



**SOĞUK HAVADA BETON ÜRETİMİNDE ANTİFRİZ
VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BİRLİKTE
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Fatma KARAGÖL
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2025
(Her hakkı saklıdır.)

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

**SOĞUK HAVADA BETON ÜRETİMİNDE ANTİFRİZ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ
KATKILARIN BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the Combined Use of Antifreeze and Air-Entraining Admixtures in Cold-Weather Concrete Production)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Erzurum
Ocak, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**SOĞUK HAVADA BETON ÜRETİMİNDE ANTİFRİZ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ
KATKILARININ BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL danışmanlığında, Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR tarafından hazırlanan bu çalışma, 20/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Rıza POLAT

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

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

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL danışmanlığında sunulan “SOĞUK HAVADA BETON ÜRETİMİNDE ANTİFRİZ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	6	30
Kuramsal Temeller	10	30
Materyal ve Metot	12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	3	20
Tezin Geneli	10	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'ten büyük olmaması gerekir.

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Şadımın İkra AYDIN ÇUKUR	Dr.Öğr.Üyesi Fatma KARAGÖL
31.1.2025	31.1.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Araştırmamdaki her adımda ilgisiyle ve sohbetiyle bana yardımcı olup desteğini sakınmayan çok değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatma Karagöl’e, eğitim alanıma lisans ve yüksek lisans dersleriyle katkı sağlayan hocalarıma, tez sürecindeki deney çalışmalarımda desteğini gönülden hissettiğim üniversite ve iş arkadaşım Yüksek İnşaat Mühendisi Gülseren Gül’e, eğitim ve iş hayatım boyunca desteğini ve sevgisini her an kalbimde hissettiğim sevgili eşim Can Okan Çukur’a ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SOĞUK HAVADA BETON ÜRETİMİNDE ANTİFRİZ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Amaç: Soğuk hava şartlarında beton dökümünde yaygın olarak priz hızlandırıcı, antifriz ve hava sürükleyici kimyasal katkıları betonun donmaya karşı direncini geliştirmek için kullanılmaktadır. Ancak bu katkıların birlikte kullanımının beton özelliklerine etkisine dair çalışmalar çok sınırlıdır. Bu bağlamda çalışmada herhangi bir koruma, yalıtım veya malzemelerin ısıtılması gibi ön işlem olmaksızın soğuk havaya maruz kalan taze haldeki betonun mekanik ve içyapı özelliklerine antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanım etkisinin tespiti amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmada, farklı kombinasyonlarda antifriz (kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat) ve hava sürükleyici katkı maddeleri içeren 5 farklı beton karışımı ve katkı maddesi içermeyen kontrol karışımı olmak üzere toplamda 6 farklı karışım üretilmiştir. Üretilen karışımlardan alınan taze beton numunelerinin bir kısmı nem kaybı önlenerek laboratuvar ortamına alınırken, bir kısmı da -5 °C ve -10 °C'deki derin dondurucularda 12 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda laboratuvar ortamındaki numuneler standart su kürüne tabi tutulurken, diğer numuneler nem kaybı önlenerek deney gününe kadar (3., 7. ve 28. günler) laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Tüm karışımlar için taze halde hidrasyon ısı ve yayılma tablası deneyleri yapılmış ve hava sürükleyici katkılı ve katkısız kontrol karışımlarının hava içeriği de tespit edilmiştir. Kür sürelerinin sonunda tüm karışımların basınç dayanımı, su emme ve kılcal su emme testleri yapılarak basınç dayanım sonuçlarına göre seçilen 4 karışımın mikroyapı ve kristal yapıları SEM ve XRD ile analiz edilmiştir.

Bulgular: Antifriz ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanımı ile üretilen taze betonun işlenebilirliği ve hidrasyon ısıları kontrol betonuna göre artmıştır. -5 °C ve -10 °C'de antifriz ve hava sürükleyici katkılı betonlardaki dayanım düşüşü kontrol betonuna göre çok daha az olup antifriz katkının hava sürükleyici ile birlikte kullanılması hava sürükleyicinin beton dayanımı üzerindeki negatif etkisini azaltmıştır. Antifriz ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanımı ile düşük sıcaklıkta basınç dayanımı, su emme ve kılcal su emme sonuçlarında pozitif yönde değişim gözlenmiş ve SEM-EDX ve XRD sonuçları da bu bulguları desteklemiştir. Ayrıca tüm karışımların içinde en optimum sonuçlar %4,5 kalsiyum nitrat ve %1,5 sodyum tiyosiyanat içeren KN+ST+HS (4,5-1,5) karışımında elde edilmiştir.

Sonuç: Antifriz katkıların birlikte kullanımı soğuk havaya maruz kalan betonun mekanik özellikleri üzerinde pozitif yönde etki etmiş, işlenebilirliğini ve iç yapısını geliştirmiş ve hava sürükleyici katkıların beton dayanımı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğuk hava, antifriz katkı, kalsiyum nitrat, sodyum tiyosiyanat, hava sürükleyici, SEM, XRD

Ocak 2025 , 117 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE COMBINED USE OF ANTIFREEZE AND AIR-ENTRAINING ADMIXTURES IN COLD WEATHER CONCRETE PRODUCTION

Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fatma KARAGÖL

Purpose: Setting accelerators, antifreeze, and air-entraining chemical admixtures are widely used to improve the resistance of concrete to freezing in cold weather conditions. However, studies on the effect of the combined use of these admixtures on concrete properties are minimal. In this context, the aim of the study was to determine the impact of the combined use of antifreeze and air-entraining admixtures on the mechanical and microstructural properties of fresh concrete exposed to cold weather without any pre-treatment such as protection, insulation, or heating of materials.

Method: A total of 6 different mixtures, including 5 different concrete mixtures using antifreeze (calcium nitrate and sodium thiocyanate) in diverse combinations and air-entraining admixtures, and the control mixture without admixture, were produced in the study. Some of the fresh concrete samples taken from the produced mixtures were placed in the laboratory environment preventing moisture loss and some were placed in deep freezers at -5 °C and -10 °C for 12 hours. At the end of 24 hours, the samples in the laboratory environment were subjected to standard water curing, while the other samples were kept in the laboratory environment preventing moisture loss until the experimental day (days 3, 7, and 28). Hydration heat and flow-table experiments were carried out on all mixtures in the fresh state, and the air content of the control mixture with and without air-entraining admixture was also determined. At the end of the curing times, compressive strength, water absorption, and capillary water absorption tests were performed for all mixtures, and the microstructure and crystal structures of the 4 mixtures selected according to the compressive strength results were analyzed with SEM and XRD.

Findings: The workability and hydration heats of the fresh concrete produced with the combined use of antifreeze and air-entraining admixture increased compared to the control concrete. The strength loss in the concretes with antifreeze and air-entraining was much less than in the control concrete at -5 °C and -10 °C, and the combined use of antifreeze and air-entraining admixtures reduced the negative effect of air-entraining on concrete strength. With the combined use of antifreeze and air-entraining admixture, positive changes were observed in compressive strength, water absorption, and capillary water absorption results for low temperatures, and the SEM-EDX and XRD results supported these findings. In addition, the most optimum results among all mixtures were obtained in the KN+ST+HS (4.5-1.5) mixture containing 4.5% calcium nitrate and 1.5% sodium thiocyanate.

Result: The combined use of antifreeze admixtures had a positive effect on the mechanical properties of concrete exposed to cold weather, improved its workability and internal structure and reduced the negative effect of air entraining admixtures on concrete strength.

Keywords: Cold weather, antifreeze admixture, calcium nitrate, sodium thiosulfate, air entraining admixture, SEM-EDX, XRD

January 2025, 117 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	2
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Soğuk Havanın Tanımı ve Beton Üretimi.....	5
Soğuk Havanın Etki Mekanizması ile Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerindeki	
Değişimler	6
Soğuk Havanın Negatif Etkilerinin Azaltılabilmesi Amacıyla Alınabilecek Tedbirler....	8
Hidratasyon Isısı Gelişimi.....	9
Betonda Kullanılan Katkı Maddeleri	9
Priz Hızlandırıcı ve Antifriz Katkıları.....	10
Antifriz Katkıların Betonun Basınç Dayanımı, Hidratasyon Isısı ve İç Yapı	
Özelliklerine Etkisi.....	11
Antifriz Katkıların Beton Su Emme ve Kılcal Su Emme Özelliklerine Etkisi	19
Antifriz Katkıların Betonun Donma Çözülme Etkisi Altındaki Davranışları.....	23
Hava Sürükleyici Katkıları.....	24
Hava Sürükleyici Katkının Çalışma Mekanizması ve Beton Üzerindeki Etkileri	25
Hava Sürükleyici Katkının Beton Basınç Dayanımı Özelliklerine Etkisi	27
Hava Sürükleyici Katkının Beton Kılcal Su Emme Özelliklerine Etkisi.....	33
Hava Sürükleyici Katkının Betonun Maruz Kaldığı Donma Çözülme Etkisi Altında	
Gelişen İç Yapı Özelliklerine Etkisi	34
MATERYAL VE YÖNTEM	36

Materyal	36
Portland çimentosu.....	36
Süperakışkanlaştırıcı	37
Antifriz katkıları.....	37
Hava sürükleyici katkı.....	39
Karışım suyu	39
Agrega	40
Standart kum	40
Deneylerde Kullanılan Aletler	41
Harç karıştırıcı.....	41
Çelik kalıplar.....	42
Elekler	42
Etüv	43
Beton basınç dayanımı deney presisi.....	43
Hidratasyon ısısı deney düzeneği.....	44
Hava ölçüm cihazı.....	44
Kür havuzu.....	45
Yayılma tablası deney düzeneği.....	45
Dondurucular.....	46
Yöntem.....	46
Agregaların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	46
Agregalara Uygulanan Deneyler.....	47
Agregalarda tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey neminin tayini deneyi	47
Agregalarda organik madde tayini deneyi	48
Agregalarda ince madde tayini deneyi	49
Antifriz ve Hava Sürükleyici Katkılı Normal Beton Tasarımı	49
Antifriz ve Hava Sürükleyici Katkılı Normal Beton Üretimi	50
Taze Halde Uygulanan Deneyler	52
Hidratasyon ısısı deneyi	52
Taze betonda hava ölçüm deneyi	52
Yayılma Tablası Kıvam Deneyi.....	53
Sertleşmiş Beton Numunelere Uygulanan Deneyler.....	53
Basınç dayanımı	53
Su emme deneyi	54
Kılcal su emme deneyi	54

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	56
Taze Beton Özelliklerinin Değişimi	56
Hidratasyon Isısı Sonuçları	58
Farklı Kür Koşullarına Maruz Bırakılan Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değişimi	64
Beton Basınç Dayanım Sonuçlarının Değerlendirilmesi	64
Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	71
Kılcal Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi	73
İç Yapı Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	74
SEM analizi.....	74
XRD analizi.....	85
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
KAYNAKÇA	96
ÖZGEÇMİŞ.....	101

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Portland çimentosunun fiziksel özellikleri	36
Tablo 2. Portland çimentosunun kimyasal bileşimi (%).....	36
Tablo 3. Süperakışkanlaştırıcının kimyasal özellikleri	37
Tablo 4. Kalsiyum nitratın ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ %98 saflıkta) kimyasal özellikleri.....	38
Tablo 5. Sodyumtiyosiyanatın (NaSCN) kimyasal özellikleri	38
Tablo 6. Hava sürükleyici katkının kimyasal özellikleri	39
Tablo 7. Agregaların Fiziksel Özellikleri	47
Tablo 8. 1 m ³ beton için karışım oranları	50
Tablo 9. K, K+HS, KN+HS, KN+ST+HS (%4,5-1,5), KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarının yayılma çap sonuçları.....	56
Tablo 10. Tüm karışımların nihai hidrasyon ısı sonuçları	64
Tablo 11. Tüm karışımların su kürü, -5°C ve -10°C kür şartlarında kılcal su emme katsayısı sonuçları	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Normal kürleme ve donma sıcaklıklarına maruz kalan betonun basınç dayanımı.....	12
Şekil 2. Çeşitli kürlenmiş şartlandırılmış numunelerin XRD analizi, a) Ortam sıcaklığında suda kürlenmiş kontrol çimento numuneleri; b) -5 °C'de kürlenen kontrol çimento numuneleri; c) -5 °C'de kürlenen ikili antifriz katkıları içeren çimento.....	12
Şekil 3. Ortalama basınç dayanımı değerleri	15
Şekil 4. Donma-çözölmeye maruz kalan taze beton karışımlarının basınç dayanımına üre ve kalsiyum nitratın etkisi	15
Şekil 5. Antifriz katkısının sülföalüminat çimento harcının basınç dayanımına etkisi.....	17
Şekil 6. Donma-çözölmeye maruz kalan taze beton karışımlarının su emmesi üzerine üre ve kalsiyum nitratın etkisi. (Metin ve tablolarda K, C ve U sırasıyla kontrol betonu, kalsiyum nitrat ve üre örneklerini göstermektedir.)	20
Şekil 7. Ortalama geçirgen gözenek hacmi.	20
Şekil 8. Su emme oranları	21
Şekil 9. Kılcallık oranı	21
Şekil 10. 28 gün kür edilen farklı s/ç oranlarına sahip numunelerin kılcal su emme eğrisi. ...	22
Şekil 11. -3+28 gün kür edilen farklı s/ç oranlarına sahip numunelerin kılcal su emme eğrisi.....	22
Şekil 12. SAC betonunun donma-çözölmeye deneyi sonuçları (Kütle kaybı)	23
Şekil 13. SAC betonunun donma-çözölmeye test sonuçları	23
Şekil 14. Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı	25
Şekil 15. Hava, su ve çimento tanelerine hava sürükleyici katkı moleküllerinin tutunmaları .	26
Şekil 16. Karışım türlerine göre, kontrol numunelerinin ortalama basınç dayanımları	28
Şekil 17. Karışım türlerine göre 0 ve 100 donma-çözölmeye çevrimi sonucu basınç dayanımları	29
Şekil 18. Donma çözölmeye uğramış su/bağlayıcı oranı 0.25 olan karışım türlerinin 0 ve 100 çevrim sonunda basınç dayanımları	31
Şekil 19. Donma çözölmeye uğramış su/bağlayıcı oranı 0.30 olan karışım türlerinin 0 ve 100 çevrim sonunda basınç dayanımları (Karakoç, 2010).....	32
Şekil 20. Çevrim sayısı ve su/bağlayıcı oranına göre basınç dayanımı değişimi	32
Şekil 21. Karışım türlerinin çevrim sayısına göre basınç dayanımı değişimi	33
Şekil 22. Farklı karışım türlerinde zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayısının değişimi	33
Şekil 23. Karışım türlerine göre 0 donma-çözölmeye çevrimi ve 100 donma-çözölmeye çevrimi sonrası kılcal geçirimsizlik katsayılarının karşılaştırılması (24 saat).....	34

Şekil 24. Betonun hava kabarcıklarında oluşan etrenjitler.....	34
Şekil 25. Donma-çözülme etkisi sonrası oluşan boşluklu yapı ve etrenjit.....	35
Şekil 26. Portland çimentosu.....	36
Şekil 27. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi.....	37
Şekil 28. Kalsiyum Nitrat.....	38
Şekil 29. Sodyum tiyosiyanat.....	38
Şekil 30. Hava sürükleyici katkı.....	39
Şekil 31. 0-5 mm tane boyutuna sahip ince agrega.....	40
Şekil 32. 5-8 mm tane boyutuna sahip iri agrega.....	40
Şekil 33. Standart kum	41
Şekil 34. Laboratuvar mikseri (harç karıştırıcı)	41
Şekil 35. 50x50x50 mm boyutlarında çelik kalıplar	42
Şekil 36. Elek sarsma cihazı, elek takımı ve elenmiş agregalar.....	42
Şekil 37. Etüv	43
Şekil 38. Beton basınç dayanımı deney presisi.....	43
Şekil 39. Hidratasyon ısısı deneyi cihazı	44
Şekil 40. Hava Ölçüm Cihazı.....	44
Şekil 41. Kür Havuzu	45
Şekil 42. Yayılma tablası deney düzeneği	45
Şekil 43. Dondurucuya yerleştirilmiş numuneler.....	46
Şekil 44. Karışımda kullanılan agregaların tane boyutu dağılım eğrisi	47
Şekil 45. Agregalarda tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey neminin tayini deneyleri	48
Şekil 46. Agregalarda organik madde tayini deneyi	48
Şekil 47. Agregalarda ince madde tayini deneyi.....	49
Şekil 48. Taze beton üretim aşaması	51
Şekil 49. Beton üretimi hazırlık aşaması (Malzemelerin tartılması ve çelik kalıpların yağlanması)	51
Şekil 50. Kalıba yerleştirilen taze beton ve sarsma tablasıyla sıkıştırma işlemi	51
Şekil 51. Hidratasyon ısısı deneyi	52
Şekil 52. Taze betonda hava ölçüm deneyi	53
Şekil 53. Taze betonun yayılma tablası deneyi (kıvam tayini)	53
Şekil 54. Sertleşmiş beton numunesi ve basınç dayanımı deneyi	54
Şekil 55. Su emme deneyi	54
Şekil 56. Kılcal su emme deneyi	55
Şekil 57. K ve K+HS karışımların yayılma tablası çapları	56

Şekil 58. KN+HS ve KN+ST+HS (%3-3) karışımların yayılma çapları	56
Şekil 59. KN+ST (%4,5-1,5) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının yayılma çapları	57
Şekil 60. K ve K+HS karışımlarının hava içeriği sonuçları	57
Şekil 61. K karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi	58
Şekil 62. K+HS karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi.....	59
Şekil 63. K ve K+HS karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 64. KN+HS karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi.....	61
Şekil 65. K+HS ve KN+HS karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 66. KN+ST+HS (%3-3) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi.....	62
Şekil 67. KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi.....	62
Şekil 68. KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi.....	63
Şekil 69. KN+ST+HS (%4,5-1,5) ve KN+ST+HS (%3-3) karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 70. KN+ST ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 71. K ve K+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları	65
Şekil 72. K+HS ve KN+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları	66
Şekil 73. K+HS, KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları.....	69
Şekil 74. KN+ST+HS (%4,5-1,5) ve KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları	70
Şekil 75. KN+HS, KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları.....	71
Şekil 76. Tüm karışımların 28 günlük su kürüne göre -5°C ve -10°C'de su emme sonuçlarındaki değişim (%)	72
Şekil 77. K, K+HS ve KN+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki su emme değerleri	73
Şekil 78. Tüm karışımların su kürü, -5°C ve -10°C kür şartlarında kılcal su emme katsayısı sonuçları	74

Şekil 79. Standart su küründeki K beton numunesinin SEM görüntüleri	75
Şekil 80. -5 °C'ye maruz kalmış K beton numunesinin SEM-EDX analizi.....	76
Şekil 81. Standart su küründeki K+HS beton numunesinin SEM-EDX analizi	77
Şekil 82. -5 °C'ye maruz kalmış K+HS beton numunesinin SEM-EDX analizi	78
Şekil 83. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi	80
Şekil 84. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi	81
Şekil 85. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi	82
Şekil 86. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi	85
Şekil 87. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük K beton numunesinin XRD analizi.....	86
Şekil 88. Standart su küründeki 28 günlük K+HS beton numunesinin XRD analizi.....	87
Şekil 89. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük K+HS beton numunesinin XRD analizi	88
Şekil 90. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi	89
Şekil 91. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi	90
Şekil 92. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi	91
Şekil 93. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi	92

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Ca(NO₃)₂	: Kalsiyum Nitrat
CEN STANDART KUM:	Avrupa Standartlar Komitesi Standart Kum
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
GPA	: Genleştirilmiş Perlit Agregası
HSK	: Hava Sürükleyici Katkı
K	: Kontrol
K+HS	: Kontrol+Hava Sürükleyici
KN+HS	: Kalsiyum Nitrat +Hava Sürükleyici
KN+ST (4,5-1,5)	: Kalsiyum Nitrat (%4,5)+ Sodyumtiyosiyanat (%1,5)
KN+ST+HS (3-3)	: Kalsiyum Nitrat (%3)+ Sodyumtiyosiyanat (%3)+ Hava Sürükleyici
KN+ST+HS (4,5-1,5)	: Kalsiyum Nitrat (%4,5)+ Sodyumtiyosiyanat (%1,5)+ Hava Sürükleyici
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NaSCN	: Sodyumtiyosiyanat
PA	: Pomza Agregası
PÇ	: Portland Çimentosu
S/Ç ORANI	: Su/çimento oranı
SP	: Süperakışkanlaştırıcı
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü

GİRİŞ

Beton; agregâ, çimento, su ve gerekli olduğunda bazı mineral ya da kimyasal katkıının bir araya getirilerek karıştırılmasıyla elde edilen, zamanla plastikliğini kaybedip sertleşerek dayanım kazanan, uzun ömürlü, durabil, yüksek mekanik özelliklere sahip ve yapı sektörünün temelini oluşturan bir yapı malzemesidir. Öyle ki kanalizasyon yapıları, tüneller, yollar, binalar, istinat duvarları ve barajlar gibi birçok yapının imalatında esas yapı malzemesi olarak beton kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle beton sudan sonra en çok üretilen ve tüketilen bir malzeme olarak tanımlanabilir.

Betonun yapı sektöründe diğer yapı malzemelerine göre daha fazla tercih edilmesinin nedenlerinden bazıları standartlaştırılmış bir üretim sürecinin olması, yüksek basınç dayanımı, uzun mesafelere taşınabilmesi, kolayca işlenebilmesi, yerleştirilebilmesi, perdahlanabilmesi, stabil özelliklere sahip olması, estetik görünüm verilebilmesi ve ekonomik olmasıdır.

Geçmişten günümüze beton teknolojisinde oldukça hızlı ilerlemeler meydana gelmiştir. Bu ilerlemeler sonucunda geliştirilen yeni teknik, yeni malzemeler ve kimyasal ve mineral katkıları yardımıyla yüksek kıvama sahip, düşük maliyetli, çevreci, su ve hammadde tüketiminin azaltıldığı daha verimli bir beton üretiminin gerçekleştirilebileceği ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığın da geliştirilmesinin mümkün olduğu anlaşılmıştır (Tunç, 2019).

Hem ülkemizde hem de dünyanın birçok bölgesinde beton veya betonarme yapılar bu çevresel etkilerden birisi olan soğuk havaya maruz kalmaktadır. Bu durumda taze ve sertleşmiş halde betonu dona karşı korumak ve olası termal şoklardan sakınmak için kür süresince yeterli sıcaklığının sağlanması gerekir. Bunun için genel olarak beton üretiminde kullanılan su ve agregâ gibi malzemeler ısıtılmakta veya kür süresince yapı yalıtılıp ısıtıcılarla gerekli ortam ısısı sağlanmaktadır. Ayrıca uygun kimyasal katkı malzemeleri eklenerek betonun dayanım kazanma mekanizması sürdürülebilir. Uygun kimyasal katkıının seçimi beton üretim amacına, hava sıcaklığına, beton karışım ve yapı tasarımına tabidir (Tunç, 2019).

Soğuk havada beton dökümünde kimyasal katkı olarak genellikle su azaltıcı, priz hızlandırıcı, antifriz ve hava sürükleyici katkıları tercih edilmektedir. Antifriz katkıları içerisinde ise kalsiyum nitrat, kalsiyum nitrit, sodyum tiyosiyanat, kalsiyum klorür, üre, sodyum klorür, sodyum nitrit, alkol bazlı bileşikler ve karbamid gibi birçok katkı kullanılmaktadır. Ancak antifriz katkıların hava sürükleyici katkıları ile birlikte kullanımına dair araştırmalar çok sınırlıdır.

Amaç ve Kapsam

Soğuk havanın beton üzerindeki etkilerini taze betondaki ve sertleşmiş betondaki etkileri adı altında iki başlıkta incelemek gereklidir. Taze beton soğuk havaya maruz kaldığında beton içerisindeki su donar ve beton hacminde artış meydana gelir. Hidratasyon için gerekli olan su, donan taze betonda azalır ve bu durum betonun prizinin gecikmesine sebep olur hatta ani donmalarda tamamen durur. Hava sıcaklığı eğer tekrar yükselmeye başlarsa buzlar çözülür ve hidratasyon kaldığı yerden devam eder. Fakat hacim artışı neticesinde taze beton bünyesinde oluşan boşluklar betonun homojenliğini ve aderans özelliklerini negatif yönde etkiler ve bunun sonucunda geçirimsizliği yüksek, boşluklu, dayanımı ve dayanıklılığı düşük beton elde edilir. Bu nedenle soğuk hava şartlarında beton dökülürken, betonun karışım suyunun donmasını engelleyecek önlemler alınmalı ve yaklaşık olarak 4 MPa dayanım kazanıncaya kadar beton dondan korunmalıdır (TS 1248, 2012). Bahsedilen önlem ve koruma yöntemlerinin geneli beton üretiminde kullanılan malzemelerin, araç ve gereçlerin sıcaklığını yüksek tutma ve taze betonun sıcaklığını döküm sırasında ya da sonrasında 15°C'nin altına düşürmeme esasına dayanır (Baradan ve ark. (2010)).

Sertleşmiş beton soğuk havaya maruz kaldığında çimento harcının içinde bulunan kapiler boşluklardaki su donar ve genişir. Bu genişleme sonucu oluşan gerilmeler betonun çekme dayanımını aşarsa betonda; kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar meydana gelir.

Soğuk havada beton dökümü için yüksek hidratasyon ısisına sahip hızlı dayanım kazan çimentolar kullanmak, priz hızlandırıcı ve suyun donma noktasını düşüren antifriz katkı kullanmak, betonun donma-çözülme direncini artırmak için hava sürükleyici katkılar kullanmak, beton bileşenlerini ısıtmak ve betonu kür süresince dışarıdan ısıtıcılarla ve yalıtım malzemeleri ile ılık olarak tutmak önlemlerden bazılarıdır.

Soğuk hava etkilerinin şiddetli bir şekilde görüldüğü Erzurum gibi yerleşim yerlerinde soğuk hava şartlarına dayanıklı, durabil ve yeterli dayanım sağlayan betonların üretilmesi ve taze ve sertleşmiş haldeki betonun mekanik ve durabilite özelliklerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanılmasının araştırılması önemlidir. Genellikle taze halde antifriz katkılar kullanılırken sertleşmiş halde hava sürükleyici katkılar kullanılmaktadır. Ancak literatürde bu katkıların birlikte kullanımına dair herhangi bir çalışma mevcut değildir.

Soğuk hava şartlarında donmaya karşı koruyucu (antifriz) kimyasal katkılar TS 1248 (2012)' ye göre çimentonun hidratasyonunu hızlandıran katkılar arasında CaCl_2 , kalsiyum nitrat (CaNO_3), kalsiyum nitrit ($\text{Ca(NO}_3)_2$), sodyumtiyosiyanat (NaSCN), potasyum karbonat

(K_2CO_3) ve kalsiyum format ($Ca(HCOO)_2$) gibi katkıları bulunur. Antifriz katkı seçiminde dikkat edilecek husus kimyasalların birbirine ve çevreye uyumluluğu ve çelik donatıya ve betona zarar vermemesidir (TS 1248, 2012). Kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat gibi antifriz katkıları beton içerisinde donatı inhibitörü görevi görür. Aynı zamanda, herhangi bir antifriz katkının, suyun az bir miktarı da olsa bir kısmının sıvı halde kalabildiği katkı konsantrasyonu ile ilgili en düşük sıcaklık olarak tanımlanan ötektik noktası altında suyun tamamı donar ve katkı kristal katı hale dönüşür. Bu yüzden ötektik noktası düşük antifriz katkıların seçimi çimentonun hidratasyon süreci ve betonun prizi ve sertleşmesini hızlandırması açısından çok önemlidir (Karagöl, 2013; Skripkiūnas ve ark. 2021). Kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat katkıları da ötektik noktası düşük katkılardır. Bu nedenle bu çalışmada herhangi bir dış korumaya gerek duymaksızın betonun donmaya karşı dayanıklılığını geliştirilmesi ve soğuk havaya maruz kalan taze haldeki betonun özellikleri üzerinde antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanım etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat katkısının birlikte kullanılmasının nedeni ise kalsiyum nitratın suyun donma noktasını düşürme özelliğine sodyum tiyosiyanatın ise sertleşmeyi hızlandırıcı özelliğe sahip olması ve birlikte kullanımının soğuk havada beton dökümünde olumlu bir etki yaratacağı düşüncesidir. Bu bağlamda hiçbir katkı içermeyen kontrol karışımı (K) ile yalnız antifriz katkı içeren, yalnız hava sürükleyici katkı içeren ve her iki katkının kombinasyon halinde kullanıldığı toplam 6 farklı beton karışımı üretilmiştir. Ayrıca oluşturulacak olan bu katkı kombinasyonunun yapı sektöründe birlikte kullanımına ve ilgili daha fazla araştırmaya öncül olması beklenmektedir.

Bu kapsamda çalışmada literatür ışığında ve ön deneylerde elde edilen sonuçlara göre karışım oranları, kullanılacak kimyasal katkı türleri taze betonun maruz bırakılacağı donma sıcaklıklarının altındaki sıcaklık ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve süreleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada bütün karışımlar için s/ç oranı 0,50 ve çimento ağırlığı 330 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı oranı tüm karışımlar için çimento ağırlığının %1'i oranındadır. Antifriz katkıları çimento ağırlığının toplam %6'sı kadar kullanılırken hava sürükleyici %0.1 oranında kullanılmıştır. Bir karışımda kalsiyum nitrat %6 oranında tek başına kullanılırken katkıların birlikte kullanıldığı diğer karışımlarda kalsiyum nitrat-sodyum tiyosiyanat oranları %4,5-%1,5 ve %3-%3 olarak seçilmiştir.

TS EN 196-9'a göre üretilen tüm karışımların hidratasyon ısısının tayini yarı adyabatik yöntem ile tespit edilmiştir. Taze beton karışımlarının yayılma çapı ve hava miktarları tespit edilerek $5\times 5\times 5\text{ cm}^3$ 'lük küp kalıplara yerleştirilen numunelerin bir kısmı standart su kürü uygulanmak üzere laboratuvar ortamına yerleştirilirken bir kısmı ise $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabit

sıcaklıkta 12 saatlik donmaya maruz bırakılmış ve ardından nem kaybı önlenecek şekilde laboratuvar ortamına alınarak deney gününe (3, 7 ve 28 gün) kadar bekletilmiştir. Kür sürelerinin sonunda tüm numuneler üzerinde basınç dayanım testi, ağırlıkça su emme ve kılcal su emme testleri yapılmıştır. Ayrıca basınç dayanım sonuçlarına göre K, K+HS, KN+ST (%4,5-1,5) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) grupları için SEM-EDX ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Soğuk Havanın Tanımı ve Beton Üretimi

TS 1248'e göre, günlük ortalama sıcaklığın 3 gün süreyle +5 °C'nin altında olduğu hava durumu beton dökümü için soğuk hava olarak tanımlanmaktadır. İlgili standartta günlük ortalama hava sıcaklığı bir gece yarısından bir sonraki gece yarısına kadar geçen süre içinde en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır (TS 1248, 2012).

Ardışık 3 günden fazla bir sürede; günlük ortalama hava sıcaklığı 5 °C'den az ise ya da 24 saatlik bir sürenin yarısından daha fazla bir sürede sıcaklık 10°C'nin üzerine çıkmıyorsa, bu koşullar da soğuk hava olarak tanımlanmaktadır (ACI 306R-16, 2016).

Betondaki don hasarı, soğuk bölgelerdeki inşaat sektörü için büyük bir zorluk olmuştur. Çevre sıcaklığının çimentonun hidratasyon süreci üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ortam sıcaklığı 5 °C'nin altında olduğunda, çimentonun hidratasyon hızı önemli ölçüde gecikir ve taze çimentolu malzemelerdeki suyun yaklaşık %92'si donar. Ayrıca suyun buz kristallerine dönüşme süreciyle oluşan genleşme gerilimleri, çimentolu malzemenin içinde çatlaklara yol açabilir (Wan ve ark. 2024, Liu ve ark. 2022 Liu ve ark. 2014). Çatlakların oluşması ise iç yapı kalitesine ve yoğunluğa ciddi şekilde zarar verebilir ve bu da mekanik özelliklerin azalmasına yol açar (Hu ve ark. 2019).

Beton sıcaklığı -2,8 °C'ye düştüğünde, karıştırma suyunun donması nedeniyle başlangıç ve nihai priz süreleri uzar, dayanım gelişimi yavaşlar, hidratasyon gelişimi yavaşlar veya tamamen durur ve bu da özellikle erken yaşta (olgunlaşmamış betonda) betonun çekme kapasitesini aşan hidrolik ve osmotik basınçlara neden olur (Yasien ve Bassuoni, 2024). -5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ise taze betondaki suyun %92'si buza dönüşür. Taze betonun donması, betonun dayanıklılığını etkileyen mikro yapıya zarar verir. Ayrıca, donatı ile beton arasındaki bağ kuvveti de azalabilir ve dayanım gelişimi durur ve geri dönüşü olmayan tahribatlar meydana gelir. (Liu ve ark. 2022 ve Tunç, 2019). Eğer donmadan sonra çözülme meydana gelirse hidratasyon yeniden başlayabilir. Ancak tek donma-çözülme çevrimi dahi agrega-çimento matrisi ara yüzeyindeki aderansın ve nihayetinde beton dayanımının önemli derecede azalmasına neden olur. Bunların yanında kalıp sökme süresinin uzaması neticesinde ekonomik olarak da kayıplar yaşanması muhtemeldir (Tunç, 2019).

Beton özelliklerindeki tüm bu olumsuz etkilerin yanında ACI 306R-16'ya göre soğuk havada yerleştirilen beton, uygun şekilde oranlandığında, üretildiğinde, yerleştirildiğinde ve

korunduğunda tasarlanan hizmet ömrünü sağlamak için yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip olabilir. Bunun yanında soğuk havada dökülen betonlarda termal çatlakların daha az oluşacağı da aşıkardır (ACI 306R-16, 2016). Ayrıca yeterli koruma sağlandığında, uygun ve yeterli süre kür edildiğinde veya betonun donmasına izin verilmediğinde yerleştirilen betonun nihai dayanımı, daha yüksek sıcaklıklarda üretilen betonun dayanımından fazla olabilir (Karagöl ve ark. 2015). Ancak hava sıcaklığı dolayısıyla beton sıcaklığı da düşükçe koruma sürelerinin uzatılması ve daha fazla tedbir alınması gereklidir.

Soğuk Havanın Etki Mekanizması ile Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerindeki Değişimler

Soğuk havada beton dökümünde hem taze beton hemde sertleşmiş beton özelliklerinin olumsuz etkilenmesi söz konusudur. Betonda meydana gelebilecek don olayı beton sertleşmeden önce, sertleşme aşamasında ve sertleşmiş betonda tekrarlanan donma ve çözölme döngüleri şeklinde oluşabilir. Bu bağlamda betondaki don hasarı zamanlamaya göre erken yaş don hasarı ve ileri yaş don hasarı olarak iki kategoriye ayrılmıştır. Erken don hasarı düşük sıcaklıklarda döküm esnasında oluşurken, ileri yaştaki don hasarı ise tekrarlanan donma-çözölme döngülerinden kaynaklanır. Her iki türde de don hasarının betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Ancak, erken yaştaki don hasarı, ileri yaş don hasarına göre betonun yapısal bütünlüğü için daha ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Huang ve ark. 2024).

Beton plastik kıvamda iken ani sıcaklık değişimlerinin neden olduğu donma neticesinde betonun içindeki serbest suyun donması ile taze beton hacminde ve boşluk oranında artış oluşur. Sonraki süreçte ise hava sıcaklığındaki artış ile çözölme olduğunda hidrasyon devam eder ancak permaabilitesi yüksek bir beton meydana gelir. Bu durum yavaş hidrasyona, hidrasyon ürünlerinin azalmasına, priz süresinin uzamasına, düşük dayanım kazanma hızına, yetersiz dayanıma, termal gerilme farklarına, dayanıklılığın azalmasına, betonun çatlamasına, yapısal güvenliğin tehlikeye girmesine ve betonun hizmet ömrünün önemli ölçüde kısılmasına neden olur (Karagöl, 2013).

Beton priz almış lakin yeterli dayanımı kazanmamış durumdayken kapiler boşluklardaki su donarsa hacmindeki %9 artış ile oluşan genleşme sonucunda boşluk çeperlerinde ve temas yüzeylerinde hidrolik bir basınç ortaya çıkar. Ayrıca donmamış su içerisindeki alkali miktarı daha fazla olacağından konsantrasyonu artar ve oluşan osmotik basınç neticesinde çok yoğun ortamdan az yoğun ortama doğru yani donan kısma doğru suyun hareketi neticesinde buz hacminde dolaylı bir yoldan da artış olmaktadır (Baradan ve ark. 2015). Bu durum sonucunda beton yapısı bozulmakta, kütle kayıpları meydana gelmekte, beton yüzeyinde pullanma ile nihayetinde düşük dayanımlı bir beton oluşmaktadır (Karagöl, 2013). Ayrıca donmuş ortamda,

beton iç yapısındaki boşluklarda ve dış ortam arasındaki nem farkı, su moleküllerinin betonun içinden dışına doğru göç etmesine neden olur ve bu da betonun içindeki hidratasyon reaksiyonları için yeterli su olmamasına yol açar (Huang ve ark. 2024).

İlerleyen süreçte hidratasyon sırasında beton bir veya birden fazla donma-çözülme döngüsüne maruz kalabilir ve bunun sonucunda yük taşıma kapasitesinde ve hizmet ömrü boyunca uzun vadeli dayanıklılığında onarılamaz hasarlar meydana gelebilir (Huang ve ark. 2024).

Kompozit bir malzeme olan betonu oluşturan temel bileşenler çimento, agrega ve karışım suyudur. Çimentonun kompozisyonu, dozajı ve tane boyutu, S/Ç oranı, mineral ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımı, taze ve sertleşmiş betonun sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve kür yöntemi gibi birçok faktör beton özelliklerini etkilemektedir (Karagöl, 2013). Soğuk havada beton dökümünde bu parametrelerin uygun seçilmesine ek olarak betonun priz süresini kısaltmak, suyun donma noktasını düşürmek ve hidratasyon ısını artırmak için kimyasal katkı seçimi, kullanılan her bir bileşenin soğuk hava koşullarına karşı dayanıklılığı ve beton karışım oranlarının (çimento dozajı, S/Ç oranı vb.) belirlenmesi de önem arz etmektedir (Karagöl, 2013). Örneğin S/Ç oranının yüksek olması durumunda erken yaşta betonda donabilir su miktarının artışı anlamına gelir. Bu durumda donma hasarı yoğunlaşır, daha boşluklu bir içyapı ve daha fazla dayanım kaybı oluşur. Bir başka parametre olan çimento dozajının çok düşük veya çok yüksek olması durumunda hidratasyon reaksiyonu çimento dozajına hassas olduğundan çimentonun hidratlanması engellenmektedir (Zhang ve ark. 2020). Bu sebeple dozajın uygun seçilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca daha ince ve erken yaş dayanımı yüksek olan çimentoların seçilmesi betonun don direnci üzerinde olumlu etki oluşturmaktadır.

Basınç dayanımı açısından hidratasyon sürecinde, TS 1248'de 4 MPa olarak verilen ve ACI 306R-16'ye göre 3,5 MPa'lık minimum basınç dayanımına ulaşılan zamana denk gelen doygunluk derecesi önemli ölçüde azalınca kadar beton donmaya karşı korunmalıdır. Bu dayanım değeri normal sıcaklıklara maruz kalan beton karışımları için ilk 24 saatte elde edilir. Beton, 3,5 MPa'lık bir basınç mukavemetine ulaşmadan önce donmaya maruz kalırsa, basınç mukavemeti önemli ölçüde azalacaktır (Nassif ve Petrou, 2013). Ancak erken yaşta donmanın betonun basınç, eğilme ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri, su emme ve kütle kaybı gibi fiziksel özellikleri ve durabilitesi üzerindeki etkisini inceleyerek koruyucu önlemler almak betonun dayanıklılığını etkili bir şekilde iyileştirebilir ve hizmet ömrünü artırabilir.

Sertleşmiş betonun boşluk yapısı hem erken yaşta hemde ileri yaşta donmaya karşı direnci etkilemektedir. Boşluk yapısının oluşumunda en önemli parametrelerden birisi kür işlemidir. Öyleki yeterli kür süresi ve kür sıcaklığı çimento hidratasyonu üzerinde önemli bir

parametre olup sertleştirilmiş çimento hamurunun performansını ve gözenek yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Gözenek yapısı ve oranı ise betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerinde oldukça etkilidir (Li ve ark. 2024). Ayrıca, düşük sıcaklıkta kürlemenin farklı S/Ç oranlarında erken yaşta betonun dayanımı üzerinde daha ciddi etkilere sahip olduğu, ancak ileri yaşta nispeten daha düşük bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir.

Soğuk Havanın Negatif Etkilerinin Azaltılabilmesi Amacıyla Alınabilecek Tedbirler

Önceki bölümde ifade edilen durumların oluşmaması için soğuk hava koşullarında beton dökümünde; ilgili standartlarda öngörülen düşük hava sıcaklığının olduğu suyun donabileceği durumlarda beton üretiminden kaçınmak, eğer döküm yapılması söz konusu ise günün sıcak saatlerinde beton dökümü yapmak, hidrasyon ile açığa çıkan ısı, yalıtım malzemeleriyle betona hapsedilmesini sağlamak, agrega ve karışım suyu gibi beton bileşenlerini veya uzun priz sürelerini önlemek için yapıyı ısıtmak, hidrasyon ısı yüksek çimento kullanmak, S/Ç oranını düşürmek ve priz hızlandırıcı, antifriz, hava sürükleyici ve hidrasyon suyunun donma noktasını düşürecek katkıları kullanmak gibi önlemler alınabilir (Tunç, 2019, Huang ve ark. 2024).

