

Korozyon İnhibitörlerinin Çimentolu Harçlarda Agresif Ortamlara Karşı Gösterdiği
Etkinin Araştırılması

İlkay Kara

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2024

Investigation of the Effect of Corrosion Inhibitors in Cementitious Mortars Against
Aggressive Environments

İlkay Kara

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

April 2024

Korozyon İnhibitörlerinin Çimentolu Harçlarda Agresif Ortamlara Karşı Gösterdiği
Etkinin Araştırılması

İlkay Kara

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

“ESOGÜ-BAP tarafından FDK-2022-2378 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.”

Nisan 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı Doktora öğrencisi **İlkay Kara**'nın DOKTORA tezi olarak hazırladığı ***“Korozyon İnhibitörlerinin Çimentolu Harçlarda Agresif Ortamlara Karşı Gösterdiği Etkinin Araştırılması”*** başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

İkinci Danışman :-

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye: Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Üye: Prof.Dr. Tayfun Uygunoğlu

Üye: Prof. Dr. Mustafa Şahmaran

Üye: Prof. Dr. Cenk Karakurt

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. İlker Bekir Topçu danışmanlığında hazırlamış olduğum ***“Korozyon İnhibitörlerinin Çimentolu Harçlarda Agresif Ortamlara Karşı Gösterdiği Etkinin Araştırılması”*** başlıklı Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 01/04/2024

İlkay Kara

ÖZET

Beton ve betonarme yapılar çeşitli agresif ortam koşullarından etkilenmektedirler. İç ve dış etkenler ile yapıya fiziksel-kimyasal olarak zarar vermekte ve çimento matrisinin dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedirler. Dış ve iç agresif ortam koşulları sülfat etkileri; donma çözülme çevrimleri, sodyum klorür etkisi, alkali-silika reaksiyonu ve donatı korozyonu olarak sıralanmaktadır. Bu olumsuz etkilere karşı alınan önlemlerden biri de korozyonu önlemek amacıyla kullanılan korozyon inhibitörleri olarak bilinmektedir. İnhibitörlerin kullanıldığı harç yapılarının farklı agresif ortamlarda olan etkileri merak edilmektedir. Literatür çalışmalarında korozyon inhibitörlerinin beton ve harç yapısındaki incelemeleri sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Uygulanan inhibitörlerin agresif ortam koşullarındaki elde edilen sonuçlarının literatüre katkıda bulunulacağı düşünülmektedir.

Deneylerde organik, inorganik ve yeşil (çevreci) olarak sınıflandırılan üç farklı korozyon inhibitörü kullanılmıştır. Numunelere etki eden agresif ortam koşulları sırası ile sülfat etkisi (magnezyum sülfat-sodyum sülfat), sodyum klorür etkisi, alkali-silika reaksiyonu ve donma-çözülme çevrimleri olarak belirlenmiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızları, birim hacim ağırlıkları, eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, inhibitör çeşidi ve oranına göre farklılıklar görülmüştür. Genel olarak standart kür uygulanan harç numunelerde, %1 oranında inhibitör kullanımı ile 28 günlük ve 180 günlük dayanım sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. D-Ç çevrimlerinde, %5,66 ile kalsiyum nitrit inhibitörü ile en az dayanım kaybı elde edilmiştir. ASR etkisinde %2 kalsiyum nitrit ve amino alkol inhibitörlerinde %0,030 oranı en az uzama belirlenmiştir.

ASTM C1012'ye göre sülfat etkisi ile boyca uzama değerlerinde üç inhibitörün de %1 uygulanmasında %0,005 oranı ile en az uzama gözlemlenmiştir. Sülfat etkisinin numunelerde dayanım etkisi incelendiğinde kontrol numunesine göre %1 inhibitör kullanımının basınç dayanımında daha etkili olduğu görülmüştür. Sodyum klorür etkisinde %2 amino alkol inhibitörünün basınç dayanımı daha başarılı olmuştur. Sonuç olarak inhibitör çeşit ve miktarlarının agresif ortamlarda gösterdiği farklılıklar dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, İnhibitör, Agresif, XRD, FE-SEM

SUMMARY

Concrete and reinforced-concrete structures are affected by various environmental conditions. Internal and external factors cause physical and chemical damage to the structure, thereby negatively affecting the durability of the cement matrix. The external and internal aggressive environmental conditions are listed as sulfate effects, F-T cycles, sodium chloride effect, alkali-silica reaction, and reinforcement corrosion. One measure to address these issues is the use of corrosion inhibitors. The effects of mortar structures that contain inhibitors in different aggressive environments are of interest. It has been observed that there is a limited number of studies on the examination of corrosion inhibitors in concrete and mortar structures in the literature. This thesis contributes to the literature by investigating the effects of inhibitors and different aggressive environmental conditions within its scope.

Three different corrosion inhibitors, classified as organic, inorganic, and green (environmental), were used in the experiments. The aggressive environmental conditions affecting the samples were determined as the sulfate effect sodium chloride effect, ASR, and F-T cycles. The ultrasonic pulse velocity, unit volume weights, and flexural-compressive strengths of the samples were analyzed. Analyzed, differences were observed according to inhibitor type and ratio. In general, it was observed that the 28 and 180-day strength results were higher with the use 1% inhibitor in mortar samples with standard curing. In D-C cycles, the least strength loss was obtained 5.66% calcium nitrite inhibitor. In the ASR effect, the least elongation of 0.030% was determined 2% calcium nitrite and amino alcohol inhibitors.

According to ASTM C1012 standards, the application of 0,005% of the three inhibitors within the 1% concentration exhibited the least length elongation under sulfate effect conditions. Analyzing the strength impact of sulfate exposure on the samples, it's notable that the use of 1% inhibitor enhanced compressive strength compared to the control sample. In the presence of sodium chloride, compressive strength improved with 2% amino alcohol inhibitor. These findings underscore the significance emphasizing the importance of both inhibitor types and concentrations in mitigating aggressive environmental effects.

Keywords: Corrosion, Inhibitor, Aggressive, XRD, FE-SEM

TEŞEKKÜR

Korozyon inhibitörlerinin çimentolu harçlarda agresif ortamlara karşı gösterdiği etkinin araştırılması konusunda gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. İlker Bekir Topçu'ya, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan çok kıymetli anneme ve babama en içten dileklerimle teşekkür eder, bu tezi #2022-2378 nolu proje kapsamında destekleyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

İlkay Kara

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Korozyon	5
2.2. Korozyon İnhibitörleri	6
2.3. İnorganik Korozyon İnhibitörleri	7
2.4. Organik Korozyon İnhibitörleri.....	9
2.5. Yeşil Korozyon İnhibitörleri.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Kullanılan Malzemeler	15
3.1.1. Çimento	15
3.1.2. Su.....	16
3.1.3. İnce agrega	16
3.1.4. Korozyon inhibitörleri.....	17
3.1.5. Sodyum hidroksit (NaOH)	18
3.1.6. Sodyum sülfat ($\text{Na}_2(\text{SO}_4)$).....	18
3.1.7. Magnezyum sülfat (MgSO_4)	18
3.1.8. Sodyum klorür (NaCl).....	19
3.2. Harç Numunelerinin Hazırlanması	19
3.3. Harç Numunelere Yapılan Deneyler	20
3.3.1. Taze harç deneyleri.....	20
3.3.1.1. <u>Birim ağırlık deneyi</u>	20
3.3.1.2. <u>Yayılma deneyi</u>	20
3.3.1.3. <u>Priz süresi deneyi</u>	21

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	21
3.3.2.1. <u>Birim ağırlık deneyi</u>	22
3.3.2.2. <u>Ultrases geçiş süresi deneyi</u>	22
3.3.2.3. <u>Eğilmede çekme dayanımı deneyi</u>	22
3.3.2.4. <u>Basınç dayanımı deneyi</u>	23
3.4. Dayanıklılık Deneyleri.....	23
3.4.1. Sülfat dayanıklılığı deneyi	23
3.4.2. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) deneyi	25
3.4.3. Sodyum klorür dayanıklılık deneyi	26
3.4.4. Donma-çözülme (D-Ç) deneyi	26
3.5. Mikroyapı Analizleri.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
4.1. Taze harç deneyleri.....	29
4.1.1. Korozyon inhibitörlerinin taze harç birim ağırlığına etkisi.....	29
4.1.2. Korozyon inhibitörlerinin yayılmaya etkisi	30
4.1.3. Korozyon inhibitörlerinin priz süresine etkisi.....	30
4.2. Sertleşmiş Harç Numunelerin Değerlendirilmesi	31
4.2.1. Standart kür sonuçları.....	31
4.2.1.1. <u>Birim ağırlık deney sonuçları</u>	31
4.2.1.2. <u>Ultrases geçiş süresi deney sonuçları</u>	33
4.2.1.3. <u>Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları</u>	35
4.2.1.4. <u>Basınç dayanımı deney sonuçları</u>	37
4.3. Dayanıklılık Deney Sonuçları	39
4.3.1. Sülfat dayanıklılığı deney sonuçları.....	39
4.3.2. Sodyum klorür dayanıklılığı deney sonuçları	50
4.3.3. Donma-çözülme deney sonuçları	54
4.3.4. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) deney sonuçları.....	58
4.4. Mikro Yapı İncelemeleri	60
4.4.1. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) sonuçları.....	60
4.4.2. EDS sonuçları.....	69
4.4.3. X-ışının difraktometresi (XRD) sonuçları.....	81

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5. HARÇ ÖZELİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ANALİZİ.....	86
5.1. Regresyon Analizi.....	86
5.1.1 Agresif ve standart kür koşulları regresyon analizi	86
5.1.2 Donma çözülme çevrimi regresyon analizi	89
5.2. Makine Öğrenmesi (ML) ile Numune Sonuçlarının Modellenmesi	90
5.2.1. Kullanılan metrikler ve veri artırımı	91
5.2.2. Doğrusal model regresyonu (Linear Model Regression)	92
5.2.3. Karar ağacı modeli regresyonu (Decision Tree Model Regression)	95
5.2.4. Gradyan artırma modeli regresyonu (Gradient Boosting model Regression)	97
5.2.5. Derin öğrenme modelleri regresyonu (Deep Learning Models Regression) .	99
5.3. Sürdürülebilirlik Analizi	106
5.4. Literatürdeki Diğer Sonuçlarla Karşılaştırma.....	108
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR DİZİNİ	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması.....	6
2.2. Çevreci (Yeşil) korozyon inhibitörleri	11
3.1. Yöntem	14
3.2. İnce agrega elek analizi	16
3.3. Korozyon inhibitörleri (a:KN, b:AA, c:BI)	17
3.4. Agresif ortam için kullanılan malzemeler	19
3.5. Vicat aleti (a) ve Priz süresi deneyi (b)	21
3.6. Prizmatik numuneler	23
3.7. MgSO ₄ etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin görüntüsü	24
3.8. MgSO ₄ etkisinde 180 gün bekletilen inhibitörlü numunelerin görüntüleri	24
3.9. Komparatör (a) ve ASR uygulanan numuneler (b)	25
3.10. D-Ç çevrimi sonrası numunelerin görüntüleri.....	27
4.1. Taze harçların korozyon inhibitörü etkisi ile BHA değişimi	29
4.2. Taze harç yayılma değerleri	30
4.3. Taze harç priz süreleri	30
4.4. Standart kür havuzunda ve agresif ortamda bekletilen numuneler.....	31
4.5. Standart kür koşulunda numunelerin birim hacim ağırlıkları.....	32
4.6. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası numunelerin BHA değerleri.....	32
4.7. Standart kür koşulunda numunelerin ultrases geçiş hızları	33
4.8. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası ultrases geçiş hızları	34
4.9. Standart kür koşulu numunelerin eğilme dayanımları.....	35
4.10. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası numunelerin eğilme dayanımları.....	36
4.11. Standart kür koşulunda basınç dayanımları.....	37
4.12. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası numunelerin basınç dayanımları	38
4.13. %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin birim hacim ağırlık sonuçları	39
4.14. %5 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin birim hacim ağırlık sonuçları.....	40
4.15. %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları	41
4.16. %5 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları.....	42
4.17. %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanımları	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

4.18. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanımları	44
4.19. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları	45
4.20. %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 180 gün bekletilen AA numuneleri.....	45
4.21. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları	46
4.22. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki KN numunelerinin boy değişimleri	47
4.23. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki KN numunelerinin boy değişimleri	47
4.24. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki AA numunelerinin boy değişimleri	48
4.25. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki AA numunelerinin boy değişimleri	48
4.26. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki Bİ numunelerinin boy değişimleri.....	49
4.27. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki Bİ numunelerinin boy değişimleri	49
4.28. %5 NaCl çözeltisindeki numuneleri hacim ağırlık değerleri.....	50
4.29. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları	51
4.30. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanımları.....	52
4.31. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları	53
4.32. KN numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı	54
4.33. KN numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı.....	54
4.34. AA numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı	55
4.35. AA numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı.....	55
4.36. Bİ numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı	56
4.37. Bİ numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı.....	56
4.38. KN içerikli numunelerin ASR deney sonucu	58
4.39. AA içerikli numunelerin ASR deney sonucu	59
4.40. Bİ içerikli numunelerin ASR deney sonucu	59
4.41. Na_2SO_4 etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü	60
4.42. Na_2SO_4 etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri	61
4.43. $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü.....	62
4.44. $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri.....	63
4.45. NaCl etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü	64
4.46. NaCl etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	<u>Sayfa</u>
4.47. ASR deneyi uygulanan İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü	66
4.48. ASR deneyi uygulanan numunelerin FE-SEM görüntüleri	67
4.49. Na ₂ SO ₄ etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri	69
4.50. Na ₂ SO ₄ etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri	71
4.51. MgSO ₄ etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri	72
4.52. MgSO ₄ etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri	74
4.53. NaCl etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri	75
4.54. NaCl etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri	77
4.55. ASR etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri	78
4.56. ASR etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri	80
4.57. NaCl etkisindeki KİH2 numunesinin XRD analizi	81
4.58. NaCl etkisindeki AİH2 ve BİH2 numunelerinin XRD analizi	82
4.59. MgSO ₄ etkisindeki numunelerin XRD analizi	83
4.60. Na ₂ SO ₄ etkisindeki numunelerin XRD analizi	84
4.61. ASR etkisindeki numunelerin XRD analiz sonucu	85
5.1. Agresif ortam ve standart kür uygulanan numunelerin regresyon analizleri	87
5.2. Doğrusal model grafiği	94
5.3. Karar ağacı modeli grafiği detaylı gösterimi	95
5.4. Karar ağacı modeli grafiği	96
5.5. Gradyan artırma modeli grafiği	98
5.6. ANN modeli tasarımı	100
5.7. LSTM modeli tasarımı	101
5.8. ANN kayıp grafiği	101
5.9. LSTM kayıp grafiği	102
5.10. Derin öğrenme ANN grafiği	103
5.11. Derin öğrenme LSTM grafiği	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

3.1. Çimentonun kimyasal analizi	15
3.2. Karışım suyunun kimyasal analizi.....	16
3.3. İnce agrega kimyasal analizi.....	16
3.4. İnhibitörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	17
3.5. Sodyum sülfatın kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	18
3.6. Magnezyum sülfatın kimyasal ve fiziksel özellikleri	18
3.7. Karışım miktarları	19
4.1. D-Ç çevrimi ultrases geçiş hızları	57
5.1. İnhibitörlü numunelerin basınç dayanımı Pearson korelasyon katsayıları.....	86
5.2. Agresif ortam basınç dayanımı ve BHA regresyon analiz sonuçları.....	88
5.3. D-Ç çevrimleri ağırlık ve basınç dayanımı kaybı regresyon analizi	89
5.4. Doğrusal model rastsal üretim sütun ağırlıkları	93
5.5. Doğrusal modelin katsayıları.....	93
5.6. Doğrusal model tahminleri	93
5.7. Karar Ağacı modeli sütun ağırlıkları	95
5.8. Karar Ağacı modeli tahminleri	96
5.9. Gradyan artırma modeli sütun ağırlıkları	97
5.10. Gradyan artırma modeli tahminleri	98
5.11. Derin Öğrenme ANN modeli sütun ağırlıkları	102
5.12. Derin Öğrenme LSTM modeli sütun ağırlıkları	102
5.13. Derin Öğrenme ANN tahminleri	103
5.14. Derin Öğrenme LSTM tahminleri	104
5.15. ML ve DÖ modelleri ile gerçek ve tahmini basınç dayanımlarının karşılaştırılması	105
5.16. E-enerji ve E-CO ₂ analiz değerleri	107
5.17. Üretilen numunelerin sürdürülebilir verimlilik analizi.....	107
5.18. Literatürde yapılan çalışmalar ve dayanım sonuçları	108
6.1. İnhibitörlerin harç özelliklerine etkilerini gösteren sonuç özeti	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
C_3S	Trikalsiyum Silikat
CSH	Kalsiyum Silika Hidrat
Fe_2O_3	Demir Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
$MgSO_4$	Magnezyum Sülfat
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SO_4	Sodyum Sülfat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
NO	Nitrik Oksit
NO_2	Azot Dioksit
SiO_2	Silisyum Dioksit
SO_3	Kükürt Trioksit

Kısaltmalar

Açıklama

AA	Amino Alkol
ANN	Sinir ağları
Bİ	Bor İnhibitörü
EDS	Enerji-dağılımlı spektroskopi
DL	Derin Öğrenme (Deep Learning)
FE-SEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

Kısaltmalar**Açıklama**

KN	Kalsiyum Nitrit
LSTM	Uzun Kısa Dönemli Bellek
ML	Makine öğrenmesi
MPa	Mega Pascal
OPC	Normal Portland Çimentosu
s/ç	Su-çimento oranı
t	Ultrases geçiş süresi, sn
TS EN	Türk Standartları European Norm
UGH	Ultrases dalga hızı, km/sn
UK	Uçucu kül
XRD	X ışını difraksiyonu
YFC	Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Beton ve betonarme yapılar dayanıklılığı azaltan çeşitli etkilerle karşılaşmaktadır. Dayanıklılığı olumsuz yönde etkileyen faktörlerden biride elektro-kimyasal reaksiyon sonucu oluşan donatı korozyonudur. Korozyonu önlemek amacıyla çeşitli koruma yöntemleri uygulanmaktadır. Bunlar içerisinde uygulanabilirliği ve daha ekonomik olması nedeniyle korozyon inhibitörleri yer almaktadır. Beton ve betonarme yapılar eş zamanlı olarak çeşitli çevresel koşullardan etkilenmektedir (Topçu ve Kara, 2023a). Bu koşullardan birkaçı; sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu, klorür iyonlarının etkisi, donma-çözülme çevrimleri olarak bilinmektedir. Çalışmada özellikle organik, inorganik ve çevre dostu yeşil korozyon inhibitörlerinin, uygulama oranları değiştirilerek çimentolu harçlarda farklı agresif ortamlara karşı gösterdiği etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması amaçlanmaktadır.

Literatürdeki araştırmalardan farklı olarak, bu çalışma çelik donatı olmaksızın, çimentolu harç yapısındaki korozyon inhibitörlerinin etkilerini incelemektedir. Elde edilen bulgular, kullanılan inhibitörlerin çimentolu yapılarda agresif koşullara dayanıklılık etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Beton veya betonarme yapılar, zamanla çeşitli iç veya dış etkiler sonucu bozulabilir. Bu etkiler arasında fiziksel, kimyasal, fiziko-kimyasal, biyolojik ve mekanik faktörler bulunmaktadır. Özellikle sülfat etkisi, aşınma, karbonatlaşma, donma-çözülme çevrimleri, asit etkileri, beton yapılarının dayanıklılığını azaltabilen önemli faktörlerdir. Oluşan hasarın derecesi, dış etkilerin şiddetine ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek dayanımlı beton yapılar olumsuz çevresel koşullara karşı korunmadığı zaman zarar görebilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2021).

Betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen faktörler; yapıların ömrünü kısaltmakla birlikte, yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilmekte ve ciddi güvenlik riskleri oluşturmaktadır. Betonun doğru tasarlanması, karşılaşma ihtimalinin olduğu çevresel koşullara uygun olarak kullanılması gereken, çimento çeşidi, kimyasal ve mineral katkıların tipi, agreganın boyutu ve petrografik özellikleri gibi malzemelere önem verilmelidir. Dolayısıyla, beton ve betonarme yapıların tasarımı, inşaatı ve bakımı, öngörülen zararların önlenmesi ve/veya en aza indirilmesi için büyük önem taşımaktadır (Baradan vd., 2010).

Sularda bulunan sülfat iyonları, özellikle yeraltı sularında, çatlama ve bozulmalar oluşturarak betona zarar vermektedir. Sülfat etkisini azaltabilmek için C_3A miktarı en fazla %5 olan sülfata dayanıklı çimento kullanımı ve çeşitli mineral katkıları içeren çimentoların kullanılması gerekmektedir. Sülfat etkilerini azaltarak betonun dayanıklılığını artırmaktadır (Türk ve Engin, 2023). Suda bulunan zararlı alkalilerden magnezyum sülfat ve sodyum sülfat, harç yapısında bulunan kalsiyum alüminatlar ile reaksiyona girerek genişleyen kristal yapılar oluşturmaktadır (Demir vd., 2018). Beton içerisine dış kaynaklardan giren sodyum sülfat, C_3A ile etkileşime girerek alçıtaşı ve etrenjit gibi yan ürünlerin oluşumuna neden olmaktadır. Gerçekleşen sülfat saldırısıyla iç yapıda oluşan yan ürünlerin miktarı, etki eden sülfat içeriğinin yoğunluk oranına bağlı olarak değişmektedir (Karakurt ve Topçu, 2011).

Sülfat etkisi sodyum sülfat ve magnezyum sülfat kaynaklı olabilmektedir. Sülfat etkisi altında, etrenjit veya sülfat tuzu oluşumu nedeniyle beton içinde boşluklar oluşmaktadır (Hasan ve Saidi, 2021). Sülfat saldırısıyla başa çıkma yeteneği, yapı malzemeleri için kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Uygulanan karışımlarda öncelikle su/çimento oranının önem taşıdığı belirtilmiştir. Harç çubuklarında oluşan belirgin bozulmalar, normal Portland çimentosu (OPC) kullanılarak hazırlanan karışımlarda gözlemlenmiştir. Bu nedenle, sülfat ortamlarında kullanılan çimentoların özelliklerini iyileştirmek ve dayanıklılıklarını artırmak amacıyla C_3A ve C_4AF miktarlarını azaltma yoluna gidilebilmektedir. Bu önlem, etrenjit oluşumunu kontrol altında tutarak yapı malzemelerini sülfat saldırısına karşı daha dayanıklı yapmaktadır (Sahmaran vd., 2007).

Belirli bir konsantrasyona kadar etrenjit oluşumu, iç yapıda hasara neden olmadığı durumlar mümkün olmaktadır. Aksine, boşluk doldurma etkisiyle basınç dayanımında artışa neden olabilmektedir. Bu nedenle, belirli bir miktarın altındaki etrenjit seviyesi ile genişleme-dayanım arasında sağlıklı bir bağlantı kurmak mümkün olmamaktadır. Benzer boşluk yapılarına sahip numunelerle yapılan karşılaştırmalar, aynı s/ç oranına sahip durumlarda etki eden sülfat çözeltisinin düşük konsantrasyonda olması, erken basınç dayanımı sonuçlarında yanıltıcı olmaktadır. Sülfat iyonlarının artması ile iç yapıdaki boşluk miktarına bağlı olarak etrenjit kristalleri artış göstermekte ve genişleme gerçekleşebilmektedir. Çimentoların sülfat dayanımını artırmak için geliştirilmesinde bu bilgilerin kullanılması önemli olmaktadır. Yapı malzemelerinin sülfat etkisi altında artan etrenjit oluşumuyla karşılaşması, dayanım ve genişleme arasındaki ilişkiyi değerlendirmek açısından önemli olmaktadır (Tosun vd. 2009).

Çimentolu yapıların dayanımını olumsuz yönde etkileyen çevresel koşullar arasında tekrarlı donma-çözülme çevrimi yer almaktadır. Betonun üretim ve yerleştirilme süreçlerinde bünyesinde çeşitli boşluklar oluşabilmektedir. Bu boşluklar içerisindeki su, sıcaklığın 0 °C'nin altına düşmesi ile donmakta ve hacmi %9 oranında genişlemektedir (Yazıcı, 2008). Başlangıçta donma olayının olası etkilerine karşı betonun dayanıklılık göstermesi için betonun içinde bulunan su miktarının belli bir oranda azalmış olması gerekmektedir. Oluşan bu durum "kritik doygunluk seviyesi" olarak tanımlanmaktadır (Uygunoğlu ve Ünal, 2005). Betonda gerçekleşen bu çevrimler sonucunda, betonun iç yapısındaki kapiler boşluklarda oluşan basınç etkisi ile yapısında bozulmalar gerçekleşmektedir. İçyapıdaki boşluk oranı zamanla artmaktadır. Dış yüzeyde ise öncelikle kılcal çatlaklar oluşturmakta, sonrasında yüzeyde dökülmeler ve donma çözülme çevrim devamı ile köşelerde kapak atmalar şeklinde gerçekleşmektedir (Topçu ve Canbaz, 2004).

Donma-çözülme (D-Ç) çevrimlerinden hem çimento fazı hem de porozitesi yüksek olan agrega taneleri etkilenmektedir (Topçu, 2006). Betonun D-Ç dayanıklılığını arttırmak amacıyla hava içermesi önerilmektedir. Hava boşluk çaplarının 300 µm ve toplam hava hacminin en fazla %5 olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca boşlukların beton içerisindeki dağılımının homojen olması önem taşımaktadır. Ancak betonda oluşan hava boşluklarının çapının ve miktarının artırılması ile dayanım değerlerinde kayıplar görülmektedir. Bu nedenle beton tasarımı önemlidir ve bu detaylara dikkat edilmesi gerekmektedir (Reiterman vd., 2019). Dayanıklılığı olumsuz etkileyen faktörlerden biride alkali-silika reaksiyonu (ASR) olarak bilinmektedir (Yahya, 2022). Kalsiyum nitrit, amino alkol ve bor içerikli inhibitörlerin ASR'ye olan etkilerinin incelendiği çalışmada ASR'yi ayrıca etkileyecek bir reaksiyon oluşmadığı dikkat çekmiştir. Ayrıca %2 kalsiyum nitrit ve amino alkol inhibitörleri ile %0,030 oranı en az uzama belirlenmiştir (Topçu ve Kara, 2024).

Donatı korozyonu da betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen başlıca nedenler arasında yer almaktadır. Korozyonun oluşmasında betonun karbonatlaşmasının yanı sıra donatı yüzeyine ulaşan klorür iyonları etkilemektedir (Al-Sodani vd., 2018). Betonarme yapılarda donatı korozyonu, betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen elektrokimyasal bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Beton, donatı yüzeyinde anodik ve katodik bölgelerden oluşan elektrokimyasal bir hücre gibi çalışmaktadır. Anodik ve katodik bölgelerde oluşan reaksiyon sonucu donatı korozyonu gerçekleşmektedir (Pradhan, 2022).

Kalsiyum nitrit (KN) içerikli inorganik inhibitörün %1 ve %2 oranlarında kullanıldığı harçlar 90 gün süre ile %5 Na₂SO₄ etkisinde bekletilmiştir. Numunelerin UGH, birim hacim ağırlığı, eğilme ve basınç dayanım sonuçları değerlendirilmiştir. Sodyum sülfat etkisinde 90 gün sonunda basınç dayanımlarının bütün numunelerde artmaya devam etmiş ve en yüksek dayanımın %1 oranında KN inhibitörlü kullanılan serilerde olduğu görülmüştür (Topçu ve Kara, 2023a). Standart kür koşulunda 28 gün bekletildikten sonra %5 MgSO₄ etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin görsel ve mekanik değerlendirmesi yapılmıştır. Deney sonucunda numuneler üzerinde beyaz lekeler, çatlaklar ve boşluklar oluşmuştur. KN'nin %1 oranında kullanıldığı numunelerde daha yüksek dayanım sonucu alınmıştır. KN kullanımının sülfat saldırısına ayrıca olumsuz etkisi görülmemiştir (Topçu ve Kara, 2023b).

Çalışmanın amacı, korozyonu önlemekte kullanılan inhibitörlerin taze ve sertleşmiş harç yapılarına olan etkilerinin değerlendirilmesidir. Bu değerlendirmenin nedeni beton ve betonarme yapılar aynı anda çeşitli iç ve dış etkenler nedeniyle zarar görebilmektedir. Bu koşullardan birini önlemek amacıyla kullanılan katkıların başka bir çevre koşuluna olan etkisi merak edilmektedir. Korozyonu önlemek amacıyla kullanılan organik, inorganik ve yeşil korozyon inhibitörlerinin farklı agresif koşullardaki etkileri değerlendirilmiştir. İnhibitörlerin harç yapılarına olan etkileriyle ilgili az sayıda çalışma mevcuttur. Literatür araştırmalarında, üretim faaliyetlerinde sıkça kullanılarak korozyonu geciktirdiği ve/veya önlediği bilinen, inorganik kalsiyum nitrit (KN) ve organik özellikli amino alkol (AA) içerikli inhibitörler harç numune üretiminde farklı oranlarda uygulanarak incelenmiştir.

Ayrıca çevreci yeşil olarak tanımlanan bor içerikli korozyon inhibitörü kullanımını literatür çalışmalarından farklı olarak incelenmiştir. Daha önce betonarme numunelerde korozyon etkisi değerlendirilmiş olan bor içerikli inhibitörün harç yapısında incelenmesi literatüre önemli bir katkı sunmuştur. Kullanılan inhibitörler farklı agresif koşullar uygulanan harç yapısına olan olumlu ya da olumsuz etkileri detaylandırılmıştır. Bu amaçla sülfat etkisi (sodyum sülfat-magnezyum sülfat), sodyum klorür etkisi, alkali-silika reaksiyonu, donma-çözülme çevrimleri değerlendirilmiştir. Ayrıca sülfat etkisinin (sodyum sülfat-magnezyum sülfat) boyca uzama değerlendirilmesi incelenmiştir. Bu amaçla standardın gereği olarak 52 haftalık boy uzama (%) ölçülmüştür. Ayrıca standart kür hidrasyon süreci ve agresif ortam etkisi sonucunda harç yapılarında oluşan iç yapı oluşumları FE-SEM, EDS ve XRD gibi mikro yapı analiz incelemeleri ile desteklenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Korozyon

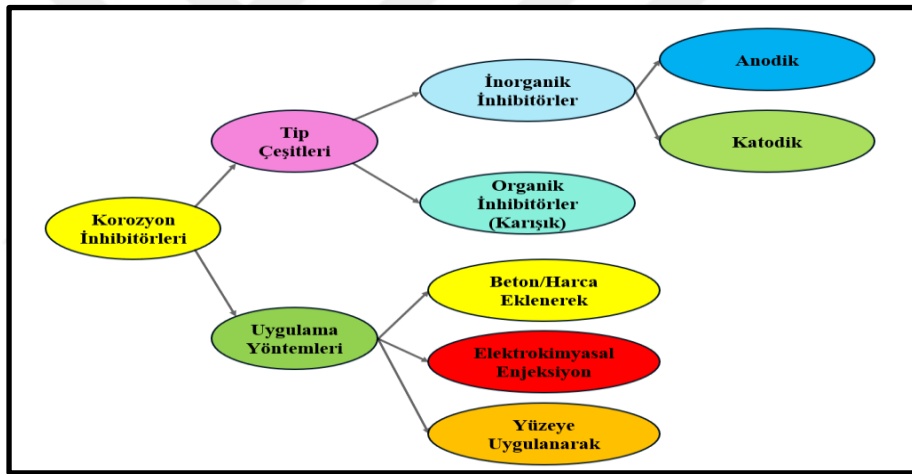
Beton genellikle donatı korozyonuna karşı güvenilir bir koruma sağlamaktadır. Beton mevcut pH değeri gereği donatının korozyonuna neden olmamaktadır. Bu duruma rağmen donatı korozyonu sık karşılaşılan önemli bir sorun olarak bilinmektedir. Korozyon sürecinde donatı üzerinde oluşan korozyon ürünleri hacimce artmakta ve betonun çatlamasına neden olmaktadır. Korozyon, oksijenin varlığında donatı üzerindeki koruyucu film tabakasının zarar görmesi sonucu oluşmaktadır (Topçu vd., 2022a). Çevresel etkilere kaynaklanan karbonatlaşma ve klorür iyonlarının artışı, beton içerisindeki donatı korozyonunu başlatarak, korozyon eşik seviyesinin azalmasına neden olmakta ve korozyonun devamlılığını sağlamaktadır (Tiwari vd., 2023; Ogunsanya ve Hansson, 2018).

Korozyonu önlemek amacıyla farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler; donatı kaplama, katodik koruma ve korozyon inhibitörleri olarak sıralanmaktadır (Topçu ve Uzunömeroğlu, 2021). Donatıyı dış etkilere karşı korumak için sıcak daldırma galvaniz ile kaplama en sık uygulanan donatı kaplama yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir (Topçu vd., 2022a; Topçu vd., 2022b). Donatı kaplama ile ilgili yapılan çalışmalardan biri olan nano boyutta kaplama TVA tekniği uygulanarak donatı kaplama denenmiştir. Uygulanan bu teknikte kaplama laboratuvar koşullarında kullanılan cihazla uygulanmıştır. TVA sistemiyle; Zn, Zn-B ve Zn-BN kaplanan donatılar incelenmiştir. Deney sonucunda kaplamasız donatıda korozyonun daha erken başladığı belirtilmiştir. Sonuçta kaplanan donatılar arasında Zn-BN donatısı daha geç korozyona uğramıştır (Uzunömeroğlu vd., 2022).

Beton katkı maddeleri, paslanmaz çelik donatı, epoksi kaplı donatılar, katodik koruma, su yalıtımı membranları, galvaniz çelik donatılar, yüzey koruma yöntemleri, anodik koruma, fiberglas kullanımı, lif ve polimer gibi yapı malzemeleri ve koruma yöntemleri, çeşitli avantajlar ve dezavantajlar taşımaktadır. Epoksi kaplı donatılarda uygun bağlantı eksikliği kimyasal saldırı riskini artırabilmektedir. Yüzey koruma yöntemleri profesyonel uzmanlık gerektirirken, anodik koruma sınırlı akım kapasitesine ve yüksek maliyetlere sahiptir. Paslanmaz çelik donatı kullanımı ve lifle güçlendirilmiş polimer uygulamalarının da yüksek maliyetli koruma yöntemleri olduğu bilinmektedir (Ahmed ve Ganesh, 2022).

2.2. Korozyon İnhibitörleri

Korozyon inhibitörleri, uygulaması kolay ve ekonomik bir yöntem olmuştur. Taze betona üretim sırasında düşük miktarda eklenerek, sertleşmiş beton yüzeyine uygulanarak ve donatı yüzeyine uygulanarak kullanılmaktadır (Angst vd., 2016). İnhibitörler donatı yüzeyinde koruyucu film tabakası oluşturmaktadır (Soylev ve Richardson, 2008). Günümüzde inhibisyon mekanizmasının tam olarak anlaşılmadığı farklı tipte inhibitörler bulunmaktadır. Bununla birlikte, kimyasal yapılarına, fiziksel, kimyasal ve elektro-kimyasal davranışlarına dayalı olarak inhibitör grupları belirlenmektedir (Wombacher vd., 2004). Araştırmalarda bilinen korozyon inhibitörleri; sodyum monoflorofosfat ($\text{Na}_2\text{PO}_3\text{F}$), sodyum nitrit (NaNO_2), amino alkol içerikli, amin tabanlı inhibitörler, kalsiyum nitrit ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$), sodyum-potasyum kromat ve sodyum fosfat şeklinde sıralamaktadır (Rivetti vd., 2018a).



Şekil 2.1. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması (Topçu ve Uzunömeroğlu, 2020).

Şekil 2.1’de korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması verilmektedir. İnhibitörler tiplerine ve uygulama yöntemlerine göre ayrıldığı görülmektedir (Topçu ve Uzunömeroğlu, 2020). Korozyon inhibitörlerinin taze betonda etkilerini incelemek amacıyla yapılan çalışmada, farklı mineral katkılarda kullanılmıştır. Kalsiyum nitrit, organik (MCI) inhibitör ve Glenium serisi süper akışkanlaştırıcı kullanılarak çökme kayıpları değerlendirilmiştir. Sabit s/ç oranında süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanmaksızın uygulanan organik korozyon inhibitörünün hem uçucu kül (UK) hem de silis dumanlı (SD) betonlarda 1 saatte kıvam kaybının gözlemlenmediği belirtilmiştir. Korozyon inhibitörlerinin kendiliğinden yerleşen betonlarda viskoziteyi azalttığı dikkat çekmektedir (Blankson ve Erdem, 2015).

2.3. İnorganik Korozyon İnhibitörleri

İnorganik korozyon inhibitörlerinden biri olan kalsiyum nitrit (KN), korozyon sırasında klorür koruma değerleri aşılması ile korozyonu azaltma eğiliminde olduğu açıklanmaktadır. Klorürün eşik değerini artırarak korozyonun başlangıcından önce geçen süreyi uzatarak betonun servis ömrünü artırmaktadır (Berke ve Hicks, 2004). Korozyonun başlamasına neden olan kritik eşik değerini arttırma özelliği bilinmektedir. İnhibitörün inhibisyon mekanizması (anodik-katodik) donatı yüzeyinde oluşmaktadır. Böylece donatının yüzeyinde, korozyonu geciktirici ve önleyici film tabakasının oluşmasını sağlayarak betonarme yapıların dayanıklılığını arttırmaktadır (Montes vd., 2004; Tang vd., 2017). Eşik oranının " $[Cl^-]/[NO_2^-]$ " 1-3 aralığında olması gerekmektedir. Bu oranın donatının korunması için önemli olduğu belirtilmektedir (Królikowski ve Kuziak, 2011).

Anodik inhibitörler, elektronları alabilme yetenekleri nedeniyle anotta gerçekleşen reaksiyonu bastırarak etki göstermektedir. Gerekli konsantrasyon genellikle çeliğe etkiyen klorür seviyesine bağlı olarak belirlenmektedir. Katodik inhibitörler, katodik reaksiyonu yavaşlatmaktadırlar ayrıca güçlü proton alıcılardır ve anodik inhibitörlere karşı eylemleri genellikle dolaylı olmaktadır. Donatı üzerindeki klorür iyonlarının oluşturduğu korozyonu önlemelerinin yanı sıra anodik ve katodik alanları birbirinden ayıran mikroskobik uzaklıktaki mikro hücre korozyonunu da önlemekte olduğu belirtilmektedir (Vaysburd ve Emmons, 2004). Ayrıca yapılan araştırmalarda, nitrit içeren inhibitörlerin korozyonu önlemedeki etkileri incelenmiştir. İnhibitör bileşimlerindeki $[NO]/[Cl]$ oranının 0.8-1.0'ı aştığı durumların daha önlemede daha etkili olduğu görülmektedir (Ormellese vd., 2006).

Yapılan çalışmalarda KN'nin hidratasyonla uyumlu olduğu ve %4 oranında %3 NaCl'de uzun süre bekletilmesinin betonun dayanıklılığına olumsuz etkisi olmadan korozyonunu azalttığı belirlenmiştir (Ryu vd., 2017). Nitrit bazlı inhibitörler, yapılan birçok araştırmada diğer inorganik inhibitörler arasında daha etkili olduğu kanıtlanmıştır. Betonun korozyonunu en aza indirmek için yapılan çalışmalarda $[NO_2^-]/[Cl^-]$ etki oranının 0.5-0.6'dan fazla olması gerektiği bulunmuştur. Bu oranın fazla olması korozyonu önlemede daha etkili olduğunu göstermektedir. Ancak, nitrit bazlı inhibitörlerin kullanımında toksisite sorunları göz önünde bulundurulmalıdır. Toksisite gibi önemli sorunlar nedeniyle alternatif olarak nitrat içerikli inhibitörlerin daha uygun olabileceği belirtilmektedir (Pradhan, 2022).

Klorür ve sülfat iyonlarının etkisindeki betonlarda donatı korozyonu incelenmiştir. Bu amaçla dört farklı inhibitör değerlendirilmiştir. KN içerikli inhibitör kullanımının korozyonu geciktirmekte diğerlerinden daha iyi inhibisyon etkisinin olduğu belirtilmiştir (Al-Amoudi vd., 2003). Kalsiyum nitrit (KN) kullanımının beton özelliklerini etkileyen çeşitli avantajları bulunmaktadır. Betonda priz hızlandırıcı etkisi bunlardan biri olmaktadır. KN inhibitörü kullanılan betonlarda 28 günlük dayanımların arttığı belirtilmektedir (Gaidis vd., 2004). Literatür araştırmalarında en verimli KN kullanımı sağlayacak sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda belirlenen bu özellikler; betonda s/ç oranının en fazla 0,50 olması, 300 kg/m³ en az çimento kullanımı, 30 mm pas payı ve betonda iri agreganın en az 18 mm büyüklüğünde olması şeklinde sıralanmaktadır (Berke ve Rosenberg, 1989).

KN inhibitörünün %0,5-1-2 oranında kullanıldığı çalışmada harç numuneler, -18°C ve +5°C'de 1 çevrimin 4 saat olduğu D-Ç çevrimleri uygulanmıştır. Ayrıca, farklı s/ç oranları (0,35-0,55) ve farklı kür koşulları uygulanarak D-Ç çevrimleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. D-Ç çevrimi sonucu oluşan ağırlık kayıpları göz önüne alındığında, 0,35 s/ç oranına sahip numunelerin ağırlık kaybı oranlarının birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. Ancak, 0,55 s/ç oranına sahip numunelerde, kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanılan numunelerde kontrol numunesine göre ağırlık kaybının daha az olduğu ifade edilmektedir (Honda vd., 2021). D-Ç çevrimlerinin organik, inorganik ve yeşil inhibitör kullanılan harç numunelerde 100 D-Ç çevrimi gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda her üç inhibitörün %1 ve %2 oranlarında kullanılmasının D-Ç çevrimlerine olumsuz bir etkisi olmamıştır. Ayrıca %1 KN kullanımında dayanım kaybının daha az olduğu görülmektedir (Topçu ve Kara, 2023c).

İçeriği Mg, Ni ve Zn iyonları olan inorganik katodik inhibitörler, suda bulunan OH⁻ ile reaksiyonları sonucunda Zn(OH)₂, Ni(OH)₂ ve Mg(OH)₂ çözünmeyen hidroksitler oluşturmaktadır. İnhibisyon mekanizması sonucu hidroksitler katodik yüzeyde film tabakası oluşturarak korozyonu önleme ve yavaşlatma etkisi göstermektedir. Katodik inhibitörler korozyona uğrayabilecek metalin yüzeyini tamamen kaplamaktadır. Kullanılan orandan bağımsız olarak inhibisyon etkisi göstermektedir (Dariva ve Galio, 2014). Başka bir inorganik inhibitör olan sodyum monoflüorofosfat (Na₂PO₃F), korozyonun başlamasını geciktirdiği ve hızını azaltma yeteneğine sahip olduğu belirtilmektedir. Doğal çevrede monoflüorofosfat hidrolize olur, ortofosfat ve florür oluşturmaktadır. İnhibisyon sonucu Fe₃O₄, γ-Fe₂O₃ ve FePO₄.H₂O gibi pasif film tabakası oluşturmaktadır (Rivetti vd., 2018b).

2.4. Organik Korozyon İnhibitörleri

Amino-alkoller, genellikle alkanolaminler ve amin karışımlarına veya alternatif olarak organik asitlere dayalı yaygın inhibitörlerdir. Toksik etkilerinin olmaması ve maliyet açısından çekici olmaları nedeniyle uygulamada kabul görmüşlerdir. Ayrıca, amino-alkoller farklı amaçlar için kullanılabilir. Amino-alkol içerikli karışık inhibitörler beton katkı maddeleri olarak veya mevcut yapıların onarımlarında kullanılmaktadır. Çeşitli uygulama yöntemleri bulunmaktadır (Wombacher vd., 2004). Organik inhibitör olan alkanolaminler, aminler, amino karboksilatlar ve bu bileşenler, yüksek buharlaşabilir içeriklere sahip olmaları nedeniyle sıvı kapiler emme ve gaz fazı difüzyonu yoluyla betonun iç yüzeyine ilerlemesine yardımcı olmaktadır. Organik inhibitörler, gösterdikleri bu özellikleri nedeniyle göç eden (ilerleyen) inhibitörler olarak adlandırılmaktadırlar (Shi vd., 2017).

Yüksek klorür içeren ortamların etkisinde kalan yapıların korunma verimliliğini artırmak için pratik öneriler de sunulmuştur. Amino alkol içerikli korozyon inhibitörleri, iki farklı yöntemle uygulanmaktadır. Taze betona katkı maddesi gibi katılmakta veya beton yüzeyine püskürtülerek uygulanmaktadır. Çalışmanın değerlendirilmesi sırasında, korozyon deneylerinde çimento harcına eklenen uygulamaların, yüzey uygulamalarına göre daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğu belirtilmiştir (Vyrides vd., 2013). Üretim sırasında betona eklenenler (ACI) olduğu gibi sertleşmiş yüzeyden göç eden (MCI) olarak adlandırılmaktadırlar. MCI'lar amin karboksilatlar ve amino alkol kombinasyonu olarak bilinmektedir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile derinlik profillemeye incelemesinde, MCI'nın 150 günde donatı yüzeyine ulaştığı belirtilmektedir (Tweek ve Abdulsada., 2023).

Amino alkol bazlı inhibitörün beton içindeki göç etkinliğinin araştırıldığı çalışmada, özellikle beton kalınlıkları ve dayanıklılık seviyeleri açısından incelenmiştir. Ayrıca, beton dayanıklılığındaki klorür varlığının donatı yüzeyinde oluşan pasif tabakanın stabilitesine olan etkisi de araştırılmıştır. Amino alkol bazlı inhibitörlerin etkinliğinin incelendiği çalışmalarda, betonun farklı kalınlıklarının inhibitörün göç etkinliğini nasıl etkilediği önemli bir etken oluşturmaktadır. Çalışma sonunda, düşük dayanımlı betonda inhibitör difüzyon hızının daha yüksek olduğu dikkat çekmiştir. Üretim sürecinde amino alkol içerikli korozyon inhibitörünün taze betona eklenmesi gereken etkili miktarın önemi vurgulanmakla birlikte en az miktarın 2,45 kg/m³ olmasının gerektiği dikkat çekmektedir (Vedalakshmi vd., 2009).

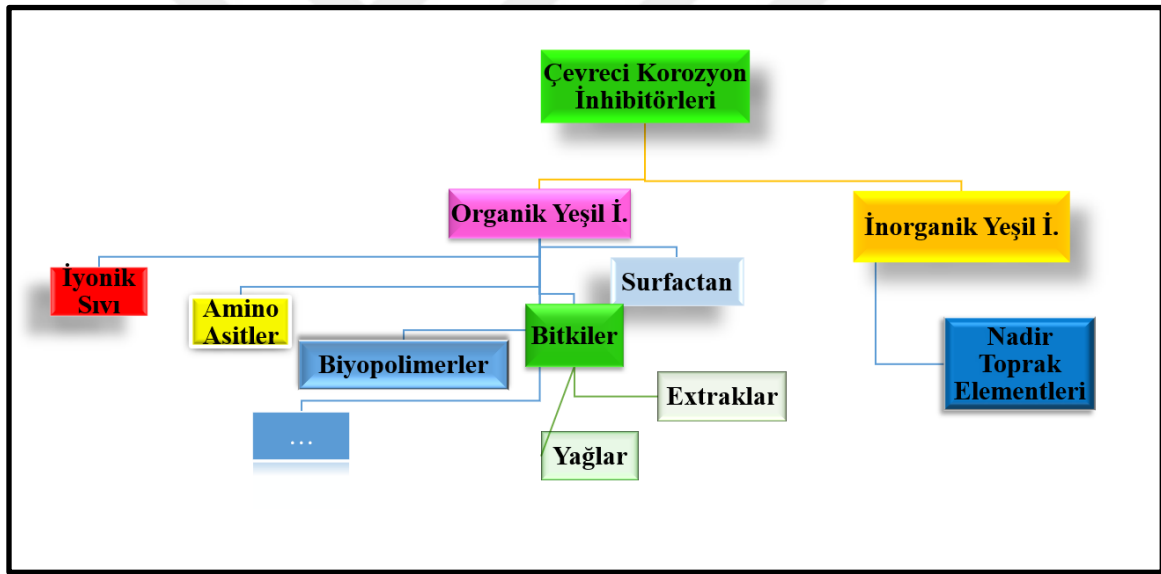
Korozyon potansiyel ölçümleri, polarizasyon eğrileri ve mikroskopik gözlemlerin uygulandığı çalışmada organik korozyon inhibitörünün etki mekanizması araştırılmıştır. İnhibitörlerin hem klorür içeren hem de içermeyen durumlarda korozyon ilerlemesini başarılı bir şekilde yavaşlatma yeteneğine sahip olduğu görülmüştür (Mechmeche vd., 2008). Ayrıca organik korozyon inhibitörlerinin kimyasal bileşikler oluşturduğu ve betonda bulunan boşluklu yapıyı bloke ederek klorür iyonlarının girişini azalttığı belirtilmektedir (Ormellese vd., 2006). Amino alkol içerikli inhibitör konsantrasyonunun %1- %4 arasında artmasıyla gözlemlenen kademeli inhibisyon etkisi incelenmiştir. Karbon çeliğinin sem analizi görüntüleri ile doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisine daldırılmış ve farklı klorür iyonu etkisinde kalmış karbon çeliğinin yüzeyinde etkili olduğu görülmüştür (Zheng vd., 2014).

Sodyum benzoat ve potasyum kromat içerikli inhibitörler çimento harçların fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnhibitör oranının (%0-%6) artması ve kalsiyum klorür oranının (%0-%4) değişimi basınç dayanımını ve işlenebilirliği azaltmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen değerler inhibitör kullanımının etkileri değerlendirilmiştir. Bu durum harç özelliklerini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir (Craig ve Wood, 1970; Pradhan, 2022). Aminler ve alkanol aminler, suda yüksek çözünürlüklü olmaları ve betonun hem sertleşmiş hem de taze beton özelliklerine etkilerinin az olması nedeniyle kullanılmaktadır. Alkanolamin bazlı inhibitörler hem klorür hem de karbonat kaynaklı korozyonları azaltmada etkili olmuştur. Ayrıca korozyon hızını $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına indirebilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir (Venkatesh vd., 2018; Diamanti vd., 2016).

Organik korozyon inhibitörlerinin NaCl etkisinde donma çözülme çevrimleri sonucu dayanımları incelenmiştir. Deney aşamaları sonucunda üretilen numunelerin gözenek boyut dağılımı, mikro yapı incelemeleri (XRD, NMR, SEM) yapılmıştır. Araştırmanın sonucunda easter içerikli inhibitörün etrenjit artışına neden olabileceği ve karboksilik asit bazlı bileşiklerin hava sürükleyerek donma direncini arttırdığı belirtilmiştir (Tian vd., 2017). Organik bileşik içerikli inhibitörleri fenil halkaları, polar fonksiyonel gruplarını, π -bağlarını ve heteroatomlar (N, S, O, P) gibi bileşikleri içermektedir. Donatı yüzeyinde NO_2 , $-\text{N}=\text{O}$, $-\text{N}=\text{C}<$, $-\text{NC}$, $-\text{COOH}$, $-\text{COCl}$, $-\text{CONH}_2$ vb. gibi fonksiyonel gruplar ve çoklu bağlarla reaksiyon gerçekleşmektedir. İnhibitörün oluşturduğu etki mekanizması, organik molekülün özelliğine, metal yüzeyine, ortamının kimyasal bileşimine, ortam çözelti sıcaklığına bağlı olarak fiziksel, kimyasal veya karışık tip şeklinde gerçekleşmektedir (Chauhan vd., 2021).

2.5. Yeşil Korozyon İnhibitörleri

Korozyon inhibitörlerinin toksik etkileri bulunabilmektedir. Bu durum çevre ve sağlık açısından endişeye neden olmaktadır (Topçu ve Kara, 2022). Su ve toprağa karışımları halinde zararlı etkileri olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle bazı ülkelerde inhibitörlerin üretimi, deşarjı ve kullanımı sırasında yasalarla önlemler alınmıştır (Sastri, 2011). Düşük toksisite değerleri, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri yeşil çevreci korozyon inhibitörlerinin araştırılması ve kullanılmasını sağlamaktadır (Raja ve Sethuraman, 2008). Etkili olan bileşenler bitkilerin çiçeklerinden, köklerinden, saplarından ve yaprak özlerindeki fitokimyasallarda bulunmaktadır. Fitokimyasalların üretiminde çoğunlukla ekstraksiyon tekniğinin kullanıldığı belirtilmektedir (Harb vd., 2020). Şekil 2.2’de çevreci (yeşil) korozyon inhibitörlerinin tipleri ve sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Çevreci (Yeşil) korozyon inhibitörleri (El İbrahimi vd., 2020)

Çevreci (yeşil) inhibitörlerde ticari inhibitörler gibi etki mekanizmalarına göre (organik ve inorganik) ayrılmaktadır (El İbrahimi vd., 2020). Peganum harmala (Esfand) tohumlarında bulunan etkili bileşiklerin düşük karbonlu çelik yüzeyini koruma potansiyeli değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında çelik donatı %3,5 klorür çözeltisinde 216 saat bekletildikten sonra, inhibitör verimliliği elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon spektroskopisi (PPS) teknikleri kullanılarak incelenmiş ve sonuç olarak %93,2 oranında inhibitör gücü olduğu kaydedilmektedir (Majd vd., 2020).

Bazı tıbbi bileşikler çevre dostu olmaları nedeniyle korozyon inhibitörü olarak tercih edilmektedir. Bu konu ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu bileşikler biyolojik olarak parçalanabilir, hidrofilik, lipofilik, polar veya polar olmayan özellikler taşımaktadır. Bu nedenle seçilen bileşiğin özelliği önemli olmaktadır (Gece, 2011). Ayrıca, organik bileşiklerde inhibitör olarak kullanılmaktadır. Bu bileşikler arasında askorbik asit, suksinik asit, triptamin, kafein ve doğal maddelerin özütleri bulunmaktadır. Bu organik inhibitörlerin etkinliği genellikle, molekül içerisindeki polar fonksiyonlar, heterosiklik bileşikler ve p elektronlarının varlığı ile ilişkili olmaktadır (De Souza ve Spinelli, 2009). Yeşil çevreci korozyon inhibitörlerinin, ticari olarak yaygın kullanılan inhibitörler gibi, organik ve inorganik bileşenlere göre sınıflandırıldığı bilinmektedir (Rani ve Basu, 2012).

Literatür çalışmaları incelendiğinde, meyan özünün inhibisyon etkisi araştırılmış ve inhibitörün donatı yüzeyinde etkili olduğu yapılan yüzey inceleme yöntemleri ile belirlenmiştir (Naderi vd., 2022). Terebinth bitkisinin meyve, yaprak ve dallarında elde edilen uçucu yağlarda üç ana bileşen (α -Pinen, Limonen ve α -Terpineol) belirlenmiştir. İnhibisyon etkisi elektrokimyasal yöntemlerle (EIS, potansiyodinamik vb.) incelenmiş ve %3 NaCl ortamında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda oluşturulan yeşil inhibitörün, etki mekanizmasının karışık tip (anodik ve katodik) olduğu ve 3000 ppm kullanımı ile %86,4 oranında verim alındığı belirtilmiştir (Barbouchi vd., 2020).

