

**ANTİFRİZ KATKILARIN SOĞUK HAVADA
DÖKÜLEN BETON ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİ**

Fatma KARAGÖL

Doktora Tezi

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA**

2013

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ANTİFRİZ KATKILARIN SOĞUK HAVADA DÖKÜLEN
BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Fatma KARAGÖL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2013

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**ANTİFRİZ KATKILARIN SOĞUK HAVADA DÖKÜLEN BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA danışmanlığında, Fatma KARAGÖL tarafından hazırlanan bu çalışma 10/07/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Direkt Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (5./5.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza

Üye : Prof. Dr. İbrahim ÖRÜNG

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA

İmza :

Üye : Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İmza :

Üye : Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Doktora Tezi

ANTİFRİZ KATKILARIN SOĞUK HAVADADÖKÜLEN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Fatma KARAGÖL

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA

Literatürde yapılan çalışmalarda görülmüştür ki planlanan servis ömrü süresince yapım safhaları standartlara uygun bir şekilde takip edilirse, soğuk havada yerleştirilen beton yeterli dayanım ve dayanıklılık kazanabilir. Ancak kürün önemi hava sıcaklığının azalması ile artar. Bu da betonun üretim maliyetini artırır. Oysa kimyasal katkıların kullanımı ile betonun yüksek maliyetli küre olan ihtiyacı azaltılabilmektedir. Kimyasal katkılar betonun yerleştirildiği düşük sıcaklık aralığını genişletmekte ve böylece inşaat sezonu uzamaktadır. Zor ve pahalı olan dışarıdan ısıtma yöntemleri, yalıtım örtüleri veya diğer termal koruma şekillerine olan ihtiyacı azaltmak amacı ile antifriz katkıları hakkında bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak şimdiye kadar yapılan çalışmalarda sürekli don etkisinde ve hiç yalıtım olmaksızın yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, çimento ağırlığının %6, %9 ve %12'si oranındakalsiyum nitrat ve üre kullanılarak üretilen numuneler doğrudan donma etkisine maruz bırakılmıştır. Bütün karışımlarda w/coranı 0,4, çimento dozajı 400kg/m^3 'tür vesüper akışkanlaştırıcı katkı maddesi çimento ağırlığının %0,5'ikadar kullanılmıştır. Üretilen numunelerden bir grup Erzurum kış şartlarında dış ortamda, bir grup kontrol amaçlı su içinde, diğer grup ise farklı kür sıcaklıklarında (-5°C , -10°C , -15°C , -20°C) ve farklı kür sürelerinde bırakılmıştır. Farklı kür şartları ve sürelerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları, birim ağırlıkları ve mikro yapıları ultrases geçiş hızları (UPV), XRD ve SEM teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. Sonuç olarak antifriz katkıların kullanımı ile numunelerin basınç dayanımlarında dikkate değer artışlar tespit edilmiştir.

2013, 216 sayfa

Anahtar Kelimeler: Basınç dayanımı, antifriz katkıları, soğuk havada beton dökümü, kür şartları, mikroyapı

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE EFFECTS OF ANTIFREEZE ADMIXTURES ON THE PROPERTIES OF COLD WEATHER CONCRETING

Fatma KARAGÖL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Ramazan DEMİRBOĞA

If the construction stages are followed in accordance with standards during the planned service life, studies in the literature showed that the concrete can gain sufficient strength and durability in cold weather. However, the importance of cure increases with a decrease in air temperature. This means an increase in cost. However, the need for concrete to high cost of cure can be reduced with the use of chemical additives. Chemical additives extend the temperature range of concrete placement and thus construction season extends. There are studies about the antifreeze additives to reduce the need for difficult and expensive heating methods, insulation covers or other thermal forms of protection. However, in ever made studies, any study made without any insulation under the influence of continuous freezing wasn't found. Furthermore in this study, produced samples with calcium nitrate and urea additives were used up to 6%, 9% and 12% by weight of cement were exposed to direct influence of freezing. Water cement ratio was 0,4, cement dosage was 400 kg/m³ and super plasticizer additive was used up to 0,5% by weight of cement in all the mixtures. A group from produced samples was left in the external environment of Erzurum winter conditions, a group was left in water as control purposes and the other a group was left to various curing periods in different cure temperatures (-5°C, -10°C, -15°C, -20°C). The compressive strengths, unit weights and microstructures of samples in different cure conditions and different cure times were determined by using ultrasonic pulse velocity (UPV), XRD and SEM techniques. In conclusions a remarkable increase in the compressive strength of the samples with the use of anti-freeze additives was determined.

2013, 216 pages

Keywords: Compressive strength, antifreeze admixtures, cold weather concreting, cure conditions, microstructure

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda değerli fikir ve yönlendirmeleriyle yardımcı olan tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya, çalışmamda değerli fikirleri, bilgileri ve tecrübeleri ile katkılar sağlayan Sayın Prof.Dr. Rüstem GÜL'e ve Sayın Prof. Dr. İbrahim ÖRÜNG'e, içyapı analizlerinde yaptıkları yardımlardan ötürü Sayın Yrd.Doç.Dr. Fatih YETİM'e, deneysel çalışma esnasında yardımlarını gördüğüm Sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a, İnş.Yük.Müh. Rıza POLAT'a, İnş.Yük.Müh. Mehmet Akif KAYGUSUZ'a ve Merhza Mohabbi YADDOLLAHI'ye teşekkür ederim. Bana her türlü desteğini esirgemeyen eşime, aileme, arkadaşlarıma ve hayatta olmasa da maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim rahmetli babama teşekkür ederim.

Fatma KARAGÖL

Temmuz 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Kaynak Özetleri	4
2. KURAMSAL TEMELLER	30
2.1. Soğuk Havanın Beton Özelliklerine Etkileri.....	30
2.1.1. Soğuk havanın betonun priz süresine etkisi	30
2.1.2. Soğuk havanın betonundayanım kazanma hızına etkisi	33
2.1.3. Soğuk havada üretilen ve yerleştirilen betonda olması gereken sıcaklıklar.....	36
2.1.4. Soğuk hava koşullarında alınması gereken önlemler	38
2.2. Betonda Kullanılan Katkı Maddeleri.....	40
2.2.1. Antifriz katkı maddeleri	41
2.2.2. Antifriz katkılı betonun kullanım alanları	46
2.2.3. Antifriz katkılı betonun mühendislik özellikleri	46
2.2.4. Antifriz katkıların gömülü donatı üzerine etkileri.....	47
2.2.5. SAK maddesi.....	48
2.2.6. Priz hızlandırıcı katkıları	48
2.3. Donma-Çözülme.....	50
2.3.1. Taze betonda donma-çözülme	51
2.3.2. Sertleşmiş betonda donma çözülme	52
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
3.1. Materyal	55
3.1.1. Agregası	55
3.1.2. Karışım Suyu	55

3.1.3. Çimento	55
3.1.4. SAK maddesi.....	57
3.1.5. Kalsiyum nitrat antifriz katkı maddesi	58
3.1.6. Üre antifriz katkı maddesi	58
3.1.7. Diğer malzemeler	59
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler	59
3.2.1.Elekler.....	59
3.2.2.Betonyer.....	59
3.2.3.Kalıplar	60
3.2.4.Dondurucular	60
3.2.5.Pres	60
3.2.6.UPV cihazı.....	60
3.2.7.XRD cihazı	61
3.2.8.SEM cihazı	62
3.3. Yöntem	62
3.3.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler.....	63
3.3.2. Granülometri eğrisinin belirlenmesi.....	63
3.3.3. Karışımlara ait kısaltmalar	64
3.3.4. Beton karışımlarının belirlenmesi	65
3.3.5. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı	65
3.3.6. Beton karışım hesapları	67
3.3.7. Beton dökülmesi.....	68
3.3.8. Taze beton deneyleri.....	69
3.3.9. Sertleşmiş beton deneyleri.....	69
3.3.9.a. UPV deneyleri	69
3.3.9.b.SEM deneyleri	70
3.3.9.c.XRD deneyleri	70
3.3.9.d.Basınç deneyleri	70
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	72
4.1.Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular	72
4.2.Taze Beton Deneyleri ile ilgili Bulgular	73
4.2.1. Çökme Deneyi	73

4.2.2. Taze birim hacim ağırlık.....	74
4.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular	75
4.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi	75
4.3.1.a. Ortam sıcaklığının 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına etkisi	75
4.3.1.b. Ortam sıcaklığının 1 yıllık basınç dayanımlarına etkisi	118
4.3.1.c. Ek su kürü uygulanan karışımlarında dayanımlarının değerlendirilmesi	135
4.3.2. UPV deneyleri ile ilgili bulgular ve değerlendirilmesi	140
4.3.3. SEM deneylerinde elde edilen görüntüler ve değerlendirilmesi	154
4.3.4. XRD deney sonuçları ve değerlendirilmesi	172
4.3.5. Maliyet analizi	185
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	186
KAYNAKLAR	190
EKLER	198
EK1	198
EK2	199
EK3	201
ÖZGEÇMİŞ.....	217

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A°	Angstrom
D _{max}	Maksimum agrega çapı
kgf/cm ² /s	Kilogramkuvvet/santimetrekare/saniye
MPa	Megapaskal

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEI	Backscattered electron image
CEM I 42.5	Normal Portland Çimentosu
CRELL	Cold Regions Research and Engineering Laboratory
CWA	Cold weather admixture
EN	Europeane Norm
EYÇ	Erken dayanımı yüksek çimento
FHWA	Federal Highway Administiration
ISO	International Organization for standardization
PKÇ	Portland Kompoze Çimento
RILEM	Uluslararası Yapı Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği
SAK	Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi
SEM	Scanning Electron Microscope
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity
W/c	Su/çimento
XRD	X-Ray Diffraction

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Donma çözülmeden sonra oluşan “D line cracking”	17
Şekil 1.2.	Delaminasyon oluşması	18
Şekil 1.3.	Pop-Outs olayı	19
Şekil 1.4.	Sıcaklık artışının betonun priz süresine etkisi (Dodson 1994).....	23
Şekil 1.5.	Dünyadaki soğuk bölgelerin tanımlanması	24
Şekil 1.6.	-5°C ve 20°C’de Antifriz ve kontrol numunelerinin basınç dayanımları .	24
Şekil 1.7.	Antifriz beton ve kontrol betonunun donma noktaları(Muthing 2006).....	27
Şekil 2.1.	Sıcaklık ve priz süresi arasındaki ilişki (Neville 1988)	31
Şekil 2.2.	Sıcaklığın beton dayanım kazanma hızına etkisi	36
Şekil 3.1.	UPV cihazının şematik görünümü	61
Şekil 3.2.	XRD cihazından veri elde edilmesi.....	61
Şekil 3.3.	Doğal agreganın düzeltilmiş granülometri eğrisi.....	64
Şekil 4.1.	-5°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	79
Şekil 4.2.	-10°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	81
Şekil 4.3.	-15°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	81
Şekil 4.4.	-20°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	82
Şekil 4.5.	-5°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	83
Şekil 4.6.	-10°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	84
Şekil 4.7.	-15°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	84
Şekil 4.8.	-20°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	85

Şekil 4.9.	-5°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	86
Şekil 4.10.	-10°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	87
Şekil 4.11.	-15°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	88
Şekil 4.12.	-20°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	88
Şekil 4.13.	Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	89
Şekil 4.14.	Ü.1, Ü.2, Ü.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	90
Şekil 4.15.	-5°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	94
Şekil 4.16.	-10°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	95
Şekil 4.17.	-15°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	96
Şekil 4.18.	-20°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	96
Şekil 4.19.	-5°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	97
Şekil 4.20.	-10°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	98
Şekil 4.21.	-15°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	99
Şekil 4.22.	-20°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	99
Şekil 4.23.	-5°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	101
Şekil 4.24.	-10°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	102

Şekil 4.25.	-15°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	103
Şekil 4.26.	-20°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	104
Şekil 4.27.	C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	105
Şekil 4.28.	C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	105
Şekil 4.29.	-5°C’de K ve Ü.C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	107
Şekil 4.30.	-10°C’de K ve Ü.C.1 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.31.	-15°C’de K ve Ü.C.1 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.32.	-20°C’de K ve Ü.C.1 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.33.	-5°C’de K ve Ü.C.2 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	110
Şekil 4.34.	-10°C’de K ve Ü.C.2 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	111
Şekil 4.35.	-15°C’de K ve Ü.C.2 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	112
Şekil 4.36.	-20°C’de K ve Ü.C.2 için 7,14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	113
Şekil 4.37.	-5°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	114
Şekil 4.38.	-10°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	115
Şekil 4.39.	-15°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	116
Şekil 4.40.	-20°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç	

	dayanımlarının karşılaştırılması	116
Şekil 4.41.	Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	117
Şekil 4.42.	Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	118
Şekil 4.43.	1 Yıllık kür için K karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	119
Şekil 4.44.	1 Yıllık kür için Ü.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	120
Şekil 4.45.	1 Yıllık kür için Ü.2 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	121
Şekil 4.46.	1 Yıllık kür için Ü.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	121
Şekil 4.47.	1 Yıllık kür için C.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	122
Şekil 4.48.	1 Yıllık kür için C.2 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	123
Şekil 4.49.	1 Yıllık kür için C.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	123
Şekil 4.50.	1 Yıllık kür için Ü.C.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	124
Şekil 4.51.	1 Yıllık kür için Ü.C.2 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	125
Şekil 4.52.	1 Yıllık kür için Ü.C.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	125
Şekil 4.53.	90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması	126
Şekil 4.54.	90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, C.1, C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması	127
Şekil 4.55.	90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	128
Şekil 4.56.	K.D ve Ü.1.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	130
Şekil 4.57.	K.D ve Ü.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	130
Şekil 4.58.	K.D ve Ü.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	131
Şekil 4.59.	K.D ve C.1.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	132
Şekil 4.60.	K.D ve C.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	132

Şekil 4.61.	K.D ve C.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	133
Şekil 4.62.	K.D ve Ü.C.1.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	134
Şekil 4.63.	K.D ve Ü.C.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	134
Şekil 4.64.	K.D ve Ü.C.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması	135
Şekil 4.65.	-5°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	143
Şekil 4.66.	-10°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	144
Şekil 4.67.	-15°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	145
Şekil 4.68.	-20°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	145
Şekil 4.69.	-5°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	146
Şekil 4.70.	-10°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	147
Şekil 4.71.	-15°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	148
Şekil 4.72.	-20°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	148
Şekil 4.73.	-5°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	150
Şekil 4.74.	-10°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	151
Şekil 4.75.	-15°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	151
Şekil 4.76.	-20°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki	152

Şekil 4.77a. Su küründeÜ.2 karışımına ait 3 günlük SEM.....	155
Şekil 4.77b. Su küründeÜ.2 karışımına ait 3 günlük SEM.....	155
Şekil 4.78a. -10°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	156
Şekil 4.78b. -10°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	156
Şekil 4.79a. -10°C’de K karışımına ait 28 günlük SEM.....	158
Şekil 4.79b. -10°C’de K karışımına ait 28 günlük SEM.....	158
Şekil 4.80a. Ü.2.D karışımına ait 3 günlük SEM	159
Şekil 4.80b. Ü.2.D karışımına ait 3 günlük SEM	160
Şekil 4.81. K.D karışımına ait 3 günlük SEM	160
Şekil 4.82. PKC400 betonlarının donma-çözülme öncesi ve sonrası mikro yapısı ...	161
Şekil 4.83. -5°C’de Ü 3 karışımına ait 3 günlük SEM.....	162
Şekil 4.84a. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 Günlük SEM.....	163
Şekil 4.84b. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 Günlük SEM.....	163
Şekil 4.84c. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 Günlük SEM.....	164
Şekil 4.85. -10°C’de Ü 3 karışımına ait 3 günlük SEM.....	165
Şekil 4.86. -15°C’de Ü.3 karışımına ait 3 günlük SEM.....	165
Şekil 4.87. -5°C’de Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM.....	166
Şekil 4.88. -15°C’de Ü.2 karışımına ait 3 Günlük SEM.....	166
Şekil 4.89a. -15°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	167
Şekil 4.89b. -15°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	167
Şekil 4.90. Ü.1.D karışımına ait 3 günlük SEM	168
Şekil 4.91. -5°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	168
Şekil 4.92. -20°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM.....	169
Şekil 4.93. -5°C’de K karışımına ait 3 günlük SEM.....	170
Şekil 4.94. Su küründeK karışımına ait 3 günlük SEM.....	170
Şekil 4.95. K.D karışımına ait 28 günlük SEM	171
Şekil 4.96. -10°C’de C.3 karışımına ait 28 günlük SEM.....	171
Şekil 4.97. C.3.D karışımına ait 28 günlük SEM.....	172
Şekil 4.98. -5°C’de C.3 karışımına ait 28 günlük SEM.....	172
Şekil 4.99. -5°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği.....	174
Şekil 4.100. -10°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği.....	174
Şekil 4.101. -15°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği.....	175

Şekil 4.102. -20°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği.....	176
Şekil 4.103. C.2.D için 28 günlük XRD grafiği.....	177
Şekil 4.104. Su küründe C.2 için 28 günlük XRD grafiği	178
Şekil 4.105. -5°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği.....	178
Şekil 4.106. -10°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği.....	179
Şekil 4.107. -15°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği.....	180
Şekil 4.108. -20°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği.....	180
Şekil 4.109. C.3.D için 28 günlük XRD grafiği.....	181
Şekil 4.110. Su küründe C.3 için 28 günlük XRD grafiği	181
Şekil 4.111. -5°C’de K için 28 günlük XRD grafiği.....	182
Şekil 4.112. -10°C’de K için 28 günlük XRD grafiği.....	182
Şekil 4.113. -15°C’de K için 28 günlük XRD grafiği.....	183
Şekil 4.114. -20°C’de K için 28 günlük XRD grafiği.....	183
Şekil 4.115. Su küründeK için 28 günlük XRD grafiği.....	184
Şekil 4.116. K.D için 28 günlük XRD grafiği	184

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	307 kg Portland çimentosu içeren betonun priz başlama süreleri (Dodson 1994).....	32
Çizelge 2.2.	Yerleştirilme esnasında betonda bulunması tavsiye edilen minimum Sıcaklıklar	36
Çizelge 2.3.	Karıştırılma sonrası betonda bulunması tavsiye edilen minimum Sıcaklıklar.....	37
Çizelge 2.4.	Koruma süresi sonrası ilk 24 saat içinde betonun en çok ne miktarda sıcaklık kaybı göstermesi gerektiğine dair değerler.....	37
Çizelge 2.5.	Katkıların basınç dayanımı üzerine etkisi	42
Çizelge 2.6.	Kalsiyum nitrat için basınç dayanım değerleri.....	43
Çizelge 2.7.	Üre ve kalsiyum nitrat ve nitrit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.....	43
Çizelge 2.8.	%10 Üre ve kontrol betonuna ait basınç dayanımları	43
Çizelge 2.9.	Üre ve kalsiyum nitratın yaklaşık donma noktaları.....	44
Çizelge 2.10.	Rusya’da kullanılan bazı antifriz katkıların donma noktaları	45
Çizelge 2.11.	Antifriz olarak kullanılan kimyasal katkıları.....	45
Çizelge 2.12.	Antifriz katkıların gömülü donatı korozyonuna etkileri.....	48
Çizelge 2.13.	Donmanın taze betona zarar vermemesi için gerekli beton yaşı	52
Çizelge 3.1.	Çimentonun kimyasal özellikleri.....	56
Çizelge 3.2.	Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	56
Çizelge 3.3.	SAK maddesinin özellikleri	57
Çizelge 3.4.	w/c oranı 0.40 olan 1m ³ beton için karışım oranları.....	67

Çizelge 4.1.	İnce agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları.....	72
Çizelge 4.2.	İri agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları.....	73
Çizelge 4.3.	Özgül ağırlık ve su emme oranı tayin deney sonuçları	73
Çizelge 4.4.	Karışımların çökme değerleri	74
Çizelge 4.5.	Karışımların taze birim hacim ağırlıkları	75
Çizelge 4.6.	K karışımına ait basınç dayanımları	76
Çizelge 4.7.	Ü.1 karışımına ait basınç dayanımları	78
Çizelge 4.8.	Ü.2 karışımına ait basınç dayanımları	82
Çizelge 4.9.	Ü.3 karışımına ait basınç dayanımları	85
Çizelge 4.10.	C.1 karışımına ait basınç dayanımları	93
Çizelge 4.11.	C.2 karışımına ait basınç dayanımları	97
Çizelge 4.12.	C.3 karışımına ait basınç dayanımları	100
Çizelge 4.13.	Ü.C.1 karışımına ait basınç dayanımları	107
Çizelge 4.14.	Ü.C.2 karışımına ait basınç dayanımları	110
Çizelge 4.15.	Ü.C.3 karışımına ait basınç dayanımları	114
Çizelge 4.16.	Ek su kürü uygulanan K için basınç dayanımları	136
Çizelge 4.17.	Ek su kürü uygulanan Ü.1 için basınç dayanımları	137
Çizelge 4.18.	Ek su kürü uygulanan C.1 için basınç dayanımları	138
Çizelge 4.19.	Ek su kürü uygulanan Ü.C.1 için basınç dayanımları	139
Çizelge 4.20.	Ek su kürü uygulanan Ü.C.2 için basınç dayanımları	140
Çizelge 4.21.	2010 yılında ilk dökülen 360 numunenin ortalama UPV değerleri.....	141
Çizelge 4.22.	UPV ölçümlerine göre beton kalitesi	143
Çizelge 4.23.	2010 yılında dökülen 300 numunenin 7 ve 28 günlük UPV değerleri .	149
Çizelge 4.24.	Ek su kürü uygulanan K karışımına ait UPV değerleri	152
Çizelge 4.25.	Ek su kürü uygulanan Ü.1 karışımına ait UPV değerleri	153

Çizelge 4.26.	Ek su kürü uygulanan C.1 karışımına ait UPV değerleri	153
Çizelge 4.27.	Ek su kürü uygulanan Ü.C.1 karışımına ait UPV değerleri	153
Çizelge 4.28.	Ek su kürü uygulanan Ü.C.2 karışımına ait UPV değerleri	154

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Beton, çağımızda birçok yapıda kullanılan en önemli ve popüler yapı malzemesidir. Evler, okullar, iş yerleri, sosyal faaliyetler için yapılan tesisler, kaldırımlar, barajlar vb. gibi günlük hayatta karşımıza çıkan birçok yapıda beton yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

TS 1248 nolu Türk standardına göre, günlük ortalama sıcaklığın 3 gün süreyle $+5^{\circ}\text{C}$ 'nin altında olduğu hava durumu beton dökümü için soğuk hava olarak tanımlanmaktadır. Burada 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.

Soğuk hava koşullarındaki taze betonun priz alma süresi, normal sıcaklık koşullarında betonun priz alma süresine göre daha uzun, dayanım kazanma hızı ise daha yavaş olmaktadır. İlk zamanlarda (beton priz almadan veya yeterli dayanımı henüz kazanmadığı süre içerisinde) betonun içerisindeki suyun bir kez dahi donması, beton dayanımını ve dayanıklılığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Yerleştirilen betondaki sıcaklık ile hava sıcaklığı arasında büyük fark olması durumunda, betonda gerilmeler oluşmakta ve çatlaklara yol açmaktadır. İlk zamanlarda yer alan donmadan kast edilen aşağıdaki iki durumdur.

1. Betonun priz almadan içerisindeki suyun donması
2. Priz alarak sertleşmiş ancak yeterli dayanım kazanmamış beton içerisinde suyun donması

Birinci durumda donma priz almadan gerçekleştiği için beton içerisindeki suyun buza dönüşmesi ile beton hacminde artış olmaktadır. Böylece imento ile kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için yeterli su bulunmamaktadır. Daha sonra hava sıcaklığının artmasıyla buz özölmekte ve beton priz alabilmektedir. Fakat bu durumda buzların erimesi ile geride kalan boşlukların hacimleri çok büyük olduğundan hidratasyon sonucunda imento jelleri bu boşlukları yeteri kadar dolduramaz ve boşluklu, geçirgenliği yüksek, dayanımı ve dayanıklılığı düşük bir beton elde edilmektedir.

İkinci durumda donma olayı gerçekleştiği zaman kapiler boşluklardaki suyun donarak genişmesi ile betonda çatlaklar oluşmakta ve betonun dayanımı düşmektedir. Yeterince dayanım kazanmamış betonun içerisindeki su bir kez dahi donsa betonda tahribat oluşturmaktadır (Erdoğan 2003, 2007).

Soğuk havalarda dökölen betonlarda temelde 2 problem ortaya çıkmaktadır. Birincisi, beton düşük sıcaklıklarda yerleştirildiğinde betonun basınç dayanım artış hızındaki yavaşlama, ikincisi ise donma–özölme çevrimlerinin neden olduğü i gerilmelerden dolayı oluşın bozulmadır.

Beton soğuk havaya maruz kaldığında büyük termal şoklardan kaçınmak ve betonu dona karşı korumak için kür süresi boyunca yeterli bir sıcaklığın korunması ve sağlanması gerekir. Temelde beton malzemeleri ısıtılmalıdır ve beton yalıtım malzemeleri ile veya kür süresince dışarıdan ısıtıcılarla ılık olarak tutulmalıdır. Ayrıca uygun katkı malzemeleri kullanılarak da betonun korunması gerçekleştirilebilir (Korhonen 2003). Kimyasal katkının uygunluğu, seçimi, geliştirilmesi yapılacak herhangi bir projenin amacına, sıcaklık değeriğine, yapı tasarımına ve beton karışım tasarımına bağlıdır. Bu çalışmada antifriz katkılı beton teknolojisinin başarılı bir şekilde geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Betonarme yapılarda ısıtıcılar vasıtasıyla uygulanan ısı yalıtımı örtöleri, rüzgâr ve kötü hava şartlarına karşı dayanıklı olmalıdır. Diğer taraftan bu ısıtıcılar ile yüksek enerji

harcanmasına rağmen betonda köşeler, kenarlar ve ince bölümlerde uygun sıcaklıklar sağlanamamaktadır. Ayrıca lokal olarak betonun ısınmasına ve yüzeyinin kurumasına neden olabilirler. Taze beton yüzeyi ısıtıcıdan açığa çıkan karbondioksit gazı konsantrasyonu, beton iç sıcaklığı ve nem durumuna bağlı olarak zarar görebilir. Oluşabilecek karbonatlaşma reaksiyonu neticesinde beton yüzeyi yumuşar ve çatlaklı bir yapı oluşur. Çok yüksek miktardaki karbon dioksit gazı çalışanların sağlığı açısından da zararlıdır. Bu çalışmada amaç soğuk havalarda dökülen betonlarda herhangi bir yalıtım, ısıtma maliyeti olmaksızın optimum karışımı verecek optimum antifriz katkı oranlarını bulmak ve herhangi bir koruma olmaksızın betonun dökülebileceği inşaat sezonunun uzatılmasıdır.

Bu amaçla antifriz katkılı betonun ısıtma, yalıtım, örtü ile kaplama gibi herhangi bir dış koruma olmaksızın donmaya karşı dayanıklılığını iyileştirmek için, w/c oranı sabit tutulmak üzere antifriz ve kış şartlarına uygun süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılmıştır. Antifriz katkılar üre ve kalsiyum nitrattır. Bu katkılar çimento ağırlığının %6, %9 ve %12'si oranlarında kullanılmıştır. Bu değerler antifriz katkılarının kullanımına dair yapılan literatür taramasına dayandırılmıştır. İki katkı kombinasyonu oranları ise %3üre+%3 kalsiyum nitrat, %4,5üre+%4,5kalsiyum nitrat, %6 üre+%6 kalsiyum nitrat olarak alınmıştır. Numuneler, -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C olmak üzere dört farklı sabit sıcaklığa,Erzurum açık hava şartlarına yani dış ortama ve su kürüne (23 ±1,7)°Cmaruz bırakılmışlardır. 7, 14, 28, 90 ve 365 günlük kür süreleri uygulanmıştır. Dış ortamdaki günlük en düşük ve en yüksek hava sıcaklıkları takip edilmiştir. Bu sıcaklıklar Ek 1'de sunulmuştur. Kullanılan agregalar 0–2, 2–4, 4–8 ve 8–16 mm olarak dört tane sınıfa ayrılmıştır. Maksimum agrega boyutu 16 mm olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmada bütün karışımlar için w/c oranı 0.40 vedozaj 400kg/m³'tür.Bu şekilde elde edilen örnekler aynı dozaj ve w/c oranına sahip kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Bundan başka 2011 ve 2012 yıllarında kontrol, %6 üre, %6 kalsiyum nitrat, %3 üre+%3 kalsiyum nitrat ve %4,5 üre+%4,5 kalsiyum nitrat kombinasyonu olmak üzere 5 grup için ek 600 adet numune dökülmüştür. Toplamda 1260 adet numune dökülmüştür.

1.2. Kaynak Özetleri

Antifriz katkılı beton ile ilgili incelenen bazı yayınların özetleri aşağıda verilmiştir. İncelenen yayınlar betonun dayanım gelişimi, priz süresi üzerine antifriz katkıların etkilerini içermektedir. Ayrıca kışın hava sıcaklıklarında oluşan değişimlerin beton özelliklerine etkilerini içeren yayınlar incelenmiştir.

Powers and Helmuth (1953)'a göre boşluklu bir yapıya sahip olan betonda kendi bünyesinde bulunmasa bile servis ömrü süresince betona sızan su, soğuk hava koşullarında donacak ve betonda tahribat meydana getirecektir. Bu tahribat birbirleriyle etkileşim halindeki mikro çatlaklar boyunca başlar ve hacimsel genleşmeye neden olurlar. Sonuçta tekrarlı donma çözülme döngülerinden sonra makro çatlaklar gelişir. Boşluklar soğuma esnasında donan suyu tuttukları için önemlidirler. Boşluk hacmi (kapiler, jel boşlukları ancak hava boşlukları hariç) esasen w/c oranı ile değişmektedir.

Çimento hidratasyonu ortam sıcaklığına karşı oldukça hassas bir reaksiyondur. Sıcaklık artışı erken dayanımı yükseltmek için hidratasyon gelişimini hızlandırır. Daha sonraki aşamalarda yüksek sıcaklıkta hidrate olmuş çimentonun dayanımı oda sıcaklığında hidrate olmuş çimentonun dayanımından daha düşüktür (Price 1951; Lothenbachet *al.* 2005; Lothenbachet *al.* 2007).

Bates and Bilello (1966) betonda karışım süresince yeterli sıcaklığın sağlanması, yerleştirilmesi ve kuru için yıllık maliyetin yaklaşık 800 milyon doları aştığını ifade etmişlerdir.

Ovcharov (1972), Kuzmin (1976), Mironov (1979) ve Sheikin (1980) kaynaklarında antifriz katkılardan sadece klorit içeren kalsiyum klorit ve sodyum kloritin korozyon etkisi gösterdiklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca sodyum nitrit, kalsiyum nitrit ve sodyum hidroksit antifriz katkıları da inhibitör olarak kullanılmaktadır. Finlandiya'da antifriz katkıları ilk olarak derzler için kullanılmıştır. Nitrat ve nitritler klorit içermeyen antifriz katkılarıdır. Soğuk havada beton dökümü için -15°C çok düşük bir hava sıcaklığıdır,

tavsiye edilen sıcaklık ise -5°C 'dir. Çünkü bu değerin altındaki sıcaklıklarda kür hızı çok yavaşlamaktadır.

Mironov (1977)'a göre antifriz katkılardan potasyum karbonat ve sodyum nitrit alkali kökenli olabilecekleri için alkali içeren agregalarla kullanılmamalıdır. Kalsiyum klorit ve sodyum klorit ise korozyona neden olabileceği için dikkatli ve düşük dozajlarda kullanılmalıdır. Bu katkıların taze betonda buz oluşumunu tamamen engellediği düşünülür. Bu nedenle uygulamada buz oluşumunu minimum seviyeye indirmek için kullanılırlar.

Dodson (1990), korozyon etkisi göstermeyen ve klorit içermeyen priz hızlandırıcı tuzların bir araştırmasını yapmıştır. Onun araştırması 1962'lere kadar uzanmaktadır. Bu dönemde kalsiyum formatın bir hızlandırıcı olarak kullanılabileceğini bulmuştur. Kalsiyum nitratın bir hızlandırıcı katkı olarak kullanımı 1969'larda başlamıştır. Yoğun bir araştırma dönemiyle daha sonradan kalsiyum nitratın betondaki gömülü donatı için çok etkili bir korozyon inhibitörü olduğu tespit edilmiştir.

Son 50 yıldır Rusya'da klorit içeren antifriz katkılar kullanılmakta ve son 20 yıldır Kuzey Amerika, İskandinavya, Çin ve Japonya'da klorit içermeyen antifriz katkılar kullanılmaktadır (Korhonen 1990, 1999; Myrdal 2007).

Brooket *al.* (1991) yapmış olduğu çalışmasında 4 farklı katkıyı bir arada kullanarak klorit içermeyen soğuk havada beton dökümü için kullanılabilecek yeni bir katkı üretmiştir. Bu katkı kombinasyonunda kullanılan katkılar kalsiyum nitrat, naftalin sülfonat formaldehit, sodyum tiyosiyonat, tetra glycoluril (N-methylol)'dir. Bunlardan birincisi antifriz katkı, ikincisi süper akışkanlaştırıcı, üçüncüsü inorganik priz hızlandırıcı, dördüncü ise priz hızlandırıcı katkıdır. Brooket *al.*(1991) çalışmasında çimento ağırlığının %0,5-%4'ü kadar antifriz katkı, %0,1-%0,8'i kadar naftalin sülfonat formaldehit, %0,033-%0,6'sı kadar sodyum tiyosiyonat ve %0,02-%0,16'sı kadar tetra glycoluril(N-methylol) kullanmıştır.

Literatürde bu katkıların kullanımına dair bir aralık olmadığı için Korhonen and Cortez (1991) ve Schroeder and Wood (1996) tarafından kullanılan oranları kullanmışlardır. Korhonen and Cortez (1991)'in ifade ettiklerine göre Kukko and Koskinen (1988) düşük sıcaklıkta yerleştirilen antifriz betonun dayanımının, normal betonun 28 günlük basınç dayanımının %29 ile %93'ü arasında bir değere sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu oran katkı cinsine, kür sıcaklığına, katkı miktarına, ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Yine aynı çalışmada Kivekaset *al.*(1985), hava sıcaklığı bir kez dahi don sıcaklığının üzerine çıksa düşük sıcaklıkta dökülen antifriz betonun dayanımının normal betonun dayanımını aştığını ifade etmiştir. Böylece sadece dayanım artışı olmamış aynı zamanda nihai dayanımı da daha yüksek bir beton elde edilmiştir.

Hidratasyon ürünlerinin yüksek heterojen dağılımlarından ve çok kısa etrenjit kristallerinin dolayı bu ürünler arasındaki aderansın zayıf olması neticesinde basınç dayanımı azalmaktadır(Kjellsen and Detwiler 1992).

Sıcaklık artışıyla beraber oluşan hızlı hidratasyon ilk saatlerde ve ilk günlerde hidratasyon ürünlerinin daha hızlı çökmesine neden olur ve erken dayanım gelişiminden sorumludur. İlk aşamada bu hızlı hidratasyon, klinker partiküllerinin etrafında çökelen ve bu parçacıkların etrafında yoğun bir iç tabaka oluşturan hidratasyon ürünlerinin daha heterojen dağılmasına neden olur (Kjellsen and Detwiler 1992). Bu heterojen yapı ise çok daha kolay bozulabilir. Düşük sıcaklıkta ise hidratasyon çok daha yavaş seyreder. Daha düşük sıcaklıklarda çökelen hidratasyon ürünleri daha sıkı bir şekilde birbirlerine karışmaktadırlar. Böylece hidratasyon ürünleri çökmeden önce çözünmüş iyonların difüzyonu için daha fazla zaman vardır, CSH daha düşük yoğunlukta oluşur ve daha az kapiler boşluk oluşur (Kjellsen and Detwiler 1992; Komonen and Penttala 2003).

Kalsiyum nitrat uzun süreli dayanım kazanmaya yardımcı, priz hızlandırıcı, antifriz ve klorit iyonlarının korozyon etkisine karşı inhibitör olarak kullanılabilen çok yönlü bir katkıdır (Justnes 1993; Justnes and Nygaard 1994, 1995; Justnes 2007). Deney sonuçlarına göre kalsiyum nitrat içeren, sıradan portland çimento ve yüksek dayanımlı

portland çimento ile üretilen iki farklı karışımdan sıradan portland çimentosu ile üretilenin ilk 8 saatlik dayanımı daha yüksektir. Ancak yüksek dayanımlı portland çimentosu ile üretilenin de 220 günlük dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Ancak her iki durumda da her iki karışımda katkı oranı arttıkça dayanım doğrusal olarak artmaktadır.

Korhonen *et al.* (1994) yayınladıkları çalışmalarında sodyum sülfat ve sodyum nitrat antifriz katkılarını kullanmışlardır. İki katkı bir arada kullanılmış ve aralarında ki oran sodyum nitrat (3) ve sodyum sülfat (1) şeklindedir. Toplamda çimento ağırlığının %2, %6 ve %8'i oranında katkı kullanılmıştır. Kür sıcaklıkları 20°C, -5°C, -10°C ve -20°C'dir. Numunelerin 7, 14 ve 28 günlük dayanımları tespit edilmiştir. Sonuçta 20°C ve -5°C'de %6 oranında katkı içeren karışım, -10°C ve -20°C'de %8 katkı içeren karışım en iyi sonuçları vermiştir. Örneğin -10°C'de kontrol numunesinin 28 günlük dayanımı yaklaşık 1,3 MPa iken %8 antifriz içeren karışımın 28 günlük dayanımı 27,6 MPa'dır.

Korhonen *et al.* (1994) portland çimento içeren betonun herhangi bir koruma olmaksızın soğuk havada kür edilemeyeceğini ifade etmişlerdir. Genellikle betonun 10°C ile 20°C sıcaklıklarda kür edilebileceğini ve rölatif nem miktarının en az %80 olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ancak bu şartlar sahada çok nadiren mevcut olmaktadır. Düşük sıcaklıklar çimentonun hidrasyonunu ve dayanım kazanma hızını yavaşlatmakta ve kalıpların güvenle sökülebilmesi için gerekli süreyi uzatmaktadır. Eğer sıcaklık çok düşerse, karışım suyu donacak ve geri dönüşü mümkün olmayan dayanım kayıpları yaşanacaktır. Bu durumla mücadele etmenin yolu taze betonu ve çevresini sıcaklık açısından kontrol altına almaktır. Termal korumaya alternatif bir uygulama ise kimyasal katkıları yolu ile düşük sıcaklıkta betonun dayanım kazanmasını sağlamaktır. Bu makale bir laboratuvar çalışması üzerine hazırlanmış ve amaç düşük sıcaklık katkısı olarak kullanılabilecek değişik kimyasal bileşimlere sahip bir ürün geliştirilmesidir. Deney sonuçları göstermektedir ki bu kimyasal katkıları soğuk havada kür edilmiş betonun dayanımını artırabilir.

Justnesand Nyguard (1994), tarafından kalsiyum nitrat katkısının çimentonun priz özellikleri ve donatı korozyonu üzerine etkisi araştırılmıştır. Başlangıçta hızlandırıcı özelliğinin çimentonun alüminat içeriğine bağlı olduğu düşünülmüştür. Bu varsayım düşük sıcaklıktaki (5°C'den düşük) çimento için doğrulanmamıştır. Kalsiyum nitrat katkısı sadece prizi hızlandırmakla kalmamakta aynı zamanda çimentodaki C_2S miktarını veya klinker içerisinde C_2S oluşumuna katkıda bulunan diğer çimento karakteristiklerinin de artışı sağlamaktadır.

Bennett (1994) yapmış olduğu çalışmasında amacını şöyle sıralamıştır.

- Don sıcaklıklarının altında kür edilen, antifriz katkı ve portland çimentosu hazırlanan birkaç beton karışımı tasarlamak için kısa ve uzun süreli dayanım değerleri, stabilite ve korozyon özelliklerini özetlemek.
- Beton karışımında kullanılan her türlü malzeme, işçi, ekipman maliyetlerinin düşürülmesi, betonun korunması, stabilite, korozyon karakteristikleri ile uzun ve kısa süreli dayanım için uygun bir veri tabanı geliştirmek.
- Farklı ortam şartları ve beton karışımları için en uygun katkı tipini belirlemede tasarımcı, yüklenici ve mal sahibi için yardımcı olacak bir yönetmelik geliştirmek.

Bennett (1994), yapmış olduğu çalışmasında farklı kaynaklardan elde ettiği karışım hesaplarından maliyet analizi yapmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki antifriz katkı kullanılarak yapılan karışımların maliyeti yüksek dayanımlı çimento kullanılıp yalıtım yapılarak üretilen beton maliyetine yakındır. Bennett (1994) yapmış olduğu yayınında genel olarak kullanılan antifriz katkılara dair bir bilgi sunmuş ve antifriz katkının tanımını yapmıştır. Ona göre antifriz katkı beton bünyesinde ki suyun donma noktasını düşürmek için kullanılan ve böylece soğuk hava şartlarında betonun kürüne imkân sağlayan katkıdır. Bu katkılar karışım sıcaklığı 0°C'nin altına düştüğünde çimento bileşenlerinin hidratasyonu için gerekli olan suyun bir kısmının donmasını engellemektedir. Herhangi bir antifriz katkının *eutectic* noktası suyun az bir miktarı da olsa bir kısmının sıvı halde kalabildiği katkı konsantrasyonu ile ilgili en düşük sıcaklıktır. Bu sıcaklığın altında su tamamen donar ve katkı bileşimi kristal bir hal alır. Pratikte bu *eutectic* noktanın biraz (5°C kadar) üzerinde ki bir sıcaklık beton sıcaklığı

için limit değeri olarak seçilebilir. Bu sıcaklığın altında hidratasyon süreci önemli derecede gecikmektedir. Çünkü kimyasal olarak çözünmüş olan serbest su molekülleri bu sıcaklık değişimi ile önemli oranda azalmaktadır. Antifriz katkıların bazıları zayıf hızlandırıcı veya zayıf geciktiricilerdir. Öyle ki bu katkılar dayanım artışını yavaşlatmakta ve genellikle hızlandırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır. Bu gruptaki katkılar sodyum nitrit, sodyum klorit ve üredir. Bu katkıların saf halleriyle donma noktaları sırasıyla $-19,56^{\circ}\text{C}$, $-21,2^{\circ}\text{C}$ ve -18°C 'dir. Diğer bir grup ise kimyasal olarak çimento mineralleri veya hidratasyon ürünleri ile reaksiyon gösteren ve böylece betonun prizini ve sertleşmesini hızlandıran antifriz katkılardır. Bu katkılar genellikle düşük *eutectic*(donma) noktaya sahiptirler. Bu katkılar potasyum karbonat, kalsiyum klorit ve kalsiyum nitrittir. Bu katkıların donma noktaları sırasıyla $-36,5^{\circ}\text{C}$, $-49,8^{\circ}\text{C}$ ve $-17,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bunlardan potasyum çok hızlı reaksiyon gösterdiği için betonun çok hızlı priz almasına neden olabilir. Bu yüzden mutlaka bir priz geciktirici katkı ile kullanılması gerekir. Bu tuzlardan kalsiyum klorit ise korozyon etkisinden dolayı kullanım yüzdesi sınırlıdır. Eğer betonarme bir yapıda kalsiyum klorit kullanılacaksa mutlaka bir korozyon inhibitörü kullanılmalıdır. Örneğin sodyum nitrit kalsiyum klorit ile birlikte eşit oranda korozyon inhibitörü olarak kullanılabilir.

Kropp and Hilsdorf (1995), beton boşluk sisteminde suyun donması neticesinde oluşan buz hacmine yer sağlamak için gerekli olan serbest boşluk hacmi yeterli değilse beton iç yapısında çukurların ve yüzeye yakın kısımlarda da pullanma, kabuk atma şeklinde tahribatlar oluşabileceğini ifade etmişlerdir. Esasen oluşabilecek tehlike beton boşluk sisteminin doygunluk derecesi ile ilişkilidir. Özellikle kapiler boşluklar adsorpsiyon yani kapilarite ile kolaylıkla kritik doygunluk derecesine ulaşabilmektedirler. Betonun maruz kaldığı şartlara ek olarak don direncini sağlamak için yönetilebilecek parametreler donması muhtemel su miktarı ve yüksek doygunluk derecesinden dolayı çimento hamurunda oluşturulabilecek yapay hava boşluk sistemidir. Bu donması muhtemel su miktarı da kapiler poroziteye yani w/c oranına, hidratasyon derecesine ve beton tarafından emilen su miktarına bağlıdır. Beton basınç dayanımı, donmaya maruz kalan betonun w/c oranı, hidratasyon derecesi ve kapiler süreklilik gibi özelliklerinin etkilerini yansıtabilecek iyi bir indikatördür. W/c oranı düşük olan yüksek basınç

dayanımına sahip beton düşük kapiler poroziteye sahip olduğu ve çok düşük hızda adsorpsiyon yaptığı için donması muhtemel olan su miktarı da azalmaktadır. FHWA(1995), uluslararası yollar, köprüler ve birçok betonarme yapının bu tür tahribatlara karşı korunabilmesi için yıllık maliyetin 54,8 milyar dolar olduğunu tahmin etmektedir.

C_3S 'in hidratasyonu süresince, antifriz katkıların çoğu ile reaksiyona girebilen CH bu reaksiyonun neticesinde hidroksil tuzların (*hydroxysalts*) oluşumunu sağlar. Oluşan hidroksil tuzlar hem çözeltinin iyonik dayanımını hem de pH değerini değiştirir. Böylece tuzlar çimento fazının yoğunluğunu artırır ve mikro yapıyı değiştirerek betonun fiziksel özelliklerini de değiştirir. Kalsiyum nitratın CH ile reaksiyonu neticesinde kalsiyum hidroksil nitrat tuzu oluşur. Bu tuzun bileşiminde kalsiyum nitrat, su ve CH bulunmaktadır. Bu tuz, iğne formundaki kristallerde olduğu gibi çift ve bazik bir yapıya sahiptir. Bu çift ve bazik tuzlar ilk yapısal iskeleti oluştururlar ve çimento fazının hidrosilikat matrisi içinde mikro boyuttaki bir donatı gibi fonksiyon gösterirler. Antifriz katkılı numunelerdeki daha yüksek basınç dayanımının temel sebebi kalsiyum hidrosilikat ile meydana gelen reaksiyon neticesinde ilk iskelet yapının oluşmasıdır. Gözlemler göstermiştir ki ilk iskelet yapının oluşumunda hidratasyonun önemli bir miktarı meydana gelmektedir ve bundan sonra iskelet yapıda devam eden küçük miktardaki hidratasyon olayı bile bir dereceye kadar daha büyük dayanım oluşumu sağlamaktadır (Ramachandran 1995). Ramachandran (1995) basınç dayanımındaki kayıpla beraber betonun don direncinin %40-%60 arasında ve beton ve donatı arasındaki aderansın ise %70 oranında azaldığını ifade etmiştir. Kalsiyum klorit, sodyum klorit, sodyum nitrit, kalsiyum nitrat, kalsiyum nitrit gibi antifrizler iyi etki göstererek prizi ve beton sertleşmesini hızlandırırlar(Ramachandran 1995).Buz çözücü katkıların betondaki dağılımı dengeli değildir çünkü bunların beton içine girişi dış yüzey vasıtası ileler. Bu düzensiz dağılım donma çözülme döngüleri süresince devam edecektir.Çünkü buz oluşumu daha yüksek konsantrasyon farkına neden olan çözücü kimyasallarında girişine eşlik edecektir. Bu osmotik basıncı artıracaktır. Böylece buz kristalleri büyüyecek ve eğer buz çözücü tuzların uygulaması boşluk suyundaki

çözünmüş konsantrasyon gradiyentini artırırsa durum daha da kötüye gidecektir (Neville 1995).

Bates and Bilello (1996) Alaska, Kanada ve diğer kutupsal bölgelerdeki ülkeler gibi kuzey bölgelerin soğuk hava koşulları ile birkaç aydan daha fazla karşılaştıklarını ifade etmektedirler. Özellikle kutupsal bölgelerde inşaat sezonunun sınırlanması, kutuplar gibi uzak bölgelere malzeme yükleme maliyetlerinin artması, iş gücü imkânının azalması ve maliyetinin artması gibi ekstra problemler ortaya çıkmaktadır.

Wagner (1996) 0°C'nin altında sıcaklıklarda kür edilen antifriz katkı içermeyen beton numuneleri ile antifriz içeren beton numunelerinin basınç dayanımlarını karşılaştırmıştır. Katkı içermeyen betonun basınç dayanımında meydana gelmiştir. Wagner bunun sebebi olarak dayanıklılıktaki azalmayı göstermiştir. Wagner sodyum nitrat ve kalsiyum nitrat antifriz katkılarını içeren beton karışımlarının dayanıklılıklarını araştırmıştır. Sonuçta kullanılan bu antifriz katkıları suyun donarak beton içerisinde kapiler boşluklarda, hamur fazındaki boşluklarda ve agrega boşluklarında oluşturduğu osmotik ve hidrolik basınçların azalmasını sağlayacağını ifade etmiştir.

Schroder and Wood (1996) U.S’de taze betonu dona karşı korumak için yapılan harcamaların yıllık 800 milyon doları bulunduğunu ifade etmişlerdir. Kimyasal katkıların suyun donma noktasını düşürdüğünü ve suyun donma noktasının altındaki sıcaklıkta betonun dayanım kazanacağını ifade etmektedirler. Bu çalışma sodyum nitrit ve kalsiyum nitrit antifriz katkılarını içeren don sıcaklıklarının altında kür edilmiş betonda beton ve donatı arasında aderans kuvvetini araştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar antifriz içermeyen ve 0°C’den daha yüksek bir sıcaklıkta kür edilen kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki antifriz katkı içeren ve sıfırın altında sıcaklıkta kür edilen betonun, antifriz içermeyen ve sıfırın üstünde sıcaklıkta kür edilen betona göre aderans dayanımı daha hızlı gelişmiş ve kontrol betonundan daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

Mwaluwinga *et al.* (1997), üre antifriz katkısının betonun akışkanlığı, hidrasyon ısı, priz süresi, dayanımı, rötre deformasyonu ve karbonatlaşma direnci üzerine etkisi araştırmışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki üre betonda hidrasyon sıcaklığını düşürmesinden başka aynı zamanda betonun dayanıklılığı ve akışkanlığı üzerine etki etmektedir. Mwaluwinga *et al.* (1997)'ya göre üre betonla karıştırıldığında, beton sıcaklığı su ve üre arasındaki endotermik reaksiyondan dolayı azalmaktadır. Bu özelliği kullanarak betonun hidrasyon süreci ve döküm aşamasında beton sıcaklığını azaltmak mümkün olabilir. Bu da daha çok kütle betonlarının dökümünde iç ve dış yüzey sıcaklığı arasındaki farkı bertaraf etmek için faydalı olmaktadır. Hidrasyon neticesinde açığa çıkan CH ve ürenin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan karbonik asit reaksiyona girmekte ve kalsiyum karbonat ve su açığa çıkmaktadır.

Mason and Michael (1997), soğuk hava şartlarında beton dökümünde beton karışımını yeterli dayanıma ulaşmadan önce dondan korumak için yüklenicilerin ekstra ölçümler yapması gerektiğini savunur. Böylece tamamlanmamış kür neticesinde dayanım ve dayanıklılık kaybının olacağını ve yapıda çatlaklar ve erkenden tahribat olabileceğini ifade etmektedir.

Antifriz katkıları bazen hızlandırıcı katkılara bağlı olan ayrı bir sınıf olarak düşünülür. Bu katkıların etkilerinden birisi karışım suyunun fiziksel özelliklerini etkilemektir. Yani taze betonda suyun donma noktasını düşürür fakat esas etkisi geleneksel hızlandırıcı katkıları gibi çimentonun hidrasyonunu hızlandırmaktır. Antifriz içeren betonda, sıcaklık düşüşüne bağlı olarak meydana gelen buz oluşumu daha yavaş ve kademeli gerçekleşir. Ancak kontrol numunesinde var olan su tek bir sıcaklıkta aniden donar ve buza dönüşür. Betonda buzun kademeli olarak oluşması ile ani buz oluşumu neticesinde meydana gelen tahribattan kaynaklanan genleşme için, kısmen elastik olan çimento matrisinde yer sağlanmaktadır. Hidrasyon süresince hidrasyon ürünlerinden oluşan yabancı maddeler, çökelen ürünler tıpkı buz oluşumunda olduğu gibi çözelti dışına itilir. Sonuçta boşluk çözeltisinin konsantrasyonu sürekli artar ve aynı anda çimento hamuru olgunlaştığı için donma noktası azalır. Ayrıca boşluk yapısındaki katkı miktarı boşluk çapının azalmasını sağlar ve böylece daha küçük boşluklar oluşur. Sonuçta suyun

donma noktası düşer ve beton donmaya karşı daha dirençli olur (Korhonen *et al.* 1997a, 1999; Rixom and Mailvaganam 1999a).

Çok dikkatli olunmasına rağmen soğuk havada dökülen betonu dondan korumak için uygulanan ısıtma yöntemlerinden dolayı aynı ortamda aynı anda aşırı sıcak ve aşırı soğuk alanların olması muhtemeldir. Sıcak hava taze beton yüzeyinde lokal kurumaya neden olabilir. Lokal dehidratasyon ve sıcaklık değişimleri homojen olmayan bir beton yapısının oluşmasına neden olabilir ve sonuçta betonda termal çatlaklar oluşabilir. Ayrıca ateşlenerek kullanılan ısıtıcılar beton yüzeyinde karbonatlaşmaya, yumuşak bir yüzey oluşmasına ve yüzeyde birbirleriyle bağlantılı çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Buna ek olarak bu ısıtıcılardan açığa çıkabilen karbon monoksit gazı çalışanlar için tehlike oluşturabilir. Termal korumaya karşı antifriz katkı kullanılması alternatif bir yöntemdir. Bu katkıların kullanımı ile termal korumaya olan ihtiyaç çok azalmakta, daha homojen bir beton oluşturulmakta ve ısısal değişimler önemsiz olmaktadır. Soğuk havada beton dökümünde ilk dikkat edilmesi gereken husus, o anda ve sonrasında yeterli kür sıcaklığının sağlanması, betonun dondan korunması ve beton soğuk havaya maruz kaldığında termal şoklardan kaçınılmasıdır (Korhonen *et al.* 1997a). Korhonen *et al.* (1997a) çalıştıkları projede yeni bir soğuk hava katkısı geliştirmeyi amaçlamışlar ve antifriz katkı kullanmışlardır. Kür sıcaklıkları 20°C, -5°C, -10°C ve -20°C'dir. Sekiz karışım için 362,8 kg/m³ ve iki karışım için 418,6 kg/m³ olmak üzere iki farklı dozaj kullanmışlardır. Çimento tipi Tip I ve w/c oranı 0,48'dir. Kullanmış oldukları katkı oranları çimento ağırlığının %1,5'i ve %8'i arasında değişmektedir. Antifriz katkıları sodyum nitrat, sodyum sülfat, kalsiyum nitrit, sodyum nitrit ve firmaların hazır katkılarıdır. Yapılan deneyler sonucunda görülmüştür ki suyun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda beton dökmek ve gerekli dayanım değerini elde etmek mümkün olabilir. Laboratuvar test sonuçlarına göre proje sonucunda geliştirilen prototip katkı -5°C sıcaklıkta kür edilen beton için güvenle kullanılabilir. Burada ki sıcaklık betonun kendi iç sıcaklığıdır. Birçok durumda hidratasyon ısı ve mevcut bir yalıtım nedeniyle beton iç sıcaklığı 0°C'nin üstünde iken, hava sıcaklığı 0°C'nin altında olmaktadır. Prototip katkı ile hava sıcaklığı -5°C'nin altında iken beton iç sıcaklığını -5°C civarında veya daha yüksek tutulabilmektedir.

Korhonen *et al.* (1997b), çalışmalarında özel firmaların ürettiği iki farklı antifriz katkı kullanmışlardır. Bu katkıların kullanıldıkları miktarlar çimento ağırlığının %3,7'si ile %6,3'ü arasında değişmektedir. Diğer karışım oranları sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Antifriz katkılar oldukça iyi performans göstermişlerdir. Bu katkılar -5°C 'ye kadar betonu dondan korumuşlardır.

Birçok araştırmacıya göre CSH kristalleri mikro yapıdaki diğer katı bileşenlere benzemeksizin kısmen kristal görünümlü bir yapıya sahiptir. Tabakalar arası su ile bağlanmıştır. Jele benzeyen amorf yapıda olduğu düşünülmektedir ve boşlukları da jel boşlukları olarak adlandırılmaktadır. CSH yapısında Ca/Si oranı 1,7 ile 2 arasında değişmektedir. Çimento tamamen hidrate olduğunda bu oran 1,8 olmaktadır (Gu and Beaudoin 1997; Tennis and Jennings 2000).

Mason and Michael (1997), bir antifriz katkı kullanarak kür süresince soğuk havaya maruz kalan betonun dayanım gelişimini incelemişlerdir. Kullanmış olduğu katkılar sodyum nitrit (%97 saflıkta) ve kalsiyum nitrittir (%34 çözelti). Mason and Michael (1997), çimento ağırlığının %6'sı oranında sodyum nitrit ve %2'si oranında kalsiyum nitrit kullanmışlardır. Mason and Michael (1997), numunelere -5°C , -10°C , oda sıcaklığı ve dış ortam olmak üzere dört farklı kür uygulamışlardır. Deneyler süresince dış ortamda hava sıcaklığı -13°C ile 20°C arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre basınç dayanımları 13,8 MPa ile 22,43 MPa arasında değişmektedir. Ancak en yüksek basınç dayanımları dışarıda dökülüp oda sıcaklığında bekletilen numunelerde görülmektedir. Oda sıcaklığında katkısız kontrol karışımının dayanımı 37,8 MPa'dır. Sonuç olarak antifriz katkı içeren beton karışımının soğuk hava şartlarında kür süresince dayanım kazanmaya devam ettiği gözlenmiştir. Yani yapılan testler -10°C 'de dahi antifriz katkı içeren betonun dayanım kazanabileceğini göstermektedir.

Schulson (1998)'a göre en eski, en çok kullanılan ve elbette en çok çalışılan yapı malzemesi olan betonun çevresel tahribattan kolay etkilenmesinin nedeni boşluklu bir yapıya sahip olmasındandır. Donatı korozyonu, sülfat saldırıları, alkali silika reaksiyonları, termal döngüler ve beton bünyesinde ki suyun donması gibi olaylar

betonda genleşme ve büzölmelerin oluşmasına neden olur. Bunun sonucunda içyapı tahrip olur ve servis ömrü kısalır.

Schulson (1998)'a göre beton oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. Onu oluşturan malzemelerin birbirlerinden bağımsız şekilde değiştirilerek mikro yapıda değişiklik yapmak zordur. Beton tamamen priz aldığında mikro yapısı da değişmektedir. Yani bir kesit alınıp bakıldığında iki fazlı kompozit bir malzeme olarak görölmektedir. Bu fazlar hamur fazı ve yaklaşık %75 oranında ki kaba agrega fazıdır. Hava ise matris içinde yayılmış küresel boşluklar olarak görölmektedir. Hidrate olmuş çimento hamuru çok fazlı bir kompozit malzemedir. Öyle ki %10-%15 oranında klinker veya hidrate olmamış çimento parçacıkları (bu parçacıklar küresel şekilli C_3S ve C_2S), yaklaşık %20 oranında plak şeklinde görünüm sergileyen CH ve matris içinde dağılan %30 oranında boşluk içeren CSH bu kompozit yapıyı oluşturmaktadırlar. CSH matrisi ve boşluk yapısı suyun buza dönüşmesini etkileyen en önemli iki yapıdır. Çünkü bu boşluklar daha sonra hidratasyon için gerekli olan suyu sağlamaktadır.

Taze betonun plastik kıvamını, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştiren katkılar yüksek performanslı beton katkıları olarak adlandırılırlar. Örneğin 21°C ortam sıcaklığında hazırlanan bir beton karışımı -7°C sıcaklıkta yerleştirilirse betonun priz süresinde ve basınç dayanımı gelişiminde önemli derecede gecikme meydana gelecektir (Nmai 1998). Ancak antifriz özellik taşıyan hızlandırıcı bir katkı eklenerek daha hızlı priz alması ve dayanım gelişimi elde edilebilir. Bu bağlamda özellikle ekonomik katkısı dikkate alındığında soğuk havada üretilen beton yüksek performanslı olarak adlandırılabilir (Nmai 1998). Nmai (1998) CWA isimli hazır bir antifriz katkı kullandığı çalışmasında yüksek dayanımlı betonda bu katkının betonun dayanımı üzerinde ki etkisini araştırmıştır. CWA katkısını farklı sıcaklıklarda ve farklı dozajlarda kullanmış ve hedeflediği tasarım dayanımına ulaşmıştır. Örneğin beton iç sıcaklığı 28°C ve dondurucu sıcaklığı -4°C iken elde edilen 28 günlük dayanım değeri 30 MPa'dır. Bu hedeflenen tasarım dayanımından 2 MPa daha fazladır. Çalışmasında 3 farklı çimento dozajı ve 5 farklı katkı dozajı kullanan Nmai elde ettiği verilerde her iki dozaj arttıkça da dayanımın arttığını gözlemiştir. Kullanmış olduğu çimento dozajları 260kg/m³,

310kg/m³, 300kg/m³'tür. Katkı dozajları ise 100 kg çimento için 65 ile 3910ml arasında değişmektedir.

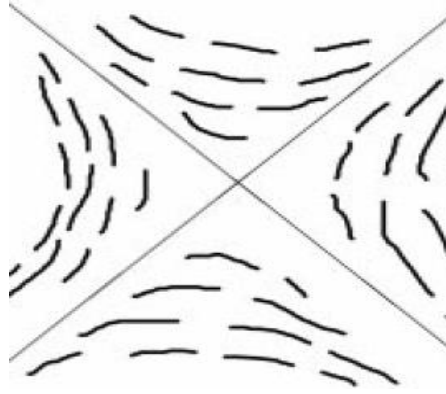
Betonun dış yüzeyi ve içyapısı arasında büyük sıcaklık farkları olduğu zaman yani 20°C'nin üzerinde bir fark olduğunda betonda çatlaklar oluşacaktır. Bu sebeple termal şoklardan kaçınmak için yalıtım malzemeleri kademeli olarak beton yüzeyinden kaldırılmalıdır (Rixom and Mailvaganam 1999b). Bu da oldukça uzun bir zaman gerektirmektedir. Oysa kalsiyum nitrat antifriz katkısı ile betonda dayanım kazanma hızı artmakta ve priz süresi kısalmaktadır.

Mammoliti (2001) tez çalışmasında kalsiyum nitrit ve nitrat katkılarının betonda korozyon etkisi üzerine araştırma yapmıştır. Klorit bilindiği gibi yollar, köprüler, park alanları ve deniz yapıları gibi birçok betonarme yapıda korozyonun temel sebeplerindendir. Kalsiyum nitrit ve nitrat katkıları bu problemi ortadan kaldırmak için çok önemli iki katkıdır. Kalsiyum nitrit ve nitrat katkılarının korozyonu engelleme mekanizmaları, çimentonun sıvı fazında bulunan ve donatı yüzündeki pasif film tabakasını parçalayabilen klorit iyonlarının çimentonun katı fazında bağlanmasını sağlamaktır. Ancak Mammoliti farklı çimento tipleri için farklı etkilerin oluşabileceğini ifade etmiştir. Çünkü bu çimentoların kimyasal yapıları farklıdır. Sıradan Portland çimentosunda korozyon açısından oldukça faydalı olan katkılardır.

Harrison *et al.* (2001), donma çözölmeye maruz kalan iyi bir beton karışımında oluşacak çatlakların değişik tiplerde olabileceğini ve bunlardan iki olağanüstü durum olan içyapıda veya yüzeyin hemen altında oluşabilecek tehlikelere azda olsa rastlanabildiğini ancak en yaygın üç durumun mevcut olduğunu ifade etmiştir. Bu üç durum: (1) "D" veya "D line cracking" diye isimlendirilen mafsalların birleşim noktalarında meydana gelen çatlaklar, (2) yüzeyde pullanma şeklinde meydana gelen bozulma, (3) lokal olarak kabuk atma şeklindedir.

- *D line cracking*

Bu çatlaklar genellikle zemin döşemelerde görülmektedir. Serbest uç ve mafsallara birleşim noktalarında meydana gelmektedirler. Bu çatlaklar mafsallara hem uzunlamasına hem de enlemesine paralel oluşurlar. Çatlaklar başlangıçta mafsal veya döşeme uç noktasına yakın görünürler. Ancak daha sonra donma çözülme döngüleri ek çatlaklara neden olur ve mafsal dışında yüzeyde artan bir şekilde ilerlerler. Bu durum derinde bulunan kaba agreganın genişlemesinden kaynaklanır ve D_{max} önem kazanır. Daha büyük agrega çapı daha fazla potansiyel bozulma demektir.



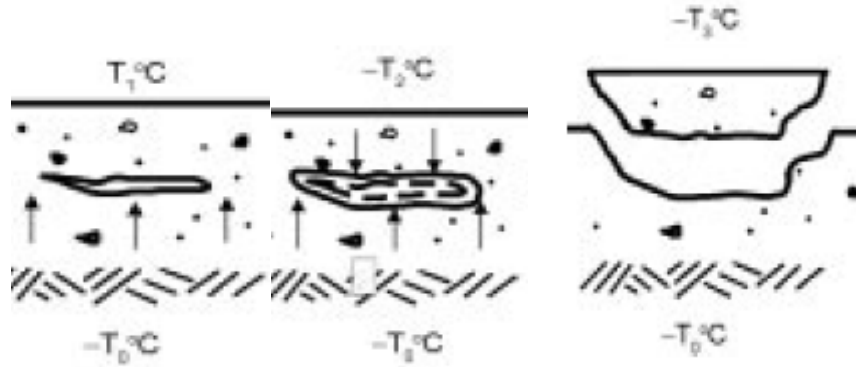
Şekil 1.1. Donma çözülmeden sonra oluşan “D line cracking”

- Tabakalar Halinde Dizilim ve Pullanma

Bir yüzeyde tabakalar halinde dizilim (delaminasyon) pullanmış bir yüzey olarak kendini gösterir. Bu pullanma, donmanın meydana geldiği veya buz lenslerinin olduğu bölgenin altında ve üstündeki tabakaların farklı davranışlarından kaynaklanır. Üstteki nemli beton tabakası yüzeye paralel bir şekilde artarak ilerleyen donmuş tabakaların etkisiyle donabilir. Beton döşemelerde bu olay meydana gelirse döşemenin altındaki toprak zeminden su döşemeye doğru hareket eder ve donan kısım giderek artar.

Donmuş tabakalardaki genişleme delaminasyona neden olabilir. Benzer bir durumda döşeme altındaki toprakta donan kısım kabuk atmaya neden olabilir. Delaminasyona

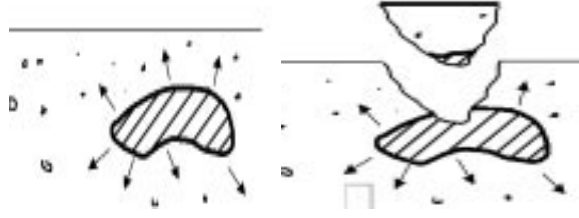
neden olan bir başka düşünce ise uzun süreli düşük sıcaklık periyotlarına maruz kalan döşeme betonlarında meydana geldiğidir. Yüzeydeki tabakalarda aynı sürede çözülmeler olsa bile daha derin tabakalar günlerce don halinde kalabilirler. Gece sıfırın altında ki sıcaklıklar yüzeyde ince buz tabakalarının oluşmasına neden olabilir. Bu buz tabakası sonra daha derindeki donmuş tabakalara doğru ilerler. İki donmuş bölge arasında gidip gelen su molekülleri donabilir, genişebilir ve yüzey tabakasında delaminasyona neden olan gerilmeleri meydana getirebilir. Bu durum Şekil 1.2’de görülmektedir. Görüldüğü gibi hava sıcaklığı giderek azalmış ve iç sıcaklık sıfırın altında seyretnmiştir.