Soğuk hava koşullarında oluşan tüm tahrip edici etkenlere karşı alınması gereken bazı önlemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Karagöl, 2013, TS 1248, 2012):

- Uygun kür yönteminin belirlenmesiyle birlikte betonun uygun şekilde kür edilmesi
- Özellikle döşemelerin inşasında; kalıp ve donatıların yüzeyindeki buz veya karın temizlenmesi gibi döküm sahasında gerekli hazırlıkların önceden yapılması
- Betonun genç yaşta donma-çözölmeye uğraması önlenmelidir.
- Betonun normal dayanım artışını olumlu yönde etkileyecek kür şartları sağlanmalı ve aşırı sıcaklık yükselmeleri önlenip betonun kürü için gereken nem temin edilmelidir.
- Yapım öncesi bir toplantı yapılarak soğuk havada beton dökme yöntemlerinden hangisinin kullanılacağına karar verilmelidir.
- Muhtemel donatı korozyonu ve alkali silika reaksiyonlarına karşı soğuk havada dökülen betonda kullanılacak katkı çeşidine dikkat edilmeli ve karışım tasarımına uygun katkıları kullanılmalıdır.
- Betonun ilk günlerdeki dayanımını artırmak için uygun çimento ve katkı maddesi kullanmak
- Beton priz süresini hızlandırıcı katkıları kullanmak ve yüksek hidrasyon ısına sahip çimento kullanmak
- Minimum beton dayanımı elde edilene kadar ısıtılmalı örtüler, kaplamalar veya yalıtım malzemeleri ile betonu korumak ve bu süre boyunca ıslak kürlemeden kaçınmak

- Belirli aralıklarla karot örnekleri alınarak beton dayanım kazanma oranını takip etmek
- Uygun sıcaklıkta taze beton üretimi için ya suyu ya da agregayı ısıtmak
- Kalıpları beton yerleştirilmeden önce ısıtmak.

Hidratasyon Isısı Gelişimi

Ekzotermik bir reaksiyon olan hidratasyon esnasında sıcaklık ve bağıl neme de bağlı olarak beton döküldükten sonra, özellikle ilk birkaç günde çok fazla ısı açığa çıkar (Wang ve ark. 2018).

Ancak farklı çevresel bozucu etkiler veya malzeme özelliklerine göre hidratasyon ısısının hızı, gelişimi ve açığa çıkan toplam ısı miktarı değişmektedir. Örneğin yaz mevsiminde sıcak havada beton dökümünde açığa çıkan ısı neticesinde beton içerisinde ısı yayılımının arttığı ve sıcaklık dağılımının 50-70 °C'lere kadar ulaşabildiği barajlar gibi kütle betonları için sıcaklık artışı azaltarak oluşabilecek çatlakların önüne geçmek kritik öneme sahiptir. Esasen hidratasyon süreci için uygun sıcaklık 20-23 °C ve bağıl nem %95 civarı olan standart su kürü koşullarıdır. (Neville, 2011, Mehta ve Monterio, 2014 ve Yasien ve Bassuoni ,2024)

Sıcak hava koşullarının aksine soğuk havada beton dökümünde ise hidratasyon ısısı gelişimi yavaşlamaktadır. Soğuk havada Portland çimentosunun daha düşük hidratasyon hızı nedeniyle betonun dayanım gelişimi de keskin bir şekilde azalır. Bu şekilde düşük dayanımlı betonda düşük hidratasyon derecesi don hasarına karşı betonu daha yatkın hale getirecektir. Ancak alınacak önlemlerle hidratasyon gelişimi uygun şekilde sağlanırsa hidratasyon derecesinin artışıyla daha dirençli beton üretimi de mümkün olabilir (Zhang ve ark. 2020). Daha ince tane yapısını sahip erken yaş dayanımı yüksek çimento tipinin seçilmesi, uygun kimyasal katkıların kullanılması ve betonun dondan korunması gibi önlemler ile hidratasyon gelişimi üzerindeki negatif etkenler elimine edilebilir.

Betonda Kullanılan Katkı Maddeleri

Düşük sıcaklıkta döküm yapıldığında termal şoklardan donmadan betonun korunabilmesi için kür süresince gerekli bir sıcaklığın sağlanması amacıyla beton bileşenleri ısıtılır veya yapı elemanları yalıtım yapılarak korunur. Buna ilaveten farklı içeriğe ve fonksiyona sahip katkılar da kullanılarak beton dondan korunabilir (Tunç, 2019).

Beton katkıları çimento, su ve agrega hariç beton üretiminde taze ve sertleşmiş betonun mekanik veya durabilite özelliklerini iyileştirmek için kullanılan farklı bileşimlere sahip organik veya inorganik kökenli mineral veya kimyasal katkı maddeleridir (Karagöl, 2013).

Kimyasal katkılar genel olarak priz hızlandırıcı, priz geciktirici, süper ve hiper akışkanlaştırıcı katkılar, su itici ve geçirimsizlik sağlayan katkılar, beton kohezyonunu artıran katkılar, antifriz katkıları ve hava sürükleyici katkıları gibi farklı özelliklerde üretilebilmektedir (Nmai, 1998). Kimyasal katkıların seçiminde katkının işlevi, bileşimi ve diğer özellikleri, beton üretiminde kullanılış şekli, çimento veya diğer bağlayıcılar ile uyumu, betonda uygulanan kür sistemi, katkının karışıma dahil edilme süreci, çevre koşulları ve sıcaklık gibi birçok faktör etkili olmaktadır. Örneğin Wang ve ark (2006) buz çözücü kimyasalların beton üzerindeki zararlı etkilerini incelediği çalışmada kalsiyum klorürün betonarme yapı elamanlarında yüksek korozyon hasarına neden olduğunu tespit etmiştir. Dolayısıyla klorür içermeyen kalsiyum nitrat ve kalsiyum nitrit gibi katkıları antifriz katkı olarak düşük sıcaklıklardaki betonda korozyon inhibitörü olarak kullanılabilir (Negheimish ve ark. 2021, Derakhshani ve ark. 2023, Angtadt ve Hurley 2021).

Kimyasal katkıları içerisinde en çok kullanılan akışkanlaştırıcı katkıları genellikle beton kıvamında iyileşme ve su/çimento oranında düşüş sağlayarak daha yüksek dayanımlı beton üretiminde pozitif etki göstermektedir. Öyleki günümüzde akışkanlaştırıcı katkı olmaksızın beton üretimi neredeyse hiç yapılmamaktadır.

Soğuk hava koşullarına karşı etkili olan ve taze ve sertleşmiş haldeki betonda uygulama kolaylığı açısından da en çok tercih edilen diğer kimyasal katkıları priz hızlandırıcı, antifriz ve hava sürükleyici katkılarıdır (Polat, 2016).

Priz Hızlandırıcı ve Antifriz Katkıları

Genel olarak taze betonun erken yaşta dondan etkilenmemesi veya bu durumun minimize edilmesi için kullanılan antifriz katkıları betondaki sıvı fazın donma noktasını düşürerek ve priz süresini kısaltarak çimentonun hidratasyonunu ve erken yaştaki dayanım gelişimini hızlandırmanın yanı sıra, beton plastik kıvamda iken buz oluşumunu önleyebilir ve böylece düşük sıcaklıklarda beton üretimine katkı sağlayabilir (Karagöl, 2013, Karagöl ve ark. 2015, Polat, 2016).

Literatür incelendiğinde üre, kalsiyum nitrat, kalsiyum nitrit, kalsiyum klorür, sodyum nitrit, sodyum nitrat, sodyum klorür, potasyum ve kalsiyum klorür-nitrit-nitrat vb. en çok tercih edilen antifriz katkılarıdır (Polat, 2016).

Portland çimentosunun alit ve belit fazları gibi kalsiyum iyonları içeren kalsiyum nitrat, kalsiyum nitrit ve kalsiyum klorür vb. katkıları hidratasyon yoğunluğunu artırdıkları için düşük sıcaklıklarda priz hızlandırıcı, dayanım artırıcı ve donma önleyici katkı maddesi olarak tanımlanırlar (Alzaza ve ark. 2022, Kıcaite ve ark. 2020 ve Karagöl ve ark. 2015). Kalsiyum

nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) ve kalsiyum klorür (CaCl_2) gibi kalsiyum içeren antifriz katkı maddeleri, çimentonun hidratasyonunu hızlandırır ve bu da düşük sıcaklıkta bile priz süresini kısaltır ve mukavemet geliştirme hızını hızlandırır. Ancak kalsiyum nitratın hızlandırma etkinliği kullanılan çimento türüne bağlıdır. Dahası, çimentodaki Belit (C_2S) içeriğinin veya klinker prosesinde Belit oluşumuna yol açan diğer çimento özelliklerinin priz hızlandırıcı etkinliğinde artışa yol açtığı tespit edilmiştir (Derakhshani ve ark. 2023, Sintef 1993, Justnes ve Nygaard 1994, Justnes ve Nygaard 1995).

Bu nedenle, CaCl_2 ve $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ çimentolu malzeme için çok işlevli katkı maddeleri olarak kabul edilir. CaCl_2 'nin antifriz katkısı olarak iyi performansına rağmen, klorürün varlığı betona gömülü takviye çubuklarının korozyon riskini artırır. Bu, klorür içermeyen antifriz katkı maddeleri ve hızlandırıcıları geliştirmeye yönelik ilgiyi artırmıştır (Alzaza ve ark. 2022).

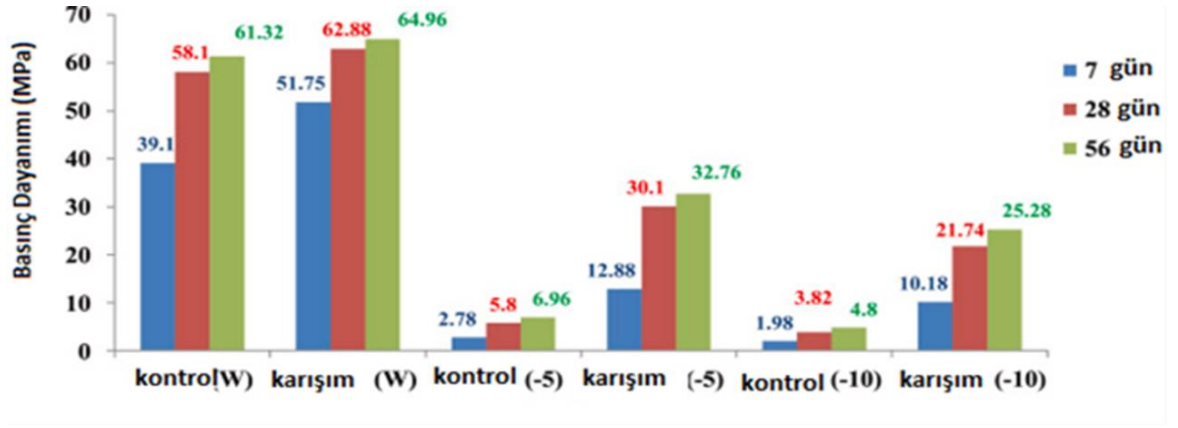
Liu ve ark. (2022) farklı su/çimento oranlarının ve antifriz tiplerinin $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye maruz kalan sülfalüminat çimento esaslı malzemelerin donma hasarına olan etkilerini incelemiştir. Bulduğu sonuçlarda sülfalüminat çimento esaslı harcının erken don hasarının, su/çimento oranının azaltılması ve kalsiyum nitrat eklenmesiyle azaltılabilen buz içeriğiyle yakından ilişkili olduğunu görmüştür.

Bir diğer antifriz katkı olan sodyum tiyosiyanat (NaSCN), tiyosiyanik asidin (HSCN) bir sodyum tuzudur ve sertleşmeyi hızlandıran bir özelliğe sahiptir (Han ve Kumar 2021).

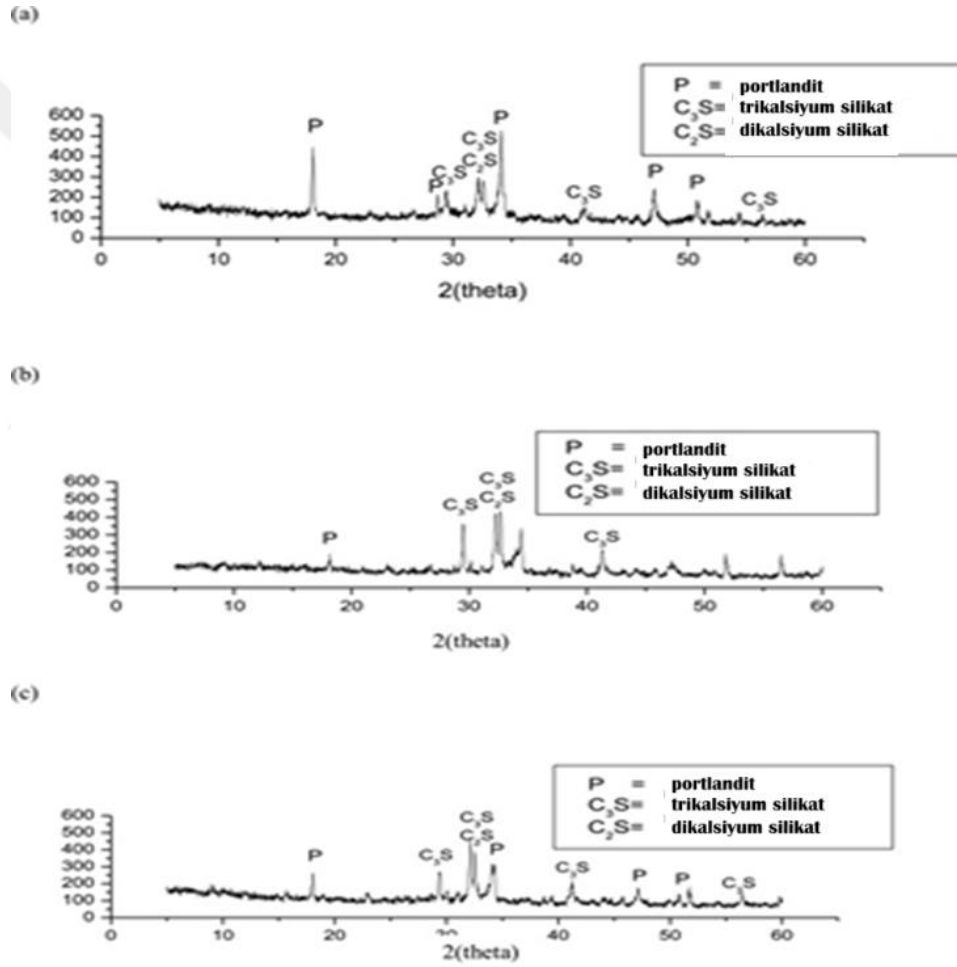
Yapılan bir çalışmada (Han ve Kumar 2021) kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat katkılarının birlikte kullanımı ile çimentonun hidratasyon ürünlerinin arttığı ve daha erken yaşta daha yüksek dayanım elde edildiği görülmüştür.

Antifriz Katkıların Betonun Basınç Dayanımı, Hidratasyon Isısı ve İç Yapı Özelliklerine Etkisi

Han ve Kumar (2021) antifriz katkıların betonun basınç dayanımı ve iç yapı özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için soğuk hava koşullarında farklı kürleme koşulları altında ikili antifriz katkı maddeleri kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat ile beton üretmişlerdir. Kalsiyum nitrat; priz hızlandırıcı, donma önleyici katkı maddesi ve korozyon inhibitörü vb. olarak kullanılabilen beton için çok işlevli bir katkı maddesidir. Sodyum tiyosiyanat (NaSCN) ise sertleşmeyi kolaylaştıran tiyosiyanik asidin (HSCN) bir sodyum tuzudur. Bu çalışmada kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat çimento ağırlığının %4–10'u arasında ve %0,5–2,5'i arasında kullanılmıştır ve elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 1'de ve XRD analiz sonuçları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 1. Normal kürleme ve donma sıcaklıklarına maruz kalan betonun basınç dayanımı



Şekil 2. Çeşitli kürlenmiş şartlandırılmış numunelerin XRD analizi, a) Ortam sıcaklığında suda kürlenmiş kontrol çimento numuneleri; b) -5 °C'de kürlenen kontrol çimento numuneleri; c) -5°C'de kürlenen ikili antifriz katkıları içeren çimento

Yukarıdaki şekilde XRD analizinden anlaşıldığı üzere, özellikle soğuk hava sıcaklıklarına maruz kalma durumunda, çimentonun hidratasyon ürünleri antifriz katkılarının kullanımıyla önemli ölçüde gelişmiştir (Han ve Kumar 2021).

Han ve Kumar (2021) basınç dayanımı sonuçlarına göre, antifriz katkı maddeleri kullanarak katkılı betonunda, kontrol betonuna kıyasla erken yaşta daha yüksek dayanım gelişimi gözlemlenmiştir. Öyle ki kontrol betonunun dayanımı, donma sıcaklıklarına maruz kalmasıyla beraber azalmıştır. Buna karşılık betonda kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat katkılarının birlikte kullanımının -5 °C ve -10 °C'lik donmaya maruz kalmasının yanı sıra donma (-5 °C) ve çözülme (+10 °C) döngülerinde betonun dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca Yoneyama ve ark. (2021) çimento hamurunun basınç dayanımının kalsiyum nitrat dozajıyla pozitif korelasyon gösterdiğini ve %13 kalsiyum nitrat içeren çimento hamurunun 1 günlük basınç dayanımının sıradan çimento hamurunun 2,79 katına ulaşabileceğini öne sürmüştür. Li ve ark. (2020) %7 kalsiyum nitrat ilavesinin, -15 °C'de 7 gün donmaya maruz kaldıktan sonra 28 gün standart su kürü ile betonun basınç dayanımının normal betona kıyasla yaklaşık %66,7 oranında arttığını bildirmişlerdir.

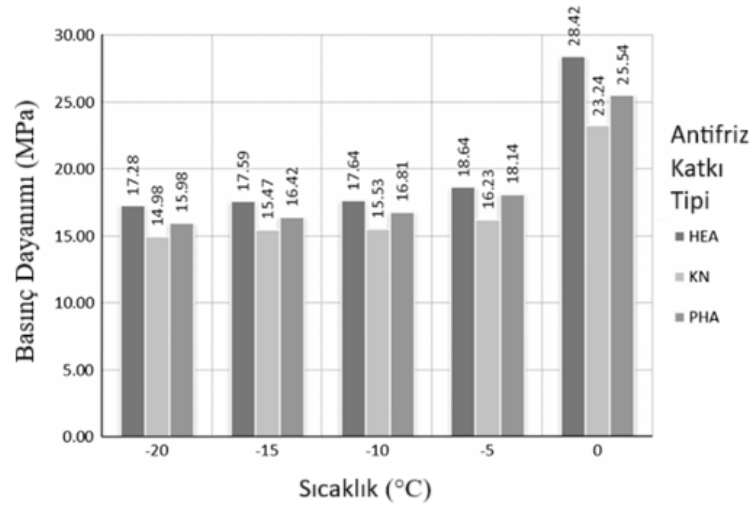
Huang ve ark. (2017) yaptığı bir çalışmada P.II 52,5R çimentosunun erken dayanım gelişiminde 15 kimyasal katkı maddesinin (alkanolaminler, alkoller, klorür/aşındırıcı olmayan hızlandırıcılar ve geciktiriciler dahil) etkisini istatistiksel yöntemler kullanarak belirlemiştir. Açığa çıkan sonuçlar, katkı oranı ağırlıkça %0,05'ten az düşük dozdaki sodyum tiyosiyanat, kalsiyum klorür, sodyum hidroksit, trietanolamin ve glikozun çimentonun 1 günlük dayanımını artırdığını ve yalnızca sodyum tiyosiyanat, trietanolamin, triizopropanolamin ve kalsiyum klorürün 3 güne kadar etkili olduğunu göstermiştir. Kalorimetrik test sonuçları, trietanolamin ve sodyum tiyosiyanat arasındaki etkileşimin, hem C₃S hem de C₃A fazları üzerindeki hızlandırıcı etkiler nedeniyle 72 saatten önce açığa çıkan ısı miktarı için daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, katkı oranı ağırlıkça %0,1 daha yüksek bir dozda bile kalsiyum nitratın etkisinin, kalsiyum klorürün etkisinden çok daha az etkili olduğunu ve kalsiyum klorürün çimentonun genel erken dayanımını önemli ölçüde iyileştirmedığını göstermiştir.

Zhou ve ark. (2022) klorür içermeyen antifriz katkı maddelerinin, sıfırın altındaki sıcaklıklarda Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu gibi farklı bağlayıcılarla çimento hamurunun reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve bu konuda daha derin bir analiz elde etmek için bir araştırma yapmıştır. Kalsiyum nitrit (Ca(NO₂)₂), kalsiyum nitrat (Ca(NO₃)₂) ve üre (CO(NH₂)₂) gibi farklı tipte klorür içermeyen antifriz katkıları ile çimento esaslı hamur numuneleri hazırlamış ve -6, -12 ve -20 °C'de kürlemiştir. Numunelerin farklı kürlenme sürelerinde viskozitesi mikroyapısal, elektrokimyasal özellikleri araştırılmıştır ve klorür içermeyen antifriz kullanımının viskoziteyi artırdığı bulunmuştur. Bu durum antifriz katkı maddelerinin erken yaşlarda çimento hidratasyonunu hızlandığını göstermektedir. Bu

bağlamda çimento hamurunun reolojik özellikleri üzerindeki etki, kürleme süresine, antifriz oranına, çimento içeriğine , sıfırın altındaki sıcaklığa ve çimento-cüruf oranına da bağlıdır.

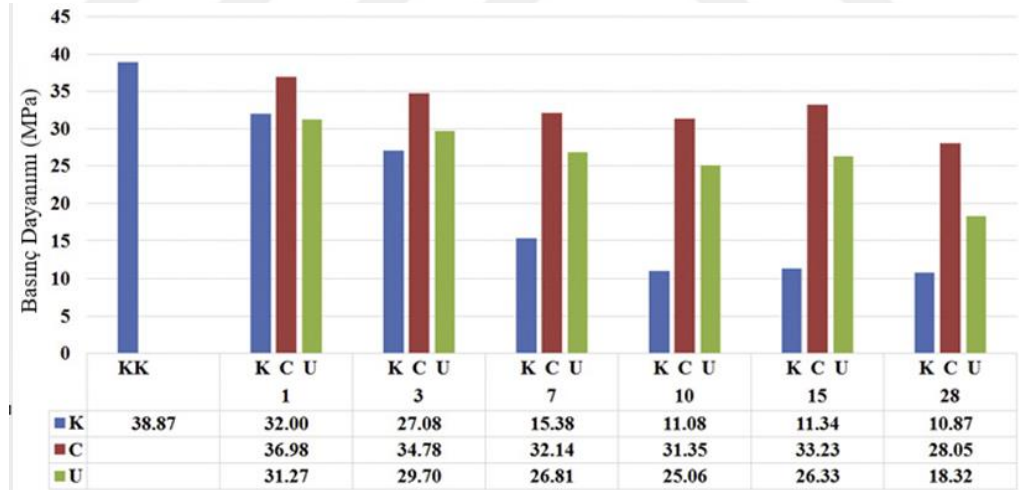
Karagöl ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise düşük sıcaklıklarda ve dış ortam kış mevsimi koşullarında antifriz katkılı taze ve sertleşmiş betonların davranışı incelenmiştir. Çalışmada katkısız kontrol karışımı, %9 kalsiyum nitrat kullanılan karışım, %9 üre kullanılan karışım ve %4,5 üre + %4,5 kalsiyum nitrat kombinasyonu şeklindeki karışım olmak üzere dört farklı karışım hazırlanarak 7, 28, 90 ve 365 gün (90 gün derin dondurucu kürlemesi) boyunca dört farklı düşük derin dondurucu sıcaklığında (-5, -10, -15 ve -20 °C) kürlenmiştir. Bir grup numune ise ASTM C 192'ye göre 7, 28, 90 ve 365 (90 gün su kürü + 275 gün laboratuvar koşulu) gün boyunca suda (23 ± 2) °C'de kürlenmiştir. Ayrıca aynı karışımlardan bir grup numune de dış ortam koşullarına maruz bırakılmıştır. Basınç dayanımının, özellikle kontrol ve %9 üre içeren numuneler için -15 °C ve -20 °C'de 7 ve 28 günlük kürleme sürelerinde çok düşük olduğu ancak kür süresinin artmasıyla birlikte %4,5 üre + %4,5 kalsiyum nitrat içeren numunelerin basınç dayanımının arttığı ve aynı sıcaklığa maruz bırakılan kontrol numunesinin basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında, dış ortam kış koşullarında 90 ve 365 günlük basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %108 ve %82 oranında bir artış olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla antifrizler özellikle kış aylarında ve soğuk iklime sahip bölgelerde betonda kullanımı öne çıkan temel katkı malzemesidir (Çullu ve Arslan 2013).

Çullu ve Arslan (2013) tarafından yapılan bir çalışmada ise üç farklı antifriz katkı %30 kalsiyum nitrat + %5 hidroksietilamin karışımı (HEA), kalsiyum nitrat (KN) ve polihidroksi amin (PHA) katkıları kullanılmıştır. Çalışmada betonun geçirgen gözenek hacmi, su emme oranı, yoğunluk, kılcallık oranı, sızdırmazlık, basınç dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı, çekme dayanımı gibi özellikleri araştırılmıştır (Çullu ve Arslan 2013). Şekil 3'te görüldüğü üzere betonun maruz kaldığı sıcaklık değerlerinin azalmasına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri de düşmesine rağmen basınç dayanımı sonuçlarında %30 kalsiyum nitrat ve %5 hidroksietilamin karışımının (HEA) en iyi performansı verdiği belirlenmiştir (Çullu ve Arslan 2013).



Şekil 3. Ortalama basınç dayanımı değerleri

Polat (2016) ise ASTM Tip I Normal Portland çimentosu ve çimentonun %0,5'i oranında süper akışkanlaştırıcı (SP) kullanarak bir beton karışımı üretmiştir. Çalışmada çimento içeriği ve su-çimento oranı sırasıyla 400 kg/m³ ve 0.40 alınmıştır ve karışımlarda çimento dozajının %6'sı oranında (karışım suyunun kütlege %15'i) oranında üre ve kalsiyum nitrat kullanılmıştır. Betonun su emme, UPV ve basınç dayanımı deneyleri ve iç yapı analizi yapılmış ve bu çalışmadaki basınç dayanımı sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Donma-çözölmeye maruz kalan taze beton karışımlarının basınç dayanımına üre ve kalsiyum nitratın etkisi

Tüm betonlar için, özellikle basınç dayanımında önemli bir düşüşe neden olan donma-çözölme döngülerine maruz kalan kontrol numuneleri için 28 günde dayanımda azalma yönünde genel bir eğilim vardır. Görüldüğü gibi, kontrol numunelerinin basınç dayanımındaki azalma, antifriz katkı numunelerinininkinden çok daha fazladır (Polat 2016).

Üre sebebiyle dayanımdaki azalmanın kalsiyum nitrattan daha yüksek olduğu görülmektedir. Suyun donma noktasının düşürülmesi, antifriz katkı maddelerinin donma

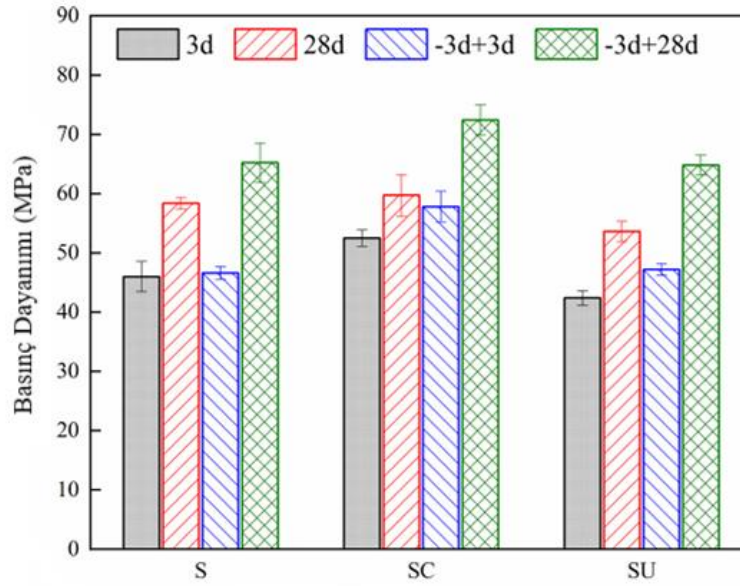
noktasını düşüren en düşük sıcaklık olan antifriz katkı karışımının ötektik noktası (katkının donma noktası) ile ilgilidir ve karışımın tipine bağlıdır (Polat 2016).

Deney sonuçları, antifriz katkılarının çimento hamurunun gözenek yapısını değiştirdiğini, çimento hamurunun yüzey alanını arttırdığını ve mukavemet artırdığını göstermiştir (Polat 2016).

Bir başka çalışmada Karagöl ve ark. (2013) hem kontrol hem de kalsiyum nitrat betonunun basınç dayanımının, azalan derin dondurucu sıcaklıklarıyla azaldığını gözlemlemiştir. Ancak, kalsiyum nitrat içeren betondaki azalmaların, kontrol örneğinden daha düşük olduğu aşıkardır.

Karagöl ve ark. (2013)'na göre kalsiyum nitrat içeren betonun basınç dayanımı, ayrıyeten herhangi bir önlem alınmadan -10 °C derin dondurucu sıcaklığa 14 gün maruz kalmaya yetecek kadar yüksektir. Fakat, kalsiyum nitrat katkısı, 28 günlük derin dondurucuya maruz kalmasından sonra, herhangi bir koruma veya ek su kürlemesi olmadan sadece -5 °C'ye maruz kalan betonu koruyabildiği görülmüştür.

Liu ve ark. (2022) antifriz katkıları olarak analitik saf kalsiyum nitrat ve analitik saf üre kullandığı çalışmasında sülfoalüminat çimento esaslı harcı için ISO standart kum kullanmıştır. Sülfoalüminat çimento esaslı betonu için kullanılan ince agrega, incelik modülü 2.3 olan nehir kumu ve kaba agrega, tane boyutu 5-20 mm olan kireçtaşı çakılıdır. %40 katı içeriği ve %25 su azaltma etkinliği olan bir polikarboksilik asit süper akışkanlaştırıcı kullandığı bu çalışmada betonun fiziksel özelliklerini belirlemek için mekanik performans testi, kılcal su emme testi, serbest su içeriği, mikro yapı gözlemi, hacim deformasyon testi ve donma-çözülme döngüsü testleri yapmıştır. Üç farklı su/çimento oranı belirleyerek yaptığı basınç dayanımı deney sonuçları artan su/çimento oranı ile azalmıştır. Harçların - 3 + 3 günlük ve - 3 + 28 günlük basınç dayanımlarının, standart kür numunelerinin dayanımından daha yüksek olduğu ve belirgin bir dayanım düşüşü olmadığı görülmektedir (Liu ve ark. 2022).



Şekil 5. Antifriz katkısının sülfoalüminat çimento harcının basınç dayanımına etkisi

SC ve SU antifriz karışımları sırasıyla %5 kalsiyum nitrat ve üre içermektedir. Sülfoalüminat çimento harcının don hasarına antifriz katkısının etkisini araştırmak için w/c oranı 0,45 olarak sabitlenmiştir (Liu ve ark. 2022).

Şekil 5 standart kütleme harcı için, SC grubunun basınç dayanımında S grubuna kıyasla hafif bir artış gösterdiğini, SU grubunun ise dayanımda bir düşüş gösterdiğini ortaya koymaktadır. Negatif sıcaklıkta kürlenmiş harç için SC, kontrol grubu S ile karşılaştırıldığında -3+28 günlük dayanımında bariz bir artış gösterirken, SU hafif bir artış göstermiştir (Liu ve ark. 2022).

Çalışmanın sonuçlarını genel olarak özetlersek kalsiyum nitratın eklenmesi ile erken aşamada donabilir su içeriği önemli ölçüde azalmaktadır, bu da sülfoalüminat çimento harcının ilk kılcal su emilimini ve betonun erken hacim deformasyonunu azaltır. Bununla birlikte, üre ilavesi ile, sülfoalüminat çimento harcının erken hidratasyonunun geciktiği ve donabilir su içeriğinin arttığı, bunun da betonun donma hasarını arttırdığı görülmüştür. Kalsiyum nitrat ilavesi, sülfoalüminat çimento harçlı betonun donma-çözülme döngülerine dayanma kabiliyetini biraz azaltır ve üre ilavesi, önemli bir olumsuz etki gösterir. Bununla birlikte, sülfoalüminat çimento harçlı betonunun erken mikro yapı gelişimini koruyabileceğinden, negatif sıcaklıklarda sülfoalüminat çimento harçlı betonu için kalsiyum nitrat hala önerilmektedir (Liu ve ark. 2022).

Saha ve ark. (2020) zaman alanı reflektometrisi (TDR) tekniği kullanarak üç hafta boyunca -10 °C'de kürlenmiş kontrol ve antifriz eklenmiş çimento hamurlarındaki hacimsel su içeriğinin ve hidratlanmış ve hidratlanmamış çimentonun evrimini izlemiştir. Kullanılan bu teknik ile sonuçlar, antifrizle işlenmiş numunelerde sıvı suyun varlığına dair açık kanıtlar

mevcuttur ve su ve reaksiyona girmemiş çimento miktarı zamanla azalıp hidrasyonun devam ettiğini göstermiştir.

Karagöl ve ark. (2013) bir çalışmada çalışma boyunca tüm karışımlar için ASTM Tip I Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ve musluk suyu kullanmıştır. Katkı olarak kalsiyum nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ %98 saf) kullanmıştır. İri agrega olarak maksimum nominal boyutu 16.0 mm olan agrega kullanmıştır. İnce agrega Erzurum/Aşkale yöresinden gelen doğal kumdur. Tüm karışımlar için çimento ağırlığının %0,5'i oranında süper akışkanlaştırıcı kullanmıştır. Çünkü bu çalışmanın amacı tek başına kalsiyum nitratın etkilerini araştırmaktır. Dolayısıyla beton karışımına hava sürüklenmemiştir. Kontrol karışımları ve kalsiyum nitrat karışımları için aynı su/çimento oranı 0,40 olarak seçilmiştir. Ağırlıkça %6 kalsiyum nitrat kullanılmıştır (Karagöl ve ark. 2013).

Sonuç olarak hem kontrol hem de kalsiyum nitrat betonunun basınç dayanımı, derin dondurucu sıcaklıklarının düşmesiyle azalmıştır. Ancak kalsiyum nitrat katkılı betondaki azalmalar kontrol örneğine göre daha düşük olmuştur (Karagöl ve ark. 2013).

Kalsiyum nitrat betonunun basınç dayanımının, herhangi bir ek önlem olmaksızın 14 gün -10 °C derin dondurucu sıcaklığına maruz kalmaya kadar yeterince yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, 28 günlük derin dondurucu küründen sonra herhangi bir koruma veya ek su kürü olmaksızın sadece -5 °C'ye maruz kalan betonu koruyabildiği ortaya çıkmıştır (Karagöl ve ark. 2013).

Kalsiyum nitrat, erken yaşta basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemiştir. Sonuçlar, kalsiyum nitratın iyi bir priz hızlandırıcı olduğunu göstermektedir. Betonun istenilen priz süresi, basınç dayanımı ve diğer özellikleri soğuk havalarda kalsiyum nitrat katılarak elde edilebilir. Aynı zamanda bu katkı maddesi, sertleştirme eyleminin oranını artırır ve dahili dondurma tarafından geliştirilen çabaları üstlenmek için yeterli güce ulaşmak için gereken süreyi kısaltır (Karagöl ve ark. 2013).

Liu ve ark. (2021) bir araştırma çalışmada Portland çimentosu için kalsiyum floroalüminat ($11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$), kalsiyum tiyosiyanat ($\text{Ca}(\text{SCN})_2$) ve trietanolamin ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$) içeren üçlü sertleşmeyi hızlandırıcı katkı maddelerinin etkisini incelemiştir. Bu bağlamda üçlü katkı maddesi kullanımı çimentonun priz süresini kısaltmış; akışkanlığı ve erken dayanımı, 20°C'de kürlenmiş geleneksel katkı maddelerine kıyasla artmıştır.

Demirboğa ve ark. (2014) genellikle antifriz katkılarının hem donma noktası düşürücü hem de hızlandırıcı özelliği olduğunu ve ürenin ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) bu grupta yer aldığını çalışmalarında eklemiştir. Çalışmanın amacı, bir antifriz karışımı olarak üreyi araştırmaktır.

Ürenin -5, -10, -15 ve -20 °C'ye maruz kalan betonun basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmişlerdir. Örnekler ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile taranıp ve sonuçları değerlendirilip tartışılmıştır. Demirboğa ve ark.(2014) bu çalışmasında ASTM Tip I normal Portland çimentosu kullanmıştır. S/Ç oranı 0,40, çimento ağırlığı 400 kg/m³ ve katkı oranı ağırlıkça %6'dır. İşlenebilirlik, basınç dayanımı deneyi yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır.

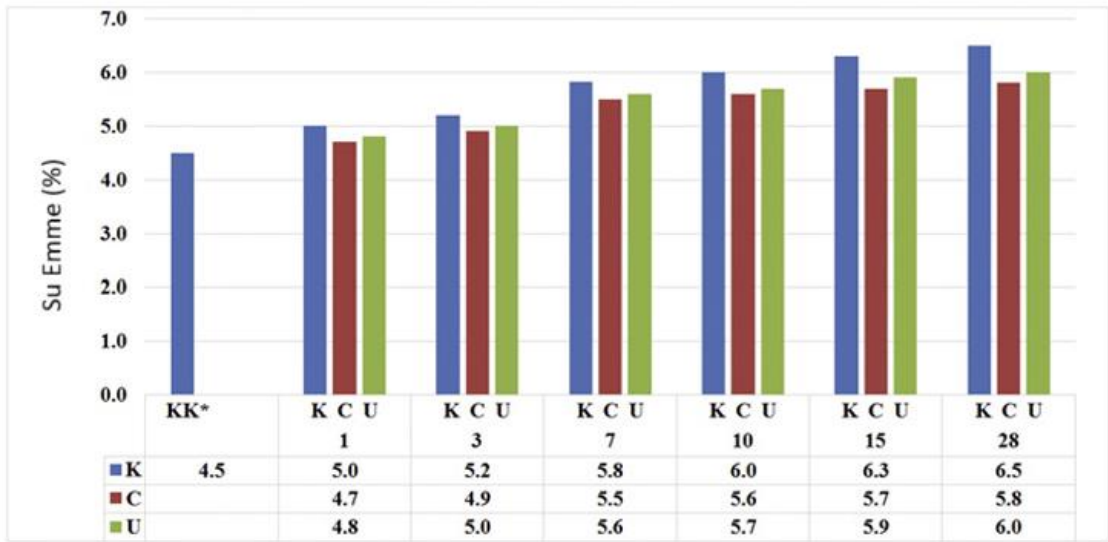
Demirboğa ve ark. (2014) elde ettiği sonuçlar; farklı kontrol karışımlarının ortalama çökmesi 4 cm iken, %6 üre içeren numunenin ortalama çökmesi 12 cm idi ve bu oldukça iyi akışkanlık göstermiştir. Bunun ana nedeni, ürenin bir süperakışkanlaştırıcı gibi davranması ve karışımın işlenebilirliğini arttırmasıdır. Bir diğer sonuç ise hem kontrol hem de üre betonunun basınç dayanımı, derin donma sıcaklıklarının düşmesiyle azalmıştır. Sonuçlar ayrıca, ürenin, herhangi bir harici veya ek koruma yöntemi ve önlemi olmaksızın -5 °C sıcaklıklar gibi uzun süre soğuk havaya maruz kalma süresi boyunca betonu koruyabileceğini göstermiştir.

Kalsiyum nitrat antifriz katkısının önemi kadar Wang ve ark.(2022) bir çalışmasında da Tiyosiyanatların Portland çimentosunun mukavemet gelişimini önemli ölçüde arttırdığını öne çıkarmıştır. Bu nedenle, tiyosiyanatlar genellikle Portland çimentosunun hem priz almasını hem de sertleşmesini hızlandırmak için diğer priz hızlandırıcılarla, özellikle de nitratlarla birleştirilir. Az miktarda sodyum tiyosiyanat ve kalsiyum nitrat kombinasyonunun, betonun 1 günlük dayanımını kalsiyum klorür olarak arttırabileceğini rapor etmişlerdir. Fakat sodyum tiyosiyanatın dezavantajlarının yüksek maliyet, toksisite ve potansiyel alkali agrega reaksiyonu (AAR) riski barındırdığı da ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, sodyum tiyosiyanatın pratik uygulamasında çimento ağırlığının maksimum %1'i kadar dozajın kullanılması tavsiye edilir. Ayrıca önerilen dozajlarda %0,75 ile %1 arasındaki sodyum tiyosiyanatın korozyon önleyici olarak görev yapabileceği de rapor edilmiştir.

Alzaza ve ark. (2022) C–S–H tohumlarının, üre ve kalsiyum nitrat gibi ikili antifriz karışımının ve kısa aralıklı oda sıcaklığında ön kürlemenin sıradan Portland çimento bağlayıcısı üzerindeki karşılıklı etkisini araştırdığı çalışmasında, bahsedilen birlikteliğin mikro yapının yoğunluğunu ve donma direncini arttırdığı görülmüştür.

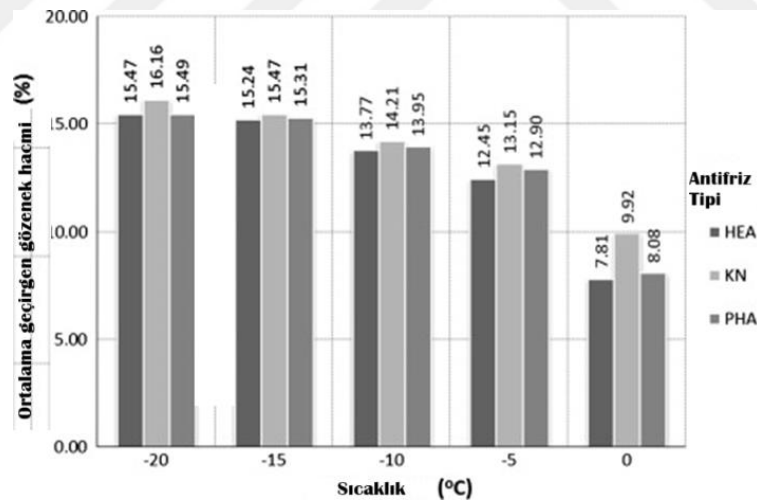
Antifriz Katkıların Beton Su Emme ve Kılcal Su Emme Özelliklerine Etkisi

Şekil 6'da görüldüğü üzere üre ve kalsiyum nitrat içeren betonlarda donmuş su miktarı daha düşük olmuş ve suyun genleşmesi nedeniyle beton çok daha az zarar görmüştür. Antifriz katkıları çimentonun hidrasyonunu hızlandırarak mukavemeti arttırırken gözenekliliği azaltarak su emilimini azaltır (Polat 2016).

