

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFU İLE ÜRETİLEN ALKALI
AKTİVASYONLU HARÇLARIN TAZE HARÇ
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hilal ASLAN

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

HAZİRAN 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

**ELAZIĞ FERROKROM CÜRUFU İLE ÜRETİLEN ALKALİ
AKTİVASYONLU HARÇLARIN TAZE HARÇ ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Hilal ASLAN

Danışman
Prof. Dr. Servet YILDIZ

HAZİRAN 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Elazığ Ferrokrom Cürufu İle Üretilen Alkali Aktivasyonlu Harçların Taze Harç Özelliklerinin Araştırılması
Yazarı:	Hilal ASLAN
İlk Teslim Tarihi:	18.05.2022
Savunma Tarihi:	17.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Servet YILDIZ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ömer KELEŞOĞLU Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Elazığ Ferrokrom Cürufu İle Üretilen Alkali Aktivasyonlu Harçların Taze Harç Özelliklerinin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

17.06.2022

Hilal ASLAN



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, malzeme temini ve tezin hazırlanması süresince her konuda bilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Servet YILDIZ'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yoğunluğuna rağmen bana zaman ayırarak her türlü tecrübesini ve bilgisini paylaşan ve her aşamada beni aydınlatan çok değerli hocam Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen bölümümüz laboratuvar teknisyeni Mehmet TEMİZER'e teşekkür ederim.

Ekton Lojistik, Sivas Kangal Termik Santrali, Sika Yapı Kimyasalları, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Eti Krom A.Ş. ve Vessam Prefabrik yetkililerine malzeme teminine sağlamış oldukları destekten ötürü teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Şevval BALOĞULLARI'na ve Oğuzhan TAŞTİMUR'a teşekkür ederim.

Son olarak, tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi her konuda, her zaman bana destek olan, başarılarımla gurur duyan BABAMA ve çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen, başarımlarım ve mutluluğum için her türlü fedakârlığı yapan, dualarını hiçbir zaman esirgemeyen ANNEME sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dilerim.

Hilal ASLAN
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu.....	1
1.2. Uçucu Kül.....	2
1.2.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	3
1.2.2. Uçucu Küllerin Özellikleri	4
1.2.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları	5
1.3. Alkali Aktivatörler.....	5
1.4. Boraks.....	6
1.5. Süperakışkanlaştırıcı.....	7
1.6. Taguchi Metodu.....	7
1.6.1. Taguchi Sinyal/Gürültü Oranları	8
1.7. Literatür Özeti	8
2. MATERYAL VE METOD	18
2.1. Materyal.....	18
2.1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu	18
2.1.2. F Sınıfı Uçucu Kül	19
2.1.3. Alkali Aktivatör	19
2.1.4. Boraks	20
2.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	21
2.1.6. Agrega	21
2.2. Metod.....	22
2.2.1. Harçların Karışım Oranlarının Belirlenmesi	22
2.2.2. Harç Numunelerinin Hazırlanması	23
2.3. Alkali Aktivasyonlu Harçlar Üzerinde Yapılan Deneyler	25
2.3.1. İşlenebilirlik Deneyi	25
2.3.2. Priz Sürelerinin Belirlenmesi	26
2.3.3. Basınç Dayanımı Deneyi.....	27
2.3.4. Eğilme Dayanımı Deneyi	27
2.3.5. Birim Ağırlık Deneyi	28
2.3.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	28
2.3.7. Kapiler Su Emme Katsayı Tayini.....	29
2.3.8. SEM - EDS Analizi	30
2.3.9. XRD Analizi.....	30
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	31
3.1. Karışımların Taze Haldeki Özelliklerinin Belirlenmesi	31

3.1.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları.....	31
3.1.2. Priz Süresi Tayini Sonuçları.....	38
3.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özelliklerinin Belirlenmesi	47
3.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	47
3.2.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	58
3.2.3. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	68
3.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları	77
3.2.5. Kapiler Su Emme Katsayı Tayini Deney Sonuçları	88
3.2.6. SEM – EDS Analiz Sonuçları	102
3.2.7. XRD Analiz Sonuçları	108
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	111
ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Elazığ Ferrookrom Cürufu İle Üretilen Alkali Aktivasyonlu Harçların Taze Harç Özelliklerinin Araştırılması

Hilal ASLAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Haziran 2022, Sayfa: xv + 117

Bu tez çalışmasında; alkali aktivasyonlu cüruf bağlayıcıların uygulamalardaki kullanımına engel teşkil eden hızlı işlenebilirlik kaybı ve düşük priz süreleri problemlerinin çözümü için boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı incelenmiştir. Alkali aktive edilmiş harç üretimi için ağırlıkça %90, %80 ve %70 oranında Elazığ ferrookrom cürufu ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak katı fazda sodyum hidroksit (NaOH) (18 ve 22 molarite) ile sıvı fazda sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltisi kullanılmıştır. NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 1/2 sabit değerinde tutulmuştur. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 alınmıştır. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları ağırlıkça %0, %3 ve %6 oranlarında tercih edilmiştir. Seçilen parametreler ve seviyeleri Taguchi metoduyla optimize edilerek en iyi karışım oranları belirlenmiştir. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkılarının alkali aktivasyonlu harç üzerindeki etkisini incelemek amacıyla taze haldeki karışımlarda priz başlangıç ve sona erme süreleri ile işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen alkali aktivasyonlu harç numunelerine 90°C sıcaklıkta 24 saat kür işlemi uygulanarak 7 ve 28 günlük süre sonunda numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve kapilarite katsayı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Taguchi metoduyla analiz edilmiş ve parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca mikro yapı incelemeleri için SEM-EDS-XRD analizleri uygulanarak belirlenen numunelerin kristal yapısı incelenmiş, mineralojik bileşimi tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkılarının alkali aktivasyonlu karışımlar üzerinde priz geciktirici etkisinin olduğu ve işlenebilirlik üzerinde olumlu katkılar sağladığı tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri ise 24,27 MPa olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali Aktive Edilmiş Harç, Elazığ Ferrookrom Cürufu, Boraks, Süperakışkanlaştırıcı, Taguchi Metodu

ABSTRACT

Investigation of Fresh Mortar Properties of Alkali Activated Mortars Produced with Elazığ Ferrochrome Slag

Hilal ASLAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Technologies

June 2022, Pages: xv + 117

In this thesis study; the use of borax and superplasticizer additives has been investigated to solve the problems of rapid workability loss and low setting times, which hinder the use of alkali-activated slag binders in applications. For the production of alkali activated mortar, 90%, 80%, 70% by weight Elazığ ferrochrome slag and 10%, 20% and 30% by weight class F fly ash were used. Solid phase sodium hydroxide (NaOH) (18 and 22 molarity) and liquid phase sodium silicate solution (Na_2SiO_3) were used as alkali activators. The ratio of NaOH/ Na_2SiO_3 was kept at a constant value of 1/2. Activator/binder ratios of 0.35, 0.40 and 0.45 were taken. The additives were preferred at 0%, 3% and 6% by weight. The selected parameters and their levels were optimized by the Taguchi method and the best mixing ratios were determined. On fresh mixtures setting times and workability tests were performed. The produced alkali-activated mortar samples were cured at 90°C for 24 hours and at the end of 7 and 28 days, compressive strength, bending strength, unit weight, ultrasound transmission rate and capillarity tests were carried out. Obtained test results were analysed by Taguchi method and optimum parameter levels were determined. The crystal structure of the samples determined by applying SEM-EDS-XRD analyses for microstructure investigations. According to the data obtained, it has been determined that borax and superplasticizer additives have a setting retarding effect on alkali-activated mixtures and provide positive contributions on workability. The highest compressive strength value was obtained as 24.27 MPa.

Keywords: Alkali Activated Mortar, Ferrochrome Slag, Borax, Superplasticizer, Taguchi Method

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sugözü Enerji Santrali.....	3
Şekil 2.1. Elazığ Ferrookrom Cürufu	18
Şekil 2.2. F Sınıfı Uçucu Kül	19
Şekil 2.3. Sodyum Silikat, Sodyum Hidroksit ve NaOH Çözeltisi.....	20
Şekil 2.4. Boraks	20
Şekil 2.5. ViscoCrete SF-18 Süper Akışkanlaştırıcı.....	21
Şekil 2.6. Agregat	21
Şekil 2.7. 5x5x5 cm küp ve 4x4x16 cm kiriş kalıbı	23
Şekil 2.8. Agregat ve bağlayıcı malzemelerin hobart mikserinde kuru karışımı	24
Şekil 2.9. Kalıptan çıkarılan ve laboratuvar ortamında bekletilen numuneler.....	25
Şekil 2.10. Yayılma tablası deneyi	25
Şekil 2.11. Vicat aleti ile priz başlangıç ve priz sona erme sürelerinin belirlenmesi	26
Şekil 2.12. Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği	27
Şekil 2.13. Arşimet terazisi	28
Şekil 2.14. Kılcal su geçirimsizliği deney düzeneği [55]	29
Şekil 2.15. SEM cihazı	30
Şekil 3.1. 18 molaritede alkali aktive edilmiş harçların yayılma değerleri.....	31
Şekil 3.2. 22 molaritede alkali aktive edilmiş harçların yayılma değerleri.....	32
Şekil 3.3. Parametre seviyelerine göre yayılma değerleri	34
Şekil 3.4. Parametre seviyelerine göre yayılma değerinin S/N oranları	35
Şekil 3.5. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim	37
Şekil 3.6. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim	37
Şekil 3.7. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim	37
Şekil 3.8. Bağlayıcı hamurların priz başlangıç ve priz bitiş süreleri	39
Şekil 3.9. Parametre seviyelerine göre priz başlangıç süresinin S/N oranları	41
Şekil 3.10. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim	42
Şekil 3.11. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim	42
Şekil 3.12. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim	43
Şekil 3.14. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre sona erme süresindeki değişim	46
Şekil 3.15. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre priz sona erme süresindeki değişim.....	46
Şekil 3.16. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre priz sona erme süresindeki değişim.....	46

Şekil 3.17. Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri.....	48
Şekil 3.18. Parametre seviyelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerleri	49
Şekil 3.19. Parametre seviyelerine göre 7 günlük basınç dayanımının S/N oranları	50
Şekil 3.20. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim.....	52
Şekil 3.21. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim.....	52
Şekil 3.22. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim.....	53
Şekil 3.23. Parametre seviyelerine göre 28 günlük basınç dayanım değerleri.....	54
Şekil 3.24. Parametre seviyelerine göre 28 günlük basınç dayanımının S/N oranları	55
Şekil 3.25. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim.....	56
Şekil 3.26. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim	57
Şekil 3.27. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim	57
Şekil 3.28. Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri	59
Şekil 3.29. Parametre seviyelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerleri	60
Şekil 3.30. Parametre seviyelerine göre 7 günlük eğilme dayanımının S/N oranları	61
Şekil 3.31. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	62
Şekil 3.32. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	62
Şekil 3.33. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	63
Şekil 3.34. Parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerleri	64
Şekil 3.35. Parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanımının S/N oranları	65
Şekil 3.36. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	66
Şekil 3.37. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	66
Şekil 3.38. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim.....	67
Şekil 3.39. Alkali Aktive Edilmiş Harç Numunelerinin 7 ve 28 Günlük Birim Ağırlık Değerleri.....	69
Şekil 3.40. Parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerleri	70
Şekil 3.41. Parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerinin S/N oranları	71
Şekil 3.42. Molarite ve boraks parametrelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim	72
Şekil 3.43. Boraks ve süperskişkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük değerlerdeki değişim	72

Şekil 3.44. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim.....	73
Şekil 3.45. Parametre seviyelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerleri	74
Şekil 3.46. Parametre seviyelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerinin S/N oranları	74
Şekil 3.47. Molarite ve boraks parametrelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim	76
Şekil 3.48. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim.....	76
Şekil 3.49. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim.....	77
Şekil 3.50. Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri	78
Şekil 3.51. Parametre seviyelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri	80
Şekil 3.52. Parametre seviyelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin S/N oranları.....	80
Şekil 3.53. Boraks ve F sınıfı uçucu kül parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	82
Şekil 3.54. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	82
Şekil 3.55. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	83
Şekil 3.56. Parametre seviyelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri	84
Şekil 3.57. Parametre seviyelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin S/N oranları.....	85
Şekil 3.58. Boraks ve F sınıfı uçucu kül parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	86
Şekil 3.59. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	87
Şekil 3.60. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.....	87
Şekil 3.61. N1- 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları.....	89
Şekil 3.62. N2- 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları.....	89
Şekil 3.63. 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri	91
Şekil 3.64. 7 günlük birincil kapilarite katsayıları S/N oranları	91
Şekil 3.65. 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri	94
Şekil 3.66. 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri S/N oranları.....	94
Şekil 3.67. N1- 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları.....	96
Şekil 3.68. N2- 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları.....	97
Şekil 3.69. 28 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri.....	98
Şekil 3.70. 28 günlük birincil kapilarite katsayıları S/N oranları	98
Şekil 3.71. 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri	101

Şekil 3.72. 28 günlük ikincil kapilarite katsayıları S/N oranları.....	101
Şekil 3.73. N8 serisinin SEM görüntüleri.....	103
Şekil 3.74. N8 serisinin EDS Analiz Sonuçları	104
Şekil 3.75. N11 serisinin SEM görüntüleri.....	105
Şekil 3.76. N11 serisinin EDS Analiz Sonuçları	106
Şekil 3.77. N15 serisinin SEM görüntüleri.....	107
Şekil 3.78. N15 serisinin EDS Analiz Sonuçları	108
Şekil 3.79. N8 numunesine ait XRD difraktogramı	109
Şekil 3.80. N11 numunesine ait XRD difraktogramı	109
Şekil 3.81. N15 numunesine ait XRD difraktogramı	110



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Elazığ Ferrokrom Cürufunun Kimyasal Özellikleri.....	18
Tablo 2.2. F Sınıfı Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.....	19
Tablo 2.3. NaOH ve Na ₂ SiO ₃ 'ün Özellikleri	20
Tablo 2.4. Deney parametreleri ve seviyeleri	22
Tablo 2.5. Harç Numunelerin Karışım Oranları	22
Tablo 3.1. Harç karışımlarının yayılma değerleri	32
Tablo 3. 2. Yayılma değerleri ve S/N oranları	33
Tablo 3.3. İlk (0. dakika) yayılma değerleri için varyans analizi sonuçları	36
Tablo 3.4. Bağlayıcı hamurların priz başlangıç ve priz sona erme süreleri	39
Tablo 3.5. Priz başlangıç süresi ve S/N oranları	40
Tablo 3.6. Priz başlangıç süresi için varyans analizi sonuçları	41
Tablo 3.7. Priz sona erme süresi ve S/N oranları	44
Tablo 3.8. Priz sona erme süresi için varyans analizi sonuçları	45
Tablo 3.9. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri.....	48
Tablo 3.10. 7 günlük basınç dayanım değerleri ve S/N oranları	50
Tablo 3.11. 7 günlük basınç dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları	51
Tablo 3.12. 28 günlük basınç dayanım değerleri ve S/N oranları	54
Tablo 3.13. 28 günlük basınç dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları	56
Tablo 3.14. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri	58
Tablo 3.15. 7 günlük eğilme dayanım değerleri ve S/N oranları	60
Tablo 3.16. 7 günlük eğilme dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları	61
Tablo 3.17. 28 günlük eğilme dayanım değerleri ve S/N oranları	64
Tablo 3.18. 28 günlük eğilme dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları	65
Tablo 3.19. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük birim ağırlık değerleri	68
Tablo 3.20. 7 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları	70
Tablo 3.21. 7 günlük birim ağırlık değerleri için varyans analizi sonuçları	71
Tablo 3.22. 28 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları	75
Tablo 3.23. 28 günlük birim ağırlık değerleri için varyans analizi sonuçları	75
Tablo 3.24. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri	78
Tablo 3.25. 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ve S/N oranları	79
Tablo 3.26. 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri için varyans analizi sonuçları	81

Tablo 3.27. 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ve S/N oranları.....	84
Tablo 3.28. 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri için varyans analizi sonuçları	86
Tablo 3.29. Harç karışımının 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri.....	88
Tablo 3.30. 7 Günlük birincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları	90
Tablo 3.31. Harç karışımının 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları.....	92
Tablo 3.33. Harç karışımının 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları.....	95
Tablo 3.34. Harç karışımının 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri.....	96
Tablo 3.36. Harç karışımının 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları.....	99
Tablo 3.37. 28 Günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları.....	100
Tablo 3.38. Harç karışımının 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları.....	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	: Eğilme dayanımı
W _{kuru}	: Numunelerin kuru birim hacim ağırlığı (g)
W _{doygun}	: Numunelerin doygun birim hacim ağırlığı(g)
W _{suda}	: Numunelerin su içerisindeki birim hacim ağırlıkları
L	: Mesnetler arası uzaklık
P	: Numunenin kırıldığı anda etki eden kuvvet (N)
k	: Kapilarite katsayısı
Q	: Numunenin emdiği su miktarı

Kısaltmalar

SiO ₂	: Silisyum Dioksit
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	: Disodyum tetraborat dekahidrat, Boraks
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
EFC	: Elazığ Ferrokrom Cürufu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
XRD	: X-ışını Difraktometresi
MgO	: Magnezyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit, sönmemiş kireç
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
Cr ₂ O ₃	: Krom Oksit
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül
μ s	: Mikro Saniye
mm	: Milimetre
°C	: Santigrat
cm	: Santimetre
g	: Gram
Kg	: Kilogram
W	: Ağırlık
N	: Kırılma Yüğü
MPa	: Megapascal
kN	: Kilonewton

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme Portland çimentosudur ve dünyada toplam CO₂ yayılımının %7'sinden fazlasının çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Çimento üretimi, gerek üretiminde kullanılan ham maddeler, gerekse üretimi esnasında açığa çıkan gazlar nedeniyle doğal yapıya zarar vermekte ve çevreyi kirletmektedir.

Yapı malzemelerinin sebep olduğu teknik, ekonomik ve çevresel problemler, Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı madde üretimini ilgi çekici hale getirmektedir. Çimento ilave etmeksizin, kimyasal aktivatör ve cüruf kullanmak suretiyle elde edilen alkali ile aktive edilmiş cürufli bağlayıcılar, sahip oldukları özellikler göz önüne alındığında, Portland çimentosuna alternatif modern bir bağlayıcı malzeme tipi olarak görülmektedir [1].

Alkali aktivasyonlu cüruf bağlayıcılar karıştırma sonrasında çok hızlı sertleşen ve ani priz alan kompozitlerdir ve özellikle kalıba yerleştirme ve yüzey işlemi aşamasında sıkıntılar oluşturarak uygulamalardaki kullanımına engel teşkil etmektedir. Bu çalışmanın amacı Elazığ Ferrokrom cürufu ve uçucu kül kullanarak alkali aktivasyonlu harçlar üretmek ve üretilen bu harçların taze harç özelliklerini belirleyerek işlenebilirlik sürelerini arttırmaktır.

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda Elazığ ferrokrom cürufu, F sınıfı uçucu kül, boraks ve süperakışkanlaştırıcı kullanarak işlenebilirliği ve basınç dayanımı yüksek olan alkali aktivasyonlu harçların taze harç özelliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Taguchi metoduyla belirlenen karışım oranları, daha az deney sayısı ile daha kapsamlı sonuçlar elde ederek zaman ve malzeme tasarrufu sağlayacaktır.

Böylece atık olarak meydana çıkan ve önemli çevre sorunları haline gelen ferrokrom cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların inşaat sektöründe yeniden kullanımı ve geri dönüşümü, hava kirliliğinin azaltılması ve enerji tasarrufu bu tez çalışmasıyla sağlanacaktır. Yöresel bir atık olan Elazığ ferrokrom cürufunun değerlendirilmesi çalışmanın özgün değerini artıracaktır.

1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu

Isıya karşı dirençli ve genellikle paslanmaz bir metal bileşiği olan ferrokrom, çelik üretiminde kullanılmaktadır. Silikoferrokrom ve ferrokrom cürufu, ferrokrom üretiminin yapıldığı tesislerde elektrik-ark fırınlarından üretim sonucu oluşan atık malzemelerdir. Bu iki atık malzemenin üretimi sırasında bir miktar silisyum oksit ile indirgenmeyen oksitler, metal yüzeyinde sıvı halde olan bir cüruf tabakası meydana getirir. Bu sıvı haldeki cüruf ise kalıplara dökülerek alınır [2].

Cürufların soğutulma şekilleri farklı olduğu için sahip oldukları özellikler de farklıdır. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olurlar. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik gösterir ve çoğunlukla agrega olarak kullanılır. Yüksek fırından çıktığında eriyik halinde olan cüruf hızlı olarak soğutulduğu takdirde ise akışkanlığındaki ani azalma kristalleşmeyi engeller ve camsı yapıda bir katı madde elde edilmesini sağlar. Bu yarı-kararlı camsı malzeme, bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Bu tür cüruflar daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılır [3].

Türkiye’de iki yerde endüstriyel boyutta ferrokrom cürufu çıkmaktadır. Bunlardan birisi Antalya Ferrokrom İşletmesi, diğeri ise Elazığ Ferrokrom İşletmesidir. Çıkan cürufların hemen hemen tamamı stok alanlarında depolanmakta olup günümüze kadar bu cürufların ciddi anlamda değerlendirilmesi söz konusu olmamıştır [4]. Antalya’daki ferrokrom cürufları, havada yavaş soğumaya bırakıldığı için kristal yapılıdır ve aktif değildir. Bu cüruf türü “Havada soğutulmuş elektrik ark fırını cürufu” (EAF cürufu) olarak adlandırılmaktadır ve çoğunlukla agrega olarak kullanıma uygundur [2].

Bu çalışmada kullanılan cüruf Elazığ ferrokrom cürufu olup bu cüruf ark fırınlarında ısıtım işlemi uygulanmış bir cüruftur. Bu cüruf demir-çelik santrallerinde üretilen yüksek fırın cürufunun oluşumuyla benzer özellik gösterir. Kullanım alanı incelendiğinde uçucu kül ile benzer alanlarda kullanılmaktadır [5].

Elazığ ferrokrom fabrikası, Elazığ-Bingöl karayolu üzerinde Elazığ’dan yaklaşık 60 km uzaklıkta olup Elazığ Kovancılar ilçesi yakınında bulunmaktadır. Hammadde olarak kullanılan maddeler, %42-47 Cr_2O_3 içeren parça kromit cevheri (25-125 mm) yanında, Cr_2O_3 içeriği düşük cevherlerin zenginleştirilmesi ile kazanılan Kef ve Sori Kromit (0-1 mm) konsantreleridir. Yardımcı maddeler ise, metalurjik kok (5-25 mm), kuvarsit (5-75 mm), boksit (5-75 mm) ve soderberg elektrot pastasıdır. Küçük tane boyulu kromit konsantresi beslemesi, kullanılan ark-direnç fırınları teknolojisinde gaz geçirgenliğini azalttığı için sınırlıdır. Fırın içinde ve potalarda, yüksek sıcaklıklarda (1700-1800°C) cürufun iyi erime ve akışkanlık özelliklerine sahip olması için belirli kimyasal bileşimi istenir [6].

1.2. Uçucu Kül

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir. Bu işlem esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir [7].

Uçucu küller beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. Pozolanik özellikleri de olduğundan çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Böylece daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar [8].

Uçucu küllerin çimento ve beton içerisinde kullanımının yanı sıra alkalilerle aktive edilerek de kullanımı mümkün olabilmektedir. Uçucu kül kullanarak alkali aktivasyonu sonucu üretilen harç ve betonların, geleneksel çimento ile üretilmiş betonlara göre kuruma büzülmesi değerleri oldukça düşük, donatı ile aderans yapma özellikleri ve çevresel etkilere dayanıklılıkları oldukça yüksektir. Geopolimerlerin önemli avantajlarından birisi de kısa zamanda dayanım kazanmaları, dış etkilere karşı dayanıklı olması, düşük ısı iletkenliği ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmalarıdır. Uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu sonucu elde edilen harçlar çimento harçlarına göre daha hafif ve daha dayanıklıdır [9].

Yapılan ön deneylerde F ve C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır, ancak C sınıfı uçucu kül ile üretilen harçların işlenebilirliği ve kalitesi düşük, ayrıca basınç dayanım değerleri az olduğundan F sınıfı uçucu kül ile çalışmalara devam edilmiştir. F sınıfı uçucu kül Adana Sugözü Termik santralinden temin edilmiş olup Şekil 1.1’de Sugözü termik santrali gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Sugözü Enerji Santrali [10]

1.2.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Uçucu Kül, yapay puzolan sınıfına giren atık bir malzemedir. Uçucu küllerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri ya hiç yoktur ya da çok azdır. Pozolanik özellik gösterdikleri için nemin varlığında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile kimyasal reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturur ve bağlayıcı özellik kazanırlar. Bu nedenle puzolanik ve

bağlayıcılık özelliklerini kimyasal ve mineralojik yapısı doğrudan etkiler. İçerisinde yer alan bileşenlere bağlı olarak çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır.

ASTM C618'e göre de uçucu küller iki geniş kategoriye ayrılmaktadır.

a) F Sınıfı Uçucu Küller bitümlü kömürlerden elde edilip $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ şartını sağlayan küllerdir,

b) C Sınıfı Küller ise genelde linyit ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ şartını sağlayan küllerdir [11].

Diğer bir sınıflandırma, TS EN 197-1'e göre yapılmakta; silisli ve kalkerli uçucu kül olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır [12]. Buna göre;

V (Silissi) Uçucu Kül; Reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren, reaktif kireç (CaO) oranının $\%10$ 'dan az, reaktif silis (SiO_2) miktarının $\%25$ 'den fazla olan küllerdir.

W (Kalkersi) Uçucu Kül; Reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenlerden oluşan, reaktif kireç (CaO) oranı $\%10$ 'dan fazla, reaktif silis miktarı da $\%25$ 'ten fazla olan küllerdir.

1.2.2. Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu külün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genellikle gri renktedir ve rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah rengi veren, içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir.

Uçucu kül, $\% 60-90$ camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir. Tane yapıları ise yuvarlak olup çimento inceliğine yakın incelik değerlerindedir. Bu nedenle ayrı bir öğütmeye ihtiyaç duymadan kullanılabilme yapısına sahiptir. Küllerin tanecik şekil ve büyüklüğü, uçucu kül tipi ve bacalardan toplama sistemine göre farklılık gösterebilmektedir. Camsı küresel tanecikler içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük küme içinde küçük küreler kümesi (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklu yapılar, yüzey tabakası kristal ile kaplanmış tabakalar, deforme olmuş yapılar ve yüzeyde şekilsiz birikmiş yapılarda bulunabilirler.

Uçucu küllerin çapları, $1-200 \mu\text{m}$ arasında değişir. Taneciklerin yaklaşık $\%75$ 'inin çapı $45 \mu\text{m}$ 'den, $\%50$ 'den çoğu ise $20 \mu\text{m}$ 'den daha küçüktür. Yoğunluğu, $2.2-2.7 \text{ g/cm}^3$ (ortalama 2.40 g/cm^3) civarındadır. Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. İnceliğe etki eden ikinci faktör, termik santrallerde küllerin toplanma yöntemine bağlıdır. Elektrostatik yöntemlerle tutulan küller beton ve çimento üretiminde kullanıma daha uygundur. Küllerin blaine özgül yüzeyleri genellikle $1800-5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişmekle birlikte, ortalama

2800 -3800 cm²/gr dolayındadır. Ama en pratik yöntem 45 mikron eleğin üstünde kalan kül yüzdesinin tayin edilmesidir [13].

Uçucu küllerin kimyasal özelliği yakılan kömürün cinsine, jeolojik kökenine, yanma, toplama şartlarına bağlı olarak oluşur. Uçucu küllerde başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, diğer bileşenler SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Bunlara ek olarak yanmamış karbon, mangan, berilyum, fosfor ve molibden eser miktarlarda bulunabilmektedir. Temel oksitler olan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO miktarları külün silissi veya kalkersi olarak sınıflandırılmasına temel teşkil etmektedir. Uçucu külde SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 ve CaO %1-40 arasında değişen oranlarda yer almaktadır. Uçucu külün özelliklerini etkileyen en önemli bileşenler silisyum dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) kütlesi %70'den az olmamalıdır. Bu yönüyle ASTM ile TS benzerlik göstermektedir [14].

1.2.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu Kül İnşaat Sektöründe;

- a) Çimento içerisinde katkı, hammadde veya ikame malzemesi olarak
- b) Agregat içerisinde ince agreganın bir kısmının yerine
- c) Beton içerisinde mineral katkı olarak
- d) Tuğla üretiminde katkı malzemesi ve kerpiç yapımında bağlayıcı olarak
- e) Yapı malzemesi olarak panel, duvar, gaz beton, beton boru, harç yapımında
- f) Baraj inşaatlarında hidratasyon ısısı problemine katkı sağlaması için
- g) Otoyol, nükleer santral yapımında
- h) Geoteknik uygulamalarda zemini güçlendirebilmek için
- i) Geopolimer harç ve beton üretiminde aktivatörler ile bağlayıcı olarak kullanılabilir

1.3. Alkali Aktivatörler

Alkali aktive edilmiş harçlar bağlayıcı malzemelerin aktivasyonunu sağlayan alkali aktivatörlerden meydana gelmektedir. Bu harçlarda bağlayıcı olarak genellikle ferrokrom cürufu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, volkanik tuf, metakaolin, silis dumanı kullanılırken aktivatör olarak alkali tuzlar ve kostik alkaliler kullanılmaktadır [15].

Genel olarak alkalilerle aktive edilmiş çimento ve betonlarda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfat, potasyum sülfat, kireç ve bunların kombinasyonu kullanılmaktadır. En etkili ve en yaygın olarak kullanılan aktivatör sodyum silikattır [5].

2010 yılında alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların özellikleri üzerinde çalışma yapan Aslan Yakupoğlu'nun yüksek lisans tezi detaylı bir şekilde incelenerek bu tez çalışması için en uygun alkali aktivatör seçimine gidilmiştir. Bu çalışmada granüle yüksek fırın cürufu; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum meta silikat ve sodyum silikat ile aktive edilerek çimentosuz geopolimer harçlar üretilmiştir. Sodyum karbonat ile aktive edilen cürufllu harçların işlenebilirliklerinin azaldığı, su emme ve boşluk oranlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diğer alkali ile aktive edilen harçlarla kıyaslandığında en düşük eğilme dayanımı ve basınç dayanım sonuçları elde edilmiştir [16]. Elde edilen sonuçlar ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınarak bu tez çalışmasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanımına karar verilmiştir.

Sodyum silikat, genel formülü $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. En çok bilineni Na_2SiO_3 olan sodyum metasilikat' tır. Bunlar dışında su camı, sıvı cam, cam suyu olarak da bilinen bu malzemeler, sulu çözelti içinde veya bir katı içinde kullanılabilir. Saf bileşimler renksiz ya da beyaz renktedir ve genelde çimentolarda, pasif yangın korumada, tekstilde, kereste işlemede, refrakter malzemelerde, otomobillerde ve diğer çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Sodyum hidroksit ise, beyaz renkte olup nem çekici özelliği bulunan bir maddedir. NaOH formülüyle gösterilir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. İnsan dokusuna kaşıntıverici bir etkisi vardır. Sodyum hidroksit (kostik soda), endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır [17].

1.4. Boraks

Bor elementi doğada serbest halde bulunmaz ve çeşitli metal veya ametal elementlerle bileşikler oluşturarak farklı özellikler gösterir. Bu sayede birçok bor bileşiği, endüstrinin farklı dallarında kullanılmaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır. Saf bor ise karbon gibi elektrik iletkeni özelliği taşımaktadır. Kristalize bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Borun saf elementi; ilk kez 1808 yılında Fransız kimyager J.L. Gay – Lussac ve Baron L.J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından elde edilmiştir [18].

Dünyada ham madde kaynaklarının hızla tükenmesi ve sanayinin birçok dalında kullanması sebebiyle borun, her geçen gün önemi artmaktadır. Dünyadaki en yüksek bor rezervine sahip olan Türkiye'yi Rusya, Güney Amerika ve Amerika Birleşik Devletleri takip etmektedir [18].

Bor ürünleri, hafiflik, gerilmeye, ısıya ve kimyasal etkilere dayanıklılıklarıyla cam laboratuvar gereçlerinin üretiminde, tarımda, nükleer enerji santrallerinde, sert çelik üretiminde, emaye ve porselen sırlarının elde edilmesinde, ilaç, kimya ve kozmetik sanayiinde, fotoğrafçılıkta, boya, dericilik ve çimento sanayiinde kullanılmaktadır. Sertleşmiş plastik formunda otomotiv

sanayiinde, fiber optik olarak haberleşmede, deterjan sanayiinde, jet motoru parçalarının üretiminde, elektrik ve ısı izolasyonlarında, mikro dalga lambalarında, lazer ile savaş teknolojisinde, nükleer füzyonda ve ayrıca yakıt olarak savaş jetlerinde ve uzay teknolojisinde kullanılması nedeniyle büyük bir stratejik öneme sahiptir [19]. Ülkemizde ise ancak cam ve çok az miktarda deterjan sanayilerinde değerlendirilirken, ABD’de en fazla kullanım izolasyon fiberlerinde, Avrupa’da deterjan sanayiinde, Japonya’ da ise tekstil fiberlerindedir [20].

Dünya bor rezervlerinin %73’üne sahip olan Türkiye’de bilinen bor yatakları; Eskişehir – Kırka, Kütahya – Emet, Balıkesir – Bigadiç, Bursa – Kestelek’te bulunmaktadır [18].

2019 yılında Muhammed Riaz Ahmad ve arkadaşları yaptığı çalışmada; oda sıcaklığında kürlenmiş alkali aktive edilmiş harçların işlenebilirliğini iyileştirmek ve yüksek basınç dayanımı elde etmek amacıyla farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı ve priz geciktirici katkıları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan katkılar arasında boraksın, mukavemette bir bozulma olmadan bağlayıcının taze özelliklerini (işlenebilirlik ve priz süresi) en iyi şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Basınç ve eğilme dayanımı da kontrol numunesine kıyasla en iyi sonucu vermiştir [21]. Yapılan literatür taraması neticesinde; alkali aktivasyonlu harçların işlenebilirliğini iyileştirmek amacıyla boraks katkısının kullanılabilir olduğu kanısına varılmıştır ve bu tez çalışmasında belirli oranlarda boraks katkısı kullanılmıştır.

1.5. Süperakışkanlaştırıcı

Harcın özelliklerini geliştirmek üzere üretim esnasında veya döküm öncesinde düşük miktarda eklenen maddelere katkı denir ve kökenine göre kimyasal ve mineral katkı olarak ikiye ayrılır. Bu tez çalışmasında alkali aktive edilmiş harçların işlenebilirlik sorununa olumlu katkılar sağlayacağı düşünülerek kimyasal katkılardan Süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

1.6. Taguchi Metodu

Geleneksel deney tasarımında bir parametre değiştirilirken diğer tüm parametreler sabit kalır ve tasarım tüm parametreler ve seviyeleri dikkate alınarak oluşturulur. Bu sebeple faktör ve seviyeler arttıkça deney sayısı da artmaktadır ve hem zaman hem de maddi açıdan zorlukları beraberinde getirmektedir. Deneysel tasarım yaklaşımlarından biri olan Taguchi metodu tasarım performansını ve kalitesini iyileştirmek için sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır [22].

Taguchi metoduyla deney sayısı azaltılarak hedeflenen kalitede ürün elde edilir ve daha az deneme ile daha verimli sonuçlara ulaşılır. Deney sayısının azalması maliyeti de düşürür. Parametreler belirlendikten sonra deney sonuçlarının varyans analizi yapılarak parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesinde kolaylık sağlar.

1.6.1. Taguchi Sinyal/Gürültü Oranları

Taguchi deney tasarımımda elde edilen verilerin Sinyal/Gürültü (S/N) oranı hesaplanarak çalışma değerlendirilir. Taguchi tarafından tanımlanan Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı, deney tasarımımda kontrol edilen parametrelerin sonuç üzerinde etkisini minimize etmek için kullanılan ve analiz değişkeni ya da performans kriteri olarak adlandırılan bir kriterdir. Bir dizi istatistik olarak ifade edilen S/N oranı uygulamada ki çalışma sonunda ulaşılması istenen hedef türüne göre üçe ayrılmıştır [23].

En Küçük – En İyi

Kalite değişkeni ya da deney sonuç verisi olarak adlandırılan Y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda S/N oranı Denklem 1.1. kullanılarak belirlenir;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1.1)$$

En Büyük – En iyi

Kalite değişkeni ya da deney sonuç verisi olarak adlandırılan Y'nin hedef değeri sonsuzdur. Bu durumda S/N oranı Denklem 1.2. kullanılarak belirlenir;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1.2)$$

Hedef Değer – En İyi

Bu tür problemlerde belli bir hedef değer kullanılır. Kalite değişkeni ya da deney sonuç verisi olarak adlandırılan Y'nin ortalama değeri $\bar{Y}$ kullanılır ve s, standart sapma olmak üzere s^2 varyansı ifade etmektedir. S/N oranı Denklem 1.3. kullanılarak belirlenir;

$$S/N = 10 \log \frac{\bar{Y}^2}{s^2} \quad (1.3)$$

Her üç yöntemde de amaç S/N oranını maksimize etmektir. S/N oranı ne kadar büyükse hedef değer etrafındaki değişim o kadar küçüktür [24].

1.7. Literatür Özeti

Canbaz (2007) yaptığı çalışmada; deney sonuçlarının değerlendirmesi ile istenilen dayanımları sağlayan, dayanıklılık yönünden özellikle sülfat dayanıklılığını artırmada, su geçirimsizliğini azaltmada etkili, en uygun alkali türünün ve bu alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanım oranının belirlenmesini amaçlamıştır. Bu çalışma kapsamında Türkiye'de bulunan üç demir çelik fabrikasının atığı olan yüksek fırın cürufları temin edilmiş ve çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75, % 85, % 90, % 95 % 100 oranlarında kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat kullanılarak harç numuneleri

üretimiştir. Deney numuneleri 28, 56, 90 gün standart kür koşullarında tutulmuştur. Bu numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Priz süreleri ve hacim genleşmeleri belirlenmiştir. Ayrıca üretilen numuneler donma çözölme, sülfat, asit gibi zararlı ortamlarda bırakılarak dayanıklılığı belirlenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde XRD ile kimyasal analiz yapılarak ve SEM ile mikro yapı fotoğrafları çekilerek alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun, harcın içyapısına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en etkili aktivatör türünün sodyum hidroksit, sodyum karbonat olduğu görölümüştür. Deney sonuçlarına bağlı olarak en uygun karışımı ve en uygun aktivatör türünü belirlemek için yapılan değerlendirme sonuçları incelendiğinde $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ve $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ kombinasyonlarının en uygun aktivatör tipi olduğu ve istenen dayanımları sağlamak ve dayanıklılığı arttırmak için aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun çimento yerine % 75-100 arasında kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir [25].

Topçu ve Canbaz (2008) yaptıkları çalışmada; çimento yerine yüksek fırın cürufunu %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında ikame etmiş, aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat ve yüksek fırın cürufunun %1'i oranında kireç kullanmıştır. Hazırlanan harç numuneleri 28 gün normal kür edildikten sonra bu numuneler tekrarlı donma-çözölme etkileri altında bırakılmış, kontrol numunelerine göre dayanım ve diğer fiziksel kayıpları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; ultrases geçiş hızı ve elastisite modölü için optimum YFC oranı %75 olurken, en uygun aktivatör kombinasyonunun ultrases geçiş hızı için $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ve elastisite modölü için Na_2SiO_3 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Donma çözölme etkisindeki basınç dayanımına bakıldığında ise, en uygun aktivatör kombinasyonu %100 YFC oranında $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ olmuştur. Sonuç olarak, donma çözölme dayanıklılığını arttırmada YFC kullanım miktarını arttırmak için aktivasyonda kullanılan alkali türünün oldukça önemli olduğu görölümüştür. Çalışmanın sonunda, $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ kombinasyonunun harç yapımında kullanılması önerilmiştir. Yapılan literatür taraması neticesinde; bu tez çalışmasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanımına karar verilmiştir [26].

Aydın (2010) yaptığı çalışma kapsamında, amorf karakterli bir malzeme olan yüksek fırın cürufunu sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive ederek yüksek performanslı bağlayıcı üretilmesini amaçlamıştır. İlk aşamada, farklı kür koşulları altında (standart su, buhar ve otoklav kürü) en uygun aktivatör çözeltisi (Ms oranı ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ve Na_2O içeriği bakımından) araştırılmıştır. Karışım özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak yüksek fırın cürufu yerine, belirli oranlarda uçucu kül, silis dumanı, meta kaolin, alçı ve bazı kimyasal katkıların (hava sürükleyici, büzölme önleyici ve köpük önleyici) kullanım olanakları araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre, yüksek fırın cürufu yerine %30 silis dumanı ikamesi basınç dayanımı bakımından, %20 silis dumanı ikamesi ise, tokluk ve eğilme dayanımı bakımından en olumlu sonuçları vermiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufu yerine %20 silis dumanı ikamesi, herhangi bir akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

kullanılmadan su/bağlayıcı oranının 0,18 gibi çok düşük bir düzeye düşürülmesine olanak sağlamıştır [27].

Yakupoglu (2010) alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların özellikleri üzerinde çalışma yaparak granüle yüksek fırın cürufunu; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum meta silikat ve sodyum silikat ile aktive edilerek çimentosuz geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali ile aktive edilen cürufllu harçların kıvam, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımları, aşınma direnci ve yangın direnci özellikleri incelenmiştir. En yüksek aşınma direnci sodyum silikat ve sodyum meta silikat ile aktive edilmiş cürufllu harçlarda gözlenmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen cürufllu harçlar Portland çimentolu kontrol ve diğer alkalilerle aktive edilen harçlara göre yangın etkisine karşı yüksek bir direnç göstermişlerdir. Sodyum karbonat ile aktive edilen cürufllu harçların işlenebilirliklerinin azaldığı, su emme ve boşluk oranlarının daha yüksek olduğu, diğer alkali ile aktive edilen harçlarla kıyaslandığında en düşük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonucunu verdiği tespit edilmiştir [16].

Rattanasak, Pankhet ve Chindaprasirt (2010) yaptıkları çalışmada; geopolimerlerin hızlı priz probleminin üstesinden gelmek için kimyasal katkıların etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak C Sınıfı Uçucu Kül ve alkali çözelti kullanılmıştır. Geopolimerin özelliklerini iyileştirmek için beton bilgilerine dayalı olarak ağırlıkça %1 ve %2 uçucu kül dozajlarında kalsiyum klorür, kalsiyum sülfat, sodyum sülfat ve sakaroz katkı maddesi ilave edilmiştir. Numunelerin priz süresi, basınç dayanımı ve hidrasyon ısısı deneyleri yapılmış ve mikro yapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kalsiyum klorür katkısının geopolimer macunun priz başlangıç ve priz sona erme sürelerini önemli ölçüde hızlandırdığını göstermiştir. Kalsiyum sülfatın hem priz başlangıç hem de priz sona erme süreleri üzerinde çok az etkisi olmuştur. Sodyum sülfat priz sona erme süresi üzerinde çok az etkiliyken priz başlangıç süresini geciktirmiştir. Sakaroz ise priz başlangıç süresi üzerinde etkili olmamış ancak priz sona erme süresini önemli ölçüde geciktirmiştir [28].

