

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜTLE ELEMANLARDA ERKEN YAŞ ÇATLAK RİSKİNİN
BELİRLENMESİ VE UYGULAMA İLE KARŞILAŞTIRMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can BİLAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Mayıs, 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜTLE ELEMANLARDA ERKEN YAŞ ÇATLAK RİSKİNİN
BELİRLENMESİ VE UYGULAMA İLE KARŞILAŞTIRMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Can BİLAL
(501091165)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA

Mayıs, 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091165 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Can BİLAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KÜTLE ELEMANLARDA ERKEN YAŞ ÇATLAK RİSKİNİN BELİRLENMESİ VE UYGULAMA İLE KARŞILAŞTIRMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman :

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **06 Haziran 2013**

Savunma Tarihi : **30 Mayıs 2013**

ÖNSÖZ

Bu tezin yönetimini yapan ve çalışmalarım sırasında bana destek çıkan başta hocalarım Prof. Dr. Yılmaz Akkaya ve yorumları ve önerileriyle büyük yardımını gördüğüm Prof. Dr. M. Ali Taşdemir'e,

Her aşamada bana destek çıkan, tezin yazımında büyük yardımı olan İnşaat Yük. Mühendisi Utkan Çorbacıoğlu'na,

2 yıl boyunca çalıştığım projede desteğini esirgemeyen başta proje müdürü Nurettin Demir olmak üzere tüm Gama-Nurol A.O çalışanlarına,

Sıcaklık takibi ve simülasyonlar hakkında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım sevgili Alattin Ramoğlu'na,

İTU de bulunan MARMARAY projesine ait yapı malzemesi laboratuvarında yoğun çalışma temposunda bana zaman ayırarak, tüm laboratuvar testlerimde yardımlarını esirgemeyen teknisyen arkadaşlara,

Saha uygulamalarında yardımı olan çalışma arkadaşlarım Abdullah Demir, Ercan Torun ve her zaman tecrübelerinden faydalandığım Fahri Ayar'a

Amacım doğrultusunda beni her zaman maddi manevi destekleyen, yetiştiren ve güvenen çok sevdiğim anneme, babama, abime,

Teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi yazım sürecinde hayata gözlerini açan biricik yeğenim Selin'e adıyorum.

Saygılarımla,

Haziran 2013

Can Bilal
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Çimento ve Hidratasyon Isısı	3
2.2 Hidratasyon Isısının Beton Özelliklerine Etkisi	5
2.2.1 Durabiliteye etkisi	5
2.2.2 Isıl gerilmelere etkisi	6
2.2.3 Çatlak etkisi	8
2.3 Rötne Mekanizması	8
2.3.1 Kısıtlanmış rötne	11
2.3.2 Bünyesel rötne	12
2.3.3 Kuruma rötresi	12
2.3.4 Rötreyi etkileyen faktörler	14
2.4 Isıl Çatlak Oluşumunun Engellenmesi	14
2.4.1 Kür yönteminin belirlenmesi	15
2.4.2 Betonun soğutulması	16
2.4.2.1 Betonu üretim-taşınma sırasında soğutma	16
2.4.2.2 Betonu döküm sonrası soğutma	17
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	19
3.1 Simülasyon Amacı	19
3.1.1 Yazılım özellikleri	19
3.1.2 Genel ısı denklemler	20
3.1.3 Sıcaklık hesabı	21
3.1.4 Gerilme ve şekil değiştirme hesabı	22
3.1.5 Beton olgunluk ve dayanım gelişimi hesabı	23
3.2 Simülasyon Verileri	25
3.2.1 Malzeme özelliklerinin bulunduğu veri tabanının oluşturulması	27
3.2.2 Kesitler ve soğutma gerekliliği	30
3.2.3 Simülasyon modelleri seçilmesi	32
3.2.4 Çevre ve kür koşullarının tanımlanması, döküm sırası belirlenmesi ...	34
3.2.5 Yük ve mesnet koşullarının belirlenmesi	35
3.3 Simülasyon hesaplaması ve sonuçlar	36
3.3.1 Temel kesiti simülasyon sonuçları (t=2,0m)	37
3.3.2 Perde 3 kesiti simülasyon sonuçları (t=1,40m)	38
4. LABORATUVAR ÇALIŞMASI – SAHA UYGULAMA SONUÇLARI ...	41
4.1 Laboratuvar Çalışması – Halka Deneyi	41

4.1.1	Halka deney ölçüm sistemi	41
4.1.2	Halka deney yapılışı ve sonuçlar.....	43
4.1.2.1	Ölçümlerin yapılması.....	44
4.1.2.2	Çatlak tespiti ve ölçümü.....	45
4.1.2.3	Halka deneyinde sıcaklık ölçümleri.....	47
4.1.3	Basınç dayanım, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanım sonuçları	47
4.1.4	Ölçülen erken yaş rötre sonuçları.....	48
4.2	Saha Uygulaması – 2 Farklı Kesit için Sıcaklık Gelişimleri	50
4.2.1	Ölçüm kriterleri	50
4.2.2	Sıcaklık takibi için cihaz ve ekipmanlar.....	51
4.2.3	Ölçümlerin yapılması ve hesaplamalar	53
4.2.3.1	Temel kesiti için bahar döneminde uygulama sonuçları.....	55
4.2.3.2	Temel kesiti için yaz döneminde uygulama sonuçları	57
4.2.3.3	Perde 3 Kesiti için bahar döneminde uygulama sonuçları.....	60
4.2.3.4	Perde 3 kesiti için yaz döneminde uygulama sonuçları	62
4.2.4	Basınç dayanım sonuçları.....	64
5.	GENEL SONUÇLAR	65
	KAYNAKLAR.....	67

KISALTMALAR

İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
GE	: Gecikmiş Etrenjit
DEF	: Delayed Ettringite Formation / GE
4C	: “4C Temperature and Stress” Analiz Programı
HACON	: Betonda Sıcaklık Gerilme Simülasyon Programı
PVC	: Polyvinyl Chloride / Plastik
CEM I-II-III-IV	: Çimento Tipleri
C40	: 28günlük dayanımı 40MPa olan beton sınıfı
No.1	: İnce gradasyonlu agrega
No.2	: Kaba gradasyonlu agrega
°C	: Sıcaklık birimi - Santigrat Derece
K	: Sıcaklık birimi - Kelvin
ASTM	: Amerikan Malzeme Test Topluluğu / Standart yöntemi
PC	: Kişisel bilgisayar
Termokupl	: Sıcaklık ölçüm kablosu
Wheatstone	: Gerinim ölçüm pul tipi
MPa	: Basınç dayanım birimi - Megapascal
GPa	: Elastisite Modülü Birimi – Gigapascal
Strain Gauge	: Gerinim Pulu
Data Logger	: Veri Kayıt Cihazı
S/Ç	: Su Çimento Oranı
LVDT	: Doğrusal Şekil Değiştirme Ölçüm Probu
APC	: Portland Çimento Tipi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Simülasyon hesaplarında kullanılacak malzeme özellikleri.	27
Çizelge 3.2: C40 Tip betonun karışım ve su/çimento oranları.....	28
Çizelge 3.3 : Kalorimetre (Adiabatik) Testleri Sonucu Değer ve Parametreler.	29
Çizelge 3.4 :Kalıp ve Kür malzemelerinin Isıl Özellikleri.	29
Çizelge 3.5 : Ortalama Sabitlenmiş Basınç Dayanım Değer ve Parametreleri.....	29
Çizelge 3.6 : Ortalama Sabit Yarmada Çekme Dayanım Değer ve Parametreleri. ...	30
Çizelge 3.7 : Elastisite Modülü Ortalama Değer ve Parametreleri.....	30
Çizelge 3.8 : Temel için sıcaklık ön hesap modeli.	33
Çizelge 3.9 :Öngörülen simülasyon ortam koşulları ve beton sıcaklıkları.....	33
Çizelge 3.10 :Simülasyon yapılacak kesitlerin farklı ortam koşulları.	34
Çizelge 3.11 :Öngörülen kalıp açma, soğutma ve kür süreleri.....	34
Çizelge 3.12 : İstasyon kesitinde bulunan örnek eleman döküm sıraları.	35
Çizelge 3.13 :Temel kesiti için simülasyon çıktıları.	38
Çizelge 3.14 :Perde 3 kesiti için simülasyon çıktıları.....	39
Çizelge 4.1 : Halka Test – Halka kalınlıkları karşılaştırma.	43
Çizelge 4.2 : Halka test – Ortam sıcaklık koşulları.	43
Çizelge 4.3 : Halka Test – Farklı su çimento oranı.	43
Çizelge 4.4 : Farklı koşullar için çatlak oluşum zamanları.	45
Çizelge 4.5 : Halka Testi –Ölçülen çatlak genişlikleri.	46
Çizelge 4.6 : Beton karışımları mekanik özellikler.	48
Çizelge 4.7 : Erken yaş rötre ölçüm sonuçları.....	49
Çizelge 4.8 : Temel kesit elemanı için taze beton değerleri.....	55
Çizelge 4.9 : Temel kesit elemanı için kür koşulları uygulama.	56
Çizelge 4.10 : Temel kesiti için bahar simülasyon-ölçüm karşılaştırması.	56
Çizelge 4.11 : Temel kesiti için yaz koşulunda taze beton değerleri.....	58
Çizelge 4.12 : Temel kesit elemanı için yaz dönemi kür koşulları.....	58
Çizelge 4.13 : Temel kesiti için yaz simülasyon-ölçüm karşılaştırması.....	59
Çizelge 4.14 : Perde 3 kesit elemanı için taze beton değerleri	60
Çizelge 4.15 : Perde 3 kesit elemanı için kür koşulları uygulama.....	60
Çizelge 4.16 : Perde 3 kesiti için bahar simülasyon-ölçüm karşılaştırması.	61
Çizelge 4.17 : Perde 3 kesit elemanı için taze beton değerleri.	62
Çizelge 4.18 : Perde 3 kesit elemanı için kür koşulları uygulama.....	62
Çizelge 4.19 : Perde 3 kesiti için yaz simülasyon-ölçüm karşılaştırması.....	63
Çizelge 4.20 : Sıcaklık gelişimi takip edilen kesitlerin basınç dayanımları.	64

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Farklı çimento tipleri için adyabatik sıcaklık ilişkisi [1].....	3
Şekil 2.2 : Çimento hidratasyon süreci [3].	4
Şekil 2.3 : GE Oluşumu - Agregada çevresi mikro çatlakların mavi mürekkep enjekte edilmiş görüntüsü [6].....	5
Şekil 2.4 : Betonun hacim değişiminin (%), kür sıcaklıklarına (°C) ve zamana (gün) bağlı değişimi [7].....	6
Şekil 2.5 : Betonun iç sıcaklığı artması sonucu çatlak oluşumu (sol), taban kısıtlanması sonucu çatlak oluşumu (sağ).	8
Şekil 2.6 : Halka testi yerleşim planı ve kesit görünüşü [15].	10
Şekil 2.7 : Halka testi ile çatlak oluşumu gerinim ilişkisi.	10
Şekil 2.8 : Kısıtlanmamış rötrede boy çatlak ilişkisi [17].....	11
Şekil 2.9 : Bünyesel rötre oluşumu [13].	12
Şekil 2.10 : Erken yaş rötrenin ortam koşulları ile değişimi [13].....	13
Şekil 2.11 : Kuruma rötresinin çimento tanecikleri arasında oluşturduğu kuvvet mekanizması [13].	14
Şekil 2.12 : Beton yüzeylerin ısı örtüleri (sol) ve naylon (sağ) ile kürlenmesi.....	16
Şekil 2.13 : Döküm sonrası soğutma sistemi (soğutma boruları).	18
Şekil 2.14 : Soğutma suyu devir daimi	18
Şekil 3.1 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ) [23].	22
Şekil 3.2 : Beş düğüm noktalı tek sonsuz eleman (sol), 3 düğüm noktalı çift sonsuz eleman (sağ) [23].	22
Şekil 3.3 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için gerilme ve şekil değiştirme geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ)..	23
Şekil 3.4 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için gerilme ve şekil değiştirme geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ)..	23
Şekil 3.5 : Olgunluğun dayanım ile kalibrasyonu [25].	24
Şekil 3.6 : “4C-Isı, 4C-Sıcaklık, 4C-Gerilme kullanım amaçları [27].....	27
Şekil 3.7 : Yeraltı tren istasyon yapısı genel kesit (J-J).	31
Şekil 3.8 : Soğutulmuş ve soğutulmamış kesitte sıcaklık vs. zaman grafiği.....	31
Şekil 3.9 : İstasyon yapı kesiti ve kalınlıkları.	32
Şekil 3.10 : Simülasyonu yapılan örnek bir perde anosu (t=1,40m).....	36
Şekil 3.11 : Simülasyon çıktıları sonucu oluşturulan, betonun korunması planı.....	40
Şekil 4.1 : Beton ile çelik halka arasındaki gerilme ilişkileri [14].	41
Şekil 4.2 : Wheatstone köprü bağlantı detayı, çalışma prensibi, uygun bir gerinim pulu (sağ) [28].	42

Şekil 4.3 : Halka deneyinde beton dökülen kesit ölçüleri.	42
Şekil 4.4 : Halka deney düzeneği (Laboratuvar numunesi 20°C).....	44
Şekil 4.5 : Gerinim ölçümleri ile çatlak oluşum zamanı (Döküm No 3).	45
Şekil 4.6 : Halka deneyi çatlak yerleri (sol) ve çatlak mikroskobu (sağ).	46
Şekil 4.7 : Halka deneyi kesit sıcaklık ölçümleri - Döküm 1.	47
Şekil 4.8 : Halka deneyinde kullanılan 2 karışım için basınç dayanım gelişimi.	48
Şekil 4.9 : Halka deneyinde kullanılan 2 karışım için rötre gelişimi.....	49
Şekil 4.10 : Termokupl takılı veri kayıt cihazı.	51
Şekil 4.11 :Temel kesiti için termokupl kesit içerisinde yerleşimi.....	52
Şekil 4.12 :Sıcaklık ölçüm çubuğunun temel içerisine yerleşimi.....	53
Şekil 4.13 :Temel kesiti bahar koşulu ölçüm grafiği.	57
Şekil 4.14 :Temel kesiti yaz koşulu ölçüm grafiği.	59
Şekil 4.15 :Perde 3 kesiti bahar koşulu ölçüm grafiği.	61
Şekil 4.16 :Perde 3 kesiti yaz koşulu ölçüm grafiği.	63
Şekil 4.17 : Temel ve perde elemanları için 28 günlük basınç dayanımları.....	64

KÜTLE ELEMANLARDA ERKEN YAŞ ÇATLAK RİSKİNİN BELİRLENMESİ VE UYGULAMA İLE KARŞILAŞTIRMASI

ÖZET

Tez kapsamında yüksek durabiliteye sahip bir kütle betonda yüksek sıcaklık sebebiyle oluşabilecek çatlak riskinin benzeşimlerle belirlenmesi ile sonuçlarının uygulama ölçümleriyle karşılaştırılmalı şekli analiz edilmiştir.

Literatür çalışmasında sertleşen betonda; hidrasyon ısısının çimento ile ilişkisi incelenmiştir, yüksek hidrasyon ısısı altında Gecikmiş Etrenjit (GE) oluşumu hakkında bilgiler edinilerek, GE oluşumunun betonda meydana getirdiği hasarlar ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Rötire mekanizması açıklanarak, rötire türleri irdelenmiştir. Betonun iç-dış sıcaklık farkının kısıtlanmış rötire etkisi ile halka deneyi ile rötire ilişkisi araştırılarak karşılaştırması yapılmış ve deney yöntemi irdelenmiştir. Beton kesitlerde kür yönteminin önemi, soğutmanın betonun iç sıcaklığına olan etkileri araştırılarak, soğutma sisteminin teşkili hakkında bilgi verilmiştir.

Simülasyon çalışmasında betonun laboratuvar koşullarında elde edilen veriler yardımıyla sıcaklık ve gerilme gelişiminin simülasyonu yapılması planlanmıştır.

Simülasyonda kullanılan hesaplar genel olarak incelenmiştir. Kesitlerin ön hesaplarına göre soğutma gerekliliği irdelenmiştir. Farklı kesitlerde simülasyon yapılmıştır. Simülasyon yardımıyla betonun maruz kalacağı ortam koşullarına göre kür gerekliliği ve süresi, kalıp söküm zamanları belirlenmiştir. Simülasyon “4C Temperature and Stress” (4C Sıcaklık ve Gerilme) programı ile yapılmıştır.

Uygulama çalışmasında ise bir yeraltı yapısı olan istasyon binasında farklı soğutmalı betonarme elemanlarda (perde ve temel kesitlerinde) ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sistemi anlatılmıştır. Bu sonuçlar elde edilen taze beton sıcaklığı, hava/mevsim koşulları ve kesit kalınlıklarına göre değerlendirilerek irdelenmesi yapılmıştır. Uygulama verilerinde elde edilen sıcaklıklardan betonda hasar yaratabilecek kriterler (en yüksek sıcaklık ve sıcaklık farkları) hesaplanmıştır. Tüm sonuçların zaman bağlı değişimleri eğrilerle eklerde verilmiştir.

Laboratuvar çalışmasında ise halka deneyi ile 2 farklı karışımdan dökümler yapılarak çatlak oluşum zamanları belirlenmiş, çatlak genişlikleri ölçülmüştür.

Aynı karışım ile yapılan 2 farklı kriterdeki dökümde numunelerin beklediği ortam sıcaklığının ve numuneleri kısıtlayan halka kalınlıklarının kısıtlanmış rötire üzerine etkisi araştırılmıştır.

Farklı karışım ile yapılan dökümlerde ise normal rötire değişimi birbirinden farklı olan 2 farklı betonda kısıtlanmış rötiredeki çatlak oluşum zamanı ve çatlak genişlikleri tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; kütle betonlarında yüksek hidrasyon ısılarından kaçınmak amacıyla ön-test olarak simülasyon yazılımları ile yapılmış model verileri saha imalat ölçümleri ile karşılaştırılarak yapılan simülasyonların uygulama ile uygunluğu grafik ve çizelgeler yardımıyla gösterilmiştir. Kullanılan modeller baz alınarak kür ve kalıp açma zamanları betonun ısıl gelişiminden elde edilen veriler yardımıyla kullanılmıştır.

EARLY-AGE CRACK RISK DETERMINATION IN MASS CONCRETE AND APPLICATION COMPARISON

SUMMARY

The main objective of this thesis is to investigate the effect of thermal stresses and boundary conditions of concrete on the risk of crack formation and compare the simulation results with the site monitoring records.

In the literature review, causes and effects of temperature rise in concrete structures are described. Heat evolution due to reaction between cement and water, effects of internal thermal differences and crack formation in concrete are described. Information on hydration reaction of is presented based on different cement types.

Mechanisms and types of early age shrinkage in concrete is discussed. Effects of shrinkage on concrete are presented by shrinkage – length change graphics. Determination of restrained shrinkage model and test method is also presented. Restrained ring test is introduced and explained.

In order to prevent thermal cracks in mass concrete, the importance of cooling and curing are discussed. Types, materials and methods for curing and cooling are described for mass concrete structures. The basics of simulation for temperature and stress calculation from heat evolution are described. Maturity concept is defined and calculation method is given.

The temperature-stress evolutions and crack risks were analyzed using “4C Temperature and Stress Simulation” software. Simulations were performed for the foundation and wall sections of a train station structure. Simulation models are presented based on the concrete properties. Curing conditions and casting sequences are determined by the model structures. A sample curing plan is obtained from calculations.

In “4C Temperature and Stress” software, the critical sections of a train station were simulated. The hardened and fresh properties of concrete are tested in laboratory. Parameters such as thermal conductivity, activation energy, tensile strength, compressive strength, elastic modulus, creep, shrinkage, thermal expansion coefficient and heat development values are used in calculations. The boundary conditions such as the concrete curing conditions, ambient temperature and wind conditions are defined in the software.

As a result of simulation for each section, temperature rise vs. time, crack risk vs. time and maturity vs. time realtions are obtained. Crack risk calculation is described for concrete structures and presented in graphs.

Restrained ring test is prepared according to ASTM C 1581 requirements in the laboratory. Test equipments are introduced, and obtained test results are given. Two different ring thicknesses, two different curing conditions and two different water/cement ratios are tested. As a result; crack initiation date and crack widths are

measured by the ring test specimens. Crack propagation under restrained shrinkage is inspected for 30 days.

4 sample temperature readings from a train station structure are recorded on site. Recordings are obtained for Spring/Fall and Summer models. Curing conditions are selected according to the measured fresh concrete properties. Temperature recordings are monitored with thermocouples for a period of 20 days.

Calculated values such as internal temperature differences, average and maximum temperatures are evaluated from measured temperatures. Maximum temperatures and times, and internal temperature differences for each concrete section are compared with simulation results. Temperature vs. time graphs are given up to 20 days.

As a result, early age temperature rise in hardening concrete; PC calculated simulation results are nearly in coordination with in-situ measured results. All recorded temperatures are measured for cooled sections are equal or below 55°C. No early age cracks were observed for all concrete elements monitored. And also the relation between restrained shrinkage cracks is shown with the result of ring test.

With the ring test, crack times were exactly estimated with strain measurements. Cracks measured and compared according to three different conditions. Crack openings by time under load were inspected. Curing effects on restrained shrinkage was shown with the relative results.

As final result before building the structures with predictions calculated by simulation models can be used as in real structures construction applications. With the correct parameters; predicting the concrete temperature stress relations are easy with basic finite element models. Early-age crack on mass concrete can be prevented by creating simulation models, applying cooling/heating and true identified curing conditions. Durability of key projects can be moved to the upper level with the engineering simulations and measurements.

1. GİRİŞ

Betonarme günümüz koşullarında en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Fakat kütle olarak dökülen yapısal elemanlarda, içerdiği çimentonun kimyasal reaksiyonu nedeniyle dayanım ve durabilitesini etkileyebilecek riskli sıcaklıklara ulaşmaktadır. Statik açıdan kesitleri azaltmak mümkün olmadığında, elemanlarda kullanılacak betonun bileşen malzemeleri optimizasyonu, kesitleri soğutarak (post cooling) veya dış yüzey sıcaklığını yüksek tutmaya çalışarak betonun iç-dış sıcaklık farkları nedeniyle çatlamasının önüne geçilebilmektedir.

Beton hidrasyonu sırasında kalın kesitlerde iç kesimlerde oluşan yüksek sıcaklık, betonun genleşmesine, dış yüzeylerin ortam koşulları nedeniyle daha düşük sıcaklıkta olması ise betonun çatlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle beton kesitinin iç sıcaklığının düşürülmesi veya betonun dış yüzeyinin izole edilerek beton sıcaklığının olabildiğince korunması önemlidir. Burada kür yöntem ve kür malzemelerinin seçimi büyük önem kazanmaktadır.

İç-dış sıcaklık farkından dolayı oluşabilecek çatlaklar, suya maruz elemanlarda su geçirimsizliği olumsuz etkilenmekte, farklı mevsim koşullarında veya don maruz kalma durumunda ise oluşan çatlakların büyümesine kadar varabilecek sorunlara yol açabilmektedir.

İç bölgelerdeki sıcaklığın yüksek derecede artması gecikmiş etrenjit (GE) oluşumunu tetiklemekte ve beton olgunluğunun düzensiz artmasına neden olarak basınç dayanımını etkileyebilmektedir.

Uygulama örneği olarak, laboratuvarında incelenen betonla aynı karışım oranlarına sahip bir endüstriyel betonda halka testleri de yapılarak kısıtlanmış durumdaki çatlak oluşum zamanı, gerinim pulları (strain gauge) ile belirlenmiştir.

Tez çalışmasında bir yeraltı tren istasyonunda kullanılan C40/50 basınç dayanım sınıfına ait yüksek durabiliteye sahip bir betonla yapılan simülasyon ve saha ölçümlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

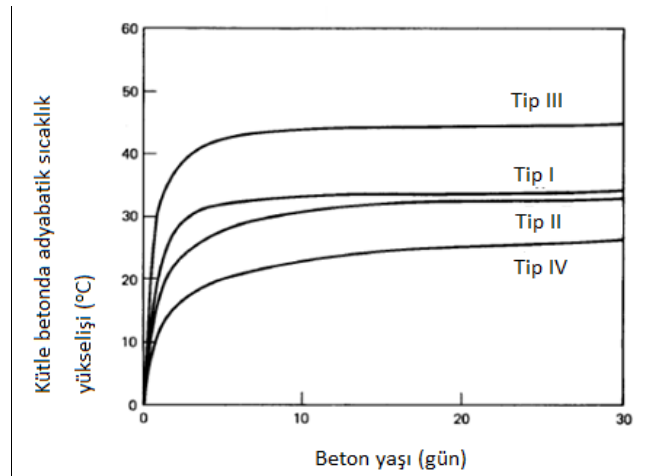
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton içerik olarak; bağlayıcı çimento, farklı boyutlardaki agregalar, su ve katkı maddelerinin belirli orandaki karışımından oluşmaktadır. Yapı olarak karışım anında akışkan bir haldedir, belirli süreler içerisinde yerleştirilmeye ve işlemeye uygundur, ancak su-çimento reaksiyonu (hidratasyon) nedeniyle zamanla sertleşerek içinde bulunduğu kalıp şeklini alarak yüksek dayanımlara ulaşır. Gevrek bir yapıya sahip olur. Bu nedenle çatlama ve kırılmaya elverişli bir yapı malzemesidir.

2.1 Çimento ve Hidratasyon Isısı

Hidratasyon; çimento taneciklerinin su ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan tepkimedir, bu tepkime ekzotermik bir reaksiyon olup ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısı çimento taneciklerinin boyutları ile bağıntılı olarak değişmektedir. Çimentonun inceliği arttıkça suyla temas edecek olan yüzey artacağından daha hızlı reaksiyon olacaktır, hızlı reaksiyonlar sonucunda daha fazla ısı açığa çıkacaktır [1].

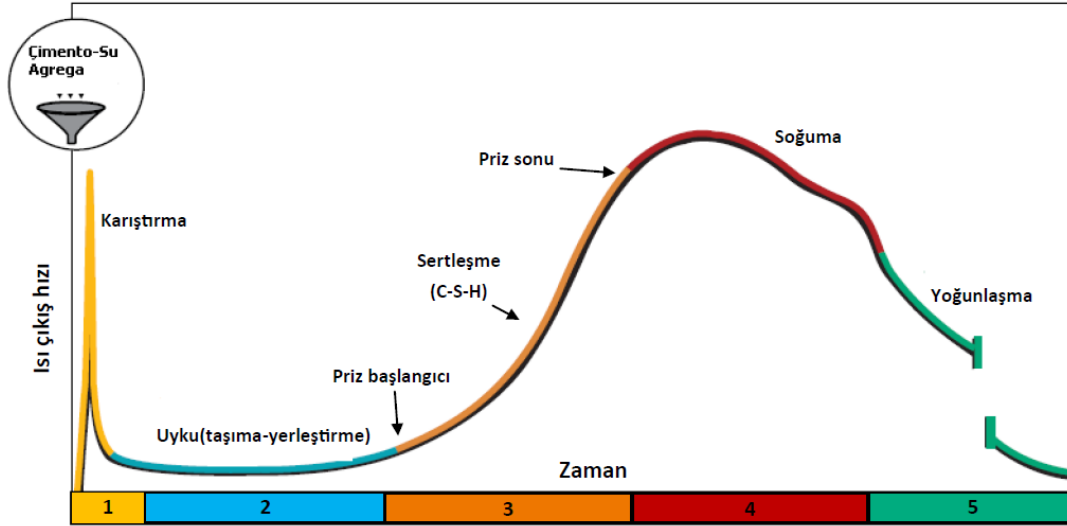
Aynı koşullar altında farklı çimento türleri için ısı üretimi oranı, önemli ölçüde farklılık gösterir. Örneğin, Şekil 2.1 de, ASTM Tip III çimento için sıcaklık 45°C'ye yükseldiği görülmektedir. Ancak, ASTM Tip IV çimento için sıcaklık artışı sadece 25°C'dir. Çeşitli çimentoların ısı üretimi oranlarındaki fark kimyasal bileşim ve inceliklerinden kaynaklanmaktadır [1].



Şekil 2.1 : Farklı çimento tipleri için adyabatik sıcaklık ilişkisi [1].

Betonun ısıl kapasitesinin düşük olması nedeniyle hidrasyon sonunda 500J/g (120kal/g) kadar ısı açığa çıkabilir. Bu nedenle beton ısıl bir yalıtkan gibi davranarak kütle betonda sıcaklığın artmasına neden olur [2].

Beton sertleşme sürecinde ilk 3 gün içinde reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşerek maksimum ısı açığa çıkmaktadır. Karışım anından itibaren devam eden reaksiyonlar zaman içinde azalarak devam etmektedir. Hidrasyon süreci 5 kısımda incelenebilir (Şekil 2.2) [3].



Şekil 2.2 : Çimento hidrasyon süreci [3].

Süreç 1: Karışım süreci

Süreç 2: Uyku Süreci (Yaklaşık 5 saat kadar sürmektedir)

Süreç 3: Hızlanma (Priz) Süreci

Süreç 4: Soğuma Süreci

Süreç 5: Sabit Süreç

En çok ısı priz sürecinde açığa çıkar. Portland çimentosu, ilk 1-3 gün aralığında toplam ısının %50 sini, 7. Gün sonuna kadar toplam ısının %75 ini, 6 ay içerisinde ise %83 - %91 kadarını açığa çıkarır. Açığa çıkan ısı betonun ısıl genişmesiyle birlikte kesitin orta noktasından kenar kısımlara doğru yayılmaktadır. Portland Çimentosuyla üretilen betonlarda, GE oluşum riski nedeniyle en yüksek sıcaklığın 65°C yi geçmemesi istenir [4].