Şekil 1.2. Delaminasyon oluşması

▪ *Pop-Outs*

Bu terim beton bir yüzeyden küçük konik şekilli bir parçanın kabarıp atmasını tanımlamak için kullanılmıştır. Bu donma çözülmeye duyarlı kaba agregaların kullanıldığı durumlarda meydana gelebilir. Yüzeye yakın ve yüksek adsorpsiyon yapan agregalar doygun hale gelip donduklarında kırılabilirler. Bu durumda oluşan gerilme o agreganın üzerinde bulunan betonu çatlatabilir. Daha sonra konik şekilli beton parçası yüzeyden kopar. Bu duruma neden olan şey donmuş ve kırılmış agregadır. Şekil 1.3’te bu durum gösterilmiştir (Richardson 2007).



Şekil 1.3.*Pop- Outs olayı*

Donma çözülme sürecini etkileyen 4 ana parametre vardır. Bunlar porozite veya geçirimsizlik, agrega özellikleri, nem durumu ve iklim koşullarıdır. Bu dört parametreye ek olarak iyi bir kür de betonun özelliklerini etkiler. Ancak beton kalitesi düşükse kür kaliteyi yükseltmez. Betonun başlangıç kürü dayanıklılık için birçok noktada hayati önem taşır. Donma çözülme olayında yüzey tabakalarının iyi hidrate olması önemlidir. Bu tabakalardan aşırı su kaybını sınırlamak için küre dikkat edilmesi gerekmektedir. Çok düşük çekme dayanımı ve yüksek miktarda kapiler boşluk suyuna sahip olduğu için olgunluk seviyesine gelmemiş yani yeterli dayanım kazanmamış bir beton donmaya karşı zayıftır. Beton döküldükten sonraki günlerde meydana gelen donma çözülme döngülerinden taze betonu korumak önemlidir.

- Porozite ve permaabilite

Porozite ve permaabilite (geçirimsizlik) terimleri orantılı olarak birbirleri ile bağlantılı değildir. Yüksek geçirimsizliğe sahip beton uygun görülmezken ilginçtir ki eğer beton doymun durumda değilse yüksek poroziteye sahip beton buz oluşumundan kaynaklanan genişlemeye karşı güvenlik sağlayacak avantaja sahiptir. Bu durum hava sürükleyici katkıların temelidir. Düşük geçirimsizliğe sahip bir beton düşük w/c oranına sahip karışımlardan elde edilebilir. Böylece düşük geçirimsizliğe sahip betonlar iki yönden faydalıdır.

Betonun geçirimsizliği dış kaynaklardan sertleşmiş beton içine giren serbest su miktarı ile azalır. Ek olarak hidrate olmuş beton minimum miktarda su(buz oluşumunu besleyen serbest sudur) içerir. Bilindiği gibi boşluk çapı suyun donacağı sıcaklığı etkiler. Örneğin

verilen bir sıcaklıkta büyük boşluklardaki su ilk önce donar. Sıcaklık giderek düştüğünde kapiler boşluklar arasındaki kısımlarda su donmaya başlayacaktır fakat jel boşluklarında su donmayacaktır. Sızan suyun hücum ettiği boşluk hacmi ve boşluğun civarı donmaya karşı direnci etkiler. Böylece yüksek porozite ve düşük geçirimlilik arasında bir denge gereklidir.

- Nem durumu

Tamamen doymuş betonda suyun buza dönüşmesi ile oluşan genleşme ve suyun hareketi için yer sağlamaz. Kuru beton ise hidrolik ve osmotik basıncın etkisinde suyun akışı ve buz oluşumundan kaynaklanan basıncı daha iyi adsorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Böylece boşluklu bir yapıda doymuşluk derecesi kapasitesinin minimum düzeyde tutulması önemli bir kontrol parametresidir.

Risk derecesinde doymuş olan beton yapılar, sürekli suya maruz kalan ve nadiren basınç altında suya maruz kalan beton yapılarıdır. Betondaki serbest su sadece ortam şartlarından etkilenmez aynı zamanda yapı elemanının ayrıntılarından da etkilenir. Özellikle su ve beton arasındaki temas süresini minimize eden drenaj yapıları faydalıdır (Harrison *et al.* 2001).

- İklim şartları

Soğuk iklimlerde beton için en büyük tehlike olarak ifade edilen betonun maruz kaldığı etkenlerden birkaç parametrenin birlikte etki etmesidir. Bunlar donma çözülme döngülerinin frekansı, kesin en düşük sıcaklık değeri, donma periyodu ve soğuma hızıdır. Daha düşük sıcaklık ve daha uzun donma periyodu potansiyel olarak tahribata maruz kalan boşlukların hacmi üzerinde daha çok etki göstermektedir. Eğer beton düşük bir ısı transfer hızına sahipse buzun oluşması çok düşük sıcaklıklar veya uzun donma periyotları veya her ikisinin kombinasyon halinde etki etmesini gerektirir. Soğuma hızı da bir parametre olarak alınabilir. Soğuma hızının daha yavaş olması, kapiler boşluklardan dışarı çıkan suyun buza dönüştüğünde oluşan genleşmeden doğan basıncın

etkisinin azaltılması için daha büyük imkân demektir. Bu durum betonun taşıma gücünün ötesinde çekme gerilmelerinin kümülatif olarak büyümesini engelleyebilir.

- Buz çözücü katkıları

Birçok durumda beton yüzeylerdeki zararlı kabuk atma, pullanma gibi olaylar buz çözücü katkıların uygulanması ile ilgilidir. Bu katkıları kar ve buz üzerine sudan daha düşük donma noktasına sahip bir solüsyon oluşturmak için yayılırlar ve böylece erime daha erken başlar. Buz çözücü katkıları klorit tabanlı olabilir. Bu katkıları gömülü donatının korozyona uğramasına neden oldukları için zararlı olabilirler. Aynı zamanda yüzeyde pullanmaya neden olabilirler. Çünkü buz çözücü katkıları temas halinde oldukları betonun doygunluk derecesini artırabilirler, farklı seviyelerde ki tabakalarında donmanın meydana gelmesine neden olabilirler, beton yüzeylerini termal şoklara ve daha şiddetli osmotik basınca maruz bırakabilirler.

Betonun doygunluk derecesi su emme hızına ve buharlaşma hızına bağlıdır. Buz çözücü tuzların etkisinden dolayı verilen bir sıcaklıkta ve harici rölatif nemde doygunluk derecesi tuz içeren boşluk suyunda beton boşluğundan daha yüksektir. Dolayısıyla kurutulma şartlarında daha büyük oranda boşluk yapısında su kalır ve böylece daha yüksek bir doygunluk derecesine sahip olur.

Düzenli olarak buz çözücü tuzlara maruz kalan betonda don sıcaklıklarına tabakaların farklı tepkileri, bir önceki döngüden eriyen suyun nüfuz etmesindendir. Hatta iyi drenaj yapılmış döşemelerde, buz çözücü katkı içeren erimiş su yüzeye doğru nüfuz edecektir ve yüzey altındaki tabakalar arasında kendine yol bularak ilerleyecektir. Emdirilmiş tabakalar suyla ıslatılmış tabakalarla karşılaştırıldığında daha düşük donma noktasına sahiptirler. Yağmur suyu yüzey tabakalarının en üstünden buz çözücü katkıyı yıkar sonra saf su kalır ve gelecek donma zamanı azalmış olur. Tabakaların farklı davranışı en dış tabakanın serbestçe genleşmesine ve böylece pullanmaya neden olabilmektedir.

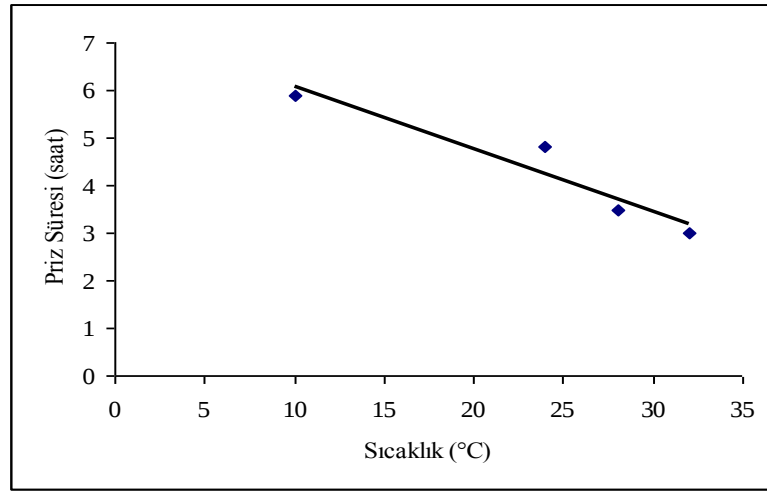
Termal şok buz çözücü tuzun bulunması durumunda kaçınılmaz bir sonuçtur. Tuz uygulandığında döşeme üzerindeki buzun veya karın erimesi bir enerji gerektirir. Bu enerji betondan gelir ve bu yüzeye yakın beton tabakalarında hızlı bir sıcaklık düşüşüne neden olur. Bu durum geçicidir fakat sonuçta oluşan termal şok betonda gerilme oluşturabilir ve çatlak ve pullanmalara neden olabilir.

Yüksek sıcaklıkta su kaybı ve porozite artışı ile basınç dayanım kaybı gözlemlenmektedir. Genellikle porozite ile basınç dayanımı arasında negatif bir korelasyon vardır. Yani porozite azaldıkça basınç dayanımı artar. Sonuçta artan geçirimsizlik neticesinde beton zaman ilerledikçe tahrip edici dış etkilere karşı daha hassas olmaktadır (Handoo and Agarwal 2002).

Korhonen (2002a) yapmış olduğu çalışmada priz hızlandırıcı, su azaltıcı, su azaltıcı ve priz hızlandırıcı, rötre azaltıcı ve korozyon inhibitörü özelliklerini gösteren 5 katkıyı farklı kombinasyonlarda kullanmıştır. Çimento dozajı 308kg/m^3 ve 476kg/m^3 arasında değişen ve w/c oranları 0,34 ve 0,52 arasında değişen 4 farklı kontrol ve antifriz kombinasyonları oluşturmuştur. Numuneler silindir şeklindeki kalıplara döküldükten sonra 20°C , -5°C , -10°C ve -20°C sıcaklıkta kür odalarına yerleştirilmişlerdir. 14 gün sonra soğuk kür odalarından çıkarılan numuneler 42 gün 20°C sıcaklıkta tutulmuşlar ve daha sonra başlık yapılarak basınç dayanımı deneyleri saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre -5°C , -10°C ve -20°C sıcaklıktaki kür odalarında bekletilen antifriz betonların 28. günden sonra dayanım artışları hızlanmış ve esas değerleri bu günden itibaren belli olmuştur. Daha önceki günlerde yapılan deneylerin sonuçlarına göre oldukça düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu sıcaklıklarda kontrol numunelerinde de herhangi bir dayanım artışı olmamıştır.

Korhonen and Asce (2002) betonun soğuk havada beton dökümü esnasında ve sonrasında ilk dikkat edilmesi gereken hususun yeterli bir kür sıcaklığı sağlamak olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun yanında betonu dondan korumanın ve soğuk havaya maruz kaldığında termal şoklardan kaçınılması gerektiğinin altını çizmektedirler. Temelde beton şantiye alanına en az 5°C iç sıcaklığına sahip olarak götürülmeli, taze

betonun temas edeceği herhangi bir yüzeyde buzlanma, kar vs. olmamalı ve kür süresince herhangi bir yalıtım malzemesi ile sıcaklığı korunmalıdır. Aslında soğuk havada üretilen bir betonda başarılı olabilmek için ilk amaç hızlı bir şekilde priz almasıdır. Yani normal betona göre daha hızlı priz ve bunun akabinde daha hızlı dayanım artışı olmalıdır. Şekil 1.4'te sıcaklık ile beton priz süresi arasındaki ilişki verilmiştir. Aynı şekilde dayanım artışı da daha düşük sıcaklıkta daha yavaş olmaktadır. Soğuk havada kür edilen beton sonunda sıcak havada kür edilen betondan daha güçlü olmasına rağmen iş programı daha yavaş ilerlemektedir.



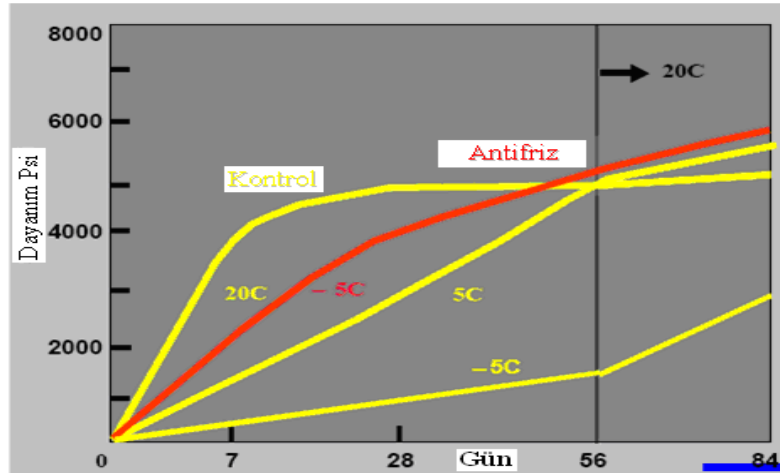
Şekil 1.4. Sıcaklık artışının betonun priz süresine etkisi (Dodson 1994)

Cortez and Barna (2002), yaptıkları çalışmalarında CRREL raporuna göre kırmızı çizgi ile gösterilen bölgelerde yılın en soğuk ayında ortalama sıcaklık değerinin -17°C ve sürekli don süresinin 180 gün olduğunu ifade etmişlerdir. Sarı çizgi ile gösterilen bölgelerde yılın en soğuk ayında ortalama sıcaklık 0°C ve sürekli don süresi 100 gündür. Şekil 1.5'te bu bölgeler görülmektedir.



Şekil 1.5.Dünyadaki soğuk bölgelerin tanımlanması

Al-Amoudiet *al.* (2003) kalsiyum nitratın korozyon ve basınç dayanımı üzerine etkisini çalışan araştırmacılardan bazılarıdır. Kalsiyum nitrat üç farklı dozajda kullanılmış ve sonuçlardan bu katkının klorit iyonlarının, sülfat tuzlarının ve deniz suyunun korozif etkisini azalttığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda tuzlu suyla hazırlanan beton numunelerinde donatı korozyonunu azaltmıştır. Şekil 1.6'da antifriz ve kontrol betonunun -5°C, 5°C ve 20°C'de basınç dayanımlarının karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 1.6. -5°C ve 20°C'de Antifriz ve kontrol numunelerinin basınç dayanımları

Gaidis (2004) kalsiyum nitratın korozyon etkisi üzerinde çalışmış olan araştırmacılardan biridir. O, düşük maliyetli olduğu için priz hızlandırıcı özelliğinin yanında bu katkının korozyon inhibitörü özelliğinin de dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir.

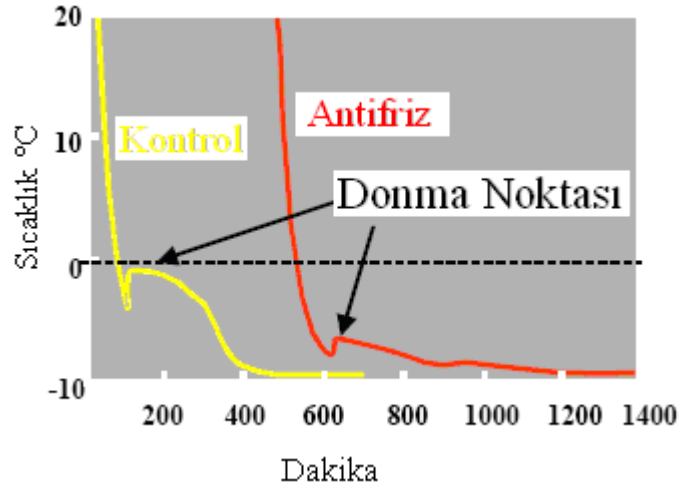
Korhonen *et al.* (2004) yapmış oldukları çalışmalarında Kanada’da ticari olarak satılan ve standartlara var olan 8 farklı katkı ile bir kombinasyon oluşturarak hava sıcaklığının sıfırın altında olduğu yani betonun dayanım kazanamayacağı kabul edilen sıcaklıklarda beton karışımını tasarlamak, karılmasını gerçekleştirmek, döküm yapmak ve kür sağlamak için çalışmışlardır. Oluşturdukları katkı kombinasyonu ile üretilen betonun -5°C bir iç sıcaklıkta tamamen kür alabileceğini, normal beton kadar durabil olabileceğini ve betonu yeterli sıcaklıkta tutmak için ek bir koruma yöntemine gerek kalmadan geleneksel beton dökme yöntemleri ile rekabet edebileceğini ifade etmişlerdir. Onlar Amerika’da iki farklı firma tarafından ticari olarak satılan katkılardan 8 farklı kombinasyon geliştirmişlerdir. Bu kombinasyonlarla taze betonun donma noktasını en az -5°C’ye düşürmeyi, -5°C’de tutulan antifriz katkılı betonun, en az 5°C’de tutulan kontrol numunesi kadar dayanımını yükseltmeyi ve en az kontrol numunesi kadar donma çözülmeye karşı durabil bir sertleşmiş beton üretmeyi amaç edinmişlerdir. Başlangıç donma noktaları numuneler içine gömülen özel termokupl ile tespit edilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre kontrol numunesinde ki su -1°C’de buz haline dönüşürken antifriz katkılı karışımlarda suyun buza dönüşmesi en düşük -7,4°C’de ve en yüksek -3,9°C’de gerçekleşmektedir. Bu çalışmada kullanılan w/c 0,45 ve dozaj 392 kg/m³’tür. Buradaki katkılar priz hızlandırıcı, priz geciktirici, korozyon inhibitörü ve rötre azaltıcı özelliklere sahiptirler.

Ortiz *et al.* (2005) yapmış oldukları çalışmalarında soğuk ve sıcak hava şartlarında dökülen betonların basınç dayanımları üzerinde araştırma yapmışlardır. Dökülen numunelerin hepsini 20°C sabit sıcaklık ve %95 sabit nemde yerleştirmişlerdir. 7 ve 28 gün sonra numunelere basınç dayanım testleri uygulanmıştır. Yapmış oldukları çalışmadaki elde edilen sonuçlara göre sıcak havada dökülen beton numunelerinin dayanımları hem referans betonundan hem de soğuk havada dökülen beton numunelerinin dayanımlarından daha düşüktür. Bunun nedeni yükseltilmiş sıcaklıklarda oluşan hızlı hidrasyon reaksiyonunun, çimento hamuru içindeki hidrasyon ürünlerinin homojen bir şekilde dağılmasını engellemesidir. Çimento hamurunun porozitesi homojen olmayan bu dağılımdan dolayı artmaktadır. Bundan başka erken yaşlarda betonda sıcaklık hızlı bir şekilde artarsa beton bünyesinde oluşan iç gerilmeler

beton çekme dayanımını aşar ve betonda porozite artışına, çatlak oluşumuna ve nihai potansiyel dayanımda azalmaya neden olmaktadır.

Korhonen (2006) tarafından yapılan çalışma 2004 yılında yapmış olduğu çalışmasının bir devamı niteliğindedir. Bu çalışmada da önceki çalışmada kullanılan antifriz özellik gösteren katkılardan priz hızlandırıcı, korozyondan koruyucu ve akışkanlaştırıcı özelliklere sahip özel bir firma tarafından üretilen katkılar kullanılmıştır. Deneyler ise beton numuneler yerine kaba agregaya içermeyen harç numuneler üzerinde yapılmıştır. Başka herhangi bir kimyasal katkı kullanılmamıştır. Korhonen farklı katkı dozajlarının, çimento dozajlarının ve su çimento oranlarının etkilerini görmek için w/c oranları ve çimento dozajları farklı olan 5 harç hazırlamıştır. Ayrıca bu harçların katkı yüzdeleri de değiştirmiş ve her bir harçtan kontrol dâhil 9 farklı harç hazırlamıştır. Basınç dayanımı testi uygulanacak numuneler ilk dökümden yaklaşık 30 dakika sonra deney gününe kadar kür edilecekleri 20°C sıcaklık ve %90 neme sahip odalara yerleştirilmişlerdir ve testten hemen önce de 24 saat kirece doymuş suda bekletilmişlerdir. Bu deneylerde amaç katkı yüzdesinin etkisini belirlemektir. Bu sebeple soğuk ortam uygulanmamış ancak antifriz katkıların nihai basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yaklaşık %10 katkı yüzdesine kadar harç numuneler giderek daha yüksek bir dayanıma sahip olmaktadır. Ancak %10'dan sonra katkı yüzdesi arttıkça dayanımda bir düşüş gözlenmiştir.

Aşağıdaki şekilde antifriz bir beton ile antifriz içermeyen normal betonun donma noktaları arasındaki fark gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Antifriz beton ve kontrol betonunun donma noktaları (Muthing 2006).

Antifriz katkıları özellikle 90. günden itibaren daha çok etki gösteren katkılardır. Beton sıcaklığı bir kez 10°C 'nin altına düşerse hidratasyon gecikir ve dayanım kazanma hızı yavaşlar. Eğer beton sıcaklığı -10°C 'nin altına düşerse hidratasyon durur. Eğer bir kez dahi sıcaklık tekrar yükselirse hidratasyon tekrar başlayacaktır. Sonuçta betonun erken yaşta dondan korunmasını sağlayacak bir yöntem ile bütün basınç dayanımı geri kazanılabilir (Lothenbach *et al.* 2007).

Richardson (2007), soğuk havada nem içeren betonun içerisindeki saf suyun donma ve çözülmesi neticesinde tekrarlı döngülere maruz kaldığını ve bunun sonucunda dayanıklılık açısından tehlike oluşabileceğini ifade etmiştir. Döngü sayısının düşük sıcaklık değerinden daha önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu durumda nemli bir betondaki genleşme ile betona zarar verecek yani onu çatlatıp bütünlüğünü bozacak iç gerilmelerin olacağını ifade etmiştir. Donma çözülme ile ilgili problemler genellikle betonda çimento matrisinde meydana gelmektedir fakat bazı boşluklu agregalarda önemli parametrelerdendir. Richardson, boşluklu agregaların eğer genleşmeden kaynaklanan basıncı karşılayabilecek kadar yeterli dayanıma sahip olurlarsa buzun ve yeniden dağılan suyun yerleşmesi için gerekli boşluğu sağlamak maksadıyla yararlı olabileceklerini söylemiştir.

Gurley (2008) yayınlamış olduğu çalışmasında antifriz ve hızlandırıcı özellik gösteren kimyasal katkılara örnek olarak kalsiyum kloriti vermektedir. Ancak bu katkının korozyon etkisinden dolayı dozajı sınırlanmıştır. Kalsiyum klorit dışındaki antifrizlerin kullanılması daha elverişlidir.

Aggoun *et al.*(2008), erken yaşta çimento hamurunda dayanım gelişimi ve priz artışı ile ilgili bazı hızlandırıcı (*calcium nitrate, triethanolamine and triisopropanolamine*) katkıların betonda erken yaştaki dayanım gelişimi ve priz hızına etkilerini araştırmış ve iki farklı çimento kullanmıştır. O hızlandırıcı katkıları iki farklı tanımla ifade etmiştir:

–Priz hızlandırıcı (*Set accelerator*) beton karışımının plastik kıvamdan rijit (katı) duruma geçişi için başlangıç priz süresini azaltan bir katkıdır.

–Dayanım kazandıran katkı(*Hardening accelerator*) priz süresine etki etmeksizin veya etki ederek betonda erken yaştaki dayanım kazanma hızını artıran bir katkıdır.

ACI 306R (Anonymous 2010) standartlarına göre beton 3,5 MPa bir basınç dayanımına ulaşırsa donmaya karşı direnç gösterebilir. Kuzey Amerika’da yaz süresince hava sıcaklıkları 21°C ile 32°C arasında değiştiğinden beton bu basınç dayanımına 12 saat gibi kısa bir sürede ulaşmaktadır. Karışım yeterli dayanım değerine ulaşmadan beton donarsa karışımın matrisini oluşturan çimento hamurunda tamiri mümkün olmayan iç çatlaklar oluşabilir ve buda dayanımı azaltır. Ancak beton soğuk havada dökülüyorsa çoklu donma çözülme döngülerinden korunabilmesi için 24 MPa gibi daha büyük bir basınç dayanımına ulaşması gereklidir. ACI 306R (Anonymous 2010) bu süreyi kısaltmanın yollarını daha fazla çimento kullanmak, Tip III çimento kullanmak veya kimyasal katkı kullanmak olarak üç madde ile ifade etmiştir. Ancak bu uygulamalar betonun kısa bir süreliğine ılık tutabilir veya iş programında bir, iki gün kazanç sağlayabilir fakat betondaki suyun donmasını engelleyemezler. Bu durumda en iyi çözüm yalıttır. Ancak buda oldukça maliyetlidir.

ASTMC94/C94M (Anonymous 2013)’e göre 10°C’den yüksek sıcaklıklarda yerleştirilen beton daha fazla karışım suyuna ihtiyaç duyar, daha fazla çökme kaybı olur

ve çatlak oluşumuna karşı daha hassas olur. Soğuk havada beton yerleştirildiğinde düşük beton iç sıcaklığı nihai dayanımı yükselttiği için daha iyi kalitede beton elde etmeye imkân sağlamaktadır. Daha yavaş priz alma ve daha yavaş dayanım kazanma sonlandırma işlemlerini, kalıpların sökölme sürecini uzatmaktadır. Fakat özellikle hızlandırıcı ve antifriz özellik gösteren katkılar ile priz süresi hızlandırılabilir ve dayanım artış hızı yükseltilebilir.

Bir sonraki kuramsal temeller başlığı altında soğuk havanın beton özelliklerine etkileri, soğuk havada dökülen betonlarda bulunması gereken sıcaklıklar ve beton dökümü esnasında alınması gereken önlemler, kullanılan süper akışkanlaştırıcı ve antifriz katkı maddeleri ve taze ve sertleşmiş betonda donma olayının etkileri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan malzemeler, deney aletleri ve deney yöntemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise deneylerden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve bu sonuçlara ait grafikler çizilerek açıklamalar yapılmıştır. Beşinci bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Soğuk Havanın Beton Özelliklerine Etkileri

2.1.1. Soğuk havanın betonun priz süresine etkisi

Soğuk hava koşullarında üretilen ve yerleştirilen betonlar için gerekli önlemler alınmadığı takdirde bazı olumsuz durumlarla karşılaşilmektedir. Bunlar betonun priz süresinin uzaması, dayanım kazanma hızının yavaşlaması ve beton iç sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasında büyük fark olması durumunda betonda ısısal gerilmeler ve çatlaklar meydana gelmesidir.

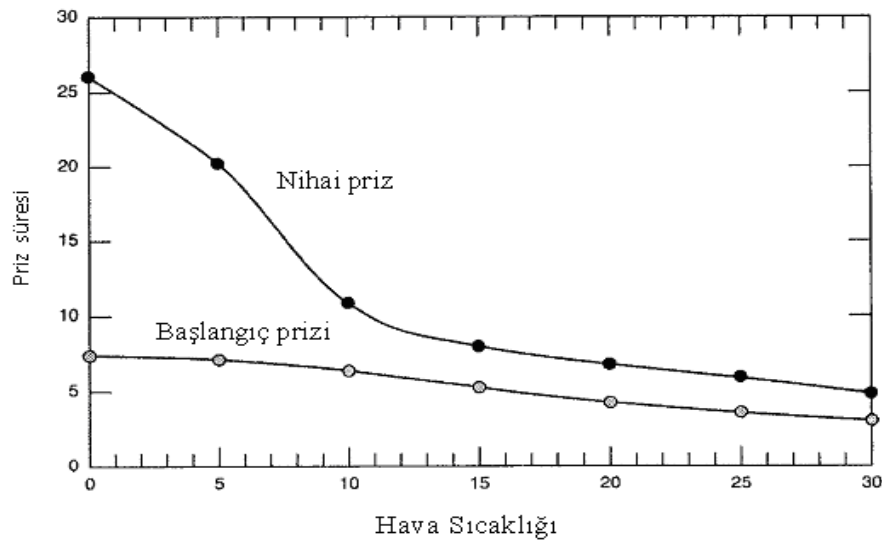
Priz alma süresi çimentonun su ile birleştirildiği an ile çimento hamurunun katılaşarak plastik özelliğini kaybettiği an arasındaki süre olarak tanımlanmaktadır. Priz alma süresi, priz başlama ve priz sona erme süresi olarak ayrı ayrı ifade edilmektedir.

Priz başlama süresi, çimentoyla suyun birleştirildiği an ile çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya başladığı an arasında geçen süredir. Priz sona erme süresi ise, çimento ve suyun birleştirildiği an ile çimento hamurunun katılaştığı an arasındaki süredir.

Soğuk hava koşullarında taze betonun priz alma süresi normal sıcaklık koşullarındaki betonun priz alma süresine göre daha uzundur. Birçok ülke standardına göre beton dökümü esnasındaki ideal sıcaklık 15-16°C ve normal olarak kabul edilen sıcaklık değeri 5°C ile 30°C veya 5°C ile 32°C arasındadır. Sıcaklığın 5°C'nin altına düşmesi durumunda beton içerisinde su ve çimento arasında kimyasal reaksiyonlar yani hidratasyon çok yavaşlamaktadır. Bu nedenle hidratasyon ürünleri arasında çimentoya ve betona bağlayıcılık sağlayan CSH jellerinin oluşumu daha yavaş yer almaktadır. Bu jellerin oluşabilmesi için beton içerisinde yeterli miktarda suyun bulunması

gereklidir. Karışım suyunun donması da betonun priz almasını önemli ölçüde engelleyecektir.

Su ve çimento arasındaki reaksiyonun sebep olduğu sertleşme yeterince tamamlandığında agrega ve çimento beraber davranır ve beton dayanım kazanmaya başlar. Neville (1988) başlangıç ve bitiş priz sürelerinin sıcaklıktaki azalmayla arttığını rapor etmiştir. Şekil 2.1 bunu gösterir. Neville'nin verileri sıcaklıktaki her 10°C'lik azalmayla priz süresindeki değişimin yaklaşık 1,5 kat olduğunu göstermektedir. Örneğin 20°C'de başlangıç priz süresi 4,25 saat iken 10°C'de başlangıç priz süresi yaklaşık 1,5 kat artışla 6,4 saattir (Korhonen 2003).



Şekil 2.1. Sıcaklık ve priz süresi arasındaki ilişki (Neville 1988)

Priz bitiş süresi düşük sıcaklıklardan daha fazla etkilenmesine rağmen perdahlama ile ilgili olarak başlangıç priz süresi daha önemlidir. Bir karışımın çok yavaş hazırlanması perdahlama ekibinin çok daha uzun süre beklemesi demektir ki bu da ilerlemeyi yavaşlatır ve yapı maliyetini artırır. Düşük sıcaklıkların sebep olduğu prizdeki yavaşlamayı engellemek için beton karışım tasarımı birkaç yolla değiştirilebilir. Beton tasarımı için etkili karışım parametreleri; çimento tipi, incelik, w/c oranı ve çimento miktarıdır. Bu parametrelerin bir veya birkaçı değiştirilerek priz süresini hızlandırmak

amacıyla erken yaşta ısı miktarı ve hız beraber artırılabilir. Çizelge 2.1 bu parametrelerin betonun priz süresini nasıl değiştirdiğinin bir örneğidir.

Çizelge 2.1. 307 kg Portland çimentosu içeren betonun priz başlama süreleri (Dodson 1994)

Çimento		İncelik Modülü		Artış Miktarı		w/c	
Tip	Saat	m ² /kg	Saat	Torba	Saat	Oran	Saat
I	4,0	435	3,6	3,75	4,8	0,58	5,2
II	4,8	322	4,0	5,9	3,9	0,54	4,7
III	3,3	556	2,8	—	—	—	—

Çimento tiplerine bakıldığı zaman Tip I den Tip III e geçildiğinde priz süresinde bir azalma söz konusu ancak Tip I den Tip II ye geçildiğinde zıt bir durum söz konusudur. Priz süresinin yaklaşık 1,2 kat arttığı gözlenmektedir. Bu sebeple Tip II çimento genellikle soğuk havada beton dökümü için tavsiye edilmez. Öyle ki bu durumda hem çimentonun priz süresi yavaşlamakta hem de inşaat süresi uzamaktadır.

Çimentonun inceliği çimento yüzey alanını değiştirmekte ve Çizelge 2.1'e göre Tip III çimento kullanıldığında çok daha etkili olabilmektedir. Özellikle en ince çimento (556 m²/kg) daha kaba taneli çimento ile karşılaştırıldığında priz süresini yaklaşık 1,3 kat azaltmaktadır (Korhonen 2003).

Son iki parametre çimento miktarının artırılması ve su çimento miktarının azaltılması priz süresini hızlandırır. Çizelge 2.1 çimento miktarında ki artışın priz süresini yaklaşık 1,1 kat artırırken w/c oranında 0,04'lük azalmanın da aynı değişimi oluşturduğunu göstermektedir. Karışım parametrelerinin birden fazlasının eş zamanlı olarak değiştirilmesi Çizelge 2.1'de gösterilmese bile düşük w/c oranı ile ekstra ince Tip III çimento kullanılması 10°C sıcaklık düşüşünden daha fazlasını telafi edebilmektedir. Bu

değişimler soğuk hava süresince yapımı hızlandırmak için yeterlidir ancak bu don sıcaklıkları süresince termal koruma ihtiyacına yeteri kadar engel olamamaktadır.

Çizelge 2.1’de gösterilmeyen ancak çimentonun hidrasyon hızını artırmak için sık sık kullanılan bir başka parametre hızlandırıcı olarak bilinen kimyasal katkılardır. ASTM C494/C494M (Anonymous 2013)’e göre 23°C’de kür edilmiş referans betonla karşılaştırıldığında bu katkılar betonun başlangıç priz süresini 3,5 saatten fazla olmamak kaydıyla en az 1 saat kadar azaltırlar. Çizelge 2.1’de Tip I çimento ile yapılmış harç örneğine bakılırsa hızlandırıcı kullanılarak priz süresindeki 1 saatlik azalmayla sanki Tip III çimentosuymuş gibi davrandığı gözükmemektedir.

2.1.2. Soğuk havanın betonun dayanım kazanma hızına etkisi

Betonun basınç dayanımı eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebildiği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Basınç dayanımı betonarme yapıların tasarlanması için betonun en önemli özelliğidir. Genellikle bu özellik, betonun yarmada çekme dayanımı, kırılma mukavemeti ve elastisite modülü gibi diğer mühendislik özelliklerinin gelişiminden de sorumludur (Garces *et al.* 1997). Betonun kritik basınç dayanımı olarak 28. gündeki basınç dayanımı esas alınmaktadır. Kür işlemi eksiksiz uygulandığı takdirde ilk 7 gün içerisinde kazanılan basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının %70’i kadar olmalıdır. Betonun dayanım kazanma hızı hidrasyon denilen çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonun gerçekleşme hızına bağlıdır. Çimentonun birleşimi ve inceliği, su/çimento oranı, mineral ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımı, betonun yerleştirildiği andaki sıcaklığı, hava sıcaklığı ve uygulanan kür yöntemi gibi birçok faktör hidrasyonu etkilemektedir.

Hava sıcaklığı yaklaşık 5°C iken yalıtım yapılması halinde beton içerisinde ısı üretimi sağlanmış olacaktır. Böylece beton iç sıcaklığının düşmesi engellenebilecek ve bu sıcaklık projenin zamanında tamamlanması için yeterli olacaktır. Hava sıcaklığı 5°C’nin altına düştüğünde ise daha ayrıntılı ve maliyeti yüksek bir ısı yalıtımı gereklidir. Beklenmeyen bir şekilde erken yaşlarda betonun donmasına neden olacak bir hava

durumu ile karşılaşıldığında suyun buza dönüşürken hacmindeki % 9'luk artış betonun tahrip olmasına neden olacaktır. (Korhonen *et al.* 2004)

NRMCA (*National Ready Mixed Concrete Association*) (1998) tarafından yayınlanan teknik bültene göre eğer plastik kıvamdaki beton sıcaklığı -4°C 'nin altına düşerse betonda bünyesindeki su donar. Bunun sonucunda beton basınç dayanımının %50'den daha fazlasını kaybeder ve dayanıklılığı da etkilenir. Düşük sıcaklık çimento hidratasyonunu etkilemekte ve dayanım kazanma hızı yavaşlamaktadır.

Donma olayı beton priz almadan gerçekleştiği zaman suyun buza dönüşmesi ile betonun hacminde bir artış olmaktadır. Suyun buza dönüşmesi ile hidratasyon için yeterli miktarda su bulunmaması neticesinde beton hem dayanım kazanamayan hem de daha büyük hacimli bir beton haline gelmektedir.

Daha sonraki zamanlarda eğer hava sıcaklığı artarsa beton içerisindeki buzun çözünmesi ile beton priz alabilmekte ve sertleşebilmektedir. Fakat bu durumda betondaki buzların erimesiyle geride bıraktıkları boşlukların hacimleri çok büyük olduğundan hidratasyon sonucunda oluşan CSH jelleri bu boşlukları yeterince dolduramamaktadır. Bu nedenle beton dayanımı az ve geçirgenliği yüksek bir beton haline gelmektedir.

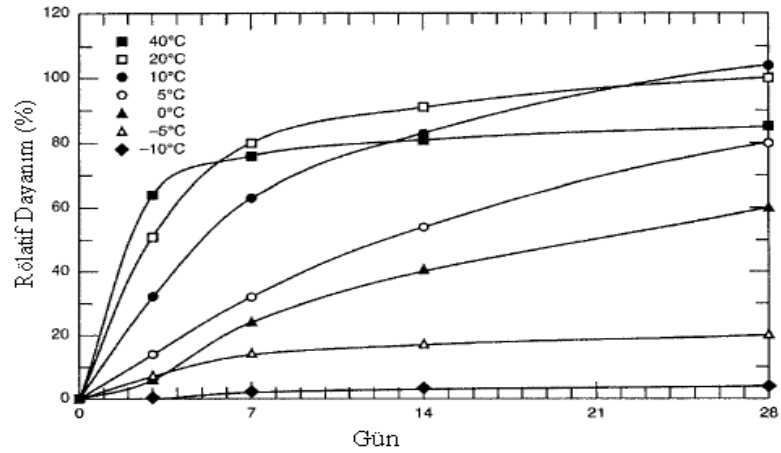
Eğer beton priz alarak sertleşmiş fakat yeterince dayanım kazanmamış iken donma meydana gelirse kapiler boşluklardaki su donmakta ve su donarken hacmindeki %9 oranında artış ile genleşme ve basınç meydana gelmekte ve betonda çatlaklar oluşmaktadır. Sonuçta düşük dayanımlı bir beton oluşmaktadır.

İlk zamanlarda meydana gelen donma neticesinde betonun yeterli dayanıklılık gösterebilmesi için beton içerisindeki suyun kritik doygunluk derecesi denilen bir seviyeye incek kadar azalmış olması gerekmektedir. Böyle bir su seviyesini tam olarak tespit etmek mümkün değildir. Bu durum ancak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Kritik doygunluk derecesinin belirlenebilmesi için betonun ilk zamanlarda kazanmış olduğu dayanım miktarının değeri araştırılmıştır.

Bu araştırma neticesinde bir kez dahi donma olayı karşısında betondahribat oluşmaması için beton dayanımının en az 3,5 MPa olması gerektiği tespit edilmiştir. Genel olarak +10°C sıcaklıkta iyi bir karışıma sahip bir beton bu değere 2 günde ulaşmaktadır.Yerine yerleştirilen suya doygun beton 24 MPa basınç dayanımına ulaşana kadar donma çözülmeden korunması gerekmektedir.

Soğuk havada yerleştirilen betonun sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki fark büyük olduğu takdirde betonda ısısal gerilmeler olmaktadır. Beton yüzeyinin hızlı soğuması veya beton dış ve iç kısımları arasında büyük sıcaklık farkı betonun çatlamasına ve dayanım kaybetmesine neden olmaktadır.

Betonun dayanım kazanma hızı inşaat süresince kalıpların sökülmesi, yeniden kullanılması ve priz süresinin tayini gibi işlemlerin nasıl hızlı bir şekilde belirlenebileceğini gösteren önemli bir özelliktir. Bu özellik hava sıcaklığı, beton iç sıcaklığı ve beton bünyesindeki çimentonun hidratasyon hızı ve derecesine bağlıdır. Kış ve yaz mevsimlerinde yapılan beton dökümleri incelendiğinde genellikle yüksek sıcaklık ile beton dayanım kazanma hızının arttığı gözlenmiştir. Bu doğrusal ilişki,betonun sıcak havada daha hızlı priz aldığı ve daha hızlı dayanım kazandığı için en iyi döküm zamanının sıcak hava olduğunu göstermektedir. Şekil 2.1 incelendiğinde 7 gün kür edilen betonlarda en iyi sonucu veren iki sıcaklık görülmektedir. Bunlar 40°C ve 20°C sıcaklıklardır. 40°C’de beton 28 günlük rölatif dayanımının %76’sını kazanırken 20°C’de %80’ini kazanmıştır. Ancak 28 günlük sürenin sonunda 40°C’de dökülen beton 20°C’de dökülen betondan %15 daha zayıftır. Buda göstermektedir ki sıcak hava aslında beton dökümü için en uygun ortam olmayabilir. Sıcak hava betonun daha hızlı dayanım kazanmasını, daha hızlı priz almasını ve daha hızlı döküm yapılmasını sağlayabilir ancak daha zayıf ve daha az durabil bir beton oluşmasına da neden olabilir. Diğer bir deyişle betonun uzun süreli dayanımı düşünüldüğünde soğuk hava faydalı olabilir. Örneğin 5°C’de kür edilen betonun dayanımı ile 40°C’de kür edilen betonun dayanımı 28 gün sonra hemen hemen eşitlenmektedir. En yüksek dayanım 10°C’de kür edilen betonun 28 günlük dayanımıdır. Bu da göstermektedir ki beton dökümü için soğuk hava en uygun zaman olabilir (Korhonen 2003).



Şekil 2.2. Sıcaklığın beton dayanım kazanma hızına etkisi

Şekil 2.2'de 20°C, -5°C ve -10°C için dayanım değerleri CREEL, 40°C ve 5°C için dayanım değerleri ACI 306 (Anonymous1988) ve 0°C için Timms and Withey (1934) çalışmasından alınmıştır (Korhonen 2003).

2.1.3. Soğuk havada üretilen ve yerleştirilen betonlarda bulunması gereken sıcaklıklar

Bir önceki başlık altında anlatılan problemleri engellemek istiyorsak 1800 mm'den daha ince kesitler için taze beton sıcaklığı 5°C'den düşük olmamalı, 300 mm'den daha ince kesitler içinde 13°C'den daha düşük olmamalıdır. Betonun yerleştirilmesi esnasında tavsiye edilen sıcaklıklar aşağıda Çizelge 2.2'de verilmiştir (Erdoğan 2007).

Çizelge 2.2. Yerleştirilme esnasında betonda bulunması tavsiye edilen minimum sıcaklıklar

Beton Kesit Kalınlığı (cm)	Yerleştirilme Esnasında Betonda Olması Gereken Minimum Sıcaklık (°C)
< 30	13
30-90	10
90-180	7
> 180	5

Betonun yerleştirilmesi esnasında bu minimum sıcaklıklara sahip olabilmesi için karıştırmanın tamamlandığı anda sahip olması gereken sıcaklıklar daha yüksektir. Çünkü betonun karıştırıldığı andaki sıcaklığı soğuk havanın etkisi ile azalmaktadır. Bu sebeple karılma sonrası tavsiye edilen sıcaklıklar Çizelge 2.3'te verilmiştir (Erdoğan 2007).

Çizelge 2.3. Karıştırılma sonrası betonda bulunması tavsiye edilen minimum sıcaklıklar

Beton Kesit Kalınlığı (cm)	Verilen Hava Sıcaklıklarında Üretilcek Beton Karışımının Üretildiği Anda Sahip Olması Gereken Sıcaklıklar (°C)		
	-18°C'den az	-18°C ile -1°C arası	-1°C'den yüksek
<30	21	18	16
30-90	18	16	13
90-180	16	13	10
> 180	13	10	7

Beton yerleştirildikten sonra soğuk havanın etkisi ile beton sıcaklığında hızlı bir düşüş gösterir. Bu yüzden betonu korumak için dökümden sonra en az ilk 24 saat hatta daha uzun koruma gereklidir. Koruma süresi sonrasında ilk 24 saat içinde betonun en çok ne miktarda sıcaklık kaybı göstermesi gerektiğine dair değerler de Çizelge 2.4'te verilmiştir (Erdoğan 2007).

Çizelge 2.4. Koruma süresi sonrası ilk 24 saat içinde betonun en çok ne miktarda sıcaklık kaybı göstermesi gerektiğine dair değerler

Beton Kesit Kalınlığı (cm)	Maksimum Sıcaklık Kaybı (°C)
< 30	28
30-90	22
90-180	17
> 180	11

2.1.4. Soğuk hava koşullarında alınması gereken önlemler

Bu hava koşullarında alınması gerekli önlemleri aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Beton karışım sıcaklığını yükseltmek için betonu oluşturan malzemelerin ısıtılarak kullanılması
- Soğuk havada dökülen betonların korunması için uygun kalıp ve yalıtım malzemelerinin ve uygun kür yönteminin uygulanması
- Betonun yeterli süre kür edilmesi
- İşin önceden planlanması ve hazırlıkların yapılması
- Betonun ilk günlerdeki dayanımını yükseltecek türde çimento ve katkı maddesi kullanmak

Burada bahsedilen kimyasal katkılar priz hızlandırıcı, su azaltıcı ve priz hızlandırıcı ve antifriz katkılardır. Antifriz katkılar suyun donma noktasını düşürdükleri için diğer katkılardan daha farklı etki gösterirler.

Birinci durumda ısıtılarak kullanılması en uygun olan malzeme sudur. Bunun nedeni suyun özgül ısısının çimento ve kumun özgül ısısından 5 kat yüksek olmasıdır. Bu uygulama esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır.

Öncelikle suyun sıcaklığı 60°C–65°C geçmemelidir. Ayrıca miksere çimentodan önce sıcak su ve iri agregâ dâhil edilmelidir. Böylece suyun derecesi bu şekilde bir miktar azaltılmış olur ve daha sonra çimento ve ince agregâ katılmalıdır.

İkinci olarak agregalar donmuş durumda değil ise veya agregâ tanelerinin arasında buz oluşmamışsa sadece suyun ısıtılması yeterli olmaktadır. Hava sıcaklığının -4°C'nin altında olduğu durumda sadece suyun ısıtılması yeterli olmamaktadır. Çok soğuk havada su sıcaklığı 60°C iken agregâ sıcaklığı en fazla 50°C–60°C olmalıdır. Agregaların ısıtılmasında genellikle buhar uygulama yöntemi kullanılmaktadır.

Soğuk havada yapılacak betonda hidratasyon ısı hızı yüksek olan ASTM Tip III-ilk dayanımı yüksek portland çimentosu veya TS'ye göre EYÇ 52.5 kullanılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca uygun katkıları kullanılarak soğuk havanın zararlı etkisi bertaraf edilebilir.

Soğuk havada dökülen betonların kalıpları yalıtım malzemeleri ile kaplanmaktadır. Yerleştirmeden hemen sonra koruma işlemine başlanmaktadır. Kalıp dış yüzeyleri battaniye, köpük, vb. örtülerle soğuktan korunmaktadır.

Yapı tamamen örtü içine alınarak dışarıdan bir ısıtıcı yardımıyla içeriye sıcak hava, buhar üflenmektedir. Uygun olan buhar üfleme türüdür. Böylece hem sıcaklık hem uygun nem sağlanmaktadır. -5°C 'nin altında ise kalıplar ısıtılmaktadır.

Soğuk havada beton yapımı esnasında taze betonun dondan korunması için bütün hazırlıklar, soğuk hava koşulları başlamadan önce yapılmalıdır. Beton dökülmeden önce betonla temas halinde olan bütün yüzeylerin kontrol edilmesi gerekir. Temas halindeki bütün yüzeylerin sıcaklıkları minimum $+2^{\circ}\text{C}$, tercihen $+10^{\circ}\text{C}$ olmalıdır.

Eğer betonun yerleştirileceği zemin buzlanmış ise zeminin üzeri dökümden iki üç gün önce uygun bir yalıtım malzemesi ile örtülmeli ve buzların çözülmesi sağlanmalıdır. Beton içinde yer alan betonarme demirleri ve diğer metalik malzemeler aşırı ölçüde düşük sıcaklıkta olmamalıdır.

Bu alınacak önlemler sayesinde erken yaştaki donmadan betonun zarar görmesi önlenir, kalıpların kaldırılması için yeterli dayanım gelişimi sağlanır, termal çatlaklar azalır (Nmai 1998).

2.2. Betonda Kullanılan Katkı Maddeleri

Beton katkı maddeleri; su, agrega ve çimento dışında betonlara çok düşük miktarda katılan organik ve inorganik kimyasal maddelerdir. Çimentonun sahip olduğu özellikleri, iyi yönde ve belirli bir ölçüde değiştirmek amacı ile beton üretilirken veya üretildikten sonra katılarak taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirirler.

Mineral ve kimyasal olarak iki guruba ayrılırlar. Kimyasal katkılar betonun akışkanlığının artırılması, erken ve yüksek dayanıma ulaşılması, geçirimsizliği ve don dayanımının sağlanması yanında priz sürelerini değiştirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar. Akışkanlaştırıcılar, uygulamada su/çimento oranını azaltarak daha yüksek dayanım kazanabilmek, kütle betonlarında hidrasyon ısını düşürmek için çimento miktarının azaltılması veya aynı işlenebilmeyi sağlayabilmek ve kolay yerleşmeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. Akışkanlaştırıcılar su içerisinde eriyen boşluklu kimyasal dizilişleri ile suyun yüzey gerilimini düşüren organik maddelerdir ve beton içine hava sürükleyerek çimentonun topaklaşmasını önleyerek etkili olmaktadır. Su indirgeyiciler negatif elektriksel yüke sahip olup, su yüzeyinde hareket etme eğilimindedirler. Su ve çimento reaksiyona girdiğinde çimento taneleri su moleküllerini çevreleyerek floküller bir yapı oluştururlar.

Suyun bu şekilde kapanması istenen akışkanlığa ulaşabilmek için daha fazla su ilavesini gerektirir. Akışkanlaştırıcı madde ilave edildiğinde çimento tanecikleri tarafından adsorbe edilerek negatif yüklü katkı partikülleriyle birleşirler ve aynı yüklü olduklarından birbirlerini iterler. Sonuçta kapanmış olan su açığa çıkar. Katkının defloküller etkisi sonunda çimento flokülleşmesi önlenmekte ve açığa su çıkmaktadır. Bu maddelerin topaklaşmayı önlemeleri ve aynı zamanda tanelerin birbiri üzerinde kaymalarını kolaylaştırarak yağlayıcı etki göstermeleri betonun iç sürtünmesini azaltmakta ve işlenebilirliği artırmaktadır. Çok düşük sıcaklıklarda yüksek kalitede beton dökümünü sağlayan özellikle hafif don halinin gün boyu devam ettiği durumlarda, gece boyunca don olması ve ani sıcaklık düşüşü beklenen hallerde, dondan koruyan katkı kullanılmaktadır. Beton antifrizi olarak kullanılan bu katkıların özeliği betonun

donma noktasını düşürmeleridir. Antifriz sıvısı olarak çoğunlukla alkol, alkol esaslı sıvılar ve etilen glikol kullanılmaktadır. Etilen glikol cinsi bir antifriz suyun içine enjekte edildiğinde oluşan çözeltinin birim yüzeyindeki su molekülü sayısı dolayısıyla da buhar faza geçen su molekülü miktarı azaltmaktadır. Kolligatif özellik olarak bilinen bu durumda suyun buhar basıncı buna paralel olarak da suyun donma noktası düşmekte, suyun buharlaşma ısısı yükselmektedir. Katkının cinsi ve miktarı donma noktasındaki değişimi etkilemektedir. Kullanılan katkının su miktarını artırmadan işlenebilirliği artırdığı, işlenebilirliği azaltmadan su miktarını azalttığı ve dona karşı dayanımı ve basınç dayanımını artırdığı belirtilmektedir. Kışın -10°C ısıya kadar beton dökümünde kalıp ve donatı suya, kara ve buza karşı korunarak gerektiğinde ısıları önceden 0°C 'ye getirilerek ve beton ısısı en az 5°C 'de tutularak kullanılması öngörülmektedir(Erdoğan 1997). İşte bu önlemleri almaksızın betonda suyun donma noktasını düşürerek etki eden antifrizlerden ikisi de bu çalışmada kullanılan üre ve kalsiyum nitrat antifriz katkılarıdır. Ancak kurallara uygun olarak üretilmeyen kötü bir beton karışımının özellikleri kimyasal katkılar kullanılarak düzeltilemez.

2.2.1. Antifriz katkı maddeleri

Antifriz katkılar suyun donma noktasını düşüren ve çimentonun hidratasyonunu hızlandıran kimyasallardır. Literatürde birçok kimyasalın hızlandırıcı olarak fonksiyon gösterdiği belirtilmektedir, özellikle kalsiyum klorit en popüler olanıdır. Isı yalıtımı veya ısı kaplamaları yerine özel kimyasal katkılar beton iç sıcaklığı suyun donma noktasının altındayken betonun dayanım kazanmasına yardımcı olmaktadır. Korhonen *et al.*(1997b) antifriz katkıların aşağıdaki şartları sağlamak zorunda olduklarını ifade etmişlerdir.

- Suyun donma noktasını düşürmek
- Düşük sıcaklıklarda betonun dayanım artışını yükseltmek
- Normal sıcaklıklarda betonun dayanım artışına olumsuz müdahale etmemek
- Betonun işlenebilirliğini korumak
- Makul bir priz süresi sağlamak

- Donma çözülmeye karşı dayanıklı bir beton üretmek
- Alkali silika reaksiyonlarına sebep olamamak
- Korozyona sebep olmamak
- Hidratasyon ürünlerini tersine değiştirmemek
- Efektif bir maliyet olması

Nmai (1998) tarafından ifade edildiğine göre Ratinove and Rozenberg 40 yılı aşkın süren deneyleri sonucunda dış ortamda hava ve zemin sıcaklığının 5°C'nin altında olduğu ve günlük ortalama sıcaklık sıfırın altında ve -30°C civarında iken Rusya'da antifriz katkı kullanımının geliştirildiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca Ratinove and Rozenberg(1989) kalsiyum nitratı bir antifriz katkı olarak sınıflandırmışlar ve RILEM tarafından kalsiyum nitrat bir antifriz katkı olarak tavsiye edilmiştir (Ramachandran 1995;Korhonen 2003).

Literatürde üre ve kalsiyum nitratın bir arada kullanımına dair bir kombinasyon Çizelge 2.5'te verilmiştir. Deneylerde kullanılan kalsiyum nitrat katkı miktarları çimento ağırlığının %6, %9 ve %12'si oranlarıdır. Çizelgelerde basınç dayanımları 28 günlük kontrol numunesinin dayanımının yüzdesi olarak verilmiştir.

Çizelge 2.5. Katkıların basınç dayanımı üzerine etkisi

Katkı kompozisyonu	Kür süresince beton sıcaklığı (C°)	Basınç dayanımı (%)			
		MPa			
		7 gün	14 gün	28 gün	56 gün
%75 Ca(NO ₃) ₂ + %25 CO(NH ₂) ₂	-10	20	35	55	70
	-15	10	25	35	50

Literatürde kullanılan katkı yüzdelere göre Çizelge 2.6, Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8'de kalsiyum nitrat ve ürenin kür sıcaklıkları ve donma noktalarına göre elde edilen basınç dayanımları verilmiştir.

Çizelge 2.6. Kalsiyum nitrat için basınç dayanım değerleri

Katkı	Çimento Ağırlığının Yüzdesi Olarak Katkı Miktarları (%)	Donma Noktası (°C)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)			
			20°C	-5°C	-10°C	-15°C
Kalsiyum nitrat	3	-5,3	114,3	3,8	3,4	3,4
	6	-6,7	107,9	3,2	3,1	1,9
	9	-8,3	96,7	6,8	6,4	5,3

Çizelge 2.7. Üre ve kalsiyum nitrat ve nitrit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları

Kullanılan Katkılar	Çimento Miktarının Yüzdesi Olarak Katkı Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (%)	Kür Süresince Beton Sıcaklığı (°C)
Kalsiyum nitrit ve üre	11	55	-15
	13	35	-20
Kalsiyum nitrat ve üre	8,8	29	-10
	9	34	-20

Çizelge 2.8. %10 Üre ve kontrol betonuna ait basınç dayanımları

Karışımlar	W/c Oranı	Beton Kür Sıcaklığı (°C)	7 günlük Dayanım(%)	28 günlük Dayanım (%)
Üre (%10)	0,45	20	86	91
		-5	62	88
		-10	17	42
		-20	0	0
Kontrol	0,39-0,48	20	100	100
		-5	9	13
		-10	1	4
		-20	0	1

Bu katkıların kullanılan çözelti konsantrasyonuna göre donma noktaları verilmiştir. Çözelti konsantrasyonları arttırılırsa donma noktaları da düşecektir. Çözelti yüzdelere göre kalsiyum nitrat ve üre için donma noktaları Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Üre ve kalsiyum nitratın yaklaşık donma noktaları

Katkı	Çözelti Yüzdeleri	Donma Noktası (°C)
Üre	31	-8,4
Kalsiyum nitrat	35	(-16)–(-18)

Korhonen and Deblasis (2008), düşük sıcaklıkta betonun kür olmasına imkân sağlayan farklı beton katkıları üzerine çalışmışlardır. Bundan başka düşük sıcaklıklarda çimentonun hidrasyon hızını artıracak ve taze betonu dondan koruyacak yeni katkılar geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu tür katkılar ilk olarak İskandinav ülkelerinde ve Sovyet Rusya’da geliştirilmiştir ve antifriz olarak isimlendirilmiştir.

Sovyetler birliği, İskandinavya, Çin ve diğer birçok ülkede suyun donma noktasını düşüren kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Bu ülkelerde birçok bileşen denenmiştir. Mironov (1977), 1950’lerde soğuk havada beton dökümü için kalsiyum ve sodyum kloritin büyük miktarda kullanıldığını rapor etmiştir. Daha sonra donatının korozyona uğramasından dolayı bu katkıların büyük bir zarar verdiği bulunmuştur. Bundan sonra kışın beton dökmeye olan ilgi uluslararası bir boyutta artmıştır. Finlandiya ve Çin gibi ülkeler önemli adımlar atmıştır. Finlandiya Sovyet literatürüne dayandırdığı 4 yıllık laboratuvar çalışmasından sonra 1985’te hazır antifriz katkılı beton karışımını pazarlamıştır (Korhonen 2003).

Antifriz katkıların iki şekilde fonksiyon gösterdiğine inanılır. Birincisi betonun sıvı fazının donma noktasını düşürmek ve ikincisi de çimentonun hidrasyonunu hızlandırmaktır. Antifriz katkılar suyun donma noktasını düşürmekte ancak bu özellik çok etkili değildir. Esas önemli etkisi yukarıda bahsedildiği gibi çimentonun hidrasyon hızını artırarak düşük sıcaklıkta dahi betonun dayanım kazanmasını sağlamasıdır. Bu katkıların nasıl etki ettiğini anlamak için normal tuz çözeltisinde buz oluşumunu anlamak gerekir. Normal bir tuz çözeltisinde soğuma esnasında oluşan buz kristalleri çözelti konsantrasyonunda bir artışa neden olurlar. Kritik konsantrasyon değerinde yani donma noktasında çözelti donar. Ratnov and Rozenberg (1989)

tarafından rapor edilen veriler göstermektedir ki verilen bir antifriz katkı için donma noktası çözelti konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Yani daha yüksek çözelti konsantrasyonu daha düşük donma noktası demektir. Bu donma noktası antifriz katkının tipine de bağlıdır. Rusya’da kullanılan bazı antifriz katkıların donmanoktaları Çizelge 2.10’da verilmiştir (Nmai 1998).

Çizelge 2.10. Rusya’da kullanılan bazı antifriz katkıların donma noktaları

Antifriz Katkı Tipleri	Çözelti Konsantrasyonu (%)	Donma Noktası (°C)
Sodyum klorit	23	-21,2
Kalsiyum klorit	31	-55
Sodyum nitrit	28	-19,6
Kalsiyum nitrat	35	-18,5
Üre	31	-8,4
Kalsiyum nitrit-nitrat	35	-29,4
Kalsiyum klorit-nitrit-nitrat	30	-48

Çizelge 2.11. Antifriz olarak kullanılan kimyasal katkılar

Katkı ismi	Sembol
Amonyum	NH ₄ OH
Kalsiyum klorit	CaCl ₂
Kalsiyum nitrat	Ca(NO ₃) ₂
Kalsiyum nitrit	Ca(NO ₂) ₂
Sodyum klorit	NaCl
Sodyum nitrat	NaNO ₃
Sodyum nitrit	NaNO ₂
Sodyum sülfat	NaSO ₄
Potasyum	K ₂ CO ₃
Üre	CO(NH ₂) ₂

Antifriz katkıların kullanımı 1950'lerden beri literatürde rapor edilmiştir. Literatür yapılan çalışmalar, kimyasal katkıların yüksek dozajda kullanılmasının taze betonun donmaya karşı belirli şartlar altında korunabileceğini göstermiştir. Bu katkılar betonun donma-çözülme dayanıklılığını artırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan antifriz katkıları Çizelge 2.11'de verilmiştir (Korhonen 2003).

2.2.2. Antifriz katkılı betonun kullanım alanları

Antifriz katkılı beton soğuk hava şartlarının uzun süreli devam ettiği mevsimlerin yaşandığı özellikle Kuzey Yarımküre ülkelerinde inşaat sezonunun uzamasına büyük ölçüde katkı sağlayacaktır. Bugün Kanada, Rusya, İskandinav ülkeleri gibi ülkelerde uygulanan bu yöntemin ülkemizde de doğu bölgelerimizde uygulanması ile zaman kayıplarının önüne geçilecektir. Antifriz katkılı beton bugün yapı sektöründe betonun kullanıldığı her alanda kullanılabilme özelliğine sahiptir. Örneğin prefabrik yapılar, hazır beton, betonarme binalar, köprüler vs.

2.2.3. Antifriz katkılı betonun mühendislik özellikleri

Antifriz katkıları betonun dayanımı, priz süresi, basınç dayanımı ve hidratasyon gelişimi gibi birçok özelliği üzerinde etki göstermektedirler. Antifriz bir beton ile:

- İnşaat sezonu 60 ile 120 gün arasında uzatılabilir.
- Doğrudan enerji tasarrufu vardır çünkü ek ısı gereksizdir.
- İnşaat teçhizatı ve iş gücü daha fazla kullanımda olacaktır.
- Mevsimlik işsizlik azalacak, işverenler hazırlık aşamasına daha fazla yatırım yapabilecekler ve böylece oluşturulan inşaat ekibi daha uzun süre çalışacak ve artan bir verimlilikte geri dönüş sağlanabilecektir.

Antifriz bir beton:

- 0°C'nin altında bir karışım sıcaklığında yerleştirilebilir ve don sıcaklıklarında yalıtımsız kür edilebilir ve aynı zamanda donma tehlikesi olmadan yeterli oranlarda dayanım kazanabilir.
- Tasarlandığından daha düşük sıcaklıklara maruz kaldığında bile bütün dayanımını kazanabilir.
- Donmuş alt tabakaların üzerine bile güvenle yerleştirilebilir.

Bir antifriz takım oluşturacak katkı kombinasyonlarının 5 amacı vardır.

- Betondaki suyun donma noktasını azaltmak,
- Buz oluşumu ile meydana gelen genleşmenin oluşturduğu basınç tehlikesinden betonu korumak,
- Hidratasyon için gerekli olan su miktarını korumak,
- Düşük sıcaklıklarda betonun dayanım artış oranını hızlandırmak,
- Betonu dona karşı korumak için gerekli su miktarını azaltmak.

Antifriz bir beton sadece yapı sektöründe değil ulaşım sektöründe de yol yapım çalışmalarında kullanılabilir. Özellikle yaz aylarında trafik yoğunluğu pik noktaya ulaştığı için bu dönemde kamunun inşaat sürecinden olumsuz etkilenmesi söz konusudur. Ayrıca çalışma alanlarında meydana gelen inşaat işlerinden kaynaklanan kaza oranları da antifriz katkı sayesinde çalışma saatleri daha geç saatlere bırakılarak azaltılabilecektir (Korhonen *et al.* 2004).

2.2.4. Antifriz katkıların gömülü donatı üzerine etkileri

Normal şartlar altında beton karışımı içerisindeki çimento donatıyı korozyona karşı koruyacak bir alkali ortam sağlar. Ancak bu alkali özelliği bozacak herhangi bir şey nem ve oksijenin bulunduğu ortamda çelik donatıyı korozyona açık hale getirmektedir. Korozyonun başlaması için karbondioksit ve klorit iki ana etkindir. Korhonen (2003) yaptığı çalışmada antifriz katkılardan kalsiyum klorit ve sodyum kloritin korozyona sebep olduğunun bilindiğini ifade etmiştir. Ancak 1979 yılında *The Low Temperature*

Building Sciences Institute of China kuruluşu sodyum nitritin çimento ağırlığının en az %4,4'ü kadar kullanıldığı zaman korozyon inhibitörü olarak etki ettiğini ortaya koymaktadır. Eğer betonda gömülü donatıda lokal bir paslanma meydana gelirse bu durum bütün donatıda olan paslanmadan daha tehlikelidir. Çünkü belirlenmesi daha zordur ve donatı üzerinde küçük bir alan korozyondan etkilenirse dayanım kaybı daha hızlıdır. Kalsiyum nitrit klorit iyonlarının korozyon etkisini engellemektedir (Virmaniet al. 1983; Virmani 1988). Antifrizlerin korozyon üzerindeki etkileri Çizelge 2.12'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Antifriz katkıların gömülü donatı korozyonuna etkileri

Antifriz Katkı İsimleri	Korozyon Etkisi
NaNO_3	Korozyona neden olmaz
NH_4OH	Korozyona neden olmaz
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Korozyona neden olmaz
K_2CO_3	Korozyona neden olmaz
NaSO_4	Korozyona neden olmaz
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Korozyona neden olmaz
$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, NaNO_2 , NaOH	İnhibitör
NaCl	Korozyona neden olur
CaCl_2	Korozyona neden olur

2.2.5. SAK maddesi

Bu katkı maddesi ile ilgili ayrıntılı bilgi Materyal ve Yöntem kısmında sunulmuştur.

2.2.6. Priz hızlandırıcı katkıları

Antifriz katkılardan kalsiyum nitrat aynı zamanda priz hızlandırma özelliğine sahip olduğu için bu tür katkıları hakkında genel bir açıklama sunulmuştur.

Priz hızlandırıcı katkıları, priz sürelerini kısaltmak, erken basınç ve çekme dayanımlarını arttırmak için kullanılır. Priz hızlandırıcı katkıları, çimento ve su arasındaki reaksiyonu hızlandırarak agregayı birbirine bağlayan jel oluşum hızını artırır. Jel oluşumu sırasında hidrasyon ısılarının açığa çıkması nedeni ile soğuk havada beton don etkisinden korunmuş olur.

Priz hızlandırıcı katkı sınıfında yer alan ani priz yapıcı katkıları ile betonda erken yüksek dayanımlara etkili olan katkıların özellikleri farklıdır. Ani priz yapıcı katkıları daha çok püskürtme betonlarda kullanılır. Bu tür katkıları, çimentonun C_3A grubu ile reaksiyona girerek ani hidrasyon oluşumu sağlar ve priz alma üzerinde etkili olur. Betonda erken dayanımlara ve don etkilerine dayanım sağlayan katkıları ise çimentonun C_3S grubu ile reaksiyona girerek erken priz alma ve dayanım artışına etkili olurlar (Nmai 1998). Prizi hızlandıran belli başlı maddeler şunlardır:

- Bütün klorürler, özellikle $CaCl_2$, $NaCl$, NH_4Cl
- Alkali bazlar, $NaOH$, KOH , NH_3
- Alkali tuzlar, Na_2CO_3 gibi
- Sodyum fluo silikat (Na_2SiF_6)
- Kalsiyum nitrat ($CaNO_3$) ve kalsiyum nitrit ($CaNO_2$).