Yeşil korozyon inhibitörü olarak sınıflandırılan bor içerikli inhibitörün kullanıldığı çalışmada yarı hücre potansiyeli deneyi ile korozyon etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda bor içerikli inhibitör kullanımının kontrol numunesine göre %30,1 oranında korozyonu azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca taze beton özelliklerinin (çökme, kıvam kaybı, vb.) değerlendirilmesi sonucu olumsuz etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Topçu ve Uzunömeroğlu, 2022). Zencefil özü içerikli inhibitörün kullanıldığı bir çalışmada, korozyon diyagramları incelenmiş ve %2 oranında kullanılmasının korozyonu önlemede daha etkili olduğu görülmüştür. İnhibitör oranının (%0-%4) artması ile işlenebilirliğe olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir. Ancak eğilme ve basınç dayanımlarında ihmal edilebilir kayıplar gözlemlenmiştir (Wang vd., 2019). Başka bir çalışma yeşil korozyon inhibitörü olarak incelenen prosopis juliflora içerikli inhibitör uygulanmıştır. Betonarme donatılar üzerinde yapılan elektrokimyasal deneylerde, 100 ppm konsantrasyonda kullanılmasının korozyon akım yoğunluğunu önemli derecede azalttığını ortaya koymaktadır (Palanisamy vd., 2016).

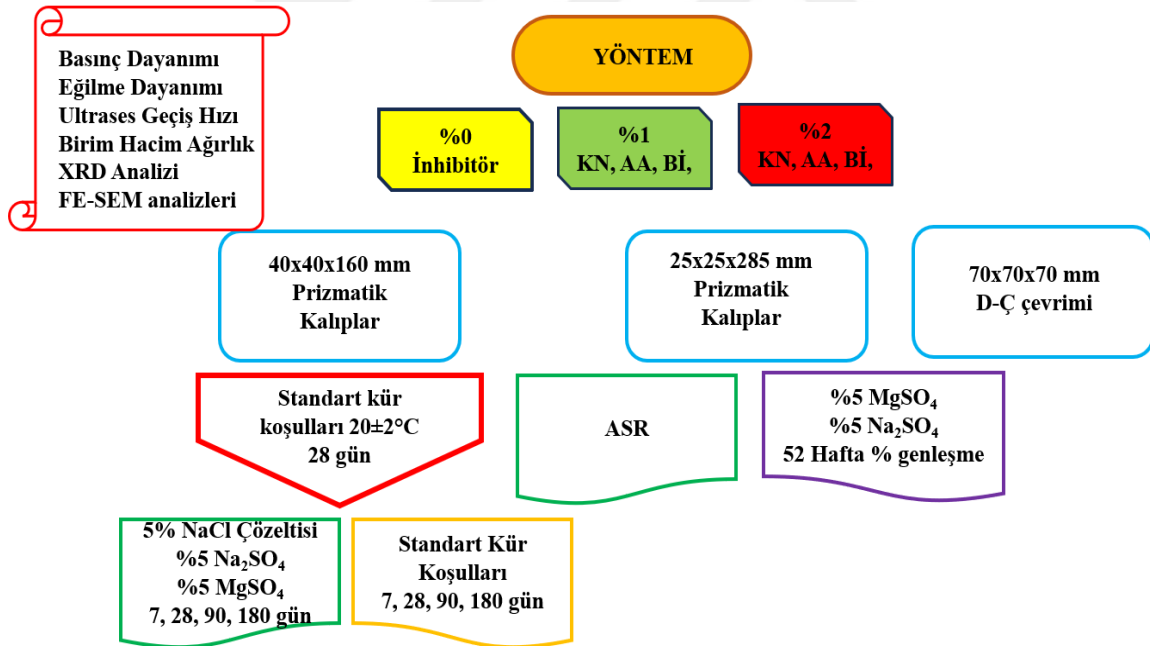
Beton dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, Bambusa Arundinacea yapraklarına ekstraksiyon işlemi uygulanarak bir korozyon inhibitörü hazırlanmıştır. Çalışmada numuneler 7, 28, 90 ve 180 gün standart kür uygulanmış ve basınç dayanımları incelenmiştir. Çalışma, çimento miktarının %1,5'i oranında magnezyum klorür ve 3 farklı korozyon inhibitörü eklenerek gerçekleştirilmiştir. Beton karışımındaki çimento ağırlığının %2'si kadar kullanılan korozyon inhibitörleri; etanol amin (C_2H_7NO), kalsiyum nitrit ($Ca(NO_2)_2$) ve B. Arundinacea inhibitörlerinin erken ve 28 günlük dayanımları karşılaştırılmıştır. KN içeren betonların dayanımının yüksek olduğu görülürken, 180 günlük sonuçlar Bambusa Arundinacea inhibitörlü beton numunesinin kontrol numunesinden %89 oranında yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermektedir (Abdulrahman ve Ismail, 2012).

Korozyon inhibitörü Malezya'da yetişen palmye ağacından elde edilen Areca catechu yapraklarının ekstraksiyonu sonrasında elde edilmiştir. Betonda %2 oranında biyolojik katkı ve kimyasal inhibitör kullanılmıştır. Ayrıca karışım suyuna %5 $MgSO_4$ ve NaCl ilave edilerek basınç dayanımları incelenmiştir. Beton numuneler üzerinde mekanik deneyler uygulanmıştır. Bu deney sonuçlarından basınç dayanımlarında, çevreci yeşil korozyon inhibitörü ile kullanılan beton numunelerin dayanımlarının daha yüksek olduğu ancak her iki inhibitör kullanıldığında da 89 günlük agresif ortamdan sonra dayanımların düştüğü belirtilmiştir. Agresif ortam koşulu olarak 360 gün boyunca ıslak-kuru döngüde %3,25 tuzlulukta (okyanus suyu) bırakılmıştır. Agresif ortam koşulunda bekletilen korozyona uğramış betonların mikroyapı analizleri incelenmiştir (Ghoreishiamiri vd., 2021).

Çevre dostu inhibitörlerin incelendiği çalışmada; sodyum nitrat, kazein, 11-aminoundekanoik asit ve p-aminobenzoik kullanılarak donatının klorür iyonu içeriği farklı ortamlarda nasıl performans gösterdikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, kazein inhibitörünün en yüksek korozyon inhibisyon verimliliğini gösterdiğini ve çelik donatıların kritik klorür konsantrasyonunda pasifleştirme sağladığını ortaya koymaktadır. Kullanılan yeşil inhibitörlerin yapı sektöründe uygulanabilirliğini sunmaktadır (Zomorodian vd., 2021). Yapılan çalışmalarda çevreye ve insana zararı olmayan yeşil inhibitörlerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Literatür çalışmalarında çevre dostu yeşil korozyon inhibitörlerinin donatı korozyonunu önlediği, son derece önemli olan toksisite etkilerinin olmadığı, betonarme yapıların korozyonu önleyerek dayanıklılığını arttırıcı etkisi olduğu ve sürdürülebilirlik açısından oldukça önemli katkılarının olabileceğine işaret edilmektedir.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu araştırmada, farklı korozyon inhibitörlerinin harçlarda kullanılarak agresif ortam koşullarındaki sonuçları incelenmiştir. Korozyon inhibitörleri inorganik (kalsiyum nitrit, KN), organik (amino alkol, AA) ve yeşil-çevreci (bor içerikli, Bİ) olmak üzere 3 farklı çeşitte kullanılmıştır. Şekil 3.1’de yapılan çalışmanın yöntemi gösterilmiştir. İnhibitör oranları çimento miktarının %1 ve %2 oranında karışıma eklenmiştir. Kontrol harç numunesi ise inhibitör kullanılmadan üretilmiştir. Karışımlarda su-çimento oranı sabit tutulmuş olup, inhibitör miktarı ayrıca ilave edilmiştir. Karışımlar, 0,50 su-çimento oranı ve ince agrega-çimento oranı 3,00 olacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelere TS EN 196-1’e göre taze ve sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır. Numunelere 20 ± 2 °C’de 7 ve 28 gün standart kür koşulu uygulanmıştır. Ayrıca numuneler 28 gün standart kür sonrasında eş zamanlı olarak karşılaştırmak amacıyla standart kür ve agresif ortam koşulu etkilerinde bekletilmiştir.



Şekil 3.1. Yöntem

Harç üretiminde 3 farklı boyutta numune kalıbı kullanılmıştır. Numuneler; 40×40×160 mm, 25×25×285 mm prizmatik şekilli ve 70 mm boyutlu küp numune olarak üretilmektedir. Harç numunelere standart kür koşuluna ek olarak 5 farklı agresif ortam koşulu uygulanmaktadır. Numuneler %5 Na₂SO₄, %5 MgSO₄ ve %5 NaCl çözeltilerinde 7, 28, 90 ve 180 gün bekletilmiştir ayrıca numuneler de ASR ve D-Ç çevrimleri de uygulanmıştır.

Birim hacim ağırlık (BHA), ultrases geçiş süresi (UGS), basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde her bir karışım serisi için üç adet numunenin ortalama değerleri alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada korozyon inhibitörlerinin harçlara olan etkileri standart kür koşullarında ve farklı agresif ortam koşullarındaki dayanım ve dayanıklılık deneyleri detaylı olarak incelenmiş ve kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Mikro yapı analiz araştırmalarında agresif ortam koşullarında bekletilen numunelerin FE-SEM, EDS ve XRD görüntü incelemeleri yapılmış, numunelerdeki oluşumlar değerlendirilmiştir. FE-SEM analizi ile mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde ayrıca EDS ve XRD analizleri ile numunelerin içerdikleri fazlar ve elementler hakkında bilgi alınmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Harç numunelerin üretim aşamasında CEM I 42,5R PÇ, 0-4 mm ince agrega, Eskişehir şebeke suyu, kalsiyum nitrit (KN), amino alkol (AA) ve bor içerikli (Bİ) olan üç farklı korozyon inhibitörü kullanılmıştır. Ayrıca agresif ortam koşullarında kullanılmak üzere Na₂SO₄, MgSO₄, NaCl ve NaOH alınmış, uygun oranlarda çözelti oluşturulmuştur.

3.1.1. Çimento

Deneysel araştırmada TS EN 197-1'e uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5R sınıfı çimento kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik analiz sonuçları verilmektedir. Ayrıca çimento basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal analizi

	Oksitler	Sonuçlar (%)	Analiz	Deneyler	Sonuçlar
Kimyasal Analiz	CaO	63,44	Fiziksel Analiz	Özgül yüzey (cm ² /g)	3622
	Al ₂ O ₃	4,77		Hacimce genleşme (mm)	1
	Fe ₂ O ₃	3,24		Özgül ağırlık g/cm ³	3,12
	SiO ₂	19,78		Priz Başlangıcı (dak.)	170
	SO ₃	3,11		45 µm Elek altı (%)	3,2
	MgO	1,49	Basınç Dayanımı, MPa	Gün	MPa
	Na ₂ O	0,74		2	32,8
	KK ^a	0,23		7	45,5
	ÇK ^b	2,82		28	54,9

^aKK: Kızdırma Kaybı. ^bÇK: Çözünmeyen Kalıntı

3.1.2 Su

Harç numunelerin üretimi için karışım suyu olarak Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır. Laboratuvarda kullanılan şebeke suyuna ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Sonuçların TS EN 1008 karma suyu özelliklerini taşıdığı görülmüştür.

Çizelge 3.2. Karışım suyunun kimyasal analizi (Sofuoğlu, 2022)

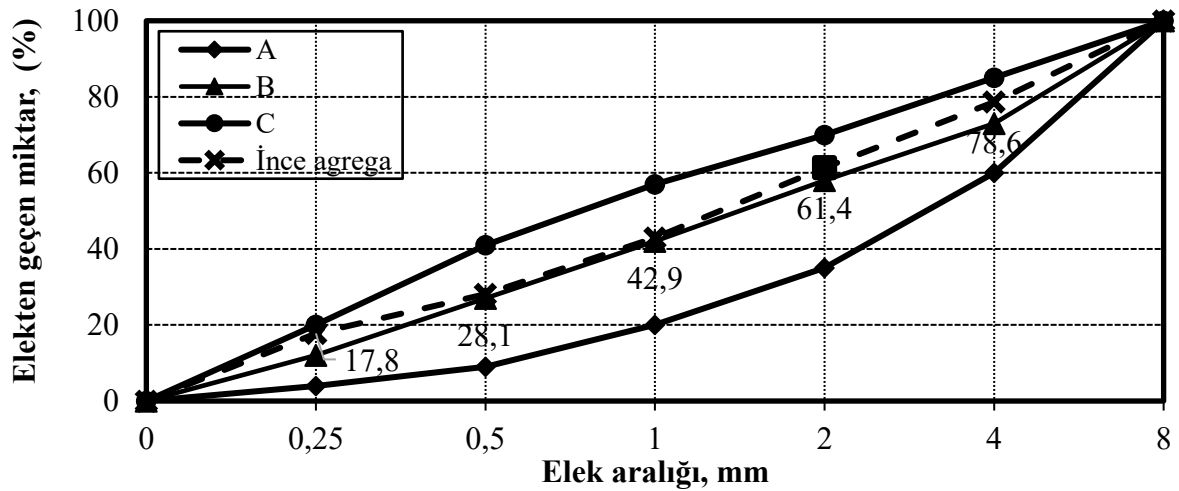
Parametreler (mg/L)										
Ca	Mg	Fe	Cl ⁻	Zn	Cu	SO ₄	ClO ₂	NO ₃ -N	ClO ₂	pH
63,8	41,5	0,074	6,53	0,375	0,092	91,5	<0,05	4,35	<0,09	7,49

3.1.3. İnce agrega

Eskişehir bölgesine ait kalker özellikli TS 706 EN 12620’ye uygun 0-4 mm ince agrega kullanılmıştır. İnce agreganın kimyasal özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir. İnce agreganın elek analiz sonuçları Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Özgül ağırlığı 2,70 ve birim ağırlığı 1,50 kg/dm³, belirlenen metilen mavisi değeri 0,50 oranında olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. İnce agrega kimyasal analizi

Oksitler	CO ₂	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO
Değerler (%)	42,38	6,44	3,47	0,69	0,23	0,10	0,06



Şekil 3.2. İnce agrega elek analizi

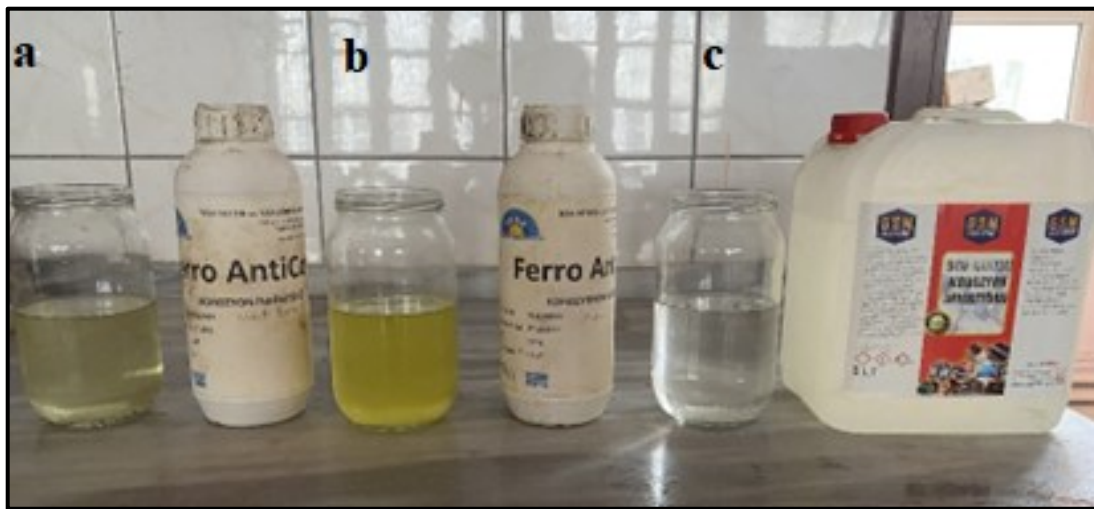
3.1.4. Korozyon inhibitörleri

Betonarme yapılarda donatı korozyonunu önlemek amacıyla kullanılan inorganik ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) içerikli, organik amino alkol içerikli ticari korozyon inhibitörleri İKSA beton ve yapı kimyasalları firmasından temin edilmiştir (İKSA, 2023). Yeşil-çevreci olarak tanımlanan bor içerikli (Trietilamin boran kompleksi) inhibitör ise Çözüm Kimya firmasından alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan bor içerikli inhibitör, sentezlenen Triflorometil halojenür boronyum katyonu sonucu elde edilmiştir (Gerengi ve Uğraş, 2017).

Çizelge 3.4. İnhibitörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Uzunömeroğlu, 2023)

Özellikler	Kalsiyum Nitrit İçerikli (KN)	Amino Alkol İçerikli (AA)	Bor İçerikli (Bİ)
Kimyasal Yapı	Nitrit esaslı	Etoksile Amino alkol	Bor
Görünüm	Kirli Sarı	Kirli Sarı	Renksiz
Yoğunluk	$1,1 \pm 0,03 \text{ kg/L}$	$1,05 \pm 0,02 \text{ kg/L}$	0,77
pH	$8,5 \pm 1$	$10,00 \pm 1$	6,5

Çizelge 3.4’de kullanılan inhibitörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir. Şekil 3.3’te inhibitörlerin numune kapları ve fiziksel özellikleri (renkleri) görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kalsiyum nitrit içerikli inhibitörün rengi açık sarı, amino alkol içerikli inhibitörün rengi daha koyu kirli sarı ve bor içerikli inhibitör ise renksizdir. Amino alkol içerikli inhibitörün diğerlerine göre pH değerinin daha bazik olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. Korozyon inhibitörleri (a:KN, b:AA, c:Bİ)

3.1.5. Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit (NaOH) harç numunelerin alkali-silika reaksiyonu değerlerinin ölçülmesinde kullanılması amacıyla Detsan Kimya Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Harç 25×25×285 boyutlu prizmatik numuneler 80 °C'de 14 gün NaOH çözeltisinde bekletilmiştir.

3.1.6. Sodyum sülfat (Na₂SO₄)

Planlanan agresif ortam koşullarında biri olan sodyum sülfat etkisinin araştırılması amacıyla Detsan Kimya Ltd. Şti.'den sodyum sülfat tozu temin edilmiştir. Harç numuneler üzerinde sülfat etkisini incelemek amacıyla %5 oranında çözelti oluşturulmakta kullanılmıştır. Sodyum sülfat tozunun firmadan temin edilen analiz formundaki kimyasal ve fiziksel özellikleri olması gereken sınır değerlerde Çizelge 3.5'te detaylı gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Sodyum sülfatın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Yapılan Analiz	Analiz sonucu	Sınır değerler
Renk ve görünüm	Beyaz, serbest akışlı toz	Beyaz, serbest akışlı toz
Yığın yoğunluğu	1,46	1,3-1,6 gr/cm ³
pH	7,25	6-8
Na ₂ SO ₄	99,58	>%99
Nem	0,09	<%0,2
Suda çözünmeyen madde	0,015	<%0,1
NaCl	0,286	≤ %0,3
Ca ⁺²	0,016	≤%0,15
Mg ⁺²	0,013	≤%0,05
Fe (Toplam)	<10 ppm	<10 ppm

3.1.7. Magnezyum Sülfat (MgSO₄)

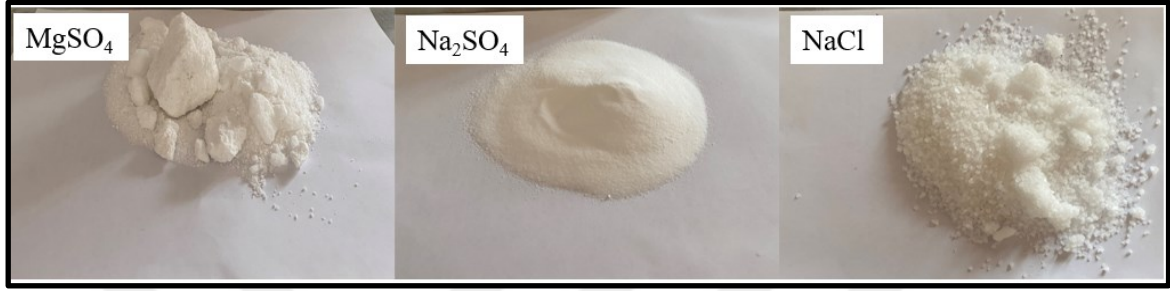
Detsan Kimya Ltd. Şti.'den temin edilen magnezyum sülfat, toz serbest akışlı formda alınmıştır. Sülfat etkisini çeşitlendirmek amacıyla %5 oranında kullanılarak agresif ortam koşulunda kullanılmıştır. Çizelge 3.6'da MgSO₄'e ait analiz sonucu gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Magnezyum sülfatın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Analiz Sonucu	Formül	Ca	Cl	Fe	Pb	As	pH
	MgSO ₄ .7H ₂ O	%0,21	77 ppm	1 ppm	3 ppm	2 ppm	7

3.1.8. Sodyum klorür (NaCl)

Korozyon inhibitörlerinin, harç yapısında kullanılması ile NaCl agresif ortam koşulundaki etkilerinin incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Dayanıklılık deneylerini gerçekleştirebilmesi için %5 oranında NaCl çözeltisi etkisindeki numuneler incelenmiştir. Şekil 3.4’de agresif ortam oluşturmak için kullanılan toz malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Agresif ortam için kullanılan malzemeler

3.2 Harç Numunelerinin Hazırlanması

Harç numunelerin üretiminde Çizelge 3.7’de belirtilen oranlar kullanılmıştır. Çimento miktarının 450 gr olarak belirlendiği çalışmada su-çimento oranı 0,50 ve ince agrega-çimento oranı 3,00 olacak şekilde eklenmiştir. Korozyon inhibitörleri çimento dozajının %1 ve %2 oranında kullanılmıştır. Kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanılan numuneler oranlarına göre KİH1 ve KİH2, amino alkol içerikli inhibitörlü numuneler AİH1 ve AİH2, bor içerikli inhibitörlü numuneler BİH1 ve BİH2 olarak adlandırılmıştır. İnhibitör kullanılmayan kontrol numuneler ise İH0 olarak adlandırılmıştır. Laboratuvar tipi karıştırıcıya sırası ile su, inhibitör, çimento 62,5 dk⁻¹ yörüngesel hızda karıştırılmıştır. İnce agrega diğer malzemelerin içine dökülür ve toplamda 60 sn olacak şekilde karıştırılmıştır. Numune hazırlığında son olarak karışım 125 dk⁻¹ dönme hızında 60 sn daha karıştırılmıştır.

Çizelge 3.7. Karışım miktarları (gr)

Kodu	Çimento	Su	Kum	s/ç	KN	AA	Bİ
İH0	450	225	1350	0,5	0	0	0
KİH1	450	225	1350	0,5	4,5	0	0
KİH2	450	225	1350	0,5	9,0	0	0
AİH1	450	225	1350	0,5	0	4,5	0
AİH2	450	225	1350	0,5	0	9,0	0
BİH1	450	225	1350	0,5	0	0	4,5
BİH2	450	225	1350	0,5	0	0	9,0

KN: Kalsiyum nitrit içerikli; **AA:** Amino alkol içerikli; **Bİ:** Bor içerikli

3.3. Harç Numunelere Yapılan Deneyler

Harç numuneler üzerinde çeşitli deneyler uygulanmıştır. Hazırlık aşamasında taze harçlar için hazırlanan harcın işlenebilirliğini değerlendirmek ve inceleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu deneyler sırası ile birim hacim ağırlık, priz başlangıç ve bitiş süresi ve yayılma tablası deneyleri olmaktadır. Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş süresi deneyi, eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

3.3.1 Taze harç deneyleri

Harç numunelerinin işlenebilirlik ve kalıptan çıkarılabilme sürelerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmektedir. İşlenebilirlik değerlendirmesi için, yayılma tablası deneyi, kalıba yerleştirilebilmesi ve kalıptan çıkartılabilmesi için priz başlama ve bitiş süreleri ile bunlara ek olarak birim hacim ağırlık deneyi uygulanmaktadır. Uygulanan bu deneyler ile taze harç numunelerinin belirli özelliklerini değerlendirmek, üretim aşamasının uygulanabilirliği ve işlenebilirlik performanslarının ölçülmesi amaçlamaktadır.

3.3.1.1 Birim ağırlık deneyi

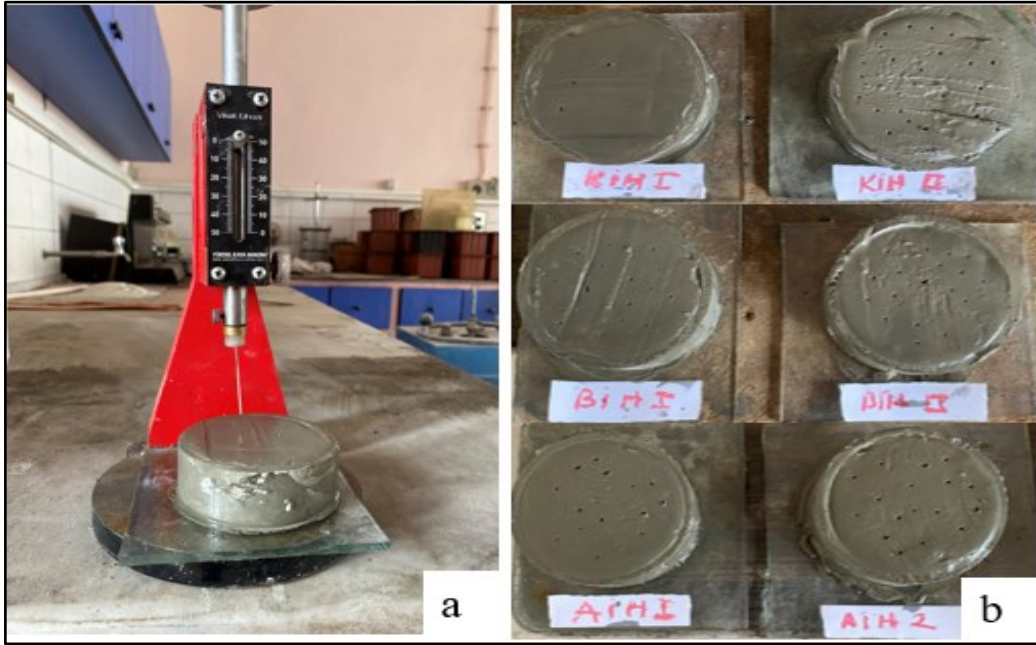
Taze harç numunenin birim hacim ağırlık değerini belirlemek amacıyla öncelikle kalıbın darasının alınması gerekmektedir. Daha sonra kalıba yerleştirilen harç ve kalıbın ağırlığı birlikte tartılarak kaydedilir. Dara değeri çıkartılarak belirlenmek istenilen birim ağırlık değerine ulaşılmaktadır (TS EN 12350-6). Deneyin amacı kullanılan inhibitör miktar ve çeşitlerinin taze harç birim hacim ağırlığı üzerindeki etkilerini değerlendirilmektedir.

3.3.1.2 Yayılma deneyi

Taze harçlar üzerinde TS EN 1015-3 standardına göre yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Deney sırasında hazırlanan harç, halka içerisine iki aşamalı olarak yerleştirilmiştir. Her tabaka, 15 defa tokmakla sıkıştırılmıştır. Ardından, harç yüzeyi düzleştirilmiş ve çekilen halka yavaş hareketlerle çekilmiştir. Yayılma tablasının ortasındaki harç ise 15 defa düşürülmüştür. Dairesel şekilde yayılan harcın çapı, çapraz bir şekilde iki defa ölçülmüştür. Yapılan bu aşamalar sayesinde taze harç yayılma değerleri belirlenmiştir.

3.3.1.3 Priz süresi deneyi

TS EN 196-3'e göre hazırlanan çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri incelenmektedir. Burada amaç kullanılan farklı korozyon inhibitörlerinin uygulama dozajlarının (%0-%1-%2) priz sürelerine olan etkisidir. Hazırlanan çimento hamuru, Vicat halkası içerisine yerleştirilmektedir. Daha sonra Vicat iğnesi, hazırlanan harç içerisine belirli bir yükseklikten kendi ağırlığı ile bırakılmaktadır. Vicat aleti üzerinde bulunan değerler yardımı ile batma yüksekliği ölçülmektedir. Bu uygulama tekrarlanarak farklı yerlere batırılarak yapılmaktadır. İğnenin halkanın tabanına olan uzaklığı 3-5 mm aralığında ise priz başlamış demektir. İğnenin 0,5 mm'lik bir derinliğe battığı durumda ise priz tamamlanmıştır. Şekil 3.5'te priz süresinin bulunması için kullanılan Vicat aleti (a) ve farklı korozyon inhibitörlerinin %1 ve %2 oranlarında hazırlanmış çimento hamurları (b) görülmektedir.



Şekil 3.5. Vicat aleti (a) ve Priz süresi deneyi (b)

3.3.2. Sertleşmiş harç deneyleri

Yapılan çalışma ile üretilen harç numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 7 ve 28 gün standart kür sonrası birim ağırlık, ultrases geçiş süresi deneyi, eğilme-basınç dayanımları ve mikro yapı görüntü (FE-SEM) incelemeleri yapılmıştır. Agresif ortam koşullarında bekletilen numuneler üzerinde de uygulanmıştır.

3.3.2.1. Birim ağırlık deneyi

TS EN 12390-7'e göre sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Deney aşamasında 4×4×16 cm boyutlu prizmatik numuneler deney günü (7, 28, 90, 180) geldiğinde ±2 gr hassaslıktaki dijital tartıda ağırlıkları belirlenmiştir. Ağırlıkları belirlenen harç numuneler bilinen hacim boyutlarına bölünerek (kg/dm³) değerine çevrilerek kaydedilmiştir.

3.3.2.2. Ultrases geçiş süresi deneyi

Bu deney malzeme içerisinden ses hızının geçiş süresinin ölçümü esasına dayanır. Bu yöntemle malzeme kalitesinin belirlenmesi için, ölçümlerin yüksek bir duyarlılık ve doğrultuda yapılması gerekir. Ultrases deney cihazı, ses üstü dalganın verildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki bir uzaklığı ne kadar sürede geçtiğini ölçmektedir. Okunan ses geçiş süresi ses hızına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile çevrilmektedir (Topçu, 2006). TS EN 12504-4'e göre yapılan deneyde V: ses hızını (km/s), t: ses geçiş süresini, (s) L: Ölçü boyu, (km) olarak belirtilmiştir. Hesaplama yöntemi ise (3.1) denklemi ile belirlenmiştir.

$$V=L/t \quad (3.1)$$

3.3.2.3. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Agresif ortam koşullarında ve standart su küründe bekletilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri incelenmiştir. Deney 7, 28, 90 ve 180 günlük harç numunelerde uygulanmıştır. Su küründen ve agresif ortam koşulundan çıkartılan numuneler yüzey kuru haline geldikten sonra birim hacim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. Prizmatik harç numuneler (40×40×160 mm) orta noktalarından eksenel yük uygulanarak eğilmede çekme dayanımları elde edilmiştir. Sonuçlar (3.2) denklemi ile bulunmaktadır.

$$\sigma_{\phi} = (PL/bh^2) \quad (3.2)$$

P: Kuvvet (N)

L: Mesnetler arası uzaklık (mm)

b: Kesit genişliği (mm)

h: Kesit yüksekliği (mm)

3.3.2.4. Basınç dayanımı deneyi

Harç numunelerin 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş süresi deneyi yapılmıştır. Daha sonra eğilmede çekme dayanımını deneyi yapılarak numuneler 40×40×160 mm boyutundaki numuneler iki eşit parçaya ayrılmaktadır. Numuneler 2000 kN kapasiteli TS EN 196-1'e uygun otomatik çimento basınç deney presinde, 40×40 mm çelik plakaların bulunduğu aparat yardımı ile basınç dayanımı sonucu elde edilmiştir. Deneyde basınç uygulanarak kırılan numunelerin basınç dayanımı değerleri presin dijital ekranından 0,01 MPa hassasiyetle okunarak elde edilen veriler kaydedilmiştir.

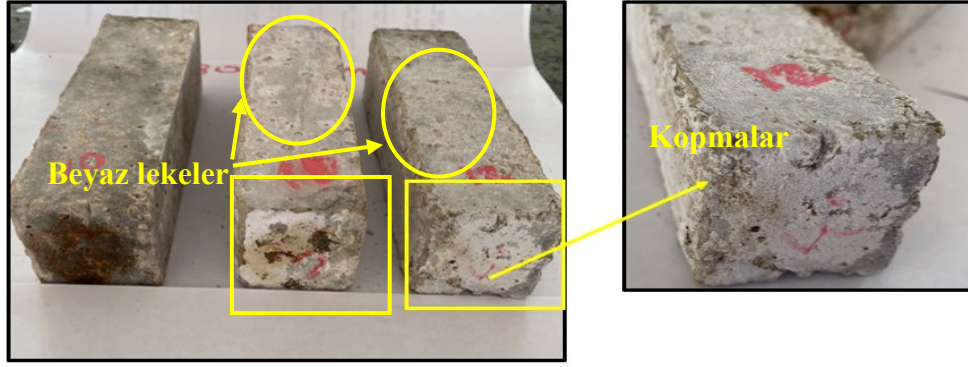
3.4. Dayanıklılık Deneyleri

3.4.1. Sülfat dayanıklılığı deneyi

ASTM C1012 standardına göre gerçekleştirilecek olan sülfat direnci deneyleri için hazırlanan numunelerin s/ç oranı standarda göre değer olan 0,485 olarak belirlenmiştir. İnce agrega/çimento oranı ise 2,75 olarak alınmıştır. Deney, inhibitörsüz kontrol numunesi ve korozyon inhibitörü içeren (%1-%2) harç numunelerinin %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltisindeki boy değişimleri incelenmiştir. Numuneler, pimli prizmatik formda olup, boyutları 25×25×285 mm olarak belirlenmiştir. Ölçümler 0,001 mm hassasiyetli komparatörle gerçekleştirilmiştir. Pimli prizmatik harç numuneler 35±3 °C'de %98 bağıl nem ortamında 24 saat kür uygulanmıştır. Harç numuneler ile aynı gün dökümü yapılan 50×50×50 mm küp numuneler kirece doygun suda, basınç dayanımları 20 MPa'ya ulaşınca kadar bekletilmiştir. Prizmatik numunelerin belirli zaman aralıklarında boy değişimleri alınmıştır. Şekil 3.6'da 25×25×285 mm boyutlu prizmatik numuneler gösterilmektedir.

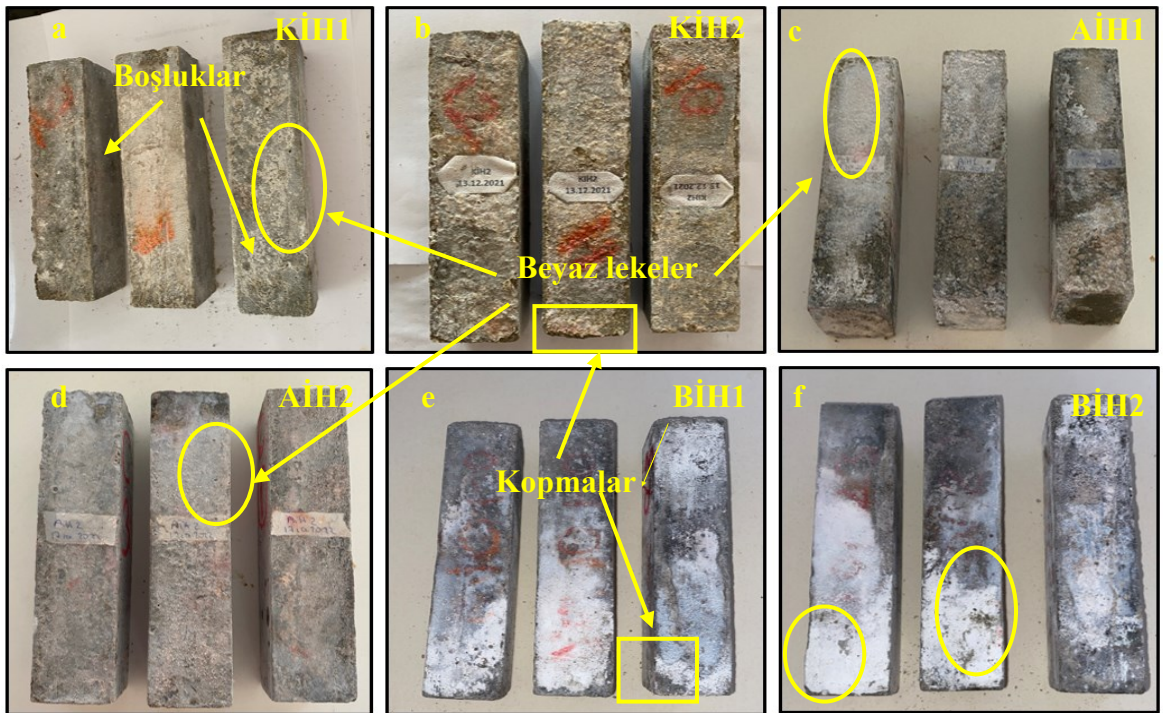


Şekil 3.6. Prizmatik numuneler



Şekil 3.7. $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin görüntüsü

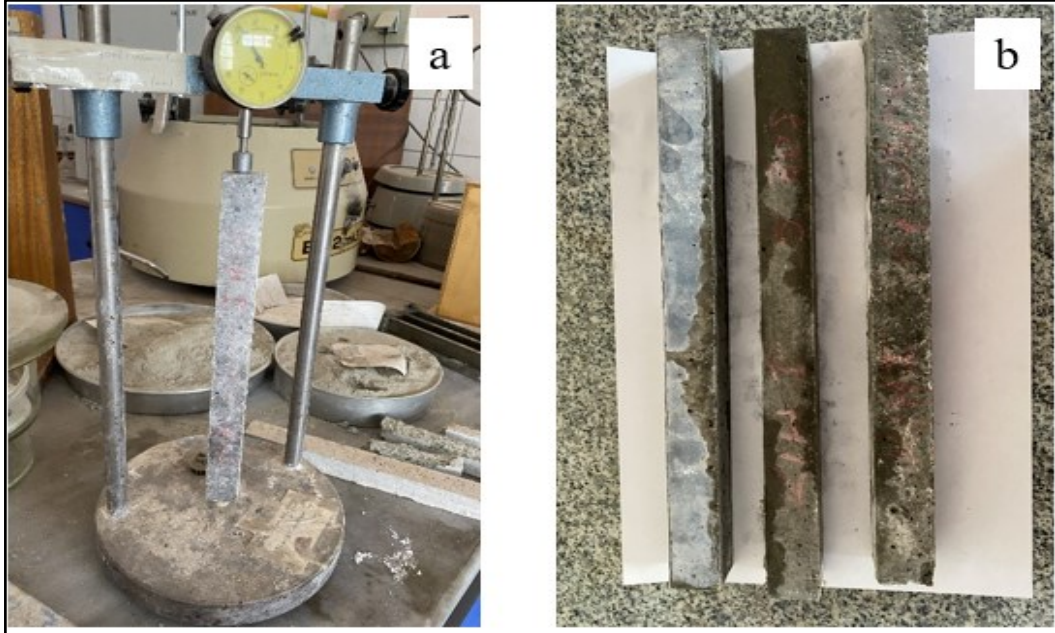
Sülfat dayanıklılığı için uygulanan diğer yöntemde ise $4 \times 4 \times 16$ cm boyutlu numunelere 28 gün standart kür uygulanmıştır. Numuneler, standart kür sonunda %5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 etkisinde 7, 28, 90 ve 180 gün bekletilmiştir. Şekil 3.7’de magnezyum sülfat çözeltisinde 180 gün bekletilen inhibitörsüz kontrol numunesinin görüntüsü verilmektedir. Numunenin üzerinde biriken beyaz lekelerin (tuz birikintileri) ve köşelerden kopmaların olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3.8’de inhibitör kullanılan numunelerin 180 gün %5 $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmesi sonucu oluşan görüntüde amino alkol içerikli numuneler (a, b), kalsiyum nitrit içerikliler (c, d) ve bor içerikli (e, f) verilmektedir. Numunelerin köşe kısımlarından kopmaların çatlakların oluştuğu ve yüzeylerinde beyaz lekeler görülmüştür.



Şekil 3.8. $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekletilen inhibitörlü numunelerin görüntüleri

3.4.2. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) deneyi

Alkali-silika reaksiyonunu belirlemek için ASTM C1260-14 standardına göre hızlandırılmış harç çubuk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde, karışım için s/ç oranı 0,47 ve agrega/çimento oranı 2,25 olarak ayarlanmıştır. Numuneler özel olarak 25×25×285 mm boyutlarında prizmatik şekilde hazırlanmış ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak ilk boy ölçümleri alınmıştır. Daha sonra, numuneler 80 °C sıcaklığındaki saf suya yerleştirilmiştir. Numuneler, saf suda 24 saat bekledikten sonra komparatörle sıfır okumaları yapılmış ve ardından 80 °C'de 1 M NaOH çözeltisi içinde 14 gün boyunca bekletilmiştir. Numunelerin son okumaları yapılarak standarda göre planlı 16 günlük süre tamamlanmıştır.



Şekil 3.9. Komparatör (a) ve ASR uygulanan numuneler (b)

Deneyin gerçekleştirilmesi amacıyla hazırlanan NaOH çözeltisi, 40 gram NaOH ve 900 ml su ile çözelti hazırlanmıştır. Harç numunelerinin 3, 7 ve 14 gün sonunda boy ölçümleri tekrar alınmıştır. Uzama miktarı (%), ASTM C1260 standardına göre zararsız, potansiyel zararlı veya tehlikeli olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9'da numunelerin boyca (%) genleşme değerlerini ölçmek amacıyla kullanılan komparatör ve alkali-silika reaksiyonu deneyi sonrası reaksiyona giren numunelerin dış yüzeyleri göstermektedir. Belirlenen boyca genleşme (%) oranları standardın sınır değerlerine göre zararsız (%0,10'un altında olması), potansiyel zararlı (%0,10-%0,20) ve zararlı (%0,20'den daha yüksek) olarak belirlenmiştir.

3.4.3. Sodyum klorür dayanıklılık deneyi

Farklı korozyon inhibitörler ve katkı değerleri ile üretilen 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplardan çıkartılan numuneler 28 gün boyunca 20±2 °C'de standart kürüne tabi tutulmuştur. Ayrıca eş zamanlı olarak standart kür uygulanmaya devam edilmiştir. Korozyon inhibitörlerinin NaCl'ye karşı etkisinin araştırılması için %5 NaCl çözeltisinde 7, 28, 90 ve 180 gün boyunca bekletilmiştir. Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde birim ağırlık, eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve ultrases geçiş süresi deneyleri uygulanmıştır.

3.4.4. Donma-çözülme (D-Ç) deneyi

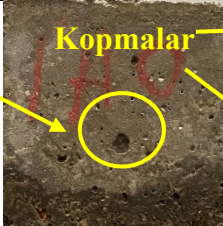
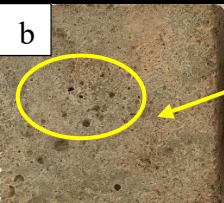
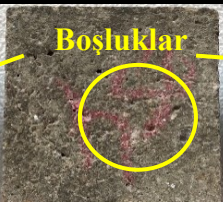
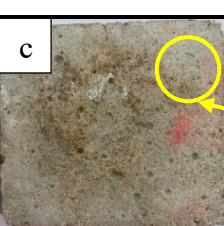
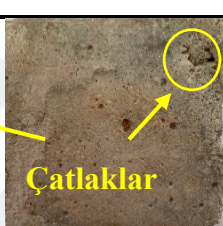
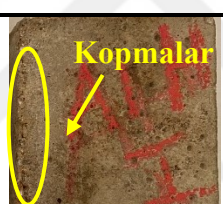
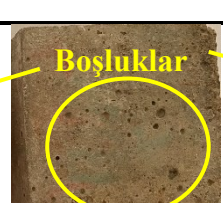
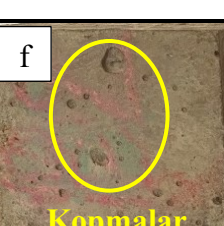
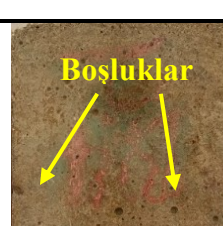
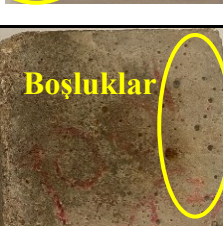
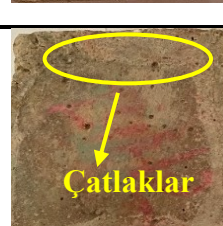
Laboratuvarda üretilen katkılı çimentoların donma-çözülme etkisinin belirlenmesi için 70×70×70 mm boyutlarında harç numuneleri üzerinde D-Ç deneyi yapılacaktır. Deney öncesi numuneler 28 gün süreyle kirece doymun 20 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin kuru ağırlığının belirlenmesi için etüvde 24 saat süreyle 100±5 °C sıcaklıkta kurutulan numunelerin hacimce su emme değerleri hesaplanmıştır. Yeniden suya doymun hale getirilen harç numuneleri -20 °C sıcaklıkta derin dondurucuda 2 saat süreyle dondurulduktan sonra 20 °C su içerisinde 2 saat süreyle bekletilmiştir. Bir donma çözülme çevrimini oluşturan bu çevrimler 100 defa tekrarlanarak korozyon inhibitörlerinin D-Ç dayanıklılığı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

$$(\%) = ((W - W_0) / W_0) \times 100 \quad (3.3)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, gr.

W : Numunenin deney sonrası ağırlığı, gr.

D-Ç deneyi sonunda dinamik elastisite modülü, basınç dayanımı ve ağırlık kayıplarında oluşan değişim hesaplanarak D-Ç etkisi sonuçları görülmüştür. Numunelerde dayanımı etkileyen koşulların etkisi ile oluşan deformasyonları belirlemek amacıyla parametrelerden biri olarak birim ağırlık kaybı deneyi yapılmıştır. Bir numunenin ağırlık kaybını bulmak için dayanımı etkileyen koşullar öncesi ve sonrasında 0,01 hassasiyetdeki terazide tartılmıştır. Deney sonucunda her seriden 3 numunenin aritmetik ortalaması alınmıştır. Ağırlık kaybı hesaplamasında denklem 3.3 uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

Numune	25 ÇEVİRİM	50 ÇEVİRİM	100 ÇEVİRİM
İH0			
KİH1			
KİH2			
AİH1			
AİH2			
BİH1			
BİH2			

Şekil 3.10. D-Ç çevrimi sonrası numunelerin görüntüleri

Şekil 3.8’de farklı korozyon inhibitörü kullanılarak üretilen numunelerin 25, 50 ve 100 çevrime kadar devam eden D-Ç deneyi sonrası görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 3.10 (a)’da kontrol numunesinde (İH0) D-Ç çevrimleri sonucu en çok yıpranmanın olduğu dikkat çekmektedir. Yüzeysel boşlukların arttığı ve köşelerden kopmaların olduğu görülmektedir. KİH1 (b) serisinde çevrim sonuçlarında oluşan boşluk sayısının arttığı belirlenmiştir. KİH2 (c) serisinde yüzeysel çatlakların derinliğinin çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. AİH1 (d)’de 50. çevrimden sonra numune kenarlarında kopmalar gözlemlenmiştir. AİH2 (e) serisinde yoğun olarak yüzeysel boşlukların oluşmuştur. BİH1 (f) bor inhibitörünün %1 oranında kullanıldığı D-Ç(100) de yüzeysel boşluk ve kopmaların boyutlarının arttığı dikkat çekmektedir. BİH2 (g) boşluk ve çatlakların BİH1’e göre daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak %1 inhibitörlü serilerde (b, d, f) yıpranmaların %2 kullanımlara göre daha az olmuştur. Ayrıca D-Ç sonucu numunelerin iç yapısında oluşan boşluk ve çatlakların belirlenmesi amacıyla ultrases geçiş süresi deneyi uygulanmıştır. D-Ç çevrim sonrası oluşan görüntüleri ve deney sonuçları birbirlerini kanıtlar nitelikte olmuştur.

3.5. Mikroyapı Analizleri

Farklı agresif ortam koşullarında bekletilen numunelerin iç yapıları üzerindeki değişimlerin incelenmesi için 180 günlük bir süre sonunda taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sırasında, numunelerin iç yapılarında oluşan yapılar görsel olarak incelenmiş ve atomların ağırlık yüzdeleri Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) sonuçları aracılığıyla belirlenmiştir. XRD analizinde fazlar bulunmuştur. Analizler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı ile Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarları (ARUM)’da yapılmıştır.

X-ışını kırınımı tekniği, temelde bir mineralin kristal yapısını belirlemek için kullanılan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemde, bir X-ışını kaynağından (örneğin Cu), alfa (α) ve beta (β) parçacıkları üretilir ve bu parçacıklar mineral üzerine yönlendirilmektedir. Analiz için hazırlanan numunede öncelikle öğütme işlemi yapılır, toz halinin analiz için uygun olması amacıyla dik presleme işlemi yapılmaktadır. Bu işlem, numunenin homojen bir yapıya sahip olmasını ve analizin doğru olmasını sağlamaktadır. Ek olarak obsidiyen gibi kristal kafes sistemine sahip olmayan mineraller veya bor gibi çok küçük kristal sistemine sahip element kökenli mineraller, X-ışını parçacığının sapma göstermemesi nedeniyle XRD yöntemi ile analiz edilmesi zor olmaktadır (Yünsel vd., 2019).

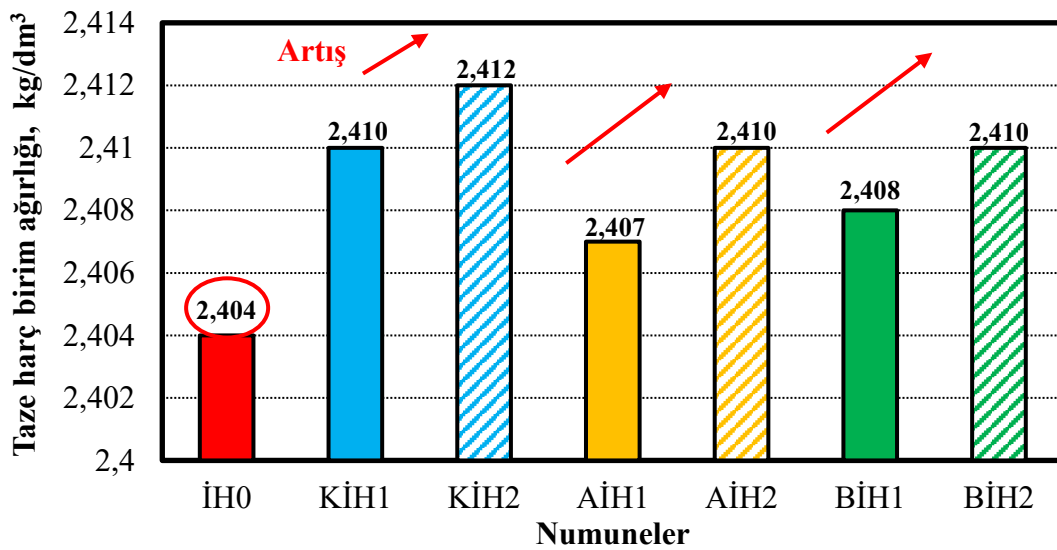
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Betonarme yapılarda donatı korozyonunu önlemekte kullanılan inhibitörlerin taze harç deney sonuçları ve standart kür sonrası sertleşmiş harç deneyleri değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Farklı özellik ve oranlarda kullanılan inhibitörlerin agresif koşullar sonrası mekanik ve fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Agresif ortam koşullarında harç yapısına sülfat ve sodyum klorür etkisi, alkali-silika reaksiyonu ve D-Ç çevrimleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, tablolar ve grafikler üzerinde değerlendirilmiştir. Numunelere agresif ortam etkileri sonunda mikro yapı incelemeleri de yapılmıştır. FE-SEM analizleri görüntüleri, EDS değerleri ve XRD sonuçları elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda sürdürülebilirlik analizi yapılmıştır ve makine öğrenmesi ile sonuçlar değerlendirilmektedir.

4.1 Taze Harç Deneyleri

4.1.1. Korozyon inhibitörlerinin taze harç birim ağırlığına etkisi

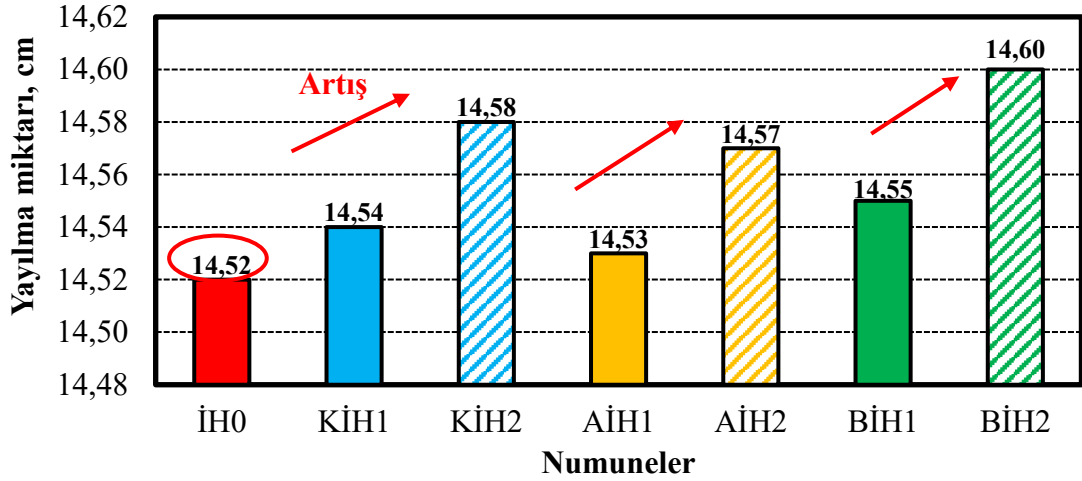
Farklı korozyon inhibitörleri ile üretilen harç numunelerin taze birim hacim ağırlıkları, yayılma değerleri ve priz başlangıç-bitiş süreleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Genel olarak inhibitörlerin kendi aralarındaki taze harç birim ağırlıklarının arttığı Şekil 4.1’de görülmektedir. Hava sürükleyici etki oluşturmadığı görülmektedir. En yüksek TBHA değeri $2,412 \text{ kg/dm}^3$ olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Taze harçların korozyon inhibitörü etkisi ile BHA değişimi

4.1.2. Korozyon inhibitörlerinin yayılmaya etkisi

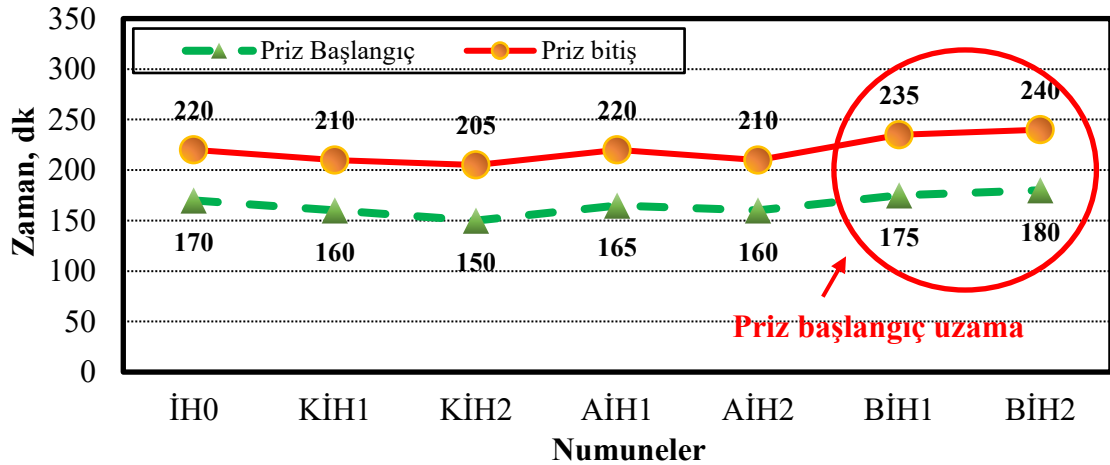
Şekil 4.1’de inhibitör miktarının artışı ile yayılma değerleri de artış göstermiştir. Sonuçlar incelendiğinde BİH2’de 14,60 cm ile en yüksek yayılma görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmada benzer şekilde, s/ç oranının sabit tutulmasına rağmen KN ve Bİ kullanılan taze betonlarda akışkanlığa olumlu etkisi görülmektedir (Topçu ve Uzunömeroğlu, 2022).