2.2 Hidratasyon Isısının Beton Özelliklerine Etkisi

Yüksek hidratasyon ısısı kalın kesitli kütle beton elemanlarında (baraj gibi), hızlı dökümlerde (art arda yapılan temel, perde, döşeme imalatları gibi) ve yüksek dayanımlı betonlarda (çimento dozajının 400kg/m³ ten fazla olduğu) ortaya çıkmaktadır [4]. Aşağıda, yüksek hidratasyon ısısının dürabiliteye, ısıl gerilmelere ve çatlaklara olan etkisi incelenmiştir.

2.2.1 Durabiliteye etkisi

Betonda durabilite; dış ortam etkilerine, kimyasal etkilere, alkali-agrega reaksiyonları ve aşınmaya maruz olan betonarme yapının servis ömrü boyunca sağlam kalması durumudur [5].

Kütle betonlarında durabiliteyi etkileyebilecek GE oluşum riski mevcuttur. Beton sıcaklığı 65°C üzerinde çıktığı durumlarda etrenjit oluşum riski başlar. GE hasarının oluşması için etrenjit genişmesinin kısıtlanmış olması gerekir. Etrenjit yeterli serbest genişme hacmi bulamadığı durumlarda betonu tahrip ederek çatlak oluşumuna ve ilerlemesine neden olabilmektedir [5]. **Şekil 2.3** te etrenjit sonucu oluşan mikro çatlaklar görülebilir.

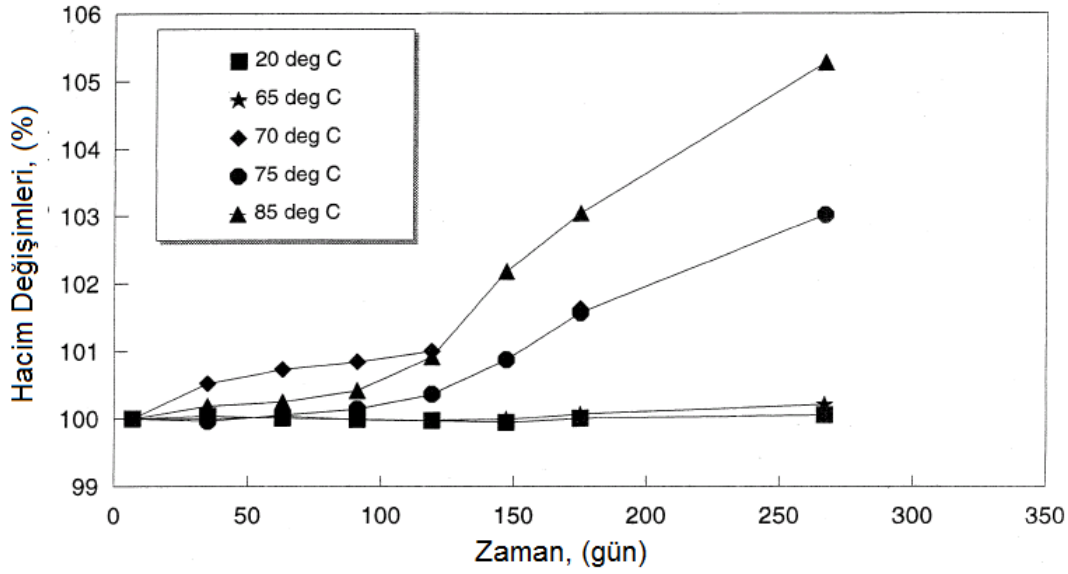


Şekil 2.3 : GE Oluşumu - Agrega çevresi mikro çatlakların mavi mürekkep enjekte edilmiş görüntüsü [6].

Etrenjit kararlı bir yapıya sahip değildir. Bazı durumlarda su kaybedebilir veya dağılabilir. Etrenjit kolaylıkla dehidrate olan 32 adet su molekülüne sahiptir. Bağlı nem, ısı artışı, pH, ortam koşulları ve sülfat iyonlarının miktarı etrenjit oluşumunu etkiler. Hidratasyon sırasında betonun ısıl özelliklerinin de sürekli olarak değişmesi durumunda etrenjit oluşumu betonun özelliklerini olumsuz etkilemektedir [7].

Yüksek hidratasyon ısıları betonda ısıl genişmeye neden olmakla birlikte reaksiyon sona erdiğinde soğumayla birlikte betonun rötresine neden olmaktadır. Buna örnek teşkil etmesi amacıyla aşağıdaki grafikte yüksek sıcaklıkta kürlenmiş betonların şekil

değiştirme – gün ilişkisini gösterilmiştir. **Şekil 2.4** ten 65°C üzerinde kürlenene betonların hacim değişiminin yüksek oranda arttığı gözlemlenmektedir [7].



Şekil 2.4 : Betonun hacim değişiminin (%), kür sıcaklıklarına (°C) ve zamana (gün) bağlı değişimi [7].

Beton durabilitesi, bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kuru gibi süreçler ile çevre koşullarından etkilenir. Beton uygun şekilde kür edilmemiş ise mukavemet yaklaşık %20-30 oranında düşebilir, ancak durabilite daha da olumsuz etkilenir; kür edilmemiş betonun su ve klor geçirimsizliği 10 kata kadar artabilir, bu durum beton içerisindeki donatı korozyonunu olumsuz etkiler ve durabilite önemli ölçüde azalır. Beton durabilitesi için amaca uygun malzeme seçilmeli, su dahil bütün bileşenler standartlara uygun olmalıdır, karışım iyi tasarlanmalıdır ve taze betonun yeterli biçimde yerine yerleştirilmesi sağlanmalıdır. Özellikle betonun sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılmalıdır, beton iyi korunmalı ve gerekli kür aksatılmadan yapılmalıdır. Tüm bunlar yapılırsa betonda oluşabilecek oturma çatlaklarının, plastik rötre çatlaklarının ve kısıtlanmış rötre çatlaklarının önüne geçilebilir. Çatlakların önlenmesi betonun durabilitesi açısından yararlıdır [8].

2.2.2 Isıl gerilmelere etkisi

Beton, ekzotermik kimyasal reaksiyonlar sonucunda dayanım kazanır. Beton ısısının artışı reaksiyon hızını artırır. Olgunluk yöntemi betonun gelişiminde sıcaklık ve zamanın etkilerini hesaba katan bir yöntemdir. Beton numuneleri farklı koşullarda

bekletildiğinde, beton numunelerinin laboratuvar ortamında elde edilen ısı geçmişi için dayanım-olgunluk ilişkileriyle dayanım tahminleri yapılabilir. Olgunluk hesaplarını uygulamada kullanabilmek için yapıda kullanılacak betonun dayanım-olgunluk ilişkisini bilmek gerekir. Yerinde dökülen betonarme elemanın sıcaklık gelişimi sürekli olarak gözlemlenir ve elde edilen bu gözlemlerden olgunluk hesaplanabilir. Yerinde olgunluk ve dayanım-olgunluk ilişkisini bilmekle yapı yerindeki dayanım yaklaşık olarak tahmin edilebilir. ASTM C 1074’de olgunluk hesaplamaları için gerekli parametreler verilmektedir, betonun kayıt edilen sıcaklık gelişiminden olgunluk hesaplaması yapılabilmektedir..

Dış etkenlerin zamanla değişmesi, içsel ısı gelişimi, farklı beton karışımlarının aynı yapıda bulunması ve kesitlerin çeşitlilik göstermesi gibi durumlar göz önüne alındığında; yapının başarılı bir simülasyonu yapılabilmesi için ısı-sıcaklık yoluyla elde edilen ısı-gerilme metodu kesinlikle statik hesaba katılmalıdır. Isı artışı nedeniyle oluşan yüklerin ve içsel ısı üretimi etkisi altındaki betonarme yapıların tasarımında ilk ele alınması gereken durum olmalıdır. Isıl gerilme ilişkisi uzun süreçte aşağıdaki durumları da içermelidir [9]. Sıcaklık ve gerilme-şekil değiştirme alanlarının ilişkisi için; malzeme elastisitesi, rötresi, zamana bağlı değişimler (Sünme davranışı) incelenmelidir.

Isıl gerilmelerin genel denklemi Formül 2.1 de gösterildiği gibidir, bu denklem yardımıyla yol kaplamalarının servis ömrü süresince etkide kalacağı sıcaklık değişimlerinden kaynaklı betonda oluşacak çekme gerilmesi hesaplanabilir [10].

$$\sigma_T = K_r * E_c * \alpha * \Delta T \quad (2.1)$$

σ_T : Çekme Gerilmesi

K_r : Serbestlik Derecesi

E_c : Elastisite Modülü (Pa)

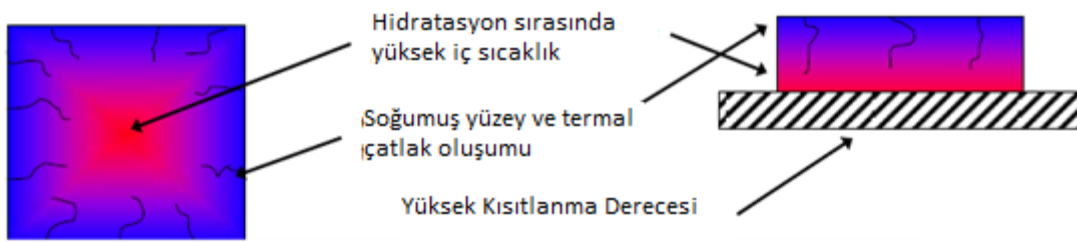
ΔT : Sıcaklık Değişimi ($T_o - T_{min}$) ($^{\circ}C$)

α : Termal Genleşme Katsayısı (şekil değiştirme/ $^{\circ}C$)

Karmaşık geometriye sahip betonarme elemanlar için ısı gerilme ilişkisinin hesaplanabilmesi için bilgisayar modelleri oluşturulur. Modellerde sonlu eleman yöntemiyle hesaplamalar yapılarak malzeme özellikleri tanımı ile sıcaklık farklarından oluşan gerilmeler hesaplanabilir [11].

2.2.3 Çatlak etkisi

Betonda, çimento hidratasyonu sonucu betonun ısısında ani yükseliş meydana gelir. Kalın kesitli betonarme elemanlarda kesitin dış bölgeler hızlı soğurken iç bölgeler geç soğumaktadır. İnce kesitli yol döşemesi gibi betonarme elemanlarda betonun döküldüğü yüzeyin soğuk olması nedeniyle oluşacak aradaki fark çatlaklara neden olabilir. Isıl genleşme ve düşük hızdaki iletim nedeniyle ısı farkları tabanda ısıl gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler betonun çekme mukavemetinden yüksek olduğu durumda ısıl çatlak oluşumu gözlenir [11]. Isıl veya kısıtlanma sonucu çatlak oluşumları için örnek Şekil 2.5 te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Betonun iç sıcaklığı artması sonucu çatlak oluşumu (sol), taban kısıtlanması sonucu çatlak oluşumu (sağ).

Isıl gerilmeler nedeniyle çatlak etkisini minimuma indirmek için ek ya da opsiyonel sıcaklık izleme kontrol mekanizmaları belirlemek gereklidir. Kütle betonarme elemanlarında, betonun merkezi ile yüzey arasındaki sıcaklık farklarını uygun seviyelerde tutmak, büyük temellerde (eğer bir beton kesit tek seferde dökülmek isteniyorsa) dış etkiler altındaki kısıtlamaların engellenmesi gereklidir. Sıcaklık farklarını düşük seviyelerde tutmak ancak betonun yalıtım ile ılık tutulmasıyla mümkün olmaktadır. Ayrıca ısıl gerilmelerin fazla olduğu bölgelerde ek donatı yerleşimi ile betonun yüksek sıcaklık farklarından dolayı çatlak riski oluşumu en düşük seviyelerde tutulabilir [12].

2.3 Rötne Mekanizması

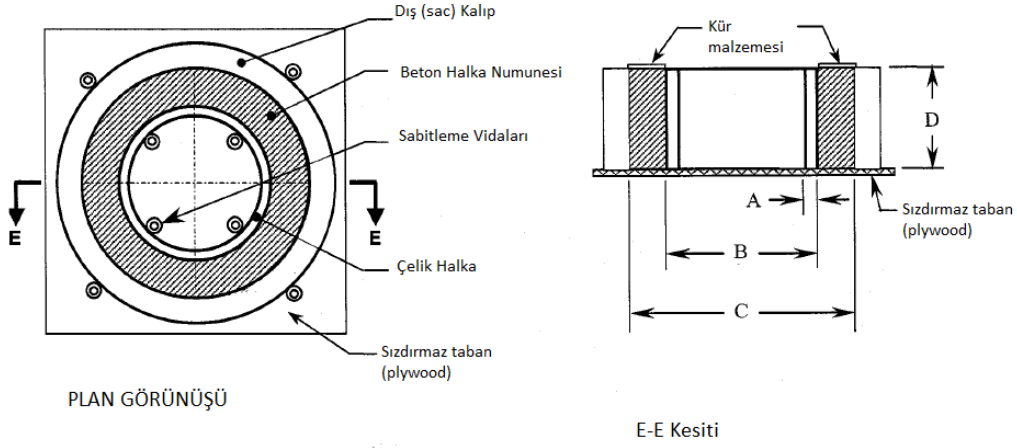
Rötne, betondaki hacim değişimleridir. Yapısal ve çevresel faktörler nedeniyle ortaya çıkan hacim değişimleri beton için kabul edilebilir bir olgudur. Yapıların çoğunda rötne yerleştirme ve priz sırasında açığa çıkmaktadır. Gerçekte ise rötne çimento ile suyun bir araya gelmesinde başlamaktadır [13].

Rötre, donatısız beton elemanlarda veya az donatılı betonarme elemanlarda hasara sebep olabilir.

Betonarme eleman içinde nem dağılımının üniform olması nedeniyle, numunenin dış yüzeyi öncelikle kuruyup rötreye uğrarken, iç tabaka ıslak kalmakta ve büzülmemektedir. Yani, priz sürecinin başlangıcı aşamasında iç tabaka basınç altında iken dış yüzey çekme etkisi altında kalmaktadır. Çekme gerilmeleri yüzey tabakada yerel mikro çatlamalara veya çekme deformasyon yumuşamasına neden olmaktadır. Çekme gerilmesinden kaynaklanan betonun lineer olmayan, inelastik davranışına bağlı olarak, yüzeyde mikro çatlaklar oluşabilmektedir. Nem beton bünyesinde üniform dağılıma ulaşırken tamamıyla kapanamazlar. Sonuç olarak, numunenin ölçülen rötresi her zaman gerçek rötresinden daha küçüktür. Kuru rötre numuneleri için tam kesit alanı basınç altında kalmaktadır ve bu nedenle basınç yönüne dik doğrultudaki düzlemlerde mikro çatlama görülebilmektedir. Özet olarak gözlenen beton numunenin rötresi mikro çatlama ve bununla ilgili geri çevrilemeyen deformasyonlar tarafından azaltılamazlar [14].

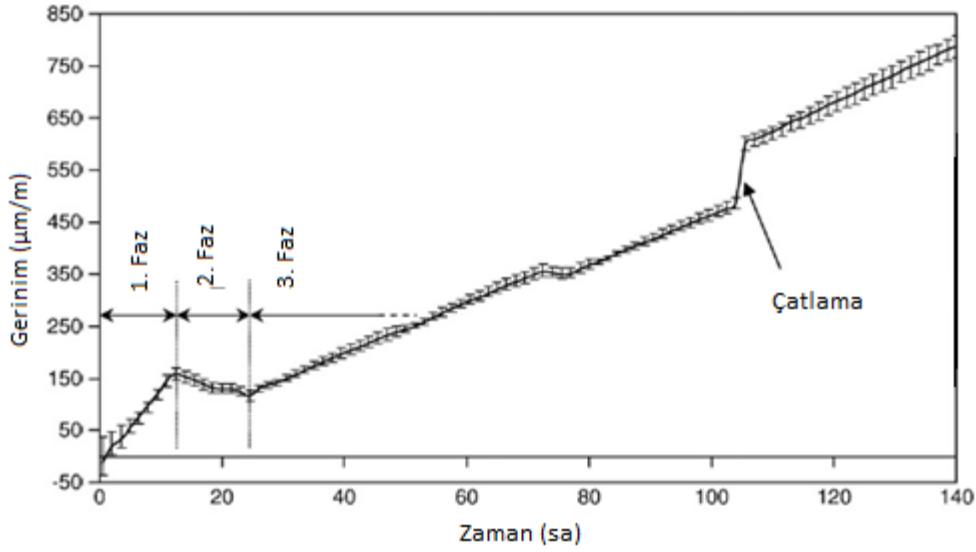
Rötre; yüzey katmanlarda çekme gerilmeleri iç katmanlarda basınç gerilmeleri oluşturur. Bu oluşum sonucu beton yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar betonun dış etkilere karşı geçirimsizliğini olumsuz etkileyerek servis ömrünü olumsuz etkiler [14].

Betonun kısıtlanmış rötre etkisinde çatlak zamanının laboratuvar koşullarında belirlenmesi ve çekme dayanım karakteristiklerini belirlemek amacıyla halka testi deneyi yöntemi ASTM C 1581'de belirtilmiştir. Standartta göre bünyesel rötre etkisi altındaki beton malzemenin kuruma rötresi ve deformasyonu ile hidrasyon ısı etkisi altındaki çatlak potansiyeli belirlenebilmektedir [15]. Deney düzeneği ve standartta belirtilen genel kesitler **Şekil 2.6** da belirtilmiştir. Deneyde çatlama zamanı birim boyda meydana gelen şekil değiştirmelerin ölçülmesi ile bulunur. Gerinim pullarından elde edilen verilerden ani azalma zamanı tespit edilerek çatlama zamanı belirlenebilmektedir (**Şekil 2.7**) [16].



Kesit Birimleri	Boyutlar (inch)	Boyutlar (mm)
A	0.50 ± 0.12 in.	12.5 ± 0.13 mm
B	13.0 ± 0.12 in.	330 ± 3 mm
C	16.0 ± 0.12 in.	406 ± 3 mm
D	6.0 ± 0.25 in.	150 ± 6 mm

Şekil 2.6 : Halka testi yerleşim planı ve kesit görünüşü [15].

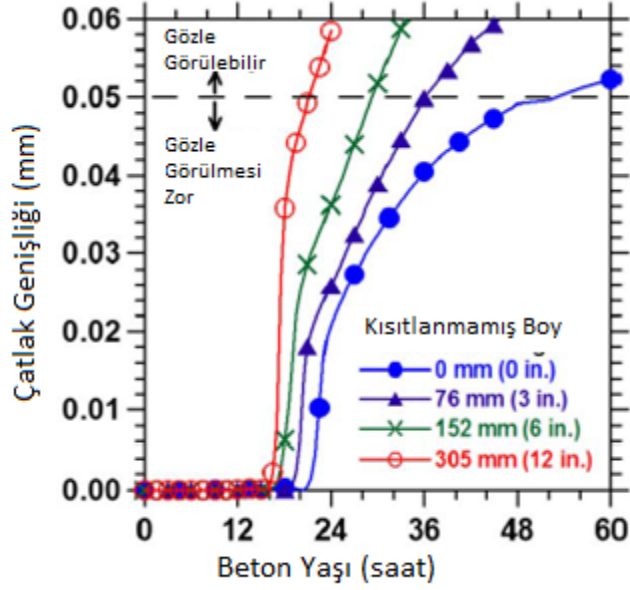


Şekil 2.7 : Halka testi ile çatlak oluşumu gerinim ilişkisi.

Halka deneyi ile betonarme eleman içerisindeki donatı ve inşaat derzleri simüle edilmiş olur. Bu test sonucunda donatı etkisi birkaç çeşit olabilir; gecikmiş çatlak oluşumu, çatlakların genişlemesi veya çok fazla noktadan çatlak oluşumu gibi. İnşaat derzlerinin ise gerilme üzerinde büyük etkisi olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Masif elemanlarda kesinlikle inşaat derzleri statik açıdan ele alınmalıdır ve yapı imalat dökümleri esas alınan inşaat derzlerine göre yapılmalıdır [16].

2.3.1 Kısıtlanmış rötre

Eleman boyutları ile ilgili olarak, Şekil 2.8 de görüldüğü üzere elemanların kısıtlanmamış uzunlukları arttıkça çatlak oluşum daha erken olmakla beraber çatlak genişlikleri de artmaktadır. Ayrıca ilerleyen olgunluk zamanlarında yeni kılcal çatlakların oluşumu da gözlemlenmiştir [17]. 0,05mm üzeri çatlaklar gözle görülebilir olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.8 : Kısıtlanmamış rötrede boy çatlak ilişkisi[17].

Masif beton elemanlarda erken yaşta olgunlaşma sürecinde çatlak potansiyeli yüksektir. Otojenik ve ısıl gerilmeler altında kısıtlanan (kendiliğinden kısıtlanmış yada inşaat derzleriyle kısıtlanmış olabilir) elemanlarda basınç ve çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler erken yaşta betonun çatlamasına neden olur. Bu çatlaklar 1.2m kesit için 0,5 mm a kadar olabilir, yapının bütünlüğünü ve su geçirimsizliğini olumsuz derecede etkiler. Köprü ve tünel gibi elemanlarda yapı taşıyıcı sistemine karbondioksit, sülfat, klorürü gibi iyonların girmesi, yapının servis ömrünü azaltıcı sonuçlar doğurabilir [16].

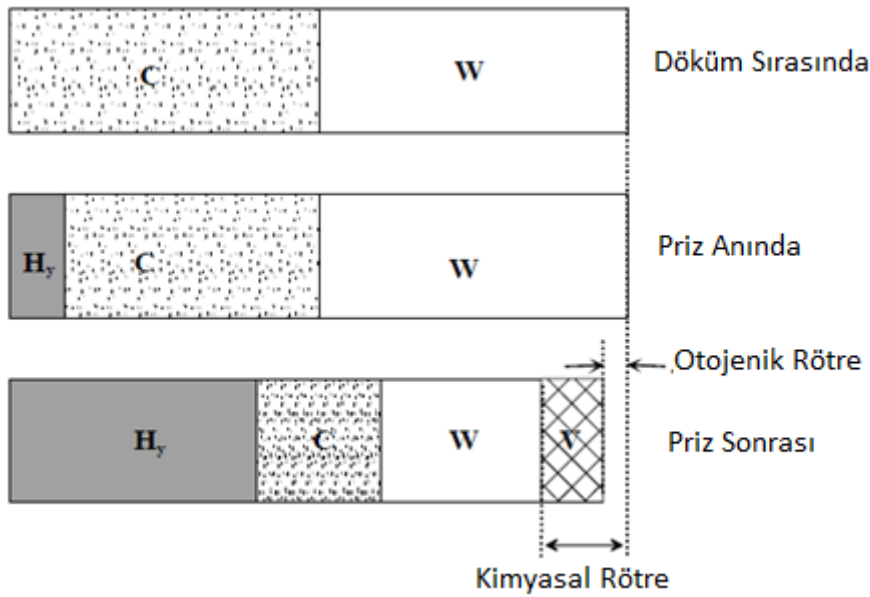
Kısıtlanmış rötre için betonarme elemanların çatlak potansiyelini gösterebilecek deneyler yapılabilir. Halka deneyi ile betonun gerilme altında kısıtlanmış rötre potansiyeli gün ve gerilme cinsinden belirlenebilir.

2.3.2 Bünyesel rötre

Betonun bünyesel rötresi; betonda dış yüzeye verilecek suyun kalmaması sonucu ortaya çıkar. Bir tür kimyasal rötre olup çimento taneciklerinin hidratasyonu nedeniyle oluşmaktadır. Bünyesel rötre ve kimyasal rötreyi özetleyen durum **Şekil 2.9** da gösterilmiştir [13].

Bünyesel rötre 3 aşamada gerçekleşir [13].

- Sıvı bölge,
- Priz öncesi bölge,
- Priz (Rijit) Bölgesi.



Şekil 2.9 : Bünyesel rötre oluşumu [13].

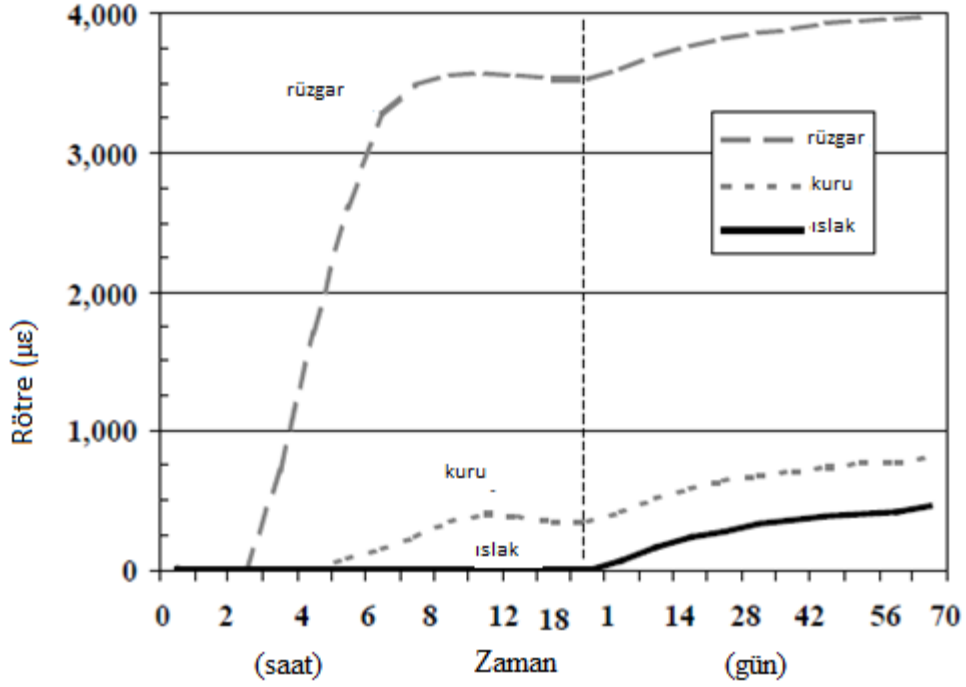
Bünyesel rötredeki şekil değiştirme dış yüzeyden olur, lineer kabul edilebilir ve kesit esas alındığında etkili derecede yüksek olmaktadır. Kimyasal rötre ise reaksiyonlar sonucu olduğundan beton karışımı ile doğrudan ilgilidir.

2.3.3 Kuruma rötresi

Kuruma rötresi prizini alıp sertleşmiş ve serbest halde bulunan suyunu kaybetmiş betonda meydana gelir. Ortamdaki bağıl nem oranının düşmesi, kuruma rötresinin gerçekleşme oranını artırır. Kuruma rötresine etki eden 3 temel etken vardır; kılcallık, basınç, açığa çıkan enerjideki değişim. Betonun plastik rötresi uzun koşullarda sabit kalırken kuruma rötresi ilk 1 gün içerisindeki kür ve ortam

koşullarına göre ani değişiklik gösterir. Bu ani değişiklikler betonun toplam rötresini ciddi derecede olumsuz etkileyebilir. **Şekil 2.10** da rüzgârlı, kuru ve ıslak ortamlardaki kuruma rötresinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Rüzgâr etkisi altında ilk günlerdeki rötrenin toplam rötreye olan olumsuz etkisi diğer koşullardan çok daha fazla olduğu görülebilir [13].

Rüzgârlı ortam için hız 2m/s , kuru ortam için nem % 40 , yaş ortam için nem % 100 alınmıştır.

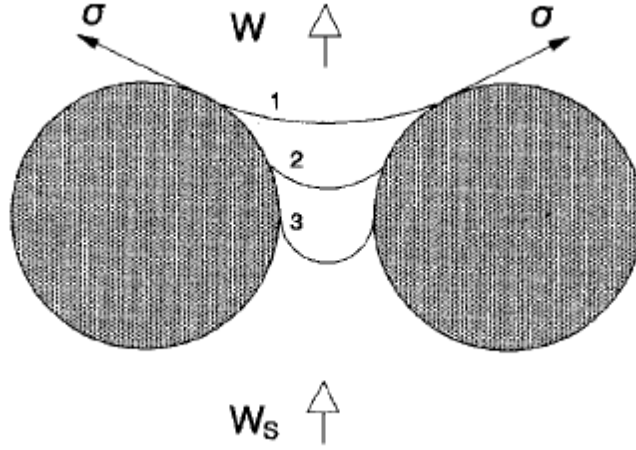


Şekil 2.10 : Erken yaş rötrenin ortam koşulları ile değişimi [13].

Beton dökümünü takiben çevre koşullarına bağlı olarak ısı dengesi sağlanana kadar betonun çevresiyle ısı alışverişi devam eder. Eğer yüzeydeki ısı, iç ısıdan az ise beton içerisinde su, ısı dengeye ulaşınca kadar buharlaşır. Yine beton ve çevresi arasında nem farkı, su buharı transferine yol açar. Ortamın rutubeti, betonun kendi rutubetinden az ise, buharlaşma rutubetin fazla olduğu taraftan kuru tarafa devam edecektir. Buna bağlı olarak betonda mikro ölçekte büzülme meydana gelecektir, bu duruma “kuruma rötresi” denir [14].

Betonda kuruma rötresinin oranı suyun buharlaşma hızından çok beton içerisindeki suyun difüzyon hızıyla ilgilidir. Çünkü betonun yüzeyine yakın kısımlardaki su, havadaki nemle çabucak dengeye ulaşırken iç bölgedeki nem dengesi, betonun difüzyona müsaade hızıyla ilişkili olacaktır (**Şekil 2.11**) [18].