Prizi hızlandıran maddeler arasında en çok kullanılanı kalsiyum klorürdür ($CaCl_2$). Bu maddenin genellikle çimento ağırlığının en fazla %2'si oranında karma suyuna katılarak kullanılması önerilir. $CaCl_2$, prizi hızlandırmakla veya başka bir deyimle priz süresini kısaltmakla beraber betonların başlangıçtaki dayanımlarını artırır. Dayanımdaki artış ilk günlerde büyük iken zaman ilerledikçe azalır. En sonunda katkılı ve katkısız betonların dayanımında bir fark kalmaz. $CaCl_2$ 'ün kullanılması halinde, hidrasyon olayı hızlandığından, hidrasyon ısı belgin bir artış gösterir. Bu özellikten dolayı soğuk havada beton dökümü bir miktar $CaCl_2$ kullanılmasıyla gerçekleşebilir. Bu maddenin % 2 oranından daha fazla kullanmasının şu sakıncaları vardır.

- Betonun r tmesini artırır.
- Betonun içinde bulunan donatıların korozyonuna neden olur. Bu zararlı etkisinden dolayı betonarme yapılarda CaCl_2 % 1 oranından daha fazla kullanılmamalıdır. Aynı nedenden bu katkı maddesinin  n gerilmeli beton yapılarda kullanılması yasaklanmıştır.
- CaCl_2 rutubet çekici bir maddedir. Bu bakımdan yapıların rutubetli olmasına neden olur. Kalsiyum klorür, betonun sülfatlı suların etkisi altında bulunması ve bir alkali-agrega reaksiyonunun meydana gelmesi olasılığının var olması hallerinde kullanılmamalıdır.

CaCl_2 için belirttiğimiz yukarıdaki hususlar daha az  l de olmak üzere diğ r klorürler ve prizi hızlandıran diğ r maddeler için geçerlidir (Korhonen 2003). Priz hızlandırıcı katkılar, genellikle; erken ve yüksek dayanım istenen yapı betonları, prefabrik beton üretiminde, soğuk havada betonu don etkisinden korumak için, tünellerin (püskürtme) kaplamalarında, boşluklar, şevler, yüzme havuzları, beton tamirleri, dolgu ve kazılarda, galeriler ve benzeri yerlerde ani destekleme yapar. Islak ve nemli yüzeyle kaplama yapımında, su geçirmezlik istenen yerlerde kullanılır.

Taze Betona Etkisi: Priz hızlandırıcı katkılar,  imentonun C_3S grubu üzerinde etkili olarak hidrasyon sırasında reaksiyon hızını artırır. Bu şekilde betonun priz alma süresini kısaltır. Kullanılan priz hızlandırıcının kimyasal bileşimine bağlı olarak %5-%7 su kesme özelliği de vardır.

Sertleşmiş Betona Etkisi: Betonda erken dayanımlar üzerinde etkili olur. Nihai dayanımlara herhangi bir etkisi olmaz (Nmai 1998).

2.3. Donma-  z lme

Soğuk iklim koşullarında betonun kalıcılığını tehdit eden en önemli etkenlerden biri donma-çözülme olayıdır. Birçok  lke standardına göre, beton dökümü esnasındaki ideal sıcaklık $15-16^\circ\text{C}$, ve normal olarak kabul edilen sıcaklık 5°C ile 30°C veya 32°C arasındadır. Sıcaklığın $+5^\circ\text{C}$ 'nin altına düşmesi durumunda, beton içerisindeki  imento

ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar çok yavaşlamaktadır. Ayrıca soğuk havada yerleştirilen betonun sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasında büyük fark olması nedeni ile de betonda ısısal gerilmeler oluşmaktadır. Beton yüzeyinin hızlı soğuması veya betonun dış kısımları ile iç kısımları arasında büyük sıcaklık farkı olması, betonun çatlamasına yol açmaktadır.

Bu konuda geçmişte öne sürülen iki hipotezden ilki 1940'lı yıllarda Powers tarafından öne sürülen hidrolik basınç hipotezidir. İkincisi ise 1950'li yıllarda Powers ve Helmuth tarafından ortaya konulan difüzyon hipotezidir. Birinci hipotezde suyun boşluk dışına itilmesi söz konusu iken, ikinci hipotezde henüz donmamış suyun buzlanmanın başladığı boşluk içerisine çekilmesi söz konusudur. Her iki hipotezde de betonun zarar görmesi don olayından kaynaklanmaktadır. Betondaki donma çözülme olayı taze betonda ve sertleşmiş betonda ayrı ayrı incelenmelidir.

2.3.1. Taze betonda donma–çözülme

Taze beton üretiminde buzlanma etkisi suya doymuş toprak üzerindeki don etkisine benzer. Beton karıştırıldıktan sonra hemen don etkisine maruz kalırsa su donarken hacmi artar. Beton henüz plastik kıvamda olduğu için buzun boşluklara hareketine engel olmaz. Buz oluşumu sonucunda taze beton bünyesinde katı parçacıkların hareketi ile kütle transferi olur. Su beton bünyesinde yeniden dağılıp, buz kütesinin büyümesini sağlar.

İri agrega tanelerinin özgül ağırlıkları betona kıyasla büyük olduğundan, ısıyı çimento harcından daha iyi iletir. Beton donmaya başlayınca agregalar daha çabuk soğur. Düşük sıcaklıklardaki bölgelerde su daha soğuk olan agregalara doğru hareket eder. Agregaya yüzeyine ulaşan su donup büyüyen bir su filmi tabakası oluşturur. Buz filmi genişince agrega ile çimento arasındaki fiziksel bağ kopar. Aderansın kaybolması ile agrega taneleri çimento matrisinden ayrılır. Hafif betonda boşluklu agrega kullanıldığı için suyu emer ve böylece normal betona göre tahribat daha düşük olur.

Donan taze betonda hidrasyon için gerekli su azalır ve betonun prizinin geciktiği hatta ani donmalarda tamamen durduğu gözlenir. Bu nedenle -12°C hatta bazı araştırmalara göre -10°C 'den düşük sıcaklıklarda dayanım kazanmadığı kabul edilir. Hava sıcaklığı yükselmeye başlayınca, buzlar çözülür ve hidrasyon kaldığı yerden devam eder. Buz tarafından tutulmuş hava kabarcıklarının salınması ile taze betonda boşluklar oluşur. Böylece betonun homojenliği ve aderans özellikleri bozulur. Beton yeniden karılmadığı ve sıkıştırılmadığı zaman mekanik ve kalıcılık özellikleri çok düşük olur.

Donmanın taze betonda oluşturduğu olumsuz etkileri azaltmak için kullanılacak malzemelerin nitelikli olması ve beton tasarımının doğru yapılması gerekir. Çizelge 2.13 beton numunelerinin dondan zarar görmemesi için önerilen kür sürelerini göstermektedir (Erdoğan 2007).

Çizelge 2.13. Donmanın taze betona zarar vermemesi için gerekli beton yaşı

Çimento Tipi	W/c Oranı	Kür Sıcaklığına Bağlı Olarak Taze Betonun Don Etkisinden Zarar Görmemesi İçin Gerekli Süre (saat)			
		5°C	10°C	15°C	20°C
Normal Portland	0,4	35	25	15	12
	0,5	50	35	25	17
	0,6	70	45	35	25
Hızlı Dayanım Kazanan portland	0,4	20	15	10	7
	0,5	30	20	15	10
	0,6	40	30	20	15

2.3.2. Serleşmiş betonda donma-çözülme

Sertleşmiş beton ve suya doygun bir beton don etkisinde kalınca, kapiler boşluklardaki su donar ve genişir. Çözülme takip eden yeniden donma sonucunda genişleme miktarı kümülatif olarak artar. Bu nedenle donma-çözülme olaylarının etkisi, çözülmenin oluşmadığı uzun süreli don etkisine kıyasla daha kuvvetlidir. Sertleşmiş betonda suyun donması sırasında iki hidrolik basınç kaynağı oluşur. İlki suyun donup yaklaşık % 9 oranında genişmesi, böylece boşluklardaki fazla suyun dışarı çıkmaya çalışması ile

oluşan hidrolik basınçtır. İkincisi ise jel boşluklarından difüzyon yoluyla çıkan suyun küçük buz kütlelerine dönüşümüdür.

Betonun donmaya karşı dayanıklılığı üzerinde en önemli iki etken betonun boşluk yapısı ve kritik doygunluk derecesidir. Beton bünyesinde çimento hamurunda jel boşlukları, hapsolmuş veya sürüklenmiş hava boşlukları ve kapiler boşluklar bulunmaktadır. Betonun dona karşı dayanımından bahsedilirken muhakkak donmaya eğilimli su tanımının iyi anlaşılması gerekmektedir. Çünkü beton bünyesindeki bütün su donma eğiliminde değildir. Bunun nedeni ise hidratasyon reaksiyonu ile oluşan kristal yapı sayesinde boşluk hacminde azalma meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar neticesinde çimento hamurunda oluşan jel boşluklarındaki su ancak -90°C 'ye yakın sıcaklıklarda donmaktadır (David 2001). Bu sıcaklık ACI 306R (Anonymous 2010) tarafından -78°C olarak ifade edilmiştir. Bu boşluklar 15-20 A° boyutundadır. Daha büyük çaptaki sürüklenmiş ve hapsolmuş hava kabarcıkları ve kapiler boşluklardaki su normal suyun donma noktasına yakın bir sıcaklıkta yani 0°C civarında donmaktadır (Erdoğan 2007). Bu boşlukların miktarını ve yapısını etkileyen en önemli faktör w/c oranıdır. Düşük w/c oranı daha az kapiler boşluk anlamına gelmektedir. Bu durum betonun donmaya karşı direncinin artması anlamına gelmektedir. İkinci bir faktör ise çimento hamurunun yaşıdır. Su miktarı yüksek olan betonda ilk başlarda serbest su miktarı daha fazla olduğu için ve bu su daha büyük boşluklarda yer aldığından beton donmaya karşı daha hassastır. Böylece zaman ilerledikçe betonun donmaya karşı hassasiyeti de azalmaktadır.

Kritik doygunluk değeri altında beton donmaya karşı oldukça dayanıklıdır. Yani beton doymuş hale gelmedikçe donma-çözülme olayından zarar görmesi beklenmez. Doygunluk seviyesi betonun donma çözülmeden zarar görüp görmediğini belirleyen ikinci önemli etkidir. Eğer boşluk hacminin sadece yarısı suyla doluysa boşluk sınırlarındaki geçişler dikkate alınmaksızın su donarken çimento hamuru zarar görmeyebilir. Aslında esas tehlike suyun bir boşluktan diğerine yani donmanın olduğu yere bir kuvvetle taşınmasıdır (David 2001).

Agreganın soğuk havada beton dökülürken doygun olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, kusurlu tanelerin, özellikle iri, yassı tanelerin varlığı dona karşı dayanıklılığı azaltmaktadır. Bu tür agregaların soğuk havada beton dökümünde kullanılmaması gerekir. Çünkü bu tanelerin altında su dolu hava cepleri oluşabilir.

Prizini almış ancak yeterli dayanıma ulaşmamış betonda serbest suyun donması neticesinde oluşan genleşme kuvvetleri taneler arası kohezyonu bozar (Kayyali *et al.* 1979). Çimento hamuru bu kuvvetlere direnecek dayanıma ulaşamadığı için betonun içyapısı bozulur ve dayanım kayıpları meydana gelir (Ortiz *et al.* 2005). Bu durumda sürüklenmiş hava boşluklarının da bir etkisi yoktur (Kewalramani and Gupta 2005).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Agregal

Deneylerde agregal malzemesi olarak Erzurum ili sınırları içinden temin edilen doğal dere agregası kullanılmıştır. Agregalar kullanımdan önce uygun tane sınıflarına ayrılmış, yıkanmış ve kurutulmuştur. Bu agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzemelerin çeşitli özellikleri tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. İnce agregal için 0-2 ve 2-4, iri agregal için ise 4-8 ve 8-16'lık tane sınıfları oluşturulmuştur.

3.1.2. Karışım suyu

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. Beton üretiminde kullanılan sular TS 3440(Anonim1982)'ye uygun olmalı ve genelde içilebilir nitelikte olmalıdır. Çalışmada karışım suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır

3.1.3. Çimento

Bu çalışmada, Ankara-Set Çimento Fabrikası'nın üretmiş olduğu PÇ 42.5 R kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Özellikler	Sonuçlar	TS EN 197-1 Standart Değerleri
		En çok (max)
Kızdırma Kaybı, (%)	2,03	5,00
Çözünmeyen kalıntı, (%)	0,25	5,00
Klorür, (%)	0,0102	0,10
SiO ₂ (%)	20,54	-
Al ₂ O ₃ (%)	5,12	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3,69	-
CaO (%)	62,98	-
MgO (%)	1,70	-
SO ₃ (%)	2,88	-
Ana Bileşenlerin Oranları (%)		
C ₃ S	53,2	
C ₂ S	16,7	
C ₃ A	7,6	
C ₄ AF	10,7	

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	Sonuçlar	TS EN 197-1 Standart Değerleri	
		En az (Min)	En çok (Max)
2 Günlük Basınç Dayanımı, (MPa)	27.9	20.0	-
7 günlük Basınç Dayanımı, (MPa)	44.9	-	-
28 Günlük Basınç Dayanımı, (MPa)	55.9	42.5	62.5
Priz Başlangıcı, (dk)	170	60	-
Bitiş Priz Süresi (dk)	230	-	-
Hacim Genleşmesi, (mm)	1	-	10
Özgül Yüzey, (cm ² /gr)	3285	-	-
Özgül ağırlık	3,17	-	-

3.1.4.SAK maddesi

SAK maddesi olarak Sika firmasının ürettiği Sikament F 05 W adlı ürün kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı özellik sağlayan beton katkısıdır. Bu katkı çimento kütlelerinin %0,5'i oranında kullanılmıştır. Bu ürün özellikle mükemmel akışkanlık istenen beton karışımlarının üretimi için uygundur. Bu katkının özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Kullanım alanları:

- Döşeme, temel ve saha betonlarında
- Perde kiriş ve kolonlarda
- İnce ve sık donatılı betonarme elemanların üretiminde
- Hazır beton üretiminde

Çizelge 3.3.SAK maddesinin özellikleri

Adı	Sikament F 05 W
Kimyasal yapı	Modifiye polimer esaslı sıvı
Renk	Açık kahverengi sıvı
Yoğunluk (kg/L)	1.18–1.22 kg/l
PH değeri	4–8
Alkali Miktarı (%Na₂O eşdeğeri olarak)	En fazla %7
Suda çözülebilir klorür yüzdesi	Maksimum %0,1, klorür içermez
Prize etkisi	Belirtilen dozajların üstünde kullanıldığında priz uzatır.
Donma noktası	-10 C°
Dozaj	Tavsiye edilen katkı dozu bağlayıcı ağırlığının %0,5'i ile %1,5'i arasındadır.

3.1.5. Kalsiyum nitrat antifriz katkı maddesi

Deneylerde kullanılan kalsiyum nitrat miktarları çimento ağırlığının %6, %9 ve %12'si kadardır. Antifriz bir katkının suyun donma noktasını düşürmesi dışında bir fonksiyonu da portland çimentosunun hidratasyonunu hızlandırmasıdır. Erken yaşta betonda dayanım gelişimindeki herhangi bir artış kür süresini ve betonda tasarım dayanımına ulaşmak için gerekli olan periyodu kısaltmaktadır. Özellikle kalsiyum nitrat antifriz özelliği ile birlikte hızlandırıcı niteliğe de sahiptir. Kalsiyum nitrat prizın ilk iki aşamasına etki ederek priz süresini hızlandırır ve dayanım kazanma hızını artırır.

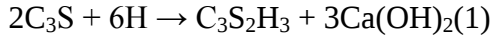
Justnes (2005) yaptığı çalışmasında kalsiyum nitrat katkısı beton karışımlarında:

- Priz hızlandırıcı olarak,
- Plastikleştirici olarak,
- Uzun süreli dayanım artışı için,
- Antifriz katkı veya soğuk havada beton dökümü katkısı olarak,
- Çelik donatı korozyonuna neden olan klorit iyonlarına karşı inhibitör olarak kullanılmakta olduğunu ifade etmiştir. Bu özelliklere bakılarak kalsiyum nitrat için çok fonksiyonlu bir beton katkısı olduğu söylenebilir.

3.1.6. Üre antifriz katkı maddesi

Bu çalışmada kullanılan üre miktarları çimento ağırlığının %6, %9 ve %12'si kadardır. Antifriz özellik göstermesinin yanında üre katkısı beton bünyesindeki su ile endotermik bir reaksiyon gösterdiği için beton sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca üre ile su arasındaki reaksiyon neticesinde oluşan karbonik asit CH ile reaksiyona girdiği için betonun hidratasyonunu, priz süresini ve dayanıklılığını etkiler (Mwaluwinga *et al.* 1997). Hidratasyon reaksiyonları incelendiği zaman üretilen CH miktarı, karbonik asitle reaksiyona giren CH miktarından daha düşüktür. Bu durumda CH miktarı kademeli olarak azalmaktadır. Bunun sonucunda beton dayanımında düşüş oluşabilmektedir (Mwaluwinga *et al.* 1997).

Hidratasyon reaksiyonları



(100) (24) (75) (49)



(100) (21) (99) (22)

Üre ve su arasındaki reaksiyonlar



100) (60) (103) (57)



(100) (119,4) (161,3) (58,1)

3.1.7. Diğer malzemeler

Sertleşmiş beton numunelerin başlıklanmasında kükürt ve numunelerin kalıplardan kolayca çıkmasını sağlamak için kalıplarda ince motor yağı kullanılmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.2.1. Elekler

Deneylerde TS ISO 3310-2 (Anonim 2009)'a uygun 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

3.2.2. Betonyer

ELE firmasının ürettiği 135° açı yapacak kadar manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dk karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır.

3.2.3. Kalıplar

Silindir şeklinde 10x20 cm boyutlarında pvc kalıplar kullanılmıştır.

3.2.4. Dondurucular

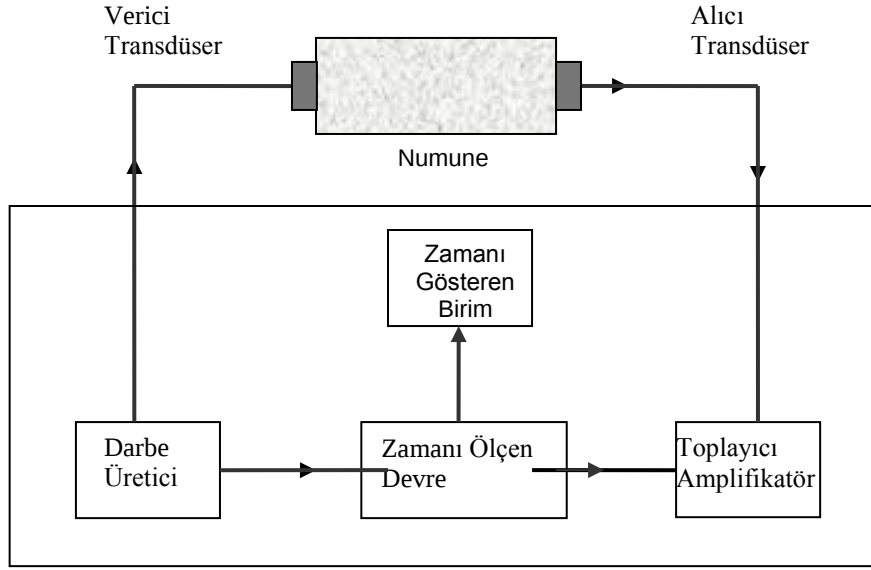
Dört farklı sıcaklık için üç adet 500 L hacminde ve bir adet 282 L hacminde dondurucular kullanılmıştır. Önceden istenen sıcaklık değerleri ayarlandıktan sonra numuneler kalıplarıyla donduruculara yerleştirilmişlerdir.

3.2.5. Pres

Bu çalışmada sertleşmiş beton deneylerinde numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen pres kullanılmıştır.

3.2.6. Ultrason ses hızı ölçüm cihazı

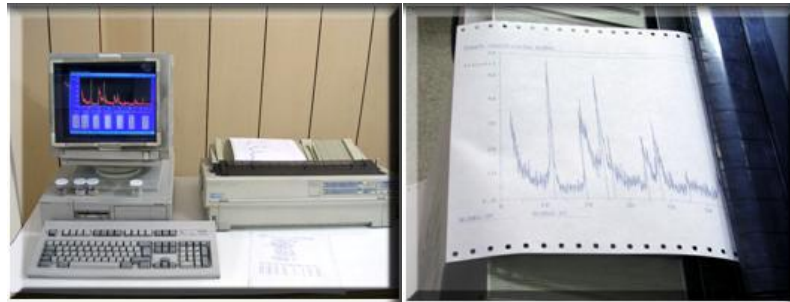
Bu cihaz, ultrasonik ses dalgaları üreterek, bu dalgaları numuneye gönderip, numunenin sonunda dalgaların alınmasına kadar geçen süreyi ölçmektedir. Beton numunenin bir yüzeyinden gönderilen ultrasonik ses dalgaları beton içinde boşluklara rastlarlar. Bu boşluklara gelen ses dalgalarının hızı azalır. Bu durum beton dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. Ultrasonik hız ölçümleri, Atatürk Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında bulunan dijital ultrasonik hız ölçme aleti ile yapılmıştır. Hız ölçümleri her grup için üç numune üzerinde tatbik edilmiştir. Ultrasonik hızın tespiti yapılırken numunenin ölçüm yapılacak başlıkları temizlenmiştir. Test aletinin iletken başlıklarına ultrason jeli sürülmüş ve her bir numune için yapılan okumaların ortalaması alınmıştır. Bu cihaz ile numunelerin 3, 7, 14, 28, 56 ve 90. günlerde ve 365 gün sonra UPV ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.1. UPV cihazının şematik görünümü

3.2.7. XRD cihazı

Plazma ile nitrülenmiş, Ti-DLC kaplanmış ve dubleks yüzey işlemi uygulanmış 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı yüzeyinde oluşan fazlar $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-Ka kullanılarak Rigaku-2200D/Max XRD cihazı vasıtasıyla belirlenmiştir. Elde edilecek sonuçlar JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) pik listeleri ile karşılaştırılarak oluşan fazların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir. Şekil 2.1’de XRD cihazı ve yazıcısı görülmektedir.



Şekil 3.2. XRD cihazından veri elde edilmesi

3.2.8. SEM cihazı

Numunelerin içyapısı, yüzey görünümü, aşınma izleri, korozyon sonrası yüzey görüntüsü ve yorulmuş malzemelerin kırılma yüzeyleri Jeol 6400 SEM kullanılarak incelenmiştir. Elektron mikroskobu 300.000 kata kadar büyütme kapasitesine sahiptir. Elektron mikroskobu ile incelenmeden önce numuneler görüntü kalitesini artırmak için 90 saniye süre ile Au-Pt ile PVD metodu ile kaplanmıştır.

SEM cihazı numunenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçmek için odaklanmış elektron demetini tarar ve bu elektron demetinin numune ile etkileşiminden kaynaklanan sinyalleri ölçer. Bu cihazla parlatılmış yüzeyler faz dağılımı ve kimyasal bileşimi belirlemek için kullanılırken, elde edilen topoğrafik görüntüler parçacık boyutu, şekli, yüzey pürüzlülüğü ve çatlak yüzeyleri incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu iki şekilde elde edilen görüntüler iki farklı elektron mikroskobu ile elde edilmektedir. Bunlardan birincisi bu çalışmada kullanılan SEM, diğeri BEI tekniğidir. Gerek ayırım gücü (*resolution*), gerek odak derinliği (*depth of focus*) gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir. Taramalı elektron mikroskobu üzerinde bulunan fotoğraf ünitesi ile ekranda incelenen görüntünün fotoğrafı alınabilmekte, elde edilen diğer ölçüm sonuçları ve analiz grafikleri ile birlikte anlaşmazlıkları sonuçlandırmakta somut veri olarak kullanılmaktadır (Flegler *et al.* 1993) .

3.3. Yöntem

Bu bölümde; agrega granülometrisi belirleme yöntemi, parametreler ve kodlama, karışım hesapları, beton üretimi, agrega deneylerinde uygulanan yöntemler, taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri anlatılmıştır. Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3.3.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

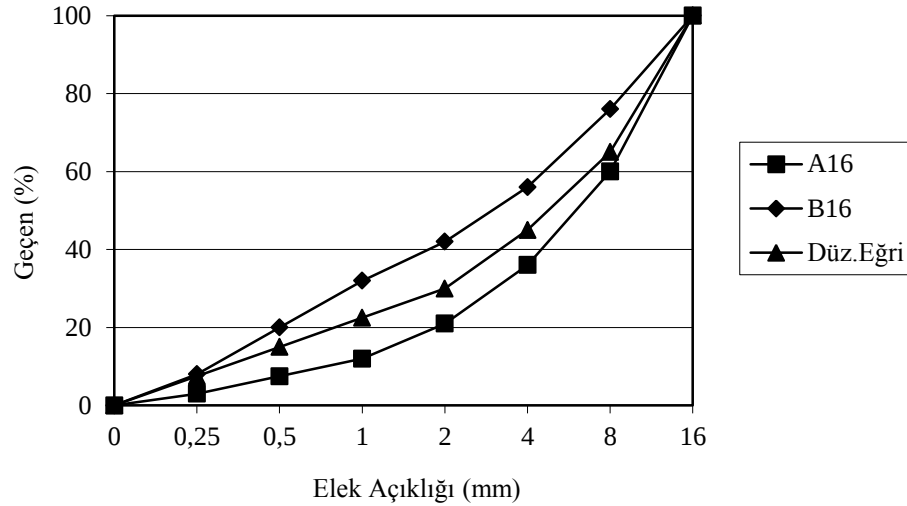
Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agregada deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Dere agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1 (Anonim 2007)'ye göre belirlenmiştir. Organik madde tayini deneyi TS EN 1744-1 (Anonim 2011)'e göre, ince madde oranı tayini deneyi TS EN 933-10 (Anonim 2010)'a göre, özgül ağırlık ve su emme deneyleri ise TS EN 1097-6/A1 (Anonim 2007)'ye göre yapılmıştır.

Agregalar yıkanıp kurutulmalarına rağmen agregaların organik madde içeriği TS EN 1744-1 (Anonim 2011)'e göre, basit bir asit-baz reaksiyonu ile belirlenmiştir. Konsantrasyonu %3 olan NaOH çözeltisi ile karıştırılan agregada, 24 saat bekletildikten sonra suyun rengi esas alınmıştır. Kullanılan agregalar üzerinde ayrı ayrı yapılan deneylerde, malzeme üzerinde kalan sıvılarda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Böylelikle çalışmada kullanılan agregaların beton üretimi için uygun olduğu gözlenmiştir.

3.3.2. Granülometri eğrisinin belirlenmesi

Granülometri eğrilerinin standart limitlerin dışına çıkmasının üretilen betonlarda istenmeyen sonuçları ortaya çıkarabileceği düşüncesiyle deneylerde dere agregası doğal haliyle kullanılmamış, bunun yerine standart limitler arasına düşürülen ayarlanmış tek tip granülometri eğrisi kullanılmıştır. Agregada için elde edilen granülometri eğrisi TS 802 (Anonim 2009)'da verilen standart eğrilerle birlikte Şekil 3.3'te verilmiştir. Karışımdaki malzeme miktarları, karışıma ağırlık olarak konularak deney numuneleri üretilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 16 mm olarak alınmıştır. Agreganın tane dağılımı ise en büyük tane çapına bağlı olarak TS 706 EN 12620+A1 (Anonim 2009)'da verilen sınır değerler içinde kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarlama sonucu tane sınıflarının oranları, 0–2 mm tane sınıfı için %30, 2–4 mm tane sınıfı için %15, 4–8 mm tane sınıfı için %20, 8–16 mm tane sınıfı için %35 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3 incelendiğinde seçilen bu eğri de TS 706 EN

12620+A1 (Anonim 2009)'da, maksimum tane çapı 16 mm için verilen standart eğrilerde uygun bölge (3. bölge)'ye düşmektedir.



Şekil 3.3. Doğal agreganın düzeltilmiş granülometri eğrisi

3.3.3.Karışımlara ait kısaltmalar

Çalışmada tek tip agregası kullanılmıştır. ERÇİMSAN'dan alınan dere agregası kullanılmıştır. Yine çalışmada tek tip çimento kullanılmıştır. Kodlama esnasında çimento ve agregası tek tip olduğu için yazılmamıştır. Kontrol karışımı için K sembolü kullanılmıştır. %6 üre kullanılan karışım için (Ü.1), %9 üre kullanılan karışım için (Ü.2), %12 üre kullanılan karışım için (Ü.3) kodları kullanılmıştır. %6 kalsiyum nitrat kullanılan karışım için (C.1), %9 kalsiyum nitrat kullanılan karışım için (C.2), %12 kalsiyum nitrat kullanılan karışım için (C.3) kodları kullanılmıştır. Üre ve kalsiyum nitratın bir arada kullanıldığı karışımlara ise %3 üre+%3 kalsiyum nitrat kombinasyonu için (Ü.C.1), %4,5 üre+%4,5 kalsiyum nitrat kombinasyonu için (Ü.C.2), %6 üre+%6 kalsiyum nitrat kombinasyonu için (Ü.C.3) kodları kullanılmıştır. Kür ortamı olarak seçilen 6 farklı ortam mevcuttur. Bunlardan -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C ortamları için herhangi bir kodlama yapılmamıştır. Dış ortam için (D) kodu belirlenmiştir. Örneğin

Ü.1: %6 üre içeren numune, C.2.D: %9 kalsiyum nitrat içeren ve dış ortamda bırakılan numune anlamına gelmektedir.

3.3.4. Beton karışımlarının belirlenmesi

Beton karışım hesabı; istenen kıvam, işlenebilme, dayanım, dayanıklılık, hacim sabitliği ve diğer aranan özelliklere sahip en ekonomik betonu elde etmek amacıyla gerekli agrega, çimento, su, hava ve gerektiğinde katkı maddesi miktarlarını tespit etmek için yapılan hesaptır. Beton karışım hesaplarının amacı, sonunda elde edilecek, yerine dökülmüş 1 m³ beton için gerekli bileşenlerin önceden tahmin edilmesidir.

Uygulamada genellikle en büyük tane boyutlu 16 mm olan agrega için kum yüzdesi, kuru gevşek hacim esasına göre, %40 ile %60 arasında olmalıdır. İnce agrega olarak doğal kum kullanıldığında, kumun kuru gevşek hacminin toplam agreganın %40'ının üstüne çıktığı enderdir. Agreganın en büyük tane boyutu azaldıkça ince agrega oranı artar.

Üretilen betonlarda dozaj sabit 400 kg/m³ alınmış olup, w/c oranı 0,40 olarak seçilmiştir. Ayrıca karışımlarda çimento ağırlığının %0,5'i kadar SAK kullanılmıştır. Karışımlarda, karışımındaki toplam çimento ağırlığının %6, %9, %12'si kadar üre ve kalsiyum nitrat kullanılmıştır. İki antifriz katkının beraber kullanıldığı karışımda katkı oranları %3 üre+%3 kalsiyum nitrat, %4,5 üre+%4,5 kalsiyum nitrat, %6 üre+%6 kalsiyum nitrat olarak uygulanmıştır. Ayrıca mukayese amaçlı olarak aynı dozaj ve aynı w/c oranına sahip kontrol numuneleri üretilmiştir. Böylelikle toplam 10 grup karışım yapılmıştır.

3.3.5. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı

Karışım hesaplarına göre beton numuneler üretilmiştir. Beton karışımları için malzeme miktarları ağırlık olarak alınmıştır. Karışımlar hazırlanırken laboratuvar tipi bir betonyer kullanılmıştır. Betonyer kullanılmadan önce iyice temizlenmiş ve nem kaybına karşı

ıslatılmıştır. Betonyere her seferde bir gruptaki 15 numune için, olabilecek kayıplar da göz önüne alınarak yeterli gelecek miktarda malzeme (25dm^3) konulmuştur. Yaklaşık 5 dakikalık bir karıştırma süresi sonunda elde edilen karışım, içi önceden yağlanmış olan 10×20 cm PVC kalıplara dökülmüştür. Döküm üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Her aşamada kalıba dökülen malzeme karışımı 25 defa şişlenerek sıkıştırılmış ve böylelikle boşluklar giderilmeye çalışılmıştır. Üçüncü aşamada sıkıştırma işleminden sonra tokmak kullanılarak kalıp içindeki karışım iyice sıkıştırılmıştır. Tokmak ile yapılan bu işlem betonun kalıba daha iyi oturmasını sağlamak içindir. Betonun yerine yerleştirilmesinin akabinde mala ile üst yüzeyleri düzeltilmiştir. Donduruculara yerleştirilecek numuneler dökümden hemen sonra kalıpları ile birlikte başka hiçbir koruma olmaksızın 4 farklı sıcaklıktaki donduruculara konulmuşlardır. Ayrıca dış ortama konulan numuneler de kalıpları ile birlikte beton bir zemin üzerine yerleştirilmişlerdir. Bir gün sonra alt yüzeyleri de açılmıştır. Numunelerin üst yüzeyleri yağın kardan hidratasyon reaksiyonunun etkilenmemesi için ince bir naylon örtü ile kapatılmıştır. Bu naylon örtü yalıtım etkisi oluşturacak bir özelliğe sahip değildir. Dondurucuların sıcaklıkları daha önceden ayarlanmış ve istenen sıcaklığa ulaşım ulaşmadığı üzerlerindeki dijital göstergeden ve ayrıca başka bir termometre yardımı ile de dondurucunun içinden kontrol edilmiştir. Üç günün sonunda bütün numunelerin kalıpları sökülerek UPV deneyleri yapılmıştır. UPV değeri ölçülen numune derhal dondurucuya geri yerleştirilmiştir. Ayrıca XRD ve SEM deneyleri için 1×1 cm boyutlarında harç örnekleri dökülmüştür. Bu numunelerde dökülür dökülmez donduruculara yerleştirilmişlerdir. Su kürüne yerleştirilecek numunelerin üst yüzeyleri naylon örtü ile kaplanarak laboratuvar ortamında 1 gün süreyle bekletilmiştir. Daha sonra bu numunelerin kalıpları sökülerek, kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığı $(23 \pm 1,7)^\circ\text{C}$ olan kür havuzuna konulmuştur. Üçüncü günün sonunda ilk UPV ölçümleri yapılmış ve her numune kendi kür ortamına yerleştirilmiştir. Her grubun numuneleri 7, 14, 28, 90 gün kürde kaldıktan sonra çıkarılarak, bir ile iki gün süreyle laboratuvar ortamında bekletildikten sonra, sırası ile UPV ve basınç dayanım testlerine tabi tutulmuşlardır. Dondurucularda uygulanan 90 günlük kür sürelerinin sonunda 660 numunenin kalan 180 tanesitoplamda 365 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında bekletildikten sonra UPV ve basınç dayanım testleri uygulanmıştır. Bu numuneler laboratuvar ortamında kalıpları olmadan bekletilmişlerdir. Ek su kürü uygulamak için dökülen 600 numuneye

de kür sürelerinin sonunda aynı işlemler uygulanmıştır. UPV ve basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.6. Beton karışım hesapları

Karışım hesapları yapılırken TS 802 (Anonim 2009)'dan yararlanılmıştır. Deney karışımlarında dozaj sabit olup, hava hacmi %2 olarak alınmıştır (hava sürüklenen betonlar hariç). Bu değerler 1 m³'den çıkarılarak toplam agregaya hacmi bulunmuştur. Elde edilen agregaya hacmi tane sınıflarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Karışıma giren agregaların ağırlıkları bulunurken; Hacimler özgül ağırlık ve nem yüzdeleri ile çarpılmıştır. Özgül ağırlık ve nem yüzdeleri iri ve ince tane sınıfları için ayrı ayrı bulunmuştur. Karışım hesaplarını gösteren Çizelge 3.9 aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.4. w/c oranı 0,40 olan 1m³ beton için karışım oranları

Özellikler	Kontrol	Ü.1	Ü.2	Ü.3	C.1	C.2	C.3	Ü.C.1	Ü.C.2	Ü.C.3
w/c oranı	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Çimento (kg)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Su (kg)	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
SAK (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SAK (kg)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Doğal Agregaya (kg)	0-2 mm	498	485	478	470	487	482	478	485	480
	2-4 mm	256	249	247	247	251	249	247	252	250
	4-8 mm	352	344	338	335	344	343	340	345	340
	8-16 mm	638	622	613	605	625	621	615	626	618
Katkı Miktarları(kg)	-	24	36	48	24	36	48	24	36	48
Toplam (kg/m ³)	2306	2286	2274	2267	2293	2293	2290	2294	2286	2280

3.3.7. Beton dökülmesi

K karışımı ve 9 antifriz karışımından oluşan 10 farklı grup hazırlanmış ve 2010 yılında ilk etapta 360 numune, ikinci etapta ise 300 numune olmak üzere toplamda 660 adet numune dökülmüştür.

İlk hazırlanan 360 numunenin 240 tanesi dondurucularda bekletilmiş, 60 tanesi dış ortamda soğuk havaya maruz bırakılmış ve 60 tanesi de su kürüne tabi tutulmuştur. Her bir grup için dondurucuda, su küründe ve dış ortamda bekleyen numunelerin 3 tanesi üzerinde 90 günlük basınç deneyleri yapılmıştır. Yani toplamda 180 numune üzerinde 90 günlük dayanımlar ölçülmüştür. Kalan 180 numunenin 150 tanesi laboratuvar ortamında, 30 adedi ise dış ortam koşullarında bir sene bekletilmiştir. Daha sonra her bir gruptan 30 adet olmak üzere ek 300 adet daha numune dökülmüştür. Bu numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Toplamda her bir gruptan 66 adet olmak üzere 660 adet beton numunesi dökülmüştür. Ayrıca her grup için, her bir ortamda (su kürü ($23 \pm 1,7$)°C, -5°C, -10°C, -15°C, -20°C ve dış ortam) 3'er numune üzerinde 3, 7, 14, 28, 56, 90 ve 365 günlük UPV ölçümleri yapılmıştır. SEM ve XRD deneyleri için 1×1cm boyutunda harç numuneler dökülmüştür. Kontrol numunesinin -5°C, -10°C, su kürü ($23 \pm 1,7$)°C ve dış ortam için 3 günlük SEM görüntüleri elde edilmiştir. Yine kontrol karışımının -10°C ve dış ortam için 28 günlük SEM görüntüleri elde edilmiştir. %6 üre içeren karışımın -5°C, -10°C, -15°C, -20°C ve dış ortam için 3 günlük SEM görüntüleri çekilmiştir. %9 üre içeren karışımın -5°C, -10°C, -15°C, su kürü ve dış ortam için 3 günlük SEM görüntüleri çekilmiştir. %12 üre içeren antifriz karışımın -5°C, -10°C ve -15°C için 3 günlük SEM görüntüleri elde edilmiştir. %12 kalsiyum nitrat içeren karışımın -5°C, -10°C ve dış ortam için 28 günlük SEM görüntüleri elde edilmiştir. Kontrol ve %6 üre içeren karışım için 3 günlük XRD verileri elde edildi. %9 ve %12 üre içeren iki karışım için 7 günlük XRD verileri elde edildi. %9 ve %12 kalsiyum nitrat içeren karışımların 7 günlük XRD verileri elde edildi. Kontrol numunesi, %9 kalsiyum nitrat ve %12 kalsiyum nitrat için 28 günlük XRD verileri elde edilmiştir.

Ayrıca ek su kürünün etkisini görmek amacıyla K, Ü.1, C.1, Ü.C.1 ve Ü.C.2 grupları için dört farklı sıcaklığında (-5°C , -10°C , -15°C ve -20°C) 30'ar tane olmak üzere toplamda bir grup için 120 adet numune dökülmüştür. Bu numuneler 7, 14 ve 28 gün dondurucularda bekletildikten sonra yine 7, 14 ve 28 günlük ek su kürüne tabi tutulmuşlardır. Kür sürelerinin sonunda ise önce UPV sonra basınç dayanım testi uygulanmıştır. Toplamda 1260 adet numune dökülmüştür.

3.3.8. Taze beton deneyleri

Taze betonda çökme ve taze birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Çökme deneyinin yapılmasında standartlarda belirtilen çökme hunisi kullanılmıştır. Çökme yöntemi ile kıvamı belirlenen taze beton tekrar harmana karıştırılmıştır. Ayrıca taze birim hacim ağırlığının belirlenmesi için karışım ile doldurulmadan önce deney kabının ağırlığı tartılmıştır. Daha sonra her karışımı için deney kabı karışımla doldurulmuştur. Doldurma işlemi üç tabaka halinde yapılmış olup, her tabakada şişleme çubuğu ile 25 defa sıkıştırma yapılmıştır. Doldurma işlemi bittikten sonra kalıpların yüzeyleri mala ile düzeltilmiş ve tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Toplam ağırlıktan kabın darası çıkarılıp kap hacmine bölünerek taze birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Deney sonuçları ise 4. Bölümde verilmiştir.

3.3.9. Sertleşmiş beton deneyleri

Dökülen numuneler üzerinde basınç dayanımı, UPV deneyleri uygulanmış, XRD grafikleri ve SEM görüntüleri elde edilmiştir.

3.3.9.a. UPV deneyleri

Numunelerin 3, 7, 14, 28, 56, 90 günlük ve 1 yıllık UPV değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerden elde edilen değerler ve bunların yorumları 4. bölümde sunulmuştur. UPV deneylerinde, laboratuvarımızda mevcut dijital ultrasonik hız ölçme aleti kullanılmıştır. Hız ölçümleri her grup için üç numune üzerinde yapılmıştır. UPV tespiti yapılırken

numunenin ölçüm yapılacak başlıkları bir fırça ile temizlenmiştir. Daha net ve doğru sonuçlar elde etmek için test aletinin başlıklarına ultrason jeli sürülmüş ve her bir numune için en az beş okuma yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. UPV ölçümleri ASTM C597 (Anonymous 2009)'daki esaslara göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında sunulmuştur.

3.3.9.b. SEM deneyleri

Bu SEM cihazı günümüzde birçok alanda malzemelerin içyapısına dair bilgi elde etmek amacıyla kullanılan bir cihazdır. Burada da betonun hidratasyon gelişimine dair bilgi edinebilmek için bu yöntem kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen görüntüler 4. Bölümde sunulmuştur. Bu görüntülere ait değerlendirmeler yine aynı bölümde yapılmıştır.

3.3.9.c. XRD deneyleri

Maddelerin çoğu doğada bileşik halinde bulunur. Maddeler üzerinde inceleme yapılırken bazen maddelerin bileşik haldeki durumu, bazen de onu oluşturan elementleri bilmek gerekir. X-ışınları ile nitel analiz sonucu örneği oluşturan bileşikler formülleri ile tespit edilebilir. X-ışınları yöntemi, maddelerin yapısını araştırmak için kullanılan bir yöntemdir. Diğer kimyasal yöntemlere göre, bazı üstünlükleri vardır. Çabuk olması, çok küçük bir örneğe ihtiyaç göstermesi ve örneğe zarar vermemesi bunlardan bazılarıdır. Bu deneylerin sonuçları 4. Bölümde sunulmuştur.

3.3.8.d. Basınç deneyleri

Basınç dayanımı testi 7, 14, 28 ve 90 ve 365 gün sonra yapılmıştır. Ayrıca 7, 14 ve 28 günlük dondurucularda bekletilen numunelere uygulanan 7, 14 ve 28 günlük ek su kürleri sonunda da basınç dayanımı testi yapılmıştır. Deneyler 100×200 mm'lik silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. İlk olarak kalıplarından çıkarılan numunelerin her iki yüzeyine yükün bütün alana eşit dağılmasını sağlamak ve birbirlerine paralel ve silindir

eksenine dik pürüzsüz yüzeyler elde etmek amacıyla kükürtten başlık tabakası yapılmıştır. Bu işlemten sonra kükürdün sertleşmesi için numuneler standartlara göre üç ile dört saat laboratuvar ortamında bırakılmış sonrasında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deney 300 ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiş olup yükleme hızı, TS EN 12390-3 (Anonim 2003)'e göre tüm numuneler için aynı olmak üzere, 2,70 kgf/cm²/salmıştır. Bu değer cihazın numune boyutlarına göre atadığı otomatik bir değerdir. Numune kırıldığında presin dijital göstergesinden kırılma yükü ve basınç dayanımı değerleri okunmuştur. Sonuçlar her grup için üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak 4. bölümde verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde agrega ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Kontrol karışımı ve farklı oranlarda üre ve kalsiyum nitrat kullanılarak üretilen toplam 10 farklı taze beton karışımının çökme miktarları ve taze birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca bu karışımların basınç dayanımı, UPV, SEM ve XRD deneyleri yapılmış ve kontrol numuneleri ile karşılaştırmak suretiyle elde edilen sonuçlar literatür doğrultusunda değerlendirilmeye çalışılmıştır.

4.1. Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular

Beton agregalarında, kilgibi ince maddelerin fazla miktarda olması, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına ve çimentonun prizini geciktirmesine neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Dere agregası elendikten sonra ince ve iri kısımları için ayrı ayrı yapılan bu deneyde bulunan ortalama sonuçlar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu deneyde iri agrega için yıkama yöntemi, ince agrega için ise çökeltme yöntemi kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili standartlar ile karşılaştırıldığında kullanılan agregalarda betona zarar verecek oranda ince taneli malzeme bulunmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. İnce agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları

Deney numunesinin				
Agrega Sınıfı	Numunenin Kuru Ağırlığı (w), g	24 saat sonra Çökelen Malzeme Yüksekliği (h), cm	Ölçü Silindiri Kesit Alanı (A) (cm ²)	İnce Malzeme Oranı (%) $m=(0,9.A.h/w).100$
0-2	1000	0,4	30,68	1,11
2-4	1000	0,01	30,68	0,03
TS 706 EN 12620+A1 (2009)’e göre beton agregalarında ince madde oranı, ince agrega için %4’ten küçük olmalıdır.				

Çizelge 4.2. İri agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları

Deney Numunesinin			
Agrega Sınıfı	Deney Öncesi Kuru Ağırlığı (W₁) (gr)	Deney Sonrası Kuru Ağırlığı (W₂) (gr)	İnce Madde Oranı (%) $m=(w_1-w_2)/w_1.100$
4-8	2000	1996	0,20
8-16	5000	4994	0,12
TS 706 EN 12620+A1 (Anonim 2009)'a göre beton agregalarında ince madde oranı, iri agrega için %2'den küçük olmalıdır.			

Dere agregası için özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. TS EN 1097-6/A1 (Anonim 2007)'ye göre yapılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deney sonuçları

Özellik	Agrega Sınıfı (mm)			
	0-2	2-4	4-8	8-16
Kuru özgül ağırlık	2,37	2,41	2,49	2,59
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık	2,40	2,47	2,54	2,63
Görünen özgül ağırlık	2,46	2,57	2,62	2,70
Nem oranları, (%)	-1,27	-1,20	-1,95	-1,93

4.2.Taze Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular

4.2.1. Çökme deneyi

Yöntem kısmında açıklanan şekilde çökme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir. SAK'ın her karışımında sabit tutulması ile katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Üre ve kalsiyum nitrat içeren bütün

karışımların çökme değerleri kontrol numunesinden daha yüksektir. Ayrıca üre ve kalsiyum nitrat katkılarının her ikisinin de miktarları arttıkça işlenebilirlik yükselmektedir. Üre ve kalsiyum nitrat katkılarının kombinasyon halinde kullanıldığı karışımların işlenebilirlikleri diğer karışımlardan daha yüksektir. Bunun temel sebebi üre katkısının süper akışkanlaştırıcı gibi etki gösterip karışımın işlenebilirliğini arttırmasıdır. Mwaluwinga *et al.* (1997) ürenin beton özellikleri üzerine çalışmış ve betonun işlenebilirliği üzerinde aynı sonuçları bulmuştur. Mason (1997) tarafından ifade edildiği gibi antifriz katkıları ile artan çökme değeri betonun kalıplara kolaylıkla yerleştirilmesini ve şişlenmesini ve taşınmasını sağlamaktadır. Özellikle soğuk hava şartları altında hava sıcaklıklarının düşük olduğu akşam saatlerinde, işlenebilirlik betonun sahaya taşınması ve sahada priz almadan önce yerleştirilmesi ve vibrasyonu açısından oldukça önemli bir özelliktir (Mason 1997).

Çizelge 4.4. Karışımların çökme değerleri

Gruplar	Çökme (cm)
K	4
Ü.1	12
Ü.2	18
Ü.3	22
Ü.C.1	16
Ü.C.2	22
Ü.C.3	22
C.1	6
C.2	12
C.3	18

4.2.2. Taze birim hacim ağırlık

Üre ve kalsiyum nitrat içeren karışımların hepsinin taze birim hacim ağırlıkları kontrol karışımından daha düşüktür. Bütün karışımlarda katkı oranları arttıkça taze birim hacim ağırlık değerleri azalmaktadır. Daha hafif bir beton elde edilmektedir. Buda binaya gelen yükü azaltmaktadır. Çünkü bu katkıları beton karışımının kıvamını arttırmaktadır.

Çizelge 4.5. Karışımların taze birim hacim ağırlıkları

Gruplar	Taze Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)
K	2306
Ü.1	2286
Ü.2	2274
Ü.3	2267
Ü.C.1	2294
Ü.C.2	2286
Ü.C.3	2280
C.1	2293
C.2	2293
C.3	2290

4.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular

4.3.1. Basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Bütün karışımlar için üretilen numunelerden bir grup dökülür dökülmez -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C sıcaklıktaki donduruculara yerleştirilerek 7, 14, 28 ve 90 gün süreyle kür edilmiştir. Bir grup ise laboratuvar ortamında bir gün süreyle bekletilerek kalıpları sökülüp 7, 28 ve 90 günlük su kürüne yerleştirilmiştir. Diğer bir grup ise Erzurum açık hava şartlarında 90 gün ve 1 yıllık süreyle dış ortama yerleştirilmiştir. Üç gün sonra dış ortam ve dondurucularda bekletilen numunelerin kalıpları sökülerek tekrar kür ortamlarına yerleştirilmişlerdir. Kür sürelerinin sonunda numunelerin basınç dayanım testleri yapılmıştır.

4.3.1.a. Ortam sıcaklığının 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına etkisi

- **K karışımına ait 7, 14, 28 ve 90 günlük dondurucu kürü**

Çizelge 4.6’da K karışımının basınç dayanım değerlerinin ortam sıcaklığı ve su kürünün etkisiyle nasıl değiştiği gösterilmiştir. Çizelge 4.6 incelendiğinde ortam sıcaklığının

azalması ile beton numunenin 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmektedir. Örneğin 7 günlük K karışımı suda kür edilen aynı kür süresinde K karışım ile karşılaştırıldığında -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C kür ortamları için sırasıyla %79, %79, %81 ve %82 oranında basınç dayanım kaybı söz konusudur. 28 günlük K karışımı aynı kür süresinde standart su kürü uygulanan K karışım ile karşılaştırıldığı zaman -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C için basınç dayanımlarında sırasıyla %92,5, %97, %98 ve %100'lük bir kayıp vardır. Korhonen (2003) yapmış olduğu çalışmada aynı durumu ifade etmiştir. Görüldüğü gibi dondurucudaki kür süresi arttıkça basınç dayanım kaybı da artmaktadır. Bunun muhtemel nedeni taze halde iken suya doygun olan numunenin bünyesindeki suyun donması neticesinde meydana gelen %9'luk hacim artışı sonucunda betonda oluşan iç gerilmelerdir. Çünkü bu iç gerilmeler sebebiyle çatlaklar meydana gelmekte, homojen yapı bozulmakta, bütünlük kaybı ve porozite artışı oluşmakta ve böylece beton basınç dayanımı azalmaktadır.

Çizelge 4.6. K karışımına ait basınç dayanımları (Kısaltmalar için 3.3.3'e bakınız)

Karışımlar	K (-5°C)	K (-10°C)	K (-15°C)	K (-20°C)	KSu Kürü	K.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	7,92	7,81	6,97	6,55	37,96	-
Veriler (14 gün) Maksimum Gerilme MPa	7,56	3,42	4,02	3,67	-	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	3,12	1,31	0,88	Veri Yok	41,05	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	14,90	10,76	9,10	8,51	48,95	21,31
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	18,37	17,03	15,03	14,56	48,82	27,08

Beton dökümden hemen sonra donma ve çözülmeye maruz kalıyorsa, kalıplar söküldükten sonra beton karışımının tasarım dayanımının en az %70'ini kazanması gerekmektedir (Ramachandran 1995). Oysa elde edilen basınç dayanımından anlaşıldığı

gibi -5°C 'de 7 günlük K karışımı 7 günlük su küründeki K karışımının basınç dayanımının yaklaşık % 21'ini kazanabilmiştir. Ayrıca -5°C 'de 28 günlük K karışımı 28 günlük su küründeki aynı karışımın basınç dayanımının sadece %7'sini kazanabilmiştir. Hatta -20°C için 28 günlük basınç dayanımı 0 MPa olmuştur. Su küründe ise dayanım kazanmaya devam etmiş ve 90 gün sonunda 41,05 MPa'a ulaşmıştır. Sürekli don etkisiyle beton prizi gecikmiş ve dayanım kazanma hızı yavaşlamıştır. Sıcaklık azaldıkça bu etki daha fazla gözlenmiştir. Çünkü dayanım kazanma hızı hidratasyon derecesine, hidratasyon hızına ve kür sıcaklığına bağlı bir fonksiyondur.

90 günlük basınç dayanımları incelendiği zaman dört farklı sıcaklık, su kürü ve ek olarak dış ortama maruz kalan numunelere ait basınç dayanım değerleri gözlenmektedir. Dış ortamda soğuk havaya maruz kaldıkları süre içinde en yüksek ve en düşük hava sıcaklıkları takip edilmiştir. Bu veriler EK 2'de sunulmuştur. Daha önce belirtildiği gibi kar yağdığında hidratasyonun etkilenmemesi için numunelerin üst yüzeyleri naylon bir örtü ile kapatılmıştır. Çünkü kar eriyip suya dönüştüğünde oluşan su, suyun varlığında beton ömrü boyunca devam eden hidratasyon reaksiyonu için temel maddedir (Oeswein 2000). Ancak bu örtü çok ince ve sadece o yüzeyi kapatacak kadardır. Numuneyi soğuktan koruyacak bir yapıda değildir. Hava sıcaklığının sürekli değiştiği dış ortamda K.D karışımının 21,31 MPa olan 90 günlük basınç dayanımı, aynı kür süresindeki sürekli donmanın olduğu -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında elde edilen basınç dayanımlarından sırasıyla %43, %93, %134 ve %150 kadar daha yüksektir. Sürekli don etkisinden dolayı -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında beton basınç dayanımları olumsuz yönde etkilenmektedir. Dış ortamda ise hava sıcaklığı gündüzleri artmakta ve betonun kendini yenileyebilmesini sağlamaktadır.

K karışımının sürekli don etkisiyle, 28. güne kadar kür süresi uzadıkça basınç dayanımı azalmıştır. Ancak 90. günden sonra karışımın dayanımında bir artış söz konusu olmuştur. Örneğin -5°C 'de 28 günlük basınç dayanımı 3,12 MPa iken 90 günlük basınç dayanımı 14,90 MPa olmuştur. Aradaki artış oranı %377 kadardır. 90. günden sonra oluşan bu artışın nedeni beton bünyesindeki jel boşluklarında var olan suyun donmamış

olması ve böylece çok yavaşta olsa hidratasyonun devam etmesidir. Korhonen (2003) yapmış olduğu çalışmasında aynı durumdan söz etmektedir.

Krylov *et al.* (1979), beton bünyesinde oluşan buz kristallerinin oluşumunda, homojen bir şekilde dağılımında, kristal şekillerinde ve buz plaklarının oluşumunda soğuma hızının rol oynadığını ifade etmiştir. Yavaş soğumanın hızlı soğumadan daha zararlı olabileceğini ifade etmiştir. Bu durumu beton bünyesinde bulunan suyun göç etmesine bağlamıştır. Ona göre yavaş soğumada su göçü hızlı soğumadan çok daha belirgindir. Çünkü yavaş soğuma esnasında beton bünyesindeki su, betona zarar verebilecek buz tabakasına doğru hareket etmek için zaman kazanmaktadır. Yani hızlı soğumada, su olduğu yerde donmakta ve tahribat azalmaktadır (Korhonen 2003). Bu sebeple K karışımına ait Çizelge 4.6 incelendiğinde -15°C kür sıcaklığında elde edilen 14 günlük basınçdayanımının, -10°C 'de elde edilen dayanımdan daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

- Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait 7, 14, 28 ve 90 günlük dondurucu kürü

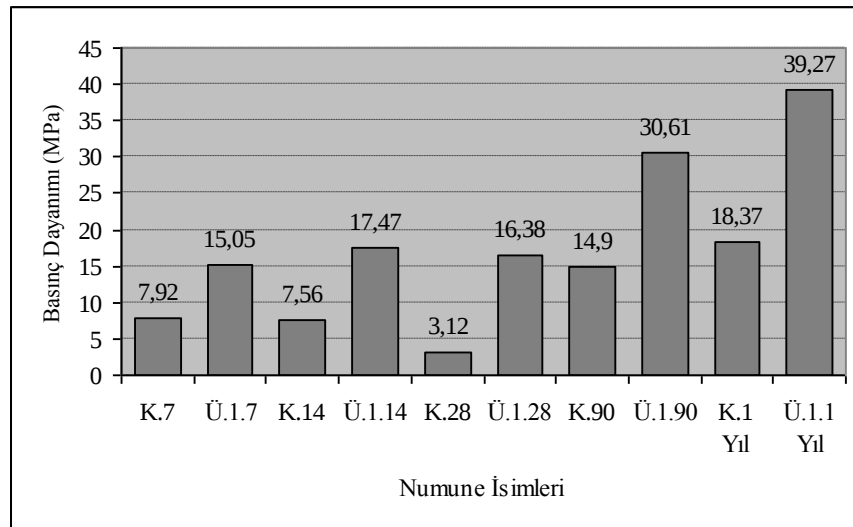
Çizelge 4.7. Ü.1 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	Ü.1 (-5°C)	Ü.1 (-10°C)	Ü.1 (-15°C)	Ü.1 (-20°C)	Ü.1Su Kürü	Ü.1.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	15,05	7,36	3,55	5,65	34,08	-
Veriler (14 gün) Maksimum Gerilme MPa	17,47	12,83	9,16	7,81	-	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	16,38	6,95	2,48	2,10	39,52	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	30,61	15,48	8,13	5,98	52,40	50,35
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	39,27	24,27	15,15	14,14	61,40	50,55

Bu çalışmada Ü.1 karışımı için kullanılan üre antifriz katkısının karışım suyu içindeki çözelti yüzdesi %13'tür. Bu çözelti yüzdesinde donma noktası Ramachandran (1995) tarafından ifade edildiğine göre $-4,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Dolayısı ile bu sıcaklığın altındaki kür sıcaklıklarında basınç dayanımı giderek azalmıştır.

7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık kür süreleri için sıcaklık azaldıkça basınç dayanımları da azalmıştır. Çizelge 4.7 incelendiğinde Ü.1 karışımının 7 günlük basınç dayanımları aynı kür süresi için su küründeki basınç dayanımından -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C için sırasıyla %56, %78, %89 ve %83 daha düşüktür.

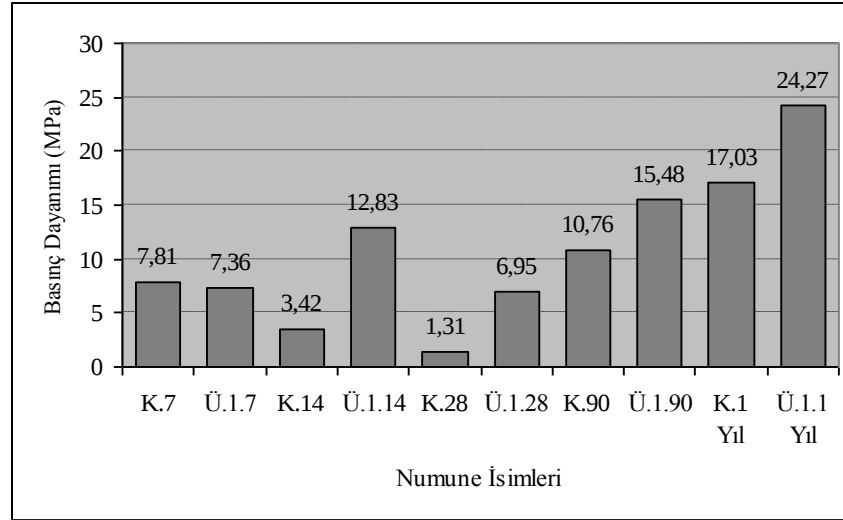
28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında elde edilen basınç dayanımlarının, aynı karışımın 28 günlük su küründe elde edilen basınç dayanımından sırasıyla %58, %82, %93 ve %94 daha düşük olduğu görülmektedir. İlerleyen süreçte özellikle 90. günden sonra -5°C 'de Ü.1 karışımının basınç dayanımı 30,61 MPa'a ulaşmıştır. Bu durum hamur fazındaki jel boşluklarında bulunan suyun varlığı ile hidratasyonun devam ettiğinin göstergesidir.



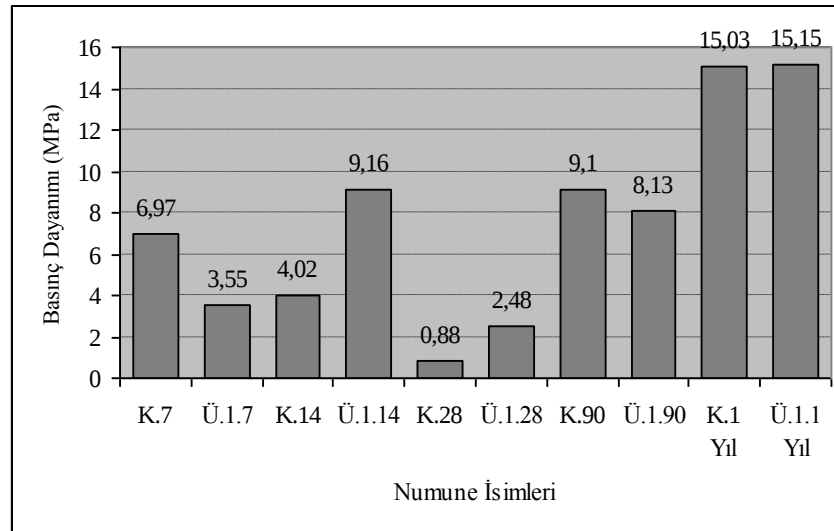
Şekil 4.1. -5°C 'de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-5°C’de K ve Ü.1 karışımı için Şekil 4.1’de 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanım test sonuçlarına bakılırsa bu sıcaklıkta Ü.1 karışımının basınç dayanım değerleri K karışımının değerlerinden daha yüksektir. -5°C’de Ü.1 karışımının 7 günlük basınç dayanımı, aynı sıcaklıktaki K.1 karışımının 7 günlük 7,92 MPa değerindeki basınç dayanımından %90 daha fazladır. Buna göre -5°C’de Ü.1 karışımı, 7 günlük suda kür edilen K karışımının basınç dayanımının %39’unu kazanmıştır. Bu durum antifriz katkının soğuk havada betonun dayanım kazanmasına imkân sağladığının göstergesidir. -5°C’de Ü.1 karışımı 14 günde sadece 17,47 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Ancak bu basınç dayanım değerleri taşıyıcı elemanlar için standartlarda öngörülen minimum basınç dayanım değerlerinden düşüktür. Genellikle betonun tasarım dayanımı 28 günlük basınç dayanım değeridir. Su küründeki K karışımının 28 günlük basınç dayanım değeri 41.05 MPa’dır. Ü.1 karışımı 28 günde bu değerin yaklaşık %58’ine ulaşmıştır. 90 gün sonunda ise %75’ine ulaşmıştır. Eğer 90 günden daha fazla kür edilirse antifriz içeren karışımın tasarım dayanımına ulaşabileceği 1 yıllık basınç dayanım değerinden görülmektedir. Sıcaklık azaldıkça hem kontrol hem de Ü.1 karışımının basınç dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Sadece üre içeren bir beton için, ilk günlerde ek yalıtım ile daha fazla dayanım artışı sağlanabilir. Ancak bu çalışmada böyle bir araştırma yapılmamıştır. Dolayısı ile üre antifriz katkısı soğuk havada beton dökümünde kullanılırken döküm esnasında daha sıcak zamanların seçilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

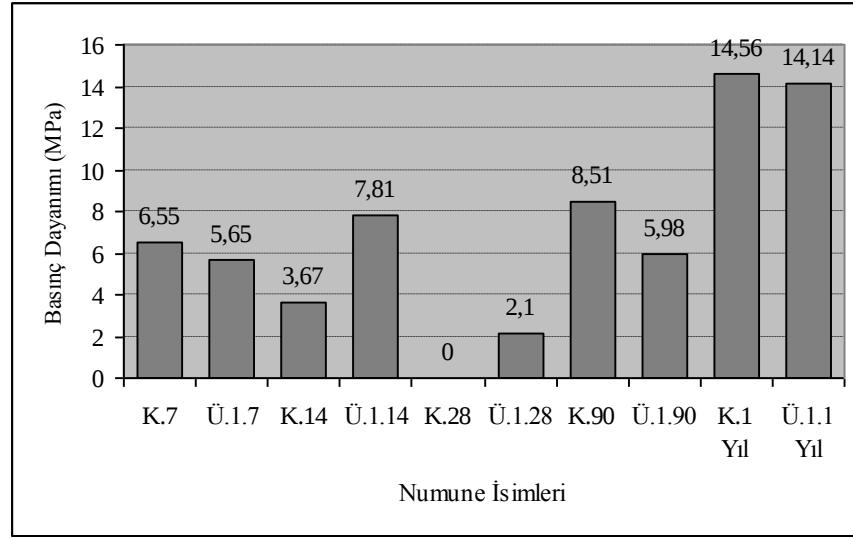


Şekil 4.2. -10°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.3. -15°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-20°C ortam sıcaklığında özellikle tek başına ürenin kullanıldığı karışımların basınç dayanım gelişimi oldukça yavaştır. Genel olarak Ü.1 karışımı için -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında bütün kür süreleri için basınç dayanımları 20 MPa’ın altındadır.



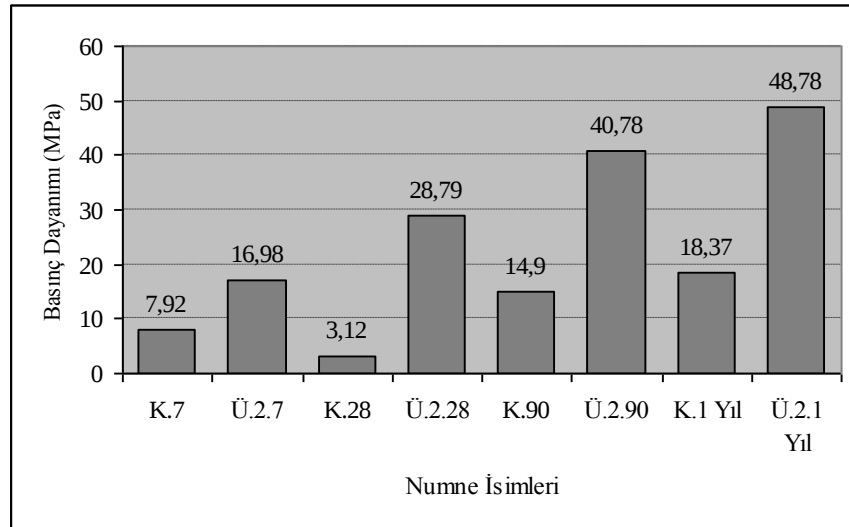
Şekil 4.4. -20°C’de K ve Ü.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.8. Ü.2 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	Ü.2 (-5°C)	Ü.2 (-10°C)	Ü.2 (-15°C)	Ü.2 (-20°C)	Ü.2Su Kürü	Ü.2.D
Veriler (7 gün) Maksimum Gerilme MPa	16,98	8,08	5,67	5,19	34,50	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	28,79	10,22	6,51	1,79	41,78	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	40,78	20,83	10,07	6,40	51,11	43,85
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	48,78	27,62	16,42	17,28	56,49	48,44

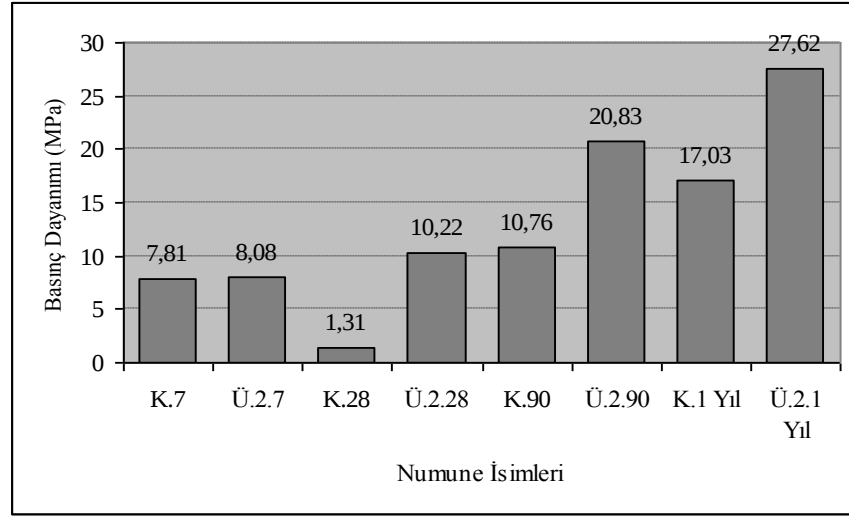
Çizelge 4.8.’e göre Ü.2 karışımının basınç dayanımları görüldüğü gibi K karışımının basınç dayanımlarından daha yüksektir. Özellikle 90 günlük dayanım değeri, su küründeki K karışımının 28 günlük basınç dayanımından yüksektir. Bu durum katkı oranının arttıkça basınç dayanım değerinin de arttığını göstermektedir. -5°C’de Ü.2 karışımının basınç dayanımı 7 günde 16,98 MPa’ya ulaşmıştır.