Maraş (2013) yaptığı çalışmada; Elazığ ferrokrom cürufu ile bağlayıcı özelliğe sahip bir geopolimer malzeme oluşturmayı amaçlamıştır. Bu kapsamda Elazığ ferrokrom cürufu çimento yerine kullanılarak farklı su/bağlayıcı (w/b) oranlarında (0.30, 0.35 ve 0.40) ve 3 farklı kür ortamında harç numuneler üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum meta silikat kullanılmıştır. Geopolimer hamur numunelerinde priz süresi, hidrasyon ısısı, basınç dayanımı ve sülfat dirençleri incelenmiştir. Genel olarak bu geopolimer harç numunelerin w/b oranının artmasıyla basınç dayanımları azalmıştır. En yüksek basınç dayanım değeri geopolimer beton numuneler için yaklaşık 35 MPa olarak tespit edilmiştir ve geopolimer beton numunelerin magnezyum sülfata karşı iyi direnç gösterdiği gözlenmiştir [29].

İlkentapar (2013) yaptığı tez çalışmasında; alkali ile aktive edilmiş cürufllu bağlayıcıların hızlı priz alma ve yüksek kuruma rötresi gibi problemlerinin çözümünde, kimyasal katkıların ve

kür koşullarının etkilerini araştırmıştır. Aktivasyonlu harç karışımlarının üretiminde, çimento yerine %100 oranında OYAK Adana Çimento Sanayi’nden temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmış, cürufun aktive edilmesinde ise ağırlıkça cüruf miktarına göre %4 ve %6 nakonsantrasyonlarına sahip sıvı sodyum silikat ve toz formundaki sodyum meta silikattan yararlanılmıştır. Kimyasal katkı olarak ağırlıkça bağlayıcı madde miktarına göre, %1 oranında modifiye polimer esaslı “süper akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici” ve polipropilen glikol türevi “rötre azaltıcı” kullanılmıştır. Karışımların, yayılma değerleri, başlangıç ve bitiş priz süreleri, basınç ve eğilme dayanımları, karbonatlaşma derinlikleri ve rötreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan kimyasal katkıların, cüruf lu karışımların taze haldeki özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlamalarına karşın, normal Portland çimentolu karışımlardaki kadar etkili olamadıklarını, ancak, rötre deformasyonlarının azaltılmasında yararlı olduklarını göstermiştir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının sertleşmiş haldeki özelliklerinin iyileştirilmesi açısından, kür koşullarının oldukça önemli olduğu ve sıcak kür işlemine maruz bırakıldıklarında, aktive edilmiş cüruf harçlarının erken dönem mukavemet gelişiminin, Portland çimentolu karışımlardan çok daha hızlı olduğu belirlenmiştir [1].

Kantarcı (2013) yaptığı çalışmada; Elazığ ferrokrom cürufunu çimento inceliğinde öğütterek alkalilerle (Na_2SiO_3 ile NaOH) aktive etmiş ve agrega kullanarak geopolimer beton numuneler üretmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (3, 7 ve 28 gün), bazı fiziksel özellikleri, yangın dayanımları (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C) ve mikro yapıları incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar normal Portland çimentolu beton numunelerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, EFC ve aktivatör kullanılarak üretilen dere agregalı geopolimer beton numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğu görülmüştür. Bu değer aynı kür şartları altında üretilen normal Portland çimentolu beton numunelerde elde edilen basınç dayanım değerinden (31.8 MPa) büyüktür. Yangın sonrası basınç dayanımlarında ise kontrol numunelerine göre, bütün karışımlarda 100 ve 300°C sıcaklıklarda basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. 700°C’de ise bütün beton numunelerinde minimum basınç dayanımı elde edilmiştir [30].

Jang vd (2013) yaptıkları çalışmada; alkali ile aktifleştirilen uçucu kül/cüruf macunlarının taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde iki tip süperakışkanlaştırıcı etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve F sınıfı uçucu kül sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilmiştir. Karışımlara bağlayıcının kütlece %0, %1, %2, %3 ve %4 oranında polikarboksilat esaslı ve naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcılar eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, daha yüksek cüruf içeriğinin basınç dayanımını artırdığını, ancak cüruf-bağlayıcı oranının %70 ve %100 olduğu durumlarda bünyesel rötre nedeniyle hızlı priz ve çatlağa neden olduğunu göstermiştir. Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı, hidratasyon ısısı üzerinde ihmal

edilebilir bir etkiyle prizi geciktirmiştir ve naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcıya kıyasla işlenebilirliği önemli ölçüde iyileştirmiştir [31].

Nematollahi ve Sanjayan (2014); alkali aktifleştirilmiş F sınıfı uçucu kül karışımları üzerinde naftalin, melamin ve polikarboksilat bazlı altı adet süperakışkanlaştırıcının etkisini araştırmıştır. Kütlece %1 uçucu kül dozajında kullanılan bu katkıları, taze macuna ilave edilerek alkali aktifleştirilmiş uçucu kül karışımlarının akışkanlığı herhangi bir katkı kullanılmadan hazırlanan kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, aktivatör tipinin ve süperakışkanlaştırıcı katkı türünün geopolimerin işlenebilirliği ve mukavemeti üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı sadece NaOH çözeltisi ile aktive edilen geopolimer için etkili olurken, NaOH + Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer üzerinde en etkili katkı polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı olmuştur [32].

Gao, Yu ve Brouwers (2015); alkali ile aktifleştirilmiş cüruf-uçucu kül karışımları üzerinde nano-silika etkilerini araştırmıştır. Farklı nano-silika içerikli ve cüruf/uçucu kül oranlarına sahip numunelerin taze özellikleri, içyapısı, gözenekliliği ve mukavemeti analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, nano-silika içeriği arttıkça çökme akışının önemli ölçüde azaldığını, sertleşme süresi ve izotermal kalorimetri sonuçlarına göre reaksiyon sürecinin biraz geciktiğini göstermektedir. Nano silika içeriğinin yaklaşık %2'ye kadar artırılması, basınç dayanımına fayda sağlamıştır ve gözenekliliğin azalmasına katkıda bulunmuştur. Ancak daha yüksek nano-silika içeriği, mukavemet üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir. Bu sonuçlara göre nano silikanın ek reaktif silis kaynağı ve boşluk doldurucu etki sağlayarak mikro yapıya ve mukavemete fayda sağladığı öne sürülmektedir. Ayrıca cüruf içeriği; alkali aktif geopolimer karışımlarda priz süresi, basınç dayanımı ve gözeneklilik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [33].

Xie ve Kayali (2016); uçucu kül bazlı geopolimerin işlenebilirlik sorununu çözmek için süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımının olası faydalarını araştırmıştır. Bu kapsamda naftalin bazlı ve polikarboksilat bazlı olmak üzere iki tip süperakışkanlaştırıcının işlevi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her iki tip süperakışkanlaştırıcının Portland çimento hamuru ile olan etkilerine kıyasla, geopolimer üzerinde çok daha az etkili olduğunu göstermiştir. Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı, F Sınıfı uçucu küle göre C sınıfı uçucu küle daha etkili olmuştur ve macunun akışkanlığını artırmıştır. Naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı ise her iki uçucu kül sınıfı için benzer şekilde performans göstermiştir [34].

Mahmut ve Emiroğlu (2016); Elazığ ferrokrom cürufu kullanarak NaOH ve Na₂SiO₃ ile 40°C, 65°C ve 90°C aktivasyon sıcaklığında harç üretimleri gerçekleştirmiştir. Üretilen harçlar üzerinde; priz başlangıç ve sona erme süreleri ile kıvam deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş harç numunelerinde ise her bir aktivasyon sıcaklığında 1., 2. ve 4. gün etüvde kalma süresi sonunda; birim ağırlık, ultrases, kapiler su emme ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; aktivatörün molarite değeri arttıkça karışımların yayılma değerinin ve priz süresinin

azaldığı tespit edilmiştir. Bunun aksine molaritenin artmasıyla geopolimer numunelerin basınç dayanımları artış göstermiş ve çimento kullanmaksızın 15 MPa'nın üzerinde basınç dayanım değerleri elde edilmiştir [35].

Yardımcı ve Aydın (2016) yaptıkları çalışmada; alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların ana hammaddesi olan yüksek fırın cürufu yerine uçucu kül, meta kaolin ve silis dumanı ikame etmiştir. Ayrıca aktivatörün Ms oranının ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) alkalilerle aktive edilmiş standart kürlü harçların, basınç dayanımları, statik ve düşük hızlı darbe yüklemeleri altındaki eğilme performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, yüksek fırın cürufu yerine meta kaolin ikamesinin mekanik özellikleri olumsuz yönde, silis dumanı ikamesinin ise olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ms oranındaki artış, meta kaolin ikamesi ile üretilen harçların mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Basınç dayanımı açısından en iyi sonuçları yüksek fırın cürufuna %15 oranında meta kaolin ve silis dumanı ikame edilmiş karışımlar vermiştir. Tüm seriler ve yükleme koşulları göz önüne alındığında; en yüksek eğilme dayanımlarının yüksek fırın cürufu yerine %15 silis dumanı ikame edilmiş serilerden elde edildiği gözlenmiştir [36].

Kalkan (2017) geopolimer betonlarda Elazığ ferrokrom cürufunu bağlayıcı madde olarak kullanmıştır. 45 mikronun altında öğütülmüş EFC; sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat ile aktive edilmiş ve dere agregasıyla karıştırılarak geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin silis modülleri 1,25, 1,50 ve 1,75 seçilmiştir. Ayrıca bağlayıcı madde yerine %10 ve %20 oranında silis dumanı katılarak da numuneler hazırlanmıştır. Böylelikle toplamda 9 grup geopolimer beton numune üretilmiştir. Numunelerin farklı kür sürelerinde (24, 48, 72 ve 96 saat) ve farklı kür sıcaklıklarında (23, 40, 60, 80 ve 100°C) basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kür süreleri ve kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanım değerlerinin arttığı, ancak silis dumanı ilavesiyle numunelerin yüksek kür sıcaklıklarında fiziki yapısının bozulması nedeniyle basınç dayanım değerlerinin düştüğü numunelerde meydana gelen çatlakların büyüdüğü tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerine (20,23 MPa) %100 EFC kullanılan, silis modülü 1,25 olan, 96 saat ve 100°C'de kür edilmiş numunelerde ulaşılmıştır [37].

Özcan (2018); yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığını incelemiştir. Bu amaçla EFC yerine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında YFC katılarak 5 grup geopolimer beton üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneleri 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra %5 konsantrasyonuna sahip fosforik asit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, sodyum klorür, magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine 12 hafta boyunca maruz bırakılmıştır. Bu süreç de numunelerin basınç dayanımları, ultrasonik ses hızları (UPV), ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri ile içyapıları incelenmiştir. Deney sonuçları, aynı yaştaki kontrol numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, geopolimer betonların basınç dayanımları

açısından en fazla etkiyi sırasıyla; sülfürik asit, hidroflorik asit, hidroklorik asit, fosforik asit, sodyum sülfat, magnezyum sülfat, magnezyum klorür ve sodyum klorür çözeltileri meydana getirmiştir. Numuneler görsel olarak incelendiğinde tuz ve sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde herhangi bir bozulma görülmezken, asit çözeltilerinde ise; sülfürik asit, hidroflorik asit ve fosforik asit çözeltilerine maruz kalan numunelerin yüzeylerinde çatlaklar oluşmuş ve numune yüzeyleri bozulmuştur. Hidroklorik asit çözeltisine maruz kalan numunelerin yüzeyinde çatlak oluşmamış ancak numunelerin renginde koyulaşma olduğu görülmüştür [38].

Bingöl (2018); çimento ile çeşitli oranlarda yer değişime uğratılarak, sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sıvı sodyum silikat (cam suyu) gibi kimyasal maddelerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük dayanım ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Mekanik deneylerin uygulamasında farklı sodyum oranları ve hiperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi seçilerek, harç karışımına farklı şekillerde ilave edilmiştir. Mekanik deneyler sonucunda optimum sodyum oranları belirlenmiştir. %4, %8 ve %12 sodyum oranlı harç karışımları üretilerek 1 gün etüvde 75°C’de, 28 gün suda ve 28 gün havada kür edilerek durabilite deneyleri uygulanmıştır. Çalışma kapsamında rötre, aşınma, asit etkisi, baz etkisi, karbonatlaşma, hızlı klor geçirimsizliği, yüksek sıcaklık, ıslanma-kuruma, birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca geopolimer harçların sonuçlarını kıyaslamak amacıyla Portland çimentolu (CEM I 42.5 R) kontrol harçları üretilmiştir. Yüksek fırın cürufu geopolimer harçların kontrol harçlarına nazaran çok daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [39].

Keskinkılınç (2019) yaptığı çalışmada; beton üretiminde çimento kullanmak yerine çimento ile aynı incelikte öğütülmüş krom cürufu ve atık mermer tozu (%10, %20 ve %30 oranlarında) tercih ederek 25, 60 ve 90°C sıcaklıklarda, alkalilerle aktive edilmiş beton üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) (16, 18 ve 20 molarite değerlerinde) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri kullanılmıştır. Çalışmada aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40 olarak belirlenmiştir. Harç numuneleri için kıvam tayini ile priz başlama ve bitiş süreleri tayini deneyleri uygulanmıştır. Beton numuneler üzerinde ise her bir sıcaklık için basınç dayanımı, ultrases, kapilarite ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Çalışmada mikroyapı incelemeleri için XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karışımlarda atık mermer tozu içeriği ve molarite değeri arttıkça genel olarak priz süresinin azaldığı ve numunelerin ultrases geçiş hızlarının atık mermer tozu miktarının artmasıyla azaldığı; molarite oranının artmasıyla da arttığı tespit edilmiştir. Çimento kullanılmaksızın, Elazığ ferrokrom cürufu ve atık mermer tozu kullanılarak 16 MPa üzerinde alkali aktivasyonlu karışımlar elde edilebildiği ve molarite değerlerindeki artışla doğru orantılı bir şekilde basınç dayanımlarının artış gösterdiği sonucuna varılmıştır [40].

Oderji ve arkadaşları (2019) yaptığı çalışmada; oda sıcaklığında kürlenerek aktive edilmiş harçların işlenebilirliğini iyileştirmek ve yüksek basınç dayanımı elde etmek amacıyla farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı ve Priz geciktirici katkıları kullanmıştır. Elde edilen sonuçlara

göre; kullanılan her iki lignosülfonat esaslı karışımın, işlenebilirliği iyileştirmede ve mukavemette belirgin bir düşüşe yol açtığı için oldukça etkisiz olduğu bulunmuştur. Veriler, Boraksın mukavemette bir bozulma olmadan bağlayıcının taze özelliklerini (işlenebilirlik ve priz süresi) en iyi şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Basınç ve eğilme dayanımı da kontrol numunesine kıyasla en iyi sonucu vermiştir. Hem mukavemet hem de işlenebilirlik açısından %4 ile %6 arasında bir boraks dozajının en uygun seviyede olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, boraksın test edilen katkıları arasında en etkili katkı maddesi olduğu kabul edilmiştir [21]. Yapılan literatür taraması neticesinde; alkali aktivasyonlu harçların işlenebilirliğini iyileştirmek amacıyla boraks katkısının kullanılabilir olduğu kanısına varılmış ve bu tez çalışmasında belirli oranlarda boraks katkısı kullanılmıştır.

Alrefaei, Wang ve Dai (2019) farklı katkıların, ortam sıcaklığında kürlenerek alkali aktifleştirilmiş macunlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Naftalin, melamin ve polikarboksilat olmak üzere üç farklı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak tüm karışımlar için akışkanlık, priz süresi ve basınç dayanımı gelişimi değerlendirilmiştir. Tüm katkı türleri, alkali ile aktifleştirilen uçucu kül/cüruf macunlarının akışkanlığını önemli ölçüde iyileştirmiş ve hem priz başlangıç süresini hem de priz sona erme süresini iki kat uzatmıştır. Ayrıca polikarboksilatın yüksek su/bağlayıcı (≥ 0.36) için etkili olduğu, düşük su/bağlayıcı (≤ 0.36) durumunda naftalinin daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir [41].

Mohabbi (2020) yaptığı çalışmada; nano ve mikro ölçekli silis malzemelerin ferrokrom cüruf bazlı geopolimerler üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Alümino-silis kaynağı olarak Elazığ ferrokrom cürufu kullanılmıştır. Geopolimerleşme sürecini hızlandırmak için Nano-silis ve silis dumanı cüruf ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kullanılmıştır ve üretilen malzemelerin basınç ile çekme mukavemeti, elastisite modülü ve mikro yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, geopolimer karışıma uygun miktarda ince silis malzemesinin eklenmesiyle malzemenin yukarıda bahsedilen mekanik özelliklerinde iyileşme meydana gelmiştir. Ferrokrom cüruf yerine farklı mikro ve nano boyutlarında (15, 30 ve 45 nm) silis kullanım oranı optimum %6 olarak belirlenmiştir. Numunelerde uygun değerlerde Nano-silis kullanımı, malzemenin kimyasal bağlarında iyileşme, homojen ve daha yoğun dokuya sahip olmasını sağlamıştır ve SEM görüntülerinde bu durum açıkça görülmektedir. Basınç mukavemetinin artışının, nano-silis ve silis dumanının uygun değerlerde kullanılması sonucunda malzemenin dokusunun yoğunlaşmasından ve kimyasal bağlarının iyileşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [42].

Nabil ve arkadaşlarının (2020) yaptığı araştırma; süperakışkanlaştırıcı türünün alkali aktive edilmiş cüruf harçlarının taze ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma sunmaktadır. Farklı dozajlarda ağırlıkça % 0, % 1, % 2 ve %3 oranlarında iki farklı tipte süperakışkanlaştırıcı (sülfonatlı naftalin formaldehit ve polikarboksilat eter (SNF ve PCE)) kullanılarak 0.40, 0.50 ve 0.60 aktivatör/bağlayıcı oranına sahip alkali aktivatör çözeltisi

hazırlanmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit tercih edilmiştir. Hazırlanan macun ve harçların priz sürelerini, işlenebilirliğini ve basınç dayanımının gelişimini incelemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla aktivatör/bağlayıcı oranı ve süperakışkanlaştırıcı dozajı artırılarak taze özelliklerin iyileştirildiği bulunmuştur. Hem sülfonatlı naftalin formaldehit (SNF) hem de polikarboksilat eter (PCE) bazlı katkıların, hava ile kürlenmiş alkali aktifleştirilmiş macun ve harçların taze özelliklerini iyileştirmede etkili olduğu sonucuna varılmıştır [43].

Almakhadmeh ve Soliman (2020) yaptığı çalışmada; ilk karıştırma suyu sıcaklıklarının tek bileşenli alkali aktifleştirilmiş cüruf harçların taze ve sertleştirilmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneylerde ağırlıkça %6, %8 ve %10 cüruf olmak üzere üç farklı dozajda susuz sodyum meta- silikat toz aktivatörü kullanıldı. 0°C, 10°C, 20°C ve 30°C olmak üzere farklı karışım suyu sıcaklıklarına sahip dört grup karışım hazırlanarak tüm karışımlar için sabit bir sıvı/katı oranı 0.40 kullanıldı. Mini slump, çökme kaybı oranı, priz süresi, hidratasyon ısı, basınç dayanımı ve rötre dahil olmak üzere taze ve sertleştirilmiş özellikler araştırıldı. Sonuçlar, başlangıçtaki karıştırma suyu sıcaklığının, farklı bileşenler (yani katı aktivatör ve cüruf) için çözünürlük ve çözünme oranlarının kontrol edilmesinde baskın bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu da hidratasyon sürecini ve dolayısıyla çeşitli özelliklerin gelişimini etkiledi. Genel olarak, karışım suyu sıcaklığı ne kadar yüksekse, çökme kaybı oranı o kadar hızlı olmuştur. Örneğin, %6 aktivatör dozajında 30°C suyla karıştırılan karışımlar için yayılma çapı sadece 10 dakikada 190 mm'den 100 mm'ye düşerken, 10°C su ile karıştırılan karışımlar için yaklaşık 55 dakika sürmüştür. Aktivatör dozajlarından bağımsız olarak, karıştırma suyu sıcaklığının arttırılması, priz süresini kısaltmıştır. Sonuç olarak dayanım zarar görmeden ilk karıştırma suyu sıcaklığı düşüldükçe çökme ömrü ve priz süresinin uzadığı bulunmuştur [44].

Hajimohammadi ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada; alkali ile aktifleştirilen uçucu kül ve granüle yüksek fırın cüruf içerikli hamurların reolojik parametrelerinin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimini araştırmıştır. Farklı zaman aralıklarında akışkanlık, plastik viskozite ve akma gerilimini belirlemek için akışkanlık ve reolojik ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; alkali aktif cüruf macunların plastik viskozitesi, karıştırmanın 5 ve 45 dakika sonrasında sırasıyla 1.3–9.7 Pa s ve 3.9– 26.3 Pa s aralığında olmuştur. Ayrıca aktivatördeki $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının akma gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, macunun plastik viskozitesi üzerinde ise bu oranın oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır [45].

Zafar vd (2020); nano-silika içeren ve içermeyen metakaolin bazlı geopolimerlerde yerel kil kullanımını araştırmıştır. 30 MPa'lık bir basınç dayanımı için kontrol geopolimerleri, 0.55 Sıvı/Katı oranı, 10 M NaOH konsantrasyonu kullanılarak ve 80°C'de kürlenerek üretilmiştir. Nano silika, %1, %2, %3, %5, %7 ve %10'luk geniş bir aralıkta eklenmiştir. Hazırlanan nano-silika metakaolin bazlı geopolimerler, yoğunluk, su emme ve ilk priz sürelerine ek olarak basınç dayanımı, XRD,

XRF, FTIR, SEM, MIP, TG, UV/VIS spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, nano-silikanın geopolimer karışımlarına %5'lik optimum değere kadar dahil edilmesiyle basınç dayanımı değerinde bir artış olduğunu gösterirken, %10 nano-silika ilavesi, kontrol geopolimerine kıyasla basınç dayanımını %5 azaltmıştır. Bununla birlikte, nano-silika içeriğinin artmasıyla ilk priz süresinin önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Son olarak, bu araştırmada benimsenen yöntem, fiziksel özelliklerin, mikro yapının ve basınç dayanımının iyileştirilmesi açısından %5 nano-silikanın yerel meta kaolin bazlı geopolimer kullanımı ve üretimi için en uygun sonuç olduğunu göstermiştir [46].

Mısır (2021) yaptığı çalışmada, çimento yerine aynı incelikte öğütülmüş ferrokrom cürufu, %5, %10 ve %15 oranlarında mermer tozu ve % 0,5 oranında cam lifi kullanarak alkaliyle aktive edilen harç numuneler üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri kullanılmıştır ve NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 1/2 olarak belirlenmiştir. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 olarak alınmış ve numunelere 24 saat boyunca 90°C aktivasyon sıcaklığı uygulanmıştır. Harç numunelerine kıvam tayini, priz başlama ve bitiş süreleri tayini, basınç dayanımı, aşınma dayanımı, birim ağırlık deneyi, kapilarite deneyi, ultrases deneyi ve ayrıca 28 günlük numunelere sülfat etkisi ve donma-çözünme deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada mikro yapı incelemeleri için SEM analizlerinden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çimento kullanmaksızın, Elazığ ferrokrom cürufu ile 20 MPa üzerinde alkali aktivasyonlu karışımlar elde edildiği gözlenmiştir. Alkali aktivasyonlu harçların hızlı priz probleminin çözümü için bazı katkı malzemelerinin kullanımının uygun olacağı görüşüne varılmıştır [47].

Taşımur (2021) yaptığı çalışmada; %10, %20 ve %30 oranında F sınıfı uçucu kül ile birlikte ferrokrom cürufu içeren birincil grup karışımlar ve %10, %20 ve %30 oranlarında C sınıfı uçucu kül ile ferrokrom cürufu içeren ikincil grup karışımlar hazırlamıştır. Ayrıca eğilme dayanımı açısından olumlu sonuçlar elde etmek için tüm karışımlarda %0,5 oranında cam lifi kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak 16 molarite NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılarak aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35-0,40-0,45 ve 0,50 olan seriler hazırlanıp 90°C aktivasyon sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. F ve C sınıfı uçucu kül içeren karışımların mekanik ve durabilite özellikleri incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri için SEM ve XRD analizlerinden yararlanılmıştır. F ve C sınıfı uçucu kül içeren karışımların en uygun aktivatör oranları belirlenmiş ve F sınıfı uçucu külde 36,48 MPa, C sınıfı uçucu külde 18,65 MPa basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül içeren karışımların işlenebilirliğinin C sınıfı uçucu kül içeren karışımlardan daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiş bunun yanı sıra aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça işlenebilirlik artmıştır. Çalışmada F sınıfı uçucu kül içeren harçların Elazığ ferrokrom cürufu ile birlikte kullanımının daha olumlu sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır [5].

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

2.1.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu

Elazığ Ferrokrom işletmesinden alınan ve deneysel çalışmalarda kullanılan cüruf, Los Angeles cihazı ile TS EN 1097-2 standardına göre öğütülmüştür. Los Angeles aletinin tamburu standarda uygun olarak 31-33 devir/dakika hızda döndürülmüştür. Toz haline gelmesi istenen cüruf 300 dakika boyunca tambur ortalama 9300 tur dönerek öğütülmüştür. Öğütmeden sonra cüruf 125 mikronluk elekten elenmiştir. Elâzığ ferrokrom cürufunun yoğunluğu $2,86 \text{ g/cm}^3$ tür. Çalışmada kullanılan cürufun öğütmeden önceki hali ve Los Angeles aletinde öğütüldükten sonra 125 mikronluk elekten geçirilmiş hali Şekil 2.1.'de verilmiştir. Elâzığ ferrokrom cürufunun kimyasal analizi ise Tablo 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Elazığ Ferrokrom Cürufu

Tablo 2.1. Elazığ Ferrokrom Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Bileşim(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Cr	Mn ₂ O ₃
EFC	30,41	23,51	2,61	2,21	32,86	0,37	0,04	0,19	0,35	6,47	0,15

2.1.2. F Sınıfı Uçucu Kül

İsken Sugözü termik santralinden yan ürün olarak çıkan F sınıfı uçucu kül Ekton Lojistik aracılığıyla temin edilmiştir. Uçucu kül 125 mikronluk eleklerden geçirilerek kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül Şekil 2.2.'de verilmiştir. Kullanılan F sınıfı uçucu külün yoğunluğu $2,31 \text{ g/cm}^3$ 'tür. F sınıfı uçucu külün kimyasal analizi Tablo 2.2.'de verilmiş olup $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşenlerinin yüzde toplamı %90,40 olup $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olduğundan F sınıfı uçucu kül kategorisinde değerlendirilmesi için gerekli şartları sağlamaktadır.



Şekil 3.2. F Sınıfı Uçucu Kül

Tablo 2.2. F Sınıfı Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

Bileşim (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Na_2O	Cl^-
F Sınıfı Uçucu Kül	60,48	19,10	10,82	2,09	0,13	0,51	0,070

2.1.3. Alkali Aktivatör

Bu çalışmada, önceki deneylerde olumlu sonuçlar gösterdiği ve literatür taramasından [5,16, 40,47] gelen önerilerle uyduğu için sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) aktivatör olarak seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda işlenebilirlik problemlerinin en çok yaşandığı 18 ve 22 molarite ile bu tez çalışması yürütülmüştür. Katı haldeki sodyum hidroksit (NaOH) sulu çözeltisi TS EN 1008'e uygun olan Elazığ ili şebeke suyu ile hazırlanmış ve yaklaşık 1 saat soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ oranı 1/2 olacak şekilde NaOH çözeltisinden istenilen oranlarda alınıp sodyum silikat 1/2 oranı dikkate alınarak ilave edilmiştir. Sodyum silikat, sodyum hidroksit, 18 ve 22 molaritede hazırlanan NaOH çözeltisi Şekil 2.3'te verilmiştir. Kullanılan NaOH ve Na_2SiO_3 'ün bazı özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sodyum Silikat, Sodyum Hidroksit ve NaOH Çözeltisi

Tablo 2.3. NaOH ve Na_2SiO_3 'ün Özellikleri

Aktivatör	Fiziksel Görünüm	Renk	Yoğunluğu (g/cm^3)	Molekül Ağırlığı
Sodyum Hidroksit	Katı	Beyaz	2,13	40.00 g/mol
Sodyum Silikat	Sıvı	Sarımsı	1,38	122.06 g/mol

2.1.4. Boraks

Bu çalışmada, literatürde [21] gösterdiği olumlu sonuçlar dikkate alınarak boraks katkı maddesi kullanılmıştır. Etimaden işletmelerinden temin edilen boraks dekahidratın kimyasal gösterimi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (disodyum tetraborat dekahidrat)'dır. Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) cevherinden kristal formda rafine edilmiş boraksın rengi beyaz ve yoğunluğu $1,73 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Kullanılan boraks Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Boraks

2.1.5. Süperakışkanlaştırıcı

İşlenebilirlik probleminin çözümü için boraks katkısının yanı sıra akışkanlaştırıcı katkı maddesi bu tez çalışmasında kullanılmıştır. Deneylerde çok yüksek oranda su azaltma ve uzun işlenebilirlik süresi sağlayan Sika ViscoCrete SF-18 yüksek performanslı süperakışkanlaştırıcı tercih edilmiştir. Sika Yapı Kimyasallarından temin edilen süperakışkanlaştırıcı homojen bir yapıya sahiptir, rengi kahverengi ve yoğunluğu $1,096 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Kullanılan süperakışkanlaştırıcı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. ViscoCrete SF-18 Süper Akışkanlaştırıcı

2.1.6. Agregat

Elazığ Vessam prefabrikten temin edilen ince kırma taş agregat laboratuvarda elenerek 0-2 mm boyutlarında kullanılmıştır. Harç karışımında kullanılan agreganın maksimum tane boyutu 2 mm'dir. Agreganın özgül ağırlık değeri 2.67 gr/cm^3 'tür. 0-2 mm boyutlarında kullanılan agregat Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6. Agregat

2.2. Metod

2.2.1. Harçların Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Harç karışım oranları belirlenirken literatürde yapılan benzer çalışmalar dikkate alınmış ve ön deneylerde elde edilen sonuçlarla hangi malzemenin hangi oranda kullanılacağına karar verilmiştir. Buna göre parametreler ve seviyeleri belirlenmiş, Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak en iyi karışım oranlarının bulunması amaçlanmıştır.

Parametreler ve seviyeleri şu şekilde seçilmiştir; NaOH molarite değeri 18 ve 22, aktivatör/bağlayıcı 0.35, 0.40 ve 0.45 ve Elazığ ferrokrom cürufu %90, %80 ve %70 oranlarında kullanılmıştır. F sınıfı uçucu kül toplam bağlayıcı miktarı dikkate alınarak %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları ise %0, %3 ve %6 oranlarında alınmıştır. Buna göre NaOH 18 ve 22 olmak üzere 2 seviyeli; aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu kül, boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametreleri ise 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Tablo 2.4.'de verilen beş parametre esas alınarak L18 ($2^1 \times 3^4$) Taguchi ortogonal dizini belirlenmiştir. Belirlenen 18 serinin karışım oranları Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye	Değer
Molarite	2	18, 22
Aktivatör/Bağlayıcı	3	0.35, 0.40, 0.45
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	3	10, 20, 30
Boraks (%)	3	0, 3, 6
Süperakışkanlaştırıcı (%)	3	0, 3, 6

Tablo 2.5. Harç Numunelerin Karışım Oranları

Seri No	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Elazığ Ferrokrom Cürufu (%)	Agrega (gr)	Boraks (%)	Süper- akışkanlaştırıcı (%)
N1	18	0,35	10	90	1400	0	0
N2	18	0,35	20	80	1400	3	3
N3	18	0,35	30	70	1400	6	6
N4	18	0,40	10	90	1400	0	3
N5	18	0,40	20	80	1400	3	6
N6	18	0,40	30	70	1400	6	0
N7	18	0,45	10	90	1400	3	0
N8	18	0,45	20	80	1400	6	3
N9	18	0,45	30	70	1400	0	6
N10	22	0,35	10	90	1400	6	6
N11	22	0,35	20	80	1400	0	0
N12	22	0,35	30	70	1400	3	3
N13	22	0,40	10	90	1400	3	6
N14	22	0,40	20	80	1400	6	0
N15	22	0,40	30	70	1400	0	3
N16	22	0,45	10	90	1400	6	3
N17	22	0,45	20	80	1400	0	6
N18	22	0,45	30	70	1400	3	0

2.2.2. Harç Numunelerinin Hazırlanması

Basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, kapilarite katsayı tayini ve birim ağırlık deneyleri için 5x5x5 cm ölçülerinde küp numuneler; eğilme dayanımı deneyi için 4x4x16 cm boyutlarında kiriş numuneler kullanılmıştır (Şekil 2.7.). Tüm numunelerin dökümü çelik harç kalıplara yapılmış ve her deney için üçer numune hazırlanıp ortalama sonuçları alınmıştır.



Şekil 8.7. 5x5x5 cm küp ve 4x4x16 cm kiriş kalıbı

İlk olarak hazırlanan NaOH çözeltisi yaklaşık 1 saat laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Ayrı bir kapta kuru malzemeler hazırlanıp hobart mikserinde (Şekil 2.8.) homojen bir karışım elde edilinceye kadar bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra soğuyan NaOH çözeltisine NaOH/Na₂SiO₃ oranı 1/2 olacak şekilde sodyum silikat ilave edilmiştir. Aktivatör, çalışır durumda olan hobart mikserindeki malzemelere eklenerek harç kıvamına gelinceye kadar yaklaşık 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan harç önceden yağlanmış kalıplara üç kademedede her biri 25 kez şişlenerek yerleştirilmiş ve üst yüzeyi mala yardımı ile düzeltilerek sarsma tablasında iyice sıkışması sağlanmıştır. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra numuneler ısıya dayanıklı streç film ile kaplanarak 90°C sıcaklıkta etüve bırakılıp 24 saat bekletilmiştir. Kalıplardan çıkarılan numuneler 7 ve 28 günlük sürede laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir. (Şekil 2.9.)



Şekil 9.8. Agrega ve bağlayıcı malzemelerin hobart mikserinde kuru karışımı





Şekil 10.9. Kalıptan çıkarılan ve laboratuvar ortamında bekletilen numuneler

2.3. Alkali Aktivasyonlu Harçlar Üzerinde Yapılan Deneyler

2.3.1. İşlenebilirlik Deneyi

Harç karışımlarının 0. dk, 5. dk, 10. dk, 15. dk, 30. dk, 45. dk ve 60. dakikalarda bir saatlik zaman dilimi içerisinde işlenebilirlik kayıpları Yayılma tablası deneyi ile TS EN 1015-3 [48] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan harç 3 dakika boyunca hobart mikserinde karıştırılmış ve taban çapı 10 cm, üst yüzey çapı 7 cm, yüksekliği 5 cm olan koni şeklindeki yağlanmış kaba iki tabaka halinde 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Her tabakada tokmak ile yanlardan vurularak harcın sıkışması sağlanmıştır. Harcın yayılmasını ölçmek için kap yavaşça yukarı kaldırılmış ve yayılma tablası kolu çevrilmiştir. Saniyede bir defa düşürülerek toplamda 15 defa düşürme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.10.).



Şekil 11.10. Yayılma tablası deneyi

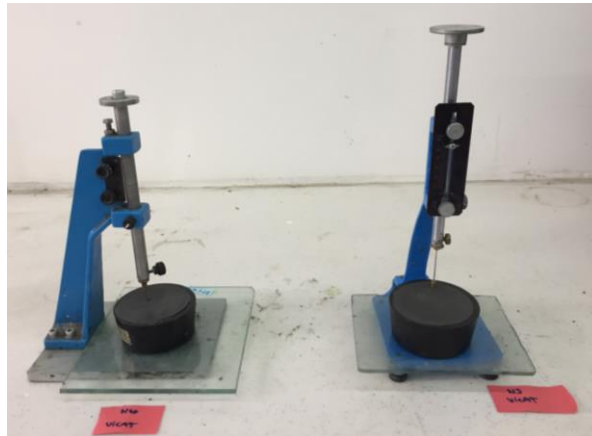
Yayılan taze harcın çapı birbirine dik iki ayrı noktadan kumpasla ölçülerek ortalaması alınmıştır. 0. dakikada ölçümü yapılan harç en az kayıpla yayılma tablasından alınarak mikser kabına bırakılmış ve malzemenin üstü bir sonraki ölçüme kadar nemli bir bezle suyu muhafaza etmesi sağlanarak örtülmüştür. 4. dakikaya kadar bu şekilde bekletilen harç; mikserde 1 dakika boyunca karıştırılmış ve işlemler tekrarlanarak harcın 5. dakikadaki yayılması ölçülmüştür. 10. dk, 15. dk, 30. dk, 45. dk ve 60. dakikalardaki ölçümler aynı şekilde yapılmıştır.

2.3.2. Priz Sürelerinin Belirlenmesi

Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen alkali aktive edilmiş bağlayıcıların hızlı priz probleminin giderilmesinde kullanılan boraks ve süperakışkanlaştırıcının etkisini gözlemlemek amacıyla TS EN 196-3 [49] standardına uygun şekilde vicat aleti deneyi gerçekleştirilmiştir.

Priz başlangıç ve priz sona erme sürelerinin tayini için bağlayıcı hamurlar hazırlanmıştır. Öncelikle vicat cihazının iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilmiş ve skala sıfırlanmıştır. Hazırlanan bağlayıcı hamur vicat halkasına hızlıca doldurulmuş ve iğne hamurun üst yüzeyine değene kadar dikkatli bir şekilde indirilerek sondada ani darbe ve çarpma etkisi olmaması için 1-2 saniye bu konumda tutulmuştur. Ardından sonda hızla serbest bırakılmıştır. İğne ile cam plaka arasındaki mesafe ve hamurun hazırlanışından bu ana kadar geçen süre kaydedilmiştir. Aynı numune üzerinde, birbirinden ve kenardan en az 10 mm mesafe kalacak şekilde ve uygun sürelerle iğne batırma işlemleri tekrarlanmıştır.

Karışımın tamamlanmasından itibaren plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 3-5 mm olduğu ana kadar geçen süre hamurun priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. Priz sona erme süresi için ise vicat halkası ters çevrilmiş ve priz sona erme süresinin tayininde kullanılan iğne takılmıştır. Plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 0,05 mm olduğu ana kadar geçen süre ise priz sona erme süresi olarak kaydedilmiştir. (Şekil 2.11.)



Şekil 12.11. Vicat aleti ile priz başlangıç ve priz sona erme sürelerinin belirlenmesi

2.3.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanım deneyi TS EN 196-1 [50] standardına uygun olarak Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyi her bir seri için üçer adet hazırlanan 5×5×5 cm boyutlarında küp numuneler üzerinde 7 ve 28. günlerin sonunda uygulanmıştır. Küp numuneler düzgün yüzeyi pres üzerine denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Uygulanan numuneler için 0,9 kN/m² sabit yükleme hızı seçilmiştir. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak kaydedilmiş ve basınç dayanım değerleri Denklem 2.1 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Basınç Dayanımı: } R_c = \frac{F_c}{\text{Alan}} \quad (2.1.)$$

Burada;

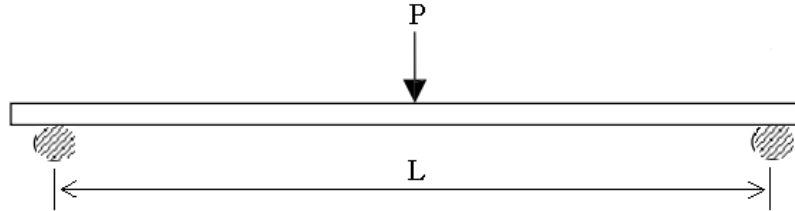
R_c: Basınç dayanımı (MPa)

F: Kırılma anında ulaşılan maksimum yük (N)

Alan: Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı kesit alanı (mm²)

2.3.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi TS EN 1015-11 [51] standardına uygun olarak Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç noktalı eğilme deneyi yöntemi kullanılmıştır ve bu modelde malzeme; basit kiriş prensibine dayanmaktadır. (Şekil 2.12.) Eğilme dayanım deneyi her bir seri için üçer adet hazırlanan 4x4x16 cm boyutlarında kiriş numuneler üzerinde 7 ve 28. günlerin sonunda uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Denklem 2.2.'de belirtilen formülde yerine yazılarak eğilme dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 13.12. Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği

$$\text{Eğilme Dayanımı: } \sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Denklem 2.2.}$$

Burada;

σ: Eğilme dayanımı (N/mm²)

P: Numunenin kırıldığı anda etki eden kuvvet (N)

L: Mesnetler arasındaki uzaklık (mm)

b: Numunenin eni (mm)

d: Numunenin yüksekliği (mm)

2.3.5. Birim Ağırlık Deneyi

Tahribatsız deneylerden olan birim ağırlık (yoğunluk) deneyi, harç üzerinde oluşan çiçeklenme gibi kusurların incelenmesi amacıyla ASTM C 642 [52] standartlarından yararlanılarak yapılmıştır.

Bu deney 5x5x5 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde her bir seri için üçer defa tekrarlanarak uygulanmıştır. İlk olarak numunelerin hava kuru ağırlığı tartılarak “Kuru birim ağırlıkları” kaydedilmiştir. Bu işlemin ardından “Doygun birim hacim ağırlığı” belirlemek için numuneler 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmiş ve daha sonra yüzeyleri kurutularak ağırlıkları tartılmıştır. Numunelerin su içerisindeki ağırlığı ise Arşimet terazisi yardımıyla ölçülmüştür. (Şekil 2.13.) Birim ağırlık değerleri Denklem 2.3.’de belirtilen formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$P \text{ yoğunluk} = \frac{W \text{ kuru}}{W \text{ doygun} - W \text{ suda}}$$

Denklem 2.3.

Burada;

W kuru: Kuru birim hacim ağırlığı

W Doygun: Doygun birim hacim ağırlığı

W Suda: Su içerisindeki birim hacim ağırlığı



Şekil 14.13. Arşimet terazisi

2.3.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Harç kalitesinin denetlenmesi ve değerlendirilmesi için uygulanan ultrases geçiş hızı deneyi TS EN 12504-4 [53] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney; numune içerisine gönderilen ses dalgalarının geçiş süresiyle dalga hızının hesaplanması esasına dayanır. Deneyde kullanılan Pund-IT cihazı düz bir yüzeye kurularak kalibrasyon ayarı 25,9 µs olarak ayarlanmıştır. Numunelerdeki boşlukları doldurmak amacıyla ses dalgalarının gönderildiği karşılıklı iki yüzeye vazelin sürülmüştür. Bu şekilde 7 ve 28 günlük 5x5x5 cm boyutlarındaki

numunelerde ultrases geçiş hızı değerleri Denklem 2.4’de belirtilen formül yardımıyla bulunmuştur.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.4.)$$

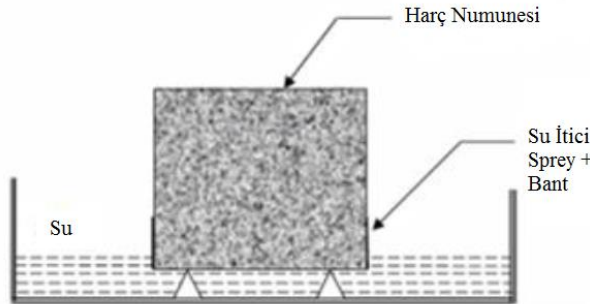
V: Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)

L: mm cinsinden iki yüzey arasındaki mesafe (50 mm)

t: Dalganın geçtiği süre (μs: Ultrases aleti üzerinde okunan değer)

2.3.7. Kapiler Su Emme Katsayı Tayini

Kılcal çatlaklar nedeniyle suyun zamanla beton içerisinde yükselerek ilerlemesine kapilarite (kılcallık) denir. Harç veya beton numuneler tarafından emilen su miktarı kılcal su emme deneyi ile değerlendirilir. Bu deney (ASTM C1585-13, 2013)’e [54] uygun olarak yapılmıştır. Deneyde her bir değişken için 3 adet 5x5x5 cm boyutlarında harçlar üretilmiştir. Numunelerin sadece bir yüzeyinin suyla temas etmesini sağlamak için yan tarafları su itici sprej ve su emmeyen bantla kaplanmıştır. İlk tartımı yapılan numunelerin suyla temas eden kısmı 5 mm suya batacak şekilde mesnetler üzerine konulmuştur. (Şekil 2.14.)