Kuruma rötresi; çimento tanecikleri arasında kapiler basınç oluşumu kaynaklıdır. Boşluk çapı azaldıkça rötreye derecesi artmaktadır. Ortamdaki nem azaldıkça kapiler basınç dış yüzeyde 10 MPa dan 100 MPa'a kadar çıkabilmektedir [13].



Şekil 2.11 : Kuruma rötresinin çimento tanecikleri arasında oluşturduğu kuvvet mekanizması [13].

Basınç etkisi ile kendisine daha kolay ve kalıcı yol açan su, betonun ilerleyen zamanlarda donatısının korozyona uğramasına neden olur. Zamanla genişleyerek oluşan boşlukları da birleştirerek betonun geçirimsizliğini artırır.

2.3.4 Rötreyi etkileyen faktörler

Rötreye birçok faktöre bağlı bir oluşumdur. Bunlar sırasıyla çimento ile ilgili faktörler, ortam şartları, beton bileşimi, agrega cinsi, zaman ve eleman boyutlarıdır.

Çimento ile ilgili faktörde ısı genleşmeleri sonucunda gerilmeler etkilidir, ortam koşulları ile ilgili rötreye betonun korunması ve bakımı önem kazanmaktadır, kuruma rötresi ise hızlı buharlaşma sonucu betonun yüzeyden nem kaybetmesi sonucu yüzey çatlaklarına sebep olmaktadır.

Erken yaş rötreye çatlakları betonarme yapıların durabilitesini olumsuz yönde etkiler [19].

2.4 Isıl Çatlak Oluşumunun Engellenmesi

Beton tasarımı değiştirilemeyen durumlarda hidrasyon ısısını düşürmek de mümkün olmadığından betonda ısı gerilmelerden oluşacak çatlakları engelleyici bazı önlemler alınması gereklidir.

2.4.1 Kür yönteminin belirlenmesi

Kütle elemanlar için düşeyde 1.5m'yi yatayda ise 3m'yi aşan beton kesitleri için sıcaklık dağılımı merkezde yüksek olacak yüzeylerde daha soğuk olacak şekilde form alır. Priz süresi 4-8 saat civarındır, sonraki 16-20 saat içerisinde beton plastik durumdan, plastik-elastik duruma geçtiği süredir, 24 saat sonunda ise elastik duruma ulaşır. İlk gün boyunca Elastisite Modülü düşük, şekil değiştirme kapasitesi yüksek olur. Beton dayanım ve elastikiyet kazanmaya başladığı anda sıcaklık sebebiyle ortaya çıkan gerilmeler önem kazanır [20].

Betondaki çimento hidrasyonu azaldığında (soğumaya başladığında) ortam sıcaklığı aktif etken olur ve dış yüzey iç yüzeyden daha hızlı soğuyarak ısı gerilmelerin artmasına sebep olur. Dış yüzeyin bu etkilerden korunması amacıyla ılımlı iklimlerde beton için dış yüzeyde olması gereken ısı direnç için 0.70 sq m*deg K/W gibi bir değer elde edilmiştir. Bu değer 2.5cm kalınlığında polistren (naylon) a denk gelmektedir. Bu koruma malzemesi maliyeti yüksek olacağından korumanın tek katlı polietilen örtülerle yapılması daha uygundur [20].

Benzer olarak mineral yün örtüler ya da yakın ısı dirence sahip kauçuk örtüler de kullanılabilir. Ancak koruyucu örtülerin beton prizini alır almaz beton yüzeyine yerleştirilmesi gerektir. Betonun dökümünden sonra ortam koşullarına bağlı olarak buharlaşma korumasının hemen, ısı korumanın ise 4-8 saat aralığında yapılması gereklidir. Fazla hava sirkülasyonuna sahip (rüzgârlı) bölgelerde ve dona maruz kalma durumlarında kalınlık 2 kat artırılabilir [20].

Betonda yüzeysel rötre çatlaklarının önlenmesi içinse ikincil koruma örtüsü olarak nemi geçirmeyen naylon örtüler kullanılabilir. Kütle betonarme elemanlarda sulama ile kür uygun görülmemektedir. Beton yüzeyine nemlendirme amacıyla dökülen su yüzeyin ani olarak soğumasına sebep olarak iç-dış sıcaklık farkını önemli derecede artıracak bir etkidir.

Kalıp malzemesi de ısı koruması açısından iyi bir kür malzemesidir. Ancak maliyet ve işin ilerleyişi açısından kalıp uzun süreli olarak eleman üzerinde bırakılamayacağından koruyucu örtülerin kullanılması daha ekonomiktir. Perde, kolon gibi düşey elemanlarda uygun dayanıma ulaşması göz önüne alındığında, kalıp açma zamanı belirlenerek kalıp açılan yüzeylerde zaman kaybedilmeden kür malzemesi ile örtülmesi sağlanmalıdır.



Şekil 2.12 : Beton yüzeylerin ısı örtüleri (sol) ve naylon (sağ) ile kürlenmesi.

2.4.2 Betonun soğutulması

Kütle betonlarında dış yüzeyin korunmasının yeterli olmadığı durumlar ortaya çıkabilir, beton yapısındaki malzemelerin ısı iletimleri sıcaklığın uygun dağılımına izin vermediği durumlarda, kütle beton kesitleri soğutulmalıdır. Soğutma beton döküm öncesinde; karışım suyu, agregası soğutulması, buz atılması gibi yöntemlerle veya döküm sonrası (post-cooling); soğutma boruları döşenerek beton iç kesimleri soğutulabilir.

2.4.2.1 Betonun üretim-taşıma sırasında soğutma

Uzun süreli durabil, yüksek dayanımlı ve uzun yerleşim süresine sahip beton elde etmek için döküm öncesi malzemenin soğutulması ile mümkün olabilir. Soğutulmuş malzeme ile oluşturulan karışımın ilk sıcaklığı düşük olacağından hidrasyonun devam eden sürecinde betonun yüksek sıcaklıklara ulaşmasına engel olacaktır. Ancak çok yüksek sıcaklığa sahip iklimlerde karışıma girecek malzemelerin soğutulması da maliyet olarak fazla olduğundan etkili bir yöntem olmamaktadır.

- Karışım suyunu soğutmak,
- Karışım suyunun bir kısmının yerine buz ilave etmek,
- Agregaları kapalı stokta bekletmek,
- Agregaları kapalı konveyörler ile karışım tankına taşımak,
- Soğuk buhar serpme ile agregası stokunu soğutmak,
- Agregası rutubetini almak,
- Karışım sırasında karıştırıcıdan sıvı nitrojen eklemek,

Yukarıdaki yöntemlerle beton döküm öncesi soğutulmuş, taze beton sıcaklığı düşük tutulabilir. Masif yapılarda taze beton sıcaklığının hava sıcaklığından 6°C altında olması durumunda maksimum beton sıcaklığının olağandan 3°C daha düşük olması

sonucu çıkar. Sıcak havalarda soğutulmuş malzeme ile döküm sırasında soğuk beton ısıyı hızlı absorbe edeceğinden ve güneş ışınmasıyla da ısı alacağından yerleştirme sırasında bu etkileri kaybedebilir, soğutulmuş stoklarla yapılan kütle elemanların dökümlerinin gece gerçekleştirilmesi daha uygundur. Aşağıda örnek bir inceleme ile üretim sırasında karışıma soğuk su ve buz eklemenin, taze beton sıcaklığını azaltmadaki etkisine değinilmiştir.

- 82 kg karışım suyunun 21°C den 2°C ye düşürülmesi sonucunda taze beton sıcaklığında yaklaşık 3°C azalma gözlemlenmiştir [20].
- 82 kg karışım suyunun $\frac{3}{4}$ ü buz olarak teşkil edilip 21°C den 2°C ye düşürülmesi sonucunda taze beton sıcaklığında yaklaşık 12°C azalma gözlemlenmiştir [20].

2.4.2.2 Beton döküm sonrası soğutma

Kütle betonlarda en iyi sonuç veren sıcaklık kontrol yöntemi betonun içerisine soğutma boruları döşenmesidir. Bu soğutma boruları ince kesitli olup içerisinde genellikle soğutulmuş su kullanılmaktadır. Soğutma süresi bir kaç gün gibi kısa bir süre olabileceği gibi bir ay gibi uzun süreçlerde soğutmada mümkündür, betonda ısıl şok yaşanmaması için soğutma borularının kesitleri projeye uygun yerleşimi ve soğutma suyu sıcaklığının uygun seçilmesi gereklidir [21].

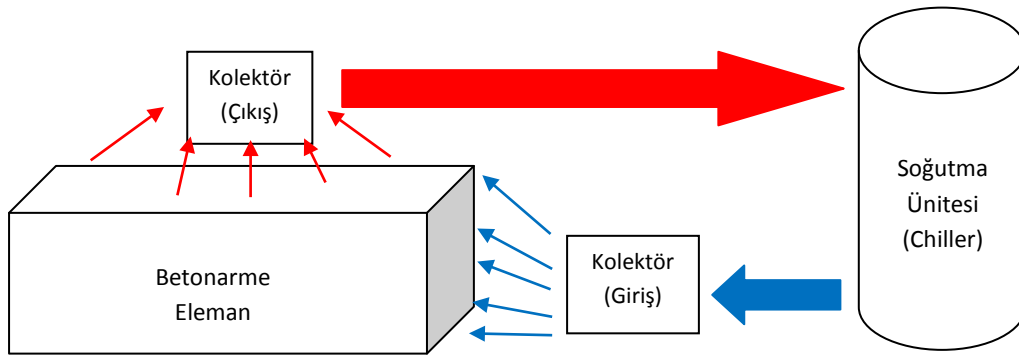
Soğutma suyu boruları alüminyum ya da PVC olabilir, alüminyumda ısı iletkenliği iyi olmasına karşın eğilip bükülmeye karşı hassastır. Boru uzunlukları 183-366 m arası değişebilir, su sıcaklığı 3°C ye kadar düşük olabilir, boru birleşimlerinin az olması tercih edilmelidir. Borular yüksek basınca karşı dayanıklı olmalı ve büyük alanlı dökümler için birbirine bağlantısı mümkün olacak şekilde seçilmelidir. Bir dağıtımdan çıkan boruların uzunluklarının aynı olması su basınçlarının aynı seviyede olmasını sağlayacağından daha uygundur. Beton döküm öncesinde tüm boru bağlantıları su sistem kapasitesine göre en yüksek su basıncında test edilmelidir. Her dağıtımda bir su saati bulunmalı ve beton soğutulması sırasında toplam geçen debiler kayıt edilmelidir [20].

Sisteme giren suyun sıcaklığı giriş ve çıkış olarak kaydedilmelidir, aradaki sıcaklık farkından tüm beton kütleinin ne kadar sıcaklık farkına neden olduğu bilinebilir.



Şekil 2.13 : Döküm sonrası soğutma sistemi (soğutma boruları).

Soğutma boruları beton içerisinde teşkil edilir. Soğutma süresi bittikten sonra içleri beton koşullarını sağlayabilen grout harcı gibi akışkan ancak rötresi az olan bir malzeme ile komple doldurulmalıdır. Soğutma sistemlerinde; soğutucu sistemler (yoğunlaşma prensibiyle çalışan sistemler) ve basınçlı pompalar ile kolektörler kullanılır. Soğutma süresi boyunca su sürekli devir daim eder. Devir daim sürecinde betonun ısıttığı su tekrar olması gereken dereceye ayarlanır. Soğutma suyu hattı boyunca, suyun sıcaklığını sabit tutabilmek için yalıtımlı ya da sonradan yalıtılmış borular kullanılmalıdır. Bu borular beton yüzeyinden kesilmek koşuluyla, içerisinde gömülü olarak bırakılır.



Şekil 2.14 : Soğutma suyu devir daimi

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Betonda meydana gelmesi muhtemel çatlakların oluşma riskini ve betonda oluşabilecek maksimum sıcaklık değerinin analiz edildiği bu çalışmada kullanılan “4C Temperature Stress” analiz programının uygulanması aşağıda belirtildiği gibi sistemli bir şekilde anlatılmış ve açıklanmıştır.

3.1 Simülasyon Amacı

Gerilmeler altındaki betonda şekil değiştirmeler oluşacaktır. Bu şekil değiştirme değerlerinin Elastisite modülü ile çarpımından beton elemanın maruz kalacağı çekme gerilmeleri hesaplanabilmektedir. Betonun çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı değerininin 0,9 katı olarak ifade edilir. Betonun ısıl gerilme altında maruz kaldığı çekme gerilmesinin, çekme dayanımına olan oranı çatlak riski olarak tarif edilmiştir [22].

Analiz programında betonun sıcaklık ve çatlak riskinin değerlendirilmesinin yanı sıra bunların hangi özelliklerden ve koşullardan nasıl etkilendiğini izlemek de mümkündür. Bu gözlem beton tasarımından kaynaklı kusurları engellemeye yardımcı unsurların belirlenmesinde ve betonun özelliklerinin geliştirilmesinde etkilidir. Betonu koruma amacıyla kullanılan kür koşullarıyla birlikte maruz kaldığı çevre şartlarının nasıl değiştirileceği yönünde uygulayıcıya imkân vermektedir. Böylece en uygun şartlarda, en uygun betonu üretmek için hangi durumların sağlanması gerektiğinin koşulları (kür yöntemleri) belirlenebilir.

3.1.1 Yazılım özellikleri

Simülasyon programı malzemelerin karakteristik özellikleri yardımıyla reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısı enerjisini sonlu eleman yöntemiyle sıcaklık verilerine dönüştürerek takip edilebilir düzeyde uygulamaya yakın sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Yazılım için bazı özellikler aşağıda belirtildiği şekilde verilmiştir [23].

- Sonlu eleman yöntemi ile ısı oluşumları hesaplanır.

- 2 boyutlu sistemleri 2 yönde çözümlenerek düzlem kesitte hesaplar.
- Çimentodaki ısı gelişimini, sıcaklık ve hidrasyonun bir fonksiyonu olarak tanımlar.
- Çevresel faktörler, kalıp sökümü, kür gibi çeşitli durumlar hesaba katar.
- Eğer varsa soğutma boruları veya ısıtma kabloları gibi betonun sıcaklığını dengeleyici önlemler simülasyonda tanımlanır.
- Betonun sertleşmesi sürecinde malzeme özellikleri ile gerilme analizleri yapar.
- Sünme veya otojen rötre gibi betonu tanımlayan tüm parametreleri veri girdisi olarak kullanır.

3.1.2 Genel ısı denklemler

Betonun ısı gelişiminin sonucu oluşacak gerilmeleri önceden tahmin etmek için öncelikle bu gerilmelere sebep olan hidrasyon ısı (3.1) ve olgunluk gelişiminin (3.2) genel denklemleri tanımlanmıştır. Beton dökümü sonrası kimyasal reaksiyonlar sonucunda hidrasyon ile ısı artmaya devam eder, bu ısı gelişimi hidrasyon derecesi aşağıdaki formülle ifade edilir [23].

$$\alpha = We/W \quad (3.1)$$

α = Hidrasyon derecesi

We = Oluşan ısı miktarı

W = Tüm hidrasyon sonucu oluşan ısı miktarı

Farklı ısı ortamları sebebiyle oluşacak sıcaklık artışı da farklı olacağından bu durumu zamana bağlamak amacıyla olgunluk fonksiyonu oluşturulmuştur. Olgunluk fonksiyonu Arrhenius denklemi yardımıyla oluşturulur [23].

$$f(T) = ke^{-(\emptyset/T)} \quad (3.2)$$

f(T) = Olgunluk fonksiyonu

k = Orantılılık Sabiti

\emptyset = Aktivasyon enerjisinin Gaz sabitine oranı

Simülasyon programı bu denklemler vasıtasıyla betonun farklı davranışları için oluşacak durumları yani sıcaklık-gerilme ilişkilerini hesaplar. Sertleşmekte olan

betonda iç gerilmelerin oluşumu ile ilgisi olan özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

1. Dayanım gelişimi,
2. Elastik şekil değiştirme,
3. Isıya bağlı şekil değiştirme ve ısıl gerilmeler,
4. Otojen rötre şekil değiştirmesi,
5. Sünme şekil değiştirmesi,
6. Çatlama şekil değiştirmesi.

3.1.3 Sıcaklık hesabı

Sonlu eleman yöntemiyle hesap yapabilmek için aşağıdaki basit denklem 3.3 ile ifade edilen ısıl denge ilişkisi kullanılır [23].

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho c T - Q = 0 \quad (3.3)$$

q_i = Isı akış vektörü

x_i = Koordinat sistemi

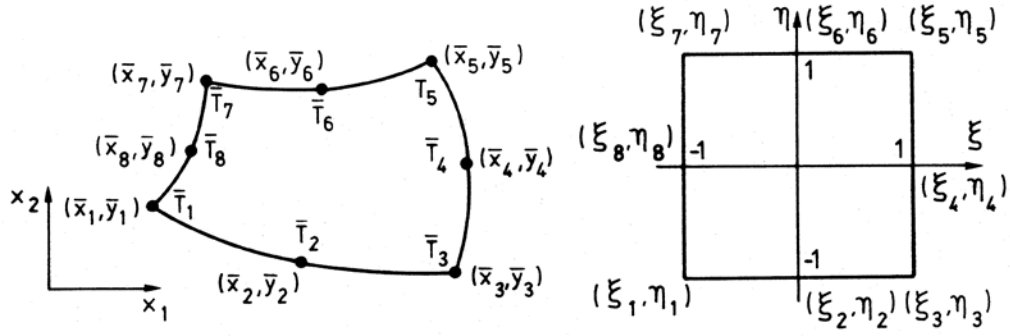
ρ = Özgül ağırlık

c = Özgül ısı

T = Sıcaklık

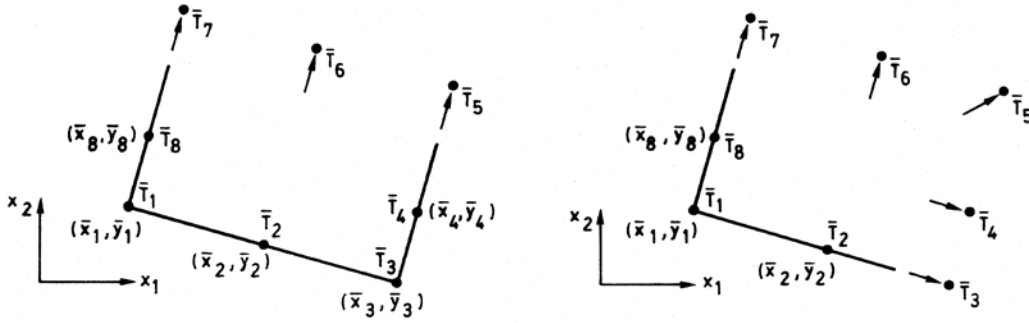
Q = Açığa çıkan ısı

Genel ısı denkleminin ağırlık fonksiyonları ile çarpımı ve bünyesel hacim ile integrali sonucunda birim malzeme için ısı akış vektörleri bulunur. Bu vektörler yardımıyla 8 düğüm noktalı izo parametrik eleman için geometri ve serbestlik dereceleri Şekil 3.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ) [23].

Sonlu eleman yöntemi ile betonun dökümü sırasında sınırlanan komşu elemanlar ile ısı alışverişini hesaplamak zordur bu sebeple eleman sonsuzlaştırılarak bu 8 düğüm noktalı karmaşık ilişki 5 düğüm noktalı tek sonsuz eleman veya 3 düğüm noktalı çift sonsuz eleman şeklinde basitleştirilir (**Şekil 3.2**).



Şekil 3.2 : Beş düğüm noktalı tek sonsuz eleman (sol), 3 düğüm noktalı çift sonsuz eleman(sağ) [23].

3.1.4 Gerilme ve şekil değiştirme hesabı

Sıcaklık dağılımları gerilme ve şekil değiştirmeler için veri olarak kullanılır. Sıcaklık dağılımlarında olduğu gibi gerilme ve şekil değiştirme hesaplamalarında sonlu eleman yöntemi kullanılır. Şekil değiştirmelerin gerilme ile ilişkisini hesaplamada şekil değiştirme denkleminde yararlanılır (3.4).

$$\varepsilon_{ij} = D_{jipq} * \varepsilon_{pq} - \sigma_{ji}^o \quad (3.4)$$

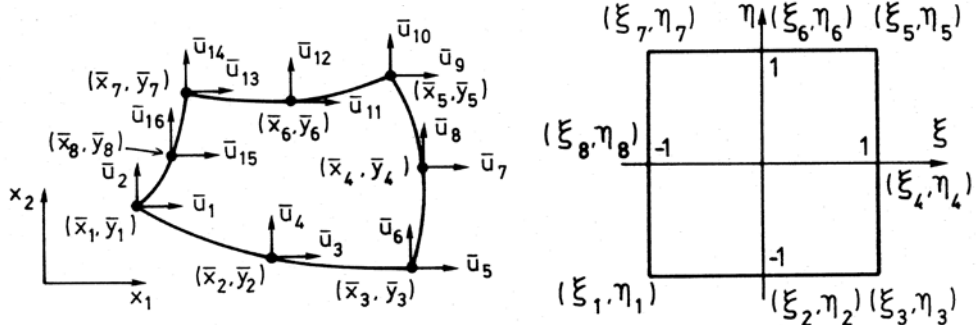
σ_{ji}^o = Pseudo Gerilmesi

D = Malzeme sertliği

ε = Şekil değiştirme (kinematik ilişkiden)

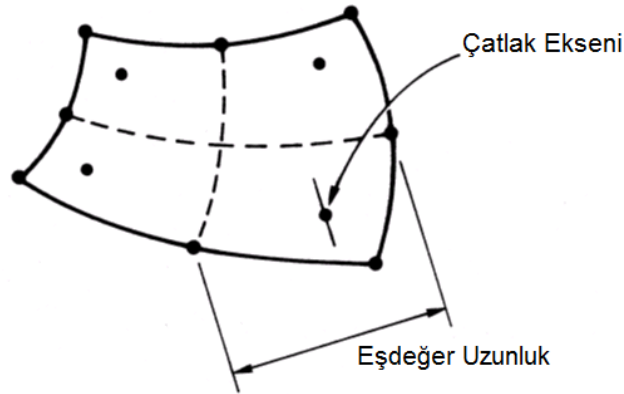
Şekil değiştirme denklemleri “u” şekil değiştirme vektörlerinden oluşur (Şekil 3.3).

$$\varepsilon_{pq} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_p}{\partial x_q} + \frac{\partial u_q}{\partial x_p} \right] \quad (3.5)$$



Şekil 3.3 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için gerilme ve şekil değiştirme geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ) [23].

Çatlamaya sebep olan gerilmenin tanımlanması için eşdeğer uzunluk L_α tanımlanmıştır. Bu uzunluk, çatlak oluşan yerdeki sonlu eleman boyutuyla direkt ilişkilidir. Eşdeğer uzunluk; çatlak eksenine dik olan, eleman alanı dahilindeki maksimum uzunluğa verilen addır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Sekiz düğüm noktalı izo parametrik eleman için gerilme ve şekil değiştirme geometri ve serbestlik dereceleri (sol), Birim eleman (sağ) [23].

3.1.5 Beton olgunluk ve dayanım gelişimi hesabı

Teoride beton için olgunluk terimi betonun farklı sıcaklıklarda çimento hidrasyonunun derecesinin karşılaştırması anlamına gelmektedir. ASTM C 1074 standardında 2 farklı olgunluk hesap yönteminden bahsedilmiştir [24].

1. *Sıcaklık-Zaman* faktörünün hesaplanmasıyla (3.6),

$$M(t) = \sum(T_a - T_0) * \Delta t \quad (3.6)$$

M(t) = t zamanındaki sıcaklık-zaman faktörü, derece-gün ya da derece-saat

T_a = Zaman aralığındaki betonun ortalama sıcaklığı, °C

T₀ = t zamanındaki sıcaklık, °C

Δt = Zaman aralığı, gün veya saat

2. Belirli sıcaklıktaki eşdeğer-yaşın hesaplanmasıyla (3.7),

$$t_e = \sum e^{-Q(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_s})} * \Delta t \quad (3.7)$$

t_e = T_s sıcaklığındaki eşdeğer yaş, gün veya saat

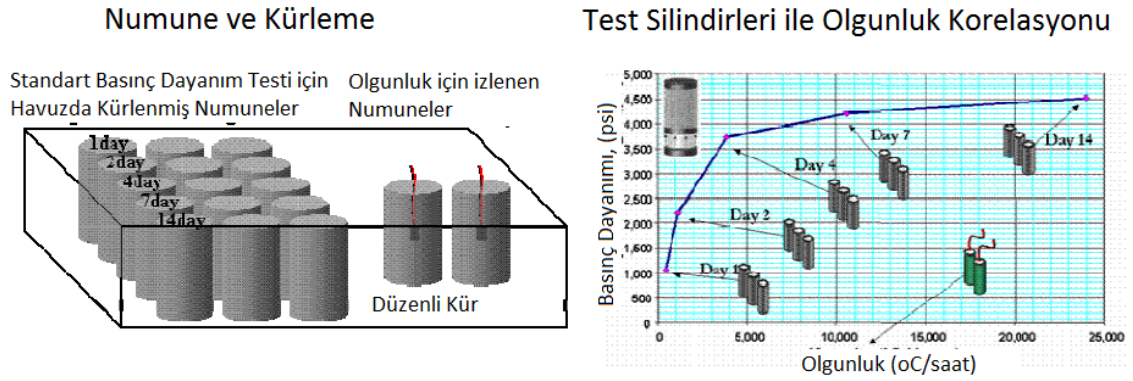
Q = Gaz sabitinin aktivasyon enerjisine oranı, K

T_s = Zaman aralığındaki betonun ortalama sıcaklığı, K

T_s = Belirli sıcaklık, K

Δt = Zaman aralığı, gün veya saat

Not: Kelvin sıcaklığı (K) yaklaşık olarak 273 °C + Santigrat derece kabul edilmelidir.



Şekil 3.5 : Olgunluğun dayanım ile kalibrasyonu [25].

Pratikte ise olgunluğu ifade edebilmek için 20°C ortam koşulunda kürlenene betonun sıcaklığının takibi ile aynı koşullarda kür havuzunda bekletilen numunelerin farklı günlerde kırılmaları sonucu elde edilen basınç dayanımlarının korelasyonu ile olgunluk tanımlanabilir (Şekil 3.5) [25].

Beton için olgunluk teriminin tanımlanmasıyla beton özelliklerinden basınç dayanımı, Elastisite modülü ve çekme dayanımının olgunluk ile gelişimi incelenebilir.

- Basınç dayanımı için birçok hesaplama mevcut iken bunlardan en yaygın kullanılanı eşdeğer-yaş metoduyla kullanılan formül 3.8 dir [26].

$$f_c(t_e) = f_{cult} * \exp \left\{ - \left(\frac{\tau_s}{T_e} \right)^{\beta_s} \right\} \quad (3.8)$$

$f_c(t_e)$ = Basınç dayanım gelişimi, MPa

f_{cult} = Basınç testleri sonucu en yüksek basınç dayanımı parametresi, MPa

τ_s, β_s = Uygun parametreler.

- Elastisite modülü kısıtlanmış gerilme ve şekil değiştirmeler arasındaki bağıdır. Karışım oranlarına, birim ağırlığa, olgunluğa, agrega, dayanım ve nem koşullarına bağlı olarak değişebilir [26].
- Betonun erken yaşta çatlama modelinin oluşturmak için çekme dayanımı çok önemlidir. Betonun çekme dayanımı gelişiminin agrega dayanımı, yassılığı, boyutu, dağılım oranı ve çimento malzemesinin özelliklerine bağlıdır [26].

Betonun olgunluk gelişimi ile incelenen bu 3 özelliğin olgunluğa bağlı değişim hızlarının ilişkisi ise aşağıdaki sıralamada verilmiştir [26].

Elastisite Modülü > Çekme Dayanımı > Basınç dayanımı

3.2 Simülasyon Verileri

“4C Temperature Stress” programında; kesitlerin simülasyonu, kullanılan betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine ait verileri ile birlikte, betona uygulanan kür koşulları ve betonun dökümden sonra maruz kaldığı çevre koşulları ile tanımlanmıştır. Böylece betonun özellikleri ve çevre koşulları dikkate alınarak belirli kesitteki yapının zamana bağlı olarak sıcaklık ve çatlak risk gelişiminin değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Yapının en kritik kesitinin gerçeğine uygun şekilde modeli hazırlanarak kullanılan beton özellikleri, çevre şartları bu simülasyonda tanımlanmıştır.

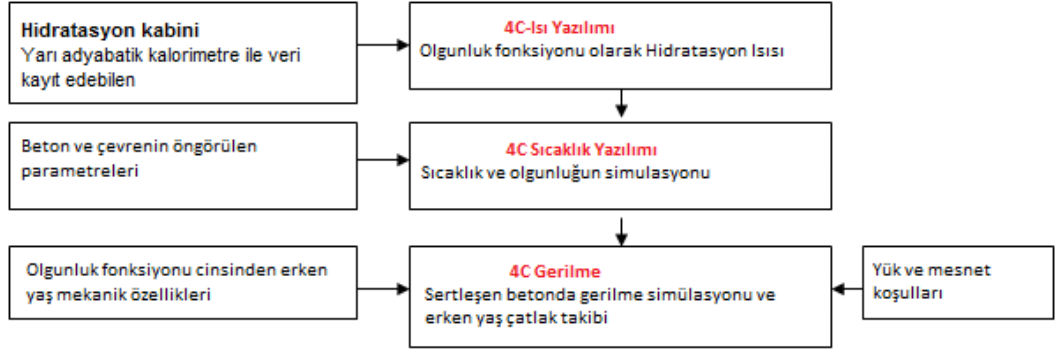
Simülasyon girdileri olarak beton özellikleri ve laboratuvar koşullarında yapılmış yarı-adiyabatik (kalorimetre), sünme, rötre verileri kullanılmıştır. Bu bilgiler veri tabanına girilerek malzeme tanımlanmıştır. Daha sonra kritik kesitler tanımlanarak, yapının maruz kalacağı çevre ve kür koşullarına göre hesaplamaları yapılmıştır. Kesitlerde mevcut ise soğutma boruları ile soğutma suyu bilgileri tanımlanmıştır. Simülasyon çalışması sonucunda dökümü yapılan beton kesiti üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı, gerilme dağılımı ve çekme gerilmesi/çekme dayanım oranı elde edilebilir.