Şekil 4.2. Taze harç yayılma değerleri

4.1.3. Korozyon inhibitörlerinin priz süresine etkisi

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi priz süreleri, inhibitör çeşidine ve oranına göre farklılık göstermektedir. KK ve AA içerikli inhibitör kullanımı ile miktarın artması priz başlangıç ve bitiş süresini kısalttığı görülmüştür. Bor içerikli inhibitör kullanımı bu sürelerin uzamasına neden olmuştur. Bu fark kontrol serisine göre çok farklı olmasa da BİH1’de %2,94 ve BİH2’de %5,88 oranlarında priz başlangıç ve bitiş sürelerini geciktirdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Taze harç priz süreleri

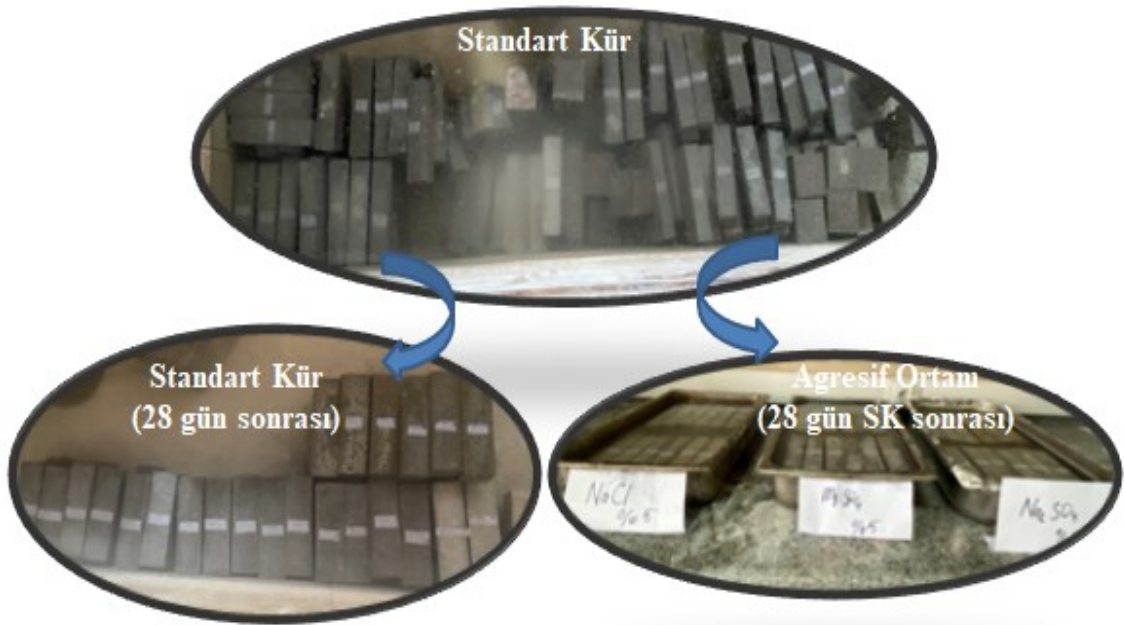
4.2 Sertleşmiş Harç Numunelerin Değerlendirilmesi

Standart kür koşulunda ve agresif ortam koşullarında bekletilen sertleşmiş harç numunelerin birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızları, eğilme ve basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirilerek üç çeşit inhibitörün farklı oranlarda (%1-%2) kullanılmasının harç özelliklerine olan etkileri detaylı incelenerek belirlenmiştir.

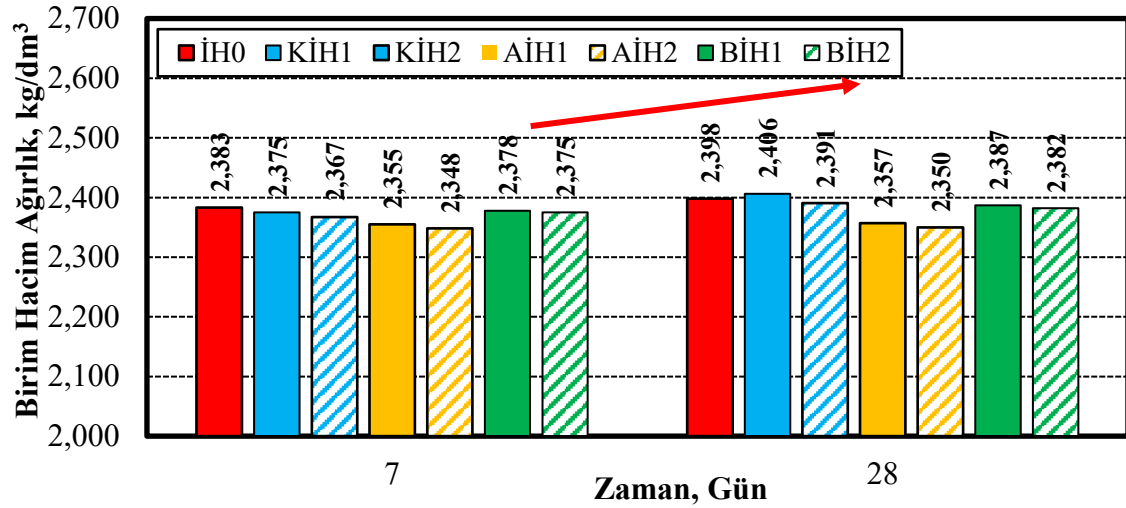
4.2.1 Standart kür sonuçları

4.2.1.1. Birim ağırlık deney sonuçları

Üretilen 4×4×16 cm boyutlu prizmatik harç numunelere 28 gün boyunca 20±2 °C'de standart su kürü uygulanmaktadır. Şekil 4.4'de standart kür koşulunda bekletilen numuneler bulunmaktadır. Agresif ortam numuneleriyle eş zamanlı olarak standart kürde bekletilmek üzere numuneler üretilmiştir. Çalışma planında her inhibitör çeşidi için 108 adet 4×4×16 cm prizmatik numuneler üretilmiştir. İnhibitör kullanılmayan numuneler ise Toplamda 378 adet numune üretilmiş olup, 72 adedi standart kür koşulunda bekletilmeye devam etmiştir. Standart 28 günlük kür süresini dolduran numuneler agresif ortam koşullarına alınmıştır. Numunelere birim hacim ağırlık deneyi (BHA) uygulanmıştır. BHA'nın zamanla artışı iç yapıda oluşan hidratasyon ürünlerin etkisini göstermektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2021).

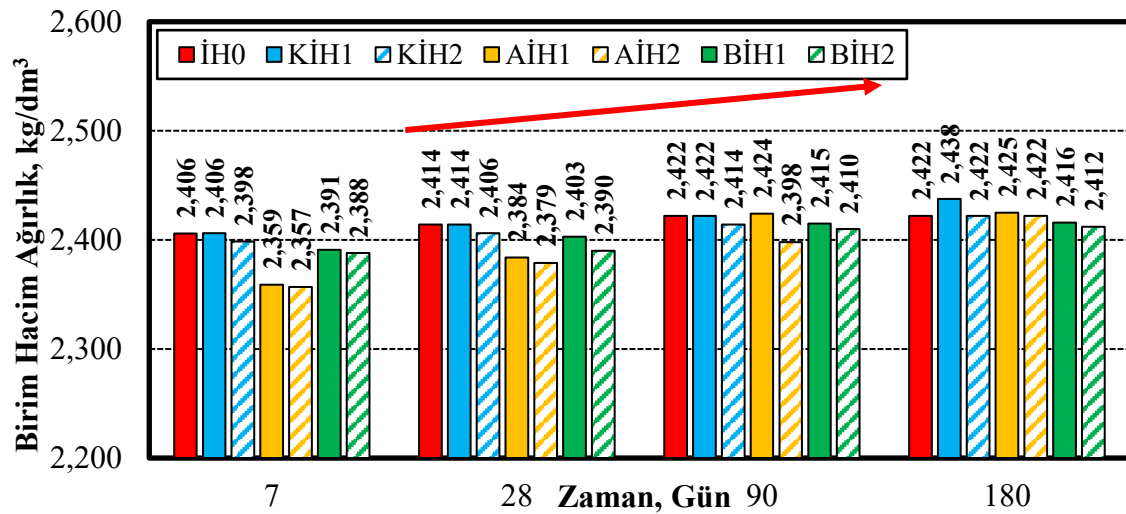


Şekil 4.4. Standart kür havuzunda ve agresif ortamda bekletilen numuneler



Şekil 4.5. Standart kür koşulunda numunelerin birim hacim ağırlıkları

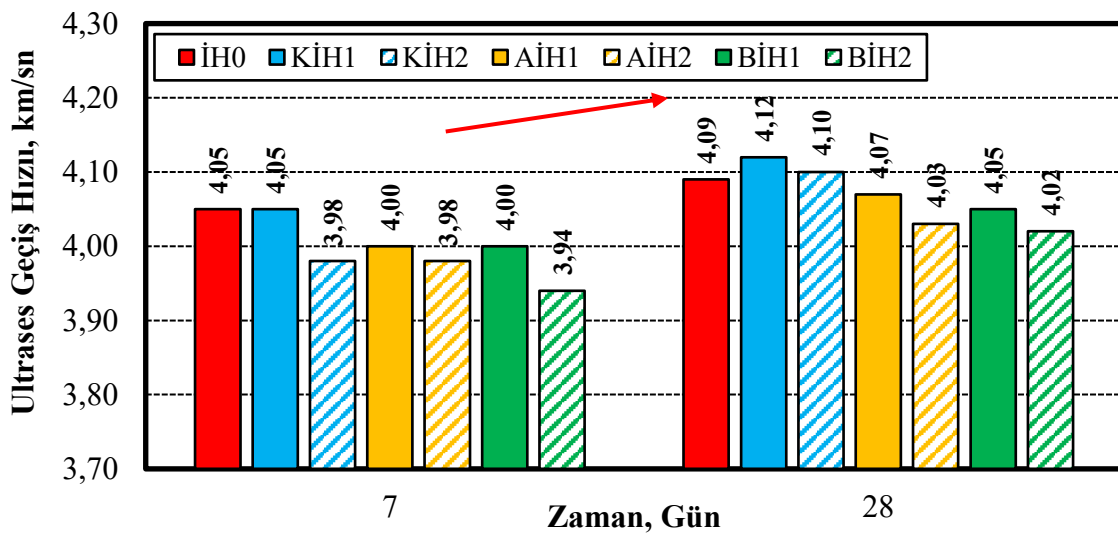
Şekil 4.5'te standart kür uygulanan numunelerin birim hacim ağırlık sonuçları verilmektedir. BHA değerleri 7-28 gün süre ile artış göstermektedir. Numuneler içerisinde en yüksek birim hacim ağırlık değeri %1 KN içerikli inhibitör kullanılan KİH1 2,406 kg/dm³ belirlenmiştir. En düşük BHA değeri amino alkol içerikli inhibitörün %2 kullanıldığı AİH2'de (2,350 kg/dm³) elde edilmiştir. Şekil 4.6'da standart kür koşullarında 28 gün sonrası numunelerin BHA değerleri verilmektedir. KİH1 numunesinde (2,438 kg/dm³) 180. günde elde edilen BHA değeri en yüksek iken, en düşük değer Bİ inhibitör kullanılan BİH2 numunesinde (2,412 kg/dm³) elde edilmiştir. BHA gelişimi incelendiğinde inhibitör çeşidine bağlı olmadan BHA değerleri 180 günlük süre içerisinde artmaya devam ettiği görülmüştür.



Şekil 4.6. Standart kür koşullarında 28 gün sonrası numunelerin BHA değerleri

4.2.1.2. Ultrases geçiş süresi deney sonuçları

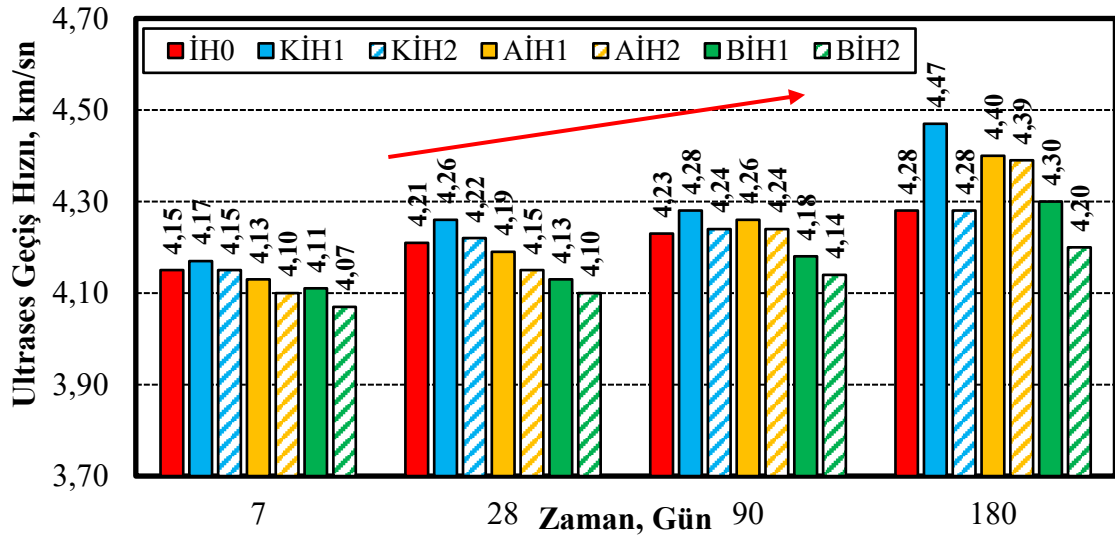
UGH ölçümü yoluyla harç ve beton dayanımını tahmin etmek ve iç kusurları (boşluklar, çatlaklar, delaminasyonlar...) belirlemek için ultrasonik yöntemler kullanılmıştır (Lafhaj vd., 2006). Şekil 4.7’de numunelerin 7/28 gün ultrases geçiş hızı değeri verilmiştir. Harç numunelerin hepsinde UGH değeri 7/28 arasında arttığı görülmüştür. Kür süresinin devamlılığı ile harç yapısında oluşan boşlukların azaldığı sonucuna varılmıştır. İnhibitör kullanılmayan İH0 serisinde 7/28 artış oranı %0,99 olduğu hesaplanmıştır. İnhibitör kullanılan numuneler incelendiğinde en yüksek değeri KN inhibitörü kullanılan KİH1 numunesinde (4,12 km/sn) olduğu belirlenmiştir. İnhibitör kullanılmayan (İH0) kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, %1 ve %2 oranında KN inhibitörü kullanılan numunelerde sırası ile %0,73 ve %0,24 UGH değeri yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.7. Standart kür koşulunda numunelerin ultrases geçiş hızları

Ayrıca elde edilen sonuçlar kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanılan numunelerinin kontrol numunesinden az boşluklu ve yapı kusurlarının daha az olduğunu göstermektedir. AA içerikli numunelerde İH0’a göre %0,49 ve %1,47 oranında az değeri almıştır. En düşük ultrases geçiş hızı değeri bor içerikli yeşil korozyon inhibitörü kullanılan BİH2 numunesinde (4,02 km/sn) belirlenmiştir. Kontrol numunesine göre BİH2 %1,71 ve BİH1 %0,98 oranında daha UGH değeri az çıkmıştır. Bu durum amino alkol ve bor içerikli inhibitör uygulanan numunelerin kontrol numunesine (İH0) göre daha boşluklu bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir. Standart kür koşulunda UGH sonuçları değerlendirildiğinde hidrasyonun devamlılığında inhibitör kullanımının olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Şekil 4.8’de standart kür koşullarının devam ettiği numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri verilmektedir. Zamanla BİH2 serisi hariç, inhibitörlü serilerin kontrol (İH0) numunesinden daha fazla değer aldığı görülmüştür. İnhibitör kullanılmayan İH0 serisinde 7/180 gün arası artış %3,13 olarak hesaplanmıştır. Bu oran KN içerikli inhibitör ile üretilen KİH1’de %7,19 ve KİH2’de %3,13 olarak belirlenmiştir. Amino alkol içerikli numunelerde ise sırasıyla %6,54 ve %7,07 olurken bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde ise %4,62 ve %3,19 olarak bulunmuştur. Kullanılan inhibitör çeşidinden bağımsız olarak UGH değerlerinde gözlemlenen artış, çimentonun hidrasyon sürecinin devam ettiğini göstermektedir. Bu durum, inhibitörlerin (KN, AA, Bİ) çimento matrisi ile gerçekleşen kimyasal reaksiyonları engellemediği ve süreçlerin ilerlemesini sağladığı düşünülmektedir.

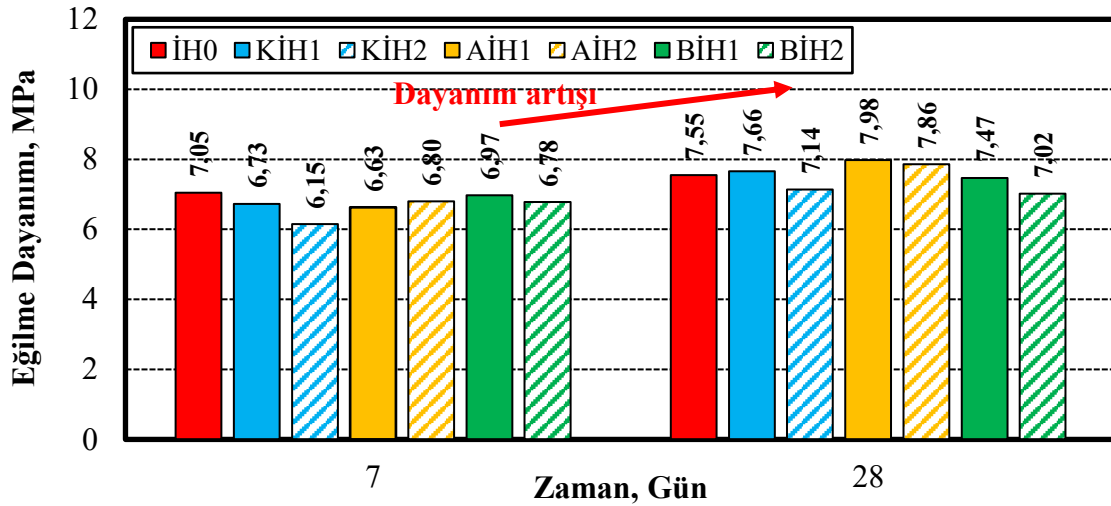


Şekil 4.8. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası ultrases geçiş hızları

Kontrol numunesinin (İH0) 180 günlük UGH değerleri ile inhibitörlü numuneler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda en yüksek değerin (4,47 km/sn) KİH1 numunesinde %4,44 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. KİH2 numunesi ise İH0 ile eşit değer almıştır. Amino alkol içerikli inhibitör kullanılan numunelerde, inhibitör artış sonuçları birbirlerine yakın oranlarda olduğu görülmüştür. Bu oranlar sırasıyla AİH1’de %2,80 ve AİH2’de %2,57 olarak belirlenmiştir. Bor içerikli inhibitör numune sonuçlarında farklılıklar dikkat çekmektedir. BİH1’de %0,47 daha fazla iken BİH2’de bu oran %1,87 oranında daha az olduğu hesaplanmıştır. Bor içerikli numunede kullanılan oran önemli olmuştur. Elde edilen UGH sonuçları, 180 günle sınırlı olan standart kür koşulunda kullanılan inhibitörlerin çeşitlerine ve uygulanan oranların önemine dikkat çekmektedir.

4.2.1.3. Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

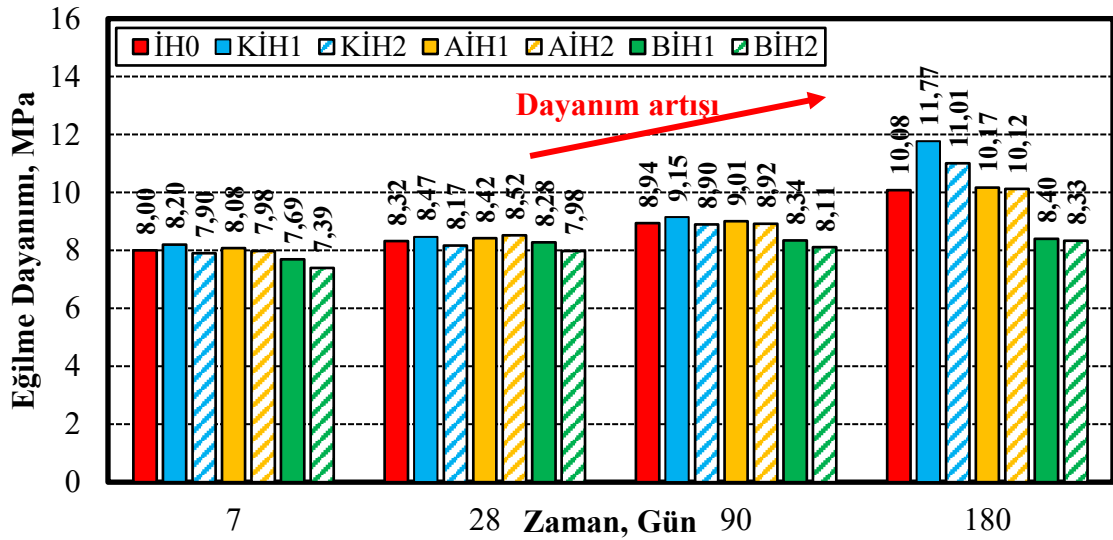
Şekil 4.9’da standart kür koşullarında bekletilen numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları verilmektedir. Eğilme dayanımlarının inhibitörlü ve inhibitörsüz numunelerde düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum çimento matrisinde bağlayıcı yapıların (CSH) oluşmaya devam ettiğini göstermektedir. Kontrol numunesinde 7/28 eğilme dayanımı oranının %93,38 olduğu görülmektedir. Bu oran KN inhibitörlü numunelerde sırası ile %87,86 ve %86,13 olarak belirlenmiştir. AA numuneleri için benzer 7/28 oranlarıyla, %83,08 ve %86,51 değerleri elde edilmiştir. Bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde eğilme dayanımı gelişimi diğerlerine göre daha hızlı olmuştur. BİH1’de %93,31 ve BİH2’de %96,58 oranları bulunmuştur. İnhibitör çeşidinden bağımsız olarak %2 oranında kullanılan numunelerin %1’lerden daha az eğilme dayanımı aldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Standart kür koşulunda numunelerin eğilme dayanımları

İnhibitör kullanımı dayanımın gelişiminde olumsuz bir etki oluşturmamakla beraber numunelerin 28 günlük sonuçları kontrol numunesi (inhibitörsüz) ile karşılaştırılmıştır. Amino alkol inhibitörlü numunelerde her iki oranda kullanılması %5,70 ve %4,11 değerinde daha yüksek çıkmıştır. Kalsiyum nitrit (KİH1) inhibitörünün %1 oranında kullanılmasının daha başarılı olduğu ve %1,46 oranında daha yüksek değer aldığı belirlenmiştir. Özellikle kalsiyum nitrit ve amino alkol içerikli inhibitörlerin %1 oranında kullanılması sonucunda numunelerin eğilme dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. İnhibitörsüz kontrol numunesi (İH0) ile karşılaştırıldığında, bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde de inhibitör oranının eğilme dayanıma olan etkisinin son derece önemli olduğuna dikkat çekmektedir.

Standart kür koşulunun devamı ile 180 güne kadar eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.10'da verilmektedir. Korozyon inhibitörleri çeşitlerine göre farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. İnhibitör kullanımının eğilme dayanımı gelişimi üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı şeklinde söylenmektedir. En yüksek sonuç KİH1'de (11,77 MPa) alınmıştır. Numunelerin 7/180 eğilme değeri artışları incelenmiştir. Kontrol numunesinde (İH0) bu oran %9,92 olarak belirlenmiştir. KN inhibitörlü numunelerde kullanılan miktarlar sırası ile %8,50 ve %9,08 olduğu görülmüştür. AA numunelerinde bu değerler %9,83 ve %9,88 olarak hesaplanmıştır. Bİ'lerde ise %11,90 ve %12,00 olduğu bulunmuştur. İnhibitör çeşidine bağlı olmaksızın %2 uygulanması halinde dayanımları %1 değerlerine göre daha azdır fakat inhibitör artışının neden olduğu reaksiyonlarda olumsuz etkiler oluşturmamıştır.

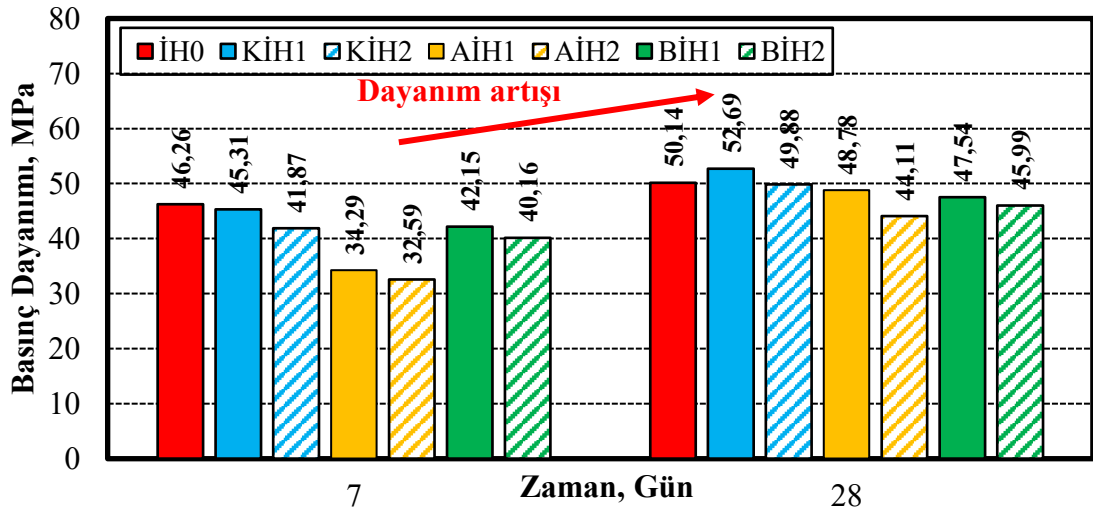


Şekil 4.10. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası numunelerin eğilme dayanımları

Kür süresinin sonunda İH0 numunesi ile karşılaştırma yapılmıştır. İH0'a göre KİH1 numunesi %16,77 ve KİH2'de %9,23 daha yüksek dayanım almıştır. Kalsiyum nitrit inhibitörü kullanımının diğer inhibitörlere göre dayanıma olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Amino alkol içerikli inhibitör kullanılan numunelerde %1 ve %2 oranlarında yakın sonuçlar alması dikkat çekmektedir. Bİ kullanılan numunelerde kontrol numunesine (İH0) göre BİH1'de %16,67 ve BİH2'de %17,36 oranlarında dayanım sonuçlarının daha az olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu karşılaştırmada kontrol numunesine göre daha az dayanım almasına rağmen standart kür koşulunda %2 oranında bor içerikli inhibitör kullanımının dayanım gelişiminin devamlılığında olumsuz etki yaratmadığı şeklinde bir sonuç oluşmuştur.

4.2.1.4. Basınç dayanımı deney sonuçları

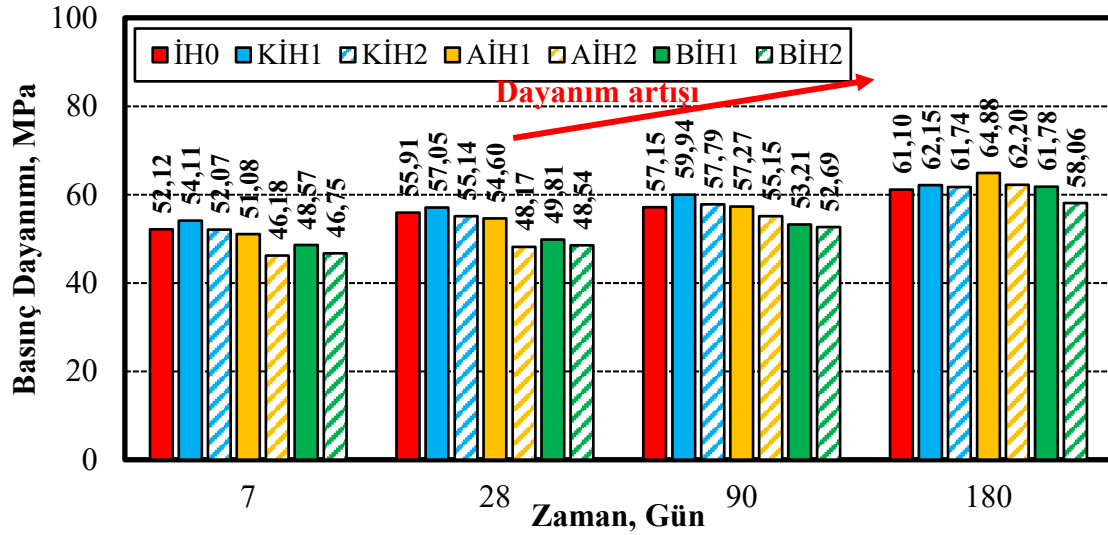
Şekil 4.11’de inhibitörlü ve inhibitörsüz kontrol numunelerin 7-28 gün standart kür sonrası basınç dayanımı sonuçları bulunmaktadır. Harç numunelerin 7 günlük erken dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek dayanımın inhibitör kullanılmayan İH0 numunesinde (46,26 MPa) olduğu görülmektedir. En düşük erken dayanımın amino alkol içerikli AİH2 numunesinde (32,59 MPa) olduğu belirlenmiştir. İnhibitör kullanılan numunelerde erken dayanımların kontrol numunesine göre daha az olduğu ve inhibitör oranlarının da etkilediği görülmüştür. Numunelerin 28 günlük sonuçlarına bakıldığında inhibitör çeşidinden ve miktarından bağımsız olarak dayanım gelişiminin devam ettiği dikkat çekmektedir. Eğilme dayanımı sonuçlarına paralel benzer sonuçlar sağlandığı görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı (52,69 MPa) değeri ile KİH1’de elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Standart kür koşulunda basınç dayanımları

Genel olarak 28 günlük sonuçlara bakıldığında kalsiyum nitrit içerikli inhibitörün %1 oranında kullanıldığı seri haricinde kontrol numunesinden (İH0) dayanımların daha az olduğu belirlenmiştir. Dayanım gelişiminin yüksek olduğu AA numunelerinde %2,71 ve %12,03 oranlarında hesaplanmıştır. Bİ kullanılanlarda ise inhibitör miktarının artması ile bu oranlar %5,19 ve %8,28 olarak bulunmuştur. KN inhibitörünün %2 kullanıldığı numunelerde ise %0,52 gibi düşük bir oranla daha az çıkmıştır. Her inhibitörün çimento harcının dayanımını artırmadaki etkinliği farklılık göstermiştir ve optimum sonuçlar için inhibitörün çeşidi ve miktarının önemli olduğu bulunan deney sonuçlarıyla desteklenmiştir.

Şekil 4.12’de standart küre devam eden numunelerin dayanım sonuçları verilmektedir. İnhibitör kullanılan numunelerin dayanımlarının devam ettiği belirlenmiştir. Numunelerin agresif ortam koşulları ile eş zamanlı olarak değerlendirilebilmesi için 28 günlük kür süresi üzerine 180 gün kür devamlılığı sağlanmıştır. Basınç dayanımı 180 gün sonunda en yüksek AA inhibitörü kullanılan numunelerde görülmüştür. Basınç dayanımının 7/28 artış oranı da hızlı gelişen AA inhibitörü 180 günde 64,88 MPa değeri almıştır. Yapılan çalışmalarda amino alkol içerikli inhibitör veya amin bazlı inhibitörlerin basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır (Söylev vd., 2007). En düşük basınç dayanımı %2 oranında bor içerikli inhibitör kullanılması ile 58,06 MPa değerinde görülmüştür. İnhibitörlü sonuçlar İH0 numunesinden daha iyi değerler almaktadır.



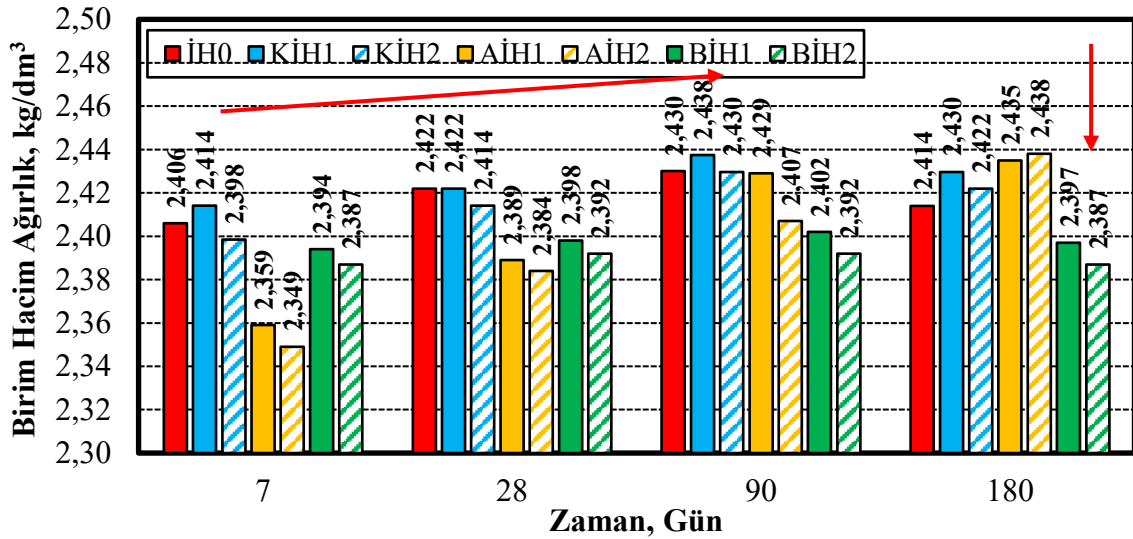
Şekil 4.12. Standart kür koşulunda 28 gün sonrası numunelerin basınç dayanımları

Deney sonuçlarının kontrol numunesi (İH0) ile karşılaştırması yapılmıştır. KN içerikli numuneler %1,72 ve %1,05 oranlarında yüksek çıkmıştır. AA numuneleri ise sırası ile %6,19 ve %1,80 oranında daha fazla dayanım almıştır. AA numunelerinin dayanımlarının yüksek olması agresif ortam koşullarına karşı dayanıklılıklarının daha iyi olabileceğini düşündürmektedir. Bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde %1 kullanımının daha yüksek dayanım verdiği görülmüştür. Ek olarak, %2 Bİ kullanımıyla elde edilen sonuçlarda %4,98 oranında daha düşük bir dayanım bulunmuştur. Sonuçlar, özellikle en yüksek dayanımı elde etmek için inhibitörün hem çeşidi hem de miktarının önemli olduğunu ve kullanımda bu durumun dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Genel olarak %1 oranında inhibitör kullanımlarının optimum verim sağladığı görülmektedir.

4.3. Dayanıklılık Deney Sonuçları

4.3.1 Sülfat dayanıklılığı deney sonuçları

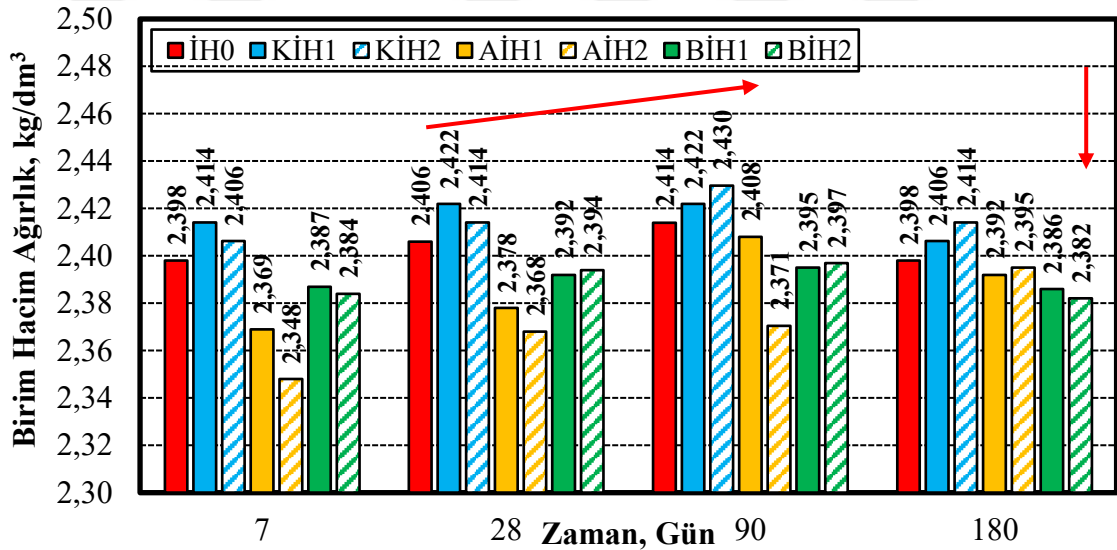
Sülfat iyonlarının numunenin iç yapısına ulaşması sonucu genleşme, ağırlık kaybı, çatlama ve dökülme gibi olumsuz etkiler meydana gelmektedir. Sülfat etkisi ile özellikle içinde OPC bulunan yapıların fiziksel ve mekanik özelliklerinde azalma gözlemlenmektedir. Sülfat direncinin, kullanılan çimento türüne, betonun geçirgenliğine, su-çimento oranına, etki süresine ve miktarına bağlı olduğu belirtilmektedir (Bhatty ve Taylor, 2006). Sülfat etkisinde bekletilen numunelerin birim hacim ağırlık sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir. Sülfat etkisi hem %5 Na₂SO₄ hem de %5 MgSO₄ etkisinde 180 gün bekletilerek incelenmiştir. Numunelerde 90 güne kadar BHA değerlerinde artışlar görülmüştür. Agresif ortam bekleme süresinin sonunda BHA değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. En yüksek BHA değer kaybı 90/180 arasında %0,66 oranı ile kontrol numunesinde (İH0) belirlenmiştir.



Şekil 4.13. %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin birim hacim ağırlıkları

Sülfat etkisi ile 90/180 gün arasında belirlenen birim hacim ağırlık kayıp oranları KİH1'de ve KİH2'de %0,32 olmakla beraber BİH1'de ve BİH2'de %0,21 oranında olduğu görülmüştür. Amino alkol içerikli inhibitör numunelerinde BHA değeri artmaya devam etmiştir. Ancak 7-180 arasında devam eden AİH1 numunesinde 90-180 gün arasında artış hızının azaldığı belirlenmiştir. Etrenjit kristallerinin etkisiyle ilerleyen zamanlarda oluşan genleşmeler iç yapıda öncelikle çatlamalara ve sonrasında dökülmelere neden olarak numunelerde birim hacim ağırlık değerlerinde azalmalarının görüleceği düşünülmektedir.

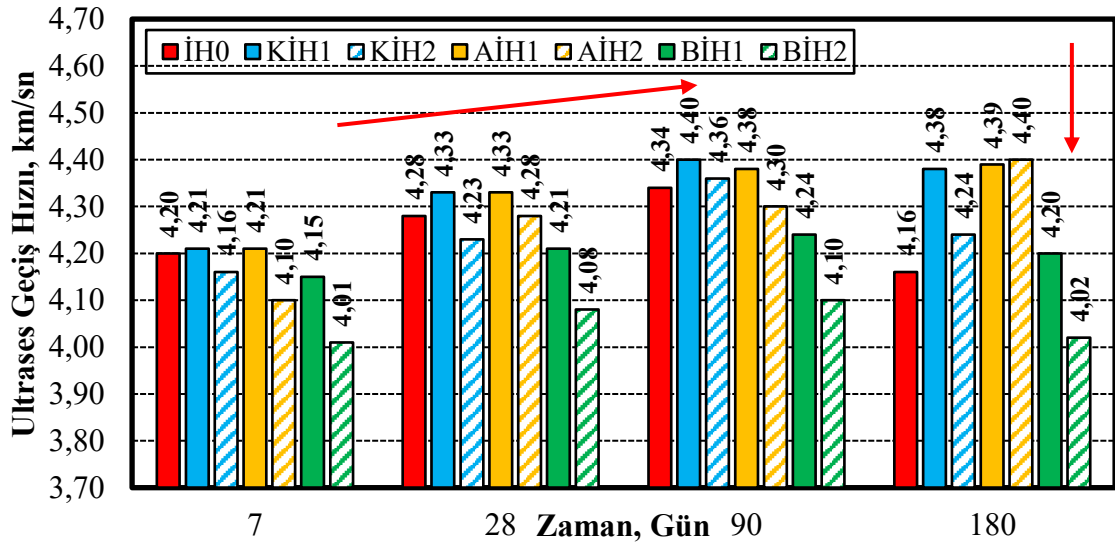
Agresif ortam koşullarından diğer sülfat etkisi magnezyum sülfat olarak belirlenmiştir. Şekil 4.14’de %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin BHA sonuçları gösterilmektedir. Numunelerde sodyum sülfat etkisinde olduğu gibi 90 güne kadar BHA değerlerinde artma gözlemlenmiştir. BHA değerlerinde 180. günde azalmalar dikkat çekmektedir. İnhibitör kullanılmayan İH0’da 90. güne kadar BHA değerlerinde düzenli olarak %0,33 oranında artış göstermiştir. Ancak 180 günlük süreçte %0,66 oranında değer kaybı kaydedilmiştir. En yüksek BHA değeri kalsiyum nitrit içerikli KİH2 serisinde (2,414 kg/dm³) olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu kayıplar, KİH1’de %0,65 ve KİH2’de %0,64 olmakla birlikte BİH1’de %0,38 ve BİH2’de %0,63 olduğu hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarında AA içerikli numunelerde %1 ve %2 kullanımı ile değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.14. %5 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin birim hacim ağırlıkları

Şekilde görüldüğü gibi AİH1’de 90/180 gün arasında %0,66 oranında birim hacim ağırlık kayıpları gözlemlenirken AİH2’de %1,03 oranında artış gerçekleşmiştir. Kontrol numunesine göre BHA değerlerinin daha az olduğu görülmüştür. Amino alkol içerikli inhibitörün %2 oranında kullanılmasının mevcut koşullarda olumsuz bir etkisinin olmadığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca standart kür koşulunda bekletilen numunelerle karşılaştırıldığında bütün numunelerin 180 günlük BHA değerlerinde kayıplar olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu kayıplar AİH1’de %1,36 ve AİH2’de %1,11 oranında belirlenmiştir. Sülfat etkisi değerlendirilirken kullanılan inhibitörün sadece en yüksek değeri almış olması değil, zamanla gelişen birim hacim ağırlık kayıpları ve kontrol numunesine göre değer farklılıklarının tümünün dikkate alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

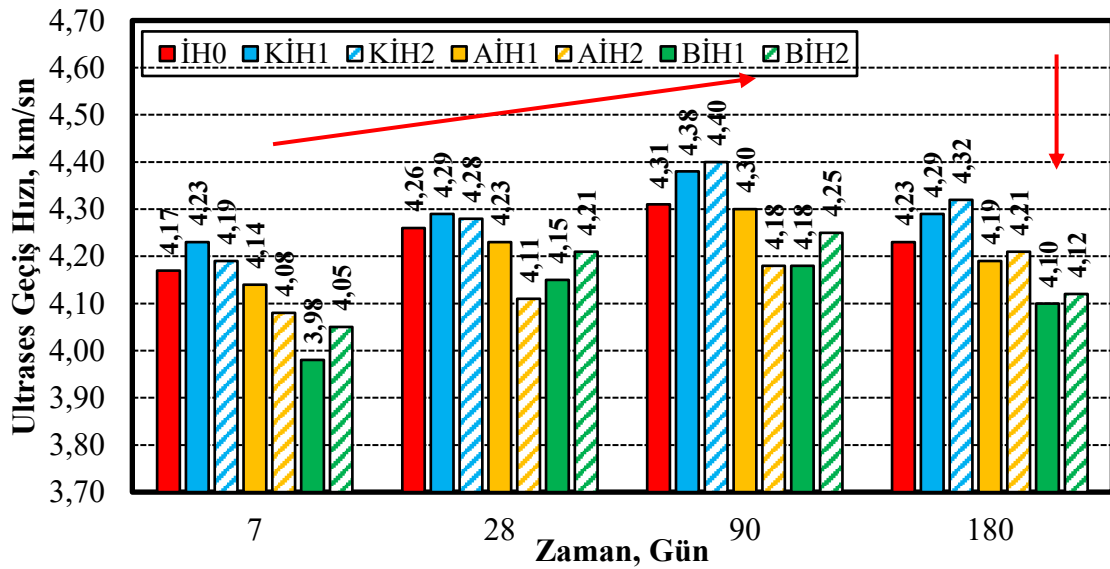
Şekil 4.15'te sodyum sülfat etkisindeki numunelerin UGH değerleri verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde BHA değerlerinde olduğu gibi 90 güne kadar genel olarak numunelerin UGH değerlerinde artışlar görülmüştür. Ancak 180. günde farklı sonuçlar dikkat çekmektedir. Kontrol numunesinde (İH0) 90/180 ultrases geçiş hızı kayıp oranı %4,15 olarak hesaplanmıştır. KN inhibitörü kullanılan numunelerde inhibitör oranına bağlı olarak %0,45 ve %2,75 oranları belirlenmiştir. Bİ numunelerinde %1 ve %2 uygulanan serilerde %0,94 ve %1,95 oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu ani değer kaybının nedeni Portland çimentosunda bulunan C_3A bileşeninin Na_2SO_4 ile reaksiyonu sonucunda etrenjit kristallerinin oluşması ile gerçekleşmektedir. Oluşan etrenjit kristalleri hacimce genişleyerek çatlaklar oluşturmaktadır. FE-SEM analiz görüntülerinde de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

En yüksek değer amino alkol içerikli inhibitörün %2 oranında kullanılması ile 4,40 km/sn olan AİH2'de görülmektedir. Hem en yüksek değer olması hem de UGH değerlerinin artmaya devam etmesi ve kontrol numunesinden %5,77 oranında daha fazla olması dikkat çekmektedir. Sodyum sülfat etkisinde amino alkol içerikli inhibitör kullanılmasının belirlenen 180 günlük sürede etkili olduğu görülmüştür. Kalsiyum nitrit içerikli inhibitör bulunan numunelerde ise inhibitör oranının artması ile %5,29 ve %1,92 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar bor içerikli inhibitör kullanılan serilerde kontrol numunesine göre BİH1 %0,96 daha yüksek değer alırken BİH2 ise %3,37 oranlarında daha az değerler almış olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde bor içerikli inhibitör kullanımında %1 oranının daha yüksek ultrases geçiş hızı değeri belirlenmektedir.

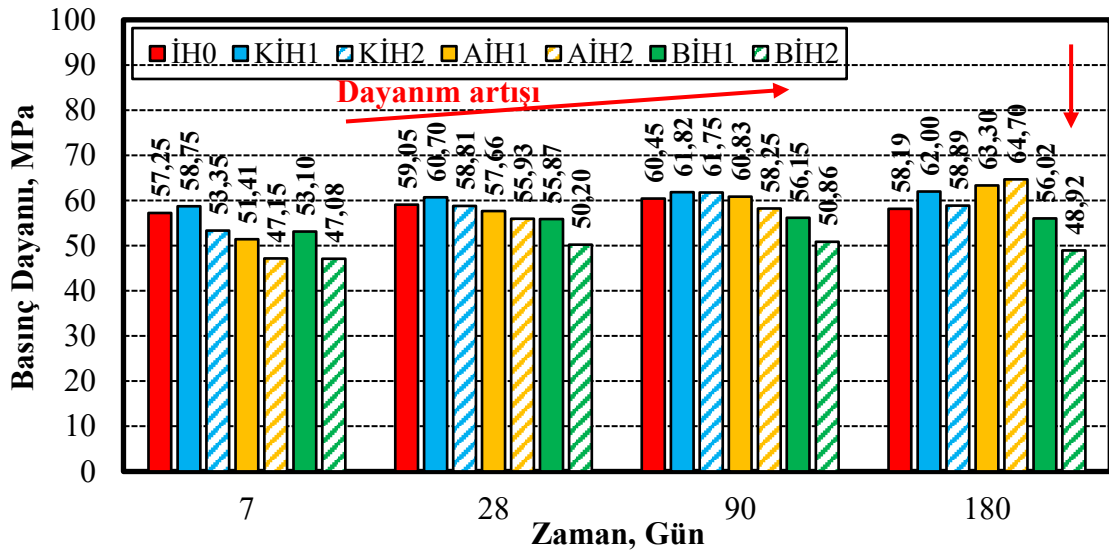
Magnezyum sülfat çözeltisinde 180 gün bekletilen numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil 4.16'da gösterilmektedir. KİH2 numunesinde 4,32 km/sn değerinde görülmüştür. UGH değeri azalmasına rağmen en yüksek değer olmuştur. İnhibitör kullanılan numunelerde AİH2 numunesi hariç diğerleri 90/180 arasında UGH değerlerinde azalmalar belirlenmiştir. Bu değerler KN numunelerinde sırası ile %2,05 ve %1,82 oranlarında hesaplanırken, Bİ numunelerinde ise %1,91 ve %3,06 olarak belirlenmiştir. Kontrol numunesinde (İH0) %1,86 oranında ultrases geçiş hızı kaybı gözlemlenmiştir. En düşük UGH değeri BİH1'de 4,10 km/sn olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar %5 MgSO₄ etkisi ile numunelerin iç yapılarında gelişen reaksiyonlar sonucu bağlayıcı yapının (CSH) bozulmaya başladığını, mikro çatlakların oluştuğu ve boşlukların geliştiğini göstermektedir. Harç numunelerinin mikro yapı analiz görüntüleri (FE-SEM) deney sonuçlarını kanıtlar nitelikte olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.16. %5 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

Magnezyum sülfat etkisi ile etrenjit kristalleri oluşmakta dolayısıyla mikro çatlaklar gelişmektedir. Ayrıca magnezyum silikat hidrat jelleri oluşarak iç yapıda dayanıklılık kazandırmayan ama yapıyı bozan jel oluşmaktadır (Nadir ve Ahmed, 2022). Bu nedenle magnezyum sülfat etkisindeki numunelerde UGH değerlerinde kayıplar gerçekleşmiştir. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında kalsiyum nitrit inhibitörü içerikli numunelerde inhibitör oranı artması ile KİH1'de %1,42 ve KİH2'de %2,13 oranlarında daha fazla ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Ayrıca bor içerikli numunelerde %3,07 ve %2,60 oranlarında; amino alkol içerikli inhibitör kullanılan numunelerde ise AİH1'de %0,95 ve AİH2'de %0,47 kontrol numunesinden (İH0) daha az UGH değerleri aldığı görülmektedir.

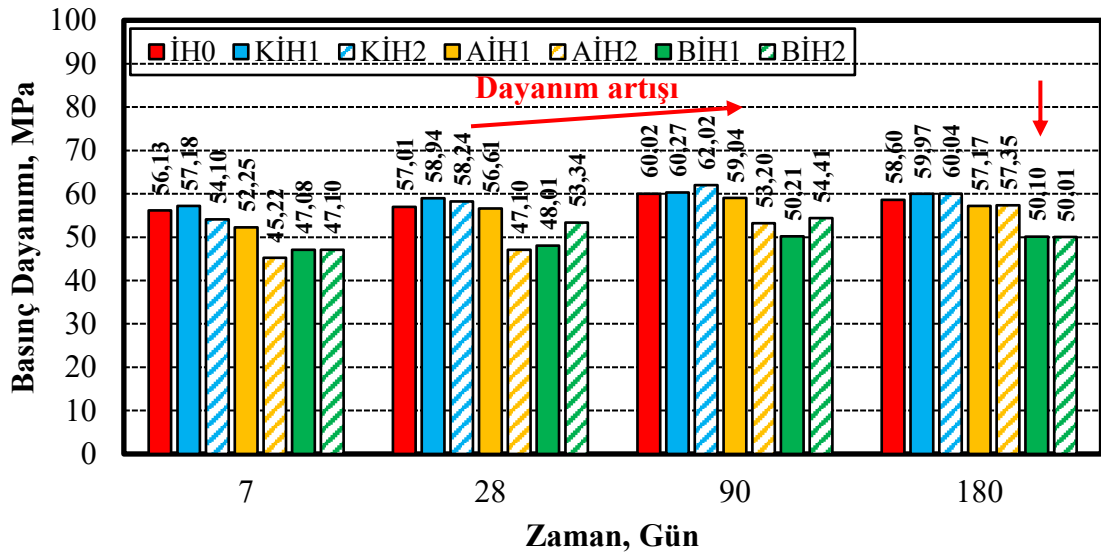
Şekil 4.17’de %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. Amino alkol içerikli numunelerde sülfat etkisi ile 180. günde dayanım kaybı kaydedilmemiştir. Numunelerin 180.günde en yüksek dayanımın AİH2’de (64,70 MPa) olduğu görülmüştür. İnhibitör kullanılmayan İH0’da dayanım kaybı 90/180 gün arasında %3,74 olduğu hesaplanmıştır. İnhibitörlerin kendi aralarında dayanım kayıpları incelendiğinde; KİH1’de %0,29 dayanım artışı olmakla birlikte KİH2’de %4,63 dayanım kaybı belirlenmiştir. Bu durum sülfat etkisine karşı %1 oranında KN kullanımı ile daha olumlu bir sonuç elde edildiğini göstermektedir. Ancak dayanım artış hızı KİH1’de %3,32’den %1,85’e ve son olarak %0,29’a düşmüştür. Elde edilen bu durum ilerleyen zamanda sülfat etkisi ile dayanım kaybının gözlemleneceğini şeklinde düşündürmektedir.