Şekil 15.14. Kılcal su geçirimliliği deney düzeneği [55]

Numuneler, su içerisine bırakıldıktan sonra 1, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 dakikalık ve 1, 2 ve 3 günlük sürelerde ağırlık okumaları yapılarak kılcal su emme katsayısı belirlenmiştir. Kapilarite katsayısı her bir t ’ye karşılık gelen Q/A değerleri arasındaki lineer ilişkinin eğiminden hesaplanmış ve Denklem 2.5. yardımıyla elde edilmiştir.

$$\left(\frac{Q}{A}\right)^2 = k.t \quad \text{Denklem 2.5.}$$

Q: Numunenin emdiği su miktarı (gr = cm³)

A: Suyla temas halinde olan yüzeyin Alanı (cm²)

t: Zaman (sn)

k: Kapilarite Katsayısı (cm²/sn = cm/sn^{1/2})

2.3.8. SEM - EDS Analizi

SEM diğerk bir ifadeyle Taramalı Elektron Mikroskobu; bünyesindeki elektron tabancasından gönderdiği elektron bulutu ile tanımlanması gereken numuneden bir elektron koparıp onun karakterize edilmesini sağlayan bir sistemdir. Numunenin içyapısındaki malzemelerin birbiriyle olan etkileşimlerinin üç boyutlu görüntüsü alınarak sertleşmiş harç karışımının mikro yapısı incelenmiştir.

SEM cihazıyla birlikte çalışan EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) görüntülenen yüzeydeki elementel analizin yapılmasını sağlar ve diğerk yöntemlerle görünmeyen katmanları göstererek numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi verir. Parçacık boyutlarını ve temel bileşimi belirleyen bu yöntem, SEM mikrograflarında gözlemlenen özellikler hakkında ek veriler sağlar ve SEM-EDS veya SEM-EDX Analizi olarak adlandırılır.

Deney sonuçlarına göre belirlenen üç adet numunenin SEM - EDS analizleri Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. (Şekil 2.15.)



Şekil 16.15. SEM cihazı

2.3.9. XRD Analizi

Toz haline getirilen numunelerin mineralojik özelliklerini incelemek için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. XRD (X-ışını Difraktometresi) adı verilen aletler ile yapılan bu deney bir maddenin, malzemenin veya kayacın kristal yapısını inceleyerek mineralojik bileşiminin bulunmasını ve numunelerin içerisindeki elementlerin ortaya çıkmasını sağlar.

XRD Analizi, Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde Rigaku X-ışını Kırınım cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

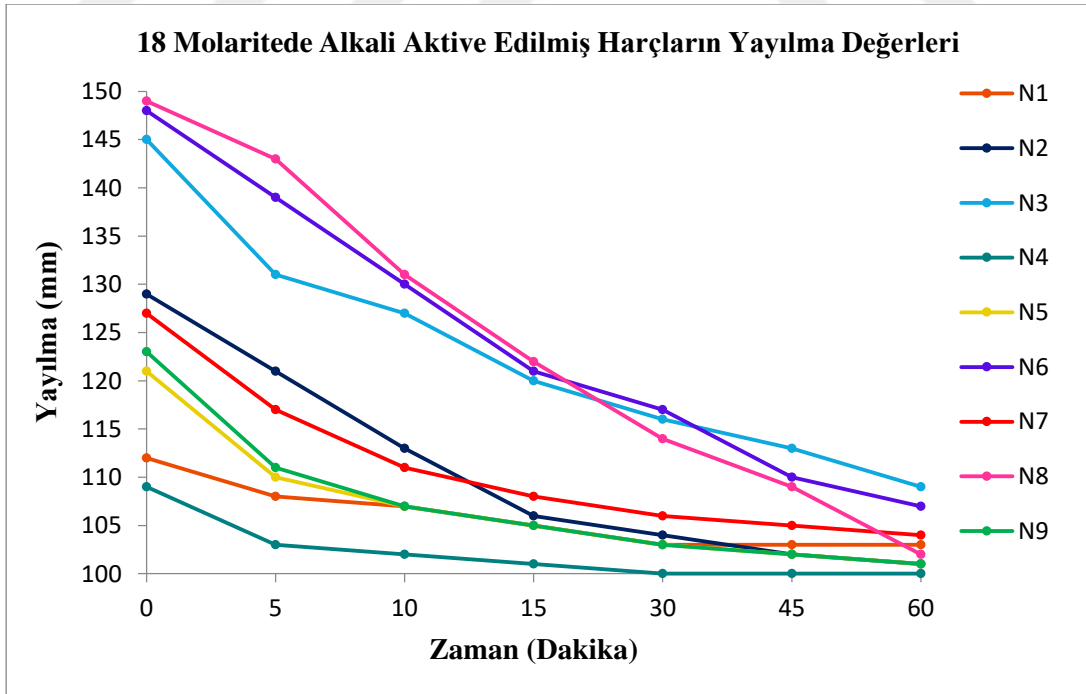
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Karışımların Taze Haldeki Özelliklerinin Belirlenmesi

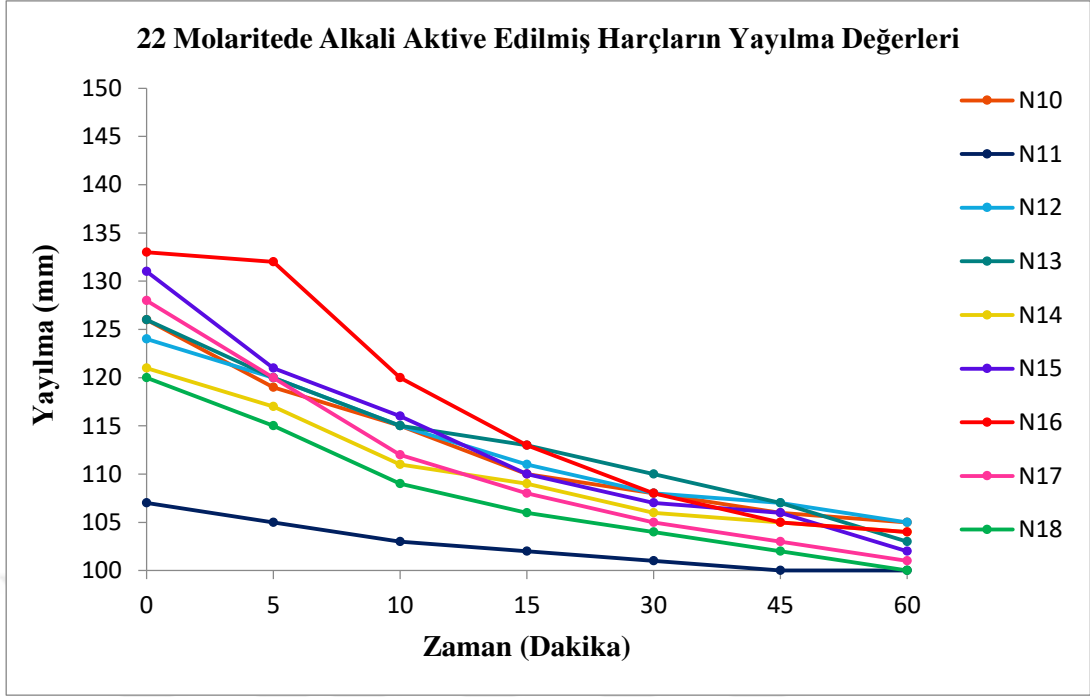
Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen alkali aktivasyonlu harçların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri taguchi yöntemiyle analiz edilerek bu bölümde verilmiştir. Çizilen üç boyutlu grafiklerle deney sonuçları yorumlanmış, Parametrelerin deney sonuçlarına etkisi ve optimum değerleri saptanmıştır.

3.1.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Harç karışımlarının 0. dk, 5. dk, 10. dk, 15. dk, 30. dk, 45. dk ve 60. dakikalardaki işlenebilirlik kayıpları yayılma tablası deneyi ile TS EN 1015-3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney ile işlenebilirliği neredeyse imkansız olan 18 ve 22 molaritedeki harç karışımlarına kimyasal katkıların olumlu etkisi gözlemlenmiş ve parametrelerin optimum değerleri taguchi metodu ile analiz edilmiştir. Yayılma değerlerinin zamana göre değişim grafiği Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de sunulmuştur. Hazırlanan 18 adet karışım üzerinde yürütülen yayılma tablası deney sonuçları ise Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. 18 molaritede alkali aktive edilmiş harçların yayılma değerleri



Şekil 3.2. 22 molaritede alkali aktive edilmiş harçların yayılma değerleri

Tablo 3.1. Harç karışımlarının yayılma değerleri

Seri No	Yayılma Değerleri (mm)						
	0. dk	5. dk	10. dk	15. dk	30. dk	45. dk	60. dk
N1	112	108	107	105	103	103	103
N2	129	121	113	106	104	102	101
N3	145	131	127	120	116	113	109
N4	109	103	102	101	100	100	100
N5	121	110	107	105	103	102	101
N6	148	139	130	121	117	110	107
N7	127	117	111	108	106	105	104
N8	149	143	131	122	114	109	102
N9	123	111	107	105	103	102	101
N10	126	119	115	110	108	106	105
N11	107	105	103	102	101	100	100
N12	124	120	115	111	108	107	105
N13	126	120	115	113	110	107	103
N14	121	117	111	109	106	105	104
N15	131	121	116	110	107	106	102
N16	133	132	120	113	108	105	104
N17	128	120	112	108	105	103	101
N18	120	115	109	106	104	102	100

Yayılma değerleri ne kadar yüksek olursa, harçların işlenebilirliği o kadar iyi olmaktadır. Bu sebeple taguchi yöntemiyle S/N oranları hesaplanırken en büyük - en iyi durumu dikkate alınarak

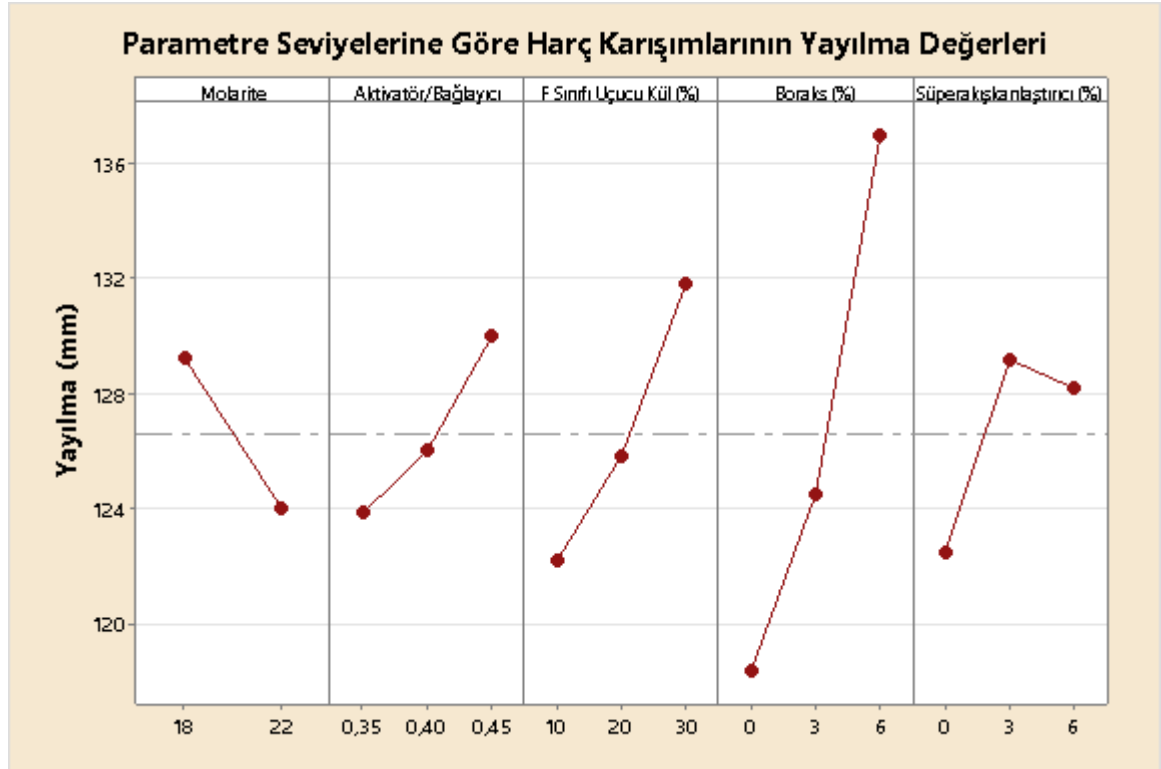
denklem 3.1 kullanılmıştır. Yayılma tablası deney sonuçlarının 0. dakika değerleri ve S/N oranları Tablo 3.2’de verilmiştir.

$$\text{En Büyük} - \text{En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.1.}$$

Tablo 3. 2. Yayılma değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					Yayılma Değerleri (mm)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	112	40,48
N2	18	0,35	20	3	3	129	40,80
N3	18	0,35	30	6	6	145	41,69
N4	18	0,40	10	0	3	109	40,17
N5	18	0,40	20	3	6	121	40,55
N6	18	0,40	30	6	0	148	41,75
N7	18	0,45	10	3	0	127	40,86
N8	18	0,45	20	6	3	149	41,67
N9	18	0,45	30	0	6	123	40,57
N10	22	0,35	10	6	6	126	40,99
N11	22	0,35	20	0	0	107	40,21
N12	22	0,35	30	3	3	124	41,01
N13	22	0,40	10	3	6	126	41,04
N14	22	0,40	20	6	0	121	40,83
N15	22	0,40	30	0	3	131	41,00
N16	22	0,45	10	6	3	133	41,20
N17	22	0,45	20	0	6	128	40,82
N18	22	0,45	30	3	0	120	40,62

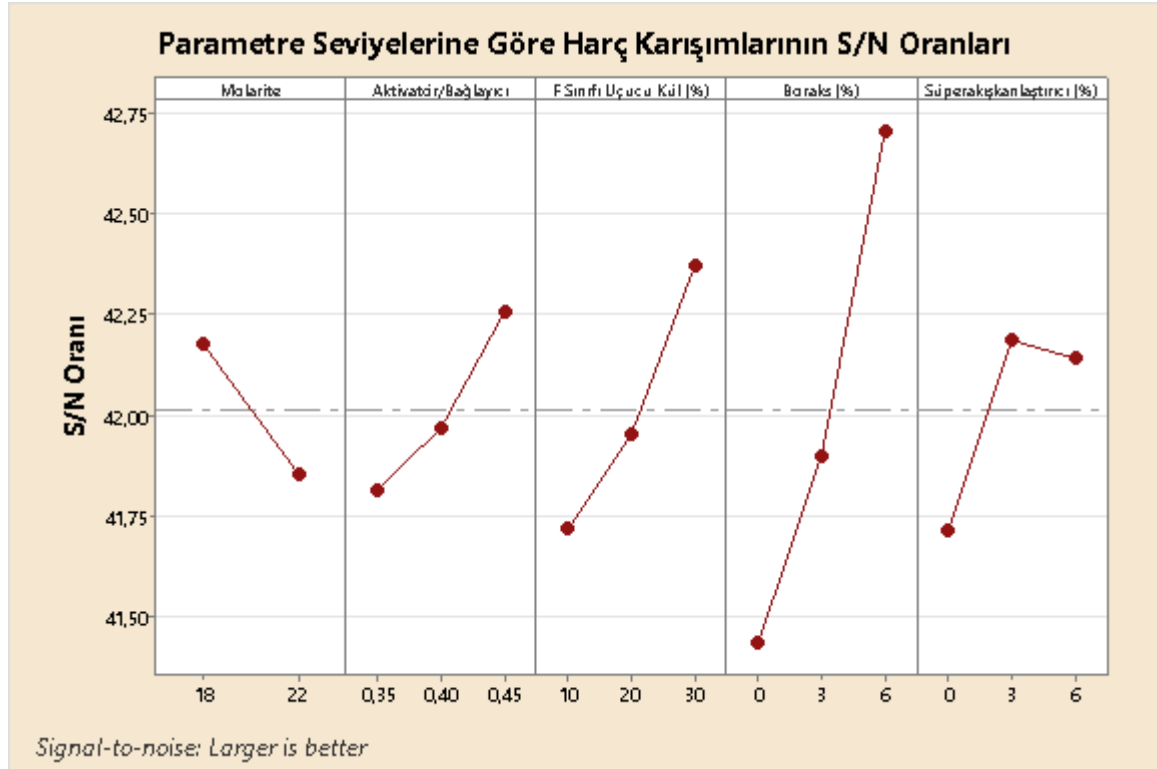
Taguchi metoduyla elde edilen bu verilere göre optimum değerler belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre 0. dakikadaki yayılma değerleri grafiği Şekil 3.3’de ve S/N oranlarının yanıt değeri grafiği Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Parametre seviyelerine göre yayılma değerleri

Şekil 3.3 incelendiğinde; her bir parametre için işaretli olan her bir verinin farklı seviyeleri gösterdiği görülmektedir. Bu noktalardan grafiksel değeri en büyük olan değer, optimum şartı gerçekleştiren seviyeyi vermektedir.

Bu durumlara dikkat edilerek; 18 molaritede, aktivatör/bağlayıcı oranının 0,45 olduğu durumda, %30 oranında F sınıfı uçucu kül içeren ve kimyasal katkılardan boraksın %6, süperakışkanlaştırıcının ise %3 oranında kullanıldığı durumda yayılma değerinin en iyi seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Parametre seviyelerine göre yayılma değerinin S/N oranları

Şekil 3.4 incelendiğinde; 18 molarite, aktivatör/bağlayıcı 0,45, F sınıfı uçucu kül %30, boraks % 6 ve süperakışkanlaştırıcı %3 iken en iyi S/N oranının elde edildiği görülmektedir. Bu değerler yayılma değerinin optimum parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu; 18 molarite, 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %80 Elazığ ferrokrom cürufu), %6 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N8'dir.

Taguchi analizinin ardından Anova analizi (varyans analizi) yapılarak deney parametrelerinin yayılma değerleri üzerindeki yüzdesel etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. İlk (0. dakika) yayılma değerleri için varyans analizi sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	122,7	122,72	1,55	0,248	5,11%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	117,4	58,72	0,74	0,507	4,89%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	285,8	142,89	1,8	0,226	11,91%
Boraks (%)	2	1085,4	542,72	6,85	0,018	45,22%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	155,1	77,56	0,98	0,417	6,46%
Hata	8	633,8	79,22			26,40%
Toplam	17	2400,3				100,00%

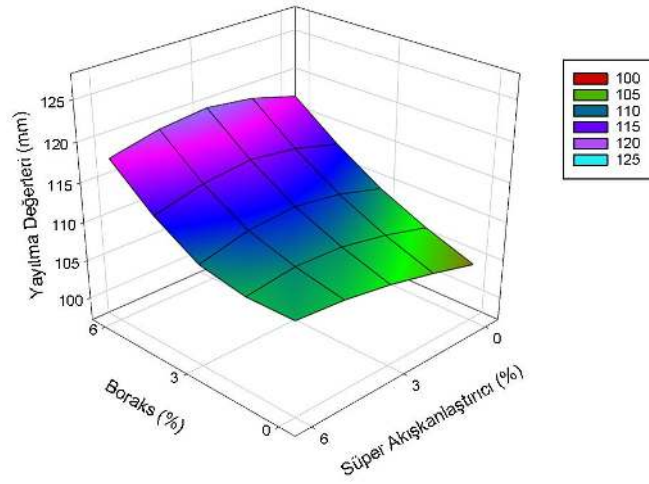
Tablodan da görülebileceği gibi serbestlik derecesi n-1 olup, molarite 2 seviyeli olduğundan (18 ve 22) serbestlik derecesi 1’dir. Diğer parametrelerin tamamı 3 seviyeli olduğundan serbestlik derecesi 2’dir.

“P” değeri incelenecek olursa; herhangi bir parametre için hesaplanan P değeri 0,05’ ten küçük ise bu durumda bu parametre deney kalitesi üzerinde etkilidir yani anlamlıdır. Eğer herhangi bir parametre için hesaplanan P değeri 0,05’ ten büyük ise bu durumda bu parametre, incelenen kalite karakteristiği üzerinde etkili değildir ya da az etkisi vardır [56]. Yayılma değerlerinin varyans analizi sonucuna göre işlenebilirlik üzerinde en etkili parametre 0,018 P değeri ile borakstır. Molarite, aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine karşılık gelen P değerleri 0.05’ten büyük olduğu için bu parametrelerin yayılma değerine etkisinin çok az olduğu söylenebilir.

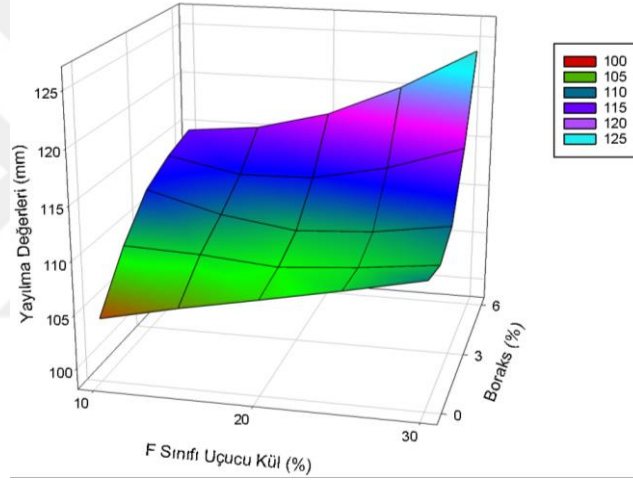
Varyans analizi tablosundaki “F” değeri etki derecelerini gösterir. En büyük F değeri en etkili parametreyi işaret eder [57]. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sırasıyla boraks 6.85, F sınıfı uçucu kül 1.8, molarite 1.55, süperakışkanlaştırıcı 0.98 ve aktivatör/bağlayıcı 0.74 şeklinde sıralanır. Bu verilere göre işlenebilirlik üzerindeki en etkili parametrenin boraks olduğu söylenebilir.

Yüzdesel olarak etki oranı incelendiğinde, en etkili parametrenin % 45.22 ile boraks olduğu görülmektedir. Ayrıca F sınıfı uçucu külün % 11.91, süperakışkanlaştırıcının %6.46, molaritenin % 5.11 ve aktivatör/bağlayıcının % 4.89 etkili olduğu görülmektedir. Tablodaki hata satırı ise deneylerde kontrol edilemeyen etkenlerin tümünün etki değerini göstermektedir ve bu değer yayılma tablası deneyi için %26.40’dır.

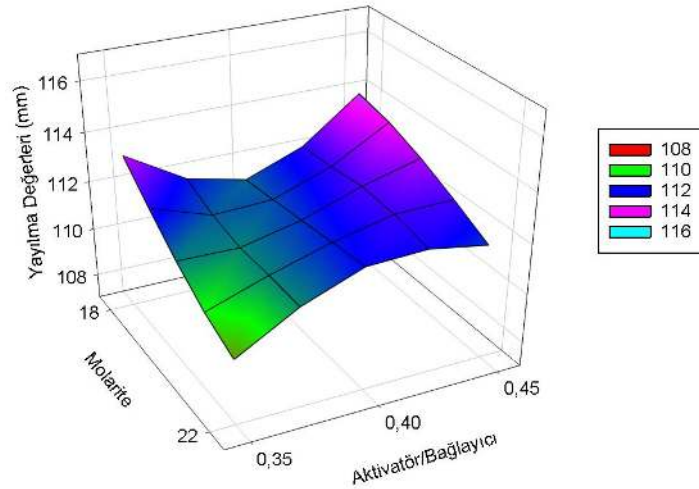
Yayılma değerlerinin parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.5 – Şekil 3.7’de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.5. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim



Şekil 3.6. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim



Şekil 3.7. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre yayılma değerlerindeki değişiminin verildiği Şekil 3.5 incelendiğinde; süperakışkanlaştırıcı ve boraks miktarı arttıkça yayılma değerlerinin arttığı görülmektedir. En düşük yayılma değeri %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı parametrelerinde elde edilmiştir. Şekil 3.6'ya göre en yüksek yayılma değerleri %30 F sınıfı uçucu kül ve %6 boraks parametre seviyelerinde elde edilmiştir. Şekil 3.7'den anlaşılabacağı üzere; en yüksek yayılma değerlerinin 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında ve 18 molaritede elde edildiği görülmektedir. molarite arttıkça işlenebilirlik azaldığından harcın yayılma miktarı da azalmıştır.

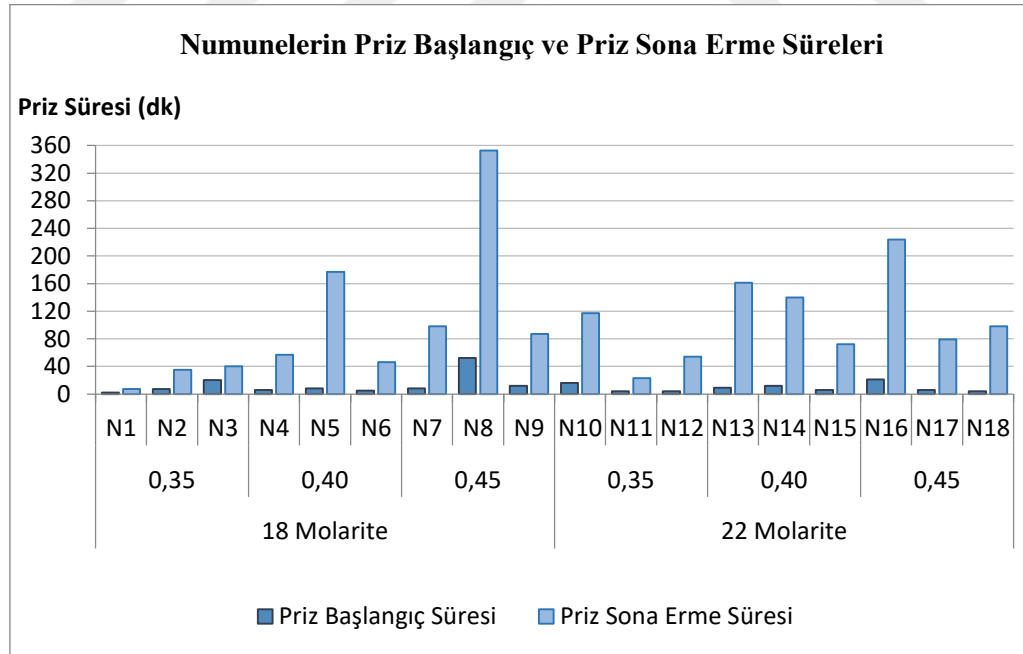
Sonuç olarak Minitab programında deney sonuçlarının analiz edilmesiyle elde edilen verilere göre, boraks oranının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı görülmektedir. Boraksın yayılma tablası deneyi için optimum değerinin %6 olduğu, süperakışkanlaştırıcının ise %3 olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan literatür taramasına göre kullanılan NaOH oranı yani molarite değeri arttıkça harcın işlenebilirliğinin neredeyse imkânsız olduğu bu sebeple 14 ve 16 molarite ile çalışmalara devam edildiği görülmüştür [5,47]. Bu tez çalışmasında hedeflendiği gibi molarite değeri 18 ve 22 gibi yüksek değerlere çıkarılmış ve elde edilen sonuçlara göre boraks ve süperakışkanlaştırıcının harcın işlenebilirliği üzerinde beklenen olumlu katkıları sağladığı görülmüştür.

3.1.2. Priz Süresi Tayini Sonuçları

Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen alkali aktive edilmiş bağlayıcıların hızlı priz probleminin giderilmesinde kullanılan boraks ve süperakışkanlaştırıcının etkisini gözlemlemek amacıyla TS EN 196-3 standardına uygun şekilde gerçekleştirilen vicat aleti deney sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir. Hazırlanan 18 adet bağlayıcı hamurların priz başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.4. Bağlayıcı hamurların priz başlangıç ve priz sona erme süreleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	Priz Başlangıç Süresi (Dakika)	Priz Sona Erme Süresi (Dakika)
N1	18	0,35	90	10	0	0	2	7
N2			80	20	3	3	7	35
N3			70	30	6	6	20	40
N4			90	10	0	3	6	57
N5		0,40	80	20	3	6	8	177
N6			70	30	6	0	5	46
N7			90	10	3	0	8	98
N8		0,45	80	20	6	3	52	353
N9			70	30	0	6	12	87
N10			90	10	6	6	16	117
N11	22	0,35	80	20	0	0	4	23
N12			70	30	3	3	4	54
N13			90	10	3	6	9	161
N14			80	20	6	0	12	140
N15		0,40	70	30	0	3	6	72
N16			90	10	6	3	21	224
N17			80	20	0	6	6	79
N18			70	30	3	0	4	98

**Şekil 3.8.** Bağlayıcı hamurların priz başlangıç ve priz bitiş süreleri

Priz Başlangıç Süresi Deney Sonuçları Analizi

Vicat aleti ile elde edilen priz başlangıç ve priz sona erme süreleri taguchi yöntemiyle birbirinden bağımsız olarak analiz edilmiştir. Bu iki ölçümün birlikte analiz edilmesi, her iki değer in ortalamasının alınması anlamına gelmektedir. Bu durum hangi parametrenin hangi priz ölçümünde daha etkili olduğunu yorumlamakta güçlük çıkaracaktır. Bu sebeple priz başlangıç ve priz sona erme süreleri taguchi yöntemiyle ve Anova ile ayrı ayrı analiz edilmiştir.

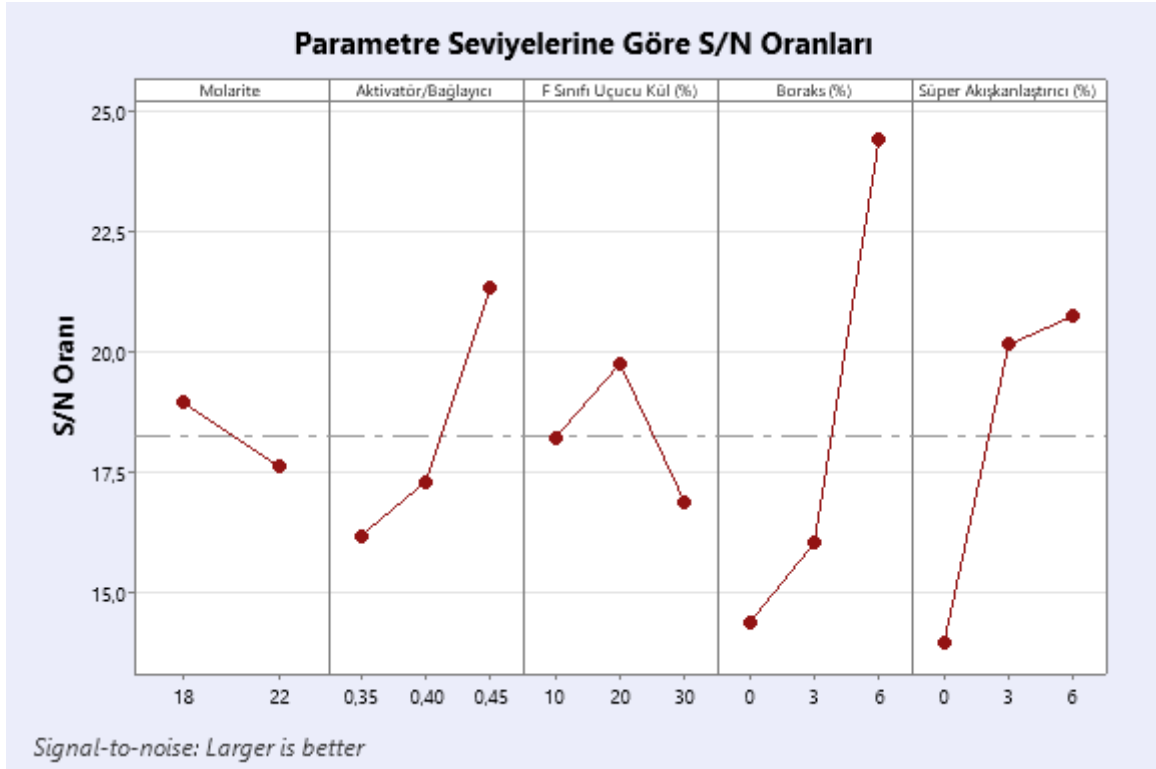
Priz başlama süresi harcın işlenebilirliği açısından oldukça önemlidir ve özellikle alkali aktive edilmiş cürufllu bağlayıcılarda harcın karılmasından kalıba yerleştirilip sıkıştırılmasına kadar geçen sürede hızlı priz alma problemi ile karşılaşmaktadır [5,47]. Priz başlangıç ve sona erme sürelerinin optimum seçimi ortam koşullarına (yaz, kış vb.) ve kullanım şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Ancak bu tez çalışmasının kapsamı düşük priz süresine sahip alkali aktivasyonlu cürufllu harçların priz süresini geciktirmek olduğundan taguchi analizinde S/N oranları hesaplanırken en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.2 kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.2.}$$

Priz başlangıç süresinin taguchi ile analizinden elde edilen S/N oranları Tablo 3.5’de, parametre seviyelerine göre priz başlangıç süresinin S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.5. Priz başlangıç süresi ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					Priz Başlangıç Süresi (Dakika)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	2	6,02
N2	18	0,35	20	3	3	7	16,90
N3	18	0,35	30	6	6	20	26,02
N4	18	0,40	10	0	3	6	15,56
N5	18	0,40	20	3	6	8	18,06
N6	18	0,40	30	6	0	5	13,98
N7	18	0,45	10	3	0	8	18,06
N8	18	0,45	20	6	3	52	34,32
N9	18	0,45	30	0	6	12	21,58
N10	22	0,35	10	6	6	16	24,08
N11	22	0,35	20	0	0	4	12,04
N12	22	0,35	30	3	3	4	12,04
N13	22	0,40	10	3	6	9	19,08
N14	22	0,40	20	6	0	12	21,58
N15	22	0,40	30	0	3	6	15,56
N16	22	0,45	10	6	3	21	26,44
N17	22	0,45	20	0	6	6	15,56
N18	22	0,45	30	3	0	4	12,04



Şekil 3.9. Parametre seviyelerine göre priz başlangıç süresinin S/N oranları

Şekil 3.9 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve priz başlangıç süresinin en uzun olduğu değerlerin 18 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45, F sınıfı uçucu külün %20 (dolayısıyla Elazığ ferrokrom cürufunun %80), boraksın %6 ve süperakışkanlaştırıcının %6 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler priz başlangıç süresinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu; 18 molarite, 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %80 Elazığ ferrokrom cürufu), %6 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N8'dir.

Priz başlangıç süresine deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.6'da verilmiştir.

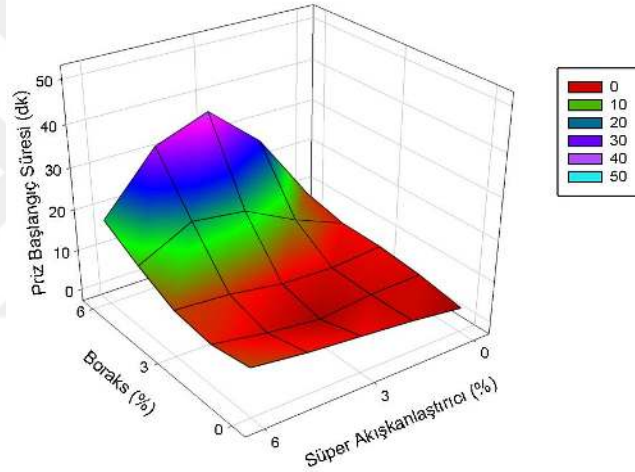
Tablo 3.6. Priz başlangıç süresi için varyans analizi sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	80,22	80,22	1,15	0,316	3,54%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	322,11	161,06	2,30	0,162	14,22%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	127,44	63,72	0,91	0,440	5,63%
Boraks (%)	2	861,78	430,89	6,15	0,024	38,05%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	313,44	156,72	2,24	0,169	13,84%
Hata	8	560,11	70,01			24,73%
Toplam	17	2265,11				100,00%

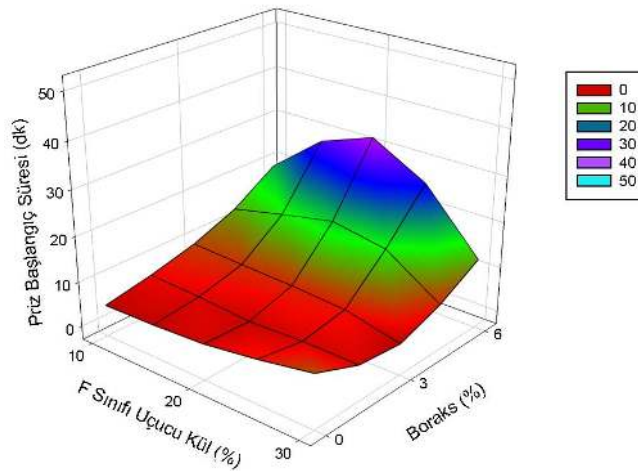
Varyans Analizinden anlaşılabacağı üzere; boraksın P değeri 0,05'ten küçüktür ve 0,024 değeri ile priz başlangıç süresi üzerinde en etkili parametredir. Diğer parametreler ise priz başlangıç süresi üzerinde çok az etkilidir. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında boraksın 6.15 ile en etkili parametre olduğu görülür. Diğer parametrelerin etki dereceleri boraksa göre oldukça azdır ve birbirine yakın değerler almıştır.

Priz başlangıç süresine etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %38.05 ile boraks olduğu ve diğer parametrelere göre daha az etki eden parametrenin ise %3.54 ile molarite olduğu görülmektedir. Molariteden sonra etkisi az olan bir diğer parametre ise %5.63 ile F sınıfı uçucu küldür.

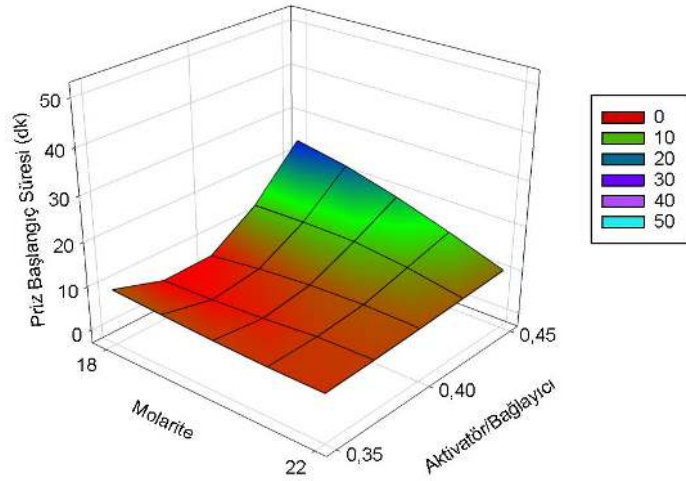
Priz başlangıç süresinin parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.10 – Şekil 3.12’de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.10. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim



Şekil 3.11. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim



Şekil 3.12. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişim

Deney parametrelerine göre priz başlangıç süresindeki değişiminin verildiği Şekil 3.10 – Şekil 3.12 incelendiğinde; süperakışkanlaştırıcı ve boraks miktarı arttıkça priz başlangıç süresinin arttığı görülmektedir. En düşük priz başlangıç süresi %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı parametrelerinde, en yüksek değer ise %6 boraks ve %6 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül %20 ve boraks %6 iken en uzun priz başlangıç süresi kaydedilmiştir. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı etkisinde priz başlangıç süresi değerlendirilecek olursa, 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında ve 18 molaritede en yüksek priz başlangıç süresi elde edilmiştir.

Priz Sona Erme Süresi Deney Sonuçları Analizi

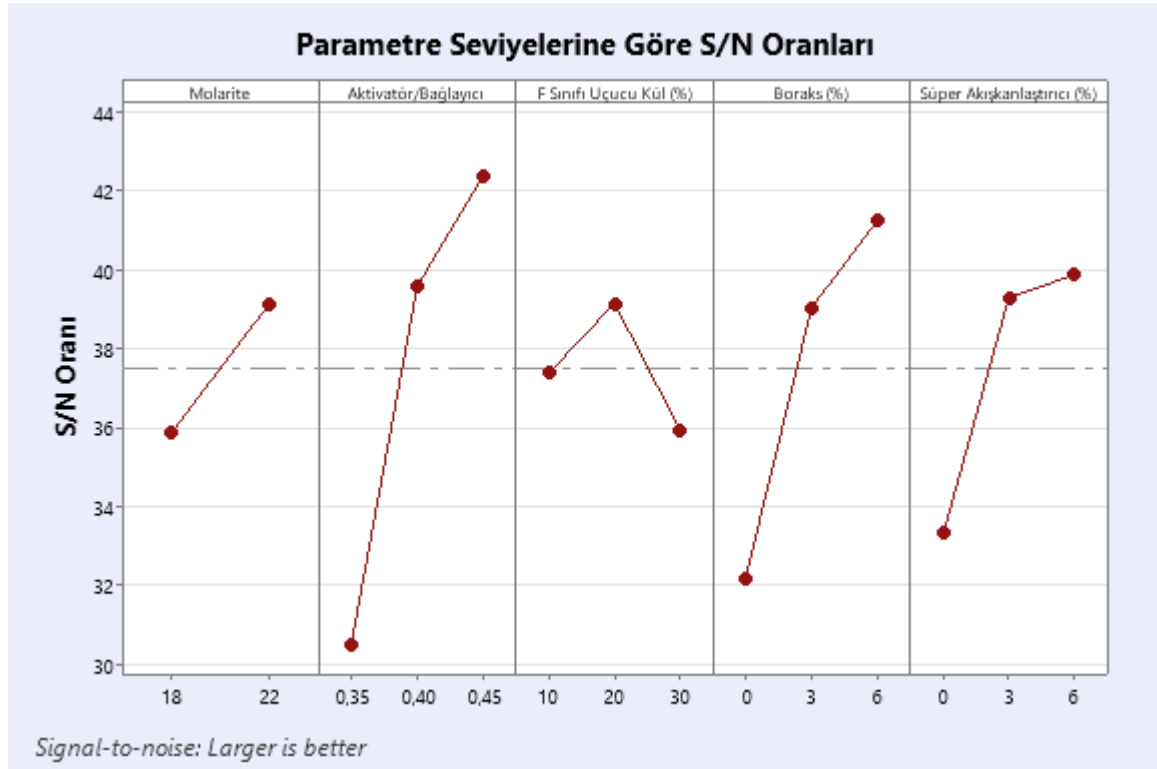
Hızlı priz alan alkali aktive edilmiş bağlayıcıların priz süresinin, katkılar yardımıyla olabildiğince uzatılması tez çalışmasının başlıca hedefleri arasındadır. Bu sebeple priz sona erme süresinde taguchi metoduyla S/N oranları hesaplanırken en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.3 kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.3.}$$

Priz sona erme süresinin taguchi ile analizinden elde edilen S/N oranları Tablo 3.7’de, parametre seviyelerine göre priz sona erme süresinin S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.13’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Priz sona erme süresi ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					Priz Sona Erme Süresi (Dakika)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	7	16,90
N2	18	0,35	20	3	3	35	30,88
N3	18	0,35	30	6	6	40	32,04
N4	18	0,40	10	0	3	57	35,12
N5	18	0,40	20	3	6	177	44,96
N6	18	0,40	30	6	0	46	33,26
N7	18	0,45	10	3	0	98	39,82
N8	18	0,45	20	6	3	353	50,96
N9	18	0,45	30	0	6	87	38,79
N10	22	0,35	10	6	6	117	41,36
N11	22	0,35	20	0	0	23	27,23
N12	22	0,35	30	3	3	54	34,65
N13	22	0,40	10	3	6	161	44,14
N14	22	0,40	20	6	0	140	42,92
N15	22	0,40	30	0	3	72	37,15
N16	22	0,45	10	6	3	224	47,00
N17	22	0,45	20	0	6	79	37,95
N18	22	0,45	30	3	0	98	39,82



Şekil 3.13. Parametre seviyelerine göre priz sona erme süresinin S/N oranları

Şekil 3.13 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve priz sona erme süresinin en uzun olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45, F sınıfı uçucu külün %20 (dolayısıyla Elazığ ferrokrom cürufunun %80), boraksın %6 ve süperakışkanlaştırıcının %6 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler priz sona erme süresinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu, varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki değerleri de göz önünde bulundurularak; 18 molarite, 0.45 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %80 Elazığ ferrokrom cürufu), %6 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N8'dir.