“4C Temperature and Stress” yazılımı geçici sıcaklık değişimlerini kesitler üzerinden ısı denklemleri ile sayısal olarak çözmektedir. Sıcaklık hesaplamaları aşağıdaki verilere dayanır [28]:

- Betonun hidratasyon ısısı,
- Taze beton sıcaklığı ve döküm hızı verileri,
- Rüzgar ve çevresel hava koşulları,
- Kalıp türü, kür malzemesi ve kalıp açma süreleri,
- Soğutma, Isıtma boruları ve ısıtma örtüleri

“4C Temperature and Stress” yazılımı perde temel gibi prizmatik yapılar için gerilmeleri 3 boyutlu analizler ile gerilme dağılımının sınır koşullar arasında merkezde sabit kalması koşuluyla düzlem kesitin düzlem olması koşulunda hesaplama yapmaktadır. Normal gerilmelerin kesitler üzerinde dağılımı; geçici hesaplama diğer adıyla “Karşılanmış Düzlem Metodu” ile çözümlenir. “4C Temperature and Stress” yazılımında bu metot Poission oranı ile bağlantılı olarak hesaplanmaktadır. Gerilme hesaplamaları aşağıdaki verilere dayanır [27]:

- Mekanik özelliklerin gelişimi (Elastisite modülü, Poission oranı, sünme parametreleri),
- Isıya bağlı deformasyonlar,
- Otojen rötre,
- Dış yükler ve mesnet koşulları,



Şekil 3.6 : “4C-Isı, 4C-Sıcaklık, 4C-Gerilme kullanım amaçları [27].

Yazılım kılavuzunda belirtilen giriş verilerinin özeti Çizelge 3.1 te verilmiştir [27].

Çizelge 3.1: Simülasyon hesaplarında kullanılacak malzeme özellikleri.

Malzeme Özelliği	Sıcaklık			Sıcaklık ve Gerilme		
	Beton	Zemin	Kalıp / Kür	Beton	Zemin	Kalıp / Kür
Özgül Ağırlık ve Isı	+	+	+	+	+	+
Isıl İletkenlik	+	+	+	+	+	+
Isıl Gelişimi	+	+	+	+	-	-
Elastisite Modülü	+	-	-	+	+	+
Isıl Genleşme Katsayısı	+	-	-	+	+	+
Poisson oranı	-	-	-	+	+	+
Otojen rötre	-	-	-	(+)	-	-
Sünme	-	-	-	(+)	-	-
Basınç Dayanımı	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Çekme Dayanımı	(+)	(+)	(+)	+	+	+

+ Gerekli

- Gerekli Değil

(+) Opsiyonel. Basınç dayanım değerleri sadece betonun olgunluk ile gelişimi sırasında hesaplanması için kullanılabilir. Basınç dayanımı ve çekme dayanımı sıcaklık analizini etkileyici değildir.

3.2.1 Malzeme özelliklerinin bulunduğu veri tabanının oluşturulması

Programın ilk aşamasında kullanılacak her bir malzemenin gereken özellikleri programda belirtilmektedir. Betonun özellikleri, laboratuvar ön testleri sonuçları girilerek tanımlanmıştır, yapının temas edeceği yüzeyin yapısı (kum, çakıl, kaya,

beton vb.) ve kürde kullanılan malzemeler ile bunların ısıll özellikleri bu bölümde tanımlanır

Hesaplamalar ve ölçümlerde kullanılan beton C40/50 basınç dayanım sınıfı, **Çizelge 3.2** de belirtilen karışım oranlarından oluşmaktadır.

Çizelge 3.2: C40 Tip betonun karışım ve su/çimento oranları.

Dayanım Sınıfı:	C40-APC	
Su Çimento Oranı:	0,38	
Malzeme	Tip	
Çimento	CEM I 42.5 N	275
Uçucu Kül	Bağlayıcı	50
Mikro silika	Bağlayıcı	15
Hiper akışkanlaştırıcı	Katkı	3.85
Hava sürükleyici	Katkı	0.385
Su	Yerel	122
İnce Agrega	Doğal Kum	404
İnce Agrega	Kırma Kum	467
Kaba Agrega	No.1	522
Kaba Agrega	No.2	499

Beton karışımı sahada imal edildiğinden **Çizelge 3.2** deki değerler tolerans değerleri izin verdiği ölçüde değişebilmektedir. Beton için karışım oranları yazılıma girilerek gradasyon eğrileri elde edilmiştir.

Simülasyon hesaplarında kullanılan veriler; karışımlardan elde edilen tüm laboratuvar sonuçları biraraya getirilerek, son değer (ön test ortalama sonuçlarından), zaman parametresi ve eğim parametresidir. Bunlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Kalorimetre (adiyabatik) testleri sonucu değer ve parametreler.

Son Değer	Zaman Parametresi	Eğim Parametresi
Y_A kJ/kg	τ [h]	α
355,8	27,27	0,89

Ayrıca, bu bölümde yapının temas ettiği yüzeye ait malzeme özellikleri de tanımlanmıştır. İstasyon yapısı çevresi açık olup 3 yüzeyde döküm sonrası malzeme bulunmayacaktır, taban ise zemin malzemesinin ortalama aşağıdaki özellikleri kullanılarak tanımlanmıştır.

- Taban Zemini Spesifik Isı Kapasitesi 1,1 kJ/kg/°C
- Taban Zemini Isıl İletkenlik Katsayısı 8 kJ/m/h°C

Seçilen kür ve kalıp malzemeleri ısıl özellikleri ise veri föylerinden alınarak ortalama aşağıda **Çizelge 3.4** te belirtildiği gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 3.4 : Kalıp ve kür malzemelerinin ısıl özellikleri.

Malzeme Tipi	Kalınlık	Isıl İletkenlik
Kalıp malzemesi	21 mm	0,54 kJ/mh°C
Formfleks yalıtım malzemesi	5 mm	0,144 kJ/mh°C
Formfleks yalıtım malzemesi	10 mm	0,288 kJ/mh°C

Betonu oluşturan malzemelerin, yapının temas ettiği zeminin ve kullanılacak betonun tanımlanması ile malzeme özelliklerinin bulunduğu veri tabanı ilk aşamada tamamlanmış olmaktadır. Program içerisinde saklanan bu bilgiler her bir farklı simülasyonda ve analizde kullanılabilir.

Basınç dayanım kriteri **Çizelge 3.5** teki gibi alınmıştır.

Çizelge 3.5 : Ortalama sabitlenmiş basınç dayanım değer ve parametreleri.

Son Değer	Zaman Parametresi	Eğim Parametresi
Y_C [MPa]	τ [h]	α
92,9	88,82	0,43

Betonun yarmada çekme dayanımı ortalama sonuçlardan **Çizelge 3.6** daki parametreler alınmıştır.

Çizelge 3.6 : Ortalama sabit yarmada çekme dayanım değer ve parametreleri.

Son Değer Y_S [MPa]	Zaman Parametresi τ [h]	Eğim Parametresi α
8,05	60,47	0,41

Betonun elastisite modülü olarak yapılan testler ortalaması **Çizelge 3.7** deki parametreler esas alınmıştır.

Çizelge 3.7 : Elastisite modülü ortalama değer ve parametreleri.

Son Değer Y_E [GPa]	Zaman Parametresi τ [h]	Eğim Parametresi α
39,9	11,9	1,64

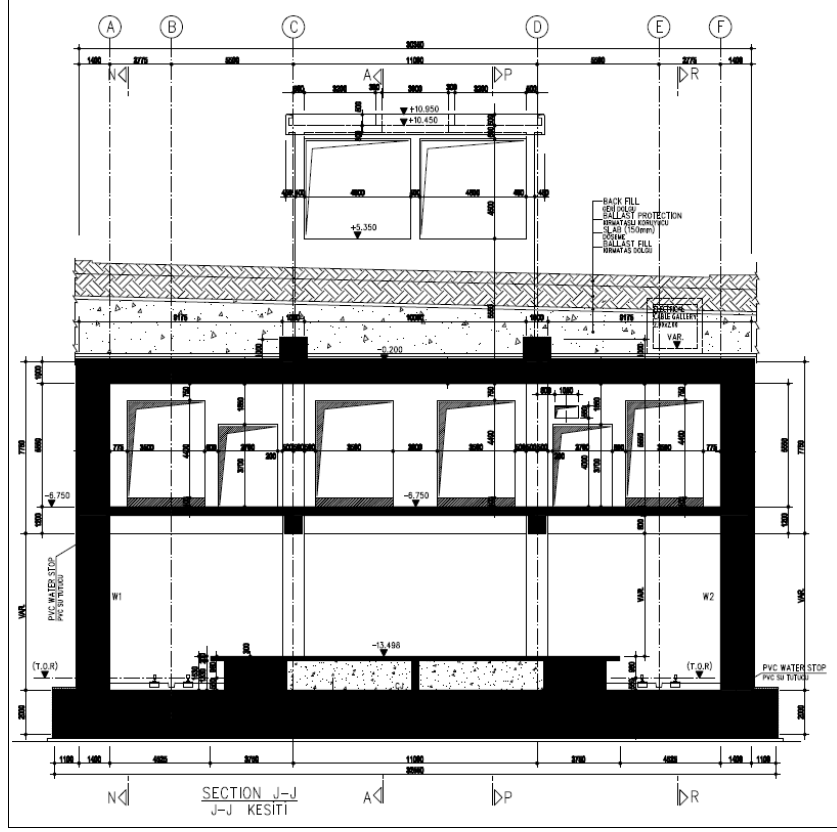
Erken yaş rötre sonuçları da simülasyonda veri olarak kullanılmıştır. Sertleşen betonda elde edilen aktivasyon enerjisi değeri ise 355,8 KJoule /gr olarak kullanılmıştır.

3.2.2 Kesitler ve soğutma gerekliliği

Yeraltı tren istasyon yapısı için hazırlanan modelde projeye göre su geçirimsiz olması gereken yapılarda simülasyon yapılması ön görülmüştür. Bunlar **Şekil 3.7** de de görüldüğü üzere,

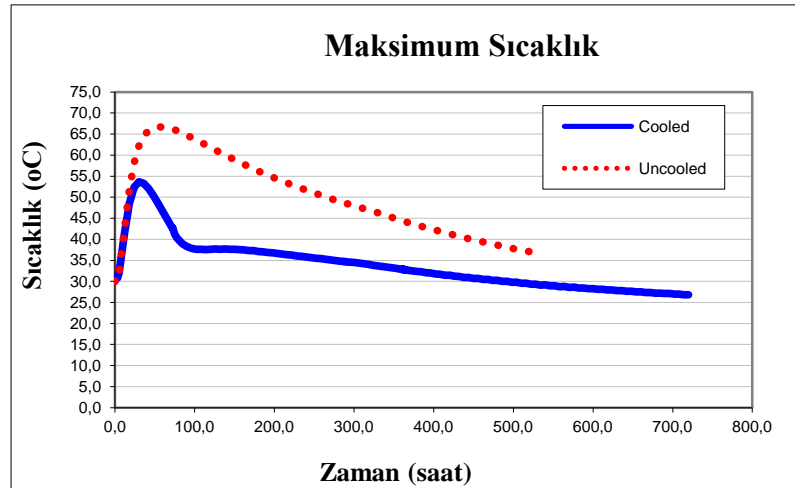
- Temel, 2,0m
- Perde, 1,4m
- Üst Döşeme, 1,0m

kesitlerdir.



Şekil 3.7 : Yeraltı tren istasyon yapısı genel kesit (J-J).

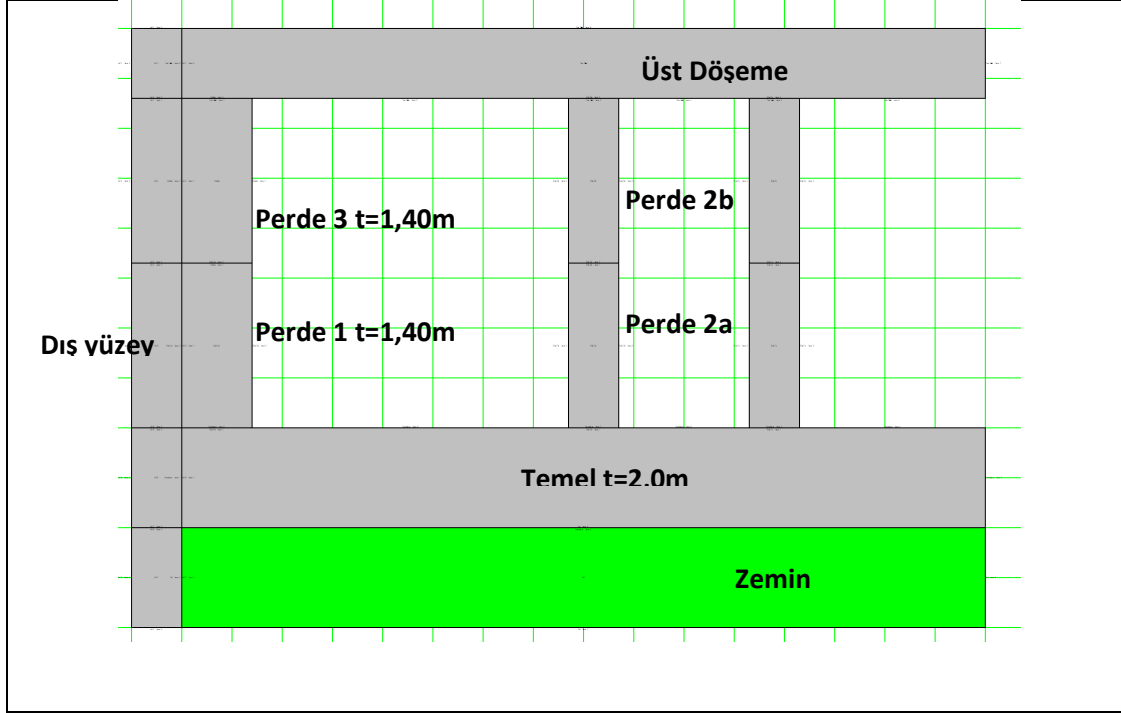
Kesitler ile ön hesap yapılarak maksimum sıcaklığın 65°C yi geçtiği görüldüğünde soğutma yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Beton sıcaklığının 65°C yi aşmaması gereken soğutma koşulları için perde kesitinde tek, temel kesitlerinde çift sıra soğutma borusu teşkil edilmiştir.



Şekil 3.8 : Soğutulmuş(mavi) ve soğutulmamış (kırmızı) kesitte sıcaklık vs. zaman grafiği.

Soğutma boruları beton içerisinde gömülü olarak teşkil edilecek olup, 32 mm dış kalınlığa, 2 mm et kalınlığına, 0.20 W/mK. Isıl iletkenliğe sahip PVC boru seçilmiştir.

Soğutma borularının kesit içerisinde eşit aralıklarla ve simetrik olarak yerleştirilmesi öngörülmüştür.



Şekil 3.9 : İstasyon yapı kesiti ve kalınlıkları.

İncelenmesi planlanan 2 simülasyon kesiti Şekil 3.9 da “Perde ” ve “Temel” kesitlerinin istasyon yapısı içinde yerleşimi görülmektedir.

3.2.3 Simülasyon modelleri seçilmesi

Malzeme tanımları yapıldıktan sonra simülasyon modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Modellerin oluşumunda farklı çatlak önleyici mekanizmalar (kür koşulu, soğutma ya da ısıtma yöntemi gibi) sabit ortam koşulu için modellenir. Uygun önleyici mekanizma için örnek model Çizelge 3.8 de verilmiştir [27].

Çizelge 3.8 : Temel için sıcaklık ön hesap modeli.

	Modeller			
Ortam Koşulları	bsnone	bscpipe	bsheat	bsheat
Rüzgâr	2.5 m/sn	2.5 m/sn	2.5 m/sn	2.5 m/sn
Sıcaklık	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
Taze Beton Sıcaklığı	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
Beton Tipi	C40-BC	C40-BC	C40-BC	C40-BC
Simülasyon Aralığı	1 ay	1 ay	1 ay	1 ay
Buharlaştırma ve soğumaya karşı koruma	10 gün boyunca 1mm kalınlığında naylon ile (39W/m ² /°C)	10 gün boyunca 1mm kalınlığında naylon ile (39W/m ² /oC) ve 3-72 saat aralığında soğutma borusu ile soğutma (15°C, 160 W/m ² /°C)	10 gün boyunca 20mm kalınlığında strafor (2 W/m ² /°C) ve 3-180 saat aralığında ısıtma kablosu ile ısıtma (20W/m)	10 gün boyunca 20mm kalınlığında strafor (2 W/m ² /oC)
Maks. Sıcaklık	42 °C, 72 saat sonunda	38 °C, 38 saat sonunda	51 °C, 108 saat sonunda	43 °C, 75 saat sonunda
Sıcaklık Farkı	14 °C, ortalama ile yüzey arasında	12 °C ortalama ile soğutma borusu arasında, 7 °C ortalama ile yüzey arasında	14 °C, koruma kaldırıldıktan sonra ortalama ile yüzey arasında	12 °C, koruma kaldırıldıktan sonra ortalama ile yüzey arasında
Olgunluk	4 gün sonra olgunluk yaşı 215 Olgunluk-saat	4 gün sonra olgunluk yaşı 185 Olgunluk-saat	3 gün sonra olgunluk yaşı 210 Olgunluk-saat	3 gün sonra olgunluk yaşı 185 Olgunluk-saat

Yapının su geçirimsiz elemanlarının inşası programa göre 2 sene süreceğinden farklı mevsimlerde farklı beton ve hava sıcaklıkları olacaktır. Bu farklı ortam koşullarına uyum sağlayabilmek için **Çizelge 3.9** da belirtilen ortam koşulları oluşturulmuştur. Hava (ortam) sıcaklıkları İstanbul için yaklaşık değerlerden alınmıştır.

Çizelge 3.9 : Öngörülen simülasyon ortam koşulları ve beton sıcaklıkları.

Model	Ortam Sıcaklığı °C	Taze Beton Sıcaklığı °C
Kış Koşulu	5	10
Bahar/Güz - 1 Koşulu	15	20
Bahar/Güz - 2 Koşulu	25	25
Yaz Koşulu	30	33

Koşullar belirlenirken betonun hava sıcaklığından ortalama 5°C yüksek olduğu varsayımıyla hareket edilmiştir. Yaz koşulunda ise şartnamede izin verilen en yüksek beton sıcaklığı (33°C) esas alınmıştır. Simülasyon hesaplarında taze beton sıcaklığının maksimum beton sıcaklığına önemli derecede etkisi olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.10 : Simülasyon yapılacak kesitlerin farklı ortam koşulları.

No	En Kesit	Yapı Elemanı	Ortam Koşulu
1	İstasyon Genel J-J Kesiti	Temel Döşemesi 2.0m	Kış Koşulu
2		Temel Döşemesi 2.0m	Bahar/Güz Koşulu
3		Temel Döşemesi 2.0m	Yaz Koşulu
4		Dış Duvar 1.4m	Kış Koşulu
5		Dış Duvar 1.4m	Bahar/Güz Koşulu
6		Dış Duvar 1.4m	Yaz Koşulu

Çizelge 3.10 da hesaplama yapılan 6 farklı durum gösterilmiştir.

3.2.4 Çevre ve kür koşullarının tanımlanması, döküm sırası belirlenmesi

Farklı hava koşulları için yapı elemanı kesitlerine göre soğutma özellikleri, kalıp sökümü gibi değerler ile betonun simülasyon verileri tamamlanmıştır. Bir sonraki döküm zamanı betonun faydalı koşullar altında yeterli olgunluğa ulaştığı en yakın zamana göre alınmıştır.

Çizelge 3.11 : Öngörülen kalıp açma, soğutma ve kür süreleri.

Hava Koşulu	Yapı Elemanı	Soğutma		Kalıp Söküm	Kür Bitimi	Bir Sonraki Döküm
		Süre	Sıcaklık			
Kış	Temel Döşemesi (t=2m)	4 gün	9°C	3 gün	25 gün (10 mm formflex)	5 gün
	Duvar (t=1.4m)	4 gün	9°C	3 gün	30 gün (10 mm formflex)	5 gün
Bahar/Güz - 1	Temel Döşemesi (t=2m)	4 gün	9°C	3 gün	25 gün (5 mm formflex)	5 gün
	Duvar (t=1.4m)	4 gün	9°C	3 gün	25 gün (5 mm formflex)	4 gün
Yaz	Temel Döşemesi (t=2m)	2 gün	12°C	3 gün	20 gün (5 mm formflex)	4 gün
	Duvar (t=1.4m)	2 gün	12°C	3 gün	20 gün (5 mm formflex)	4 gün

Daha sonra yapı elemanlarının döküm sıraları öngörülerek simülasyonda yapıların birbirleri ile olan sıcaklık etkileşim durumlarını çıkarmak için döküm sırası şablonu çıkarılmıştır. Çizelge 3.12 de, Çizelge 3.11 deki kalıp açma süreleri esas alınarak oluşturulmuş kış, bahar/güz ve yaz durumları için örnek döküm sıra çizelgesi gösterilmiştir. Döküm sıraları devam olarak ikinci kademe duvar ve üst döşemenin döküm zamanları da eklenerek uzatılabilir ancak burada elemanların birbirinden ısı

etkileşimleri önemli olduğundan ikinci kademe ve sonrası için planlama gösterilmemiştir.

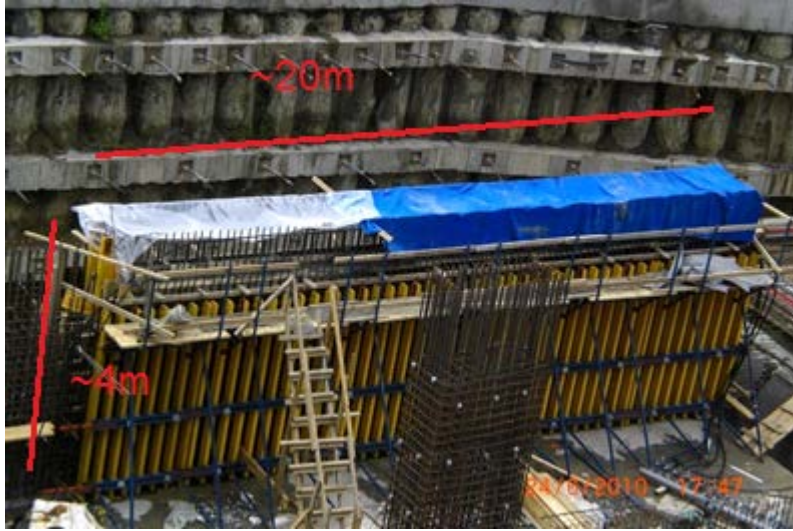
Çizelge 3.12 : İstasyon kesitinde bulunan örnek eleman döküm sıraları.

Tüp İstasyon Genel Kesiti için Döküm Sırası		Kış		Bahar/Güz		Yaz	
Kısım	Aktivite	Saat	Gün	Saat	Gün	Saat	Gün
Temel Döşemesi	Döküm	0	0	0	0	0	0
Temel Döşemesi	Soğutma Başlangıcı	-2	0	-2	0	-2	0
Temel Döşemesi	Kalıp Sökümü	72	3	72	3	72	3
Temel Döşemesi	Soğutma Bitimi	96	4	96	4	48	2
Kademe 1 Duvar	Döküm	120	5	120	5	120	5
Kademe 1 Duvar	Soğutma Başlangıcı	120	5	120	5	120	5
Kademe 1 Duvar	Kalıp Sökümü	192	8	192	8	192	8
Kademe 1 Duvar	Soğutma Bitimi	216	9	216	9	168	7
Temel Döşemesi	Kür Bitimi	600	25	600	25	480	20
Kademe 1 Duvar	Kür Bitimi	840	35	720	30	600	25

3.2.5 Yük ve mesnet koşullarının belirlenmesi

Yapıda simulasyonu yapılması öngörülen perde ve temel su geçirimsiz elemanları için mesnet koşulları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Temel döşeme betonu tamamı zemin üzerine oturacak şekilde mesnetlendirilmiştir. Döküm ano boyları yaklaşık 10 m olarak alınmıştır. Temel boyu 32 m olarak tüm istasyon boyunca sabit teşkil edilmiştir. Temel betonu yeterli olgunluğa ulaşmasından sonra üzerinde oluşacak yük koşulları olarak dış duvarlar esas alınmıştır.
- Perdeler ise temel üzerindeki konumlarına göre mesnetlendirilmiştir. 2 temel üzerine 1 adet perde olacak şekilde, yaklaşık 20 m boyunda **Şekil 3.1** deki gibi mesnetlendirilmiştir. Kademe döküm yükseklikleri yaklaşık 4,0 m olarak alınmıştır.



Şekil 3.10 :Simülasyonu yapılan örnek bir perde anosu ($t=1,40m$).

3.3 Simülasyon hesaplaması ve sonuçlar

Simülasyon hesabı için gerekli tüm veriler girildikten sonra analiz hesaplaması yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar simülasyonda 3 farklı yöntemle görüntülenebilmektedir [27].

1. Geometri Yöntemi;

Simülasyon sonuçlarının geometrik dış boyutları ve yaratılan sonlu eleman model değerlerinin yer aldığı sonuçlardır. 10 farklı elemana ait hesaplanmış veriler zamanın fonksiyonu olarak geometrik modda verilebilir.

2. Diyagram Yöntemi;

Hesaplanan sıcaklıklar, olgunluklar, dayanımlar ve gerilmeler sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilir. x/y ekseninde çizilen grafikler 10 farklı elemana ait hesaplanmış veriler zamanın fonksiyonu olarak diyagram modda verilebilir. Her döküm için minimum-maksimum veya ortalama değerler gösterilir. Sıcaklık farkları (D_{ext} ve D_{int}) gibi değerler gösterilebilir.

3. İzoğri Yöntemi;

Simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık, olgunluk, dayanım ve gerilmeleri izo eğriler yardımıyla dökümden sonraki herhangi bir zaman için göstermek de mümkündür.

Simülasyon hesaplamalarında diyagram ve izo eğriler ile elde edilen sonuçlar **Ek A** da verilmiştir.

3.3.1 Temel kesiti simülasyon sonuçları (t=2,0m)

Kesit kalınlığı 2,0 m olan soğutma sistemli temel döşemesi için aşağıdaki simülasyon diyagramları elde edilmiştir.

1. Maksimum- Minimum Sıcaklık Eğrileri (Her bir koşul için ayrı ayrı),
2. Kesit İç-Dış Sıcaklık Fark Eğrileri (Her bir koşul için ayrı ayrı),
3. Çatlak Riski (P) grafiği (Bahar/Güz ve Yaz için),
4. Çatlak Risk Eş Eğrileri (Bahar/Güz ve Yaz için),
5. Sıcaklık-Olgunluk gelişim eğrisi (Bahar/Güz ve Yaz için), hesaplanmıştır.

Temel kesiti için tüm simülasyon sonuç diyagramları **Ek A** da **Şekil A.1** den **Şekil A.12** ye kadar verilmiştir.

Ayrıca Temel için simülasyon çıktıları özet olarak **Çizelge 3.13** te verilmiştir. Döküm direkt olarak yalıtımlı zemin üzerine yapılacağından önceki betonun sıcaklığı değerlendirmelere katılmamıştır.

Çizelge 3.13 :Temel kesiti için simülasyon çıktıları.

Temel (t=2 m)	Kış	Bahar/Güz	Yaz
	yvnt_k1.prj	yvn_s1.prj	yvn_y1.prj
Beton Döküm Öncesi			
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	-	-	-
Beton Döküm Sırası			
Taze beton sıcaklığı	≤ 10°C	≤ 20°C	≤ 33°C
Beton Döküm Sonrası			
Kür başlangıcı	45 dk içinde	45 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	28 sa sonra	17 sa sonra	12 sa sonra
Yan kalıbın sökümü	72 sa sonra	72 sa sonra	72 sa sonra
Ana kalıbın sökümü	120sa sonra	120sa sonra	120sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	13 gün sonra	11 gün sonra	10 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	40 gün sonra	20 gün sonra	20 gün sonra
Bir sonraki döküm	96sa sonra	96sa sonra	96sa sonra
Sıcaklık ve Gerilme			
Maksimum iç sıcaklık farkı	9.5°C	13°C	12°C
Maksimum sıcaklık	43°C	54°C	52°C
Maksimum sıcaklık zamanı	100sa sonra	70sa sonra	24sa sonra
Maksimum çatlama riski	0,61	0,66	0,64

3.3.2 Perde 3 kesiti simülasyon sonuçları (t=1,40m)

Kesit kalınlığı 1,40 m olan soğutma sistemli perde elemanı için aşağıdaki simülasyon diyagramları elde edilmiştir.