Ü.2 karışımı için katkının çözelti yüzdesi %18'dir. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası $-5,82^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 4.5 incelendiğinde -10°C 'nin altındaki hava sıcaklıklarında eğer sürekli dona maruz kalırsa üre antifriz katkısının oranı artsa da dayanım değerinde önemli bir artış olmadığı gözlenmektedir. -5°C 'de Ü.2 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 28,79 MPa iken 90. günde yaklaşık 12 MPa artarak basınç dayanımı 40,78 MPa değerine ulaşmıştır. Bu basınç dayanımı aynı kür şartlarındaki kontrol karışımının basınç dayanımından %173 daha yüksektir. Sürekli dona maruz kaldıkları ortamlar göz önüne alınırsa en iyi sonuçlar Ü.2 karışımına aittir. 90 günlük sürede dış ortamdaki en düşük hava sıcaklığı -22°C olmuştur. Bu sıcaklıkta bu üç karışımından elde edilen en düşük dayanım değeri Ü.3.D karışımına ait olup 42,81 MPa'dır. Bu basınç dayanımı 90 günlük su küründeki K karışımının %79'u kadardır.

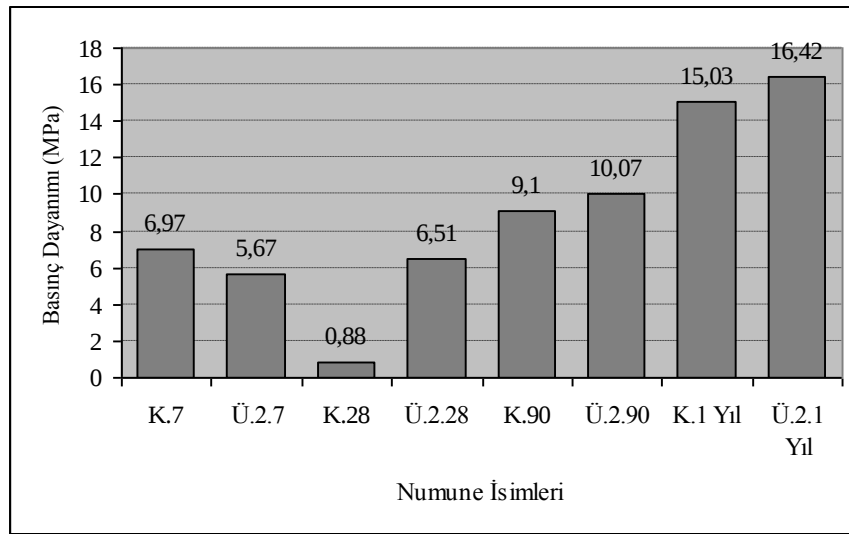


Şekil 4.5. -5°C 'de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-10°C katkının çözelti yüzdesine göre donma noktasından düşük olmasına rağmen Ü.2 karışımının basınç dayanımı 90 günde 20,83 MPa olmuştur. Daha düşük sıcaklıklarda basınç dayanımları arasındaki fark azalmıştır.

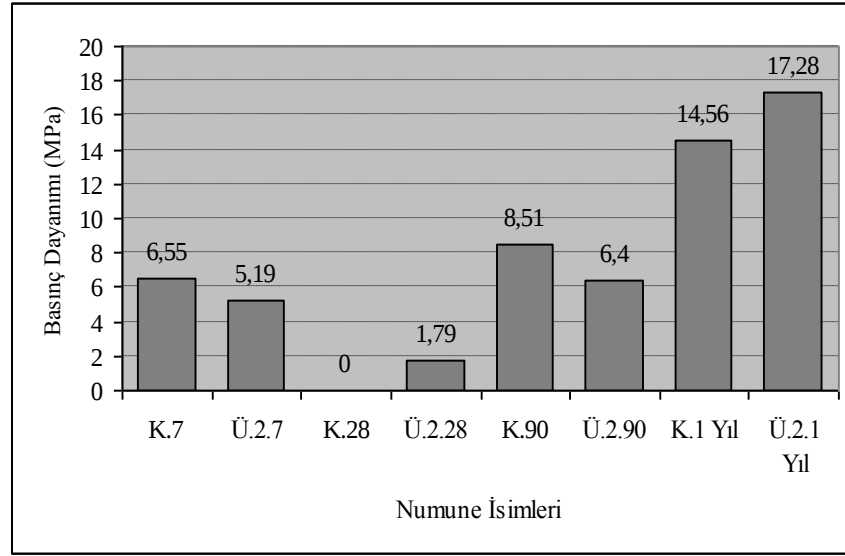


Şekil 4.6. -10°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.7. -15°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Katkı miktarı artırılmasına ve Ü.2 karışımının donma noktası Ü.1 karışımından biraz daha düşük olmasına rağmen katkı donma noktasının altındaki kür sıcaklıklarında beton basınç dayanımı üzerinde çok etkin değildir. Örneğin -15°C ve -20°C’de Ü.2 karışımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 1,79 MPa ile 10,07 MPa arasında değişmektedir.

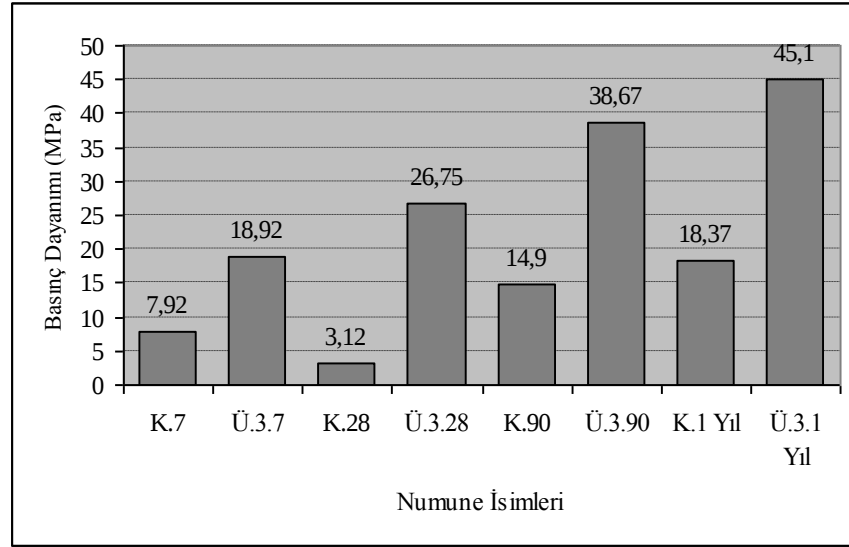


Şekil 4.8. -20°C’de K ve Ü.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.9. Ü.3 karışımına ait basınç dayanımları

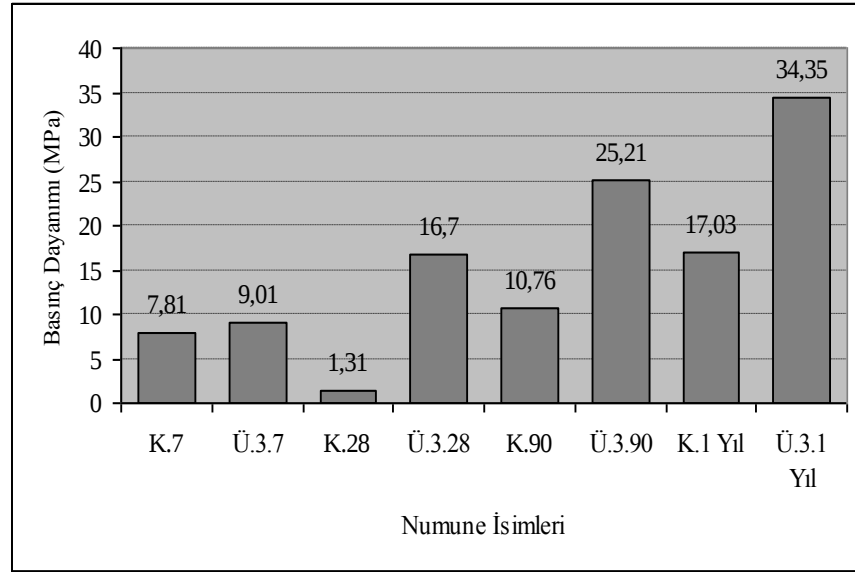
Karışımlar	Ü.3 (-5°C)	Ü.3 (-10°C)	Ü.3 (-15°C)	Ü.3 (-20°C)	Ü.3Su Kürü	Ü.3.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme MPa	18,92	9,01	5,93	4,87	26,84	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	26,75	16,70	6,19	1,45	37,34	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	38,67	25,21	7,70	5,38	45,06	42,81
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	45,10	34,35	13,85	15,37	51,66	48,08

Görüldüğü gibi katkı yüzdesi arttığında basınç dayanımı da giderek artmaktadır. Donma noktası -10°C’den yüksek olduğu için katkının etkinliği düşüktür. 1 m³ beton karışımı için Ü.3 karışımının çözelti konsantrasyonu %23’tür. Bu konsantrasyon değerinde beton bünyesindeki çözeltinin donma noktası -6,96°C’dir.



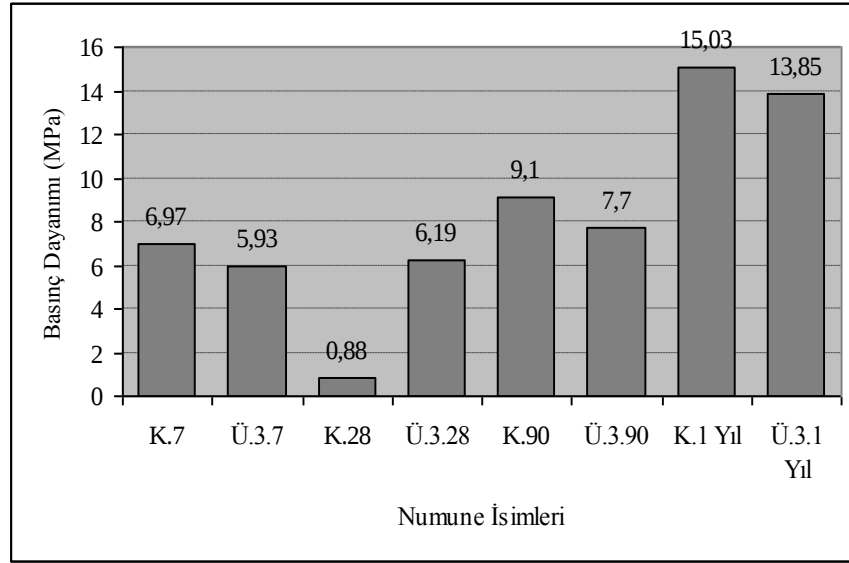
Şekil 4.9. -5°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Sonuçlar incelendiğinde üre içeren karışımlar için en yüksek 7 günlük basınç dayanımları -5°C’de ve -10°C’de Ü.3 karışımına aittir. -5°C’de 7 günde K karışımının basınç dayanımını aynı kür sıcaklığında ve süresindeki Ü.3 karışımının basınç dayanımının %41’i kadardır. -5°C’de Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının aynı sıcaklıktaki K karışımından daha iyi performans gösterdikleri anlaşılmaktadır. Ancak düşük sıcaklıklarda ürenin tek başına kullanımı uygun değildir. Bu sebeple soğuk havada beton dökümünde bir priz hızlandırıcı katkı ile beraber kullanılması daha uygun olabilir.

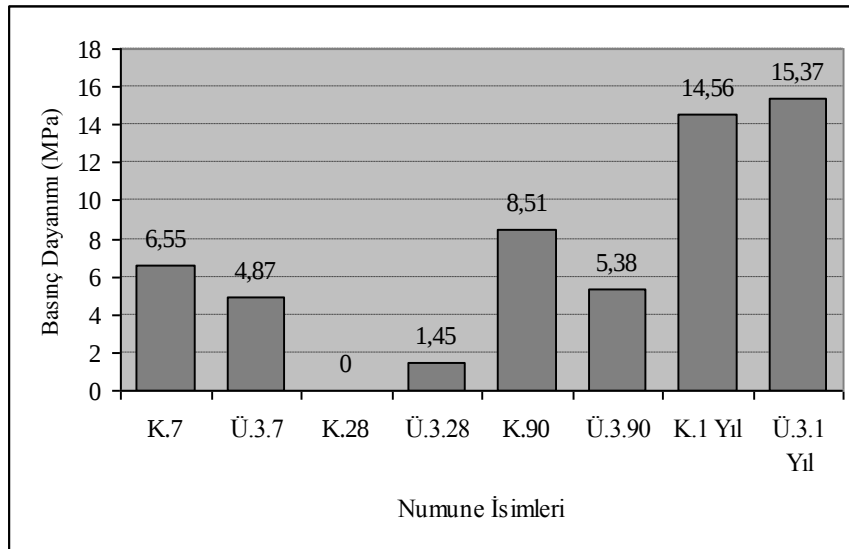


Şekil 4.10. -10°C’de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Uzun süreli ve sürekli donmaya maruz kalan numunelerin özellikle katkının donma noktasının altındaki bir sıcaklıkta basınç dayanımlarındaki düşüş meydana gelmektedir. Ortam sıcaklığı azaldıkça bu düşüş oranı da artmaktadır. Şöyle ki -20°C için Ü.3 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 1,45 MPa’a kadar düşmüştür. Ancak Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde katkı miktarı arttıkça bu düşüşün azaldığı gözlenmektedir. Örneğin Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının ortam sıcaklığı -5°C’den -10°C’ye düştüğünde 90 günlük basınç dayanımlarındaki kayıp miktarı sırasıyla %49, %48 ve %35’tir.



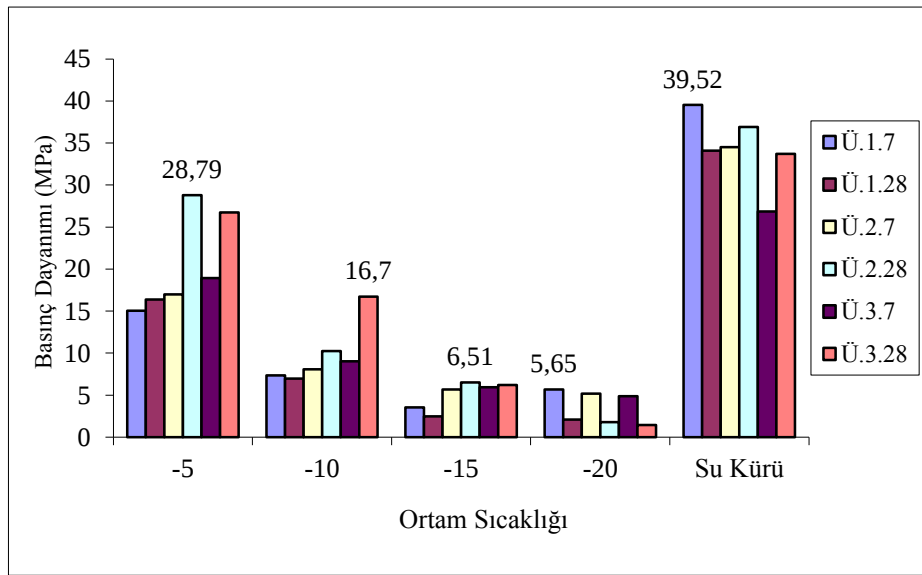
Şekil 4.11. -15°C'de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.12. -20°C'de K ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımları arasında -5°C'de 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 28,79 MPa ile Ü.2 karışımına aittir. Bu basınç dayanımı su kürüne tabi tutulmuş 28 günlük K karışımının basınç dayanımının %56'sı kadardır. -5°C'dendaha düşük sıcaklıklardaki basınç dayanımları betonun hem kendi yükünü hem de üzerine gelecek

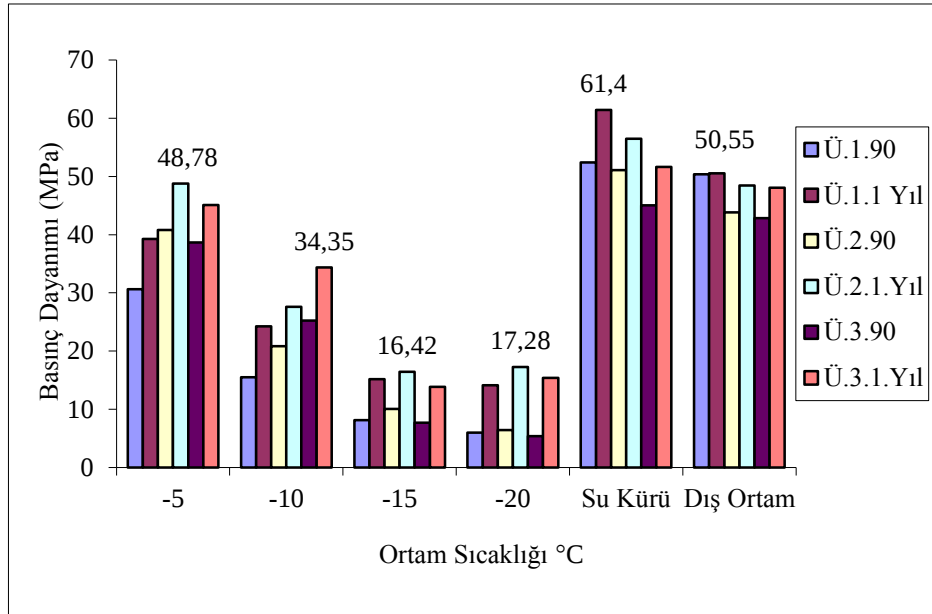
yükleri taşıyabilmesi ve kalıpların sökülebilmesi için standartlarda belirtilen değerlere göre yeterli değildir. Bir antifriz katkı betonun hem dayanım kazanma hızını artırmalı hem de nihai dayanımı üzerinde olumlu etkilere sahip olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan çözelti yüzdelerine göre özellikle 90 gün sonra üre nihai dayanım üzerinde olumlu etkilere sahipken, erken dayanım kazanma hızına etkisi kendi donma noktasının altında bir sıcaklıkta yeterli değildir. Çünkü katkının donma noktası altında fonksiyonu azalmaktadır.



Şekil 4.13. Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Üç farklı dozda üre antifriz katkısının kullanıldığı karışımların -5°C ve -10°C için 90 günlük basınç dayanımları 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarından oldukça yüksektir. -10°C'de Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının basınç dayanımları 20,83 MPa ve 25,21 MPa'dır. Bu durum göstermektedir ki antifriz katkıları nihai dayanım üzerinde oldukça etkilidirler. Öyle ki Korhonen (2003), normal betonun 28 günde tasarım dayanımına ulaştığını ve bundan sonra dayanım artışının çok daha yavaş ilerlediğini, ancak antifriz içeren betonun düşük sıcaklıkta 28. günden sonra dayanım artışının durmadığını ve 90 gün sonra 28 günlük suda kür edilen kontrol numunesinin dayanımına ulaştığını ifade

etmiştir. Yani daha uzun süreli kür uygulandığında dayanım değerlerinde artış olmaktadır.



Şekil 4.14. Ü.1, Ü.2, Ü.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Sürekli donmaya maruz kalan Ü.3 karışımının -20°C’de basınç dayanımı 5,38 Mpa’a kadar düşmüştür. Dış ortamda hava sıcaklığında meydana gelen değişkenlik betonun kendini yenilemesinisağlamıştır. Mironov (1977) beton içerisindeki karışım suyunun %20’si buza dönüşene kadar betonun nihai dayanımının zarar görmediğini ifade etmiştir (Korhonen 2003). Yani antifriz içeren betonda buz oluşumu azaltılmakta böylece soğuk havaya karşı tolerans geliştirilmektedir. Bu durum basınç dayanımlarından anlaşılmaktadır. Kuzmin (1976) ise suyun sadece bir kısmının buza dönüşmesi ile oluşan genişlemenin zararlı etkisinin sınırlı olduğunu ve bu durumun çimento jeline zarar vermekten ziyade onu sıkıştırdığını ortaya koymuştur (Korhonen 2003).

Mwaluwinga *et al.* (1997) ürenin beton özellikleri üzerindeki etkisinin çimento miktarı ve w/c oranı ile değiştiğini ifade etmiştir. Çimento miktarı arttıkça ve w/c oranı azaldıkça ürenin etkisi de artmaktadır. Üre aynı zamanda betonun akışkanlığını yani kıvamını ve dayanıklılığını geliştiren bir katkıdır. Korhonen (2003), antifriz katkının

beton özelliklerine etkisinin kullanılan miktarlara bağlı olduğunu ifade etmiştir. Çünkü katkı miktarı değiştikçe karışım suyundaki oluşan çözelti oranı değişmektedir. Katkıların donma noktaları da bu çözelti yüzdelere göre değişir. Bu çalışmada kullanılan üre katkısının yüzdelere göre donma noktaları -4°C ile -10°C arasındadır. Yani sıcaklık düştükçe katkının suyun donma noktasına etkisi azalmaktadır. Bu durum elde edilen basınç dayanımlarından gözlenmektedir. Dökümden hemen sonra soğuk havada yerleştirilen kontrol betonunda sıcaklık -3°C 'ye ulaştığında beton bünyesindeki suyun %90'ı donmaktadır.

Sıcaklık azaldığı için -10°C 'de elde edilen basınç dayanımları -5°C 'de elde edilen basınç dayanımlarına göre daha düşüktür. Bu uygulanan kür sıcaklığı her üç karışımında donma noktalarından düşük olduğu için ilk 28 günde istenilen sonucu verememiştir. Katkının priz geciktirici etkisinden dolayı hidratasyon hızı yavaşlamıştır. Sıcaklık azalmasına rağmen kür süresi arttıkça basınç dayanımlarının arttığı gözlenmektedir. Elde edilen en yüksek dayanım değeri Ü.3 karışımının bir yılın sonunda elde edilen basınç dayanımıdır. Bu değer su küründeki K karışımının 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %67'si kadardır. Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının 3 günlük SEM görüntüleri (Şekil 4.80a, Şekil 4.80b, Şekil 4.84a ve Şekil 4.84b) incelendiğinde CSH yapısı, geniş etrenjit ve CH oluşumu göze çarpmaktadır. Bazı araştırmacılara göre etrenjit kristalleri başlangıç prizi üzerinde büyük bir katkıya sahiptir (Ramachandran 1995).

Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlara ait sonuçlar incelendiği zaman donma noktalarının altındaki sürekli dona maruz kaldıkları ortam sıcaklıklarında dayanımların düşük olduğu görülmektedir. Bu üç grup arasında -15°C 'de bir yılın sonunda elde edilen en yüksek dayanım 16,42 MPa ile Ü.2 grubuna aittir. Bu değer su küründeki K karışımının 28 günlük dayanımının yaklaşık %32'si kadardır.

Antifriz katkıların hızlandırıcı etkisi çimentonun silikat ve alüminat bileşenlerinin hidratasyonu üzerindeki etkisiyle ilişkilidir. Çimento fazındaki iyonlarla aynı iyonları (Ca, Si veya Al iyonları) içermeyen üre gibi antifriz katkıları, hidratasyon sürecini

başlıca C_3S ve C_2S 'in çözünürlüğünü artırarak hızlandırırlar (Ramachandran 1995). Elektrolit özellik gösteren antifriz katkıları sadece elektriksel ısınma periyodunu kısaltıp, betonun sertleşmesini hızlandırmazlar aynı zamanda likit fazın elektriksel iletkenliğini artırır. Böylece $0^\circ C$ 'nin altında bir sıcaklıkta elektriksel ısınma sağlanır. Sonuçta hidrasyonun devamı için gerekli olan suyun donması engellenebilmektedir. Aynı zamanda bu katkıları çimento hamurunun yüzey alanını artırır ve çimento hamuru ve agrega arasındaki temas yüzeyini yani aderansı geliştirir. C_3S ve C_2S ile temas halinde olan elektrolitler çözeltinin iyonik dayanımını ve boşluk çözeltisinin yoğunluğunu değiştirirler. Böylece üre içeren numunenin basınç dayanımı artmıştır.

Çimento hidrasyonu hamurdaki boşlukların sistematik bir şekilde yeniden dağılımı şeklinde ifade edilebilir. Sonuçta çok daha ince boşluklar oluşur. Potasyum hariç antifriz katkıların hemen hemen tümü çimento hamurunun boşluk yapısı üzerinde aynı etkiye sahiptirler. Sonuç olarak daha ince boşluklardaki suyun donma noktası düşecektir. Beton karışımı yerleştirildikten sonra çimentonun hidrasyon işlemi düşük sıcaklıklarda çok daha uzun bir süreçtir ve bu yüzden beton yavaş dayanım kazanır (Ramachandran 1995).

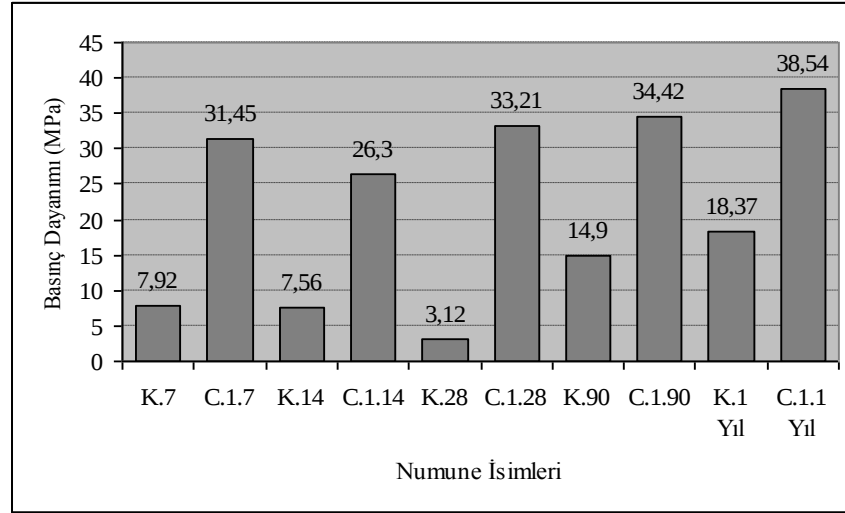
Daha yoğun bir yapı oluşmasını sağlayan antifriz katkıları hem betonun mikro yapısını hem de boşluk çözeltisinin yapısını değiştirirler. Böylece betonun don direnci, geçirimsizliği ve çimento hamuru ve agrega arasındaki temas yüzeyi artmaktadır. Sonuçta üre içeren karışımın hidrasyon işlemi K karışımından daha hızlı oluşmaktadır. Dış ortamda Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait basınç dayanımları birbirine yakındır. $-5^\circ C$, $-10^\circ C$, $-15^\circ C$ ve $-20^\circ C$ ortam sıcaklıklarında ise Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait basınç dayanımları birbirine yakındır. Ancak ekonomik tarafta kalmak için seçilecek optimum katkı oranı %9'dur.

- C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait 7, 14, 28 ve 90 günlük dondurucu kürü

Çizelge 4.10 incelendiğinde aynı kür süresinde ortam sıcaklığının azalması ile beton basınç dayanımının da azaldığı gözlenmektedir. Ancak aynı kür şartları için kalsiyum nitrat içeren karışımlara ait dayanımlar, kontrol betonuna ait dayanımlardan oldukça yüksektirler. Örneğin -5°C’de C.1 karışımının 7 günlük basınç dayanımı, 7 günlük su küründeki K karışımının basınç dayanımının yaklaşık %83’ü kadardır.

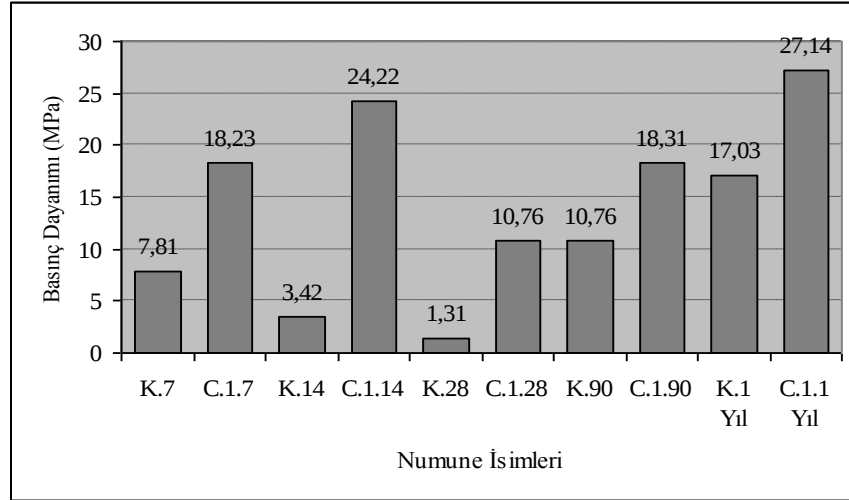
Çizelge 4.10. C.1 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	C.1 (-5°C)	C.1 (-10°C)	C.1 (-15°C)	C.1 (-20°C)	C.1Su Kürü	C.1.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	31,45	18,23	16,10	15,53	45,95	-
Veriler (14 gün) Maksimum Gerilme (MPa)	26,30	24,22	16,31	6,54	-	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme (MPa)	33,21	10,76	5,35	4,13	46,57	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme (MPa)	34,42	18,31	15,57	15,60	54,22	28,41
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme (MPa)	38,54	27,14	21,79	20,98	55,99	35,77



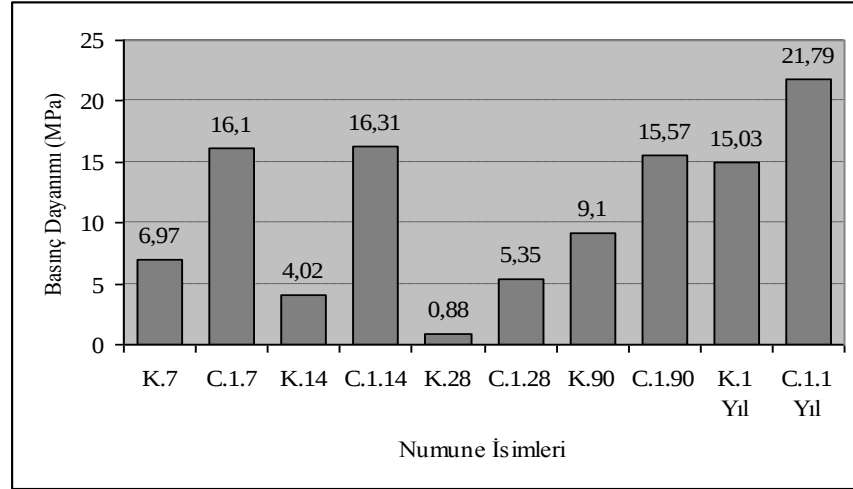
Şekil 4.15. -5°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-5°C’de C.1 karışımının 7 günlük basınç dayanımı 31,45 MPa’dır. K karışımı ise bu sürede aynı sıcaklıkta sadece 7,92 MPa basınç dayanımına ulaşabilmiştir. Elde edilen basınç dayanımlarının yüzdeleri, Ramachandran (1995) tarafından belirtilen minimum %70 oranından çok daha yüksektir. Şekil 4.15 incelendiğinde kür süresinin artışıyla basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. -5°C için 90 günde basınç dayanımı 34,42 MPa olmuştur. -10°C’deki K karışımının 14 günlük basınç dayanımı aynı sıcaklık ve kür süresine sahip C.1 karışımının basınç dayanımının %14’ü kadardır. Aradaki bu fark kalsiyum nitratın hem priz hızlandırıcı hem de antifriz özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Burada -5°C ve -10°C ortam sıcaklıklarında görülmektedir ki yavaş olsa bile hidratasyon reaksiyonları devam etmektedir. Hidratasyonun devam etmesi sayesinde çimento hamur hacmi artmakta, boşluk hacmi ve boyutları azalmaktadır. Dolayısı ile çimento hamuru ve agrega arasında aderans gelişmekte, bütünlük oluşmakta ve beton basınç dayanımı artmaktadır. Şekil 4.16 incelendiğinde -10°C’de 28 günlük uzun süreli don etkisinde C.1 karışımının basınç dayanımında düşüş mevcuttur. Bunun nedeni karışımın donma noktasından daha düşük bir sıcaklığa maruz kalması olabilir. Ancak K karışımı ile karşılaştırılırsa uzun süreçte beton kendini yenilemiştir.

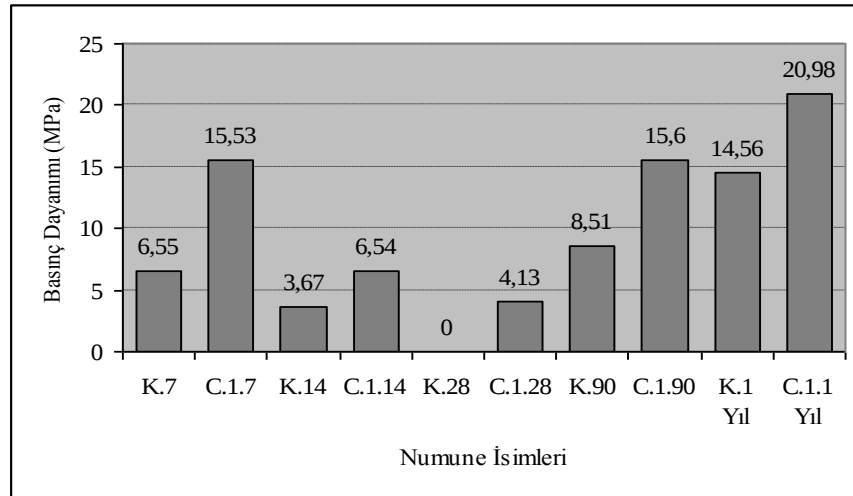


Şekil 4.16. -10°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de K ve C.1 karışımlarının -15°C ve -20°C’de sürekli son etkisinde elde edilen basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. -15°C’de C.1 karışımının 90 günlük basınç dayanımı K karışımının dayanımından %71 daha yüksektir. 28 günlük K karışımının basınç dayanımı 0,88 MPa değerine kadar düşmüştür. Ancak daha önceden de ifade edildiği gibi jel boşluklarındaki suyun hidratasyonu ile dayanım kazanmaya devam etmiştir. Bu durum C.1 karışımı içinde geçerlidir. -20°C’de kür sıcaklığı azalmasına rağmen K karışımı ile C.1 karışımının 90 günlük dayanımları arasındaki fark %83’tür. Yani C.1 karışımı %83 daha yüksek dayanıma sahiptir. 1m³ beton karışımı için C.1 karışımında kullanılan katkının çözelti yüzdesi %13’tür. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası -4,22°C’dir (Ramachandran 1995). Bu sebeple sıcaklık azaldıkça, katkının donma noktasından çok daha düşük olan bu kür sıcaklığında nihai dayanım da azalmıştır.



Şekil 4.17. -15°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

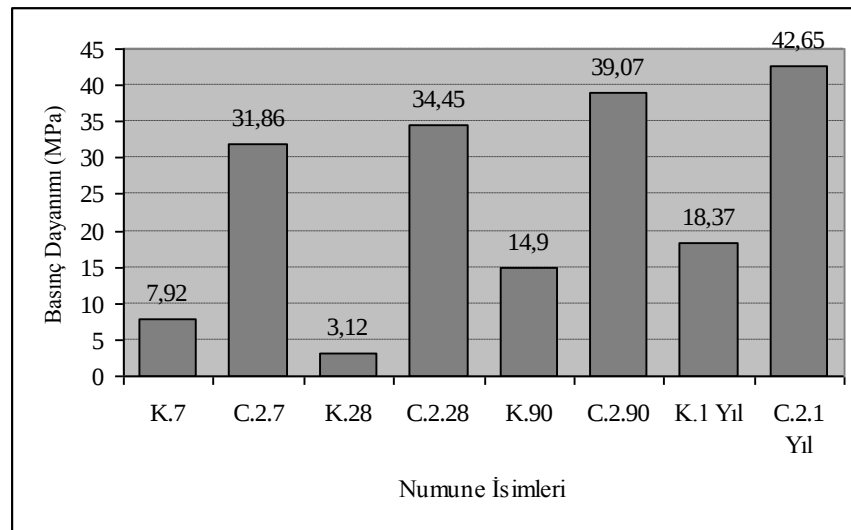


Şekil 4.18. -20°C’de K ve C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.11 incelendiğinde -5°C’de 7 günde C.2 karışımının 31,86 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir. K karışımının aynı sıcaklıkta ve kür süresindeki 7,92 MPa olan basınç dayanımı bu değerin yaklaşık %24’ü kadardır. -5°C’de C.2 karışımının 7 günlük basınç dayanımı, 7 günlük su küründeki K karışımının basınç dayanımının %84’ü kadardır. Yani standartlara göre kalıpların sökülebilmesi ve işin devam etmesi için yeterli dayanım artışı sağlanmıştır.

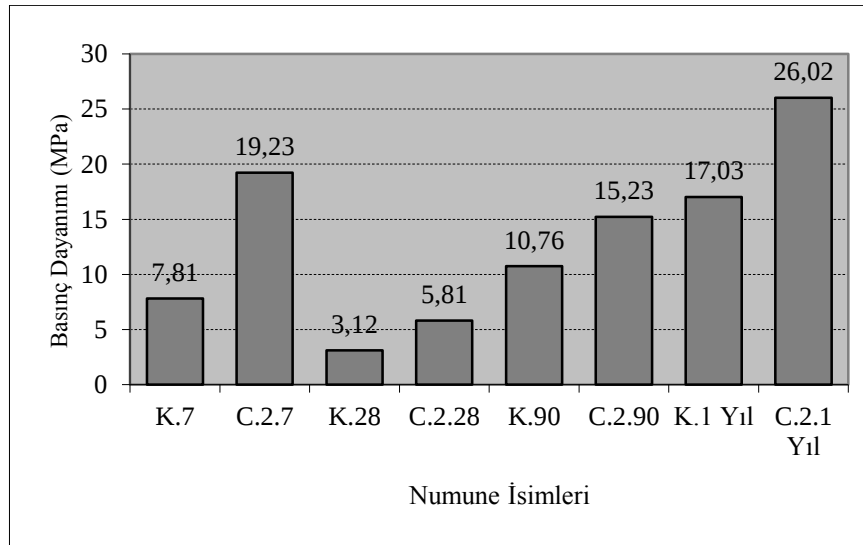
Çizelge 4.11. C.2 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	C.2 (-5°C)	C.2 (-10°C)	C.2 (-15°C)	C.2 (-20°C)	C.2Su Kürü	C.2.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	31,86	19,23	18,05	16,01	39,35	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	34,45	5,81	4,90	4,63	50,88	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	39,07	15,23	14,25	12,73	51,43	36,94
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	42,65	26,02	25,99	25,79	59,75	39,58

**Şekil 4.19.** -5°C'de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

En yüksek 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları C.2 grubuna aittir. Kalsiyum nitrat içeren üç karışıma ait sonuçlar incelendiğinde dış ortamda 90 günlük en yüksek dayanımın C.2 karışımına ait olduğu gözlenmektedir. C.2 karışımının -5°, -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında 7,14, 28 ve 90 günlük dayanımları arasında en yüksek basınç dayanımı -5°C'de 90 günde elde edilmiştir. Bu basınç dayanımı 39,07 MPa'dır.C.2 karışımı 90 günde normal suda kür edilen K karışımının 28 günlük

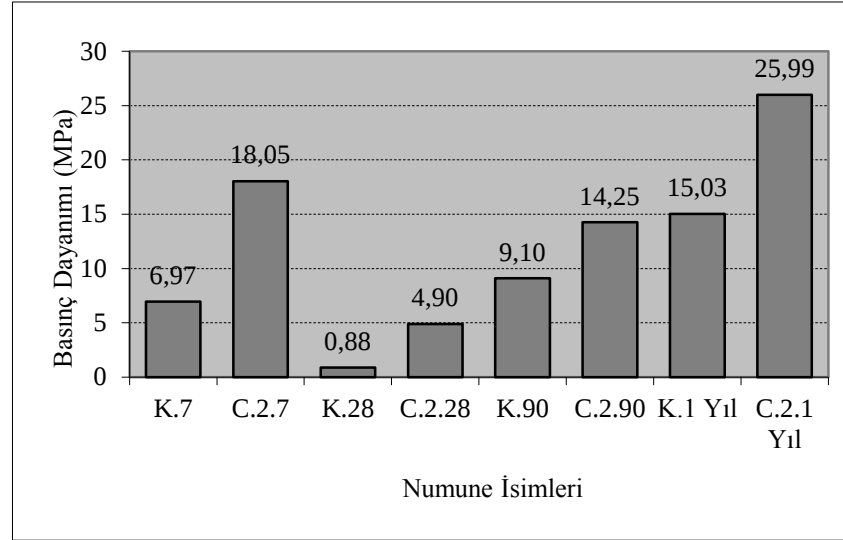
dayanımının %95'ini kazanmıştır. -5°C 'de K karışımının 90 günlük dayanımı C.2 karışımının %38'i kadardır. Kür süresi uzamasına rağmen K karışımının jel boşluklarındaki su betonun kendini yenilemesi için yeterli olmamıştır. -10°C 'de K karışımı ve C.2 karışımının özellikle 28 ve 90 günlük basınç dayanımları arasındaki fark azalmıştır. Şöyle ki K karışımının 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, aynı kür süreleri için C.2 karışımının basınç dayanımlarının sırasıyla %53 ve %70'i kadardır. Bu çalışmada 1 m^3 beton karışımı için C.2 karışımında kullanılan katkının çözelti yüzdesi %18'dir. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası ise $-6,6^{\circ}\text{C}$ 'dir. Aradaki farkın -5°C 'ye göre daha düşük olmasının muhtemel nedeni ise kalsiyum nitrat içeren numunelerin katkının donma noktasından daha düşük bir sıcaklığa maruz kalmasıdır. Çünkü bu sıcaklıkta katkının etkinliği azalmaktadır (Ramachandran 1995). Bu sonuçlardan antifriz katkının suyun donma noktasını düşürdüğü ve betonda hidratasyonun devam ettiği anlaşılabilmektedir.



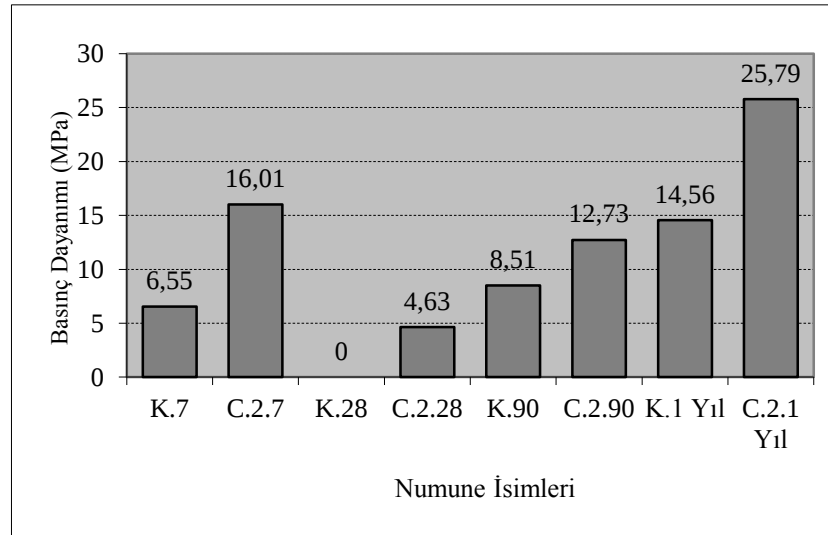
Şekil 4.20. -10°C 'de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-15° ve -20°C kür sıcaklıklarına ait Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 incelendiği zaman hem K karışımı hem de C.2 karışımının basınç dayanımlarında -5°C ve -10°C kür sıcaklıklarına göre düşüş gözlenmektedir. Arslan vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada da sıcaklık

azaldıkça kalsiyum nitrat içeren karışımın basınç dayanımının azaldığı ifade edilmiştir. Ancak K karışımına göre nihai dayanımlar daha yüksektir.



Şekil 4.21. -15°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.22. -20°C’de K ve C.2 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.12 incelendiği zaman katkı oranı arttıkça basınç dayanımlarında artış gözlenmektedir. -5°C’de 7 günde C.3 karışımının 34,84 MPa değerinde bir basınç

dayanımına ulaştığı görülmektedir. C.3 karışımının bu basınç dayanımı, 7 günlük standart kür şartlarında suda kür edilen K karışımının basınç dayanımının %92'si kadardır. -10°C'de C.3 karışımı için 7 günün sonunda basınç dayanımı 27,71 MPa değerine ulaşmaktadır.

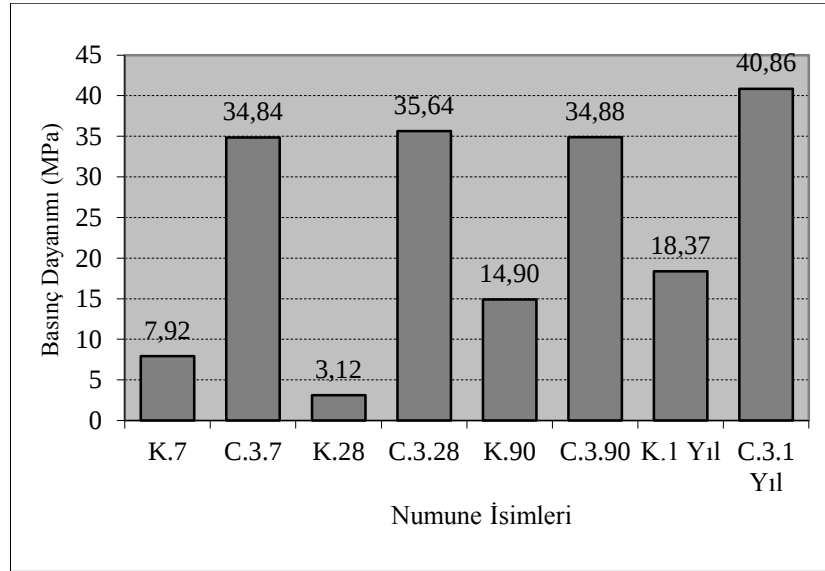
Çizelge 4.12. C.3 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	C.3 (-5°C)	C.3 (-10°C)	C.3 (-15°C)	C.3 (-20°C)	C.3Su Kürü	C.3.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	34,84	27,71	22,52	16,38	37,17	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	35,64	11,16	8,10	9,21	49,38	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	34,88	15,82	11,96	10,80	49,79	29,07
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	40,86	22,53	20,58	19,82	46,78	45,91

-15°C'de 7 günde C.3 karışımının basınç dayanımı 22,52 MPa değerine ulaşmıştır. Aynı sıcaklık ve kür süresindeki K karışımının basınç dayanımını bu değerin yaklaşık %30'u kadardır. Bu sonuçlar göstermektedir ki kalsiyum nitrat katkısı hem suyun donma noktasını düşürmekte hem de betonun prizini hızlandırarak dayanım kazanma hızını da artırmaktadır. Ancak kalsiyum nitrat katkısı betonun prizini hızlandırdığı için daha yüksek miktarlarda kullanılacağı zaman dikkat edilmelidir. Örneğin bir priz geciktirici katkı ile beraber kullanılabilir. Aksi takdirde betonda çok hızlı bir prize neden olabilir. Bu aşırı hızlı priz betonun basınç dayanımı için olumsuz bir etki oluşturabilir.

Katkılar tek başlarına kullanıldıklarında, üre miktarı ve beton basınç dayanımı arasındaki ilişkinin aksine kalsiyum nitrat miktarı ile beton basınç dayanımı arasında bir doğru orantının varlığı göze çarpmaktadır. Su kürü hariç diğer kür ortamlarında ise en yüksek dayanım değerleri -5°C ortam sıcaklığında elde edilmiştir. Bu sıcaklıktaki en

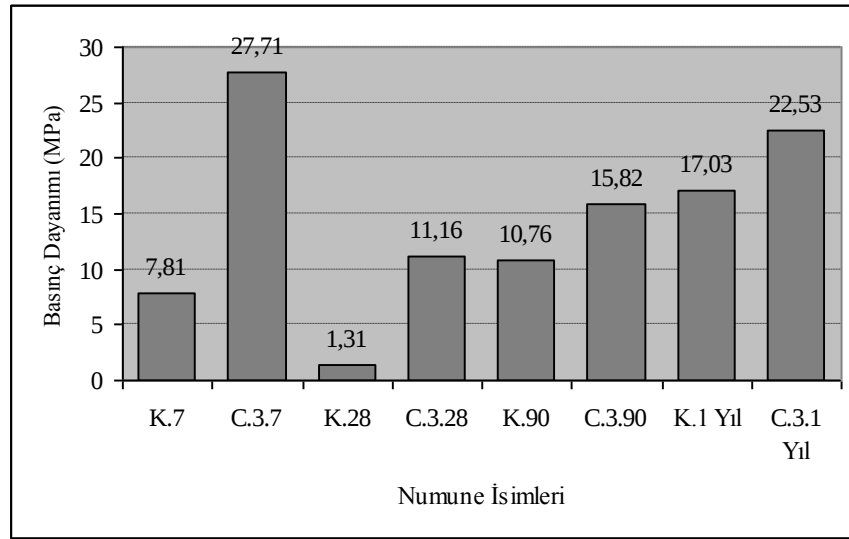
yüksek 7 günlük basınç dayanımı C.3 karışımına aittir. Bu çalışmada kullanılan katkılar beton işlenebilirliğini artırmaktadır ve segregasyona neden olmamaktadırlar (Korhonen 2003).



Şekil 4.23. -5°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

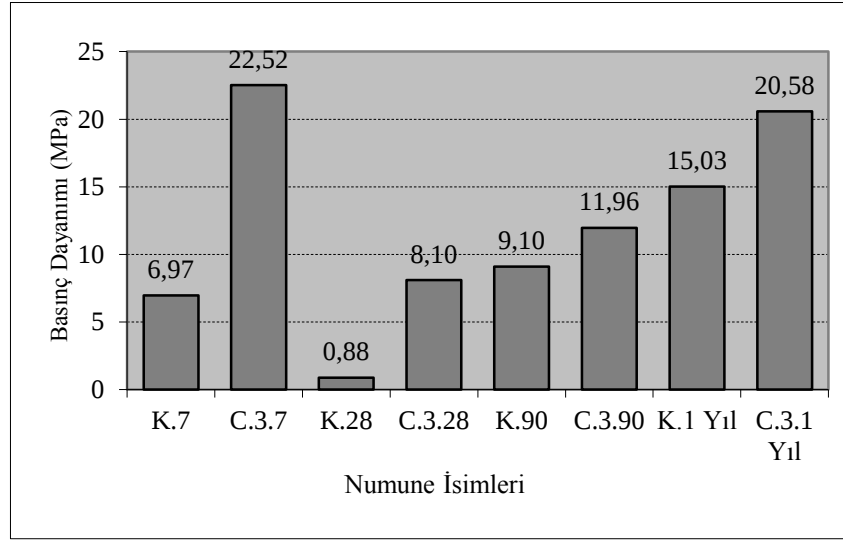
Şekil 4.23 incelendiğinde 28 günlük en yüksek basınç dayanımlarının C.3 karışımına ait olduğu görülmektedir. C.3 karışımının -5°C için 28 günlük basınç dayanımı 35,64 MPa’dır. Aynı kür şartlarındaki K karışımının basınç dayanımı bu değerin sadece %8’i kadardır. Bu değersu küründeki K karışımının basınç dayanımının yaklaşık %86’sı kadardır. Kalsiyum nitrat katkısının betonunun dayanım kazanmasını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Kalsiyum nitrat priz hızlandırıcı etki göstermiş ve betonun erken dayanım kazanma hızını artırmıştır. Antifriz katkıları hem betondaki suyun donma noktasını düşürmekte hem de düşük sıcaklıklarda dayanım artışını sağlamaktadır. Basınç dayanım sonuçlarından anlaşılmaktadır ki kalsiyum nitrat ile donmanın zararlı etkileri minimize edilerek betonun düşük sıcaklıklarda kür olmasını sağlanmaktadır (Korhonen 2003).

1 m³ beton karışımı için C.3 karışımında kullanılan katkının çözelti yüzdesi %23'tür. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası ise -9,5°C'dir. Dolayısı ile daha düşük sıcaklıklarda katkının donma noktasının altındaki sıcaklıklarda basınç dayanımları daha düşüktür. -5°C'de elde edilen basınç dayanımına göre, -10°C, -15°C ve -20°C için 28 günlük basınç dayanımlarındaki düşüş sırasıyla %68, %77 ve %74'tür. Kalsiyum nitratın beton prizi üzerindeki etkisi çimentonun C₂S miktarı ile doğru orantılıdır. Kalsiyum nitrat saf halde kullanıldığında erken dayanımı artırmaktadır ancak 1 günlük dayanımı artırmaz. Özellikle 28. günden sonra daha ilerideki zamanlarda örneğin 220 gün gibi bir sürede porozite artışına rağmen betonda uzun süreli dayanım artışı sağlamaktadır (Justnes 2005). Bu sebeple esas dayanım değerlerini anlamak için 28. günden sonraki verilere bakmak daha doğru bir değerlendirme olacaktır.



Şekil 4.24. -10°C'de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

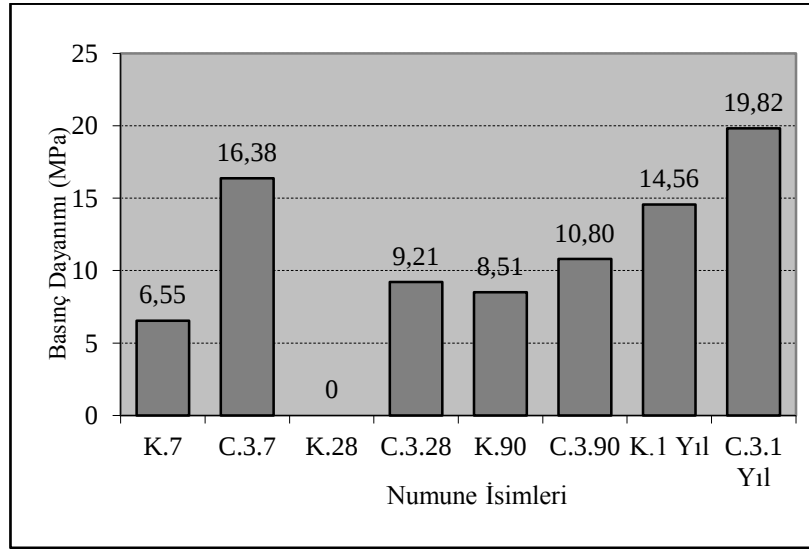
Ramachandran (1995) kalsiyum nitrat içeren beton karışımlarında çimento hamurunun boşluk boyut dağılımının mikro kapiler ve jel boşluklarına doğru olduğunu ifade etmiştir. Yani geçirimsizliği azaltarak ve aderansı artırarak boşluk boyutunun küçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca antifriz katkının bulunduğu ortamda daha yüksek ısı yayılımı söz konusu olduğu için daha fazla buz suya dönüşmektedir (Ramachandran 1995).



Şekil 4.25. -15°C’de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

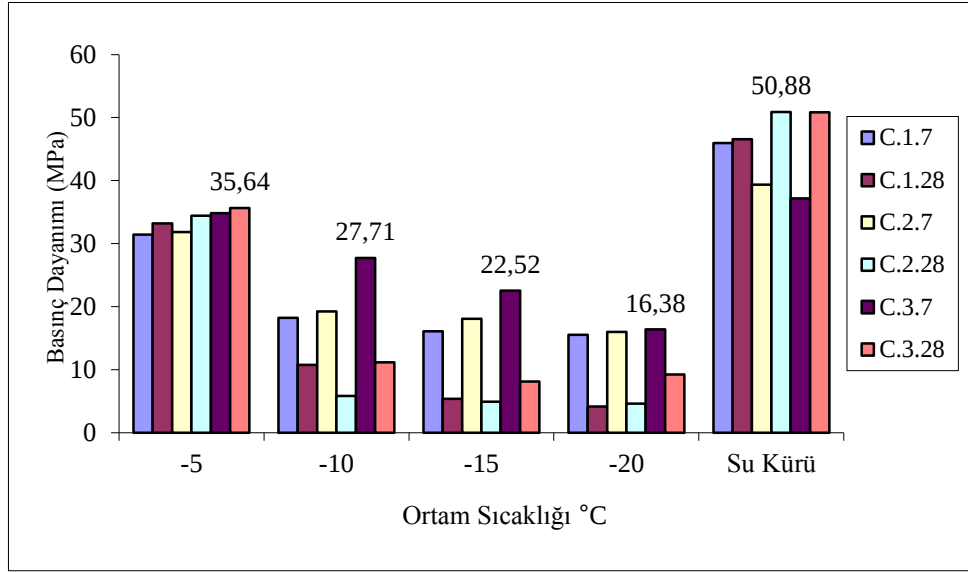
Hidratasyon reaksiyonu 5 aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada C_3S su ile reaksiyona girer ve hızlı bir şekilde ısı gelişimi söz konusudur. Bu aşama 15 ile 20 dakika içinde durur. İkinci aşamada ise reaksiyon hızı çok yavaşlar. Bu aşamaya hareketsiz veya giriş periyodu denir. Bu periyot birkaç saat sürebilir. Kalsiyum nitrat gibi antifriz katkıları ise ilk iki aşamaya etki ederek bu süreyi kısaltır (Ramachandran 1995). Bu sebeple ilk etapta betonun yeterli basınç dayanımına ulaşabilmesi için sıcaklık çok önemli bir etkidir. Çünkü betonun dayanım kazanma mekanizması kür esnasında hidratasyon reaksiyonu neticesinde açığa çıkan sıcaklığın bir fonksiyonudur (Lothenbach *et al.* 2007). Bu ortamın sağlanması için antifriz katkıları oldukça etkilidir. Başlangıçta karışımın donmaya maruz kaldığı süre uzadıkça 28.güne kadar basınç dayanımlarında bir düşüş oluşurken daha sonra zamanla artış söz konusudur. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da görüldüğü gibi özellikle katkının donma noktasından daha düşük sıcaklıklarda basınç dayanımlarındaki düşüş daha belirgindir. C.3 karışımı -15°C’de 7 günlük dayanımı 22,52 MPa iken zamanla azalmıştır. 28. Günden sonra beton kendini yenilemeye başlamış ancak 1 yılın sonunda basınç dayanımı 20,58 MPa’a yükselmiştir. Yani kaybettiği dayanımı tamamen geri kazanamamıştır. 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında C.3 karışımının basınç dayanımları sırasıyla 11,96 MPa ve 10,80 MPa’dır. C.3 karışımı,90 günde kalıpların

sökülebilmesi ve işin devam etmesi için standartlarda belirtilen minimum değerlerden daha düşük bir basınç dayanımına sahiptir. Ancak 90 gün boyunca günün 24 saati hava sıcaklığının -15°C ve -20°C olması ekstrem bir durum olduğu için katkının donma noktasına yakın kür sıcaklıklarında ve dış ortamda elde edilen basınç dayanımları daha yüksektir.

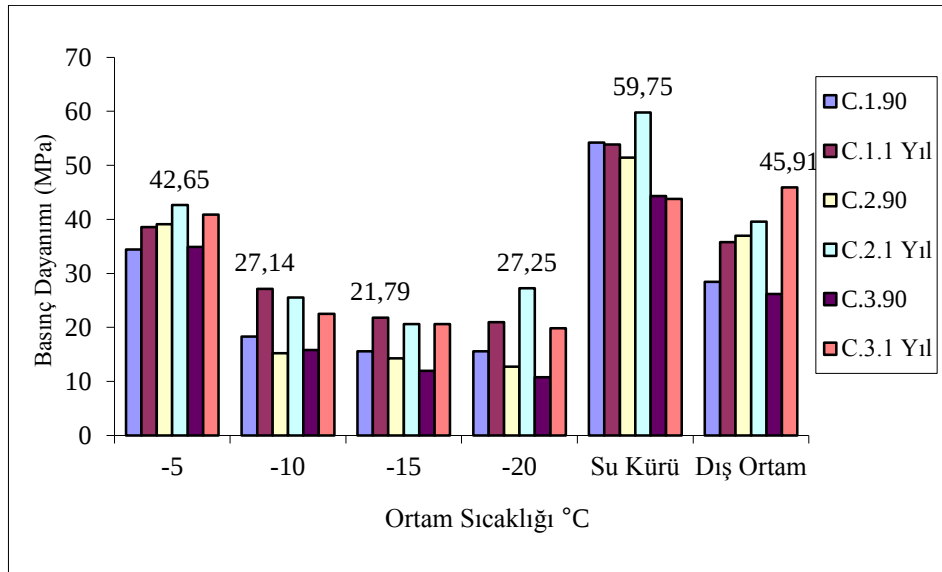


Şekil 4.26. -20°C 'de K ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 incelendiğinde -10°C 'de ilk 7 günde elde edilen C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait basınç dayanımlarının 28. ve 90. günde elde edilen dayanımlardan daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bunun temel sebebi karışımlardaki kalsiyum nitratın donma noktasının -15°C 'den yüksek olması olabilir. Kür süresi uzadıkça ilerleyen buz oluşumu neticesinde basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Ancak 28. günden sonra jel boşluklarında bulunan suyun hidratasyonu devam ettirmesi neticesinde basınç dayanımlarında artış söz konusudur. Katkının donma noktasından daha düşük olan -15°C ve -20°C ortam sıcaklıklarında çok yüksek dayanım gelişimi olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.27. C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.28. C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Kimyasal katkıları beton yerleştirilirken gerekli olan sıcaklık aralığını yani beton döküm mevsimini uzatabilmektedirler (U.S. Anonymous 2003). Bu kimyasal katkıları kritik dayanıma ulaşmadan önce, agregalar arasındaki boşluklarda karışım suyunun buza dönüşüp genişlemesini önlerler. Böylece bu katkıları beton bünyesine eklenerek kür işlemi gerçekleştirilebilir (Anon 2002). Kalsiyum nitrat bu amaçla yaygın olarak

kullanılan katkılardandır. Bu antifriz katkı normal hidratasyon sürecini hızlandırır. Soğuk havada beton dökümünde kullanılmasının avantajı betonun don tahribatına karşı duyarlılığını azaltmasıdır (Korhonen and Orchino 2001). Kalsiyum nitratin bu özellikleri elde edilen basınç dayanımlarından anlaşılabilmektedir. Özellikle dış ortamda ve katkının çözelti yüzdesine göre donma noktalarının sınırları içinde elde edilen basınç dayanımları K karışımına göre oldukça yüksektir. Bu üç karışım arasında C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımları C.1 karışımından daha yüksektir. -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C ortam sıcaklıklarında kür süresi uzadıkça grupların basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. C.1, C.2 ve C.3 karışımları arasında dış ortamda 90 günlük en yüksek basınç dayanımı C.2 karışımına aittir. Şekil 4.27 ve 4.28 incelendiğinde C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımlarının birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Ancak hem basınç dayanımları hem de ekonomik yönü dikkate alındığında bu üç karışım arasında optimum karışım C.2 karışımıdır.

- **Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait 7, 14, 28 ve 90 günlük dondurucu kürü**

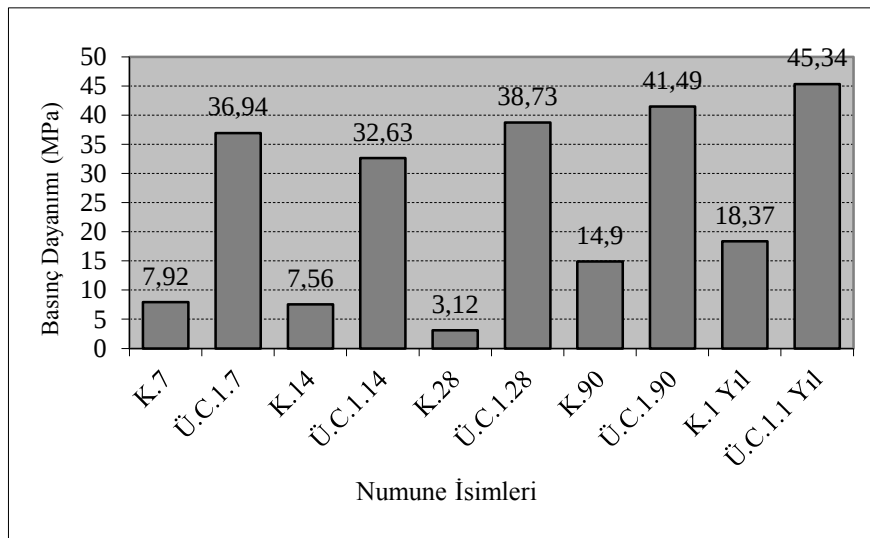
Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızı çok önemlidir. Bu süreçte yeterli ölçüde hidratasyon yapmamış ve yeterli dayanım kazanamamış olan beton üzerine gelen yükleri taşıyamamakta ve çatlamaktadır. Oysa kombinasyon halinde kullanılan antifriz katkıları beton karışımının hidratasyonunu artırır (Mironov 1977).

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.29 incelendiğinde genel olarak diğer karışımlarda gözlendiği gibi kür sıcaklığı azaldıkça Ü.C.1 karışımının 7, 14, 28 ve 90 günlük dayanımları da azalmaktadır. Örneğin -10°C, -15°C ve -20°C’de elde edilen 7 günlük basınç dayanımları -5°C’de elde edilenden sırasıyla %55, %74 ve %78 daha düşüktür. -5°C’de 7 günlük basınç dayanımı, aynı kür süresinde su küründe elde edilen basınç dayanımının %99’u kadardır. Yani sürekli don etkisinde kalan karışım standart su küründeki basınç dayanımına aynı süreçte ulaşmıştır. Ü.C.1 karışımına ait -5°C’de 14 günlük basınç dayanımı 32,63 MPa gibi oldukça yüksek bir değere sahiptir. K karışımının aynı sıcaklık ve kür süresindeki basınç dayanımı bu değerinde sadece %23’ü kadardır. Sürekli donmaya maruz kalan bir beton karışımı için kısa bir sürede bu dayanıma ulaşması:

kalıpların sökülmesi, iş sürecinin ilerlemesi, iş ve iş gücü kaybının önlenmesi, don sıcaklıkları altında beton dökülmesi ve betonu soğuktan korumak için gerekli olan ısıtma, yalıtım gibi maliyetlerin azaltılması açısından önemlidir.