Priz başlangıç süresine deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Priz sona erme süresi için varyans analizi sonuçları

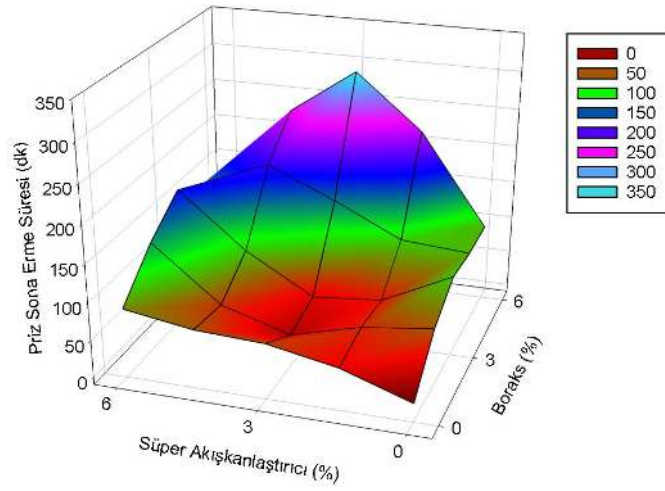
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	256,9	256,9	0,07	0,792	0,21%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	36860,8	18430,4	5,32	0,034	30,37%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	14435,4	7217,7	2,08	0,187	11,90%
Boraks (%)	2	29502,1	14751,1	4,26	0,055	24,31%
Süper Akışkanlaştırıcı (%)	2	12591,4	6295,7	1,82	0,223	10,38%
Hata	8	27706,4	3463,3			22,83%
Toplam	17	121353				100,00%

Varyans analizi çıktısı incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten küçük olan parametre 0,034 değeri ile aktivatör/bağlayıcıdır ve priz sona erme süresi üzerinde en etkili parametredir. Boraksın P değeri ise 0,055'dir ve priz sona erme süresinde önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir. Diğer parametreler ise priz sona erme süresi üzerinde daha az etkilidir.

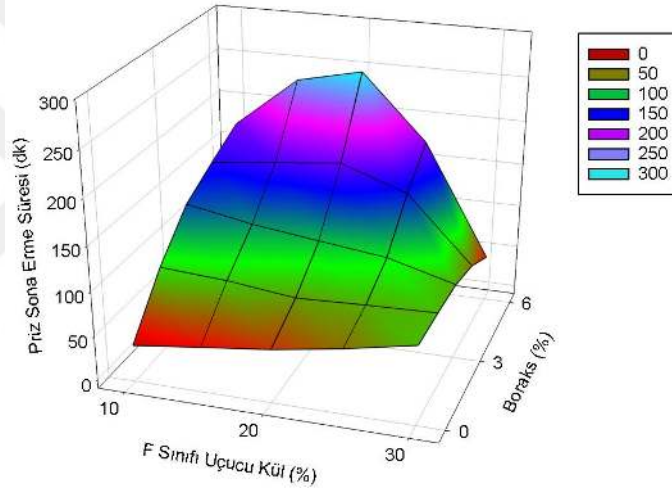
F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında aktivatör/bağlayıcının 5.32 ile en etkili parametre olduğu söylenebilir. Boraksın 4.26 etki değeri ile ikinci dereceden etkili olduğu görülür. Etkisi çok az olan parametre ise 0,07 etki değeri ile molaritedir. Buna göre priz sona erme süresinde en etkili parametrenin aktivatör/bağlayıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Priz sona erme süresine etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %30.37 ile aktivatör/bağlayıcı olduğu ve diğer parametrelere göre neredeyse etkisiz olan parametrenin %0.21 ile molarite olduğu görülmektedir.

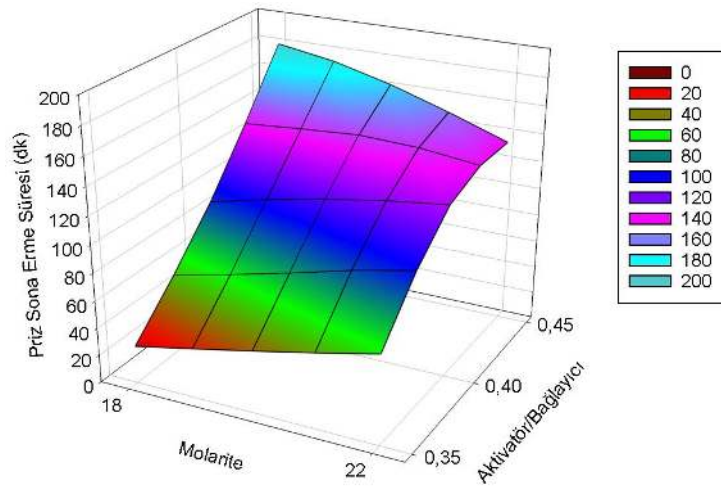
Priz sona erme süresinin parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.14 – Şekil 3.16'da verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.14. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre sona erme süresindeki değişim



Şekil 3.15. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre priz sona erme süresindeki değişim



Şekil 3.16. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre priz sona erme süresindeki değişim

Deney parametrelerine göre priz sona erme süresindeki değişiminin verildiği Şekil 3.14 – Şekil 3.16 incelendiğinde; süperakışkanlaştırıcı %3 ve boraks %6 iken en yüksek priz sona erme süresinin elde edildiği görülmektedir. En düşük priz sona erme süresi %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı parametrelerinde kaydedilmiştir. F sınıfı uçucu külün %20 ve boraksın %6 olduğu seviyelerde en uzun priz sona erme süresi okunmuştur. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı etkisinde priz sona erme süresi değerlendirilecek olursa, aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça priz sona erme süresinin uzadığı ve en yüksek priz sona erme süresinin 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında ve 18 molaritede elde edildiği görülmektedir. Priz başlangıç ve priz sona erme süreleri dikkate alındığında, boraksın beklenen olumlu katkıları sağladığı ve priz süresini uzattığı görülmektedir. Boraks, priz geciktirici olarak kullanıldığında, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisinde çözünerek yüksek kalsiyum içerikli F sınıfı uçucu kül ve Elazığ ferrokrom cürufunda bulunan Ca^{2+} ile reaksiyona girer ve alkali çözelti içerisinde kalsiyum bazlı bir borat tabakası oluşturur. Bağlayıcı malzemenin kristal ayrışması nedeniyle boraksın priz geciktirici etkisi olduğu bildirilmiştir [21].

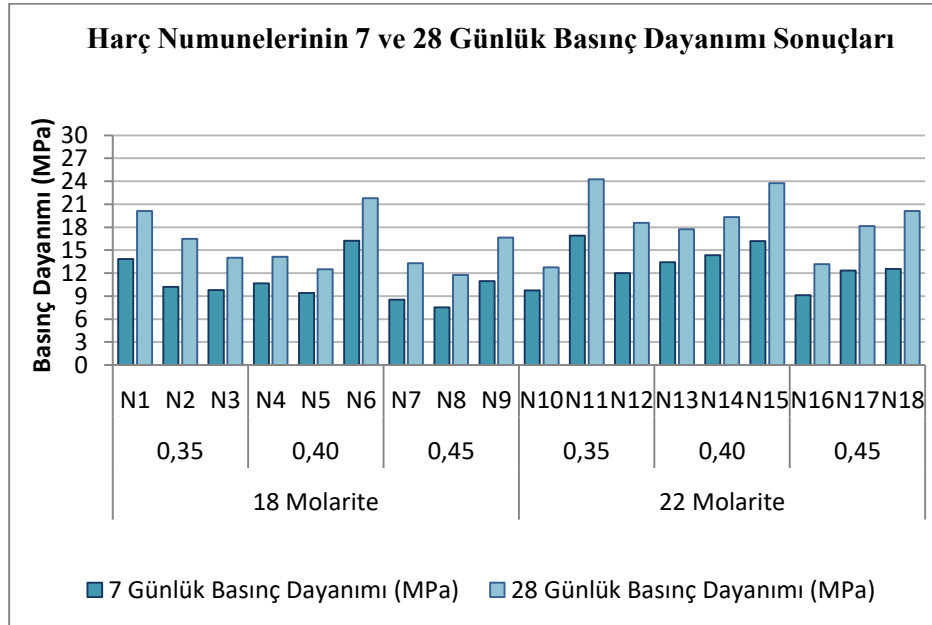
3.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Basınç dayanımı deneyi için farklı oranlarda Elazığ ferrokrom cürufu, F sınıfı uçucu kül, boraks ve süperakışkanlaştırıcı ile üretilen alkali aktive edilmiş 18 serinin her biri için altı adet 5x5x5cm'lik harç numunesi dökülmüş ve üçü 7. günde, diğer üçü 28. günde olmak üzere kırımları gerçekleştirilmiştir. 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 3.9'da ve basınç dayanımı değerlerinin grafiği Şekil 3.17'de sunulmuştur.

Tablo 3.9. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
N1	18	0,35	90	10	0	0	13,85	20,12
N2			80	20	3	3	10,23	16,47
N3			70	30	6	6	9,78	14,03
N4			90	10	0	3	10,65	14,13
N5		0,4	80	20	3	6	9,42	12,52
N6			70	30	6	0	16,21	21,79
N7			90	10	3	0	8,54	13,32
N8		0,45	80	20	6	3	7,52	11,75
N9			70	30	0	6	10,97	16,64
N10			90	10	6	6	9,75	12,78
N11	22	0,35	80	20	0	0	16,88	24,27
N12			70	30	3	3	12,01	18,59
N13			90	10	3	6	13,43	17,73
N14			80	20	6	0	14,36	19,32
N15		0,4	70	30	0	3	16,20	23,76
N16			90	10	6	3	9,12	13,16
N17			80	20	0	6	12,33	18,17
N18			70	30	3	0	12,57	20,13

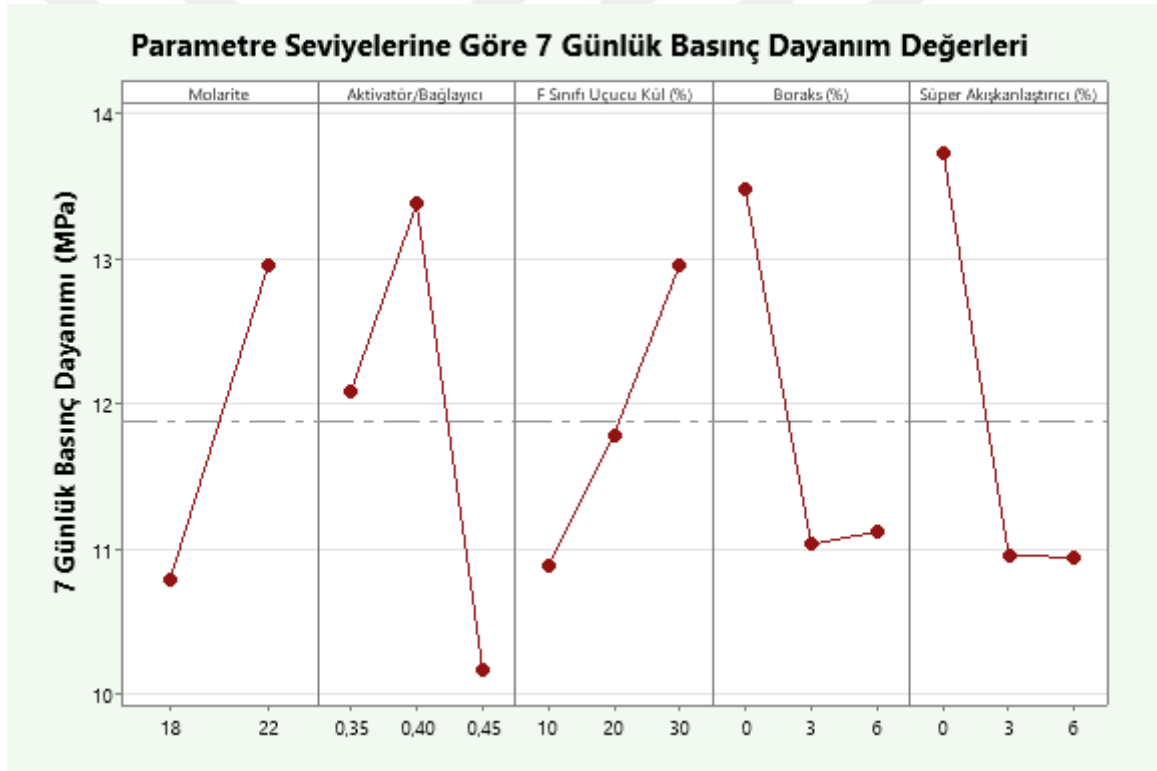
**Şekil 3.17.** Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

7 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları Analizi

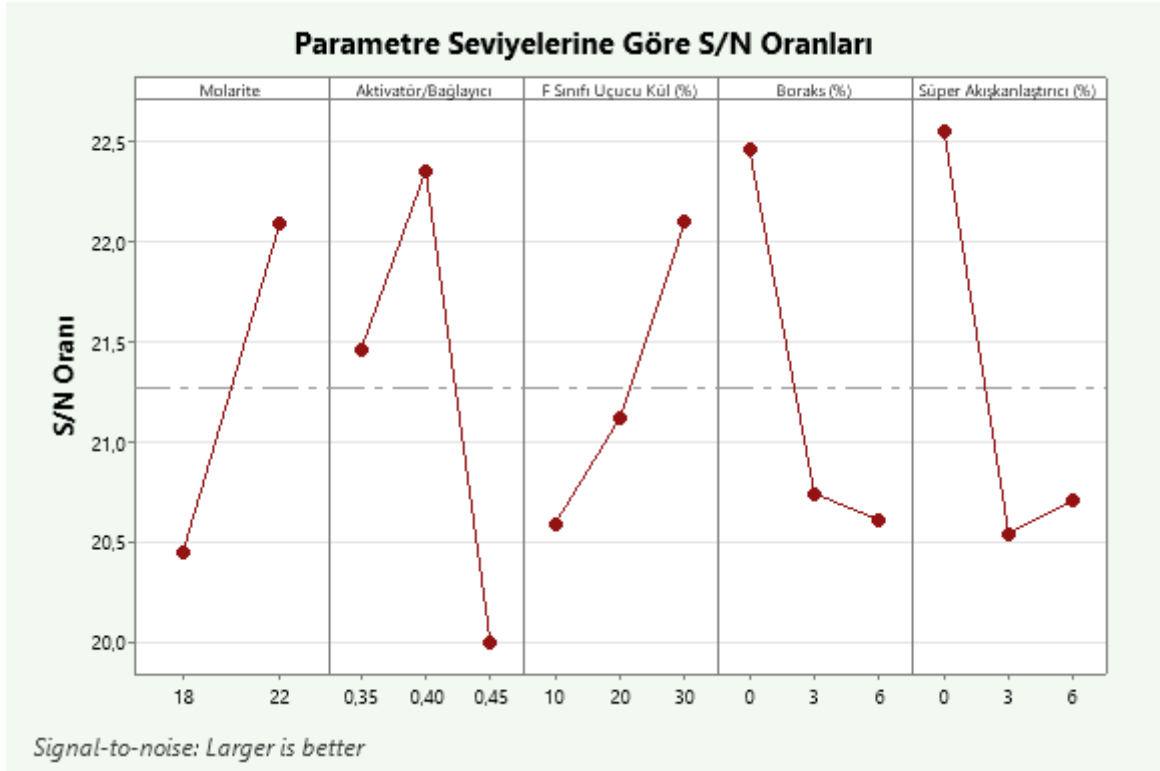
Basınç dayanım değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların basınç dayanımının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.4 kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.4.}$$

Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük basınç dayanım değerlerinin parametre seviyelerine göre grafiği Şekil 3.1. ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.19’da verilmiştir. 7 günlük Basınç dayanım değerleri ve S/N oranları Tablo 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Parametre seviyelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 3.19. Parametre seviyelerine göre 7 günlük basınç dayanımının S/N oranları

Tablo 3.10. 7 günlük basınç dayanım değerleri ve S/N oranları

Deney Parametreleri						7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
Seri No	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	13,85	22,83
N2	18	0,35	20	3	3	10,23	20,20
N3	18	0,35	30	6	6	9,78	19,81
N4	18	0,40	10	0	3	10,65	20,55
N5	18	0,40	20	3	6	9,42	19,48
N6	18	0,40	30	6	0	16,21	24,20
N7	18	0,45	10	3	0	8,54	18,63
N8	18	0,45	20	6	3	7,52	17,52
N9	18	0,45	30	0	6	10,97	20,80
N10	22	0,35	10	6	6	9,75	19,78
N11	22	0,35	20	0	0	16,88	24,55
N12	22	0,35	30	3	3	12,01	21,59
N13	22	0,40	10	3	6	13,43	22,56
N14	22	0,40	20	6	0	14,36	23,14
N15	22	0,40	30	0	3	16,20	24,19
N16	22	0,45	10	6	3	9,12	19,20
N17	22	0,45	20	0	6	12,33	21,82
N18	22	0,45	30	3	0	12,57	21,99

Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve 7 günlük basınç dayanımının en iyi olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40, F sınıfı uçucu külün %30, boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 7 günlük basınç dayanımının optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir.

Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu; 22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %70 Elazığ ferrokrom cürufu), %0 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N15'dir.

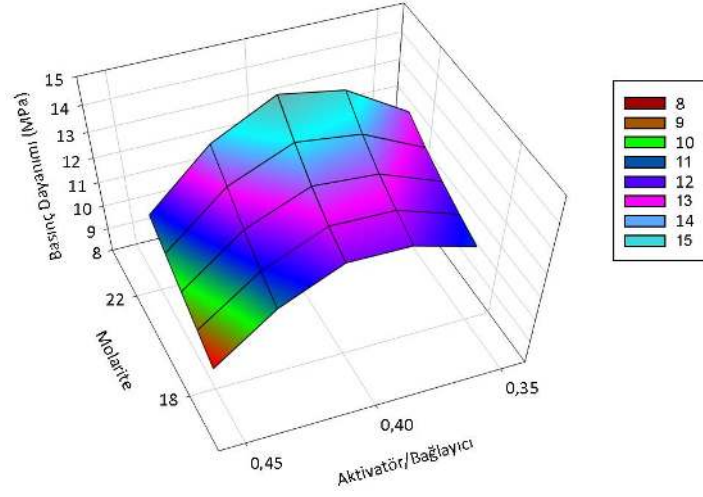
7 Günlük basınç dayanımına deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11. 7 günlük basınç dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları

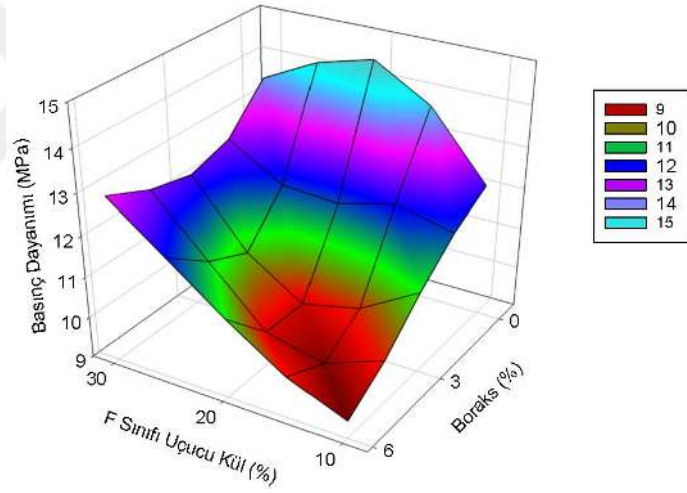
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	21,08	21,082	11,91	0,009	15,81%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	31,16	15,580	8,80	0,010	23,36%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	12,88	6,442	3,64	0,075	9,66%
Boraks (%)	2	23,10	11,548	6,53	0,021	17,32%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	31,01	15,503	8,76	0,010	23,25%
Hata	8	14,16	1,770			10,61%
Toplam	17	133,39				100,00%

Varyans analizi incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten büyük olan F sınıfı uçucu kül 7 günlük basınç dayanımı üzerinde diğer parametrelere göre daha az etkilidir. Molarite ise 0,009 P değeri ile en etkili parametre olmuştur. F etki değeri en yüksek olan parametre yine molaritedir. 7 günlük basınç dayanımına etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %23.36 ile aktivatör/bağlayıcı olduğu ve ikinci en etkili parametrenin %23.25 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Diğer parametrelere göre daha az etki eden parametrenin ise %9.66 ile F sınıfı uçucu kül olduğu görülmektedir.

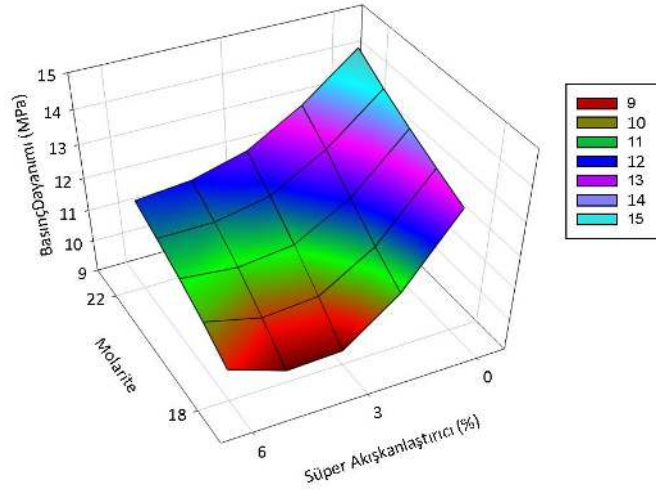
7 günlük basınç dayanım sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.20. – Şekil 3.22.'de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.20. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.21. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.22. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre değişiminin verildiği Şekil 2.3. – Şekil 2.5. deki grafikler incelendiğinde; en yüksek basınç dayanım değerlerinin 22 molaritede elde edildiği, 18 molaritede basınç dayanım değerlerinin düştüğü görülmektedir. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça basınç dayanımı düşmüş, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı oranında en yüksek değer elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanım değerleri de artmıştır ve en yüksek basınç dayanımı %30 F sınıfı uçucu kül oranında elde edilmiştir. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 iken basınç dayanımı düşmüş, en yüksek değer 22 molaritede 0,35 ve 0,40 A/B oranında elde edilmiştir.

28 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları Analizi

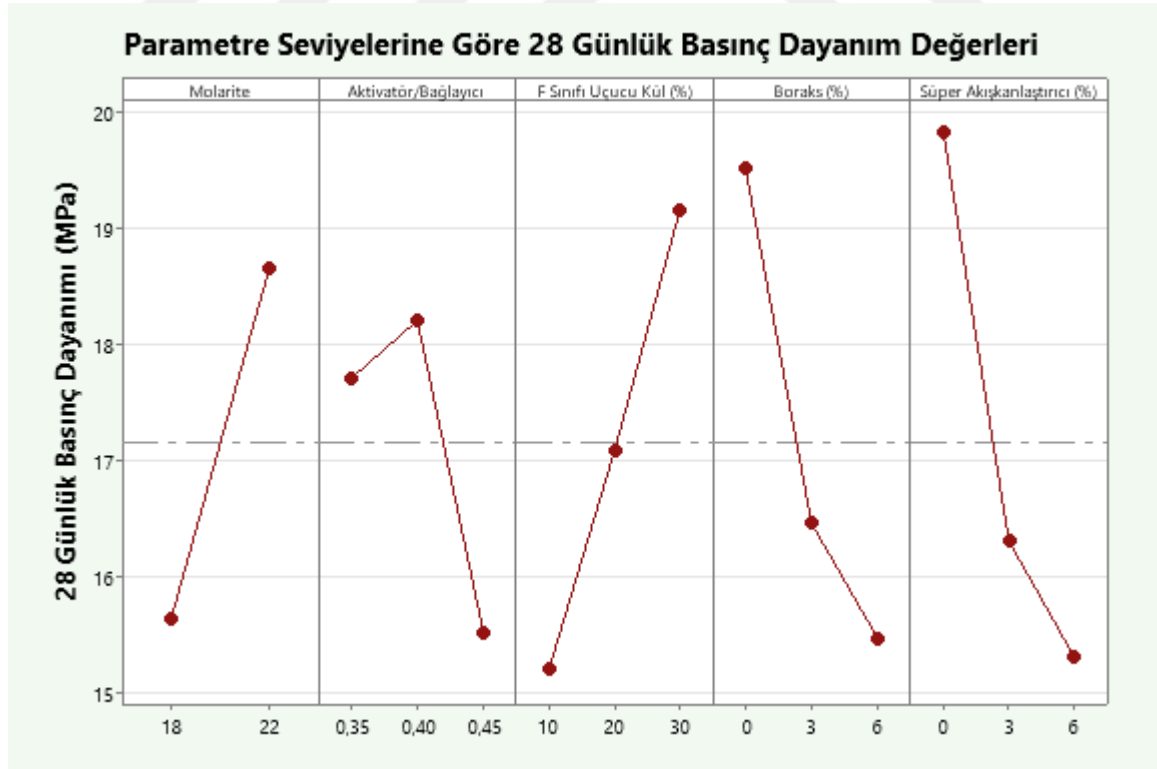
Basınç dayanım değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların basınç dayanımının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.5. kullanılmıştır.

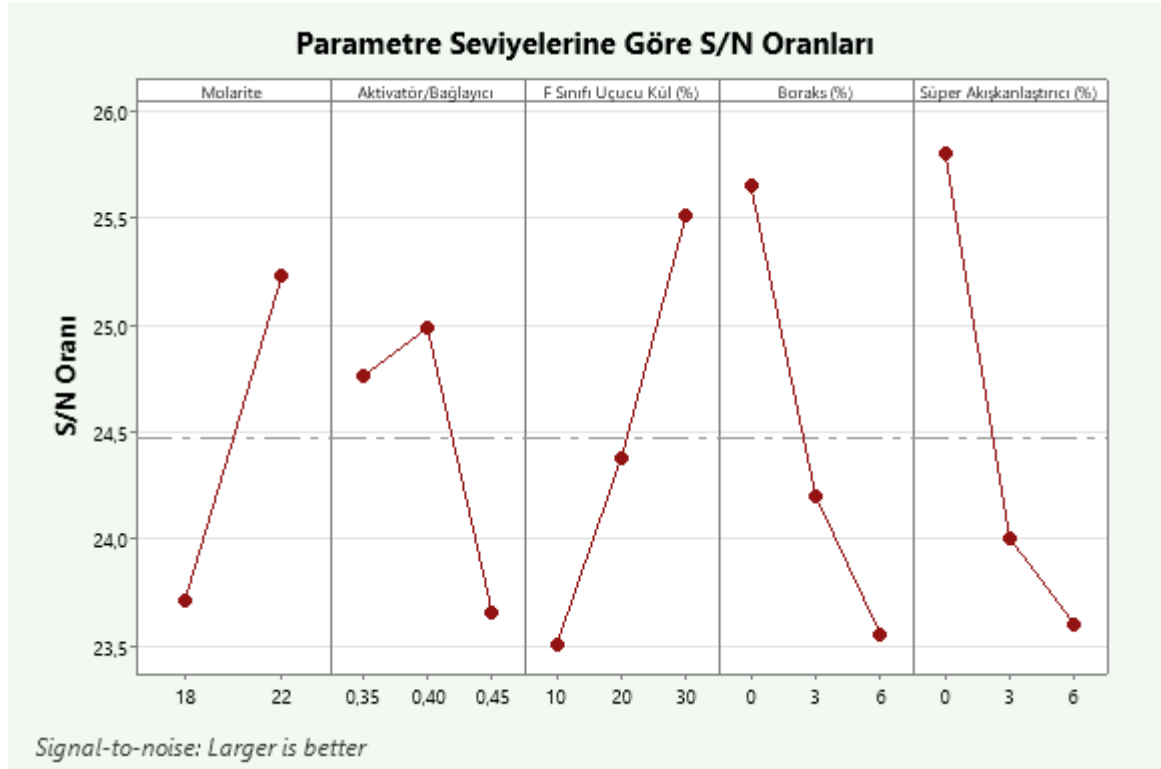
$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.5.}$$

Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük basınç dayanım değerlerinin S/N oranları Tablo 3.12’de, parametre seviyelerine göre 28 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 3.23 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.24.’te verilmiştir.

Tablo 3.12. 28 günlük basınç dayanım değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	20,12	26,07
N2	18	0,35	20	3	3	16,47	24,33
N3	18	0,35	30	6	6	14,03	22,94
N4	18	0,40	10	0	3	14,13	23,00
N5	18	0,40	20	3	6	12,52	21,95
N6	18	0,40	30	6	0	21,79	26,77
N7	18	0,45	10	3	0	13,32	22,49
N8	18	0,45	20	6	3	11,75	21,40
N9	18	0,45	30	0	6	16,64	24,42
N10	22	0,35	10	6	6	12,78	22,13
N11	22	0,35	20	0	0	24,27	27,70
N12	22	0,35	30	3	3	18,59	25,39
N13	22	0,40	10	3	6	17,73	24,97
N14	22	0,40	20	6	0	19,32	25,72
N15	22	0,40	30	0	3	23,76	27,52
N16	22	0,45	10	6	3	13,16	22,39
N17	22	0,45	20	0	6	18,17	25,19
N18	22	0,45	30	3	0	20,13	26,08

**Şekil 3.23.** Parametre seviyelerine göre 28 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 3.24. Parametre seviyelerine göre 28 günlük basınç dayanımının S/N oranları

Şekillerden anlaşılacağı üzere; S/N oranının en yüksek ve 28 günlük basınç dayanımının en iyi olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40, F sınıfı uçucu külün %30 (EFC'nin %70), boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 7 günlük basınç dayanımında olduğu gibi 28 günlük basınç dayanımının da optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu; 22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %70 Elazığ ferrokrom cürufu), %0 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N15'dir.

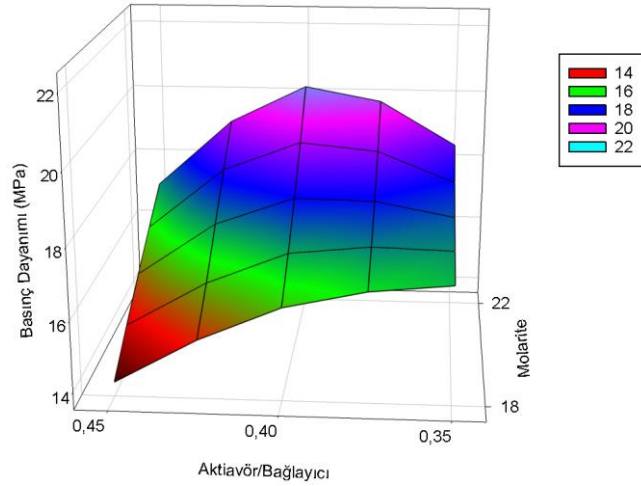
28 günlük basınç dayanımına deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.13.'te verilmiştir.

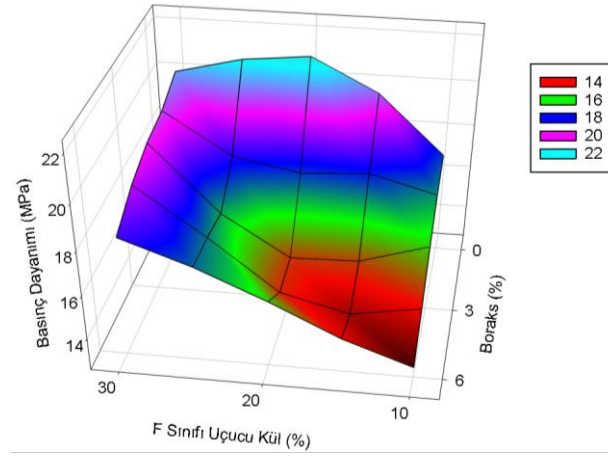
Tablo 3.13. 28 günlük basınç dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	40,92	40,921	11,40	0,010	15,64%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	24,38	12,190	3,39	0,086	9,32%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	46,85	23,423	6,52	0,021	17,91%
Boraks (%)	2	53,32	26,658	7,42	0,015	20,38%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	67,44	33,722	9,39	0,008	25,78%
Hata	8	28,73	3,591			10,98%
Toplam	17	261,64				100,00%

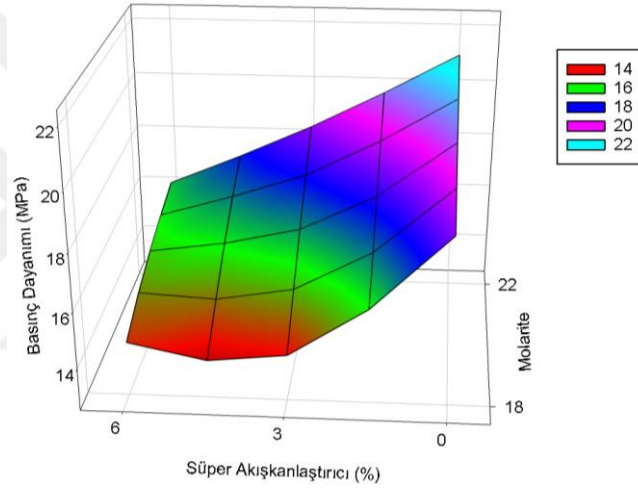
Varyans analizi incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten büyük olan aktivatör/bağlayıcı parametresi 28 günlük basınç dayanımı üzerinde diğer parametrelere göre daha az etkilidir. Süperakışkanlaştırıcı ise 0,008 P değeri ile en etkili parametre olmuştur. 28 günlük basınç dayanımına etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %25.78 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu ve ikinci en etkili parametrenin %20.28 ile boraks olduğu görülmektedir. Diğer parametrelere göre daha az etki eden parametrenin ise %9.32 ile aktivatör/bağlayıcı olduğu görülmektedir.

28 günlük basınç dayanım sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.25 – Şekil 3.27'de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.

**Şekil 3.25.** Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük basınç dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.26. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim



Şekil 3.27. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim

Deney parametrelerine göre değişiminin verildiği Şekil 3.25 – Şekil 3.27’deki grafikler incelendiğinde; en yüksek basınç dayanım değerlerinin 22 molaritede elde edildiği, 18 molaritede basınç dayanım değerlerinin düştüğü görülmektedir. Boraks miktarı arttıkça basınç dayanımı düşmüş, en yüksek dayanım %0 boraks ve %30 F sınıfı uçucu kül parametre seviyelerinde elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül miktarı arttıkça 28 günlük basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde 22 molarite ve %0 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde en yüksek 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı miktarı arttıkça basınç dayanımı 13-14 MPa’a kadar düşmüştür. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 iken basınç dayanımı düşmüş, en yüksek değer 22 molaritede sırasıyla 0,35 ve 0,40 A/B oranında elde edilmiştir.

7 ve 28 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre;

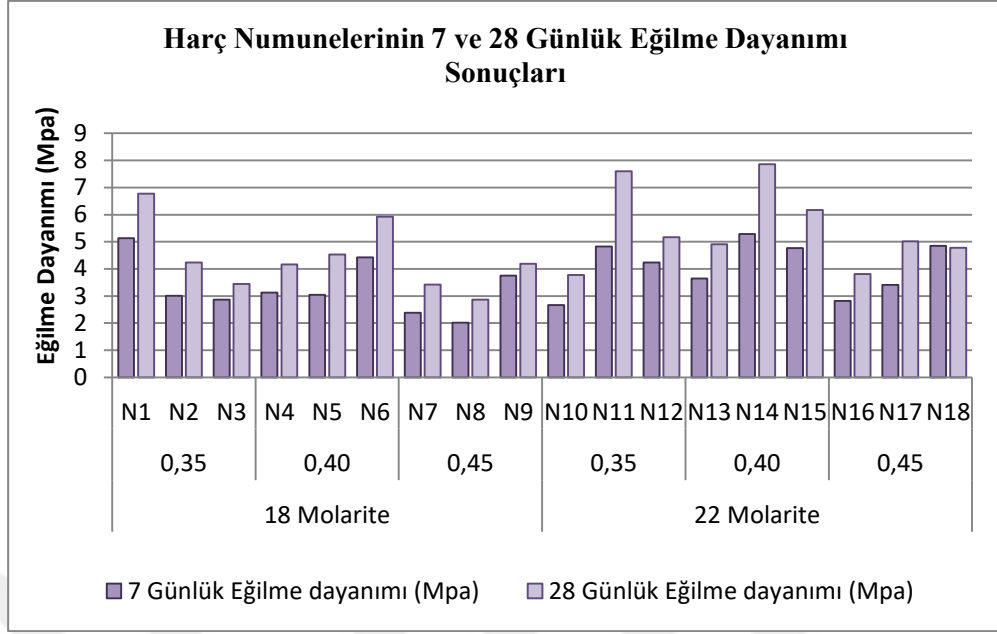
Boraks ve süperakışkanlaştırıcı işlenebilirliği ve priz süresini olumlu yönde etkilemesine rağmen, basınç dayanımı üzerinde olumlu bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Basınç dayanım deneyi için boraks ve süperakışkanlaştırıcının optimum değeri %0'dır. İşlenebilirlik 18 molaritede daha iyiyken, basınç dayanım değerleri 22 molaritede daha iyi sonuçlar vermiştir. F sınıfı uçucu kül %30 oranında kullanıldığında basınç dayanımı en yüksek sonuçları vermiştir. Bu durum daha önce yapılan çalışmaları destekler niteliktedir [5].

3.2.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Eğilme dayanımı deneyi için farklı oranlarda Elazığ ferrokrom cürufu, F sınıfı uçucu kül, boraks ve süperakışkanlaştırıcı ile üretilen alkali aktive edilmiş 18 serinin her biri için altı adet 4x4x16 cm'lik harç numunesi dökülmüş ve üçü 7. günde, diğer üçü 28. günde olmak üzere kırılmaları gerçekleştirilmiştir. 7 ve 28 günlük ortalama eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 3.14.'de ve eğilme dayanımı değerlerinin grafiği Şekil 3.28.'de sunulmuştur.

Tablo 3.14. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)
N1	18	0,35	90	10	0	0	5,13	6,77
N2			80	20	3	3	3,01	4,23
N3			70	30	6	6	2,87	3,44
N4			90	10	0	3	3,12	4,17
N5		0,4	80	20	3	6	3,04	4,53
N6			70	30	6	0	4,42	5,92
N7			90	10	3	0	2,38	3,42
N8			80	20	6	3	2,01	2,87
N9		0,45	70	30	0	6	3,75	4,19
N10			90	10	6	6	2,66	3,78
N11	22	0,35	80	20	0	0	4,83	7,60
N12			70	30	3	3	4,23	5,17
N13			90	10	3	6	3,64	4,91
N14			80	20	6	0	5,29	7,86
N15		0,4	70	30	0	3	4,77	6,17
N16			90	10	6	3	2,82	3,81
N17			80	20	0	6	3,41	5,02
N18			70	30	3	0	4,85	4,78



Şekil 3.28. Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri

7 Günlük Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları Analizi

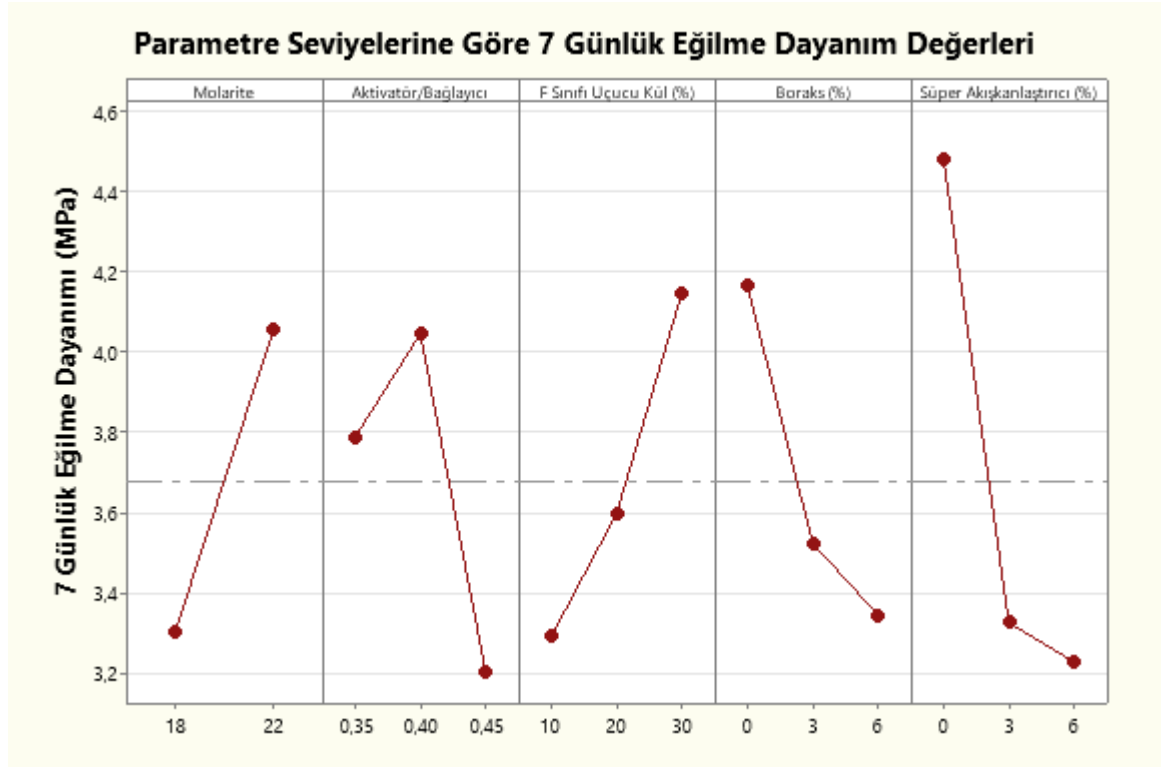
Eğilme dayanım değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların eğilme dayanımının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.6. kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.6.}$$

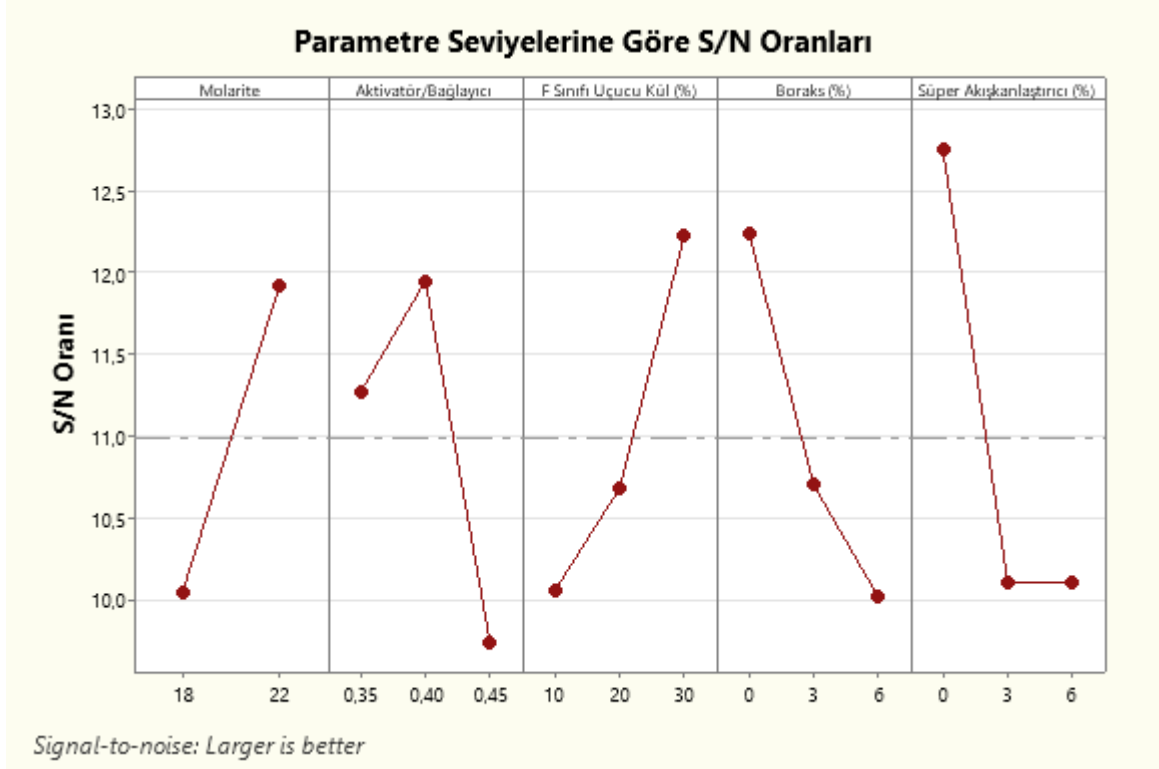
Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük eğilme dayanım değerlerinin S/N oranları Tablo 3.15.'de, Parametre seviyelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 3.29 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.30'da verilmiştir.