1. Maksimum- Minimum Sıcaklık Eğrileri (Her bir koşul için ayrı ayrı),
2. Kesit İç-Dış Sıcaklık Fark Eğrileri (Her bir koşul için ayrı ayrı),
3. Çatlak Riski (P) grafiği (Bahar/Güz ve Yaz için),
4. Çatlak Risk Eş Eğrileri (Bahar/Güz ve Yaz için),

Sıcaklık-Olgunluk gelişim eğrisi (Bahar/Güz ve Yaz için), hesaplanmıştır.

Perde 3 kesiti için tüm simülasyon sonuç diyagramları **Ek A** da **Şekil A.13** ten **Şekil A.24** e kadar verilmiştir.

Ayrıca simülasyon çıktıları özet olarak **Çizelge 3.14'te** verilmiştir. Beton dökümü ile altındaki döşemenin birbiri ile sıcaklık etkileşimi gözardı edilmiş, bir önceki betonun ortalama sıcaklığının hava sıcaklığı ile aynı olduğu kabul edilmiştir.

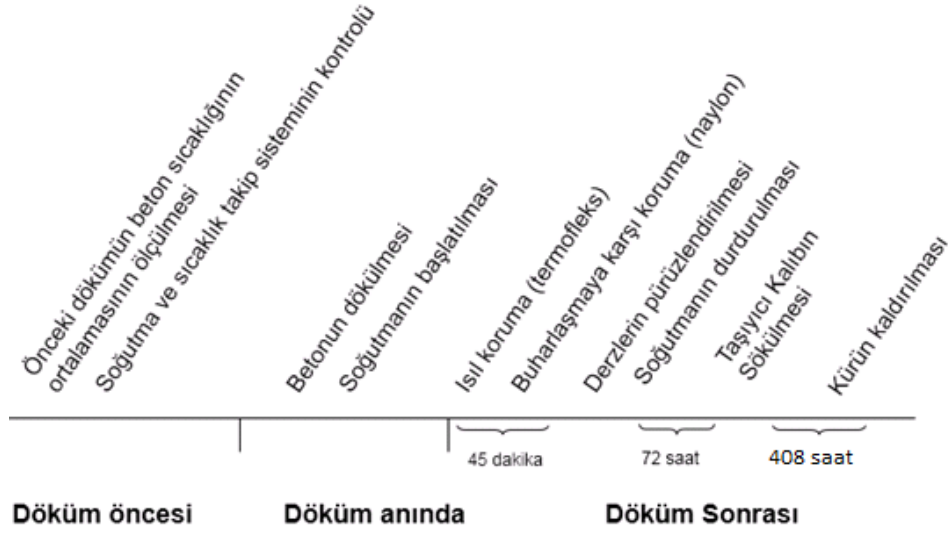
Çizelge 3.14 :Perde 3 kesiti için simülasyon çıktıları.

Perde 3 (t=1.4 m)	Kış	Bahar/Güz	Yaz
	yvnt_k2.prj	yvn_s2.prj	yvn_y2.prj
Beton Döküm Öncesi			
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	5°C	15°C	25°C
Beton Döküm Sırası			
Taze beton sıcaklığı	≤ 10°C	≤ 20°C	≤ 33°C
Beton Döküm Sonrası			
Kür başlangıcı	45 dk içinde	45 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	36 sa sonra	16 sa sonra	12 sa sonra
Yan kalıbın sökümü	72 sa sonra	72 sa sonra	72 sa sonra
Ana kalıbın sökümü	120 sa sonra	120 sa sonra	120 sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	24 gün sonra	14 gün sonra	9 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	30 gün sonra	20 gün sonra	20 gün sonra
Bir sonraki döküm	96 sa sonra	96 sa sonra	96 sa sonra
Sıcaklık ve Gerilme			
Maksimum iç sıcaklık farkı	8.5°C	7°C	9°C
Maksimum sıcaklık	36°C	39°C	54°C
Maksimum sıcaklık zamanı	80sa sonra	40sa sonra	24sa sonra
Maksimum çatlama riski	0,58	0,55	0,68

Her iki kesit için de sıcaklığın maksimum olduğu zaman için gerilme ve çatlak risklerini gösteren örnek izo eğri sonuç diyagramları **Ek A** da **Şekil A.11-12-23-24** te verilmiştir.

Simülasyon çıktılarına bağlı olarak döküm elemanları için uygulanacak sıcaklık ve buharlaştırma korumasının takibi için bir plan oluşturulmuştur (**Şekil 3.11**). Plan oluşturulurken, maksimum sıcaklığın oluşum zamanı, iç-dış sıcaklık farklarının gelişimi, betondaki ısıl gerilmelerden dolayı oluşabilecek en yüksek çatlak riski olan

kesitin zamana bağılı değişimleri dikkate alınmıştır. Kür/koruma plan ile ısı gerilmelerden dolayı oluşabilecek çatlakların en aza indirilmesi planlanmıştır. Bu plana göre simülasyon çıktılarından elde edilen kalıp açma ve yalıtım sürelerine eşit veya büyük olacak kür uygulama koşulları belirlenmiş, saha imalatlarının sürekli olarak bu şartlara uygun zamanlama ile devamı sağlanmıştır.

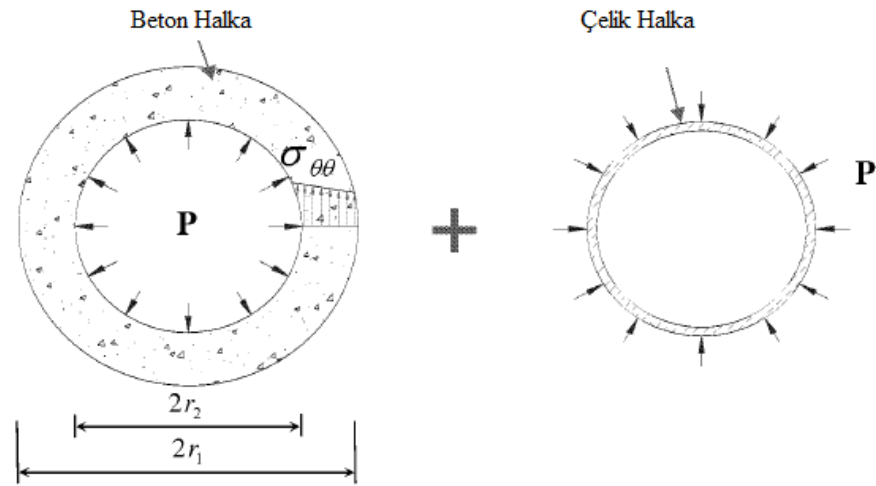


Şekil 3.11 : Simülasyon çıktıları sonucu oluşturulan, betonun korunması (kür) planı.

4. LABORATUVAR ÇALIŞMASI – SAHA UYGULAMA SONUÇLARI

4.1 Laboratuvar Çalışması – Halka Deneyi

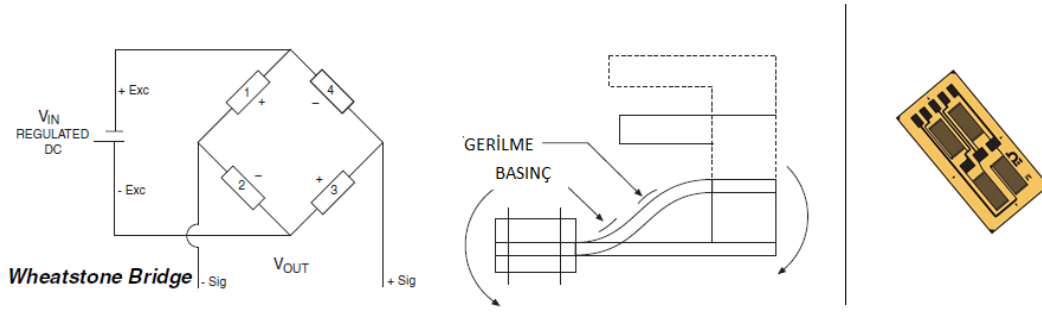
Halka testi ile betonun kısıtlanmış etki altında çatlak potansiyeli ile ilgili bilgi edinmemiz mümkündür. Rijit çelik halka, halkanın sabitleneceği bir kalıp malzemesi ve halka dışında yine sadece kalıp amacı göreceğ olan saç levhadan oluşan bir sistemdir. Bu sistemde betonun sertleşmesi sürecinde, orta kısımda bulunan rijit çelik halkaya uyguladığı gerilmeye karşılık olarak, beton kesiti içerisinde çekme gerilmesi oluşturacak durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Beton ile çelik halka arasındaki gerilme ilişkileri [14].

4.1.1 Halka deney ölçüm sistemi

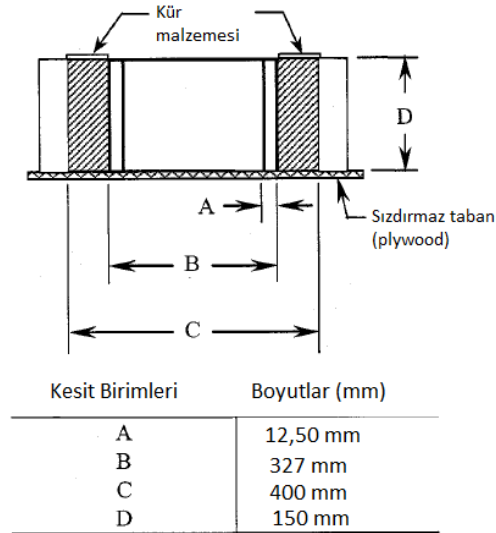
Sistemde ölçme verileri; halkanın içine karşılıklı olacak şekilde 2 adet “Wheatstone Bridge” köprüsü ile kurulmuş hassas gerinim ölçer pullar monte edilerek elde edilmiştir (Şekil 4.2). Bu pullar kendi içerisinde 4 adet daha küçük puldan oluşmakta olup 2 doğrultuda ve tek ekseninde gerinim ölçebilecek özelliktedir. Pullar ASTM C 1581-04 de istenen özelliklerde bir gerinim ölçer kayıt cihazına bağlanmıştır. Veri toplama cihazı ise 10^{-6} hassasiyet ile veri toplayabilecek özellikte seçilmiştir.



Şekil 4.2 : Wheatstone köprü bağlantı detayı, çalışma prensibi, uygun bir gerinim pulu (sağ) [28].

Gerinim pulları; deneyde kullanılacak olan halka üzerine karşılıklı olarak tam kesitin orta kısmında olacak şekilde uygun yapıştırıcı ile kalıcı olarak monte edilmiştir. Üzerleri dış etkilerden etkilenmeyecek şekilde izole edilip ölçüm kabloları numaralandırılarak veri kayıt cihazına standarda uygun köprüleme ile bağlantıları yapılmıştır.

Betonun yerleştirileceği kesitin ölçüleri standarda uygun olarak belirlenmiş olup **Şekil 4.3** te gösterildiği gibi boyutlar ölçülmüştür. Taban kalıbı olarak plywood kullanılmıştır. Dıştaki ince kalıp ve içteki halka beton dökümü sırasında hareket etmeyecek şekilde bu plywooda sabitlenmiştir. Betonun sertleşmesinden sonra dış kalıp açılarak, iç halka kısıtlaması nedeniyle beton numunede oluşacak çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 : Halka deneyinde beton dökülen kesit ölçüleri.

4.1.2 Halka deney yapılışı ve sonuçlar

2 farklı dizayn ile 3 farklı döküm yapılmıştır. Beton; kalıba dökülmeden önce içerisinde 16 mm den büyük agrega olmayacak şekilde elekten elenmiştir[15].

- 1.dökümde 2 adet farklı kalınlıkta halkalarla kısıtlanmış C35 karışım dizaynı dökülmüştür. Her 2 numune de aynı ortamda (20°C) bırakılıp çatlak oluşma zamanları takip edilmiştir. İnce kesitli halka (ASTM C 1581-04 e uygun) ile sınırlanmış numune 14. günde çatlarken kalın kesitli halka ile sınırlanmış numune 10. günde çatlamıştır (**Çizelge 4.1**).

Çizelge 4.1 : Halka Test – Halka kalınlıkları karşılaştırma.

Döküm No.	Karışım No	Halka kalınlığı
1	Karışım 1	12,50 mm
2	Karışım 1	25,00 mm

- 2.dökümde 2 adet aynı kesit kalınlığında halka ile kısıtlanmış farklı koşullarda kurlenmiş C40 karışım dizaynı dökülmüştür. 1. Numune 20°C laboratuvar ortamında bırakılıp, 16. günde çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 2. Numune ise 40°C kür odasına yerleştirilip bekletilerek çatlak oluşum zamanı 12.gün olarak kaydedilmiştir (**Çizelge 4.2**).

Çizelge 4.2 : Halka test – Ortam sıcaklık koşulları.

Döküm No.	Karışım No	Ortam Sıcaklık koşulu
3	Karışım 1	20 °C
4	Karışım 1	40 °C

- 3.dökümde 2 farklı beton karışımı için aynı kesit kalınlığında aynı koşullarda döküm yapılmıştır. 1. Karışım 0,45 s/ç karışım oranında tasarlanmış, 2. Karışım 0,38 s/ç oranı ile tasarlanmış ve dökülmüştür. 0,45 s/ç oranına sahip karışımda çatlak oluşumu 9. Günde görülmüştür. 0,38 s/ç oranına sahip karışımda ise 8. Günde oluşan kılcal bir çatlağın 10. Günde genişlediği tespit edilmiştir (**Çizelge 4.3**).

Çizelge 4.3 : Halka Test – Farklı su çimento oranı.

Döküm No.	Karışım No	Su-Çimento Oranı (Dizayn)
5	Karışım 1	0,45
6	Karışım 2	0,38

Sadece 3. Dökümle ilgili tam şekil değiştirme ölçümleri toplanabildiğinden 3. Dökümle ilgili ölçüm ve hesaplamalar tez kapsamında verilmiştir. 1 ve 2. Dökümde görsel takip ile çatlak oluşum zamanı belirlenmiş sadece sıcaklık ölçümleri kayıt edilmiştir.

4.1.2.1 Ölçümlerin yapılması

Her numune için sıcaklık ve gerinim ölçümleri kaydedilmiştir;

Sıcaklık ölçümü; T Tip termokupl ile ortam ve beton sıcaklığı ölçülmüştür. Veri kayıt aralıkları 10 dk olarak belirlenmiştir.

Gerinim ölçümü; 2 adet Wheatstone köprüsü kurularak bağlanmış gerinim ölçer pul ile çelik halkanın karşılıklı 2 yüzeyinden gerinim ölçümü 10 dk aralıklarla kaydedilmiştir. Kayıtlar DataTaker DT82 veri kayıt cihazı ile alınmıştır.

Ölçüm düzeneği **şekil 4.4** te görüldüğü gibi kurulmuştur ve çatlak tespit edildiğinde ölçümler sonlandırılmıştır.



şekil 4.4 : Halka deney düzeneği (Laboratuvar numunesi 20°C).

4.1.2.2 Çatlak tespiti ve ölçümü

Çatlak oluşum zamanları görsel ve/veya gerinim pulları yardımıyla tespit edilmiştir. Ölçüm direncindeki ani düşüş çatlak oluşum zamanını göstermektedir, C35 betonda yapılan ölçümler kayıt edilmiştir ve çatlak oluşum zamanı 9. gün (220. saat) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Gerinim ölçümleri ile çatlak oluşum zamanı (Döküm No 3).

Her farklı döküm modeli için çatlak oluşum zamanları tespit edilerek Çizelge 4.4 te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Farklı koşullar için çatlak oluşum zamanları.

Döküm Koşulu	Döküm No	Kriter	Çatlak Oluşum Zamanı
Farklı Kısıtlanma (Ring Kesiti)	1	İnce Ring (ASTM C1581)	14.gün
	2	Kalın Ring	10.gün
Farklı Ortam Sıcaklığı	3	40°C	12.gün
	4	20°C	16.gün
Farklı Dizayn	5	0,45 (C35)	9.gün
	6	0,38 (C40)	8.gün

Çatlak oluşum zamanları belirlendikten sonra çatlakların genişlikleri ölçülerek kıyaslama yapılmıştır. Çatlak genişliği ölçümünde Şekil 4.6 sağda bulunan çatlak mikroskobundan faydalanılmıştır. Çatlakların oluşum zamanını takiben 1 ay süreyle numuneler çelik halka içinde bekletilerek çatlakların genişleme mekanizmaları incelenmiştir. Bazı çatlaklarda genişlemenin mevcut olduğu bir ay sonrasında yapılan ölçümlerle saptanmıştır. Tüm bu sonuçlar Çizelge 4.5 de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Halka Testi –Ölçülen çatlak genişlikleri.

Döküm Koşulu	Döküm No	Kriter	Çatlak Genişliği (Ort)	1 ay sonunda Çatlak Genişlemesi
Farklı Kısıtlanma (Ring Kesiti)	1	İnce Ring (ASTM C1581)	0,2 mm	+ 0,1 mm
	2	Kalın Ring	0,5 mm	-
Farklı Kür Ortamı	3	40°C	0,3 mm	-
	4	20°C	0,2 mm	+ 0,1 mm
Farklı S/Ç Oranı	5	0,45 (C35)	0,6 mm	-
	6	0,38 (C40)	0,5 mm	+ 0,1 mm

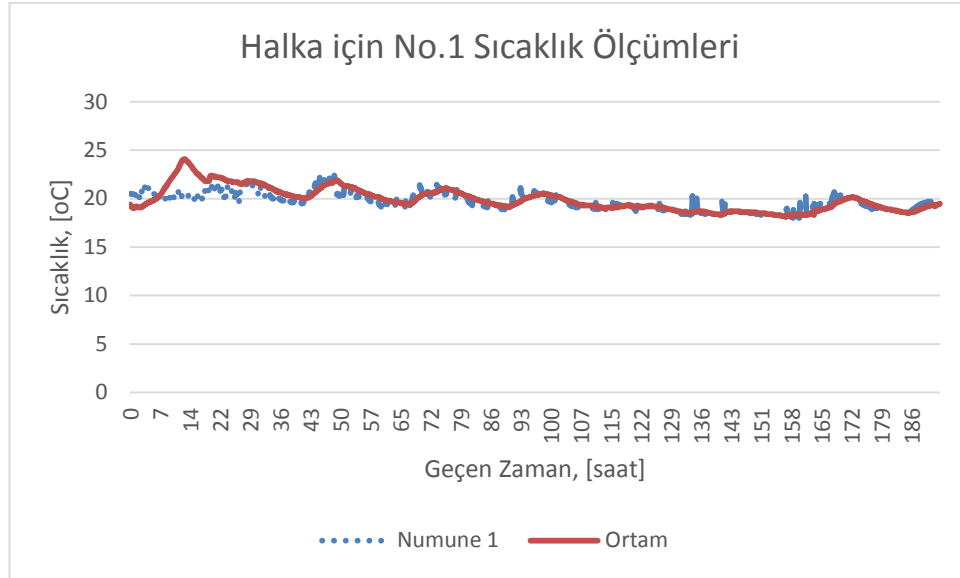
Çatlak genişlikleri her numune için 4 farklı noktadan ölçülmüştür, 3 ü yan yüzeyden 1 i ise üst veya alt yüzeyden alınmıştır. Çatlak oluşum yerleri her numune için farklı bölgelerde tespit edilmiştir (Şekil 4.6-sol).



Şekil 4.6 : Halka deneyi çatlak yerleri (sol) ve çatlak mikroskobu (sağ).

4.1.2.3 Halka deneyinde sıcaklık ölçümleri

Halka deneyi yapılan her numune için sıcaklıklar yüzeyden 1 cm içerden olmak koşuluyla ölçülmüştür. Kesit sıcaklığı ile birlikte ortam sıcaklığında kayıt edilmiştir. Örnek bir kesit için kesit ve ortam sıcaklığı **Şekil 4.7** de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Halka deneyi kesit sıcaklık ölçümleri - Döküm 1.

Kesitin küçük olması nedeniyle gerilmeler üzerinde sıcaklık değişimlerinin hiçbir etkisi olmadığı varsayımı yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri yalnızca kesit ve ortam sıcaklığının takibi için yapılmıştır.

4.1.3 Basınç dayanım, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanım sonuçları

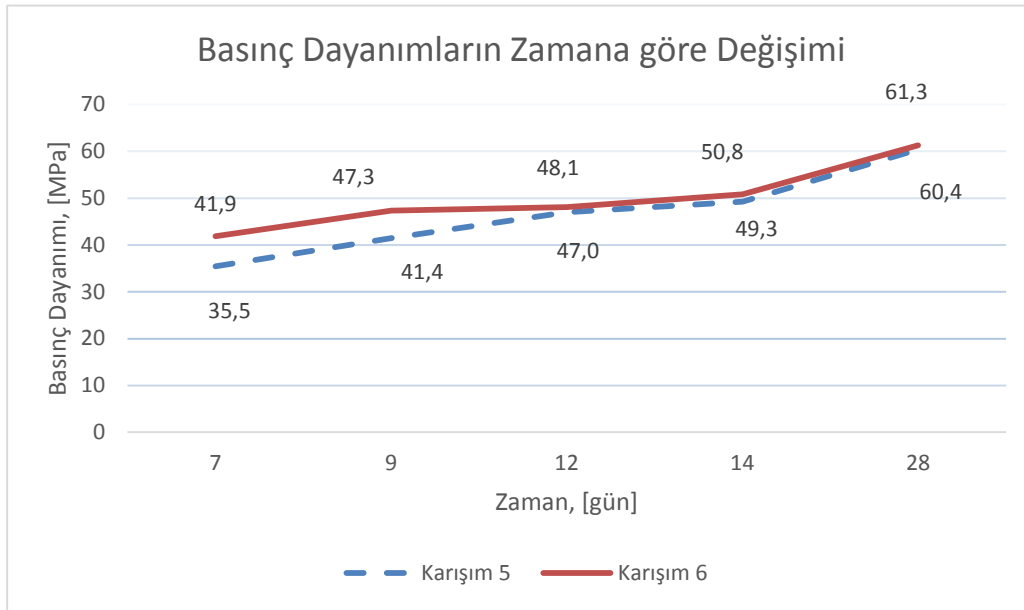
Halka deneyinde kullanılan beton karışımları için 7-9-12-14 ve 28. Gün için 150x300mm silindirlerden elde edilen basınç dayanımları ve 7-14-28 gün için elastisite modülü ile yarmada çekme dayanım sonuçları verilmiştir (**Çizelge 4.6**). Elastisite modülü ve çekme dayanım sonuçlarından teorik olarak betonun rötresi hesaplanabilir.

Çizelge 4.6 : Beton karışımları mekanik özellikler.

Test Günü	Karışım No.1 için (Döküm 5)			Karışım No.2 için (Döküm 6)		
	Basınç Dayanım [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]	Y. Çekme Dayanımı [MPa]	Basınç Dayanım [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]	Y. Çekme Dayanımı [MPa]
7	35,5	17	3,2	41,9	19,0	4,4
9	41,4	*	*	47,3	*	*
12	47,0	*	*	48,1	*	*
14	49,3	22	4,2	50,8	23,4	5,0
28	60,4	27	5,1	61,3	27,7	6,0

*Ölçüm Yapılmamıştır.

Basınç dayanımlarının çatlak oluşum zamanı ile ilişkisinin gösterilebilmesi için kırım sonuçlarının zamana bağlı değişim grafiği **Şekil 4.8** de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Halka deneyinde kullanılan 2 farklı karışım için basınç dayanım gelişimi.

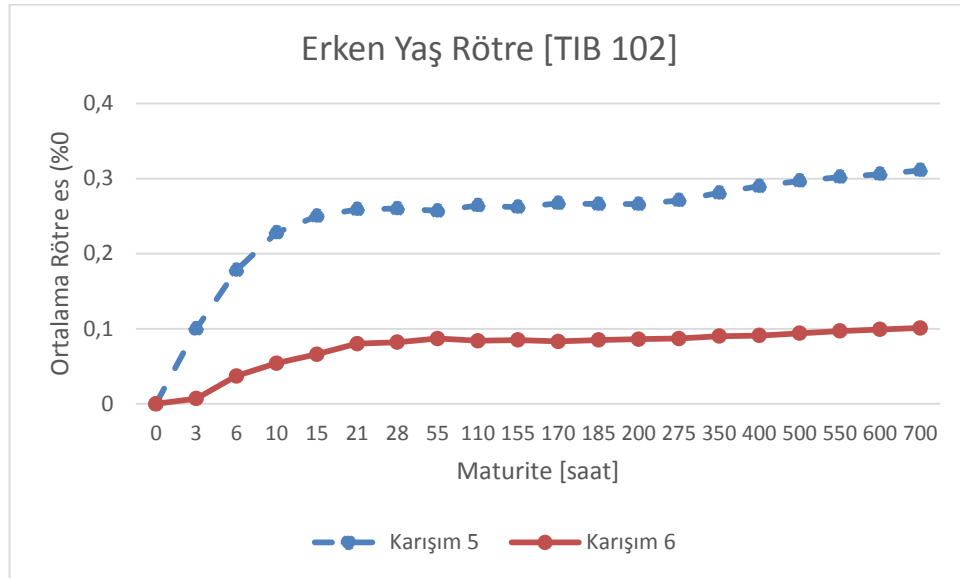
4.1.4 Ölçülen erken yaş rötre sonuçları

Erken Yaş Rötre Sonuçları TI-B 102 (95) standardına uygun deney düzeneği ile 100x1000 lik silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. 3 farklı numune için kurulan düzenekte LVDT ler yardımıyla kayıtlar alınmış ve betonun olgunluk yaşına göre erken yaş rötreleri iki karışım içinde **Çizelge 4.7** de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Erken yaş rötne ölçüm sonuçları.

Maturite [saat]	Ortalama Rötneleler ϵ_s (%0) [TIB 102]	
	Karışım 1	Karışım 2
3	0,100	0,007
6	0,178	0,037
10	0,228	0,054
15	0,250	0,066
21	0,259	0,080
28	0,260	0,082
55	0,257	0,087
110	0,264	0,084
155	0,262	0,085
170	0,267	0,083
185	0,266	0,085
200	0,266	0,086
275	0,271	0,087
350	0,281	0,090
400	0,290	0,091
500	0,297	0,094
550	0,302	0,097
600	0,306	0,099
700	0,311	0,101

Şekil 4.9 : Halka deneyinde kullanılan 2 karışım için rötne gelişimi.



TIB 102 standardına uygun olarak test edilmiş erken yaş rötne grafiğinden Karışım 5 için erken yaş rötrenin Karışım 6'dan yüksek olduğu görülmektedir. 2 farklı karışım ile yapılan farklı testlerin sonuçları bir araya toplandığında; erken yaş rötrenin kısıtlanmış rötne ile olan ilişkisinde bir sonuca varılamamıştır.

4.2 Saha Uygulaması – 2 Farklı Kesit için Sıcaklık Gelişimleri

Uygulamada ölçümler bir istasyon yapısı için temel ve perde kesitleri için 2 mevsim modelinde yapılmıştır.

Kesitler (elemanlar);

1. Temel Kesiti ($t=2,0m$): 2m kalınlığında betonarme kesit
2. Duvar Kesiti: ($t=1,40m$): 1,4m kalınlığında betonarme kesit

Ölçüm Modeli (mevsim);

1. Bahar/Güz
2. Yaz

Uygulamada sırasıyla ölçüm kriterleri belirlenerek, sıcaklık takibinin yapıldığı ekipmanlar tanıtılmıştır. Ölçüm sonuçları her bir kesit ve model için ayrı ayrı verilmiştir.

4.2.1 Ölçüm kriterleri

Sertleşmekte olan betonda sıcaklık ölçüm izleme sistemi; takip edilen beton elemanı için uygulama verilerinin simülasyon verilerine uygunluğu ile karşılaştırılması için yapılmıştır. Burada sıcaklık takip ekipmanlarının hazırlanması ve sıcaklık takip sisteminin çizimlere uygun yerleştirilmesi önem kazanmaktadır. İzleme sisteminde incelenmesi planlanan sıcaklık parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Ortam hava sıcaklığı (T_{air}), °C
- Taze beton döküm sıcaklığı (T_{fresh}), °C
- Dökülen betonun ortalama sıcaklığı (T_{mean}), °C
- Dökülen betonun maksimum sıcaklığı (T_{max}), °C
- Dökülen betonun iç sıcaklık farkı (D_{int}), °C

Eğerki yeni dökülen betonun bir önce dökülen beton ile 15 günden daha kısa bir süre içerisinde kısıtlanma durumu söz konusu ise aşağıdaki sıcaklık parametreleri de incelenmelidir. Ancak tezde incelenen 4 örnekte içinde bu durum gözardı edilmiştir.

- Önceden dökülen betonun ortalama sıcaklığı (T_{pre}), °C
- Önceki beton ile yeni dökülen beton arasındaki sıcaklık farkı (D_{ext}), °C

Uygulamada ölçümü yapılan elemanlar için yapısal kısıtlamalar aşağıda verilmiştir:

1. Temel Kesiti için kısıtlamalar,

Temel alt ve yan yüzeyleri simülasyonda kullanılan modele uygun kalıp malzemesi ile teşkil edilmiştir. Temel boyutları 32,0m x 8,0m x 2,0m olup, kesit içerisinde çift sıra soğutma borusu kullanılmıştır. Kesitteki toplam soğutma suyu boru uzunluğu 900m'dir. Temel taban yüzeyi membran ve koruma betonu ile yalıtımlı olduğundan zemin ile herhangi bir ısıl ilişki varlığı söz konusu değildir. Kesit içerisinde dolaşan soğutma suyu sıcaklığı 9 ila 12°C'dir.