Çizelge 4.13. Ü.C.1 karışımına ait basınç dayanımları

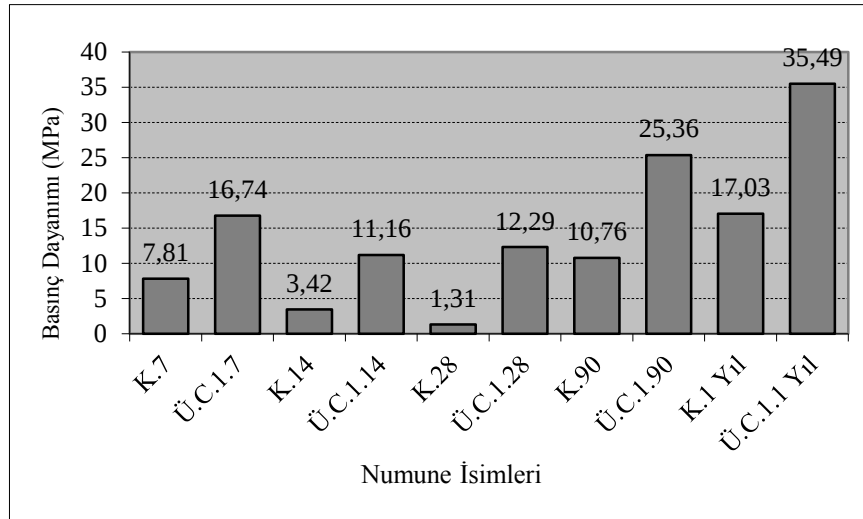
Karışımlar	Ü.C.1 (-5°C)	Ü.C.1 (-10°C)	Ü.C.1 (-15°C)	Ü.C.1 (-20°C)	Ü.C.1Su Kürü	Ü.C.1.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	36,94	16,74	10,21	8,09	37,09	-
Veriler (14 gün) Maksimum Gerilme MPa	32,63	11,16	8,10	9,21	-	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	38,73	12,29	7,18	4,52	39,30	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	41,49	25,36	13,22	10,85	53,32	51,85
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	45,34	35,49	22,28	21,22	53,90	54,93



Şekil 4.29. -5°C'de K ve Ü.C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

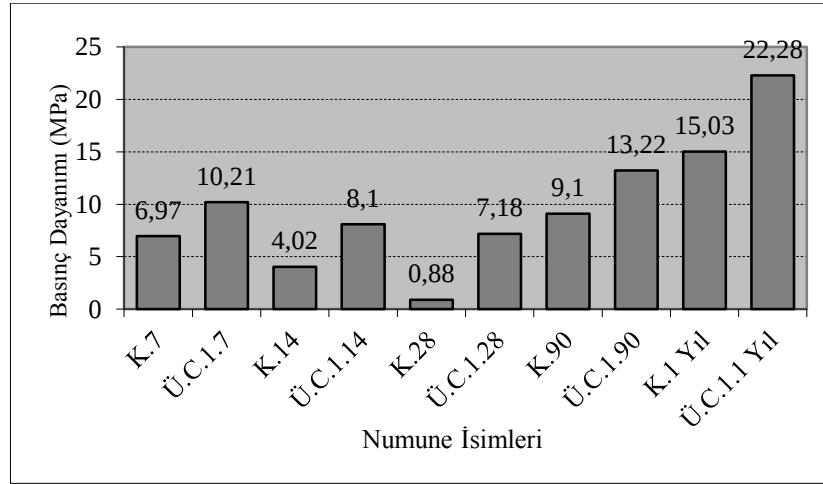
1 m³ beton karışımı için Ü.C.1 karışımı için katkının çözelti yüzdesi %13'tür. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası -4°C'dir. -5°C'de sürekli donmaya maruz bırakılan K karışımının basınç dayanımı 28. güne kadar giderek azalmış ve 3.12 MPa olmuştur. Aynı sıcaklıktaki Ü.C.1 karışımının basınç dayanımı 38,73 MPa'dır ve K karışımının dayanımı bu değerin sadece %8'i kadardır. 28 günlük bu değer aynı karışımın aynı kür süresinde su küründeki basınç dayanımının yaklaşık %99'u kadardır. Yani sürekli donmaya maruz kalmasına rağmen beton kendini tamamen yenileyebilmiştir.

Deney sonuçları göstermektedir ki üre antifriz katkısı tek başına kullanılmaktan ziyade kalsiyum nitrat ile bir arada kombinasyon halinde kullanıldığında özellikle 90. günden sonra çok daha iyi sonuç vermektedir. Sonuçlar arasındaki farklar sıcaklık değişimlerinden ve katkı oranlarındaki değişimlerden kaynaklanmaktadır. -5°C'de Ü.C.1 karışımının 90 günlük basınç dayanımı 41,49 MPa değerine ulaşmıştır. Sürekli donmaya maruz kalmasına rağmen bu değer, 90 günlük standart su küründeki katkısız K karışımının basınç dayanımının %85'i kadardır.

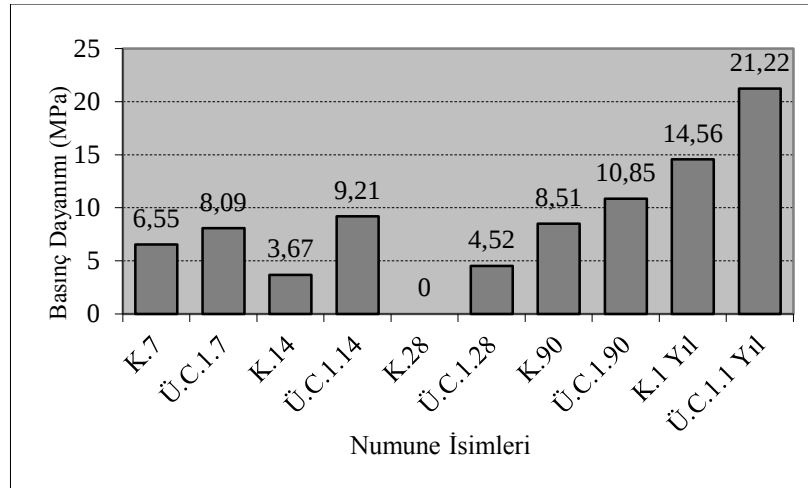


Şekil 4.30. -10°C'de K ve Ü.C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 incelendiğinde 90 günlük basınç dayanımlarının -5°C’de elde edilen 41,49 MPa basınç dayanımına göre -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında sırasıyla %39, %68 ve %74 daha düşük olduğu görülmektedir.



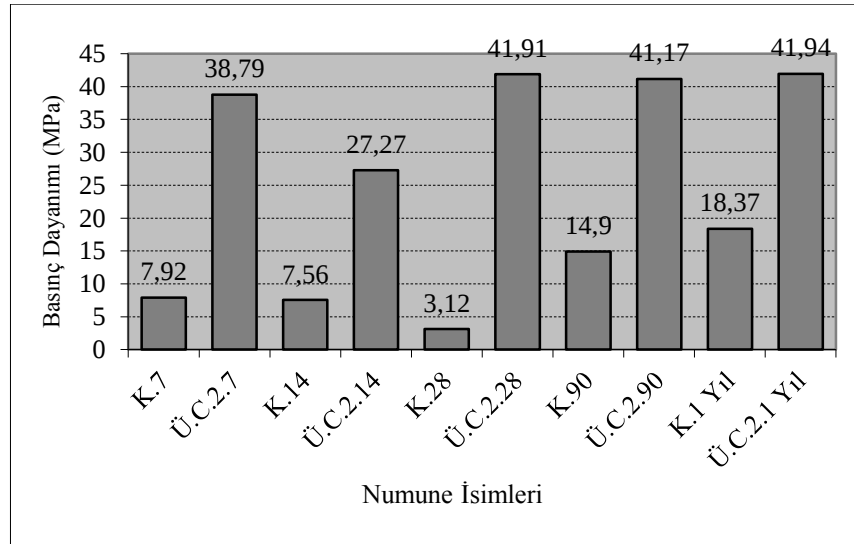
Şekil 4.31. -15°C’de K ve Ü.C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.32. -20°C’de K ve Ü.C.1 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

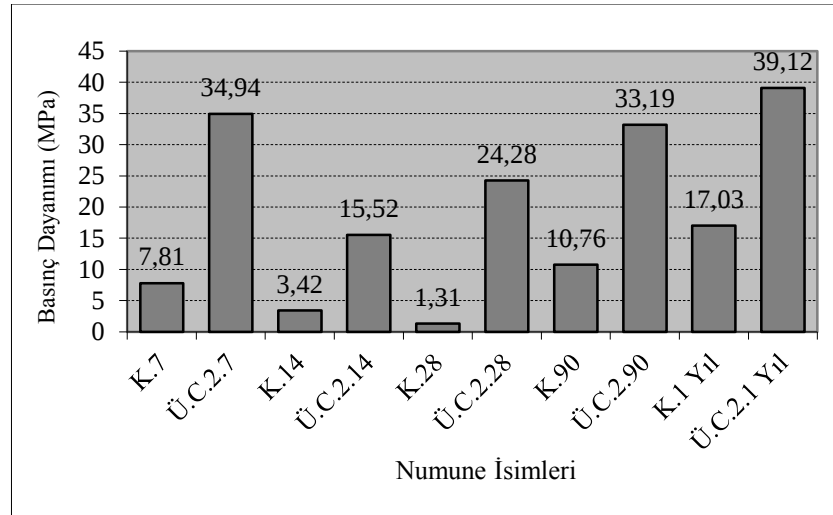
Çizelge 4.14. Ü.C.2 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	Ü.C.2 (-5°C)	Ü.C.2 (-10°C)	Ü.C.2 (-15°C)	Ü.C.2 (-20°C)	Ü.C.2Su Kürü	Ü.C.2.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	38,79	34,94	19,27	12,79	41,18	-
Veriler (14 gün) Maksimum Gerilme MPa	27,27	15,52	13,61	11,60	-	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	41,91	24,28	8,86	3,99	41,39	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	41,17	33,19	21,77	13,58	47,24	44,35
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	41,94	39,12	27,16	21,58	49,27	54,28

**Şekil 4.33.** -5°C’de K ve Ü.C.2 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

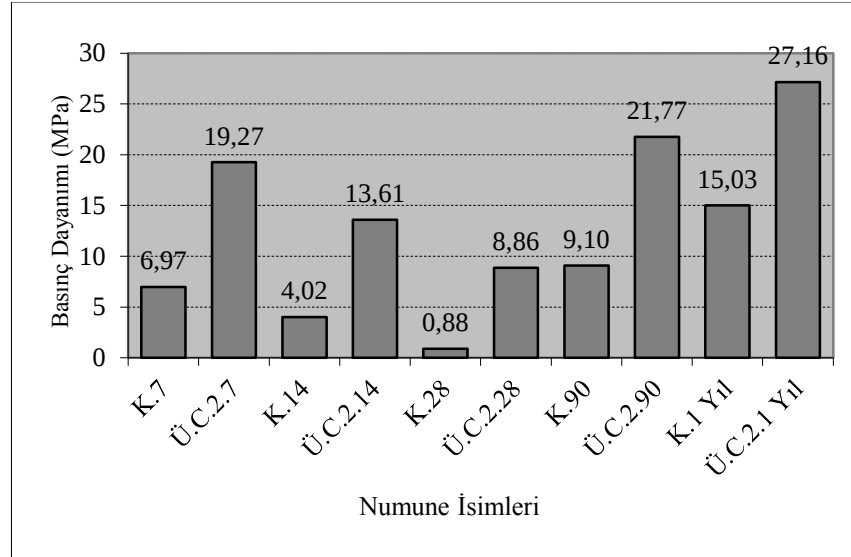
Dolayısı ile -5°C’de Ü.C.2 karışımının 7 günlük basınç dayanımı 7 günlük su küründeki K karışımının basınç dayanımından %2 daha yüksektir. Antifriz katkı kombinasyonu miktarı %6’dan %9’a çıkarıldığında beton basınç dayanımı bütün ortam sıcaklıkları ve

su kürü için artmaktadır. Öyle ki -5°C 'de  .C.2 karışımına ait 7 günlük basınç dayanımı 38,79 MPa iken aynı sıcaklıkta K karışımının basınç dayanımı sadece 7,92 MPa'dır. Bu değerK karışımının -5°C 'deki 7 günlük basınç dayanımından %389 daha yüksektir. .C.2 karışımının -5°C 'de 14 günlük basınç dayanımı 27,27 MPa olup K karışımının aynı sıcaklıktaki ve k r süresindeki basınç dayanımından %260 oranında daha yüksektir. Basınç dayanımları incelendiğinde -5°C 'den düşük sıcaklıklarda,  .C.1 karışımı gibi  .C.2 karışımının basınç dayanımlarının da düşük olduğu gözlenmektedir. Bu durum üre katkısının priz geciktirici etkisinden, hidratasyonun devamı için gerekli ısıyı adsorbe etmesinden ve dolaylı yoldan CH miktarını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Kombinasyonlar incelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımlarının  .C.2 karışımına ait olduğu gözlenmektedir. -5°C için  .C.2 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 41,91 MPa değerine ulaşmıştır. Bu değer su küründeki K karışımının 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %82'sine denk gelmektedir. -5°C 'de İlk 7 günde dahi beton dayanımları 30 MPa'ın üstündedir. -5°C 'de K karışımının 28 günlük basınç dayanımı, aynı sıcaklıktaki  .C.2 karışımının 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %7'si kadardır.



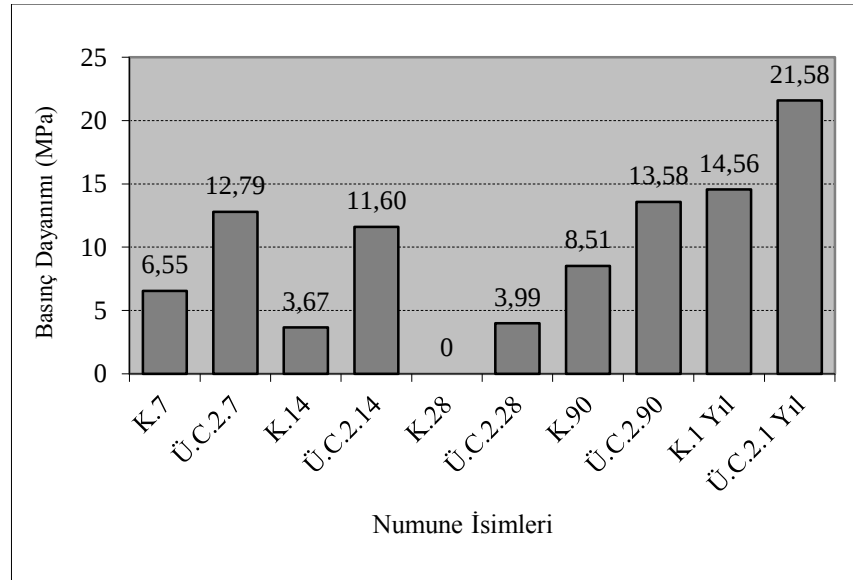
şekil 4.34. -10°C 'de K ve  .C.2 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-10°C'deki K karışımının 7 günlük basınç dayanımı 7,81 MPa iken -10°C'de Ü.C.2 karışımına ait basınç dayanımı ilk 7 günde 32 MPa değerine kadar ulaşmıştır. Bu değer su küründeki K karışımının 7 günlük dayanımının %84'ü kadardır. Bu sonuç -10°C'de dahi antifriz içeren betonun dayanım kazanabildiğini ve hidratasyon olayının devam ettiğini, antifriz katkıları sayesinde suyun donma noktasının düşürülebildiğini kanıtlamaktadır. -10°C için Ü.C.2 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 24,28 MPa'dır. Bu basınç dayanımı ise aynı kür sıcaklığı ve kür süresi için K karışımının 28 günlük basınç dayanımının %47'si kadardır. Basınç dayanımlarına bakıldığında -10°C'de 90 gün boyunca sürekli dona maruz kalan Ü.C.2 karışımının 33,19 MPa gibi bir dayanıma ulaşabilmesi hidratasyonun devam ettiğini ve katkının etkisini ortaya koymaktadır. Numunelere herhangi bir koruma uygulanmamış ve dökülür dökülmez daha önceden istenilen sıcaklıklara getirilen donduruculara yerleştirilmişlerdir. Beton dökümünde ilk dikkate alınması gereken nokta betonun kürüdür. Çünkü kür beton dayanımını ve aşınma direncini artırır, beton yüzeyinin pullanıp dökülmesini, tozlanmasını ve çatlamasını azaltır. İşte antifriz katkı ile katkının donma noktası dikkate alınarak soğuk havada beton dökümünde kür işlemi çok daha kolay yapılabilir.



Şekil 4.35. -15°C'de K ve Ü.C.2 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

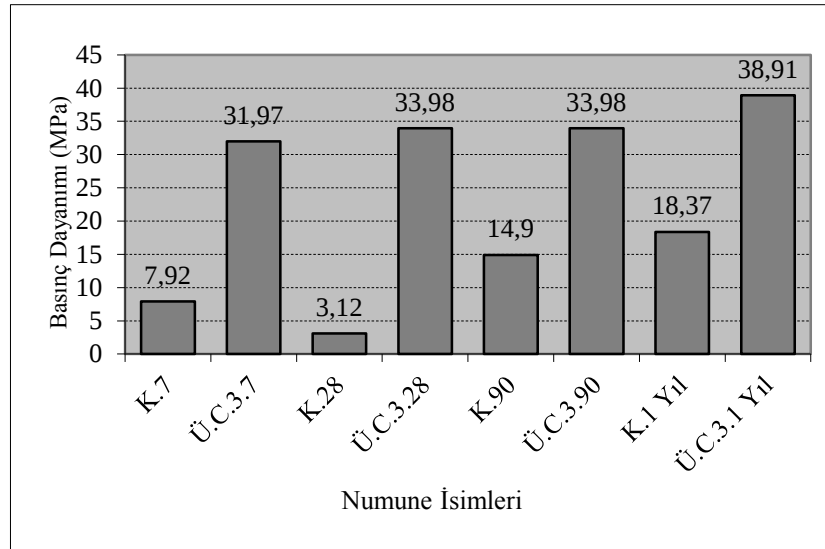
-15°C’de Ü.C.2 karışımı 21,77 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu dayanım değeri aynı zamanda antifriz katkıların uzun süreli etkilerini göstermektedir. -10°C’de en yüksek basınç dayanımı Ü.C.2 karışımına aittir. -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarındaki düşüş üre miktarının artışından kaynaklanabilir. Çünkü ürenin su ile reaksiyonu sonucunda karbonik asit ve amonyak gazı açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyon çok hızlı olup betonda soğuma eğrisinin pik noktası yani dönüm noktasına etki eder ve bunu ısıyı adsorbe ederek yapar. Isının azalması neticesinde priz hızı düşmekte ve hidratasyon yavaşlamaktadır. Ayrıca burada açığa çıkan karbonik asit CH ile reaksiyona girmekte ve kalsit oluşumuna neden olmaktadır. Böylecedolaylı olarak beton dayanımıazalmaktadır. Bu düşüşün temel sebebi %18 konsantrasyona sahip bu karışımın donma noktasının yaklaşık -5,5°C olmasıdır (Ramachandran 1995). Dolayısı ile ortam sıcaklığının -5°C’nin altında olması durumunda -15°C ve -20°C ortam sıcaklıkları için basınç dayanım sonuçları betonun kendini tamamen yenilemesi ve nihai dayanımına ulaşması için yeterli değildir. Bu sebeple kullanılan katkı yüzdeleri ile çok uzun süreli ve katkıların donma noktalarının altında donmaya maruz kalan bir beton suda kür edildiğinde elde edilen dayanımlarına ulaşamamaktadır.



Şekil 4.36. -20°C’de K ve Ü.C.2 için 7, 14, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

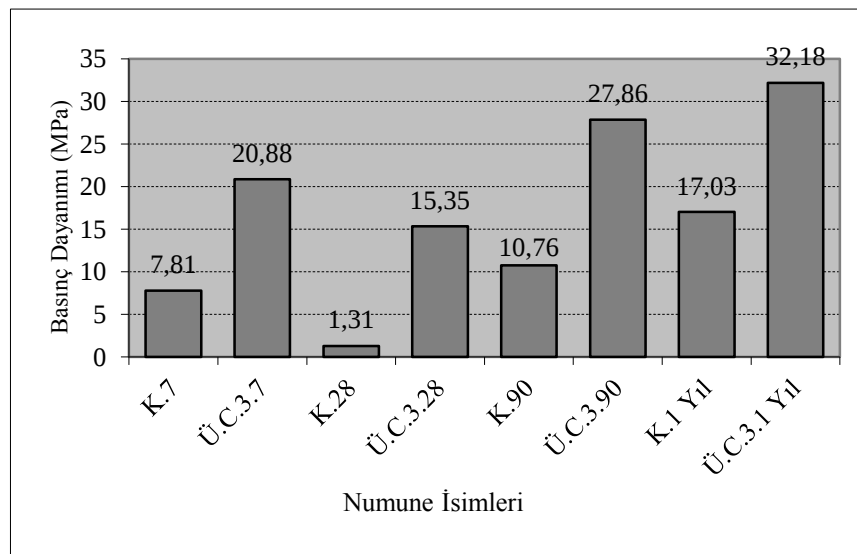
Çizelge 4.15. Ü.C.3 karışımına ait basınç dayanımları

Karışımlar	Ü.C.3 (-5°C)	Ü.C.3 (-10°C)	Ü.C.3 (-15°C)	Ü.C.3 (-20°C)	Ü.C.3Su Kürü	Ü.C.3.D
Veriler (7 Gün) Maksimum Gerilme (MPa)	31,97	20,88	11,29	12,15	36,82	-
Veriler (28 gün) Maksimum Gerilme MPa	33,98	15,35	6,38	2,86	42,64	-
Veriler (90 gün) Maksimum Gerilme MPa	33,98	27,86	13,68	11,72	49,14	38,07
Veriler (1 yıl) Maksimum Gerilme MPa	38,91	32,18	21,49	16,69	50,45	52,06

**Şekil 4.37.** -5°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

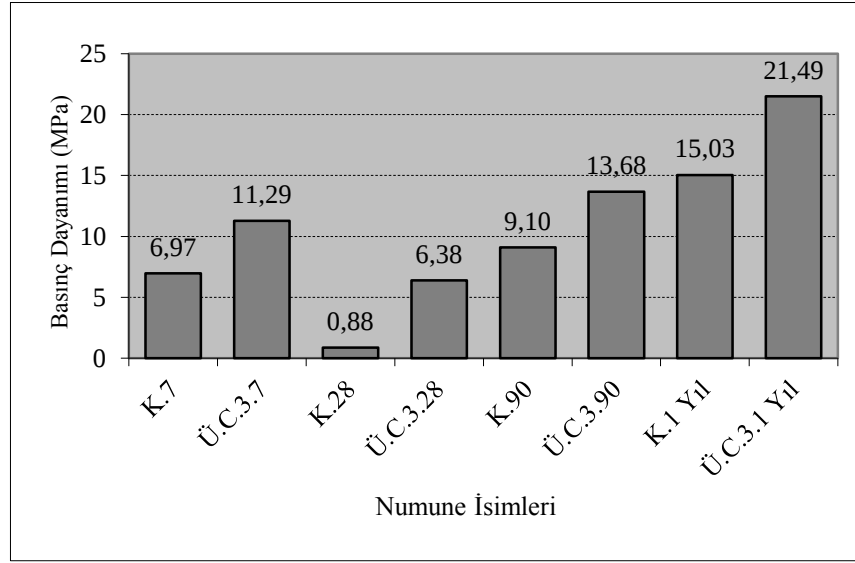
Soğuk havada beton dökümünde, betonun erken yaşta donması, gerekli dayanımın kazanılamaması, kür işleminin yeterince uygulanamaması, hızlı sıcaklık değişimleri ve servis ömrü süresince yapının stabilitesinin sağlanamaması gibi bazı problemlerle karşılaşilmektedir (Rixom and Mailvaganam 1999c). Elde edilen sonuçlar antifriz katkıların, bu problemlerin üstesinden gelmek için uygulanabilecek pratik ve güvenilir

bir seçenek olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada 1 m³ beton Ü.C.3 karışımı için kullanılan katkının çözelti yüzdesi %23'tür. Bu çözelti yüzdesi için donma noktası -7°C'dir(Ramachandran 1995). -5°C'de Ü.C.3 karışımının 7, 28 ve 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları sırasıyla 31,97 MPa, 33,98 MPa, 33,98 MPa ve 38,91 MPa'dır. Bu basınç dayanımları, aynı sıcaklıktaki K karışımının basınç dayanımlarındansırasıyla %300, %989, %128 ve %111 yüksektir. Genel olarak kür süresi uzadıkça basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir.

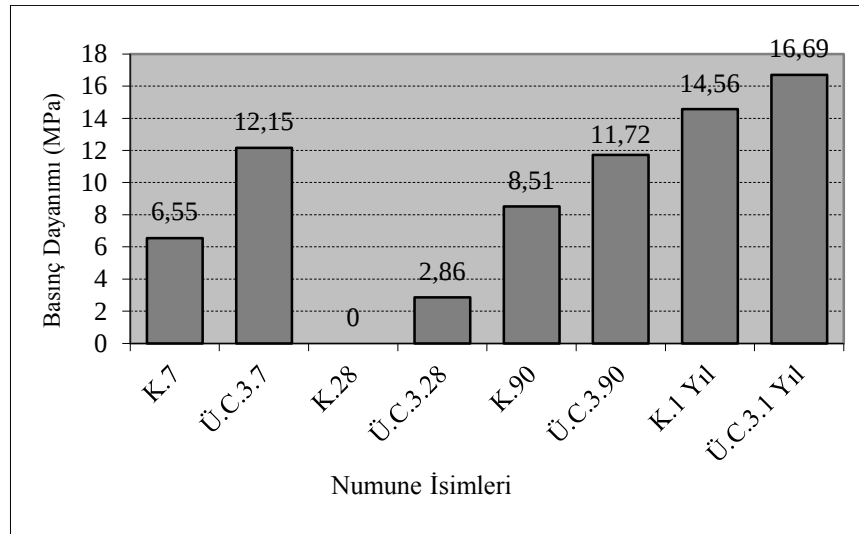


Şekil 4.38. -10°C'de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

-10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında Ü.C.3 karışımına ait basınç dayanımları K karışımının basınç dayanımları ile karşılaştırılarak Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 çizilmiştir. Bütün şekillerde görüldüğü gibi Ü.C.3 karışımının her sıcaklık ve kür süresi için basınç dayanımları K karışımının basınç dayanımlarından daha yüksektir. -10°C için 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla 20,88 MPa, 15,35 MPa ve 27,86 MPa'dır. Aynı kür şartlarına sahip K karışımının 7, 28 ve 90 günlük basınç değerleri, Ü.C.3 karışımının basınç dayanımlarının sırasıyla %37'si, %9'u ve %38'i kadardır. -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının 20 MPa'dan daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla uygulanan bu kür sıcaklıkları kullanılan çözelti yüzdesi için elverişli değildir.



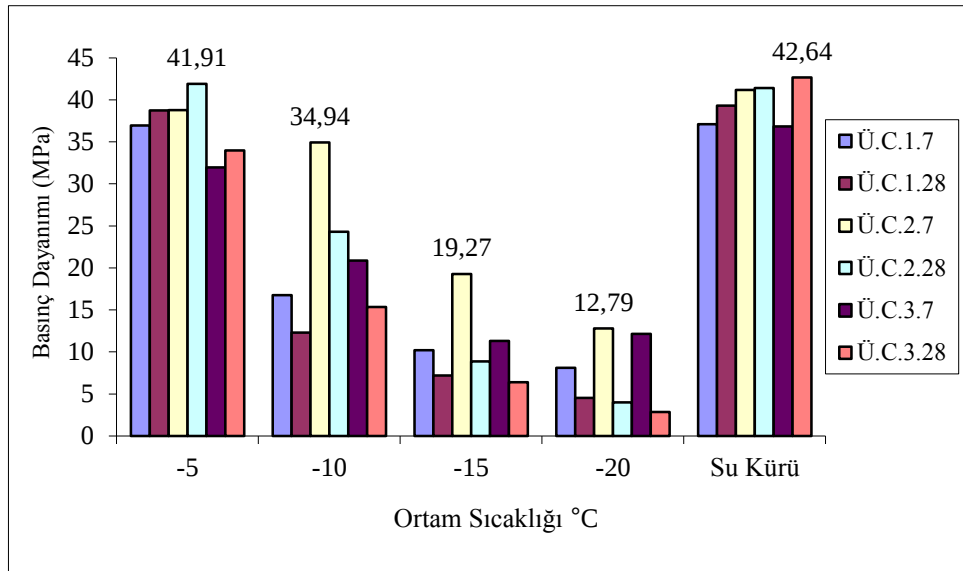
Şekil 4.39. -15°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.40. -20°C’de K ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Soğuk hava ilk 28 günde beton özelliklerine daha fazla etki göstermektedir. Diğer karışımlarda olduğu gibi bu üç karışımda da esas dayanım gelişimi 28. günden sonra gözlenmektedir. Aslında burada önemli olan herhangi bir koruma olmaksızın don sıcaklıkları altında yerleştirilebilen, kür edilebilen ve dayanım kazanabilecek bir karışım elde etmektir. Ayrıca ortam sıcaklıklarının düşmesi ile paralel olarak basınç dayanımları

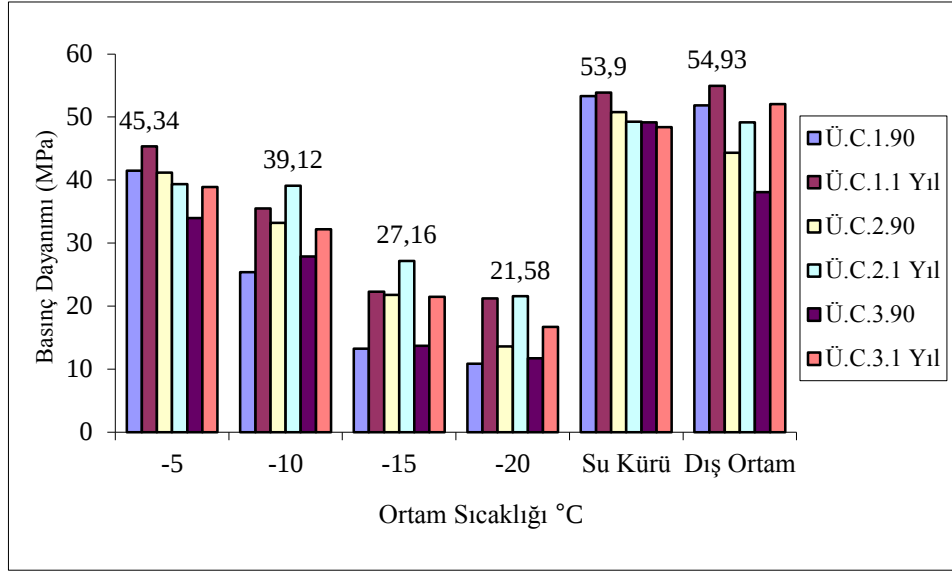
da azalmaktadır. Yani kullanılan üre miktarı arttıkça priz üzerindeki olumsuz etkisi neticesinde donma noktasından daha düşük bir sıcaklıkta, katkının etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 incelendiğinde Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait -15°C kür sıcaklığında 28 günde kazanılan basınç dayanımlarının ortalaması 6 MPa'dır. Hava sıcaklığının -22°C ile 7°C arasında değiştiği dış ortamda K.D karışımının 90 günlük basınç dayanımı 21,31 MPa iken aynı kür süresinde Ü.C.1.D, Ü.C.2.D ve Ü.C.3.D karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla 51,85 MPa, 44,35 MPa ve 38,07 MPa'dır. Görüldüğü gibi gece ve gündüz sıcaklıklarının devamlı değiştiği dış ortamda elde edilen basınç dayanımları, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımları için K karışımının basınç dayanımından sırasıyla %143, %108 ve %78 daha yüksektir.



Şekil 4.41. Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Bu üç grup arasında bütün kür ortamları incelendiğinde en iyi sonuçlar Ü.C.2 karışımına aittir. Üç grup arasında en düşük dayanımlar Ü.C.3 karışımına aittir. Bunun nedeni priz üzerinde geciktirici etkisi olan üre miktarının artışıdır. Ayrıca ürenin donma noktası kalsiyum nitrattan daha düşüktür. Dolayısı ile üre miktarı arttıkça özellikle düşük sıcaklıklarda beton bünyesindeki suyun donma ihtimali artmaktadır. Su küründeki Ü.C.2 karışımının 7 günlük basınç dayanımı su küründeki K karışımının 7 günlük basınç dayanımından yaklaşık %8,5 daha fazladır. Bu sonuçlara göre katkıların

birlikte kullanılması dayanım kazanma hızının artması ve erken dayanım artışı için daha elverişli olabilir.



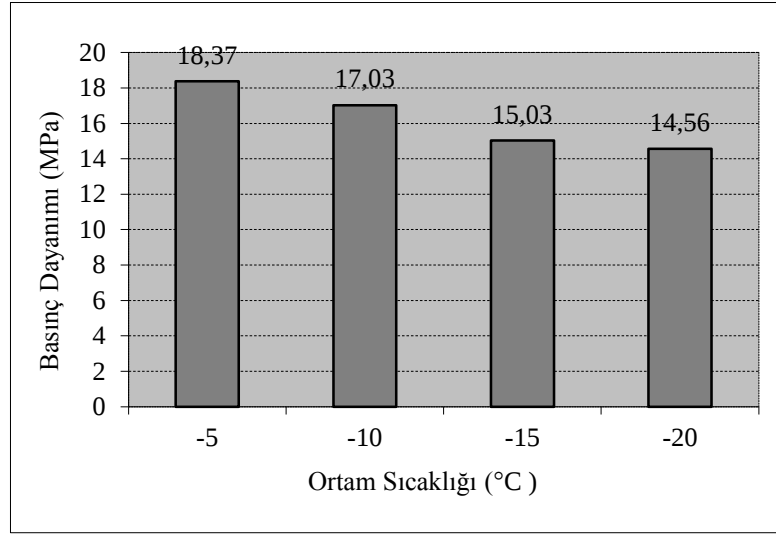
Şekil 4.42. Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

4.3.1.b. Ortam sıcaklığının 1 yıllık basınç dayanımlarına etkisi

❖ 90 gün dondurucu+275 gün laboratuvar kürünün uygulanması

• K karışımına ait sonuçların değerlendirilmesi

Üçer numune -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C sıcaklıklardaki dondurucularda 90 gün boyunca bekletildikten sonra 275 gün laboratuvar ortamında bırakılmışlardır. 90 gün sonra numuneler donduruculardan laboratuvar ortamına bırakıldıkları için beton bünyesinde donan su çözünmüş ve zamanla dayanımı -5°C için 18,37 MPa'a ulaşmıştır.



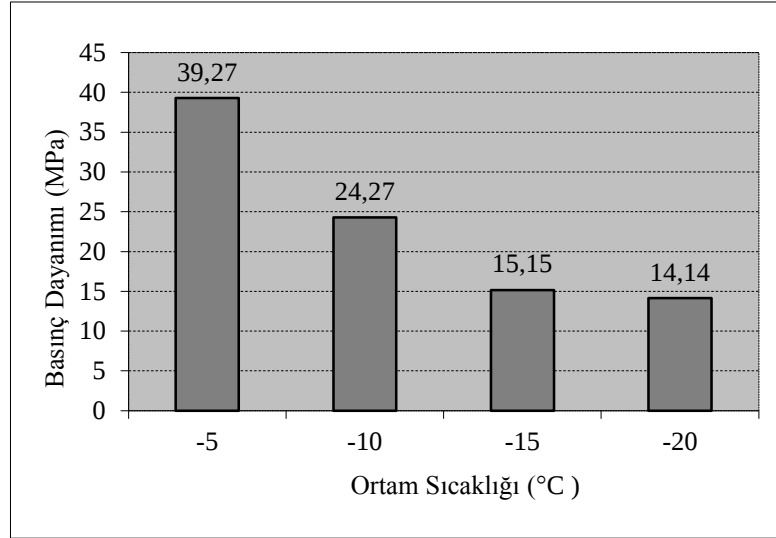
Şekil 4.43. 1 Yıllık kür için K karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

Ek laboratuvar kürüyle, yalnız 90 gün dondurucuda kür edilen numuneye göre basınç dayanımlarında -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C ortam sıcaklıkları için sırasıyla %23, %58, %65 ve %71 oranında artış meydana gelmiştir. Fakat beton dondan zarar gördüğü için bu basınç dayanımları 28 günlük suda kür edilen basınç dayanımından oldukça düşüktür. Yani beton kendini tamamen yenileyememiştir. Ortam sıcaklığı azaldıkça basınç dayanımlarında -5°C'den -10°C'ye %7 oranında, -5°C'den -15°C'ye %18 oranında ve -5°C'den -20°C'ye %20 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Görüldüğü gibi ortam sıcaklıkları arasındaki fark yükseldikçe basınç dayanımlarındaki düşüş yüzdeleride artmaktadır.

- **Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi**

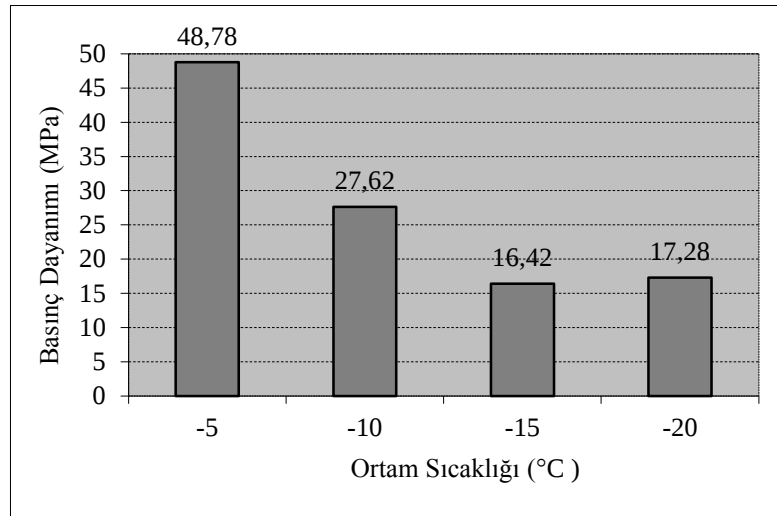
ACI 306R (Anonymous 2010)'a göre soğuk havada beton dökümünde, minimum 10°C bir beton karışım sıcaklığı ve yerleştirme esnasında ise maksimum 26,67°C sıcaklık elde etmek için karışım hazırlanmadan önce su ve agreganın ısıtılması gereklidir. Ayrıca betonun bütün yüzeyleri 7 gün boyunca bu sıcaklıkta tutulmalıdır. Ancak betonun dondan korunması işi oldukça maliyetlidir. Gerçek yapı boyutları düşünüldüğü zaman çok büyük yapıların her noktasının aynı sıcaklıkta tutulması oldukça zor bir iştir.

Dolayısı ile betonun bu ısıda kalmasını sağlamak yerine beton bünyesindeki suyun donmasını engellemek çok daha kolay ve pratik bir yöntem olacaktır.



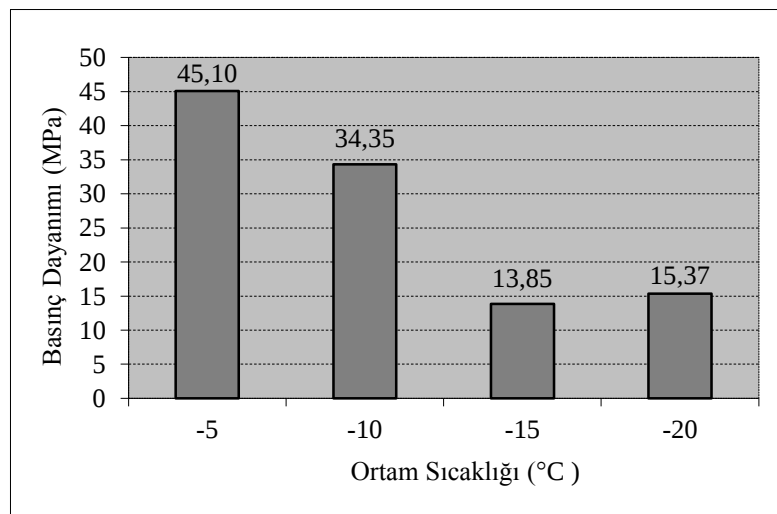
Şekil 4.44. 1 Yıllık kür için Ü.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

Sadece üre içeren Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımları incelendiğinde üç grupta da kür sıcaklığı azaldıkça 1 yıllık basınç dayanım değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Özellikle -15°C ve -20°C ortam sıcaklıklarında basınç dayanımları -5°C ve -10°C ortam sıcaklıklarında elde edilen basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak -5°C ve -10°C ortam sıcaklıklarında K karışımı ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Örneğin -5°C için önce 90 gün dondurucu sonra 275 gün laboratuvar ortamında bekletilen K karışımının basınç dayanımı 18,37 MPa, Ü.1 karışımının basınç dayanımı 39,27 MPa'dır. -5°C ve -10°C için Ü.1 karışımının basınç dayanımları K karışımının basınç dayanımından sırasıyla yaklaşık %114 ve %42 daha yüksektir. Kendi içinde karşılaştırılacak olursa Ü.1 karışımının -5°C'deki 39,27 MPa olan basınç dayanımı, -10°C için %38, -15°C için %61 ve -20°C için %64 azalmıştır. Bu değer standart su kürüne tabi tutulan K karışımının basınç dayanımının %96'sı kadardır. Sürekli donmaya maruz kalmasına rağmen ürenin antifriz özelliği ile beton donma noktası civarındaki -5°C ortam sıcaklığında kendini yenileyebilmiştir.



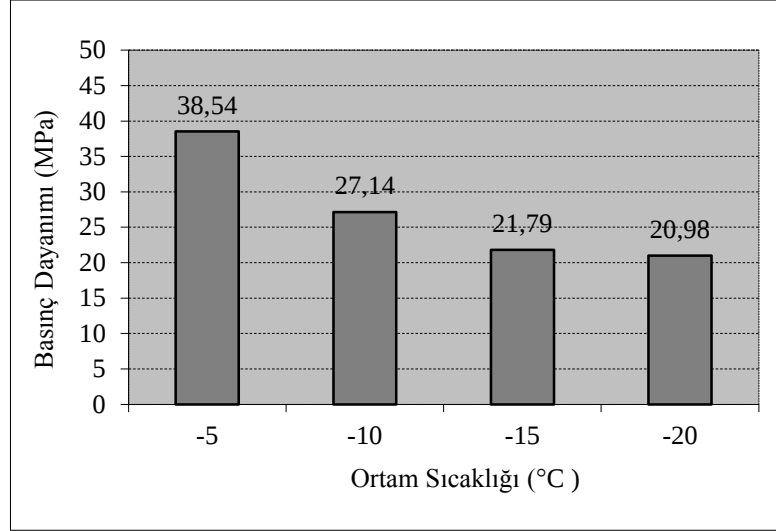
Şekil 4.45. 1 Yıllık kür için Ü.2 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

-5°C ve -10°C için Ü.2 karışımının basınç dayanımları 48,78 MPa ve 27,72 MPa, Ü.3 karışımının basınç dayanımları ise 45,10 MPa ve 34,35 MPa'dır. Aynı sıcaklıkta Ü.2 karışımının basınç dayanımları K karışımının basınç dayanımlarından sırasıyla %165 ve %83, Ü.3 karışımı ise %145 ve %128 daha yüksektir. Üre içeren her üç karışımda 90 gün boyunca dondurucu kürüne maruz kalsalar bile kullanılan çözelti yüzdelilerindeki donma noktalarından daha yüksek sıcaklıklarda kendini yenilemekte ve basınç dayanım gelişimi devam etmektedir.



Şekil 4.46. 1 Yıllık kür için Ü.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

- C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi

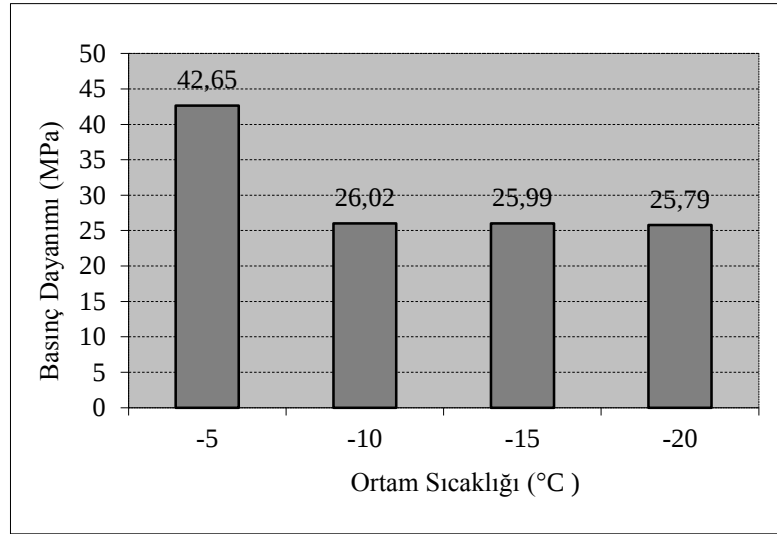


Şekil 4.47. 1 Yıllık kür için C.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

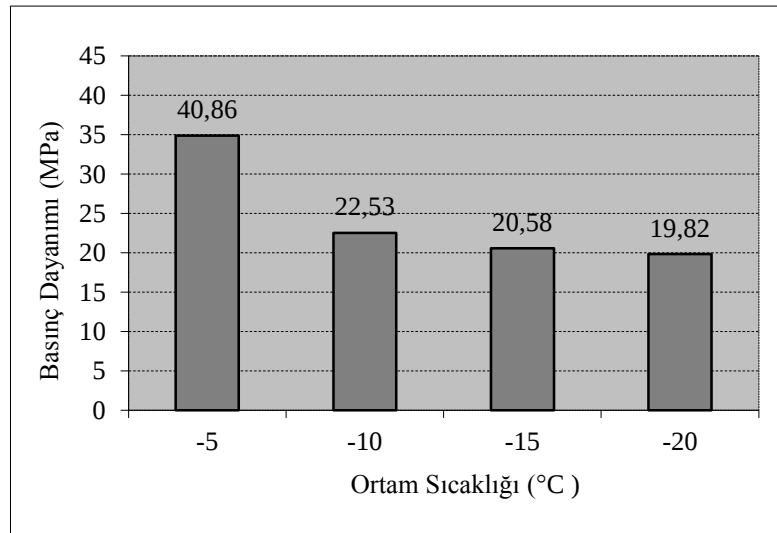
C.1, C.2 ve C.3 karışımlarının 1 yıllık kür süreleri için sıcaklıkla basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da gösterilmiştir. C.1 karışımının -5°C’de 38,54 MPa değerindeki basınç dayanımı ile -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında elde edilen basınç dayanımları karşılaştırılacak olursa bu sıcaklıklardaki kayıplar sırasıyla %30, %43 ve %45’tir. Daha önceden de belirtildiği gibi kür süresi uzadıkça özellikle 90. günden sonra, sıcaklık düşüşüne bağlı olarak basınç dayanımlarında meydana gelen kayıp daha düşüktür. Örneğin aynı karışımın 28 günlük basınç dayanımlarında sıcaklık azaldıkça meydana gelen kayıplar yaklaşık olarak -10°C için %68, -15°C için %84 ve -20°C için %88’dir. Yani uzun kür süresi antifriz katkılı betonda olumlu bir etkiye sahiptir. C.1 karışımının basınç dayanımı aynı kür şartlarındaki K karışımının dayanımından %109 oranında daha yüksektir

Şekil 4.48’de görüldüğü gibi sürekli donmanın olduğu kür sıcaklıkları için C.2 karışımının 1 yıllık basınç dayanımları C.1 ve C.3 karışımlarının dayanımlarından daha yüksektir. Örneğin -20°C ortam sıcaklığı için en yüksek basınç dayanımı 25,79 MPa ile C.2 karışımına aittir. -5°C için en yüksek basınç dayanımı C.2 karışımına ait olup bu değer 42,65 MPa’dır. C.2 karışımının basınç dayanımı aynı kür şartlarındaki K

karışımının dayanımından %132 oranında daha yüksektir. C.3 karışımının ise -5°C’de elde edilen basınç dayanımı aynı kür şartlarındaki K karışımından %122 oranında daha yüksektir. Bu sonuçlara göre daha önceden de ifade edildiği gibi kalsiyum nitratın tek başına kullanıldığı karışımlarda optimum karışım %9 oranında katkı kullanılan C.2 karışımıdır.



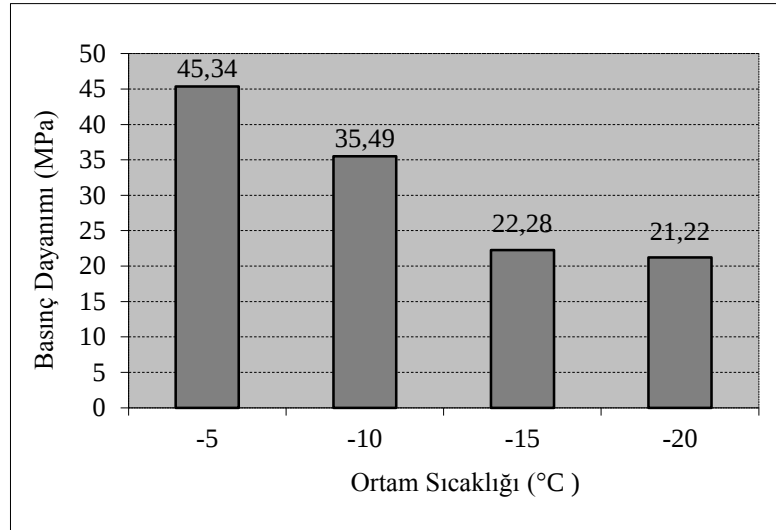
Şekil 4.48. 1 Yıllık kür için C.2 karışımın sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.49. 1 Yıllık kür için C.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

Kalsiyum nitrat gibi antifriz katkıları boşluk yapısında suyun konsantrasyonu artırarak suyun donma noktasını düşürmektedir. Çünkü boşluk yapısındaki katkı boşluk çapının azalmasını sağlar ve daha küçük boşluklarda donma noktası daha düşük olur (Kornonen 1997,1999; Rixom and Mailvaganam 1999a). Kalsiyum nitratın tek başına kullanıldığı bu karışımlara ait sonuçlar beton özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Kalsiyum nitrat katkısı -15°C ve -20°C gibi düşük sıcaklıklarda üreye göre daha fazla etki göstermiştir.

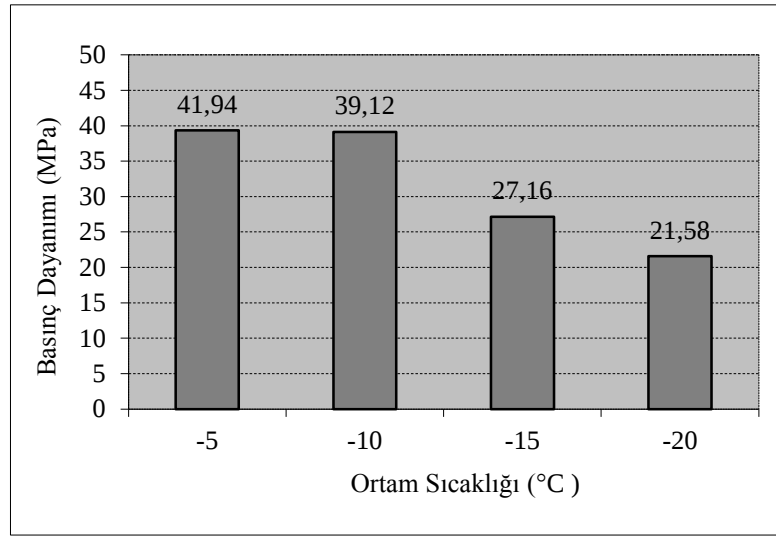
- **Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi**



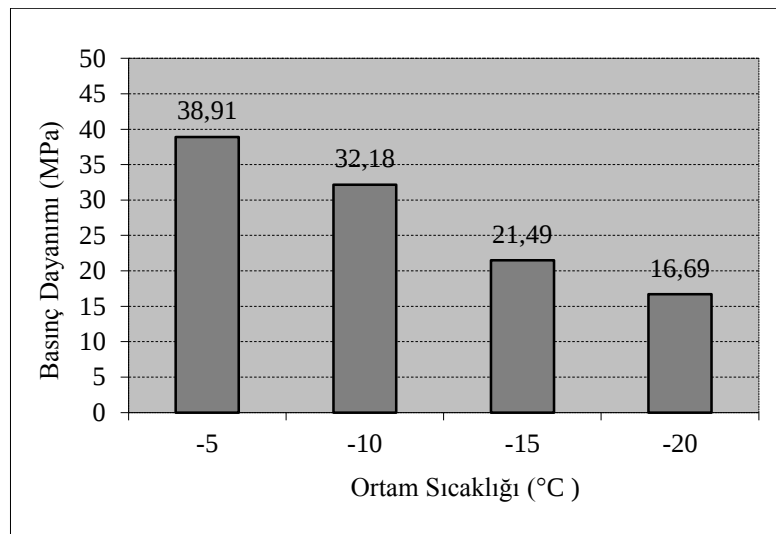
Şekil 4.50. 1 Yıllık kür için Ü.C.1 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

-5°C kür sıcaklığında elde edilen en yüksek basınç dayanımı 45,34 MPa ile Ü.C.1 karışımına aittir. Ancak -10°C için 39,12 MPa, -15°C için 27,16 MPa ve -20°C için 21,58 MPa ile Ü.C.2 karışımına aittir. Bu basınç dayanımları, kullanılan çözelti yüzdesine göre katkının donma noktasından daha düşük sıcaklıklara maruz kalmasına rağmen betonun kendini yenileyebildiğini göstermektedir. Genel olarak bütün kür süreleri ve sıcaklıkları dikkate alındığında sürekli donma etkisinde en yüksek sonuçlar Ü.C.2 karışımına aittir. Ü.C.2 karışımının -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C için basınç dayanımları, aynı kür şartlarındaki K karışımının basınç dayanımlarından sırasıyla %128, %129, %80 ve %48 daha yüksektir. Sıcaklık azaldıkça aradaki fark azalmaktadır.

Ancak -5°C ve -10°C kür sıcaklıkları için aradaki fark oldukça yüksektir. Ü.C.3 karışımının ise -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C için basınç dayanımları, aynı kür şartlarındaki K karışımının basınç dayanımlarından sırasıyla %111, %89, %43 ve %15 daha yüksektir. Yani katkı oranı arttıkça K karışımı ile olan fark azalmaktadır. Bu durum, Mwaluwinga *et al.*(1997) tarafından ifade edildiği gibi artan kalsiyum nitratla beraber üre miktarının da artışından kaynaklanabilir.



Şekil 4.51. 1 Yıllık kür için Ü.C.2 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi



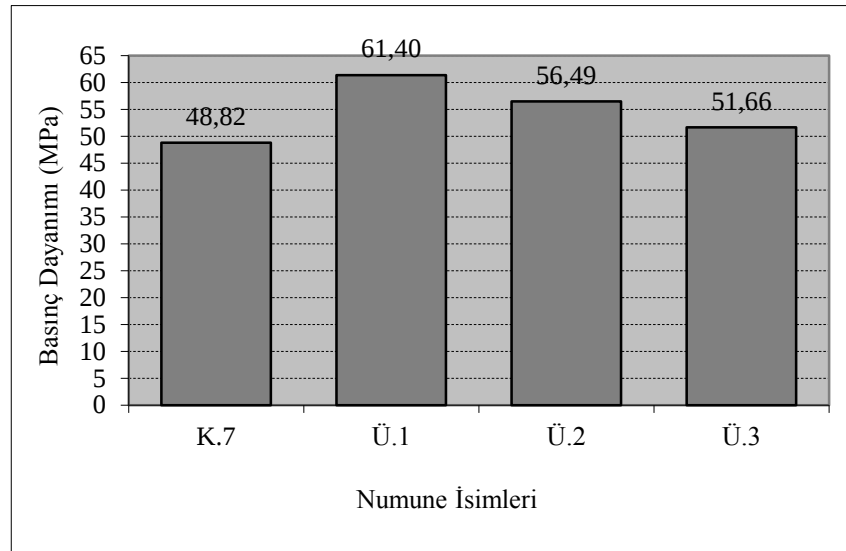
Şekil 4.52. 1 Yıllık kür için Ü.C.3 karışımının sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

❖ 90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürünün uygulanması

• K karışımına ait sonuçların değerlendirilmesi

Bu kür şartında numuneler dökülür dökülmez standart su kürüne yerleştirilmişlerdir. 90 gün sonra sudan çıkarılan numuneler 1 yıl tamamlayacak şekilde 275 gün laboratuvar ortamına bırakılmışlardır. Bu süre sonunda ise basınç dayanım testleri yapılmıştır. K karışımının bu kür şartlarında elde edilen basınç dayanımı 48,82 MPa'dır. Yani K karışımının 28 günlük su küründe elde edilen basınç dayanımı ile karşılaştırılacak olursa yaklaşık %19'luk bir artış söz konusudur. Ayrıca -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarındaki dayanımları ile karşılaştırılırsa dayanımlardaki kayıplar sırasıyla %62, %65, %69 ve %70'tir.

• Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi

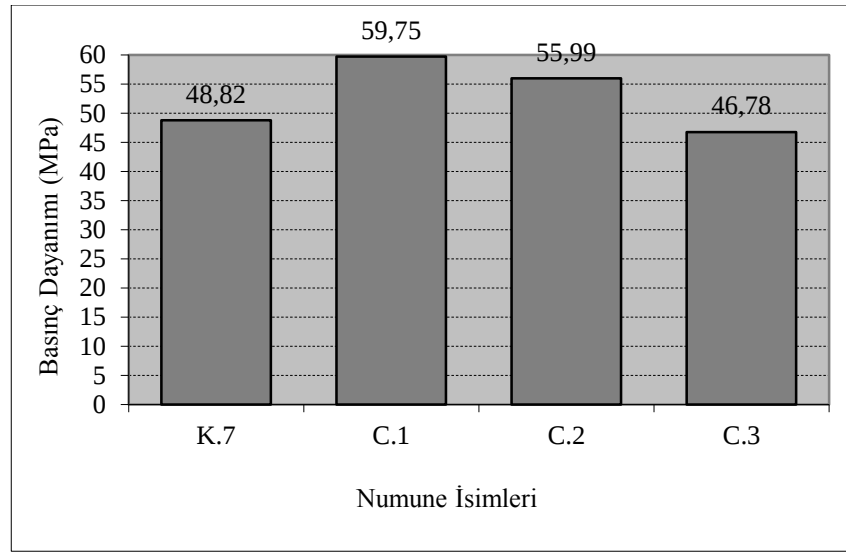


Şekil 4.53. 90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması

K karışımı ve üre içeren Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımları karşılaştırıldığında üre içeren karışımların basınç dayanımlarının K karışımından daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şöyle ki Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarının basınç dayanımları K karışımından sırasıyla yaklaşık olarak %26, %16 ve %6 daha yüksektir. Standart su küründe elde edilen basınç dayanımlarının yüksek çıkması beklenen bir durumdur. En yüksek dayanım Ü.1 karışımına ait olup 61,40 MPa'dır. Aynı zamanda bu değer bütün karışımlar ve bütün kür süreleri içinde elde edilen en yüksek basınç dayanımıdır. Katkı miktarı arttıkça priz geciktirici etkisinden dolayı basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmektedir (Mwaluwinga *et al.* 1997). Üre katkıları standart su küründe oldukça etkilidir. Bu katkı aynı zamanda normal hava koşullarında da yüksek dayanımlı beton elde etmek için de kullanılabilir.

- **C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi**

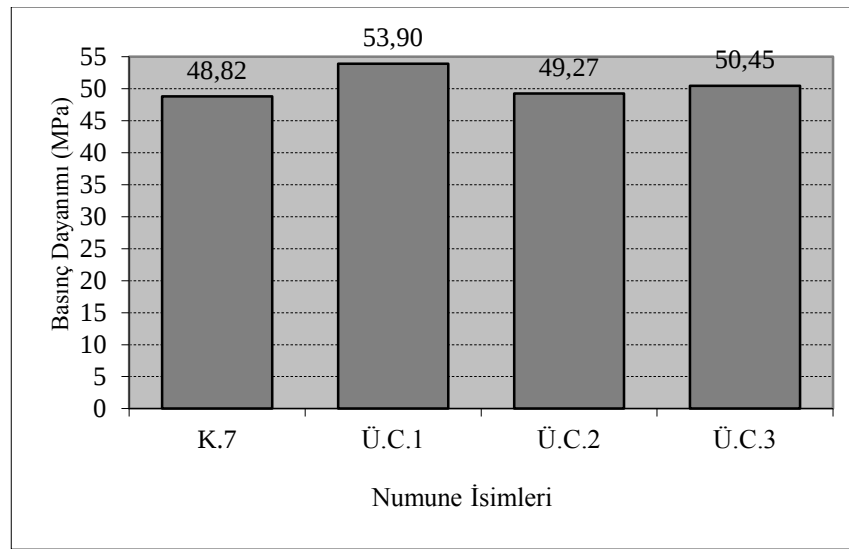


Şekil 4.54. 90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, C.1, C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Katkı oranı arttıkça su küründeki karışımların basınç dayanımları azalmıştır. Şöyle ki C.1, C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımları incelendiğinde C.1 ve C.2 karışımlarının K karışımından daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu, C.3 karışımının ise daha düşük bir basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmektedir. C.1 ve C.2 karışımlarının dayanımları K karışımından sırasıyla %22 ve %15 daha yüksektir. C.3 karışımı ise K karışımından %4 oranında daha düşüktür. Bu üç karışım

içinde standart su küründe elde edilen yüksek dayanım C:1 karışımına aittir. Su kürlerinin uygulanmasındaki amaç sürekli don etkisi ile aradaki farkın gözlenmesidir. Şöyle ki sadece kalsiyum nitrat içeren üç karışım içinde sürekli don etkisi de göz önüne alındığında optimum karışım C.2 karışımıdır.

- Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi



Şekil 4.55. 90 gün su kürü+275 gün laboratuvar kürü için K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Her üç karışım için elde edilen basınç dayanımları K karışımının basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımları arasında standart su küründe 1 yılın sonunda elde edilen en yüksek basınç dayanımı Ü.C.1 karışımına aittir. Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımları K karışımından sırayla % Ancak bu çalışmada amaç don sıcaklıkları altında optimum karışımı tespit etmek olduğu için sürekli donma etkisi esas değerlendirme kriteridir. Bu bağlamda -10°C'den düşük kür sıcaklıklarında en yüksek dayanımlar Ü.C.2 karışımına aittir. Dolayısı ile bu üç karışımın optimum karışımı Ü.C.2'dir. Korhonen (2003) tarafından ifade edildiği gibi standart su küründe elde edilen dayanımlar bütün karışımlar için oldukça yüksektir.

❖ 365 gün dış ortam kürü uygulanması

• K karışımına ait sonuçların değerlendirilmesi

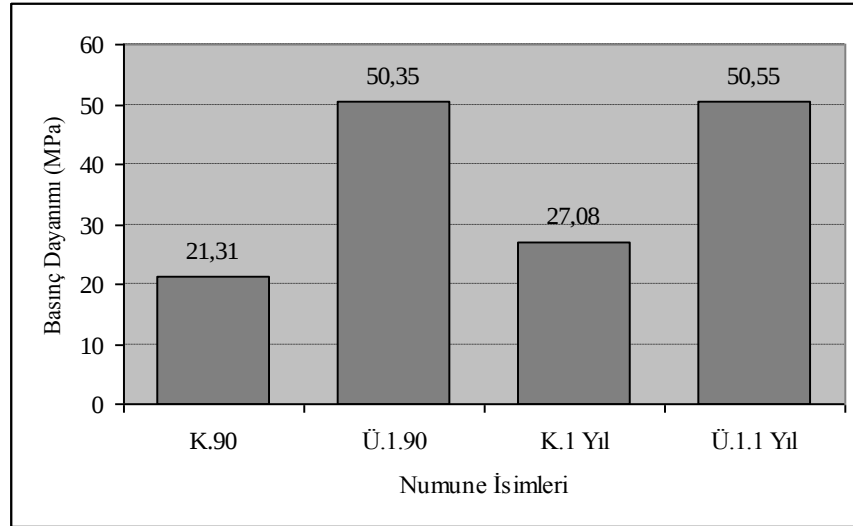
Dış ortamdaki numuneler en başından dökülür dökülmez Erzurum kış şartlarında dış ortama bırakılmışlardır. Bu ortamda hava sıcaklıkları 7°C ile -22°C arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklar EK 2’de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Yani bu numuneler önce soğuk hava şartlarına maruz kaldıktan sonra yağışlı bahar mevsimine ve daha sonra yaz ve sonbahar iklim şartlarına maruz bırakılmışlardır. Dış ortamdaki K.D karışımının 90 günlük basınç dayanımı 21,31 MPa iken 1 yılın sonunda %27 oranında bir artış ile 27,08 MPa olmuştur. Dış ortamda elde edilen bütün veriler incelendiğinde antifriz içeren karışımların basınç dayanımlarının, K.D karışımının basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Standart su küründe elde edilen 28 günlük basınç dayanımı, K.D karışımının 90 günlük ve 1 yıllık dayanımlarından sırasıyla %92 ve %52 daha yüksektir. K karışımı dış ortamda soğuk havaya maruz kaldığı için bazı günler gündüz hava sıcaklıkları suyun donma noktasından yüksek olmasına rağmen beton kendini tamamen yenileyememiştir.

• Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi

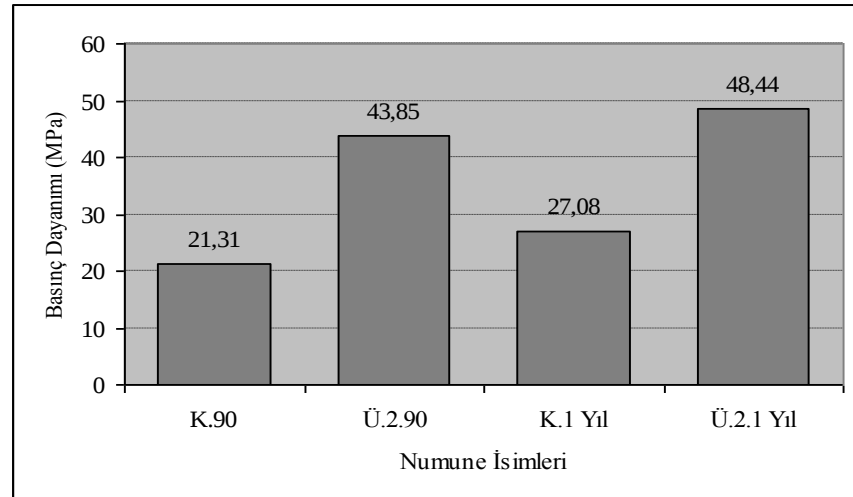
Dış ortamda üç karışımında basınç dayanımları K karışımına göre oldukça yüksektir. Bunun nedeni, hava sıcaklığındaki ve nem durumundaki değişimdir. Dış ortamda gece ve gündüz sıcaklıkları değiştiği için basınç dayanım gelişimi pozitif yönde ve daha yüksek değerlere doğru devam etmiştir. Dondurucularda kür edilen numuneler sürekli soğuk havaya maruz kaldıkları için dayanım değerleri daha düşüktür.

Ü.1.D için 50,55 MPa, Ü.2.D için 48,44 MPa ve Ü.3.D için 48,08 Mpa değerlerinde oldukça yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Üre içeren üç farklı karışımdan elde edilen sonuçlara göre dış ortamda basınç dayanımı gelişimi durmamış ve hidrasyon devam etmiştir. Ü.1.D karışımının 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları K.D karışımının 90 günlük ve 1 yıllık dayanımlarından sırasıyla %136 ve %86 daha

yüksektir. Bu üç karışım içinde dış ortamdaki en yüksek basınç dayanımları Ü.1.D karışımına aittir. Ü.1.D karışımının 90 günlük basınç dayanımı standart su küründeki K karışımının 28 günlük basınç dayanımından yaklaşık %23daha yüksektir.



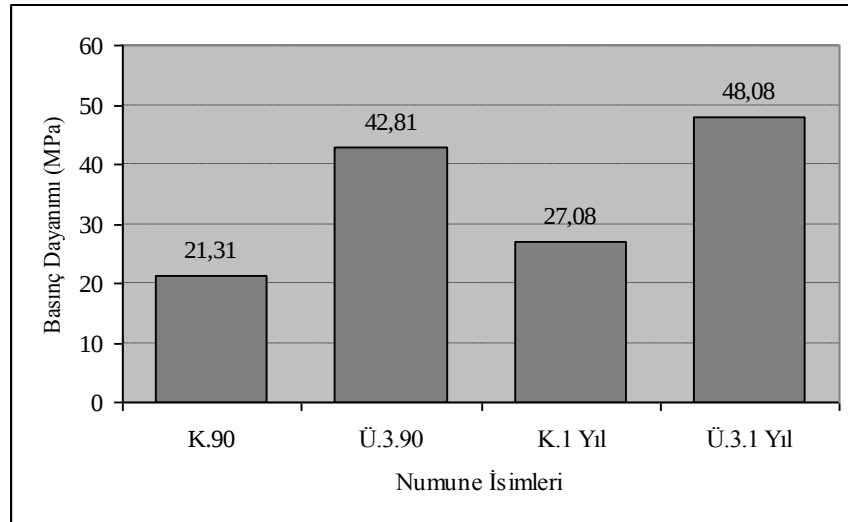
Şekil 4.56. K.D ve Ü.1.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.57. K.D ve Ü.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Ü.2.D karışımının 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları aynı kür sürelerindeki K.D karışımının basınç dayanımlarından %105 ve %78, Ü.3.D karışımının 90 günlük ve 1

yıllık basınç dayanımları ise K.D karışımından %100 ve %77 daha yüksektir. Kür süresi uzadıkça Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımları ile K karışımı arasındaki fark azalmaktadır. Yani katkısız olan kontrol betonu da dış ortamda dayanım kazanmaya devam etmiştir. Bu durum soğuk havanın beton dökümü için elverişli bir zaman olabileceğini göstermektedir. Katkı miktarı arttıkça dış ortamda dayanımlardaki düşüşün nedeni ürenin dolaylı yoldan CH miktarını azaltması ve priz geciktirici etkisi gösterilebilir. Dış ortamda üç karışım arasında en yüksek basınç dayanımı Ü.1 karışımına aittir. Ancak tüm kür sıcaklıkları dikkate alındığında en optimum karışım Ü.2 karışımıdır. Çünkü sürekli don etkisinde Ü.1 karışımının dayanımları Ü.2 karışımından daha düşüktür.