Tablo 3.15. 7 günlük eğilme dayanım değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	5,13	14,20
N2	18	0,35	20	3	3	3,01	9,57
N3	18	0,35	30	6	6	2,87	9,16
N4	18	0,40	10	0	3	3,12	9,88
N5	18	0,40	20	3	6	3,04	9,66
N6	18	0,40	30	6	0	4,42	12,91
N7	18	0,45	10	3	0	2,38	7,53
N8	18	0,45	20	6	3	2,01	6,06
N9	18	0,45	30	0	6	3,75	11,48
N10	22	0,35	10	6	6	2,66	8,50
N11	22	0,35	20	0	0	4,83	13,68
N12	22	0,35	30	3	3	4,23	12,53
N13	22	0,40	10	3	6	3,64	11,22
N14	22	0,40	20	6	0	5,29	14,47
N15	22	0,40	30	0	3	4,77	13,57
N16	22	0,45	10	6	3	2,82	9,01
N17	22	0,45	20	0	6	3,41	10,66
N18	22	0,45	30	3	0	4,85	13,71



Şekil 3.29. Parametre seviyelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerleri



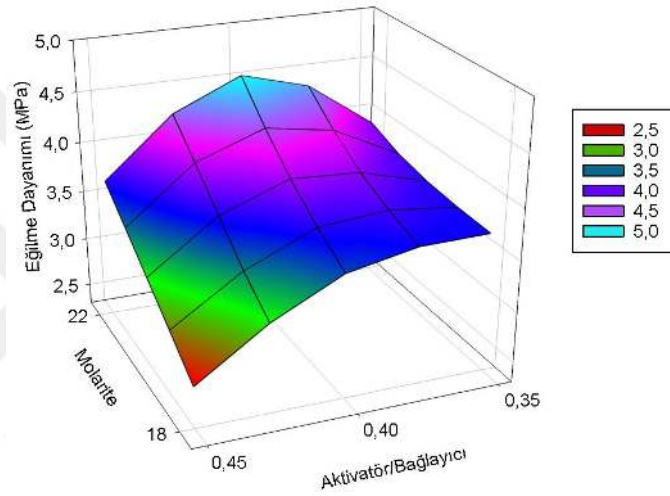
Şekil 3.30. Parametre seviyelerine göre 7 günlük eğilme dayanımının S/N oranları

Şekil 3.29 ve Şekil 3.30 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve 7 günlük eğilme dayanımının en iyi olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40, F sınıfı uçucu külün %30 (EFC %70), boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 7 günlük eğilme dayanımının optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu; 22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül (dolayısıyla %70 Elazığ ferrokrom cürufu), %0 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N15'dir. 7 günlük eğilme dayanımına deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.16'da verilmiştir.

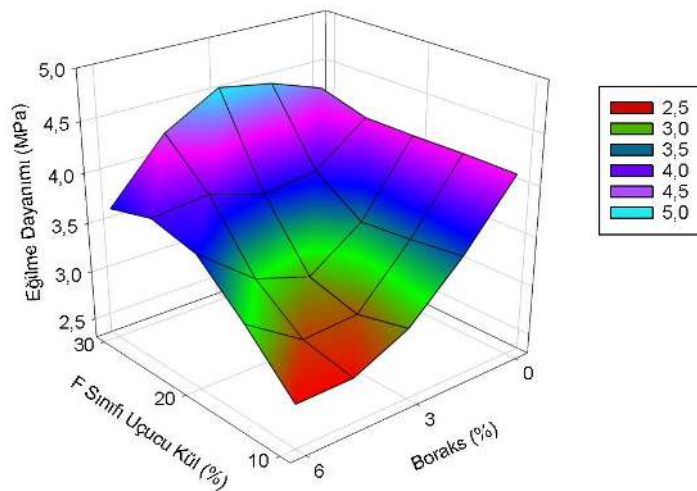
Tablo 3.16. 7 günlük eğilme dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	2,546	2,5463	8,32	0,020	14,48%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	2,240	1,1202	3,66	0,074	12,74%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	2,261	1,1304	3,69	0,073	12,85%
Boraks (%)	2	2,248	1,1242	3,67	0,074	12,78%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	5,845	2,9226	9,54	0,008	33,23%
Hata	8	2,450	0,3062			13,93%
Toplam	17	17,591				100,00%

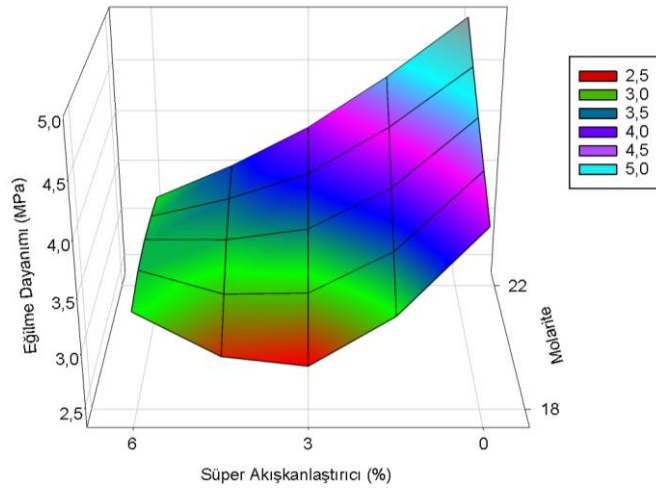
Varyans analizi incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten küçük olan en etkili parametrenin 0,008 P değeri ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülür. İkinci en etkili parametre ise 0,020 P değeri ile molaritedir. Diğer parametrelerin 7 günlük eğilme dayanımı üzerinde daha az etkisi vardır. Aynı durum F etki dereceleri sıralaması için de geçerlidir. F etki değeri en yüksek olan parametre yine süperakışkanlaştırıcıdır. 7 günlük eğilme dayanımına etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %33.23 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin etki oranları birbirine yakın değerler almıştır. 7 günlük eğilme dayanım sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.31 – Şekil 3.33'de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.31. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.32. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.33. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre 7 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişimi gösteren Şekil 3.31 incelendiğinde; 22 molarite ve 0,40 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek 7 günlük eğilme dayanım değerlerinin elde edildiği görülmektedir. 18 molarite ve 0,45 A/B oranında en düşük eğilme dayanım değeri okunmuştur. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre eğilme dayanım değerlerindeki değişim grafiği incelenecek olursa; F sınıfı uçucu kül oranı arttıkça ve boraks miktarı düştükçe eğilme dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek dayanım %30 F sınıfı uçucu kül ve %0 boraks parametre seviyesinde elde edilmiştir. %30 F sınıfı uçucu kül ve %3 boraks seviyesinde de eğilme dayanım değerlerinin yüksek olduğu, ancak %10 F sınıfı uçucu kül ve %6 boraks seviyesinde eğilme dayanımının çok düştüğü görülmektedir. Şekil 3.33'den de anlaşılabacağı üzere; en yüksek eğilme dayanımı 22 molaritede %0 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde elde edilmiştir. En düşük değer ise 18 molarite ve %3 süperakışkanlaştırıcı parametre seviyesinde elde edilmiştir.

28 Günlük Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları Analizi

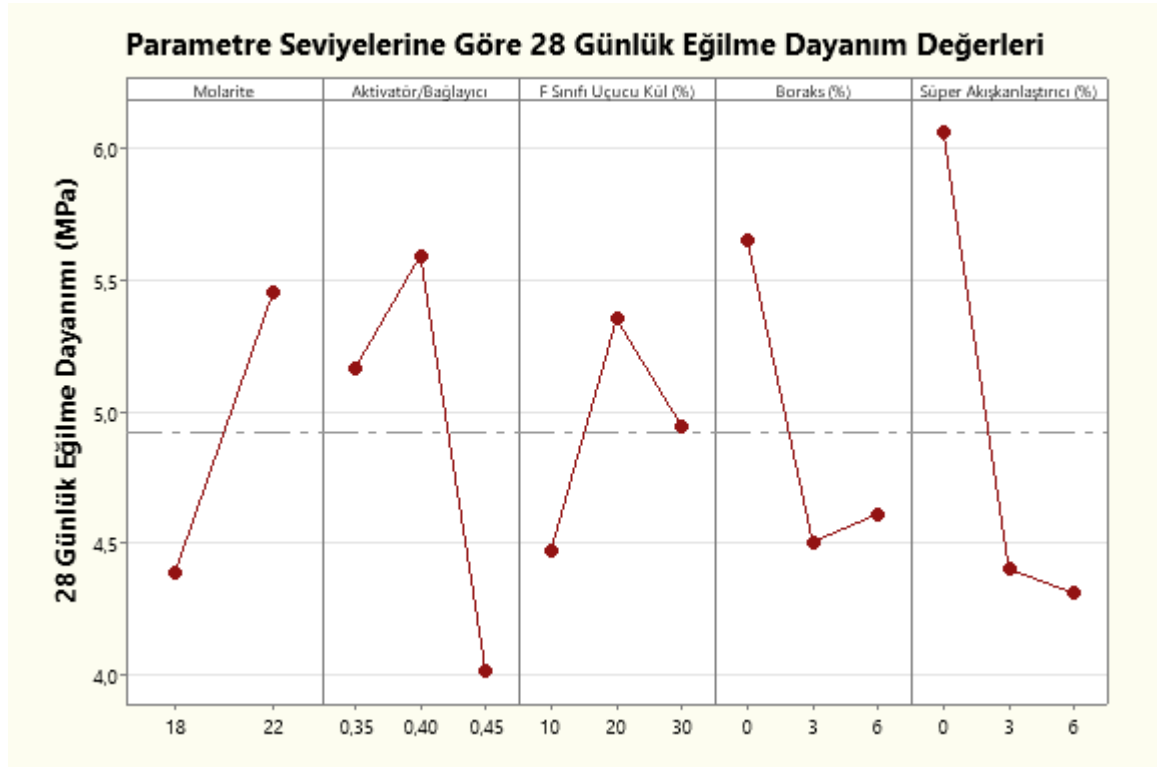
Eğilme dayanım değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların eğilme dayanımının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.7. kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.7.}$$

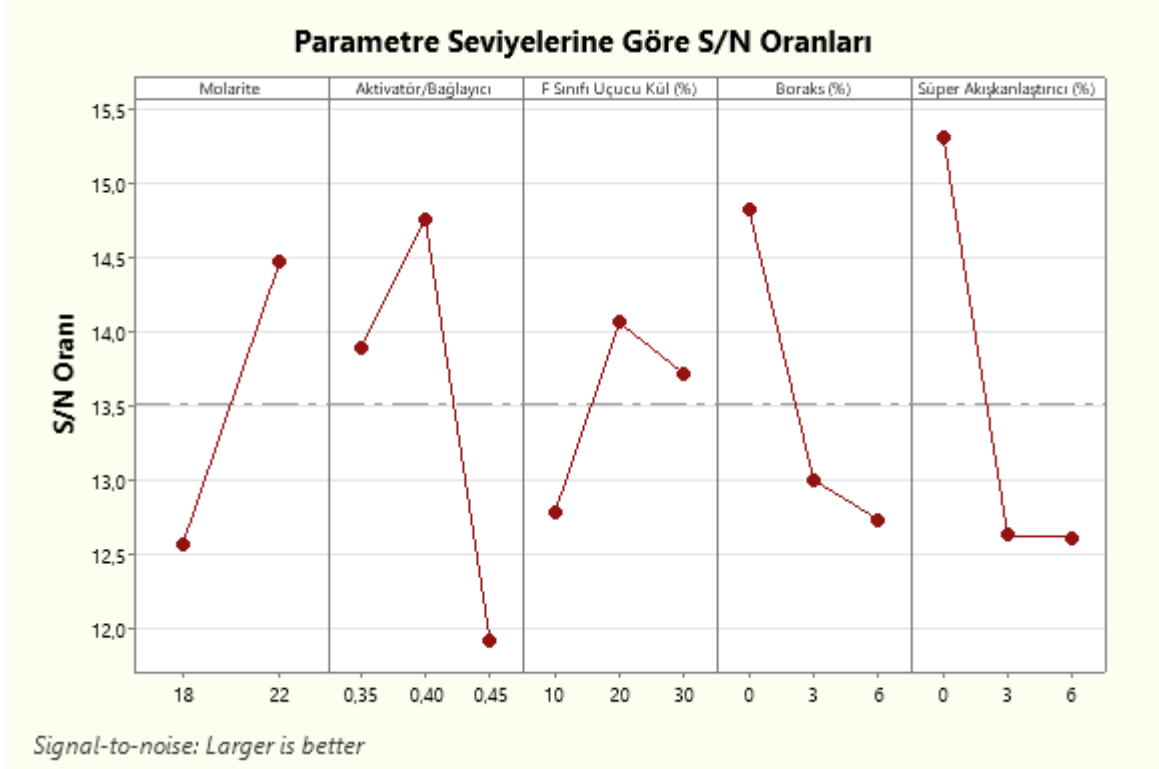
Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük eğilme dayanım değerlerinin S/N oranları Tablo 3.17.'de, parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 3.34. ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.35.'de verilmiştir.

Tablo 3.17. 28 günlük eğilme dayanım değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	6,77	16,61
N2	18	0,35	20	3	3	4,23	12,53
N3	18	0,35	30	6	6	3,44	10,73
N4	18	0,40	10	0	3	4,17	12,40
N5	18	0,40	20	3	6	4,53	13,12
N6	18	0,40	30	6	0	5,92	15,45
N7	18	0,45	10	3	0	3,42	10,68
N8	18	0,45	20	6	3	2,87	9,16
N9	18	0,45	30	0	6	4,19	12,44
N10	22	0,35	10	6	6	3,78	11,55
N11	22	0,35	20	0	0	7,60	17,62
N12	22	0,35	30	3	3	5,17	14,27
N13	22	0,40	10	3	6	4,91	13,82
N14	22	0,40	20	6	0	7,86	17,91
N15	22	0,40	30	0	3	6,17	15,81
N16	22	0,45	10	6	3	3,81	11,62
N17	22	0,45	20	0	6	5,02	14,01
N18	22	0,45	30	3	0	4,78	13,59



Şekil 3.34. Parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerleri



Şekil 3.35. Parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanımının S/N oranları

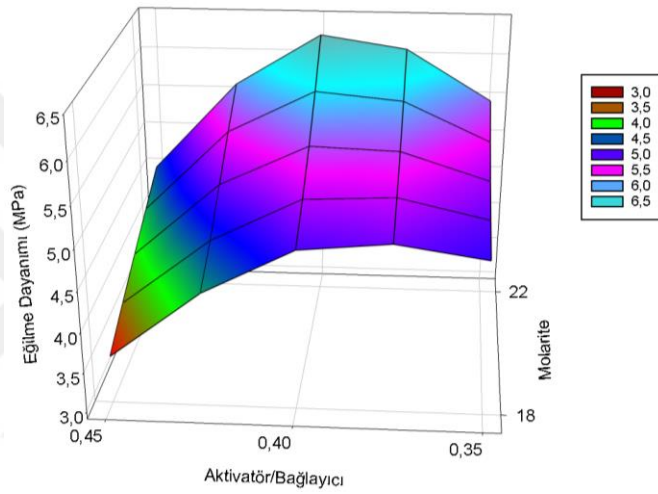
Parametre seviyelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerleri ve S/N oranı yanıt grafiği incelendiğinde; 28 günlük eğilme dayanımının en iyi olduğu değerlerin; 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40, F sınıfı uçucu külün %20, boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 28 günlük eğilme dayanımının optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu Varyans analizi etki değerleri dikkate alınarak; 22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül, %0 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı ile N15'dir. 28 günlük eğilme dayanımına deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.18. 28 günlük eğilme dayanım değerleri için varyans analizi sonuçları

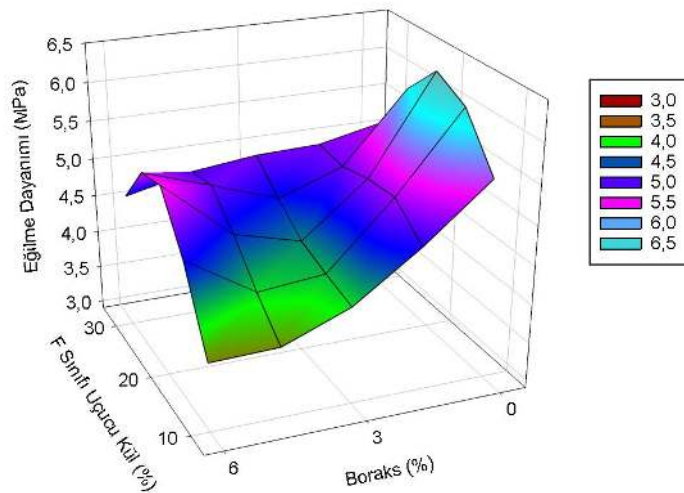
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	5,077	5,0774	13,47	0,006	14,59%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	7,994	3,9971	10,60	0,006	22,97%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	2,301	1,1503	3,05	0,104	6,61%
Boraks (%)	2	4,816	2,4078	6,39	0,022	13,84%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	11,597	5,7983	15,38	0,002	33,32%
Hata	8	3,017	0,3771			8,67%
Toplam	17	34,801				100,00%

Varyans analizi incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten küçük olan en etkili parametrelerin 0,002 P değeri ile süperakışkanlaştırıcı ve 0,006 P değeri ile molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametreleri olduğu görülür. Boraksın da 0,022 P değeri ile 28 günlük eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. F sınıfı uçucu külün ise 28 günlük eğilme dayanıma bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. F etki derecelerine göre süperakışkanlaştırıcı birinci sırada yer almaktadır. İkinci sırada etkili olan parametre ise molaritedir. Parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %33,32 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Etki oranı en az olan parametre ise %6,61 ile F sınıfı uçucu küldür.

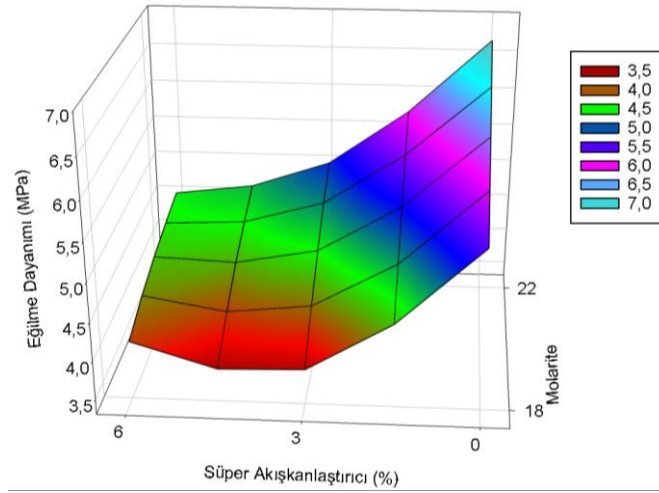
28 günlük eğilme dayanım sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.36 – Şekil 3.38’de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.36. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.37. F sınıfı uçucu kül ve boraks parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim



Şekil 3.38. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre 28 günlük eğilme dayanım değerlerindeki değişimi gösteren Şekil 3.36 incelendiğinde; 22 molarite ve 0,40 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek 28 günlük eğilme dayanım değerlerinin elde edildiği görülmektedir. 18 molarite ve 0,45 A/B oranında en düşük eğilme dayanım değeri okunmuştur. Şekil 3.37 incelenecek olursa; F sınıfı uçucu kül oranı arttıkça ve boraks miktarı azaldıkça eğilme dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Eğilme dayanımının en yüksek olduğu seviyeler %20 F sınıfı uçucu kül ile %0 boraks ve %20 F sınıfı uçucu kül ile %6 boraks seviyelerinde elde edilmiştir. Şekil 3.38'den de anlaşılabileceği üzere; en yüksek eğilme dayanımı 22 molaritede %0 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde elde edilmiştir. En düşük değer ise 18 molarite ve %3 - %6 süperakışkanlaştırıcı parametre seviyesinde elde edilmiştir.

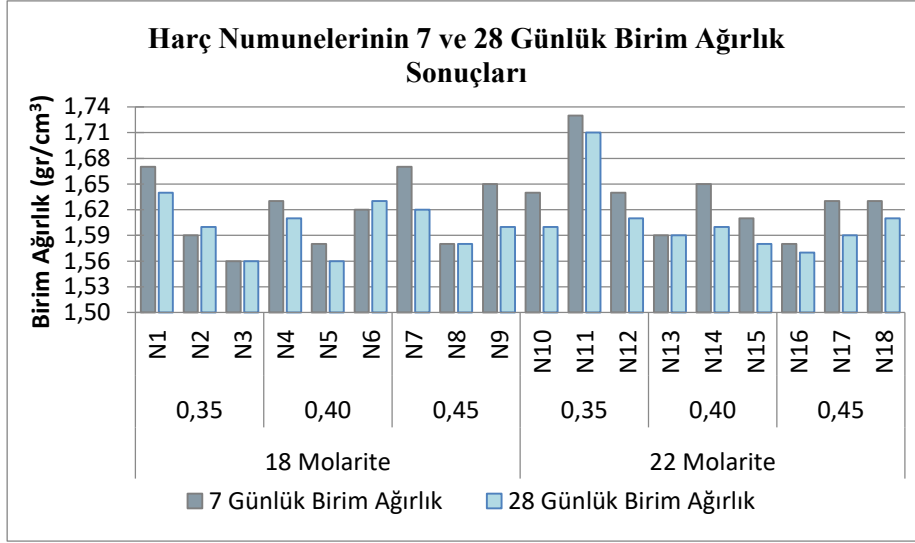
7 ve 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarının taguchi metoduyla analizine göre; boraks ve süperakışkanlaştırıcı işlenebilirliği ve priz süresini olumlu yönde etkilemesine rağmen, eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Eğilme dayanım deneyi için boraks ve süperakışkanlaştırıcının optimum değeri basınç dayanımında olduğu gibi %0'dır. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu ise N15'dir. Literatürdeki diğer çalışmalar değerlendirilecek olursa, bu tez çalışmasında elde edilen eğilme dayanım değerlerinin cam lifi kullanılan karışımlara yakın hatta bazı durumlarda daha iyi sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır [5]. Bu durum boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkısının eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı bilgisine ulaştırır.

3.2.3. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Üretilen alkali aktive edilmiş 5x5x5 cm boyutundaki üçer adet küp numuneler 90 °C aktivasyon sıcaklığında 24 saat bekletilmiş ve laboratuvar ortamında kür edilmiştir. 7 ve 28 günlük kür süreleri ardından kuru birim ağırlıkları, 24 saat suda bekletilmiş doygun yüzey kuru ağırlıkları ve Arşimet terazisi yardımıyla sudaki ağırlıkları belirlenmiş ve 18 seri için ortalama birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Yapılan birim ağırlık deney sonuçları Tablo 3.19 ve Şekil 3.39’da verilmiştir.

Tablo 3.19. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük birim ağırlık değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	7 Günlük Birim Ağırlık Sonuçları (g/cm ³)	28 Günlük Birim Ağırlık Sonuçları (g/cm ³)
N1	18	0,35	90	10	0	0	1,67	1,64
N2			80	20	3	3	1,59	1,60
N3			70	30	6	6	1,56	1,56
N4			90	10	0	3	1,63	1,61
N5		0,4	80	20	3	6	1,58	1,56
N6			70	30	6	0	1,62	1,63
N7			90	10	3	0	1,67	1,62
N8			80	20	6	3	1,58	1,58
N9		0,45	70	30	0	6	1,65	1,60
N10			90	10	6	6	1,64	1,60
N11	22	0,35	80	20	0	0	1,73	1,71
N12			70	30	3	3	1,64	1,61
N13			90	10	3	6	1,59	1,59
N14			80	20	6	0	1,65	1,60
N15		0,4	70	30	0	3	1,61	1,58
N16			90	10	6	3	1,58	1,57
N17			80	20	0	6	1,63	1,59
N18			70	30	3	0	1,63	1,61



Şekil 3.39. Alkali Aktive Edilmiş Harç Numunelerinin 7 ve 28 Günlük Birim Ağırlık Değerleri

7 Günlük Birim Ağırlık Deney Sonuçları Analizi

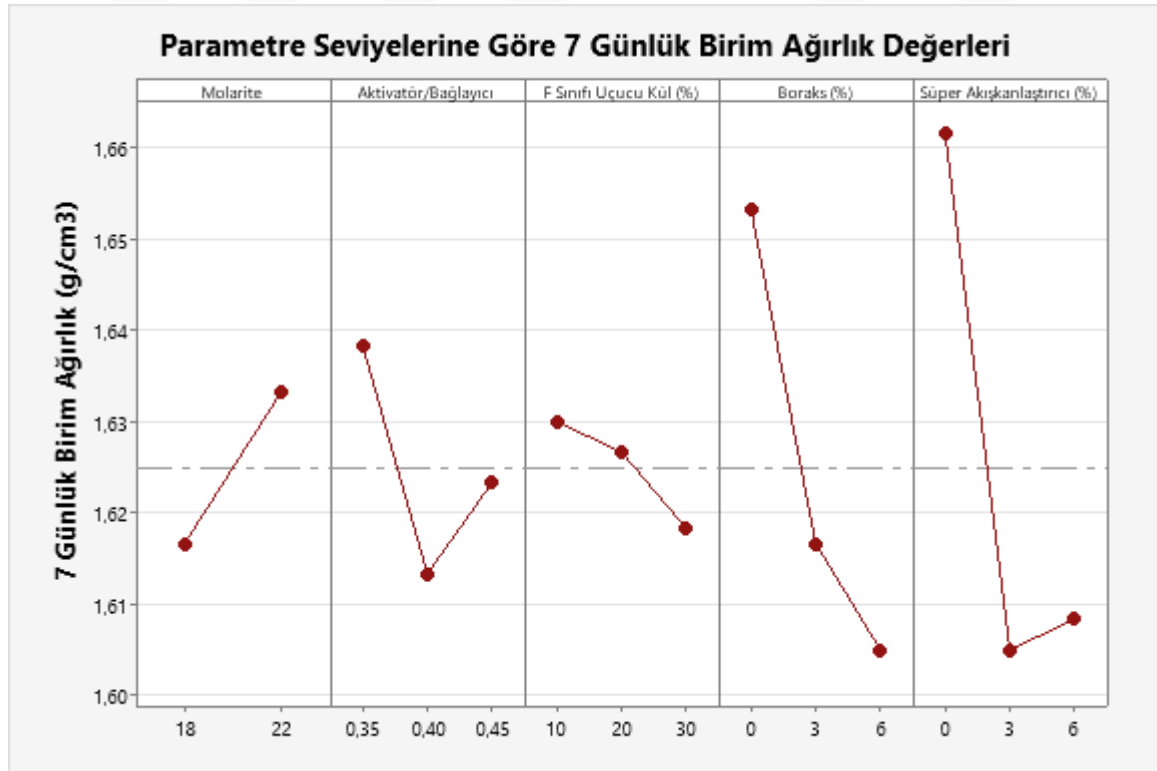
Birim ağırlık değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların birim ağırlıklarının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.8. kullanılmıştır.

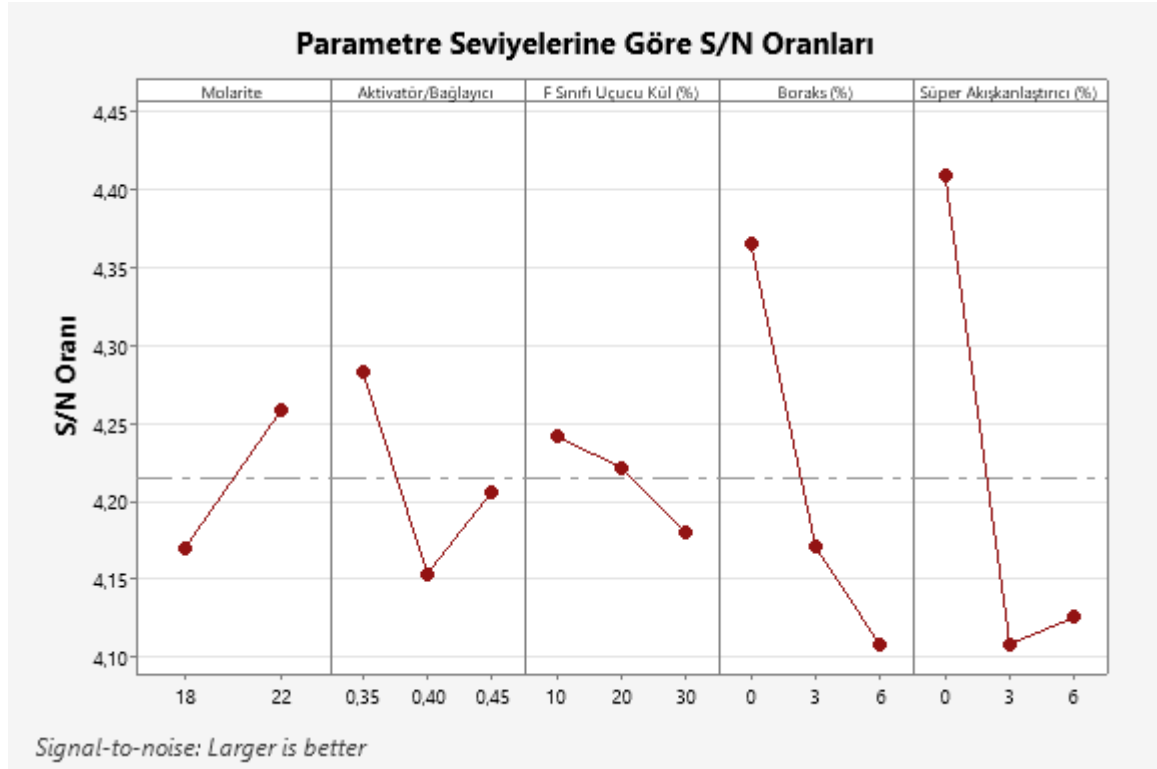
$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.8.}$$

Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük birim ağırlık değerlerinin S/N oranları Tablo 3.20’de, parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerleri Şekil 3.40. ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.41.’de verilmiştir.

Tablo 3.20. 7 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					7 Günlük Birim Ağırlık Değerleri (g/cm ³)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	1,67	4,45
N2	18	0,35	20	3	3	1,59	4,03
N3	18	0,35	30	6	6	1,56	3,86
N4	18	0,40	10	0	3	1,63	4,24
N5	18	0,40	20	3	6	1,58	3,97
N6	18	0,40	30	6	0	1,62	4,19
N7	18	0,45	10	3	0	1,67	4,45
N8	18	0,45	20	6	3	1,58	3,97
N9	18	0,45	30	0	6	1,65	4,35
N10	22	0,35	10	6	6	1,64	4,30
N11	22	0,35	20	0	0	1,73	4,76
N12	22	0,35	30	3	3	1,64	4,30
N13	22	0,40	10	3	6	1,59	4,03
N14	22	0,40	20	6	0	1,65	4,35
N15	22	0,40	30	0	3	1,61	4,14
N16	22	0,45	10	6	3	1,58	3,97
N17	22	0,45	20	0	6	1,63	4,24
N18	22	0,45	30	3	0	1,63	4,24

**Şekil 3.40.** Parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerleri



Şekil 3.41. Parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerinin S/N oranları

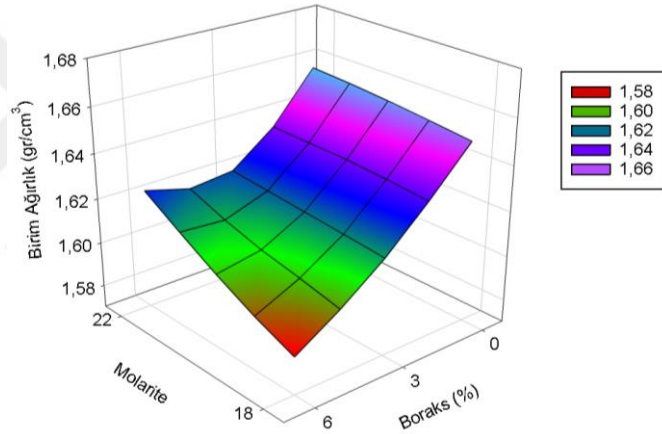
Parametre seviyelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve birim ağırlıkların en iyi olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, F sınıfı uçucu külün %10, boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 7 günlük birim ağırlık değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 22 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N11'dir. 7 günlük birim ağırlık sonuçlarına deney parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Varyans analizi yapılmış ve veriler Tablo 3.21'de sunulmuştur.

Tablo 3.21. 7 günlük birim ağırlık değerleri için varyans analizi sonuçları

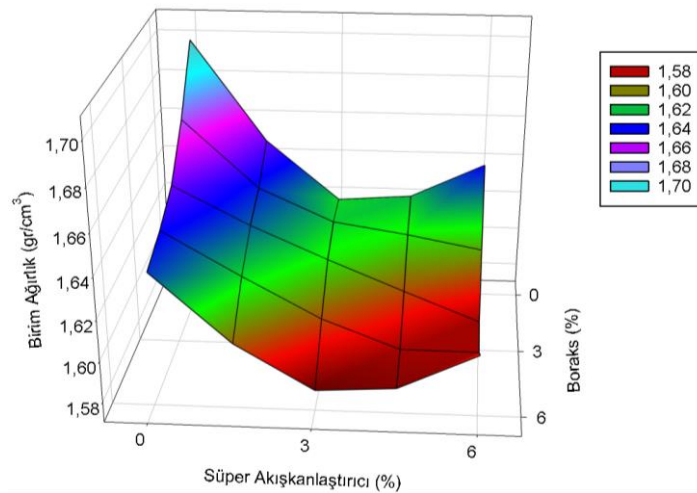
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,001250	0,001250	1,54	0,250	4,19%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,001900	0,000950	1,17	0,359	6,37%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	0,000433	0,000217	0,27	0,772	1,45%
Boraks (%)	2	0,007633	0,003817	4,70	0,045	25,57%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	0,012133	0,006067	7,47	0,015	40,65%
Hata	8	0,006500	0,000812			21,78%
Toplam	17	0,029850				100,00%

Varyans analizi çıktısı incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten küçük olan parametre 0,015 P değeri ile süperakışkanlaştırıcıdır ve 7 günlük birim ağırlık sonuçları üzerinde en etkili parametredir. Boraksın P değeri ise 0,045'dir ve anlamlıdır, bu sebeple boraksın da birim ağırlık değerlerine önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir. Diğer parametreler ise birim ağırlık üzerinde etkili değildir veya daha az etkilidir denebilir. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında süperakışkanlaştırıcının 7.47 ile en etkili parametre olduğu görülür. Boraks ise 4.70 etki değeri ile ikinci sırada yer almaktadır. Diğer parametrelerin etki dereceleri oldukça azdır ve P değerleri ile aynı sıralamada yer alır. 7 günlük birim ağırlık değerlerine etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %40.65 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu ve Boraksın etki oranının %25.57 olduğu görülmektedir. F sınıfı uçucu kül ise %1.45 ile etkisi en az olan parametredir.

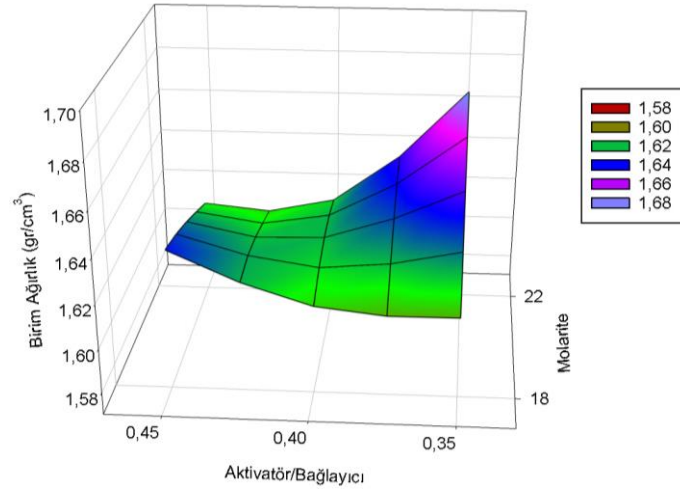
7 günlük birim ağırlık sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.42. – Şekil 3.44.'de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.42. Molarite ve boraks parametrelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim



Şekil 3.43. Boraks ve süperskişkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük değerlerdeki değişim



Şekil 3.44. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim

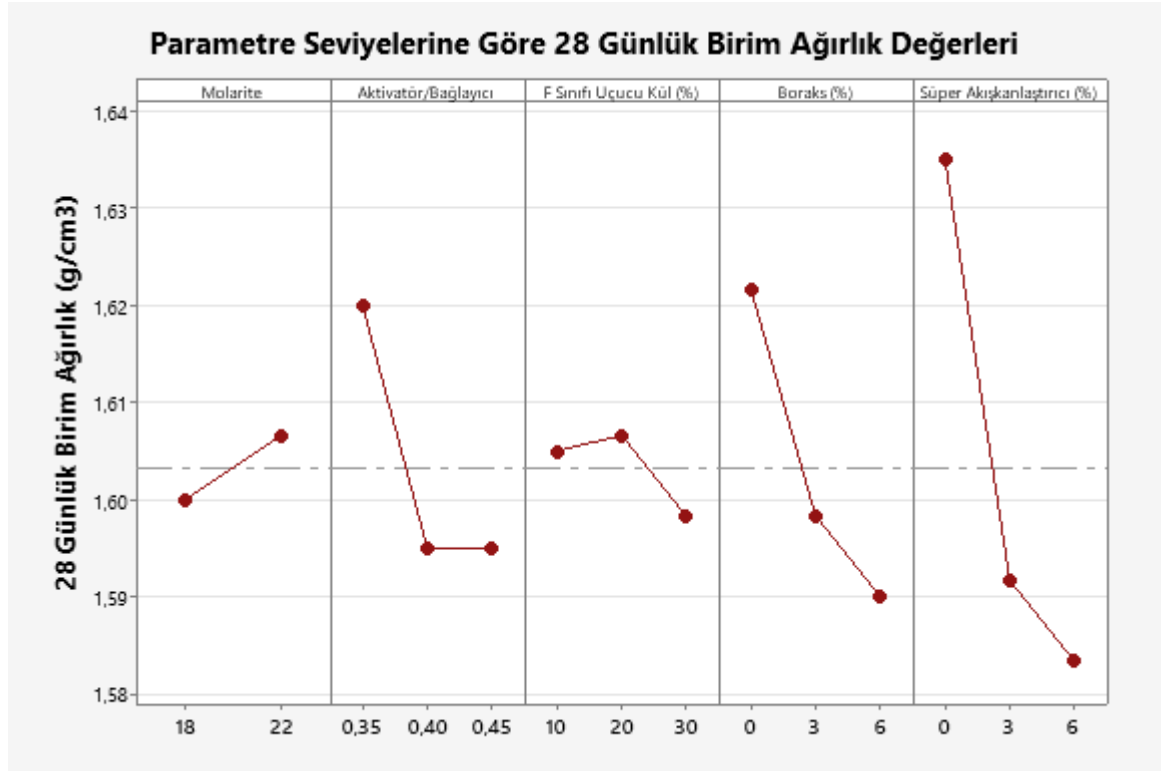
Deney parametrelerine göre 7 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişimi gösteren Şekil 3.42 incelendiğinde; 22 molarite ve %0 boraks seviyesinde en yüksek 7 günlük birim ağırlık değeri ve 18 molarite ile %6 boraks parametresinde en düşük değer elde edilmiştir. Şekil 3.43 incelenecek olursa; boraks ve süperakışkanlaştırıcı oranı %0 iken en yüksek değer, her iki oran %6 iken en düşük birim ağırlık değeri okunmuştur. Bu durumda katkı oranı arttıkça birim ağırlık değerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Şekil 3.44'dan da anlaşılabacağı üzere; 22 molarite ve 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek birim ağırlık değeri okunmuştur.