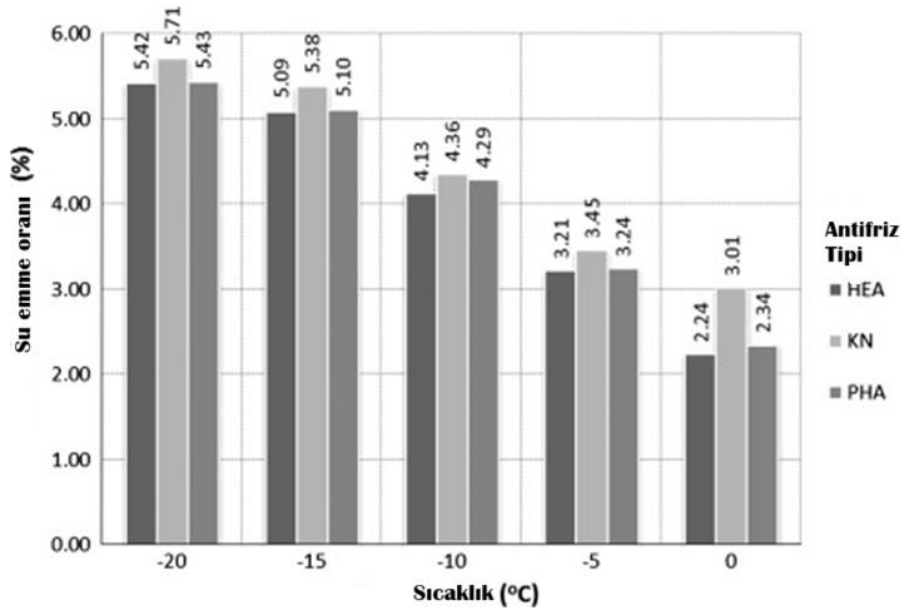


Şekil 6. Donma-çözülmeye maruz kalan taze beton karışımlarının su emmesi üzerine üre ve kalsiyum nitratın etkisi. (Metin ve tablolarda K, C ve U sırasıyla kontrol betonu, kalsiyum nitrat ve üre örneklerini göstermektedir.)

İncelenen başka bir çalışmada ise Şekil 7’de görüldüğü gibi geçirgen gözenek hacmi değeri, betonun kalınlığı ve çimentonun hidrasyonu için gerekli olan suyun donması ve beton içinde gözenekli bir yapı meydana getirmesi sebebiyle betonun maruz kaldığı sıcaklık değerlerindeki düşüşe paralel olarak artmaktadır (Çullu ve Arslan 2013).

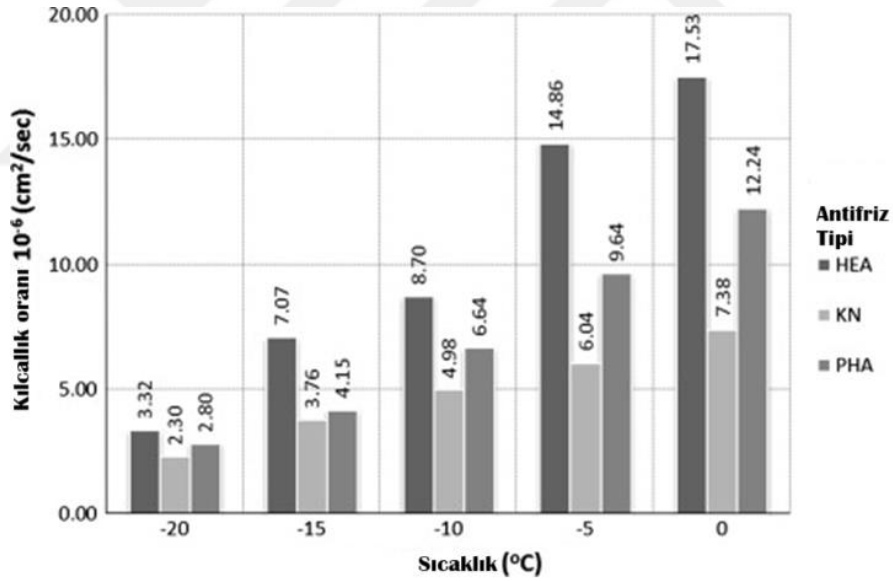


Şekil 7. Ortalama geçirgen gözenek hacmi.



Şekil 8. Su emme oranları

Şekil 8’den anlaşıldığı gibi Su emme oranı, betonun maruz kaldığı sıcaklık düşüşü sebebiyle artan boşluk yapısından dolayı artmıştır (Çullu ve Arslan 2013).

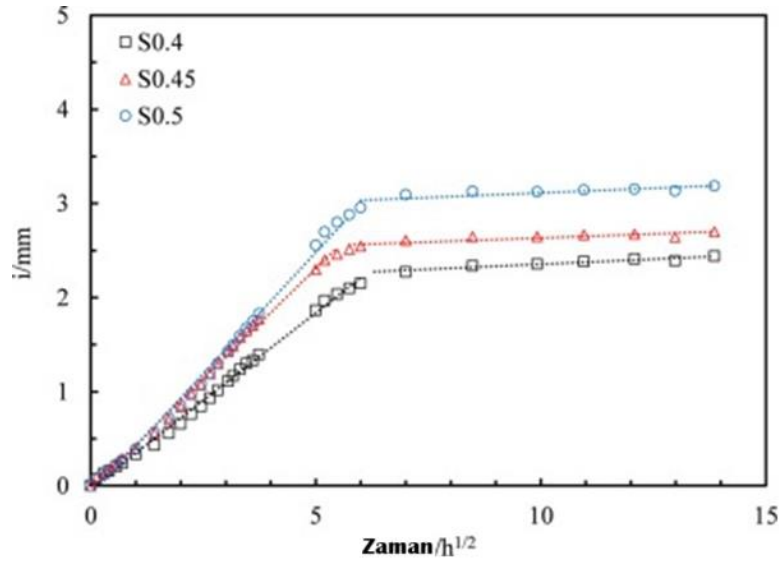


Şekil 9. Kılcallık oranı

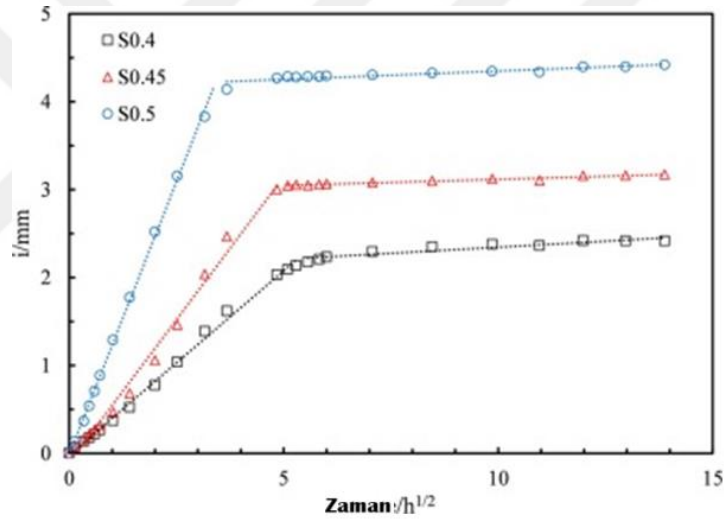
Şekil 9’da görüldüğü üzere kılcallık oranı, betonun maruz kaldığı ortamda sıcaklığın düşmesinden dolayı artan boşluk yapısına paralel olarak azalmıştır. (Çullu ve Arslan 2013).

Betonun içinde oluşan gözenekli yapı aynı zamanda betonun birim hacim ağırlığını da etkileyerek azaltmıştır. (Çullu ve Arslan 2013).

Liu ve ark. (2022) bir çalışmada ise 28 gün ve -3+28 gün kür altında farklı su/çimento oranlarına sahip numuneler üzerinde kılcal su emme testi yapmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. 28 gün kür edilen farklı s/ç oranlarına sahip numunelerin kılcal su emme eğrisi.



Şekil 11. -3+28 gün kür edilen farklı s/ç oranlarına sahip numunelerin kılcal su emme eğrisi

Şekil 10 ve Şekil 11’de görüldüğü gibi hem 28 günlük hem de -3 + 28 günlük numuneler, su/çimento oranı azaldıkça daha yavaş ilerleyen bir su emme oranına ve daha da küçük su emme kapasitesine sahiptir ve durum da daha yoğun bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir.(Liu ve ark. 2022).

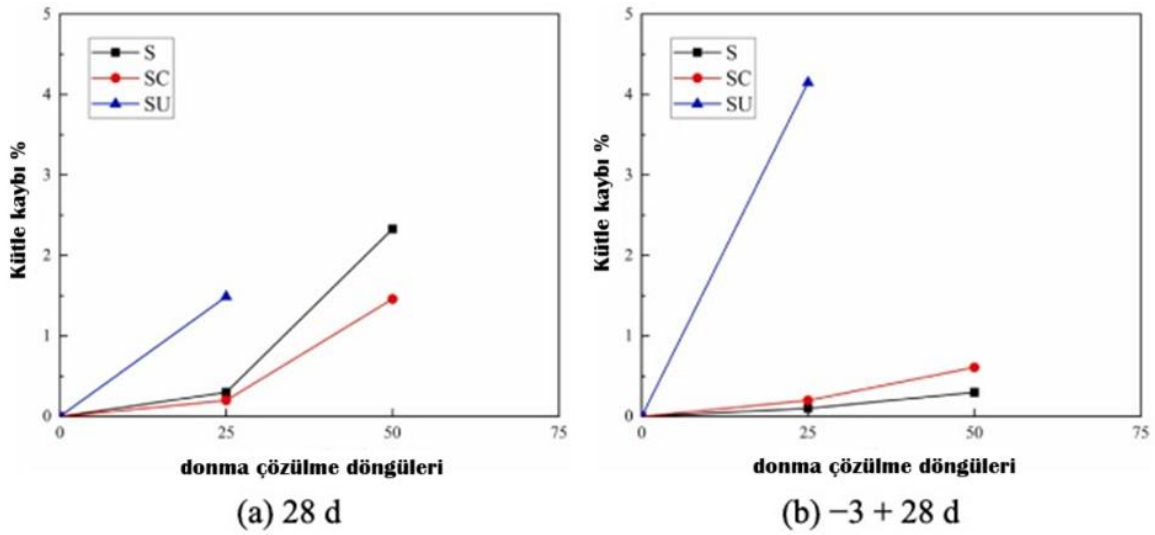
Negatif sıcaklıkta küremeye sahip numuneler, 28 günlük küreme altındaki numunelerle karşılaştırıldığında negatif sıcaklıkta küremeye sahip numunelerin su emme oranı ve su emme miktarının arttığı ve daha büyük su/çimento oranına sahip gruptaki artışın da daha fazla olduğu görülmüştür. Bu, negatif sıcaklıkta kürelemeden sonra numunenin mikro yapısının bozulduğuna işaretler. Ek olarak daha büyük su/çimento oranına sahip numunenin bozulması daha tahrip edici olmuştur (Liu ve ark. 2022).

Antifriz Katkıların Betonun Donma Çözülme Etkisi Altındaki Davranışları

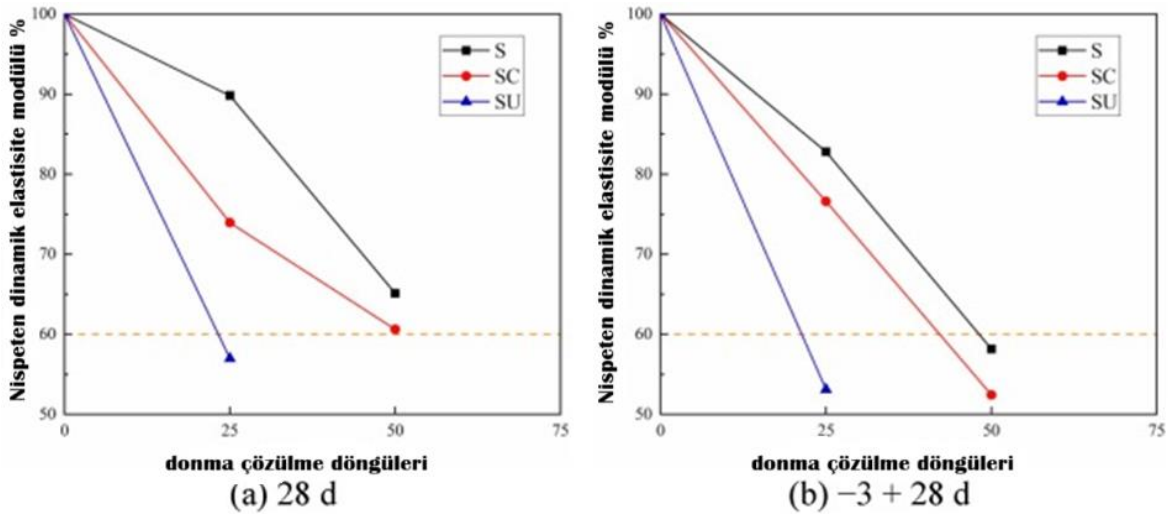
Antifriz katkıların betonun donma çözülme etkisi altındaki davranışlarını incelemek için aşağıdaki literatür özetlerine bakılacak olursa;

Liu ve ark. (2022) farklı su/çimento oranlarının ve antifriz tiplerinin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye maruz kalan sülfoalüminat çimento (SAC) esaslı malzemelerin donma çözülme etkisindeki davranışını incelediği çalışmada, SC ve SU sırasıyla kalsiyum nitrat ve üre antifriz katkısı olmak üzere aşağıdaki sonuçları gözlemlemiştir:

Aşağıda yer alan Şekil 12 ve Şekil 13'te bağıl dinamik elastisite modülü, kütle kaybı oranı, ve donma-çözülme çevrimi sayısının ilişki eğrileri gösterilmiştir. Bu değerler betonun donma-çözülme çevrimi direncini karakterize eden iki ana göstergedir (Liu ve ark. 2022).



Şekil 12. SAC betonunun donma-çözülme deneyi sonuçları (Kütle kaybı)



Şekil 13. SAC betonunun donma-çözülme test sonuçları

S ve SC betonunun maksimum donma-çözülme çevrimi sayısı yaklaşık 50'dir ve SU için donma-çözülme çevrimi sayısı 25'tir. Standart kürlleme 28 günlük numune veya -3 + 28 günlük numune olması farketmeksizin, bağıl dinamik elastisite modülü hızlıdan yavaşa doğru azalır: (SU > SC > S) Dolayısıyla antifriz katkısı, özellikle üre betonun donma-çözülme kabiliyeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir denebilir (Liu ve ark. 2022).

Eğer betona donma önleyici katkı maddesi eklenirse, çimento hidratasyonu hızlanır ve betonun mukavemeti artar. Böylelikle genel olarak donma-çözülme döngülerine maruz kalan betonun dayanıklılığı artmış olur. Örneğin, yukarıdaki sonuçlarda kalsiyum nitratın Portland çimentosu için iyi bir priz hızlandırıcı olduğu ve betonun erken yaş basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür (Liu ve ark. 2022).

SAC betonuna kalsiyum nitrat eklenmesi, betonunun donma-çözülme döngüsü altındaki direncini hafifçe azaltır fakat üre eklenmesi önemli bir olumsuz etkiye neden olur. Bu bağlamda, kalsiyum nitrat, SAC betonunun erken mikro yapı gelişimini koruyabileceğinden negatif sıcaklıklarda dahi SAC betonu için önerilir (Liu ve ark. 2022).

Hava Sürükleyici Katkılar

Soğuk havalarda donma-çözülme direncinin artırılması amacıyla kullanılan bir diğer kimyasal katkı olan hava sürükleyici katkıları betonu don hasarına karşı koruyan çimento hamurundaki hava boşluklarını stabilize etmek için kullanılan yüzey aktif madde bazlı solüsyonlar ve tozlardır. Hava sürükleyici katkıları donma-çözülme etkisinde kalan betonlarda oluşacak hasarı önlemede en etkili katkılardır. Betonun dayanıklılık, donma ve çözülme direnci; yapıyı düşük su-çimento (w/c) oranı kullanarak veya hava sürükleyici katkı olarak bilinen ince ve bağlantısız hava kabarcıkları ekleyerek artırılabilir. Betonun geçirimsizliğini ve dayanımını arttırmaya yönelik yapılan mineral katkı kullanımı gibi yöntemler ise ikincil derecede etkilidir (Tunstall ve ark. 2021, Şahin, 2013).

Hava sürükleyici katkıları uygulamada betonun donma-çözülme direncinin artırılması amacıyla kullanılır. Taze betonun işlenebilirliğini ve perdahlanabilirliğini kolaylaştıran hava sürükleyici katkıları aynı zamanda ayrışma ve terleme riskini de azaltırlar. Özel bir durum olarak, düşük çimento dozajlarında hava sürükleyici katkı kullanılması halinde, işlenebilirlikte yarattığı olumlu etki ile daha iyi sıkışma sağlanarak, basınç dayanımı artışı gözlemlenebilir.

Hava sürükleyici katkıları betonda kalıcı ve düzenli hava kabarcıkları oluşturarak betonun donma-çözülme direncini artırdığı görülmüştür. Betonun karıştırılmasıyla oluşan hava kabarcıklarını düzenlemek için betona hava sürükleyici katkı katılabilir. Hava sürükleyici katkının donma-çözülme direncini artırmasının yanı sıra oluşturduğu hava kabarcığı nedeniyle

hava içeriğinin artmasıyla mukavemetinde azalmalar görülür. Şahin ve ark. (2023) çalışmasında her %1'lik hava içeriğinin artışında basınç dayanımında yaklaşık %5'lik bir azalma olduğunu bahsetmiştir.

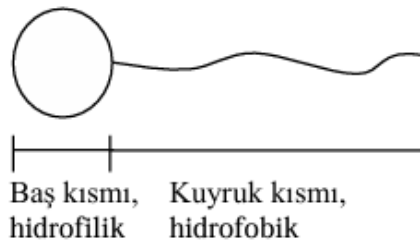
Hava sürükleyici katkının kullanımı sertleşmiş betonun özelliklerini etkilemesinin yanında taze beton özelliklerini de etkiler. Hava sürükleyici katkı kullanmak taze betonun işlenebilirliğini artırır. Hava sürükleyen katkıların kullanımının matriste küresel şekilli hava kabarcıkları oluşturmaya sebebiyle taze betonun işlenebilirliğini artırdığı belirlenmiştir (Şahin ve ark. 2023).

Hava sürükleyici katkının betonun dayanımında azalma meydana getirmesinin önüne geçilmesi için süperakışkanlaştırıcı kullanımı ön plana çıkmaktadır. Michta (2019) süperakışkanlaştırıcının betonun sıvılaşmasını sağlayarak gözenek içeriğini azalttığını gözlemlemiştir.

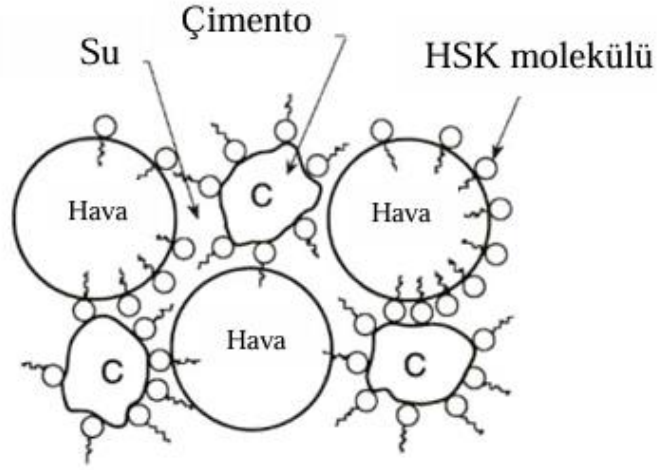
Hava Sürükleyici katkılar betonda kalıcı ve düzenli hava kabarcıkları oluşturarak betonun donma-çözülme direncini artırır. Betonun karıştırılmasıyla oluşan hava kabarcıklarını düzenlemek için betona hava sürükleyici katkı katılabilir (Şahin ve ark. 2023).

Hava Sürükleyici Katkının Çalışma Mekanizması ve Beton Üzerindeki Etkileri

Hidrofilik baş kısmından ve hidrofobik kuyruk kısmından oluşan hava sürükleyici katkılar (HSK) ile beton içerisinde boyutları 10 µm ile 1 mm arasında değişen küresel hava kabarcıkları oluşturulmaktadır (Şekil 14). Şekil 15'te görüldüğü gibi boşlukların stabilitesi hidrofilik (su seven) özellikteki baş kısmının çimento tanelerine tutunmasıyla sağlanır (Şahin, 2013).



Şekil 14. Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı



Şekil 15. Hava, su ve çimento tanelerine hava sürükleyici katkı moleküllerinin tutunmaları

Hava sürüklemenin beton üzerine etkilerini aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Hava sürükleme hamur hacmini artırdığı ve çimento tanesi ile agrega arasındaki sürtünmeyi azalttığı için işlenebilirliği artırmaktadır.
- Hava miktarının her %1'lik artışı için basınç dayanımı yaklaşık %6-10 arasında azalmaktadır.
- Hava miktarının %1'lik artışı için betonun elastisite modülü ve eğilme dayanımı yaklaşık %2-6 arasında azalmaktadır.
- Hava sürükleme sülfat, alkali silika direncine katkıda bulunurken sünme, yorulma, rötre ve aşınma dayanımlarına çok az katkı sağlamaktadır Şahin (2013).

Donma çözülme etkisine maruz kalan sertleşmiş ve suya doymuş bir betonda çimento harcındaki kapiler boşluklarda su donar ve hacmi artar. Çözülmenin ardından yeniden donma neticesinde genleşme miktarı artmaya devam eder. Bu sebeple ard arda donma çözülme olayları, çözülmenin oluşmadığı uzun süreli don etkisine göre çok daha güçlüdür. Bu durum bir önceki donma olayında oluşan ince bir çatlak yeniden donma neticesinde genişleyip büyümesiyle açıklanabilir. Genleşme sonucu oluşan gerilmeler betonun çekme dayanımını aşarsa betonda; ufalanma, çatlama, kabuk atma gibi olaylar meydana gelir. Hava sürükleyici katkıları beton içinde küçük çaplı boşluklar oluşturarak donan su hacminin ilerleyebileceği birbirinden bağımsız hava boşlukları oluşturmaktadır. Bu sayede donma-çözülme döngülerinden betonun minimum düzeyde etkilenmesi sağlanabilir hatta dondan zarar görmesi engellenebilir. Bunun yanında bazı durumlarda kalitesiz, yeterli sıkıştırma yapılmamış betonda bile çok büyük boşlukların (ki bunlar genellikle hava ile doludurlar) çoğunlukla don etkisinden zarar görmediği de yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır (Yegin, 2009).

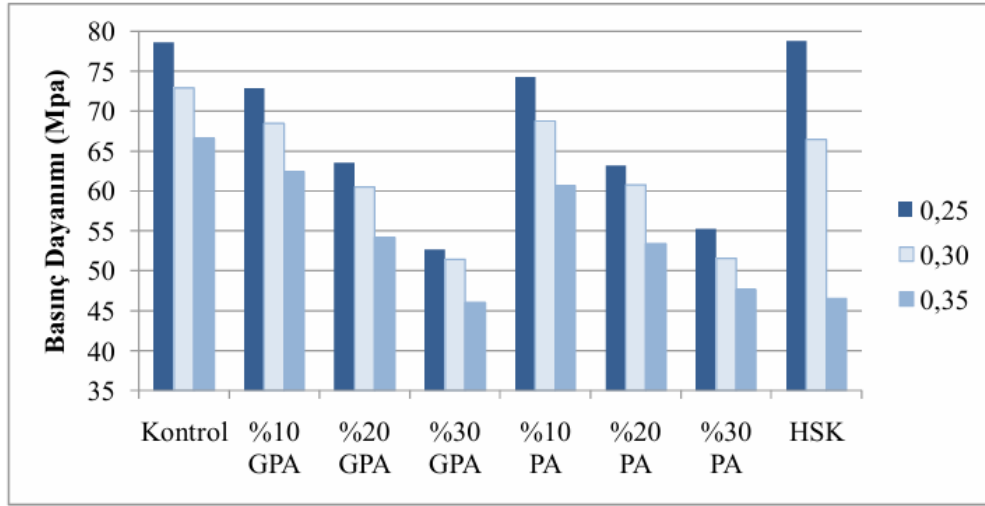
Wang ve ark. (2023) bir çalışmasında, bir sınıf uçucu kül, üç farklı hava sürükleyen katkı maddesi ve iki farklı polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı dahil olmak üzere mineral ve kimyasal katkı maddelerinin birlikte kullanımının taze çimentolu sistemlerde hava kabarcıklarının oluşumu ve kararlılığı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmanın sonucunda uçucu külün, hava sürükleyen katkı madde tiplerinin ve süperakışkanlaştırıcının köpük kabiliyeti üzerindeki etkileri incelendiğinde, süperakışkanlaştırıcı eklenmesinin hava sürükleyen katkı maddesinin köpük kabiliyetini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Hava Sürükleyici Katkının Beton Basınç Dayanımı Özelliklerine Etkisi

Beton içerisinde hapsolan hava hacminin artışı basınç dayanımını düşürür, ancak bu düşüş, hava sürükleyici ile uyum sağlayan bir akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcının beraber kullanılmasıyla tolere edilebilir. Hava sürükleyici katkıları oluşturdukları kapalı gözenekli boşluklar sayesinde donma çözülme direncini artırır. Hava sürükleyici katkılı üretilen betonların yüksek donma-çözülme direncinin nedeni hidrolik basınçla kapiler boşlukların dışına itilen suyun bu boşluklara girmesi ve betondaki iç gerilmeyi azaltması ile ifade edilebilir (Yegin, 2009).

Çok güçlü katkıları olan hava sürükleyiciler sadece %1-5 oranında kullanılması tavsiye edilmektedir. Düşük dozda güçlü bir etki göstermesi için, uygun bir miktarda tam ve düzgün ayarlanmış bir dozaj gereklidir. Hava sürüklenmiş beton %4 ile %8 arasında hava boşluğu içerir. Genellikle sürüklenen her %1 hava için dayanımda %5-6 oranında azalma olduğu görülmekle beraber buna karşın düşük çimento içeriğinde, karışımlarda artan hava miktarı su miktarını biraz azaltarak işlenebilirliği iyileştirir ve buda dayanımdaki azalmanın bir kısmını karşılayabilir (Yegin, 2009).

Yegin (2009) çalışmasındaki özellikle sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde betonun donma-çözülme hasarına karşı dayanıklılığını iyileştirmek için ince agreganın yerine agrega hacminin %10, %20 ve %30'u oranlarında genleştirilmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA) kullanmış ve betonun donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığını incelemiştir. Ayrıca bir grupta da toplam hacmin %0,01'i oranında hava sürükleyici katkı (HSK) kullanmıştır. ASTM C 666 standart'ında belirtilen yöntem A ve yöntem B için 200 donma-çözülme çevrimi etkisini incelemek için numunelerin basınç dayanımları, ultrason hızları ve birim ağırlık değişimlerini değerlendirmiştir. Sonuç olarak Yegin (2009), %10 hafif agregalı ve HSK'lı karışımların donma-çözülme hasarına karşı daha iyi sonuç verdiğini görmüştür (Şekil 16).



Şekil 16. Karışım türlerine göre, kontrol numunelerinin ortalama basınç dayanımları

Sonuç olarak HSK maddesinin düşük su/çimento oranlarında betonun işlenebilirliğini arttırdığı ve dolayısıyla düşük su/çimento oranlarında yüksek dayanımlı betonların üretilmesine olanak sağladığı belirlenmiştir. Buna karşılık artan w/b oranlarında boşluk oranının artması ile HSK maddesinin basınç dayanımını azalttığı gözlemlenmiştir.

Yegin (2009) HSK'nın düşük su/çimento oranlarında hem basınç dayanımında hem donma çözülme dayanıklılığında en etkili katkı olduğunu fakat artan su/çimento oranlarında bu etkinin azaldığını görmüştür.

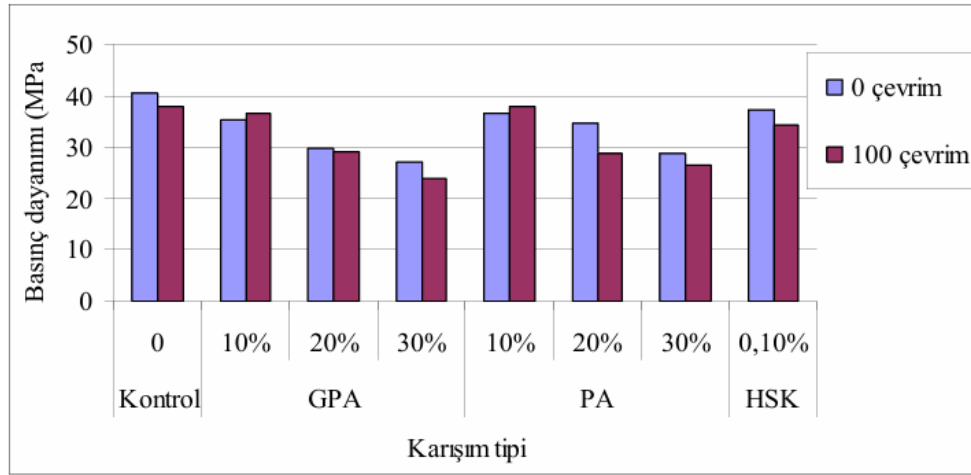
Beton suya doygun olsa dahi yapay şekilde oluşturulan hava boşlukları su ile dolmazlar. Dolayısıyla, suyun donması neticesinde genişleyen buz hacmi bu boşluklara geçiş yaparak betonda iç gerilme oluşturmaz. Hava katkısının etkisi betonun su/çimento oranının artışına bağlı olarak azaldığından hava sürükleyici katkı maddesi kullanımının yanında, betonda kapiler boşlukları minimize edecek tedbirlerde alınmalıdır. ACI 201R'de donma-çözölmeye maruz kalan betonda su/çimento oranının 0,5'i aşmaması ve 24 MPa basınç dayanımına ulaşılan kadar donma-çözölmeye maruz kalmaması tavsiye edilmektedir. TS EN 206-1'e göre donma-çözölmeye riskinin bulunduğu durumda (buz çözöcö tuzlara ve deniz dalgalarına maruz) betonarme yapılarda en küçük dayanım sınıfı C30, en yüksek su/çimento oranı 0,45, minimum çimento dozajı 340 kg/m³ ve en fazla hava içeriğı %4 ile sınırlamaktadır. Ayrıca agreganın da donma-çözölmeye dayanıklı olması gereklidir (Polat, 2007).

Polat (2007) bir çalışmasında ince agrega yerine %10, %20 ve %30 oranlarında GPA ve PA ile %0.1 oranında HSK katarak ürettiğı betonlara 100 donma-çözölmeye çevrimi uygulayıp kılcal geçirimsizlik, birim ağırlık ve basınç dayanımını belirlemeyi amaçlamıştır.

Bu çalışmada GPA ve PA oranları arttıkça basınç dayanımı ve birim ağırlığının azaldığı, kılcal geçirimsizlik katsayısının arttığı ve 100 donma-çözölmeye çevrimi sonucunda betonun,

basınç dayanımı ile birim ağırlığı değerlerinin azaldığı ve kılcal geçirimlilik katsayısının arttığı belirlenmiştir. %0.1 HSK içeren numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonucu basınç dayanımlarının düştüğünü fakat kılcal geçirimlilik katsayısının çok fazla düşmediğini belirlemiştir (Polat, 2007).

Şekil 17’de görüldüğü gibi kullanılan GPA ve PA oranları arttıkça basınç dayanımları düşmektedir. Ek olarak da HSK kullanılmasının beton içerisinde oluşturduğu boşluklar sebebiyle basınç dayanımını azalttığı görülmüştür (Polat,2007).



Şekil 17. Karışım türlerine göre 0 ve 100 donma-çözülme çevrimi sonucu basınç dayanımları

Fülöp ve ark. (2022) bir başka araştırma çalışmasında hava sürüklenmesinin betonun gözenekliliği ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri açısından köprüleri incelemiştir.

Hava sürüklenmiş beton, betonun donma-çözülme etkisine maruz kaldığı dış mekan betonlama uygulaması için standarttır. Aslında hava sürüklemenin temel amacı, betonun iç çatlamaya ve yüzey pullanmaya karşı donma-çözülme direncini arttırmaktır. Ek bir avantajı ise taze betonun işlenebilirliğini artırması, pompalamayı ve yerleştirmeyi kolaylaştırmasıdır (Fülöp ve ark. 2022).

Hava sürükleyicinin amacı, taze beton içerisinde eşit dağılımlı ve kontrollü boyutta hava kabarcıkları oluşturmaktır. Bu iyi dağılmış kabarcıklar çimento hamurunda boşluklar halinde kalarak ek bir gözeneklilik yaratır. Su betonun içinde donduğunda hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Doymamış hava sürükleyici boşlukları, katıya zarar vermeden donma suyunun genişlemesi için gerekli kaçış sınırlarını sağlar. Hava sürükleyici gözeneklerinin, çimento hamuru içerisinde iyi bir şekilde dağılmaları halinde etkili donma-çözülme savunması sağladığı tespit edilmiştir(Fülöp ve ark. 2022).

Bir başka araştırma çalışmasında hava sürükleyici katkının harcın erken don genişlemesinde soğurucu etkisi incelenmiştir(Gao ve ark. 2024). Soğuk havada beton

dökümünde betonun donma hasarından korunması en önemli görevdir. Negatif sıcaklık, çimentonun düşük hidratasyon derecesi ve büyük miktarda hidratlanmamış suyun varlığı nedeniyle betonda donma hasarına neden olabilir. Betonda kalan su donduğunda %9'a kadar hacimsel genleşme meydana gelir ve buna büyük genleşme gerilimi de eşlik eder. Bu gerilim gözenek duvarlarının çekme mukavemetini aştığında çatlaklar ortaya çıkar ve iç yapı bozulur. Erken donmuş beton genellikle daha sonraki aşamada mekanik dayanım ve beton ile donatı arasındaki bağlanma özellikleri açısından belirgin bir bozulma gösterir. Çok sayıda çalışma hava sürükleyicinin betonun donma direncinin iyileştirilmesi üzerindeki etkisinin açık olduğunu göstermiştir. Bu, hava sürükleyicinin çok sayıda tekdüze ve kararlı ince kabarcığı sürükleyebildiği, betonun doygunluk derecesini azaltabildiği ve gözenek yapısı dağılımını iyileştirebildiğine işaretir.

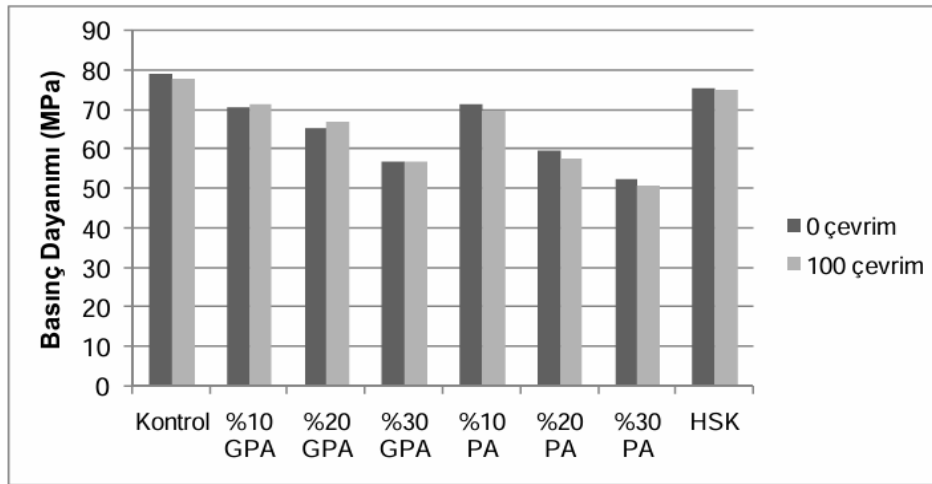
Gao ve ark.(2024) bu çalışmada harcın erken donma deformasyonu için Negatif Sıcaklık Büzülme Konisi Cihazı geliştirdi ve hava sürüklenen harcın erken donma deformasyonu zamanında izlenebilmiştir. Hava sürükleyici eklenmediğinde harcın deformasyonu genleşme gösterir. Hava sürükleyici ilavesinden sonra don genleşmesinin boşluk tarafından emilmesi nedeniyle don deformasyonu büzülme şeklinde ortaya çıkmıştır.

Hesaplama modeline dayanarak, erken yaş harcın donmasını önlemek için optimal hava sürükleyici dozajının belirlenmesine yönelik bir yöntem önerilmiştir. Sabit donma sıcaklığı ve ön kürleme süresi koşulları altında, toplam hacim deformasyonu ve hesaplanan sıcaklık deformasyonu eşit olduğunda, bu minimum hava sürükleyici dozajı, hava sürükleyicinin optimal dozajıdır(Gao ve ark. 2024).

Hesaplama modeli esas alınarak erken yaş harcın donmaya karşı minimum ön kür süresinin belirlenmesine yönelik bir yöntem önerilmiştir. Sabit donma sıcaklığı ve hava sürükleyici dozajı koşulu altında, harçtaki hava gözenek yapısı tarafından absorbe edilen donma genleşmesinin maksimum değeri, donabilir suyun faz dönüşümünün neden olduğu hacim deformasyonuna eşit olduğunda, ön kürleme süresi donma suyuna karşılık gelir. Harcın hacmi (hidratasyon derecesi) minimum ön kürleme süresidir(Gao ve ark. 2024).

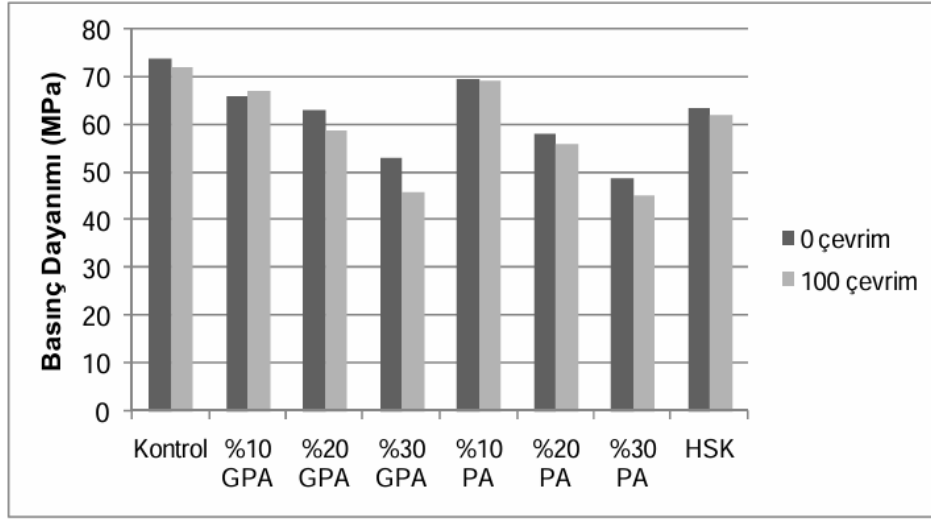
Bir başka çalışmada ise Nia ve ark. (2018) donma ve çözülme çevrimlerindeki sıcaklık değişimleri altında hava sürükleyici katkıların betona etkisini incelemektedir. Bu çalışmada, hava içermeyen ve hava sürüklenmiş beton için donma ve çözülme çevrimlerindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu gerilmeler incelenmiştir. Sonuçlar, hava kabarcıklarının betondaki ısı gerilmelerin düzgün dağılımında önemli rol oynayabileceğini ve bunun da betonda meydana gelen maksimum gerilmenin azalmasına yol açabileceğini göstermiştir.

Karakoç (2010) bir çalışmasında yüksek dayanımlı betonda hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin donma-çözülme dayanıklılığına etkilerini incelemiştir. Çalışmada 0-2 mm ince agreganın yerine %10, %20 ve %30 oranlarında genişletilmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA) ve hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Donma-çözülme dayanıklılığı bakımından, hava sürükleyici katkılı grupların ve %10 hafif agregalı grupların, kontrol gruplarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca karışımlardaki hava sürükleyici katkılı diğer bir karışım türünün de basınç dayanımını azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 18).



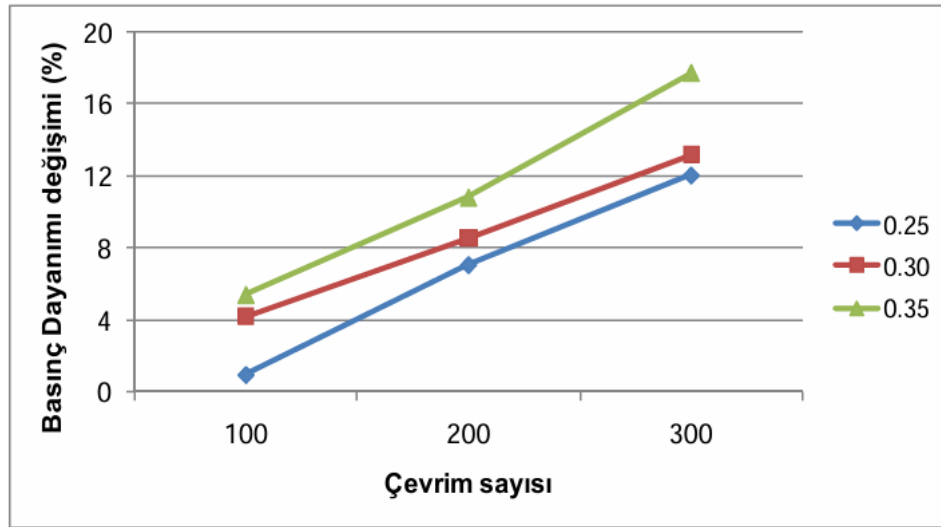
Şekil 18. Donma çözölmeye uğramış su/bağlayıcı oranı 0.25 olan karışım türlerinin 0 ve 100 çevrim sonunda basınç dayanımları

Karakoç (2010) aynı zamanda Şekil 19’da GPA’lı numunelerin 100 donma-çözölme çevrimi sonucunda basınç dayanımlarının azalmadığını HSK’lı numunelerinde ise basınç dayanımında %1 oranında azalma olduğunu gözlemlemiştir. Ancak 100 donma-çözölme çevrimine uğramış numunelerin basınç dayanımlarını incelediğinde hava sürükleyici katkı içeren betonların donma dayanıklılığının kontrol numunelere kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Karakoç, 2010).