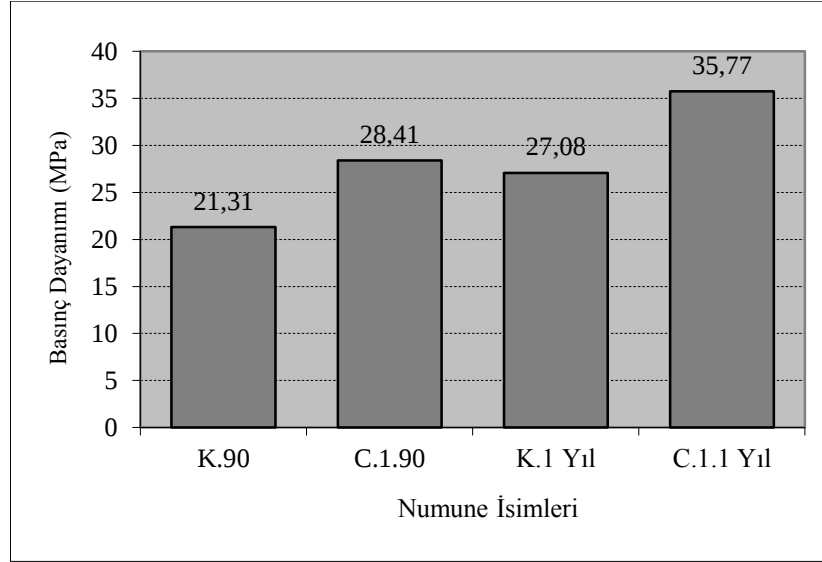


Şekil 4.58. K.D ve Ü.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

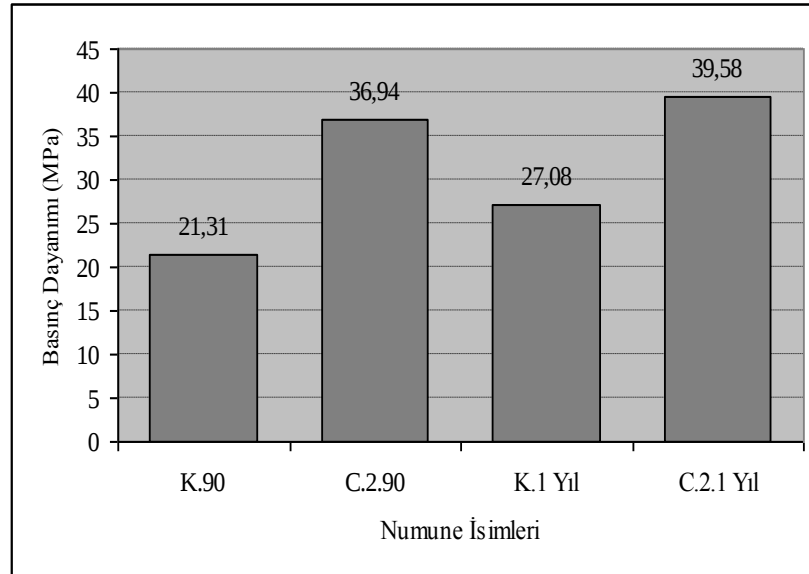
- **C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi**

C_3S ve C_2S ile aynı katyonları içeren kalsiyum klorit, kalsiyum nitrit ve kalsiyum nitrat gibi katkıları böyle iyonların çekirdek hareketleri ile hidrasyonu hızlandırır ve bunun sonucunda hidrasyon süresince kristalleşme işleminde bir yoğunlaşma meydana gelir (Ramachandran 1995). Sonuçta oluşan yoğun yapı ile ortam pH değeri yükselir ve sadece çimento hamurunda değil aynı zamanda agrega ile temas yüzeyinde daha yoğun bir yapı oluşur. Böylece boşluk boyutu azalır. Daha küçük çaptaki

boşluklarda suyun donma noktası düşmektedir. Şekil 4.59 incelendiğinde C.1.D karışımının 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının, K.D karışımının dayanımlarından yaklaşık %33 daha yüksek olduğu görülmektedir.

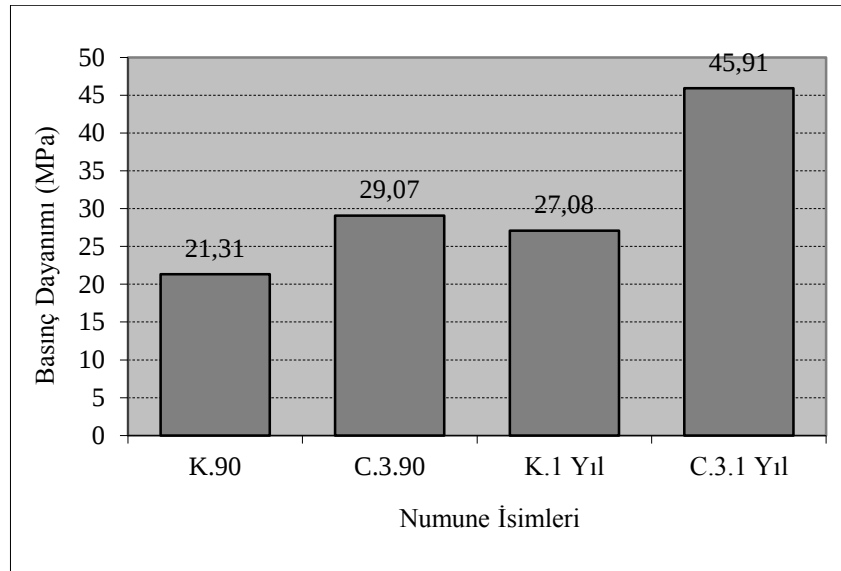


Şekil 4.59. K.D ve C.1.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.60. K.D ve C.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Özellikle dış ortamdaki basınç dayanımlarından anlaşılmaktadır ki kalsiyum nitrat içeren karışımlarda basınç dayanım gelişimi K karışımından daha hızlıdır. Üç karışım içinde en yüksek 1 yıllık basınç dayanımı 45,91 MPa ile C.3.D karışımına aittir. Ancak 90 günlük dayanımlar arasından en yüksek dayanım C.2.D karışımına aittir. Bu durum ilk 90 günde C.2 karışımının daha hızlı dayanım kazandığını göstermektedir. Genel olarak C.2 ve C.3 karışımlarının basınç dayanımları birbirlerine yakındır. Ancak daha önceden de ifade edildiği gibi ekonomik tarafta kalmak için seçilecek optimum karışım C.2 karışımıdır.



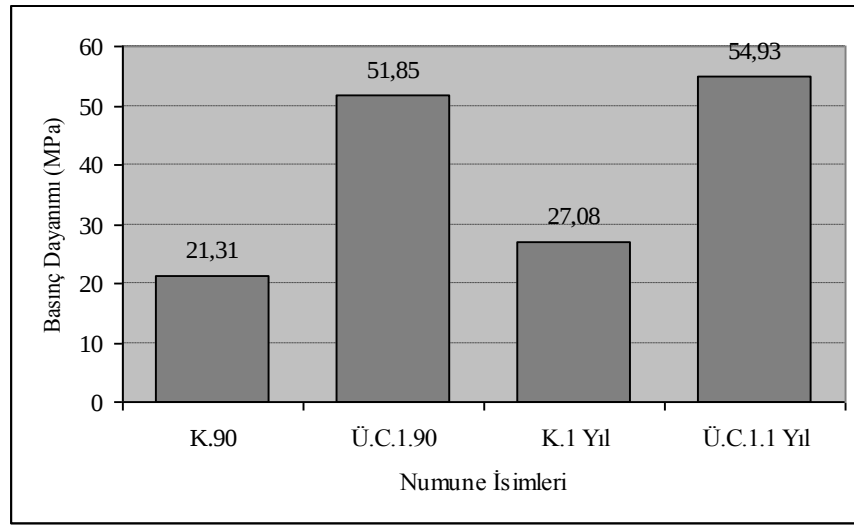
Şekil 4.61.K.D ve C.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

- **Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait sonuçların değerlendirilmesi**

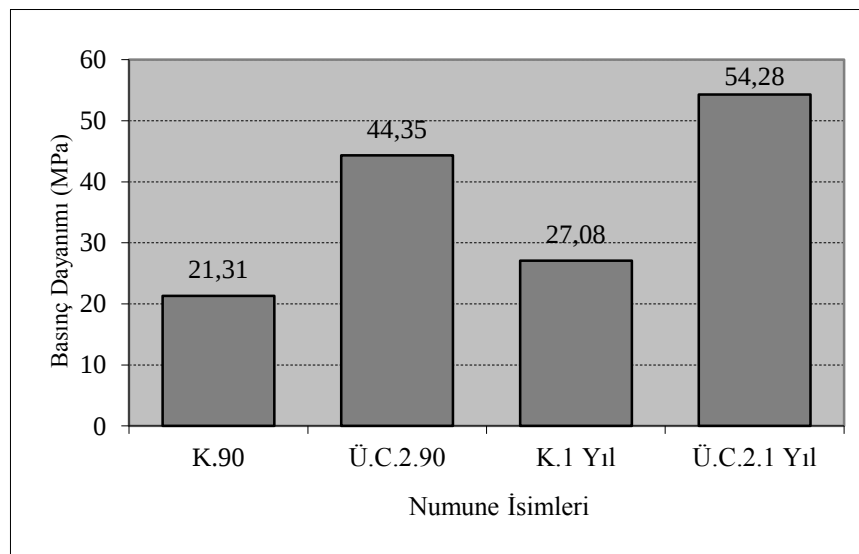
Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait basınç dayanım değerleri Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'te grafiklerle gösterilmiştir. Basınç dayanımları incelendiğinde dış ortamdaki antifriz içeren karışımların basınç dayanımlarının K.D karışımına göre oldukça yüksek olduğu gözlenmektedir.

Özellikle dış ortamdaki 1 yıllık basınç dayanımları oldukça yüksektir. Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarının 1 yıllık basınç dayanımları, Ü.1, Ü.2, Ü.3, C.1, C.2 ve

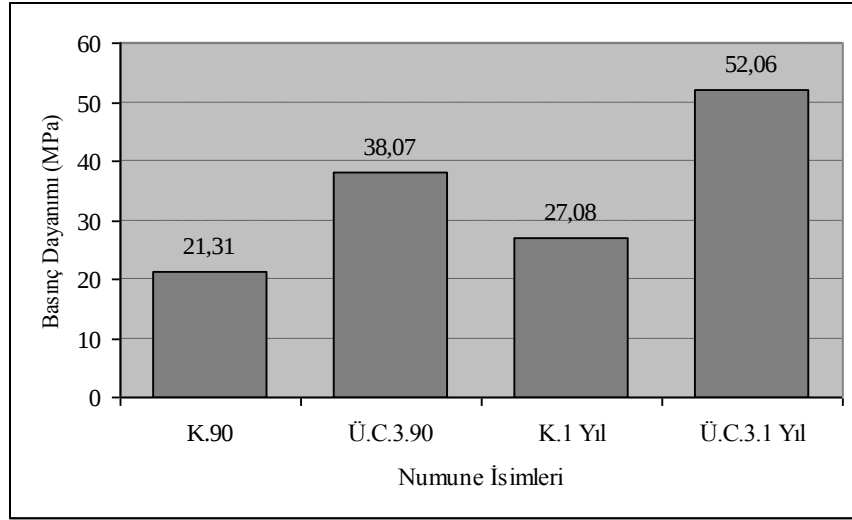
C.3karışımlarının 1 yıllık dayanımlarından daha yüksektir. Ü.C.1.D karışımının 90 günlük basınç dayanımı, aynı kür süresindeki K karışımının basınç dayanımından yaklaşık %143 daha yüksektir. Hatta Ü.C.1.D karışımının 1 yıllık basınç dayanımı 54,93 MPa değerine ulaşmıştır. Yani K karışımına göre 1 yıllık basınç dayanımında %103'lük bir artış söz konusudur.



Şekil 4.62.K.D ve Ü.C.1.Diçin 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.63.K.D ve Ü.C.2.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.64.K.D ve Ü.C.3.D için 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.63 ve Şekil 4.64 incelendiğinde K karışımına göre 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımlarındaki artış yüzdesi sırasıyla Ü.C.2 karışımı için yaklaşık %108 ve %100, Ü.C.3 karışımı için %79 ve %92'dir. Genel olarak bütün kür ortamlarında en yüksek basınç dayanımları kombinasyonların kullanıldığı karışımlara aittir. Dış ortamda soğuk havaya maruz kalmasına rağmen beton devamlı dayanım kazanmıştır. Çünkü gece ve gündüz sıcaklıkları farklı olduğundan, sürekli donma söz konusu olmadığı için antifriz içeren betonlarda hidratasyon devam etmiş ve basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir.

4.3.1.c. Ek su kürü uygulanan karışımların dayanımlarının değerlendirilmesi

Standart su kürü karışımların basınç dayanımlarını oldukça arttırmıştır. Bu durum soğuk havaya maruz kalan betonda hidratasyonun devamı için gerekli olan suyun temin edilmesi ile betonun kendini yenileyebileceği fikrini akla getirmektedir. Bu sebeple K, Ü.1, C.1, Ü.C.1 ve Ü.C.2 karışımları -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C'de 7, 14 ve 28 günlük kür uygulandıktan sonra 7, 14 ve 28 günlük su kürüne tabi tutulmuşlardır. Daha sonra basınç dayanım testi uygulanmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 4.16. Ek su kürü uygulanan K için basınç dayanımları

Ortam Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımları (MPa)								
	7.7 (Gün)	7.14 (Gün)	7.28 (Gün)	14.7 (Gün)	14.14 (Gün)	14.28 (Gün)	28.7 (Gün)	28.14 (Gün)	28.28 (Gün)
-5	29,63	13,91	26,18	18,19	14,02	23,80	31,41	30,46	21,92
-10	10,41	9,63	17,85	8,29	11,90	19,09	11,32	12,55	19,60
-15	10,65	9,82	16,42	9,38	11,55	16,84	10,50	13,35	14,15
-20	12,42	9,81	15,10	9,99	11,86	14,03	10,64	12,84	16,61

Uygulanan ek su kürü ile K karışımının -5°C'nin altındaki sıcaklıklarda basınç dayanımları 19,60 MPa ile 8,29 MPa arasında değişmektedir. -5°C ve -10°C kür sıcaklıkları için K ve Ü.1 karışımları karşılaştırıldığında, ek su kürü uygulandığı zaman basınç dayanımlarındaki artış Ü.1 için daha yüksektir. Su kürü süresi arttığında, basınç dayanımlarındaki artış daha fazla olmaktadır. Örneğin -5°C için 14 gün dondurucuda kaldıktan sonra 14 gün su kürü uygulanan numunelerden K karışımının basınç dayanımı 14,02 MPa iken Ü.1 karışımının basınç dayanımı 33,43 MPa'dır. Basınç dayanımındaki artış %100'den fazladır.

Ü.1 için sadece 28 günlük su küründeki basınç dayanımı 34,08 MPa'dır. Hiçbir koruma uygulanmaksızın -5°C'de 28 gün dondurucuda kür uygulandıktan sonra, 14 günlük ek su kürü ile elde edilen basınç dayanımı 41,31 MPa olmuştur. 14 gün ek su kürü uygulanan Ü.1 karışımının basınç dayanımı, sadece 28gün dondurucuda kür edildiğinde elde edilen basınç dayanımına göre %152 oranında yükselmiştir. -5°C için Ü.1 karışımının 7 günlük basınç dayanımı 28 günlük ek su kürü ile %128 oranında artarak 34,45 MPa olmuştur. Yani beton ilk 7 boyunca sürekli donmaya maruz kalsa bile ek su kürü ile kendinin yenileyebilmektedir. Ancak katkının donma noktasından daha düşük sıcaklıklarda artış yüzdesi daha düşüktür. Örneğin -10°C'de 14 gün dondurucuda kür edilen Ü.1 karışımının ek 14 ve 28 günlük su kürü ile basınç dayanımındaki artış yüzdesi sırasıyla %22 ve %115'tir.

Çizelge 4.17. Ek su kürü uygulanan Ü.1 için basınç dayanımları

Ortam Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımları (MPa)								
	7.7 (Gün)	7.14 (Gün)	7.28 (Gün)	14.7 (Gün)	14.14 (Gün)	14.28 (Gün)	28.7 (Gün)	28.14 (Gün)	28.28 (Gün)
-5	23,76	30,81	34,45	28,86	33,43	26,19	29,42	41,31	30,28
-10	10,14	10,63	23,78	8,84	15,70	27,59	10,19	11,17	22,12
-15	7,56	9,68	17,65	5,11	9,97	14,81	5,91	6,66	12,15
-20	6,04	8,83	12,50	5,97	10,23	-	7,88	10,37	12,19

Su kürünün basınç dayanımları üzerindeki etkisi sıcaklık azaldıkça düşmektedir. Sonuçlar incelendiği zaman kullanılan çözelti yüzdesi için -5°C'ye kadar üre katkısı bugünkü beton teknolojisinde kullanılabilmekte, taze betonun bu sıcaklıklarda yeterli dayanım kazanmasını sağlamakta ve suyun donmasını engellemektedir (Korhonen 2003). Ancak sıcaklık azaldıkça basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmektedir. Özellikle -20°C için üre içeren betonda basınç dayanımları K karışımından daha düşüktür. Bunun sebebi üre antifriz katkının bir yandan suyun donma noktasını düşürürken bir yandan da priz geciktirici özelliğinden dolayı çok düşük sıcaklıklarda betonun yeterli dayanım kazanamamasıdır. Ayrıca Ramachandran (1995) ve Korhonen (2003) ürenin donma noktasının %31 çözelti konsantrasyonu ile -8,4°C olduğunu ifade etmişlerdir. Daha önceden de ifade edildiği gibi bu karışımda kullanılan katkının %13'lük çözelti yüzdesindeki donma noktası ise -4,5°C'dir. Bu sebeple bu sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda basınç dayanımlarında bir düşüş gözlenmektedir. Ancak ek su kürü ürenin bu sıcaklığın altında kullanılması sağlanabilir.

Basınç dayanımı betonun diğer yapısal özellikleri gibi çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonuna bağlıdır. Bu reaksiyonun başlayabilmesi ve devam edebilmesi için gerekli ortam şartlarının sağlanması gerekir. Antifriz katkının kullanılmasındaki esas amaç soğuk havada bu ortamı sağlamak ve suyun donmasını engelleyerek hidratasyon reaksiyonunun oluşumunu sağlamaktır. Mironov (1977) tarafından ifade edildiğine göre betonun basınç dayanımı kazanma hızı antifriz katkı ilavesiyle artmaktadır. Böylece antifriz katkı içeren betonun düşük sıcaklıklarda da dayanım kazanması devam etmektedir. Bu sıcaklıklar kullanılan katkıların donma noktalarına

bağlıdır. Kalsiyum nitrat katkısının da donma noktası %35 çözelti konsantrasyonu ile -18,5°C'dir (Korhonen 2003). Bu deneylerde C.1 karışımı için katkı konsantrasyonu %13 ve donma noktası -4,22°C'dir. Bu oran karışımında kullanılan su miktarı ve katkı yüzdesinden hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.18. Ek su kürü uygulanan C.1 için basınç dayanımları

Ortam Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımları (MPa)								
	7.7 (Gün)	7.14 (Gün)	7.28 (Gün)	14.7 (Gün)	14.14 (Gün)	14.28 (Gün)	28.7 (Gün)	28.14 (Gün)	28.28 (Gün)
-5	44,69	38,71	38,69	35,75	24,25	55,17	32,29	29,10	57,51
-10	24,51	21,27	35,30	16,86	17,91	48,34	17,02	20,01	52,93
-15	15,58	17,26	35,28	16,01	17,03	37,56	16,59	17,28	51,35
-20	11,68	14,35	33,26	15,99	17,05	34,36	14,90	15,94	47,02

Görüldüğü gibi -15°C'nin altındaki sıcaklıklarda basınç dayanım sonuçlarında bir düşüş vardır. Çünkü bu sıcaklık altında konsantrasyon yoğunluğu da düşük olduğu için, su kürü uygulansa bile beton kendini tamamen yenileyememiştir. Sonuçlar incelendiğinde bu sıcaklık üzerinde kür süresinin artışıyla basınç dayanımlarında da artış meydana gelmiştir. -20°C sıcaklıkta dahi 28 günlük ek su kürü ile beton kendini yenilemiştir. Çizelge 4.18 incelendiğinde basınç dayanımlarının oldukça yüksek olduğu gözlenmektedir. Bütün basınç dayanımları incelendiğinde 28 günlük ek su kürü ile basınç dayanımlarında yüksek artışlar dikkati çekmektedir. Örneğin -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında 7 günlük dondurucu küründen sonra uygulanan 28 günlük ek su kürü ile basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %23, %94, %119 ve %114'tür. 14 günlük-5°C, -10°C, -15°C ve -20°C kür sıcaklıklarında dondurucu küründen sonra uygulanan 28 günlük ek su kürü ile basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %109, %100, %130 ve %425'tir. 28 gün dondurucuda kaldıktan sonra ek olarak uygulanan 28 günlük su kürü ile basınç dayanımları -5°C, -10°C, -15°C ve -20°C için sırasıyla %73, %392, %859, %1038 artmıştır. Yani ek su kürü ile düşük katkı konsantrasyonları kullanılarak soğuk havada beton dökümünde istenilen basınç dayanımları elde edilebilir. Böylece ekonomik maliyette düşürülebilir.

Çizelge 4.19 Ü.C.1 karışımına ait basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Basınç dayanımları incelendiğinde elde edilen basınç dayanımları sadece kalsiyum nitrat kullanılan karışıma göre daha düşüktür. Bunun sebebi, kullanılan üre katkısının donma noktasının -5°C 'den daha yüksek olması ve priz geciktirici etkisinin olması olabilir. Ayrıca%3 olarak kullanılan kalsiyum nitrat katkı yüzdesinin düşük olması muhtemel bir sebeptir. Ancak ek su kürü ile uzun süreli kür uygulandığında beton yine kendini yenileyebilmektedir. Bu karışım için en yüksek dayanım değeri 14 gün dondurucu kür süresine ilaveten 28 gün su kürü uygulanması ile elde edilen 57,29 MPa değeridir. Hatta -20°C 'de dahi beton 28 gün dondurucu kür süresine ilaveten 28 gün su kürü uygulanması ile 26,27 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu basınç dayanımını aynı kür süresinde sadece dondurucu kürü uygulanan karışımın 4,52 MPa olan basınç dayanımından %481 daha yüksektir. -10°C 'de 14 gün dondurucuda kalan karışımın basınç dayanımı 11,16 MPa iken 28 günlük ek su kürü ile bu değer 50,77 MPa olmuştur. Aradaki artış yüzdesi %355'tir. 28 gün dondurucu küründen sonra uygulanan 28 günlük ek su kürü ile basınç dayanımlarında meydana gelen artış -5°C , -10°C , -15°C , -20°C için sırasıyla %3, %199, %324 ve %481'dir. Yine en iyi sonuçlar 28 günlük ek su kürü uygulanan karışımlara aittir.

Çizelge 4.19. Ek su kürü uygulanan Ü.C.1 için basınç dayanımları

Ortam Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Basınç Dayanımları (MPa)								
	7.7 (Gün)	7.14 (Gün)	7.28 (Gün)	14.7 (Gün)	14.14 (Gün)	14.28 (Gün)	28.7 (Gün)	28.14 (Gün)	28.28 (Gün)
-5	37,65	28,95	23,27	34,37	32,26	57,29	33,89	33,53	40
-10	23,26	21,03	22,28	28,32	27,46	50,77	21,54	21,05	36,71
-15	14,48	19,78	18,62	16,45	18,07	45,72	12,24	14,40	30,47
-20	17,34	17,17	19,10	15,88	18,47	22,37	12,06	14,75	26,27

Ü.C.2 karışımına ait sonuçlara bakıldığı zaman basınç dayanımları diğer karışımlarda olduğu gibi sıcaklık azaldıkça basınç dayanımları azalmakta, su kürü süresi arttıkça basınç dayanımları artmaktadır. Bu karışım da her iki katkı miktarı da artırıldığı için basınç dayanımları Ü.C.1 karışımından daha yüksektir. 14 gün dondurucu kürü uygulandıktan sonra 28 günlük ek su kürü ile basınç dayanımlarındaki artış -5°C , -10°C ,

-15°C ve -20°C için sırasıyla %115, %275, %189, %162'dir. En yüksek basınç dayanımı 59,16 MPa ile 28 gün dondurucu küründe bekletilip 28 gün ek su kürüne tabi tutulan numunelere aittir. Bu basınç dayanımlarının her biri 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. -5°C ve -10°C kür sıcaklıklarında basınç dayanımları oldukça yüksektir. Ayrıca 28 gün dondurucuda kalan karışımın -15°C ve -20°C'deki basınç dayanımları sırasıyla 8,86MPa ve 3,99 MPa iken 28 günlük ek su kürü ile 40,66 MPa ve 39,25 MPa olmuştur. Aradaki artış yüzdeleri -15°C ve -20°C için %359 ve %884'tür.

Çizelge 4.20. Ek su kürü uygulanan Ü.C.2 için basınç dayanımları

Ortam Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımları (MPa)								
	7.7 (Gün)	7.14 (Gün)	7.28 (Gün)	14.7 (Gün)	14.14 (Gün)	14.28 (Gün)	28.7 (Gün)	28.14 (Gün)	28.28 (Gün)
-5	30,64	35,74	46,01	26,89	31,85	58,62	32,39	41,59	59,16
-10	23,51	26,17	31,78	22,81	20,53	58,20	30,91	27,42	58,40
-15	16,86	17,14	26,48	15,07	13,79	39,43	14,20	14,26	40,66
-20	16,11	14,96	25,48	10,26	12,74	30,34	14,76	16,66	39,25

Sonuç olarak ek su kürü uygulanan karışımların basınç dayanımlarının olumlu yönde değiştiği gözlenmektedir. Özellikle Ü.C.2 ve C.1 karışımlarının basınç dayanımları diğerlerine göre daha yüksektir. 28 günlük ek su kürü en iyi sonuçları vermektedir. Ancak daha önceki deneylerde uygulanan sürekli donma etkisinde olan karışımların basınç dayanımları incelenecek olursa optimum karışım Ü.C.2 karışımıdır.

4.3.2. UPV deneyleri ile ilgili bulgular ve değerlendirilmesi

Tahribatsız deney yöntemleri geleneksel basınç dayanım testlerinden farklı avantajlara sahip olduğu için son yıllarda daha fazla tercih edilmektedir. Beton kalitesini tespit için uygulanan tahribatsız deney yöntemlerinden birisi olan UPV son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Kewalramani and Gupta 2005). Var olan yapılarda betonun gerçek basınç dayanımının tahribatsız bir yöntem ile değerlendirilmesi, dayanım ve tahribatsız deney yöntem parametreleri arasındaki deneysel ilişkilere

bağlıdır. Bu parametreler her beton türü için sabit değildir. Bu yüzden farklı karışımlar için cihazın kalibrasyon edilmesi gerekmektedir. Cihaz ile deney yapmadan önce numune cinsi ve boyutları ayarlanmaktadır. Tahribatsız deney yöntemlerinden birisi olan UPV basınçla uygulanan gerilme dalgalarının yani numune boyunca yol alan dalgaların hız ölçümüne dayanmaktadır. Numunenin bir yüzünden diğerine gidip gelen bu dalgaların hızı malzemenin yoğunluk ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bazı malzemelerin kalitesi elastik rijitliğine bağlıdır. Bu sebeple böyle malzemelerde UPV ölçümleri hem kaliteyi hem de elastik özellikleri belirlemek için kullanılır. Yani daha yüksek elastisite modülü, yoğunluk ve beton bütünlüğü ve homojenliği daha yüksek UPV değeri anlamına gelir (Kewalramani and Gupta 2005). Bu metot aslında ses dalgasının bir malzeme içindeki hızına dayanmaktadır. UPV hızı malzemenin elastik özeliğine bağlıken geometrisine bağlı değildir. Çizelge 4.21'den numunelerden elde edilen UPV değerleri verilmiştir. Bu UPV değerleri, her bir numune için 3 değer ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu numunelerin döküm tarihleri ve deney tarihleri Ek 1'de verilmiştir. Silindir numunenin bir yüzeyinden gönderilen dalgalar ilerlerken yolları üzerinde boşluklara rastlarlar. Bu dalgalar boşluk kenarına gelince, boşluğun etrafını dolaşacaktır. Böylece alınan yol artmakta ve hız azalmaktadır. Yani ultrason hızının azalması, betonun boşluklu olduğunu göstermekte buna bağlı olarak beton dayanımı da düşmektedir.

Çizelge 4.21. 2010 yılında ilk dökülen 360 numunenin ortalama UPV değerleri (Kısaltmalar için Bölüm 3.3.3'e bakınız)

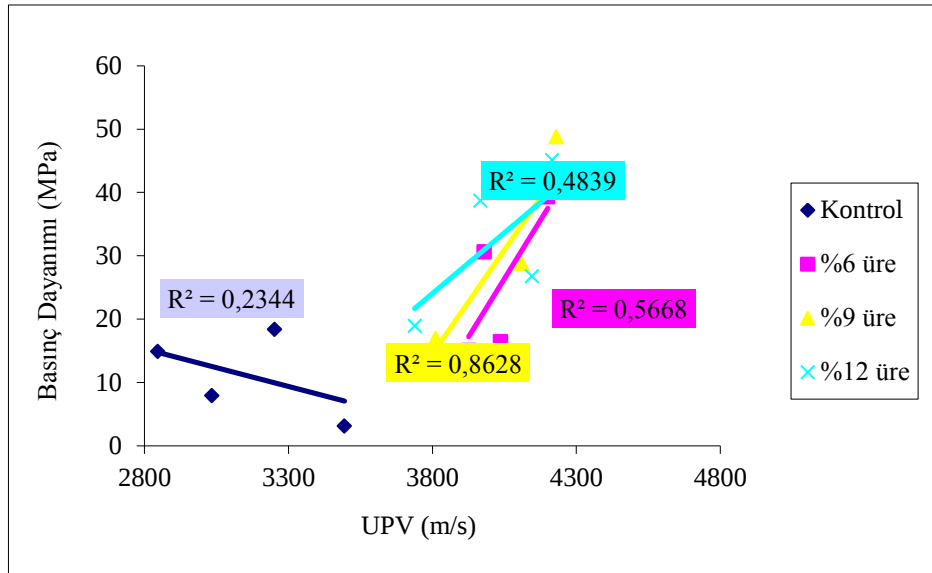
Gruplar	3 gün Ort. UPV (m/s)	7 gün Ort. UPV (m/s)	14 gün Ort. UPV (m/s)	28 gün Ort. UPV (m/s)	56 gün Ort. UPV (m/s)	90 gün Ort. UPV (m/s)	1 yıl Ort. UPV (m/s)
K (Su Kürü)	4160	4361	4215	4395	4386	4434	3932
Ü.1 (Su Kürü)	4118	4221	4181	4313	4365	4392	3870
Ü.2 (Su Kürü)	3937	4254	4330	4444	4524	4229	3813
Ü.3 (Su Kürü)	3958	4101	4246	4381	4347	4191	3743
Ü.C.1 (Su Kürü)	3893	4260	4270	4384	4403	4338	3745
Ü.C.2 (Su Kürü)	4390	4116	4170	4374	4387	4176	3733
Ü.C.3 (Su Kürü)	3906	4193	4349	4318	4436	4136	3693

Çizelge 4.21. Ocak ve Şubat aylarında ilk dökülen 360 numunenin ortalama UPV değerleri (Devam)

C.1 (Su Kürü)	4000	4240	4377	4324	4500	4187	3884
C.2 (Su Kürü)	4315	4459	4369	4466	4446	4463	3723
C.3 (Su Kürü)	4029	4255	4152	4285	4353	4033	3718
K.D	3287	4346	2152	3656	4148	4179	2839
Ü.1.D	3545	4038	3522	3669	4420	4368	3795
Ü.2.D	-----	3451	3848	3529	3826	4261	3969
Ü.3.D	-----	3298	3828	3727	3955	4232	3891
Ü.C.1.D	-----	3600	3992	4026	4300	4333	3800
Ü.C.2.D	-----	3495	4036	4026	4249	4290	3671
Ü.C.3.D	3066	3685	3994	4085	4320	4665	3510
C.1.D	3121	3578	3331	4209	4213	4140	3928
C.2.D	-----	3748	3896	4131	4376	4260	3924
C.3.D	-----	3520	3346	3985	4252	4040	3696
K (-5°C)	1634	2350	2359	3751	2997	2846	3252
Ü.1 (-5°C)	2778	3678	3820	3878	3879	3980	4200
Ü.2 (-5°C)	2495	3766	2622	3870	4218	4228	4230
Ü.3 (-5°C)	2657	3570	3706	3759	3956	3966	4215
Ü.C.1 (-5°C)	2360	3480	3964	4295	4368	3847	4209
Ü.C.2 (-5°C)	3043	3494	3707	4229	4288	4024	3735
Ü.C.3 (-5°C)	2309	3458	3972	3891	4240	3881	4136
C.1 (-5°C)	3590	4124	4307	4210	4418	3798	4230
C.2 (-5°C)	3684	4050	4300	4505	4499	3740	4254
C.3 (-5°C)	3347	3942	3945	4186	4312	4256	3290
K (-10°C)	1385	3841	3030	3165	3918	2736	3252
Ü.1 (-10°C)	2166	3904	3350	4034	4226	3831	2906
Ü.2 (-10°C)	3033	1883	3092	3923	4161	3968	2851
Ü.3 (-10°C)	1360	2480	3440	3937	4018	3746	2820
Ü.C.1 (-10°C)	3696	2847	4257	4317	4468	4128	4176
Ü.C.2 (-10°C)	2952	3064	3982	4275	4312	3477	4133
Ü.C.3 (-10°C)	3113	3611	3976	3719	4276	3551	3995
C.1 (-10°C)	4032	4434	4518	4340	4426	4010	4146
C.2 (-10°C)	4525	4544	4167	4424	4546	3739	4350
C.3 (-10°C)	4299	4360	3203	4356	4489	3853	4190
K (-15°C)	593	3497	3264	3793	3388	3223	2606
Ü.1 (-15°C)	1170	3939	3521	4221	4567	3254	2775
Ü.2 (-15°C)	1748	2561	2885	4000	4100	3143	2858
Ü.3 (-15°C)	-----	2536	3254	4000	4176	2914	2790
Ü.C.1 (-15°C)	-----	4263	4338	4480	4434	3676	4449
Ü.C.2 (-15°C)	-----	4031	4231	4299	4235	3888	4177
Ü.C.3 (-15°C)	3776	3911	3995	3970	4181	3663	2984
C.1 (-15°C)	4408	4586	4531	4421	4507	3713	2962
C.2 (-15°C)	4482	4540	4126	4406	4463	3590	3315
C.3 (-15°C)	4358	4612	3670	4023	4504	3441	2972

Çizelge 4.21. Ocak ve Şubat aylarında ilk dökülen 360 numunenin ortalama UPV değerleri (Devam)

K (-20°C)	-----	3763	3019	4363	4566	2983	3740
Ü.1 (-20°C)	-----	4310	3095	4435	3686	2896	3776
Ü.2 (-20°C)	-----	2250	4332	4414	4156	3022	3706
Ü.3 (-20°C)	-----	2279	4230	4364	4346	2961	3742
Ü.C.1 (-20°C)	-----	4217	4431	4480	4492	3715	3781
Ü.C.2 (-20°C)	-----	3986	4265	4320	4459	3664	3862
Ü.C.3 (-20°C)	-----	4085	4259	4236	4293	3613	4155
C.1 (-20°C)	-----	4573	4564	4526	4528	3708	3737
C.2 (-20°C)	-----	4701	4591	4478	4647	3677	3735
C.3 (-20°C)	-----	4587	3848	4369	4432	3386	4566



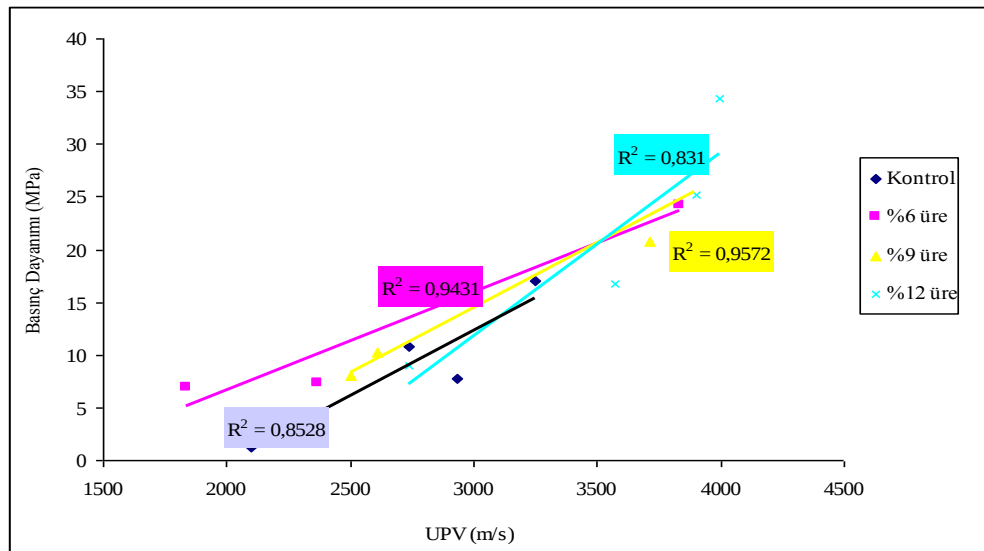
Şekil 4.65. -5°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 ve 1 yıllık basınçdayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.22 UPV test sonuçlarına göre betonun kalitesini değerlendirmek için bir rehber olarak kullanılabilir.

Çizelge 4.22. UPV ölçümlerine göre beton kalitesi

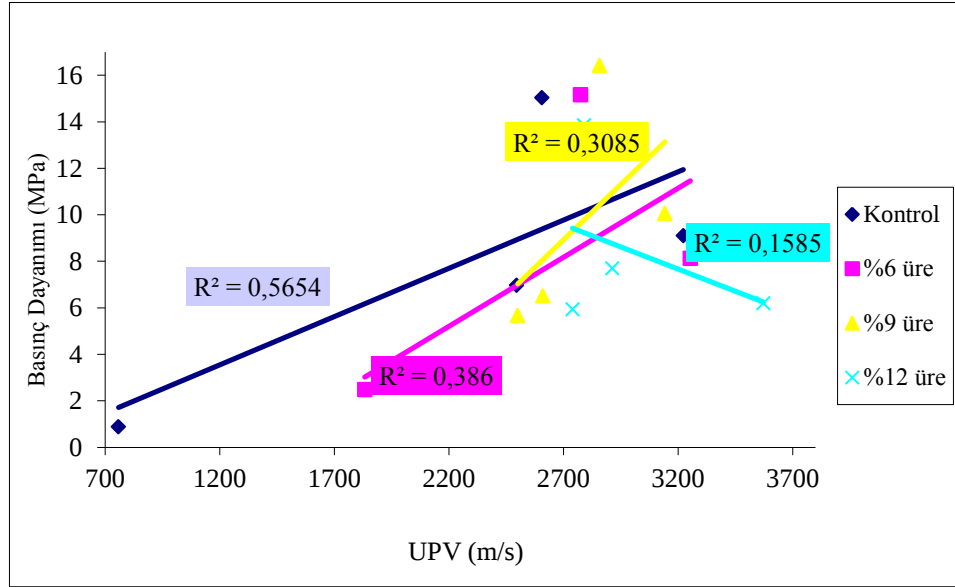
Hız	Beton Kalitesi
>4,0 km/s	Mükemmel
3,5 – 4,0 km/s	İyi, biraz porozite gözlenebilir
3,0 – 3,5 km/s	Memnuniyet verici fakat bütünlük bozulmuş olabilir
<3,0 km/s	Zayıf ve bütünlük kaybı mevcut

-5°C’de Kontrol numunesinin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında oldukça düşük bir korelasyon gözlenmektedir. UPV değerleri 2500 ile 3500 arasında değişmektedir. Dolayısı ile bu beton zayıf, bütünlüğü bozulmuş bir yapı haline gelmiştir. Ayrıca beton bünyesindeki su donmuş olabileceği için UPV değerleri gerçek değerlerinden yüksek olabilir. Çünkü su donduğu zaman mevcut boşlukları doldurduğu için ultrases hızı yükselmektedir. Bundan dolayı basınç dayanımları ile UPV değerleri arasında doğrusal bir korelasyon yoktur. En yüksek korelasyon %9 üre antifrizi içeren karışıma aittir. En yüksek dayanım değerleri de %9 üre içeren karışıma aittir.

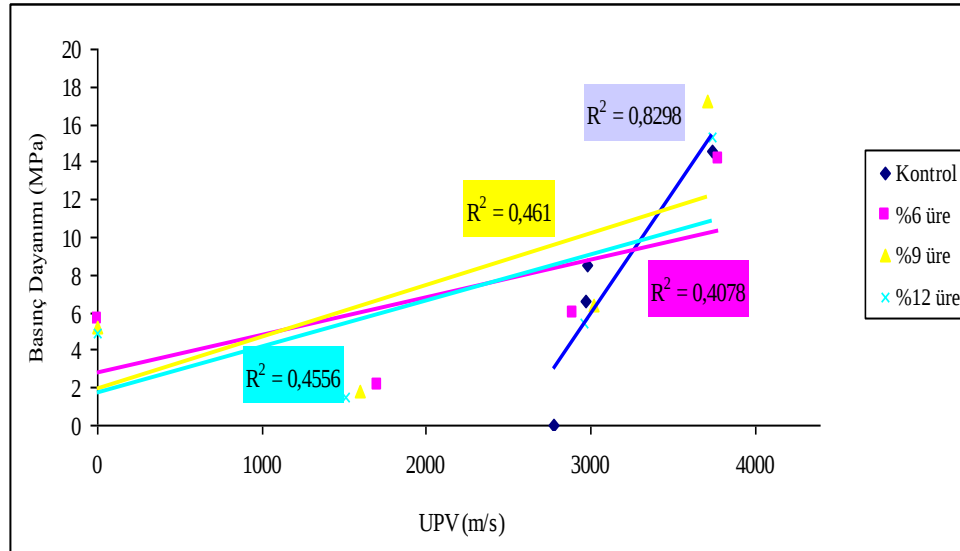


Şekil 4.66. -10°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

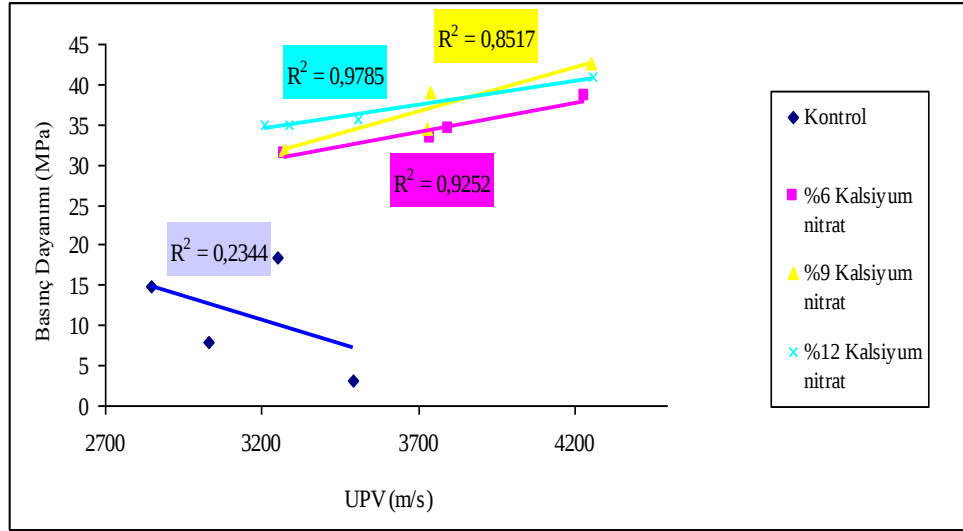
-10°C’de UPV değerleri ve basınç dayanımları arasındaki ilişki Ü.2 karışımı için en yüksek korelasyona sahiptir. Ancak ortam sıcaklığı azaldıkça örneğin -15°C ve -20°C gibi ortam sıcaklıklarında veriler arasında doğrusal bir ilişki saptanamamaktadır. Çünkü bu ortam sıcaklıkları hem Kkarışımı hem de üre içeren karışımlar için uygun değildir. Üre antifriz katkısının donma noktası -10°C’nin altında olduğu için betonu dondan koruyamamıştır. Ayrıca bu düşük sıcaklıkta su kısmen de olsa donmuş olabileceği için elde edilen UPV değerleri normalden yüksek olabilir. Dolayısı ile katkının donma noktası altında bir sıcaklıkta elde edilen korelasyon çok doğru bir sonuç vermeyebilir.



Şekil 4.67. -15°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



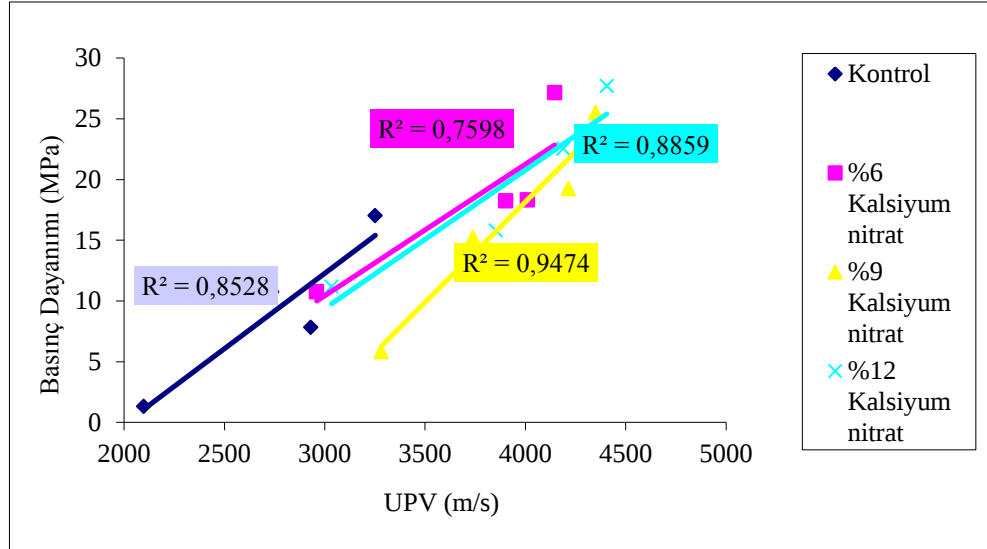
Şekil 4.68. -20°C’de K, Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.69. -5°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

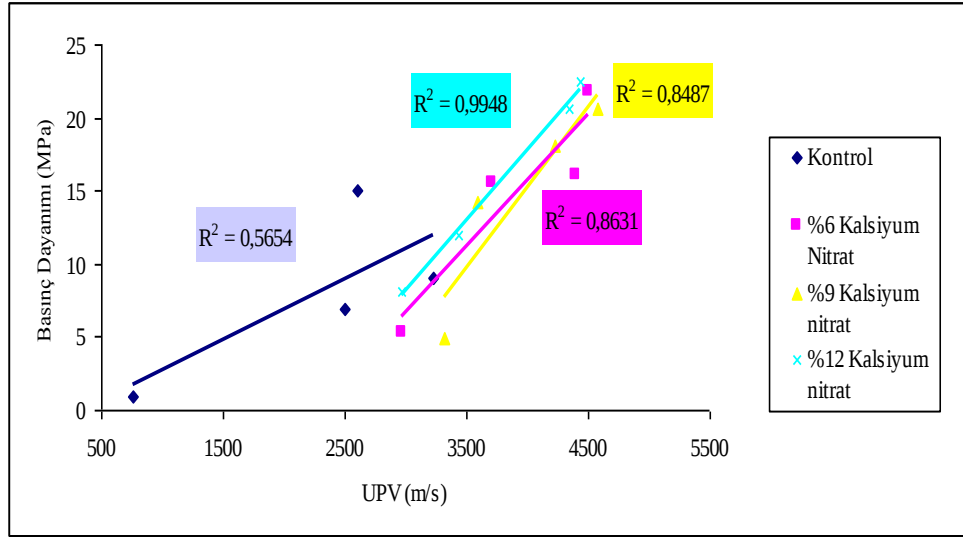
UPV değerleri beton kalitesinin değerlendirmek, lokal kusurları belirlemek, deformasyonları ve çatlak dağılımını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Betonun bileşimi UPV ve beton dayanımı arasındaki ilişkiyi etkileyen en önemli unsurlardandır. Deneylerden elde edilen korelasyon ile UPV değerlerinden betonun basınç dayanımı değerlendirilebilmektedir (Carnot and Kaspar 2001). Çünkü beton dayanımını etkileyen agrega tanelerinin boyutu ve dağılımı, w/c oranı, nem miktarı ve çelik donatı gibi bazı parametreler UPV değerlerini etkilememektedir. Ancak bu durum diğer bütün parametreler sabit iken geçerlidir. Bazı ölçümlerde gruplar arasında karşılaştırma yapılırken UPV değeri daha yüksek olanın basınç dayanımının daha düşük olduğu gözlenmiştir (Carnot and Kaspar 2001). Aynı w/c oranına sahip karışımlar için bu durum agrega miktarı ve dağılımı ile ilgilidir. Ayrıca betondaki boşluklar ve çatlaklar ses dalgasının yolunu uzatmakta ve düzensiz sonuçlar vermektedir (Kewalramani and Gupta 2005). Dolayısı ile düşük sıcaklıklarda özellikle kontrol betonunun UPV değerleri ve basınç dayanımları arasında daha fazla tutarsızlık olmaktadır. Çünkü soğuk hava beton yapısını tahrip etmektedir. Kalsiyum nitrat ise hem betonun erken dayanım kazanma hızını artıran hemde priz süresini hızlandıran bir kimyasal katkıdır. Bu sayede soğuk havada beton üretimi ve dökümü için oldukça elverişlidir. UPV değerleri ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenirse -5°C ve -10°C kür ortamları için doğrusal bir korelasyonun mevcut olduğu görülmektedir. Antifriz katkı suyun donma

noktasını düşürdüğü için katkının donma noktasından daha yüksek sıcaklıklarda UPV değerleri ve basınç dayanımları örtüşmektedir.

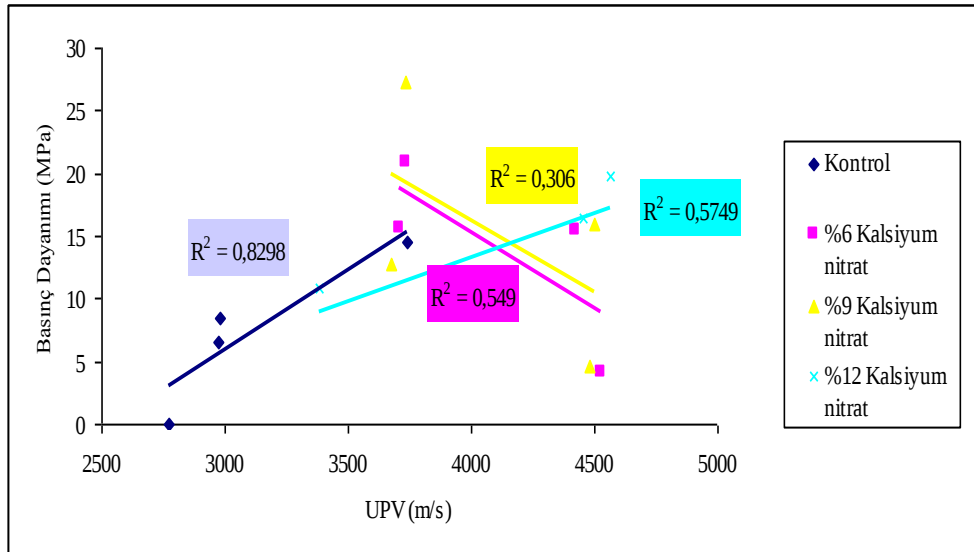


Şekil 4.70. -10°C’de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

UPV deneyleri farklı kür süreleri ve farklı kür sıcaklıkları için antifriz katkının beton basınç dayanımına etkisini belirlemek ve bu sonuçlar kullanılarak tahribatsız bir şekilde önceden basınç dayanım sonuçlarının tahmininin mümkün olup olamayacağını tespit etmek maksadı ile yapılmıştır. Ortam sıcaklığı -5°C’den -10°C’ye düştüğünde UPV değerleri azalmaktadır. Ancak sıcaklık -15°C hatta -20°C değerlerine gerilediğinde UPV değerlerindeki düşüş daha fazladır. Beton basınç dayanımı üzerinde kalsiyum nitrat antifriz katkısı üre antifriz katkısından daha olumlu etki göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda üre kalsiyum nitrat kadar yüksek sonuçlar vermemiştir.



Şekil 4.71. -15°C'de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.72. -20°C'de K, C.1, C.2 ve C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

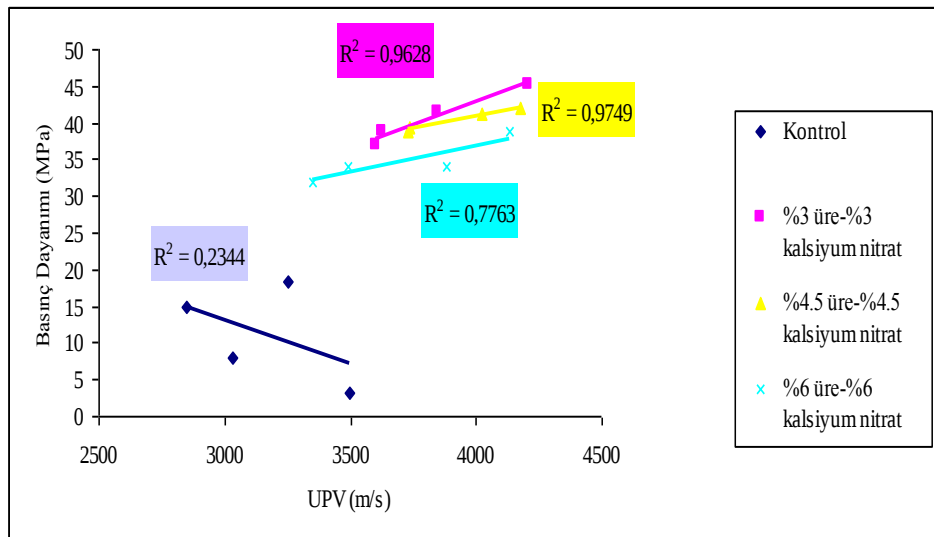
Çizelge 4.23. 2010 yılında dökülen 300 numunenin 7 ve 28 günlük UPV değerleri

Gruplar	7 günlük Ortalama UPV (m/s)	28 günlük Ortalama UPV (m/s)
K (Su Kürü)	4344	4577
Ü.1 (Su Kürü)	4223	4413
Ü.2 (Su Kürü)	4182	4447
Ü.3 (Su Kürü)	4158	4411
Ü.C.1 (Su Kürü)	4130	4496
Ü.C.2 (Su Kürü)	4260	4482
Ü.C.3 (Su Kürü)	4225	4389
C.1 (Su Kürü)	4241	4454
C.2 (Su Kürü)	4160	4434
C.3 (Su Kürü)	4183	4485
K (-5°C)	3033	3494
Ü.1 (-5°C)	3926	4036
Ü.2 (-5°C)	3811	4110
Ü.3 (-5°C)	3738	4146
Ü.C.1 (-5°C)	3603	3627
Ü.C.2 (-5°C)	3728	4177
Ü.C.3 (-5°C)	3350	3491
C.1 (-5°C)	3271	3740
C.2 (-5°C)	3274	3731
C.3 (-5°C)	3210	3510
K (-10°C)	2931	2098
Ü.1 (-10°C)	2792	3961
Ü.2 (-10°C)	2940	3177
Ü.3 (-10°C)	3075	2027
Ü.C.1 (-10°C)	3416	3134
Ü.C.2 (-10°C)	3739	3428
Ü.C.3 (-10°C)	3346	3173
C.1 (-10°C)	3903	2960
C.2 (-10°C)	4215	3282
C.3 (-10°C)	4406	3034
K (-15°C)	2496	758
Ü.1 (-15°C)	2370	1833
Ü.2 (-15°C)	2500	2610
Ü.3 (-15°C)	2740	3573
Ü.C.1 (-15°C)	3196	2640
Ü.C.2 (-15°C)	3834	3105
Ü.C.3 (-15°C)	3838	4034
C.1 (-15°C)	4504	4392
C.2 (-15°C)	4579	4222
C.3 (-15°C)	4436	4338

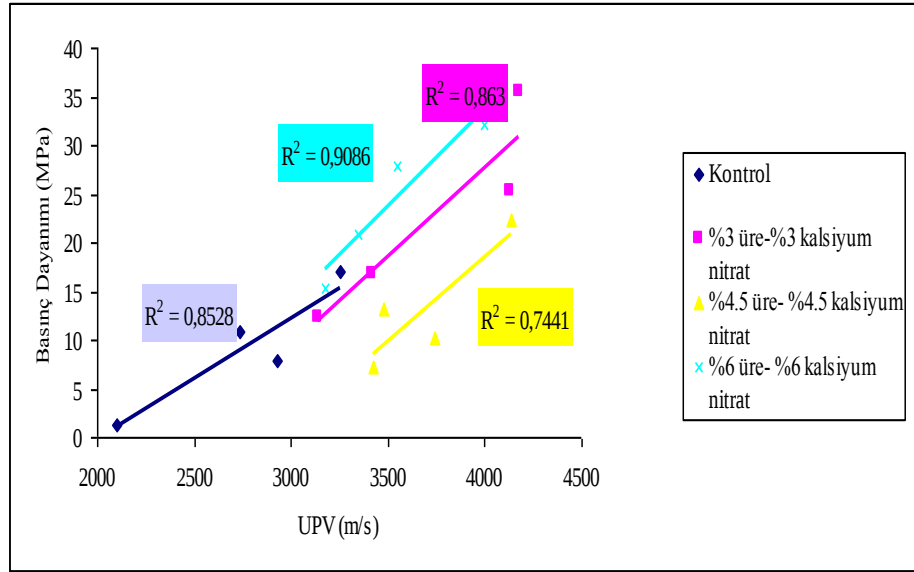
Çizelge 4.23. 2010 yılında dökülen 300 numunenin 7 ve 28 günlük UPV değerleri (Devam)

K (-20°C)	2973	2770
Ü.1 (-20°C)	Ölçülemedi	1700
Ü.2 (-20°C)	Ölçülemedi	1600
Ü.3 (-20°C)	Ölçülemedi	1510
Ü.C.1 (-20°C)	4437	466
Ü.C.2 (-20°C)	4213	2340
Ü.C.3 (-20°C)	3829	3560
C.1 (-20°C)	4421	4526
C.2 (-20°C)	4500	4481
C.3 (-20°C)	4457	4073

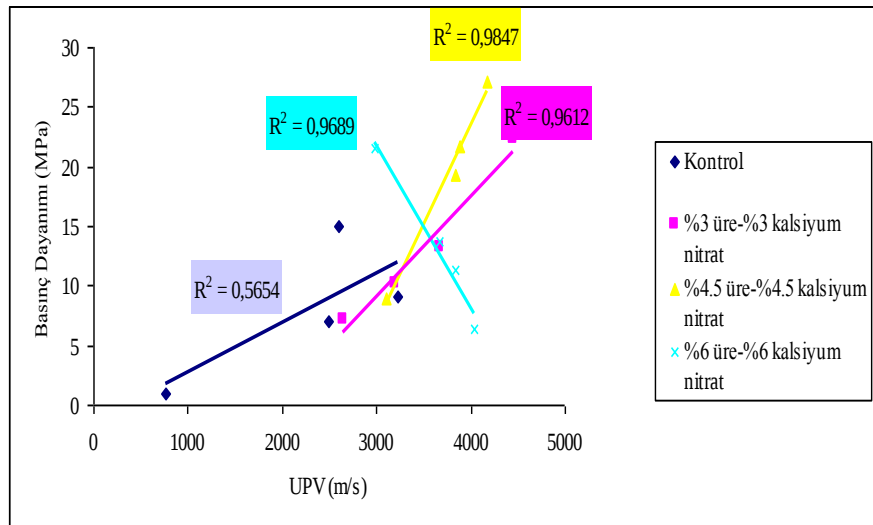
UPV yöntemi donma çözülme ve çevresel kaynaklı kimyasal etkenlerden dolayı betonda oluşan kusurların ve iç çatlakların tespit edilmesi için kullanılabilir. Bu yöntemi kullanarak sertleşmiş bir betonun basınç dayanımını tespit etmek mümkün olmaktadır (Domingo and Hirose 2009). Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımlarına ait UPV basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde genel olarak ortam sıcaklığı düştükçe diğer karışımlardaki gibi korelasyonun azaldığı gözlenmektedir.



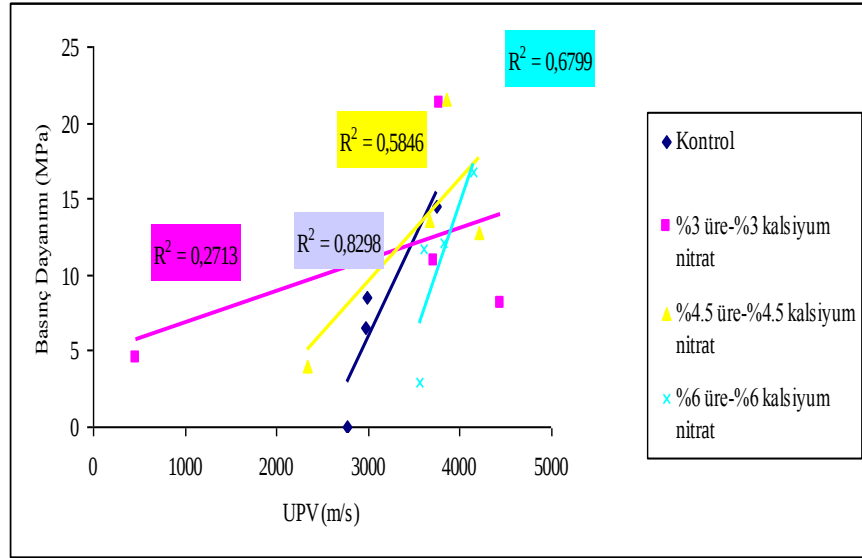
Şekil 4.73. -5°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.74. -10°C'de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.75. -15°C'de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.76. -20°C’de K, Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 için 7, 28, 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanımları ve UPV değerleri arasındaki ilişki

Özellikle -20°C için korelasyon katsayısındaki bu düşüş çok daha hızlıdır. Bu durum karışımların içindeki üre antifriz katkısının priz geciktirici etkisinden kaynaklanabilir. Çünkü ilk 7 gün içerisinde UPV ölçümleri sırasında sürekli çok soğuk bir havaya maruz kalan numunelerin yüzeylerinde çözülmeler meydana gelmektedir. Bu durumda UPV ölçümleri esnasında hem alıcı ve verici başlıkların hemde numunenin ölçüm yapılacak yüzeylerinin çok temiz olması gerektiği için cihaz hata verebilmektedir. Korelasyonlar arasında -20°C için en fazla düşüş Ü.C.1 karışımında gözlenmiştir. Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.28 arasındaki bütün çizelgelerde ilk rakam dondurucu kür süresini ikinci rakam ek su kürü süresini göstermektedir. Örneğin 7.7 ifadesi 7 günlük dondurucu kürü+7 günlük su kürü anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.24. Ek su kürü uygulanan K karışımına ait UPV değerleri

Ortam Sıcaklık (C°)	7.7 Gün	7.14 Gün	7.28 Gün	14.7 Gün	14.14 Gün	14.28 Gün	28.7 Gün	28.14 Gün	28.28 Gün
-5	3673	3878	2800	4077	3725	3080	4149	4094	3476
-10	3095	3600	3631	3788	3726	3076	3709	3810	3372
-15	2995	3505	3046	3718	3612	2940	2547	3800	3276
-20	2857	2800	3098	2965	3332	2767	3771	3186	2575

Çizelge 4.25. Ek su kürü uygulanan Ü.1karışımına ait UPV değerleri

Ortam Sıcaklık (C°)	7.7 Gün	7.14 Gün	7.28 Gün	14.7 Gün	14.14 Gün	14.28 Gün	28.7 Gün	28.14 Gün	28.28 Gün
-5	3725	4129	3112	4179	4190	3142	4126	4048	3411
-10	3350	3610	3657	3147	3577	3121	3355	3300	3338
-15	2883	2815	3364	2865	3367	3118	2899	3008	3247
-20	2475	2300	3298	2975	3080	Çözündü	2939	2969	3128

Çizelge 4.26. Ek su kürü uygulanan C.1 karışımına ait UPV değerleri

Ortam Sıcaklık (C°)	7.7 Gün	7.14 Gün	7.28 Gün	14.7 Gün	14.14 Gün	14.28 Gün	28.7 Gün	28.14 Gün	28.28 Gün
-5	4373	4320	4100	4297	4240	4258	4205	4105	4438
-10	3298	3774	3880	3997	4073	3944	3967	3976	4350
-15	3013	3665	3759	3911	4008	3791	3934	3934	4312
-20	2622	2886	3401	3855	3895	3316	3820	3815	4008

Çizelge 4.27. Ek su kürü uygulanan Ü.C.1 karışımına ait UPV değerleri

Ortam Sıcaklık (C°)	7.7 Gün	7.14 Gün	7.28 Gün	14.7 Gün	14.14 Gün	14.28 Gün	28.7 Gün	28.14 Gün	28.28 Gün
-5	4223	4250	3810	4102	4225	4400	4157	4145	4163
-10	3936	3857	3690	4057	4133	4354	3977	3893	3830
-15	3535	3763	3580	3679	3771	4230	2001	3313	3646
-20	3259	3575	3630	3282	3140	3549	3600	3196	3411

Çizelge 4.24 ve 4.28 arasındaki UPV değerleri 2011 Ocak ve Temmuz aylarında dökülen 540 numuneye aittir. Çizelgeler incelendiği zaman kür süresinin artışıyla UPV değerlerinde çok düzgün bir dağılım olmamakla beraber kür süresi sabitken sıcaklık azaldıkça UPV değerlerinde bir düşüş gözlenmektedir. Bu değerler aynı numunelerin basınç dayanımları ile karşılaştırıldıklarında basınç dayanımlarının da bu yönde değiştiği gözlenmektedir.