2. Perde Kesiti için kısıtlamalar,

Uygulamada bir perde anosu iki temel anosu üzerine konumlandırılmıştır. Perde altındaki temel anolarının dökümü 15 gün öncesinde tamamlanmıştır ve bu döküm ile ısıl etkileşim olmadığı varsayılmıştır. Ölçüm yapılan perde (Perde 3) boyutları, 18,0m x 1,4m x 4,0m olup, kesit içerisinde tek sıra soğutma borusu kullanılmıştır. Kesitteki toplam soğutma suyu boru uzunluğu 120m'dir. Soğutma suyu sıcaklığı 9 ila 12°C'dir.

4.2.2 Sıcaklık takibi için cihaz ve ekipmanlar

Sertleşen betonda sıcaklık takip sistemi aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır (**Şekil 4.10**);

- Beton içerisine yerleştirilecek termokupllar (ısı kablosu),
- Bilgisayar kontrollü ısı kabloları ile uyumlu veri kayıt cihazları.



Şekil 4.10 : Termokupl takılı veri kayıt cihazı.

Tüm ölçüm sistemi için hassaslık $\pm 1^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümü farklı kesitlerde yapılacağından her kesit için sıcaklık izleme sistem yerleşim planı çizilmiştir (**Şekil 4.11**). Planlarda termokupl yerleşim yerleri soğutma boruları yerleri

toplayıcısına 30 dakika aralıklarla kaydedilmiştir. Kayıt beton dökülmeden önce başlatılıp, dökümden sonra 20 gün boyunca (~480 saat) veri kaydı yapılmıştır.

Beton içerisindeki termokupllar dışında;

- Soğutma suyunun sıcaklığı; giriş ve çıkış olarak ölçülmüş ve soğutma süresi boyunca kayıt edilmiştir.

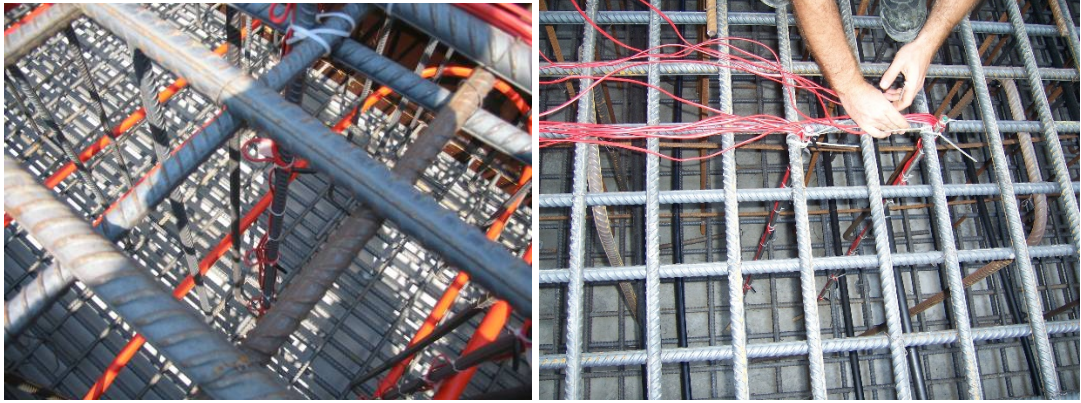
Her iki kesit için soğutma suyu sıcaklıkları aşağıdaki gibi kayıt edilmiştir;

- W_{in} : Soğutma suyu giriş sıcaklığı,
- W_{out} : Soğutma suyu çıkış sıcaklığı

- Hava sıcaklığı; beton dökülen eleman ile aynı koşullarda ve sürede kayıt edilmiştir.

- T_{air} : Hava/ortam sıcaklığı

Beton ve hava sıcaklık ölçümleri, perde ve temel elemanı için ayrı ayrı olarak Ek B de grafiklerle verilmiştir.



Şekil 4.12 :Sıcaklık ölçüm çubuğunun temel içerisine yerleşimi.

4.2.3 Ölçümlerin yapılması ve hesaplamalar

Sıcaklık izleme sistemi 2 farklı eleman ve 2 farklı koşul için yerleştirilmiştir ve sonuçları toplanarak değerlendirilmiştir.

1. Perde 3 elemanı için;
 - Bahar koşulunda (Beton sıcaklığı 10°C ile 20 °C arasında olduğu durum),
 - Yaz koşulunda (Beton sıcaklığı, 20 °C ile 33°C arasında olduğu durum),
2. Temel elemanı için;
 - Bahar koşulunda (Beton sıcaklığı 10°C ile 20 °C arasında olduğu durum),
 - Yaz koşulunda (Beton sıcaklığı, 20 °C ile 33°C arasında olduğu durum),

Kaydedilen sıcaklık parametreleri soğutulan kesitlerde soğutma sistemi nedeniyle kesitin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık gelişimleri elde edileceğinden aşağıda belirtildiği gibi seçilmiştir.

1. Perde elemanı için sırasıyla, A1, A2, A3, A4, A5 kanalları ve perdenin bulunduğu ortam sıcaklığı (T_{air}),
2. Temel elemanı için sırasıyla, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 kanalları, temelin bulunduğu ortam sıcaklığı (T_{air}), soğutma suyunun giriş (W_{in}) ve çıkış (W_{out}) sıcaklıkları kayıt edilmiştir.

Ölçülen değerler sonucunda betondaki olgunluk gelişiminin ifadesi ve oluşabilecek risklerin gözlemi için 2 farklı eleman için hesaplanan parametreler ve formüller aşağıda belirtildiği gibidir;

- Ortalama Sıcaklıklar (T_{avg1} ve T_{avg2}),
Kesit geneli için sıcaklık gelişimini ifade etmekte kullanılır. Her zaman dilimi için aşağıdaki sıcaklıklar hesaplanmıştır;

1. Ortalama 1: 5 ya da 7 kanalın aritmetik ortalaması

$$T_{avg1} = \frac{A1+A2+\dots+A7}{7} \quad (4.1)$$

2. Ortalama 2: Soğutma faktörü dağılımlı ortalama

5 kanal için;

$$T_{avg2} = \frac{(3*A1)+(12*A2)+(6*A3)+(12*A4)+(3*A5)}{36} \quad (4.2)$$

7 kanal için;

$$T_{avg2} = \frac{(A1)+(4*A2)+(5*A3)+(16*A4)+(5*A5)+(4*A6)+(A7)}{36} \quad (4.3)$$

Not: Sıcaklık farkı hesaplamalarında “Ortalama 1” kullanılmıştır.

- Minimum sıcaklık (T_{min}),
Kesit içerisindeki en düşük sıcaklığın belirlenmesi için kayıt edilmiştir, sıcaklık farklarını hesaplamada kullanılır. Her zaman dilimi için minimum sıcaklıklar hesaplanmıştır.
- Maksimum sıcaklık (T_{max}),
Kesitte GE oluşum riskinin tayini için en yüksek sıcaklığın tespit edilmesi gereklidir. Her zaman dilimi için en yüksek sıcaklıklar hesaplanmıştır.
- İç sıcaklık farkları (D_{int1} ve D_{int2}),

Kesitteki sıcaklık farklarından dolayı çatlak riskinin ifade edilebilmesi için gerekli değerdir. 15°C yi aşması durumunda sıcaklık farklarından dolayı oluşan çekme gerilmeleri en yüksek mertebeye ulaşacağından hesaplanması önemlidir.

1. İç Sıcaklık Farkı 1: Aynı zaman dilimindeki maksimum sıcaklık ile ortalama sıcaklık arasındaki fark olarak hesaplanmıştır.

$$Dint1 = T_{max} - T_{avg1} \quad (4.4)$$

2. İç Sıcaklık Farkı 2: Aynı zaman dilimindeki ortalama sıcaklık ile minimum sıcaklık arasındaki fark olarak hesaplanmıştır.

$$Dint2 = T_{avg1} - T_{min} \quad (4.5)$$

- Soğutma suyu sıcaklık farkı: Soğutma süreci boyunca kesitteki soğutma suyundaki ortalama sıcaklık değişimi giriş (In) ve çıkış (Out) borularındaki sıcaklık farkından elde edilerek yazılmıştır. Sıcaklık ölçümü soğutma ünitesine en yakın bölgede yapıldığından soğutma hattı boyunca kayıp olan ısı gözardı edilmiştir. Bu nedenle çizelgelerde yaklaşık değer verilmiştir.

Tüm ölçüm kanallarının ve hesaplama eğrilerinin grafikleri **Ek-B1**'den **Ek-B16**'ya kadar tezin ekinde verilmiştir.

4.2.3.1 Temel kesiti için bahar döneminde uygulama sonuçları

Temel elemanında yapılan ölçümler taze beton sıcaklığı verisinden faydalanarak simülasyonda yapılan bahar/güz koşuluyla karşılaştırılmıştır. Ölçümler Ocak ayı içerisinde yapılmıştır.

Taze beton deneyleri belirli aralıklarla belirli mikserlerden yapılarak ortalama sonuçları **Çizelge 4.8**'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Temel kesit elemanı için taze beton değerleri.

Döküm Süresince Ortalama Hava Sıcaklığı Değeri	1,0 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Sıcaklığı Değeri	11,0 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Çökme Değeri	238 mm
Döküm Süresince Ortalama Beton Hava Yüzdesi	5,5 %
Toplam Alınan Numune Sayısı	24 silindir
Toplam Dökülen Beton Hacmi	550 m ³
Döküm Süresi	8 sa 15 dk

Yukarıdaki taze beton verilerinden yararlanılarak **Çizelge 4.9**'da ki kür koşulları yapısal elemanda uygulanmıştır.

Çizelge 4.9 : Temel kesit elemanı için kür koşulları uygulama.

Hava Koşulu	Yapı Elemanı	Soğutma		Kalıp Sökümü	Kür Bitimi	Bir Sonraki Döküm
Bahar/Güz - 1	Temel (t=2m)	4 gün	9°C	3 gün	25 gün (5 mm formflex)	5 gün

Beton dökümünden önce başlatılan ve 20 gün boyunca kayıt edilen sıcaklık ölçüm verileri özet sonuçları **Çizelge 4.10**'da verilmiştir.

Temel için; soğutma sistemi beton başlamadan önce çalıştırılmış ve soğutma süresi boyunca (4 gün/96 saat) soğutma suyunda (W_{in} ve W_{out} arasında) 0,5 ila 1,0 °C arasında değişim tespit edilmiştir. Soğutma sürecinde betondan çıkan suyun ısınması eğrilerin yer değişiminden gözlemlenebilmiştir

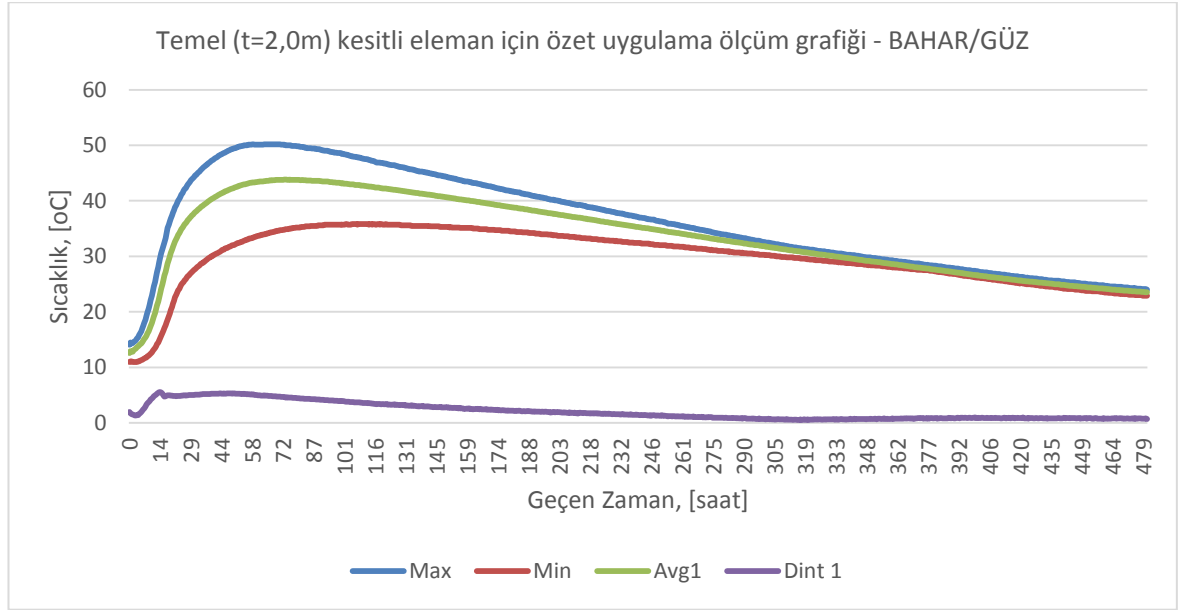
Çizelge 4.10 : Temel kesiti için bahar simülasyon-ölçüm karşılaştırması.

	Ölçüm Verisi	Simülasyon Verisi
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	-	-
Taze beton sıcaklığı	11 °C	≤ 20°C
Kür başlangıcı	30 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	30 dk içinde *	17 sa sonra
Yan kalıbın sökümü	48 sa sonra	72 sa sonra
Ana kalıbın sökümü	120sa sonra	120sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	25 gün sonra	11 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	25 gün sonra	20 gün sonra
Sıcaklık ve Gerilmeler		
Maksimum dış sıcaklık farkı (su geçirimsiz)	-	-
Maksimum iç sıcaklık farkı	12,1°C	13°C
Maksimum sıcaklık	50,2°C	54°C
Maksimum sıcaklık oluşma zamanı	63-71 saat arası	70sa sonra

*Hava sıcaklığının düşük olması nedeniyle donmaya karşı koruma olarak 2.kat termofleks örtü kullanılmıştır.

Hesaplanan verilerden elde edilen sonuçlar ile temel kesiti için bahar koşulunda yapılan ölçümlerde maksimum sıcaklığın soğutmalı kesitler için üst koşul olan 55°C nin altında kaldığı görülmektedir. Maksimum sıcaklık ilk olarak beton dökümünden sonra geçen 63. saatte kayıt edilmiştir. 8 saat kadar sabit kalan sıcaklık 71. Saatten

sonra azalmaya başlamıştır. Minimum sıcaklıklar soğutma borusuna yakın ölçüm kanallarında ölçülmüştür. İç sıcaklık farkı limitlerin içerisinde kalmıştır.



Şekil 4.13 :Temel kesiti bahar koşulu ölçüm grafiği.

Özet grafik ve çizelgelerdeki verilerde görüldüğü üzere, temel kesiti için yapılan bahar ölçümlerinde elde edilen verilerde simülasyon verilerine yakın değerler elde edilmiştir.

Temel kesitinde soğumanın geç ve yavaş olması Şekil 4.13'teki ölçüm grafiğinden de görülebilir. Isınma yüksek eğim ile başlamış olup, soğuma düşük eğim ile daha uzun süreçte devam etmiştir.

4.2.3.2 Temel kesiti için yaz döneminde uygulama sonuçları

Temel elemanında yapılan ikinci ölçümler taze beton sıcaklığı verisi dikkate alındığında, simülasyonda yapılan yaz koşuluyla karşılaştırılmıştır. Ölçümler Temmuz ayı içerisinde yapılmıştır. Taze beton deneyleri belirli aralıklarla belirli mikserlerden yapılarak ortalama sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Temel kesiti için yaz koşulunda taze beton değerleri.

Döküm Süresince Ortalama Hava Sıcaklığı Değeri	26,8 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Sıcaklığı Değeri	29,9 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Çökme Değeri	238 mm
Döküm Süresince Ortalama Beton Hava Yüzdesi	5,9 %
Toplam Alınan Numune Sayısı	16 silindir
Dökümdeki Toplam Beton Hacmi	623 m ³
Toplam Döküm süresi	8 sa 30 dk

Yukarıdaki taze beton verilerinden yararlanılarak **Çizelge 4.12** deki kür koşulları yapısal elemanda uygulanmıştır.

Çizelge 4.12 : Temel kesit elemanı için yaz dönemi kür koşulları.

Hava Koşulu	Yapı Elemanı	Soğutma		Kalıp Söküm	Kür Bitimi	Bir Sonraki Döküm
Yaz	Temel Döşemesi (t=2m)	2 gün	12°C	3 gün	20 gün (5 mm formflex)	4 gün

Beton dökümünden önce başlatılan ve 20 gün boyunca kayıt edilen sıcaklık ölçüm verilerinden elde edilen özet sonuçlar **Çizelge 4.13** de verilmiştir.

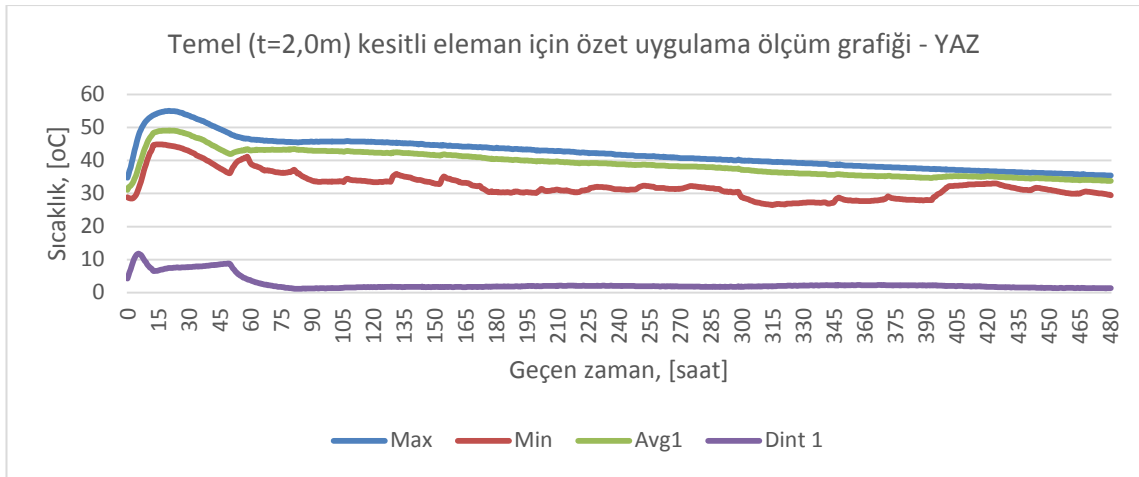
Temel için; soğutma sistemi beton başlamadan önce çalıştırılmış ve soğutma süresi boyunca 2 gün (48saat) soğutma suyunda (W_{in} ve W_{out} arasında) yaklaşık 1,0 °C fark görülmüştür. Soğutma sürecinde betondan çıkan suyun ısınması eğrilerin yer değişiminden gözlemlenebilmiştir.

Çizelge 4.13 : Temel kesiti için yaz simülasyon-ölçüm karşılaştırması.

	Ölçüm Verisi	Simülasyon Verisi
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	-	-
Taze beton sıcaklığı	29,9 °C	≤ 33°C
Kür başlangıcı	30 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	*	12 sa sonra
Yan kalıbın sökümü	48 sa sonra	72 sa sonra
Ana kalıbın sökümü	120sa sonra	120sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	20 gün sonra	10 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	20 gün sonra	20 gün sonra
Sıcaklık ve Gerilmeler		
Maksimum iç sıcaklık farkı	11,9°C	12°C
Maksimum sıcaklık	55°C	52°C
Maksimum sıcaklık zamanı	24 sa sonra	24 sa sonra

*Yaz koşullarında donma olması beklenmediğinden uygulanmamıştır.

Elde edilen sonuçlarda simülasyon ile çok yakın sonuçlar alınmıştır, en yüksek sıcaklık 55°C olarak kayıt edilmiştir. Minimum sıcaklık değerleri soğutma süresi boyunca soğutma borusuna yakın termokupldan kaydedilmiştir. **Şekil 4.14** grafik üzerinde 2.gün (48. Saat) soğutma sisteminin kapatılması ile minimum sıcaklıkta yükseliş gözlemlenmiştir. Yine aynı gün içerisinde yan kalıbın sökülmesi ile (48 ila 60 saat) sıcaklıkta düşüş gözlemlenmiştir ancak bu durum sıcaklık farklarında bir ani değişim yaratmamıştır.



Şekil 4.14 : Temel kesiti yaz koşulu ölçüm grafiği.

Temel kesiti için özetlemek gerekirse kesit kalınlığı fazla olduğundan (t=2,0m), ısınma ani olur (eğim fazla), soğuma ise yavaş olur (eğim az). Çift sıra soğutmanın

etkili olması elde edilen sıcaklık verilerinden görülmektedir. Temel elemanı için bahar ve yaz döneminde yapılan ölçümlerde elde edilen tüm grafikler Ek B de görülebilir.

4.2.3.3 Perde 3 Kesiti için bahar döneminde uygulama sonuçları

1,40m kalınlığındaki perde elemanında ilk yapılan ölçümler taze beton sıcaklığı verisinden faydalanarak simülasyonda yapılan bahar koşuluyla karşılaştırılmıştır. İlk ölçümler “Şubat” ayı içerisinde yapılmıştır. Taze beton deneyleri belirli aralıklarla belirli beton mikserlerinden yapılarak ortalama sonuçları **Çizelge 4.14** de verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Perde 3 kesit elemanı için taze beton değerleri

Döküm Süresince Ortalama Hava Sıcaklığı Değeri:	8,5°C
Döküm Süresince Ortalama Beton Sıcaklığı Değeri:	12,4°C
Döküm Süresince Ortalama Beton Çökme Değeri:	232 mm
Döküm Süresince Ortalama Beton Hava Yüzdesi:	6,5 %
Toplam Alınan Numune Sayısı:	4 silindir
Toplam Dökülen Beton Hacmi:	86 m ³
Döküm Süresi:	4 sa 0 dk

Yukarıdaki taze beton verilerinden yararlanılarak **Çizelge 4.15** deki kür şartları yapısal elemanda uygulanmıştır.

Çizelge 4.15 : Perde 3 kesit elemanı için kür koşulları uygulama.

Hava Koşulu	Yapı Elemanı	Soğutma		Kalıp Söküm	Kür Bitimi	Bir Sonraki Döküm
Bahar/Güz	Duvar (t=1.4m)	3gün	12°C	3 gün	20 gün (5 mm formflex)	4 gün

Beton dökümünden hemen önce başlatılan ve 20 gün boyunca kayıt edilen sıcaklık ölçüm verilerinden elde edilen özet sonuçlar **Çizelge 4.16** da verilmiştir. Perde elemanı için yapılan ölçümlerde 5 kanallı sistem kullanılmıştır.

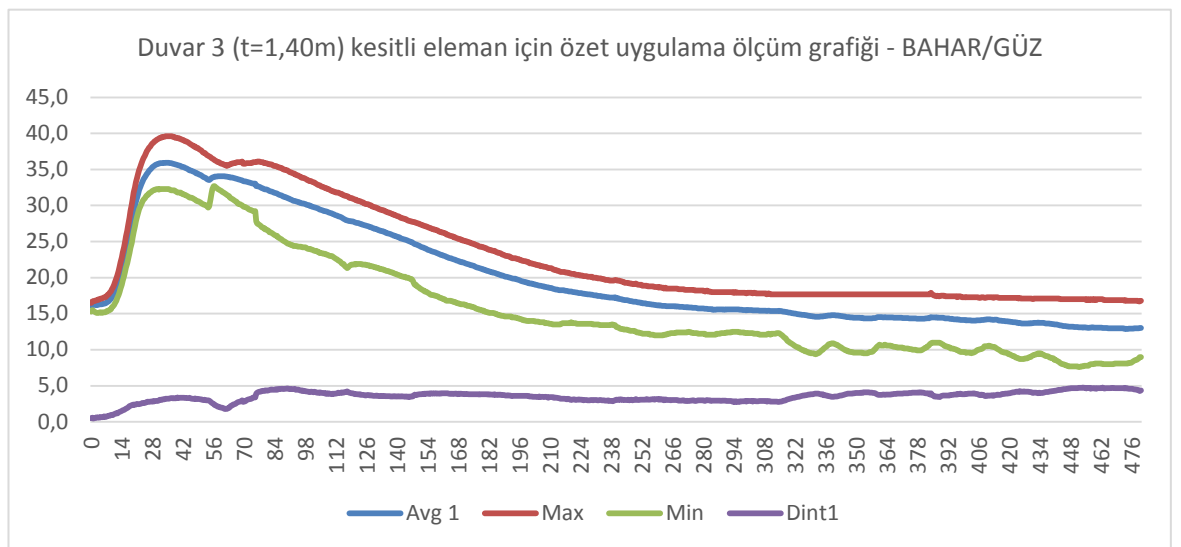
Perde için; soğutma sistemi beton başladığında çalışır durumdadır ve soğutma süresi boyunca (3 gün / 72 saat) soğutma suyunda (W_{in} ve W_{out} arasında) 0 ila 0,5 °C arasında fark görülmüştür.

Çizelge 4.16 : Perde 3 kesiti için bahar simülasyon-ölçüm karşılaştırması.

	Ölçüm Verisi	Simülasyon Verisi
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	-	-
Taze beton sıcaklığı	12,4 °C	≤ 20 °C
Kür başlangıcı	30 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	*	16sa sonra
Yan kalıbın sökümü	72 sa sonra	72sa sonra
Ana kalıbın sökümü	72 sa sonra	120sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	13 gün sonra	14 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	20 gün sonra	20 gün sonra
Sıcaklık ve Gerilmeler		
Maksimum iç sıcaklık farkı	5,8 °C	7°C
Maksimum sıcaklık	39,6 °C	39°C
Maksimum sıcaklık zamanı	36-38 saat arası	40sa sonra

*Yaz koşullarında donma olması beklenmediğinden uygulanmamıştır.

Maksimum sıcaklık değeri simülasyonda elde edilen değerden 0,6°C daha fazla çıkmıştır. Soğutmanın devre dışı bırakılması ile 2.gün sonunda (48. Saat) tüm kesit içerisinde bir miktar ısı artışı gözlemlenmiştir ancak bu durum iç sıcaklık farkını etkileyici bir durum yaratmamış soğuma sürecinin uzamasına neden olmuştur. 4.gün içerisinde (80.saat) kalıp açılması ile minimum sıcaklıkta ani bir düşüş olmuştur. 13. Gün (312 saat) itibariyle betonda buharlaştırma korumasının sonlandırılması ile ortam (hava) sıcaklıklarını ölçümleri etkilediği görülebilmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 :Perde 3 kesiti bahar koşulu ölçüm grafiği.

4.2.3.4 Perde 3 kesiti için yaz döneminde uygulama sonuçları

1,40m kalınlığındaki perde elemanında yapılan ölçümler taze beton sıcaklığı verisinden faydalanarak simülasyonda yapılan yaz modeli ile karşılaştırılmıştır. Ölçümler “Ağustos” ayı içerisinde yapılmıştır. Taze beton deneyleri belirli aralıklarla belirli mikserlerden yapılarak ortalama sonuçları **Çizelge 4.17** de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : Perde 3 kesit elemanı için taze beton değerleri.

Döküm Süresince Ortalama Hava Sıcaklığı Değeri	25,0 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Sıcaklığı Değeri	28,0 °C
Döküm Süresince Ortalama Beton Çökme Değeri	235 mm
Döküm Süresince Ortalama Beton Hava Yüzdesi	5,6 %
Toplam Alınan Numune Sayısı	4 silindir
Toplam Dökülen Beton Hacmi	130 m ³
Döküm Süresi	7 sa 27 dk

Yukarıdaki taze beton verilerinden yararlanılarak **Çizelge 4.18** deki kür şartları yapısal elemanda uygulanmıştır.

Çizelge 4.18 : Perde 3 kesit elemanı için kür koşulları uygulama.

Hava Koşulu	Yapı Elemanı	Soğutma		Kalıp Sökümü	Kür Bitimi	Bir Sonraki Döküm
Yaz	Perde (t=1.4m)	2 gün	12°C	3 gün	20 gün (5 mm formflex)	4 gün

Beton dökümünden önce başlatılan ve 20 gün boyunca kayıt edilen sıcaklık ölçüm verilerinden elde edilen özet sonuçlar **Çizelge 4.19** da verilmiştir.

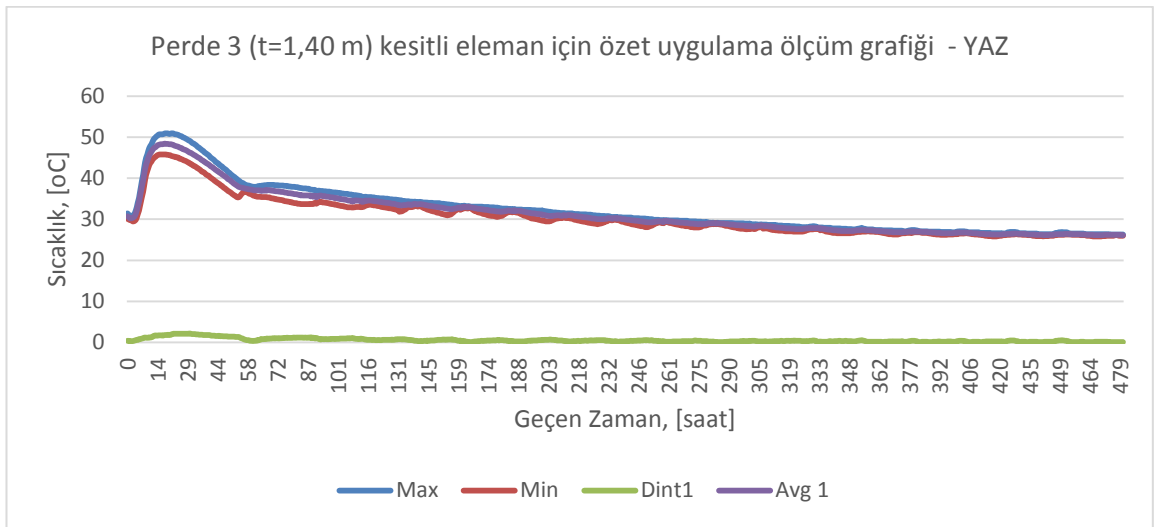
Perde için; soğutma sistemi beton başladığında çalışır durumdadır ve soğutma süresi boyunca (2 gün / 48 saat) soğutma suyunda (W_{in} ve W_{out} arasında) 0 ila 0,5 °C arasında fark görülmüştür. Soğutma sürecinde betondan çıkan suyun ısınması eğrilerin yer değişiminden gözlemlenebilmiştir.