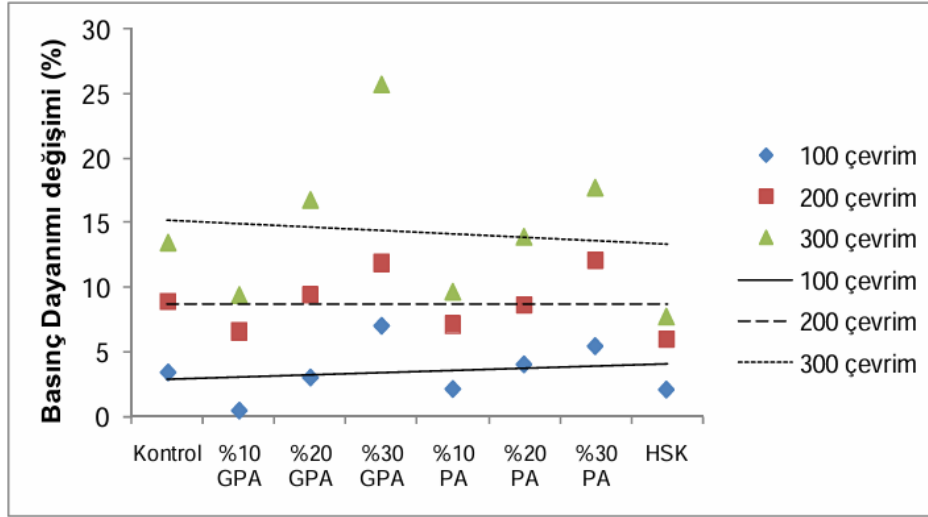


Şekil 19. Donma çözölmeye uğramış su/bağlayıcı oranı 0.30 olan karışım türlerinin 0 ve 100 çevrim sonunda basınç dayanımları (Karakoç, 2010)

Şekil 20’de göröldüğü gibi su/bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte betonun daha boşluklu bir yapıya sahip olması ve özellikle kapiler boşlukların artması neticesinde basınç dayanımı değışim miktarı artmıştır. Ayrıca Şekil 21’den anlaşıldığı üzere donma-çözölme çevrim sayısının artmasıyla birlikte basınç dayanımı değışim miktarı artmış ve dona dayanıklılık azalmıştır (Karakoç, 2010).



Şekil 20. Çevrim sayısı ve su/bağlayıcı oranına göre basınç dayanımı değışimi

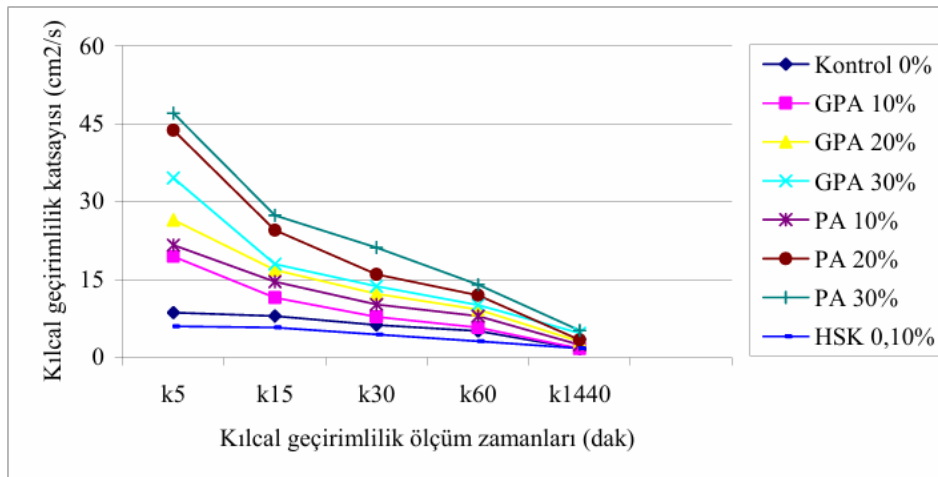


Şekil 21. Karışım türlerinin çevrim sayısına göre basınç dayanımı değişimi

Hava Sürükleyici Katkının Beton Kılcal Su Emme Özelliklerine Etkisi

Polat (2007) çalışmasında 0.1% hava sürükleyici katkı içeren numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonucu basınç dayanımlarının düşerken, kılcal geçirimlilik katsayısında çok önemli düşüşler meydana gelmediğini belirlemiştir.

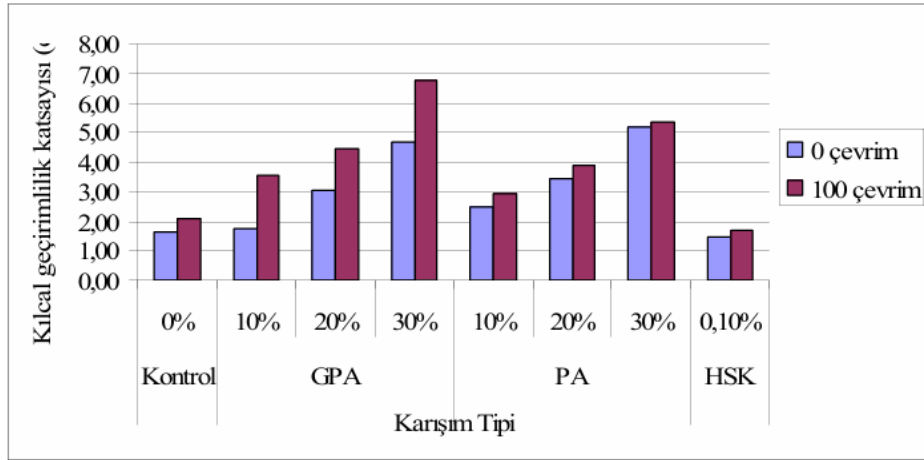
Polat (2007) çalışmasında sekiz farklı beton karışımına, donma-çözülme öncesi ve 100 donma-çözülme çevrimi sonrası kılcal geçirimlilik deneyi yapmış ve HSK kullanılması ile ve GPA ve PA oranlarındaki artışla beraber kılcal geçirimlilik katsayılarının arttığını tespit etmiştir.



Şekil 22. Farklı karışım türlerinde zamana bağlı kılcal geçirimlilik katsayısının değişimi

Şekil 22’de görüldüğü gibi bütün karışımlarda kılcal yolla su emme ilk zamanlarda yüksek bir hızla seyredirken giderek daha düşük bir hızla oluşmaktadır. Aynı zamanda GPA ve PA’lı betonların su emmesi kontrol numunelerine göre daha yüksektir (Polat, 2007). Şekil

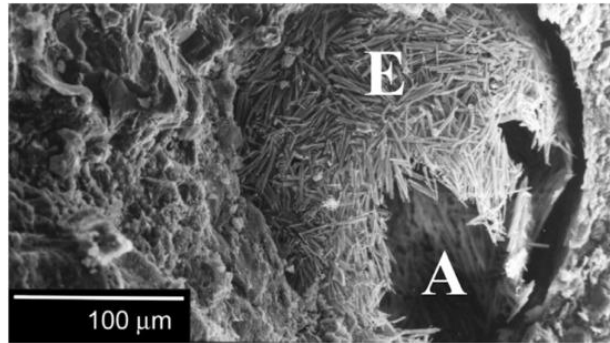
23'ten anlaşıldığı üzere, 100 donma-çözülme çevriminden sonra GPA, PA ve HSK'lı betonlarda kılcal geçirimlilik katsayısı artmıştır (Polat, 2007).



Şekil 23. Karışım türlerine göre 0 donma-çözülme çevrimi ve 100 donma-çözülme çevrimi sonrası kılcal geçirimlilik katsayılarının karşılaştırılması (24 saat).

Hava Sürükleyici Katkının Betonun Maruz Kaldığı Donma Çözülme Etkisi Altında Gelişen İç Yapı Özelliklerine Etkisi

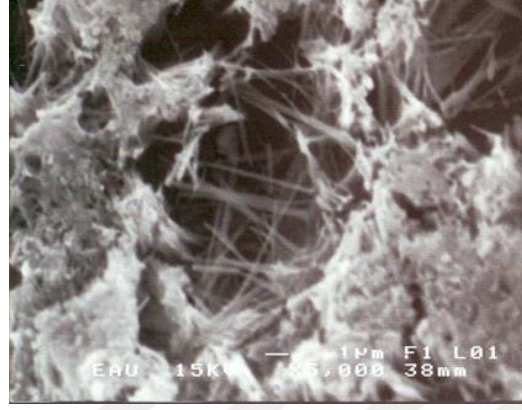
Beton karışımlarında oluşan donma-çözülme çatlakları yüzeysel bir şekilde başlar ve betonun derinliklerine kadar devam eder. Bu şartlarda, betonun dayanıklılığını artırmada en etkili aşamalardan biri karışımlarda hava sürükleyici katkıların kullanılmasıdır. Bu bağlamda karışımlara %4-6 oranındaki hava sürüklemek, betonun donma-çözülme etkisine karşı direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Şahin ve ark. 2023).



Şekil 24. Betonun hava kabarcıklarında oluşan etrenjitler

Donma ve çözülme etkisi sebebiyle hasar gören betonun iç yapısı elektron mikroskobu ile incelendiğinde, Şekil 24'te görüldüğü gibi hava kabarcıklarının birçok kısmı etrenjitlerle ve agrega-macun ara yüzünde doludur. Etrenjit kristallerini oluşturan çoğu iyonlar hava kabarcıklarına taşınmıştır. Dolayısıyla daha büyük kristallerin oluşumu için yeterli alan bulunmuştur (Şahin ve ark. 2023).

Donma-çözölme çevrimlerine uğramış betonların üzerinde yapılan SEM iç yapı analizleri incelendiğinde Şekil 25'te görüldüğü gibi hamur boşluklarında ve çatlaklarında etrenjit iğnelerinin varlığı tespit edilmiştir. Donma-çözölme çevrimlerine uğramamış numunelerde de agrega-hamur ara yüzeyinde etrenjit ve kalsiyum hidroksitten daha ziyade yoğun CSH jeline rastlanmıştır. (Karakoç 2010).



Şekil 25. Donma-çözölme etkisi sonrası oluşan boşluklu yapı ve etrenjit

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Portland çimentosu

Bu tez kapsamında normal beton üretimi için gerekli CEM I 42,5 R tipi çimento Ayhan Türkan İnşaat Malzemeleri ŞTİ.'den temin edilmiştir. Temin edilen Portland çimentosunun (PÇ) görseli Şekil 26'da, fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 26. Portland çimentosu

Tablo 1. Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri

Basınç Dayanımı (N/mm ²)			Priz süreleri (dakika)		Hacim genişlemesi, (mm)	Özgül yüzey, (cm ² /g)	Özgül ağırlık
2 günlük	7 günlük	28 günlük	Priz başlangıç süresi	Priz bitiş süresi			
31,1	43,9	54,9	160	215	0	3590	3,13

Tablo 2. Portland Çimentosunun Kimyasal Bileşimi (%)

Çözünmeyen Kalıntı	Cl ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
0,18	0,0049	18,40	5,00	3,23	62,12	2,99	3,03

Süperakışkanlaştırıcı

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi Nanoment Hp 2038 adında Lyksor ŞTİ.'den temin edilmiştir. Tüm karışımlar için süperakışkanlaştırıcı çimento ağırlığının %1'i oranında kullanılmıştır. Rengi kahverengi ve formu sıvıdır. Nanoment Hp 2038 karışım suyunun bir kısmı ile ilk karışım yapıldıktan sonra kalan suyla birlikte çimento agrega karışımına eklenerek kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı (SP) Şekil 27'de ve süperakışkanlaştırıcının kimyasal özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 27. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi

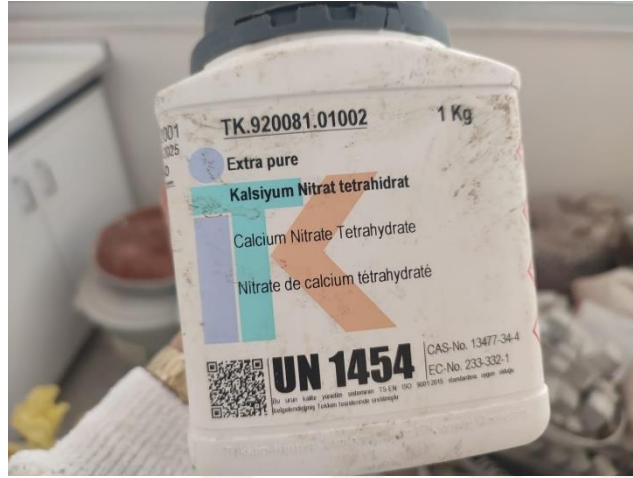
Tablo 3. Süperakışkanlaştırıcının Kimyasal Özellikleri

Kimyasal özellikler	Kimyasal köken	Yoğunluk (kg/lt)	Klorür iyonu muhtevası	Alkali miktarı	pH
Yaklaşık değerler	Polikarboksilat	1,05 – 1,09 (+20 °C)	En fazla % 0,1 - TS EN 934-2'ye göre klörür içermez.	En fazla %5	3,0-7,0

Antifriz katkıları

Tiyosiyanat Portland çimentosunun mukavemet gelişimini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir. Bu nedenle, tiyosiyanatlar genellikle Portland çimentosunun hem priz almasını hem de sertleşmesini hızlandırmak için diğer priz hızlandırıcılarla, özellikle de nitratlarla birleştirilir (Wang 2022). Bu çıkarımdan yola çıkarak bu çalışmada kalsiyum nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ %98 saflıkta) ve sodyum tiyosiyanat (NaSCN) olmak üzere iki tür antifriz katkı birlikte kullanılmıştır. Her iki katkıda kristal yapıda olup beyaz pellet formundadır. Antifriz katkıları karışım suyunun bir kısmında çözündükten sonra kalan suyla birlikte çimento agrega karışımına eklenerek kullanılmıştır. Tekkim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti'den temin edilen Kalsiyum nitrat (KN) Şekil 28'de ve kalsiyum nitratın kimyasal özellikleri Tablo 4'te

verilmiştir. Yenilab Laboratuvar ve Eğitim Gereçleri Kimya Sanayi Tic. Ltd. Şti'den temin edilen Sodyum tiyosiyanat (ST) Şekil 29'da ve sodyum tiyosiyanatın kimyasal özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 28. Kalsiyum Nitrat

Tablo 4. Kalsiyum Nitratın ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ %98 saflıkta) Kimyasal Özellikleri

Kimyasal özellikler	Saflık (%)	CaO (%)	Ca (%)	N (%)	Ph	Yoğunluk
Yaklaşık değerler	$\geq 98,0$	$\geq 23,0$	$\geq 16,5$	$\geq 11,5$	3,0-6,0	1,82



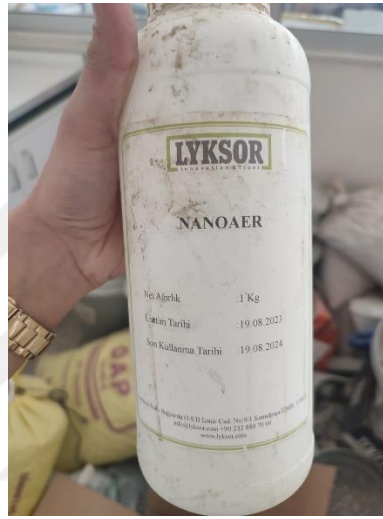
Şekil 29. Sodyum tiyosiyanat

Tablo 5. Sodyumtiyosiyanatın (NaSCN) Kimyasal Özellikleri

Kimyasal özellikler	Yoğunluk (g/cm^3)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Saklama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Saflık (%)
Yaklaşık değerler	1,74	81.07	308.0	+5 / +30	$\geq 98,5$

Hava sürükleyici katkı

Çalışmada kullanılan Lyksor ŞTİ.'den temin edilen Nanoaer hava sürükleyici katkısı için önerilen kullanım dozaj aralığı karışımdaki çimento miktarının % 0,03'ü ile % 0,2'si arasındadır. Yapılan ön deneyler sonucunda sürüklenen hava miktarları taze betonda hava ölçümü yapılarak netleştirilmiş ve hava sürükleyici katkının kullanıldığı tüm karışımlarda katkı oranı çimento ağırlığının % 0,1'i kadar alınmıştır. Hava sürükleyici katkı (HS) ilk olarak karışım suyunun bir kısmı ile karıştırılmış ve daha sonra kalan suyla birlikte çimento agrega karışımına eklenerek kullanılmıştır. Şekil 30'da hava sürükleyici katkı ve Tablo 6'da hava sürükleyici katkının kimyasal özellikleri verilmiştir.



Şekil 30. Hava sürükleyici katkı

Tablo 6. Hava Sürükleyici Katkının Kimyasal Özellikleri

Kimyasal özellikler	Yoğunluk (kg/l)	Klor iyonu muhtevası	Alkali miktarı	pH
Yaklaşık değerler	0,98 – 1,02 (+20 °C)	Max %0.1- TS EN 934-2'ye göre klor içermez	Max %3	5-9

Karışım suyu

Bu tez çalışmasında antifriz ve hava sürükleyici katkılı normal beton karışım suyu olarak TS EN 1008 standardına uygun Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi şebeke suyu kullanılmıştır.

Agrega

Katkılı ve katkısız beton numuneler üretmek için kullanılan agregaların tane boyutu dağılımı, maksimum agrega tane boyutuna göre TS 802 (2016)'da belirtilen ideal bölgeye uygun olarak oluşturulmuştur. Agregaların su emme miktarı, tane yoğunluğu ve yüzey nemi özellikleri yapılan deneyler ışığında belirlenmiştir. Tüm karışım gruplarında kullanılacak agreganın maksimum tane çapı 8 mm olarak seçilmiş olup 0-5 mm ve 5-8 mm tane boyutuna sahip dere agregalarının görselleri sırasıyla Şekil 31'de ve Şekil 32'de sunulmuştur.



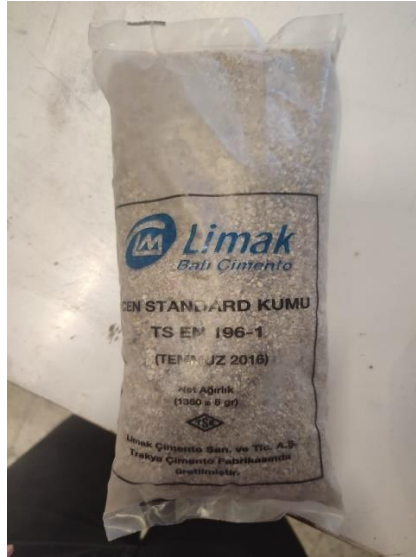
Şekil 31. 0-5 mm tane boyutuna sahip ince agrega



Şekil 32. 5-8 mm tane boyutuna sahip iri agrega

Standart kum

Hidratasyon ısısı deneyinde TS EN 196-9 (2016) standartına uygun Limak Batı Çimento ŞTİ.'den temin edilen CEN Standart Kum kullanılmıştır (Şekil 33).



Şekil 33. Standart kum

Deneylerde Kullanılan Aletler

Harç karıştırıcı

Beton numuneleri üretilirken homojen bir karışım elde edebilmek için TS EN 196–1 (2016) standardına uygun, 280 dev/dk karıştırma hızına sahip ve 10 dm³ hacime sahip laboratuvar mikseri kullanılmıştır (Şekil 34).



Şekil 34. Laboratuvar mikseri (harç karıştırıcı)

Çelik kalıplar

Numuneleri yerleştirmek için TS EN 12390-1 (2021)'e uygun UTEST Malzeme Test Cihazları firmasından temin edilen 50x50x50 mm boyutlarında çelik kalıplar kullanılmıştır (şekil 35).



şekil 35. 50x50x50 mm boyutlarında çelik kalıplar

Elekler

Deneylerde şekil 36'da gösterildiği gibi TS EN 933-1 (2015) standardına uygun 11,2-8-4-2-1-0,500-0,250-0,125-0,063 mm kare delik genişliğine sahip 9 adet elek kullanılmıştır.



şekil 36. Elek sarsma cihazı, elek takımı ve elenmiş agregalar

Etüv

Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için dijital termostata sahip etüv kullanılmıştır (Şekil 37).



Şekil 37. Etüv

Beton basınç dayanımı deney presi

Küp numunelerin basınç dayanımını tayin etmek için BESMAK marka bilgisayar kontrollü TS EN 12390-4 (2019) standardı ile uyumlu 300 tonluk test cihazı kullanılmıştır (Şekil 38).



Şekil 38. Beton basınç dayanımı deney presi

Hidratasyon ısısı deney düzeneği

TS EN 196-9'a göre yarı adyabatik yöntem ile hidratasyon ısısını tayin etmek için CONTROLAB marka bilgisayar kontrollü test düzeneği Şekil 39'da görülmektedir.



Şekil 39. Hidratasyon ısısı deneyi cihazı

Hava ölçüm cihazı

TS EN 12350-7 (2019)'e göre taze betonda hava içeriği ölçümünde kullanılan Yüksel Kaya Makina Laboratuvar Test Cihazları marka deney cihazı Şekil 40'da görülmektedir.



Şekil 40. Hava Ölçüm Cihazı

Kür havuzu

TS EN 12390-2 (2019)'e göre betonun gerek mekanik gerekse durabilite özelliklerinin gelişiminin sağlanması amacıyla uygun koşullarının oluşturulması için kullanılan kür havuzu Şekil 41'de görülmektedir.



Şekil 41. Kür Havuzu

Yayılma tablası deney düzeneği

TS EN 12350-5, (2019)'e göre taze betonun yayılma (akışkanlık) testlerinde kullanılan düzene Şekil 42'de görülmektedir.



Şekil 42. Yayılma tablası deney düzeneği

Dondurucular

Taze halde donmaya maruz kalan tüm karışımlardan yeterli sayıda numune -5°C ve -10°C sıcaklıklara ayarlanabilen ve sabit sıcaklıkta tutulan donduruculara yerleştirilmiştir (Şekil 43).



Şekil 43. Dondurucuya yerleştirilmiş numuneler

Yöntem

Bu bölümde kullanılan dere agregalarının özellikleri, agregalara uygulanan agrega deneyler, beton numunelerinin karışım hesapları, üretim yöntemleri, kür koşulları ve beton numunelerine uygulanan deneyler açıklanmıştır.

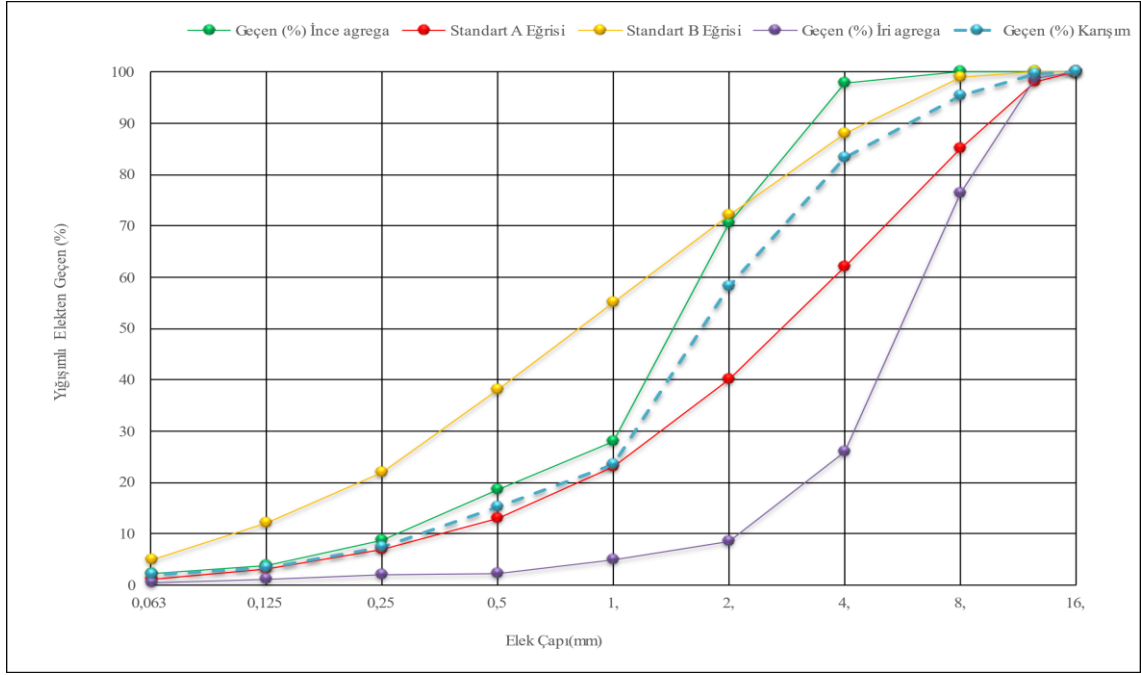
Agregaların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında normal beton numunelerinde kullanılan dere agregalarının su emme oranları, doygun kuru yüzey (DKY) özgül ağırlıkları, ince madde ve organik madde tayini gibi fiziksel özellikleri TS EN 1097- 6 (2022) ve TS 1744-1+A1 (2013) standartlarına göre ve tane büyüklüğü dağılımı ise TS EN 933-1 (2015) standardına göre tespit edilmiştir.

Karışımında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 7’de gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan ince ve iri agrega miktarları uygulanan elek analizi sonucunda %85 ince agrega (0-5 mm) ve %15 iri agrega (5-8 mm) olacak şekilde belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan agreganın gradasyon eğrisi TS 802 (2016) standardındaki sınır değerler esas alınarak çizilmiştir (Şekil 44).

Tablo 7. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega Boyutu	0-5 mm	5-8 mm
Su Emme Oranı (%)	1,1	1,1
DKY Özgöl Ağırlığı	2,59	2,68
İnce Madde Oranı (%)	7	1,92
Organik Madde Tayini	Hafif sarı (Kabul edilebilir.)	Hafif sarı (Kabul edilebilir.)

**Şekil 44.** Karışımda kullanılan agregaların tane boyutu dağılım eğrisi

Agregalara Uygulanan Deneyler

Agregalarda tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey neminin tayini deneyi

Agregaların yüzey nemi oranı tespiti TS 3523/2015 standardına, su emme oranı ve yoğunlukları ise TS EN 1097-6 (2022) standartına göre yapılmıştır. Deneylerde maksimum tane çapına göre TS 706 EN 12620+A1 (2009)'e uygun olarak numune miktarı belirlenmiştir.

TS EN 1097- 6'ya göre uygun ağırlıkta agreganın miktarı tartılıp etüvde 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de bekletildikten sonra etüv kuru ağırlıkları tespit edilerek piknometrenin içine konulmuştur. Ardından piknometrenin içine hava boşluğu olmayacak şekilde su ilave edilmiş ve yüzeyi kurulanıp tekrar tartılmıştır. İçi numune ile dolu olan piknometre 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra bir tepsiye alınan ve ısıtılan ince agregaların doygun kuru yüzey durumu Abraham hunusu yardımıyla kontrol edilmiştir (Şekil 45). İri agregaların doygun kuru yüzey durumuna getirilmesi için havlu yardımıyla yüzeyleri kurulanmış ve tartılmıştır (Şekil

45). Bu işlemler sonucunda agregaların su emme oranı, tane yoğunluğu ve yüzey nemi hesaplanmıştır.



Şekil 45. Agregalarda tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey neminin tayini deneyleri

Agregalarda organik madde tayini deneyi

İlgili standarda göre 8 mm göz açıklıklı elekten geçen deney numunesi içinden gelişigüzel alınan 500 g malzeme, ölçü silindirinin 130 mL çizgisine kadar doldurulmuştur. Sonra 200 mL işaret çizgisine kadar %3'lük NaOH çözeltisi eklenmiş ve tanelerin arasından koyu renk bulutları çıkmayınca kadar ağzı kapalı ölçü silindiri çalkalanmıştır. Daha sonra çalkalanan karışım 24 saat dinlendirilerek agregaların üzerindeki sıvının rengi kontrol edilmiştir. Sıvı çok açık sarı olduğundan beton için zararlı miktarda organik madde bulunmadığına karar verilmiştir (Şekil 46).



Şekil 46. Agregalarda organik madde tayini deneyi

Agregalarda ince madde tayini deneyi

TS EN 933-10 (2010) standardına göre çökelterek ve yıkama tayini metodları kullanılarak ince ve iri agregalarda deneyler gerçekleştirilmiştir. İlgili deney sürelerinin sonunda ince agregda ince madde oranı tespit edilirken agrega üzerinde çökelen ince madde oranı belirlenmiş ve standarda göre hesaplanmıştır (Şekil 47). İri agregada ise yıkama ile 0.063 mm göz açıklıklı elekten geçen kısmın etüv kurusu ağırlığı tespit edilerek yine aynı standarda göre sonuçlar hesaplanmıştır.



Şekil 47. Agregalarda ince madde tayini deneyi

Antifriz ve Hava Sürükleyici Katkılı Normal Beton Tasarımı

Antifriz katkıli normal beton üretimi için literatür araştırmaları sonucunda en uygun antifriz katkısı olarak KN ve ST seçilmiştir. Literatür ışığında KN ve ST antifriz katkılarının kullanım oranı KN'nin tek başına kullanıldığında çimento ağırlığının %6'sı şeklinde, KN ve ST'nin ikili kombinasyonlarında ise çimento ağırlığının %4,5-1,5 ve %3-3 oranları şeklinde karar verilmiştir. Çimento dozajı uygun su/çimento (0,50) seçilerek tüm karışımlar için sabit tutularak 330 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Tüm karışımlar için SP ve HS katkılarının kullanım oranları sırasıyla çimento ağırlığının %1'i ve %0,1'idir. Tablo 8'de beton karışım oranları verilmiştir.

Tablo 8. 1 m³ beton için karışım oranları

Malzemeler	K	K+HS	KN+HS	KN+ST+HS (%4,5-1,5)	KN+ST+HS (%3-3)	KN+ST (%4,5 -1,5)
Katkı oranı (%)	0	0	6	4,5-1,5	3-3	4,5-1,5
Su/çimento oranı	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Çimento (kg)	330	330	330	330	330	330
Kalsiyum nitrat (kg)	-	-	19,8	14,85	9,9	14,85
Sodyumtiyosiyanat (kg)	-	-	-	4,95	9,9	4,95
Hava Sürükleyici %	-	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Toplam Su (kg)	165	165	165	165	165	165
Süperakışkanlaştırıcı (%)	1	1	1	1	1	1
Hava	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
0-5 mm İnce Agregası (kg)	1515,61	1514,91	1491,23	1490,98	1491	1491,67
5-8 mm İri Agregası (kg)	267,46	267,34	263,16	263,11	263,1	263,24

Antifriz ve Hava Sürükleyici Katkılı Normal Beton Üretimi

Beton karışımı yapılmaya başlandığında her karışım için öncelikle ince ve iri agregası ve çimento kuru karışımı 10 dm³ kapasiteli 3 kademeli 280 dev.dk⁻¹ karıştırma hızına sahip karıştırıcıda 2 dk karıştırılmıştır (Şekil 48). Daha sonra kullanılan katkıları su ile çözünerek yavaş yavaş kuru karışıma eklenmiş ve 3 dk daha mikserde karıştırmaya devam edilmiştir. Geriye kalan su karışıma yavaşça eklenerek homojen bir kıvam alınca ve 5 dakikayı geçmeden mikser durdurulmuş ve 5x5x5 cm³'lük çelik küp kalıplara 3 aşamada 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir (Şekil 49). Yerleştirilen beton numunelerine daha sonra sarsma tablasıyla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Beton karışımları kalıplara (Şekil 50) yerleştirildikten sonra numunelerin nem kaybının önlenmesi için numunelerin yüzeyi poşetle kaplanmıştır ve ortam koşullarında küre maruz bırakılmıştır. Hiçbir katkı içermeyen kontrol karışımı, kalsiyum nitrat, sodyum tiyosiyanat ve hava sürükleyici katkının farklı kombinasyonlarda kullanıldığı 5 karışım ve yalnız hava sürükleyici katkı içeren bir karışım olmak üzere toplam 6 farklı beton karışımı üretilmiştir. Taze beton karışımlarının yayılma çapı ve K ile K+HS karışımlarının taze halde hava miktarları tespit edilerek 5x5 cm³'lük kalıplara yerleştirilen numuneler vibrasyon uygulandıktan sonra (Şekil 50) -5 °C ve -10 °C'de sabit sıcaklıkta 12 saatlik donmaya maruz bırakılmıştır. Tüm etkilerden sonra basınç dayanım testi, ağırlıkça su emme ve kılcal su emme testleri yapılmıştır.



Şekil 48. Taze beton üretim aşaması



Şekil 49. Beton üretimi hazırlık aşaması (Malzemelerin tartılması ve çelik kalıpların yağlanması)



Şekil 50. Kalıba yerleştirilen taze beton ve sarsma tablasıyla sıkıştırma işlemi

Taze Halde Uygulanan Deneyler

Hidratasyon ısısı deneyi

Hidratasyon ısısı deneyi laboratuvar ortamında TS EN 196-9 (2016)'a uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sıcaklığı 20°C'de sabitlenmiş bir odaya yerleştirilen yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi Şekil 51'de verilmiştir. Yarı adyabatik yöntemi, kalorimetreye taze bir şekilde oluşturulan harç numunesinin yerleştirilmesiyle meydana gelen sıcaklık artışına göre çimento hidratasyon ısısının devamlı olarak ölçülmesine dayanmaktadır. Harçtaki çimentonun hidratasyonu sonucunda, artan sıcaklıklar 48 saat boyunca, her sıcaklık okumasının zamanı saat ve dakika olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak yerleştirilen taze harç numunesinin sıcaklık artışı, referans numune sıcaklığı ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan kalorimetreye ait programlar üzerinden otomatik hesaplamalar yapılmaktadır. SIRIUS programından yararlanarak veriler kaydedilmiş ve CEMTECH programından yararlanarak hidratasyon ısısı hesaplanmış ve gerekli grafikler ise geçen zamana bağlı olarak çizilmiştir (Şekil 51).



Şekil 51. Hidratasyon ısısı deneyi

Taze betonda hava ölçüm deneyi

TS EN 12350-7, (2019)'e göre belirli hacimdeki taze beton su sızdırmayan cihazın kabı içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş, cihaz kilitlenmiş belli bir yüksekliğe kadar su ilâve edilmiş ve su üzerine hava basıncı uygulanmıştır. Taze beton numunesi içerisinde bulunan hava hacminde, sıkışma nedeniyle azalma meydana gelmiştir ve bu şekilde beton içerisindeki hava

yüzdesine göre kalibre edilmiş su sütununun, seviyesindeki düşme miktarı gözlenerek ölçülmüştür (Şekil 52).



Şekil 52. Taze betonda hava ölçüm deneyi

Yayılma Tablası Kıvam Deneyi

TS EN 12350-5, (2019)'e göre taze beton kıvamı, düşme hareketi yaptırılan bir tabla üzerindeki betonun yayılmasının ölçümü yoluyla belirlenmiştir (Şekil 53).



Şekil 53. Taze betonun yayılma tablası deneyi (kıvam tayini)

Sertleşmiş Beton Numunelere Uygulanan Deneyler

Basınç dayanımı

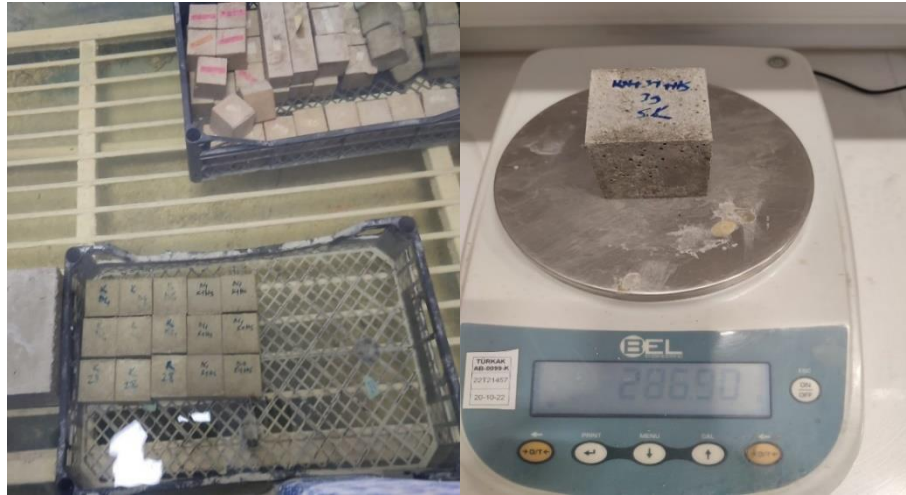
50×50×50 mm³ boyutlarına sahip karışım beton numunelerin ve kontrol numunelerinin 3, 7, 28 günlük basınç dayanımı tayini TS EN 12390-3 (2019) standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Numuneler basınç dayanım test cihazına döküm yönüne dik olacak şekilde (Şekil 54) yerleştirilmiş ve yükleme hızı 0,5 MPa/s olarak uygulanmıştır. Her karışım için üçer adet numune üretilmiş ve basınç dayanımı değerleri ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 54. Sertleşmiş beton numunesi ve basınç dayanımı deneyi

Su emme deneyi

Sertleşmiş betonda su emme deneyi 28 günlük kür sürelerinin sonunda tüm karışımlar için TS EN 1097-6 (2022) standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 55). Numuneler 24 saat sabit ağırlığa gelinceye kadar 105°C’de etüvde bekletildikten sonra tartılmıştır. Tartılan numuneler Şekil 55’te görüldüğü gibi yüzeylerini kaplayacak şekilde 24 saat su banyosuna daldırılmıştır. 24 saatin sonunda numunelerin yüzeyi havlu ile kurutularak tartılıp su emme oranları bulunmuştur.



Şekil 55. Su emme deneyi

Kılcal su emme deneyi

TS EN 13057 (2002) standardına göre numuneler 24 saat 105°C’de etüvde bekletildikten sonra yan yüzeyleri su geçirmez izolasyon bandıyla kaplanarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Şekil 56’da görüldüğü gibi numuneler tabanını 2 mm geçicek şekilde su dolu

tepsi içindeki ızgaraya yerleştirilmiştir. Numuneler ızgaraya yerleştirildikten sonra 12 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 24 saatte bir ağırlıkları kaydedilmiştir.



Şekil 56. Kılcal su emme deneyi

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

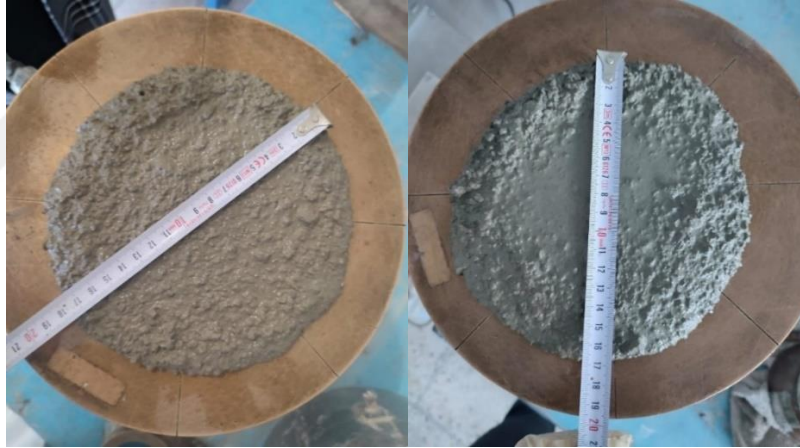
Taze Beton Özelliklerinin Değişimi

İşlenebilirlik, yerleştirme ve üretim için kolaylık sağlar. Beton işlenebilir, dayanıklı ve su geçirmez olmalıdır. Betonun bu özellikleri, uygun karışım tasarımı ve uygun malzemelerin kullanılmasıyla elde edilebilir (Karagöl ve ark. 2015).

İşlenebilirliği belirlemek için taze betonda yayılma tablası deneyi yapılarak elde edilen yayılma çapları Tablo 9’da ve Şekil 57, Şekil 58 vce Şekil 59’da verilmiştir.

Tablo 9. K, K+HS, KN+HS, KN+ST+HS (%4,5-1,5), KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST (%4,5-1,5) Karışımlarının Yayılma Çap Sonuçları

Karışımlar	K	K+HS	KN+HS	KN+ST+HS (%4,5-1,5)	KN+ST+HS (%3-3)	KN+ST (%4,5-1,5)
Yayılma Çapı(cm)	17	17	23	23	23	21



Şekil 57. K ve K+HS karışımların yayılma tablası çapları



Şekil 58. KN+HS ve KN+ST+HS (%3-3) karışımların yayılma çapları



Şekil 59. KN+ST (%4,5-1,5) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının yayılma çapları

Tablo 9 incelendiğinde karışımlarda antifriz ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanımı taze betonun kıvamını yani işlenebilirliğini artırdığı görülmektedir. Wang ve ark. (2022), Karagöl ve ark. (2015) ve Demirboğa ve ark. (2014) betona antifriz katkı eklendiğinde taze betonun işlenebilirliğinde artış elde edildiğini tespit ederek bu durumun nedeninin katkıların beton su ihtiyacını azaltması ve akışkanlaştırıcı gibi davranması olduğunu belirtmişlerdir. Nitratlar suda yüksek çözünürlüğe sahiptir ve sulu fazdaki diğer anyonların yerini alır. Böylece oluşturulan betonun bileşimi değişir ve bu durum katı fazdaki bileşenler arasında daha iyi bağlanmanın yanı sıra artan işlenebilirlik ile sonuçlanır ve böylece dayanımda gelişir (Abdelrazig ve ark. 1999, Kumar ve ark. 2018). Ayrıca antifriz katkılara ek olarak %1 hava sürükleyici katkı kullanımı ile betonun çökme değerinin yaklaşık 2.5 kat arttığı ve bu etkinin, hava kabarcıklarının agrega parçacıkları arasındaki sürtünmeyi azaltmasından kaynaklanabileceği ifade edilmiştir (Şahin ve ark. 2023).