28 Günlük Birim Ağırlık Deney Sonuçları Analizi

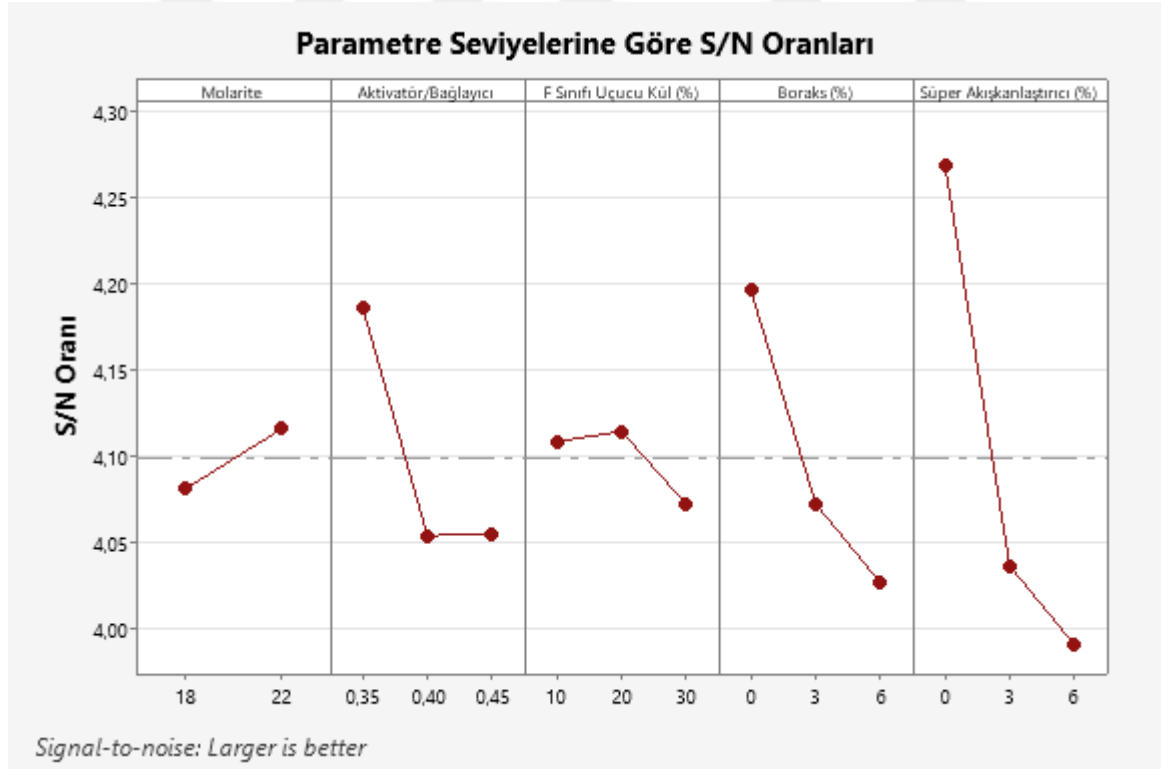
Birim ağırlık değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harçların birim ağırlıklarının yüksek olması istendiğinden en büyük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.9 kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.9.}$$

Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük birim ağırlık değerlerinin parametre seviyeleri Şekil 3.45 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.46'da verilmiştir. 28 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları Tablo 3.22'de sunulmuştur.



Şekil 3.45. Parametre seviyelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerleri



Şekil 3.46. Parametre seviyelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerinin S/N oranları

Tablo 3.22. 28 günlük birim ağırlık değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük Birim Ağırlık Değerleri (g/cm ³)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	1,64	4,30
N2	18	0,35	20	3	3	1,60	4,08
N3	18	0,35	30	6	6	1,56	3,86
N4	18	0,40	10	0	3	1,61	4,14
N5	18	0,40	20	3	6	1,56	3,86
N6	18	0,40	30	6	0	1,63	4,24
N7	18	0,45	10	3	0	1,62	4,19
N8	18	0,45	20	6	3	1,58	3,97
N9	18	0,45	30	0	6	1,60	4,08
N10	22	0,35	10	6	6	1,60	4,08
N11	22	0,35	20	0	0	1,71	4,66
N12	22	0,35	30	3	3	1,61	4,14
N13	22	0,40	10	3	6	1,59	4,03
N14	22	0,40	20	6	0	1,60	4,08
N15	22	0,40	30	0	3	1,58	3,97
N16	22	0,45	10	6	3	1,57	3,92
N17	22	0,45	20	0	6	1,59	4,03
N18	22	0,45	30	3	0	1,61	4,14

Birim ağırlık değerleri ve S/N oranının yanıt grafiği incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve 28 günlük birim ağırlıkların en iyi olduğu değerlerin 22 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, F sınıfı uçucu külün %20, boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 28 günlük birim ağırlık değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerleri sağlayan deney kombinasyonu; 22 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N11'dir.

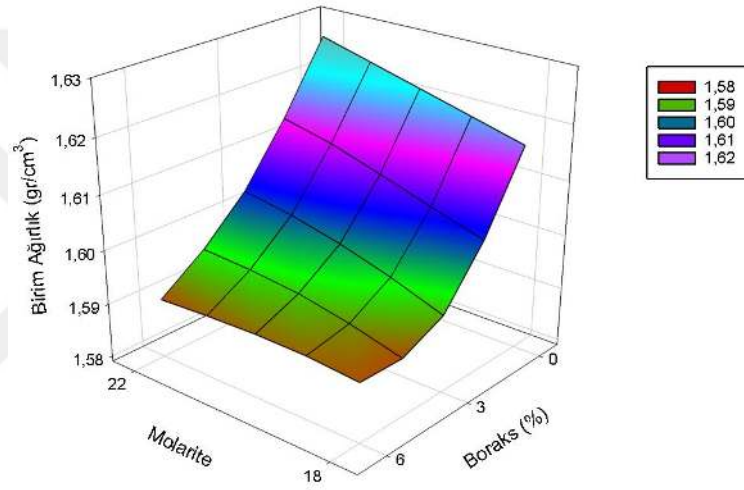
28 günlük birim ağırlık değerlerinin Varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 3.23.'te sunulmuştur.

Tablo 3.23. 28 günlük birim ağırlık değerleri için varyans analizi sonuçları

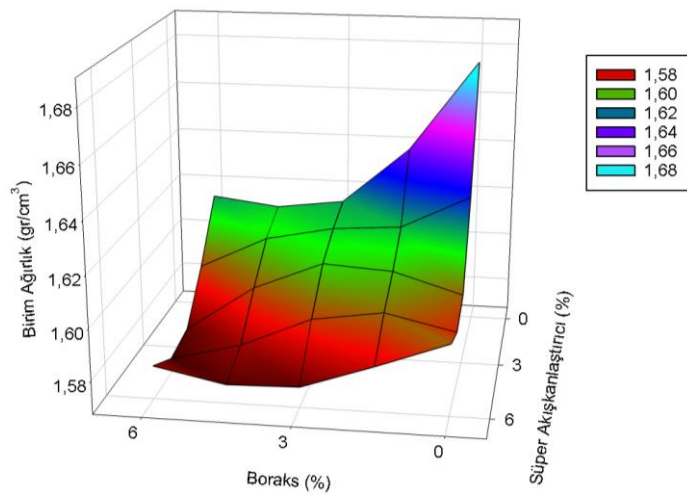
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,000200	0,000200	0,33	0,580	0,99%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,002500	0,001250	2,08	0,187	12,38%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	0,000233	0,000117	0,19	0,827	1,16%
Boraks (%)	2	0,003233	0,001617	2,69	0,127	16,01%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	0,009233	0,004617	7,69	0,014	45,71%
Hata	8	0,004800	0,000600			23,76%
Toplam	17	0,020200				100,00%

Varyans analizi sonuçları incelenecek olursa; P değeri 0,05'ten küçük olan en etkili parametrenin 0,014 P değeri ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin P değerleri 0,05'ten büyüktür ve 28 günlük birim ağırlık üzerinde etkileri yoktur yada çok az etkilidir denebilir. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında süperakışkanlaştırıcının 7.69 ile en etkili parametre olduğu görülür. Etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %45.71 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu ve etkisi en az olan parametrenin %0.99 ile molarite olduğu görülmektedir. F sınıfı uçucu kül ise %1.16 ile molariteden sonra etki oranı en az olan parametredir.

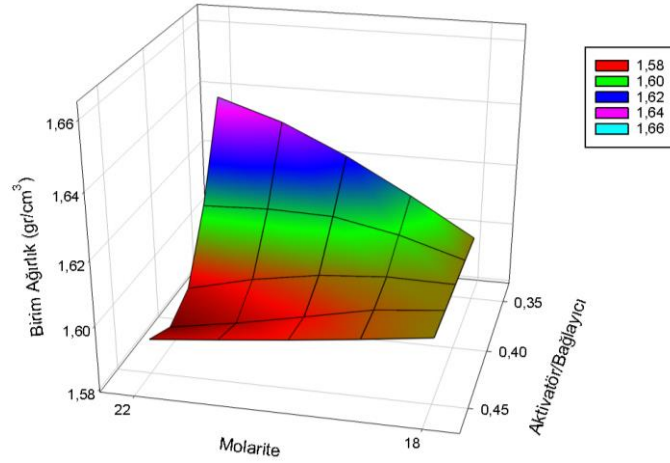
28 günlük birim ağırlık sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.47 – Şekil 3.49'da verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.47. Molarite ve boraks parametrelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim



Şekil 3.48. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük değerlerdeki değişim



Şekil 3.49. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre 28 günlük birim ağırlık değerlerindeki değişimi gösteren Şekil 3.47 incelendiğinde; 22 molarite ve %0 boraks seviyesinde en yüksek 28 günlük birim ağırlık değeri elde edilmiştir. 18 ve 22 molaritede %6 boraks parametresinde birim ağırlık değerleri düşmüştür. Şekil 3.48 incelenecek olursa; boraks ve süperakışkanlaştırıcı oranı %0 iken en yüksek değer, her iki oran %6 iken en düşük birim ağırlık değeri okunmuştur. Bu durumda katkı oranı arttıkça birim ağırlık değerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Şekil 3.49'dan da anlaşılabileceği üzere; 22 molarite ve 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek birim ağırlık değeri okunmuştur.

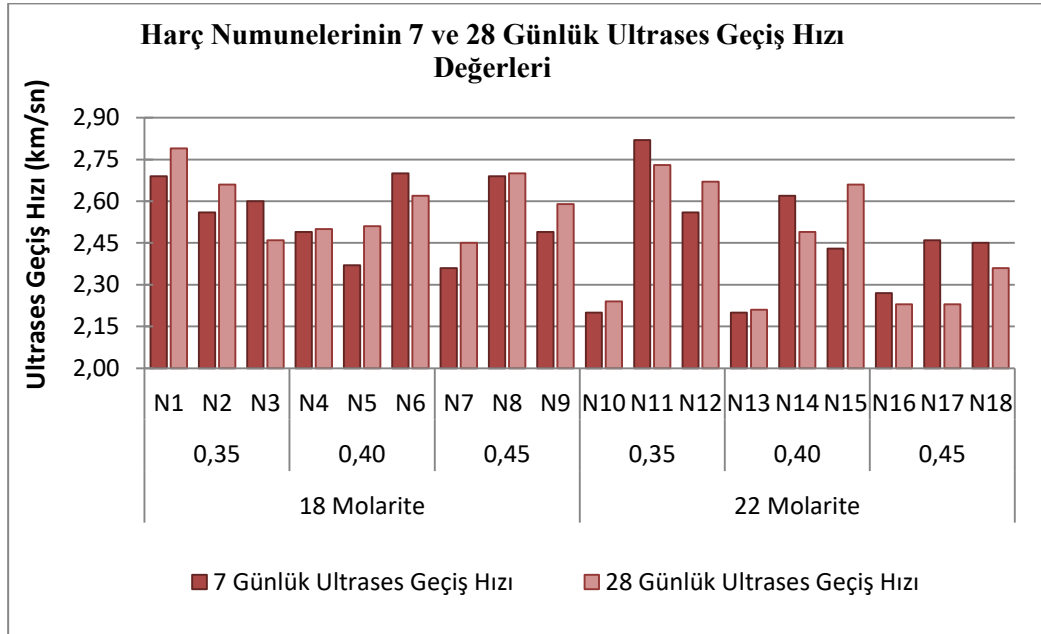
7 ve 28 günlük birim ağırlık değerlerine göre; süperakışkanlaştırıcının %0 optimum değeri ile birim ağırlık deneyi üzerinde %40-45 gibi büyük bir oranda etkili olduğu görülmektedir. Boraksın optimum değeri basınç ve eğilme dayanımında olduğu gibi 7 ve 28 günlük birim ağırlık deneyinde de %0'dır. Anlaşılabileceği üzere; harcın yayılmasını ve priz süresini olumlu yönde etkileyen boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları, birim ağırlık deneyi üzerinde olumlu bir etki sağlamamıştır ve her iki katkının kullanılmadığı N11 serisi en iyi birim ağırlık sonuçlarını vermiştir. Birçok serinin 28 günlük birim ağırlık değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere göre daha fazla su kaybetmesidir.

3.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Farklı oranlarda Elazığ ferrokrom cürufu, F sınıfı uçucu kül, süperakışkanlaştırıcı ve boraks katkılı alkali aktive edilmiş harç numunelerinin ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyi için altı adet 5x5x5 cm boyutlarında harç numuneleri hazırlanmış ve 7 ve 28 günlük süre sonunda ölçümleri yapılmıştır. 7 ve 28 günlük üçer adet numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinin ortalaması Tablo 3.24. ve Şekil 3.50.'de sunulmuştur.

Tablo 3.24. Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	7 Günlük Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)
N1	18	0,35	90	10	0	0	2,69	2,79
N2			80	20	3	3	2,56	2,66
N3			70	30	6	6	2,60	2,46
N4		0,4	90	10	0	3	2,49	2,50
N5			80	20	3	6	2,37	2,51
N6			70	30	6	0	2,70	2,62
N7		0,45	90	10	3	0	2,36	2,45
N8			80	20	6	3	2,69	2,70
N9			70	30	0	6	2,49	2,59
N10		22	0,35	90	10	6	6	2,20
N11	80			20	0	0	2,82	2,73
N12	70			30	3	3	2,56	2,67
N13	0,4		90	10	3	6	2,20	2,21
N14			80	20	6	0	2,62	2,49
N15			70	30	0	3	2,43	2,66
N16	0,45		90	10	6	3	2,27	2,23
N17			80	20	0	6	2,46	2,23
N18		70	30	3	0	2,45	2,36	



Şekil 3.50. Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri

7 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçlarının Analizi

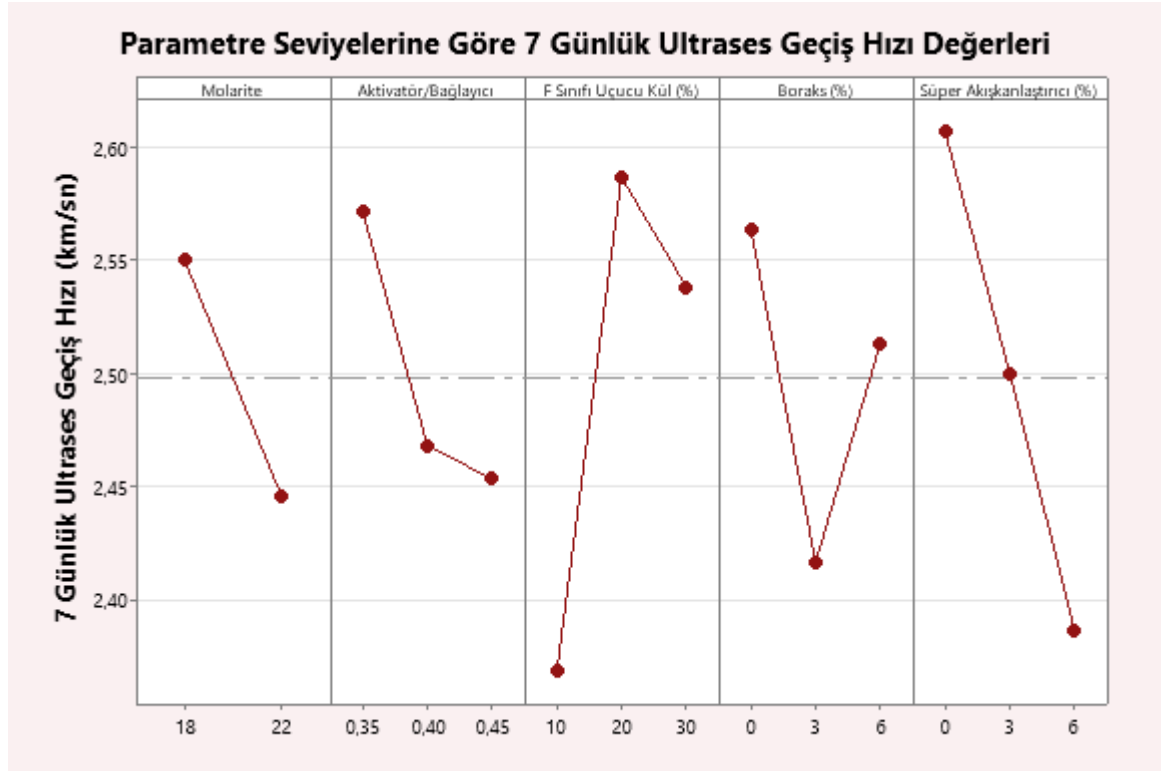
Ultrases geçiş hızı arttıkça harcın kalitesi arttığından taguchi yöntemiyle S/N oranları hesaplanırken en büyük - en iyi durumu dikkate alınarak denklem 3.10 kullanılmıştır.

$$\text{En Büyük - En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.10.}$$

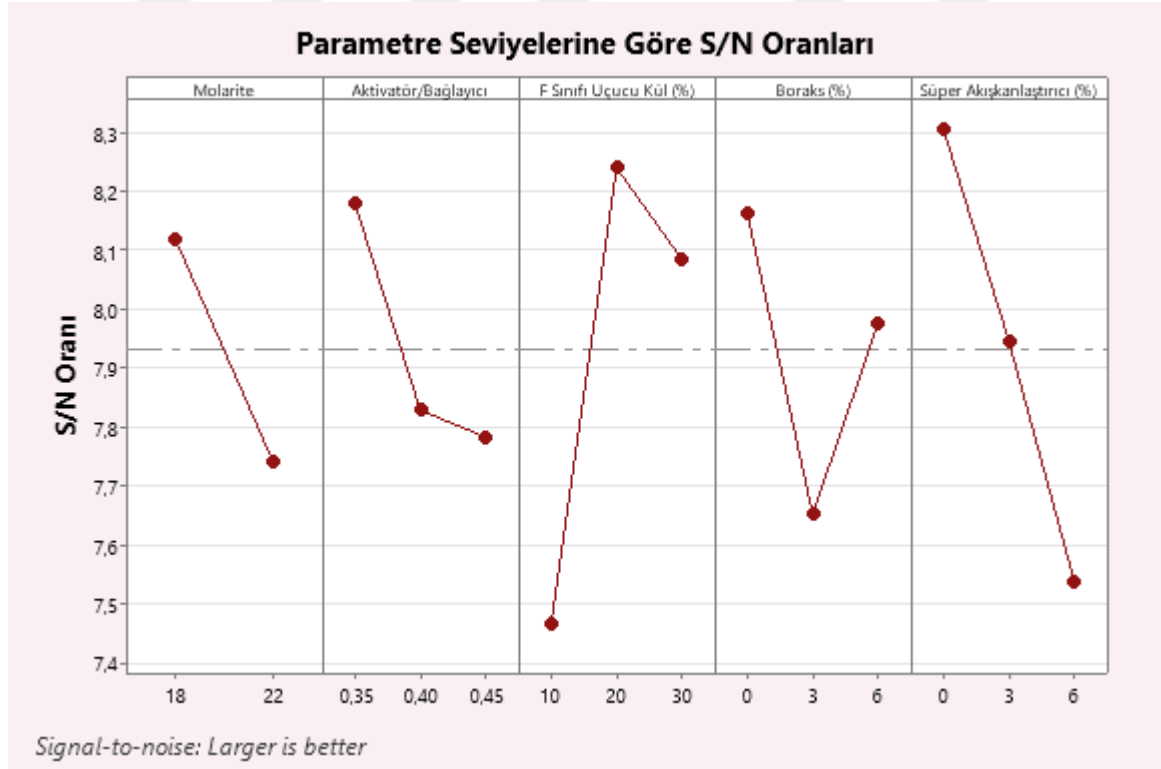
Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının S/N oranları Tablo 3.25’de, parametre seviyelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 3.51 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.52’de verilmiştir.

Tablo 3.25. 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					7 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (km/sn)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	2,69	8,60
N2	18	0,35	20	3	3	2,56	8,16
N3	18	0,35	30	6	6	2,60	8,30
N4	18	0,40	10	0	3	2,49	7,92
N5	18	0,40	20	3	6	2,37	7,49
N6	18	0,40	30	6	0	2,70	8,63
N7	18	0,45	10	3	0	2,36	7,46
N8	18	0,45	20	6	3	2,69	8,60
N9	18	0,45	30	0	6	2,49	7,92
N10	22	0,35	10	6	6	2,20	6,85
N11	22	0,35	20	0	0	2,82	9,00
N12	22	0,35	30	3	3	2,56	8,16
N13	22	0,40	10	3	6	2,20	6,85
N14	22	0,40	20	6	0	2,62	8,37
N15	22	0,40	30	0	3	2,43	7,71
N16	22	0,45	10	6	3	2,27	7,12
N17	22	0,45	20	0	6	2,46	7,82
N18	22	0,45	30	3	0	2,45	7,78



Şekil 3.51. Parametre seviyelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 3.52. Parametre seviyelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin S/N oranları

Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin en iyi olduğu parametre seviyelerinin 18 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, F sınıfı uçucu kül %20, boraks %0 ve süperakışkanlaştırıcı %0 iken elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 22 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı oranı, %20 F sınıfı uçucu kül, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N11'dir. Varyans analizine göre en etkili parametre F sınıfı uçucu kül olduğundan optimum değeri veren %20 seviyesinde bir değişikliğe gidilmemiş, bunun yerine etkisi çok az olan molaritenin parametre seviyesi değiştirilerek 18 molarite uygun değer olarak seçilmiştir. Böylece N11 serisi optimum değerleri veren en yakın deney kombinasyonu olarak kabul edilmiştir.

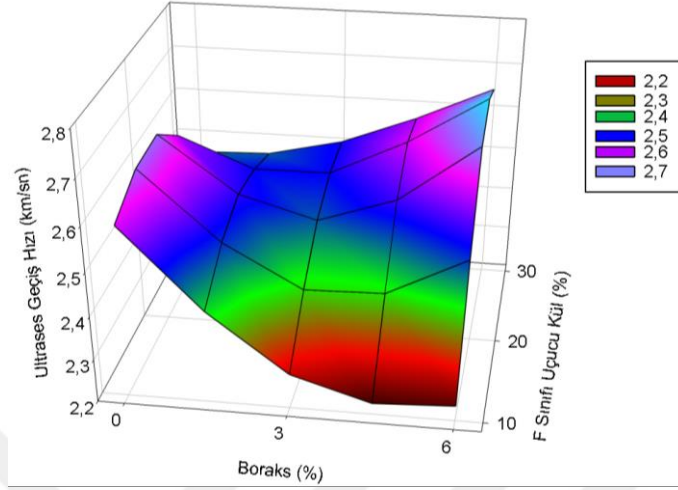
7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin Varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 3.26'da sunulmuştur.

Tablo 3.26. 7 günlük ultrases geçiş hızı değerleri için varyans analizi sonuçları

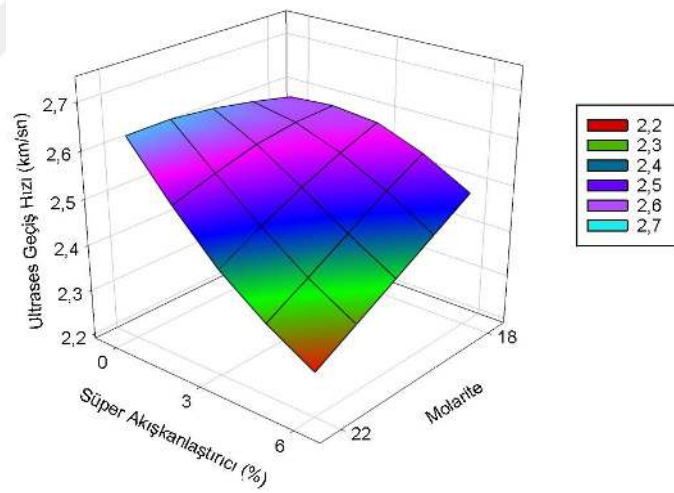
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,04909	0,049089	7,01	0,029	9,36%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,04981	0,024906	3,56	0,079	9,49%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	0,15781	0,078906	11,26	0,005	30,08%
Boraks (%)	2	0,06671	0,033356	4,76	0,043	12,71%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	0,14524	0,072622	10,37	0,006	27,68%
Hata	8	0,05604	0,007006			10,68%
Toplam	17	0,52471				100,00%

Varyans analizine göre; P değeri 0,05'ten küçük olan en etkili parametrenin 0,005 P değeri ile F sınıfı uçucu kül olduğu ve bunun yanı sıra aktivatör/bağlayıcı dışındaki tüm parametrelerin 0,05'ten küçük P değerleri ile ultrases geçiş hızı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. aktivatör/bağlayıcı parametresinin 0.079 P değeri ile ultrases geçiş hızı üzerinde etkisi yoktur yada çok azdır. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre; F sınıfı uçucu kül 11.26, süperakışkanlaştırıcı 10.37, molarite 7.01, boraks 4.76, aktivatör/bağlayıcı 3.56 şeklinde sıralanır. Bu verilere göre ultrases geçiş hızı üzerindeki en etkili parametrenin F sınıfı uçucu kül olduğu söylenebilir. 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerine göre etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; en etkili parametrenin %30.08 ile F sınıfı uçucu kül olduğu ve etkisi en az olan parametrenin %9.36 ile molarite olduğu görülmektedir. Molariteden sonra etki

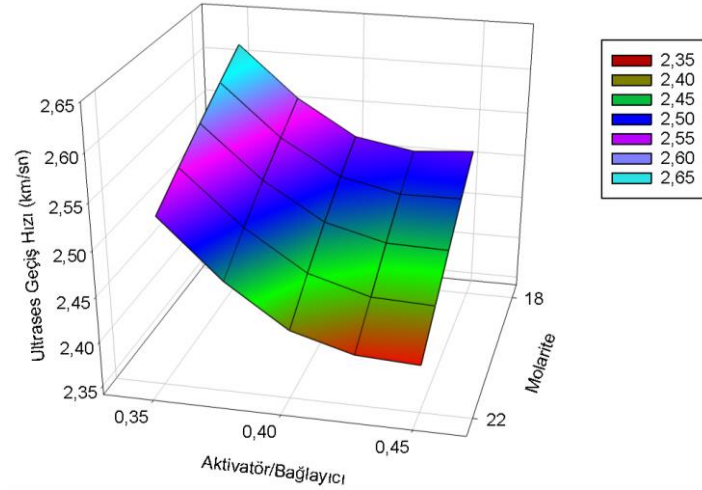
oranı en az olan bir diğer parametre %9.49 etki oranı ile aktivatör/bağlayıcıdır. 7 günlük ultrases geçiş hızı sonuçlarının parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 3.53 – Şekil 3.55’de verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



Şekil 3.53. Boraks ve F sınıfı uçucu kül parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim



Şekil 3.54. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim



Şekil 3.55. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 7 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim

Deney parametrelerine göre ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişiminin verildiği Şekil 3.53 incelendiğinde; en düşük ultrases geçiş hızı değerinin %10 F sınıfı uçucu kül ve %6 boraks seviyelerinde elde edildiği görülmektedir. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre ultrases geçiş hızı değerindeki değişim grafiğine göre; 22 molarite ve %6 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde en düşük ultrases geçiş hızı değeri elde edilirken en yüksek değer 22 molaritede %0 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde elde edildiği tespit edilmiştir. Şekil 3.55'e göre 22 molaritede 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında en düşük ultrases geçiş hızı değerleri elde edilirken en yüksek değer 18 molaritede 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında olmuştur.

28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçlarının Analizi

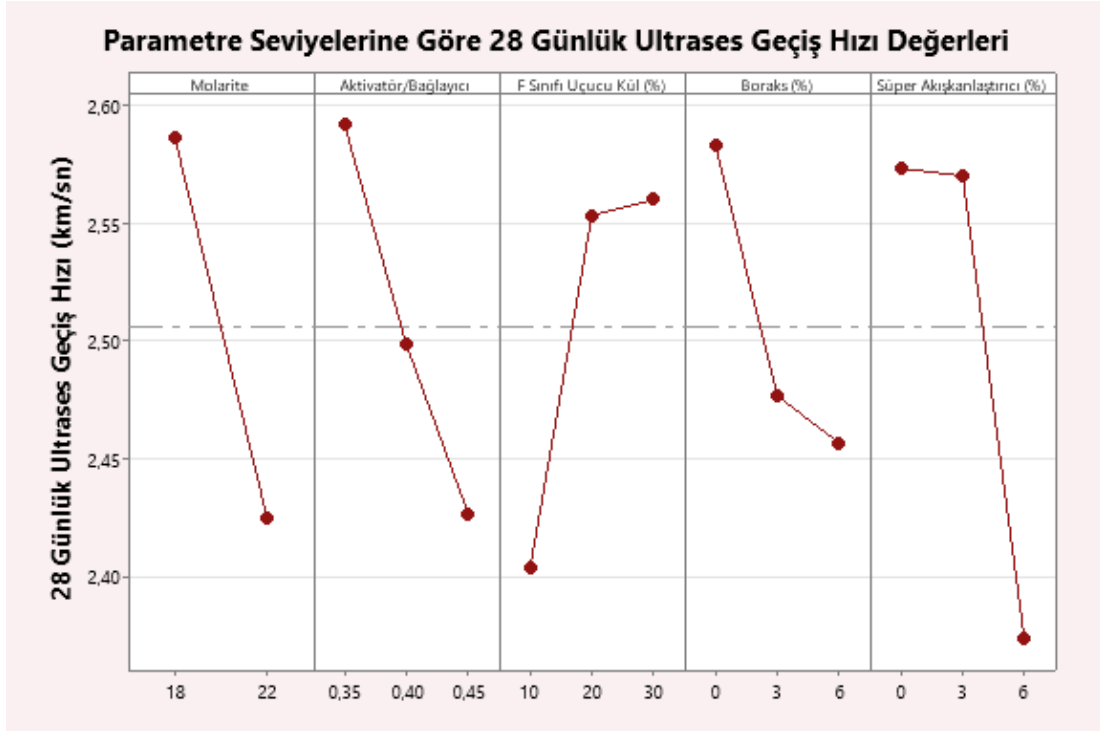
Ultrases geçiş hızı arttıkça harcın kalitesi arttığından, taguchi yöntemiyle S/N oranları hesaplanırken en büyük - en iyi durumu dikkate alınarak denklem 3.11 kullanılmıştır.

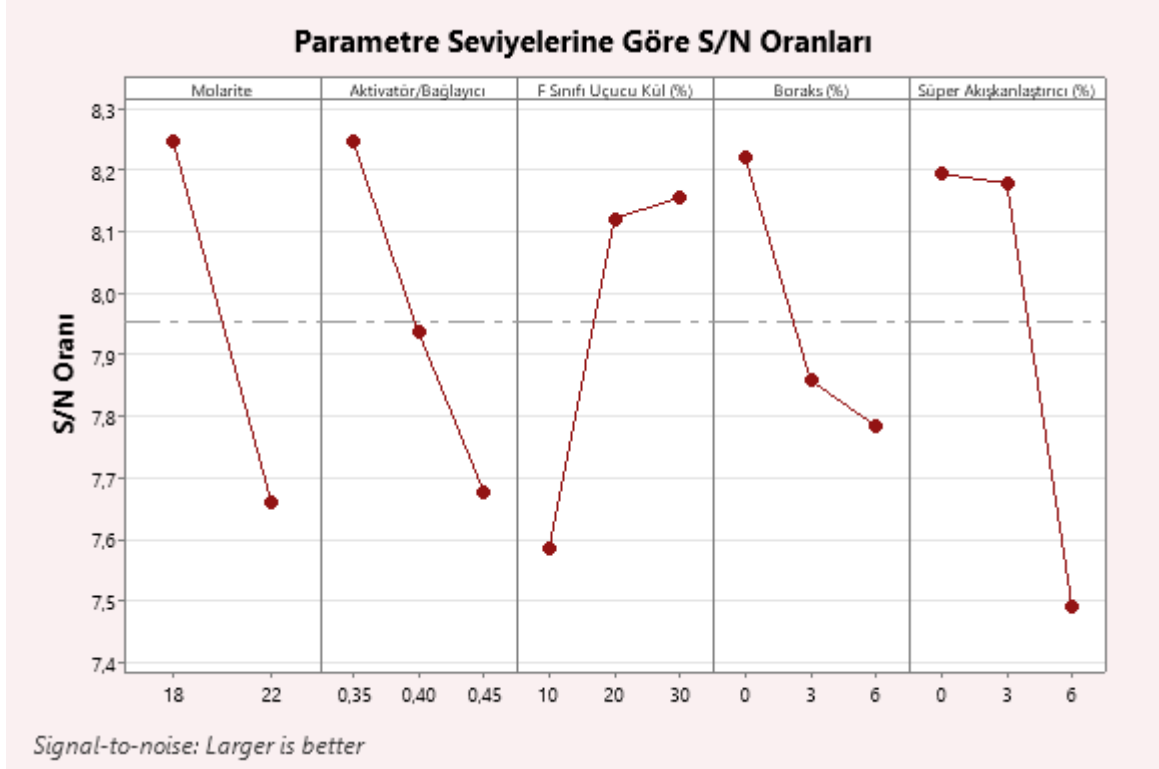
$$\text{En Büyük - En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Denklem 3.11.}$$

Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının S/N oranları Tablo 3.27'de, parametre seviyelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 3.56 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.57'de verilmiştir.

Tablo 3.27. 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (km/sn)	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştıracı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	2,79	8,91
N2	18	0,35	20	3	3	2,66	8,50
N3	18	0,35	30	6	6	2,46	7,82
N4	18	0,40	10	0	3	2,50	7,96
N5	18	0,40	20	3	6	2,51	7,99
N6	18	0,40	30	6	0	2,62	8,37
N7	18	0,45	10	3	0	2,45	7,78
N8	18	0,45	20	6	3	2,70	8,63
N9	18	0,45	30	0	6	2,59	8,27
N10	22	0,35	10	6	6	2,24	7,00
N11	22	0,35	20	0	0	2,73	8,72
N12	22	0,35	30	3	3	2,67	8,53
N13	22	0,40	10	3	6	2,21	6,89
N14	22	0,40	20	6	0	2,49	7,92
N15	22	0,40	30	0	3	2,66	8,50
N16	22	0,45	10	6	3	2,23	6,97
N17	22	0,45	20	0	6	2,23	6,97
N18	22	0,45	30	3	0	2,36	7,46

**Şekil 3.56.** Parametre seviyelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 3.57. Parametre seviyelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin S/N oranları

Şekil 3.56 ve Şekil 3.57 incelendiğinde; S/N oranının en yüksek ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin en iyi olduğu parametre seviyelerinin 18 molarite, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, F sınıfı uçucu kül %30, boraks %0 ve süperakışkanlaştırıcı %0 iken elde edildiği görülmektedir. Bu değerler 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir. Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak etkisi en az olan boraks ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerinde değişikliğe gidilerek seçilmiştir. Analiz çıktısına göre en etkili parametre molarite olduğundan optimum değeri veren 18 seviyesinde bir değişikliğe gidilmemiş, bunun yerine etkisi çok az olan boraksın parametre seviyesi değiştirilerek %6 uygun değer olarak seçilmiştir. Etkisi en az olan diğer parametre ise aktivatör/bağlayıcı olduğundan bu değer de 0.40 seçilmiştir. Buna göre; 18 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül, %6 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N6'nın optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu olduğu düşünülmektedir.

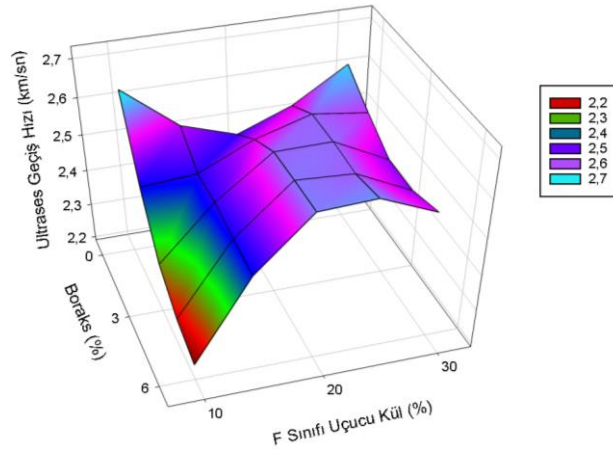
28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin Varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 3.28.'da sunulmuştur.

Tablo 3.28. 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri için varyans analizi sonuçları

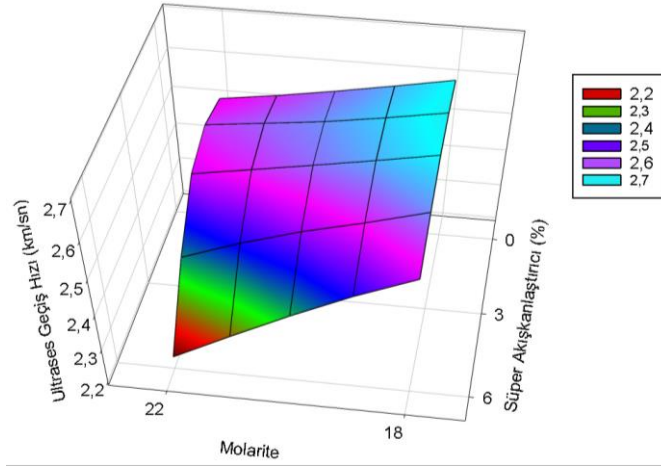
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F- Değeri	P- Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,11842	0,11842	10,22	0,013	19,72%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,08214	0,04107	3,55	0,079	13,68%
F Sınıfı Uçucu Kül (%)	2	0,09418	0,04709	4,06	0,061	15,68%
Boraks (%)	2	0,05564	0,02782	2,40	0,152	9,27%
Süperakışkanlaştırıcı (%)	2	0,15738	0,07869	6,79	0,019	26,21%
Hata	8	0,09268	0,01158			15,43%
Toplam	17	0,60044				100,00%

Varyans analizine göre; P değeri 0,05'ten küçük olan en etkili parametrenin 0,013 P değeri ile molarite olduğu ve bunun yanısıra süperakışkanlaştırıcı parametresinin de 0,05'ten küçük P değeri (0,019) ile 28 günlük ultrases Geçiş Hızı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin 28 günlük ultrases geçiş hızı üzerinde etkisi yoktur yada çok azdır. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında; en etkili parametrenin 10,22 F değeri ile molarite olduğu görülmektedir. 28 günlük ultrases geçiş hızına etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; etki oranı en yüksek olan parametrenin %26.21 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu ve en az olan parametrenin %9.27 ile Boraks olduğu görülmektedir. sperakışkanlaştırıcıdan sonra etki oranı en fazla olan bir diğer parametre %19.72 ile molaritedir.

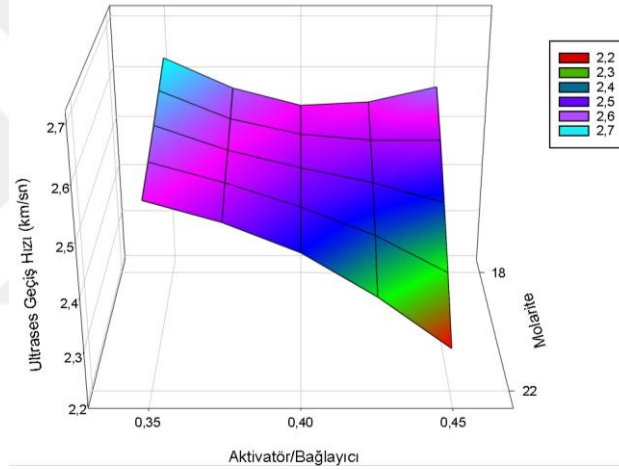
28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin parametre seviyelerine göre değişiminin daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için şekil 3.58 – şekil 3.60'da verilen üç boyutlu grafikler hazırlandı.



şekil 3.58. Boraks ve F sınıfı ucu kl parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim



Şekil 3.59. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim



Şekil 3.60. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı parametrelerine göre 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim

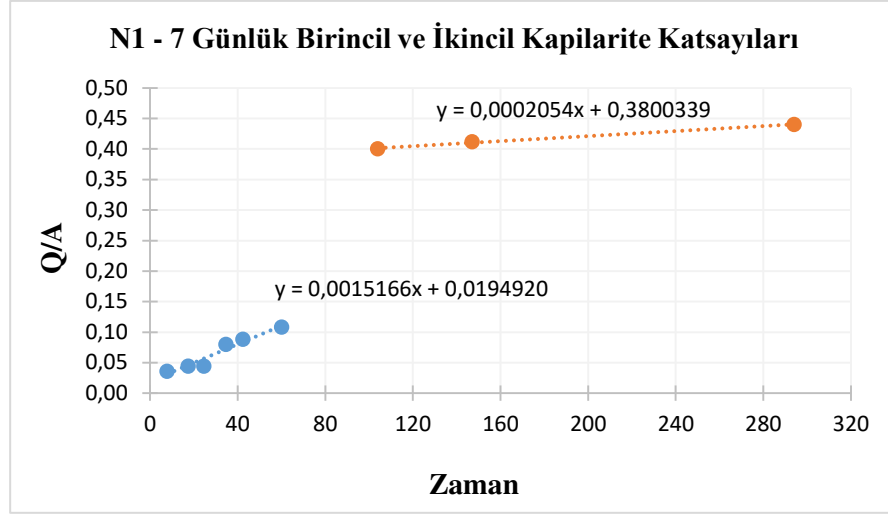
Deney parametrelerine göre ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişiminin verildiği Şekil 3.58 incelendiğinde; en yüksek ultrases geçiş hızı değerinin %10 F sınıfı uçucu kül ve %0 boraks parametre seviyesinde elde edildiği görülür. En düşük ultrases geçiş hızı değeri ise %10 F sınıfı uçucu kül ve %6 boraks seviyelerinde olmuştur. Molarite ve süperakışkanlaştırıcı parametrelerine göre ultrases geçiş hızı değerindeki değişim grafiğine göre; 22 molarite ve %6 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde en düşük ultrases geçiş hızı değeri elde edilirken en yüksek değer 18 molaritede %0 süperakışkanlaştırıcı seviyesinde elde edildiği tespit edilmiştir. Böylece boraks ve süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinin düştüğü ve harcın kalitesinin zayıfladığı sonucuna varılmıştır. Şekil 3.60'a göre 22 molaritede 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında en düşük ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. 18 molaritede 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında ise ultrases geçiş hızı değeri en yüksek sonucu almıştır.

3.2.5. Kapiler Su Emme Katsayı Tayini Deney Sonuçları

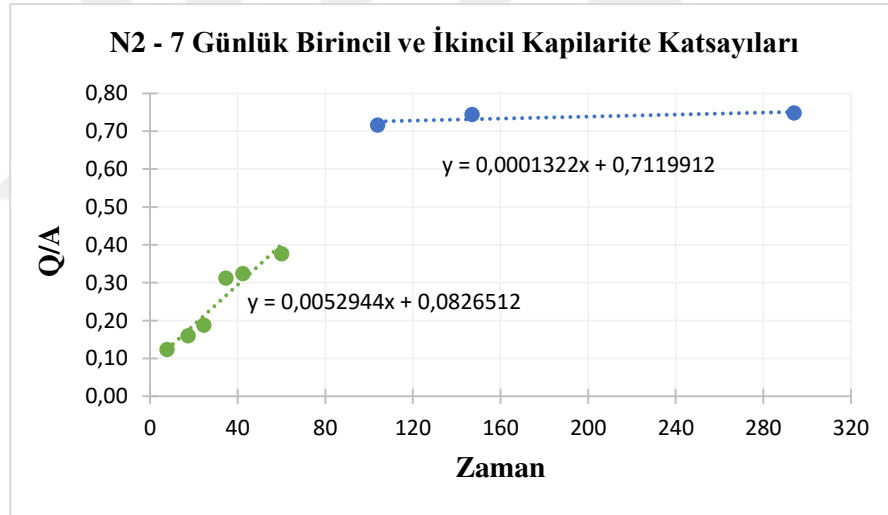
18 seri için üretilen üçer adet 5x5x5 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde 7 ve 28 gün sonunda kapilarite deneyi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin, su içerisine bırakıldıktan 1, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 dakikalık ve 1, 2 ve 3 günlük süre sonunda ağırlık okumaları yapılarak tüm değerlerin excel tablosunda grafiği çizilmiş ve oluşan eğrilerin denklemleri oluşturularak birincil ve ikincil kapilarite katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri Tablo 3.29’da, ilk iki serinin grafiği ise Şekil 3.61- Şekil 3.62’de örnek olarak verilmiştir.