Şekil 4.17. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanımları

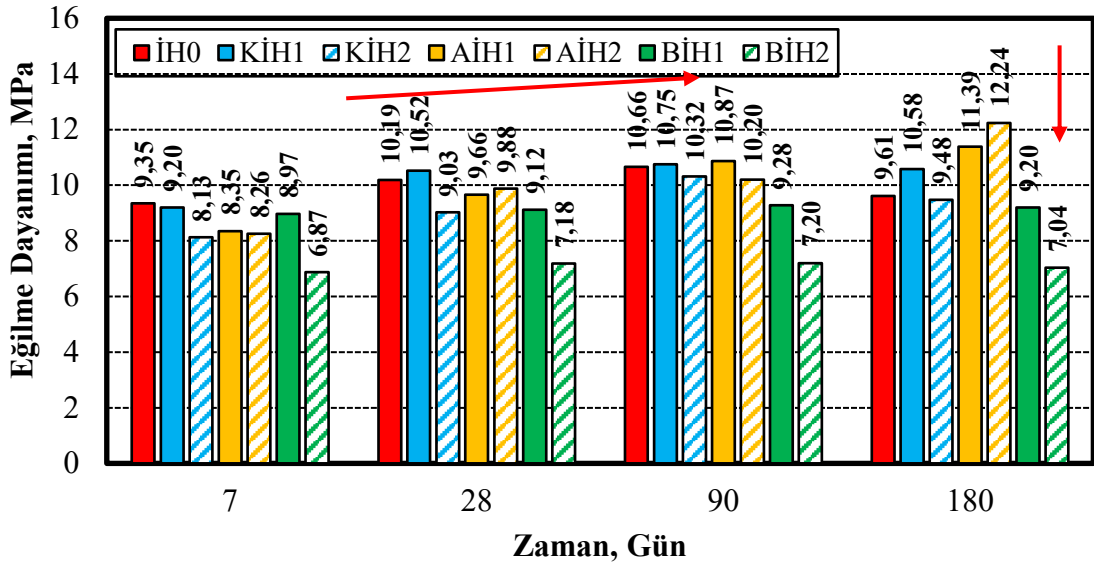
KİH2 numunesinde 7/28 arasında %10,23 olurken 28/90 arasında %5,00 şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bİ kullanılan numunelerde 90/180 arasında BİH1’de %0,23 ve BİH2’de %3,81 dayanım kaybı belirlenmiştir. Kontrol numunesine (İH0) göre daha az dayanım elde edildiği ve inhibitörlü serilerde de en düşük dayanımı almıştır. Ancak bor inhibitörlü numunelerin kendi aralarındaki dayanım kayıpları incelendiğinde; sodyum sülfat etkisinde 180 gün sonundaki sonuçlara göre %1 oranında Bİ kullanılmasının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. AA içerikli inhibitör numunelerde 90/180 arası %4,06 ve %11,07 oranlarında dayanım artış oranı bulunmuştur. Sülfat etkisi ile dayanım değerlerinin kullanılan inhibitör çeşidine ve oranına göre farklı sonuçlar göstermesi dikkat çekmektedir.

Sülfat etkisinin değerlendirildiği Şekil 4.18’de gösterilen %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. Numuneler incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 180 gün sonunda KİH2’de (60,04 MPa) olduğu görülmektedir. İnhibitörlü numunelerde farklı sonuçlar bulunmuştur. Mevcut agresif ortamda dayanım kayıpları 180 gün sonrasında inhibitör kullanılmayan İH0’da %2,37 olurken, KİH1’de %0,50 ve KİH2’de %3,19 olarak belirlenmiştir. Amino alkol içerikli numunelerde; AİH1’de %3,17 oranında kayıp gözlemlenirken, AİH2’de %7,80 dayanım artışı devam etmektedir. Ancak AİH2 numunesinin dayanım artış hızı 7/28 arasında %4,20 oranında, 28/90 arasında %13 ve 90/180 arasında ise %7,8 oranına düştüğü belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %5 MgSO₄ etkisinin devam etmesi halinde dayanım kaybının görüleceği düşünülmektedir.



Şekil 4.18. %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

Bor inhibitörlü numunelerde her iki oranda da dayanım kayıpları olduğu görülmüştür. Bu değerler BİH1’de %0,22 ve BİH2’de %8,09 olarak kaydedilmiştir. Kontrol numunesine göre karşılaştırma yapıldığında ise inhibitör oranlarına göre sırasıyla %14,51 ve %14,66 oranlarında az basınç dayanımı aldığı gözlemlenmiştir. Kontrol numunesine göre dayanım sonuçları az olsa da kendi içlerinde değerlendirildiğinde %1 kullanılması halinde 90/180 gün sonrası dayanım kaybının oldukça az yaşandığı belirlenmiştir. Her iki oranda (%1-%2) kullanılan numunelerin basınç dayanım sonuçları 180 gün etki süresi sonunda birbirlerine yakın çıkmıştır. Karşılaşılan bu durum magnezyum sülfat etkisinde tercih edilmesi gereken optimum inhibitör oranının ve çeşidinin önemi hakkında dikkat çekmiştir.



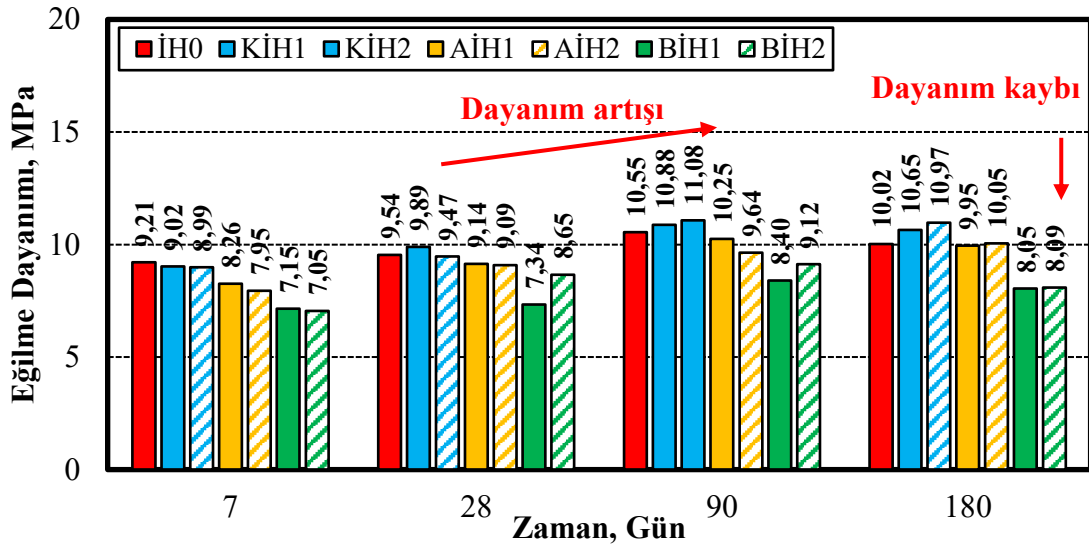
Şekil 4.19. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları

Sülfat etkisindeki numunelerin %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 180 günlük eğilme dayanım sonuçları Şekil 4.19’da gösterilmektedir. En yüksek eğilme dayanımı sonucu AİH2’de (12,24 MPa) elde edilmiştir. Amino alkol içerikli numunelerde 180 gün sonunda eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Bu artış 90 günlük süre içerisinde çok belirgin olmamakla birlikte, AİH1’de 0,52 MPa iken AİH2’de 2,04 MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.20’de sodyum sülfat etkisinde 180 gün bekletilmiş numunelerin görüntüsü bulunmaktadır. Numunelerde yıpranmalar, kopmalar, büyük boyutta boşluklar görülmemiştir. Numunelerin görselleri deney sonuçlarını kanıtlar niteliktedir. Diğer numune serilerinde 90/180 gün sonrasında dayanım kayıpları dikkat çekmektedir. Kontrol numunesinde dayanım kaybı %9,85 iken KİH1’de %1,58 ve KİH2’de %8,14 oranında dayanım kaybı belirlenmektedir.



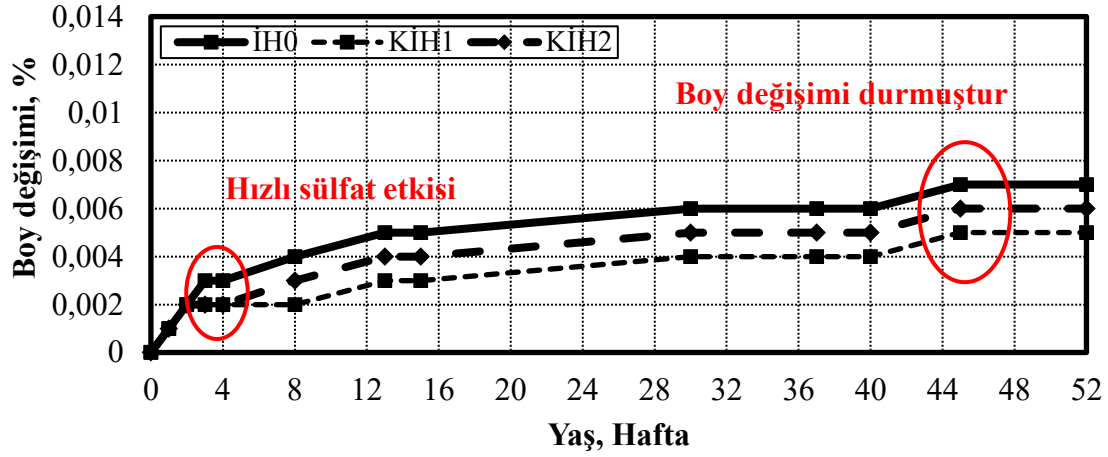
Şekil 4.20. %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 180 bekletilen AA numuneleri

Şekil 4.21’de %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin eğilme dayanımları verilmektedir. Deney sonuçları genel olarak değişkenlik göstermekle birlikte, her bir inhibitör kullanımı için yorumlanabilmektedir. Harç numunelerin 180 gün sonundaki eğilme dayanımı sonuçlarına göre KİH2’nin (10,97 MPa) en yüksek değere sahip olduğu saptanmıştır. KN içerikli numuneler 90/180 günlük aralık karşılaştırıldığında; KİH1’de %2,11 ve KİH2’de ise %0,99 oranında dayanım kaybı görülmektedir. Magnezyum sülfat etkisinde dayanım kaybının daha az olması ve en yüksek dayanımın KİH2’de olması eğilme dayanımı performansının daha iyi olduğu sonucunu vermektedir. AA içerikli inhibitör uygulanan numunelerde farklı etkiler belirlenmiştir. AİH1’de %2,93 oranında dayanım kaybı belirlenirken, AİH2’de ise %4,25 oranında dayanım artışı olduğu hesaplanmıştır.



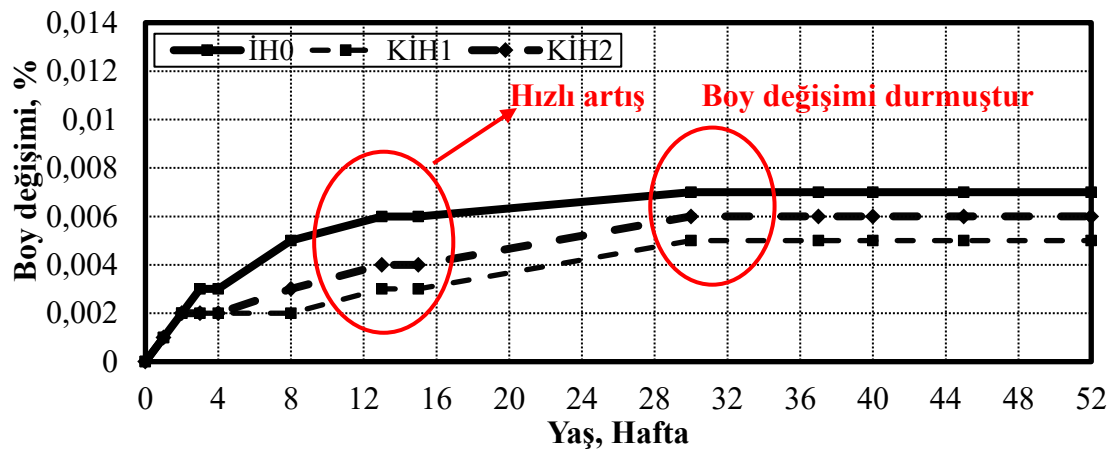
Şekil 4.21. %5 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları

Eğilme dayanımı artan AİH2 numunesinde dayanım artış oranları incelenmiştir. Artışlar sırası ile 7/28 arası %14,34 oranında ve 28/90 arasında %6,05 olduğu belirlenmiştir. Bu oranların giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Agresif ortam koşulunun devamında dayanım kayıplarının oluşması beklenilmektedir. BİH1 incelendiğinde 90/180 arasında %4,17 ve BİH2’de %11,29 eğilme dayanımı azalmıştır. İH0 serisine bakıldığında, dayanım değerlerinin %3,58 ve %10,59 oranında artış gösterdikten sonra %5,02 değerinde azaldığı saptanmıştır. Genel olarak numuneler 90 gün sülfat etkisinden yıpranmadığı fakat sürenin devam etmesi ile numunelerin hem görüntülerinde hem de deney sonuçlarından alınan değerlerde mikro çatlakların oluştuğu ve dayanımın olumsuz etkilendiği dikkat çekmektedir.

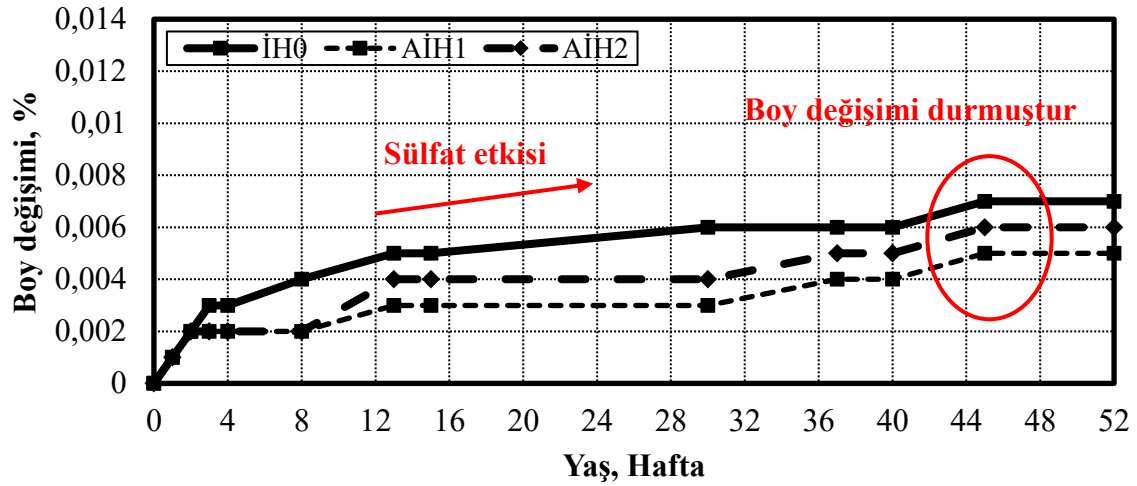


Şekil 4.22. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki KN numunelerinin boy değişimleri

ASTM C1012'ye göre %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin iç yapılarında oluşan reaksiyonlar ile numunelerde hacim değişimleri oluşmaktadır. Sülfat saldırısı çimentodaki C₃A miktarına, C₃S/C₂S oranına ve çözeltinin etki süresi ile değişmektedir (Tikal'sky vd., 2002). Numunelerin belirli aralıklarla 52 hafta süre ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22'de %5 Na₂SO₄ etkisinde kalsiyum nitrit içerikli numunelerin uzama değişimleri verilmektedir. Sonuçlara göre 52. haftada İH0'da %0,007 oranında, KİH2'de %0,006 ve KİH1'de %0,005 olduğu görülmüştür. Şekil 4.23'de %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin boy değişim sonuçlarına göre uzama değerleri İH0'ın %0,007, KİH1'in %0,005 ve KİH2'nin %0,006 olduğu belirlenmiştir. Boyca uzama (%) değerlerini her iki sülfat etkisinde de elde edilen sonuçların aynı olduğu görülmüştür. Deney sonucunda %0,05 ve %0,10 standardın sınır değerlerinin altında olduğu görülmüştür.

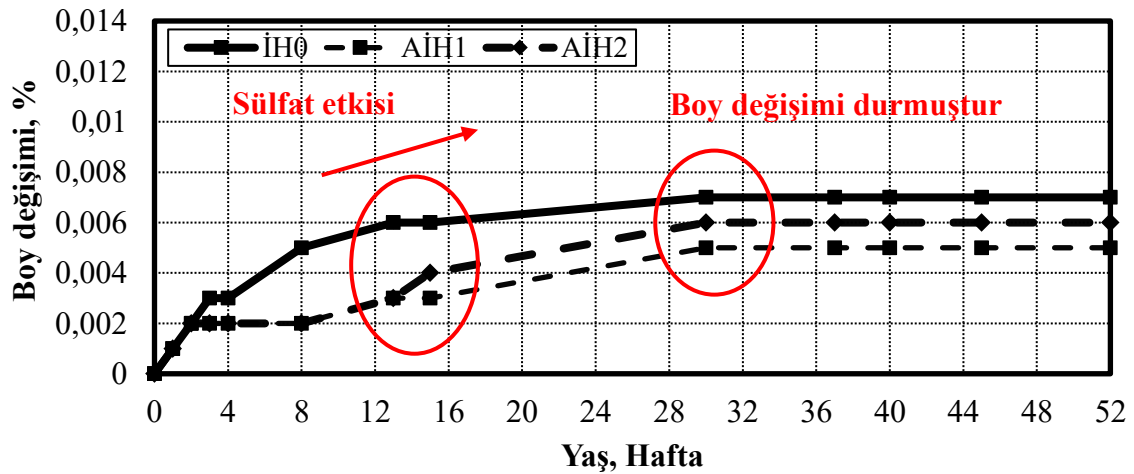


Şekil 4.23. %5 MgSO₄ çözeltisindeki KN numunelerinin boy değişimleri

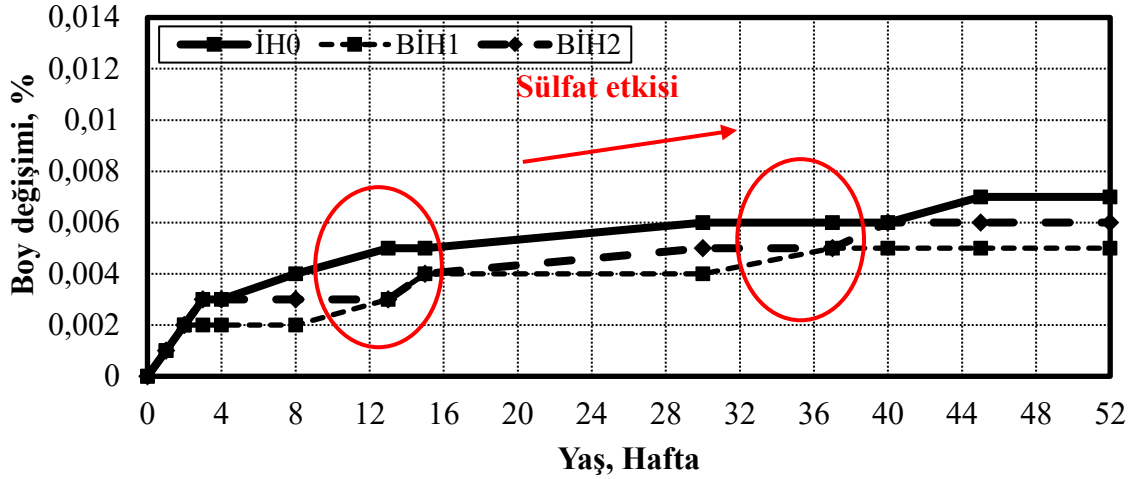


Şekil 4.24. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki AA numunelerinin boy değişimleri

Sülfat etkisi ile oluşan etrenjit yapısı numunede genleşme oluşturarak numunelerde uzama etkisi yaratabilmektedir. Amino alkol içerikli korozyon inhibitörü kullanılan numunelerde Na₂SO₄ etkisi ile 8. haftaya kadar aynı değerler alırken, 13. haftada AİH2 numunesinin boyca uzaması AİH1'e göre %0,001 daha fazla uzadığı Şekil 4.24'te görülmektedir. Prizmatik numunelerin 52. hafta ölçüm sonuçları ise AİH1'in %0,005 ve AİH2'nin %0,006 uzama göstermiştir. Şekil 4.25'te MgSO₄ etkisinde ise boyca uzama oranları (%) 13. haftaya kadar aynı değerlerde devam ederken, 15. haftada farklı okumalar görülmüştür. Sülfat dayanıklılığında harç numunenin yapısı oldukça önemli olmaktadır. Mg⁺² ve SO₄ iyonlarının etkisi ile CSH yapısı bozularak magnezyum silika hidrat oluşumu gerçekleşmektedir (Topçu ve Canbaz, 2009). Deney sonunda AİH1'in %0,005 ve AİH2'nin %0,006 olduğu, inhibitörsüz İH0'ya göre daha az uzama oranı olduğu gözlemlenmektedir.

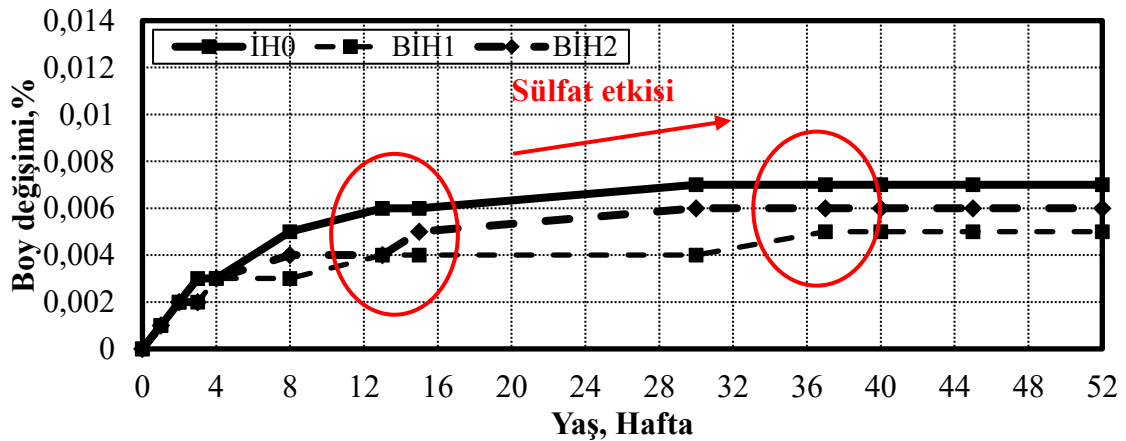


Şekil 4.25. %5 MgSO₄ çözeltisindeki AA numunelerinin boy değişimleri



Şekil 4.26. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki Bİ numunelerinin boy değişimleri

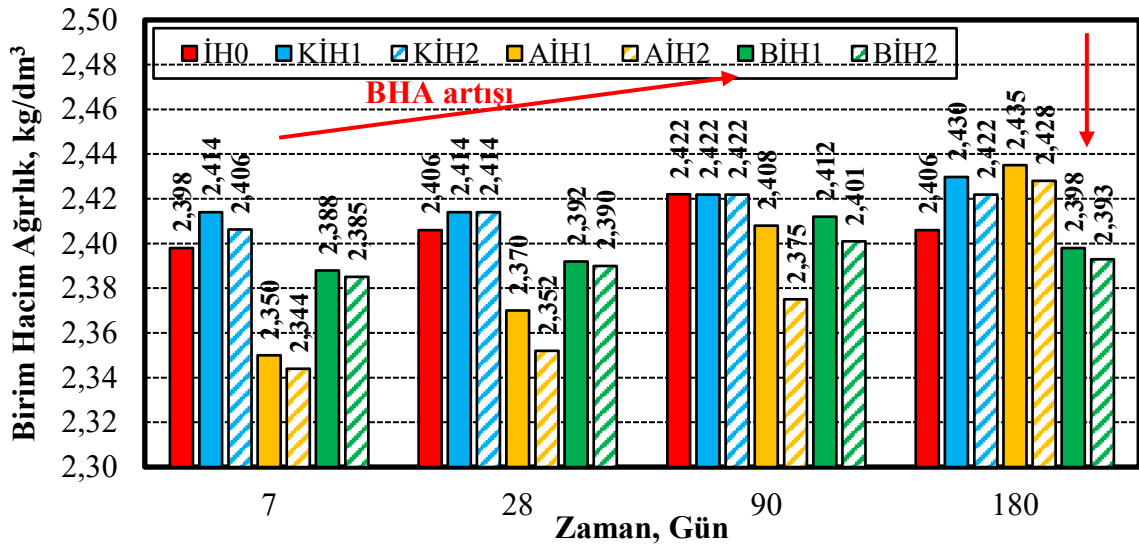
Şekil 4.26'da %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen bor içerikli numunelerin boy değişimleri (%) verilmektedir. Numunelerin boy değişim değerlerinde zamanla beraber farklılıklar göstermektedir. İlk günlerde boyca değişim oranları hızlı şekilde artmıştır. BİH1 ve BİH 2 numuneleri 40. haftaya kadar uzamaya devam etmişlerdir ancak daha sonraki ölçümlerde değerlerin sabit kaldığı görülmüştür. Uzama (%) miktarları BİH1'de %0,005 ve BİH2'de %0,006 olarak saptanmıştır. Şekil 4.27'de MgSO₄ etkisinde boyca uzama değerleri verilmektedir. Numunelerin farklı uzama oranları, sülfat türünün de boy değişimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. MgSO₄ çözeltisinde BİH1 37. haftada ve BİH2 30. haftada sabit uzama miktarında kalmıştır. Bor içerikli inhibitör kullanımının sülfat etkisinde boyca değişimi arttıran ayrıca olumsuz bir etkisinin olmadığı, aksine İH0 numunesi ile karşılaştırıldığında daha az boy uzama oranı elde edildiği belirlenmektedir.



Şekil 4.27. %5 MgSO₄ çözeltisindeki Bİ numunelerinin boy değişimleri

4.3.2 Sodyum klorür dayanıklılığı deney sonuçları

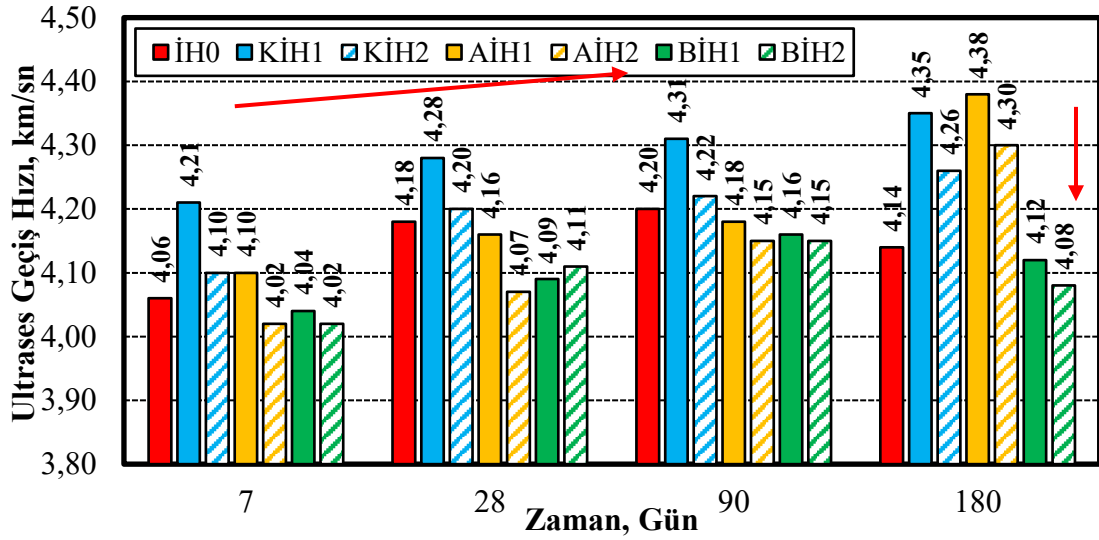
Çalışma kapsamında farklı korozyon inhibitörlerinin kullanıldığı harç numuneler %5 NaCl etkisinde harç yapısına olan etkileri de araştırılmıştır. Literatür araştırmalarında korozyon inhibitörlerinin NaCl etkisinde donatı üzerinde olumlu etkileri belirtilmektedir. Sodyum klorür etkisinde harç yapısına etkileri bu araştırmada incelenmiştir. Standart kür sonrası 28 günlük dayanım değerlerini alan harç numuneler, %5 NaCl çözeltisinde 180 güne kadar bekletilmiştir. Şekil 4.28’de %5 NaCl çözeltisinde 180 gün bekletilen numunelerden en yüksek BHA değerinin AİH1’de ($2,435 \text{ kg/dm}^3$) olduğu görülmektedir. KN ve AA inhibitörü içeren numunelerde BHA değerlerinde artmaların devam ettiği gözlemlenmiştir. Numunelerin 90/180 gün aralığında BHA değerlerindeki artış oranları sırasıyla; AİH1’de %1,12 ve AİH2’de %2,23 değerinde olurken, KİH1’de %0,32 oranında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.28. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin birim hacim ağırlık değerleri

NaCl çözeltisi harç içindeki su ile reaksiyonu sonucunda oluşan tuz kristalleri iç yapıda boşlukları doldurarak hacim artışı oluşturabilmektedir. Etki süresinin artması ile çatlaklar oluşmakta ve numunenin dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Cuma vd., 2020). Bor içerikli korozyon inhibitörünün uygulandığı numunelerde diğerlerinde olduğu gibi ilk 90 günlük NaCl etkisinde birim hacim ağırlık değerleri artmıştır. Numunelerin 180 gün sonunda BHA değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalmalar kontrol numunesinde sodyum klorür etkisi ile BHA değerlerinde azalmalar belirlenmiştir. Bulunan azalma değerlerinin BİH1’de %0,58 ve BİH2’de %0,33 oranında olduğu belirlenmektedir.

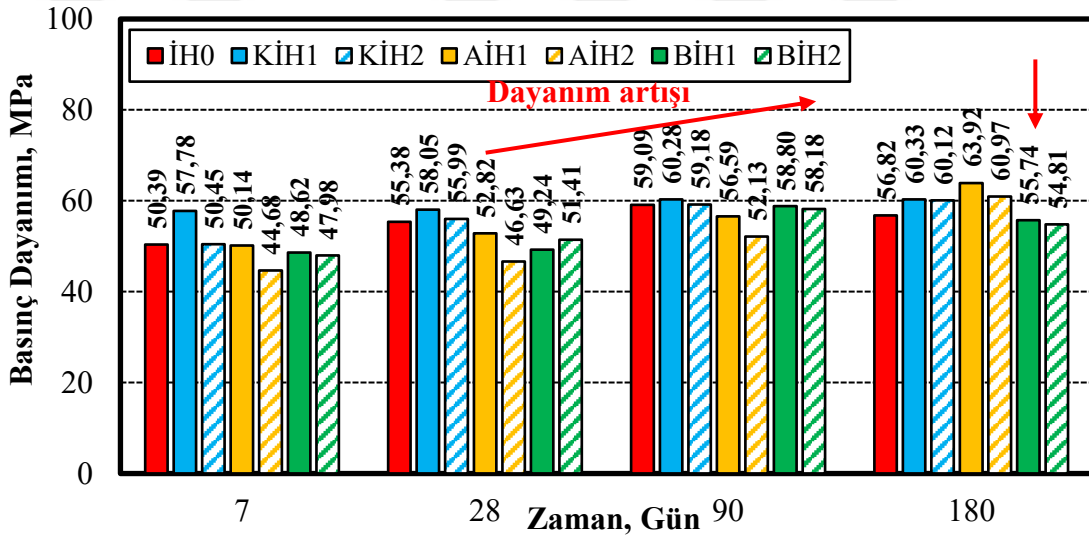
Birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesinin ardından, ultrases geçiş süresi deneyi uygulanmaktadır. Şekil 4.29’de verilen UGH değerleri BHA sonuçları ile benzerlik göstermesi dikkat çekmektedir. Numunelerin 7 günlük %5 NaCl etkisinde ultrases geçiş hızı değeri KİH1 (4,21 km/sn) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Agresif ortamın etki süresinin devamında 90/180 gün arasındaki KN numunelerinin artışları; KİH1’de %0,93 ve KİH2’de %0,95 olmuştur. Agresif ortam devam ettiği süre içerisinde 180. günde ise AİH1 numunesi 4,18 km/sn’den 4,38 km/sn sonucuna ulaşarak en yüksek değeri almıştır. AA numunelerinde AİH1’de belirlenen artış %4,78 olmakla birlikte AİH2’de bu değer %3,61 olmaktadır. İH0 ve Bİ serilerinde olduğu gibi NaCl çözeltisi ile iç yapıya ilerleyen tuz kristallerinin boşlukları dolduruyor olması UGH değerlerini önce arttırmakta, etki süresinin artması ile zamanla oluşan iç basınç kılcal çatlaklara neden olarak UGH’yi azaltacağı şeklinde düşünülmektedir.



Şekil 4.29. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

Sodyum klorür etkisinde zamanla numunelerde yıpranmalar gözlemlenmiştir. Bu etkiler ultrases geçiş hızı değerleri ile ispatlanmaktadır. Kontrol numunesinde (İH0) planlanan etki süresi sonunda %1,43 azalma gözlemlenmiştir. Bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde de benzer şekilde azalmalar belirlenmiştir. Bu oranlar BİH1’de %0,96 ve BİH2’de %1,69 olmuştur. Ayrıca kontrol numunesi ile karşılaştırma yapıldığında amino alkol ve kalsiyum nitrit içerikli inhibitörü kullanılan numunelerin daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Bu oranlar kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanılan KİH1’de %5,07 ve KİH2 %2,90 olurken; amino alkol içerikli korozyon inhibitörünün kullanıldığı AİH1 serisinde %5,80 ve AİH2 serisinde %3,86 oranlarında olduğu dikkat çekmektedir.

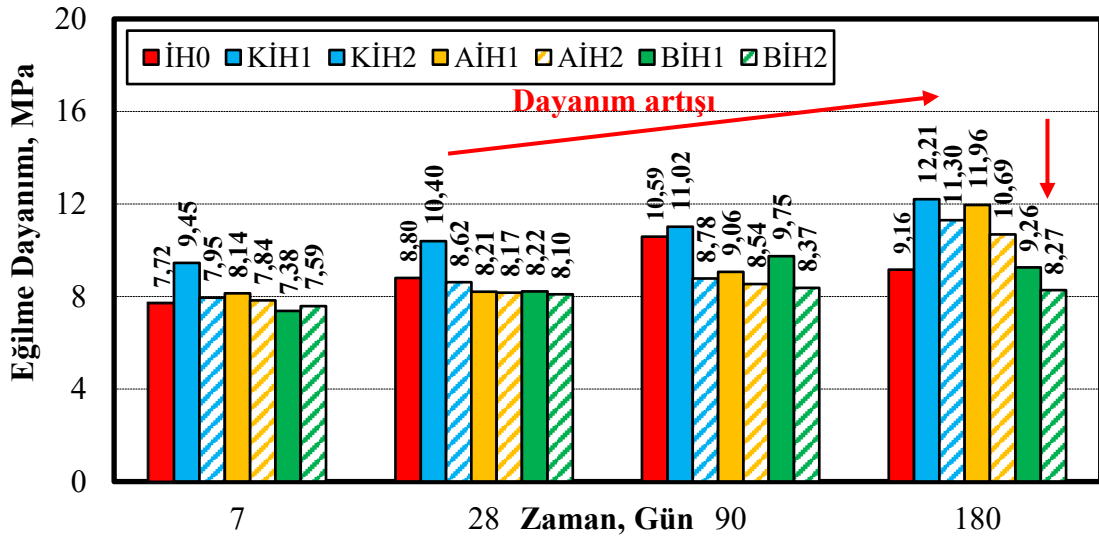
NaCl etkisindeki numunelerin basınç dayanım sonuçları Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Numunelerin 180 günlük etki süresi sonrası dayanım sonuçlarına bakıldığında AA içerikli numunelerin dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. AA içerikli numunelerde 90/180 gün inhibitör oranının artması ile AİH1'de %12,95 ve AİH2'de %16,96 olmuştur. Başka bir çalışmada AA inhibitörlerinin taze betona karıştırılması ile hidrasyonun devam ettiği, aynı zamanda yüzeye uygulanması halinde klorürün betonla etkileşimini ve su geçirgenliğini azalttığı belirtilmiştir (Sun vd., 2019). KN içerikli numunelerde 90/180 gün arasında KİH1'de %0,08 ve KİH2'de %1,59 oranında dayanım artışı hesaplanmıştır. Bor İnhibitörlü numunelerde ise; %1 oranında kullanılan seride %5,20 ve %2 oranında kullanılan seride %5,79 oranında dayanım kaybı bulunmuştur.



Şekil 4.30. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanımları

Kontrol numunesine göre inhibitörlü numunelerin sonuçları değerlendirilmiştir. En düşük basınç dayanımı BİH2 numunelerinde elde edilmiştir. Yeşil çevreci korozyon inhibitörünün iki farklı miktarında ise dayanım farkları çok olmasa da (1,08-2,01 MPa) İH0'a göre daha az dayanımı elde edilmiştir. Bu oranlar BİH1'de %1,90 BİH2'de %3,54 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde çimento matrisinde yapısal bozulmaların başladığı, iç yapıda gelişen reaksiyonlar sonucu mekanik özelliklerin azaldığı belirlenmiştir. Numunelerin yıprandığı, tuz birikintilerinin ve kopmaların olduğu gözlemlenmiştir. İH0 numune serisi ile karşılaştırma yapıldığında; inorganik (KN) ve organik (AA) korozyon inhibitörlü numunelerde daha fazla dayanım alındığı görülmüştür.

Eğilme dayanımı sonuçlarının gösterildiği Şekil 4.31’de 7, 28, 90 ve 180 günlük %5 NaCl etkileri sunulmaktadır. Genel olarak bütün numunelerde 90 günlük etki süresinde eğilme dayanımlarının düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Etki süresi sonunda (180 gün) en yüksek eğilme dayanım sonucu KİH1 numunesinde (12,21 MPa) olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde kontrol numunesine göre KN ve AA içerikli inhibitör kullanılan numunelerin daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Ancak bor içerikli inhibitör numunelerinde 90/180 arasında dayanım kayıpları belirlenmiştir. Bu kayıplar BİH1’de %5,03 ve BİH2’de %1,19 olmuştur. Bu durumun yanı sıra Bİ içerikli numunelerde %1 oranında kullanılması sonucu kontrol numunesine göre %1,09 daha yüksek sonuç alınmıştır. NaCl etkisinde %1 oranında Bİ kullanımının daha olumlu sonuç vermiştir.

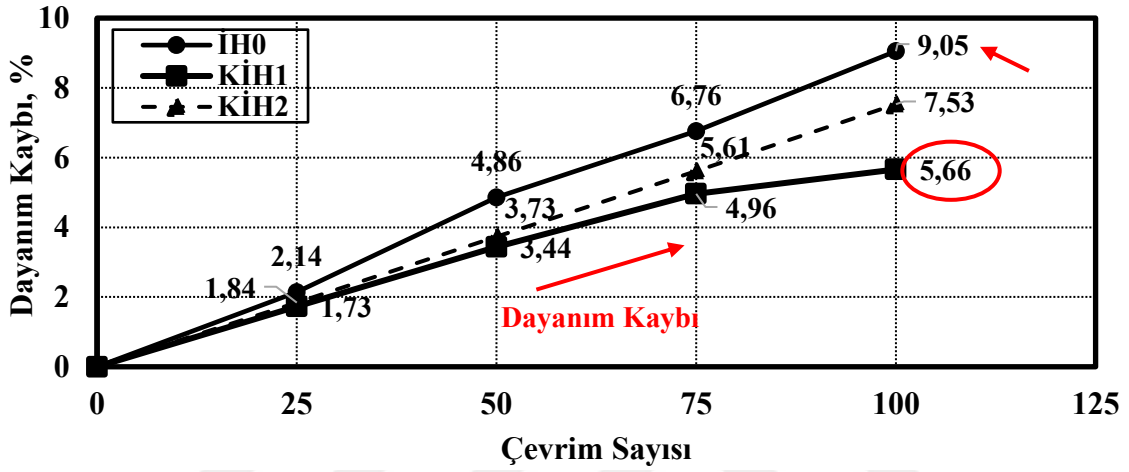


Şekil 4.31. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanımları

İnhibitör kullanılmayan İH0 numunesinde 90/180 arasında %13,5 oranında eğilme dayanımında azalma görülmüştür. Bu oranla birlikte en büyük eğilme dayanım kaybının inhibitörsüz seride olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizler, %5 NaCl etkisi altında en uygun inhibitör oranının bütün inhibitörlü numuneler için %1 olduğunu ortaya koymaktadır. Bu oranda (%1) inhibitör kullanılan numunelerde hepsinin kontrol serisinden daha yüksek eğilme dayanımı değerleri aldığı belirlenmiştir. İnhibitörlerin kendi aralarındaki dayanım farkları hesaplanmıştır. Bu değerlerin %1 kullanılan seriler ile kalsiyum nitrit içerikli seride KİH2’de %7,45 oranında, amino alkollü inhibitör serilerinde AİH2’de %10,62 değerinde ve bor içerikli inhibitör kullanılan serilerde BİH2’de %10,69 oranında olduğu hesaplanmıştır.

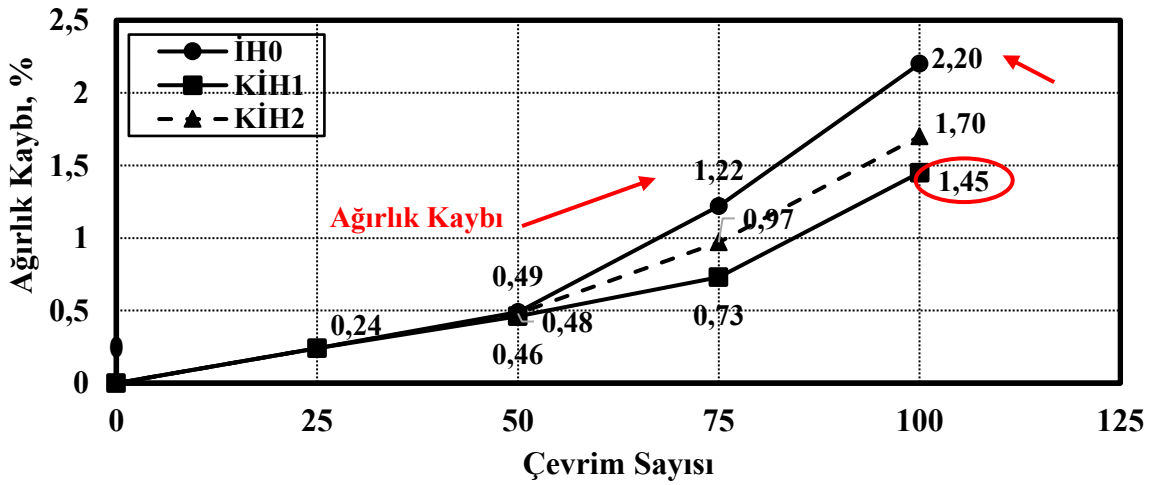
4.3.3. Donma-çözülme deney sonuçları

Kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörünün tek başına donma direncini artırdığı veya azalttığı durumlar bulunmaktadır. Özellikle, su-çimento oranına bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. KN içeren numunelerin D-Ç ağırlık kayıpları s/ç oranı ile değişmektedir (Honda vd., 2021). Şekil 4.32’de KN inhibitörü kullanılan numunelerin D-Ç çevrimlerinde KİH1’de (%5,66) ve KİH2 (%7,53) oranında dayanım kaybı görülmektedir.

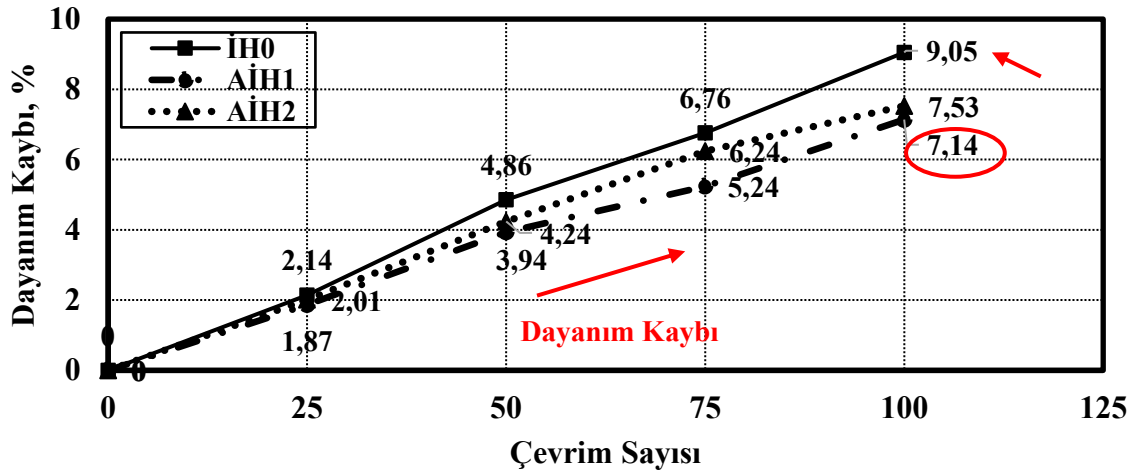


Şekil 4.32. KN numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı

İnhibitör kullanılmayan İH0’da dayanım kaybının daha fazla oluşu görülmektedir. KİH1 serisinin mevcut D-Ç (100) döngülerinde optimum değer olduğu belirlenmektedir. Şekil.4.33’te D-Ç etkisinde ağırlık kaybının en az KİH1’de (%1,45) olduğu belirlenmiştir. Ağırlık ve dayanım kayıpları sonuçlarının birbirlerine paralel olduğu görülmektedir. D-Ç çevrimlerinde kalsiyum nitrit inhibitörünün %1 oranında kullanılması daha etkili olmuştur.

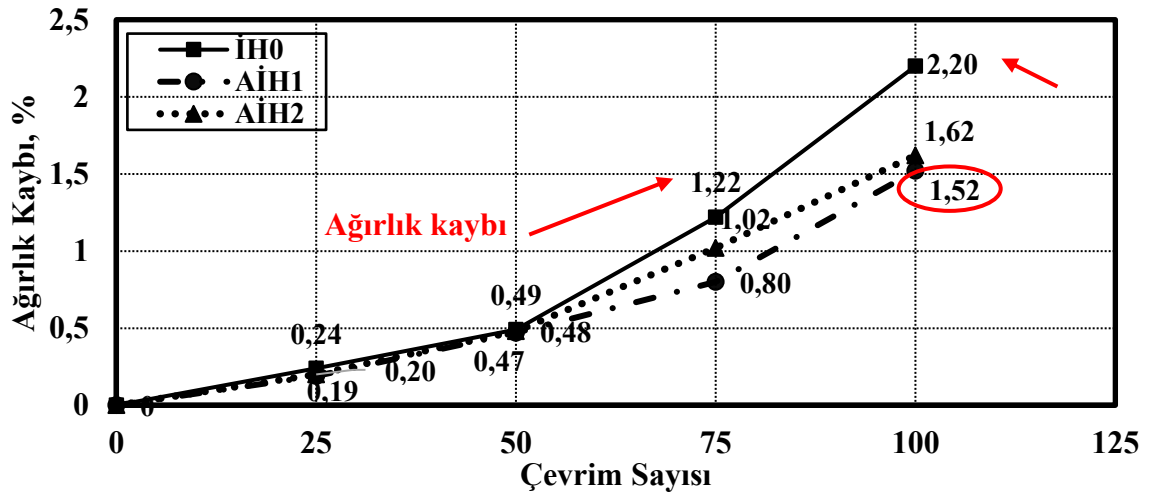


Şekil 4.33. KN numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı

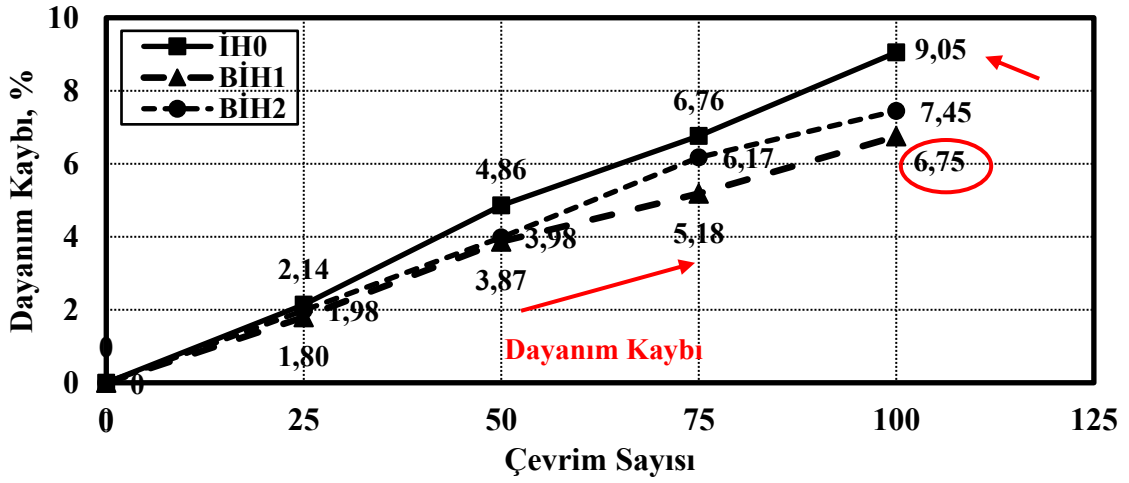


Şekil 4.34. AA numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı

Amino alkol içerikli numunelerin D-Ç çevrimleri Şekil 4.34’de AİH1’de dayanım kaybı %7,14 ve AİH2’de %7,53 olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle numunenin iç yapısına daha az su girmesi D-Ç etkisinin daha az olmasını sağlamaktadır. Numunelerin görünümünde D-Ç sonrası kapak atma, çatlamalar, büyük boşluklar gibi yüzeysel bozulmalar gözlemlenmemiştir. D-Ç döngüleri sırasında harç ve betonun iç yapısında buz kristallerinin oluşması hidrolik ve ozmotik basınca neden olarak mikro çatlaklara ve bozulmalara yol açmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2021; Baradan vd., 2015). Ağırlık kayıplarının verildiği Şekil 4.35’de mevcut koşullarda en az ağırlık kaybının AİH1 numunesinde (%1,52) olduğu görülmüştür. Sonuç olarak amino alkol inhibitör kullanımının %2 oranına kadar D-Ç çevrimlerinde olumlu etkisinin olduğunu şeklinde düşünülmektedir.

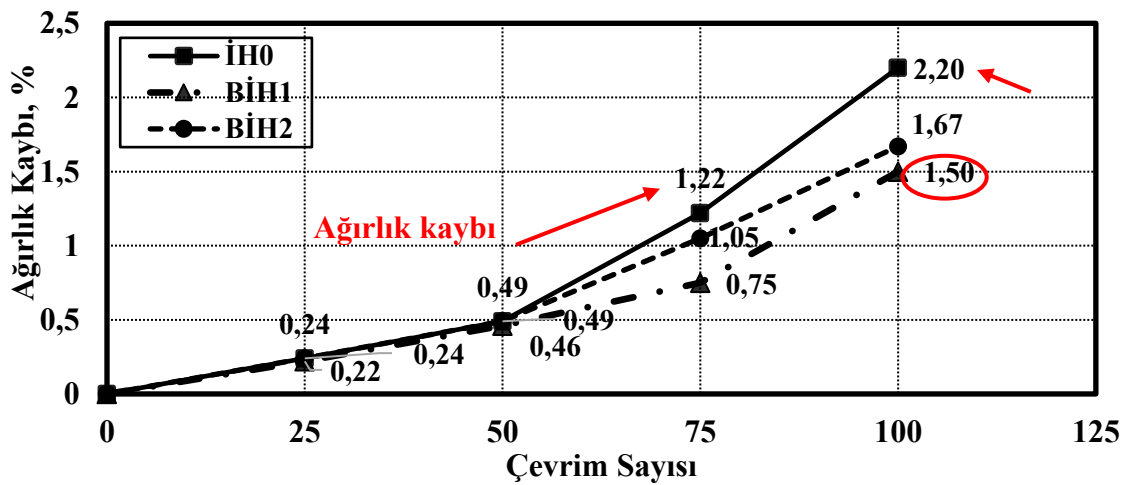


Şekil 4.35. AA numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı



Şekil 4.36. Bİ numunelerinin D-Ç deneyi sonucu dayanım kaybı

Numunelerde kullanılan bor içerikli inhibitörlerin D-Ç çevrimleri sonucu elde edilen dayanım ve ağırlık kaybı sonuçları, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de gösterilmiştir. İlk 50 çevrime kadar, inhibitörlü ve inhibitörsüz numunelerin dayanım kayıpları benzer değerler göstermektedir. Mevcut D-Ç çevrim koşullarında, 100 çevrim sonunda BİH1 numunesinde %6,75 ve BİH2 numunesinde %7,45 oranında dayanım kayıpları hesaplanmıştır. Numunelerin iç yapısında ve dışında oluşan çatlaklar ve boşluklar; deney sonuçlarındaki ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı kayıpları arasında doğrudan bir ilişki olduğuna işaret etmektedir. Ağırlık kayıpları ise BİH1 için %1,50 ve BİH2 için %1,67 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, bor içerikli inhibitörlerin betonun donma-çözülme çevrimlerinde dayanıklılığı artırabileceğini ve yapısal performansını koruyabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 4.37. Bİ numunelerinin D-Ç deneyi sonucu ağırlık kaybı

Donma-çözülme etkisinde kalan numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri her 25 çevrim sonrasında ölçülmüştür. Çizelge 4.1'de belirtilen üç farklı korozyon inhibitörünün çeşitli oranlarda kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar verilmektedir. Çevrim sayısının artması ile birlikte UGH (Ultrases Geçiş Hızı) değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalmalar, numunelerin iç yapısında oluşan boşluklar ve çatlaklarla ilişkilendirilmiştir. En düşük UGH değeri İH0 numunesinde 100. çevrimde kaydedilmiştir. İH0'ın çevrim devamı ile ultrases geçiş hız kayıpları sırasıyla D-Ç (25) %4,04 oranında D-Ç (50)'de %6,74 ve D-Ç (100)'de %15,73 olarak hesaplanmıştır. İnhibitör kullanımının 100 çevrim sonunda İH0'a göre daha yüksek değerler sağladığı gözlemlenmiştir. En yüksek değer ise KİH1 numunesinde, 4,00 km/sn olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, mevcut koşullarda kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörü etkinliğinin 100 çevrime kadar olumlu yönde olmuştur.