K karışımının taze halde hava içeriği %2 iken hava sürükleyici eklendiğinde aynı karışımın (K+HS) hava içeriği %2,5 olarak elde edilmiştir (Şekil 60).

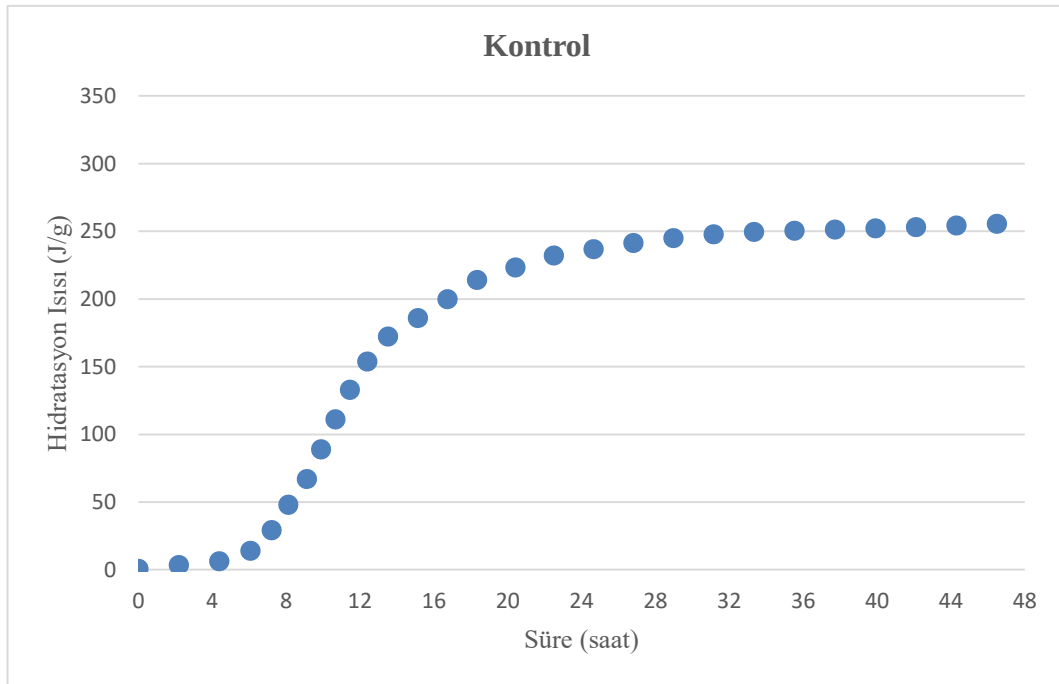


Şekil 60. K ve K+HS karışımlarının hava içeriği sonuçları

Hidratasyon Isısı Sonuçları

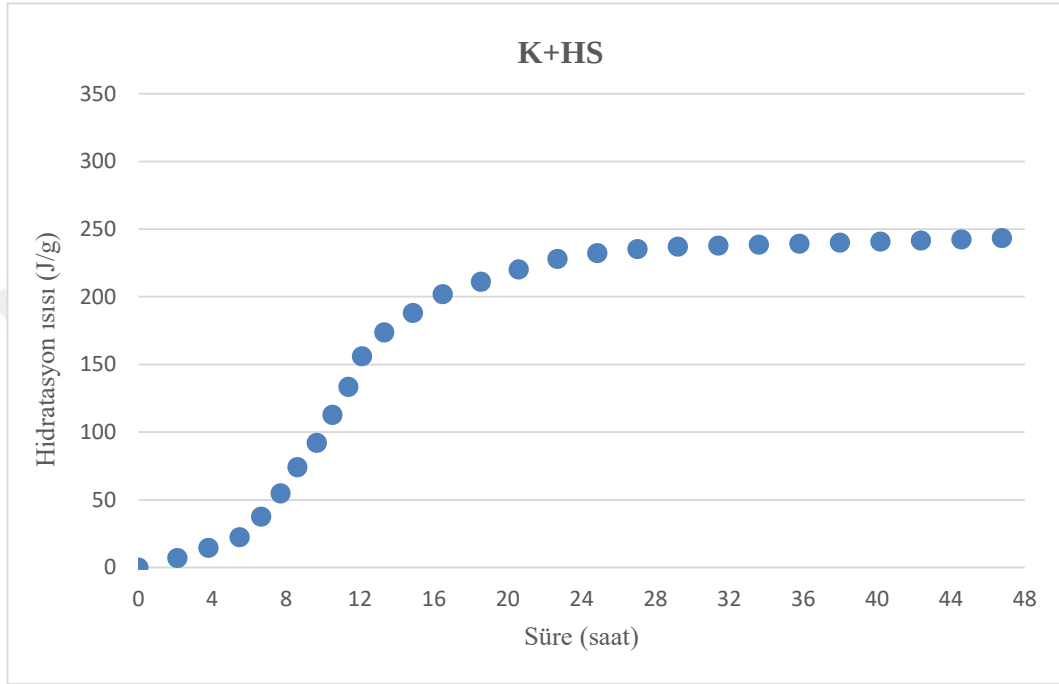
Çimentoyu oluşturan bileşiklerin herbiri su ile kimyasal reaksiyona girdiğinde hidratasyon olayı başlar ve hidratasyon sonucu açığa çıkan ısıнын toplamına “hidratasyon ısısı” denir (Qarluq 2017). Kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat Portland çimentosu hidratasyonunu, prizi ve sertleşmeyi hızlandırıcı etkilerinden dolayı kullanılmaktadır (Hoang ve ark. (2016). Ayrıca antifriz katkıların taze betonda suyun donma noktasını düşürücü etkisi vardır fakat esas etkisi geleneksel hızlandırıcı katkıları gibi çimentonun hidratasyonunu hızlandırmaktır (Karagöl 2013). Antifriz kullanımı ile artan hidratasyon ısısı basınç dayanımındaki artışları da beraberinde getirmiştir. Antifriz katkıların tekli kullanımından ziyade üre/kalsiyum nitrat ve sodyumtiyosiyanat/kalsiyum nitrat gibi ikili kullanımının sıfırın altındaki kütleme sıcaklıklarında çimento hidratasyonu ve mukavemet gelişimi üzerindeki birlikte oluşturdukları etkilerinin daha önemli olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Alzaza ve ark. 2022).

Bu çalışmada yarı adyabatik deney düzeneğindeki kalorimetreye taze bir şekilde oluşturulan harç numunesinin yerleştirilmesiyle meydana gelen sıcaklık artışına göre çimento hidratasyon ısısı devamlı ve 48 saat boyunca ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 ve 70’de verilmiştir. Tüm karışımların nihai hidratasyon ısı sonuçları da Tablo 10’da sunulmuştur.

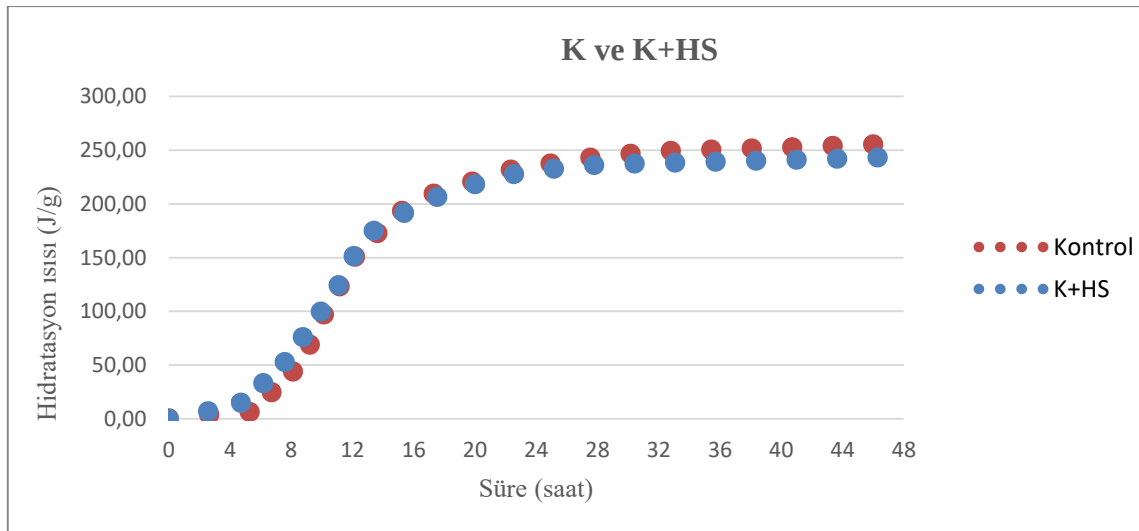


Şekil 61. K karışımlarının 48 saat süre boyunca hidratasyon ısısı değişimi

Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63’de görüldüğü gibi ilk 20 saat boyunca hava sürükleyici içermeyen kontrol betonu ve K+HS karışımının hidrasyon ısıları değişimleri benzerlik göstermekle beraber 4. saatten yaklaşık 20. saatlik zaman dilimine kadar K karışımının hidrasyon ısılarındaki değişim oranı daha yüksektir. 20. saatten sonra hem katkısız K karışımının hem de K+HS karışımının hidrasyon ısıları değişimi paralellik göstermekle beraber zamanla K karışımının hidrasyon ısılarının nihai değerinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir.



Şekil 62. K+HS karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısıları değişimi



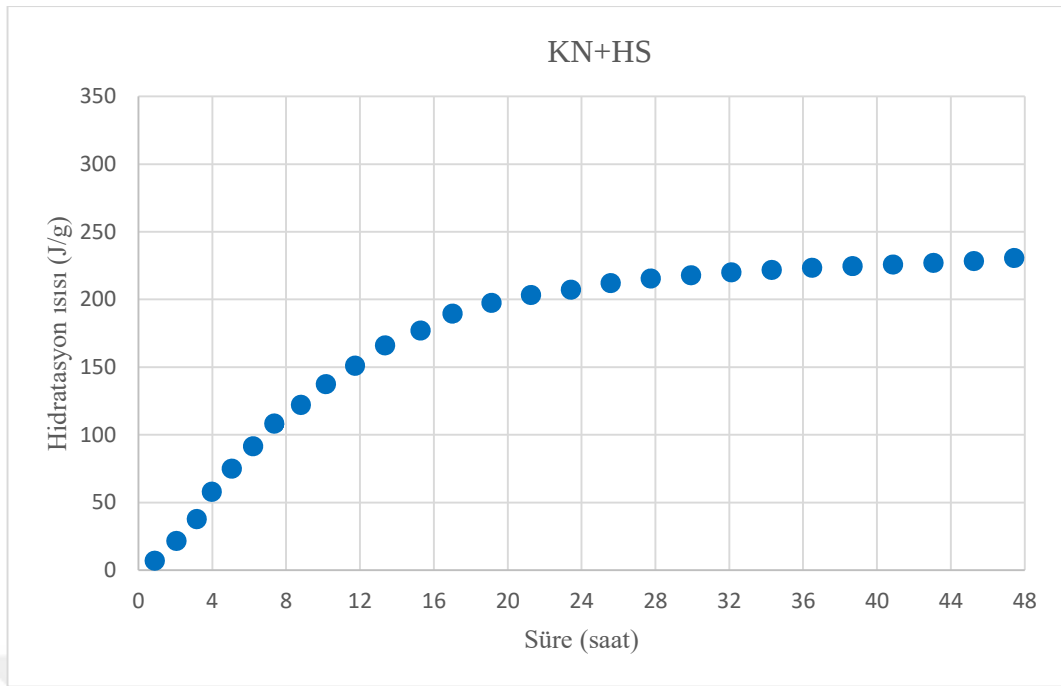
Şekil 63. K ve K+HS karışımlarının hidrasyon ısıları değişimlerinin karşılaştırılması

Ayrıca Şekil 64, 65, 66, 67, 68 ve 69’da görüldüğü gibi K+HS karışımına antifriz eklendiğinde ilk 24 saatteki hidrasyon ısılarında ani ve hızlı bir artış olmuştur. Montanari (2022) hızlandırıcıların sıradan portland çimento macunlarının elektriksel özellikleri üzerindeki

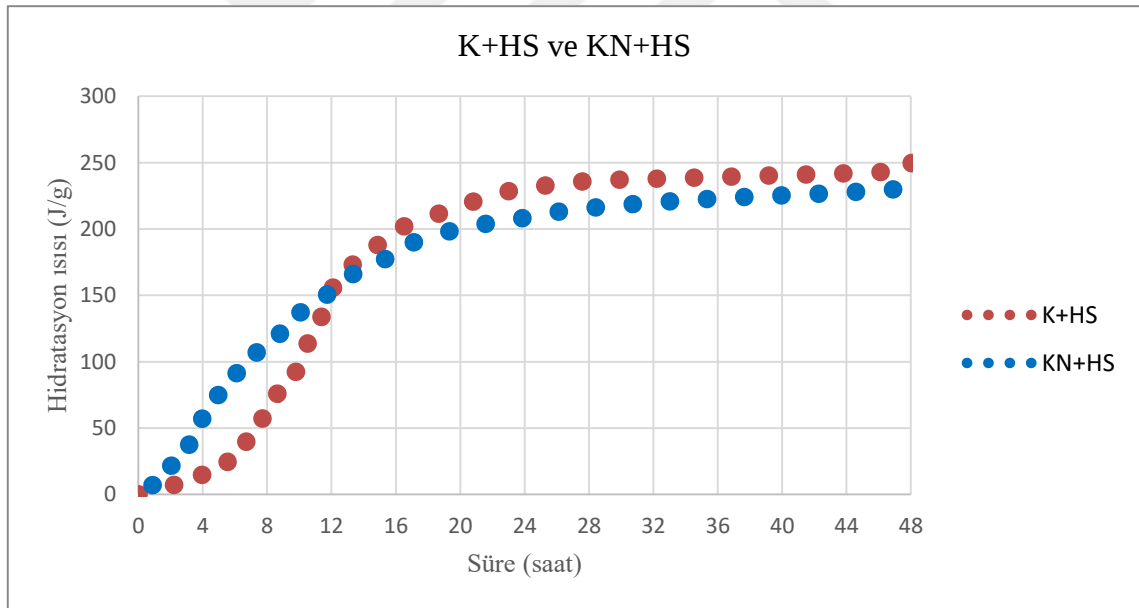
etkisini incelediği çalışmasında hızlandırıcı olarak kalsiyum nitrat ve sodyumtiyosiyonat antifriz katkılarına yer vermiştir. Bu bağlamda 24 saatten kısa kürlenme sürelerinde, hızlandırıcı katkı içeren karışımlarda hidrasyon derecesinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla erken yaşlarda hidrasyon derecesini ve mukavemeti artırmak için antifriz katkı maddelerinin kullanımı ile erken yaş dayanımının artması yukarıdaki çıkarımı destekler niteliktedir. Özellikle ilk 4 saatlik zaman diliminde dahi K+HS karışımına göre tüm antifriz ve hava sürükleyici içeren karışımların hidrasyon ısıları bariz bir şekilde daha yüksektir. 24. saatten sonra ise yine K ve K+HS karışımlarına paralel olarak ilerlemiştir. Alzaza (2022) yaptığı çalışmasında da karışımlara antifriz eklenmesiyle hidrasyon ısının arttığını tespit etmiştir. Hızlanma etkisi eklenen antifriz miktarıyla daha da belirginleşmiştir.

KN+ST (%4,5-1,5) karışımına hava sürükleyici eklenmesi ile hidrasyon ısısı değişimlerinde belirgin bir fark olmadığı Şekil 67, 68 ve 70’ de görülmektedir. Bu durumda da antifriz kullanımının karışıma eklenen hava sürükleyicinin hidrasyon ısısı değişimindeki düşürücü etkisini minimize ettiği anlaşılmaktadır.

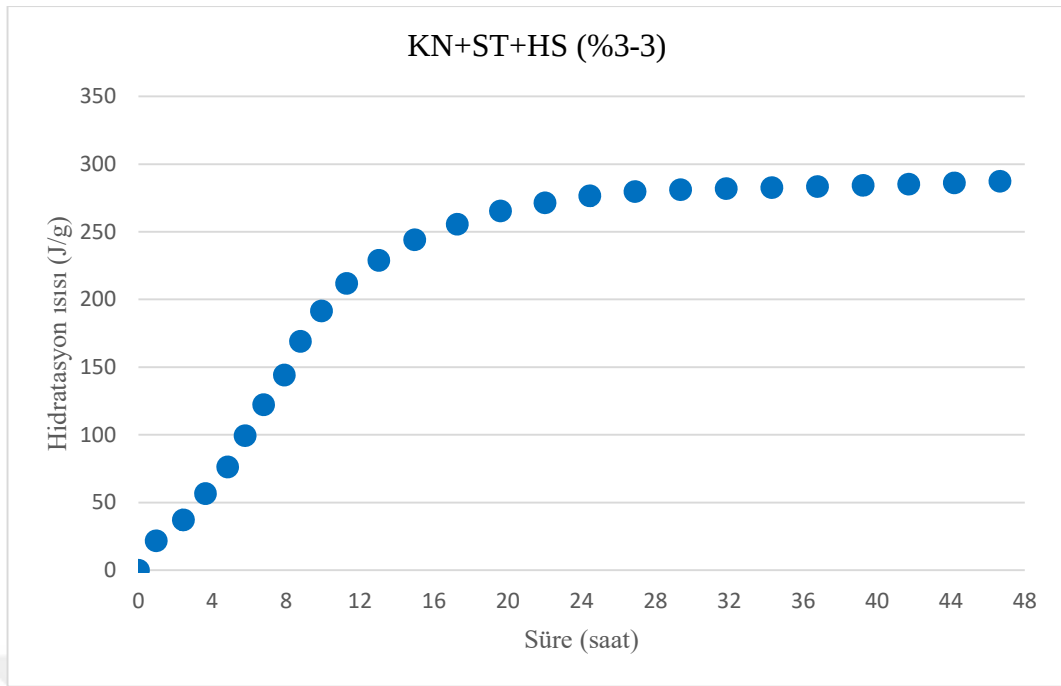
Antifriz katkılı karışımların hidrasyon ısının önemli bir kısmı ilk 24 saatlik zamanda gerçekleşmiştir. KN antifriz katkısı ağırlıkça %3 oranında kullanıldığında yalnız hava sürükleyici katkı içeren kontrol betonuna kıyasla ilk 24 saatlik hidrasyon ısında %2’lik bir artış söz konusu iken KN antifriz katkısı ağırlıkça %4,5 oranında kullanıldığında ise bu artış yaklaşık %12 olarak tespit edilmiştir. Diğer karışımlarda da olduğu gibi 24 saatten sonra hidrasyon ısısı değişimi paralellik göstermiş 48 saat sonunda ise neredeyse aynı hidrasyon ısına ulaşmışlardır.



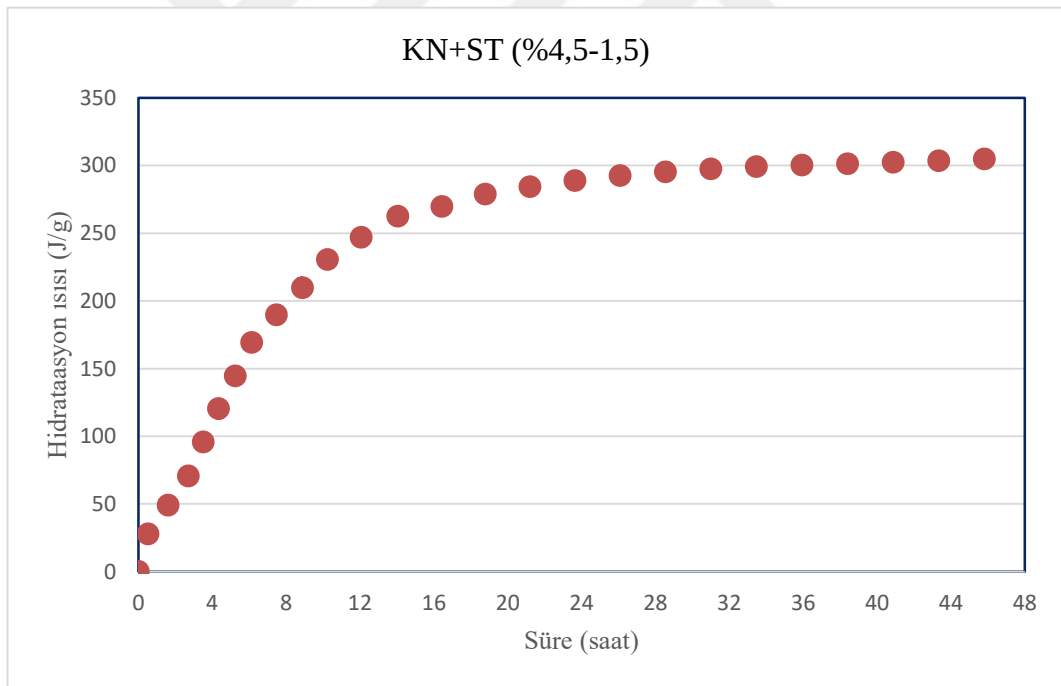
Şekil 64. KN+HS karışımlarının 48 saat süre boyunca hidrasyon ısısı değişimi



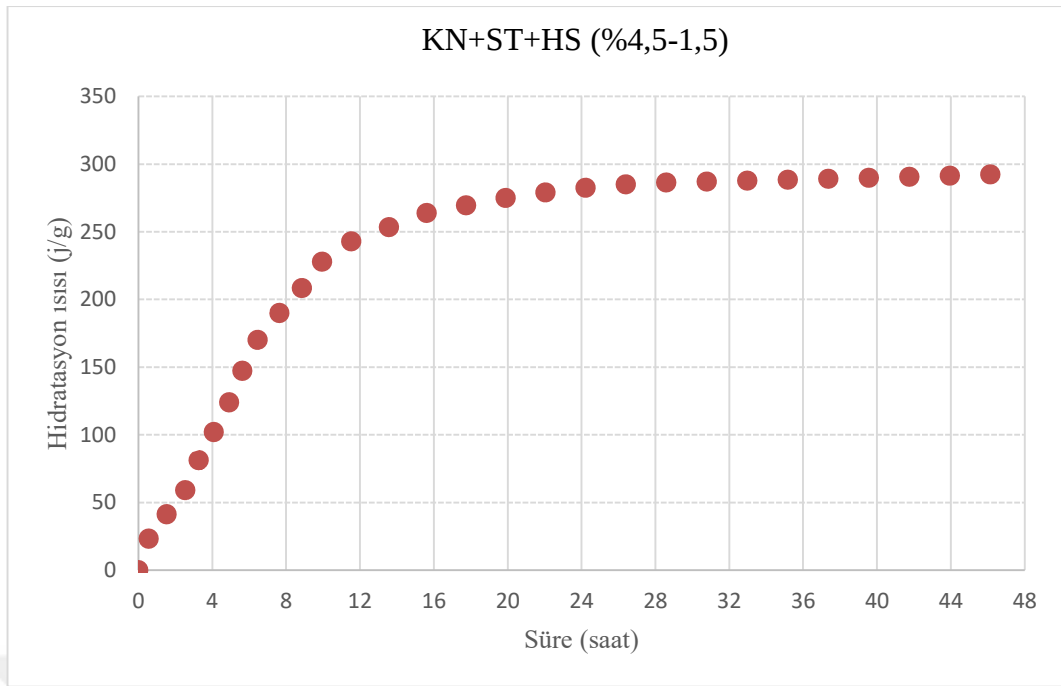
Şekil 65. K+HS ve KN+HS karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması



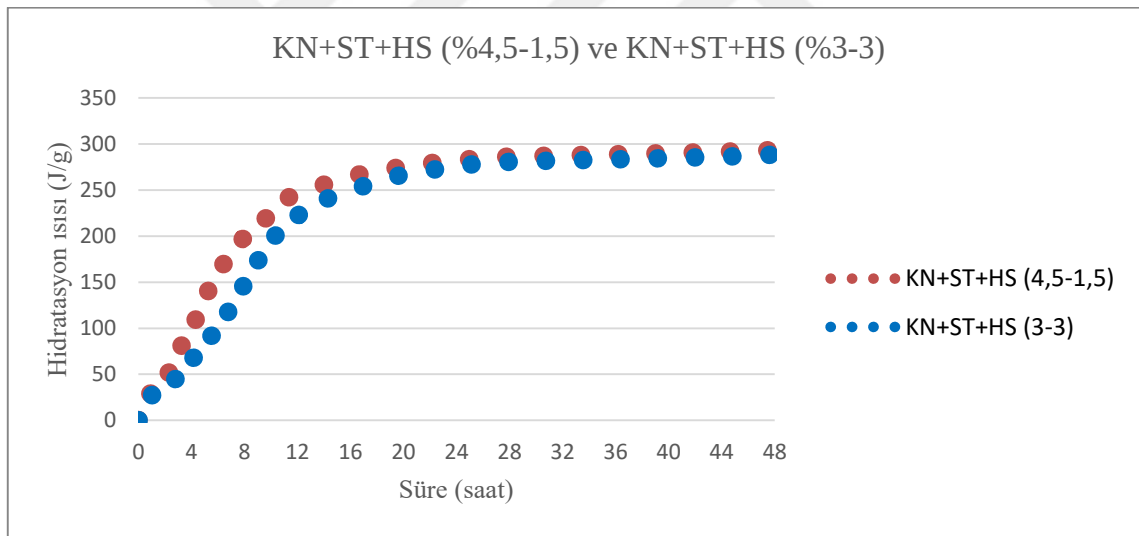
Şekil 66. KN+ST+HS (%3-3) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidratasyon ısısı değişimi



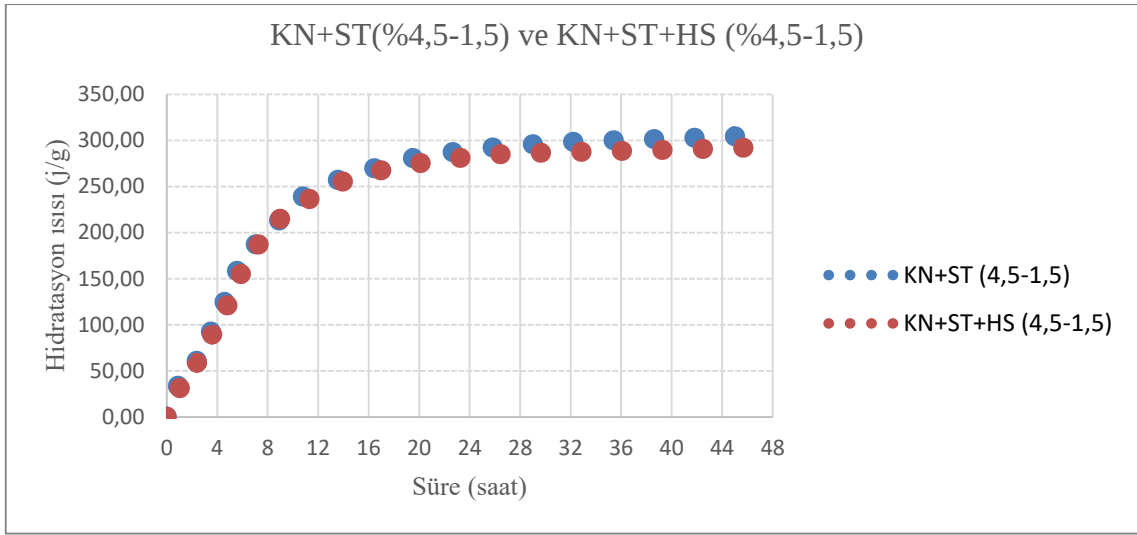
Şekil 67. KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidratasyon ısısı değişimi



Şekil 68. KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının 48 saat süre boyunca hidratasyon ısısı değişimi



Şekil 69. KN+ST+HS (%4,5-1,5) ve KN+ST+HS (%3-3) karışımlarının hidratasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil 70. KN+ST ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının hidrasyon ısısı değişimlerinin karşılaştırılması

Tablo 10. Tüm Karışımların Nihai Hidrasyon Isı Sonuçları

Karışımlar	K	K+HS	KN+HS	KN+ST+HS (%4,5-1,5)	KN+ST+HS (%3-3)	KN+ST (%4,5-1,5)
Nihai Hidrasyon Isısı (J/g)	257,09	250,26	234,90	293,74	291,47	307,00

Tablo 10’da görüldüğü gibi K ve K+HS karışımlarının nihai hidrasyon ısı sonuçları neredeyse aynıdır. K+HS karışımına KN antifriz katkısı eklenmesiyle ilk 24 saatteki hidrasyon ısısında ani ve hızlı bir artış olmasına rağmen nihai değeri düşmüştür. Buna karşın ikili antifriz ve hava sürükleyici kullanımı ile nihai hidrasyon ısıları artış göstermiştir.

Farklı Kür Koşullarına Maruz Bırakılan Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değişimi

Bütün karışımlar için üretilen numunelerden bir grup dökülür dökülmez taze halde iken -5°C ve -10°C sabit sıcaklıktaki donduruculara yerleştirilerek 12 saat bekledikten sonra dondurucudan çıkarılıp 3,7 ve 28 gün laboratuvar ortamında tutulmuştur. Bir grup ise laboratuvar ortamında bir gün süreyle bekletilerek kalıpları sökülüp 3,7 ve 28 günlük su kürüne yerleştirilmiştir. Kür sürelerinin sonunda numunelere su emme, kılcal su emme ve basınç dayanım testi yapılmıştır.

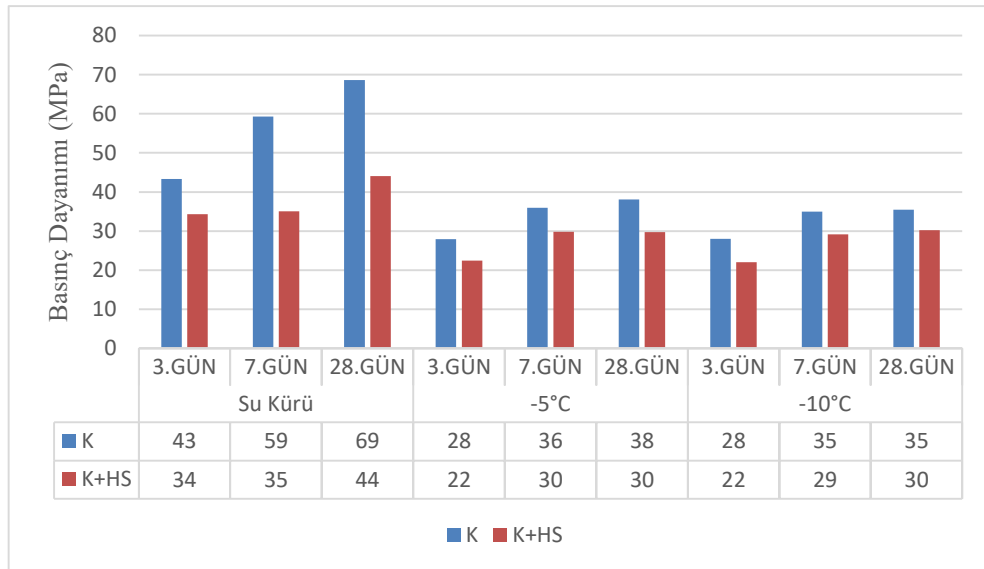
Beton Basınç Dayanım Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73’te görüldüğü gibi standart su küründe tüm karışımların basınç dayanımları zamanla artmıştır. En yüksek sonuçlar kontrol betonunda elde edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak sodyum tiyosiyanat ve kalsiyum nitrat antifriz katkılarının taze

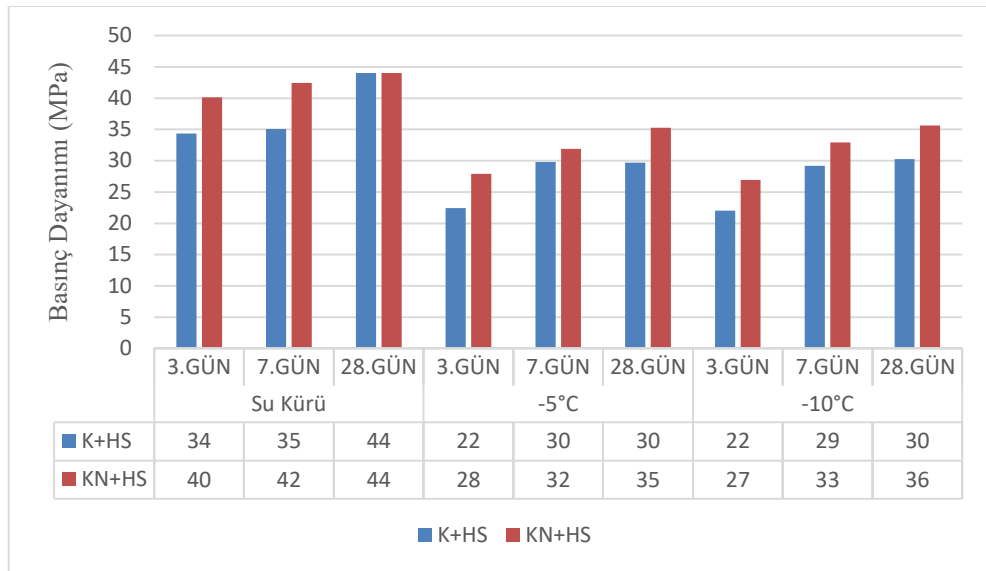
betonun kıvamını kontrol karışımına göre önemli derecede artırması gösterilebilir. Yayılma çapı deneyi sonuçlarından da anlaşıldığı üzere hem antifriz hemde hava sürükleyici içeren beton karışımlarının kıvamları kontrol betonundan çok daha yüksektir. Dolayısıyla artan kıvam, sürüklenmiş havanın oluşturduğu boşluk miktarı ve kalsiyum nitrat tetrahidrat katkısının moleküler bileşimi (bir miktar moleküler olarak bağlı su içermektedir) göz önüne alındığında bu karışımların su küründeki sonuçları kontrol betonundan daha düşük elde edilmiştir.

Betonda hava miktarı arttıkça her %1 için basınç dayanımının yaklaşık %6-10 arasında azaldığı bilinmektedir (Şahin, 2013). Ayrıca Wang ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada antifriz ve priz hızlandırıcıların donma önleyici veya korozyon önleyici özelliklerinin yanında bazılarının betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olabileceği, dayanım düşüşü olabileceği ve bu nedenle hızlandırıcı dozajının uygun bir şekilde belirlenmesinin önemini vurgulamıştır.

Kontrol karışımına hava sürükleyici katkı eklendiğinde standart su küründeki 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında yaklaşık %21, %41 ve %36 düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum beton içerisine sürüklenmiş havanın oluşturduğu boşlukların betonun basınç dayanımını düşürmesi ile açıklanabilir (Polat (2007). KN+ST (%4,5-1,5) karışımına hava sürükleyici eklendiğinde ise elde edilen dayanım düşüşleri 3 ve 7 günlük yaklaşık %16 ve %18'dir. Bu karışımın 28 günlük basınç dayanımının ise artarak 51 MPa'a ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 71. K ve K+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları



Şekil 72. K+HS ve KN+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları

Hava sürükleyici içeren karışımların standart su küründeki 3 ve 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde tüm karışımlar içerisinde en düşük sonuç K+HS karışımına aittir. Antifriz içeren karışımların hava sürükleyici katkı ile hem erken yaşta hemde ileri yaşta daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Örneğin hava sürükleyici içeren K+HS karışımına kalsiyum nitrat antifriz katkısının eklenmesi ile üretilen KN+HS karışımının 3 günlük erken yaş basınç dayanımında K+HS karışımına göre %17,65'lik ve 7 günlük basınç dayanım değerinde ise %20'lik bir artış meydana gelmiştir. 28 günlük dayanım sonuçları ise K+HS ve KN+HS karışımları için değişmemiştir. Derakhshani ve ark. (2023) kalsiyum nitratın genellikle basınç dayanım kazanma hızını artıran bir malzeme gibi davrandığını ve hızlandırıcı özelliğinin çimentoyu oluşturan kimyasal bileşime bağlı olduğunu ve ayrıca erken yaş basınç dayanımı üzerindeki etkisinin ileri yaş basınç dayanımına göre daha fazla olduğunu belirtip çalışmada elde edilen sonucu desteklemiştir.

KN+ST+HS (%3-3) karışımına ait su küründeki basınç dayanımları K+HS karışımı ile karşılaştırıldığında artış oranları 3 ve 7 günlük basınç dayanımları için sırasıyla %35,30 ve %45,71 olarak değişmektedir. Aynı karışımların 28 günlük su küründeki basınç dayanımları karşılaştırıldığında %6,82'lik bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum kalsiyum nitrat katkısının tek başına %6 oranında kullanımına göre sodyum tiyosiyanat ile daha düşük oranda kullanımının daha yararlı olduğu sonucunu vermektedir. Ayrıca erken yaşlarda K+HS karışımına göre dayanım sonuçları çok daha hızlı artarken ileri yaş dayanımlarında daha düşük bir değişim söz konusudur. Bu da katkıların erken yaşta daha etkili olduğunu göstermektedir.

Sodyum tiyosiyanat katkısının kullanım oranının %3'ten %1.5'a düşmesi durumunda ise K+HS karışımına göre yine daha yüksek basınç dayanım sonuçları elde edilirken

KN+ST+HS (%3-3) karışımının 3 ve 7 günlük su küründeki basınç dayanım değerleri ve bu değerlerdeki artış oranları daha yüksektir. Ancak nihai dayanıma baktığında 28 günlük su küründeki karışımlar içerisinde KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımın basınç dayanımı diğer antifriz içeren karışımlardan daha yüksektir.

Antifriz katkı maddelerinin incelendiği bir başka çalışmada hızlandırıcı özellikteki katkı maddelerinin taze veya sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirdiğini, taze betonun işlenebilirliğini oldukça artırdığını dolayısıyla beton yerleştirme işlerinde düşük işçilik maliyeti ile yüksek dayanıma sahip beton üretimi için kullanıldığı belirtilmiştir (Cheung ve ark. 2018). Dolayısıyla hava sürükleyici içeren beton karışımlarında, antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanıldığı durumda, standart su küründe basınç dayanım sonuçlarının pozitif yönde etkilendiği anlaşılmaktadır.

Düşük sıcaklıkta kürlenme erken yaşta özellikle 3 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve dayanım gelişimi üzerinde belirleyicidir. Donmaya maruz kalan tüm karışımlarda 3 günlük basınç dayanımlarının standart su küründeki dayanımlarına göre azaldığı görülmektedir. Ancak 3. günden 28. güne kadar olan süreçte düşük sıcaklıklara maruz kalıp laboratuvar ortamında bekletilen tüm karışımların basınç dayanımlarında artış tespit edilmiştir. Örneğin standart su kürü uygulanan kontrol karışımının -5 °C ve -10 °C'deki 28 günlük basınç dayanımları, 28 günlük su küründeki basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında yaklaşık sırasıyla %45 ve %49 düşüş görülmektedir. Fakat aynı karışımın 3. günden 28. güne kadar olan süreçte laboratuvar ortamında yeniden dayanım kazandığı görülmektedir. Bu durum tüm karışımlar için geçerlidir.

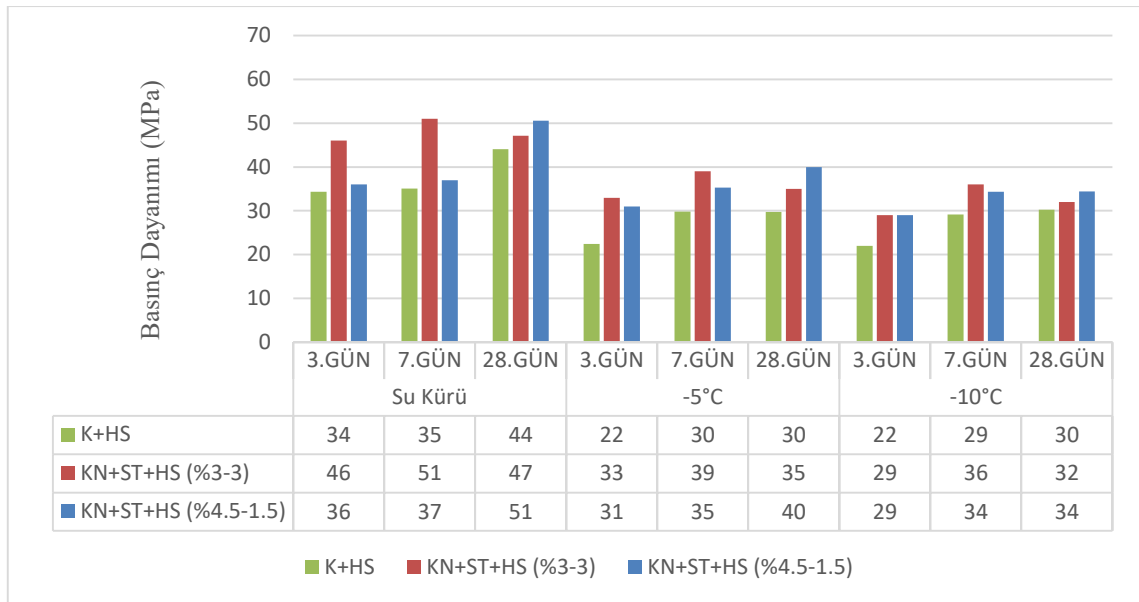
Karışımların -5 °C'deki basınç dayanımları incelendiğinde K+HS karışımının 3 günlük basınç dayanımında su kürüne göre %35 düşüş tespit edilirken KN+HS karışımında bu oran %30 (Şekil 72), KN+ST+HS (%3-3) karışımında %28 ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımında yaklaşık %13,8'dir (Şekil 73). Dolayısıyla hava sürükleyici içeren karışımlara antifriz katkıları eklendiğinde erken yaş dayanımında düşük sıcaklıkta dayanım düşüş oranının daha az olduğu anlaşılmaktadır. En iyi sonuç ise KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımına aittir. Hava sürükleyici içeren bu karışımların 7 günlük basınç dayanımlarındaki düşüş oranları incelendiğinde yine minimum düşüş oranının %5,7 ile KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımına ait olduğu görülmektedir. Wise ve ark. (1995) %3 sodyum tiyosiyanat içeren çimento hamurunun 28 günlük basınç dayanımının -5 °C'de katkısız çimento hamurundan %210 daha yüksek olduğunu ifade ederek elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Karışımların -5 °C'deki 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, K+HS karışımının 28 günlük basınç dayanımında su kürüne göre % 31,8 düşüş tespit edilirken

KN+HS karışımında bu oran %20,5, KN+ST+HS (%3-3) karışımında %25,5 ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımında yaklaşık %21,6'dır. Dolayısıyla hava sürükleyici içeren karışımlara antifriz katkıları eklendiğinde ileri yaş dayanımında düşük sıcaklıkta dayanım düşüş oranının daha az olduğu anlaşılmaktadır. Karışımların -5 °C'deki 3,7 ve 28 günlük basınç dayanımları genel olarak incelendiğinde ise erken yaş dayanımında en iyi sonucu KN+ST+HS (%3-3) karışımı ileri yaş dayanımında ise KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımı vermiştir (Şekil 73).