Çizelge 4.19 : Perde 3 kesiti için yaz simülasyon-ölçüm karşılaştırması.

	Ölçüm Verisi	Simülasyon Verisi
Önceki betonun ortalama sıcaklığı	-	-
Taze beton sıcaklığı	28,1 °C	≤ 33 °C
Kür başlangıcı	30 dk içinde	45 dk içinde
Donmaya karşı koruma	*	12sa sonra
Yan kalıbın sökümü	48 sa sonra	72sa sonra
Ana kalıbın sökümü	84sa sonra	120sa sonra
Buharlaştırma korumasının sonlandırılması	20 gün sonra	9 gün sonra
Isıl korumanın sonlandırılması	20 gün sonra	20 gün sonra
Sıcaklık ve Gerilmeler		
Maksimum dış sıcaklık farkı (su geçirimsiz)	-	-
Maksimum iç sıcaklık farkı	2,2 ve 3,5 °C	9°C
Maksimum sıcaklık	50,9 °C	54 °C
Maksimum sıcaklık zamanı	18-22 saat arası	24 sa sonra

*Yaz koşullarında donma olması beklenmediğinden uygulanmamıştır.

Maksimum sıcaklık 50,9°C olarak ölçülmüştür. Hava sıcaklıklarının yüksek seyretmesi nedeni ile en yüksek sıcaklık ilk olarak 18. saatte kayıt edilmiştir, 4 saat boyunca sabit kaldıktan sonra sıcaklık azalmaya başlamıştır. Soğutmanın sonlandırılması ile kesit sıcaklıklarında az miktarda artış gözlemlenmiştir. Döküm üzerinden 5 gün geçmesi ile beton sıcaklığının hava koşullarından etkilenmesi durumu eğrinin dalgalanmasından anlaşılmaktadır. Gündüz hava sıcaklıklarının yüksek, gece ise soğuk olması nedeniyle bu dalgalanmalar saptanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 :Perde 3 kesiti yaz koşulu ölçüm grafiği.

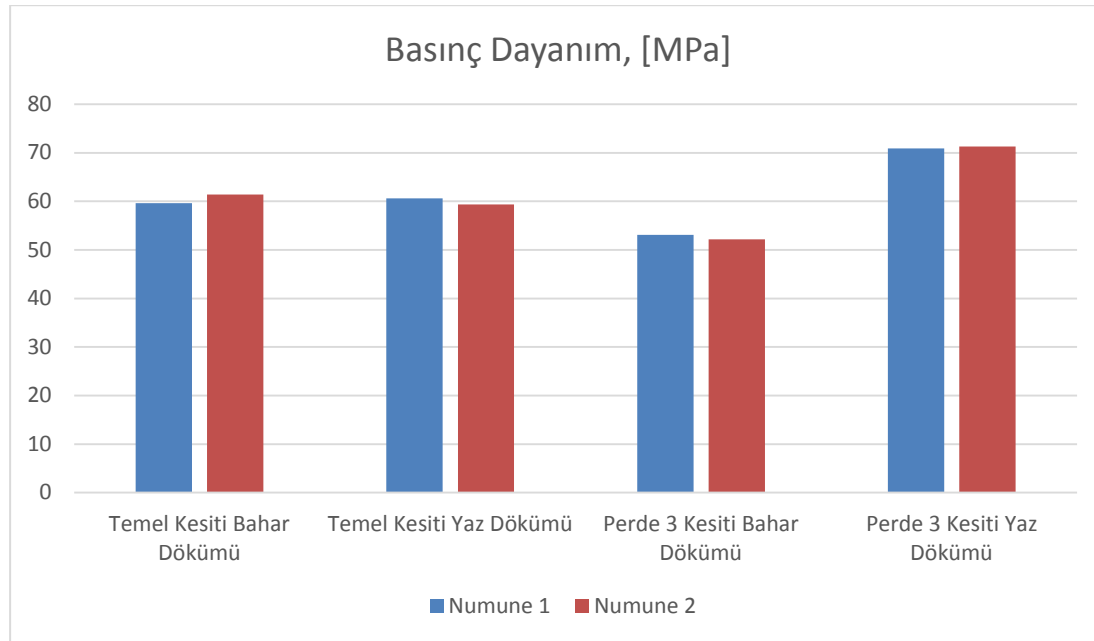
4.2.4 Basınç dayanım sonuçları

Sıcaklık gelişim izlemesi yapılan tüm elemanlar için 28 günlük basınç dayanım testleri yapılmıştır. Basınç dayanım sonuçları **Çizelge 4.20** de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : Sıcaklık gelişimi takip edilen kesitlerin basınç dayanımları.

Eleman	Basınç Dayanım (MPa)	Basınç Dayanım (MPa)	Basınç Dayanım (MPa)
	Numune 1 – 28gün	Numune 2 – 28gün	Ort. – 28 gün
Temel Kesiti / Bahar	59,6	61,4	60,5
Temel Kesiti / Yaz	60,6	59,4	60,0
Perde 3 Kesiti Bahar	53,1	52,2	52,7
Perde 3 Kesiti Yaz	70,9	71,3	71,1

Ölçüm yapılan 4 eleman için taze betondan alınan 150x300 silindirik beton numuneleri basınç dayanımı için kullanılmıştır. Laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerin ortalama basınç dayanım değeri 28 gün için 61 MPa'dır.



Şekil 4.17 : Temel ve perde elemanları için 28 günlük basınç dayanımları.

Sıcak havalarda dökülen ve kürlenmiş beton için karışım ıslaklığının yüksek olması nedeniyle daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında kesitlerin simülasyonu ile betonarme eleman içerisindeki sıcaklık ve gerilmelerinin tahmini yapılmıştır. Simülasyonu yapılan kesitlerde ısı gerilmeler etkisiyle ve/veya kısıtlanmış rötre nedeniyle oluşan çatlaklar ile ilgili deneysel araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Laboratuvar şartlarında halka deneyi ile elde edilen verilerde rötre çatlak potansiyelinin belirlenebileceği saptanmıştır. Betonun kısıtlanma dereceleri ile çatlak potansiyelinin etkilenebileceği; yüksek derecede engellenmiş betonda çatlağın daha erken oluşumunun gözlemlenmesi sonucu çıkarılmıştır.
- Halka deneyinde yüksek sıcaklıkta bekletilen betonun daha erken çatlaması sonucu alınmıştır. Bu duruma yüksek sıcaklıkta gelişimi hızlandırılan betonda kısıtlanmış rötre mekanizmasının daha erken oluştuğu gözlemlenmiştir.
- 2 farklı karışımda mikrosilikalı bir beton ile su-çimento oranının farklı betonda halka deneyi ile çatlama zamanını etkilemediği gözlemlenmiştir.
- Kısıtlanmış rötre deneyi yapılan 2 farklı karışımda elastisite modülü yarmada çekme dayanımı, basınç dayanım deneyleri ile deneysel ölçülen rötre verileri karşılaştırılmıştır.
- Kısıtlanmış rötre potansiyeli yüksek olan betonda çatlak genişliğinin 0,4mm olmasına karşın, kısıtlanmış rötre potansiyeli düşük olan beton tasarımında oluşan çatlak genişliği 0,2 mm tespit edilmiştir. Erken yaşta çatlakan betonda oluşan çatlakların daha büyük olduğu kararına varılmıştır.
- Betonda ısı genleşmeler ve rötre sonucu oluşan çatlaklarda zamana bağlı olarak genişleme mekanizmasının varlığı halka içinde bir süre bekleyen numunelerde çatlak boyutlarının +0,1 mm arttığı gözlemlenerek tespit edilmiştir.
- Kısıtlanmış rötre deneyinde, sıcaklık gelişiminin numuneler üzerinde etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

- K t le betonlarında simülasyon yöntemi ile yapının ısıya bağlı stres, iliŐkilerinin öngörülmesi ve döküm öncesi tahminler ile uygun k r yöntem ve s resinin belirlenebilmesi mümkündür.
- Soğutulmuş kesitli elemanlarda soğutma suyunun beton sıcaklığını uygun seviyelerde tutmak için aktif bir yöntem olmasının farkındalığına varılmıştır.
- Betonun ısl gelişiminin üzerinde; k r ortam koşulları, taze beton sıcaklığı ve betonun diğer özelliklerinin etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak yüksek performanslı betonlar ile tasarlanan yapılarda simülasyon yazılımları ile bir yapının kesitlerinde beton özellikleri tanımlanarak imalat öncesi ısl gerilme yüklerinin hesaplarının belirlenebilmesi mümkündür.  n tahminlerin saha ölümleri ile uygunluğu sonuçlarla ispatlanmış döküm yapılan tüm betonarme kesitlerde erken yaşta hiç bir  atlağa rastlanmamıŐtır.

Tez sonucu öneri olarak ise;

- Laboratuvar çalışmasında yapılan ölümlerde  elik üzerindeki gerinim pullarından alınan verilerden betondaki gerilme hesaplanabilirse çatlak zamanında oluşan betondaki çekme gerilmesi bulunabilir duruma gelir.
- Bu sonuçlar ile betonun yarmada çekme dayanımından çekme gerilmesi karŐılaŐtırmaları yapılabilir.

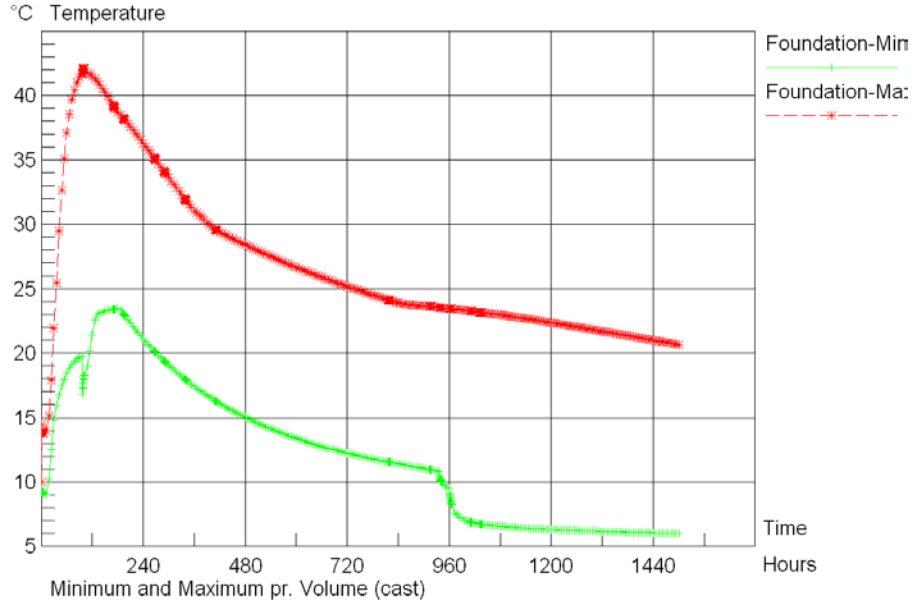
KAYNAKLAR

- [1] **Wang, K., Ge, Z., Grove, J., Ruiz, M. and Rasmussen, R.**, 2006. Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring The Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field Applications , *Final Report*, s14-15, US.
- [2] **Neville, A.M.**, 2011. Properties of Concrete, Heat of Hydration of Cement, s37, UK.
- [3] **Kosmatka, H., Voigt, Gerald F., Taylor, Peter.**, 2006, Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual, Center for Transportation Research and Education Iowa State University, s69-104.
- [4] **Binici, H., Çağatay, İ.H., Kaplan, H.**, 2005, Çimentonun Hidratasyon Isısının Ölçümünde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, *PU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s2.
- [5] **Acquaye, L.**, 2006, Effect of High Curing Temperatures on the Strength, Durability and Potential of Delayed Ettringite Formation in Mass Concrete Structures, University of Florida, s32.
- [6] **Construction Materials Consultants Inc.**, Microstructure of Concrete affected by Delayed Ettringite Formation, Photo Gallery, <http://www.cmc-concrete.com/> .
- [7] **Ronne, M., Hammer, T. A.**, 1999, Delayed Ettringite Formation in Structural Lightweight Aggregate Concrete: Effect of Curing Temperature, Moisture and Silica Fume Content, s202-211.
- [8] **Kutlu O., Demiriz M.**, Cem III Tipi Çimentoların Betonda Kullanımının Teknik Ve Ekonomik Yönlerinin Değerlendirilmesi, s8.
- [9] **Saetta A., Scotta R., Vitaliani R.**, 1995, Stress Analysis of Concrete Structures Subjected to Variable Thermal Loads, Journal of Structural Engineering, s11.
- [10] **Schindler A. K. McCullough B. F.**, 2002, The Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions, The Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C, s5.
- [11] **Moser R.** Mass Concrete, Lecture Notes for CEE8813A Material Science of Concrete Lesson, s5-10
- [12] **ACI 301-05**, 2005, Specifications for Structural Concrete, An ACI Standard, Reported by ACI Comitee 301, s43-45.

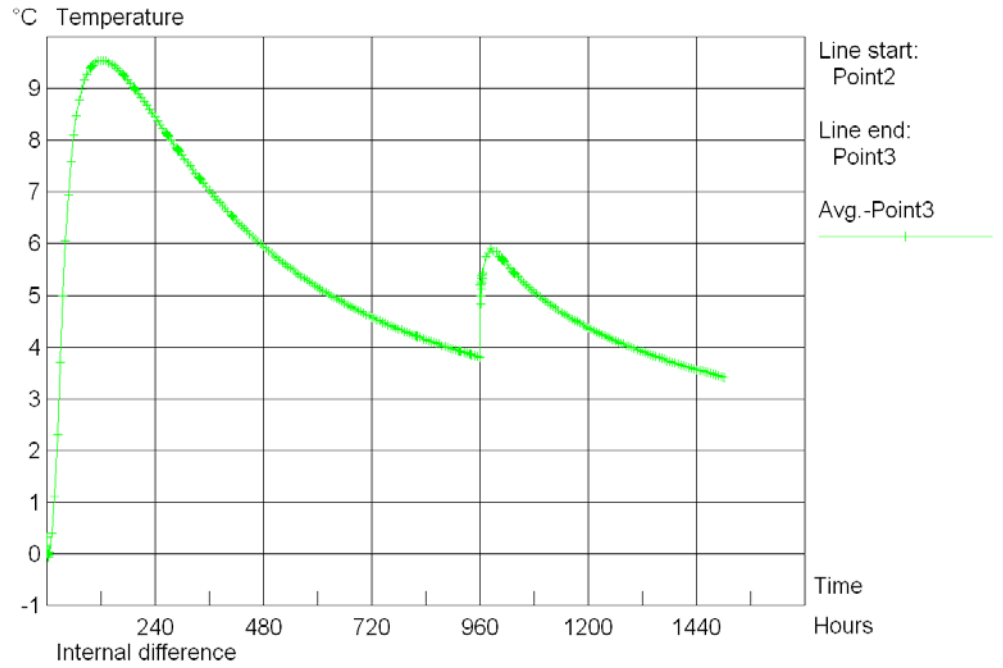
- [13] **Holt E. E.**, 2001, Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete, VTT Building and Transport, s9-31.
- [14] **Çorbacioğlu U.**, 2008, Beton Karışım Tasarımının Geçirimsizliğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Turkey, s12-30.
- [15] **ASTM C-1581**, 2004. Standard Test Method for Determining Age at Cracking And Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar And Concrete Under Restrained Shrinkage, ASTM, U.S.A.
- [16] **Briffaut W., Benboudjema M., Torrenti J.M, Nahas G.**, 2010, A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures, s4-30.
- [17] **Raoufi K., Pour-Ghaz M., Poursaei A., Weiss J.**, 2011, Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Elements: Role of Substrate Bond on Crack Development, Journal of Materials Civil Engineering ASCE, June 2011, s3-8.
- [18] **Gong, Z.**, 2006, Cracking Studies of High-Performance concrete for Bridge Decks, PhD Thesis, West Virginia University, Morgantown.
- [19] **Akkaya, Y., Ouyang, C. And Shah, S.**, 2007, Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete, Cement and Concrete Composites, 29, s117-123, US.
- [20] **ACI 207.4R-93**, 1993, Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete, ACI Committee Report, Reported by ACI Comitee 207, s3-18.
- [21] **Gao G., Qian C.**, 2011, Reduction of Interior Temperature of Mass Concrete Using Suspension of Phase Change Materials as Cooling Fluid, Construction of Building Materials 26, s1-2.
- [22] **Sarıalioğlu D., Akkaya Y., Aslan Ş. Y.**, Kütle Betonlarının Erken Yaşta Çatlama Riskine Göre Tasarımında Simülasyon Programı Uygulaması, s2-4.
- [23] **Dahlblom O., Lindemann J.**, 2000, HACON A Program for Simulation of Temperature and Stress in Hardening Concrete, s25,35,53.
- [24] **ASTM C-1074**, 2011, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, s2
- [25] **Papworth F., Barnes R., Fox M., Munn R.**, Thermal Analysis, Temperature Monitoring And Maturity Assessment, s10.
- [26] **Riding K.A.**, 2007, “Early Age Concrete Thermal Stress Measurement and Modeling, s233.
- [27] **DTI Building Technology**, 1998, 4C-Temp&Stress Ver. 2.0 for Windows, User Manual.
- [28] **OMEGA Engineering Inc**, Transducer Quality Strain Gauge, User Manual, E46, http://www.omega.com/Pressure/pdf/SGT_Rev-Bend_FullBridge.pdf

EKLER

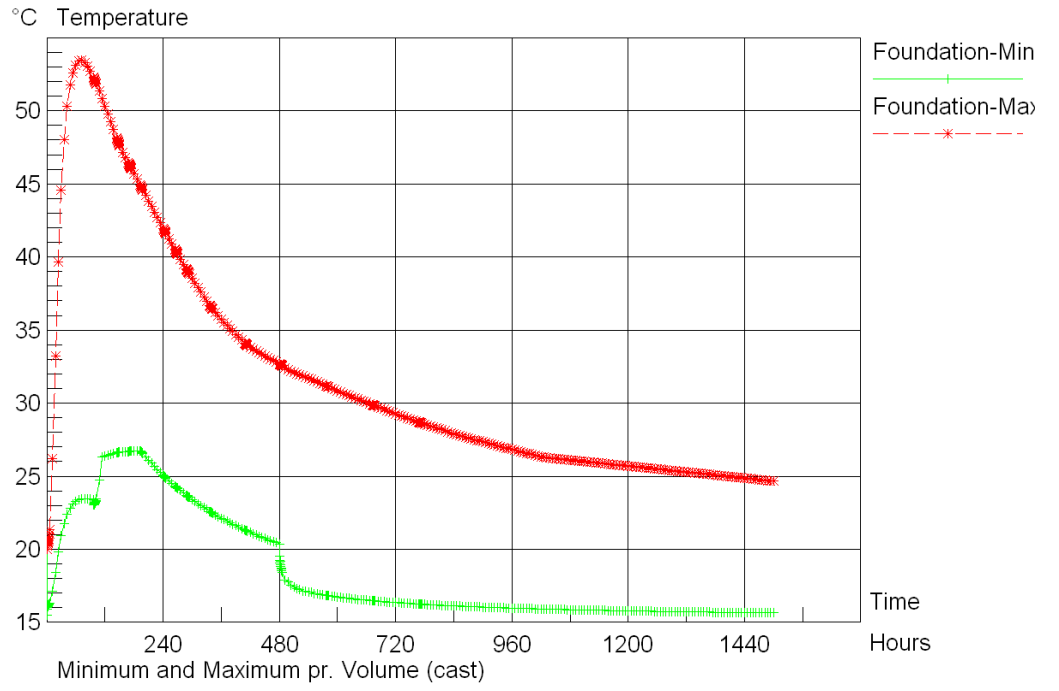
- **EK-A:** Simülasyon Sonuç Grafikleri



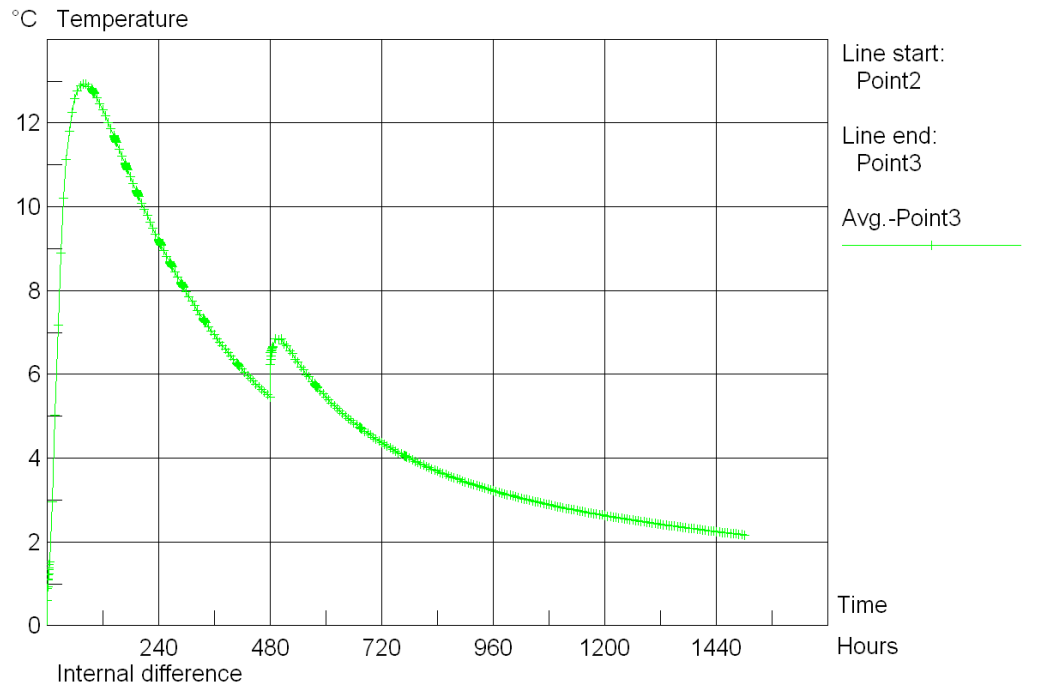
Şekil A.1 : Temel kesiti için kış koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar/zaman diyagramları (T_{\min} - T_{\max}).



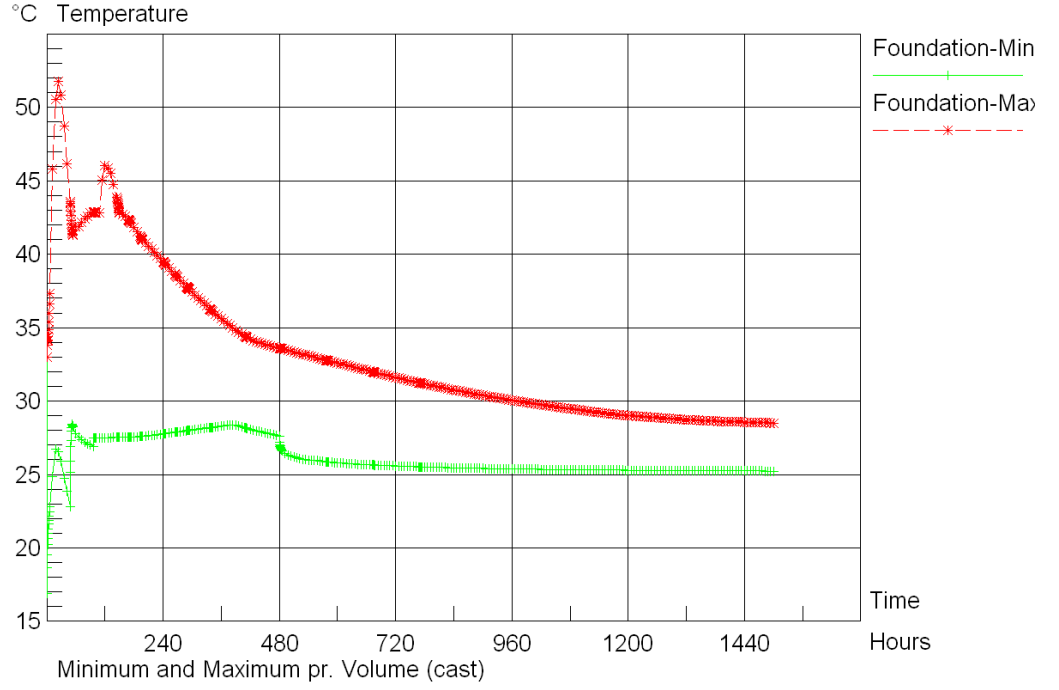
Şekil A.2 : Temel kesiti için kış koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



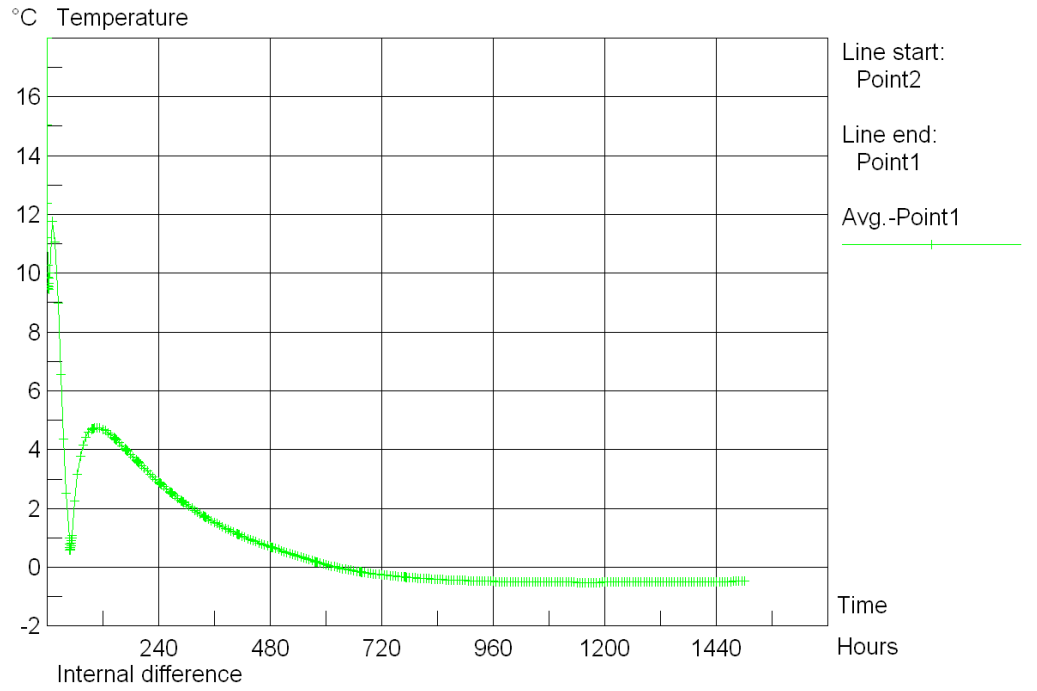
Şekil A.3 : Temel kesiti için bahar-güz koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar (T_{\min} - T_{\max}).