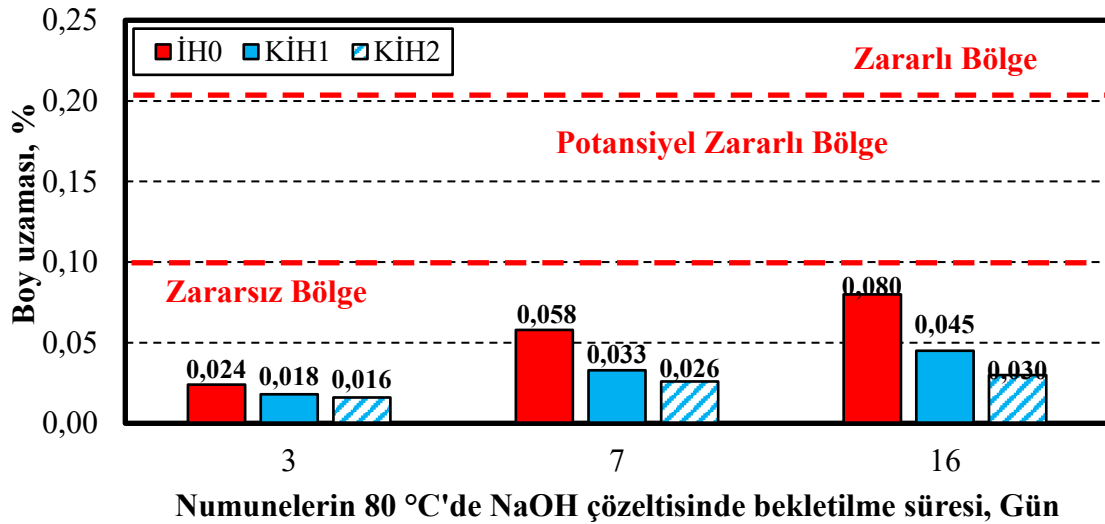
Çizelge 4.1. D-Ç çevrimi ultrases geçiş hızı sonuçları

Çevrim	Ultrases geçiş hızı, km/sn						
	İH0	KİH1	KİH2	AİH1	AİH2	BİH1	BİH2
0	4,45	4,40	4,42	4,30	4,25	4,35	4,30
25	4,27	4,24	4,20	4,30	4,20	4,32	4,25
50	4,15	4,20	4,10	4,26	4,12	4,28	4,20
75	4,05	4,12	4,05	4,10	4,05	4,15	4,10
100	3,75	4,00	3,98	3,90	3,80	3,95	3,90

Her inhibitör çeşidi için UGH değerleri incelendiğinde genel olarak %1 oranında kullanımının en uygun miktar olduğu görülmektedir. İH0'a göre aralarındaki UGH farkları KİH1'de %6,67 ve KİH2'de %6,13 oranında olmakla beraber AİH1'de bu oran %4,00 ve AİH2'de %1,33 olarak kaydedilmiştir. Bİ serilerinde bu değerler inhibitör miktarının artması ile %5,33 ve %4,00 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Numunelerin dış yüzeylerinde gözlemlenen köşelerdeki küçük kopmalar, 1-2 mm çaplı boşluklar ve ince çatlaklar ağırlık ve dayanım kayıplarının nedenlerini göstermektedir. Ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı kayıpları, ultrases geçiş hızlarındaki azalmalarla birlikte elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu olmuştur. Deney sonuçları detaylı olarak incelendiğinde mevcut koşullarda uygulanan inhibitör oranlarının (%1-%2) ve çeşitlerinin harcın donma-çözülme dayanıklılığını azaltmadığı ve dayanıklılığı koruduğunu düşündürmektedir. Bu bulgular, çalışmada kullanılan korozyon inhibitörlerinin (KN, AA, Bİ) betonun donma-çözülme çevrimleri ile oluşacak dayanıklılık kayıplarına karşı katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

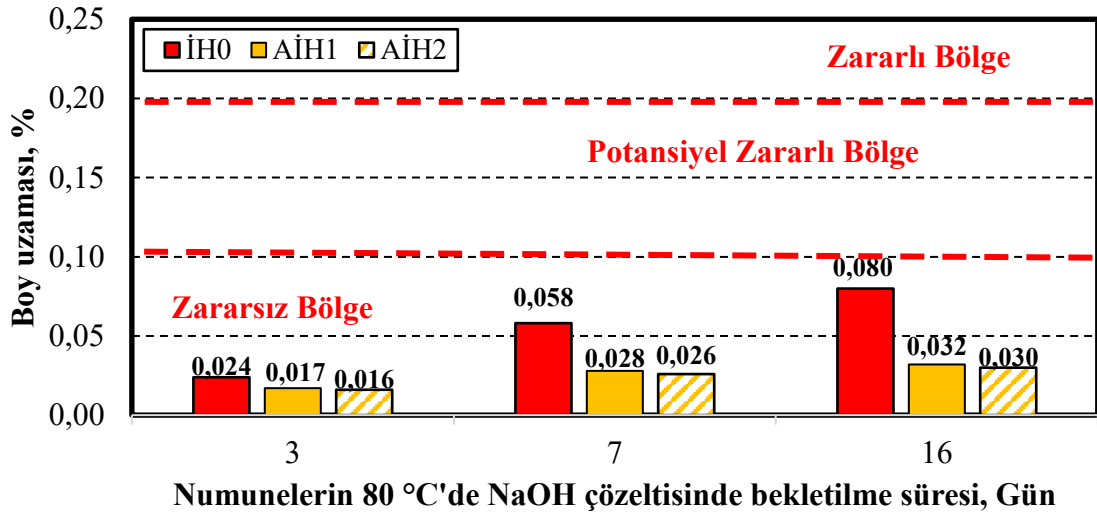
4.3.4. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) deney sonuçları

Çalışmada korozyon inhibitörlerinin ASR'ye olan etkisi incelenmiştir. Kullanılan 0-4 mm ince agregada aktif silis miktarı düşük olması nedeniyle tercih edilmiştir. Şekil 4.38'de KN içerikli numunelerin inhibitör oranının artması ile genleşme oranının kontrol numunesine göre daha az olduğu görülmektedir. KN inhibitörü içerikli prizmatik numuneler 16. gün sonucunda inhibitör kullanılmayan İH0 serisine göre daha az etkilenebilir. Bu oran KİH1 numunesinde %3,24 ve KİH2'de %4,63 daha az etkilendiğini söylemek mümkündür. Kontrol numunesinde deney süresince 3/7 gün arasında %3,32 oranıyla hızlıca arttığı gözlemlenmekte olup, 7/16 arasında ise %2,08 oranında boyca (%) uzama artışı olduğu belirlenmiştir. Uygulanan 16 günlük deney sonucunda ASTM C 1260'a göre "zararsız bölge" olarak (%0-%0,10) tanımlanan sınır değerlerinin aşılmadığı gözlemlenmektedir.



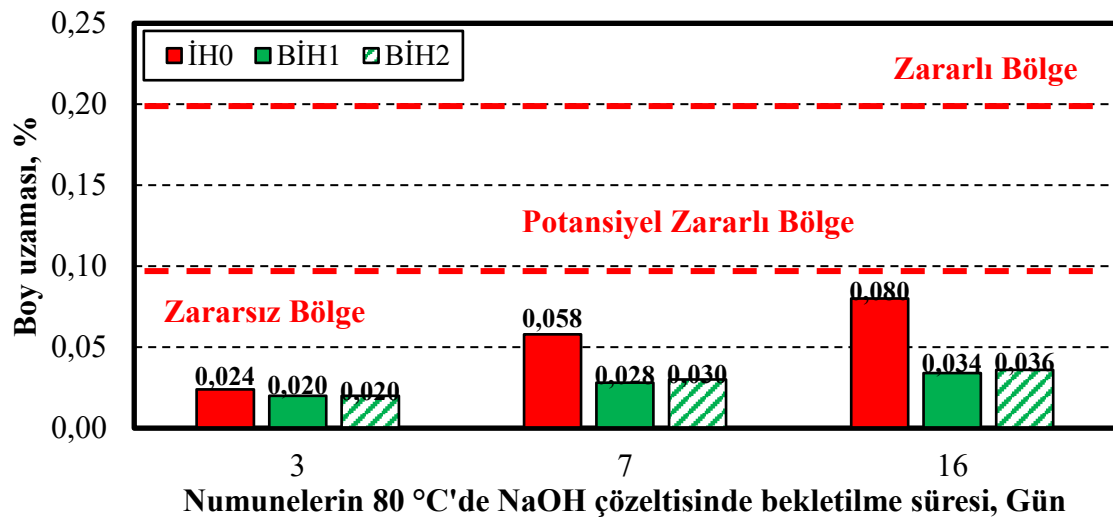
Şekil 4.38. KN içerikli numunelerin ASR deney sonucu

Kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörü kullanımının alkali-silika jellerinin oluşmasında reaksiyon hızını arttırmadığı ve ayrıca %2 oranında kullanılması ile reaksiyon hızını sınırlandırıldığı şeklinde düşündürmektedir. Çimento miktarının %1 ve %2 oranında kullanılmasının elde edilen sonuçlar, alkali silika reaksiyonunun olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermektedir. İnhibitör kullanılmayan kontrol numunesinde, boyca uzama oranının inhibitörlü numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak standardın sınır değerine göre ASR'nin numuneler üzerinde zararlı etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.39. AA içerikli numunelerin ASR deney sonucu

Şekil 4.39’da amino alkol içerikli inhibitörlerin alkali-silika deney sonuçları verilmiştir. Deneyde ölçümler belirli sürelerde (3,7,16 gün) ölçülmüştür. Deney sonucunda 16 günlük uzama (%) değerlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde AA inhibitörünün %1 ve %2 oranında kullanılması halinde deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın değerler (%0,032 ve %0,030) aldığı hesaplanmıştır. Kullanılan 0-4 mm ince agreganın silis miktarı ve çimentodaki toplam alkali oranı etkisi ile ASR’yi arttıracak ayrıca reaksiyonların oluşmadığı dikkat çekmektedir. Şekil 4.40’da bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerde 16. gün deney sonuçlarında %1 oranında kullanılmasının en uygun değer olduğu (%0,034) gözlemlenmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, deneyde uygulanan ASTM C1260’a göre Bİ kullanımının ASR’ye ayrıca olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır.

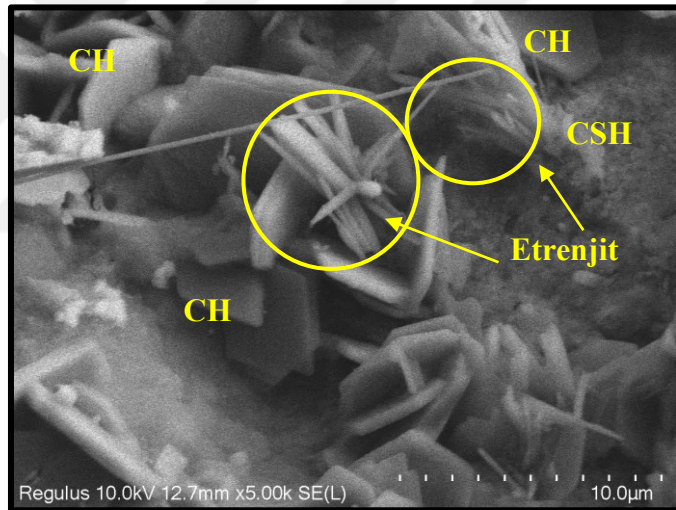


Şekil 4.40. Bİ içerikli numunelerin ASR deney sonucu

4.4. Mikro Yapı İncelemeleri

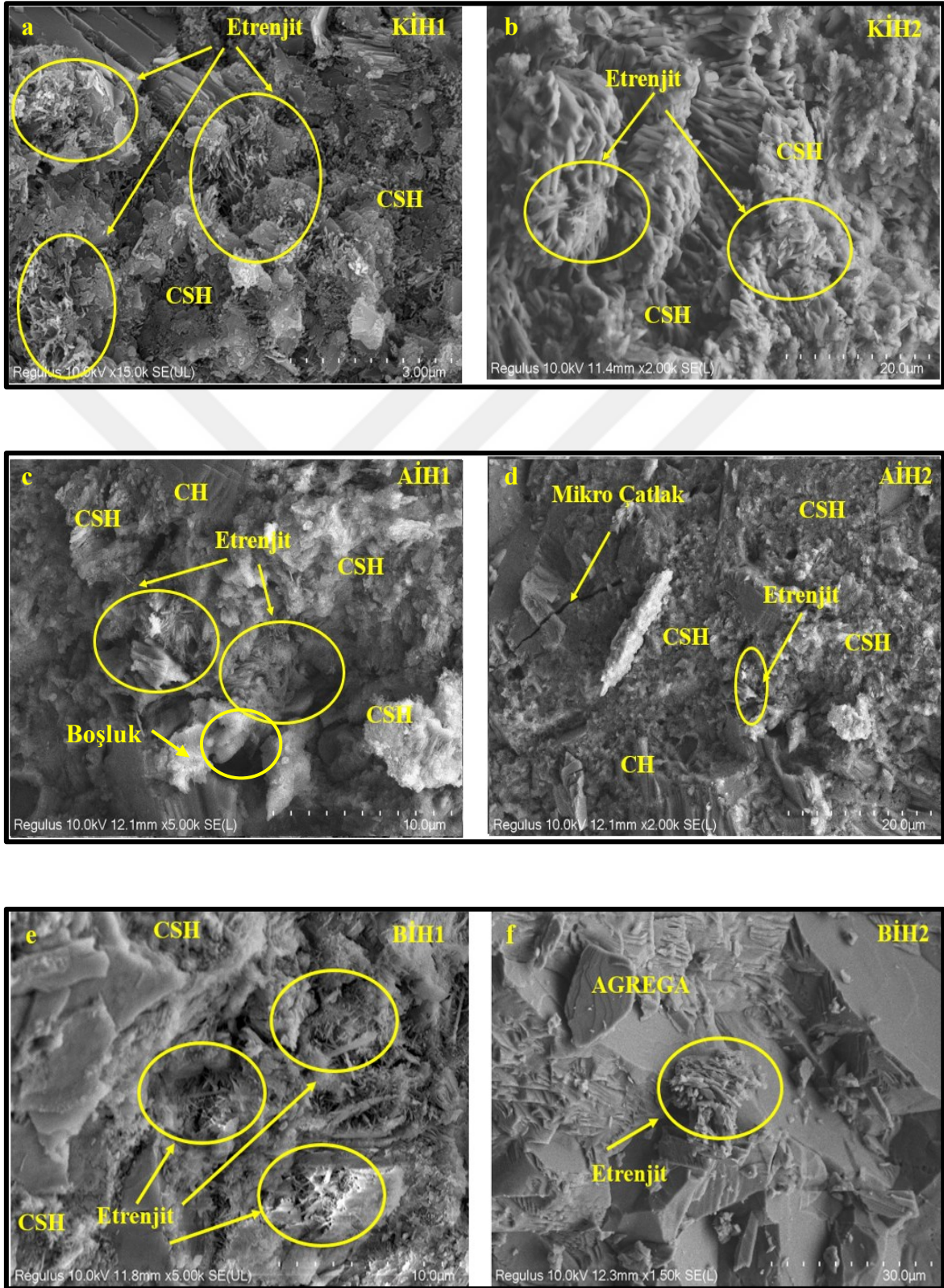
4.4.1 Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) sonuçları

Agresif ortamda bekletilen numunelerin mikro yapı görüntüleri alınmıştır. Sodyum sülfat etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin mekanik özellikleri deneylerle belirlenmişti. İç yapı ve kimyasal sonuçlarının belirlenmesi amacıyla FE-SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.41'de %5 Na₂SO₄ etkisinde 180 gün bekletilen inhibitör kullanılmayan İH0 numunesinin mikroyapı görüntüsü bulunmaktadır. Şekilde görüleceği gibi çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H ve CH (portlandit) yapılarının arasında sülfat etkisi ile oluşan etrenjit kristalleri bulunmaktadır. Oluşan etrenjit kristalleri bağlayıcı yapı arasında gelişerek yapıyı bozmakta ve oluşan iç basınç sonucu çatlaklara neden olmaktadır. Bu durum numunelerin ultrases geçiş hızlarını, basınç ve eğilme dayanımlarındaki azalmaları destekler niteliktedir.



Şekil 4.41. Na₂SO₄ etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü

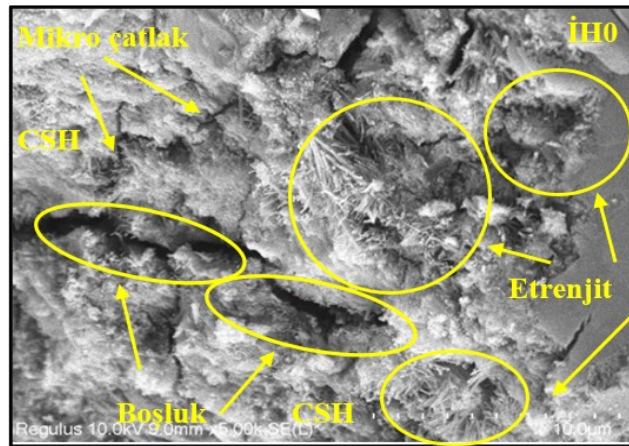
İH0 numunesinin 5000 kat büyütülerek alındığı görüntüde, yoğun etrenjit kristallerinin oluşumu dikkat çekmektedir. CSH yapılarının agrega tanelerini kapladığı görülmektedir. Etrenjit kristallerinin boşluklarda oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu yapılar, harç yapısının bütünlüğünü ve agrega tanelerinin çimento matrisi ile olan aderansını olumsuz yönde etkilemektedir. Numunelerde dayanıklılık sorunlarına neden olmaktadır. Deney sonuçları ile mikro yapı görüntülerinin uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, kontrol numunesi olan İH0'nun FE-SEM görüntüsünde, harç yapısında oluşan hidratasyon ürünlerinden CH (portlandit) yapılarının varlığı da belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.



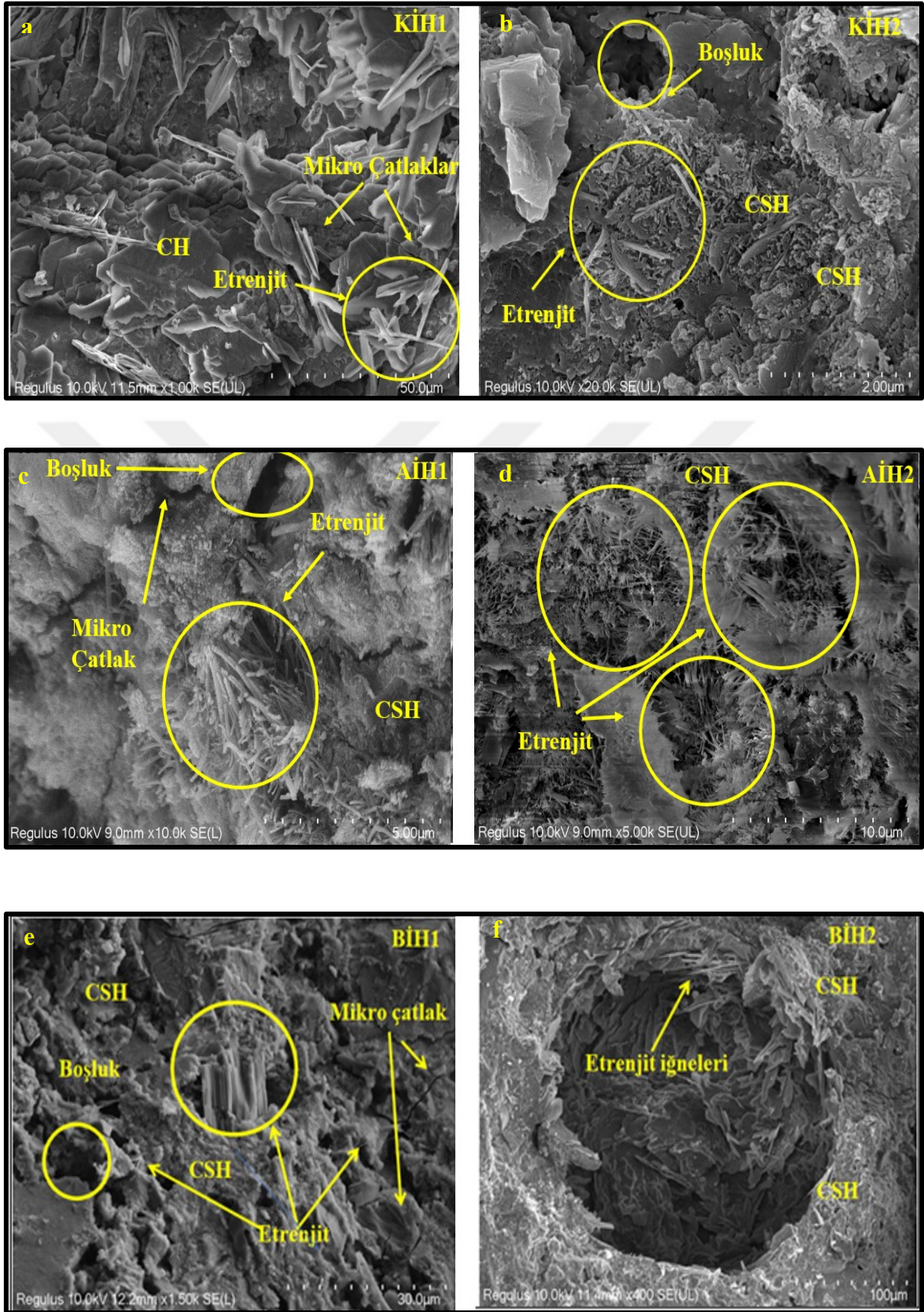
Şekil 4.42. Na_2SO_4 etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri

Şekil 4.42’de %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri verilmektedir. Sırasıyla kalsiyum nitrit (a, b), amino alkol (c, d) ve bor içerikli (e, f) inhibitör kullanılan numunelerin mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. KİH1 (a) numunesi 15000 kat büyütülmüş görüntüsünde bağlayıcı yapının (CSH) arasında oluşan etrenjit kristalleri belirgin bir şekilde görülmektedir. KİH2 (b) 2000 kat büyütülmüş olan görüntüsünde etrenjit kristallerinin daha yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Sülfat etkisi ile oluşan etrenjit kristalleri çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan bağlayıcı CSH yapılarını bozduğu gözlemlenmiştir. Artan sülfat iyonları içeren çözelti etrenjit kristallerinin daha fazla hacimce gelişmesine ve çatlaklara neden olmaktadır. KİH2 (b) numunesinde dayanım kayıplarına neden olmuştur. FE-SEM görüntüleri ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Amino alkol içerikli numunelerin görüntülerinde AİH1 (c) numunesinde 5000 kat büyütülmüş görüntüsünde diğerlerinde olduğu gibi etrenjit kristalleri oluşması ve mikro boşluklar belirlenmiştir. Etrenjit kristallerinin harç yapısındaki boşluklarda yerleştiği ve en yoğun olarak görüldüğü numune olduğu belirlenmiştir. CH ve CSH yapılarının varlığı dikkat çekmektedir. AİH2 (d) numunesinin 2000 kat büyütülmüş görüntüsünde ise oluşan çatlaklar dikkat çekmektedir. BİH1 (e) 5000 kat ve BİH2 (f) 1500 kat büyütülmüştür. İnceleme etrenjit kristallerinin daha yoğun bir şekilde olduğu görülmektedir. Harç yapısının bütünlüğünü ve agrega tanelerinin çimento matrisi ile aderansını bozduğu belirlenmiştir. Şekil 4.43’de de %5 MgSO₄ etkisinde bulunan İH0 numunesi 5000 kat büyütülmüş görüntüsünde mikro çatlaklar, yoğun etrenjit kristalleri ve boşluklar belirlenmiştir. Magnezyum sülfat etkisi ile harç yapısında dayanımı sağlayan CSH yapısı zarar görmüştür. Bozulan bağlayıcı yapıda kılcal mikro çatlaklar ve boşluklar yoğun olarak gözlemlenmiştir.



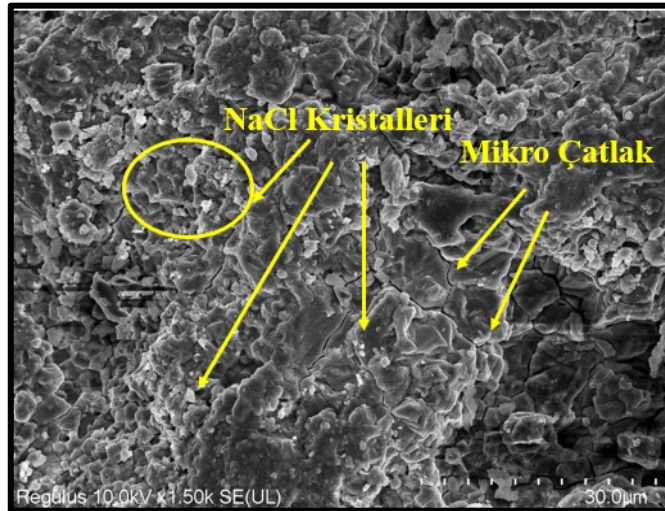
Şekil 4.43. MgSO₄ etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü



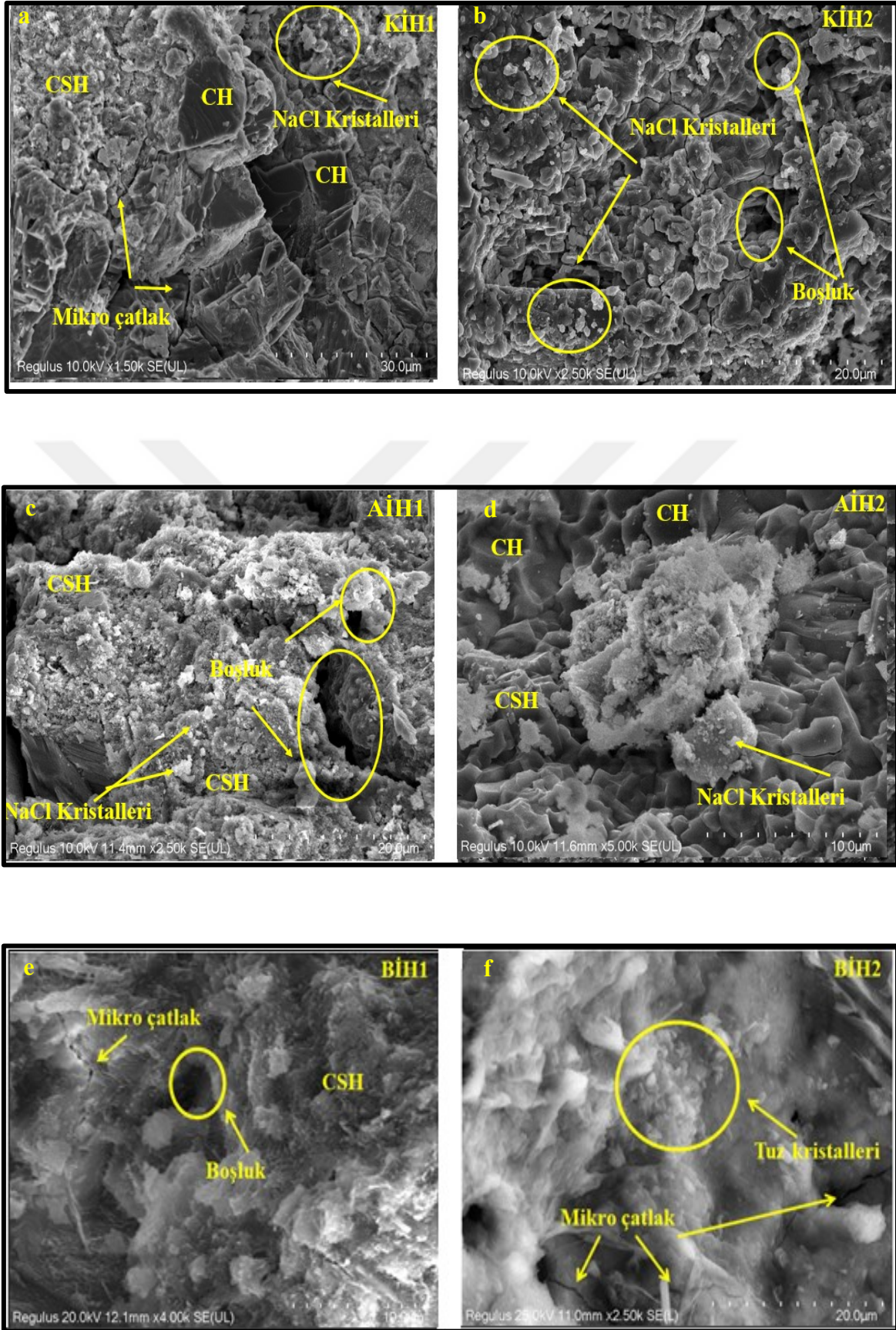
Şekil 4.44. $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri

Şekil 4.44'te $MgSO_4$ etkisinde 180 gün bekleyen numunelerin iç yapı görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde 1000 kat büyütülen KİH1 (a) numunesinde etrenjit kristalleri görülmektedir. Bu kristallerin varlığı, harç yapısındaki minerallerin hidratasyon sürecindeki değişiklikleri ve kimyasal etkileşimleri açısından önem oluşturmaktadır. KİH2 (b) 20000 kat büyütülmüş görüntüsünde bağlayıcı harç yapısının içinde yoğun şekilde oluşan etrenjit kristalleri bulunmaktadır. Amino alkol içerikli 10000 kat büyütülmüş AİH1 (c) görüntüsünde hidratasyon ürünü olan CH (portlandit) oluşumlarının yanı sıra etrenjit kristallerinin büyümesi ile çevresinde gelişen çatlaklar ve devamında boşluklar belirlenmiştir. AİH2 (d) numunesinin 5000 kat büyütülmüş görüntüsünde kalsiyum silika hidrat jellerinin varlığının yanı sıra yapıyı bozan ince etrenjit kristalleri gözlemlenmektedir.

BİH1(f) numunesinin 1500 kat büyütme analiz görüntüsünde çimento matrisinde bulunan CSH jelleri ve büyük boşluklar belirlenmiştir. Görüntüde ayrıca mikro çatlaklar ve boşluklar görülmektedir. BİH2 (g) numunesinin 400 kat büyütülerek alındığı analiz görüntüsünde boşluk içerisinde etrenjit kristalleri gözlemlenmektedir. Şekil 4.45'te NaCl etkisinde 180 gün bekletilmiş İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü bulunmaktadır. Numune iç yapısında mikro boyutta çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca sodyum klorür etkisi ile harç yapısına ulaşan tuz kristallerinin varlığı belirlenmiştir. Tuz kristallerinin boşluklarda olduğu ve CSH bağlayıcı yapının üzerinde gözlemlenmiştir. Karşılaşılan bu durum harç numunesinin basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Kontrol numunesinde (İH0) %5 NaCl etkisinde 180 gün sonunda dayanım kayıpları hesaplanmıştır.



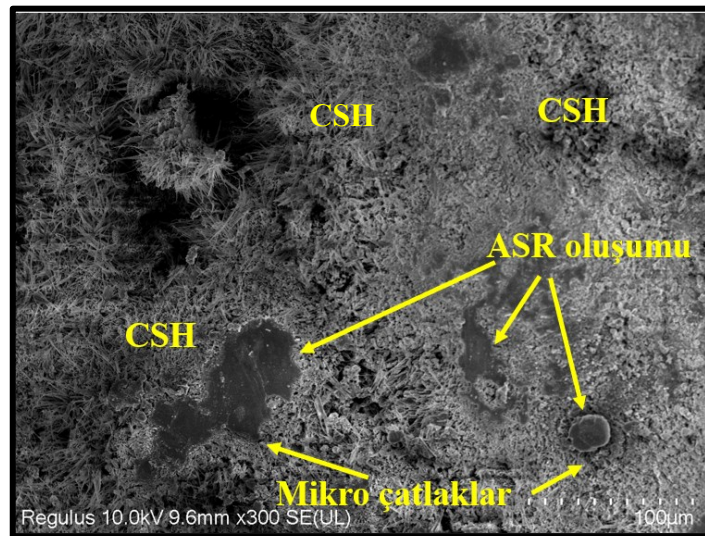
Şekil 4.45. NaCl etkisinde 180 gün bekletilen İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü



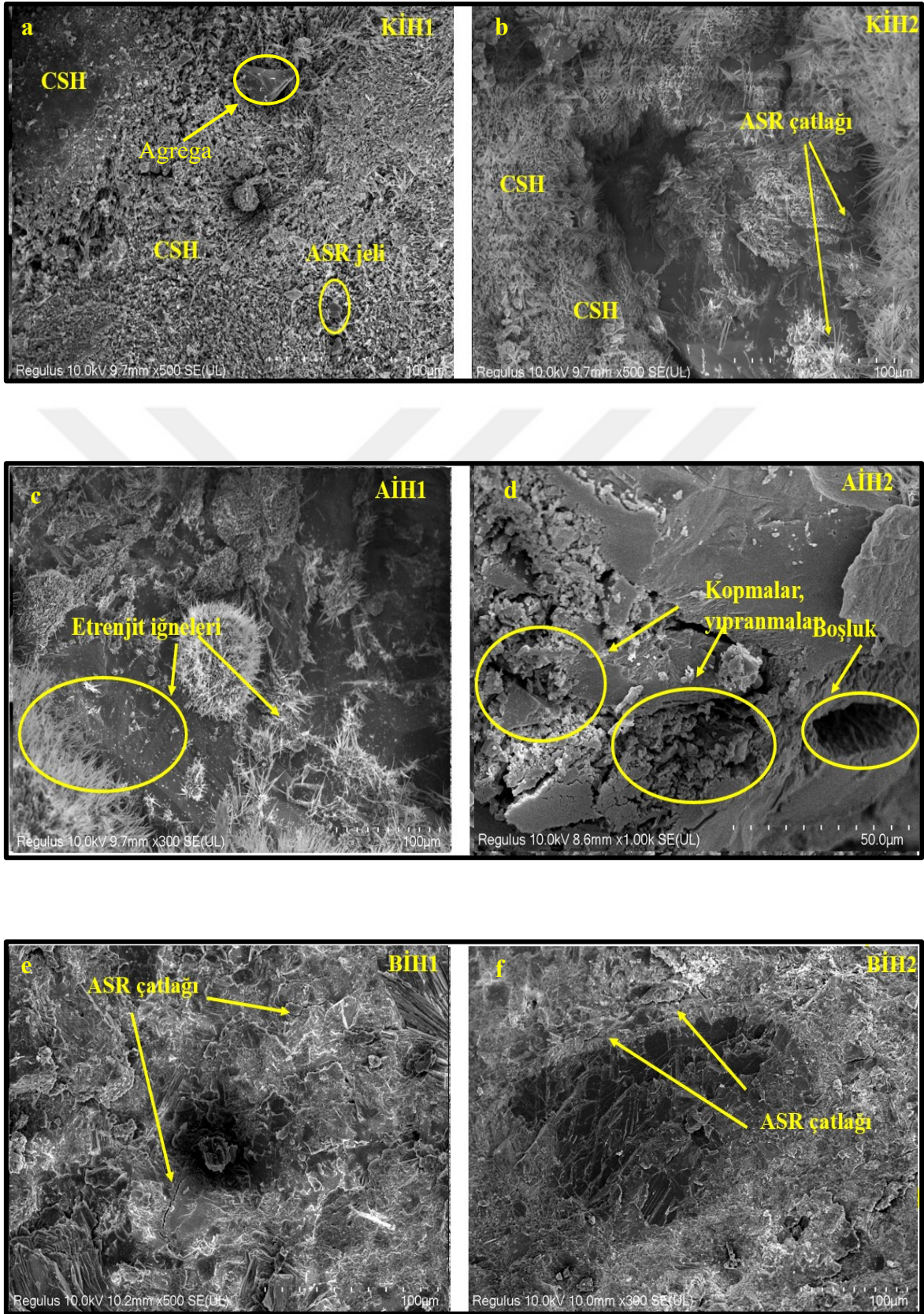
Şekil 4.46. NaCl etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin FE-SEM görüntüleri

Sodyum klorür etkisindeki numunelerin FE-SEM görüntüleri Şekil 4.46'da verilmektedir. Farklı büyütme oranlarının kullanılarak iç yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. KN içerikli numunelerde, KİH1(a) numunesi 1500 kat ve KİH2 (b) 2500 kat büyütülerek inceleme yapılmıştır. İnceleme sonucunda NaCl kristallerine rastlanmıştır. NaCl kristallerinin yanı sıra boşluklu yapılar ve mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Amino alkol içeren numunelerde AİH1'de (c) benzer şekilde NaCl kristallerinin yanı sıra iç yapıda bozulmaların belirlenmesi dikkat çekmektedir. AİH2 (d) numunesine ait 5000 kat büyütülmüş FE-SEM görüntüsünde CSH yapısı üzerinde yoğun şekilde tuz kristalleri belirgin şekilde görülmektedir. Elde edilen bu görüntüler, numunelerin çevresel koşullardan etkilendiğini, etki sonucunda fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğradığını göstermektedir.

BİH1 (f) numunesine ait 4000 kat büyütülmüş görüntüsünde mikro çatlaklar ve boşluklar bulunmaktadır. BİH2 (g) numunesi 2500 kat büyütülerek görüntü alınmıştır. Büyütülen görüntüde inceleme sonucunda tuz kristallerine ve mikro çatlaklar belirlenmiştir. Bu durum, numunelerin dayanıklılığı, stabilitesi ve performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilecek potansiyel riskleri işaret etmektedir. Şekil 4.47'de ASR etkisinde kalan İH0 numunesinin FE-SEM analiz görüntüsü bulunmaktadır. Deney sonucunda numunenin zararsız bölgede yer aldığı bilinmekle beraber FE-SEM analiz görüntüsünde beklenildiği gibi yoğun alkali-silika jellerine rastlanmamıştır. Numuneye ait 300 kat büyütülen görüntüde yoğun miktarda görülen CSH'lar iç yapıda bütünlüğünün bozulmadığı gözlemlenmektedir. Mevcut iç yapı görüntüsü boyca uzama oranı nedenini daha açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4.47. ASR deneyi uygulanan İH0 numunesinin FE-SEM görüntüsü



Şekil 4.48. ASR deneyi uygulanan numunelerin FE-SEM görüntüleri

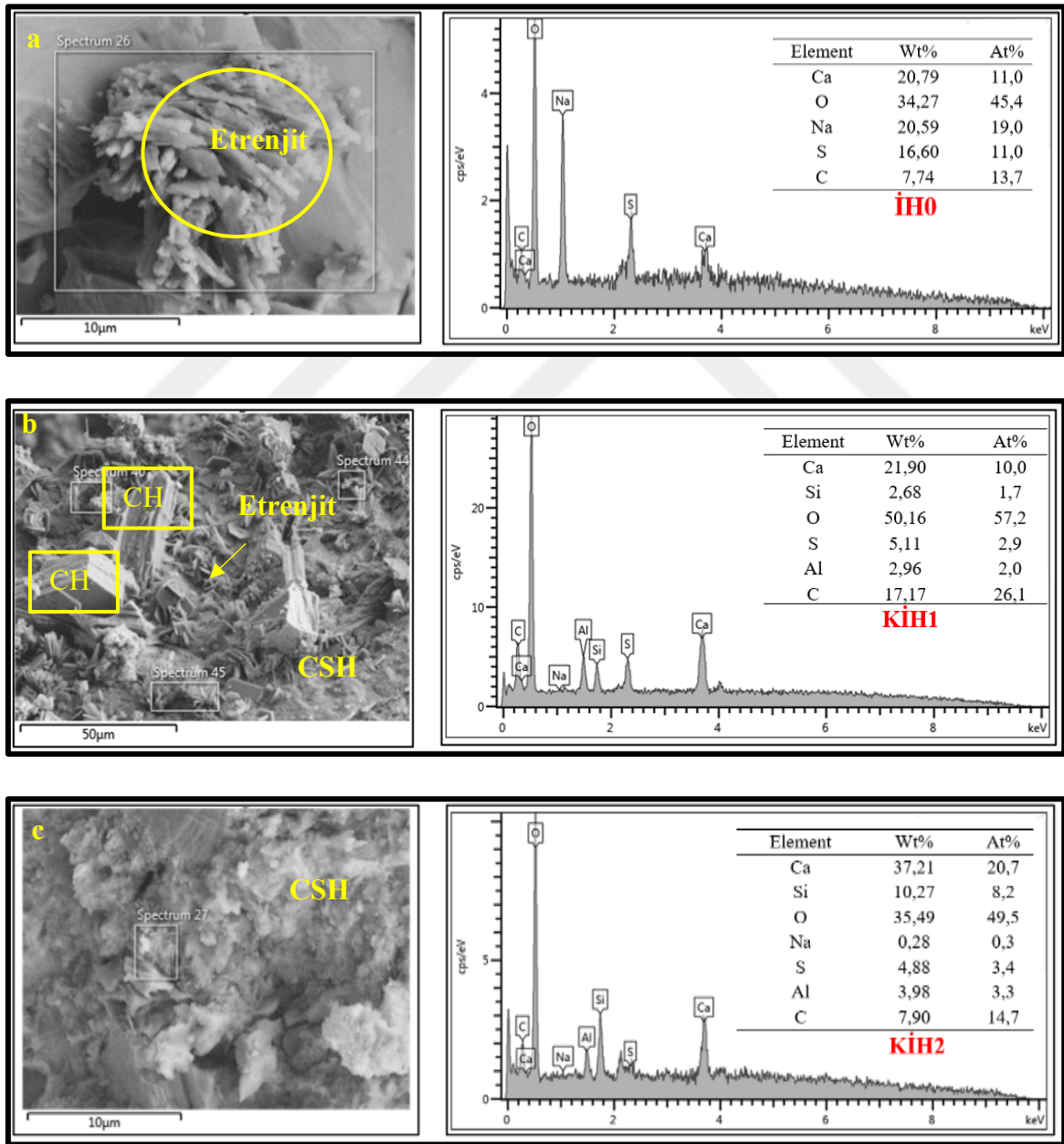
Alkali-silika reaksiyonu sonucu numunelerin FE-SEM mikro yapı görüntüleri Şekil 4.48’de görülmektedir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre, numunelerde boyca (%) uzama değerlerinin standardın zararsız bölge sınırını geçmediği belirlenmiştir. Sırası ile KN, AA ve Bİ içerikli numunelerin 14 günlük etki süresi sonrası iç yapıları incelenmiştir. Şekil 4.48’de KİH1 (a) ve KİH2 (B) numunelerine ait 500 kat büyütülmüş görüntüleri bulunmaktadır. KİH1 (a) numunesinde alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan ASR jelleri görülmektedir. İnhibitör kullanılan numuneler içerisinde en yüksek boyca uzamanın geliştiği KİH1 olarak belirlenmiştir. KİH2 (b) numunesinde yoğun olarak CSH yapıları bulunmaktadır. Ayrıca kılcal ASR çatlakları görülmektedir. Bu durum, numunelerin yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve hasarın kabul edilebilir seviyelerde kaldığını belirtmektedir.

Amino alkol içerikli inhibitör kullanılan AİH1 (d) numunesi 300 kat büyütülerek görüntü alınmıştır. Alınan görüntüde etrenjit iğneleri belirlenmiştir. CSH yapısının bozulmadığı görülmektedir. AİH2 (e) numunesi 1000 kat büyütüldüğü FE-SEM görüntüsünde ASR jel yapıları görülmemektedir fakat ASR çatlakları, iç yapı bozulmaları, kopmalar dikkat çekilmektedir. AİH2 numunesinde görüntü büyüklüğünün daha fazla olması nedeniyle kopma ve boşlukların daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu durum, numunenin ASR etkisi ve yapısal bütünlüğünün etkilendiğini göstermektedir. Bor içerikli inhibitör kullanılan BİH1 (f) numunesi 500 kat büyütülmüş görüntüsünde mikro yapıda ASR çatlaklar bulunmaktadır. Benzer şekilde BİH2 (g) numunesinde ASR çatlakları gözlemlenmektedir. BİH2 (g) numunesine ait 300 kat büyütülmüş görüntüsü alınmıştır.

Bu çatlaklar, alkali-silika reaksiyonu sonucunda numunelerin iç yapısında zararlı etkilerin oluştuğuna işaret etmektedir Özellikle BİH2’de daha küçük bir büyütme yapıldığı halde çatlakların belirginliği alkali silika reaksiyonu sonucu numuneye etkisinin fazla olduğunu belirtmektedir. Bu sonuçlar, farklı inhibitör kullanılan çimentolu harç numunelerinde alkali-silika reaksiyonunun mikro yapı incelenmesi düzeyinde nasıl etkiler yarattığını anlamak için önemli bir bilgi sağlamaktadır. İnhibitör çeşidinin ve miktarının ASR açısından önemini inceleme konusunda yardımcı olmaktadır. Ayrıca, numunelerin farklı büyütme seviyelerinde incelenmesi, alkali silika reaksiyonu etkilerinin daha detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Alınan FE-SEM analiz görüntüleri sonuçları kanıtlar nitelikte olmuştur. Ayrıca, FE-SEM mikro yapı görüntüleri, deney sonuçlarını doğrulayarak, numunelerin iç yapısındaki değişiklikleri açıkça göstermektedir.

4.4.2 EDS sonuçları

Numunelerin FE-SEM analizleri ve EDS analizleri incelenmiştir. Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de %5 Na₂SO₄ etkisindeki numunelerin ağırlık ve atom (%) oranları görülmektedir. Numunelerde Ca, Si, O varlığı CSH jeli oluşumu ve ile bağlayıcı yapının oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca hidrate faz olan portlandit yapıları da görülmektedir. Agresif ortam etkisi ile Na ve S'nin yapıyı etkilediği anlaşılmaktadır. EDS değerlerinin alındığı görüntülerde sodyum sülfat etkisi ile oluşan etrenjit kristallerinin olduğu görülmektedir.

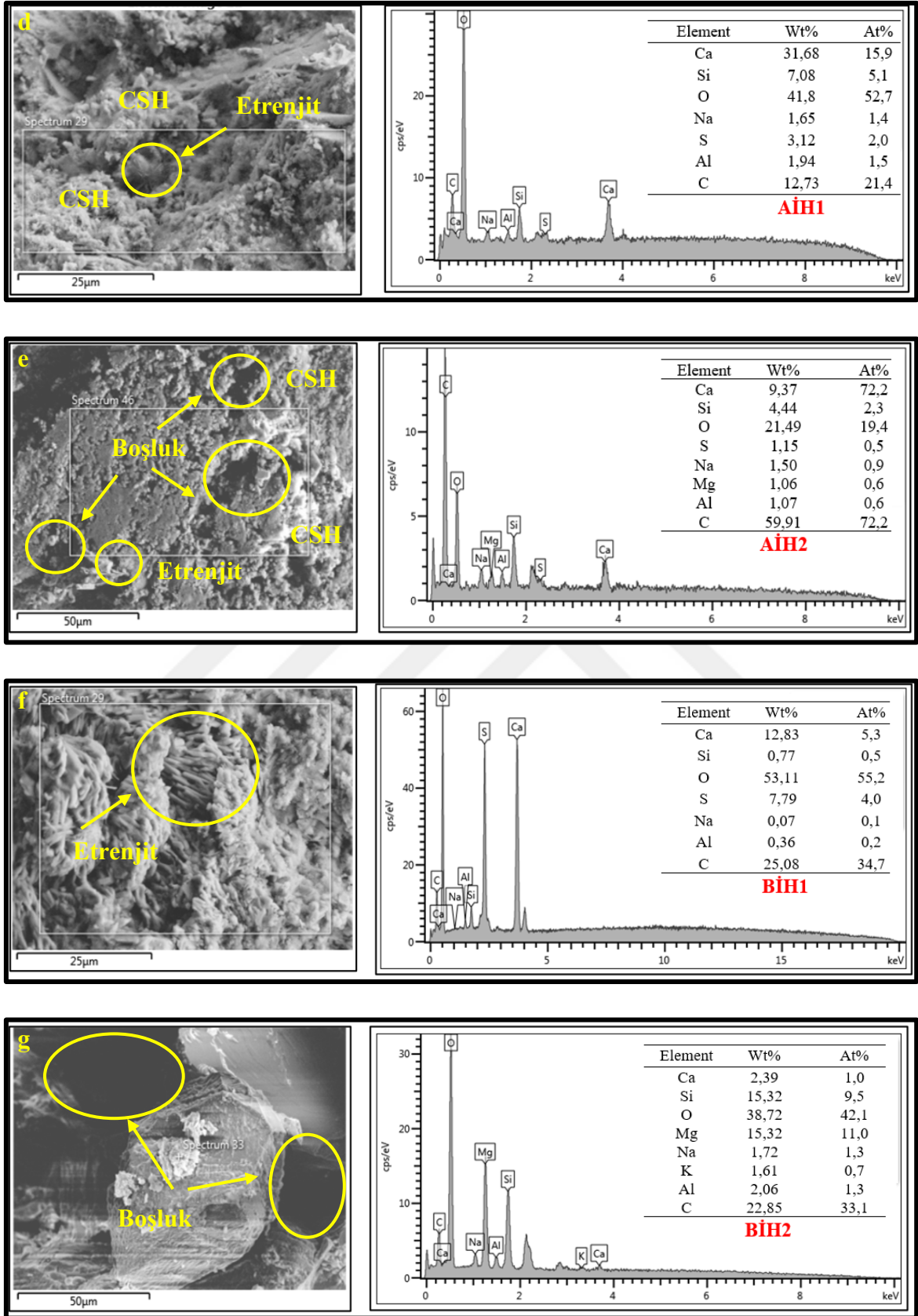


Şekil 4.49. Na₂SO₄ etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri

Şekil 4.49’da inhibitör kullanılmayan kontrol numunesinden İH0 (a) FE-SEM analizi kesitinden alınan EDS analiz ve görüntüsü bulunmaktadır. Sülfat etkisinin yoğun olarak görüldüğü numunede etrenjit kristalleri görülmektedir. EDS değerleri incelendiğinde sülfat etkisi nedeniyle yoğun Na, S ve O pikleri oluşmuştur. Ağırlıkça Na miktarının %20,59 olması sülfat etkisinin sonucu olduğunu göstermektedir. KİH1 (b) numunesine ait görüntüde CSH, CH oluşumlarının arasında etrenjit kristalleri bulunmaktadır. Bu yapıların varlığı Ca, Si ve O piklerini oluşturmaktadır. KİH2 (c) numunesinde EDS analiz sonuçlarında ağırlıkça Ca, Si, O, Na, S, Al ve C atomları belirlenmiştir. Numunenin görüntü alındığı kesitte CSH yapıları dikkat çekmektedir. Bu nedenle ağırlıkça atomsal yüzde oranları Ca (%37,21), Si (%10,27) ve O (%35,49) olmakla birlikte oluşan pikler belirgin şekilde gözlemlenmektedir.

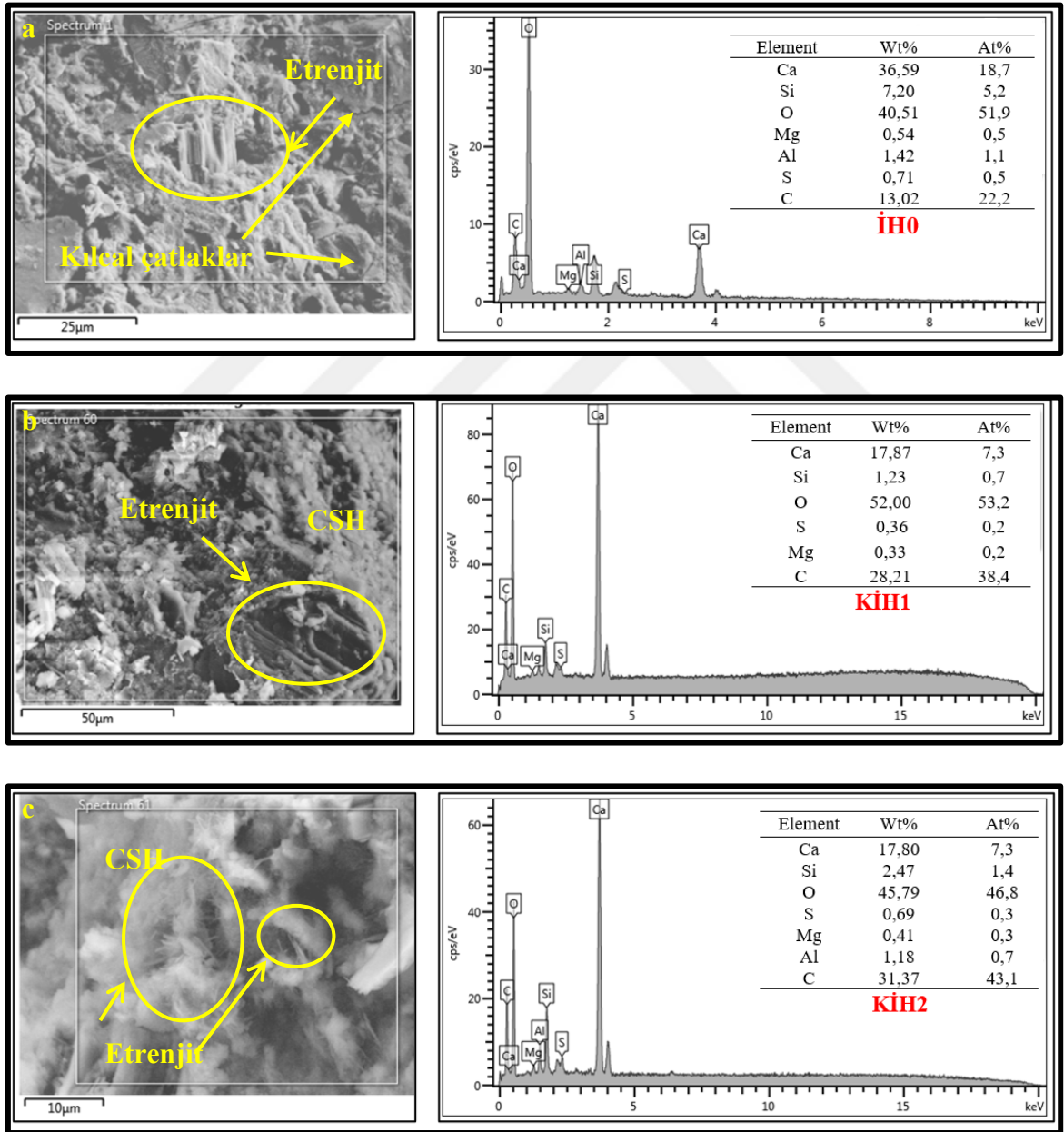
Şekil 4.50’de Na₂SO₄ etkisindeki amino alkol ve bor içerikli inhibitör kullanılan numunelerin EDS analiz görüntüleri bulunmaktadır. Amino alkol içerikli inhibitörün %1 oranında kullanıldığı AİH1(d) numunesine ait FE-SEM görüntü kesitinde CSH jelleri, etrenjit iğneleri bulunmaktadır. Ağırlıkça Ca, Si, O, Na, S, Al ve C atomlarına ait pikler görülmektedir. Na, S ve O atomları sülfat etkisi sonucu bulunmaktadır. AİH2 (e) numunesine ait EDS analiz ve görüntüleri bulunmaktadır. Mikro yapı görüntüsünde CSH yapılarının arasında oluşan boşluklar ve boşlukların içerisinde oluşan etrenjit iğneleri gözlemlenmektedir. Mikro yapı görüntü kesitinden elde edilen atomsal ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si ve O oranlarının (%) AİH1 (d) numunesinden daha az olduğu belirlenmiştir ve bağlayıcı yapının sülfat etkisi ile daha fazla bozulduğunu göstermektedir.

Bor inhibitörünün kullanıldığı numunelere ait FE-SEM görüntü ve EDS analizleri BİH1 (f) ve BİH2 (g) olarak verilmektedir. BİH1 (f) numunesine ait görüntüde yoğun olarak etrenjit kristallerinin varlığı görülmektedir. CSH yapılarının arasında oluşan boşluklar görülen etrenjit kristalleri, numunenin dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Atomal ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si, O, Na, S, Al ve C atomları bulunmaktadır. Ca, Si ve O pikleri belirgin bir şekilde görülmektedir. BİH2 (g) numunesine ait mikro yapı görüntüsü incelendiğinde boşluklar gözlemlenmektedir. Alınan kesitin EDS sonuçlarında ise Ca, Si, O, Mg, Na, K, Al ve C atomlarına ait pikler belirlenmiştir. Ağırlıkça silis miktarının %15,32 olması kesitin alındığı bu mikro yapı görüntüsünde CSH jel oluşumunun varlığını göstermektedir. Görüntü üzerinden alınan kesitin yeri önemli olmakla birlikte harc numunenin farklı bölgelerindeki atomsal yoğunlukları ve dağılımları değişebilmektedir.