Karışımların -10°C'deki basınç dayanımları incelendiğinde K+HS karışımının 3 günlük basınç dayanımında su kürüne göre %35,3 düşüş tespit edilirken KN+HS karışımında bu oran %32,5, KN+ST+HS (%3-3) karışımında %36,9 ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımında yaklaşık %19,4'tür. Dolayısıyla hava sürükleyici içeren karışımlara %6 ve %4,5 oranında antifriz katkıları eklendiğinde erken yaş dayanımında düşük sıcaklıkta dayanım düşüş oranının daha az olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımındaki erken yaş dayanımının düşüş oranı çok daha azdır. Hava sürükleyici içeren bu karışımların 7 günlük basınç dayanımlarındaki düşüş oranları incelendiğinde yine minimum düşüş oranının %8,1 ile KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımına ait olduğu görülmektedir.

Karışımların -10°C'deki 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde K+HS karışımının 28 günlük basınç dayanımında su kürüne göre %31,8 düşüş tespit edilirken KN+HS karışımında bu oran %18,1, KN+ST+HS (%3-3) karışımında %31,9 ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımında yaklaşık %33,3'tür. Hava sürükleyici içeren karışımlara %6 oranında antifriz katkı eklendiğinde ileri yaş dayanımında düşük sıcaklıkta dayanım düşüş oranının diğer karışımlara kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Karışımların -10 °C'deki 3,7 ve 28 günlük basınç dayanımları genel olarak incelendiğinde erken yaş dayanımında en iyi sonucu KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımı ileri yaş dayanımında ise KN+HS karışımı vermiştir (Şekil 72 ve 73).

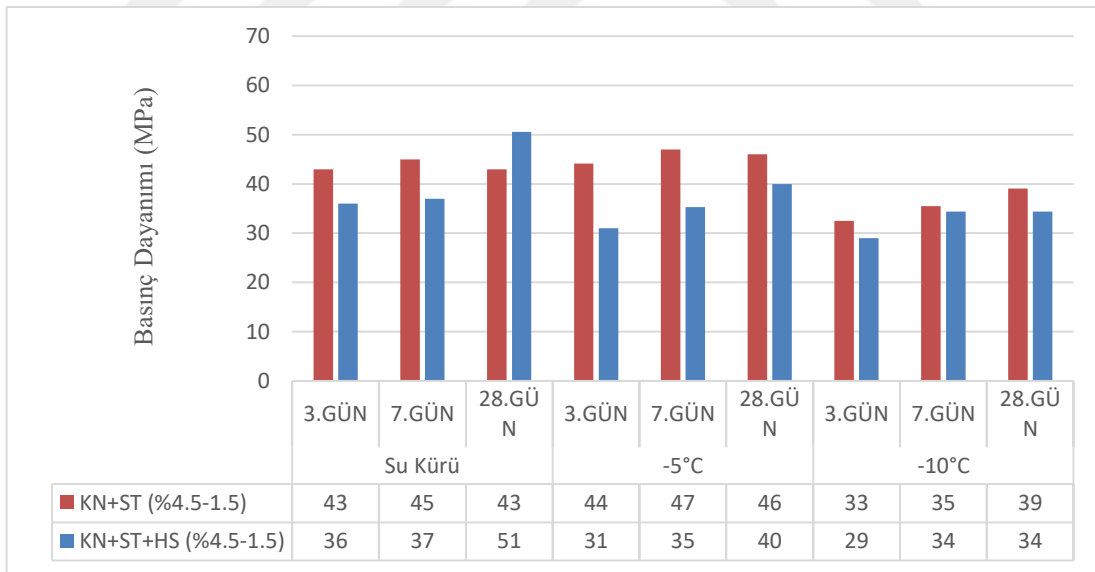


Şekil 73. K+HS, KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C’deki basınç dayanım sonuçları

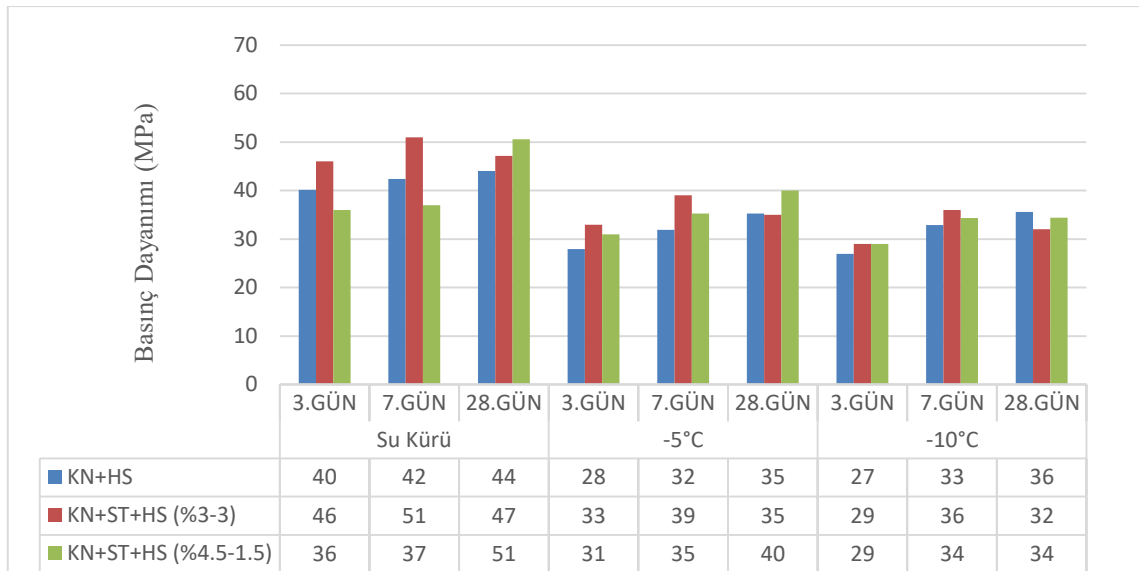
Şekil 73’te görüldüğü gibi -5 °C ve -10 °C’de sabit sıcaklıkta 12 saatlik donmaya maruz bırakılan hem antifriz hemde hava sürükleyici katkı içeren karışımlarda, ikili antifriz katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarında kontrol betonuna kıyasla olumlu bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Sodyum tiyosiyanat betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını hızlandıran bir antifriz katkı olarak tüm kür ortamlarında 3 ve 7 günlük erken yaş dayanım gelişiminde etkili olmuştur. Öyleki sodyum tiyosiyanatın % 3 oranında kullanıldığı karışımın erken yaş dayanım değerlerinin % 1,5 sodyum tiyosiyanat kullanılan karışımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak 28 günlük sonuçlar incelendiğinde kalsiyum nitrat oranının % 3’ten % 4.5’a yükselmesi ile basınç dayanımı değerlerinin azda olsa yükseldiği anlaşılmaktadır (Şekil 73). Bu durum kalsiyum nitrat katkısının betonun ileri yaş performansı üzerindeki pozitif etkisine atfedilebilir. Ayrıca katkı oranının artışına bağlı olarak donma noktasını düşürme derecesi de artmaktadır. Genel olarak -5 °C ve -10 °C’ye maruz kalan ikili kombinasyonların kullanıldığı karışımlarda basınç dayanım sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Han ve Kumar (2021), yaptığı çalışmada kalsiyum nitrat ve sodyumtiyosiyanatın birlikte kullanımının, soğuk hava koşullarında çeşitli kür şartlarında betonun dayanımının artırılması üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve soğuk hava koşullarında beton uygulamalarını desteklemek için olumlu bir girişim olacağı sonucuna varmıştır. Genel olarak bu deneysel çalışmada da %8 kalsiyum nitrat ve %1,5 sodyumtiyosiyanat kullanımının beton numunelerinin soğuk hava koşullarındaki mukavemet özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu söyleyerek yapılan yorumları desteklemiştir.

Şekil 74’te görüldüğü gibi -5 °C ve -10 °C’de KN+ST (%4,5-1,5) karışımına hava sürükleyici katkı eklendiğinde dayanım düşüşü gözlenmektedir. Örneğin -5 °C’de, KN+ST+HS

(%4,5-1,5) karışımının 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında KN+ST (%4,5-1,5) karışımına göre yaklaşık %29,55, %25,53 ve %13'lük düşüş olduğu görülmektedir. Şahin ve ark. (2023) çalışmasında betonun su/bağlayıcı oranı sabit tutularak hava sürükleyici kullanımı ile dayanım performansının düştüğünü ve hava içeriğindeki her %1'lik artış için dayanımın yaklaşık %5 oranında azaldığını belirtmiştir. Ancak bu katkılar sertleşmiş betonda donma neticesinde artan su hacminin hareket edebileceği alanlar oluşturmakta ve durum dayanım performansında telafi edici bir artışa sebep olabilmektedir (Şahin ve ark. 2023). Çalışmada da görüldüğü gibi dayanım düşüşüne rağmen -10 °C'de dahi en düşük dayanım değeri 29 MPa olarak elde edilmiştir. Hava sürükleyici katkının etkisiyle -10 °C'de basınç dayanımlarında düşüş oranları -5 °C'ye göre daha azdır. Bu durum düşük sıcaklıklarda ikili antifriz katkı kullanımının hava sürükleyici katkının basınç dayanımını düşürücü etkisini azalttığını göstermektedir. Aynı zamanda da Gao ve ark. (2024) beton içerisine hava sürüklemenin betonun don hasarını azaltmada kullanılan en etkili yöntemlerden biri olduğundan bahsetmiştir. Bu hava sürükleyici katkının çok sayıda düzgün ve kararlı yapıya sahip kabarcıkları sürükleyebileceği, gözenek yapısını düzenleyebileceği ve betonun doygunluk derecesini azaltabileceğine atfedilir. Dayanım sonuçları incelendiğinde katkısız betona göre antifriz katkıları ile birlikte kullanımı neticesinde beton üzerindeki olumlu özellikleri olumsuz özelliklerinin önüne geçmektedir.



Şekil 74. KN+ST+HS (%4,5-1,5) ve KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanım sonuçları



Şekil 75. KN+HS, KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C’deki basınç dayanım sonuçları

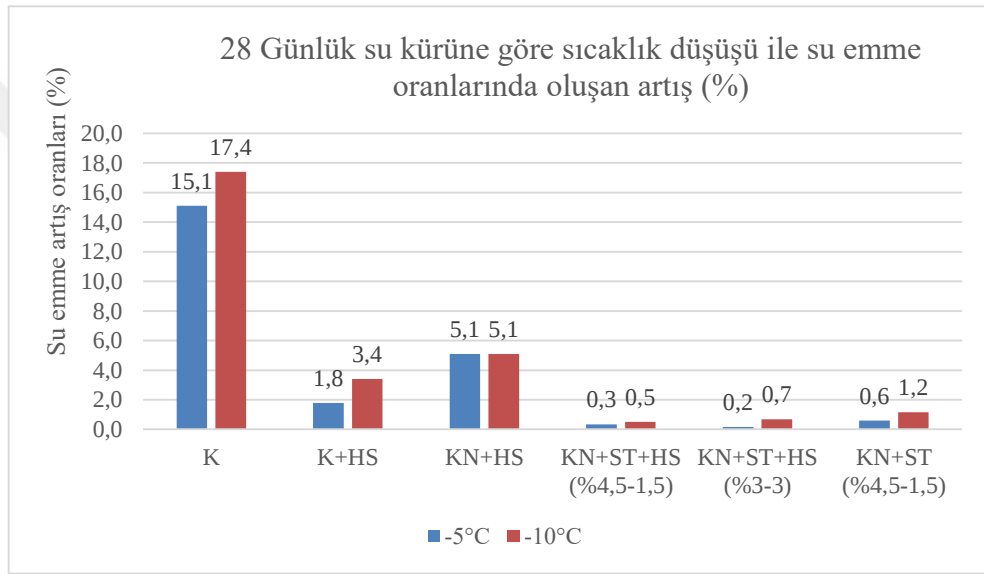
Antifriz katkı içeren karışımların -5 °C ve -10 °C’deki 3 günlük erken yaş basınç dayanımları kontrol karışımından daha yüksektir. Hava sürükleyici içeren tüm karışımlar içerisinde antifriz katkı içeren karışımların -5 °C ve -10 °C’deki basınç dayanımları kontrol karışımından daha yüksektir. Wan ve ark. (2024) düşük sıcaklıkta antifriz kullanımının betonun mekanik özellikleri üzerinde iyileştirici özelliği olduğundan bahsederek yapılan yorumları ve çıkarımları desteklemiştir. Basınç dayanımlarında hava sürükleyici eklendiğinde düşüş olmasına rağmen hem -5 °C hem de -10 °C’de en optimum sonuçlar %4.5 KN ve %1.5 ST içeren karışımda elde edilmiştir.

Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 76 ve 77’de görüldüğü gibi kontrol betonu ve yalnız hava sürükleyici içeren kontrol betonundaki su emme oranı hava sürükleyici katkının ve betonun maruz kaldığı sıcaklık düşüşünün etkisiyle artmıştır. Değişim oranları incelendiğinde hiçbir katkı içermeyen kontrol karışımının sıcaklık düşüşü ile su emme değerlerinin arttığı, özellikle -10°C’de su kürüne göre %17.4’lük bir artış olduğu görülmektedir. Bu karışma ait basınç dayanım değişimleri de incelendiğinde, ortam sıcaklığındaki düşüş sebebiyle artan boşluk yapısı su emme sonuçlarındaki değişimi getirmiş ve dayanım düşüşü gözlenmiştir (Çullu ve Arslan, 2013).

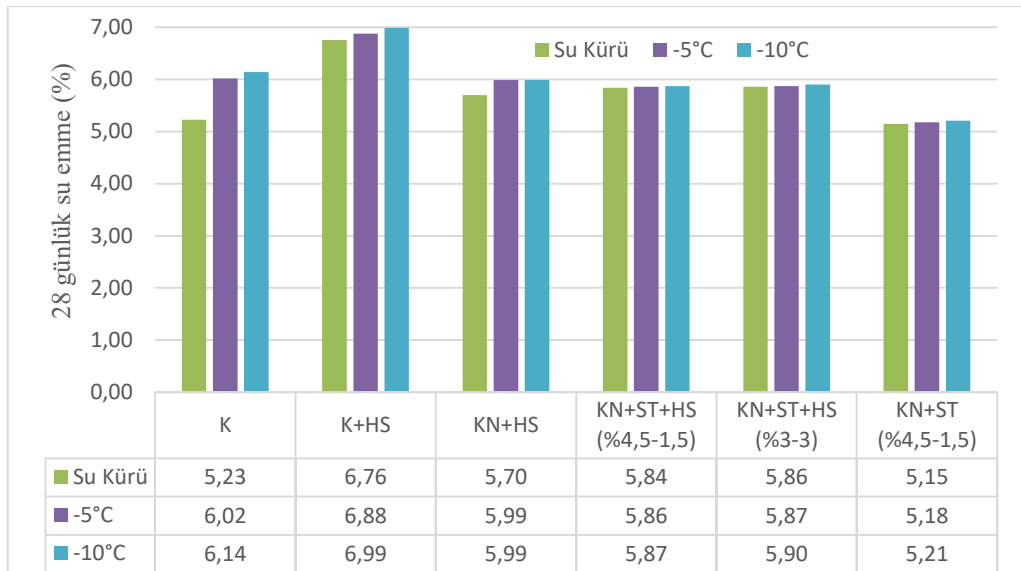
Antifriz ve hava sürükleyici katkı içeren tüm karışımların su emme oranlarının hava sürükleyici içeren kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir. Antifriz ve hava sürükleyici içeren karışımların -5 °C ve -10 °C’deki kendi su küründeki sonuçlarına göre K, K+HS, KN+HS, KN+ST+HS (%4,5-1,5), KN+ST+HS (%3-3) ve KN+ST (%4,5-1,5) karışımları için sırasıyla yaklaşık %15,1-%17,4, %1-8-%3,4, %5,1-%5,1, %0,3-

%0,5, %0,2-%0,7, %0,6-%1.2 olarak tespit edilmiştir. Burada antifriz ve hava sürükleyici katkıların düşük sıcaklıkta birlikte kullanımı olumlu yönde etki etmiştir. Ancak sıcaklık düşüştüğü kontrol betonunda su emme oranlarında çok daha yüksek bir artış elde edilirken antifriz ve hava sürükleyici katkılı karışımların su emme oranlarında artış çok daha düşüktür. Alzaza ve ark. (2022) yaptığı çalışmada ikili antifriz kullanımının su emilimini ve geçirgen gözenekliliği azalttığını tespit etmiştir. Bu durum antifriz katkının betonu donmaya karşı koruma yeteneğine bağlanabilir ve dolayısıyla yapısal donma hasarı ortadan kaldırılarak gözeneklerin birbiriyle olan bağlantısı da en az indirilebilir. Fakat kullanılan katkı dozajı betonun boşluk yapısını etkileyeceğinden özellikle yüksek dozajda bu etki öne çıkacaktır (Huang ve ark. 2024).



Şekil 76. Tüm karışımların 28 günlük su kürüne göre -5°C ve -10°C’de su emme sonuçlarındaki değişim (%)

Antifriz katkıların çimentonun hidratasyonunu hızlandırarak mukavemeti arttırdığı ve kalsiyum nitrat katkısının artan mukavemetle birlikte dolaylı olarak gözenekliliği azaltıp su emilimini azalttığı bilinmektedir (Polat, 2016). Bu çalışmada da kalsiyum nitratın hava sürükleyici ile kullanılması neticesindeki etkisini tespit etmek adına üretilen KN+HS karışımının -5 °C ve -10 °C gibi düşük sıcaklıklarda su emme oranı kontrol betonundan daha düşük elde edilmiştir. Antifriz ve hava sürükleyici katkının ikili kullanımı da bu bağlamda olumlu yönde etki etmektedir.



Şekil 77. K, K+HS ve KN+HS karışımlarının su kürü, -5 °C ve -10 °C’deki su emme değerleri

Aynı zamanda Şekil 77’de görüldüğü gibi kalsiyum nitratın ağırlıkça yüzdesinin %3’ten %4,5’e yükselmesi su emme değerlerinde önemli bir değişime neden olmamıştır. KN+ST(%4,5-1,5) karışımına hava sürükleyici katkı eklendiğinde -5 °C ve -10 °C’deki su emme oranları bir miktar artmıştır. Ancak bu sıcaklıklarda en düşük değerler yine bu karışıma aittir. Optimum sonuçlar katkıların birlikte kullanıldığı karışımlara aittir.

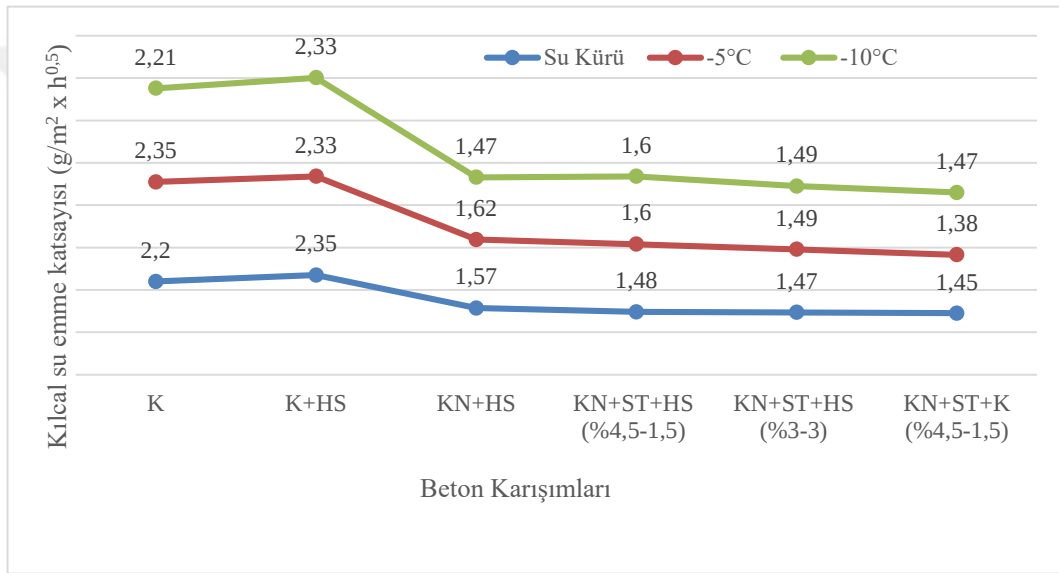
Kılcal Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 11 ve Şekil 78’de görüldüğü gibi kontrol betonu ve yalnız hava sürükleyici içeren kontrol betonunun kılcal su emme katsayısı hava sürükleyici katkının eklenmesi ile birlikte su kürü uygulanan K+HS karışımlarında %6,8 ve -10 °C’deki K+HS karışımlarında %5,4’lük bir artış tespit edilmiştir. Aynı zamanda KN+ST karışımlarına hava sürükleyici eklendiğinde ise su kürü şartlarında %2,07, -5°C’de %15,9 ve -10°C’de ise %8,8’lik bir artış söz konusudur. Öyle ki karışımlara hava sürükleyici eklenmesi beton içerisinde hava boşlukları oluşturduğundan kılcal su emme katsayısını artırmaktadır. Polat (2007) çalışmasında da hava sürükleyici kullanılması halinde donma çözülme öncesi; kontrol numunelerine kıyasla kılcal geçirimlilik katsayısının arttığını görmüştür. Tüm kür şartlarında hava sürükleyici içeren kontrol karışımlarına antifriz katkı eklenmeye başladığında ise kılcal su emme katsayısında düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu düşüş su kürü uygulanan KN+HS karışımlarında %33,2 olarak -5°C’deki KN+HS karışımlarında %30,5 ve -10°C’deki KN+HS karışımlarında %36,9 olarak tespit edilmiştir. Bu bağlamda düşük sıcaklıklarda antifriz katkıların hava sürükleyici ile birlikte kullanımı ile kılcal su emme katsayısının düştüğü öne çıkmaktadır. KN ve ST antifriz katkıların ağırlıkça kullanım oranlarının değişmesi ile de kılcal su emme katsayılarında

kaydadeğer bir değişime neden olmamıştır. Sonuç olarak antifriz kullanımı karışımların kılcal su emmesi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

Tablo 11. Tüm Karışımların Su Kürü, -5°C ve -10°C Kür Şartlarında Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçları

Kılcal Su Emme Katsayısı	K	K+HS	KN+HS	KN+ST+HS (%4,5-1,5)	KN+ST+HS (%3-3)	KN+ST (%4,5-1,5)
Su Kürü	2,20	2,35	1,57	1,48	1,47	1,45
-5°C	2,35	2,33	1,62	1,60	1,49	1,38
-10°C	2,21	2,33	1,47	1,60	1,49	1,47

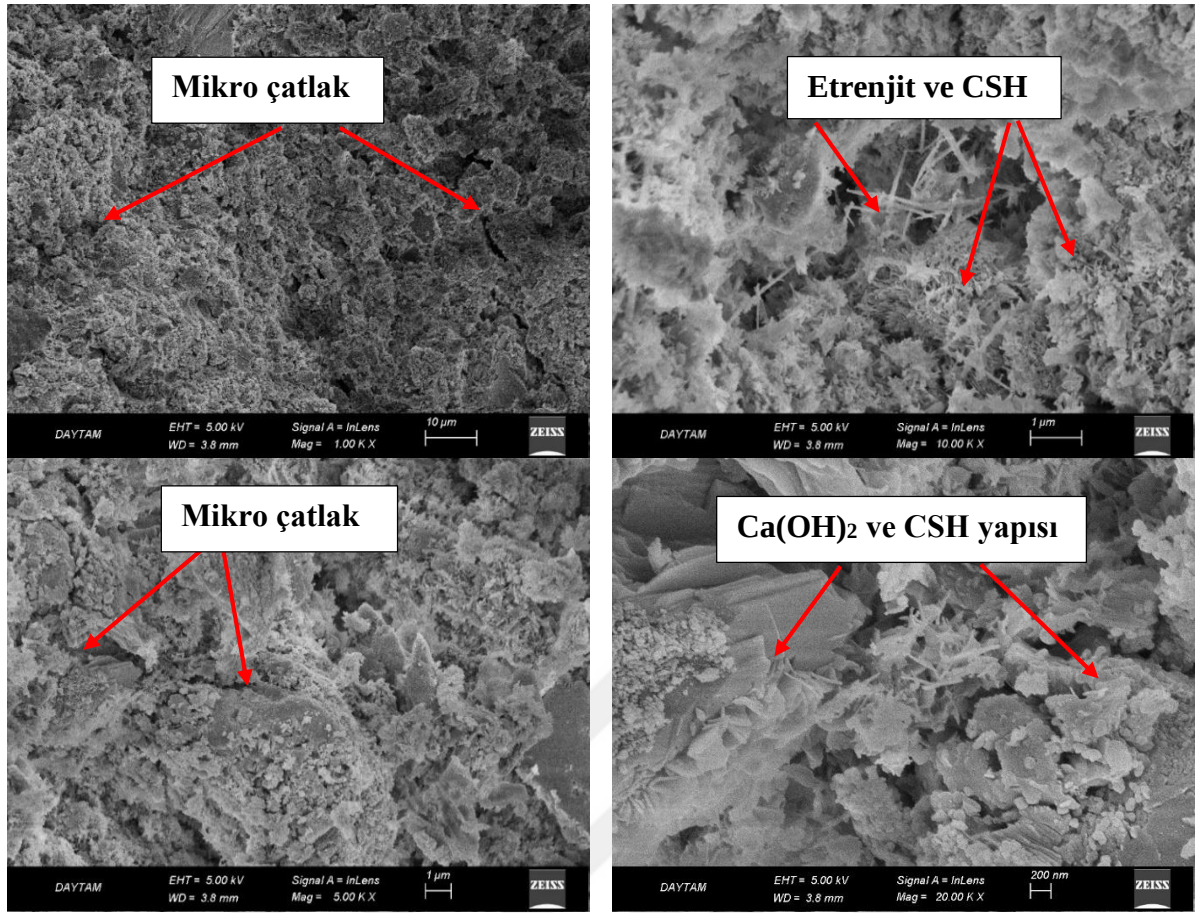


Şekil 78. Tüm karışımların su kürü, -5°C ve -10°C kür şartlarında kılcal su emme katsayısı sonuçları

İç Yapı Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SEM analizi

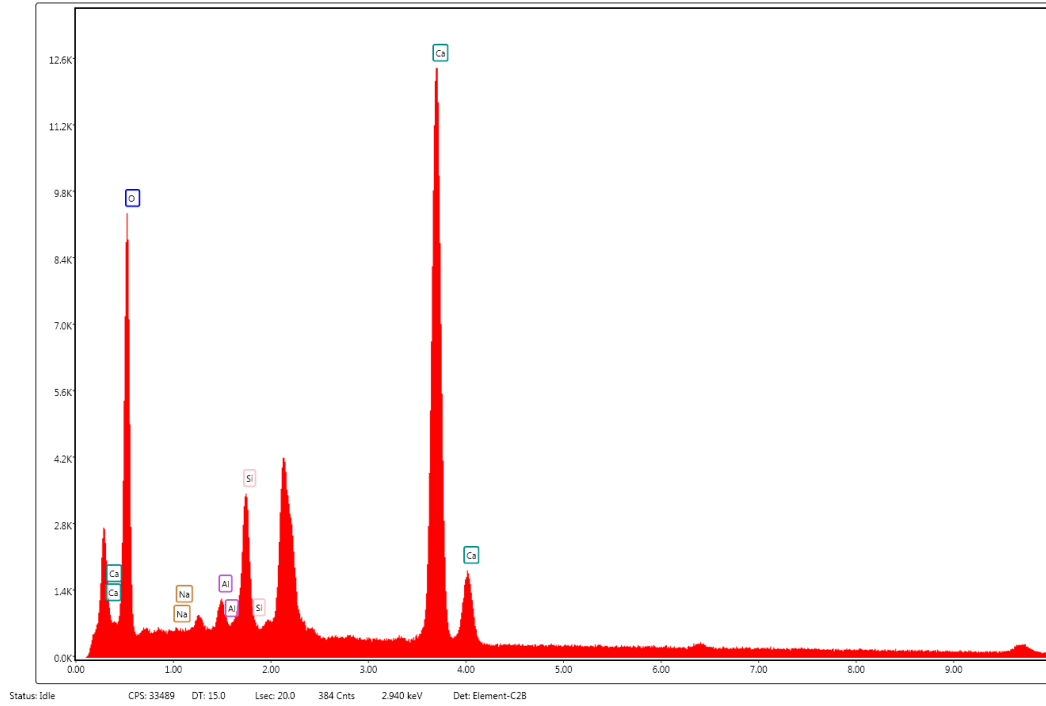
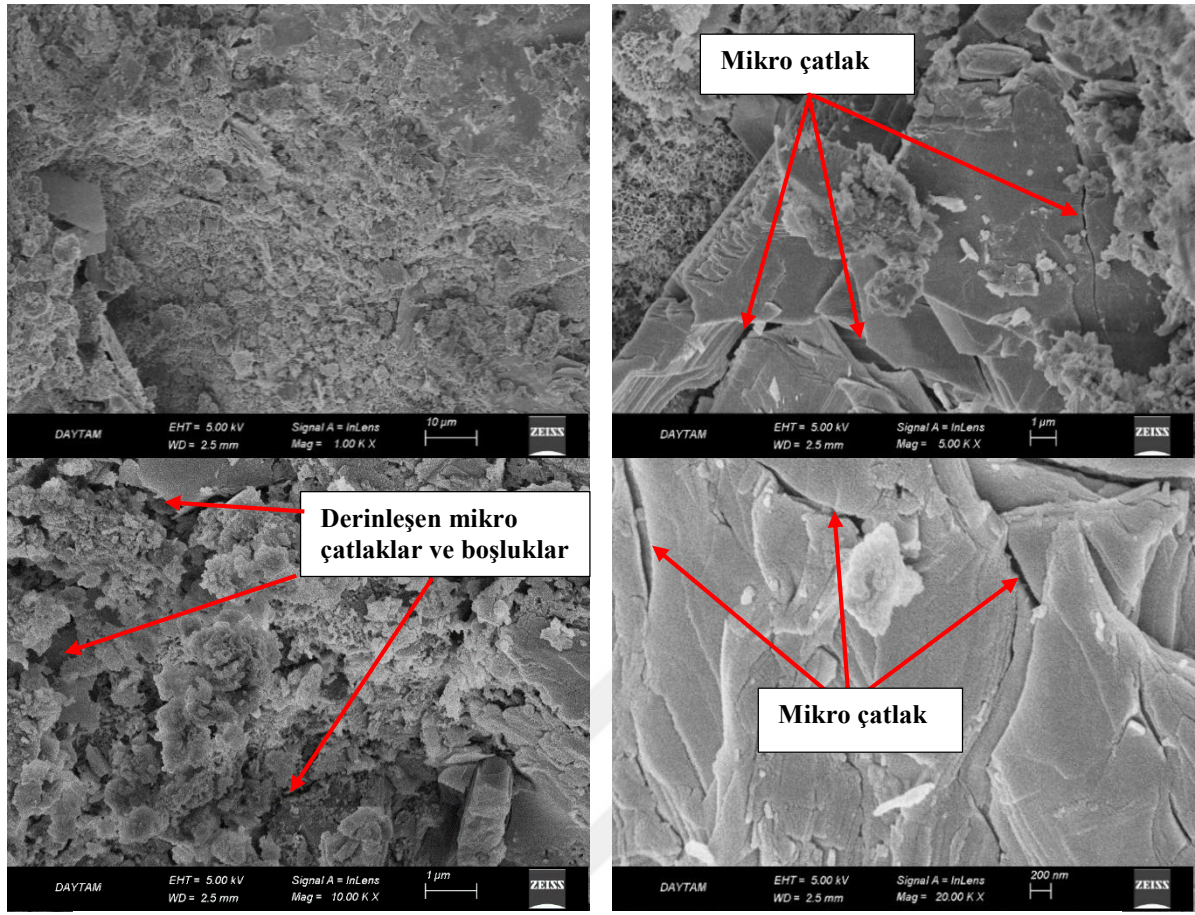
Bir karışımın iç yapısındaki fazların tipi, dağılımı, miktarı ve şekli mikro yapısını oluşturur. Betonun mikro yapısı heterojen ve kompleks bir yapıya sahiptir. SEM beton ve bileşenleri hakkında iyi bir analiz yapmak ve beton iç yapısını incelemek için önemli bir araçtır. Aynı zamanda betonda meydana gelebilecek bir bozulmanın sebebini anlamak için farklı avantajlara sahiptir. SEM tekniği ile elde edilen görüntüler sertleşmiş çimento hamurunun bileşenlerinin tespiti gibi avantajlarının yanı sıra diğer optik görüntülemelere göre daha büyük üç boyutlu bir çözünürlüğe sahiptir (Karagöl 2013). Bu bağlamda deneyler için 1x1 cm boyutlarında numuneler oluşturularak bu numuneler incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen SEM görüntüleri Şekil 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85 ve 86’da verilmiştir.



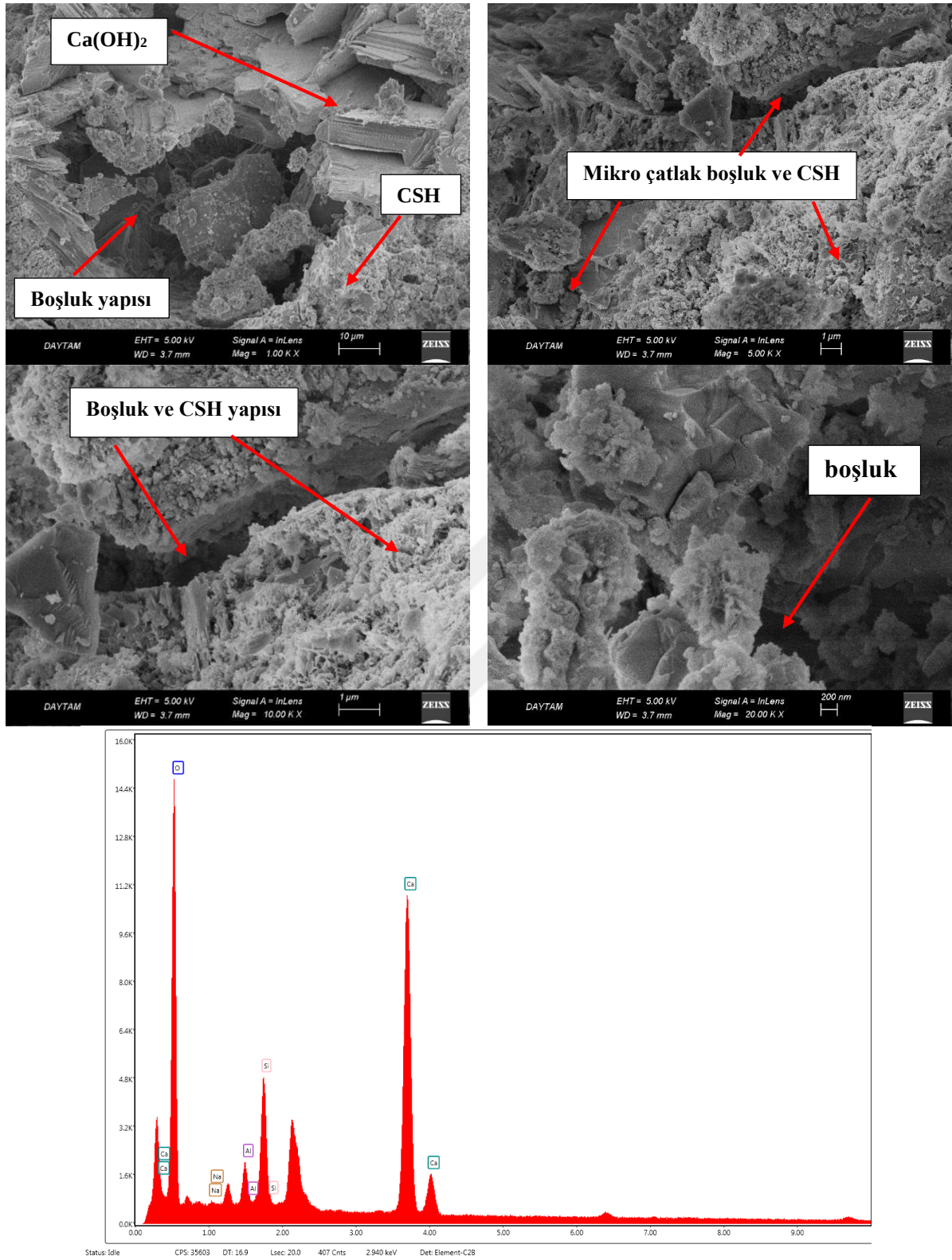
Şekil 79. Standart su küründeki K beton numunesinin SEM görüntüleri

Şekil 79’da 28 günlük su küründen sonra K beton numunesinin iç yapı analizinde iğnemsî formdaki etrenjit, CSH ve plak şeklindeki hegzagonal yapılar olan Ca(OH)_2 görülmektedir. Hidratasyon olayı ve oluşturduğu bileşikler arttıkça betonun dayanımı artar. SEM görüntülerinde daha koyu özellikteki bölgeler çimento hamurundan ayrılan bir faz olarak kapiler boşlukların göstergesidir.

Şekil 80’de ise $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye maruz kalan K numunesinin SEM görüntülerinde su küründen sonra da var olan ince mikro çatlakların düşük sıcaklığının etkisiyle derinleşip daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Plak şeklinde gözükten Ca(OH)_2 ve CSH’nın varlığı ise $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de de hidratasyonun kısmen devam ettiğini göstermektedir. Ancak $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’deki SEM görüntülerinde görülen boşluk yapısı ve çatlaklarla, elde edilen basınç dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde düşük sıcaklıkta var olan çatlakların derinleşmesi ve yeni çatlakların oluşumuyla dayanım gelişiminin etkilendiği ve dayanım değerlerinin azaldığı, ayrıca su emme ve kılcal su emme oranlarının da arttığı tespit edilmiştir. Liu ve ark. (2022) yaptığı çalışmasında da düşük sıcaklıkta kürlemenin SEM görüntülerinde mikro çatlaklar oluşturduğunu tespit etmiştir. Şekil 80’de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye maruz kalmış K beton numunesinin EDX analizi incelendiğinde Ca, O, Si ve Al elementlerinin ağırlık olarak yoğunluklarının sırasıyla %49,58, %46, %3,96 ve %0,47 olduğu tespit edilmiştir.



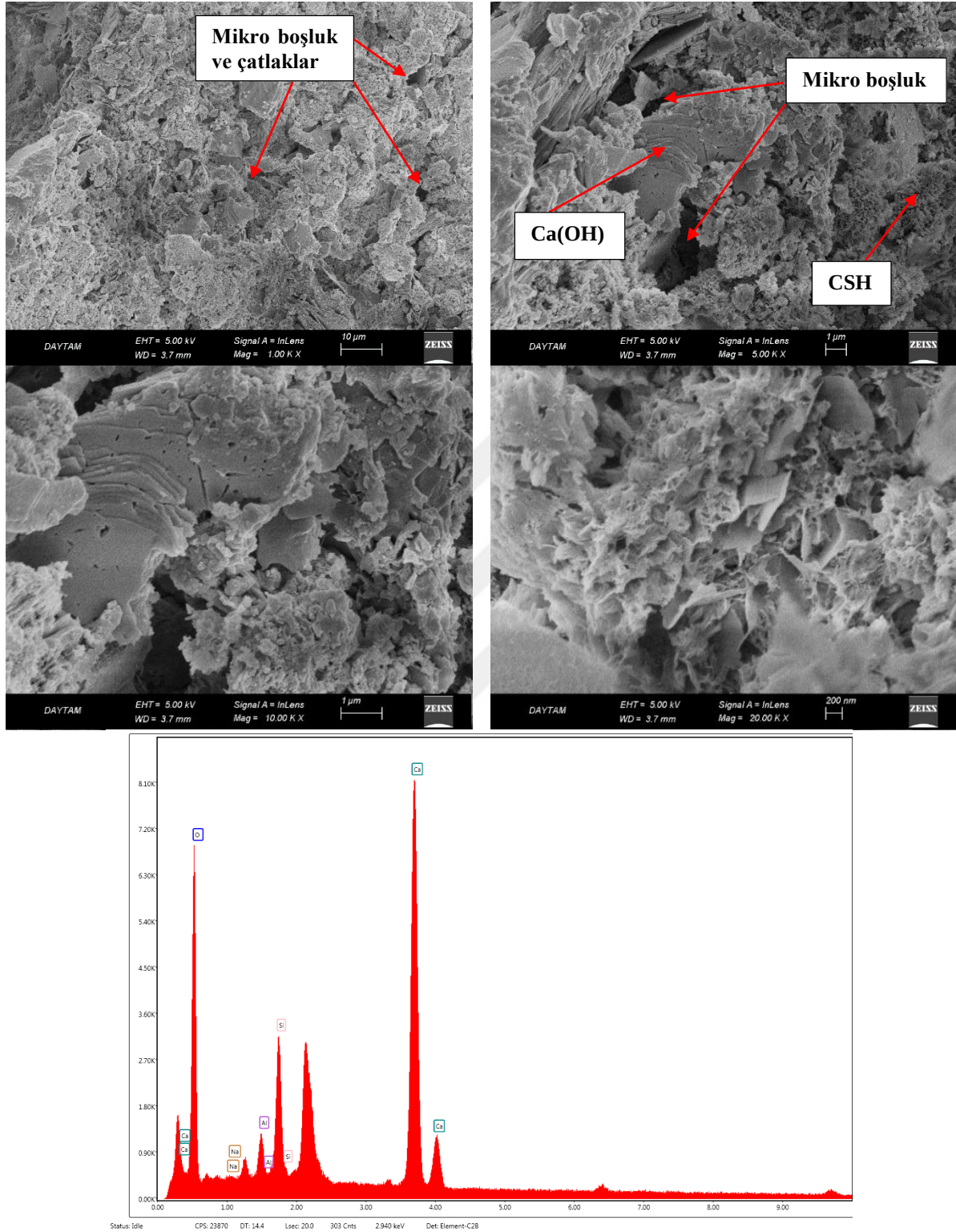
Şekil 80. -5 °C'ye maruz kalmış K beton numunesinin SEM-EDX analizi



Şekil 81. Standart su küründeki K+HS beton numunesinin SEM-EDX analizi

Şekil 81'deki su kürü uygulanan K+HS beton numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde kontrol betonuna hava sürükleyici eklenmesi ile boşlukların oluştuğu görülmüştür. Şekil 82'de ise -5 °C'de K+HS betonunun SEM görüntülerinde yine boşluk ve çatlak oluşumu ile beraber CSH ve Ca(OH)_2 yapılarının da oluştuğu görülmektedir. Beton

karışımına hava sürükleyici eklenmesi ile oluşan boşluklar sebebiyle basınç dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bu durumu basınç dayanım sonuçları da desteklemektedir.