Tablo 3.29. Harç karışımlarının 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	7 Günlük Birincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	7 Günlük ikincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})
N1			90	10	0	0	0,0015166	0,0002054
N2		0,35	80	20	3	3	0,0052944	0,0001322
N3			70	30	6	6	0,0017626	0,0007346
N4			90	10	0	3	0,0021276	0,0003498
N5	18	0,4	80	20	3	6	0,0049829	0,0001009
N6			70	30	6	0	0,0021983	0,0001235
N7			90	10	3	0	0,0013032	0,0001601
N8		0,45	80	20	6	3	0,0017441	0,0001984
N9			70	30	0	6	0,0020289	0,0004351
N10			90	10	6	6	0,0010787	0,0007885
N11		0,35	80	20	0	0	0,0021618	0,0002697
N12			70	30	3	3	0,0039192	0,0001688
N13			90	10	3	6	0,0095161	0,0001479
N14	22	0,4	80	20	6	0	0,0018470	0,0004647
N15			70	30	0	3	0,0023881	0,0004787
N16			90	10	6	3	0,0052124	0,0003219
N17		0,45	80	20	0	6	0,0039120	0,0005622
N18			70	30	3	0	0,0098731	0,0002384



Şekil 3.61. N1- 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları



Şekil 3.62. N2- 7 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları

7 Günlük Birincil ve İkincil Kapilarite Katsayı Değerlerinin Analizi

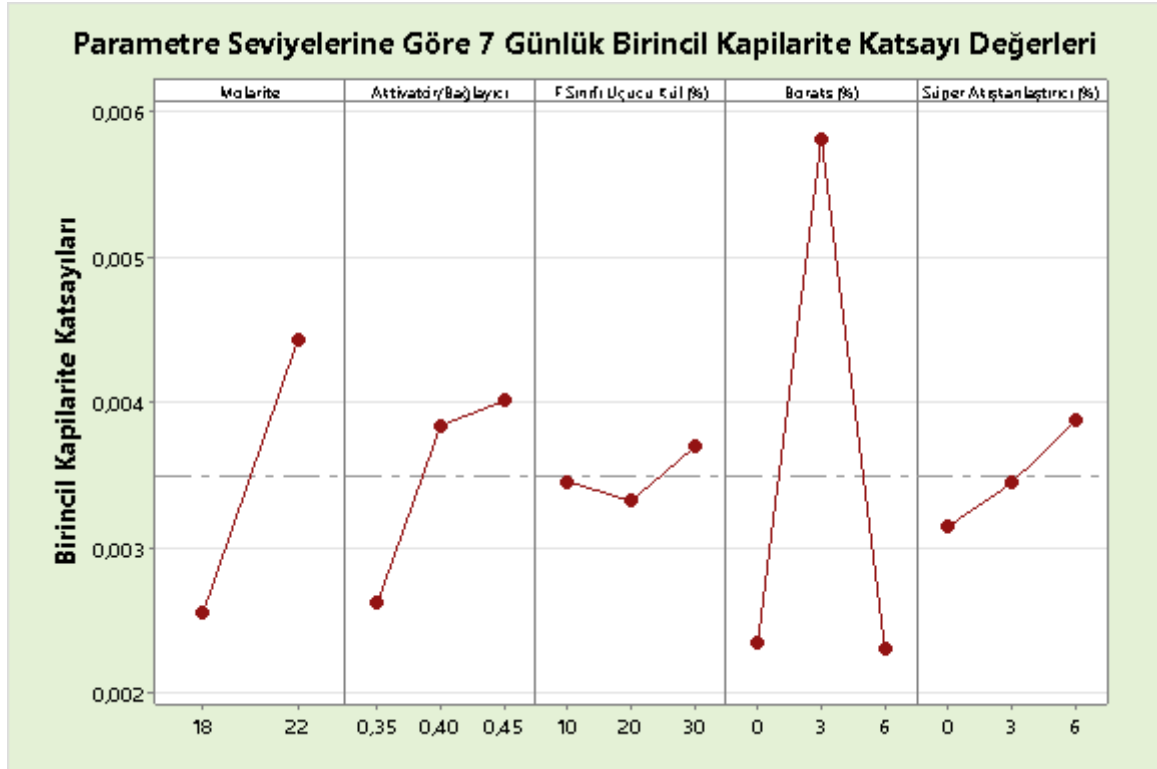
Kapilarite katsayı değerlerinin taguchi metoduyla analizinde S/N oranları hesaplanırken, harç numunelerinin daha az boşluklu olması böylece su emme oranının ve kapilarite katsayılarının düşük olması istendiğinden en küçük – en iyi durumu dikkate alınmış ve Denklem 3.12 kullanılmıştır.

$$\text{En Küçük – En İyi: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.12)$$

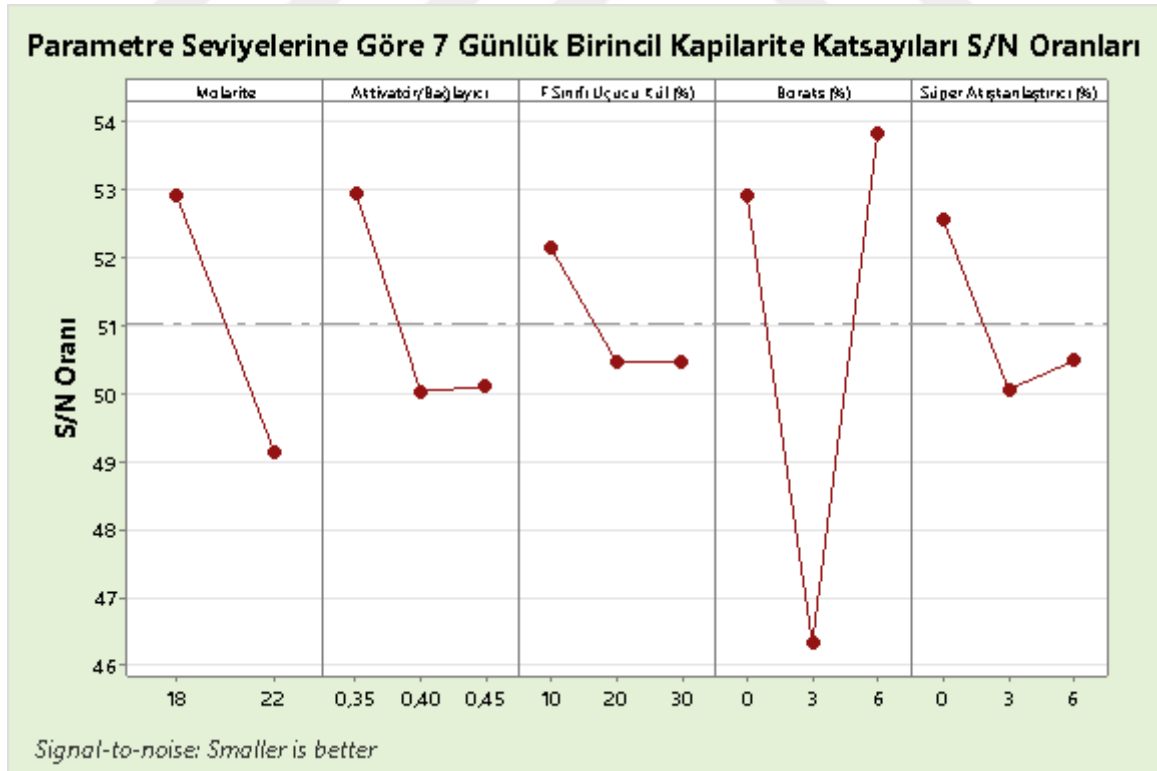
Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerlerinin S/N oranları Tablo 3.30’da, parametre seviyelerine göre 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri Şekil 3.63 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.64’de verilmiştir.

Tablo 3. 30. 7 Günlük birincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					7 Günlük Birincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	0,0015166	56,3826
N2	18	0,35	20	3	3	0,0052944	45,5237
N3	18	0,35	30	6	6	0,0017626	55,0769
N4	18	0,40	10	0	3	0,0021276	53,4422
N5	18	0,40	20	3	6	0,0049829	46,0504
N6	18	0,40	30	6	0	0,0021983	53,1583
N7	18	0,45	10	3	0	0,0013032	57,6998
N8	18	0,45	20	6	3	0,0017441	55,1686
N9	18	0,45	30	0	6	0,0020289	53,8548
N10	22	0,35	10	6	6	0,0010787	59,3420
N11	22	0,35	20	0	0	0,0021618	53,3037
N12	22	0,35	30	3	3	0,0039192	48,1361
N13	22	0,40	10	3	6	0,0095161	40,4308
N14	22	0,40	20	6	0	0,0018470	54,6707
N15	22	0,40	30	0	3	0,0023881	52,4389
N16	22	0,45	10	6	3	0,0052124	45,6592
N17	22	0,45	20	0	6	0,0039120	48,1520
N18	22	0,45	30	3	0	0,0098731	40,1109



Şekil 3.63. 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.64. 7 günlük birincil kapilarite katsayıları S/N oranları

Şekil 3.63 - Şekil 3.64 incelenecek olursa en küçük - en iyi durumu dikkate alındığından; S/N oranının maksimum ve kapilarite katsayı değerinin en az olduğu sonuçlar 18 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu külün %10, boraksın %6 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu değerler 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir.

Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 18 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı oranı, %30 F sınıfı uçucu kül, %6 boraks ve %6 süperakışkanlaştırıcı ile N3'dür. Varyans analizine göre en etkili parametre Boraks olduğundan optimum değeri veren %6 seviyesinde bir değişikliğe gidilmemiş, bunun yerine etkisi az olan süperakışkanlaştırıcı parametresi değiştirilerek %6 ve etkisi en az olan F sınıfı uçucu kül parametre seviyesi değiştirilerek %30 seviyesi uygun değer olarak seçilmiştir. Böylece N3 serisi optimum değerleri veren en yakın deney kombinasyonu olarak kabul edilmiştir.

7 Günlük sonuçların Varyans analizi yapılarak, deney parametrelerinin kapilarite katsayı değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiş ve Tablo 3.31'de sunulmuştur.

Tablo 3.31. Harç karışımlarının 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları

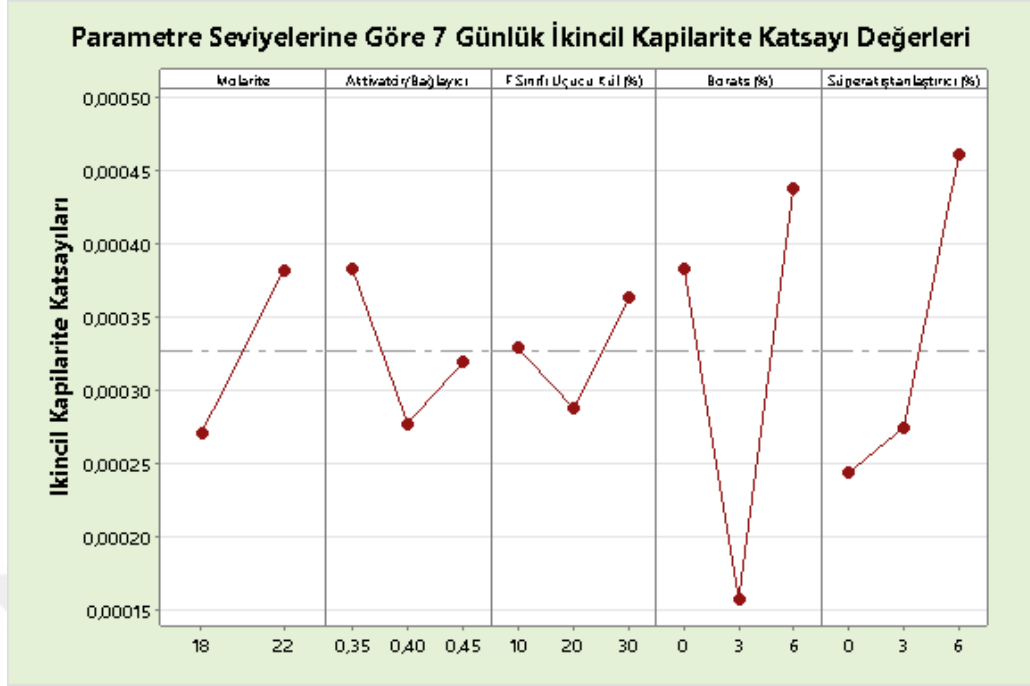
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,0000160	0,0000160	2,88	0,128	13,56%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,0000069	0,0000035	0,62	0,560	5,86%
F Sınıfı UK (%)	2	0,0000004	0,0000002	0,04	0,963	0,36%
Boraks (%)	2	0,0000485	0,0000243	4,38	0,052	41,23%
SA (%)	2	0,0000016	0,0000008	0,15	0,866	1,37%
Hata	8	0,0000443	0,0000055			37,61%
Toplam	17	0,0001177				100,00%

Varyans analizi sonuçlarına göre; 0,05'ten küçük P değeri yoktur ancak 0,05'e en yakın P değeri 0,052 ile boraksa aittir. Etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; etki oranı en yüksek olan parametrenin %41.23 ile boraks ve %13.56 ile molarite olduğu görülmektedir. Etkisi en az olan parametre %0.36 ile F sınıfı uçucu küldür.

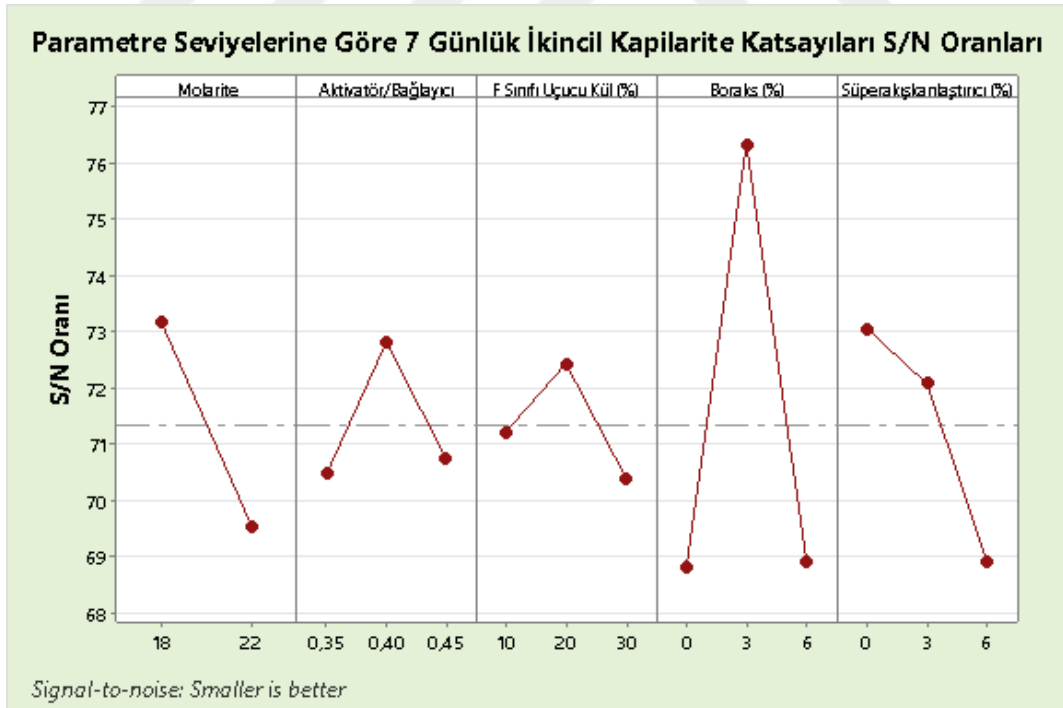
Taguchi metoduyla analiz edilen 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerlerinin S/N oranları Tablo 3.32'de, parametre seviyelerine göre 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri Şekil 3.65 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.66'de verilmiştir.

Tablo 3. 32. 7 Günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					7 Günlük İkincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	0,0002054	73,7480
N2	18	0,35	20	3	3	0,0001322	77,5754
N3	18	0,35	30	6	6	0,0007346	62,6790
N4	18	0,40	10	0	3	0,0003498	69,1236
N5	18	0,40	20	3	6	0,0001009	79,9222
N6	18	0,40	30	6	0	0,0001235	78,1667
N7	18	0,45	10	3	0	0,0001601	75,9122
N8	18	0,45	20	6	3	0,0001984	74,0492
N9	18	0,45	30	0	6	0,0004351	67,2282
N10	22	0,35	10	6	6	0,0007885	62,0640
N11	22	0,35	20	0	0	0,0002697	71,3824
N12	22	0,35	30	3	3	0,0001688	75,4526
N13	22	0,40	10	3	6	0,0001479	76,6006
N14	22	0,40	20	6	0	0,0004647	66,6565
N15	22	0,40	30	0	3	0,0004787	66,3987
N16	22	0,45	10	6	3	0,0003219	69,8456
N17	22	0,45	20	0	6	0,0005622	65,0022
N18	22	0,45	30	3	0	0,0002384	72,4539



Şekil 3.65. 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.66. 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri S/N oranları

Şekil 3.65 - Şekil 3.66 incelenecek olursa en küçük - en iyi durumu dikkate alındığından; S/N oranının maksimum ve kapilarite katsayı değerinin en az olduğu sonuçlar 18 molarite, 0.40

aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu külün %20, boraksın %3 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu değerler 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir.

Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 18 molarite, 0.45 aktivatör/bağlayıcı oranı, %10 F sınıfı uçucu kül, %3 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N7'dir. Varyans analizine göre en etkili parametre Boraks olduğundan optimum değeri veren %3 seviyesinde bir değişikliğe gidilmemiş, bunun yerine etkisi en az olan F sınıfı uçucu kül parametre seviyesi değiştirilerek %10 seviyesi uygun değer olarak seçilmiş ve aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olarak seçilmiştir. Böylece N7 serisi optimum değerleri veren en yakın deney kombinasyonu olarak kabul edilmiştir.

7 günlük sonuçların Varyans analizi yapılarak, deney parametrelerinin ikincil kapilarite katsayı değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiş ve Tablo 3.33'de sunulmuştur.

Tablo 3.33. Harç karışımlarının 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,0000000556	0,0000000556	2,14	0,182	7,45%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,0000000340	0,0000000170	0,65	0,547	4,55%
F Sınıfı UK (%)	2	0,0000000170	0,0000000085	0,33	0,731	2,28%
Boraks (%)	2	0,0000002651	0,0000001326	5,09	0,037	35,51%
SA (%)	2	0,0000001665	0,0000000833	3,20	0,095	22,31%
Hata	8	0,0000002083	0,0000000260			27,90%
Toplam	17	0,0000007465				100,00%

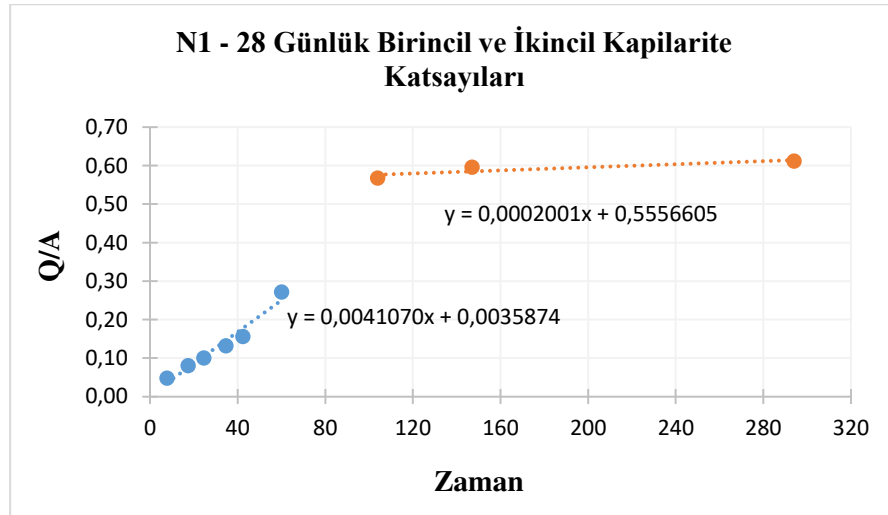
Varyans analizi sonuçlarına göre; 0,05'ten küçük P değeri 0,037 ile borakstır. Etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; etki oranı en yüksek olan parametrenin %35.51 ile boraks ve %22.31 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Etkisi en az olan parametre %2.28 ile F sınıfı uçucu küldür.

28 Günlük Birincil ve İkincil Kapilarite Katsayı Değerlerinin Analizi

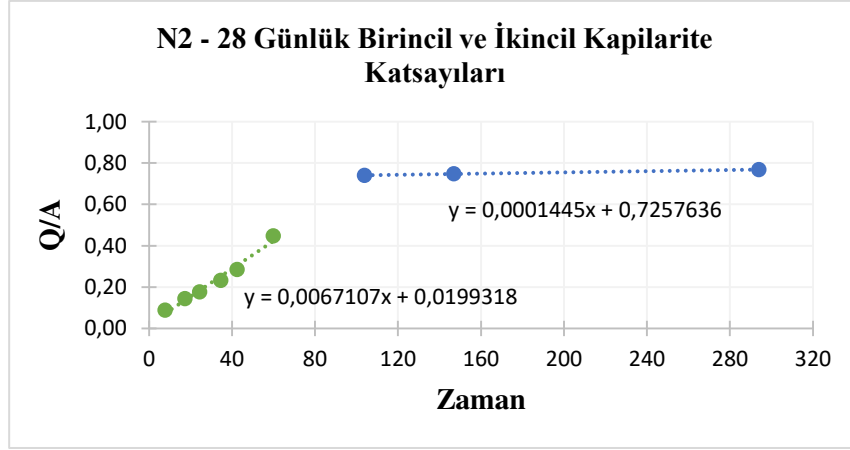
Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri Tablo 3.34'de, ilk iki serinin grafiği ise Şekil 3.67- Şekil 3.68'de örnek olarak verilmiştir.

Tablo 3.34. Harç karışımlarının 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayı değerleri

Seri No	Mol	A/B	EFC (%)	F Sınıfı UK (%)	Boraks (%)	SA (%)	28 Günlük Birincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	28 Günlük ikincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})
N1			90	10	0	0	0,0041070	0,0002001
N2		0,35	80	20	3	3	0,0067107	0,0001445
N3			70	30	6	6	0,0031079	0,0004645
N4			90	10	0	3	0,0053752	0,0001184
N5	18	0,4	80	20	3	6	0,0066500	0,0002314
N6			70	30	6	0	0,0086300	0,0001062
N7			90	10	3	0	0,0057742	0,0001445
N8		0,45	80	20	6	3	0,0069767	0,0001218
N9			70	30	0	6	0,0029325	0,0001914
N10			90	10	6	6	0,0036616	0,0001288
N11		0,35	80	20	0	0	0,0030067	0,0001741
N12			70	30	3	3	0,0027887	0,0001758
N13			90	10	3	6	0,0112458	0,0001062
N14	22	0,4	80	20	6	0	0,0107506	0,0001375
N15			70	30	0	3	0,0044939	0,0003010
N16			90	10	6	3	0,0074323	0,0002071
N17		0,45	80	20	0	6	0,0050779	0,0002001
N18			70	30	3	0	0,0071860	0,0001062



Şekil 3.67. N1- 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları

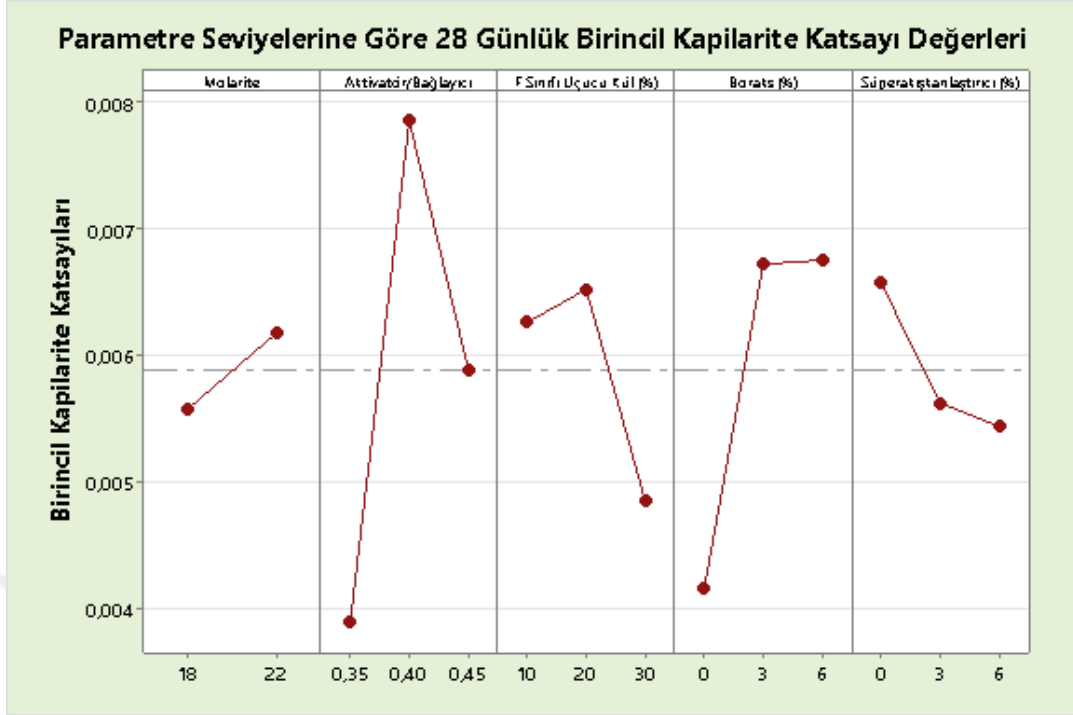


Şekil 3.68. N2- 28 günlük birincil ve ikincil kapilarite katsayıları

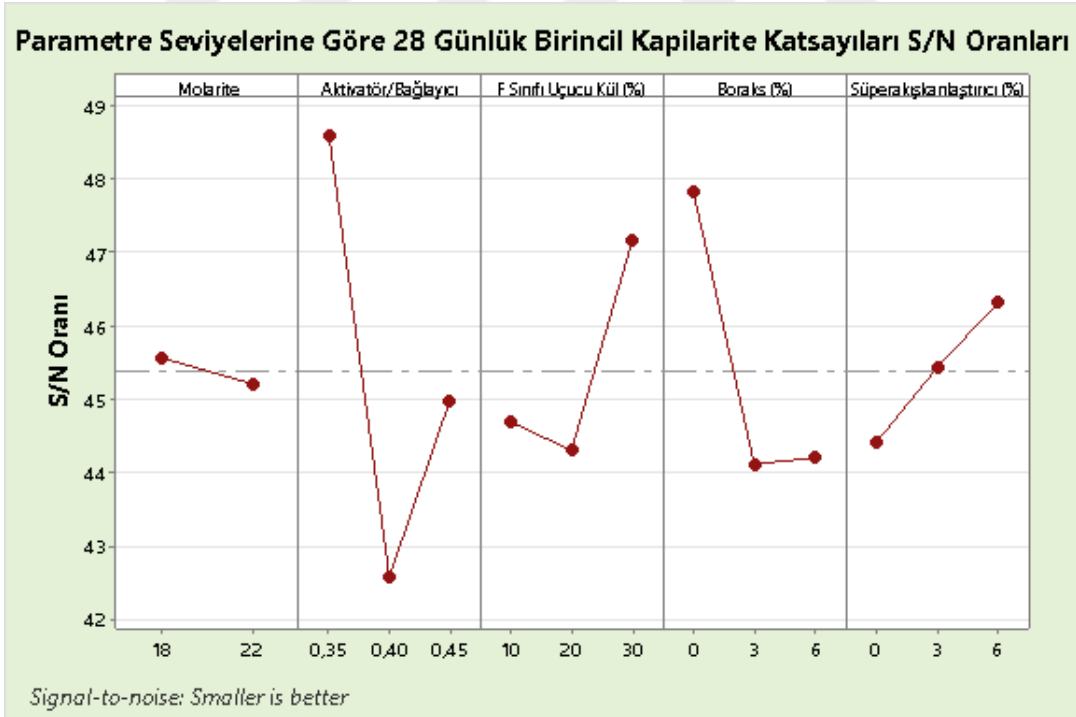
Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük birincil kapilarite katsayı değerlerinin S/N oranları Tablo 3.35’de, parametre seviyelerine göre 7 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri Şekil 3.69 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.70’de verilmiştir.

Tablo 3. 35. 28 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük Birincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	0,0041070	47,7295
N2	18	0,35	20	3	3	0,0067107	43,4646
N3	18	0,35	30	6	6	0,0031079	50,1507
N4	18	0,40	10	0	3	0,0053752	45,3921
N5	18	0,40	20	3	6	0,0066500	43,5436
N6	18	0,40	30	6	0	0,0086300	41,2798
N7	18	0,45	10	3	0	0,0057742	44,7702
N8	18	0,45	20	6	3	0,0069767	43,1270
N9	18	0,45	30	0	6	0,0029325	50,6552
N10	22	0,35	10	6	6	0,0036616	48,7266
N11	22	0,35	20	0	0	0,0030067	50,4382
N12	22	0,35	30	3	3	0,0027887	51,0920
N13	22	0,40	10	3	6	0,0112458	38,9802
N14	22	0,40	20	6	0	0,0107506	39,3713
N15	22	0,40	30	0	3	0,0044939	46,9475
N16	22	0,45	10	6	3	0,0074323	42,5775
N17	22	0,45	20	0	6	0,0050779	45,8863
N18	22	0,45	30	3	0	0,0071860	42,8703



Şekil 3.69. 28 günlük birincil kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.70. 28 günlük birincil kapilarite katsayıları S/N oranları

Şekil 3.69 - Şekil 3.70 incelenecek olursa en küçük - en iyi durumu dikkate alındığından; S/N oranının maksimum ve kapilarite katsayı değerinin en az olduğu sonuçlar 18 molarite, 0.35

aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu külün %30, boraksın %0 ve süperakışkanlaştırıcının %6 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu değerler 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir.

Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 18 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı oranı, %10 F sınıfı uçucu kül, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı ile N1'dir.

28 günlük sonuçların Varyans analizi yapılarak, deney parametrelerinin birincil kapilarite katsayı değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiş ve Tablo 3.36'da sunulmuştur.

Tablo 3.36. Harç karışımlarının 7 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları

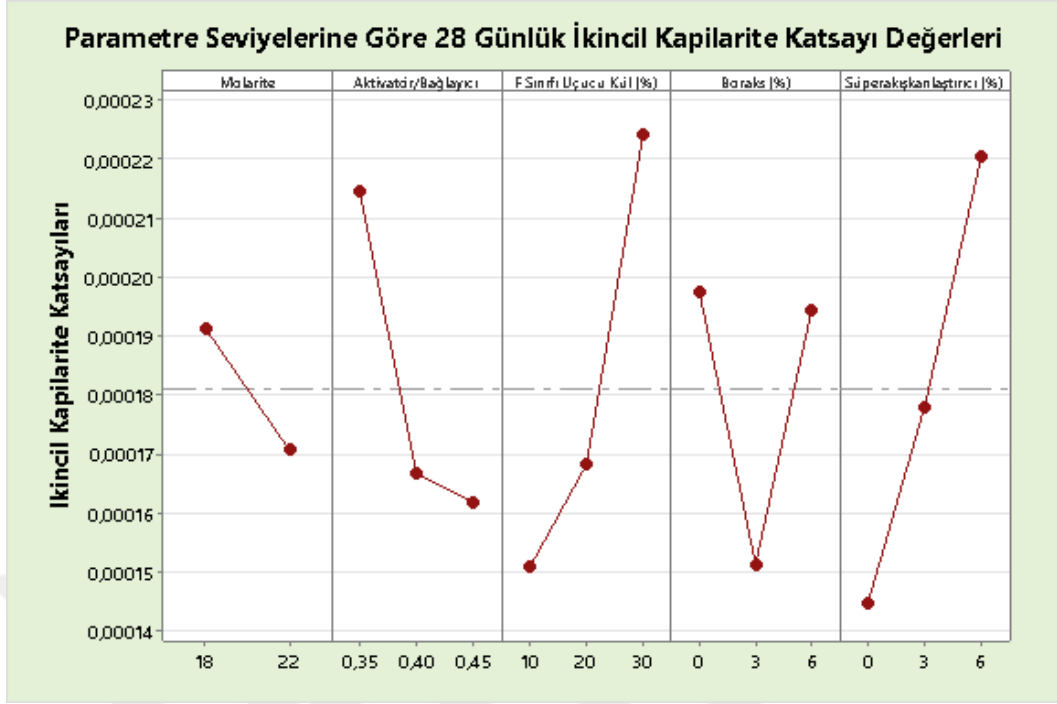
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,0000016	0,0000016	0,57	0,470	1,44%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,0000471	0,0000235	8,40	0,011	42,11%
F Sınıfı UK (%)	2	0,0000097	0,0000049	1,73	0,237	8,68%
Boraks (%)	2	0,0000266	0,0000133	4,74	0,044	23,78%
SA (%)	2	0,0000044	0,0000022	0,79	0,487	3,95%
Hata	8	0,0000224	0,0000028			20,05%
Toplam	17	0,0001118				100,00%

Varyans analizi sonuçlarına göre; 0,05'ten küçük P değeri 0,011 ile aktivatör/bağlayıcı ve 0,044 ile boraktır. Etki oranları da yüzde (%) olarak incelendiğinde; etki oranı en yüksek olan parametrenin %42.11 ile aktivatör/bağlayıcı ve %23.78 ile boraks olduğu görülmektedir. Etkisi en az olan parametre %1.44 ile molaritedir.

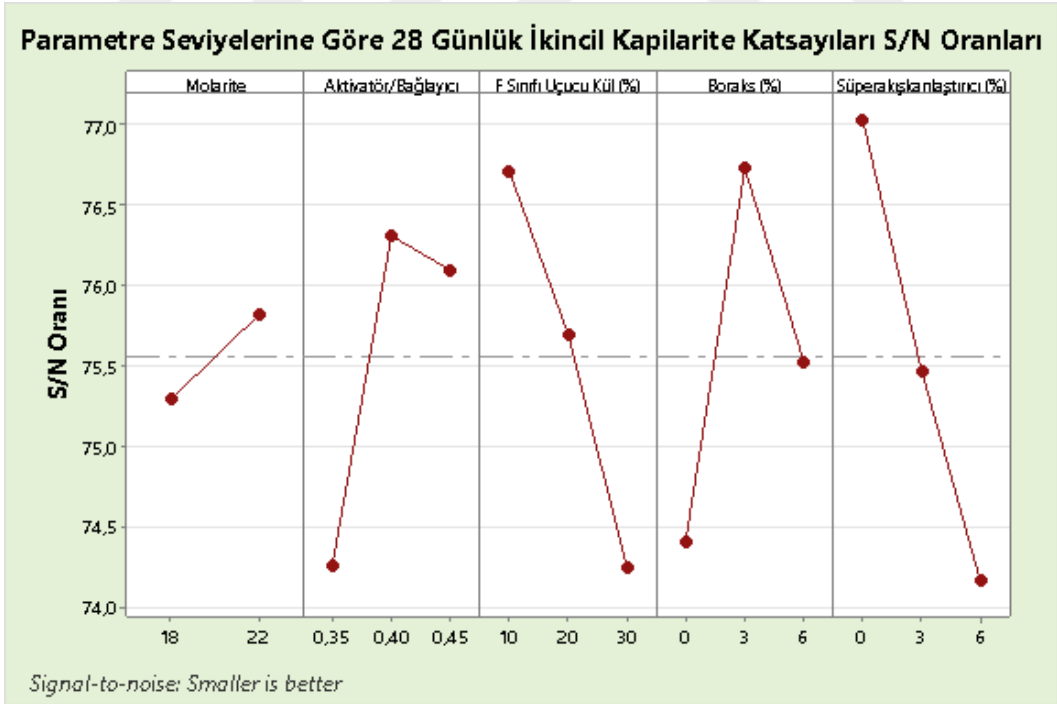
Taguchi metoduyla analiz edilen 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerlerinin S/N oranları Tablo 3.37'de, parametre seviyelerine göre 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri Şekil 3.71 ve S/N yanıt değeri grafiği Şekil 3.72'de verilmiştir.

Tablo 3. 37. 28 Günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri ve S/N oranları

Seri No	Deney Parametreleri					28 Günlük İkincil Kapilarite Katsayıları (cm/sn ^{1/2})	S/N Oranı
	Molarite	Aktivatör / Bağlayıcı	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	Boraks (%)	Süper-akışkanlaştırıcı (%)		
N1	18	0,35	10	0	0	0,0002001	73,9751
N2	18	0,35	20	3	3	0,0001445	76,8026
N3	18	0,35	30	6	6	0,0004645	66,6603
N4	18	0,40	10	0	3	0,0001184	78,5330
N5	18	0,40	20	3	6	0,0002314	72,7127
N6	18	0,40	30	6	0	0,0001062	79,4775
N7	18	0,45	10	3	0	0,0001445	76,8026
N8	18	0,45	20	6	3	0,0001218	78,2871
N9	18	0,45	30	0	6	0,0001914	74,3612
N10	22	0,35	10	6	6	0,0001288	77,8017
N11	22	0,35	20	0	0	0,0001741	75,1840
N12	22	0,35	30	3	3	0,0001758	75,0996
N13	22	0,40	10	3	6	0,0001062	79,4775
N14	22	0,40	20	6	0	0,0001375	77,2339
N15	22	0,40	30	0	3	0,0003010	70,4287
N16	22	0,45	10	6	3	0,0002071	73,6764
N17	22	0,45	20	0	6	0,0002001	73,9751
N18	22	0,45	30	3	0	0,0001062	79,4775



Şekil 3.71. 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.72. 28 günlük ikincil kapilarite katsayıları S/N oranları

Şekil 3.72 incelenecek olursa en küçük - en iyi durumu dikkate alındığından; S/N oranının maksimum ve kapilarite katsayı değerinin en az olduğu sonuçlar 22 molarite, 0,40

aktivatör/bağlayıcı, F sınıfı uçucu külün %10, boraksın %3 ve süperakışkanlaştırıcının %0 olduğu parametre seviyelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu değerler 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerlerinin optimum olduğu parametre seviyelerini vermektedir.

Optimum değerlere en yakın deney kombinasyonu varyans analiz sonuçları da dikkate alınarak; 22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranı, %10 F sınıfı uçucu kül, %3 boraks ve %6 süperakışkanlaştırıcı ile N13'dir.

28 günlük sonuçların Varyans analizi yapılarak, deney parametrelerinin ikincil kapilarite katsayı değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiş ve Tablo 3.38'de sunulmuştur.

Tablo 3.38. Harç karışımlarının 28 günlük ikincil kapilarite katsayı değerleri için varyans analizi sonuçları

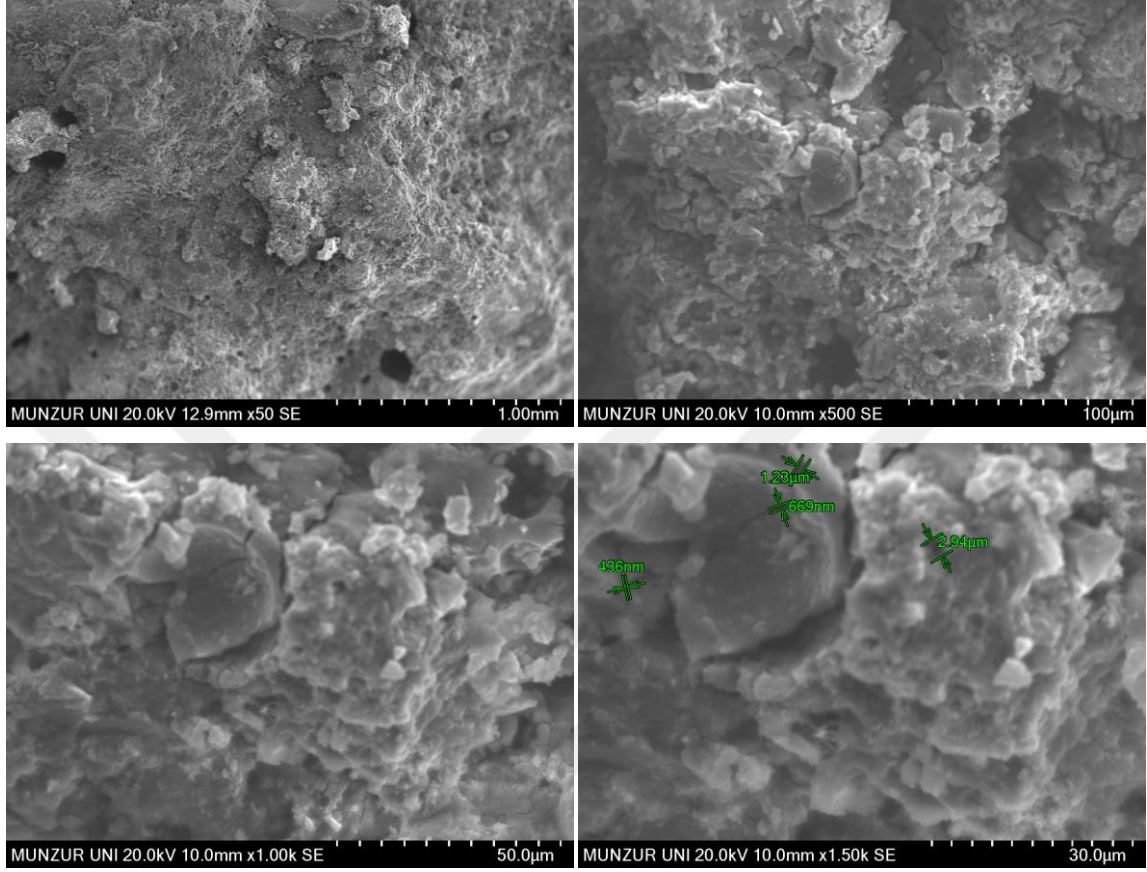
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki Oranı (%)
Molarite	1	0,0000000019	0,0000000019	0,20	0,664	1,47%
Aktivatör/Bağlayıcı	2	0,0000000102	0,0000000051	0,54	0,602	7,82%
F Sınıfı UK (%)	2	0,0000000176	0,0000000088	0,93	0,432	13,51%
Boraks (%)	2	0,0000000079	0,0000000040	0,42	0,670	6,09%
SA (%)	2	0,0000000172	0,0000000086	0,91	0,439	13,22%
Hata	8	0,0000000755	0,0000000094			57,87%
Toplam	17	0,0000001304				100,00%

Varyans analizi sonuçlarına göre; 0,05'ten küçük P değeri yoktur ancak etki oranları yüzde (%) olarak incelendiğinde; etki oranı diğer parametrelere göre daha yüksek olan parametrenin %13.51 ile F sınıfı uçucu kül ve %13.22 ile süperakışkanlaştırıcı olduğu görülmektedir. Etkisi en az olan parametre %1.47 ile molaritedir.