Şekil 4.50. Na₂SO₄ etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri

Magnezyum sülfat etkisinde 180 gün bekletilen numunelerin EDS analiz sonuçları Şekil 4.51 ve 4.52’de verilmektedir. EDS sonuçlarına göre harçların birincil elementlerinin Ca ve O olduğu görülmektedir. Bu durum kalker özellikli kullanılan 0-4 mm ince agrega kullanımının etkisi olduğu düşünülmektedir. Agresif ortam olan %5 $MgSO_4$ etkisi ile analizlerde Mg ve S elementleri görülmektedir. EDS analizinin yapıldığı görüntülerde bağlayıcı yapının arasında oluşmuş olan etrenjit kristallerinin Bİ içerikli numunelerde daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Bu durum yapılan deney sonuçları ile paralellik göstermiştir.

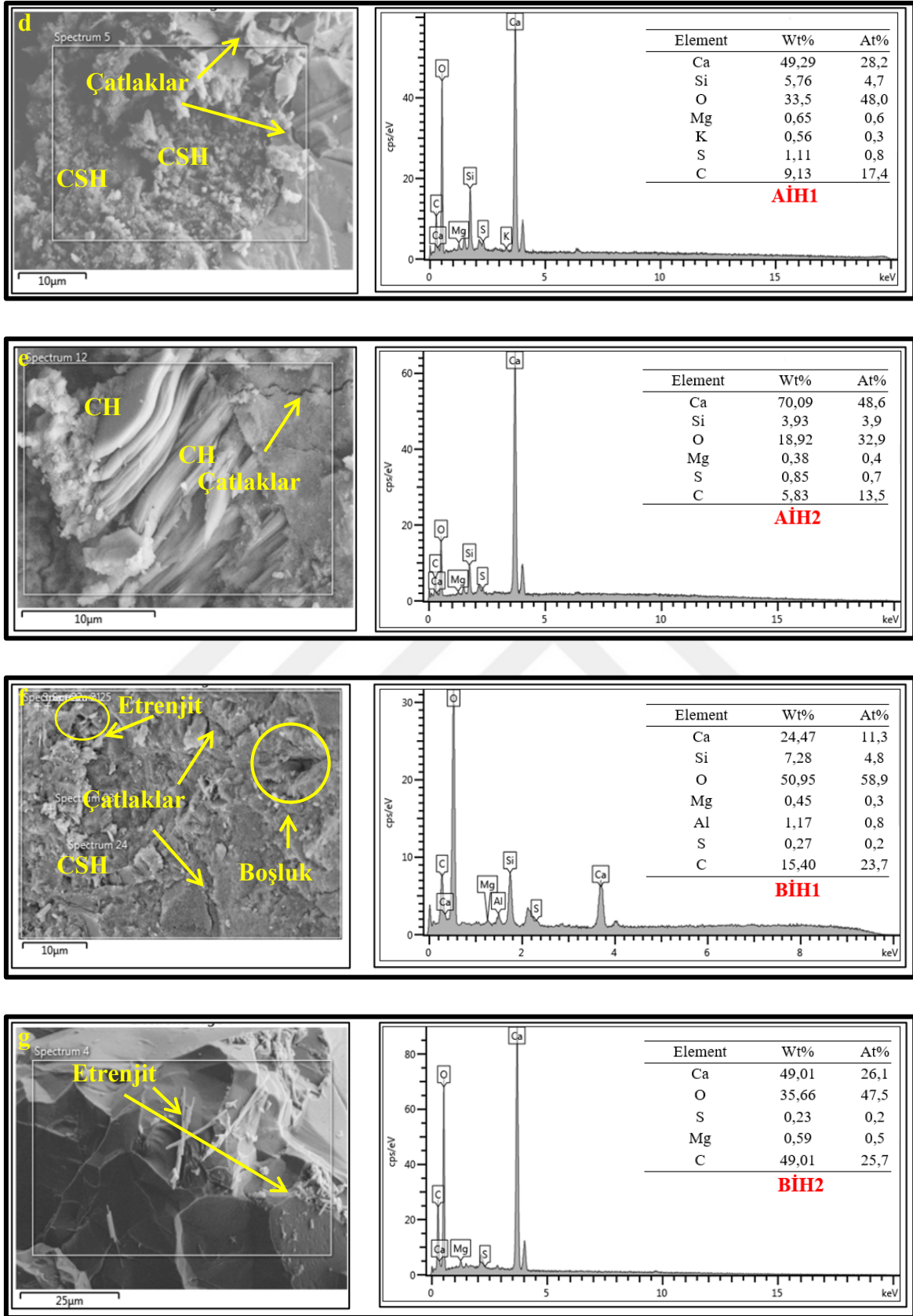


Şekil 4.51. $MgSO_4$ etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri

Şekil 4.51 $MgSO_4$ etkisindeki İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri verilmektedir. Kontrol numunesi İH0 (a) numunesine ait FE-SEM analizi sonucu elde edilen mikro yapı görüntüsü ve görüntünün EDS analiz sonucu görülmektedir. Mikroyapı görüntüsünde etrenjit kristalleri ve kılcal çatlaklar bulunmaktadır. Harç yapısında oluşan boşluğun içinde oluştuğu görülmektedir. EDS analizinde Ca, Si, O, Mg, Al, S ve C atomlarına ait pikler elde edilmiştir. En yüksek pikler Ca, Si ve O atomsal ağırlıklarda görülmektedir. Ayrıca magnezyum sülfat etkisi nedeniyle Mg ve S atomları bulunmaktadır. Kalsiyum nitrit içerikli inhibitör içeren KİH1 (b) numunesinin mikro yapı görüntüsünde sülfat iyonlarının etkisi ile oluşan etrenjit kristalleri bulunmaktadır. EDS analizinde Ca atomunun ağırlıkça fazla olması, CSH jellerinden ve kalker içerikli agregadan gelmektedir.

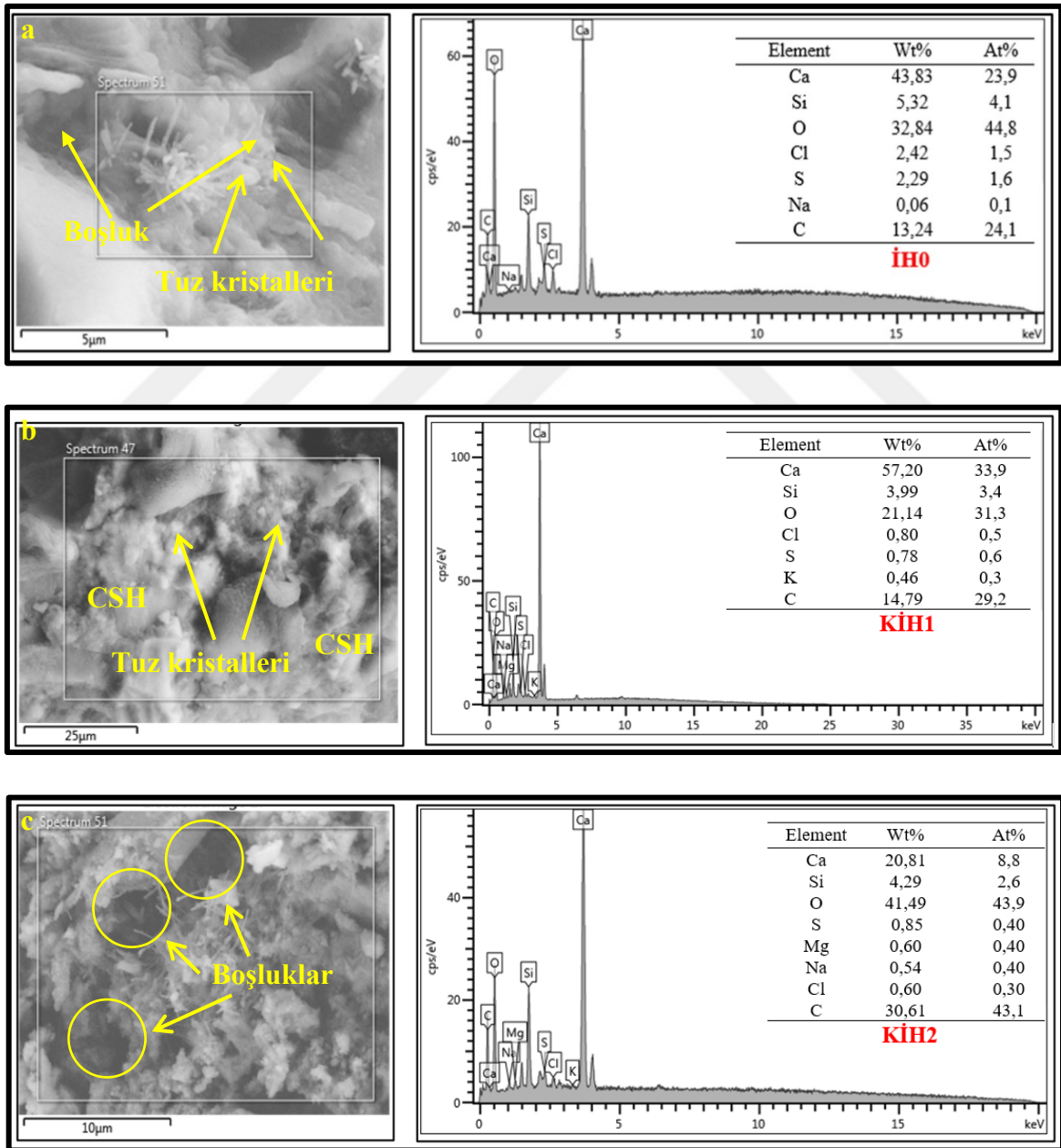
KİH2 (c) numunesinin EDS analiz sonucunda atomsal ağırlıklara bakıldığında Ca, Si, O, S, Mg, Al ve C pikleri elde edilmiştir. Şekil 4.52 $MgSO_4$ etkisindeki amino alkol ve bor içerikli numunelerin EDS analizleri verilmektedir. Amino alkol inhibitörlü AİH1 (d) numunesinde FE-SEM görüntüsünde çatlaklar dikkat çekmektedir. Görülen bu yapısal kusurlar, numunenin dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Eğilme ve basınç dayanımı kayıplarına neden olmaktadır. Görüntüye ait EDS analizinde $MgSO_4$ etkisinden gelen Mg ve S elementleri bulunmaktadır. AİH2 (e) numunesinde yoğun olarak CH yapıları dikkat çekmektedir. Çimento hidrasyon reaksiyonlarında portlandit (CH), hidratlı kalsiyum silikat (C-S-H) jel oluşumunun bir yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. EDS analiz sonucunda Ca oranının %70,09 olduğu görülmektedir. Oluşan Ca ve O piklerinin FE-SEM analizinde görülen portlandit ($Ca(OH)_2$) yapılarından geldiği düşünülmektedir.

Bor inhibitörünün %1 oranında kullanıldığı BİH1(f) numunesine ait mikro yapı görüntüsünde yoğun olarak çatlaklar ve boşluklar gözlemlenirken, etrenjit yapısı ise küçük bir alanda görülmektedir. FE-SEM görüntüsüne ait alınan EDS analizinde Ca, Si, O, Mg, Al, S ve C pikleri bulunmaktadır. Sülfat etkisi ve etki sonrası oluşan yapılardan dolayı; Mg, S, O ve Al elementleri bulunmaktadır. Ca, Si ve O piklerinin daha belirgin olması, hidrasyon sonucu numunenin dayanım kazanmasını sağlayan CSH jelleri nedeniyle olmaktadır. BİH2 (g) numunesinde agrega yüzeyi üzerinde oluşan etrenjit kristalleri belirlenmiştir. Agregada ve çimento matrisi arasında oluşarak numunenin dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. EDS analiz Ca, O, S, Mg ve C pikleri bulunmaktadır. Yapılan analiz sonucunda dikkat çeken pikler özellikle Ca, O ve C elementlerinde atomsal ağırlıkların yoğun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.52. MgSO_4 etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri

Sodyum klorür etkisinde numunelerin EDS sonuçları Şekil 4.53 ve 4.54’de gösterilmektedir. EDS analizinin yapıldığı harçlarda Ca, C, O ve Si elementleri öne çıkmaktadır. Oluşan yapılar Na ve Cl elementleri de etki ettiği analiz sonuçlarından görülmektedir. EDS görüntüleri incelendiğinde 180 gün sonunda dayanım almaya devam eden AA içerikli numunelerinin yapılarında tuz kristallerinin bulunduğu fakat bağlayıcı yapıda boşluk, çatlak gibi kusurların az olduğu belirlenmektedir. Ayrıca Al elementi hidrasyon ürünlerinden olan C-A-H yapısının varlığını göstermektedir. Bİ içerikli numunelerde öne çıkan elementler aynı olmakla birlikte yapılarda bozulmalar görülmüştür.

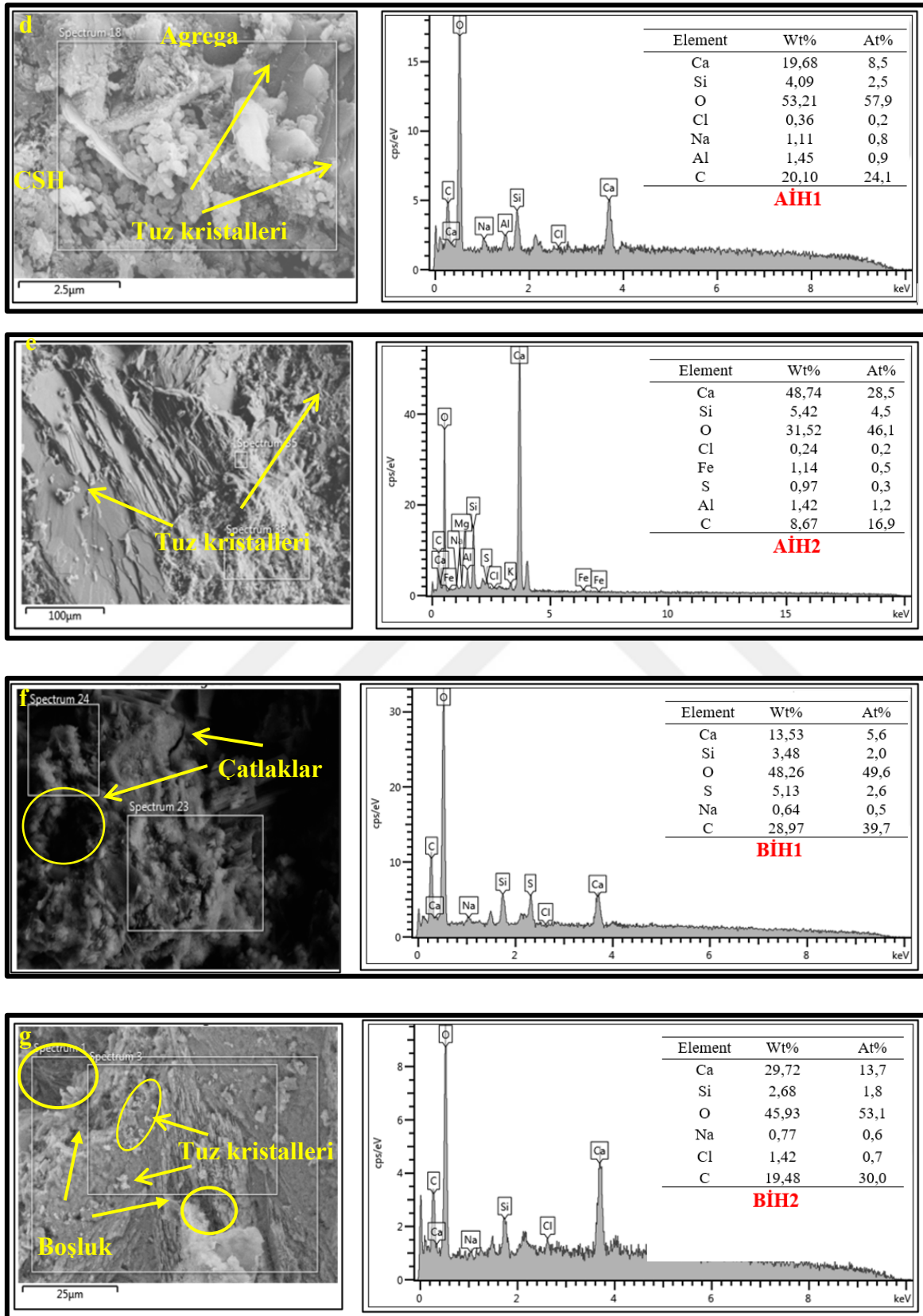


Şekil 4.53. NaCl etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri

Şekil 4.53'te NaCl etkisindeki inhibitörsüz ve kalsiyum nitrit içerikli numunelerin EDS analizleri görülmektedir. İH0 (a) numunesine ait mikroyapı incelemesinde çok belirgin olmayan tuz kristalleri görülmektedir. Ayrıca yapıda oluşan boşluklar bulunmaktadır. Atomsal ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si, O, Cl, S, Na ve C pikleri gözlemlenmiştir. Agresif ortamdan etkilenen numunede Na ve Cl elementleri görülmektedir. KİH1 (b) numunesine ait FE-SEM analiz görüntüsünde yoğun CSH yapıları gözlemlenmektedir. Yapı içerisindeki boşluklarda tuz kristallerinin varlığı belirlenmiştir. EDS analizine bakıldığında Ca, Si, O, Cl, S, K ve C pikleri gözlemlenmiştir. Şekil 4.53'te KİH2 (c) numunesinin incelemesinde, boşluklar ve boşlukların içinde oluşmuş etrenjit iğneleri dikkat çekmektedir. CSH yapısının varlığı ve kullanılan kalsiyum nitrit içerikli inhibitör nedeniyle Ca piki yüksek görülmüştür.

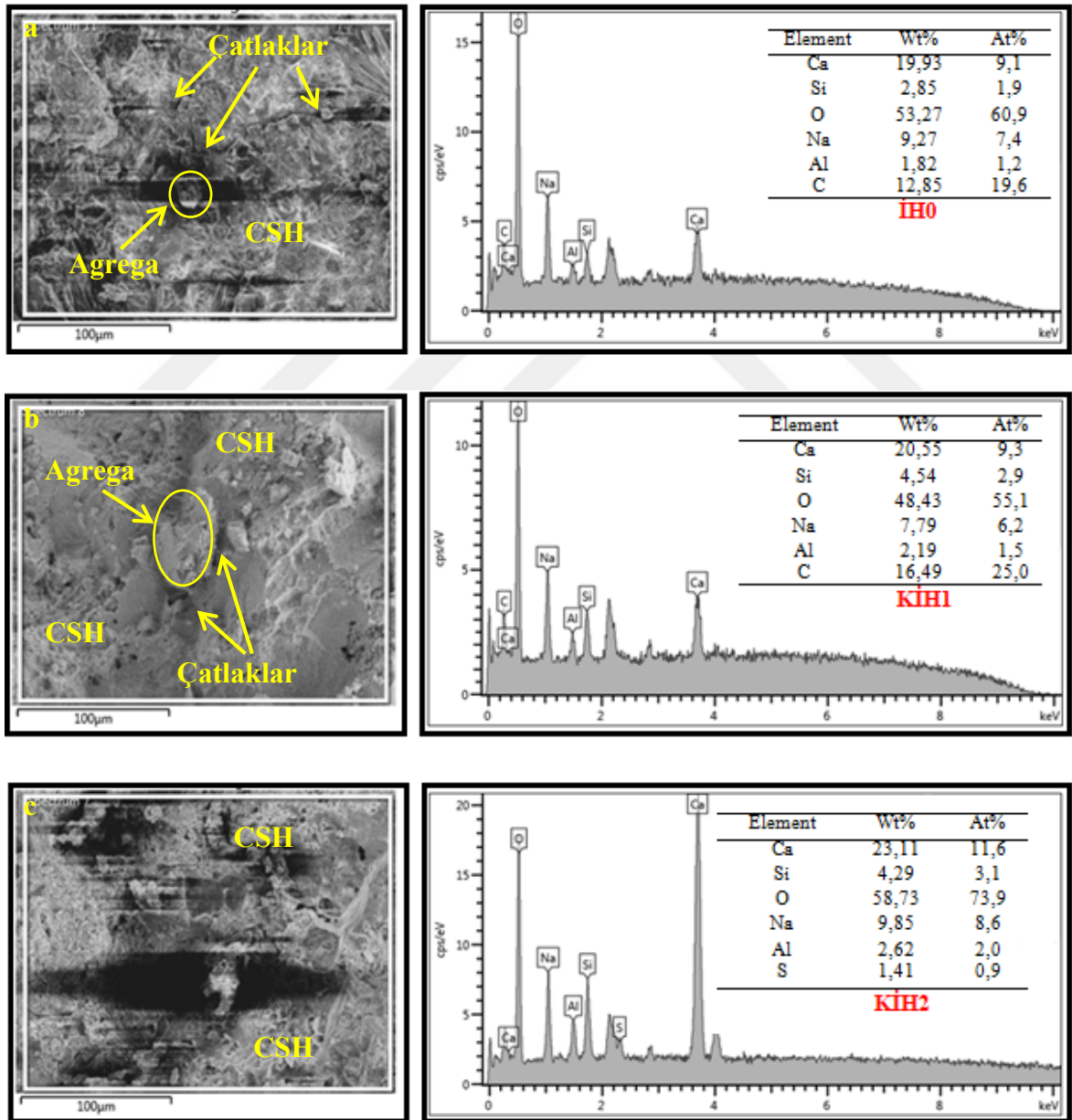
Şekil 4.54'de NaCl etkisindeki amino alkol ve bor inhibitörü içerikli numunelerin EDS analizleri verilmiştir. AİH1 (d) numunesinde bağlayıcı yapının boşluklarla bozulduğu ve aralarda tuz kristallerinin varlığı dikkat çekmektedir. Harç üretiminde kullanılan 0-4 mm ince agregada FE-SEM kesitinde görüntülenmiştir. Atomsal ağırlıkların Ca, Si, O, Cl, Na, Al ve C elementleri bulunmuştur. AİH2 (f) numunesinin analiz görüntüsünde genel olarak bağlayıcı yapının bozulmadığı görülmektedir. İç yapıda agresif ortam nedeniyle ulaşan tuz kristallerinin varlığı gözlemlenmektedir. NaCl etkisinde AA içerikli numunelerin dayanımlarının yüksek çıktığı sonucu ile ilişki kurmak gerekirse, klorür iyonlarının yapıya ulaştığı ancak bozulma yaratacak seviyede henüz olmadığı düşünülmektedir. Atomsal ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si ve O ağırlıkları İH0 numunesine göre fazla görülmektedir.

Çimento hamurunun NaCl'ye maruz kalması sonucunda, silikat açısından zengin CSH (kalsiyum silikat hidrat) fazlarının öncelikli olarak çözündüğü belirtilmektedir (Shi vd., 2011). AA numunelerinin İH0 (a)'ya göre bağlayıcı yapının NaCl etkisinde bozulmadığı şeklinde düşündürmektedir. Bor inhibitörü kullanılan BİH1 (f) numunesinde iç yapının bozulduğunu yoğun boşlukların ve çatlakların olduğu görülmektedir. Atomsal ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si, O, S, Na ve C pikleri belirgin olmaktadır. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında Ca, Si değerlerinin (%) daha az olduğu ve bağlayıcı yapının daha fazla bozulduğu belirlenmektedir. Numunelerin 180 günlük basınç dayanımı sonuçlarında da İH0 (a) ile karşılaştırıldığında %1,90 oranında daha az dayanım sonucu alınmıştır. BİH2 (g) numunesinin mikro yapı analiz sonucuna bakıldığında yapının bozulduğu boşlukların oluşmuştur. Tuz kristalleri nedeniyle Cl atom ağırlık değeri BİH1(f)'den yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.54. NaCl etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri

Alkali-silika reaksiyonu sonucu numunelerin EDS sonuçları Şekil 4.55 ve 4.56'da gösterilmektedir. ASR etkisinin az olması sonucu öne çıkan elementler; Ca, Si, C, O olarak sıralanmaktadır. FE-SEM analiz görüntülerinde olduğu gibi kesit alınan EDS analiz görüntülerinde de alkali-silika jellerine yoğun bir şekilde rastlanmamaktadır. Deney sonuçlarında olduğu gibi Analiz görüntülerinde İH0 numunesinde bozulmalar görülmektedir. Bunun nedeni reaksiyon sonucunda İH0 numunesinde diğerlerine göre boyca uzama görülmüş olmaktadır. İnhibitör kullanılan numunelerde alkali-silika reaksiyonu etkisi ile KİH1(b)'de boyca uzama oranı diğer inhibitörlü serilere göre daha fazla görülmüştür.

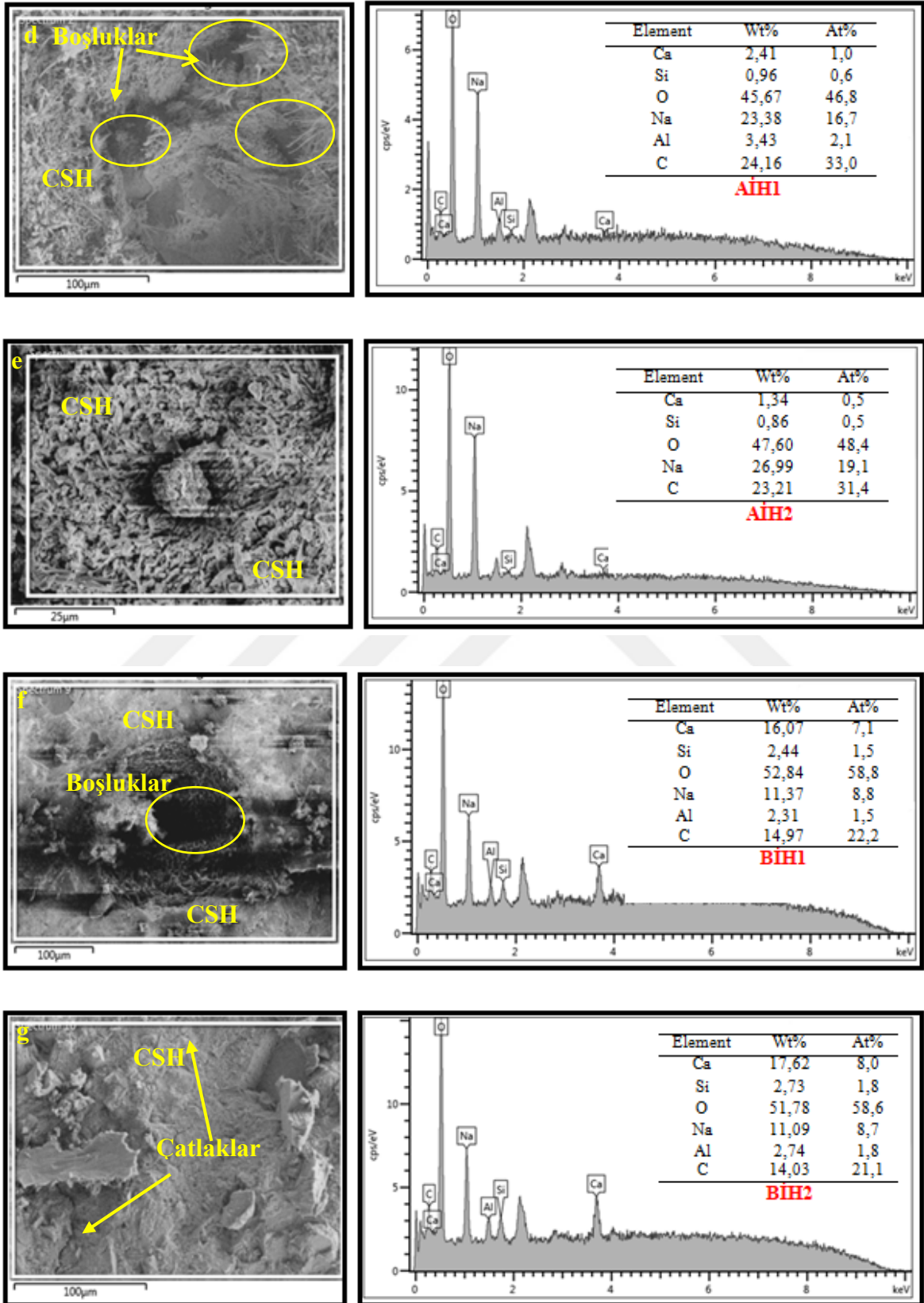


Şekil 4.55. ASR etkisinde İH0 ve KN içerikli numunelerin EDS analizleri

Şekil 4.55’te alkali silika reaksiyonu etkisinde kontrol numunesi (İH0) ve kalsiyum nitrit (KN) içerikli numunelerin EDS analiz sonuçları görülmektedir. Şekilde İH0 (a) FE-SEM görüntüsünde oluşan çatlaklar dikkat çekmektedir. ASR sonucunda oluşan boyca uzama ve çatlaklar numunenin etkilendiğini göstermektedir. ASR etkisi sonucu oluşan ürünler; alkali silika jelleri ve kristaller olarak iki farklı şekilde belirtilmektedir. ASR jelleri yoğun bir görüntü oluştururken, kristal yapı ise iğnemi, tabakalı ve yaprak gibi görülebilmektedir (Ramyar, 2013). Atom ağırlıkları incelendiğinde Ca, Si, O, Na, Al ve C pikleri görülmektedir. KİH1 (b) numune görüntüsünde mikro boyutta ASR çatlakları gözlemlenmektedir. İH0 numunesine göre çatlakların daha az olduğu belirlenmiştir. Atom ağırlıklarına bakıldığında Ca piki belirgin olduğu ayrıca Si, Na ve Al varlığı belirlenmiştir.

KİH2 (c) numunesinde agrega taneleri ve CSH yapılarının arasında mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan ASR ürünlerinin karakterizasyonu, literatür çalışmalarda belirtildiği gibi, temel olarak silisyum ve düşük alkali içerikten oluştuğunu ve kalsiyumun da bulunduğu belirtilmektedir (Shi vd., 2015). Genel olarak bakıldığında numunelerin EDS analizi incelendiğinde yoğun Si değeri görülmemiştir. Bu durum ASR etkisinin fazla olmadığını göstermektedir. Kullanılan agrega inhibitör etkisinin incelenmesi amacıyla silis oranı düşük tercih edilmiştir. Şekil 4.56 ASR etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analiz sonuçları gösterilmektedir. AİH1 (d) numunesinin mikro yapı görüntüsünde CSH yapısı ve yapının aralarda oluşan boşluklar bulunmaktadır. Analiz sonunda bulunan atom değerlerinde ise Ca, Si, O, Na, Al ve C pikleri gözlemlenmektedir.

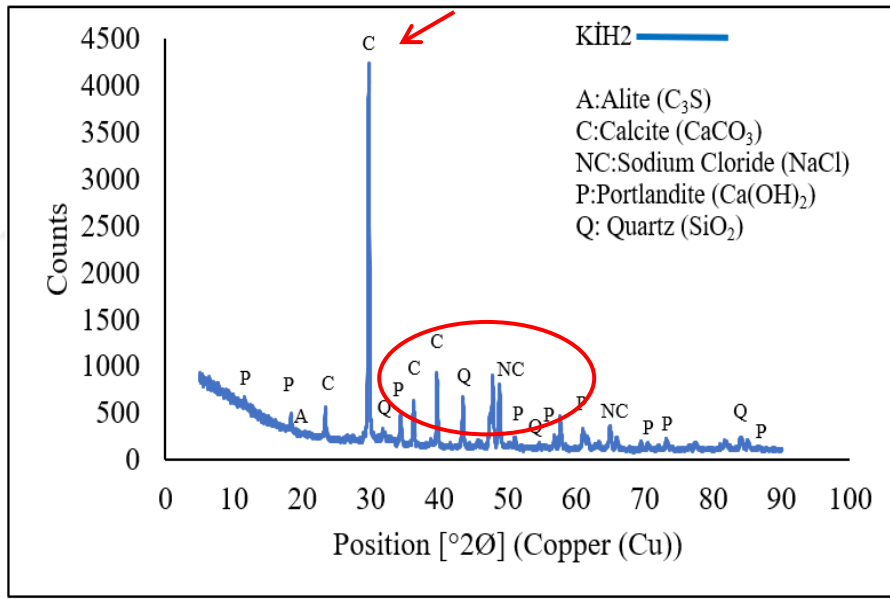
AİH2 (e)’de ASR etkisi ile İH0 (a) numunesinde belirli olan ASR etkileri görülmemektedir. FE-SEM görüntüsünde de ASR jelleri ve çatlakları görülmemekle birlikte CSH yapıları dikkat çekmektedir. Bor içerikli inhibitörün kullanıldığı numunelerden BİH1 (f)’de boşluklu yapı dikkat çekmektedir. BİH2 (g) numunesine ait görüntü ve görüntü kesitinin EDS analiz sonuçları görülmektedir. FE-SEM görüntülerinde mikro çatlaklar bulunmaktadır. Atom ağırlıklarına (%) bakıldığında Ca, O ve Na pikleri görülmektedir. Alkali silika reaksiyonu ürünleri FE-SEM görüntüsünde bulunmamaktadır. Elde edilen görüntü ve EDS analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında uyumlu oldukları gözlemlenmektedir. Numunelerin ASTM C1260’a göre “zararsız” bölgede olduğu belirlenmiştir. Numunelerin deney sonunda yüzey görüntülerinde de hasarlar gözlemlenmemiştir. İç yapı analizinde yoğun ASR jelleri ve çatlakları gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.56. ASR etkisinde AA ve Bİ içerikli numunelerin EDS analizleri

4.4.3 X-ışının difraktometresi (XRD) sonuçları

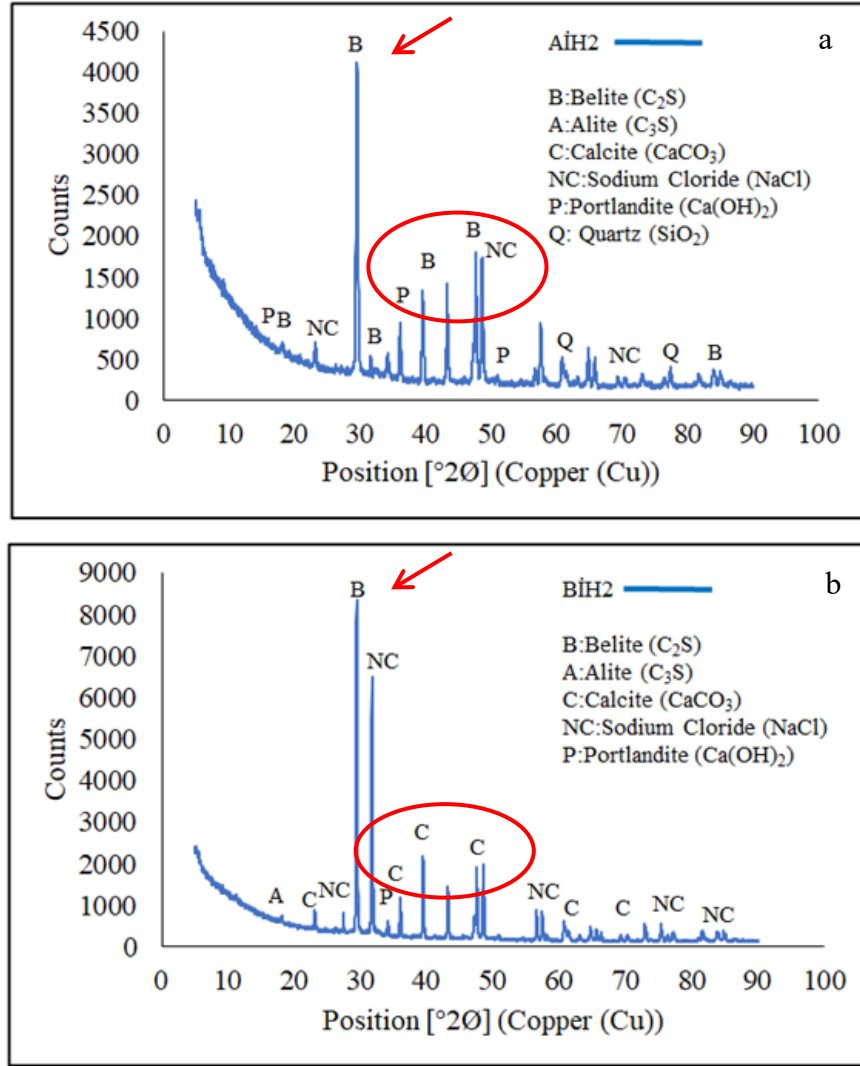
XRD analizleri 180 gün farklı agresif ortam koşullarında bekletilen ve ASR deneyi uygulanan numuneler için yapılmıştır. Agresif ortam koşulları sonucu dayanım değerleri düşük olan numuneler incelenmiştir. XRD cihazında 2θ kırılma açısı $5^\circ - 90^\circ$ arasında olacak şekilde analizler yapılmıştır. Grafik üzerindeki veriler analiz edilerek pik noktalarına göre numunelerin mineralojik yapıları belirlenmiştir. Hidratasyon sonucu oluşan ürünlerin agresif ortam koşullarından etkilenmeleri ile bağlayıcı yapının son durumu değerlendirilmiştir. Hidratasyonunu tamamlayan harçlar, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum hidroksit (CH veya Ca(OH)_2), gibi hidratasyon ürünleri ile birlikte alite (C_3S) ve belite (C_2S) gibi fazları içermektedir (Topçu, 2006). Yapılan XRD analizleri, harçların iç yapı değişiklikleri ve oluşan bileşenlerdeki farklılıkları belirlemeye yönelik önemli detayları sunmaktadır.



Şekil 4.57. NaCl etkisindeki KİH2 numunesinin XRD analizi

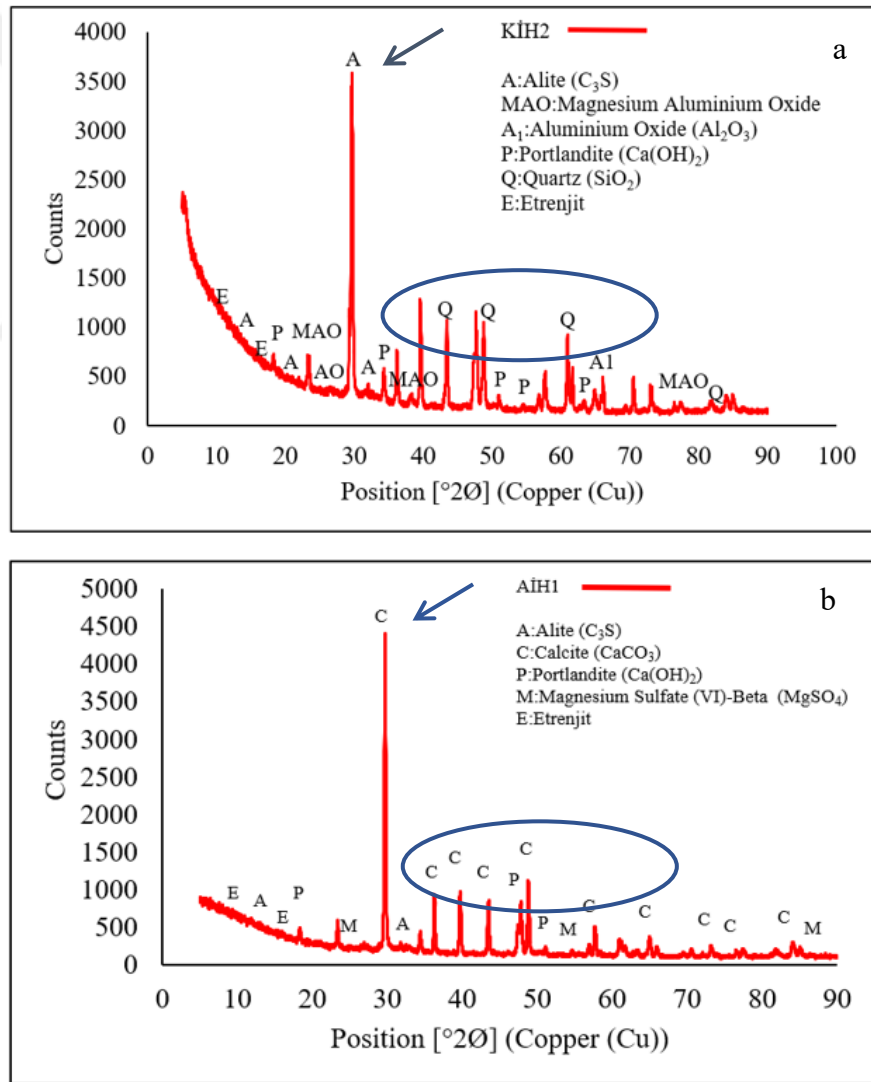
Şekil 4.57’de %5 NaCl etkisinde 180 gün bekletilen KİH2 numunesinin XRD analiz pikleri verilmektedir. Analiz sonucunda alite, kalsit, sodyum klorür, portlandit ve Quartz pikleri görülmüştür. Pikler içerisinde yoğun olarak görülen kalsit minerali, birçok jeolojik süreçte oluşabildiği gibi genellikle çimento ve kireçtaşı oluşumlarında bulunmaktadır. XRD analiz sonucunda görülen NaCl varlığı agresif ortamdan gelen tuz kristallerinin iç yapıya ulaşmış olduğunu ve gelişen reaksiyonlar sonucu bağlayıcı yapıya etkisini göstermektedir.

NaCl etkisinde bekletilen AİH2 (a) ve BİH2 (b) numunelerinin XRD analizleri Şekil 4.58’de verilmektedir. AİH2 (a) numunesinde en belirgin pikler belite (C_2S), alite (C_3S), kalsit ($CaCO_3$), sodyum klorür ($NaCl$), portlandit ve Quartz fazları olduğu dikkat çekmektedir. Kalsit fazlarının nedeni kullanılan 0-4 mm kalker özellikli agrega ve çimento bileşimlerinden gelmektedir. Agresif ortam gereği 48° ’de görülen NaCl piki gözlemlenmiştir. BİH2 (b) numunesinde çimento bileşenlerinden olan belite 30° - 31° ’de piki belirgin olarak görülmektedir. Agresif ortamın numune iç yapısına ulaştığı 32° ’de belirgin olarak gözlemlenen sodyum klorür fazı ile anlaşılmaktadır. Bu analiz, numunenin bileşenlerinin tanımlanması ve miktarlarının belirlenmesi yoluyla, numunenin kimyasal yapısını ve bileşenlerinin agresif ortamda nasıl değiştiğini anlamamıza yardımcı olmuştur.



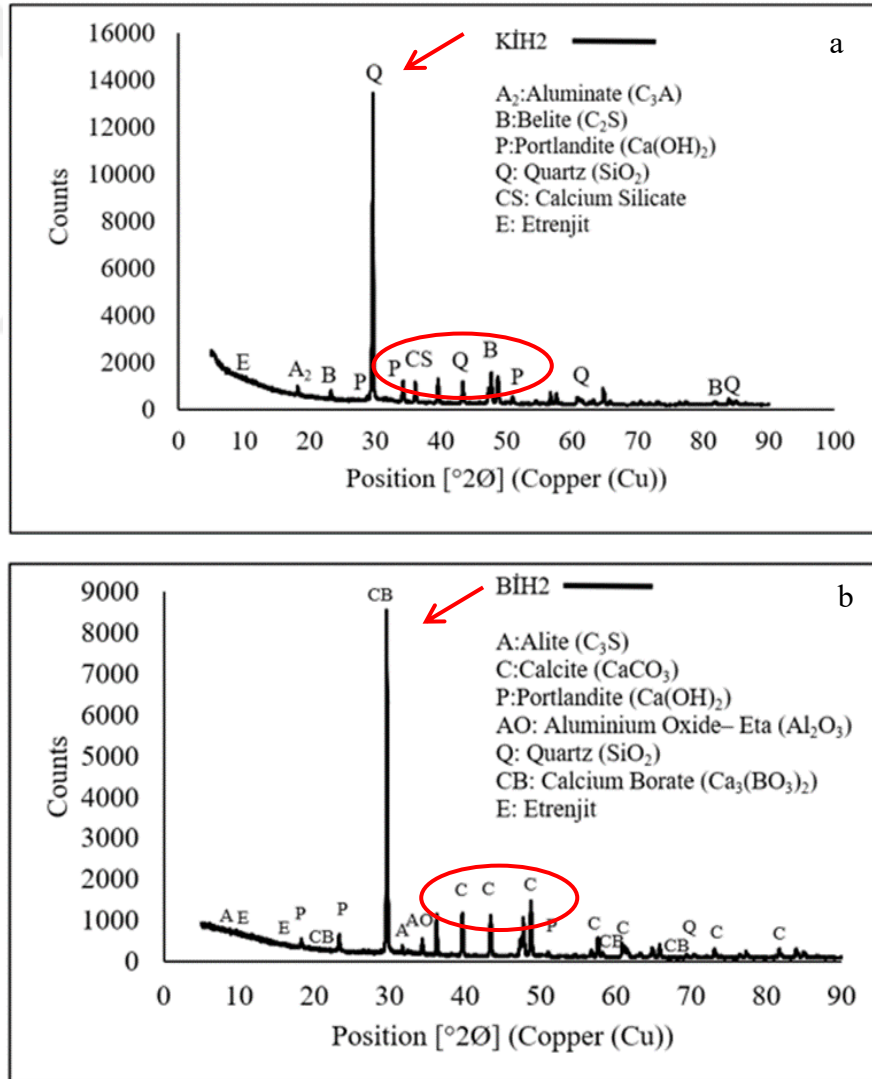
Şekil 4.58. NaCl etkisindeki AİH2 ve BİH2 numunelerinin XRD analizi

Şekil 4.59’da %5 MgSO_4 etkisinde 180 gün bekletilen KİH2 (a) ve AİH1 (b) numunelerinin XRD analizleri görülmektedir. Pikler mineral isimlerinin kısaltmalarından oluşmaktadır. Ayrıca analizde bulunan fazlarda belirtilmiştir. İnceleme sonucunda KİH2(a) numunesinin analizinde yoğun Quartz pikleri görülmekle beraber alüminyum oksit, magnezyum alüminyum oksit ve portlandit (CH) pikleri bulunmuştur. Alüminyum oksit (Al_2O_3) çimentonun bileşenlerinden biri olarak bilinmektedir. AİH1 (b) numunesinde genel olarak piklerde kalsit (CaCO_3) görülmekle birlikte ana bileşenlerden olan alite (C_3S) ve portlandit (CH) görülmektedir. Agresif ortamın etkisi ile analizde magnezyum sülfat (MgSO_4) belirlenmiştir. Sülfat etkisinin, harç numunelerde çimentonun hidratasyonu ile oluşan bağlayıcı yapı CSH'yi bozarak azalttığı XRD analiz sonuçlarında gözlemlenmektedir.



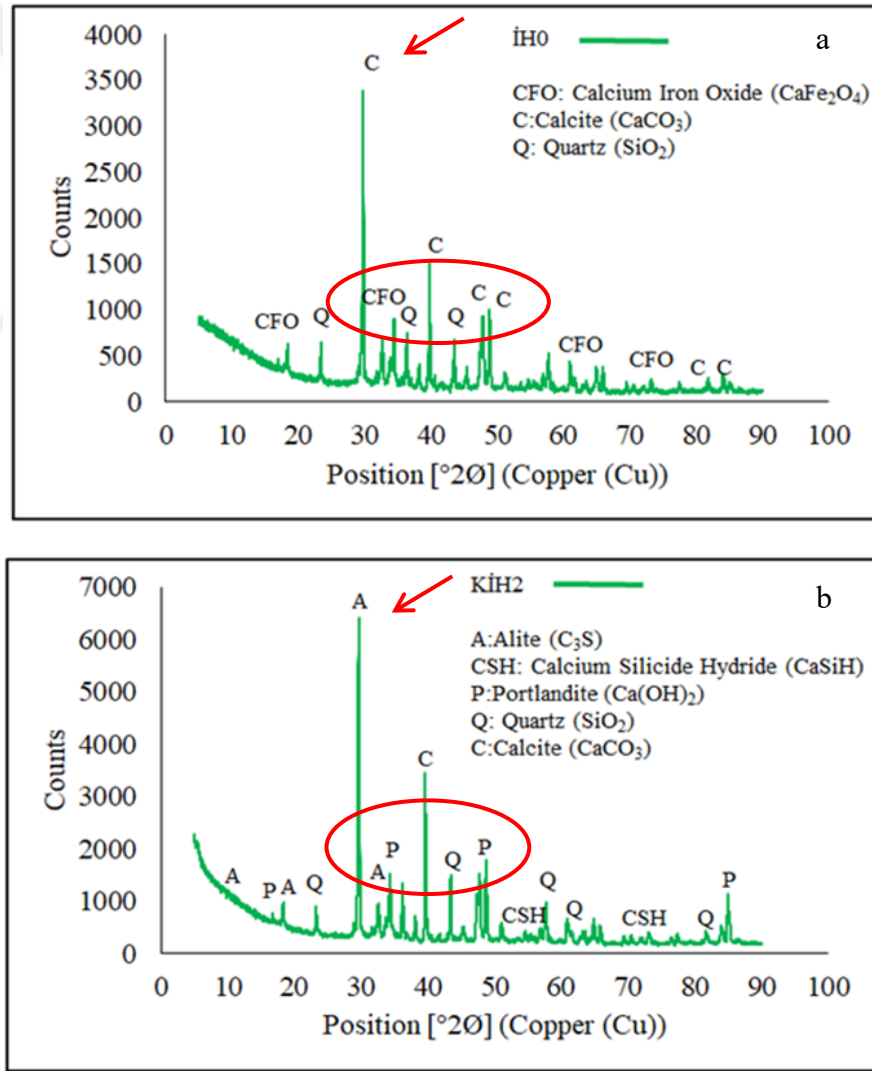
Şekil 4.59. MgSO_4 etkisindeki numunelerin XRD analizi

Şekil 4.60'da %5 NaSO₄ etkisinde 180 gün bekletilen KİH2 (a) ve BİH2 (b) numunelerinin XRD analizleri görülmektedir. Pikler mineral isimlerinin kısaltılmış ifadeleri olmaktadır. Ayrıca bulunan fazlarda belirtilmiştir. Özellikle, agresif ortamlar altında numunenin içinde oluşan farklı fazları ve koşulların etkilerini değerlendirmek için önemli olmaktadır. Bu iki numunenin seçilme nedeni inhibitör kullanılan serilerde dayanım kaybının diğerlerine göre daha fazla olmasıdır. BİH2 (b)'de genel olarak piklerde Ca(CO)₃ görülmekle birlikte ana bileşenlerden olan alite (C₃S) ve portlandit (CH) bulunmaktadır. Sodyum sülfat etkisi ile bu yapıların azaldığını söylenmektedir. Sülfat etkisi ile etrenjit yapısı (C₆AS₃H₃₂) FE-SEM'de net olarak görülmesine rağmen XRD pikleri görülememiştir. Ancak 8°-9° ve 15°-16° aralarında etrenjit fazları gözlemlenmektedir (Sahmaran vd., 2007).



Şekil 4.60. Na₂SO₄ etkisindeki numunelerin XRD analizi

Şekil 4.61’de ASR etkisinde kalan inhibitör kullanılmayan İH0 (a) ve KN içerikli KİH2 (b) numunelerinin XRD analizleri görülmektedir. ASR’den en çok etkilenen ve en az etkilenen 2 numune tercih edilmiştir. İH0 numunesinde; kalsiyum demir oksit (CaFe_2O_4), kalsit (CaCO_3) ve Quartz pikleri belirlenmiştir. FE-SEM analiz görüntüleri ve deney sonuçlarında olduğu gibi alkali-silika jelleri az miktarda gözlemlenmiştir. Alkali-silika jellerinin az miktarda gözlemlenmesi, numunelerin dayanıklı olduğunu ancak reaksiyonun bazı belirtilerinin hala var olduğunu göstermektedir. XRD analiz sonuçlarında da belirgin ASR etkileri görülememiştir. KİH2(b) numunesinde; alite (C_3S), kalsiyum silika hidrat (CSH), portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve Quartz (SiO_2) fazları görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, numunenin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri hakkında kapsamlı bilgi sağlamaktadır.



Şekil 4.61. ASR etkisindeki numunelerin XRD analiz sonucu

5. HARÇ ÖZELİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ANALİZİ

5.1. Regresyon Analizleri

5.1.1 Agresif ortam ve standart kür koşulları regresyon analizi

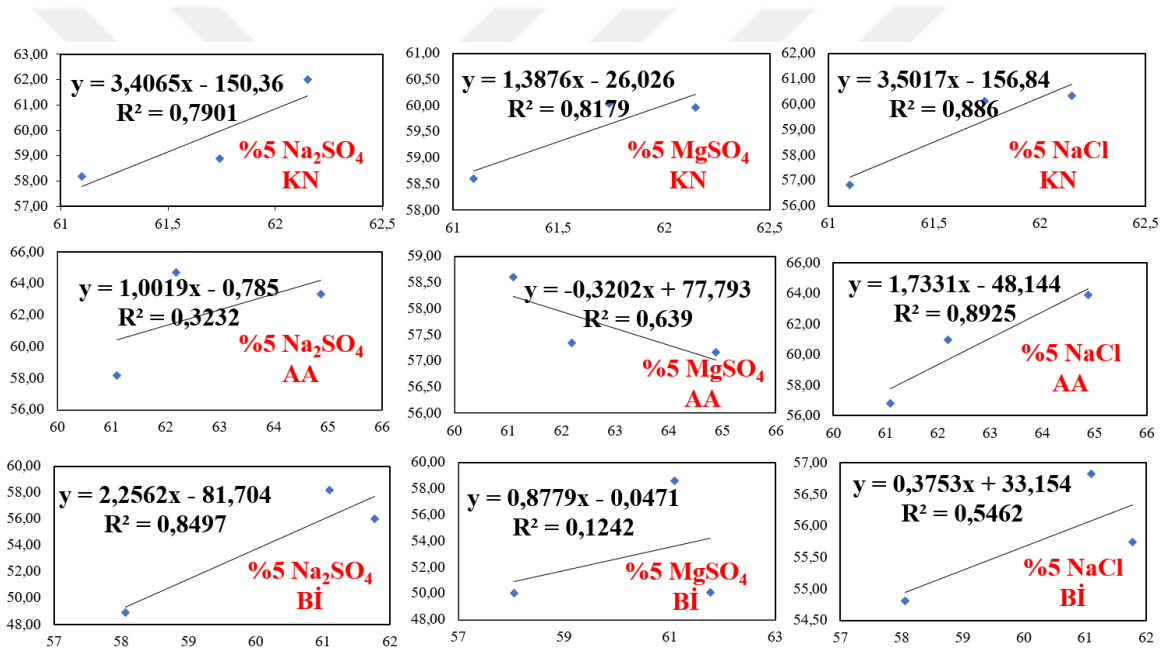
Bu çalışma inhibitör çeşitlerinin ve miktarlarının dayanıklılığa olan etkisi araştırılırken sodyum sülfat, magnezyum sülfat, sodyum klorür etki ve standart kür koşullarında aralarındaki farklılıklar incelenmiştir. Bu etkilerde ultrases geçiş hızları, birim hacim ağırlıkları, eğilme ve basınç dayanım sonuçları değerlendirilmiştir. Bu parametreler arasındaki ikili korelasyonun kurulması, inhibitör çeşidinin ve oranının harç dayanıklılığı üzerinde faktörlerin etkisinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu amaçla 180 gün standart kür koşulunda bekletilen numuneler ile agresif ortam koşulunda bekletilen numunelerinin basınç dayanımları arasındaki Pearson korelasyonu incelenmiştir. Çizelge 5.1’de inhibitörlü numunelerin basınç dayanımı Pearson korelasyonları verilmektedir. Çizelge 5.1’e bakıldığında kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanımının artması ile elde edilen R değerlerinin (Pearson korelasyonu) 0,89-0,94 aralığında olduğu belirlenmektedir.