Şekil 82. -5 °C'ye maruz kalmış K+HS beton numunesinin SEM-EDX analizi

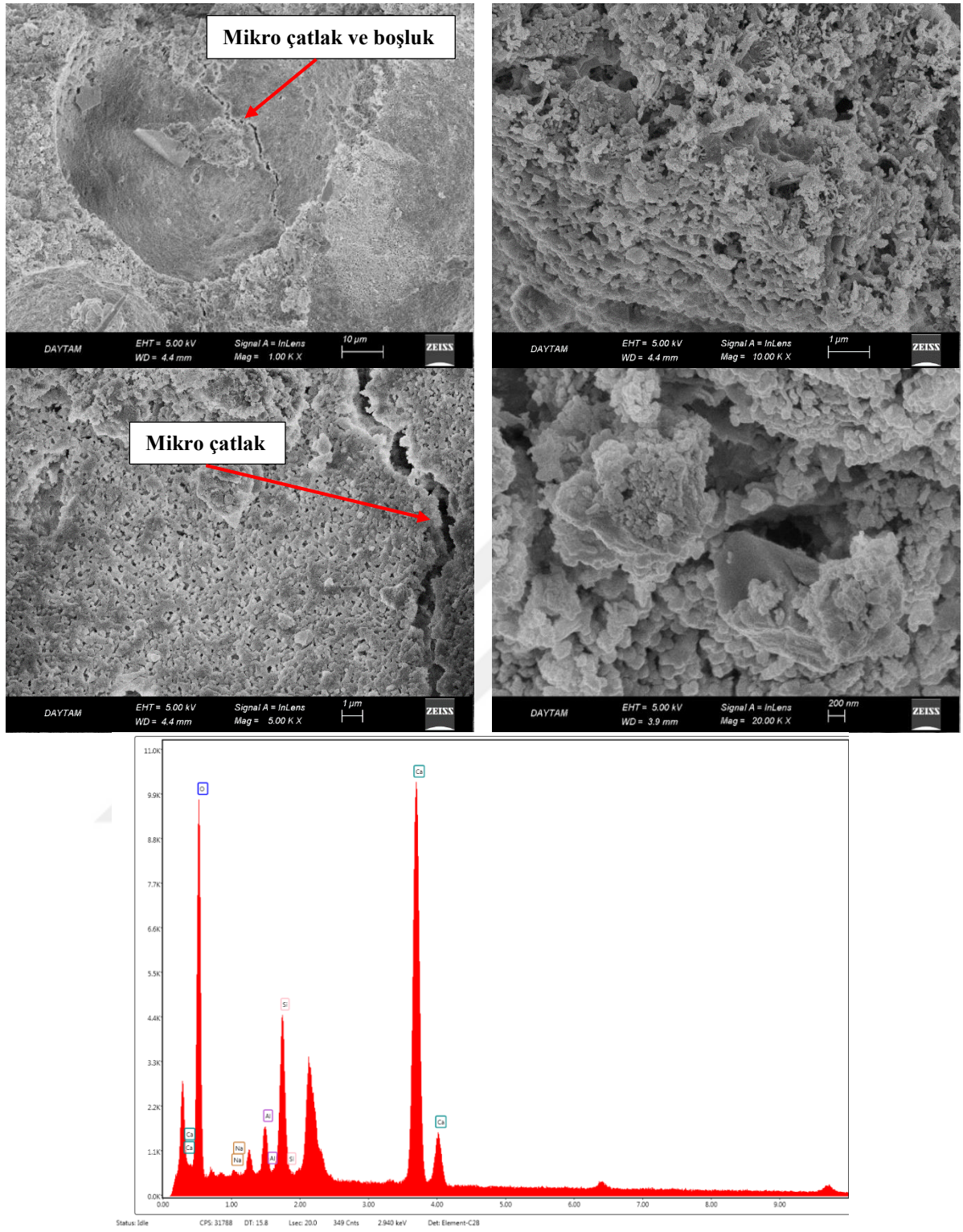
Şekil 81 ve 82'de su küründeki K+HS karışımının ise Ca, O, Si ve Al yüzde ağırlık oranlarının sırasıyla % 39,32, % 53,85, % 5,37 ve % 1,46 iken -5 °C'ye maruz kalmış K+HS beton numunesinin EDX analizi incelendiğinde Ca, O, Si ve Al yüzde ağırlık oranlarının

sırasıyla % 46,99, % 46,31, % 5,43 ve % 1,27 olduğu görülmektedir. Şekil 81 ve Şekil 82 karşılaştırıldığında hava sürükleyici içeren karışımın sıcaklık düşüşü ile tüm elementlerin pik yoğunluklarının azaldığı görülmektedir. Standart su kürü sonuçlarında Ca, Si ve O pikleri yaklaşık 11,2, 4,8 ve 14,4 iken -5 °C’de ise Ca, Si ve O pikleri yaklaşık 8,10, 3,60 ve 7,20’dir. Bu bağlamda düşük sıcaklıkta çimento bileşenlerinin yoğunluğunun düştüğü söylenebilir.

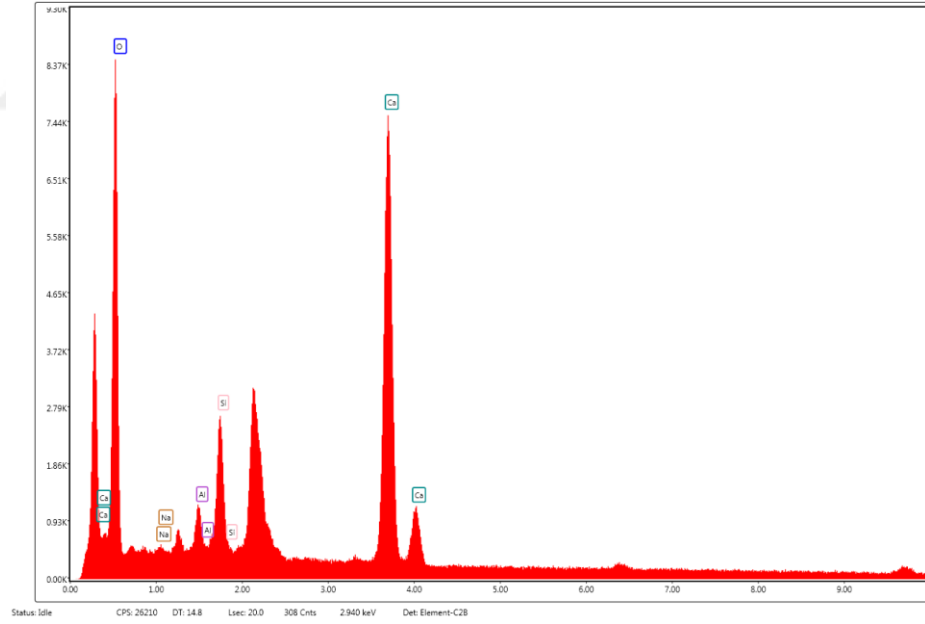
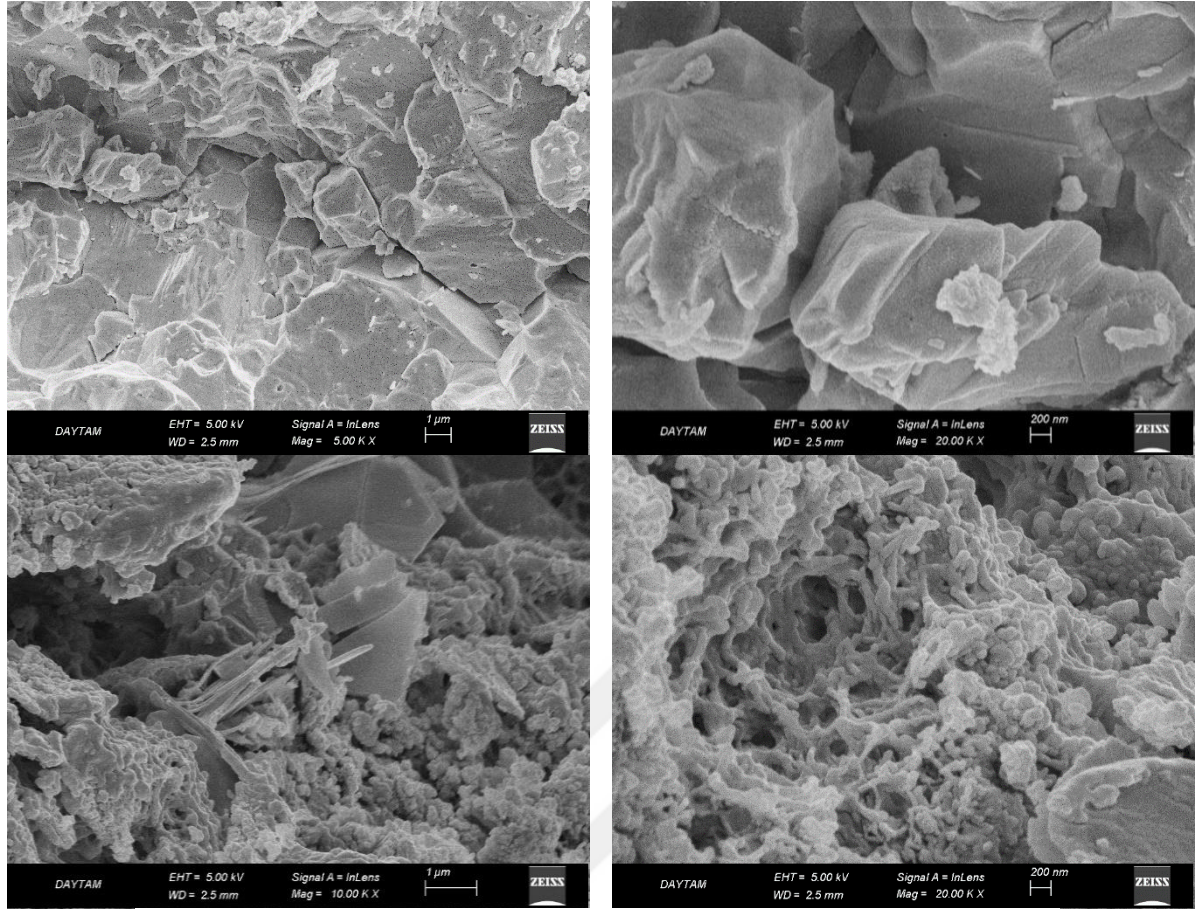
Şekil 83 ve Şekil 84’te ikili antifriz katkı kullanımı ile standart su kürü uygulanan ve taze halde -5 °C’ye maruz kalmış KN+ST (%4,5+1,5) beton karışımının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 83’deki SEM görüntüleri incelendiğinde standart su küründeki beton karışımında iç yapıda bazı çatlak ve boşluklarla birlikte CSH ve Ca(OH)_2 gibi yapılarında olduğu görülmektedir. Oluşan boşluk ve mikro çatlaklar kontrol betonuna kıyasla beton basınç dayanım değerlerindeki düşüşün bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. SEM-EDX analizlerinde su küründeki KN+ST (%4,5+1,5) beton karışımının Ca, Si, Al ve O elementlerinin yüzde ağırlık oranlarının sırasıyla % 44,43, % 5,97, % 1,52 ile % 48,08 ve -5 °C’de ise bu oranların sırasıyla % 42,76, % 4,24, % 1,03 ile % 51,97 olduğu tespit edilmiştir. Pik yoğunluklarının ise su küründe daha yüksek olduğu sıcaklık düşüşü ile azaldığı tespit edilmiştir.

Kalsiyum nitrat gibi antifriz katkıların C_3S hidrasyonundaki hızlandırıcı etkisi nedeniyle, portlandit ve CSH’nin oluşumu ve morfolojisi üzerinde etkilidir (Wu ve ark. 2024) ve aynı zamanda gözenek yapısının iyileşmesini sağlayabilir (Sivakumar 2013). Şekil 84’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde ise -5 °C’ye maruz kalan KN+ST (%4,5-1,5) karışımının mikro yapısının su küründeki mikro yapısı ile benzerlik gösterdiği, boşluklar ve çatlakların varlığı ile birlikte CSH ve Ca(OH)_2 yapılarında olduğu ve su kürü ile karşılaştırıldığında çok fazla değişim olmadığı görülmektedir. Bu durum -5 °C’de hidrasyonun ve betona dayanım kazandıran yapıların oluşumunun devam etmesi ile açıklanabilir. Basınç dayanım sonuçları da incelendiğinde karışımın 28 günlük su küründen sonra ve taze halde -5 °C’ye maruz kaldıktan sonraki 28 günlük dayanımları arasında ciddi bir fark olmadığı da görülmektedir.

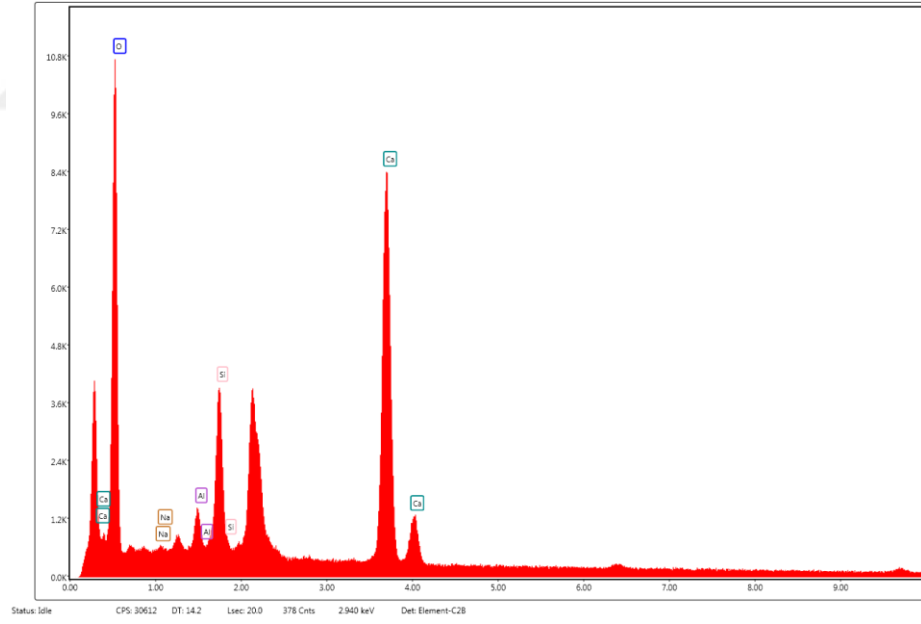
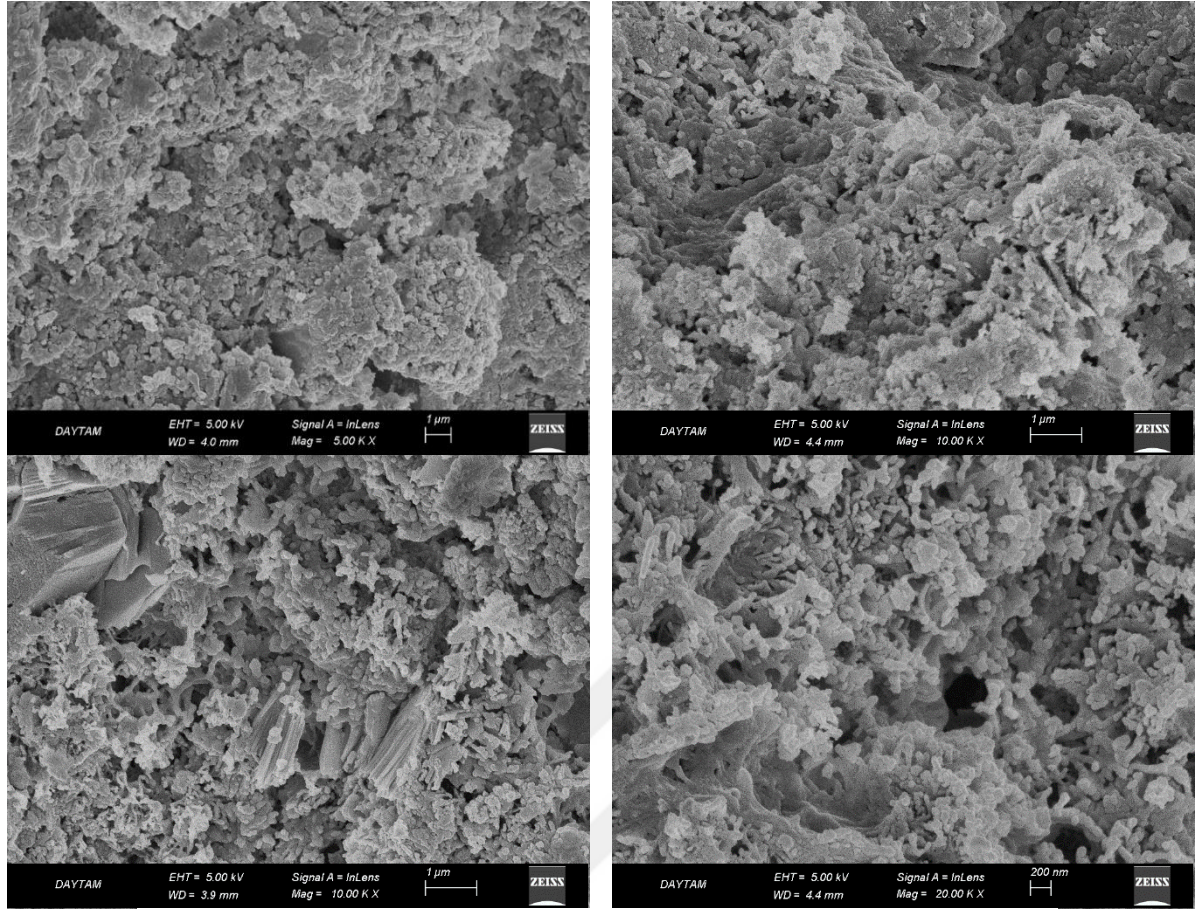
Demirboğa ve ark. (2014) bir çalışmada SEM görüntülerini incelediğinde, hidrasyon bileşenlerinin; %6 üre antifriz katkısı içeren beton için kalsiyum hidroksit ve CSH yapısını 3 gün ve -10 °C’de gözlemlemiştir. Ayrıca kontrol numunesinde önemli miktarda etrenjit tespit etmiştir ve etrenjit boşluklarda gelişerek kısa ve kalın kristaller oluşturmuştur.



Şekil 83. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi



Şekil 84. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi



Şekil 85. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi

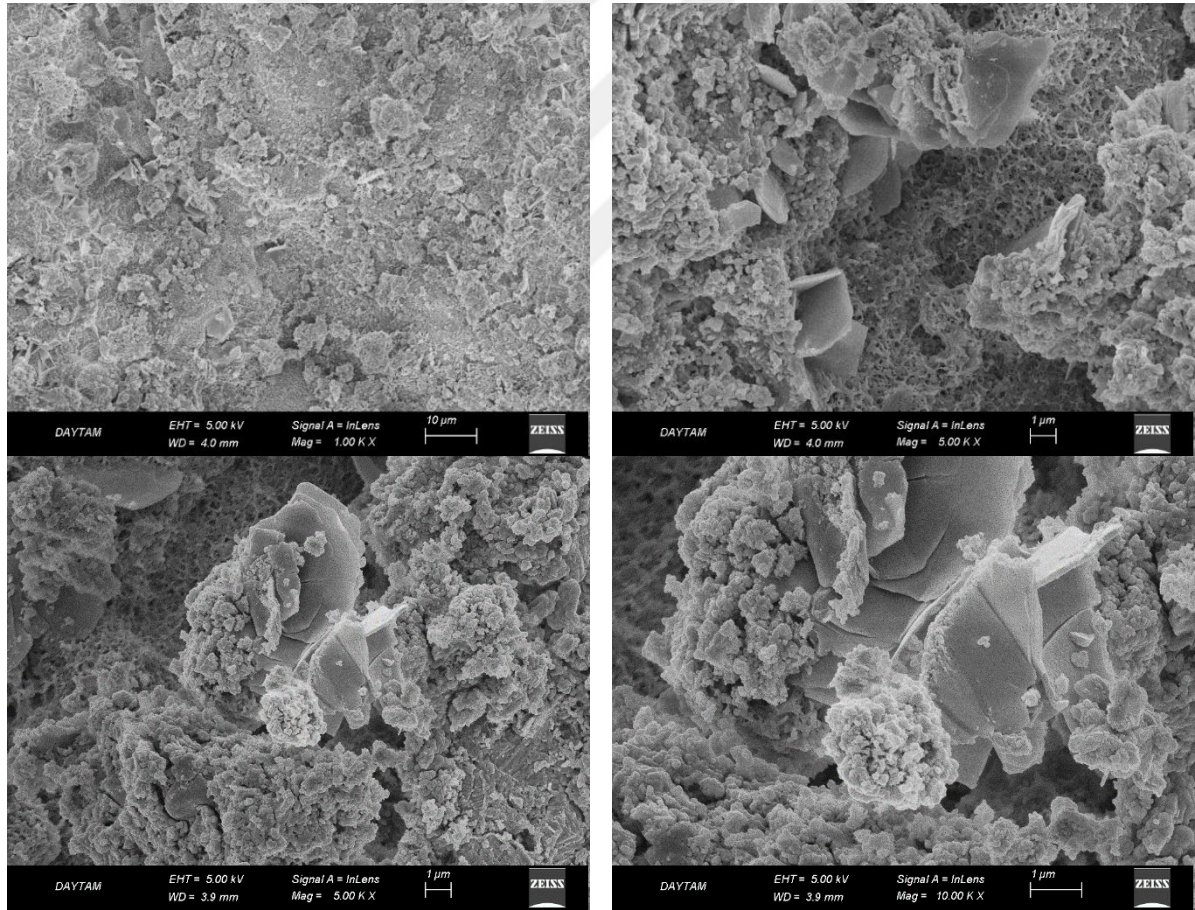
Şekil 85'te standart su küründeki KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde, hava sürükleyici katkı içeren K+HS karışımına göre ikili antifriz kullanımı ile daha yoğun bir mikro yapının elde edildiği ve hava sürükleyici etkisiyle oluşan boşlukların daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dayanım sonuçlarındaki değişimi de desteklemektedir. Ayrıca Şekil 86'da -5 °C'ye maruz kalmış KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton

numunesinde ikili antifriz kullanımı ve hava sürükleyici etkisiyle neredeyse hiç çatlak oluşmadığı hidrasyon olayı sonucu meydana gelen yapıların belirgin bir şekilde ortaya çıktığı söylenebilir. Yoğun bir mikro yapıya sahip olması ve içindeki boşlukların az olması su emme ve kılcal su emme sonuçlarında da azalma meydana getirmiştir. Yani donma önleyici antifriz katkı, sadece betonun mikro yapısının değil, aynı zamanda gözenek yapısının da yoğun olmasını sağlamaktadır (Demirboğa ve ark. 2014). Her ne kadar düşük sıcaklık etkisiyle aynı karışımın 28 günlük standart su küründeki dayanımı sıcaklık düşüşüyle azalmış olsa bile nihayetinde 40 MPa'ın üzerindeki dayanım değerine sahip betonun iç yapısında da yoğun bir yapıya neden olmuştur. Ayrıca kalsiyum nitratın portlanditin görünümünü oldukça yönsüz ve küçük parçacıklardan çok daha büyük kümelerle dönüştürdüğü ifade edilmiştir (Wang ve ark. 2022, Zhang ve ark. 2022, Justnes ve Nygaard 1997). Bu durum, gözenek çözeltisindeki iyon difüzyonunu kısıtlayan kalsiyum nitrat tarafından sağlanan yüksek Ca^{2+} konsantrasyonuna atfedilebilir (Justnes ve Nygaard 1997). Wang ve ark. (2023) bir çalışmada da XRD analizi ve SEM sonuçlarına göre, antifriz katkı ilavesiyle erken yaştaki çimento hidrasyonunda daha fazla hidrasyon ürünü oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu bağlamda düşük sıcaklıklarda antifriz kullanımı ile kontrol betonuna kıyasla daha fazla hidrasyon ürünü ortaya çıkmıştır. Ayrıca Şekil 85 ve 86'da SEM-EDS analizlerinde KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımının su küründeki ve -5 °C'ye maruz kaldığında Ca, Si, Al ve O elementlerinin yüzde ağırlık oranlarının sırasıyla % 39,99, % 5,88, % 1,09 ile % 53,05 ve % 36,70, % 4,71, % 1,17 ile % 57,33 olduğu, EDX grafiklerindeki özellikle Ca, Si ve Al pik yoğunluklarının ise yine sıcaklık düşüşü ile bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.

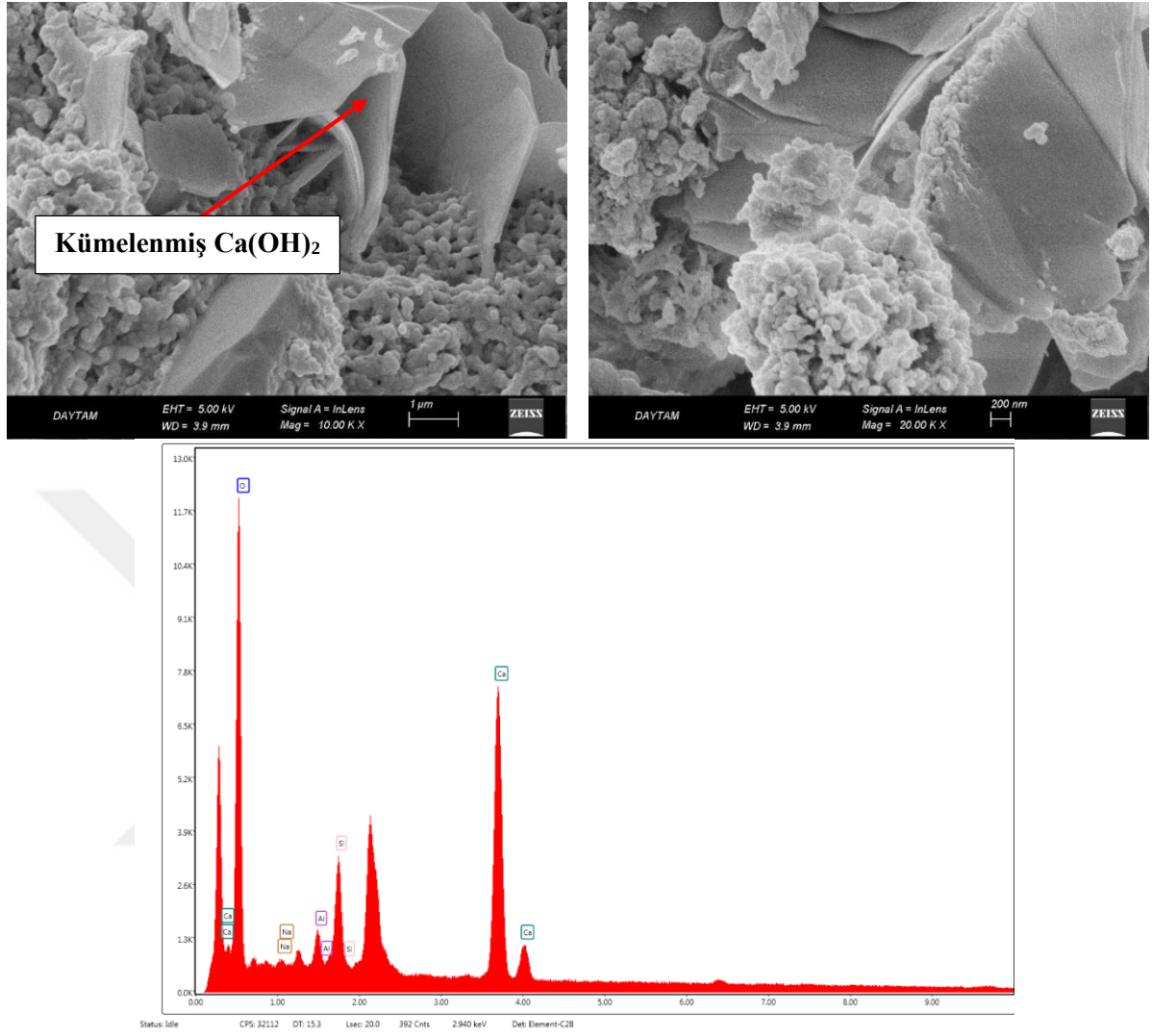
Polat (2016) bir çalışmada SEM görüntülerini incelediğinde karışımlarına üre ve kalsiyum nitrat eklemesi ile birlikte beton iç yapısının iyileştiğini tespit etmiştir. Yani arayüz ve mikro çatlaklarda, çok fazla iğne şeklinde etrenjit ve CSH jeli oluşmuş ve dolmuştur. Bu bağlamda da kalsiyum nitrat ve üre içeren betonun yoğunluğu katkı maddesi içermeyen kontrol betonuna kıyasla daha yüksektir.

Ren ve ark. (2021) bir çalışmada kalsiyum format ve metakrilik asitin çimento hamuru tozuyla birlikteliğinin priz süresi, akışkanlık ve çimento harcının mekanik dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar %1,0 kalsiyum format (veya %0,5 metakrilik asit) %1,0 çimento hamuru tozu ile birleştirildiğinde basınç dayanımının arttığını göstermiştir. X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları ise birlikte kullanılmış hızlandırıcı katkı maddelerinin çimentonun hidrasyonunu hızlandırdığını ve çimento harcının gözenekliliğini de azalttığını göstermiştir.

KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımının 28 günlük standart su küründen sonraki ve -5 °C'ye maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında düşük sıcaklıktaki basınç dayanımlarında yaklaşık %21 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durum SEM görüntülerinde az da olsa meydana gelen çatlakların oluşumuna atfedilebilir. Ancak elde edilen basınç dayanımı 40 MPa olduğundan bu dayanıma sahip bir betonun iç yapısında çok fazla mikro çatlakların oluşumu da beklenmemektedir. Yani dayanım düşüşü az olduğu için -5 °C'ye maruz kalmış KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM görüntülerinde de yoğun bir mikro yapı ve hidratasyon ürünlerinin varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca, Şekil 86'da da görüldüğü üzere sodyum tiyosiyanat gibi bir antifriz katkı içeren karışımda mikro yapısal değişiklikler ile çimento hamurunun kontrol örneğinden daha yoğun bir yapı sergilediği görülmektedir (Wang ve ark. 2022). Dolayısıyla ikili antifriz ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanımı basınç dayanımı, su emme ve kılcal su emme sonuçlarında olduğu gibi SEM görüntülerinde de olumlu bir şekilde sonuçlanmıştır.



Şekil 86. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi

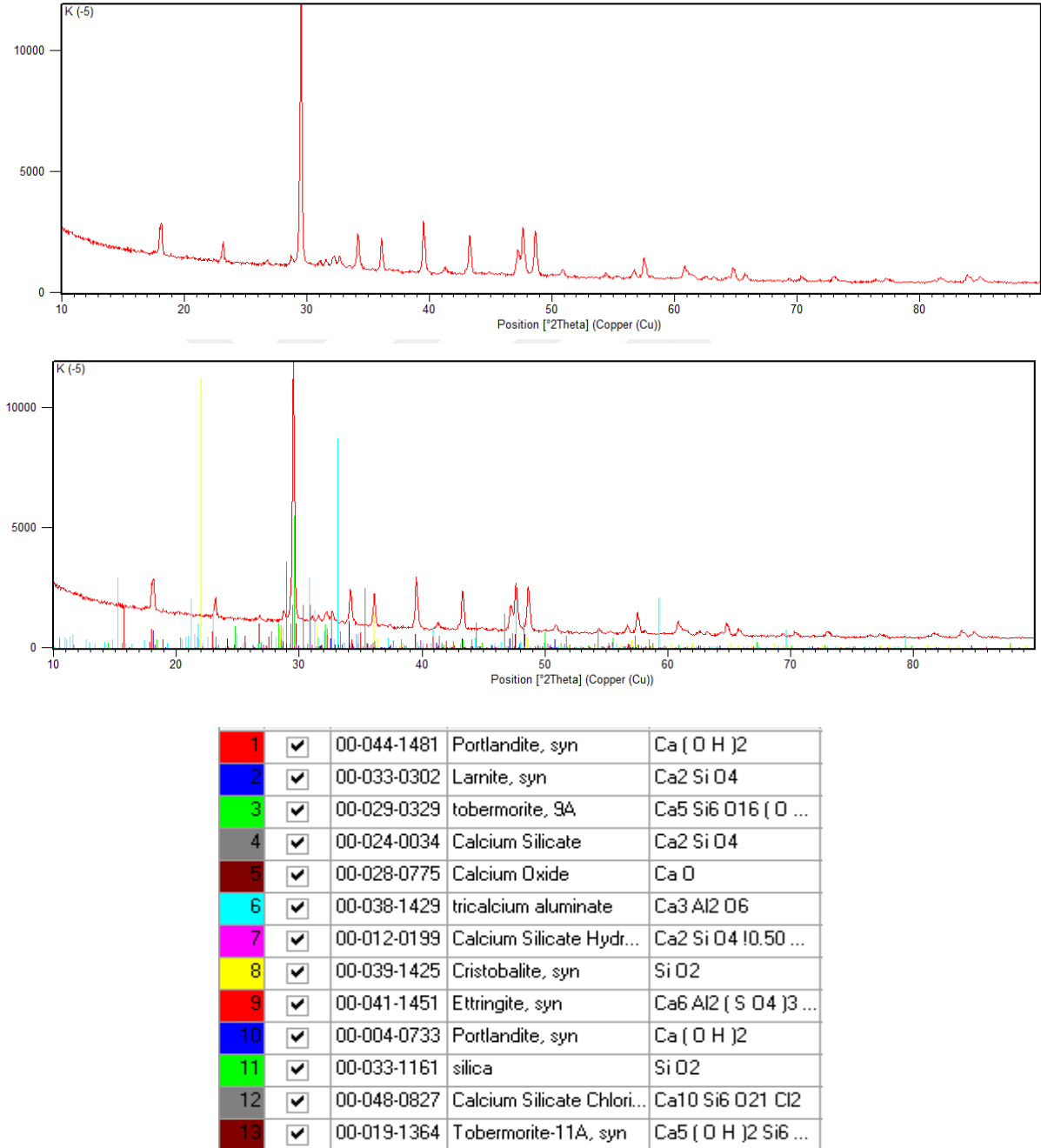


Şekil 86. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin SEM-EDX analizi (devamı)

XRD analizi

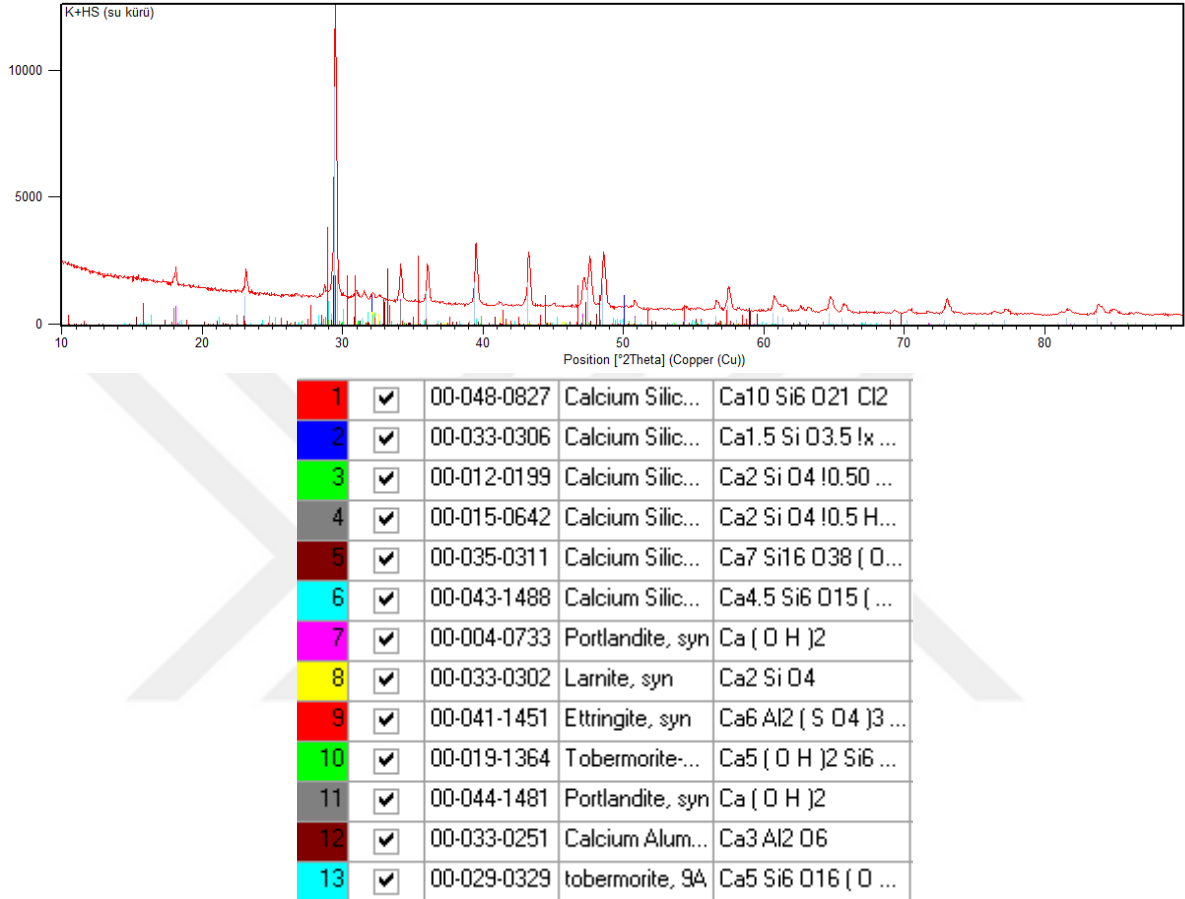
Bu analizde numuneler yüksek enerjili elektronlar ile bombardıman edildiğinde X ışınları üretilir ve XRD analizi genel olarak bir enerji dağıtan dedektör kullanmaktadır. Bu dedektör tüm verileri tek bir seferde toplama özelliğine sahiptir. Bu analiz herhangi bir malzemede bulunan elementlerin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız deney yöntemlerinden biridir (Siddique ve ark. 2011). Ek olarak X-ışını kırınımı (XRD), kırınım açısının ölçülmesi ile çimento esaslı malzemelerin mineralojik bileşimini nitel olarak analiz eden bir yöntemdir (Zhou ve ark. 2022). Aşağıda bu yöntem ile çizilen K, K+HS, KN+ST+HS(%4,5-1,5) ve KN+ST (%4,5-1,5) karışımlarına ait XRD analiz sonuçları yer almaktadır.

Şekil 87 incelendiğinde K karışımının pikleri içinde etrenjit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)i larnit, etrenjit, kristabolit ve tobermorit gibi yapıların var olduğu görülmektedir. Şekil 88’de standart su küründeki K+HS karışımının XRD analizi incelendiğinde -5 °C’deki K numunesine göre pik yoğunluğunun daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum soğuk hava koşullarına maruz bırakılan K karışımında-5 °C’de karıştırma suyunun donması ile $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ ve su arasındaki reaksiyonun daha az olması neticesinde yetersiz hidratasyona bağlanabilir (Ananyachandran ve Vasugi 2022, Khan ve Kumar 2021).