Çizelge 4.28. Ek su kürü uygulanan Ü.C.2 karışımına ait UPV değerleri

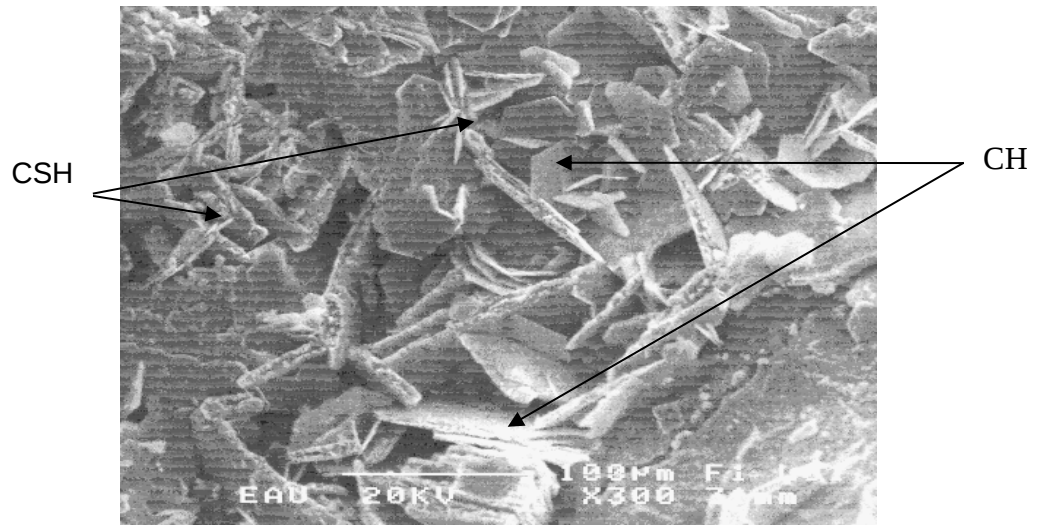
Ortam Sıcaklık (C°)	7.7 Gün	7.14 Gün	7.28 Gün	14.7 Gün	14.14 Gün	14.28 Gün	28.7 Gün	28.14 Gün	28.28 Gün
-5	4344	4328	4352	4235	4298	4440	4127	4179	4500
-10	4225	4192	4250	4005	4184	4320	4134	3900	4480
-15	3600	3862	3954	3697	3779	4210	3723	3758	4358
-20	3273	3153	3674	3284	3205	3958	3585	3593	3817

4.3.3. SEM deneylerinde elde edilen görüntüler ve değerlendirilmesi

Bir karışımda bulunan fazların tipi, miktarı, şekli ve dağılımı onun mikro yapısını oluşturur. Beton mikro yapısı ise heterojen ve oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. SEM beton ve bileşenleri hakkında analiz yapmak için çok güçlü bir araçtır (Sahu *et al.* 2004). SEM tekniği beton, çimento ve agreganın mikro yapısının karakterini belirlemede ve betonda meydana gelebilecek bir bozulmanın sebeplerinin anlaşılmasında ve anlamlandırılmasında farklı avantajlara sahiptir. SEM tekniği ile elde edilen görüntüler sertleşmiş çimento hamurunun bileşenlerinin belirlenmesinde kolaylık sağlar, diğer optik metotlardan daha büyük üç boyutlu bir çözünürlüğe sahiptir ve elementlerin analizinde ve görüntülenmesinde belirleyici bir kapasiteye sahiptir (Stutzman 2001). Bu deneyler için 1×1 cm boyutunda numuneler dökülmüş ve bir yüzeyleri parlatılarak incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen SEM görüntülerinin bir kısmı Şekil 4.77 ile Şekil 4.98 arasında verilmiştir. Beton numuneler döküldükten sonra en erken 3 günlük SEM görüntüleri elde edilmiştir. Resimlerde görülen plak şeklindeki hekzagonal yapılar CH yapısına ait görüntülerdir (Jun *et al.* 2001). SEM görüntülerinde daha koyu özellikteki bölgeler çimento hamurunun diğer fazlarından ayrılan kapiler boşlukların göstergesidir (Sahu *et al.* 2004). Ayrıca bu koyu bölgeler hidrate olmuş veya olamamış yapılar arasındaki kapiler boşlukların su ile dolu olduğunun da göstergesidir (Gallucci and Scrivener 2007). Su küründeki Ü.2 karışımına ait SEM görüntüleri Şekil 4.77a ve Şekil 4.77b’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiği zaman plak formunda CH ve iğne formunda etrenjit oluşumu görülmektedir (Cerulli *et al.* 2003).

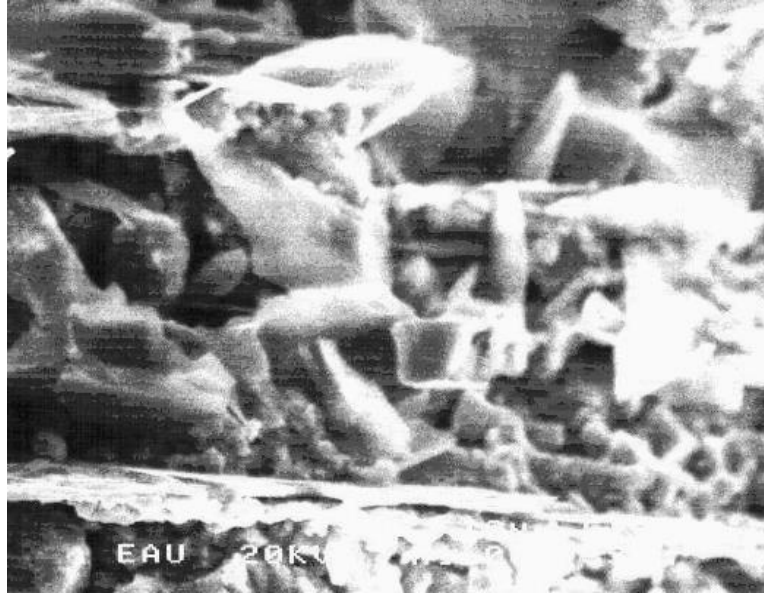


Şekil 4.77a.Su küründe Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM

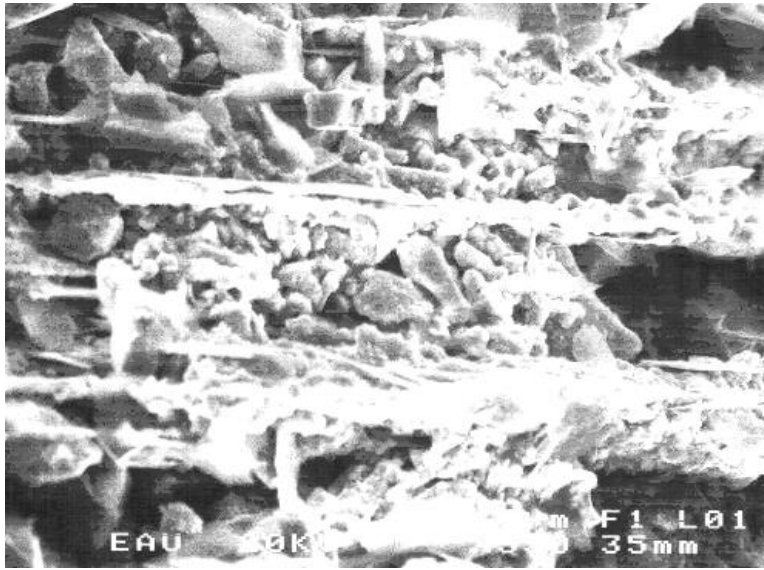


Şekil 4.77b.Su küründe Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM

Gallucci and Scrivener (2007) yapmış oldukları çalışmalarında zamanla bir betondaki ara yüzey geçiş bölgesinin CH ile dolduğunu ifade etmişlerdir. Su küründeki Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde oluşan plak şeklinde yoğun CH yapısı ve CSH yapısı dikkati çekmektedir.



Şekil 4.78a. -10°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM



Şekil 4.78b. -10°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM

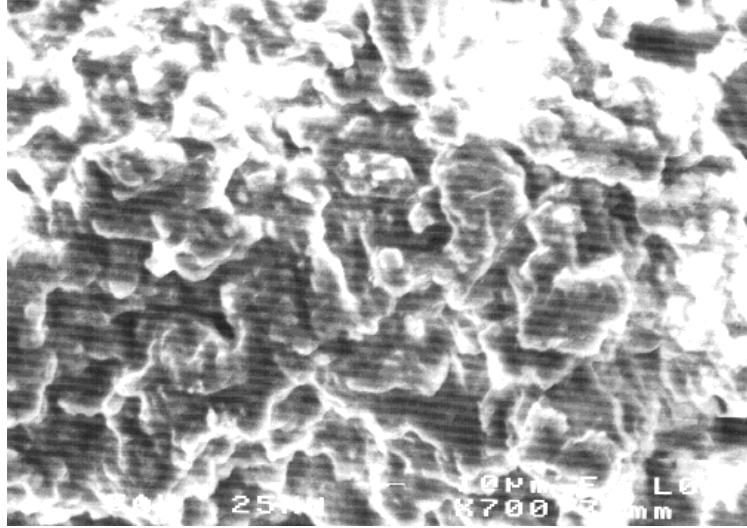
Şekil 4.78a ve Şekil 4.78b’de ise Ü.1 karışımına ait -10°C’de 3 günlük SEM görüntülerinden örnekler görülmektedir. Bu örneklerle bakıldığında numunelerde ilk 3 günde dahi bazı hekzagonal ve iğnemsî yapıların oluşmaya başladığı görülmektedir. Bu ise hidratasyon olayının meydana geldiğinin kanıtıdır.

Bunun yanında -10°C 'de K karışımının 3 günlük SEM görüntüsü incelendiği zaman herhangi bir yapının oluşmadığı ve sadece çimento partiküllerinin görüntüsünün elde edildiği açıktır. Bu antifriz katkı içermeyen beton numunesinde düşük sıcaklıkta hidratasyon gelişiminin ilk 3 gün içinde başlamadığının göstergesidir. Yani beton bünyesindeki suyun donması neticesinde su ve çimento arasında olması gereken hidratasyon reaksiyonu soğuk havanın etkisiyle gecikmiş veya durmuştur. Şekil 4.79 bunun kanıtıdır.

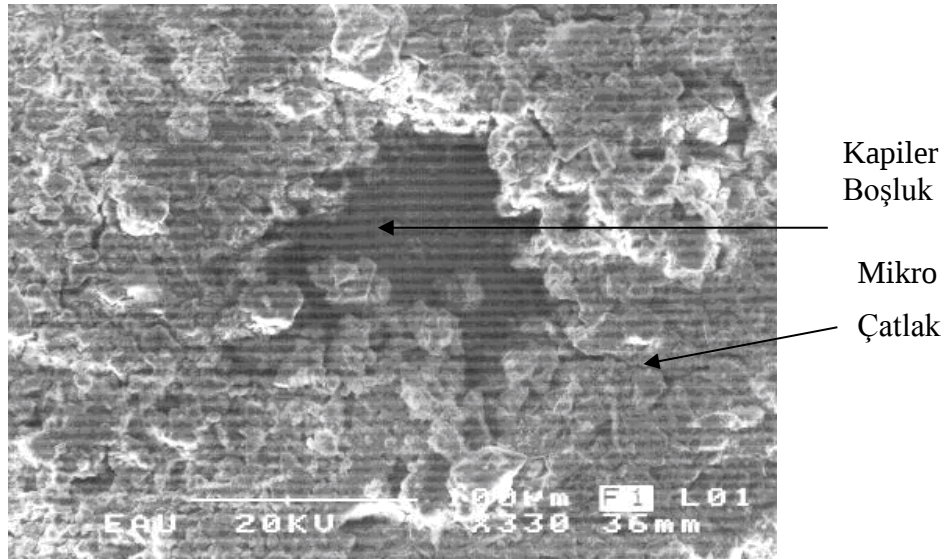
Çimento hamurundaki dört faz, hidrate olmamış çimento parçacıkları, CH, CSH ve kapiler boşluklar SEM görüntüleme tekniği ile incelenebilmektedir (Igarashi *et al.* 2004). CSH çimento hamurundaki bilinen en büyük fazdır. CSH fazının mekanik davranışı üzerinde birçok parametre etkilidir. Bunlar: CSH yapısını oluşturan partiküllerin boyutu, şekli, dağılımı, konsantrasyonu, dağınık ve sürekli fazların bileşimi, karışımın topolojisi ve boşluk yapısıdır. CSH yapısı SEM görüntülerinde parlak bir şekilde de görüntülenmektedir (Siddique *et al.* 2011). CSH'nın 4 farklı mikroskobik şekilde olabileceği belirtilmiştir: bunlar, a) 0,5-2 mikron uzunluğunda ve 0,2 mikrondan küçük enine sahip kristal iğneler şeklinde, b) tabakalar şeklinde yaprak gibi, c) düzensiz hekzagonal panel kristaller şeklinde ve d) hidrate olmuş çimento kenarından yönelmiş ve yoğun kümelenmiş CSH hamuru şeklindedir. Şekil 4.79b incelendiğinde kontrol betonunda böyle bir yapının oluşmadığı ve soğuk havanın etkisiyle boşluk etrafındaki yapıda mikro çatlakların meydana geldiği gözlenmektedir.

Son yıllarda SEM tekniği çimento hamurunun hidratasyon derecesinin tahmin edilmesi için kullanılan nicel yöntemlerden birisidir ve dikkatli bir şekilde uygulandığı zaman bu teknik çimento hamurunun hidratasyon derecesinin belirlenmesi için etkili bir teknik olabilir (Feng *et al.* 2004). SEM ve X-ray mikro analiz teknikleri betonun kompleks mikro yapısının görüntülenmesi için geliştirilmiştir ve bu teknikler mikro metrenin altındaki boyutlarda olan görüntülerin tanımlanmasını sağlamaktadırlar. SEM tekniği çimentonun ve betonun mikro yapısını anlama yeteneğimizi geliştirmektedir (Ye *et al.* 2007). Ayrıca bu teknik çimento materyallerinin etkisinin değerlendirilmesinde,

betonda dayanıklılık problemlerinin değerlendirilmesinde ve servis ömrünün tahmininde yardımcı olmaktadır (Stutzman 2001).



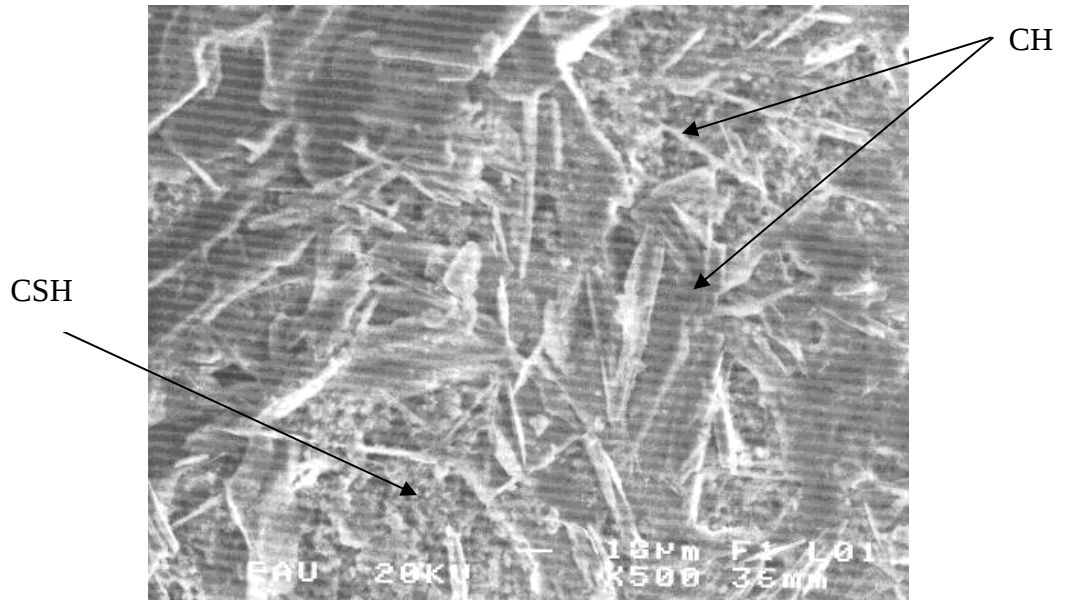
Şekil 4.79a. -10°C’de K karışımına ait 28 günlük SEM



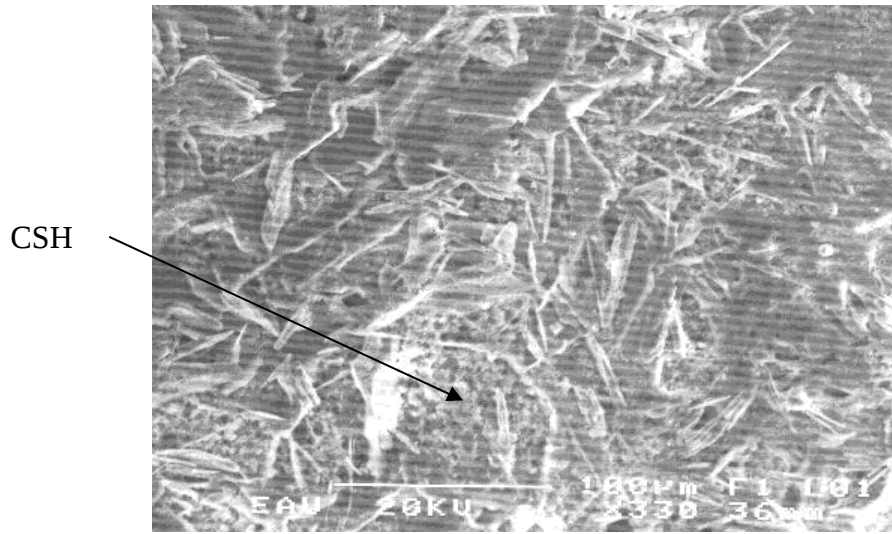
Şekil 4.79b. -10°C’de K karışımına ait 3 günlük SEM

Dökülür dökülmez dış ortamabırakılan K ve Ü.2 karışımlarına ait 3 günlük SEM görüntülerinde hidrasyon olayının başladığı ve devam ettiği gözlenmiştir. Oluşan plak yapılar, iğnemsî formdaki görüntüler ve birbirleri ile olan bağlantıları ve bu yapıların arasındaki çimento partikülleri hidrasyonun başladığının yani betonun dayanım

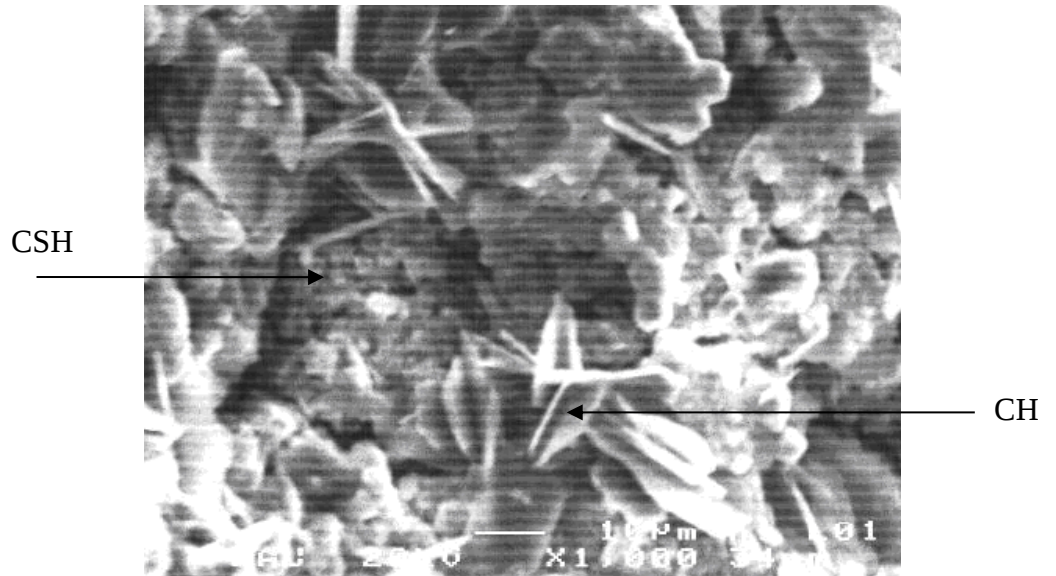
kazandığının ve devam ettiğinin birer kanıtıdır. Aynı şartlardaki kontrol ve %9 üre içeren numuneler karşılaştırıldığında üre içeren antifriz karışımında dayanım kazanma hızının daha fazla olduğu görülmektedir. Zira oluşan yapılar bunu kanıtlamaktadır. Kontrol betonunun 3 günlük SEM görüntüsünde hidrate olmamış çimento partikülleri daha sık görülmekte iken %9 üre içeren beton karışımında hem etrenjit yapısı hem de plak şeklindeki yapılar yani CH daha sık görülmektedir. K betonunda oluşan mikro çatlaklar ve boşluklu yapı nemi kendisinde toplar ve burada biriken su düşük sıcaklıklarda donup genleşebilir. Sonuç olarak bu çatlaklar yayılır, beton mikro yapısı zarar görür ve basınç dayanımı azalır. Bu mikro çatlaklar zıt yönlü termal gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Gao *et al.* 2002). Etrenjit ve CH yapıları boşlukları doldururlar ve ayrıca agrega yüzeylerinde de yoğun olarak görülürler (Batic *et al.* 2000). Bu fark antifriz katkının etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak hidratasyon üre içeren numunede daha hızlı gelişmektedir.



Şekil 4.80a. Ü.2.D karışımına ait 3 günlük SEM



Şekil 4.80b. Ü.2.D karışımına ait 3 günlük SEM



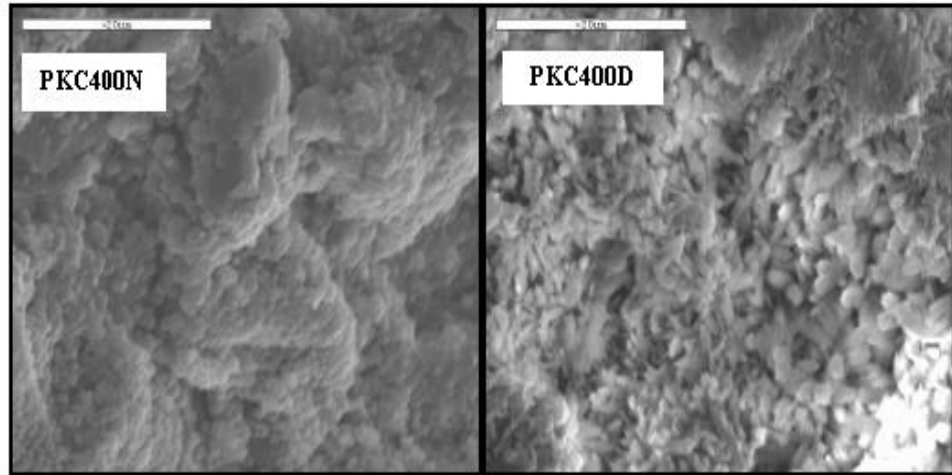
Şekil 4.81.K.D karışımına ait 3 günlük SEM

Elzafraney 2004 yılında yaptığı çalışmasında tipik kuzey enlem sıcaklıklarında donma çözölmeye maruz betonun gördüğü zarar üzerine bir araştırma yapmıştır. Çalışmasında Elzafraney donma çözölmeye maruz kalan numunelerin mikro çatlaklarının arttığını gözlemlemiştir. Gözlemleri neticesinde donma çözölmeye maruz betonun çimento hamurundaki mikro çatlakların oluştuğunu ortaya koymuş ve bu çatlakların hamur boyunca ve büyük agrega tanelerinin sınırlarında yayıldıklarını ifade etmiştir. Donma

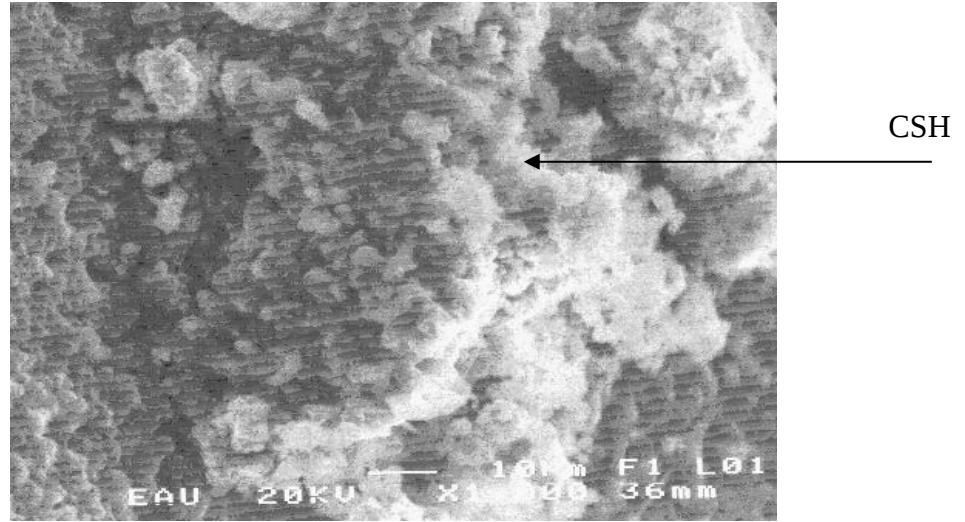
çözülme döngülerinden sonra bozulan birçok beton numunesinde mikro çatlakların ortalama koordinat boyutları 400-500 μm 'dir ve genişlikleri 1 ve 10 μm arasında değişmektedir.

Donma çözülme şartları altında buz çözücü tuzların kullanılması kabuklanmaya sebep olur. Donma çözülmeye maruz kalan yüzeyde paralel düzensiz mikro çatlakların gelişimi ile oluşan kabuk atma şeklinde tahribat olmaktadır.

Topçuve Canbaz (2006), yaptıkları çalışmada PKÇ/B 32.5R Portland Kompoze Çimentosu ve KÇ 32.5 katkılı çimento kullanmışlardır. Üretilen beton numuneleri tekrarlı donma-çözülme deneyi yapılarak mikro yapısında oluşan değişimler SEM ile incelenmeye çalışılmıştır. PKÇ/B 32.5R ile üretilen 400 dozajlı beton (PKC400D) incelendiğinde hidratasyon ürünlerinden olan CSH etkisi ile yuvarlak yapılardan oluşan oldukça dolu bir yüzey görüntüsü görülmektedir. Donma-çözülme etkisi ile bu numunenin porozitesi artmıştır. Zayıf olan yapılar donma-çözülme etkisinde oluşan hidrolik basınç kuvveti ile parçalanmış ve gözenekli bir yapı oluşmuştur.

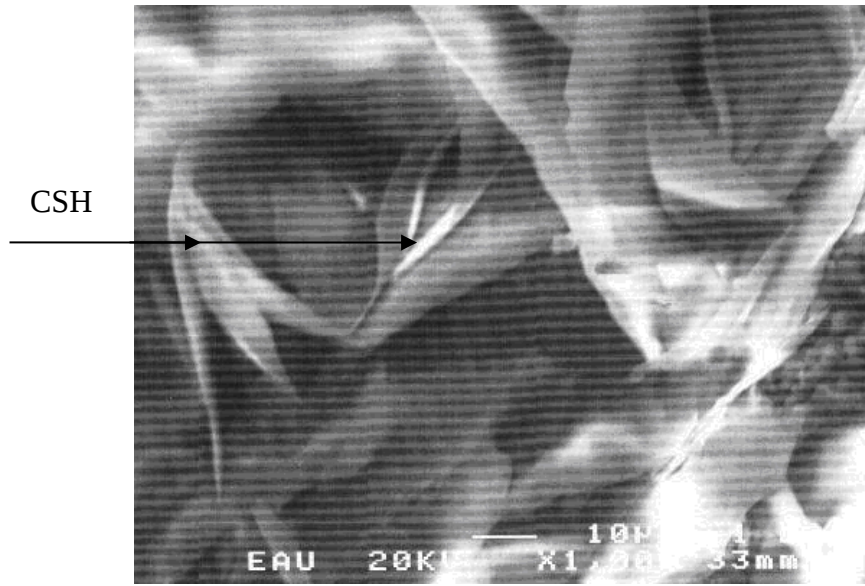


Şekil 4.82. PKC400 betonlarının donma-çözülme öncesi ve sonrası mikro yapısı

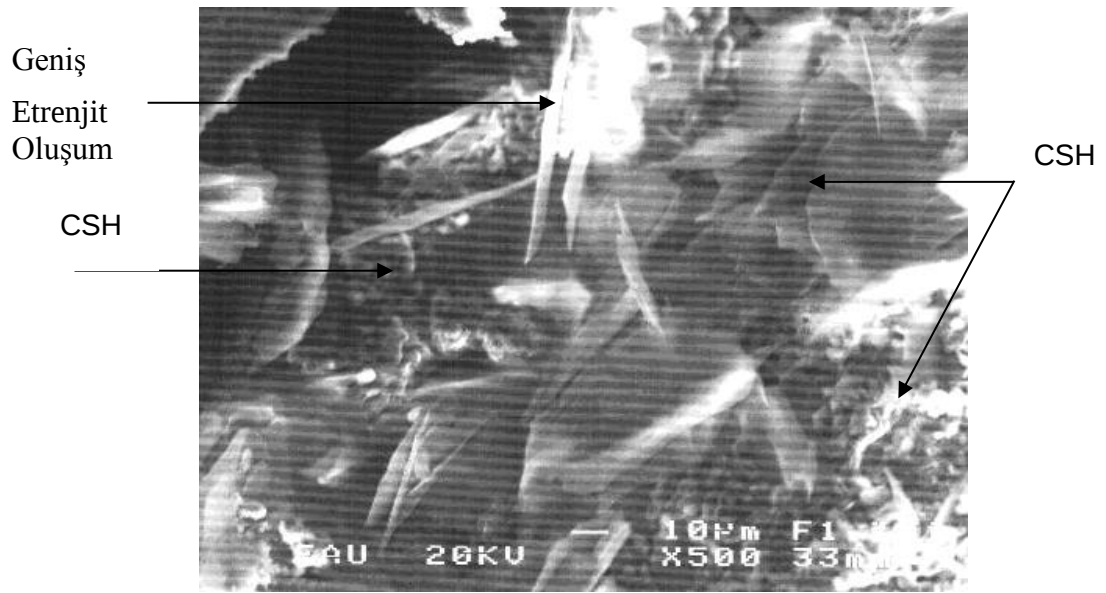


Şekil 4.83. -5°C’de Ü.3 karışımına ait 3 günlük SEM

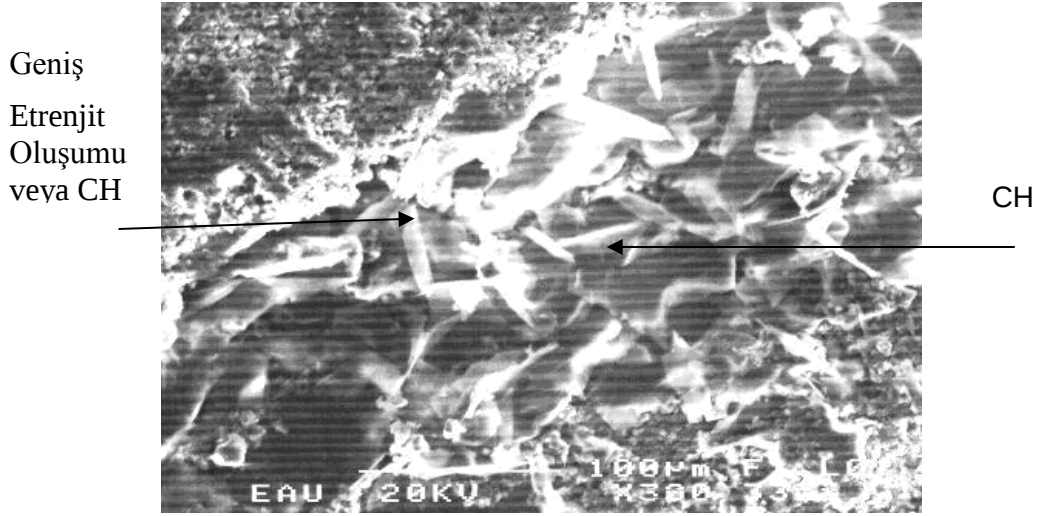
Korhonen (2002b) portland çimentosu su içinde dağıldığında çimento derhal iyonize olduğunu ve hidrasyon reaksiyonu ile farklı yeni ürünlerine dönüştüğünü ifade etmiştir. En kritik ve önemli ürün CSH ve CH’tır. CSH kür süresince var olan sıcaklık, zaman ve nem şartlarına bağlı olarak gelişen amorf yapıda bir bileşiktir. Bütün hidrasyon ürünlerinin hacim olarak 2/3’ünü oluşturur. Çok küçük ve ince tabakalar halinde oluşmuştur ve bu sebeple oldukça büyük $100-700\text{m}^2/\text{g}$ gibi bir yüzey alanına sahiptir. Bu yüzey alanı betonda dayanım değerini etkileyen parametredir. CSH elektron mikroskobu altında incelendiği zaman deniz anemon çiçeği gibi her yönde iğnemsî formda yaprakları varmış gibi görünür. Çok büyük yüzey alanından dolayı bu iğnemsî formdaki yapılar birbirlerine Van Der Waals kuvvetleri ile bağlanırlar. Çimento hamurunda başka bağlar oluşmasına rağmen yüzey kuvvetleri daha baskındır ve betonun dayanımının oluşmasında elektrostatik bağ kuvvetlerinin miktarı önemlidir. CH ise toplam hacmin %20-25’ini oluşturur ve SEM görüntülerinde hegzagonal yapıda görünür. Ayrıca CH temel bir düzlem boyunca dizilmiş ince tabakalar ve yarıklar şeklinde görülmektedir (Stutzman 2001).



Şekil 4.84a. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 Günlük SEM

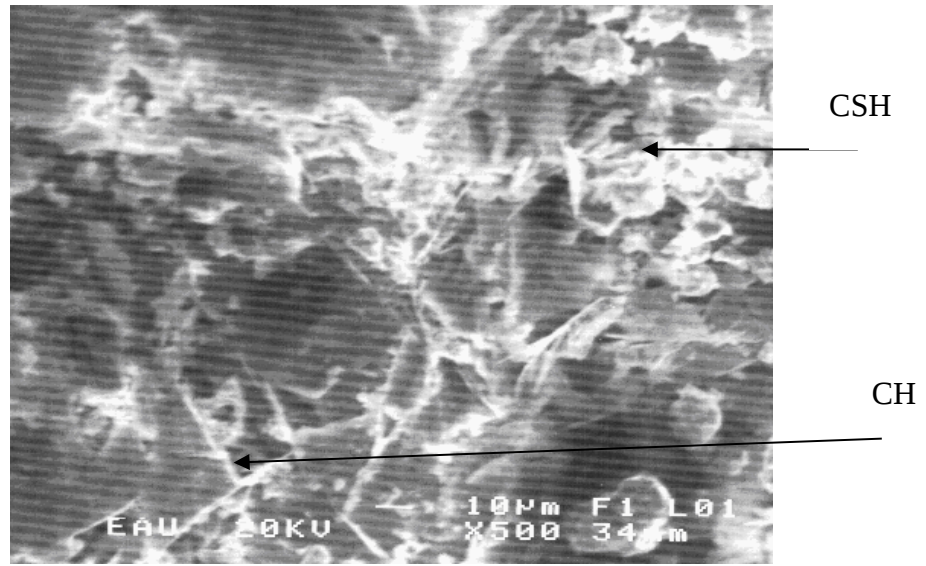


Şekil 4.84b. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM

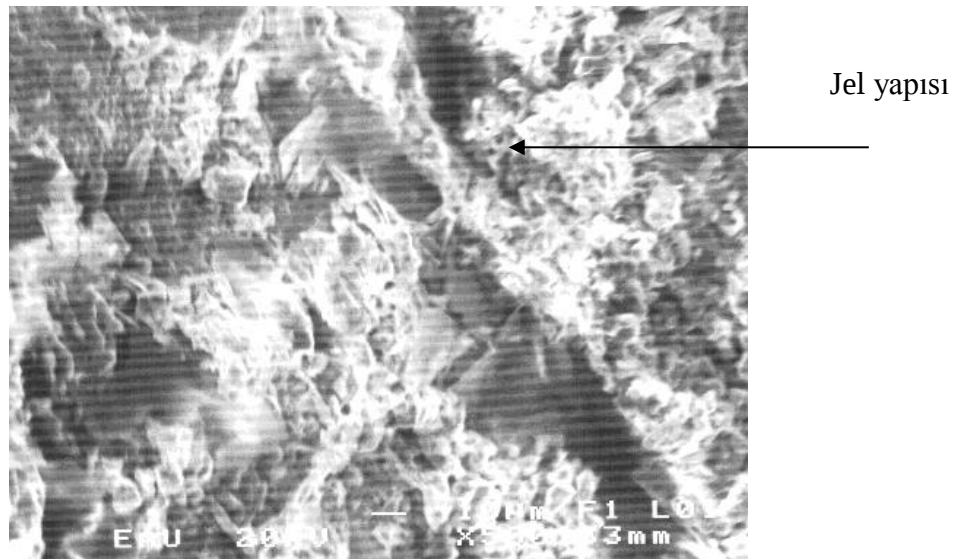


Şekil 4.84c. -10°C’de Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM

Ü.2 karışımına ait -10°C’deki 3 günlük SEM görüntüsü incelendiği zaman çimento ve agrega ara yüzeyinde hidratasyon neticesinde oluşan bazı yapılar dikkati çekmektedir. Agrega civarında yani sınırındaki hidratasyon gelişimi ile yoğun çimento hamurundaki hidratasyon gelişimi birbirlerinden farklıdır. Çünkü agreganın varlığında lokal olarak w/c oranı daha yüksektir ve agreganın yüzeysel ve kimyasal özellikleri hidratasyon gelişimini etkileyebilir (Wang *et al.* 2005). Agrega civarındaki çimento partikülleri, agrega yanında ve gevşek bir görünüm sergilemektedir. Bunun sonucu olarak agrega yüzeyinde lokal olarak w/c oranının yüksek olması porozite eğilimini artırmaktadır. Aynı noktada çimento hamurundaki w/c oranı daha düşüktür (Cwirzen and Penttala 2005). Ancak burada antifriz katkının etkisiyle hidratasyon gelişiminin devam ettiğini ve dallanma şeklinde CH yapısının oluştuğu gözlenmektedir. Ayrıca Yue and Shuguang (2001) sıradan portland çimentosunda agrega çimento ara yüzeyinde büyük miktarda CH oluştuğunu ifade etmişlerdir. Burada CH kristallerinin boyutu kristal büyüme boşluğu ile ilişkilidir. Kristallerin büyümesi için boşluk alanı ne kadar büyükse, kristallerin kısıtlanması o kadar küçük olacak ve CH kristal boyutları daha büyük olacaktır. Bu da kristal yapının, betonda geçiş bölgesinde ki karakteristik değer olan porozite ile alakalı olduğunun göstergesidir. SEM ile beraber XRD deneyleri bu kristal yapının belirlenmesi için kullanılan yöntemlerdendir (Yue and Shuguang 2001).



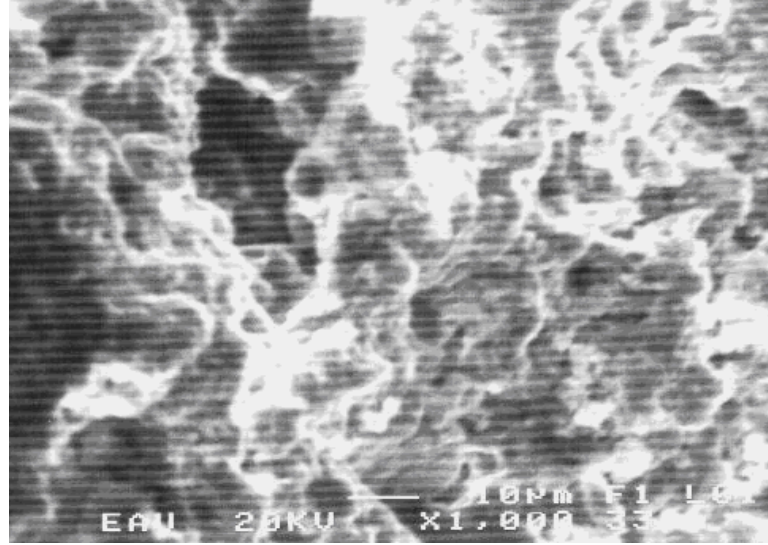
Şekil 4.85. -10°C’de Ü.3 karışımına ait 3 günlük SEM



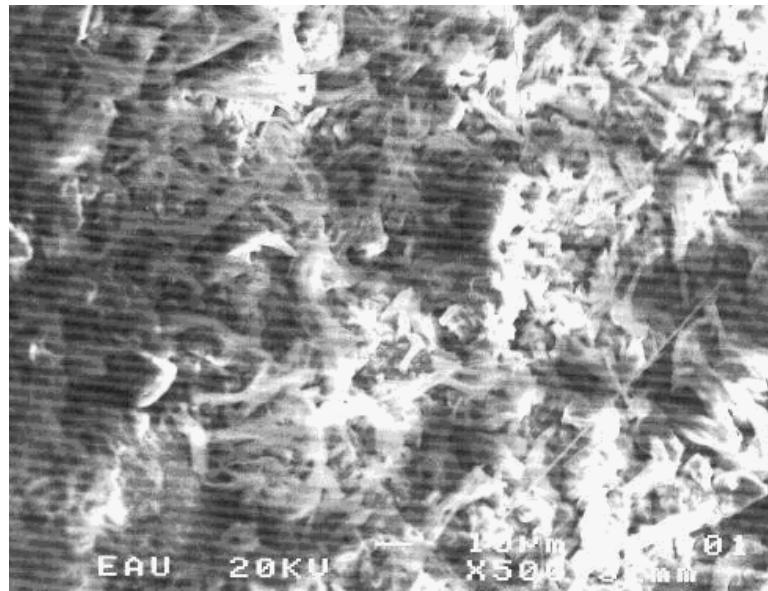
Şekil 4.86. -15°C’de Ü.3 karışımına ait 3 günlük SEM

-10°C ve -15°C kür sıcaklıklarında Ü.3 karışımına ait 3 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde CSH yapısı ve plak şeklinde CH yapısı dikkati çekmektedir. K karışımı ile karşılaştırılacak olursa ilk 3 günde dahi bu yapıların oluşumu hidrasyon olayının katkının donma noktasının altında bile oluşabildiğini göstermektedir. Çünkü antifriz sayesinde buz oluşumu kademeli olduğu için ani donma meydana gelmemektedir. Böylece yavaşta olsa dayanım gelişimi devam etmektedir.

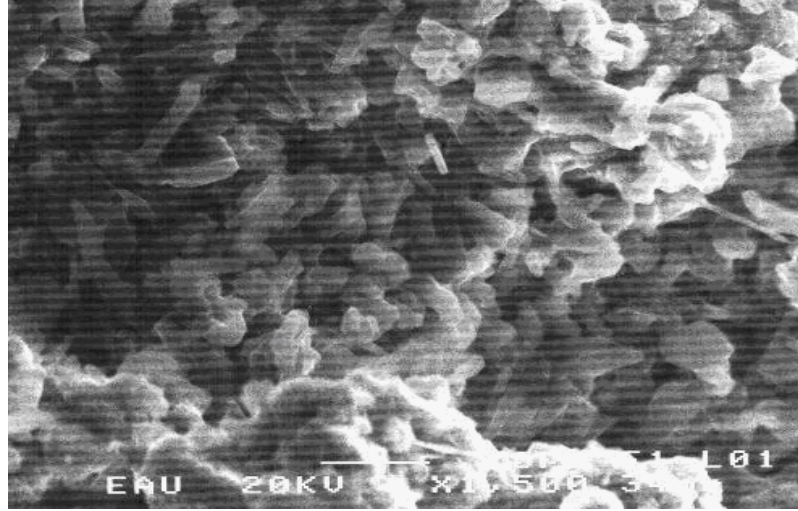
Ü.2 karışımına ait -5°C 'de 3 günlük SEM görüntüsü incelendiği zaman yoğun taneli bir yapıda CSH oluşumu göze çarpmaktadır. Hidratasyon süreci ve porozite birbirleri ile bağlantılı ve mikro yapıyı karakterize eden iki fiziksel mekanizmadır. Yani porozitenin varlığı ile hidratasyon gelişimi ters orantılıdır(Wang *et al.* 2005).



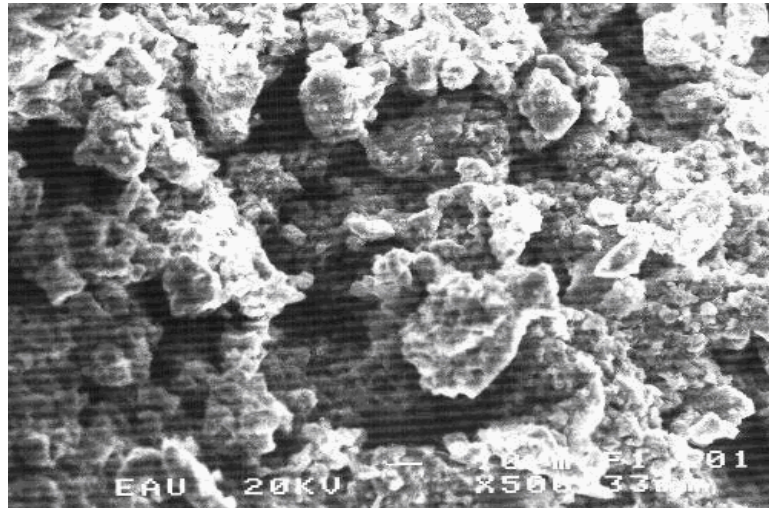
Şekil 4.87. -5°C 'de Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM



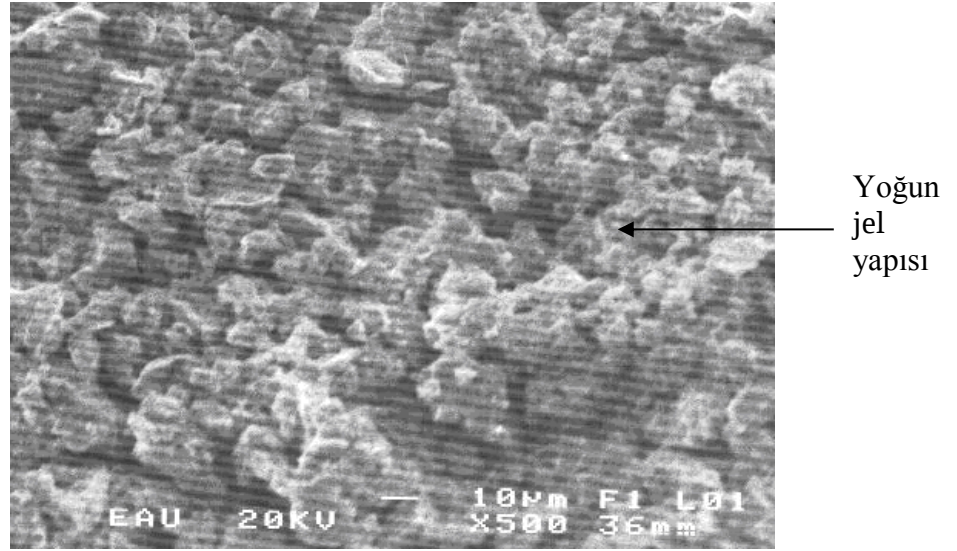
Şekil 4.88. -15°C 'de Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM



Şekil 4.89a -15°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM

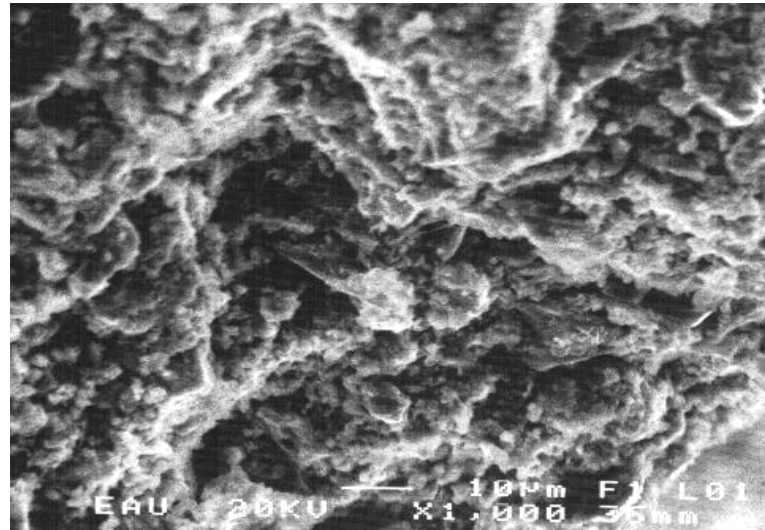


Şekil 4.89b. -15°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM

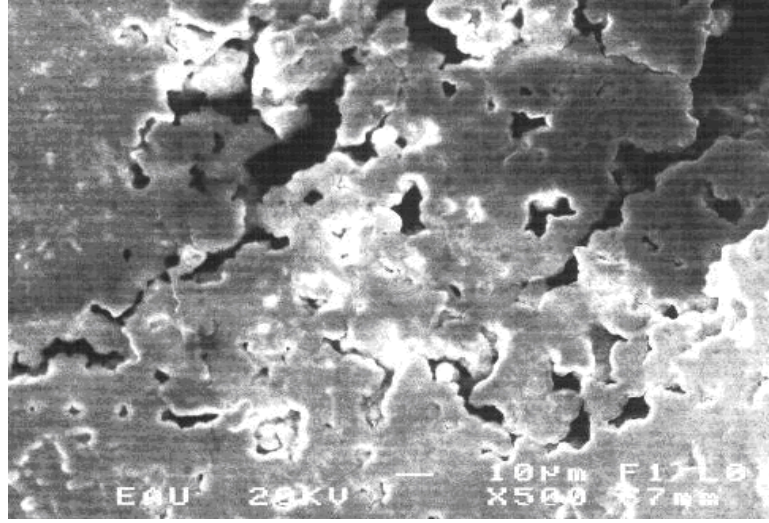


Şekil 4.90. Ü.1.D karışımına ait 3 günlük SEM

Ü.1 karışımının dış ortamdaki 3 günlük SEM görüntüsü yoğun bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Bu yapı hem basınç dayanımı gelişimi açısından hem de agrega ve çimento ara yüzeyinde aderansın gelişimi açısından oldukça önemlidir.

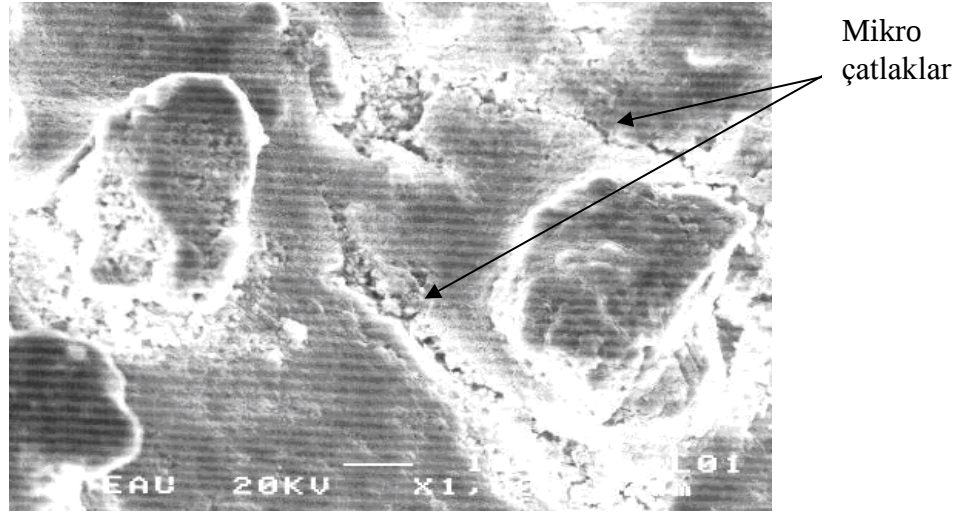


Şekil 4.91. -5°C'de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM



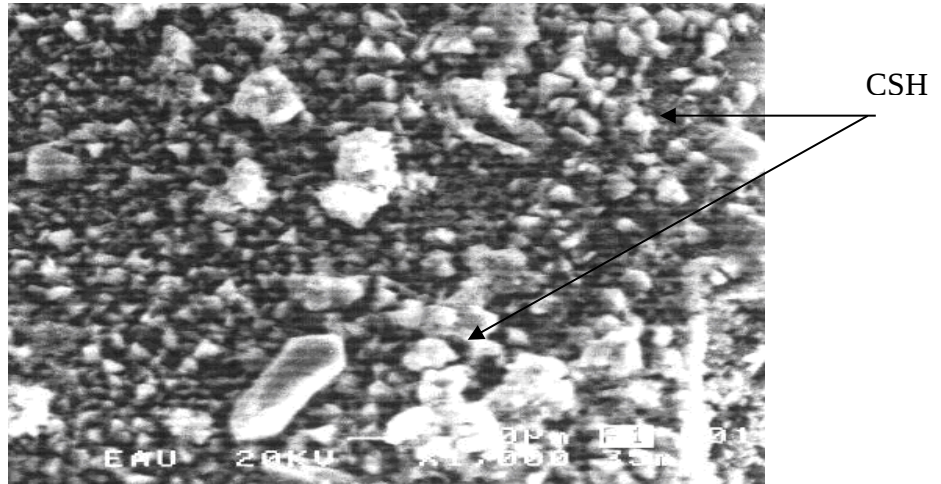
Şekil 4.92. -20°C’de Ü.1 karışımına ait 3 günlük SEM

Taze betonda agregaların etrafındaki ve aralarındaki boşluklarda çimento partiküllerinin mikro yapısal olarak dağılımı neticesinde sertleşmiş betonda dayanım artışı sağlayan ilk iskelet yapı oluşmaktadır (Diamond and Kjellsen 2008). Dolayısı ile ilk günlerde oluşan bu yapı ve agrega çimento ara yüzeyindeki aderans dayanım gelişimi açısından önemlidir. Burada Ü.1 karışımına ait -20°C’de 3 günlük SEM görüntüsü incelendiğinde oldukça boşluklu ve çatlakların olduğu bir yapı görülmektedir. Ayrıca kontrol numunesine ait -5°C’de 3 günlük SEM görüntüsü incelendiğinde agrega ve çimento hamuru ara yüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu görülmektedir. -20°C’de Ü.1 karışımı ile bu kontrol karışımı karşılaştırıldığında kontrol karışımının mikro çatlaklara rağmen daha fazla bütünlüğe sahip olduğu gözlenmektedir. Basınç dayanımı ise hem bütünlük özelliğine hem de mikro çatlakların başlama ve yayılma mekanizmalarına bağlı bir özelliktir. Soğuk havanın etkisi ile betonda oluşan iç gerilmelerin neticesinde meydana gelen mikro çatlakların olduğu bölgelerde dayanım kaybı söz konusudur. Bu karışımlara ait 7 günlük basınç dayanım değerlerine bakıldığında her iki gruba ait bu değerlerin oldukça düşük olduğu gözlenmektedir. Ayrıca -20°C’de Ü.1 karışımının basınç dayanımı da kontrolden daha düşüktür.



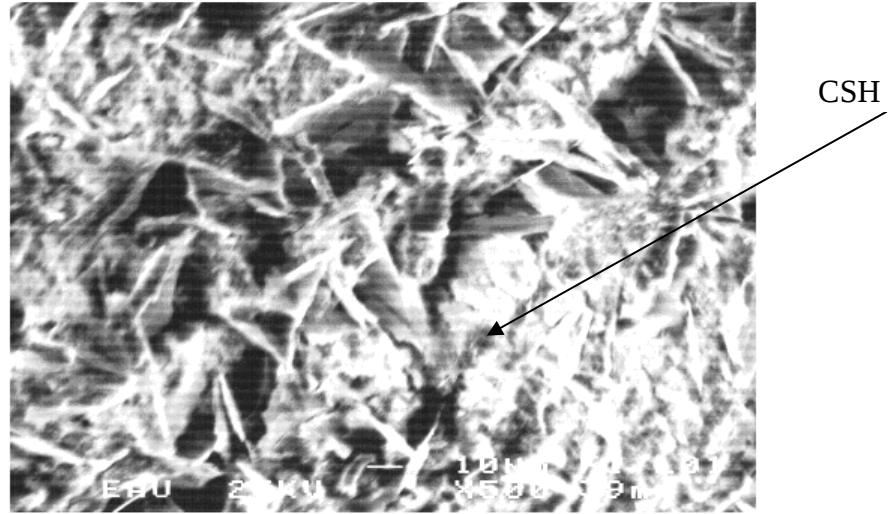
Şekil 4.93. -5°C’de K karışımına ait 3 günlük SEM

Kontrol karışımına ait 3 günlük su küründeki SEM görüntüsünde mikro yapıda CSH açısından oldukça yoğun bir yapı görülmektedir. Bu karışımın sertliğinin de yüksek olduğunun bir kanıtıdır (Wang *et al.* 2005). Sertliği yüksek olan karışımın 7 günlük basınç dayanımı incelendiğinde yüksek bir değere sahip olduğu gözlenmektedir.

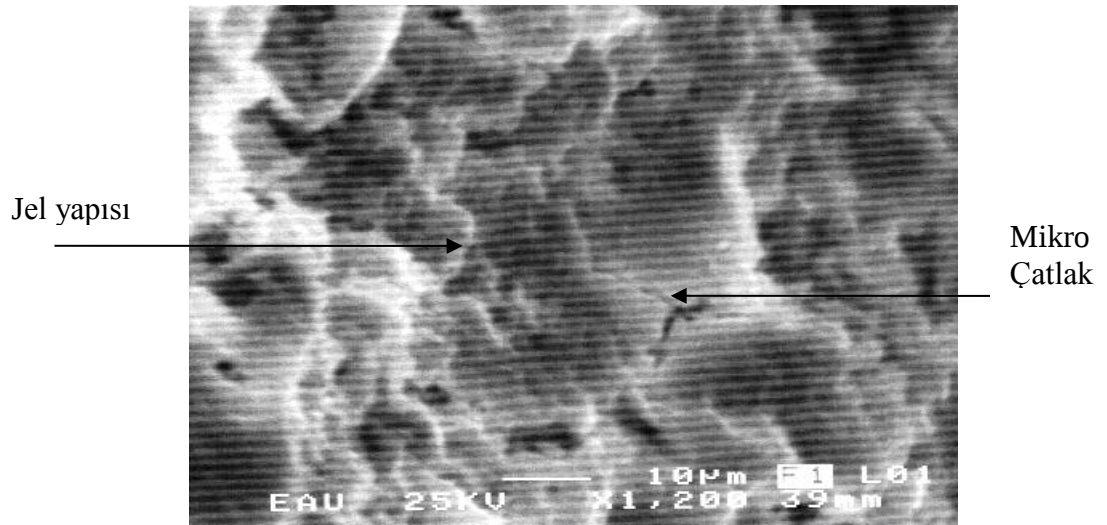


Şekil 4.94. Su küründe K karışımına ait 3 günlük SEM

K.D karışımının 28 günlük SEM görüntüsü incelendiğinde birbirine bağlı ve oldukça yoğun bir jel yapısı dikkati çekmektedir. Bu kür ortamında K karışımının basınç dayanımı diğer kür ortamlarında elde edilen değerlerden oldukça yüksektir.

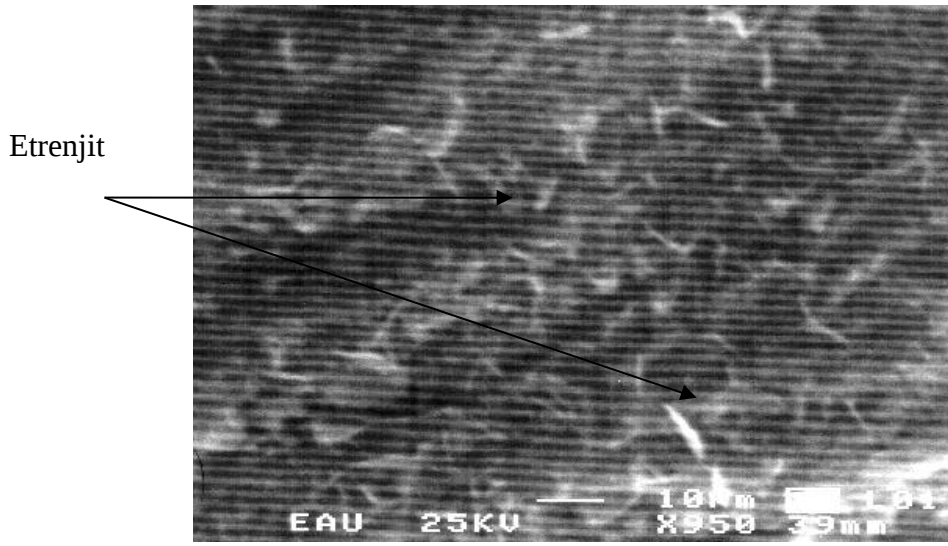


Şekil 4.95. K.D karışımına ait 28 günlük SEM

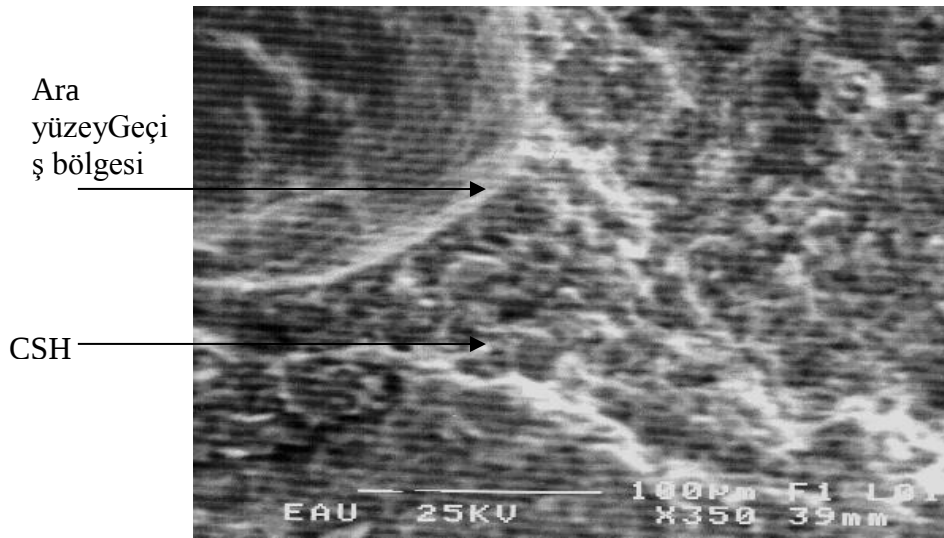


Şekil 4.96. -10°C’de C.3 karışımına ait 28 günlük SEM

Şekil 4.96, Şekil 4.97 ve Şekil 4.98 incelendiği zaman C.3 karışımının -10°C’de elde edilen 28 günlük SEM görüntüsünde parlak ve daha sıkı bir yapı göze çarpmaktadır. Ancak mikro çatlak oluşumu da görülebilmektedir. Bu karışımın bu kür sıcaklığındaki basınç dayanımı dış ortamda ve -5°C’de elde edilen dayanımına göre daha düşüktür. -5°C’de çok daha sıkı bir yapı görülmektedir. Bu kür sıcaklığında elde edilen basınç dayanımı da oldukça yüksektir.



Şekil 4.97.C.3.D karışımına ait 28 günlük SEM



Şekil 4.98.-5°C'de C.3 karışımına ait 28 günlük SEM

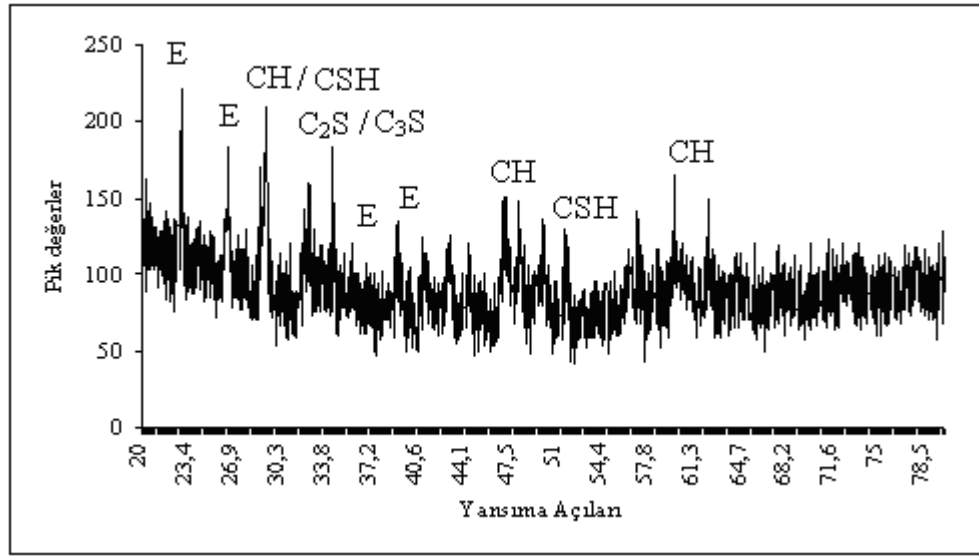
4.3.4. XRD deney sonuçları ve değerlendirilmesi

XRD deneylerinden elde edilen veriler grafik halinde Ek 2'de verilmiştir. Bu grafiklerde kristal bir yapıya rastlandığı zaman pik noktaları oluşmaktadır. Bu noktaların koordinatlarından hangi bileşiğe ait olduğu tahmin edilebilmektedir. Bu cihazda incelenmek üzere üretilen 10 farklı grup harcından 1x1cm ebatlı numuneler dökülmüş

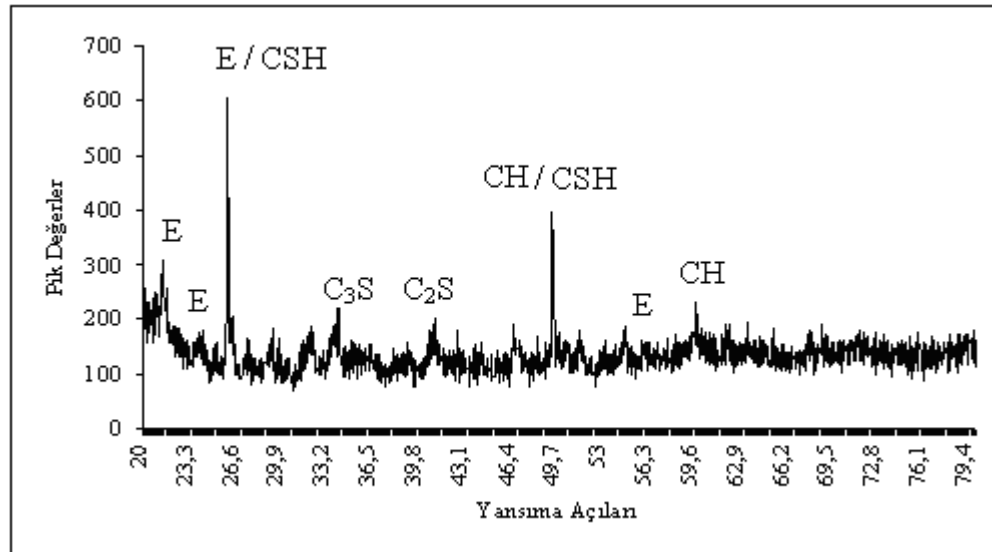
ve bu numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük deneyleri yapılmıştır. Literatüre dayandırılarak beton numuneler için açılma değerleri 200 ile 800 arasında alınmıştır.

Bu yöntemde numuneler yüksek enerjili elektronlar ile bombardıman edildiğinde X ışınları üretilir. XRD yöntemi genellikle bir enerji dağıtan detektör kullanmaktadır. Enerji dağıtan detektör bütün verileri bir seferde toplama özelliğine sahiptir. Bu yöntem herhangi bir maddede bulunan elementleri belirlemek için kullanılan tahribatsız deney yöntemlerinden birisidir (Siddique *et al.* 2011). XRD yöntemi, katkı kullanılsın veya kullanılsın çimentonun hidratasyon kinetiğini takip etmek için kullanılır. Etrenjit, CH, kalsit ve CSH gibi farklı hidratasyon ürünleri bu yöntem ile belirlenebilmektedir (Ramachandran 1995). Aşağıda bu yöntem ile çizilen kontrol ve kalsiyum nitrat içeren karışımlara ait 28 günlük grafikler yer almaktadır. Ayrıca EK 3'te tüm grafikler verilmiştir.

-5°C'de C.2 karışımına ait 7 günlük XRD grafiğinde 26,5° yansıma açısında oluşan 141 değerindeki hidrate olmamış çimento partiküllerine ait pik değeri, 28 günlük grafikte aynı açıda zamanla azalmış ve 101 değerine ulaşmıştır. Bu değeri C_3S ve C_2S miktarlarındaki azalmayı göstermektedir. Yaklaşık 29° yansıma açısında ise oluşan CH ve CSH yapılarına ait pik değerlerde ise bir artış söz konusudur. Yani bir karışımda ölçülen piklerin yoğunluğu onu oluşturan maddelerin miktarı ile doğru orantılıdır. Bu artış, azalan C_3S ve C_2S fazlarının CSH ve CH oluşumunda rol oynadıklarını göstermektedir (Grierson *et al.* 2005).