Çizelge 5.1. İnhibitörlü numunelerin basınç dayanımı Pearson korelasyon katsayıları

İnhibitör	Na₂SO₄	MgSO₄	NaCl
KN	0,89	0,90	0,94
AA	0,57	-0,80	0,94
Bİ	0,92	0,35	0,56

Bu durum KN artırılması ile agresif ortamlardaki basınç dayanımının standart kür koşulundaki etkisi ile benzer olduğunu vermektedir. Pozitif sonuçlar KN inhibitörünün agresif ortam koşullarında olumlu etkisinin olduğunu göstermektedir. Amino alkol içerikli inhibitörlü serilerde %5 MgSO₄ etkisi ile elde edilen basınç dayanımı sonuçlarında R=-0,80 bulunmuştur. Belirlenen negatif etki inhibitör kullanımının artması ile MgSO₄ etkisinde dayanımların azaldığını göstermektedir. Pearson katsayısının 0,57 olması, inhibitörlü numunelerin standart kür koşullarında bekletilmiş numuneler ile sodyum sülfat içinde bekletilmiş numuneler arasında orta derecede pozitif yönlü bir ilişki olduğunu belirtmektedir. Sodyum sülfat etkisinde AA inhibitör kullanımının pozitif etki yarattığı anlaşılmaktadır. Bor içerikli (Bİ) inhibitör kullanılan numunelerinin agresif koşullardaki belirlenen R değerlerinin pozitif olduğu ve 0,35-0,92 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Bİ numunelerinin $R=0,92$ değer almış olması; sodyum sülfatta, standart kürde olduğu gibi inhibitör oranının artması ile basınç dayanımlarının azaldığını göstermektedir. Magnezyum sülfat etkisinde $R=0,35$ olması, inhibitör oranı ile standart kür koşulundaki etkiden uzak olduğunu göstermektedir. Sodyum klor etkisinde $R=0,56$ değerinde olması, inhibitör kullanımının standart kür koşulları ile pozitif etki olduğunu belirtmektedir. Klorür etkisinde inhibitör kullanımının artması dayanımı azalttığı anlaşılmaktadır. Bu değer 0'a yaklaşması standart kür koşulundaki dayanım sonuçları ile aynı doğrultuda olmamaktadır. Şekil 5.1'de agresif ortam (Na_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl) ve standart kür uygulanan numunelerin 180 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı regresyon analizleri verilmektedir. KN inhibitörü sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı standart kürdeki gibi artarak azalmıştır.



Şekil 5.1. Agresif ortam ve standart kür uygulanan numunelerin regresyon analizleri

AA içerikli numunelerde R^2 değerinin 0,3232 olmasının nedeni standart kür koşulunda basınç dayanımı %1 kullanımında yüksek çıkarken agresif ortamda inhibitör oranının artması ile daha yüksek dayanım alınmıştır. Doğrusal ilişkiden uzaklaşıldığını belirtmektedir. Benzer durum bor içerikli inhibitör serilerinde de görülmüştür. Bİ oranının %1 kullanılması optimum değer sağlarken magnezyum sülfat etkisinde inhibitör oranının artması ile dayanım daha az olması doğrusal ilişkiden uzaklaştırmıştır. Amino alkol içerikli numuneler standart kürde %1 de optimum değer alırken magnezyum sülfat etkisi ile dayanımların azalması negatif yönlü etki yaratmıştır. Klorür etkisinde en düşük regresyon analizinde Bİ kullanımı ile $R^2=0,5462$ değeri ile doğrusallıktan uzak bir ilişki oluşturmuştur.

Agresif ortam koşullarında bekletilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları ve birim hacim ağırlık sonuçları arasında kurulacak olan ikili korelasyon, inhibitör kullanım oranının dayanıklılığa olan etkilerinin değerlendirilmesi açısından önem taşıdığı düşünülmektedir. Bu amaçla sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve sodyum klorür etkisinde 180 gün sonunda basınç dayanımlarının birim hacim ağırlıkları ile olan değişimleri değerlendirilmiştir. Çizelge 5.2’de agresif ortam basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık regresyon analiz sonuçları karşılaştırmaları verilmektedir. Sodyum sülfat etkisinde elde edilen basınç dayanım sonuçları ile birim hacim ağırlık sonuçlarının karşılaştırılmasında en yakın R^2 değeri 0,9918 ile amino alkol inhibitörü kullanılan serilerde görülmektedir. İnhibitör oranının artışı ile dayanım ve birim hacim ağırlık değerleri artmaya devam etmiştir.

Çizelge 5.2. Agresif ortam basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık regresyon analiz sonuçları

Agresif Ortam	İnhibitör	Pearson korelasyon katsayısı (R)	Regresyon katsayısı (R^2)	Model Denklem
Na ₂ SO ₄	KN	0,94	0,8808	$y=0,0036x-2,2052$
	AA	0,99	0,9918	$y=0,0038x-2,1931$
	Bİ	0,90	0,8135	$y=0,0025x-2,2613$
MgSO ₄	KN	0,89	0,7991	$y=0,0088x+1,8796$
	AA	0,92	0,8427	$y=0,0035x+2,1910$
	Bİ	0,97	0,9465	$y=0,0016x+2,3018$
NaCl	KN	0,96	0,9256	$y=0,0059x+2,0706$
	AA	0,98	0,9632	$y=0,0042x+2,1708$
	Bİ	0,99	0,9920	$y=0,0065x+2,0368$

Magnezyum sülfat etkisindeki numunelerin Pearson korelasyon kat sayılarının (0,89-0,97) arasında değiştiği görülmektedir. Magnezyum sülfat etkisinde kalan numunelerde $R^2=0,9465$ değeri ile bor inhibitörü (Bİ) kullanılan numunelerde daha fazla doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Bor inhibitörü oranının artması ile birim hacim ağırlık değeri ve basınç dayanımı azalması doğrusal olarak azalmaktadır. KN inhibitörü oranının artması ile basınç dayanımlarının ve birim hacim ağırlık değerlerinin daha fazla olması doğrusal bir ilişki kurulmasını sağlamıştır. AA inhibitörlü seride de 180 gün magnezyum sülfat etkisinde kalan numunelerin basınç dayanımları ile BHA değerlerinin doğrusal bağlantısının olduğunu belirtmektedir. Sodyum klorür etkisindeki ikili korelasyon analizinde R^2 değeri 0,9920 ile 1’e en yakın Bİ’de gözlemlenmiştir. İnhibitör oranı artışı ile dayanımlar ve BHA azalmıştır.

5.1.2. Donma-çözülme çevrimleri regresyon analizi

Donma-çözülme etkisinin inhibitör oranı ve çeşidine göre değiştiği yapılan incelemelerde görülmektedir. D-Ç etkisi ile ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarının birbirlerine olan etkileri incelenmek amacıyla doğrusal regresyon modeli incelenmiştir. Bu amaçla Pearson korelasyon ve R^2 değerleri incelenmiştir. Çizelge 5.1’de Pearson korelasyon değerleri verilmektedir. Üç farklı korozyon inhibitörünün inhibitör oranının artması ile D-Ç çevrimleri sonucunu etkilemesi incelenmiştir. Bu çizelgede, her inhibitör için Pearson katsayıları oldukça yüksek (0,95 ile 0,96 arasında), bu da inhibitör konsantrasyonu ile inhibisyon etme oranı arasında güçlü bir pozitif doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca, her inhibitör için model denklemleri de verilmiştir. Bu denklemler, harc numunelerindeki inhibitör oranı ile oluşan D-Ç kayıpları arasındaki ilişkiyi belirtmektedir.

Çizelge 5.3. D-Ç çevrimleri ağırlık ve basınç dayanımı kaybı regresyon analizi

İnhibitör	Pearson korelasyon katsayısı (R)	Regresyon katsayısı (R^2)	Model Denklem
KN	0,95	0,8945	$y = 0,2641x - 0,3928$
AA	0,96	0,9234	$y = 0,2667x - 0,4851$
Bİ	0,96	0,9138	$y = 0,2664x - 0,4543$

Çizelge 5.3’e bakıldığında en yüksek R^2 değerinin amino alkol içerikli (AA) inhibitör kullanımı ile elde edildiği bulunmuştur. Bu durum regresyon modelinin veriye ne kadar uyduğunu göstermektedir. İnhibitör oranının artması, D-Ç ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kaybı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve inhibitör oranının artmasıyla bu kayıpların azaldığını belirtmektedir. Regresyon katsayıları incelendiğinde doğrusallığa yakın olan bor içerikli inhibitör (Bİ) kullanımı sonucu D-Ç dayanıklılığına olumlu etkisinin olduğunu göstermektedir. İkili korelasyon sonucunda oluşan y denklemlerinde; x inhibitör oranının artması ile basınç dayanımı kaybını, y ise inhibitör oranının artması ile ağırlık kaybı oranı arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Kalsiyum nitrit içerikli (KN) inhibitörün R^2 değeri 0,8945 olarak belirlenmiştir. KN inhibitörünün artması ile optimum KN inhibitörü kullanımının %1’de daha etkili olduğu görülmüştür. Bu durum diğer inhibitör kullanımlarından elde edilen R^2 değerinden daha düşük olmasına neden olmaktadır. Bulunan değerler, üç inhibitörün (%1-%2) kullanılmasının D-Ç çevrimlerine olan olumlu etkisini göstermektedir.

5.2. Makine Öğrenmesi (ML) ile Numune Sonuçlarının Modellenmesi

Makine öğrenimi (ML), bilim ve mühendislik disiplinlerinde geniş bir kabul görmüş bir yöntemdir. ML algoritmaları, yapay zekâ (AI) kavramlarının önemli bir parçasını oluşturur ve tekrarlı öğrenme süreçleriyle bilinmektedir. Makine öğrenimi algoritmaları, araştırmacıların deneyimlerine gerek kalmadan içgörüler ve bulgular elde etme imkânı sağlayarak, çözilememiş karmaşıklıkları ve çok sayıda bağlı parametreye sahip alanları keşfetmek için önemli bir araç olmaktadır (Sobuz vd., 2024). Bu çalışmanın temel amacı, deneysel ölçümlere kıyasla verimli ve uygun maliyetli bir yaklaşım sunan makine öğrenimi yöntemlerini kullanarak inhibitör değerleri ile basınç arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Makine öğrenimine dayalı sistemlerin, inhibitör kullanımının basınç dayanımının daha hızlı ve daha düşük maliyetle belirlenebilmesi amacıyla önemli bir potansiyele sahip olmaktadır.

Kompozit bir yapı malzemesi olan betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla makine öğrenme üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Kalabari vd., 2021). Bu amacı gerçekleştirmek için deneysel ölçümlerin yanı sıra deneysel verilerin rastsallığını (ön görememezlik) özelliğini de dikkate alan modeller sunulmuştur. Basınç dayanımını belirlemek için çeşitli regresyon ve tahmin modelleri kullanılmıştır, bunlar arasında Doğrusal Model, Karar Ağacı Regresyonu, Derin Öğrenme ve Gradyan Artırma Regresyonu bulunmaktadır. Bu modeller arasında, basınç dayanımlarının tahmininde en yüksek performansı ve doğruluğu gösteren Karar Ağaçları Regresyon Modeli ve Sinir Ağları modeli bulunmaktadır. Model tahmin değerleri ile gerçek basınç dayanımı değerleri arasındaki fark R^2 ve RMSE metrikleri kullanarak en yüksek doğruluk ile tahmin modellemesi bulunmuştur.

Makine öğrenmesi analizlerinde, deneysel çalışmalarda elde edilen kontrol numunesi (İH0), amino alkol içerikli korozyon inhibitörü kullanılan AİH1 ve AİH2 numuneleri üzerinde uygulanan basınç dayanım deneyleri sonucu ulaşılan değerler üzerinde modeller eğitilmiştir. Girdi parametreleri olarak çimento, ince agrega, su ve korozyon inhibitör değerleri ile bir veri seti oluşturulmuştur. Toplamda beş farklı regresyon tahmin modeli değerlendirilmiştir. Bu amaçla kullanılan regresyon modellemeleri sırasıyla Doğrusal Model, Karar Ağacı modeli ve Gradyan Artırma Regresyon modelleri olmaktadır. Sonuç olarak çalışmada uygulanan Derin öğrenme tabanlı regresyon tahminleri üretmek için Sinir Ağları (ANN), Uzun Kısa Dönemli Bellek (LSTM) modellerinin kullanımı tercih edilmiştir.

5.2.1. Kullanılan metrikler ve veri artırımı

Determinasyon katsayısı olarak da bilinen R^2 , bir modelin verilere ne ölçüde uyduğunu gösteren istatistiksel bir ölçü olarak tanımlanmaktadır. Regresyon alanında, regresyon çizgisinin gerçek verilerle ne kadar iyi eşleştiğini gösteren istatistiksel bir gösterge olarak bilinmektedir. Modelin yanıt verilerinin kendi ortalaması etrafındaki tüm değişkenliği açıkladığı ve kusursuz bir eğri sağlandığı durumda, $R^2=1$ olmaktadır. Modelin yanıt verilerinin ortalama etrafındaki değişkenliklerinin hiçbirini açıklamaması durumu ise $R^2=0$ olmaktadır. Eğer R^2 değeri 0,8'den büyükse, iki veri arasında anlamlı bir ilişkinin var olduğunu belirtmektedir. Eğer R^2 işareti pozitif ise, iki veri arasında artan doğrusal bir ilişki vardır ve tersi durumunda ise azalan doğrusal bir ilişki vardır. Determinasyon katsayısı R^2 değeri hesaplamak için açıklanabilen varyasyon (SSR) ve toplam varyasyonun (SST) bilinmesi gerekmektedir. Varyasyonlardan SSR değerinin SST'ye bölünmesi ile hesaplanan oran sonucunda veriler arasındaki kurulan ilişki hakkında bilgi sağlamaktadır (Anonim 1).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_1 - u)^2}{\sum(y_2 - u)^2} \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5.2)$$

En küçük kareler yönteminde determinasyon katsayısı 5.1'de verilen denklem ile hesaplanmaktadır. Determinasyon katsayısı denkleminde kısaltmalar; y_1 : deneysel olarak elde edilmiş, gerçek değerler, y_2 : regresyon denkleminde tahmin edilen değerler, u : gerçek değerlerin ortalamasını temsil etmektedir. İkinci olarak kullanılan metrik ise Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error (RMSE)'dir. Tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere olan yakınlığı belirlenmektedir. RMSE değeri ne kadar düşükse, modelin tahmin ettiği değerler gerçek değerlere o kadar yakın demektir. RMSE değeri 5.2'de verilen denklem uygulanarak hesaplanmaktadır (Abidin vd., 2018). ML yöntemlerinin daha iyi öğrenmesini sağlamak için veriler üzerinde interpolasyon yaparak veri artırımı yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada veri artırımı için bozucu olmayan, sinyaller üzerinde uygulanan titreme (Jittering) yöntemi tercih edilmiştir. Toplamda Jittering yöntemiyle eğitim örnek sayısı 1818'e çıkartılmıştır. Eğitim örnek sayısı artırılarak daha güvenilir tahmin yapılmıştır. Tahmin değerleri için sadece deneysel orijinal veriler kullanılmaktadır.

5.2.2. Doğrusal model regresyonu (Linear Model Regression)

Makine öğrenimi (ML) modelleri, verileri etkili ve verimli bir şekilde analiz ederek ilgili akıllı uygulamaları geliştirmek için tasarlanmıştır. Bu alanda birçok farklı türde makine öğrenimi algoritması bulunmaktadır. Makine öğrenimi; denetimli, denetimsiz, yarı denetimli ve takviyeli öğrenmeyi içeren dört farklı şekilde incelenmektedir. Ayrıca daha geniş makine öğrenimi teknikleri ailesinin bir alt kümesi olan derin öğrenme, fazla sayıda veri üzerinde aynı anda akıllı analizler yapma kapasitesine sahip olmaktadır (Louridas ve Ebert, 2016). Bu çalışma kapsamında, denetimli makine öğrenimi algoritmalarının regresyon problemindeki performansı analiz edilerek, farklı çalışmalara örnek kapsamlı bir bakış açısı sunulmaktadır. Denetimli öğrenmede x verisi girdileri ve y verisi laboratuvar ortamında cihazlardan üretilen gerçek değerleri ifade etmektedir. Bu durumda x bağımsız ve y bağımlı değişken olmaktadır.

$$y_i = w_0 + w_1 x_i + \text{hata} (E) \quad (5.3)$$

İki değişken arasında bir bağımlılık ilişkisi olduğunda, bir değişkenin değerini diğerinin değerine göre tahmin edebilmek için veriler arasındaki korelasyonun ortaya çıkarılması gerekmektedir. Anlamlı bir ilişki olması durumunda bağımsız değişken ile üzerinde analiz etmek istediğimiz bağımlı değişkenler arasında bir ilişki olmaktadır. Tüm denetimli öğrenme algoritmaları arasında doğrusal regresyon en temel olarak kullanılmaktadır. İki değişken arasındaki ilişkinin en basit modeli birinci dereceden doğrusal olan model olarak bilinmektedir ve denklem (5.3) ile hesaplanmaktadır. Verilen denklemde w_0 ve w_1 , doğrusal regresyon analizi için eğri-oturtma sayesinde öğrenilebilir ağırlıkları belirtilmekte, x girdi verilerini ve y değeri ise modelin tahmin değerlerini göstermektedir.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.4)$$

Basit bir regresyon modelinde denklemde verilen hatayı hesaplama tahmini için Ortalama Karesel Hata yöntemi (MSE) genel olarak tercih edilmektedir. Bir makine öğrenme algoritmasının hızını ölçmek için kullanılır. Kare işleminden dolayı daima pozitifdir ve sifıra yakınlığı ile performansı yüksek olmaktadır. Verilen (5.4) denkleminde: n; laboratuvar ortamında elde edilen örnek sayısı, y_i örnek i için modelin ürettiği tahmin değerini, $\hat{y}_i$ ise örnek i için laboratuvar ortamında ölçülen değer olmaktadır (Anonim 2).

Çizelge 5.4. Doğrusal model rastsal üretim sütun ağırlıkları

Parametre	Ağırlık
Çimento	0,006
İnce Agregat	0,004
Su	0,006
İnhibitör	0,710

Çizelge 5.5. Doğrusal modelin katsayıları

Parametre	Katsayı
Çimento	-0,001512
İnce Agregat	0,001575
Su	-0,000301
İnhibitör	-0,782231
Sabit (Kesişme Noktası) ^a	50,63857

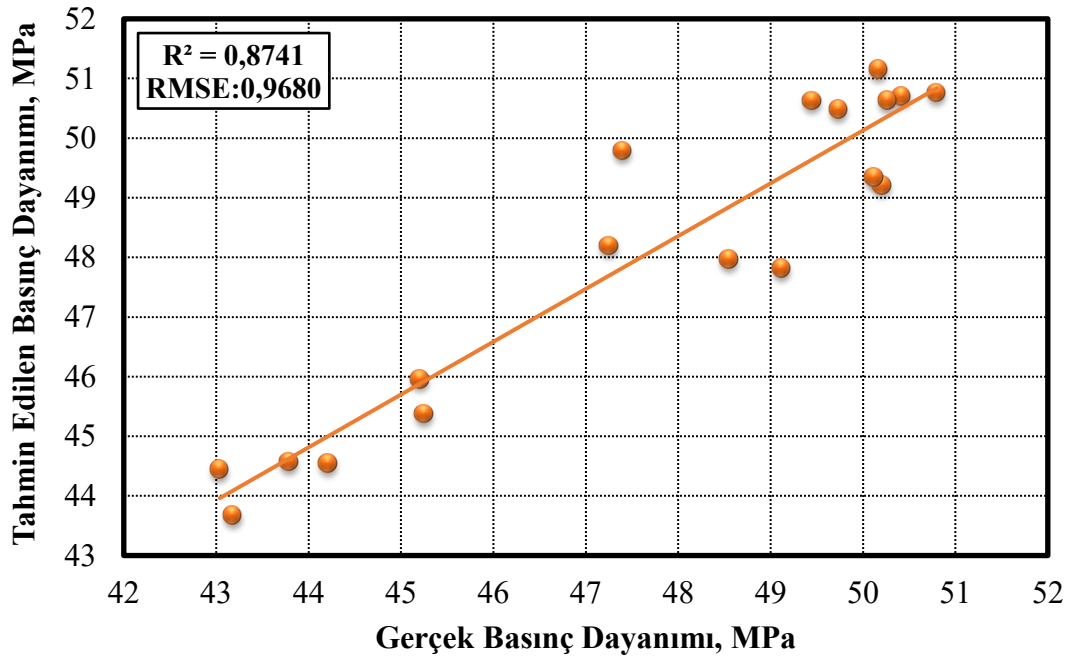
^a Kesişme Noktası, doğrusal bir modelin parçası olarak tahmin edilen sabit bir terimdir. Bir regresyon modelindeki kesişme noktası ("sabit" katsayı), modeldeki tüm bağımlı değişkenler sıfıra eşit olduğunda, çıktı değerinin ortalama değerini karşılık gelmektedir.

Temel doğrusal regresyon, basitlik ve yorumlanabilirlik açısından çeşitli disiplinlerdeki veri analistleri ve bilim insanları tarafından çok tercih edilmektedir. Deney çalışmasında kullanılan inhibitör numunelerinin basınç dayanım verileri üzerinde doğrusal regresyon kullanıldığı bir tahmin modelinde; R^2 değeri 0,8741 olarak bulunmuştur. Çizelge 5.4'te doğrusal model rastsal üretim sütun ağırlıkları 4 veri setinde gösterilmiştir. Belirlenen doğrusal modelin katsayıları ise Çizelge 5.5'de verilmiştir. Parametreler ve katsayıların verildiği çizelgede sabit kesişme noktası da belirtilmektedir. Doğrusal modelin ürettiği tahmin değerleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Tahmin değerleri incelendiğinde inhibitör oranının artması ile dayanım arasında ters bir orantı görülmüştür.

Çizelge 5.6. Doğrusal model tahminleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr
İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr
Su	225 ml	Su	225 ml	Su	225 ml
İnhibitör	0 gr	İnhibitör	4,5 gr	İnhibitör	9 gr
Dayanım Tahmini	52,00 MPa	Dayanım Tahmini	48,48 MPa	Dayanım Tahmini	44,96 MPa

Özet olarak, veriler arasındaki ilişkiyi inceleyen bir doğrusal model kullanılarak yapılan analizde, tüm içerik oranları sabit tutularak, inhibitör kullanımıyla numunelerin basınç dayanım değerleri arasında ters bir ilişki belirlenmektedir. İnhibitör oranının artması ile basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Şekil 5.2'de basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon bağlantısı verilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığında, tahmin edilen verilerin gerçek verilere yakın olması beklenmektedir. Bu, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini belirlemede önemli bir kriter olmaktadır. Doğrusal model grafiği incelendiğinde analiz sonucunda en az hata durumunda, tüm basınç dayanımı verilerinin, gösterilen çapraz doğrusal çizgiye oldukça yakın olacağı öngörülmektedir.



Şekil 5.2. Doğrusal model grafiği

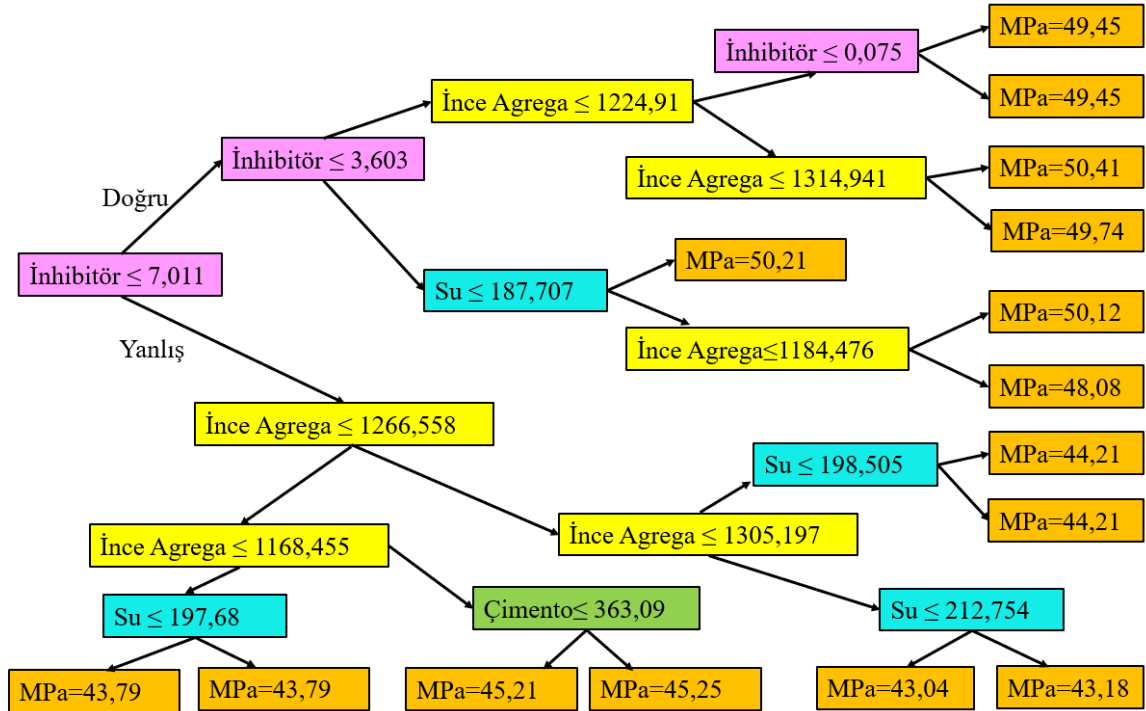
Bu durum, modelin verilere ne kadar iyi uyduğunu ve tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu göstermektedir. İdeal bir modelde, elde edilen tahmin değerlerinin diyagonal doğrusal çizgiye yakın olması, modellerin ürettiği tahminlerin doğruluğunu artırmaktadır. Bu, modelin veriye daha yakın ve tutarlı tahminler yapma yeteneğini yansıtmaktadır ve sonuç olarak analizlerin daha güvenilir olmasını sağlamaktadır. Doğrusal modelde RMSE değerinin 0,9680 olarak belirlenmiştir. Ayrıca hesaplanan determinasyon R^2 değerinin 0,8741 olduğu bulunmuştur. Determinasyon R^2 değerinin 1'e yakın olması iki değişken arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. Laboratuvar sonuçlarında olduğu gibi tahminde de inhibitör oranındaki farklılık ile basınç dayanımı aynı şekilde değişmektedir.

5.2.3. Karar ağacı modeli regresyonu (Decision Tree Model Regression)

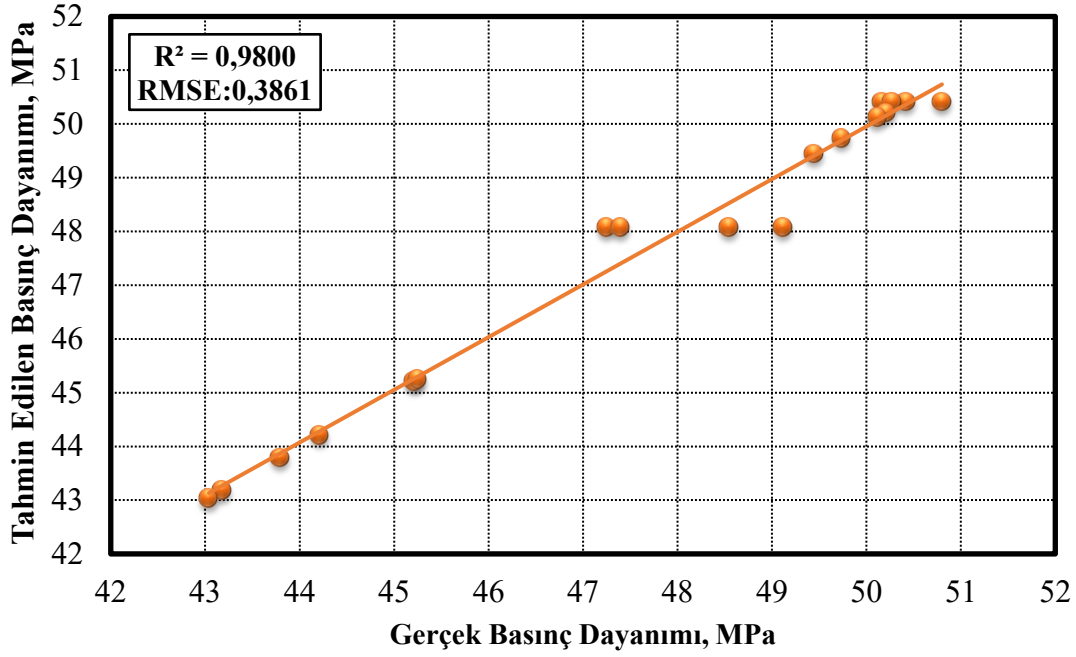
Bir nesnenin ait olduğu kategorinin belirlenmesi, tahmine dayalı bir yöntem olan karar ağacı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Karar verme görselleştirmesi sayesinde kullanıcılar çeşitli seçenekleri değerlendirebilmekte ve istenen sonuca ulaşmak için bir eylem planı oluşturabilmektedir. Teknik olarak ikili ağaç yapısı, karar ağaçlarında uygulanmaktadır. Adından da anlaşılacağı gibi, ağaca benzeyen bir akış şemasıdır ve belirlenmiş gereksinimlerden yararlanarak bir örüntünün sınıfını adım adım belirlemek için kullanılmaktadır. Ters çevrilmiş ağaç yapısı düşünüldüğünde; en tepeden (köklerden) en aşağıya (yapraklara) inen bir strateji ile sınıflandırma görevini sağlamaktadır. Kök sorgu düğümünden ortaya çıkan tek bir karar ve ağaç gösteriminde başka düğüme yol açan dal tarafından belirtilmektedir (Gacar ve Kocakoç, 2020). Çizelge 5.7’de karar ağacı modeli sütun ağırlıkları ve Şekil 5.3’te ise karar ağacı modelinin detaylı gösterimi bulunmaktadır. Modelin tahmin sonunda elde edilen basınç dayanımları (MPa) olacak şekilde verilmektedir.

Çizelge 5.7. Karar ağacı modeli sütun ağırlıkları

Parametre	Ağırlık
Çimento	0,71
İnce Agregası	0,85
Su	0,78
İnhibitör	0,93



Şekil 5.3. Karar Ağacı modelinin detaylı gösterimi



Şekil 5.4. Karar Ağacı modeli grafiği

Öngörülen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon bağlantısı Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Bu modele değerlendirme yapılması durumunda, tahmin edilen verilerin gerçek verilere yakın olması beklenmektedir. Elde edilen inhibitör numunelerinin oranı ile basınç dayanım arasındaki ilişkiyi modellemek için Karar Ağacı (DT) ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; R^2 değeri 0,9800 olarak bulunmuştur. RMSE değeri 0,3861 olarak belirlenmiştir. RMSE değerinin düşük olması, modelin tahminlerinin genellikle gerçek değerlerle yakın bir şekilde eşleştiğini ve bu nedenle modelin güvenilir olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.8'de gösterildiği gibi, Karar Ağacı modeli tahminlerinin üzerinden sonuçlar incelendiğinde, tüm girdi verileri sabit tutularak sadece inhibitör oranı arttırıldığında harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.8. Karar Ağacı modeli tahminleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr
İnce Agregası	1340,29 gr	İnce Agregası	1340,29 gr	İnce Agregası	1340,29 gr
Su	225 ml	Su	225 ml	Su	225 ml
İnhibitör	0 gr	İnhibitör	4,5 gr	İnhibitör	9 gr
Dayanım Tahmini	49,74 MPa	Dayanım Tahmini	48,08 MPa	Dayanım Tahmini	44,21 MPa

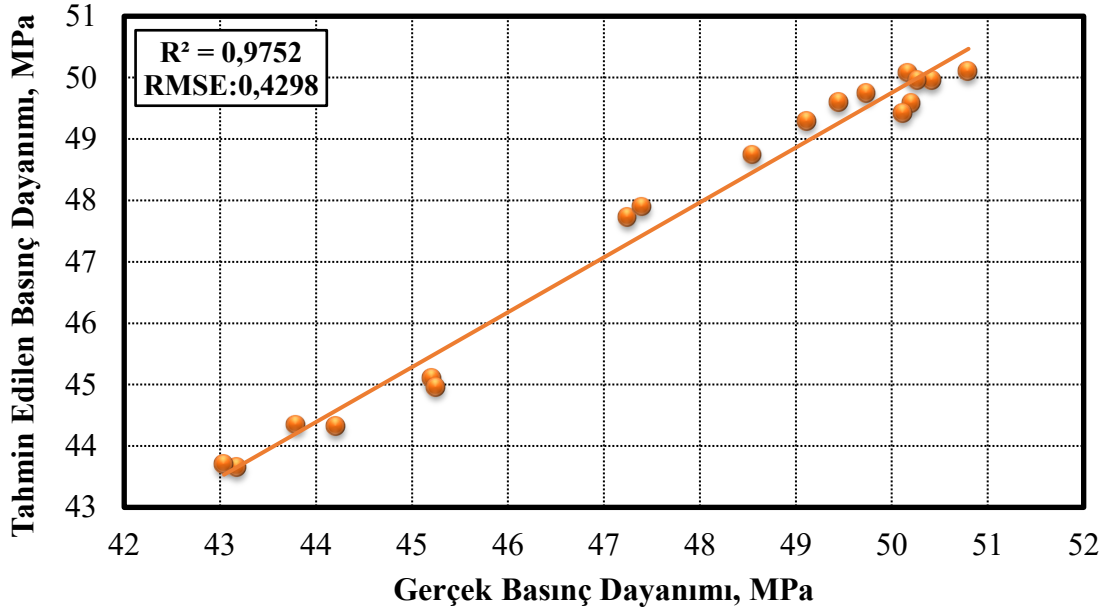
5.2.4. Gradyan Artırma Modeli Regresyonu (Gradient Boosting Model Regression)

Bir topluluk öğrenme yöntemi olan Gradyan Artırma Model algoritmasının sınıflandırma işlemi esnasında, zayıf ağaçlar ile başlayarak, gradyan artırma yöntem ile daha güçlü bir ağacın olmasını hedefleyen bir algoritma olmaktadır. Belirli kurallara göre tekrar eden bir süreçte, güçlü bir tahmin modeli geliştirmeyi amaçlayan algoritmaları ve yaklaşımları incelemektedir. Gradyan Artırma algoritmasının üç temel unsur bulunmaktadır. Bu unsurlar; kayıp fonksiyonu, zayıf öğrenici ve eklemeli model olarak sıralanmaktadır. Kayıp fonksiyonunun temel amacı, modelin gelecekteki sonuçlarını tahmin etme yeteneğini değerlendirmektir. Zayıf öğrenicilerin amacı gelecekteki sonuçları tahmin etmektir (Lu vd., 2020). Bu çalışmada kayıp fonksiyonu olarak karesel hata kullanılmıştır. Çizelge 5.9'da Gradyan artırma modeli sütun ağırlıklarının veri setlerine göre değişen değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.9. Gradyan artırma modeli sütun ağırlıkları

Parametre	Ağırlık
Çimento	0,050
İnce Agregat	0,002
Su	0,011
İnhibitör	0,712

Gradyan artırma makineleri, geniş bir yelpazedeki pratik problemlerde dikkate değer başarılar elde eden, güçlü bir makine öğrenimi yöntemleri grubu olarak bilinmektedir. Bu teknikler, çeşitli kayıp fonksiyonları kullanılarak öğrenme gibi, uygulamanın özgün gereksinimlerine göre oldukça uyarlanabilir özelliklere sahiptir. Gradyan artırma yaklaşımları makine öğrenimi modelleme süreçlerine yoğun bir şekilde odaklanmaktadır (Natekin ve Knoll, 2013). Modelin çalışma prensibinde, bir karar ağacı etkisiz bir öğrenici olmaktadır. Ağaçlar eklenirken meydana gelen kayıp miktarını azaltmak için gradyan inişi olarak bilinen bir süreç kullanılmaktadır. Tahmin ve gerçek değere asında gelişen sapmayı azaltmaktadır. Toplam parametre sayısını minimuma indirilmektedir. Sadece hata hesaplandıktan sonra ağırlıklar güncellenir ve sonuçların doğruluğunu azaltılması sağlanmaktadır. Her bir ağacın ardışık olarak eklenmesi ve her seferinde modelin hatalarını düzeltmek için yeni bir ağaç oluşturulmasıyla devam edilmektedir. Önceki tahmin edicilerin hatalarını düzelterek yeni tahmin ediciler eklemektir. Sonuç olarak regresyon ağaçları, karmaşık ilişkileri ve veri yapılarını yakalamak için birbirine bağlı bir şekilde oluşturulur ve böylece toplu olarak daha güçlü bir tahmin modeli gerçekleştirilmektedir (Işık vd., 2024).



Şekil 5.5. Gradyan artırma modeli grafiği

Öngörülen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon bağlantısı Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Elde edilen inhibitör numunelerinin oranı ile basınç dayanım arasındaki ilişkiyi modellemek için uygulanan Gradyan Artırma yaklaşımı ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; elde edilen determinasyon katsayı değerinin $R^2=0,9752$ olarak bulunduğu görülmektedir. Ayrıca hesaplanan RMSE değerinin 0,4298 olduğu görülmektedir. Bütün veri seti değerleri sabit tutularak, inhibitör oranlarının basınç dayanımı ile olan doğrusal ilişkisi analiz edilmiştir. Çizelge 5.10'da Gradyan artırma modeli ile üretilen tahminler incelendiğinde, veri setinin sabit tutulması durumunda inhibitör oranının artmasıyla birlikte harç numunelerinin basınç dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.10. Gradyan artırma modeli tahminleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr
İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr
Su	225 ml	Su	225 ml	Su	225 ml
İnhibitör	0 gr	İnhibitör	4,5 gr	İnhibitör	9 gr
Dayanım Tahmini	48,10 MPa	Dayanım Tahmini	47,89 MPa	Dayanım Tahmini	44,92 MPa

5.2.5. Derin Öğrenme Modelleri Regresyonu (Deep Learning Models Regression)

Makine öğrenimi alanında sinir ağı, insan beyinde görülen bağlantılı nöronları simüle eden bir model türü olmaktadır. Her nörona bir ağırlık vermek mümkündür, bu da nöronların farklı derecelerde önem kazanmasına ve dolayısıyla öğrenme işlemini gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Giriş verileri, belirli bir ağırlık tarafından işlenir ve bir transfer fonksiyonu kullanılarak nöronun uygun hedefe iletilmektedir. Derin öğrenme (DL), yapay sinir ağları (ANN) arasında, matematiksel modeline dahil ettiği gizli katmanlar ve aktivasyon fonksiyonları sayesinde ANN yapılarından farklılaşmaktadır (Sarker, 2021). Makine öğrenmenin alt dalı olan DL denetimsiz ve yapılandırılmamış verilerle çalışabilen yapay zekâ sistemleri olmaktadır. Bu yöntem, kullanıcı etkisine gerek kalmadan, doğrudan mevcut verilerden en uygun girdileri otomatik olarak bulabilmektedir (Moein vd., 2023).

Derin öğrenme algoritmaları, hem verilerin içindeki özelliklerle hedef arasındaki ilişkiyi hem de bu özellikleri çıkarma işlemini öğrenebilmektedir. Basit bir sinir ağını oluşturan bileşenler; bir girdi, bir çıktı ve bir gizli katman olarak verilmektedir. Derin öğrenme modelleri ise çok sayıda gizli katmanından oluşur. Derin öğrenme, karmaşık verilerdeki örüntüleri tanımlamak ve bu örüntülerin sonuçları hakkında tahminlerde bulunmak için algoritmalar kullanan makine öğreniminin bir alt kümesi olarak bilinmektedir. Eğitim verilerini kullanarak, fotoğraflar, metinler, zaman serileri ve benzeri gerçek dünya verilerindeki çeşitli örüntüleri tanıma yeteneği bulunmaktadır. Son zamanlarda, makine öğrenimi (ML) yöntemleri karmaşık veri kümelerinin desenlerini tahmin etmek amacıyla haritalama konusunda dikkat çekmektedir (Nguyen-Sy vd., 2020).

Kaybolan gradyan sorunu, tekrarlayan sinir ağları (RNN'ler) tarafından karşılaşılan önemli bir problem olmaktadır. Modellerde tahminlerin doğruluğunu artırması için çok sayıda veriye gerek duymaktadır. LSTM yapılarında gradyan kayıp sorununun, öğrenme kaybının üstesinden gelmek için özel bir hücre yapısı önerilmiştir. Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (LSTM), derin öğrenme (DL) yeteneğine sahip ve bilginin korunmasını sağlayan bir tür sıralı sinir ağı olarak tanımlanmaktadır (Hochreiter ve Schmidhuber, 1997). Memory-cell olarak adlandırılan yapıda unutmayı ve hatırlamayı sağlamak için çeşitli çarpma ve toplama işlemleri gerçekleştirilmektedir (Grossberg, 2013). Yapılan bu çalışmada, dayanım sonuçlarının tahmini için derin öğrenme yapısı olan (ANN) ve (LSTM) tercih edilmektedir.

Keras kütüphanesinden yararlanılarak, ANN modeli için üç bloğa sahip ardışık bir sinir ağı yapısı geliştirilmiştir. Her katmanda, Dense, BatchNormalization ve Dropout katmanları bulunmaktadır. LSTM modelinde ise sadece LSTM, Dropout ve Dense katmanları tercih edilmiştir. Her iki modelin eğitiminde aynı hiper-parametre ayarları kullanılmıştır. ANN için Dropout oranları 0,2-0,3 ve 0,4 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon için RMSprop kullanılmıştır (Hinton vd., 2012). Toplamda 500 Epok süresince model eğitilmiştir. Eğitim başlangıcında learning rate 0,001 olarak atanmış ve learning rate scheduling yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, eğer 70 Epok boyunca performansta belirgin bir artış gözlenmezse, learning rate değeri 0,3 oranında azaltılarak modelin daha iyi öğrenmesi sağlanmıştır. Batch-size olarak 128 ve aktivasyon fonksiyonu relu seçilmektedir.

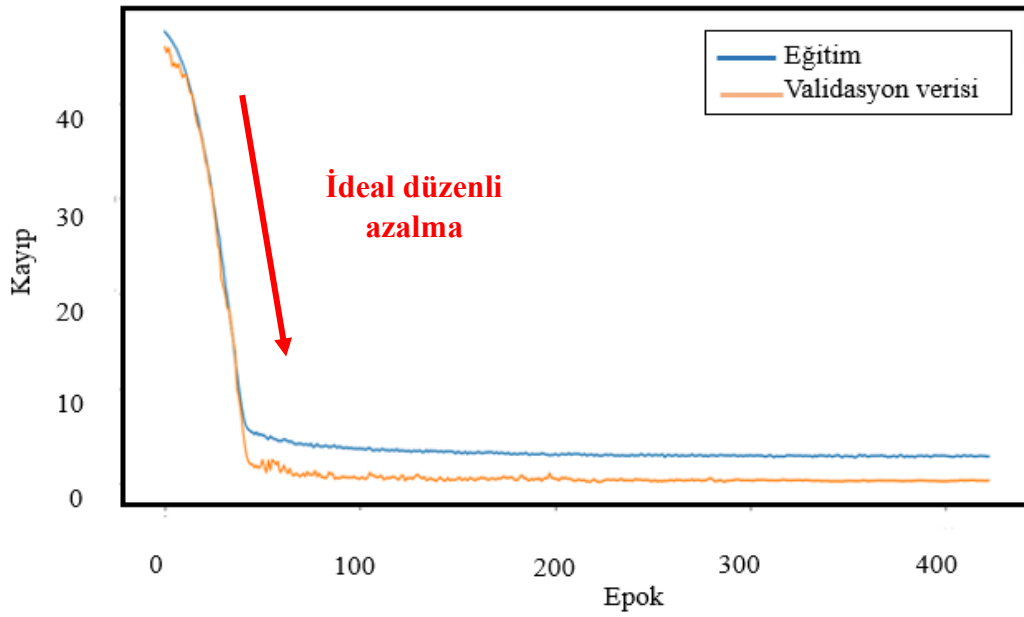
Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 128)	640
batch_normalization (Batch Normalization)	(None, 128)	512
dropout (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 256)	33024
batch_normalization_1 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dropout_1 (Dropout)	(None, 256)	0
dense_2 (Dense)	(None, 128)	32896
batch_normalization_2 (Batch Normalization)	(None, 128)	512
dropout_2 (Dropout)	(None, 128)	0
dense_3 (Dense)	(None, 1)	129

Total params: 68737 (268.50 KB)		
Trainable params: 67713 (264.50 KB)		
Non-trainable params: 1024 (4.00 KB)		

None		

Şekil 5.6. ANN modeli tasarımı

Kullanılan ANN modelinin tüm katmanlarını ve detayları Şekil 5.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, iç Dense katmanlarda sırasıyla 128, 256 ve 128 filtre kullanılmıştır. Regresyon problemi olduğundan, modelden tek bir çıktı beklenmektedir. ANN modeli toplamda 68737 parametreden oluştuğu görülmektedir. Filtre sayısı ve katmanların uygun seçimi, veri seti özelliklerini etkilemektedir. Yapılan makine öğrenme analizlerinin sonuçları incelenerek LSTM modeli ile karşılaştırıldığında, ANN modelinin daha iyi öğrendiği belirlenmiştir. Bu durumda ANN modelinin veri setindeki karmaşıklıkları daha etkili bir şekilde yakaladığı ve daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağladığı görülmektedir.

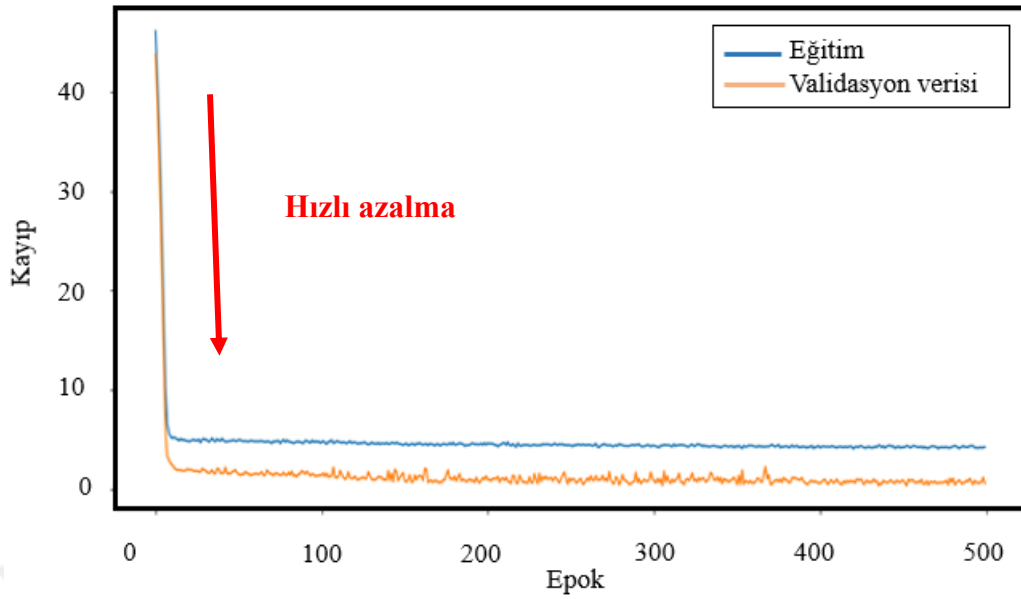


Şekil 5.7. ANN kayıp grafiği

Şekil 5.7’de modele ait Epok başına öğrenme aşamalarını göstermek için Epok-Kayıp grafiği verilmiştir. İdeal durumda, kayıp değerleri her Epok’ta azalmalıdır, bu da modelin daha iyi öğrenerek daha doğru tahminler yapmaya başladığını gösterir. Eğitim ve validasyon verileri arasındaki kayıp farkının az olması modelin daha iyi öğrendiğini göstermektedir. Şekil 5.8’de LSTM modeline ait tasarım verilmektedir. ANN modeli ile karşılaştırıldığında LSTM modelinde ezberleme (overfitting) problemi görülmektedir. Modelin ara katmanlarında 128’lik filtreler kullanmıştır ve toplamda 84737 parametreden oluşmaktadır. Regresyon problemi olması nedeniyle modelden tek bir çıktı beklenmektedir.

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 1, 128)	68096
dense_4 (Dense)	(None, 1, 128)	16512
dropout_3 (Dropout)	(None, 1, 128)	0
dense_5 (Dense)	(None, 1, 1)	129
=====		
Total params: 84737 (331.00 KB)		
Trainable params: 84737 (331.00 KB)		
Non-trainable params: 0 (0.00 Byte)		
None		

Şekil 5.8. LSTM modeli tasarımı



Şekil 5.9. LSTM kayıp grafiği

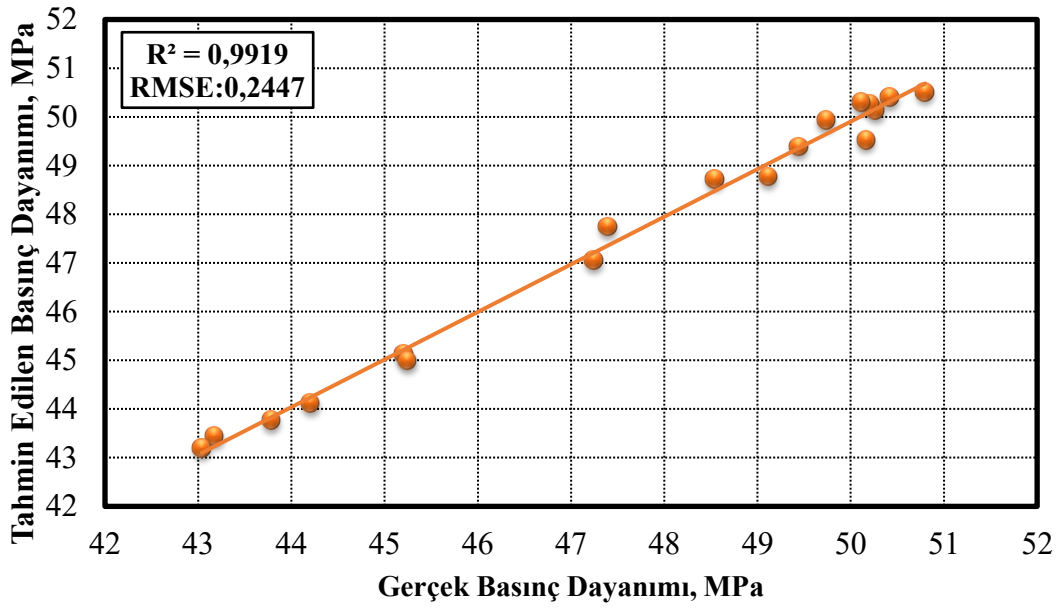
Şekil 5.9'da LSTM kayıp grafiği verilmektedir. Derin Öğrenme sistemleri, uygun eğitimle, özellikleri çıkarmadan birincil veya ham girdilerden hedef çıktılara doğrudan eşleme yapabilmektedir. Ayrıca, yüksek seviyeli özellikleri açıklayan bir hiyerarşi olarak basit öğrenilmiş özellikleri tanımlayabilmektedir. Bu yetenek, karmaşık görevleri daha basit problemlere ayırıp çözme yeteneğine sahiptir (Moein vd., 2023). Çizelge 5.11. Derin Öğrenme-ANN modeli sütun ağırlıkları verilmektedir. Kullanılan malzemelere göre oranlar belirlenmiştir. Çizelge 5.12 derin öğrenme-LSTM modeli sütun ağırlıkları gösterilmektedir.

Çizelge 5.11. Derin Öğrenme ANN modeli sütun ağırlıkları

Parametre	Ağırlık
Çimento	0,021
İnce Agregat	0,007
Su	0,027
İnhibitör	0,820

Çizelge 5.12. Derin Öğrenme LSTM modeli sütun ağırlıkları

Parametre	Ağırlık
Çimento	0,360
İnce Agregat	0,069
Su	0,024
İnhibitör	0,820

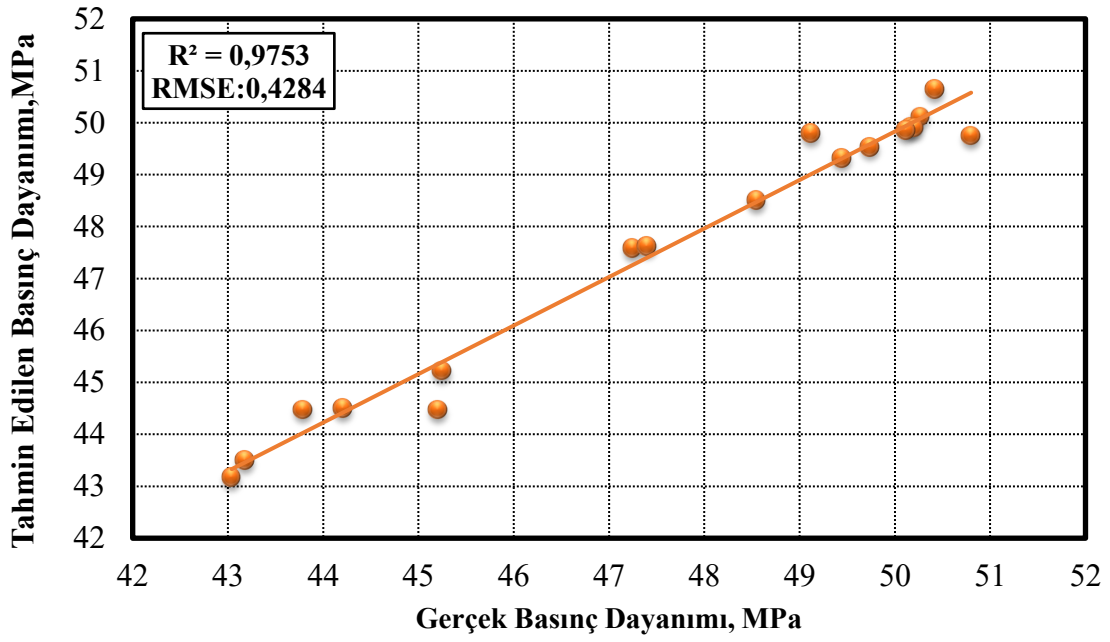


Şekil 5.10. Derin Öğrenme ANN grafiği

Öngörülen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon bağlantısı Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Bir değerlendirme yapılması durumunda, tahmin edilen verilerin gerçek verilere yakın olması beklenmektedir. Basınç dayanımı verilerinin düşük hata oranıyla, gösterilen diyagonal çizgi etrafında toplanması beklenmektedir. İdeal bir senaryoda, tahmin edilen değerlerin bu diyagonal çizgiye ne kadar yakın olduğu, modelin tahminlerinin doğruluğunu göstermektedir. Çizelge 5.13’de Derin öğrenme ANN tahminleri verilmektedir. Verilen tahmin değerleri incelenmektedir. İncelemede derin öğrenme algoritmasından olan ANN yapısı bir tahmin modeli oluşturulduğunda; determinasyon katsayısının R^2 değerinin 0,9919 olduğu bulunmuştur. Ayrıca uygulanan ANN modelinde hesaplanan kök ortalama kare hatası değerinin (RMSE) 0,2447 olduğu belirlenmektedir.