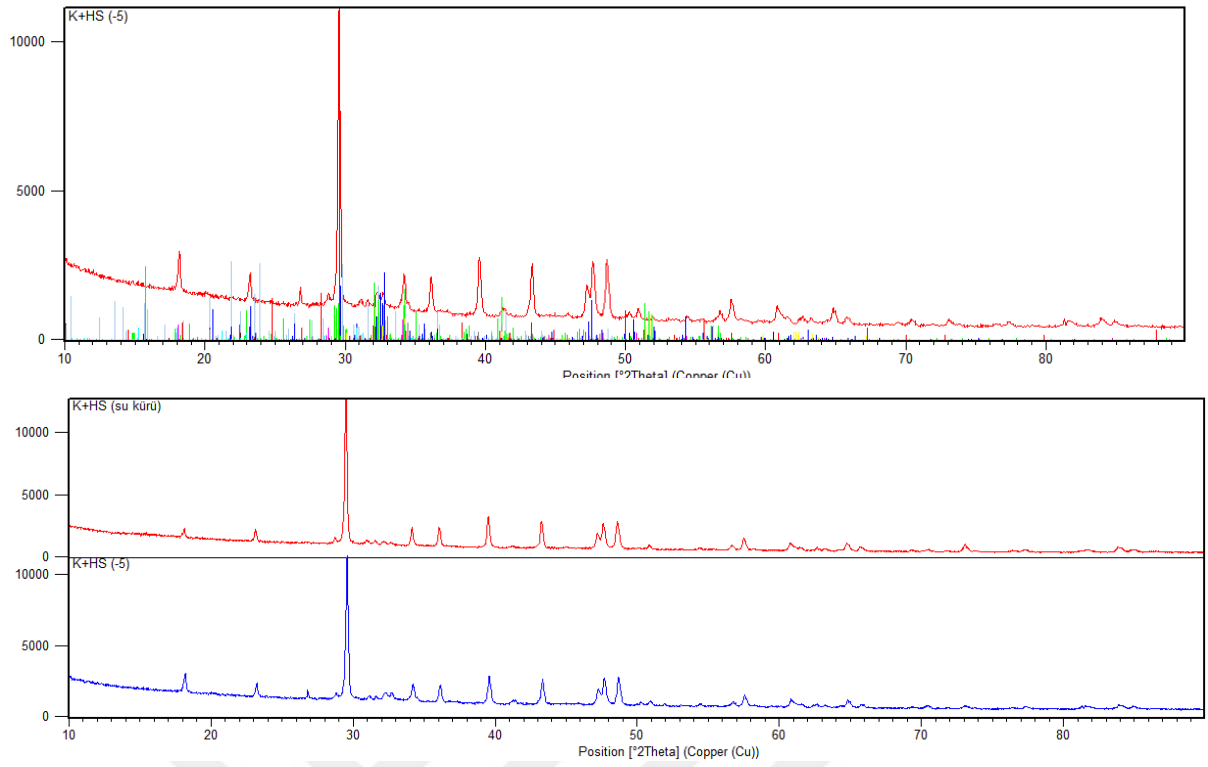
Şekil 87. -5 °C’ye maruz kalmış 28 günlük K beton numunesinin XRD analizi

K+HS karışımında ise yine etrenjit, portlandit, kalsiyum silikat hidrate, kalsiyum alüminat hidrate vb. yapılar tespit edilmiştir (Şekil 88 ve Şekil 89). Ancak oluşan yapıların pik yoğunluklarının değiştiği, su kürüne göre -5 °C’de bazı pik yoğunluklarının azaldığı, hava sürükleyici katkı eklendiğinde kontrol betonuna göre düşük sıcaklıkta bazı pik değerlerinde çok az fark olduğu ve genel olarak pik yoğunluklarının yakın olduğu görülmektedir.



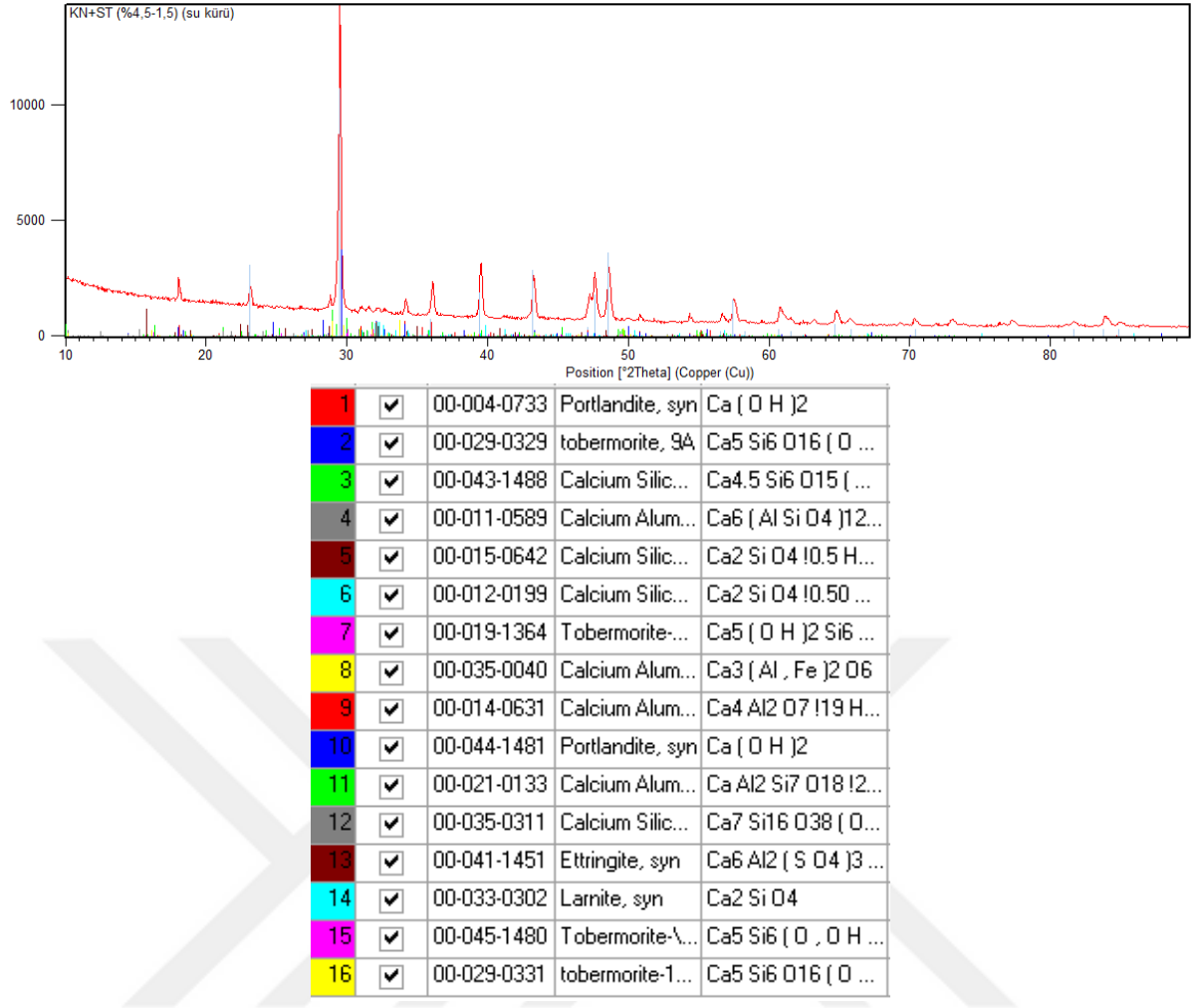
Şekil 88. Standart su küründeki 28 günlük K+HS beton numunesinin XRD analizi

Şekil 90, 91, 92 ve Şekil 93 incelendiğinde kontrol karışımına göre antifriz katkılı karışımlarda pik değerlerinin daha yüksek olduğu ayrıca antifriz katkıların eklenmesiyle hava sürükleyici katkılı betonun mikroyapı yoğunluğunun arttığı ve bu durumun XRD analiz sonuçlarına da yansıdığı da görülmektedir. XRD analizinden anlaşıldığı üzere, özellikle soğuk hava sıcaklıklarına maruz kalma durumunda, çimentonun hidrasyon ürünleri antifriz katkılarının kullanımıyla önemli ölçüde gelişmiştir (Han ve Kumar 2021).



1	☒	00-029-0329	tobermorite, 9A	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂
2	☒	00-024-0034	Calcium Silicate	Ca ₂ SiO ₄
3	☒	00-031-0301	Calcium Silicate	Ca ₃ SiO ₅
4	☒	00-029-0371	Larnite, syn	Ca ₂ SiO ₄
5	☒	00-021-0133	Calcium Aluminum Sili...	Ca ₄ Al ₂ Si ₇ O ₁₈ ·2H ₂ O
6	☒	00-044-1481	Portlandite, syn	Ca(OH) ₂
7	☒	00-015-0642	Calcium Silicate Hydr...	Ca ₂ SiO ₄ ·0.5H ₂ O
8	☒	00-049-0442	Calcium Silicate	Ca ₃ SiO ₅
9	☒	00-049-1673	Calcium Silicate	Ca ₂ SiO ₄
10	☒	00-031-0297	Calcium Silicate	Ca ₂ SiO ₄
11	☒	00-041-1451	Ettringite, syn	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₂ ·2H ₂ O
12	☒	00-012-0008	Calcium Aluminum Oxi...	Ca ₂ Al ₂ O ₅ ·6H ₂ O
13	☒	00-035-0311	Calcium Silicate Hydr...	Ca ₇ Si ₁₆ O ₃₈ (OH) ₂
14	☒	00-004-0733	Portlandite, syn	Ca(OH) ₂

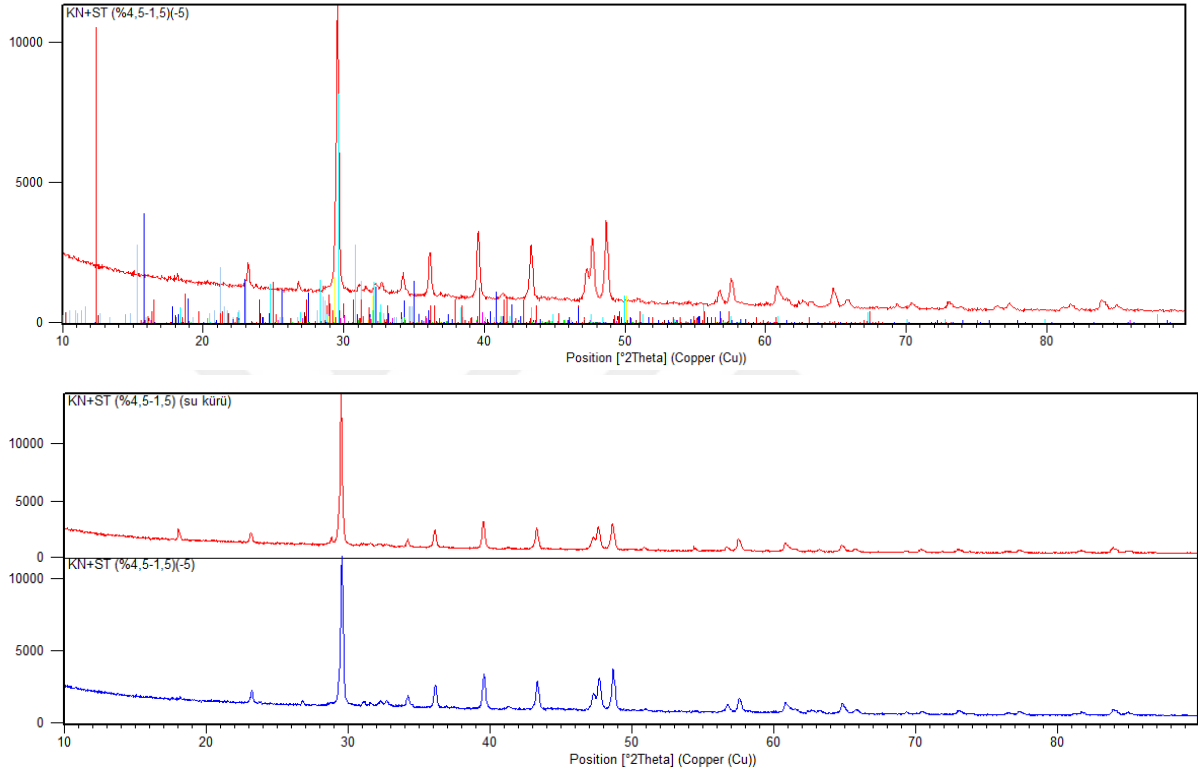
Şekil 89. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük K+HS beton numunesinin XRD analizi



Şekil 90. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi

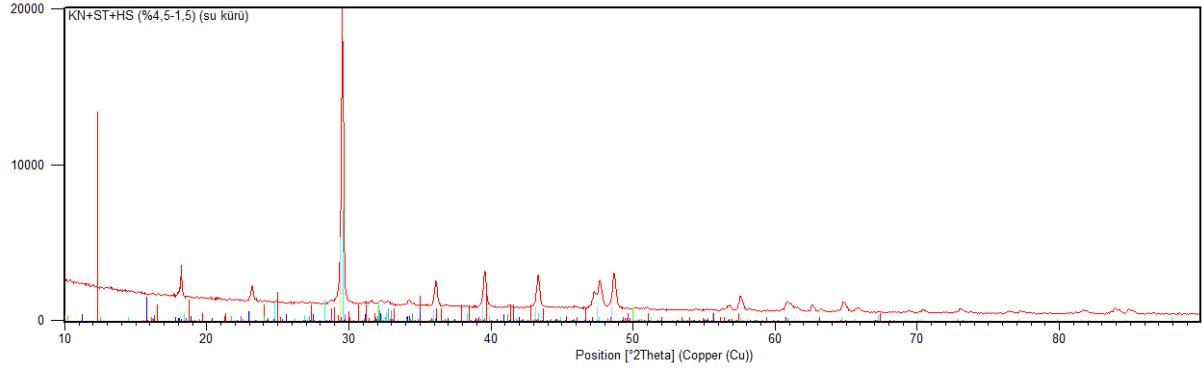
-5 °C'ye maruz kalan antifriz katkılı karışımlarda kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat katkılarının birlikte kullanımı ile hidratlanmış fazların piklerinin daha yoğun olduğu ve K ile K+HS karışımlarına göre güçlü ve yoğun hale geldiği görülmüştür. Beton dayanım kazanma mekanizmasını hızlandırıcı ve beton sertleşmesine katkıda bulunan bu katkıların eklenmesiyle C₃S'nin hidratasyonu arttığından iç yapıda oluşan portlandit büyür ve gelişir. Belirgin olarak betonun sertleşmesini hızlandıran bu antifriz katkıların basınç dayanımı üzerindeki pozitif etkisi yine C₃A ve C₃S'i uyararak hidratasyonu artırması ve dolayısıyla artan mikro yapı yoğunluğuna bağlanabilir (Ananyachandran ve Vasugi 2022). Bu durum hem SEM-EDX hem de XRD analizlerinden anlaşılmaktadır. Öyle ki Şekil 90, 91, 92 ve 93'teki XRD analiz sonuçları incelendiğinde hem KN+ST (%4,5-1,5) hem de KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımlarında daha fazla Al içeren hidratlanmış yapıların olduğu göze çarpmaktadır. -5 C'deki KN+ST (%4,5-1,5) karışımı kendi standart su küründe elde edilen sonuçları ile karşılaştırıldığında, KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımına göre pik yoğunluğundaki azalmanın çok daha az olduğu hatta bazı piklerin yoğunluklarının ise arttığı gözlenmektedir. Örneğin -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinde su küründe de oluşan

tobermorit, portlandit, etrenjit, larnit, kalsiyum silikat hidrate ve kalsiyum alüminat hidrate yapılarının sıcaklık düşüşü ile piklerinde azalma olmadığı ve geliştiği görülmektedir. Ancak hava sürükleyici katkı eklenen karışımda su küründe elde edilen sonuçlara göre pik yoğunluklarında azalma görülmektedir. Bununla birlikte antifriz katkıların hava sürükleyici ile kullanımı genel olarak pozitif yönde etki etmiştir. Örneğin standart su küründeki KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımının XRD grafiği incelendiğinde diğer tüm karışımlardan daha yüksek yoğunlukta piklerin oluştuğu tespit edilmiştir.



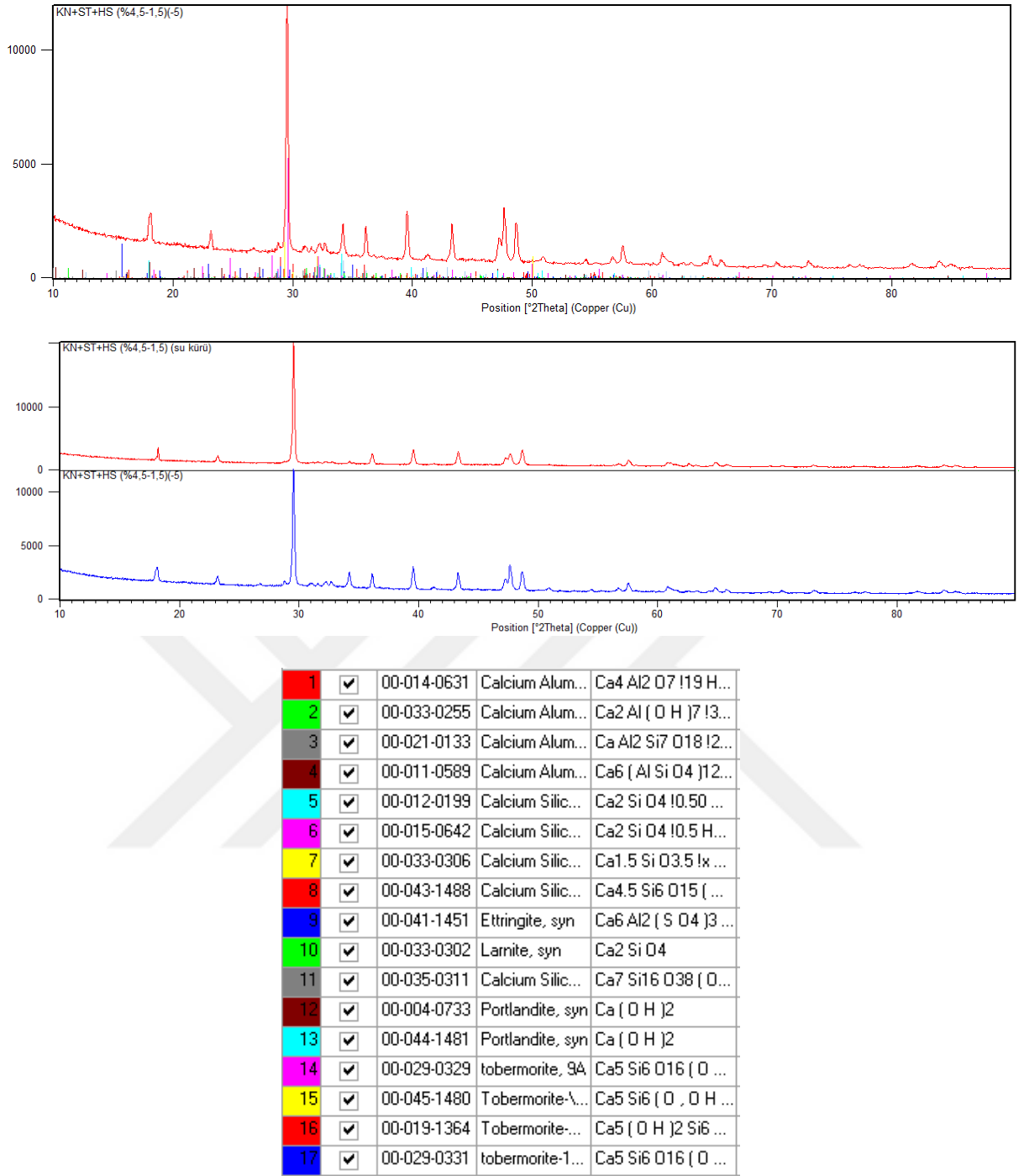
1	☒	00-012-0408	Calcium Alum...	Ca Al ₂ O ₄ 110 H ₂ O
2	☒	00-014-0631	Calcium Alum...	Ca ₄ Al ₂ O ₇ 119 H...
3	☒	00-012-0008	Calcium Alum...	Ca ₂ Al ₂ O ₅ 16 H ₂ O
4	☒	00-021-0133	Calcium Alum...	Ca Al ₂ Si ₇ O ₁₈ 12...
5	☒	00-011-0589	Calcium Alum...	Ca ₆ (Al Si O ₄) ₁₂ ...
6	☒	00-015-0642	Calcium Silic...	Ca ₂ Si O ₄ 10.5 H...
7	☒	00-012-0199	Calcium Silic...	Ca ₂ Si O ₄ 10.50 ...
8	☒	00-033-0306	Calcium Silic...	Ca _{1.5} Si O _{3.5} 1x ...
9	☒	00-043-1488	Calcium Silic...	Ca _{4.5} Si ₆ O ₁₅ (...
10	☒	00-041-1451	Ettringite, syn	Ca ₆ Al ₂ (S O ₄) ₃ ...
11	☒	00-033-0302	Larnite, syn	Ca ₂ Si O ₄
12	☒	00-004-0733	Portlandite, syn	Ca (O H) ₂
13	☒	00-044-1481	Portlandite, syn	Ca (O H) ₂
14	☒	00-029-0329	tobermorite, 9A	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (O ...
15	☒	00-045-1480	Tobermorite-\...	Ca ₅ Si ₆ (O , O H ...
16	☒	00-019-1364	Tobermorite-...	Ca ₅ (O H) ₂ Si ₆ ...
17	☒	00-029-0331	tobermorite-1...	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (O ...

Şekil 91. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi



1	☒	00-012-0408	Calcium Alum...	Ca Al ₂ O ₄ · 10 H ₂ O
2	☒	00-033-0255	Calcium Alum...	Ca ₂ Al (O H) ₇ !3...
3	☒	00-011-0589	Calcium Alum...	Ca ₆ (Al Si O ₄) ₁₂ ...
4	☒	00-021-0133	Calcium Alum...	Ca Al ₂ Si ₇ O ₁₈ !2...
5	☒	00-012-0008	Calcium Alum...	Ca ₂ Al ₂ O ₅ !6 H ₂ O
6	☒	00-012-0199	Calcium Silic...	Ca ₂ Si O ₄ !0.50 ...
7	☒	00-015-0642	Calcium Silic...	Ca ₂ Si O ₄ !0.5 H...
8	☒	00-033-0306	Calcium Silic...	Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x ...
9	☒	00-043-1488	Calcium Silic...	Ca _{4.5} Si ₆ O ₁₅ (...
10	☒	00-041-1451	Ettringite, syn	Ca ₆ Al ₂ (S O ₄) ₃ ...
11	☒	00-033-0302	Larnite, syn	Ca ₂ Si O ₄
12	☒	00-029-0371	Larnite, syn	Ca ₂ Si O ₄
13	☒	00-004-0733	Portlandite, syn	Ca (O H) ₂
14	☒	00-029-0329	tobermorite, 9A	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (O ...
15	☒	00-029-0331	tobermorite-1...	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (O ...
16	☒	00-019-1364	Tobermorite-...	Ca ₅ (O H) ₂ Si ₆ ...
17	☒	00-045-1480	Tobermorite-\...	Ca ₅ Si ₆ (O , O H ...
18	☒	00-044-1481	Portlandite, syn	Ca (O H) ₂

Şekil 92. Standart su küründeki 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi



Şekil 93. -5 °C'ye maruz kalmış 28 günlük KN+ST+HS (%4,5-1,5) beton numunesinin XRD analizi

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, literatürde sınırlı olan antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanımı konusunu incelemek ve herhangi bir koruma, yalıtım veya malzemelerin ısıtılması gibi ön işlem olmaksızın soğuk havaya maruz kalan taze ve sertleşmiş normal betonların mekanik ve iç yapı özelliklerine antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanım etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Gerekli deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- Karışımlarda antifriz ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanımı taze betonun kıvamını yani işlenebilirliğini artırmıştır.
- K karışımının taze halde hava içeriği %2 iken hava sürükleyici eklendiğinde aynı karışımın (K+HS) hava içeriği %2,5 olarak elde edilmiştir.
- Antifriz katkıların taze betonda suyun donma noktasını düşürücü etkisi vardır fakat esas etkisi geleneksel hızlandırıcı katkılar gibi çimentonun hidratasyonunu hızlandırmaktır (Karagöl 2013). Antifriz kullanımı ile artan hidratasyon ısısı basınç dayanımındaki artışları da beraberinde getirmiştir.
- Hava sürükleyici içeren beton karışımlarında, antifriz ve hava sürükleyici katkıların birlikte kullanıldığı durumda, standart su küründe basınç dayanım sonuçlarının pozitif yönde etkilendiği anlaşılmaktadır.
- -5 °C ve -10 °C’de sabit sıcaklıkta 12 saatlik donmaya maruz bırakılan hem antifriz hemde hava sürükleyici katkı içeren karışımlarda, ikili antifriz katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarında kontrol betonuna kıyasla olumlu bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Sodyum tiyosiyanat betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını hızlandıran bir antifriz katkı olarak tüm kür ortamlarında 3 ve 7 günlük erken yaş dayanım gelişiminde etkili olmuştur. Kalsiyum nitrat katkısının betonun erken yaş dayanımında olduğu gibi ileri yaş performansı üzerinde de pozitif etkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca katkı oranının artışına bağlı olarak donma noktasını düşürme derecesi de artmaktadır. Genel olarak -5 °C ve -10 °C’ye maruz kalan ikili kombinasyonların kullanıldığı karışımlarda basınç dayanım sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir.
- Hava sürükleyici katkının etkisiyle -10 °C’de basınç dayanımlarında düşüş oranları -5 °C’ye göre daha azdır. Bu durum düşük sıcaklıklarda ikili antifriz katkı kullanımının hava sürükleyici katkının basınç dayanımını düşürücü etkisini azalttığını göstermektedir.

- Antifriz katkı içeren karışımların -5 °C ve -10 °C'deki 3 günlük erken yaş basınç dayanımları kontrol karışımından daha yüksektir. Hava sürükleyici içeren tüm karışımlar içerisinde antifriz katkı içeren karışımların -5 °C ve -10 °C'deki basınç dayanımları kontrol karışımından daha yüksektir. Basınç dayanımlarında hava sürükleyici eklendiğinde düşüş olmasına rağmen hem -5 °C hem de -10 °C'de en optimum sonuçlar %4.5 KN ve %1.5 ST içeren karışımda elde edilmiştir.
- Sıcaklık düşüşüyle su emme oranlarında bir miktar artış gözlenmekle beraber kontrol karışımına göre antifriz ve hava sürükleyici katkıların düşük sıcaklıkta birlikte kullanımı karışımların su emmesine olumlu yönde etki etmiştir. Sonuçlar basınç dayanım sonuçları ile genel olarak uygunluk göstermektedir. Antifriz kullanımı karışımların kılcal su emmesi üzerinde de olumlu bir etkiye sahiptir.
- -5 °C'ye maruz kalan K ve K+HS karışımlarının SEM görüntülerinde su küründen sonra da var olan ince mikro çatlakların düşük sıcaklığının etkisiyle derinleşip belirginleştiği, plak şeklinde gözükken Ca(OH)_2 ve CSH'nin varlığı ise -5 °C'de de hidratasyonun kısmen devam ettiğini, ancak -5 °C'deki SEM görüntülerindeki boşluk yapısı ve çatlaklarla, elde edilen basınç dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde düşük sıcaklıkta var olan çatlakların derinleşmesi ve yeni çatlakların oluşumuyla dayanım gelişiminin etkilendiği ve dayanım değerlerinin azaldığı, ayrıca su emme ve kılcal su emme oranlarının da arttığı tespit edilmiştir.
- SEM analizinde, ikili antifriz katkı kullanımı ile standart su kürü uygulanan ve taze halde -5 °C'ye maruz kalan KN+ST (%4,5-1,5) karışımının mikro yapısının su küründeki mikro yapısı ile benzerlik gösterdiği, boşluklar ve çatlakların varlığı ile birlikte CSH ve Ca(OH)_2 yapılarının da oluştuğu, su kürü ile karşılaştırıldığında çok fazla değişim olmadığı ve dolayısıyla -5 °C'de de hidratasyonun ve betona dayanım kazandıran yapıların oluşumunun devam ettiği anlaşılmaktadır. Öyle ki basınç dayanım sonuçları da incelendiğinde karışımın su küründen ve -5 °C'ye maruz kaldıktan sonraki 28 günlük dayanımları arasında ciddi bir fark olmadığı da görülmektedir.
- KN+ST+HS (%4,5-1,5) karışımı taze halde -5 °C'ye maruz kaldığında, SEM analizinde ikili antifriz katkı ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanılmasıyla neredeyse hiç çatlak oluşmadığı, hidratasyon olayı sonucu meydana gelen yapıların belirgin bir şekilde ortaya çıktığı, yoğun bir mikro yapının oluştuğu ve boşlukların daha az oluştuğu görülmektedir. Bu durum su emme ve kılcal su emme sonuçlarında aynı şartlardaki diğer karışımlara göre azalma meydana getirmiş ve düşük sıcaklıkta dahi 40 MPa'nın üzerinde bir basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.

- EDX analizlerinde tüm karışımlar için Ca, Si, Al ve O gibi elementlerin pik değerlerinin sıcaklık düşüşü ile azaldığı ve ağırlık oranlarının değiştiği tespit edilmiştir.
- XRD analiz sonuçları incelendiğinde özellikle düşük sıcaklıkta kontrol betonuna göre ikili antifriz katkı içeren karışımlarda çimentonun hidratasyon ürünlerinin (kalsiyum silikat alüminat hidrate, portlandit ve kalsiyum silikat hidrate vb.) pik yoğunluklarının arttığı, özellikle Al içeren hidratasyon ürünlerinin daha fazla olduğu, hava sürükleyici katkı ile birlikte bu katkıların kullanımıyla sadece hava sürükleyici içeren kontrol karışımına göre daha yoğun yapıların olduğu ve bu durumun SEM-EDX analizleri ile de örtüştüğü tespit edilmiştir.

Kalsiyum nitrat ve sodyum tiyosiyanat antifriz katkıları ile taze halde düşük sıcaklığa maruz kalan betonun mekanik, fiziksel ve mikroyapı özelliklerinin geliştiği, özellikle hava sürükleyici katkılı betonun özelliklerine etkisi incelendiğinde ikili antifriz katkı kullanımının hava sürükleyicinin basınç dayanımı üzerindeki negatif etkisini azalttığı ve olumlu sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Bu bağlamda çeşitli antifriz katkıların farklı oran ve sıcaklıklarda hava sürükleyiciler ile birlikte kullanılıp kimyasal veya fiziksel durabilite etkileri altında beton özelliklerine etkisinin araştırılması literatürde önemli bir yere sahip olması açısından önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdelrazig, B.E.I, Bonner, D.G., Nowell, D.V., Dransfield, J.M., Egan, P.J. (1999). The solution chemistry and early hydration of ordinary portland cement pastes with and without admixtures, *Thermochimica Acta* 340–341: 417-430
- Al-Negheimish, A.I., Al-Mutlaq, F.M., Fares, G., Alhozaimy, A.M., Khan, M.I., (2021). Characterization of chemical accelerators for sustainable recycling of fresh electric-arc furnace dust in cement pastes, *Advanced Powder Technology* 32 (8): 3046-3062
- Alzaza, A., Ohenoja, K., Langas, I., Arntsen, B., Poikelispää, M., Low-temperature (10 ° C) curing of Portland cement paste – Synergetic effects of chloride-free antifreeze admixture, C–S–H seeds, and room-temperature pre-curing, *Cement and Concrete Composites*, 125 (2022), Article 104319
- Ananyachandran, P., Vasugi, V., Development of a sustainable high early strength concrete incorporated with pozzolans, calcium nitrate and triethanolamine: An experimental study, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 54 (2022), Article 102857
- Angtadt, R.L., Hurley, F.R., (2021). US Patent No. 3,427,175, 1969. <https://patents.google.com/patent/EP0233691A1/en>
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2015. Beton, 2. Baskı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul.
- Cheung, J., Roberts, L., Liu, J. (2018). Admixtures and sustainability, *Cement and Concrete Research*, 114: 79-89
- Çullu, M., Arslan, M., 2013. The effects of antifreeze use on physical and mechanical properties of concrete produced in cold weather, *Composites: Part B*, 50. 202-209.
- Demirboğa, R., Karagöl, F., Polat, R., Kaygusuz, M. A., 2014. The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather conditions, *Construction and Building Materials*, 64, 114-120.
- Derakhshani, A., Ghadi, A., Vahdat, S. E., Study of the effect of calcium nitrate, calcium formate, triethanolamine, and triisopropanolamine on compressive strength of Portland-pozzolana cement, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023), e01799.
- Dikicioğlu, B., 2024. Farklı Alüminosilikat Esaslı Geopolimer Harçlarda Çiçeklenme Davranışının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Fülöp, L., Ferreira, M., Bohner, E., Valokoski, J., Vuotari, J., Tirkkonen, T., Inspection of bridges for effects of air-entrainment on the porosity and compressive strength of concretes, *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022), Article e01211
- Gao, J., Sang, Y., Huo, Y., Liu, Y., Yang, Y., Absorbing effect of air entraining agent on early frost expansion of mortar: Calculation model and application, *Construction and Building Materials*, 415 (2024), Article 135100
- Hoang, K., Justnes, H., Geiker, M. (2016). Early age strength increase of fly ash blended cement by a ternary hardening accelerating admixture, *Cement and Concrete Research*, 81: 59-69

- Hu, S., Xu, Z., Ma, X., Huo, Y., Yang, Y., Preparation of C-S-H seeds from solid waste and its application as Portland cement accelerator, *Construction and Building Materials*, 428(2024), Article 136277
- Hu, X., Peng, G., Niu, D., Zhao, N., (2019). Damage study on service performance of early-age frozen concrete, *Construction and Building Materials* 210: 22-31
- Huang, D., Feng Y., Xia Q., Tian J., Li X., Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 425 (2024), Article 135988
- Huang, H., Shen, X., (2017) Influence of low-dose chemicals on the early strength of Portland cement: statistical and calorimetric evidence, *Advances in Cement Research*, 29(4): 155-165
- Justnes, H., Nygaard, E. C., (1997). Changes in the microstructure of cement paste and concrete due to calcium nitrate addition, *Construction and Building Materials* 173: 657-672
- Justnes, H., Nygaard, E.C., (1994). The influence of technical calcium nitrate additions on the chloride binding capacity of cement and the rate of chloride induced corrosion of steel embedded in mortars, *Proceedings of the International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, 491-502.
- Justnes, H., Nygaard, E.C., (1995). Technical calcium nitrate as set accelerator for cement at low temperatures, *Cement and Concrete Research* 25(8): 1766-1774
- Karagöl, F., Demirboga, R., Khushefati, W. H. (2015). Behavior of fresh and hardened concretes with antifreeze admixtures in deep-freeze low temperatures and exterior winter conditions, *Construction and Building Materials*, 76, 388–395.
- Karagöl, F., 2013. Antifriz Katkıların Soğuk Havada Dökülen Beton Özelliklerine Etkileri, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Karagöl, F., Demirboğa, R., Kaygusuz, M. A., Yadollahi, M. M., Polat, R., 2013. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures, *Cold Regions Science and Technology*, 89. 30-35.
- Karakoç, M. B., 2010. Hafif Agreganın ve Hava Sürükleyici Katkı Maddesinin Yüksek Dayanımlı Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisinin İncelenmesi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Kcaite, A., Skripkiunas, G., Pundiene, I., 2020. The effect of calcium nitrate on the properties of Portland cement pastes and concrete hardening at low temperatures, *Ceramics-Silikaty*, 11, LT-10223
- Khan, J., Kumar, G. S., Influence of binary antifreeze admixtures on strength performance of concrete under cold weather conditions, *Journal of Building Engineering*, 34 (2021), Article 102055
- Kumar, M. P., Mini, K.M., Rangarajan, M., (2018). Ultrafine GGBS and calcium nitrate as concrete admixtures for improved mechanical properties and corrosion resistance, *Construction and Building Materials* 182: 249-257
- Li, P., Gao, X., Wang, K., Tam, V.W.Y., Li, W., Hydration mechanism and early frost resistance of calcium sulfoaluminate cement concrete, *Construction and Building Materials* 239 (2020) Article 117862

- Li, Y., Liu, Y., Guo, H., Li, Y., Investigation of the freeze-thaw deterioration behavior of hydraulic concrete under various curing temperatures, *Journal of Building Engineering*, 95 (2024), Article 110247
- Liu, J., Ji, X., Luo, Q., Xue, J., Ma, M., (2021) Improvement of early age properties of Portland cement by ternary hardening-accelerating admixture, *Magazine of Concrete Research*, 73(4): 195-203
- Liu, L., Shen, D., Chen, H., Sun, W., Qian, Z., Zhao, H., Jiang, J., (2014). Analysis of damage development in cement paste due to ice nucleation at different temperatures, *Materials Science, Engineering Cement & Concrete Composites* 53: 1-9
- Liu, Y., Yang, S., Li, J., Wang, F., Hu, S., Effect of w/c ratio and antifreeze admixture on the frost damage of sulfoaluminate cement concrete at -20 °C, *Construction and Building Materials*, 347 (2022), Article 128457
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., Concrete Microstructure Properties and Materials (3th ed.), McGraw-Hill
- Michta, A. N., 2019. Impact analysis of air-entraining and superplasticizing admixtures on concrete compressive strength, *9th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture*, 23. 77-82. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.
- Montanari, L., Helsel, M., Varga, I., Spragg, R., Juenger, M., Impact of accelerating admixtures on the electrical properties of ordinary portland cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 133(2022), Article 104651
- Nassif, A. Y., Petrou, M. F. (2013). Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 44. 161-167.
- Neville, A.M. (2011) Properties of Concrete. Pearson Education Limited, Essex.
- Nia, A. Z., Tadayonfar, G. R., Naddaf, H. E., 2018. Effect of air entraining admixture on concrete under temperature changes in freeze and thaw cycles, *Materials Today: Proceedings*, 5. 6208-6216.
- Nmai, C. K., 1998. Cold weather concreting admixtures, *Cement and Concrete Composites*, 20. 121-128.
- Polat, R., 2007. Genleştirilmiş Perlit ve Pomza ile Hava Sürükleyici Katkının Betonda Kılcal Geçirimsizlik ve Don Hasarına Etkisi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Polat, R., 2016. The effect of antifreeze additives on fresh concrete subjected to freezing and thawing cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 127. 10-17.
- Qarluq, A. W., 2017. Halloysit Nano-Kil, Nano-SiO₂ ve Nano-CaO'nun Çimento Esaslı Harçlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Ren, G., Tian, Z., Wu, J., Gao, X., Effects of combined accelerating admixtures on mechanical strength and microstructure of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 304 (2021), Article 124642
- Saha, V., Boulfiza, M., Wegner, L. D., TDR tekniği kullanılarak donma noktasının altındaki sıcaklıklarda antifriz uygulanmış çimento hamurunun hidratasyonunun izlenmesi, *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 262 (2020), Article 119915

- Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E., Bennacer, R., 2011. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS), *Construction and Building Materials*, 25(4). 1916-1925.
- Sintef, J.H., (2021). Structures and Concrete, Norway, 1993. <https://www.sintef.no/en/expertise/community/concrete/>
- Sivakumar, V.S.A., (2013). Effect of calcium nitrate on the pozzolanic properties of high early strength concrete, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6 (13): 2502-2508.
- Skripkiūnas, G., Kičaitė, A., Justnes, H., Pundienė, I., Effect of Calcium Nitrate on the Properties of Portland–Limestone Cement-Based Concrete Cured at Low Temperature, *Construction and Building Materials* 14(7) (2021) Article 1611
- Şahin, H. G., Mardani, A., Özen, S., Emin, A., Utilization of high-range water reducing admixture having air entraining agents in cementitious systems, *Journal of Building Engineering*, 64 (2023), Article 105565
- Şahin, Y., 2013. Hava Sürükleyici Katkıların Karakterizasyonu ve Deney Koşullarının Betonun Donma-Çözülme Hasarına Etkisi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı*, İstanbul.
- Tunç, H., 2019. Taze Halde Soğuk Hava Etkisine Maruz Lifli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Gümüşhane.
- Tunstall, L. E., Ley, M. T., Scherer, G.W., Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions, *Cement and Concrete Research*, 150 (2021), Article 106557
- Wan, L., Yu, M., Zhao, Y., Study on the effect of nano-silica on the early-age strength and microstructure of cement paste mixed with calcium nitrite under negative temperature conditions, *Case Studies in Construction Materials*, 21(2024), e03481.
- Wang, K., Nelsen, D. E., Nixon, W. A. (2006). Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials, *Cement and Concrete Composites*, 28(2): 173-188.
- Wang, L., Yang, H. Q., Zhou, S. H., Chen, E., Tang, S. W. (2018). Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland(LHP) cement and fly ash, *Construction and Building Materials*, 187: 1073-1091.
- Wang, W. C., Duong, H. T. H., Zhang, C. H., Influence of accelerating admixtures on high early strength cement performance using heat curing method, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023), Article e01746
- Wang, Y., Lei, L., Liu, J., Ma, Y., Liu, Y., Xiao, Z., Shi, C., Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Composites*, 134 (2022), Article 104762
- Wang, Y., Xiao, R., Hu, W., Jiang, Ş., As, L., Huang, B., Influences of admixture combinations on the formation and stability of air bubbles in fresh cementitious materials, *Journal of Building Engineering*, 76 (2023), Article 107264
- Wang, Y., Lei, L., Liu, J., Ma, Y., Liu, Y., Xiao, Z., Shi, C., Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Composites* 134 (2022) Article 104762
- Wise, T., Ramachandran, V.S., Polomark, G.M., (1995). The effect of thiocyanates on the hydration of portland cement at low temperatures, *Thermochimica Acta*, 264: 157-171

- Wu, C.,Zhang, H., Wang, D., Zhou, X., Wang, N., Study on mechanical and chloride salt freezing-thawing resistance of CSW concrete, *Construction and Building Materials* 447 (2024), Article 138078
- Yasien, A., Bassuoni, M.T. (2024). Cold weather concreting: provisions of codes and research advances, *Construction Materials*, 177(5): 286–301.
- Yegin, Y., 2009. Donma- Çözülme Hasarına Hafif Agreganın, Hava Sürükleyici Katkının ve Donma-Çözülme Yönteminin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum.
- Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Lim, M., Sudoh, Y., Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials, *Research of Mechanical Behavior of Cement and Concrete Composites*, 14 (4) (2021) Article 1006
- Zhang, G., Yang, Y., Li, H., Calcium-silicate-hydrate seeds as an accelerator for saving energy in cold weather concreting, *Construction and Building Materials*, 264 (2020), Article 120191
- Zhang, Y., Zhang, X., Cai, X., Gao, L., Li, Q., Kong, X., A further understanding on the strength development of cement pastes in the presence of triisopropanolamine used in CRTS III slab track, *Construction and Building Materials*, 315 (2022), Article 125743
- Zhou, Y., Fall, M., Haruna, S., Flow ability of cemented paste backfill with chloride-free antifreeze additives in sub-zero environments, *Cem. Concr. Compos.*, 126 (2022) Article 104359

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Şadıman İkra AYDIN ÇUKUR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	