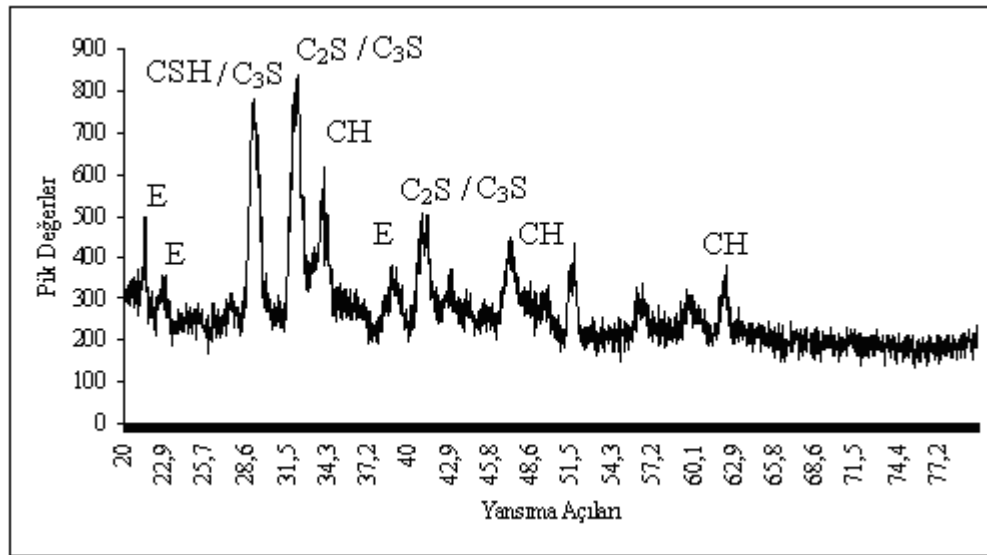
Şekil 4.99. -5°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği



Şekil 4.100. -10°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği

Roncero *et al.* (2002) yapmış olduğu çalışmasında süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların beton özelliklerine etkilerini incelerken çimento hamuru üzerinde de XRD deneyleri uygulamış ve hidrasyon gelişimini takip etmiştir. Bu teknik etrenjit, monosülfat ve CH gibi yapıların ve alçıtaşı, C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF gibi çimentonun anhidrate yapılarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Etrenjit su ile çimentonun

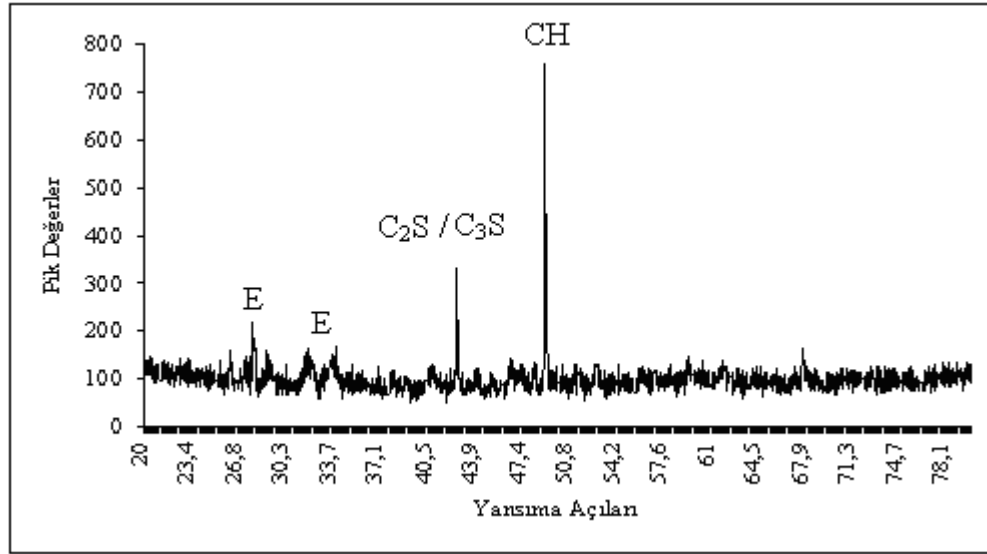
karılmasından hemen sonra oluşmaya başladığı için ilk etapta grafiklerde etrenjit oluşumu gözlenmektedir. CH oluşumu ise 2. günden sonra hızlanmaktadır. Etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), ($\text{C}_6\text{ASH}_{32}$) C_3A ve alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) arasındaki reaksiyonun bir ürünüdür (Irassar *et al.* 2003). Gu *et al.* (1997) tarafından sıradan portland çimentosu üzerinde yapılan çalışmada XRD grafiklerinde etrenjit piklerinin ilk 4 saatte ve daha sonrasında gözlemlendiği ifade edilmiştir. Ayrıca CH pikleri ilk 8 saate oluşmaya başlamış ve zamanla artış göstermiştir. C_2S fazına ait maksimum piklerin şiddeti ile C_3S fazının pikleri çakıştığı için bu pikleri değerlendirmek zordur. Alçıtaşı prizinin ilk saatlerinde belirlenebilir ancak iki gün sonra sülfatlar etrenjite dönüşmüşlerdir.



Şekil 4.101.-15°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği

XRD grafiklerinde elde edilen piklerin yoğunluğu ve şiddeti ile tanımlamalar yapılmaktadır. Çünkü pikler maddelerin karakteristik özellikleridir. XRD sinyalleri ile aranan elementlerin bulunup bulunmadıkları, dağılımları ve konsantrasyonları belirlenebilir (Stutzman 2001; Tagnit-Hamou *et al.* 2005). XRD analizleri mümkün olduğu kadar kaba agreganın olmadığı harç kısmında yapılır. İnce agreganın ise ayrılması mümkün değildir (Batic *et al.* 2000). Dış ortam ve su kürrüne tabi tutulan numunelerde daha fazla hidrate olmuş kristal yapıların oluştuğu gözlenmektedir. Su

küründe ve dış ortamda yaklaşık 290 açıda CSH oluşumu gözlenmektedir. Bu karışıma ait 7 günlük XRD grafiğinde yaklaşık aynı yansıma açılarında pik değerlerin zamanla yükseldiği gözlenmektedir. Yani oluşan CSH ve CH gibi hidrasyon ürünlerinin miktarları zamanla artmıştır.



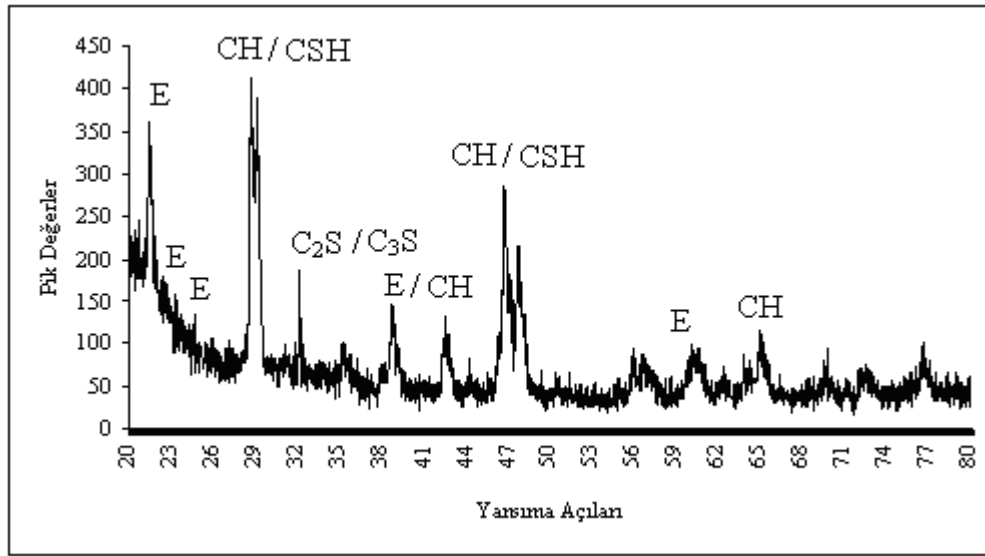
Şekil 4.102. -20°C’de C.2 için 28 günlük XRD grafiği

C₂S ve C₃S beraber portland çimentosunun yaklaşık %75-80’ ini oluştururlar. Yeterli suyun bulunması durumunda ise aşağıda gösterildiği gibi hemen suyla reaksiyona girerek CSH ve CH gibi yapıları oluştururlar.



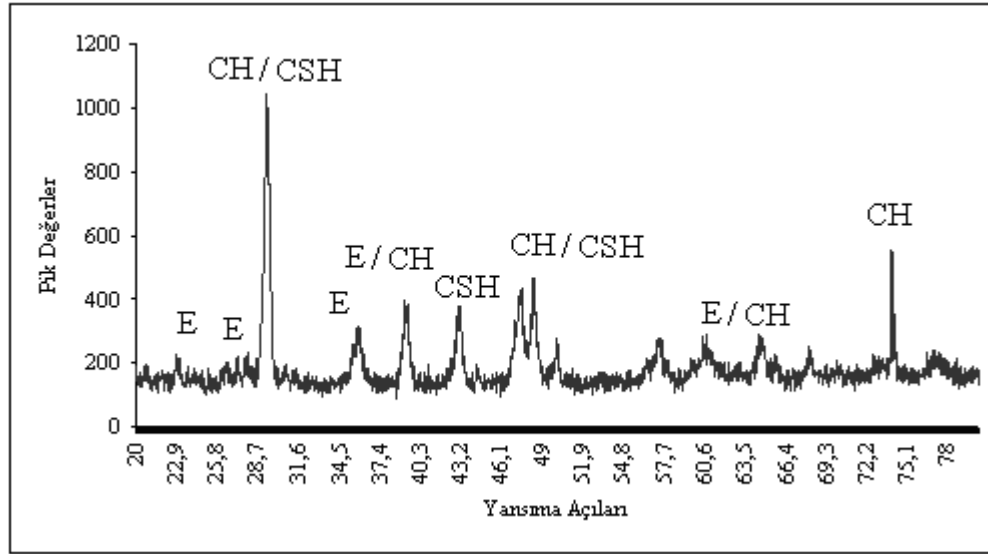
Bu reaksiyonlar neticesinde oluşan CSH fazı, koloidal yani jel yapısında amorf küçük parçacıkları içeren zayıf bir kristal yapısına sahiptir ve XRD grafiklerinde çok zayıf pik değerlerine sahiptir. Bu sebeple tespit edilmesi kolay değildir (Ramachandran 1995; Tagnit-Hamou *et al.*2005). Yapılan tespitler de daha önceden yapılmış çalışmalara dayandırılmaktadır. -20°C’de C.2 karışımına ait 7 günlük XRD grafiği incelendiğinde

yaklaşık 49° yansıma açısında bir pik oluşmamışken 28 günlük grafikte aynı açıda CH oluşumu göze çarpmaktadır. Bu durum hidratasyon reaksiyonunun devam ettiğinin kanıtıdır. Aynı zamanda 23° ile 32° yansıma açılarında var olan üç pik değer zamanla yükselmiştir. Bu pikler ilk zamanlarda oluşan ve artmaya devam eden etrenjit pikleridir.

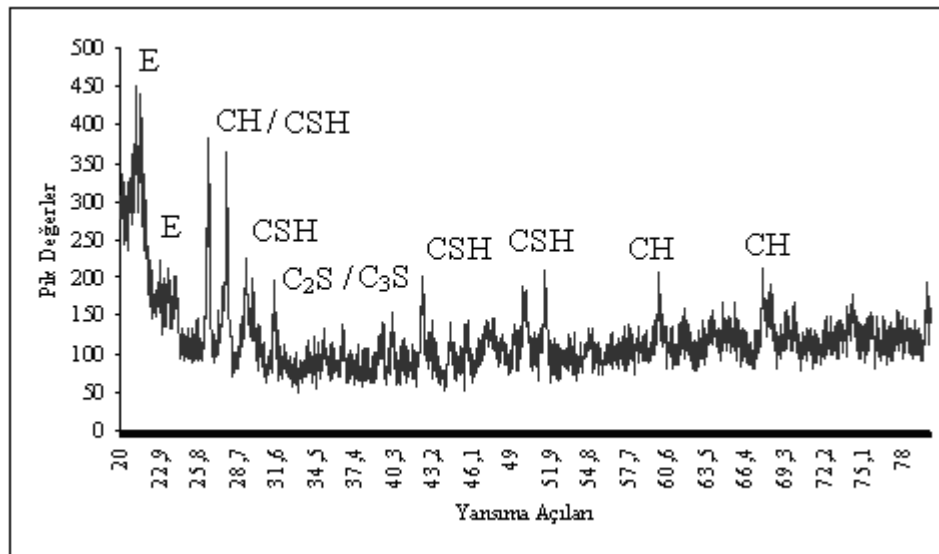


Şekil 4.103.C.2.D için 28 günlük XRD grafiği

C.2.D karışımına ait 7 ve 28 günlük XRD pikleri incelendiğinde farklı açılarda farklı pikler dikkati çekmektedir. Oldukça yoğun bir yapı söz konusudur. Bu durumda karışıma ait basınç dayanımları da incelendiğinde görülmektedir ki farklı açılarda CSH, CH ve etrenjit oluşumu sürekli artış göstermektedir. Aynı açılarda ise oluşan C_2S ve C_3S piklerinde düşüş gözlenmektedir. Bu düşüş çimento fazlarındaki azalmayla beraber betonun dayanım kazanma mekanizmasını oluşturan diğer fazların artışının kanıtıdır.



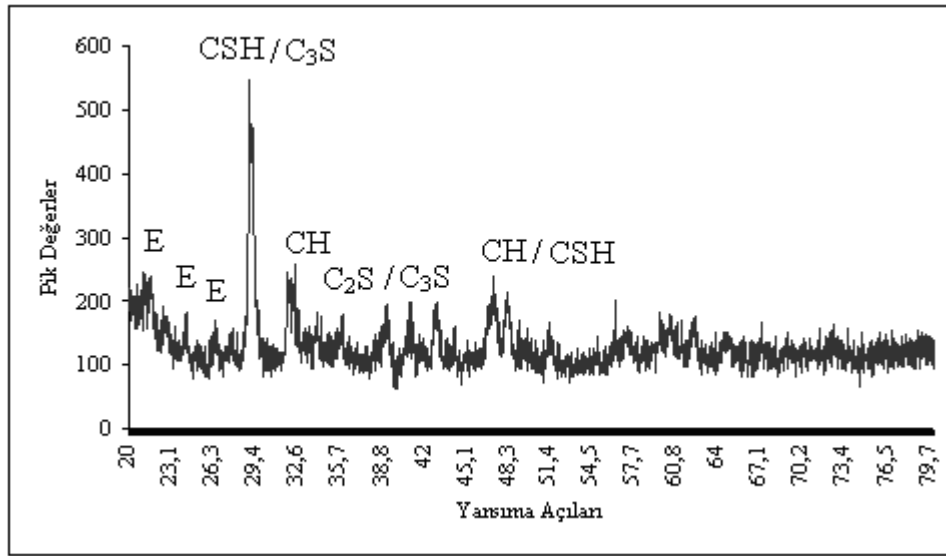
Şekil 4.104.Su küründe C.2 için 28 günlük XRD grafiği



Şekil 4.105.-5°C'de C.3 için 28 günlük XRD grafiği

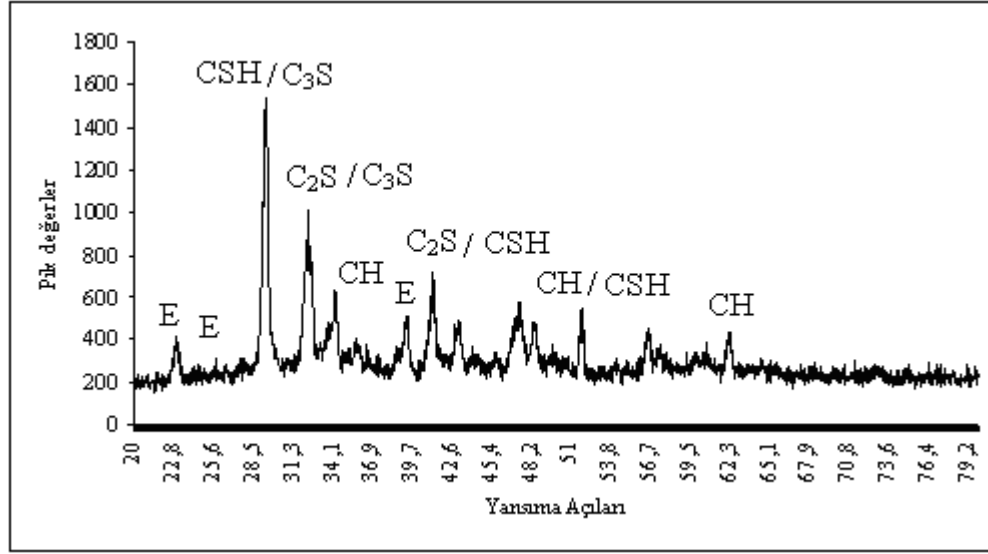
Etrenjit ortam pH değeri 10,7'nin altına düştüğünde kararsız bir yapıya sahip olmaktadır dolayısı ile pH bu değer altına düştüğünde onun yapısında bozulma meydana gelebilir (Irassar *et al.*2003). Dolayısı ile boşluk çözeltisinde, pH değerinin düşmesine neden olabilecek herhangi bir durum etrenjit gelişimin önüne geçebilir veya oluşmuş yapının bozulmasına neden olabilir. Ancak antifriz katkıları çözeltinin pH değerini de etkiledikleri ve konsantrasyonu artırdıkları için olumlu yönde etki göstermektedirler ve

böylece etrenjit yapısının bozulması engellenebilmektedir. -5°C 'de C.3 karışımına ait 7 günlük XRD grafiğinde yaklaşık 23° yansıma açısında etrenjit oluşumuna ait olduğu düşünülen pik değer 28 günlük XRD grafiğinde 151° 'den 251° değerine yükselmiştir. Aynı karışıma ait 7 günlük XRD grafiğinde diğer açılarda elde edilen C_2S ve C_3S fazlarına ait pikler, 28 günlük grafiklerde kaybolmuş ve onların yerini CH ve CSH yapıları almıştır. Bu durum C_2S ve C_3S fazlarının hidratasyon neticesinde betonda dayanım kazanmayı sağlayan yapılara dönüştüğünü göstermektedir.

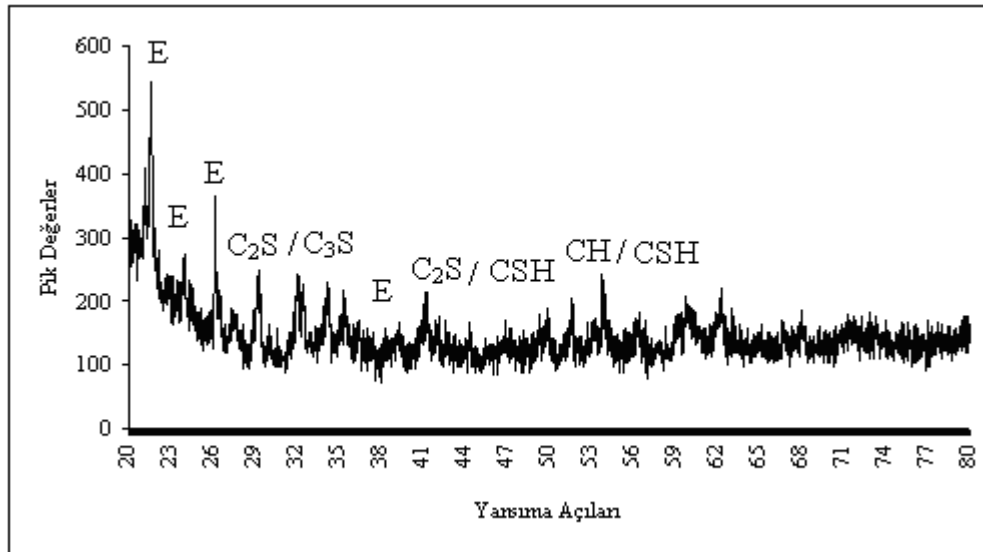


Şekil 4.106.- 10°C 'de C.3 için 28 günlük XRD grafiği

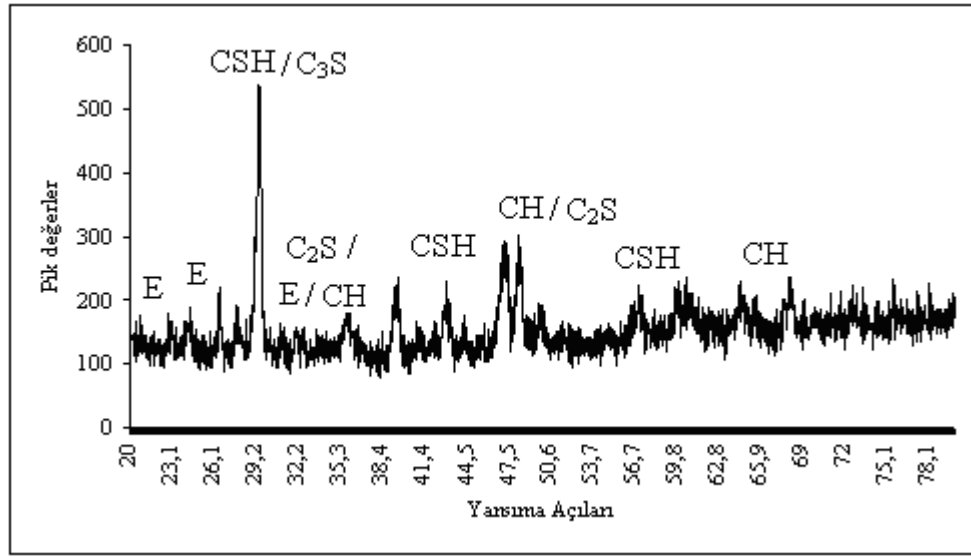
XRD grafiklerinden elde edilen karakteristik pikler ile beton içyapısında meydana gelebilecek herhangi bir değişim veya dışarıdan etki eden yabancı iyonların sebep olabileceği yapısal bir tahribat veya birim hücre boyutunda meydana gelebilecek bir değişiklik tespit edilebilir. Zira bu değişimler katkı ilavesi ve ortam şartlarının değişmesi ile oluşabilir. Katkılar ve ortam şartları beton basınç dayanımı gibi özelliklerin gelişimini sağlayan suyun varlığında meydana gelen hidratasyonu da etkilemektedir. C_3S erken yaştaki beton basınç dayanımı ve priz süresi üzerinde oldukça etkilidir. Hatta ilk 3 günde ve 7 günde elde edilen XRD grafiklerinde $29,88^{\circ}$ - $30,70^{\circ}$ yansıma açılarında yüksek pik değerlerine sahiptir (Svinning *et al.* 2008).



Şekil 4.107. -15°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği

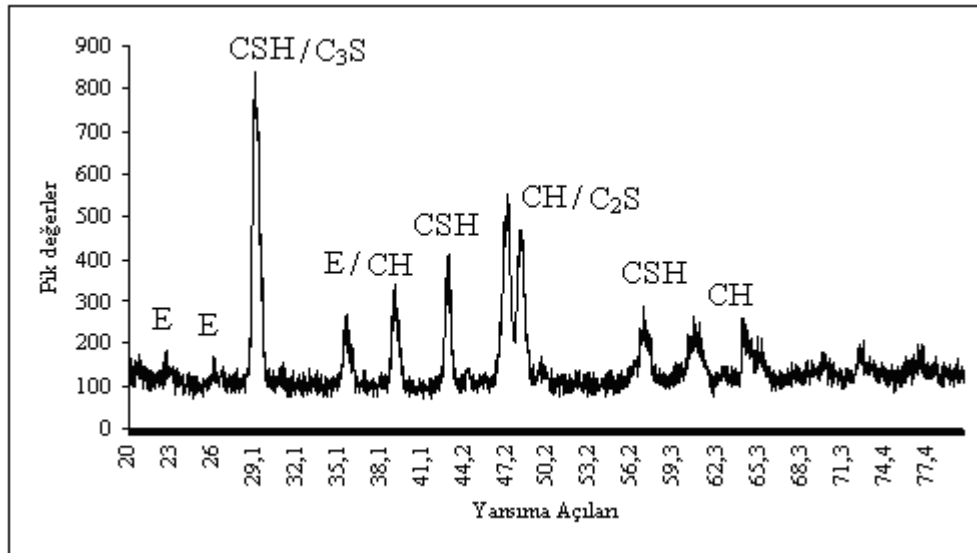


Şekil 4.108. -20°C’de C.3 için 28 günlük XRD grafiği

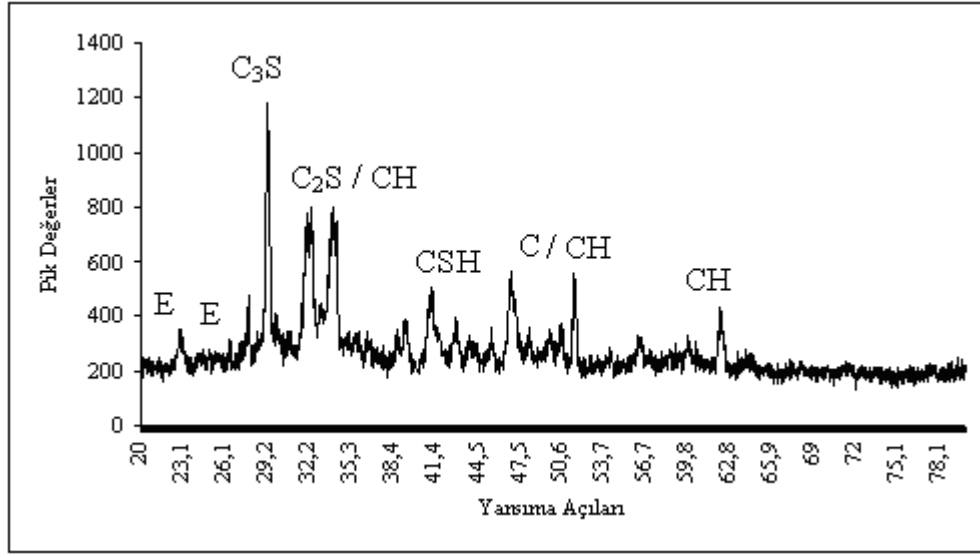


Şekil 4.109. C.3.D için 28 günlük XRD grafiği

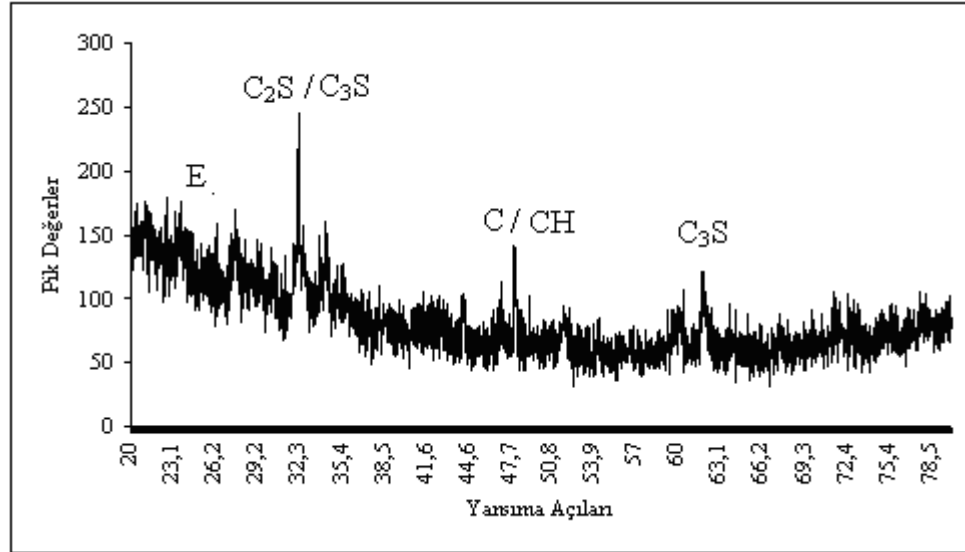
EK 3'te verilen C.3.D karışımına ait 7 günlük XRD grafiği incelendiğinde 35° yansıma açısında var olan C₂S oluşumunun 28. günde CH yapısına dönüştüğü gözlenmektedir.



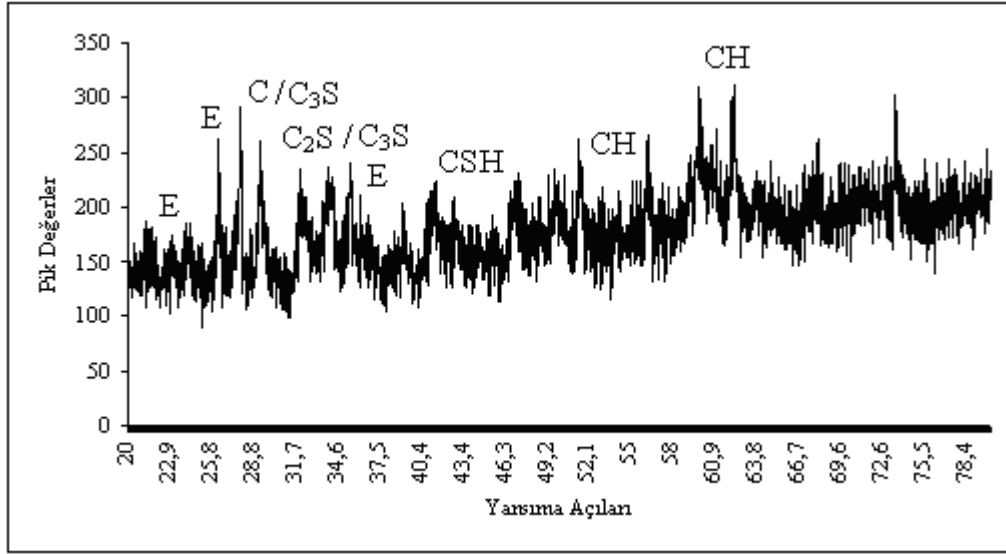
Şekil 4.110. Su küründe C.3 için 28 günlük XRD grafiği



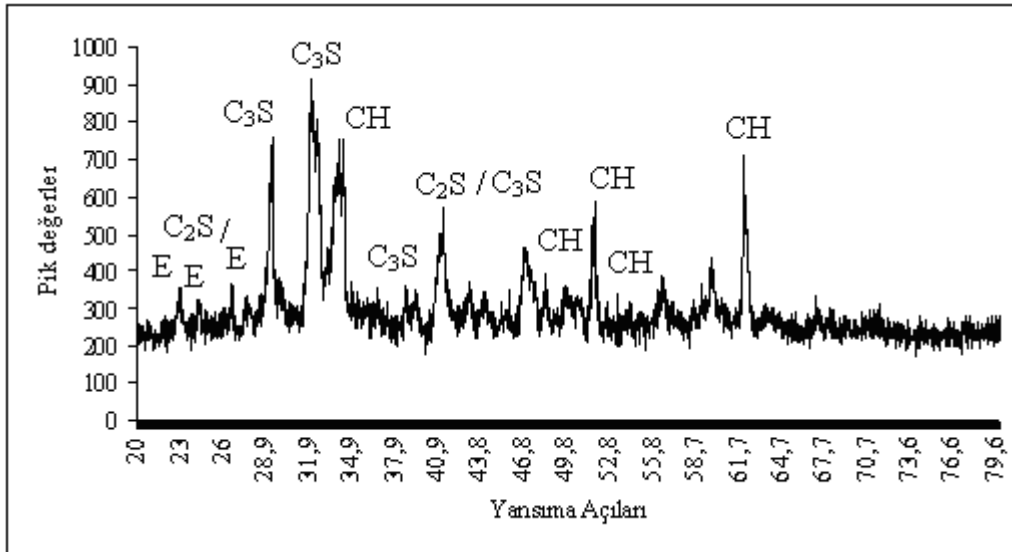
Şekil 4.111. -5°C’de K için 28 günlük XRD grafiği



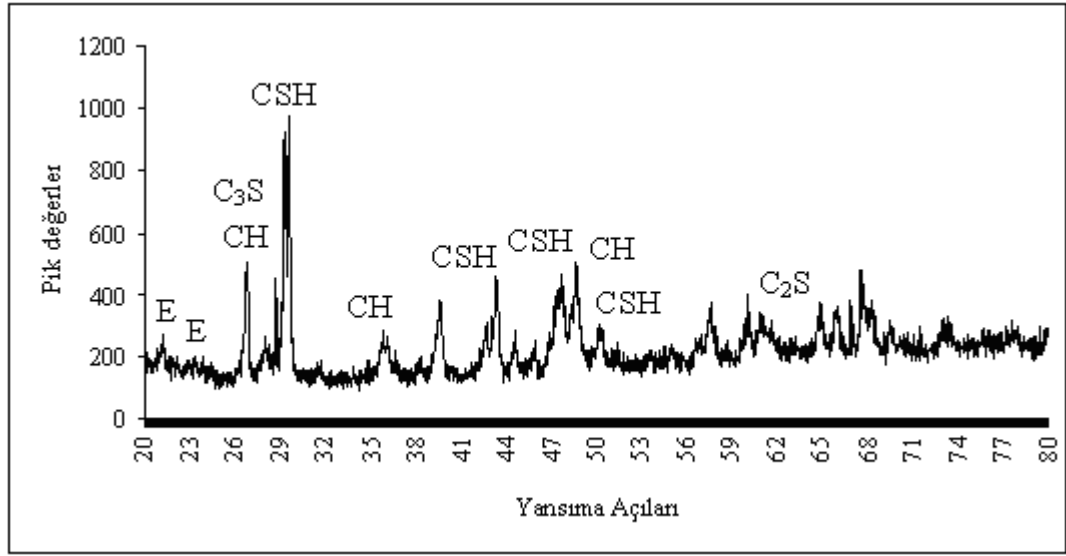
Şekil 4.112. -10°C’de K için 28 günlük XRD grafiği



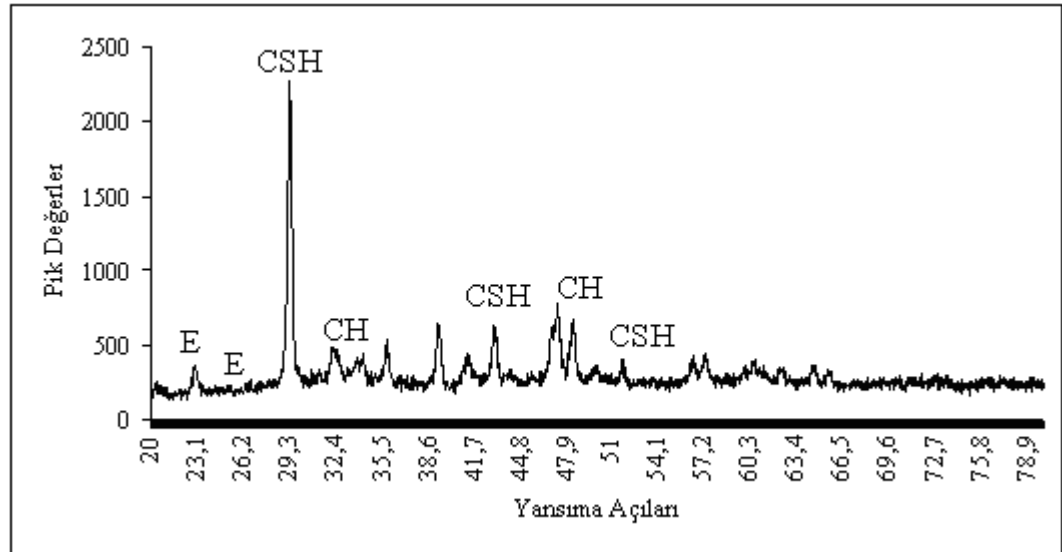
Şekil 4.113. -15°C’de K için 28 günlük XRD grafiği



Şekil 4.114.-20°C’de K için 28 günlük XRD grafiği



Şekil 4.115. Su kuru için 28 günlük XRD grafiği



Şekil 4.116. K.D için 28 günlük XRD grafiği

C_2S ve C_3S fazları silikanın varlığı ile tobermorit fazına dönüşür. CSH fazı C_2S ve C_3S 'in yüksek sıcaklıktaki esas hidrasyon ürünüdür. Tobermoritin oluşumu hidrotermal bir reaksiyondur. Tobermorit oluşumu basınç dayanımını artırmaktadır (Korhonen and DeBlasis 2008).

4.3.5. Maliyet analizi

Özellikle priz hızlandırıcı özelliğe sahip olan kalsiyum nitrat gibi bir antifriz katkının soğuk havada beton dökümü için ekonomik katkısı imalat süresini yani inşaat sezonunu uzatmasıdır. Ayrıca diğer soğuk havada beton dökümü uygulamaları için bir alternatiftir.

Bu çalışmada 1 m³ betonda en düşük çimento ağırlığının %6'sı kadaryani 24 kg, en yüksek ise %12'si kadar yani 48 kg üre kullanılmıştır. Aynı oranlar kalsiyum nitrat kullanılan karışımlar içinde geçerlidir. Üre ve kalsiyum nitratın bir arada kullanıldığı kombinasyonlarda ise 1 m³ beton için en düşük %3 üre+%3 kalsiyum nitrat yani 12 kg üre+12 kg kalsiyum nitrat, en yüksek ise %6 üre+% 6 kalsiyum nitrat yani 24kgüre+24 kg kalsiyum nitrat kullanılmıştır.

Piyasada bu katkıların fiyatları marka ve firmalara göre değişkenlik göstermektedir. İthal ürünlerin fiyatları kg başına üre için 15TL ile 150 TL arasında, kalsiyum nitratın kg fiyatı 30TL ile 160TL arasında değişmektedir. Kullanılan yerli üretim olursa üre katkısının 10 kg fiyatı 50 TL, kalsiyum nitrat katkısının 10 kg fiyatı 75 TL civarındadır.Örneğinoptimum karışım olarak belirlenen Ü.C.2 karışımı için1 m³betonda kullanılan üre ve kalsiyum nitrat miktarları 18 kg'dır.Yerli üretim kullanılırsa 1 m³ beton için ürenin maliyeti 90 TL, kalsiyum nitratın maliyeti 135 TL civarındadır. Toplamda 225 TL ek maliyet getirmektedir. İthal ürün kullanılacak olursa 1 m³Ü.C.2 karışımı için toplam maliyet 800 TL civarındadır. Ancak fiyatlar toptan alımlarda düşmektedir. Ayrıca dökümden sonra herhangi bir koruma veya yalıtım gerekmediği için zaman ve işçi maliyeti açısından da elde edilecek tasarruf göz önünde bulundurulmalıdır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Soğuk havada beton dökümü esnasında kullanılan antifriz katkılardan üre ve kalsiyum nitrat katkılarının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri üzerine yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda ifade edilmiştir.

1. Üç farklı oranda üre içeren karışımlara ait UPV değerleri incelendiğinde en iyi korelasyon -5°C ve -10°C ortam sıcaklıkları için Ü.2 karışımına aittir. Daha düşük sıcaklıklarda betonda don olayı meydana geldiği için UPV değerleri ve basınç dayanım sonuçları arasında doğrusal bir korelasyon bulunmamaktadır.
2. -10°C 'ye kadar, sıcaklıktaki düşüş ile UPV değerlerindeki düşüş daha yavaştır. Daha düşük sıcaklıklarda ortam sıcaklığı değiştiğinde UPV değerleri de hızla azalmaktadır. Bu betonun yapısal olarak daha zayıf olduğunun göstergesidir. Antifriz kullanılsınarağmen -20°C kür sıcaklığında sürekli dona maruz kalan betonda basınç dayanımının düşük olması sürpriz değildir.
3. -5°C , -10°C ve -15°C ortam sıcaklıklarında ki C.1, C.2 ve C.3 karışımlarına ait UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler daha doğrusal bir ilişki sergilemektedir.
4. -15°C ve -20°C sıcaklıklarda UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafiklerde çok düşük bir korelasyon bulunmaktadır. Bunun muhtemel nedeni bu sıcaklıklarda betonda don olayının meydana gelmesidir. Bu sebeple katkıların donma noktalarından daha düşük sıcaklıklarda UPV ve basınç dayanımları arasında doğrusal bir ilişki mevcut değildir.
5. Bütün karışımlar için kür sıcaklığı azaldıkça UPV değerleri de düşmektedir. Özellikle üre içeren karışımlarda ürenin priz geciktirici etkisinden dolayı daha hızlı bir düşüş söz konusudur.
6. Kontrol numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde dış ortam ve su kürü hariç dayanım kazandığına ait bir görüntü elde edilememiştir. -5°C ve -10°C 'de ise mikro çatlaklar ve kapiler boşluk yapısı göze çarpmaktadır.
7. Ü.1 ve Ü.2 karışımlarına ait -10°C 'de elde edilen SEM görüntülerinde CH ve CSH yapıları ve yoğun jel yapısı dikkati çekmektedir. -15°C 'de ilk 3 günde elde edilen SEM

görüntülerinde herhangi bir kristal yapıya rastlanmamıştır. Bu durumu basınç dayanım testi sonuçları desteklemektedir.

8. Su küründe Ü.2 karışımına ait 3 günlük SEM görüntülerinde ve XRD diyagramlarında kristal yapılara rastlanmıştır. Ayrıca 3 günlük UPV değerlerinin ortalaması da 3900m/s'nin üzerindedir. Bu durumda beton boşluksuz ve iyi bir yapıya sahiptir. Az miktarda porozite gözlenebilir. Kkarışımının aynı şartlardaki SEM görüntülerinde herhangi bir kristal yapıya rastlanmamıştır. Bu durumda üre antifriz katkısının beton içerisindeki bağlayıcılık vazifesi gören yapıların oluşumunu desteklediği anlaşılmaktadır. Elde edilen basınç dayanım değerleri de bunu desteklemektedir.

9. Ü.2.D karışımına ait SEM görüntüleri incelendiğinde iğnemi formda etrenjit oluşumu ve hekzagonal plaklar şeklinde CH oluşumu gözlenmektedir. Aynı şartlardaki kontrol numunesinin SEM görüntülerinde de etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Ancak üre antifriz içeren karışıma ait sonuçlar çok daha iyidir. Basınç dayanımı değerleri incelendiği zaman bu durum daha iyi anlaşılmaktadır.

10. İlk 3 günde sürekli donmanın olduğu durumda -5°C'de Ü.1 ve Ü.2 karışımlarına ait XRD diyagramlarında amorf bir yapı izlenmiş kristal bir yapıya rastlanmamıştır. Ancak bu amorf yapı CSH olabilir. Çünkü CSH yapısı XRD diyagramlarında amorf bir yapıda gözlenebilir (Ramachandran 1995).

11. -10°C'de ise Ü.2 karışımına ait SEM görüntülerinde etrenjit oluşumu ve plak formda CH yapısına rastlanmış ve XRD diyagramlarında da yüksek pik noktalarından kristal yapıların oluşumu anlaşılmıştır. Kkarışımı için aynı şartlarda SEM görüntülerinde kristal bir yapı gözlenmemiş ve XRD diyagramında da betonun dayanım kazanmasını sağlayacak bir yapıya rastlanmamıştır.

12. K karışımı ve her iki katkının kullanıldığı numunelerde de sıcaklık azaldıkça basınç dayanım değerleri azalmaktadır. Ancak kalsiyum hidrat içeren numunelerde düşüş daha yavaştır.

13. Dış ortamdaki 10 farklı karışıma ait basınç dayanım değerleri, sürekli donmaya maruz kalan aynı özelliklere sahip karışımların basınç dayanımlarından daha yüksektir. Bunun esassebebi hava sıcaklığının dış ortamda değişken olmasıdır. Gündüzleri hava sıcaklığı arttığı için hidrasyonun devamı açısından olumlu etki yapmaktadır. Dış ortamdaki bütün numunelerin basınç dayanımları K karışımından yüksektir.

14. Ü.2.D'ye ait 90 günlük ve 1 yıllık dayanımlar 43,85 MPa ve 48,44 MPa'dır. Ü.3.D'ye ait 90 günlük ve 1 yıllık basınç dayanım değerleri ise 42,81 MPa ve 48,08 MPa'dır. Katkı miktarı %9'dan %12'ye çıktığında ürenin priz geciktirici etkisinden dolayı basınç dayanım değerlerinde bir azalma olmuştur. Sürekli donmanın olduğu durumda katkı çözelti yüzdesine göre donma noktasından düşük olan -10°C 'nin altındaki kür sıcaklıklarında üre antifriz katkısı tek başına kullanılmamalıdır. Bir priz hızlandırıcı etkisi olan antifriz katkı ile beraber kullanılabilir. Bu çalışmada tek başına kullanıldığı karışımların yanında kalsiyum nitrat ile kombinasyon halinde de kullanılmıştır.

15. Su küründe 90 gün bekletilip daha sonra laboratuvar ortamına alınan Ü.1 karışımının 1 yıllık basınç dayanımı 61,40 MPa iken 90 günlük su küründeki basınç dayanımı 52,40 MPa'dır. Aynı karışımındaki ortamdaki 90 günlük basınç dayanımı 50,35 MPa'dır. Yani hiç su kürü görmese bile bu numune dış ortamdaki hava sıcaklığının değişmesi neticesinde kendini yenilemiştir. K karışımının dış ortamdaki basınç dayanımı ise 1 yılın sonunda sadece 27,08 MPa olmuştur. Ü.1 karışımının -20°C kür sıcaklığındaki 28 günlük basınç dayanımı sadece 2,10 MPa'a kadar düşmüştür. Ancak bu kür sıcaklığı katkının donma noktasının altında olduğu için 28 günlük ek su kürüyle dahi bu basınç dayanımı 12,19 MPa olmuştur. Ü.1, Ü.2 ve Ü.3 karışımları arasında en optimum karışım Ü.2 karışımıdır. Ü.3 karışımına ait sonuçlar daha düşüktür. Çünkü ürenin yüksek oranlarda kullanılması priz üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Mwaluwinga *et al.* 1997).

16. Sadece kalsiyum nitrat içeren karışımlar içinse sıcaklık sabitken katkı miktarı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Sıcaklık azaldıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Fakat K karışımı ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptir. 7 günlük basınç dayanımları incelenirse -20°C kür sıcaklığında dahi K karışımının basınç dayanımı 6,55 MPa iken, C.1 karışımına ait basınç dayanımı 15,53 MPa'dır. Hatta bu basınç dayanımı 28 günlük ek su kürü ile %114 artışla 33,26 MPa'a yükselmiştir. Katkı oranı arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Kalsiyum nitrat katkısı beton dayanımına olumlu etki sağlamıştır. Sürekli don etkisi dikkate alındığında C.1, C.2 ve C.3 karışımları arasında optimum sonuçlar C.2 karışımına aittir.

17. Katkı kombinasyonları incelenirse Ü.C.2 karışımının -10°C 'de sadece 7 günde 34,94 MPa'a ulaştığı görülmektedir ki bu dayanım değeri aynı kür şartlarındaki K karışımından %347 daha yüksektir.

18. Ü.C.1 karışımına ait sonuçlar incelendiğinde -5°C 'de hiçbir koruma olmaksızın kontrol numunesinin 28 günlük su küründeki dayanımına 90. günde ulaştığı görülmüştür. Dış ortamdaki dayanımı ise K.D karışımından %59 daha yüksektir. Sürekli donmaya maruz kalındığında en iyi sonuçlar Ü.C.2 karışımına aittir. Dış ortamda ise her üç kombinasyondan elde edilen basınç dayanımları oldukça yüksektir. Şöyle ki 90 günlük basınç dayanımları 38,07 MPa ile 51,85 MPa arasında, 1 yıllık basınç dayanımları ise 52,06 MPa ile 54,93 MPa arasında değişmektedir. Sürekli don etkisi ve ek su kürü de dikkate alındığında Ü.C.1, Ü.C.2 ve Ü.C.3 karışımları arasında optimum karışım Ü.C.2'dir. Bu karışımın -20°C 'de elde edilen 3,99 MPa değerindeki 28 günlük basınç dayanımı, 28 günlük ek su kürü ile 39,25 MPa'a ulaşmıştır. Aradaki artış yüzdesi %884'tür.

19. Dondurucularda bekletilen karışımlardan 5 grup için ayrıca ek su kürü uygulanmıştır. Bu gruplar K, Ü.1, C.1, Ü.C.1 ve Ü.C.2 kombinasyonlarıdır. Bu ek su kürleri 7, 14 ve 28 gün süreyle uygulanmıştır. Uygulanan ek su kürü ile basınç dayanım değerlerinde iyileşme görülmüştür. Ancak sıcaklık azaldıkça su kürünün olumlu etkisi de azalmaktadır. En yüksek sonuçlar 28 günlük ek su kürü ile elde edilmiştir. Ü.C.2 ve C.1 karışımlarının basınç dayanımları diğer üç karışımdan daha yüksektir. Ancak sürekli donmanın etkisi de göz önüne alınırsa optimum karışım Ü.C.2 karışımıdır.

KAYNAKLAR

- Aggoun, S., Cheikh-Zouaoui, M., Chikh, N. and Duval, R., 2008. Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages. *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp 106–110.
- Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., Lashari, A.N. and Almusallam, A.A., 2003. Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
- Anon., 2002. Related technical issues. Chapter 5 Using Concrete in Freezing Temperatures, pp. 55–67.
- Anonim, 1980. TS 3527: Beton agregalarında ince madde oranı tayini
- Anonim, 1982. TS 3440: Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları. TSE, Ankara.
- Anonim, 2002b. TS EN 197-1: Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- Anonim, 2003. TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS 3530 EN 933-1/A1 Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu. TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS EN 1097-6/A1: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, TSE, Ankara.
- Anonim, 2009. TS 706 EN 12620+A1: Beton Agregaları, TSE, Ankara.
- Anonim, 2009. TS 802: Beton Karışımı Hesap Esasları. TSE, Ankara.
- Anonim, 2009. TS ISO 3310-2: Deney Elekleri-Teknik Özellikler ve Deneyler Kısım 1: Tel Örgülü Deney Elekleri, TSE Ankara.
- Anonim, 2010. TS EN 933-10, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 10: İnce malzeme tayini - İnce dolgu malzemelerinin tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (hava jetiyle eleme), TSE, Ankara.
- Anonim, 2011. TS EN 1744-1: Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Kimyasal Analiz, TSE, Ankara.
- Anonim, 2012/1989. TS 1248, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları-Anormal hava şartlarında. TSE, Ankara.
- Anonymous, 1988. ACI 306: Cold-Weather Concreting, reapproved 2010, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997, 23 pages.
- Anonymous, 2009. ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete
- Anonymous, 2010. ACI 306R: Guide to Cold Weather Concreting. American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- Anonymous, 2013. ASTM C494/C494M: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- Anonymous, 2013. ASTM C94/C94M: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete
- Anonymous, 2003, U.S: Cold Weather Concreting. U.S. Army Engineer Research and Development Center, pp. 1–3.

- Arezki, Tagnit-Hamou., Mladenka Saric-Coric. and Patrice Rivard., 2005. Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates. *Cement and Concrete Research*, vol 35, pp 99–107.
- Arslan, M., Çullu, M., and Durmuş, G., 2011. The Effect Of Antifreeze Admixtures On Compressive Strength Of Concretes Subjected To Frost Action. *Gazi University Journal of Science*. 24(2):299-307(2011), pp 1-9.
- Bates, R.E., and Bilello, M.A., 1966. Defining the cold regions of the northern hemisphere. Hanover, NH: CREEL, Technical Report 178. Definition and characterizations of cold regions.
- Batic, O.R., Milanesi, C.A., Maiza, P.J., and Marfil S.A., 2000. Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions. *Cement and Concrete Research*, vol.30, pp1407-1412.
- Bennett, F.L., 1994. Economic Evaluation of Cold Concrete. Technical Report Documentation. Report No:INE/TRC94.2. Engineering and Science Management University of Alaska Fairbanks, Alaska 99775.
- Brook, M., L.J., K.M and Devar, J.O., 1991. *Concrete Materials and Practice*. Butter & Tanler Ltd London, 411-136.
- Carnot, L.N., and Kapsar J. W., 2001. Ultrasonic Testing of Damage in concrete under Uniaxial Compression. *ACI Materials Journal*, Technical Reports, V.98, No.3.
- Cerulli, T., Pistolesi, C., Maltese, C., and Salvioni, D., 2003. Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp 1375–1383.
- Concrete in Practice NRMCA (National Ready Mix Concrete Association), 1998, CIP 27 cold weather concreting. Technical Information Prepared by NRMCA, pp 1–10.
- Cortez, E.R., and Barna, L.E., 2002. Addressing Cold Regions Issues in Pavement Engineering Research Civil Engineer. ERDC – CRREL.
- Cwirzen, A. and Penttala V., 2005. Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp 671–679.
- David, J.C., 2001. A Microscopic Study of Ice Formation and Propagation in Concrete. Graduate Division of The University of California, Berkeley.
- Diamond, S., and Kjellsen, K.O., 2008. Scanning electron microscopic investigations of fresh mortars: Well-defined water-filled layers adjacent to sand grains. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp 530–537.
- Dodson, V.H., 1990. *Concrete admixture*. New York, VN Reinhold.
- Dodson, V.H., 1994. Time of Setting. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM STP 169C, Chapter 11, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Domingo, R., and Hirose S., 2009. Correlation Between Concrete Strength and Combined Nondestructive Tests for Concrete Using High-Early Strength Cement.
- Elzafraney, M., 2004. Quantitative Microstructural Investigation of Damaged Concrete.
- Erdoğan, T.Y., 1997. *Admixtures for concrete*. METU Press, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2007. *Beton*, METU Yayınları, Ankara.

- Fagerlund, G., and Setzer, M., 1991. Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. RILEM Committee TC-117 FDC, Lund Institute of Technology Research Seminar Held in Lund, pp. 1–165.
- Feng, X., Garboczi, E.J., Bentz, D.P., Stutzman, P.E., and Mason, T.O., 2004. Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp 1787–1793.
- FHWA, 1995. Report to Congress: Status of the Nation's surface transportation system. U.S Federal Highway Administration.
- Flegler, S.L., Heckman, J.W., and Klomprens, K.L., 1993. *Scanning and Transmission Electron Microscopy: An Introduction*. Oxford Univ. Press, ISBN #0-19-510751-9.
- Gaidis, J.M., 2004. Chemistry of corrosion inhibitors, *Cement and Concrete Composites*, 26 (3), , pp 181-189. 15012 Kenwood Court, Woodbine, MD 21797, USA
- Gallucci, E., and Scrivener, K., 2007. In situ dynamic SEM imaging of hydration of cement using WETSEM technology *Advances in Applied Ceramics*. Vol 106, No 6, pp 319-326.
- Gao, X.F., Lob, Y.T., and Tam, C.M., 2002. Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, vol.37, pp 485 – 489.
- Garces, P., Alcocel, E.G., Chinchon, S., Andreu, C.G., and Alcaide, J., 1997. Effect of Curing Temperature in Some Hydration Characteristics of Calcium Aluminate Cement Compared with Those of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, Vol 27, No 9, pp 1343-1355.
- Grierson, L.H., Knight, J.C., and Maharaj, R., 2005. The role of calcium ions and lignosulphonate plasticiser in the hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, vol.35, pp 631–636.
- Gu, P., Beaudoin, J.J., Quinn, E.G., and Myers, R.E., 1997. Early Strength Development and Hydration of Ordinary Portland Cement/Calcium Aluminate Cement Pastes Materials. *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6 pp 53–58. Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada.
- Gurley, E., 2008. Cold-Weather Concreting Several practices must be addressed in order to produce quality products that meet specifications. *Precast Inc. Magazine*, pp 1-7.
- Handoo, S.K., and Agarwal, S.K., 2002. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, vol.32, pp 1009–1018.
- Harrison, T.A., Dewar, J.D., and Brown, B.V., 2001. Freeze-thaw resisting concrete-its achievement in the UK. Report C559, CIRIA, London.
- Igarashi, S., Kawamura, M., and Watanabe A., 2004. Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model. *Cement & Concrete Composites*, 26, 977–985.
- Irassar, E.F., Bonavetti, V.L. and Gonza'lez, M., 2003. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, vol 33, pp 31–41.

- Jun,C., Xin, C., Lingchao, L., Futian,L., and Jianping,Z., 2001. The influences of two admixtures on white and colored Portland cement. *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp 1367–1372.
- Justnes, H. and Nyguard, 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. In: Swamy RN, editor. *Proceedings of international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete*. UK: Sheffield; p. 491–502.
- Justnes, H. and Nyguard, EC., 1995. Technical calcium nitrate as set accelerator for cement at low temperatures. *Cement Concrete Research*, 25(8), 1766–74.
- Justnes, H., 1993. Report STF F93013. SINTEF Structures and Concrete. Norway: Trondheim.
- Justnes, H., 2007. Calcium nitrate as a Multifunctional Concrete Admixture. In *Slovenian 14th Slovenian colloquium on Concrete*, Ljubljana, Slovenia, pp. 21–28.
- Kayyali, O.A., Page, C.L. and Ritchie, A.G.B., 1979. Frost action on Immature Cement Paste Effects on Mechanical Behaviour. *ACF Journal* November, pp 1217-1225.
- Kewalramani, M.A. and Gupta R., 2005. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Civil Engineering Group, Birla Institute of Technology and Science, Pilani, Rajasthan-333 031, India*.
- Kivekas, L., Houvinen S., and Leivo M., 1985. Concrete under arctic conditions. *Technical Research Centre of Finland (VTT), Concrete and Silicate Laboratory, Research Report 343*.
- Kjellsen, K.O. and Detwiler, R.J., 1992. Reaction-kinetics of Portland-cement mortars hydrated at different temperatures. *Cement Concrete Research*, 22 (1), pp 112–120.
- Komonen, J. and Penttala, V., 2003. Effects of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes. *Fire Technol.* 39 (1), pp 23–34.
- Korhonen, C.J., 1990. Antifreeze Admixtures for Cold Regions Concreting. A Literature Review, Special Report 90-32, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and development Center, National Technical Information Service, USA, September, pp 19.
- Korhonen, C.J., 1999. Expedient Low-Temperature Concrete Admixtures for the Army. Special Report 99-17, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and development Center, National Technical Information Service, USA, November, pp 20.
- Korhonen, C.J., 2002a. Off-the-shelf antifreeze admixtures. Technical Report TR02-07, US Army Corps of Engineers®, Engineer Research and Development Center, pp 38.
- Korhonen, C.J., 2002b. Effect of High Doses of Chemical Admixtures on the Freeze–Thaw Durability of Portland Cement Concrete. Technical Report TR02-05, US Army Corps of Engineers®, Engineer Research and Development Center, pp 1–38.

- Korhonen, C.J., 2003. Effect of High Doses of Chemical Admixtures on The Strength Development and Freeze-Thaw Durability of Portland Cement Mortar. PhD theses, pp. 14–16.
- Korhonen, C.J., 2006. Extending the Season for Concrete Construction and Repair Phase II. Defining Engineering Parameters Technical Report ERDC/CRREL TR-06-8, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
- Korhonen, C.J., and Asce. M., 2002. New Developments in Cold-Weather Concreting. pp 1-7 .Research Civil Engineer, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 72 Lyme Road, Hanover, New Hampshire 03755-1290.
- Korhonen, C.J., and Cortez, E.R., 1991. Antifreeze Admixtures for Cold Weather Concreting. American concrete Institute, pp. 1–4 (March). 5. Edition of SP-4.
- Korhonen, C.J., and DeBlasis N.J., 2008. The Influence of Curing Temperature on Cement Stabilization of North Carolina Soils.
- Korhonen, C.J., and Orchino, S.A., 2001. Off-the-shelf antifreeze admixtures. Technical Report TR-01-02. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, pp. 1–23 (January).
- Korhonen, C.J., Charest B. and Romisch, K., 1997b. Developing New Low-Temperature Admixtures for Concrete A Field Evaluation Special Report 97-9
- Korhonen, C.J., Cortez, E.R., Durning, T.A. and Jeknavorian, A.A., 1997a. Antifreeze Admixtures for Concrete. Special Report 97-26, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and development Center, National Technical Information Service, USA, October, pp 22.
- Korhonen, C.J., Etna, N.H., Cortez, E.R. and Thetford N., 1994. Antifreeze Admixture for Concrete, pp 2-3.
- Korhonen, C.J., Semen P.M. and Barna L.A., 2002. An Off-The-Shelf Approach to Winter Concreting. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 72 Lyme Road, Hanover, New Hampshire 03755-1290.
- Korhonen, C.J., Semen P.M., and Barna, L.A., 2004. Extending the Season for Concrete Construction and Repair Phase I. Establishing the Technology, Technical Report ERDC/CRREL TR-04-2, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire. February
- Kropp, J., and Hilsdorf, H.K., 1995. Performance Criteria for Concrete Durability. RILEM REPORT 12 State of the Art Report prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Performance of Concrete as a Criterion of its Durability, pp 76-79.
- Krylov, B.A., A.V. Lagoida, and G.P. Apostolova 1979. Critical strength of concretes with antifreeze admixtures. *Beton i Zhelezbeton* (Concrete and Reinforced Concrete). No 12, p 27-28.
- Kuzmin, Y.D., 1976. Concretes with Antifreeze admixtures. Kiev: Budivelnik Publishing House.
- Li, Y., Shuguang, H., 2001. The microstructure of the interfacial transition zone between steel and cement paste. *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp 385-388.

- Lothenbach, B., Alder, C., Winnefeld, F. and Lunk, P., 2005. *Einfluss der Temperatur und Lagerungsbedingungen auf die Festigkeitsentwicklung von Mörtel und Betonen*. vol.55 (12), pp 604–609.
- Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E. and Lunk, P., 2007. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol.37, pp 483–491.
- Mammoliti, L., 2001. Examination of the Mechanism of Corrosion Inhibition by $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ based Admixtures in Concrete. pp 7-8, Waterloo, Ontario, Canada.
- Mason, P.E., and Michael, R., 1997. Strength Development of Concrete Prepared with An Antifreeze Admixture and Subjected to Cyclic Freeze Thaw During Curing. PhD thesis. pp 12-28.
- Mironov, S.A., 1977. Theory and methods of winter concreting. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Draft Translation 636.
- Mironov, S.A., Ivanova O.S., and Volkov Yu.B., 1979. Concrete with new antifreeze admixtures. *Concrete and Reinforced Concrete*, no.7, pp 14-15.
- Muthig, M., 2006. Cold Weather Admixture Systems (CWAS). Joint Service Environmental Management Conference. Concurrent Technologies Corporation.
- Mwaluwinga, S., Ayano, T., and Sakata K., 1997. Influence of Urea in Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 733-745.
- Myrdal, R., 2007. Accelerating admixtures for concrete. SINTEF Report Building and Infrastructure Concrete and Innovation Center, Project No: 3D006020, pp. 1–35 (12–05).
- Neville, A.M. 1995. *Properties of Concrete*, Third Edition. England: Longman Scientific & Technical. Pp 455-475
- Neville, A.M., 1988. *Properties of Concrete*, 3rd Ed. England: Longman Scientific & Technical.
- Nmai, C.K., 1998. Cold Weather Concreting Admixtures. Marketing Department, Master Builders, Inc., 23700 Chagrin Blvd., Cleveland, OH 44122, USA.
- Oeswein, J.V., 2000. Durability Assessment of Portland Cement Concrete Using Accelerated Freeze-Thaw Testing.
- Ortiz, J., Aguado A., Agullo L., and Garcia T., 2005. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. Technical University of Catalonia (UPC), C. Jordi Girona 1-3, module C-1, 08034 Barcelona, Spain School of Civil Engineering of Barcelona (UPC), C. Jordi Girona 1-3, module C-1, 08034 Barcelona, Spain *Cement and Concrete Research*, pp 7-10.
- Ovcharov, V.I., 1972. Effective life of corrosion inhibitor-containing concretes and mortars prepared under winter conditions. Tsentr. Nauchno-Issled Inst. Stroit. Konstrim. Kucherenko (in Russian).
- Popovics, S., 1992. *Concrete materials, Properties, Specifications and Testing*. 2nd edition. William Andrew Publishing, Noyes, pp. 236–246 (Chapter 6).
- Powers, T.C., and Helmut, R.A., 1953. Theory of volume changes in hardened cement paste during freezing. *Proc. Highway Res. Brd.*, 32, 285-297.
- Price, W.H., 1951. Factors influencing concrete strength. *J. Am. Concr. Inst.*, 47 (31), 417–432.

- Ramachandran, V.S., 1995, Concrete Admixtures Handbook, Chapter 11: Antifreezing admixtures, pp. 740–797 and Chapter 5: Accelerators, pp 246-273.
- Ratinov, V. B., and Rozenberg, T. I., 1989. Concrete Admixtures. Strojizdat.
- Richardson, M., 2007. Degradation of concrete in cold weather conditions. Chapter 8 pp. 282-312. University College Dublin, Ireland.
- Rixom, R., Mailvaganam, N.P., 1999a. Chemical Admixtures for Concrete, Chapter 5, E&FN Spon, London, pp 1-37.
- Rixom, R., Mailvaganam, N.P., 1999b. Chemical Admixtures for Concrete, Chapter 6. E&FN Spon, London, pp. 10-12, 208–211.
- Rixom, R., Mailvaganam, N.P., 1999c, Chemical Admixtures for Concrete, Chapter 7, E&FN Spon, London, pp 84-90.
- Roncero, J., Valls, S., Gettu, R., 2002. Study of the influence of superplasticizers on the hydration of cement paste using nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction techniques. Cement and Concrete Research, vol.32, pp 103–108.
- Sahu, S., Badger, S., Thaulow, N., and Lee, R.J., 2004. Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. Cement & Concrete Composites, 26, 987–992.
- Schroeder, H.P., and Wood, T.B., 1996. Concrete / Reinforcing Steel Bond Strength of Low Temperature Concrete. Journal of cold Regions Engineering, Vol. 10, No. 2, ASCE, paper No. 10520.
- Schulson, E.M., 1998. Ice Damage to Concrete. US Army Corps of Engineers® Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 98-6.
- Sheikin, A.E., Kostyaev, P.S., Dobshits, L.M., Smolyanskii, V.M., Rozental, N.K., Ivanova, O.S., and Pchelkin, S.I., 1980. Study of the corrosion of steel reinforcement in concretes containing certain additives. *Tr. Institute Zheleznodorozhn.* Transp.662: 35-44
- Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri E.H., and Bennacer, R., 2011. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). Construction and Building Materials, vol. 25, pp 1916–1925.
- Stutzman, P.E., 2001. Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography. Material Science of Concrete National Institute of Standards and Technology. 100 Bureau Drive, Stop 8621 Gaithersburg, Maryland 20899-8621.
- Svinning, K., Høskuldsson, A., and Justnes, H., 2008. Prediction of compressive strength up to 28 days from microstructure of Portland cement. Cement & Concrete Composites, vol. 30, pp 138–151.
- Tagnit-Hamou, A., Saric-Coric, M., Rivard, P., 2005. Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates Original Research Article Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 1, pages 99-107
- Tennis, P.D., and Jennings, H.M., 2000. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 6, Pages 855-863.
- Timms, A.G., and Witney, N.H. 1934. Further studies of temperature effects on compressive strength of concrete. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, 31: 165-180
- Topçu, İ., Canbaz, M., 2006. Silis Dumanlı Betonlarda Donma Çözülme Etkisinin İncelenmesi.

- Virmani, Y. P., 1988. Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, Vol VI: Calcium Nitrite Admixture. FHWA/RD-88/165, , pp. 1-45.
- Virmani, Y. P., Clear, K. C., and Pasko Jr., T. J., 1983. Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, Volume 5: Calcium Nitrite Admixture or Epoxy Coated Reinforcing Bars as Corrosion Protection Systems. FHWA/RD-83/012, pp. 1-72.
- Wagner, D.J., 1996. Durability of Concrete with Antifreeze Admixtures at Temperatures Below 0°C. pp 6-10.
- Wang, X.S., Wu B.S., and Wang Q.Y., 2005. Online SEM investigation of microcrack characteristics of concretes at various temperatures. Cement and Concrete Research, vol.35, pp 385– 1390.
- Watcharapong, W., Pailyn, T., Kedsarin, P., and Arnon, C., 2011. Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. Materials and Desingn, pp 2-4.
- Wright, B., 2001. Cold Weather Concreting. Technical Bulletin 5.4.1.2, February, P. Eng. R.W. Wright Design 100 Victoria Street, Ganonoque, ON K7G 2S1.
- Ye, G., Liu, X., Schutter, G.D., Poppe, A.M., and Taerwe, L., 2007. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. Cement & Concrete Composites, vol. 29, pp. 96–97.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma KARAGÖL 01.01.1981 tarihinde doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Balıkesir ve Sivas'ta tamamladı. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2004 ve 2005 yıllarında özel bir firmada kontrol mühendisliği yaptı. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim dalında direkt doktora başladı. Tübitak yurtiçi doktora bursu almaya hak kazandı. İstanbul Teknik Üniversitesinde çalışmalarda bulundu.