Çizelge 5.13. Derin öğrenme ANN tahminleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr
İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr	İnce Agregat	1340,29 gr
Su	225 ml	Su	225 ml	Su	225 ml
İnhibitör	0 gr	İnhibitör	4,5 gr	İnhibitör	9 gr
Dayanım Tahmini	48,17 MPa	Dayanım Tahmini	47,76 MPa	Dayanım Tahmini	46,86 MPa



Şekil 5.11. Derin Öğrenme LSTM grafiği

Tüm modeller arasında en yüksek korelasyon değeri ANN tarafından elde edilmiştir. Tüm girdilere ait içerik oranları sabit tutularak inhibitör değeri arttırıldıkça, numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Öngörülen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon bağlantısı Şekil 5.11'de gösterilmektedir. İdeal bir modelde, elde edilen tahmin değerlerinin diyagonal doğrusal çizgiye yakın olması, modellerin ürettiği tahminlerin doğruluğunu arttırmaktadır. Çizelge 5.14'de verilen tahmin değerleri incelediğinde derin öğrenme algoritmasından olan LSTM yapısı kullanılarak bir tahmin modeli oluşturulduğunda; determinasyon katsayısının yani R^2 değerinin 0,9753 olduğu bulunmuştur. ANN modelinde olduğu gibi diğer girdiler sabit tutularak, inhibitör oranlarının artırılması sonucunda basınç dayanımı tahminlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.14. Derin Öğrenme LSTM tahminleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr	Çimento	450,71 gr
İnce Agreg	1340,29 gr	İnce Agreg	1340,29 gr	İnce Agreg	1340,29 gr
Su	225 ml	Su	225 ml	Su	225 ml
İnhibitör	0 gr	İnhibitör	4,5 gr	İnhibitör	9 gr
Dayanım Tahmini	48,78 MPa	Dayanım Tahmini	49,19 MPa	Dayanım Tahmini	44,63 MPa

Çizelge 5.15’de görüldüğü gibi, makine öğrenimi deneylerinde, inhibitör numunelerin gerçek ve tahmini basınç dayanım değer verileri arasındaki ilişkiyi göstermek için beş adet model kullanılmıştır. Modelleri performansı R^2 ve RMSE iki metrik cinsinden ifade edilmiştir. Bu iki metrik ölçüsü arasında paralel bir ilişki olduğu gözlenmektedir. Modeller başarı sırasına göre sıralandığında listenin en başında Derin Öğrenme-ANN modelinin R^2 değerinin 0,9919 olduğu ve RMSE değerinin 0,2447 olduğu görülmektedir. Bu modelin diğerlerine göre daha doğru tahminlerde bulunduğu belirlenmektedir. ANN modeline Karar Ağacı modelinin R^2 değeri 0,9800 alarak yakın olduğu görülmektedir. Tahmin sıralamasında doğrusal modelinin R^2 değerini 0,8741 ve RMSE’nin 0,9680 ile en az değer olduğu belirlenmektedir. Modellerden elde edilen veriler incelendiğinde sonuçlara göre R^2 değerinin artması ile gerçek değerlere en yakın doğru tahmin modeli bulunmaktadır.

Çizelge 5.15. ML ve DÖ modelleri ile gerçek-tahmini basınç dayanımlarının karşılaştırması

Model Tipi	Çimento gr	İnce Agr., gr	Su, ml	İnhibitör gr	R^2	RMSE	Tahmin, MPa	Gerçek, MPa	Hata, %
Doğrusal model	450,71	1340,29	225	0	0,8741	0,9680	52,00	50,14	0,04
				4,5			48,48	48,78	-0,01
				9			44,96	44,11	0,02
Gradyan Artırma model	450,71	1340,29	225	0	0,9752	0,4298	48,10	50,14	-0,04
				4,5			47,89	48,78	-0,02
				9			44,92	44,11	0,02
Karar Ağacı Modeli	450,71	1340,29	225	0	0,9800	0,3861	49,74	50,14	-0,01
				4,5			48,08	48,78	-0,01
				9			44,21	44,11	0,00
Derin Öğr, -ANN	450,71	1340,29	225	0	0,9919	0,2447	48,17	50,14	-0,04
				4,5			47,76	48,78	-0,02
				9			46,86	44,11	0,06
Derin Öğr, -LSTM	450,71	1340,29	225	0	0,9753	0,4284	48,78	50,14	-0,03
				4,5			49,19	48,78	0,01
				9			44,63	44,11	0,01

5.3. Sürdürülebilirlik analizi

Enerji verimliliği, inşaat sektöründe gün geçtikçe önemi artan konulardan biri haline gelmiştir. Sürdürülebilirlik kapsamında, gömülü enerji kavramı önemli bir rol oynamaktadır. Gömülü enerji, bir ürünün üretimi için kullanılan hammaddelerin çıkarılması ve taşınması süreçlerinde tüketilen enerjiyi ifade etmektedir. Ürünün üretim, taşıma ve diğer aşamalarındaki çevresel etkileri değerlendirirken, gömülü karbon terimi de malzemenin üretim aşamalarında atmosfere salınan sera gazı miktarını belirtmektedir. Diğer endüstri alanları ile karşılaştırıldığında, inşaat sektörü devam eden sürdürülebilirlik tartışmalarından daha fazla etkilenmektedir (Topcu ve Sofuoğlu, 2021). Sürdürülebilirlik araştırmalarında çimento ve beton üretim süreçlerinde ortaya çıkan CO₂ salınımı nedeniyle yoğunlaşmaktadır. Beton üretimindeki kimyasal katkı maddeleri, taze beton özelliklerini etkileyerek dayanıklılığı ve işlenebilirliği artırırken, çevreye olumsuz etkilerini de artırmaktadır (Ozcelik vd., 2013).

$$E_f = \text{Gömülü Enerji (MJ/Ton)} / f_c \quad (5.5)$$

$$C_f = \text{Gömülü CO}_2 \text{ (kg CO}_2\text{/ton)}/f_c \quad (5.6)$$

Betonun sürdürülebilirliğini artırmak ve yeşil-ekolojik beton geliştirmek amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler, geri dönüştürülmüş malzemelerin beton karışımlarında kullanılması, uygun karışım tasarımının belirlenmesi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması gibi unsurları içermektedir. Sonuç olarak, çevresel etkileri değerlendirirken çevresel yük, emisyonlar, enerji tüketimi ve kaynak kullanımı önemli kriterler haline gelmektedir. Bu nedenle, betonun sürdürülebilir gelişimi endüstrinin genelinde artan bir ilgi görmektedir (Long vd., 2015). E_f ve C_f üretilen numunelerin sürdürülebilirlik analizi için kullanılmıştır. E_f değeri enerji parametresini belirtirken, C_f değeri ise CO₂'yi temsil etmektedir. Bu değerleri hesaplamak için iki denklem (5.5-5.6) kullanılmıştır. Denklemdeki belirtilen f_c (MPa) değeri 28 günlük basınç dayanımını temsil etmektedir (Chiaia vd., 2014). Çimento üretiminde CO₂ emisyonlarını azaltmak, sürdürülebilirlik açısından önemli olmaktadır. Uygulanan stratejilerden biri, enerji kullanımını azaltmayı hedefleyen modifiye Portland çimentolarının geliştirilmesidir. Ancak, CO₂ oranının azalması için bazı teknolojiler cazip olmasına rağmen, ekonomik açıdan uygun olmamaktadır. Maliyet etkinliğini artırmak için araştırmalara ve yeniliklere ihtiyaç olmaktadır (Monteiro vd., 2017).

Bu çalışma, sürdürülebilirlik araştırması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Gömülü enerji ve gömülü CO₂ değerleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin değerleri, Çizelge 5.16'da ton başına gömülü enerji ve CO₂ değerleri olarak gösterilmiştir. Çizelge 5.17'de verilen E-enerji ve E-CO₂ değerleri literatür araştırmalarından yararlanılarak bulunmuştur. Sürdürülebilir verimlilik analizi için çalışmada standart kür koşullarında bekletilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.16. E-enerji ve E-CO₂ analiz değerleri

Malzeme	E-enerji (Mj/ton)	E-CO ₂ (kg CO ₂ /ton)	Kaynak
Çimento	4800	930	(Sobuz vd., 2023)
Su	5,7	0,318	(Chiaia vd., 2014)
İnce agrega	1140	6,11	(Müller vd., 2014)
KN	2130,23	121,61	(Uzunömeroğlu, 2023)
Bİ	3812,76	0,23	(Uzunömeroğlu, 2023)

Kalsiyum nitrit içeren korozyon inhibitörlerinin kullanıldığı seride sürdürülebilirlik analizinde KİH1 numunesinin E_f ve C_f değerinin en düşük olduğu görülmüştür. E_f değeri İH0'a göre %4,19 olduğu belirlenmiştir. C_f değeri de İH0'a göre %4,48 oranında daha verimli olduğu hesaplanmıştır. Kalsiyum nitrit içerikli inhibitör miktarının %2 oranında kullanıldığı seride sürdürülebilir verimlilik inhibitörsüz numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum dayanım karşısında uygulanan karışım oranlarının yeterli verimlilikte olmadığını göstermektedir. Aynı şekilde bor içerikli inhibitör serilerinde de bu durum verimlilik yönünde yeterli görülmemektedir. Bunun nedeni bor içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının inhibitör kullanılmayan seriden daha düşük olmasıdır.

Çizelge 5.17. Üretilen numunelerin sürdürülebilir verimlilik analizi

Numuneler	E-enerji (Mj/ton)	E-CO ₂ (kg CO ₂ /ton)	E _f (Mj/ton. MPa)	C _f (kg CO ₂ / ton. MPa)
İH0	4978,09	536,98	99,28	10,71
KİH1	5012,13	538,92	95,12	10,23
KİH2	5046,17	540,86	101,17	10,84
BİH1	5065,13	536,99	106,54	11,30
BİH2	5152,17	536,99	112,03	11,68

5.4. Literatürdeki Diğer Sonuçlarla Karşılaştırma

Korozyon inhibitörleri ile ilgili literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Genellikle betonarme yapıda donatı korozyonu incelendiği için beton dayanımları değerlendirilmiştir. Çizelge 5.18’de literatürde uygulanan çalışmalarda kullanılan çimento tipleri, s/ç oranları, agresif ortamlar, inhibitör miktarı ve uygulanan deneyler bulunmaktadır.

Çizelge 5.18. Literatürde yapılan çalışmalar ve dayanım sonuçları

No	Tip	Karışım Oranları				Korozyon Deneyleri	Standart kür Basınç Day. MPa	Kaynak
		Bağlayıcı Tipi	s/ç	İnh.	Miktar			
1	H	CEM I 42,5	0,50	KN, AA, Bİ	1/2	-	52,69/49,88 48,78/44,11 47,54/45,99	Bu çalışma (Kara, 2024)
2	B	CEM I 42,5 R	0,50	KN	20 l/m ³	YHPD, HKGD, ACD	28 gün 38,10 90 gün 39,70	(Uzunömeroğlu, 2023)
3	B	CEM I 42,5R	0,50	Bİ	20l/m ³	YHPD, HKGD, ACT	28 gün 38,8 90 gün 40,7	(Uzunömeroğlu, 2023)
4	H	OPC	0,35 0,55	KN	0,5/1/2 0,5/1/2	D-Ç Hava ölçümü	~ 75/~76/~75 ~45/~47/~40	(Honda vd., 2021)
5	B	OPC PPC	0,46 0,44	KN	2/5	HKGD	45,85/46,37 44,44/40,89	(Satish ve Ravindra, 2021)
6	B	CEM I 42,5 R YFC (25) YFC (50)	0,50	KN	10-20 l/m ³	YHPD, HKGD, HKD	38,69/42,30 41,34/37,72 33,20/31,72	(Boğa, 2010)
7	B	OPC -%30 PFA -%65 GGBS	0,45	KN	0/1/2/3	HKGD, HKD	~32/~32/~33/~31 ~28/~29/~29/~28 ~29/~31/~30/~29	(Reou ve Ann, 2008)
8	B	OPC	0,50	KN	0-3 l/m ³	HKGD, HKD	~40	(Ann vd., 2006)
9	H/B	CEM I 42,5	0,50	KN	20 l/m ³	Korozyon direnci	Dayanım azalması %8,93 (NaCl)	(Batis ve Sideris, 2004)
10	B	CEM I 42,5 R CEM III/A 42.5 LA	0,45	KN	5 l/m ³	HKGD, HKGD, ACD	47,6 47,1	(De Schutter ve Luo, 2004)
11	B	CEM II 32.5R (Type V)	0,42	KN	20 l/m ³	YHPD Ağırlık kaybı	55,18 57,82	(Sideris ve Savva, 2005)
12	B	ASTM C 150 Type V PC	0,45	KN	0/2/4	Korozyon direnci	~28/~29	(Al-Amoudi vd., 2003)

B: Beton; H: Harç; İnh.: İnhibitör; YHPD: Yarı hücre potansiyel deneyi
HKGD: Hızlı klorür geçirimsliliği deneyi; HKD: Hızlandırılmış korozyon deneyi

Literatür araştırmalarında (2) ve (3) numarada kalsiyum nitrit ve bor içerikli inhibitör kullanımı (20 l/m^3) sonuçları verilmektedir. Standart kür koşulunda 15 cm boyutlu beton küp numuneler 28 ve 90 gün bekletilmiştir. Çalışmanın sonunda Bİ kullanılan serilerinde dayanım almaya devam ettiği görülmektedir. Bu artış 28/90 gün için %4,90 oranında olduğu belirlenmiştir (Uzunömeroğlu, 2023). Bu çalışmada, KN ve Bİ içerikli inhibitörler harç numunelerinde kullanılmış ve dolayısı ile uygulanan inhibitör oranı çimento dozajının %1 ve %2 olacak şekilde değerlendirilmiştir. Harç numunelerde de dayanım gelişiminde olumsuz bir etki görülmemiştir. Dayanım artışı Bİ kullanılan numunelerde 28/90 gün arasında %1 kullanılması %1,88 oranında, %2 kullanılması ise %1,90 oranında değer elde edilmiştir. Beton numunelerde bor içerikli korozyon inhibitörlü serilerde görülen artışın nedeni karışımın içinde iri agrega ve inhibitör miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.18 (4) numaralı çalışma harç numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İki farklı su/çimento oranında değerlendirilen çalışmada KN inhibitörü %0,5-2 aralığında uygulanmıştır. Karışımlarda uygulanan su/çimento oranına (0,35-0,55) bağlı olarak dayanım değerleri düşmekle beraber %1 oranında kullanılmasının diğer oranlara göre daha uygun olduğu deney sonuçlarında görülmüştür (Honda vd., 2021). Mevcut çalışmada (1) ise su/çimento oranı 0,50 alınmakla birlikte farklı iki oran (%1-%2) değerlendirilmiştir. Yapılan basınç dayanımı deneylerinde 28 günlük sonuçları benzer şekilde %1 oranında kalsiyum nitrit inhibitörlü numunelerde en yüksek dayanım değerinin elde edildiği görülmüştür. Ayrıca standart kür koşulunun devamlılığında (180 gün) %1 oranı daha yüksek olmuştur.

Inhibitör kullanımının donma-çözülme çevrimlerindeki etkilerinin araştırılmasında koşullar ($-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bir çevrimin 4 saat olacağı şeklinde planlanmıştır. İki farklı kür koşulu değerlendirilmiş ve D-Ç çevrim sonuçları incelenmiştir. Standart kür uygulanan numunelerin ağırlık kayıplarının su/çimento oranlarına göre farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir Düşük su/çimento (0,35) oranında KN kullanımında sonuçların benzer olduğu, ancak (0,55) oranında KN kullanımının D-Ç çevrimlerinde ağırlık kaybını azaltma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Honda vd., 2021). Bu çalışmada (1) ise koşullar ($-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bir çevrim 4 saat olacak şekilde düzenlenmiştir. Çalışmanın sonunda KN içerikli inhibitör kullanımının 100 çevrime kadar mevcut koşullarda olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Uygulanan su/çimento oranı, çevrim sayısı ve çevrim koşulları önem oluşturmaktadır. D-Ç çevrimi uygulanan numunelerin boyutu şekil etkisi nedeniyle ayrıca değerlendirilmelidir.

Korozyon inhibitörünün farklı çimento tipleri ve mineral katkılarla birlikte kullanımının etkileri de yapılan araştırmalar arsında yer almaktadır. Çizelge 5.18'de (5) çalışmada iki farklı çimento tipi (OPC- PPC) iki farklı korozyon inhibitörü kullanımı ile incelenmiştir. İnhibitörler kalsiyum nitrit içerikli ve amino alkol içerikli olmak üzere iki farklı oranda (%2-5) değerlendirilmiştir. Standart çimento ile yapılan çalışmada ise amino alkol içerikli inhibitör kullanılan numunelerin KN kullanılanlardan dayanımlarının daha düşük olduğu görülmüştür. KN kullanılan numuneler ile karşılaştırıldığında bu oran farkı, %2 inhibitör kullanımında %7,11 ve %5 inhibitör kullanımında %6,05 olmaktadır (Satish ve Ravindra, 2021). Mevcut çalışmada (1) AA içerikli numuneler KN inhibitörlü numunelerden daha az dayanım almıştır. Bu oranlar KN kullanılan numunelere göre %1 inhibitör kullanımında %7,42 oranında ve %2 kullanımında %11,56 oranında dayanım farkı olmuştur.

Çizelge 5.18'de (6) numaralı çalışmada CEM I 42,5 R çimentosu ile %25-50 oranında YFC kullanılan beton tasarımında kalsiyum nitrit içerikli inhibitör 10-20 lt/m³ değerlerinde kullanılmıştır. YCF kullanılmayan numunelerde KN oranı artması ile dayanımlar %9,33 oranında artmıştır (Boğa, 2010). UK ve YFC kullanımın değerlendirildiği KN kullanılan beton numuneler incelendiği çalışma (7) numarada verilmektedir. Beton numuneleri %30 UK ve %65 YFC kullanılarak üretilmiştir. Sabit s/ç oranında KN miktarı %0, %1, %2 ve %3'ü oranında eklenmiştir. KN kullanılan numunelerde inhibitör miktarına bağlı olarak dayanımların birbirine yakın olduğu belirlenmiştir (Reou ve Ann, 2008). Mevcut çalışma (1) karşılaştırıldığında her iki araştırma içinde genel olarak KN kullanımının CEM I 42,5 R çimentolu karışımlarda olumsuz etki oluşturmamış olduğunu söylemek mümkün olmaktadır.

Başka bir çalışmada (8), 3 lt/m³ dozunda kalsiyum nitrit içerikli inhibitör kullanımı sonucu basınç dayanım değerleri 7, 28, 60 gün ve uzun vadeli (900 gün) olarak gözlemlenmiştir. Kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörü kullanılan beton numunelerinin basınç dayanımı sonuçları kontrol betonuyla karşılaştırılmıştır. Standart kür koşulunda bekletilen numune yaşları 60 günde kontrol numunesinden daha yüksek olduğu, ancak 900 günde bir azalma olduğu gözlemlenmiştir (Ann vd., 2006). Mevcut çalışmada (1) toplamda 208 gün (28+180) standart kür koşulunda bekletilen numunelerde dayanım artışının devam ettiği görülmüştür. İnhibitör kullanılmayan numune ile karşılaştırma yapılması halinde %1 kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörü içeren numunede 208 gün sonunda %1,72 oranında ve %2 KN'de ise %1,05 oranında daha fazla dayanım alınmıştır.

Çizelge 5.18'deki (9) numaralı kaynakta, KN miktarı 20 lt/m³ olarak kullanılmış ve farklı agresif ortamlarda beklenilmiştir. Bu çalışmada, 1 yılın sonunda KN kullanılan numunelerin agresif ortam koşullarında boyca (%) genleşme ve basınç dayanımı sonuçları değerlendirilmiştir. Boyca genleşmelerin incelendiği agresif ortamlarda NaCl ve Sülfat etkisi birlikte değerlendirilmiştir. Agresif ortam koşulları oluşturulurken SO₄⁻ ve Cl⁻ iyonlarının oluşturacağı konsantrasyon sabit tutularak Na ve Mg etkisi araştırılmıştır. Boyca uzamalarda %5 Na₂SO₄ etkisinde %0,089 ve %4,24 MgSO₄ etkisinde %0,073 oranları bulunmuştur. Belirlenen dayanım kayıpları ise Na₂SO₄ etkisinde %12,86 ve MgSO₄ etkisinde %35,71 olarak kaydedilmiştir. Değerlendirilen çalışmada %5 NaCl etkisi ile belirlenen basınç dayanım kaybı %8,93 oranında gözlemlenmiştir (Batis vd., 2004). Mevcut çalışmada (1) %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ etkisinde numuneler 52 hafta süre ile bekletilmişlerdir. KN inhibitörünün %1 ve %2 oranında kullanıldığı numunelerde ayrı ayrı her iki sülfat etkisinde de %0,005 ve %0,006 oranlarında boyca (%) uzamalar görülmüştür.

Yapılan tez çalışmasında, %5 Na₂SO₄ etkisinde incelenen numunelerin boyca uzama oranlarına dair dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, 52. hafta sonunda %1 KN kullanılan numunelerde %0,005 ve %2 KN kullanılan numunelerde %0,006 oranları bulunmuştur. İnhibitör kullanılmayan kontrol numunesinde %0,007 oranında uzama değeri bulunmuştur. Bu sonuçlar, kalsiyum nitrit içerikli numunelerin uzama özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Kontrol numunesi ile Sülfat etkisini ayrıca arttırıcı bir reaksiyon gelişmemiştir. Basınç kayıpları ise %5 Na₂SO₄ etkisinde 180 gün sonunda eş zamanlı olarak standart kür uygulanan numuneler ile karşılaştırıldığında %0,24 ve %4,62 olarak kaydedilmiştir. Ayrıca diğer agresif ortam koşulu olan sodyum klorür etkisindeki dayanım kayıpları sırası ile %2,93 ve %2,62 oranlarında olduğu bulunmuştur.

Beton numuneleri üretilen CEM I 42.5R ve CEM III/A tipi çimentoların kullanıldığı ve 5 lt/m³ miktarında KN-AA inhibitörlerinin kullanılan çalışmada (10) kontrol numunelerle karşılaştırılmıştır. Amino alkol içerikli inhibitör kullanılan numunelerin kontrol numunelere göre 28 günlük basınç dayanım değerlerinin %13,92 oranında düşük olduğu ve KN kullanılanlarda %0,42 oranında fazla olduğu görülmüştür (De Schutter ve Luo, 2004). Mevcut çalışmada kalsiyum nitrit içerikli korozyon inhibitörü kullanılan numunelerin 28 günlük standart kür kolunda bekletilmesi sonucu basınç dayanımlarının amino alkol içerikli korozyon inhibitörlerine göre daha fazla dayanım değeri aldığı daha öncede belirtilmiştir.

Farklı çimento tipleri ile KN içerikli numunelerin bulunduğu çalışmalar (11) literatürde araştırılmıştır. İki farklı Portland çimento (Tip I ve Tip V) ile 20 lt/m³ KN kullanımı sonucu, KN içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanımları inhibitörsüz numunelere göre %2,84 oranında daha fazla olmuştur (Sideris ve Savva, 2005). Korozyon inhibitörü kullanılan beton numunelerde %2 ve %4 oranında kullanılmasının dayanım gelişimine olumsuz etkisinin olmadığı belirtilen çalışmada (12), %4 oranında KN kontrol numunesinden yüksek çıkmıştır (Al-Amoudi vd., 2003). Standart kür koşullarında bekletilen KN inhibitörünün %1 ve %2 oranlarında kullanılması ile dayanım gelişimine olumsuz etkisi olmadığı görülmüştür. Çalışmanın devamında 180 günlük kür süresi boyunca dayanım artışları gözlemlenmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri artmıştır. Her iki literatür sonuçlarının mevcut çalışma ile uyumlu olduğu herhangi bir olumsuz sonuç oluşturmadığı görülmüştür.

Literatür incelendiğinde organik, inorganik ve yeşil-çevreci korozyon inhibitörleri farklı miktarlarda beton ve harç numunelerde kullanılmıştır. Karışımlarda su/çimento oranları farklı olmakla birlikte basınç dayanımı sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir. Mevcut çalışma ile literatür araştırma sonuçları arasında çeşitli farklılıklar dikkat çekmektedir. Bunlar; uygulanan numunenin boyutu, kür koşulları ve bağlayıcı miktarları olarak sıralanmaktadır. Çalışmasında numuneler 28 gün standart kür uygulandıktan sonra agresif ortam koşulları etkisinde bırakılmış ve agresif ortam etki süresi 180 gün ile sınırlandırılmıştır. Literatür ile karşılaştırma yaparken agresif ortam etki süresi, numune boyutu, agresif ortamda başlangıç dayanımı, çözelti oranı gibi farklılıklar olabilmektedir. Bu özellikler dikkate alınarak karşılaştırmaların yapılması daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Genel olarak yapılan araştırmalarda optimum dozaj kullanımı ile korozyon inhibitörlerinin basınç dayanım gelişimi devam etmektedir. Agresif ortam koşullarında etkileri arttırmaya yönelik ayrıca olumsuz bir katkısının olduğu belirtilmemiştir. Bu bulguların literatürdeki mevcut bilgilere uygun olduğu ve korozyon inhibitörleri ile ilgili gelişmelere katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu bulgular, mevcut literatürdeki bilgilerle uyumlu olarak görülmektedir ve korozyon inhibitörlerinin gelişimi konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, agresif ortamlarda kalan inhibitör kullanılmış beton ve harç numunelerinin tasarımında inhibitör seçiminin etkilerini daha derinlemesine anlamak için önemli bir referans noktası sağlamaktadır. İnhibitör kullanımlarının harç ve betonda dayanıklılığının değerlendirilmesi konusunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Betonarme yapılarda donatı korozyonunu önlemede kullanılan korozyon inhibitörlerinin harç yapılarına olan etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında inorganik (kalsiyum nitrit, KN), organik (amino alkol, AA) ve toksisitelerinin daha az olması nedeniyle son zamanlarda tercih edilen yeşil-çevreci (bor içerikli, Bİ) inhibitörleri uygulanmıştır. İnhibitörler %1-%2 oranında kullanılan ve inhibitör kullanılmayan kontrol numunesi (İH0) ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.1’de inhibitör kullanılan numunelerin uygulanan deney sonuçlarının kontrol numunesi ile karşılaştırması özet olacak şekilde verilmektedir. Belirtilen işaretler kontrol numunesinden fazla ya da daha az değer aldığını belirtmektedir.

Çizelge 6.1. İnhibitörlerin harç özelliklerine etkilerini gösteren sonuç özeti

Özellik	İnhibitörün Özeliğe Etkisi		
	Kalsiyum Nitrit, KN	Amino Alkol, AA	Bor İçerikli, Bİ
Priz Başlangıcı	↓	↓	↑
Yayılma	↑	↑	↑
Taze Harç Birim Hacim Ağırlığı	↑	↑	↑
Standart kür Basınç Dayanımı	↕	↓	↓
Standart kür (180 gün BD)	↑	↑	↕
%5 MgSO ₄ Basınç Dayanımı	↑	↓	↓
%5 Na ₂ SO ₄ Basınç Dayanımı	↑	↑	↓
%5 NaCl Basınç Dayanımı	↑	↑	↓
%5 MgSO ₄ (Uzama)	→	→	→
%5 Na ₂ SO ₄ (Uzama)	→	→	→
ASR (Uzama)	→	→	→
D-Ç (100) Dayanım Kaybı	↓	↓	↓

Sonuç olarak inhibitör kullanımının hidrasyon sürecinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Dayanım gelişimleri 28 gün sonrasında da devam ettiği görülmüştür. Agresif ortam koşulları 180 gün ile sınırlandırılarak değerlendirilmiştir. Sülfat etkisinde ($MgSO_4-Na_2SO_4$) inhibitör kullanımının dayanım kaybını hızlandırıcı etkisi görülmemiştir. AA içerikli numunelerde 180 güne kadar dayanım artışı gözlemlenmekle beraber artış oranı azalmıştır. Sürecin devamında dayanım kayıplarının görüleceği düşünülmektedir. İnhibitör kullanımının sülfat etkisinde kontrol numunesine göre boyca uzamaya ayrıca katkısı olan reaksiyonlar geliştirmediği düşünülmektedir. Sonuçlar kontrol numunesine göre daha az oranda belirlenmiştir. Sodyum klorür etkisinde Bİ numunelerinde 180 gün sonunda dayanım kayıpları belirlenmiştir. AA ve KN inhibitörlerinin klorür etkisinde yüksek dayanım almıştır. Bİ numunelerinde s/ç oranı değişikliği ile daha iyi sonuçlar alınacağı düşünülmektedir.

ASR etkisinde kontrol numunesine göre karşılaştırıldığında inhibitör kullanımını (KN, AA, Bİ) alkali silika jellerinin oluşumunu daha fazla arttırmadığı gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimlerinde inhibitörlerin hava sürükleyici etki göstermemesinin yanı sıra daha az dayanım ve ağırlık kaybı dikkat çekmektedir. İnhibitör kullanılması daha homojen ve boşluksuz yapıların oluştuğu ve suyun iç yapıya ulaşmasının daha az olduğunu düşünülmektedir. En iyi sonuç %1 KN kullanımında görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerinin arttırılması ile TS EN 206'da yer alan XF1-XF3 çevre etki sınıfına uygun uygulanma alanlarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Mikro yapı çalışmalarında XRD, FE-SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında görülen fazların ve görüntülerin deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan analizde %1 KN kullanımının sürdürülebilir verimliliği için en uygun değer olduğu belirlenmektedir.

Gelecek çalışmalar için, 360 gün boyunca aynı agresif ortam koşullarının etkilerinin takip edilmesi ve asit etkisi, karbonatlaşma gibi çeşitli agresif ortamlarda inhibitör kullanımının harç yapısındaki etkilerinin değerlendirilmesi önerilmektedir. İnhibitör oranlarının artırılması ile dayanıklılık deneylerinden bir diğeri olan D-Ç çevrimlerinin arttırılarak dayanım ve ağırlık kayıplarının incelenmesi uygun olacaktır. Ayrıca aynı agresif ortam koşullar uygulanarak farklı su/çimento oranlarıyla ve inhibitör miktarlarının değiştirilmesi ile dayanıklılık etkileri incelenebilir. Böylece mevcut sonuçlarla elde edilen bulgulara daha fazla cevap verebilme olanağı sunacaktır. Belirtilen bu önerilerin literatüre önemli katkı sağlayarak ilerleyen çalışmalarda yararlı olacağı şeklinde düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdulrahman, A.S., Ismail, M. (2012). *Evaluation of Corrosion Inhibiting Admixtures for Steel Reinforcement in Concrete*. International Journal of Physical Sciences, 7(1), 139-143. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.966>
- Abidin, N.Z., Ismail, A.R., Emran, N.A. (2018). *Performance analysis of machine learning algorithms for missing value imputation*. International Jour. of Advanced Computer Science and Applications, 9(6). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090660>
- Ahmed, E.S.J., Ganesh, G.M. (2022). *A comprehensive overview on corrosion in RCC and its prevention using various green corrosion inhibitors*. Buildings, 12(10), 1682. <https://doi.org/10.3390/buildings12101682>
- Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., Lashari, A.N., Almusallam, A.A. (2003). *Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete*. Cement and Concrete Composites, 25(4-5), 439-449. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00084-7)
- Al-Sodani, K.A.A., Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O.S.B., Saleh, T.A., Shameem, M. (2018). *Efficiency of generic and proprietary inhibitors in mitigating corrosion of carbon steel in chloride-sulfate environments*. Scientific Reports, 8(1), 11443.
- Angst, U.M, Büchler, M.M., Schlumpf, J., Marazzani, B. (2016). *An organic corrosion-inhibiting admixture for reinforced concrete: 18 years of field experience*. Materials and Structures, 49(7):2807- 2818.
- Ann, K.Y., Jung, H.S., Kim, H.S., Kim, S.S., Moon, H.Y. (2006). *Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in Concrete*. Cem. & Con. Res., 36(3), 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.003>
- Anonim1: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/62029/mod_resource/content/0/4.%20hafta.pdf Erişim tarihi: 25.03.2024
- Anonim 2: <https://www.investopedia.com/terms/m/mlr.asp> Erişim tarihi: 25.03.2024
- ASTM C1012/C1012M-18b (2019) *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*, ASTM International.
- ASTM C1260-23 (2023) *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, ASTM International.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K.T, Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U. (2015). Beton. Dokuz Eylül Üniv. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, 825 s.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2010). *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. THBB, 318 s.
- Batis, G., Sideris, K.K., Pantazopoulou, P.G. (2004). *Influence of calcium nitrite inhibitor on the durability of mortars under contaminated chloride and sulphate environments*. Anti-Corrosion Methods and Materials, 51(2), 112-120. <https://doi.org/10.1108/00035590410523201>
- Berke, N.S, Rosenberg, A. (1989). *Technical review of calcium nitrite corrosion inhibitor in concrete*, Transportation Research Record no. 1211 Washington, DC: Transportation Research Board; 18-27.
- Berke, N.S., Hicks, M.C. (2004). *Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with calcium nitrite corrosion inhibitor*. Cement and Concrete Composites, 26(3), 191-198. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00038-6)
- Bhatty, J., Taylor, P. (2006). *Sulfate resistance of concrete using blended cements or supplementary cementitious materials* (No. PCA R&D Serial No. 2916a).
- Barbouchi, M., Benzidia, B., Aouidate, A., Ghaleb, A., El Idrissi, M. (2020). *Theoretical Modeling And Experimental Studies of Terebinth Extracts As Green Corrosion Inhibitor for Iron in 3% NaCl Medium*. J. of King Saud University-Science, 32(7), 2995-3004. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.08.004>
- Blankson, M.A., Erdem, S. (2015). *Comparison of the effect of organic and inorganic corrosion inhibitors on the rheology of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 77, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.032>
- Boğa, A.R., (2010). *Yüksek Fırın Cürufu ve Korozyon İnhibitörü Kullanımının Beton İçerisindeki Donatı Korozyonuna ve Beton Özelliklerine Etkileri*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 207 s.
- Chauhan, D.S., Verma, C., Quraishi, M.A. (2021). *Molecular structural aspects of organic corrosion inhibitors: Experimental and computational insights*. Journal of Molecular Structure, 1227, 129374. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129374>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chiaia, B., Fantilli, A.P., Guerini, A., Volpatti, G., Zampini, D. (2014). Eco-mechanical index for structural concrete, *Construction and Building Materials* 67, p. 386-392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.090>
- Craig, R.J., Wood, L.E. (1970). *Effectiveness of corrosion inhibitors and their influence on the physical properties of Portland cement mortars*, 77-88
- Cuma, K., Kütük Sert, T., Kütük, S. (2020). Öğütülmüş kolemanit içeren betonlarda sodyum klorür etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 499-510. <https://doi.org/10.29130/dubited.553523>
- Dariva, C.G., Galio, A.F. (2014). *Corrosion inhibitors—principles, mechanisms and applications*. *Developments in Corrosion Protection*, 16, 365-378.
- De Schutter, G., Luo, L., (2004), *Effect of corrosion inhibiting admixtures on concrete properties*. *Construction and Building Materials*, 18(7), 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.001>
- De Souza, F.S., Spinelli, A. (2009). *Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel*. *Corrosion Science*, 51(3), 642-649.
- Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Şengül, Ç.G. (2018). *Microstructural Evaluation of Cement Mortars with Blast Furnace Slag*, *International Scientific and Vocational Journal (ISVOS)*, V(2)1, 8-18
- Diamanti, M., Ormellese, M., Perez-Rosales, E.V. (2016). *An experimental and theoretical study of the inhibition mechanism of organic substances in concrete*. *Une*, 13(10), 15.
- El Ibrahim, B., Jmiai, A., Bazzi, L., El Issami, S. (2020). *Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys*. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 740-771. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.07.013>
- Gacar, B.K., Kocakoç, İ.D. (2020). *Regression analyses or decision trees? Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(4), 251-260. <https://doi.org/10.18026/cbayarsos.796172>
- Gaidis, J.M. (2004). *Chemistry of corrosion inhibitors*. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 181-189. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00037-4)

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Gece, G. (2011). *Drugs: A review of promising novel corrosion inhibitors*. Corrosion Science, 53(12), 3873-3898. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.006>
- Gerengi, H., Uğraş, H.İ. (2017). *Katyonik Bor İçeren İyonik Sıvıların Korozyon İnhibitörü Olarak Kullanılması ile İlgili Patent Çalışmaları*. Technological Applied Sciences, 12(2), 53-65.
- Ghoreishiamiri, S., Raja, P.B., Ismail, M., Karouei, S.F.H., Forouzani, P. (2021). *Areca Catechu: An Eco-Friendly Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete Structures in Corrosive Mediums*. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 7(1), 1-5.
- Grossberg, S. (2013). *Recurrent neural networks*. Scholarpedia, 8(2), 1888.
- Harb, M.B., Abubshait, S., Etteyeb, N., Kamoun, M., Dhouib, A. (2020). *Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater*. Arabian Journal of Chemistry, 13(3), 4846-4856.
- Hasan, M., Saidi, T. (2021). *The durability of composite cement paste using diatomaceous earth against sodium sulfate attack*. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1933, No. 1, p. 012100). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1933/1/012100>
- Hinton, G., Srivastava, N., Swersky, K. (2012). *Neural networks for machine learning lecture 6a overview of mini-batch gradient descent*. Cited on, 14(8), 2.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J. (1997). *Long short-term memory*. Neural Computation, 9 (8), 1735-1780.
- Honda, D., Quy, N.X., Kim, J., Hama, Y. (2021). *Influence of drying on frost resistance of mortar using a nitrite corrosion inhibitor and paraffin waterproofing agent*. Construction and Building Materials, 283, 122581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122581>
- Işık, Ş., Turgut, B., Anagün, Y., Olgun, M. (2024). *Predicting Soil Quality Index with a Deep Regression Approach*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1-11. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2305838>
- Kalabarige, L.R., Sridhar, J., Subbaram, S., Prasath, P., Gobinath, R. (2024). *Machine Learning Modeling Integrating Experimental Analysis for Predicting Compressive Strength of Concrete Containing Different Industrial Byproducts*. Advances in Civil Engineering, Article ID 7844854, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2024/7844854>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Karakurt, C., Topçu, İ.B. (2011). *Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete*. Construction and Building Materials, 25(4), 1789-1795.
- Królikowski, A., Kuziak, J. (2011). *Impedance study on calcium nitrite as a penetrating corrosion inhibitor for steel in Concrete*. Electrochimica Acta, 56(23). 7845-7853, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.01.069>.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M. (2006). *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*. Cement and Concrete Research, 36(4), 625-633. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>
- Long, G., Gao, Y., Xie, Y. (2015). *Designing more sustainable and greener self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 84, 301-306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.072>
- Louridas, P., Ebert, C. (2016). *Machine learning*. IEEE Software 33(5),110-115. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.114>
- Lu, H., Karimireddy, S.P., Ponomareva, N., Mirrokni, V. (2020). *Accelerating gradient boosting machines*. In International conference on artificial intelligence and statistics (pp. 516-526). PMLR
- Majd, M.T., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B. (2020). *Steel corrosion lowering in front of the saline solution by a nitrogen-rich source of green inhibitors: Detailed surface, electrochemical and computational studies*. Construction and Building Materials, 254, 119266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119266>
- Mechmeche, L.B., Dhouibi, L., Ouezdou, M.B., Triki, E., Zucchi, F. (2008). *Investigation of the early effectiveness of an amino-alcohol based corrosion inhibitor using simulated pore solutions and mortar specimens*. Cement & Concrete Composites, 30(3), 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.007>
- Moein, M.M., Saradar, A., Rahmati, K., Mousavinejad, S.H.G., Bristow, J., Aramali, V., Karakouzian, M. (2023). *Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: A review*. Journal of Building Engineering, 63, 105444. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105444>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Monteiro, P.J., Miller, S.A., Horvath, A. (2017). *Towards sustainable concrete*. Nature Materials, 16(7), 698-699
- Montes, P., Bremner, T.W., Lister, D.H. (2004). *Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment*. Cement and Concrete Composites, 26(3), 243-253, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00043-X)
- Müller, H.S., Haist, M., Vogel, M. (2014). *Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime*. Construction and Building Materials, 67, 321-337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039>
- Naderi, R., Bautista, A., Velasco, F., Soleimani, M., Pourfath, M. (2022). *Use of Licorice Plant Extract for Controlling Corrosion of Steel Rebar in Chloride-Polluted Concrete Pore Solution*. Journal of Molecular Liquids, 346, 117856. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117856>
- Nadir, H.M., Ahmed, A. (2022). *The mechanisms of sulphate attack in concrete—A review*. Modern Approaches on Material Science, 5(2), 658-670.
- Natekin, A., Knoll, A. (2013). *Gradient boosting machines, a tutorial*. Frontiers in neurorobotics, 7, 21. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00021>
- Nguyen-Sy, T., Wakim, J., To, Q.D., Vu, M.N., Nguyen, T.D., Nguyen, T.T. (2020). *Predicting the compressive strength of concrete from its compositions and age using the extreme gradient boosting method*. Construction and Building Materials, 260, 119757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119757>
- Ogunsanya, I.G., Hansson, C.M. (2018). *Detection of the critical chloride threshold of carbon steel rebar in synthetic concrete pore solutions*, RILEM Technical Letters, 3, 75-83, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.70>
- Ormellese, M., Berra, M., Bolzoni, F.A.B.I.O., Pastore, T. (2006). *Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures*. Cement and Concrete Research, 36(3), 536-547. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.007>
- Ozcelik, G., Gürsel, A.P., Meral, Ç. (2013). *Yapı Kimyasallarına Çevresel Çerçeveden Bakış*. Uluslararası Katılımlı Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyumu ve Sergisi, 179-197

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Palanisamy, S.P., Maheswaran, G., Kamal, C., Venkatesh, G. (2016). *Prosopis juliflora-A green corrosion inhibitor for reinforced steel in concrete*. Research on Chemical Intermediates, 42(12), 7823-7840. <https://doi.org/10.1007/s11164-016-2564-1>
- Pradhan, B. (2022). *A study on effectiveness of inorganic and organic corrosion inhibitors on rebar corrosion in concrete: A review*. Materials Today: Proc., 65, 1360-1366. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.296>
- Raja, P.B., Ismail, M., Ghoreishiamiri, S., Mirza, J., Ismail, M.C., Kakooei, S., Rahim, A.A. (2016). *Reviews on corrosion inhibitors: a short view*. Chemical Engineering Communications, 203(9), 1145-1156. <https://doi.org/10.1080/00986445.2016.1172485>
- Ramyar, K. (2013). *Betonda alkali-silis reaksiyonu: Bir Derleme*. Hazır Beton, 120, 70-82.
- Rani, B.E.A., Basu, B.B.J., 2012. *Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview*. Intern. J. of Corrosion, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/380217>
- Reiterman, P., Holčapek, O., Zobal, O., Keppert, M. (2019). *Freeze-thaw resistance of cement screed with various supplementary cementitious materials*. Reviews on advanced materials science, 58(1), 66-74. <https://doi.org/10.1515/rams-2019-0006>
- Reou, J.S., Ann, K.Y. (2008). *The Electrochemical Assessment of Corrosion Inhibition Effect of Calcium Nitrite in Blended Concretes*. Materials Chemistry and Physics, 109(2-3), 526-533, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.12.030>
- Rivetti, M.L.S., Neto, J.S.A., Júnior, N.S.A., Ribeiro, D.V. (2018a). *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. 262, DOI: 10.5772/intechopen.70101
- Rivetti, M.L.S., Netto, J., Junior, M.A., Ribeiro, D.V. (2018b). *Corrosion inhibitors for reinforced concrete*. Corrosion inhibitors, principles and recent applications, 35-58.
- Ryu, H.S., Singh, J.K., Lee, H.S., Park, W.J. (2017). *An electrochemical study to evaluate the effect of calcium nitrite inhibitor to mitigate the corrosion of reinforcement in sodium chloride contaminated Ca(OH)₂ solution*. Advances in Materials Science and Engineering, 1-14
- Sahmaran, M., Kasap, O., Duru, K., Yaman, I.O. (2007). *Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements*. Cement and Concrete Composites, 29(3), 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.007>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sarker, I.H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. SN computer science, 2(3), 160.
- Sastri, V.S. (2011). *Green Corrosion Inhibitors*, Theory and Practice. John Wiley, Sons, Inc., New Jersey.
- Satish, V.L., Ravindra V. (2021). *Evaluation of Corrosion Resistance of Corrosion Inhibitors in Concrete Structures by Impressed Voltage Test*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1025(1), p. 012002. IOP Publishing. DOI 10.1088/1757899X/1025/1/012002
- Shi, W., Wang, T.Z., Dong, Z.H., Guo, X.P. (2017). *Application of wire beam electrode technique to investigate the migrating behavior of corrosion inhibitors in mortar*. Construction and Building Materials, 134, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.036>
- Shi, X., Fay, L., Peterson, M. M., Berry, M., Mooney, M. (2011). *A FESEM/EDX investigation into how continuous deicer exposure affects the chemistry of Portland cement concrete*. Construction and building materials, 25(2), 957-966.
- Shi, Z., Shi, C., Zhao, R., Wan, S. (2015). *Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars*. Materials and Structures, 48, 743-751. <https://doi.org/10.1617/s/11527-015-0535-4>
- Sideris, K.K., Savva, A.E. (2005). *Durability of Mixtures Containing Calcium Nitrite Based Corrosion Inhibitor*, Cement and Concrete Composites, 27(2), 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.016>
- Sobuz, M.H.R., Khan, M.H., Kabbo, M.K.I., Alhamami, A. H., Aditto, F.S., Sajib, M.S., Alam, A. (2024). *Assessment of mechanical properties with machine learning modeling and durability, and microstructural characteristics of a biochar-cement mortar composite*. Construction and Building Materials, 411, 134281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134281>
- Sobuz, M.H.R., Meraz, M.M., Safayet, M.A., Mim, N.J., Mehedi, M.T., Farsangi, E.N., Shrestha R. K., Arafin S. A. K. Bibi T., Hussain M. S., Bhattacharya B., Aftab M. R., Paul S. K., Paul P., Meraz, M.M. (2023). *Performance evaluation of high-performance self-compacting concrete with waste glass aggregate and metakaolin*. J. of Building Engineering, 67, 105976. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105976>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sofuoğlu T., Topçu, İ.B. (2023). *Geopolimer Harç Üretimi: Endüstriyel Atık Perspektifi*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 118s.
- Sofuoğlu, T., (2022). *Şeker Üretim Sürecinde Açığa Çıkan Pres Filtre Atığının Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılması*. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 108s.
- Söylev, T.A., McNally, C., Richardson, M.G. (2007). *The effect of a new generation surface-applied organic inhibitor on concrete properties*. Cement and Concrete Composites, 29(5), 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.013>
- Soylev, T.A., Richardson, M.G. (2008). *Corrosion inhibitors for steel in concrete; state-of-the art report*. Construction and Building Materials 22(4):609-622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013>
- Sun, C., Chen, M., Zheng, H., Zhang, P., Li, Y., Hou, B. (2019). *The effect of amino-alcohol-based corrosion inhibitors on concrete durability*. Canadian Journal of Civil Engineering, 46(9), 771-776. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0482>
- Tang, Y., Wang, S., Xu, Y., Ni, J. (2017). *Influence of calcium nitrite on the passive films of rebar in simulated concrete pore solution*. Anti-Corrosion Methods and Materials, 64(3), 265-272, <https://doi.org/10.1108/ACMM-05-2016-1667>.
- Tian, Y., Bao, J., Xie, D., Wang, B., Zhang, P., Zhao, T., Lei, D. (2023). *The effects of organic corrosion inhibitor on concrete properties and frost resistance*. Journal of Building Engineering, 65, 105762. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105762>
- Tikalsky, P.J., Roy, D., Scheetz, B., Krize, T. (2002). *Redefining cement characteristics for sulfate-resistant Portland cement*. Cement and Concrete Research, 32(8), 1239-1246. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00767-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00767-6)
- Tiwari, A.K., Goyal S., Luxami V. (2023). *Influence of corrosion inhibitors on two different concrete systems under combined chloride and carbonated environment*, Structures, Elsevier, 48, 717-735, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.093>
- Topcu, İ.B., Sofuoğlu, T. (2021). *Properties of geopolymers produced with sugar press filter waste and fly ash under certain curing conditions*, Journal of Building Engineering, 44, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102938>.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Topçu, İ.B., Canbaz, M. (2009). *Sülfatlı Ortamların Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Mikroyapısına Etkisi*. Anadolu University Journal of Sciences & Technology, 10(1).
- Topçu, İ.B., (2006) *Yapı Malzemeleri ve Beton*, Eskişehir, 503 s
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2010). *Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete*, Materials & Design, 31 (7), 3358-3365, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.057>.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M. (2004). *Silis Dumanlı Betonlarda Donma-Çözülme Etkisinin İncelenmesi*, BETON 2004 Kong., THBB, 10-12.06. 2004, İstanbul, ss. 367-375.
- Topçu, İ.B., Kara, İ., (2022, 25-26 Mayıs). *Environmentally Green Corrosion Inhibitors Effects on Steel Reinforcement and Mortar Properties*. CASP 2022, 2nd International Conf. and Exhibition on Corrosion and Surface Protection for Steel, İstanbul, Turkey
- Topçu, İ.B., Kara, İ. (2023a, 21-23 Ocak). *Investigation of the Effects of Calcium Nitride Containing Corrosion Inhibitor on Mortar Durability*, 12th International İstanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering and Applied Sciences, Vol. 1, İstanbul, Turkey, pp. 117-124.
- Topçu, İ.B., Kara, İ. (2023b, 29-30 Nisan). *Durability of Mortars Containing CN Corrosion Inhibitor at The Effect of MgSO₄*. 13th Intern. İstanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering and Applied Sciences, Vol. 1, İstanbul, Turkey, pp. 58-66.
- Topçu, İ.B., Kara, İ., (2023c, 25-27 Kasım). *Comparison of Freeze-Thaw Effects on Mortar Utilizing Inorganic, Organic and Green Corrosion Inhibitors*. 11th International Congr. on Life, Engineering and Applied Sciences in a Changing World pp. 54-62.
- Topçu, İ.B., Kara, İ., (2024, 28-30 Nisan). *Investigation of The Effects of Corrosion Inhibitors on Alkali-Silica Reaction*. 17th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Sciences İstanbul, Turkey, pp.188-198.
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2021). *Yapı Malzemesi*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 400 s
- Topçu, İ.B., Uzunomeroğlu, A. (2021). *Experimental Investigation of Utilizing Chemical Additives and New Generation Corrosion Inhibitors on RC*, Research on Engineering Structures Materials, 7(1), 13-34, <http://dx.doi.org/10.17515/resm2020.214st0929>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A. (2020). *Properties of corrosion inhibitors on RC*. Journal of Structural Engineering, 3(2), 93-109. <https://doi.org/10.31462/jseam.2020.02093109>
- Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A., (2022). *The Effect of Boron Inhibitor and Chemical Additives on Concrete Durability*. 10th International Congress on Engineering, Architecture and Design (pp.1128-1134). İstanbul, Turkey
- Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A., Pat, S. (2022a). *Enhanced corrosion behavior of reinforcing steel in concrete using titanium nano-composite thin films*, Jordan Journal of Civil Engineering, 16(2), 294-306.
- Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A., Pat, S., (2022b). *Development of Corrosion Resistance of Structural Steel with Nano-silver Coatings*. CASP 2022 İstanbul 2nd Int. Conference and Exhibition on Corrosion and Surface Protection for Steel, İstanbul, Turkey
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, İ.A. (2009). *Portland Kalkerli Çimento, Bölüm 2-Sülfat Dayanıklılık*, İMO Teknik Dergi, 4737-4757, Yazı 310
- TS 706 EN 12620, (2009). *Beton Agregaları*, TSE, Ankara, Türkiye 50s.
- TS EN 206 (2022), *Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk*, TSE, Ankara, Türkiye 105s
- TS EN 1008, (2003), *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 18s.
- TS EN 1015-3, (2000), *Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye 8s.
- TS EN 12350-6, (2019). *Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye 16s.
- TS EN 196-1, (2009). *Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye 31s.
- TS EN 197-1, (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 29s.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Türk., S, Engin, Y. (2023, 8-10 Kasım). *Düşük Klinkerli Çimento Kullanımında Mevcut Durum, Beklentiler ve Engeller*, Türkiye Hazır Beton Birliği Beton 2023 Kongresi, 192-205
- Tweek, M.K., Abdulsada, S.A. (2023). *Improvement corrosion properties of reinforcement concrete by corrosion inhibitors: A brief review*. KOM–Corrosion and Material Protection Journal, 67(1), 50-58.
- Uygunoğlu, T, Ünal, O. (2005). *Erken Yaşlardaki Beton Üzerinde Buzun Etkisi*. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (1) 37-44
- Uzunömeroğlu, A. (2023). *Betonda kullanılan korozyon inhibitörlerinin farklı kimyasal katkılarla etkileşimi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü], Eskişehir, 122 s.
- Uzunömeroğlu, A., Boğa, A.R., Pat, S., Topçu, İ.B. (2022). *Improving the Corrosion Resistance of Reinforcement Embedded in Concrete with High Strength Zinc, Zinc-Boron and Zinc-Boron-Nitrogen Nanocrystal Composite Coating*. Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 47, No. 11, pp. 12789-12802. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06619-6>
- Vaysburd, A.M., Emmons, P.H. (2004). *Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts*. Cement and Concrete Composites, 26(3), 255-263. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00044-1)
- Vedalakshmi, R., Rajagopal, K., Palaniswamy, N. (2009). *Determination of migration efficiency of amino alcohol based migrating corrosion inhibitor through concrete*. Corrosion Engineering, Science and Technology, 44(1), 20-31. <https://doi.org/10.1179/174327808X272405>
- Venkatesh, C., Mohiddin, S.K., Ruben, N. (2018). *Corrosion inhibitors behaviour on reinforced concrete-a review*. Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018, 127-134. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0>
- Vyrides, I., Rakanta, E., Zafeiropoulou, T., Batis, G. (2013). *Efficiency of amino alcohols as corrosion inhibitors in reinforced concrete*. Open Journal of Civil Engineering., (3), 1-8. <https://doi.org/10.4236/ojce.2013.32A001>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Wang, W., Song, Z., Guo, M., Jiang, L., Xiao, B., Jiang, Q., Chu, H., Liu, Y., Zhang, Y., Xu, N. (2019). *Employing ginger extract as an eco-friendly corrosion inhibitor in cementitious materials*. Construction and Building Materials, 228, 116713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116713>
- Wombacher, F., Maeder, U., Marazzani, B. (2004). *Aminoalcohol based mixed corrosion inhibitors*. Cement and Concrete Composites, 26(3), 209-216. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00040-4)
- Yahya, D.A. (2022). *Review of Mechanisms and Mitigation of Alkali-Silica Reaction*, Engineering engrxiv archive, 1-25, <https://doi.org/10.31224/2544>
- Yazıcı, H., (2008). *The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 22, 456-462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>
- Yünsel, T.Y., Ersoy, A., Ehsani, A. (2019). *X-Işını Difraksiyonu Yöntemi ile Kantitatif Mineral İçeriği Tayini ve Çalışma Şartlarının Etkisi*. Artıbilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 2(2), 16-28.
- Zheng, H., Li, W., Ma, F., Kong, Q. (2014). *The performance of a surface-applied corrosion inhibitor for the carbon steel in saturated Ca (OH)₂ solutions*. Cement and Concrete Research, 55, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.10.005>
- Zomorodian, A., Bagonyi, R., Al-Tabbaa, A. (2021). *The efficiency of eco-friendly corrosion inhibitors in protecting steel reinforcement*. Journal of Building Engineering, 38, 102171. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102171>