3.2.6. SEM – EDS Analiz Sonuçları

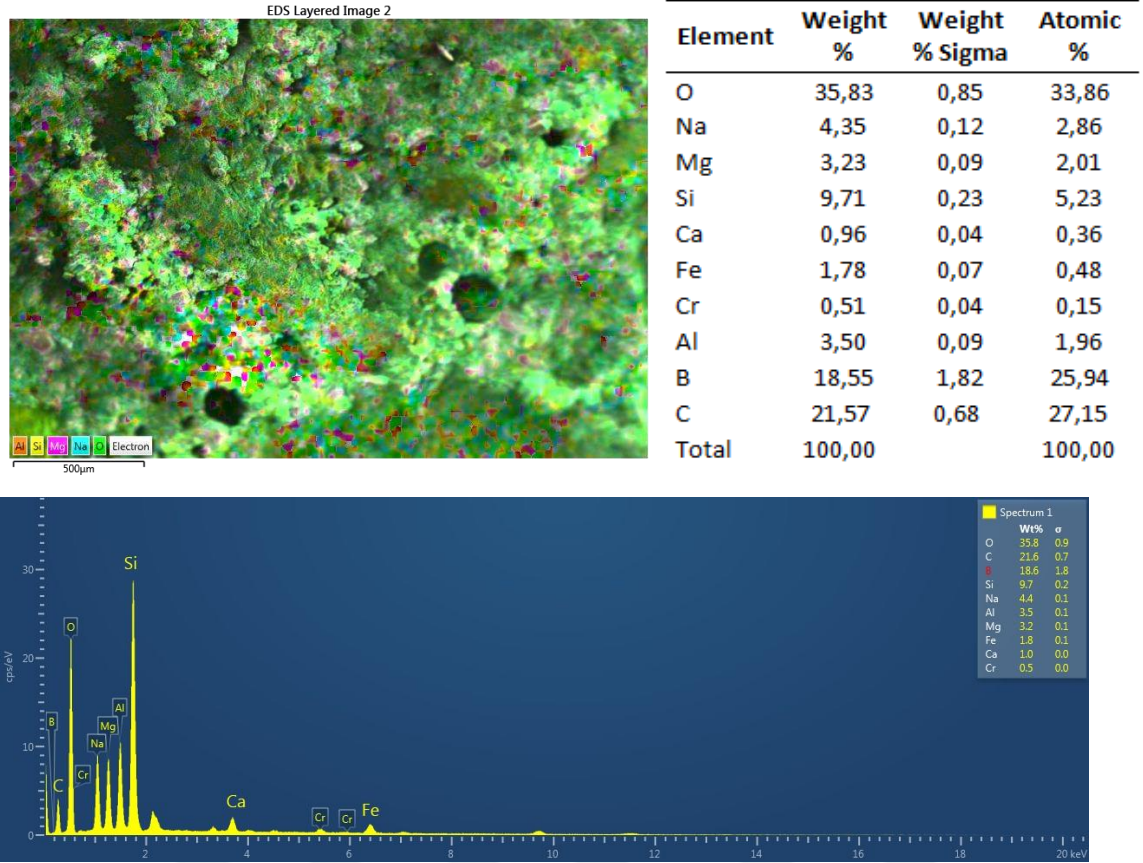
Tarayıcı elektron mikroskopu ile harç örneklerin farklı yerlerinden alınan SEM görüntüleri ile harçların mikroyapı analizleri yapılmıştır. SEM – EDS analizi için; Basınç dayanım ve eğilme dayanım sonuçlarına göre optimum deney kombinasyonuna en yakın seri olarak belirlenen N15 ve en kötü basınç - eğilme değerlerini veren N8 serisi seçilmiştir. N8 aynı zamanda işlenebilirlik ve priz sürelerinin optimum değerine en yakın numune olduğundan bu seri analiz için uygun görülmüştür. Bunun yanı sıra N11 serisi en düşük işlenebilirlik ve priz süresi değerlerini verdiğinden ve içeriğinde boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları bulunmadığından bu serinin de analizi önem kazanmıştır. Sonuç olarak N8, N11 ve N15 olmak üzere 3 adet numunenin analizi Tunceli Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

18 molarite, 0.45 aktivatör/bağlayıcı, %20 F sınıfı uçucu kül, %80 Elazığ ferrokrom cürufu, %6 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı içerikli N8 serisine ait SEM görüntüleri Şekil 3.73'de sunulmuştur.



Şekil 3.73. N8 serisinin SEM görüntüleri

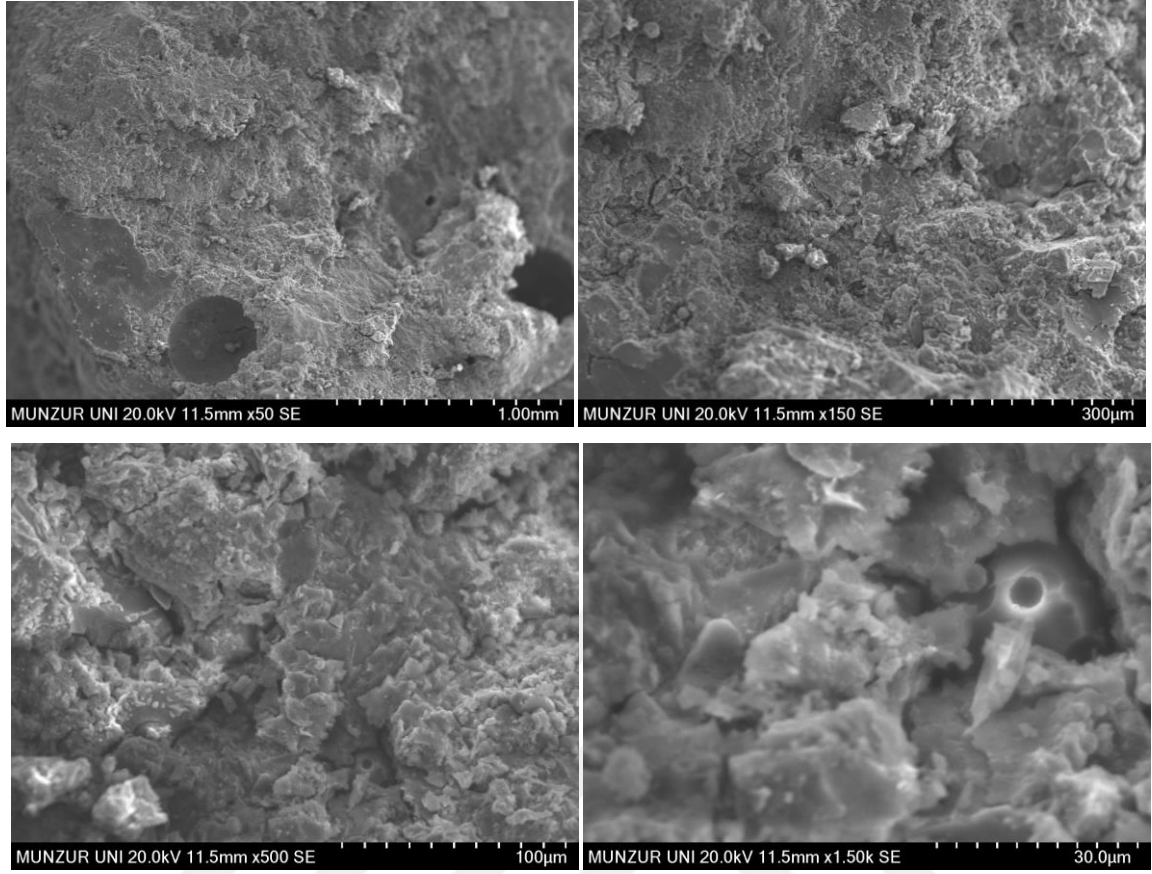
N8 numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde; farklı boyutlardaki boşlukların hamur fazı içinde olduğu görülmektedir. Bu boşlukların basınç dayanımının azalmasında önemli bir etki oluşturduğu düşünülmektedir. Harç numunesinin üretiminde kullanılan Elazığ ferrokrom cürufu %30,41 ve F sınıfı uçucu kül %60,48 oranında SiO_2 içermektedir. SEM görüntülerinde görünen siyah büyük boşlukların kapiler boşluk (2.94 μm boyutunda) olduğu bilinmektedir. Alkali aktivasyon sırasında meydana gelen jelleşmeler bu kapiler boşlukları dolduracaktır. Numuneler incelendiğinde kılcal çatlaklar (669 nm) ve basınç çatlakları gözlemlenmiştir. Ayrıca görüntüler incelendiğinde aktivatörle bağlayıcının reaksiyona girdiği ve yoğun bir yapının gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 3.74. N8 serisinin EDS Analiz Sonuçları

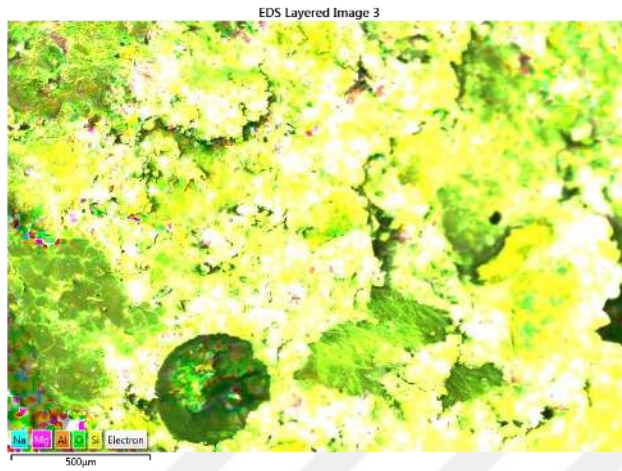
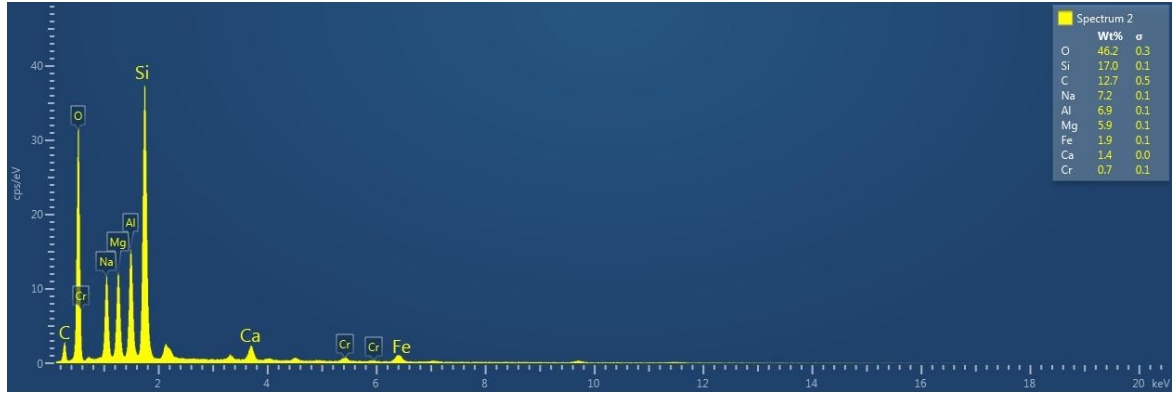
N8 serili karışımın EDS analiz sonuçları Şekil 3.74’de verilmiştir. Numuneden alınan noktasal bir bölge incelendiğinde; Si, O, Al, Mg, Fe, Ca, Cr, Na, C ve B elementlerinin ağırlıkça oranları görülmektedir. N8 serisinde kullanılan Boraks oranı %6’dır. EDS analiz sonucuna göre %18,55 oranında bulunan B elementi yüzdesel olarak karışımda kullanılan %6 boraksa tekabül etmektedir. Si/Na oranı 2,20 olduğundan orta dereceli bir reaksiyon gerçekleşmiştir. Si/Al oranı 2,77 olması alümina süzülmesinin iyi olduğunu gösterir.

22 molarite, 0.35 aktivatör/bağlayıcı, %20 F sınıfı uçucu kül, %80 Elazığ ferrokrom cürufu, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı içerikli N11 serisine ait SEM görüntüleri Şekil 3.75.’de sunulmuştur.



Şekil 3.75. N11 serisinin SEM görüntüleri

N11'e ait SEM görüntüsü; kısmen veya tamamen reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıkları arasında eriyik halde bulunan sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) jelinin varlığını gösterir. İncelenen numune; uçucu kül parçacıklarının kısmi veya tam reaksiyonundan dolayı çok sayıda küçük gözeneklere ve bazı daha kaba küresel gözeneklere sahip olduğunu göstermiştir. Jelin oluşumu, ilk olarak küresel kül parçacıklarının yüzeyinde gerçekleşmiştir [58]. Ayrıca net olarak SiO_2 'nin eriyik hale geldiğini ve küçük beyaz partiküllerin reaksiyona girmeyen sodyum parçacıkları olduğu tespit edilmiştir. Çok küçük sodyum partiküllerinin gözlemlenmesi, N8 serisine göre aktivatörle bağlayıcının daha iyi tepkimeye girdiğini gösterir. Bu seride elde edilen yüksek basınç değerleri bunu destekler niteliktedir.

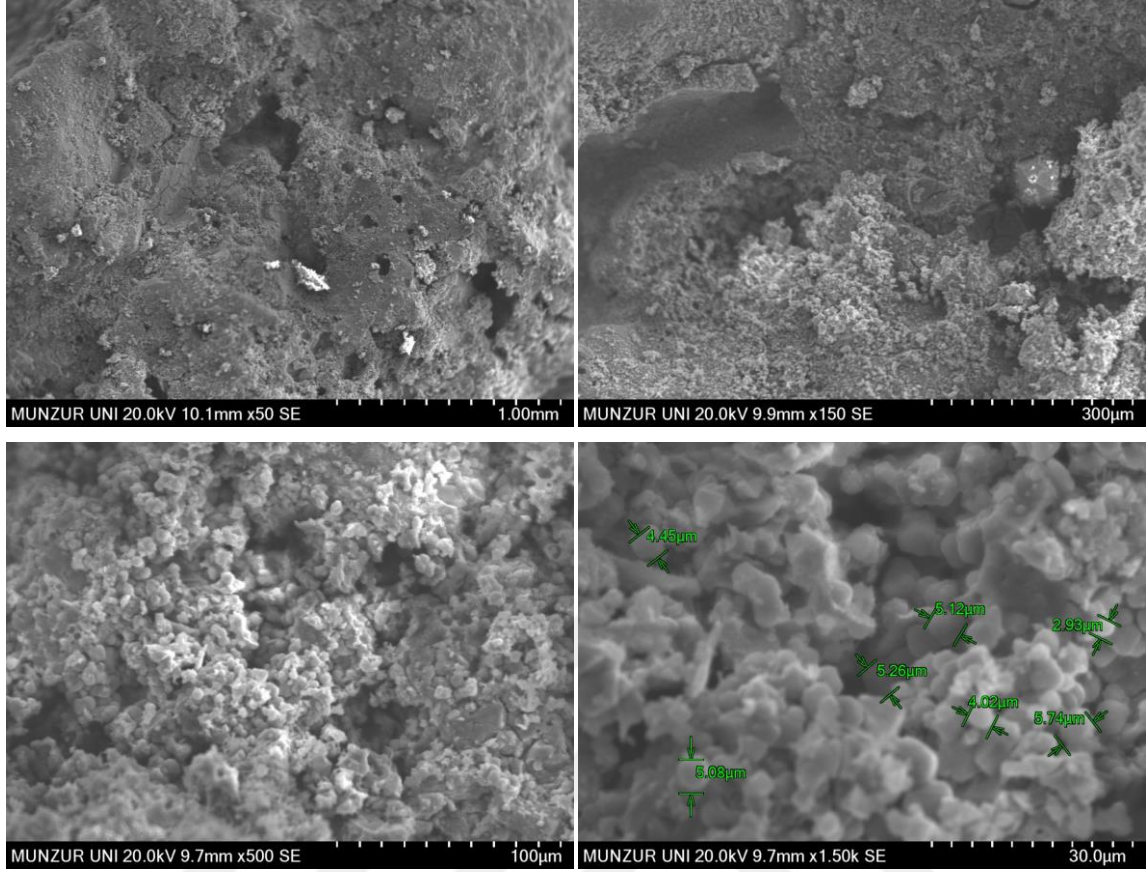


Element	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	46,22	0,33	53,03
Na	7,22	0,10	5,76
Mg	5,94	0,09	4,49
Si	16,99	0,15	11,10
Ca	1,43	0,05	0,65
Fe	1,93	0,08	0,63
Cr	0,70	0,05	0,25
Al	6,89	0,09	4,68
C	12,69	0,46	19,40
Total	100,00		100,00

Şekil 3.76. N11 serisinin EDS Analiz Sonuçları

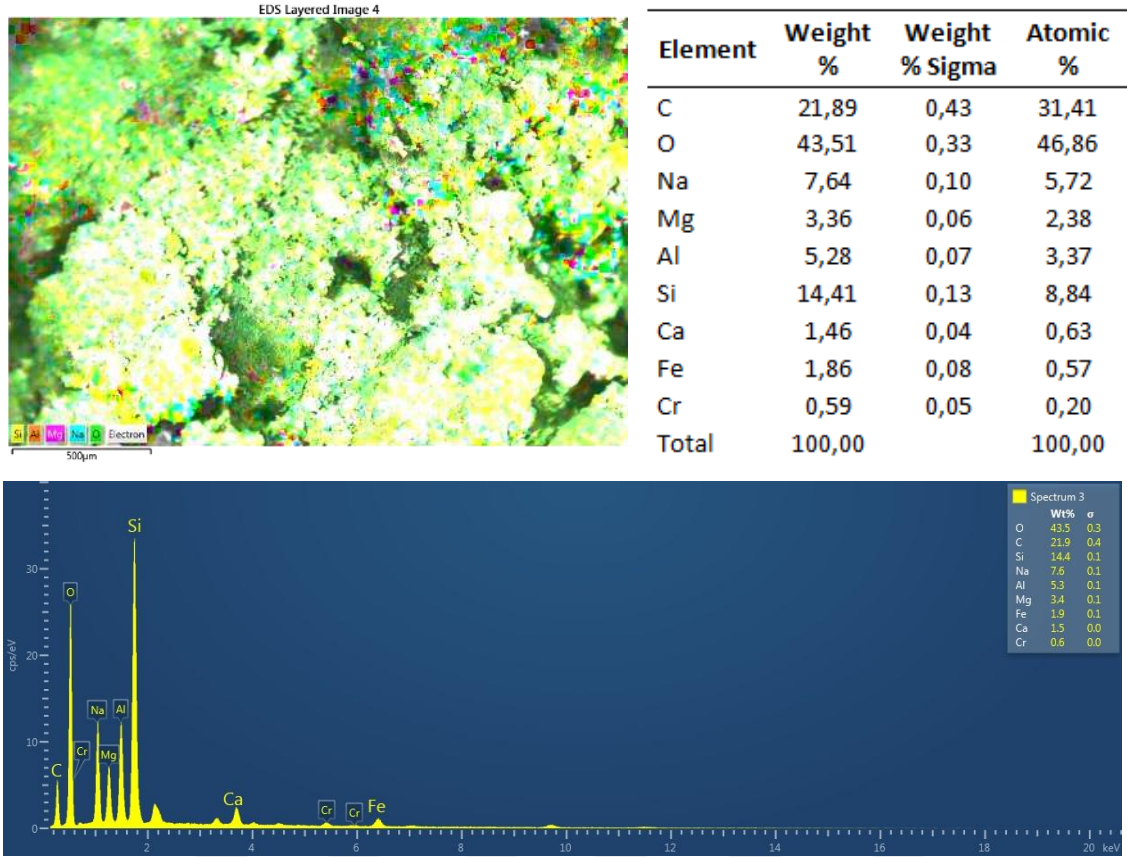
Şekil 3.76’da bölgesel olarak alınan EDS sonuçlarına göre Si, Al, Na, C ve Mg elementlerine rastlanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda bu bölgelerde N-A-S-H jel oluşumu ispatlanmıştır. Si/Al = 2,47 alümina süzülmesinin iyi olduğunu gösterir.

22 molarite, 0.40 aktivatör/bağlayıcı, %30 F sınıfı uçucu kül, %70 Elazığ ferrokrom cürufu, %0 boraks ve %3 süperakışkanlaştırıcı içerikli N15 serisine ait SEM görüntüleri Şekil 3.77’de sunulmuştur.



Şekil 3.77. N15 serisinin SEM görüntüleri

N15 serisinde kullanılan F sınıfı uçucu kül miktarı %30'dur. Numuneye ait SEM görüntüsünde diğer iki numuneye göre belirgin bir şekilde jellerin oluştuğu ve karışım içerisindeki aderansın kısmen sağlandığı düşünülmektedir. Harcın dayanım kazanmasını sağlayan en önemli hidrasyon ürünü NASH jeli olduğundan bu serinin dayanım değerleri yüksek çıkmıştır. Beyaz parçacıkların silikat parçacığı olduğu, küçük çaplı gözeneklerin ve mikro çatlakların ise vibrasyon eksikliğine bağlı olarak hava boşluğundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



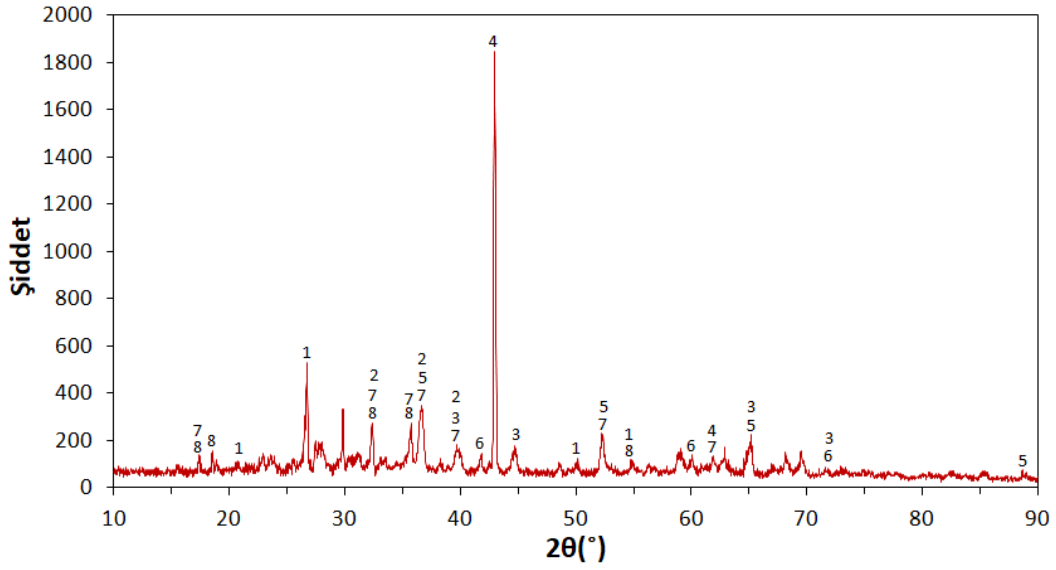
Şekil 3.78. N15 serisinin EDS Analiz Sonuçları

N15 serili karışımın EDS analiz sonuçları Şekil 3.78’de verilmiştir. Numuneden alınan noktasal bir bölge incelendiğinde; Si, O, Al, Mg, Fe, Ca, Cr, Na ve C elementlerinin ağırlıkça oranları görülmektedir. Buna göre Si/Al oranı 2,73 ve Si/Na oranı 1,89 olarak hesaplanmıştır ve reaksiyonun hızlı gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

3.2.7. XRD Analiz Sonuçları

Belirlenen üç adet numunenin (N8, N11, N15) yapılarındaki amorf ve kristal fazları tanımlamak ve mineralojik özelliklerini incelemek için gerçekleştirilen XRD analiz sonuçları Şekil 3.79 – Şekil 3.81’de sunulmuştur.

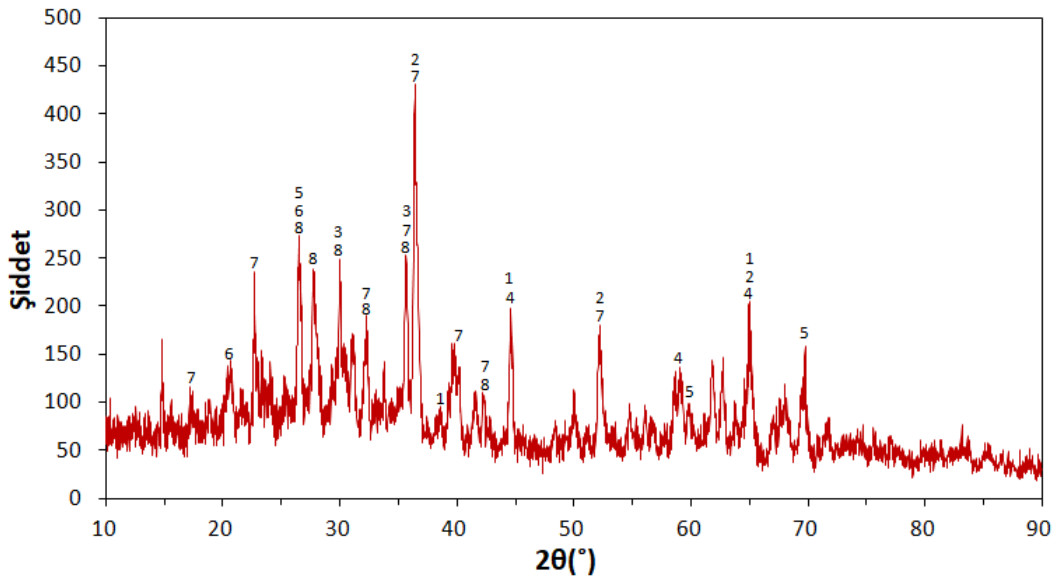
XRD Analizi, Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde Rigaku X-Işını Kırınım cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.79. N8 numunesine ait XRD difraktogramı

(1: Quartz (SiO_2), 2: Aluminium oxide (Al_2O_3), 3: Chromium trioxide (CrO_3), 4: Periclase (MgO), 5: Lime (CaO), 6: Hematite (Fe_2O_3), 7: Forsterite (Mg_2SiO_4), 8: Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$))

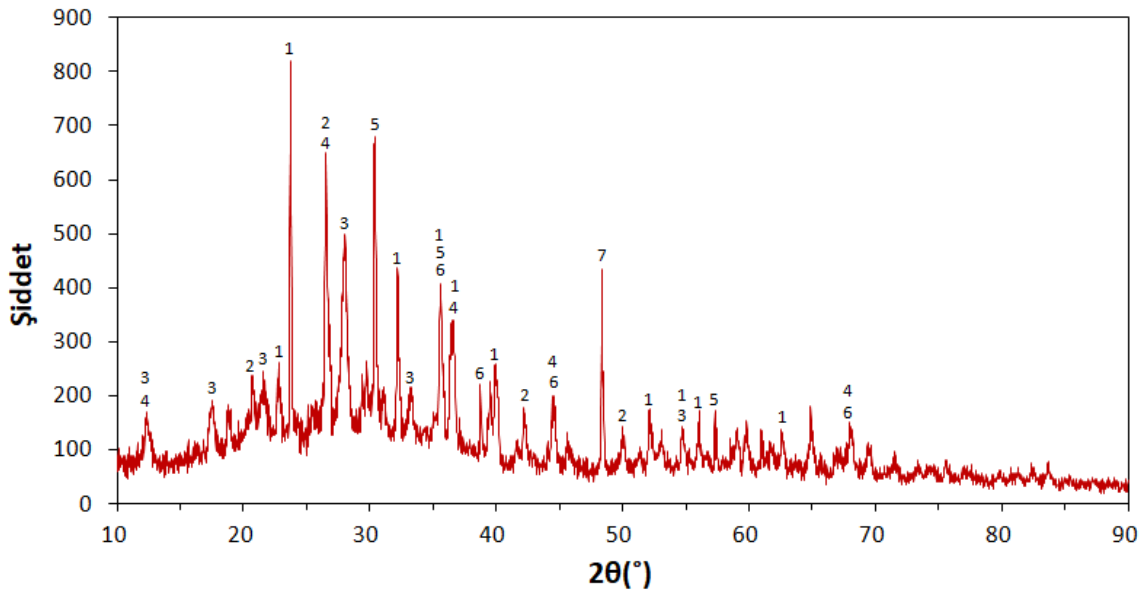
Şekil 3.79 incelendiğinde; N8 numunesinde EFC ve F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşiminde yüksek oranda mevcut olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO fazları tespit edilmiştir. Ayrıca Elazığ ferrokrom cürufunda yüksek miktarda bulunan MgO ve Forsterite olarak adlandırılan mineral de XRD analizinde görülmüştür. Elazığ ferrokrom cürufunda %6,47 oranında bulunan Cr elementinin reaksiyonu sonucu chromium trioxide (CrO_3) olduğu düşünülmüştür. Karışımda kullanılan %6 borakstan kaynaklı borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) tespit edilmiştir.



Şekil 3.80. N11 numunesine ait XRD difraktogramı

(1: Periclase (MgO), 2: Lime (CaO), 3: Chromite (FeCr₂O₄), 4: Magnetite (Fe₃O₄), 5: Aluminium oxide (Al₂O₃), 6: Quartz (SiO₂), 7: Forsterite (Mg₂SiO₄), 8: Enstatite (Mg₂Si₂O₆))

Şekil 3.80 incelendiğinde; N11 numunesinde EFC ve F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşiminde yüksek oranda mevcut olan SiO₂, Al₂O₃ ve CaO fazları tespit edilmiştir. Ayrıca Elazığ ferrokrom cürufunda yüksek miktarda bulunan MgO, Forsterite (Mg₂SiO₄) ve Enstatite (Mg₂Si₂O₆) olarak adlandırılan mineraller ve manyetit (Fe₃O₄) demir mineralinin varlığı XRD analizinde görülmüştür. Demir krom oksiti olan chromite (FeCr₂O₄) fazı da tespit edilmiştir.



Şekil 3.81. N15 numunesine ait XRD difraktogramı

(1: Olivine ((Mg,Fe)₂SiO₄), 2: Quartz (SiO₂), 3: Al₆Na_{5.92}O_{43.28}Si₁₀ (COD 8103734) 4: Aluminium oxide (Al₂O₃), 5: Magnetite (Fe₃O₄), 6: Esclaite (Cr₂O₃), 7: Periclase (MgO))

Şekil 3.81’de N15’e ait XRD difraktogramı incelendiğinde; ortamda mevcut olan alüminyum ve silisyum miktarına bağlı olarak Si/Al = 2,73 olan yeni bir zeolitik faz, zeolit P (Al₆Na_{5.92}O_{43.28}Si₁₀, COD 8103734) oluştuğu gözlemlenmiştir. [58] EFC ve F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşiminde yüksek oranda mevcut olan SiO₂ ve Al₂O₃ fazları tespit edilmiştir. Ayrıca Elazığ ferrokrom cürufunda yüksek miktarda bulunan MgO, nadir bulunan Esclaite krom oksit minerali ve manyetit (Fe₃O₄) demir mineralinin varlığı XRD analizinde görülmüştür. Magnezyum ve demir iyonlarını içeren, siyahtan yeşile kadar değişebilen renk özelliğine sahip bir magnezyum demir silikası olan Olivine ((Mg,Fe)₂SiO₄); XRD analizinde tespit edilen bir başka mineraldir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen alkali aktivasyonlu harçların taze harç özelliklerinin araştırılması üzerine yürütülen bu tez çalışmasında; cürufun yanı sıra F sınıfı uçucu kül ve katkı maddesi olarak boraks ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmış ve NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 1/2 sabit değerde tutulmuştur. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.35, 0.40 ve 0.45 alınmıştır. F sınıfı uçucu kül %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılırken; boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları %0, %3 ve %6 oranlarında tercih edilmiştir. Belirlenen parametreler taguchi metoduyla optimize edilerek en iyi karışım oranları $L_{18}(2^1 \times 3^4)$ ortogonal dizini ile belirlenmiştir. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkılarının geopolimer harç üzerindeki etkisini incelemek amacıyla hamur numuneleri üzerinde priz başlangıç ve priz sona erme süreleri, harç numuneleri üzerinde ise işlenebilirlik (yayılma tablası deneyi) gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve kapilarite katsayı tayini deneyleri için ise geopolimer harç numunelerine 90°C sıcaklıkta 24 saat kür işlemi uygulanmıştır. 7 ve 28 günlük süre sonunda gerçekleştirilen deneylerin sonuçları taguchi metoduyla analiz edilmiş ve elde edilen verilerin varyans analizi yapılarak parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca mikro yapı incelemeleri için SEM-EDS analizleri uygulanarak numunenin içyapısındaki malzemelerin birbiriyle olan etkileşimlerinin üç boyutlu görüntüsü alınmış ve elementel analizi ile numunelerin kimyasal bileşimi hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Gerçekleştirilen XRD analizi ile numunenin kristal yapısı incelenmiş, mineralojik bileşimi bulunmuş ve içerisindeki elementler ortaya çıkarılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve analizleri aşağıdaki gibidir:

1. İşlenebilirlik deney sonuçlarının analizine göre; süperakışkanlaştırıcı ve boraks miktarı arttıkça yayılma değerlerinin arttığı görülmüştür. Boraksın yayılma tablası deneyi için optimum değerinin %6 olduğu, süperakışkanlaştırıcının ise %3 olduğu ve tez çalışması kapsamında boraks ve süperakışkanlaştırıcının harcın işlenebilirliği üzerinde beklenen olumlu katkıları sağladığı görülmüştür. Molarite değeri arttıkça işlenebilirlik azaldığından harcın yayılma miktarı da azalmıştır.
2. Priz süresi tayini deney sonuçlarının analizine göre; süperakışkanlaştırıcı ve boraks miktarı arttıkça priz başlangıç ve sona erme süresinin arttığı görülmüştür. Ayrıca aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça priz sona erme süresinin uzadığı ve en yüksek priz sona erme süresinin 0,45 aktivatör/bağlayıcı oranında ve 18 molaritede elde edildiği görülmüştür. Elde edilen verilere göre boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkılarının geopolimer hamurlar üzerinde priz geciktirici etkisi olduğu ispatlanmıştır.

3. Basınç dayanımı deney sonuçlarının analizine göre; en yüksek basınç dayanım değerlerinin 22 molaritede elde edildiği, 18 molaritede basınç dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça basınç dayanımı düşmüş, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı oranında en yüksek değer elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanım değerleri de artmıştır ve en yüksek basınç dayanımı %30 F sınıfı uçucu kül ile 24,27 MPa olarak elde edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça basınç dayanımı 13-14 MPa'a kadar düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; kullanılan katkıların işlenebilirliği ve priz süresini olumlu, dayanımı ise olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

4. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının analizine göre; en yüksek eğilme dayanım değerlerinin 22 molaritede elde edildiği, 18 molaritede eğilme dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça eğilme dayanımı düşmüş, %0 boraks ve %0 süperakışkanlaştırıcı oranında en yüksek değer 7,86 MPa olarak elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül oranı arttıkça ve boraks miktarı düştükçe eğilme dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Elde edilen verilere göre; kullanılan katkıların işlenebilirliği ve priz süresini olumlu yönde etkilemesine rağmen, eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir.

5. Birim ağırlık deney sonuçlarının analizine göre; katkı oranı arttıkça birim ağırlık değerinin düştüğü anlaşılmıştır. Ayrıca 22 molarite ve 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek birim ağırlık değeri okunmuştur.

6. Ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının analizine göre; ultrases geçiş hızı değerleri tüm numunelerde 2-3 aralığında olduğundan harç numunelerinin kalitesinin zayıf olduğu tespit edilmiştir.

7. Kapiler su emme katsayı tayini deney sonuçlarının analizine göre; kapilarite deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde sodyum hidroksit (NaOH) birikmesine bağlı olarak çiçeklenme olduğu gözlemlenmiştir.

8. Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri basınç ve eğilme deneyi sonuçlarını destekler niteliktedir. Basınç ve eğilme dayanımı yüksek çıkan serilerin SEM görüntülerinde jel oluşumu gözlemlenmiştir (C-S-H).

9. Taguchi metoduyla belirlenen deney sayısı; malzeme ve zamandan tasarruf ederek kısa sürede geniş kapsamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

ÖNERİLER

Deneyisel araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar;

Cüruf ve uçucu kül ile birlikte silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi farklı malzemeler kullanılarak, aktivatör cinsleri veya katkı malzemeleri değiştirilerek çalışmanın geliştirilmesi mümkündür.

Ayrıca belirlenen parametreler ve seviyeleri değiştirilerek alkali aktivasyonlu harç karışımlarında ilave araştırmalar yapılabileceği söylenebilir.

Elde edilen veriler yapay zeka uygulamaları ile desteklenerek kıyaslamalı analizler gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] İlkentapar, S., (2013). Kimyasal Katkı İçeren Alkali İle Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Farklı Kür Koşulları Altındaki Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [2] Yılmaz, A., Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. İMO Teknik Dergi, 294, 4455-4470.
- [3] Proctor, D.M., Et al., Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace Basic Oxygen Furnace and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags, Environment Science and Technology 34 (8): pp: 1576-1582, 2000.
- [4] Yılmaz, A., (2002). Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- [5] Taştımur O., (2021). Uçucu Kül Ve Cam Lifi İçeren Cürufla Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [6] Erşimşek M., (2006). Enjeksiyon yöntemiyle üretilen kristal yapılı ferrokrom cürufu katkılı betonların fiziksel özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [7] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 112 s.
- [8] Bilim, C., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 206 s.
- [9] Topçu, İ.B., Toprak, M.U, 2009. Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (2): 153-164.
- [10] Sugözü Enerji Santrali, <http://www.ekton.com.tr/hafriyat/iskenderun.html> (Erişim Tarihi: Mayıs 2022)
- [11] ASTM C618: Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, No.4, 1998.
- [12] TS EN 197-1: Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Mart 2002.
- [13] EİE. (1979). "Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları". Ankara.
- [14] Yeğınobalı, A., Ertün, T. (2009). "Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar", TÇMB, Ankara.
- [15] Shi, C., Jimenez, A.F., Palomo, A., 2011, New Cements For The 21st Century: The pursuit of an alternative to portland cement, Cement And Concrete Research, Vol. 41, Issue 7, 750 – 763.
- [16] Yakupoğlu A., (2010). Alkalilerle Aktive Edilmiş Cüruflu Harçların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [17] Mahmut O., (2015). Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrokrom Cürufu Kullanımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- [18] Etimaden, <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi/dunyada-bor/turkiyede-bor> (Erişim Tarihi: Mayıs 2022)

- [19] Alp, M. S., Tanrıverdi, M., Kahraman, B. ve Batar, T. 1995. Bor Minerallerinin ve Ürünlerinin Pazarlama Koşulları. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı. İzmir. s. 49-57.
- [20] Poslu, K. ve Arslan, İ. H. 1995. Dünya Bor Mineralleri ve Bileşikleri Üretiminde Türkiye'nin Yeri. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı. İzmir. s. 33- 41.
- [21] Oderji, S.Y., Chen, B., Shakya, C., Ahmad, M.R., Shah, S. F. A., (2019) Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature. Construction and Building Materials 229 (2019) 116891
- [22] Bayrak, O.Ü., (2007). Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- [23] Şırvancı, M. (1997). Kalite İçin Deney Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı".İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- [24] Uray, E. (2014). Gabion Tipi Dayanma Duvarlarında Tasarım Kriterlerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [25] Canbaz, M., (2007). Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçların Özellikleri. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [26] Topçu, İ., B., Canbaz, M., (2008). Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçlarda Donma Çözülme. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi C.XXI, S.2, 2008
- [27] Aydın, S., (2010). Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [28] Rattanasak, U., Pankhet, K., Chindaprasirt, P., (2010). Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Volume 18, Number 3, June 2011, Page 364 DOI: 10.1007/s12613-011-0448-3
- [29] Maraş, M. M., (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [30] Kantarcı, F., (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [31] Jang, J.G., Lee, N.K., Lee, H.K., (2013). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. Construction and Building Materials 50 (2014) 169–176
- [32] Nematollahi, B., Sanjayan, J., (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. Materials and Design 57 (2014) 667–67
- [33] Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H., (2015). Characterization of alkali activated slag-fly ash blends containing nano-silica. Construction and Building Materials 98 (2015) 397–406
- [34] Xie, J., Kayali, O., (2016). Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C fly ash-based geopolymers. Construction and Building Materials 122 (2016) 36–42
- [35] Mahmut, O., Emiroğlu, M., (2016). Elazığ Ferrokrom Cürufunun Alkali Aktive Edilmiş Harç Üretiminde Kullanım Potansiyelinin Araştırılması. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 28(1),23-34, 2016
- [36] Yardımcı, M., Y., Aydın, S., (2016). Alkalilerle Aktive Edilmiş Standard Kürlü Harçların Statik Ve Dinamik Yükleme Altındaki Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt:18, No:3, Sayı:54, Sayfa 381-398, DOI: 10.21205/deufmd.2016185408

- [37] Kalkan, Y., (2017). Farklı Kür Şartlarının Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Betonların Mekanik Özellikleri Ve Mikro Yapısı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [38] Özcan, A., (2018). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [39] Bingöl, Ş., (2018). Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [40] Keskinçinç, M.K., (2019). Alkali Aktive Edilmiş Harç Üretiminde Krom Cürufu Ve Atık Mermer Tozunun Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [41] Alrefaei, Y., Wang, Y.S., Dai, J.G., (2019). The effectiveness of different superplasticizers in ambient cured one-part alkali activated pastes. *Cement and Concrete Composites* 97 (2019) 166-174
- [42] Mohabbi, M., (2020). Nano Silica and Micro Silica Effect on Mechanical Attributes of Ferrochrome Slag Based Geopolymer. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 8 (2020) 347-362
- [43] Nabil, K.M., Namitha, S., Sundhar, R., Rafeeqe, N. V. M., Raju, T., Ramaswamy, K.P., (2020). Effect Of Superplastizicer Type On The Fresh And Strength Properties Of Alkali Activated Slag Composites. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 491 012046
- [44] Almakhadmeh, M., Soliman, A.M., (2020). Effects of mixing water temperatures on properties of one-part alkali-activated slag paste. *Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Canada. Construction and Building Materials* 266 (2021) 121030
- [45] Alnahhal, M., F., Kim, T., Hajimohammadi, A., (2020). evolution of flow properties, plastic viscosity, and yield stress of alkali activated fly ash/slag pastes, *RILEM Technical Letters* (2020) 5: 141-149
- [46] Zidi, Z., Ltifi, M., Zafar, I., (2020). Characterization of Nano-Silica Local Metakaolin Based-Geopolymer: Microstructure and Mechanical Properties. *Scientific Research Publishing. Open Journal of Civil Engineering*, 2020, 10, 143-161
- [47] Mısıır, M. N., (2021). Elazığ Ferrokrom Cürufu ile Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [48] TS EN 1015-3, 2000. Kâğır Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [49] TS EN 196-3, 2002. Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [50] TSE EN 196-1. (2002). Çimento deney metotları - Dayanım tayini, TSE, Ankara.
- [51] TS EN 1015-11. (2000). Kâğır Harcı Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara
- [52] ASTM C642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- [53] TS EN 12504-4, (2004). "Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [54] ASTM C1585-13, 2013. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. s.l.:s.n.

- [55] Köker, T. Ş., (2019). Hafif Agregalı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- [56] Shams, Y., (2019). Killi Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Taguchi metodu). Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [57] Özen, E.S., (2019). Kumlu Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesinde Doymamış Polyester Kullanımı (Taguchi Metodu). Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- [58] Criado, M., Vicent, M., Garcia-Ten, F.J., (2022). Reactivation of alkali-activated materials made up of fly ashes from a coal power plant. Cleaner Materials 3 (2022) 100043