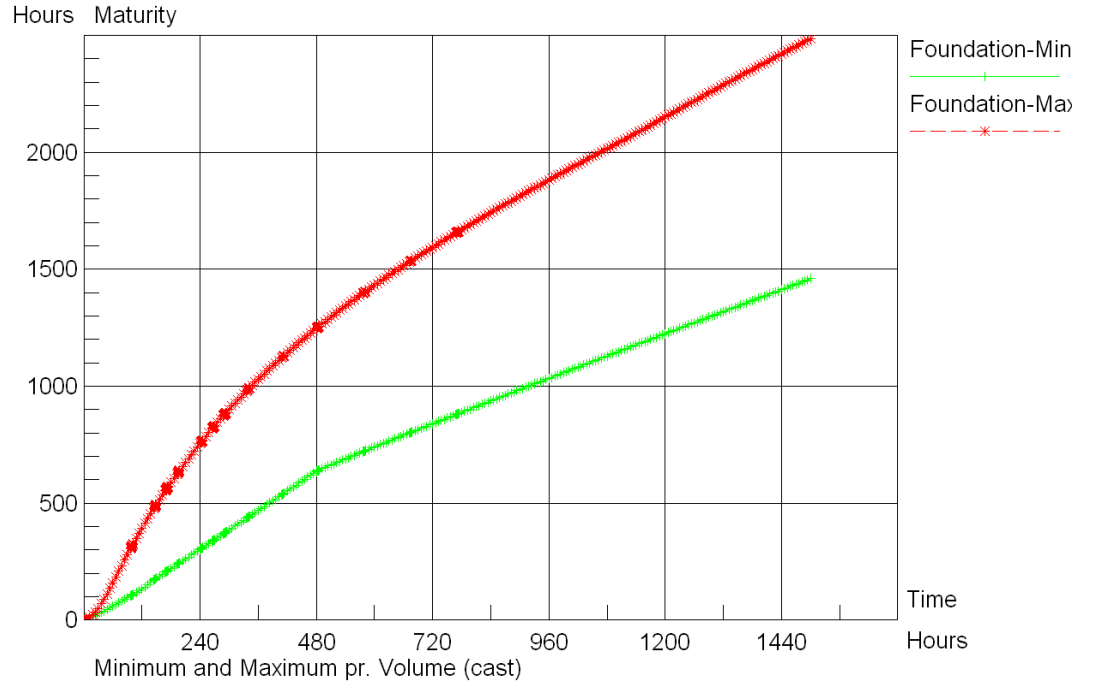
Şekil A.4 : Temel kesiti için bahar/güz-1 koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



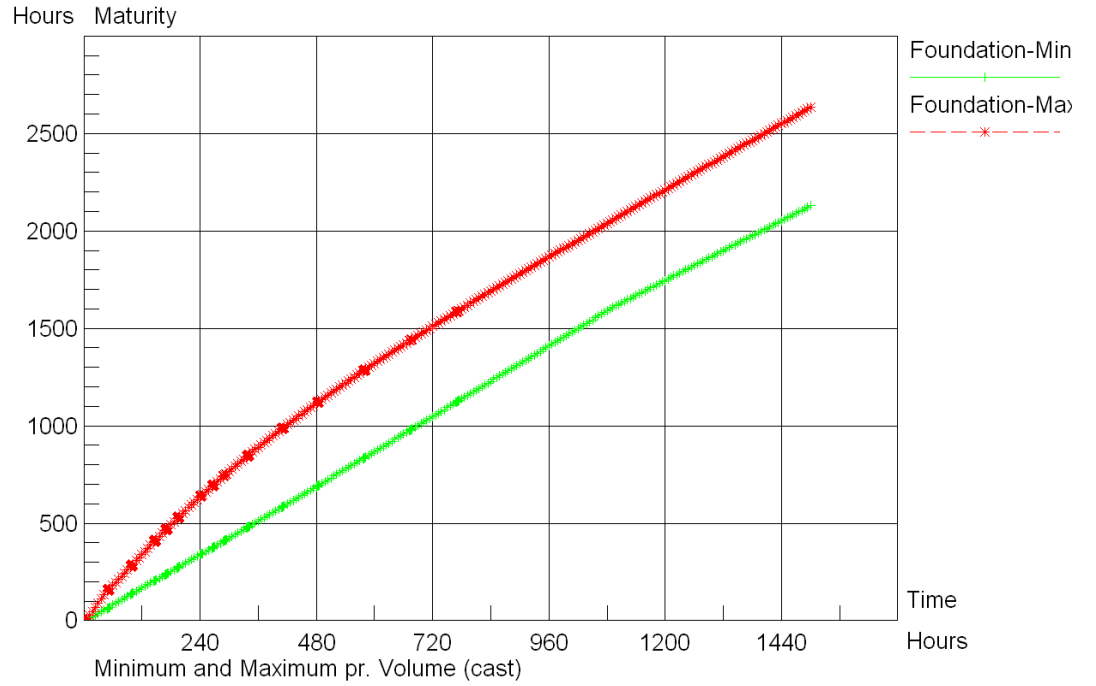
Şekil A.5 : Temel kesiti için yaz koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar ($T_{\min} - T_{\max}$).



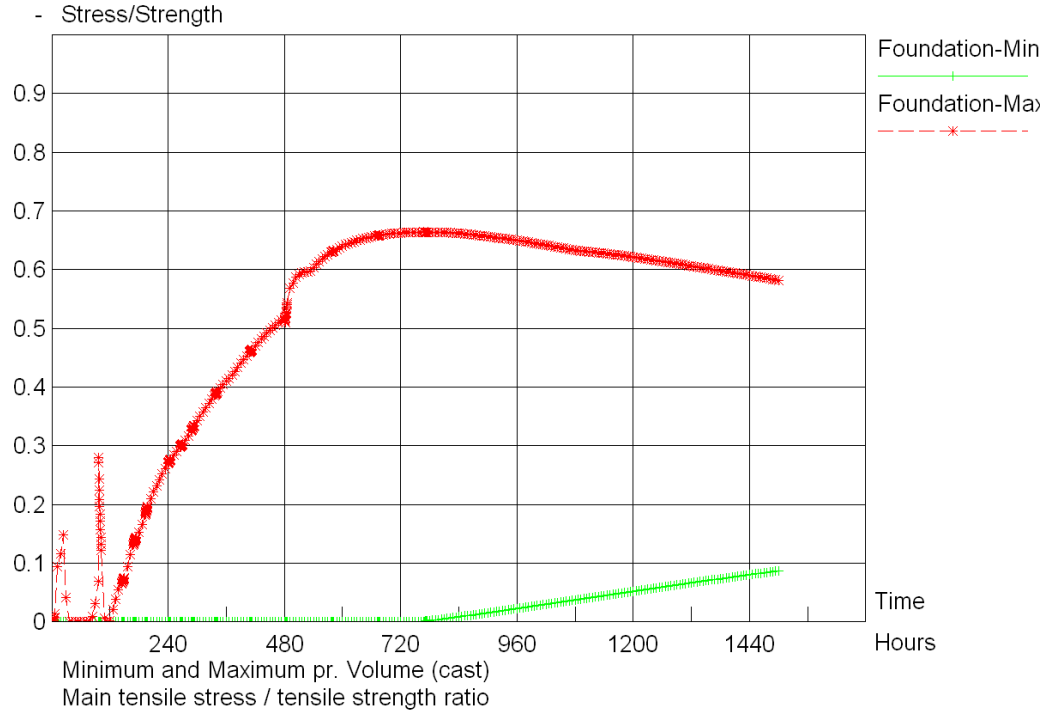
Şekil A.6 : Temel kesiti için yaz koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



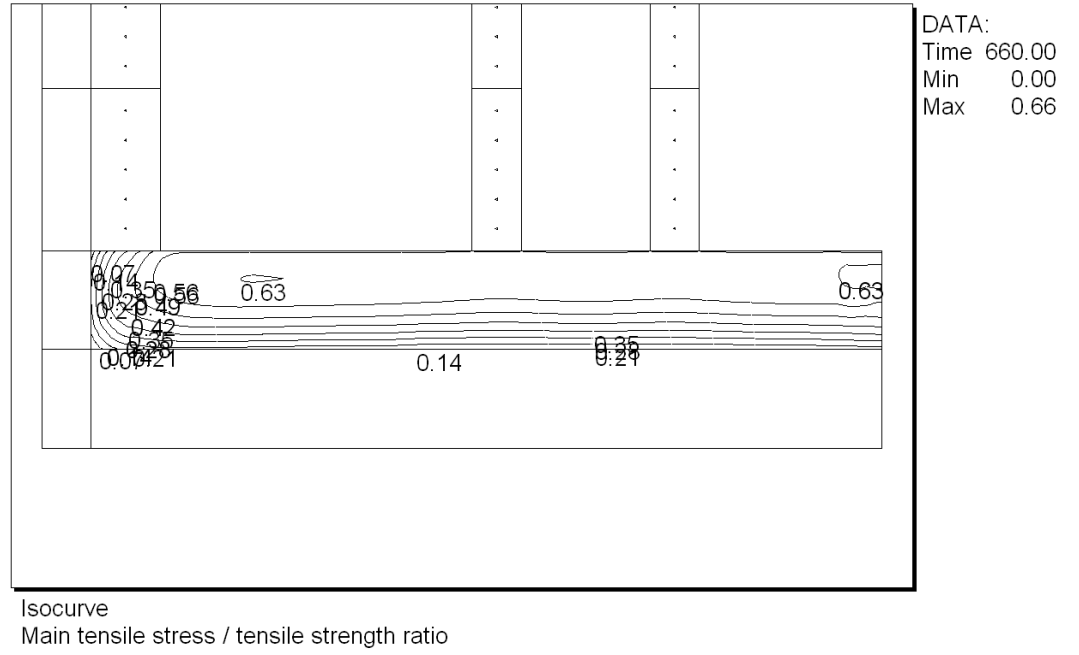
Şekil A.7 : Temel kesiti için bahar/güz koşulları altında olgunluk (maturite) gelişimi.



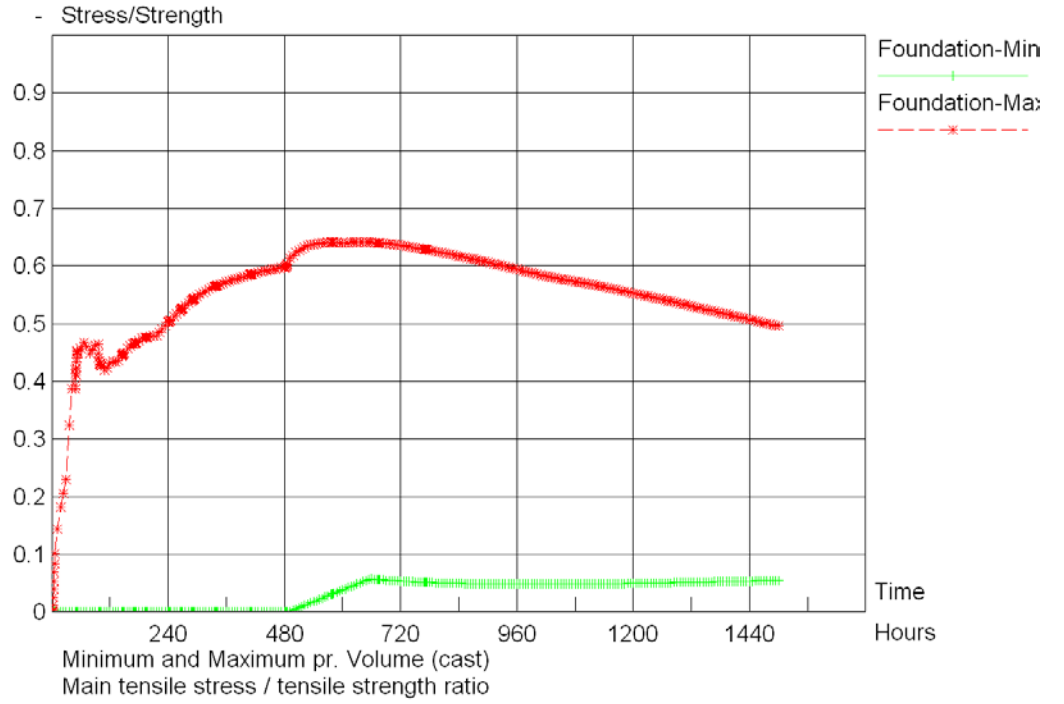
Şekil A.8 : Temel kesiti için yaz koşulları altında olgunluk (maturite) gelişimi.



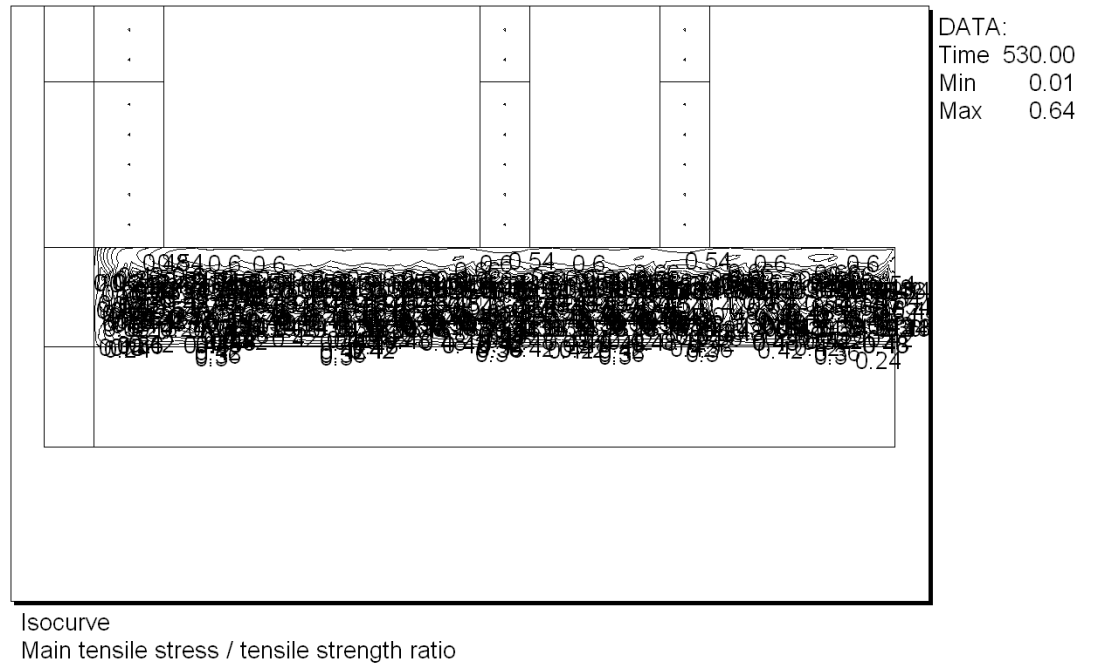
Şekil A.9 : Temel kesiti için bahar/güz koşulları altında çatlak riski gelişimi.



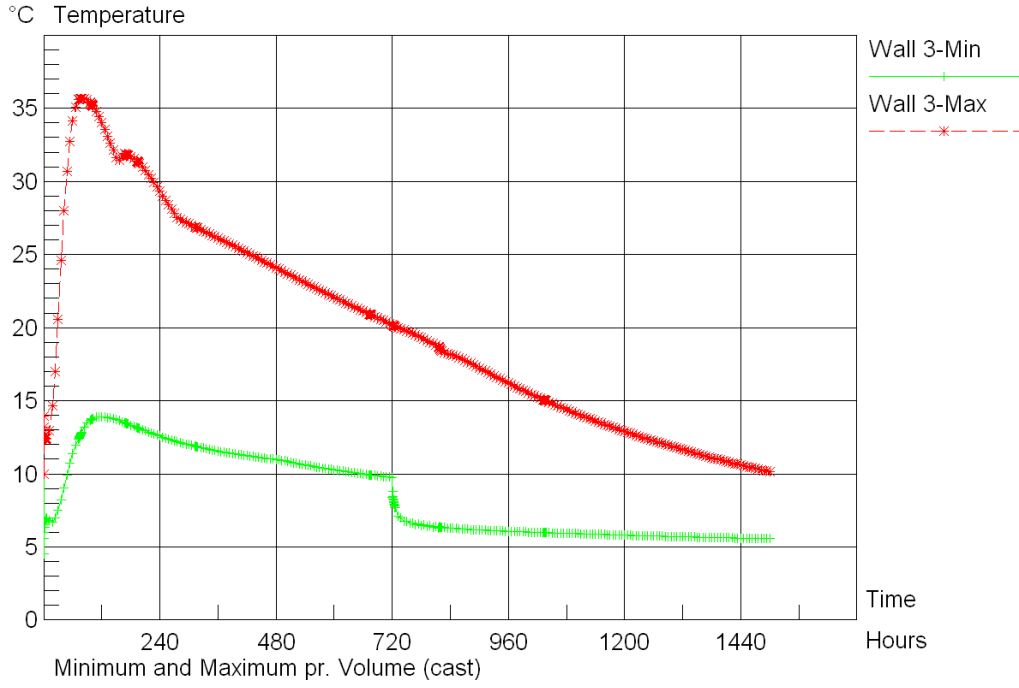
Şekil A.10 : Temel kesiti için bahar/güz koşulu çatlak riski gerilim dağılımı - eş eğriler.



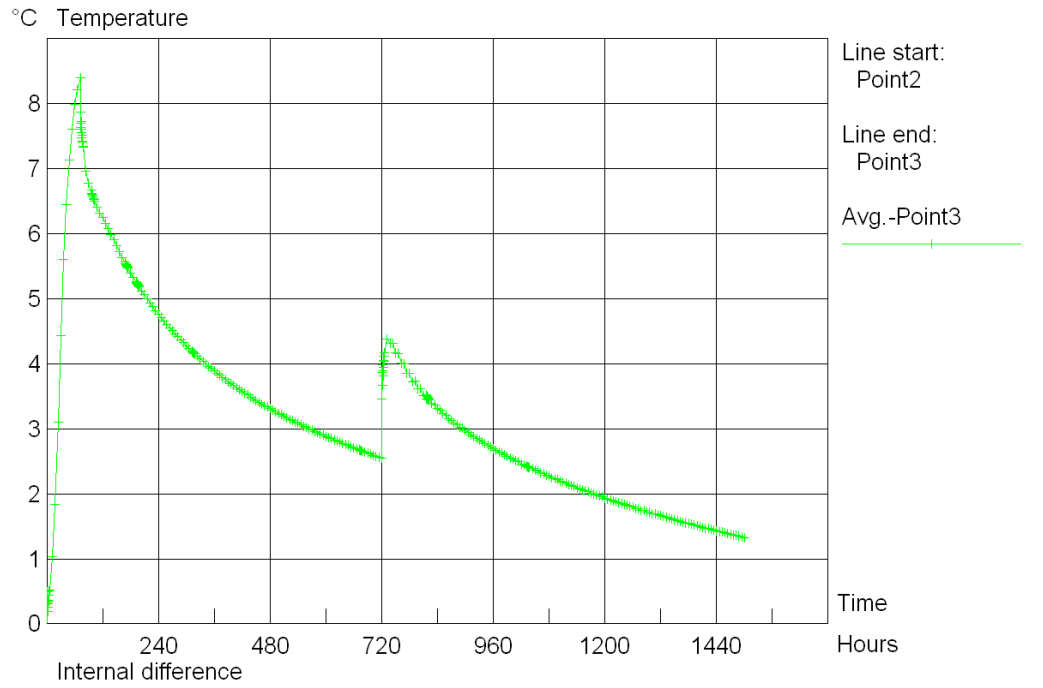
Şekil A.11 : Temel kesiti için yaz koşulları altında çatlak riski gelişimi.



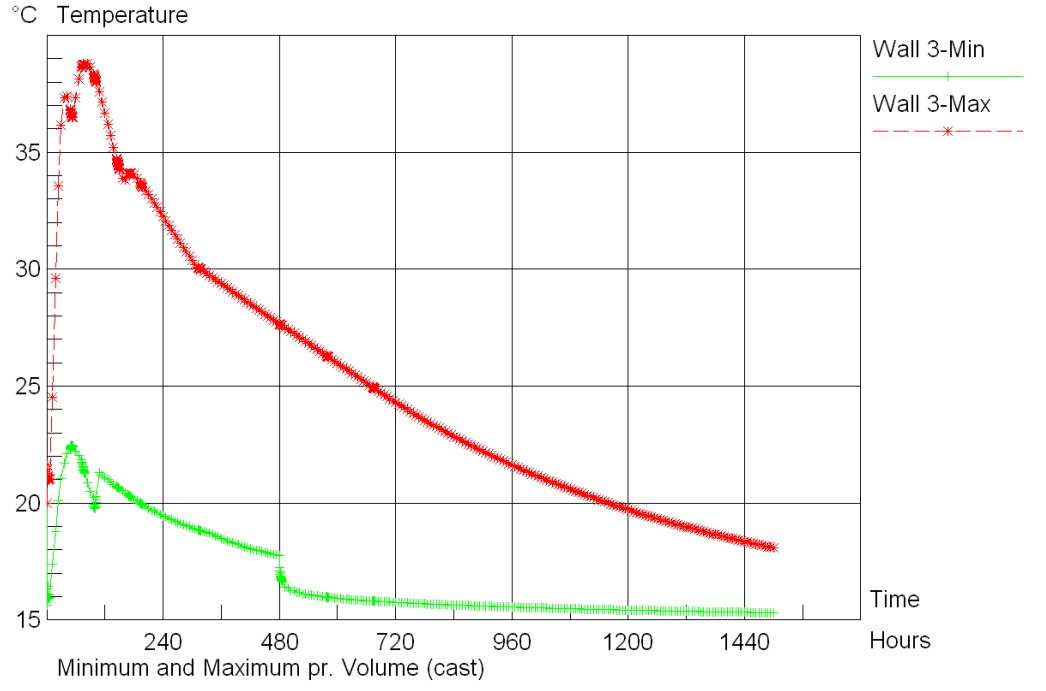
Şekil A.12 : Temel kesiti için yaz koşulu çatlak riski gerilim dağılımı - eş eğriler.



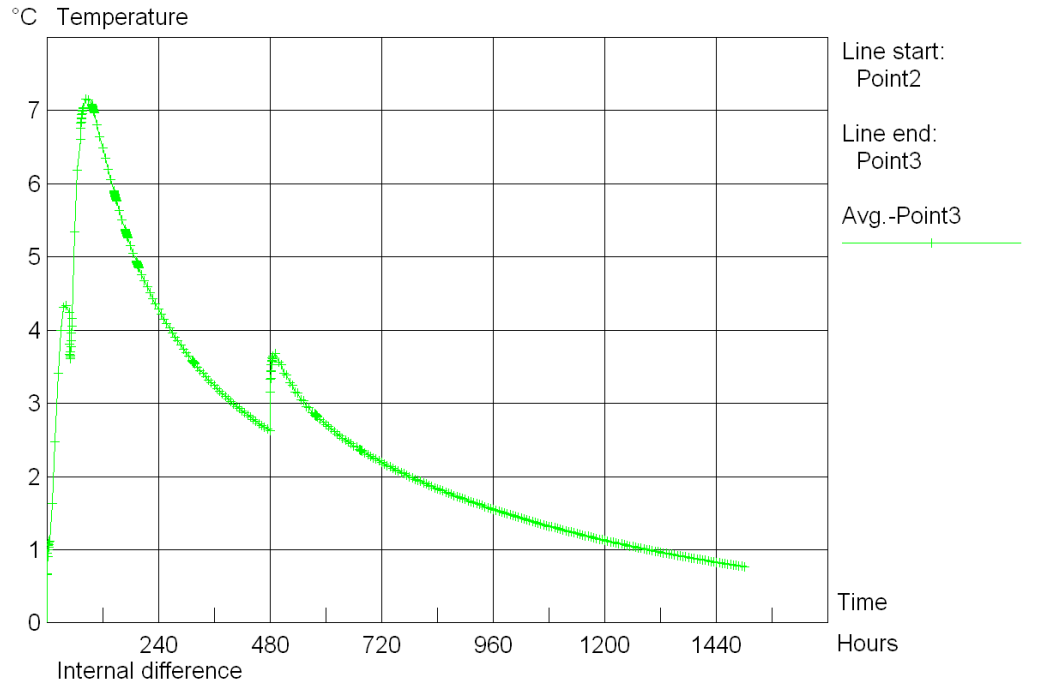
Şekil A.13 : Perde 3 kesiti için kış koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar ($T_{min} - T_{max}$).



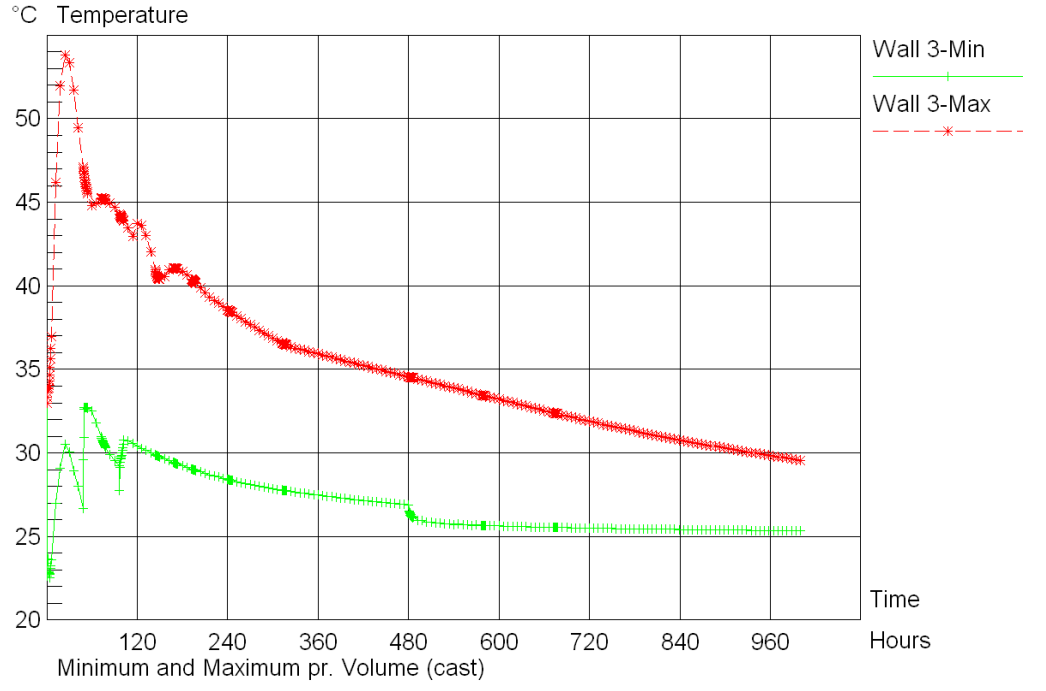
Şekil A.14 : Perde 3 kesiti için kış koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



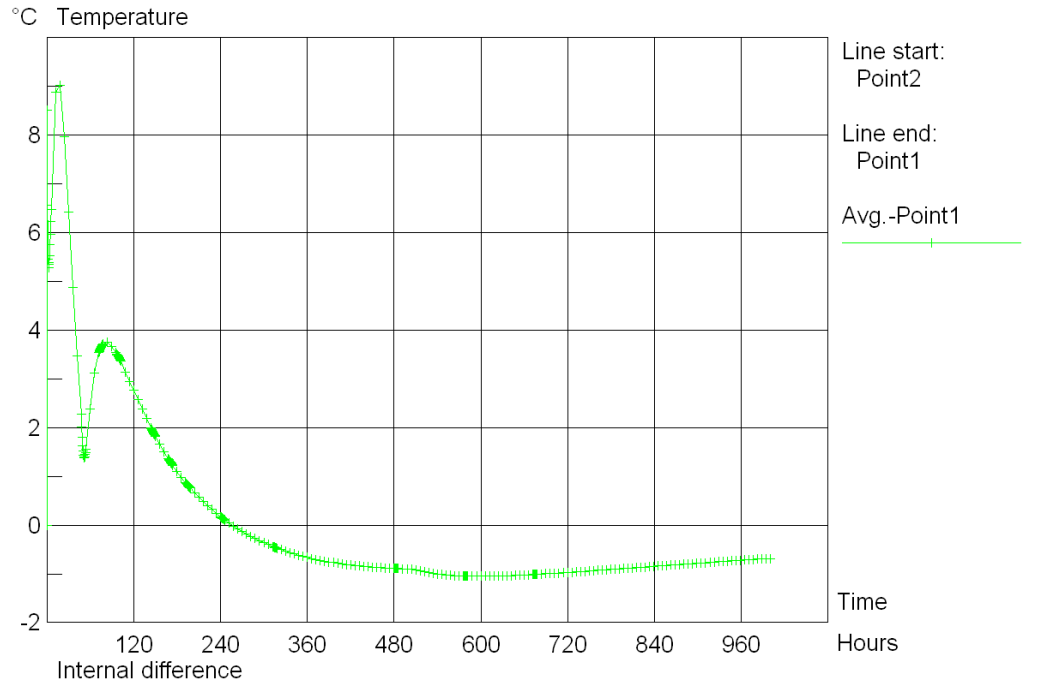
Şekil A.15 : Perde 3 kesiti için bahar/güz koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar ($T_{\min} - T_{\max}$).



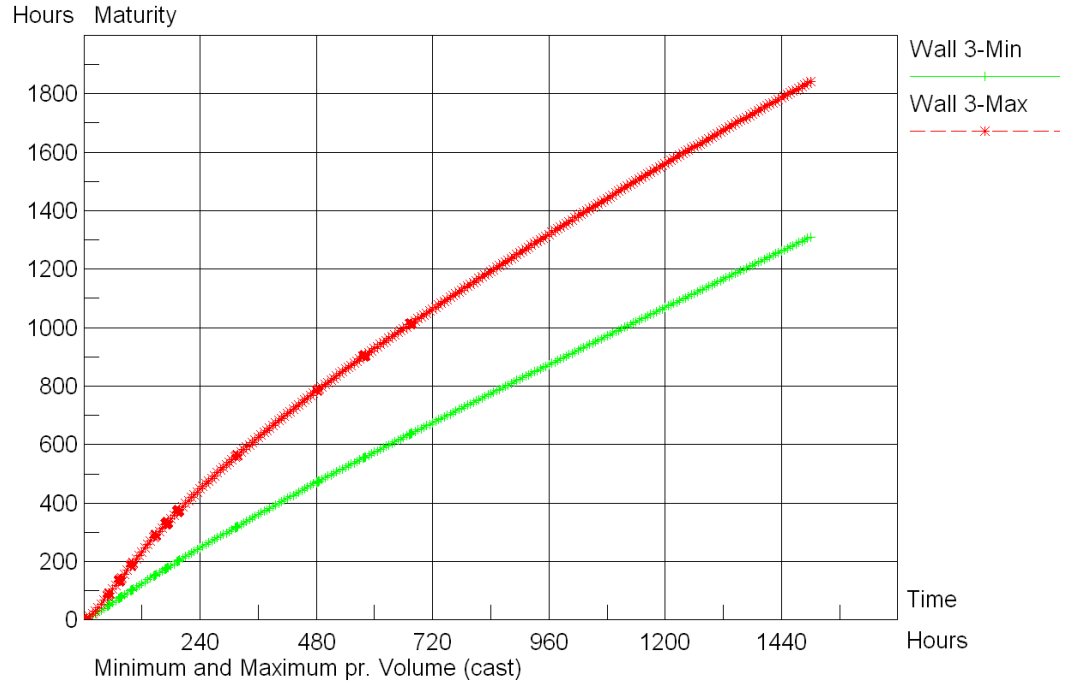
Şekil A.16 : Perde 3 kesiti için bahar/güz koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



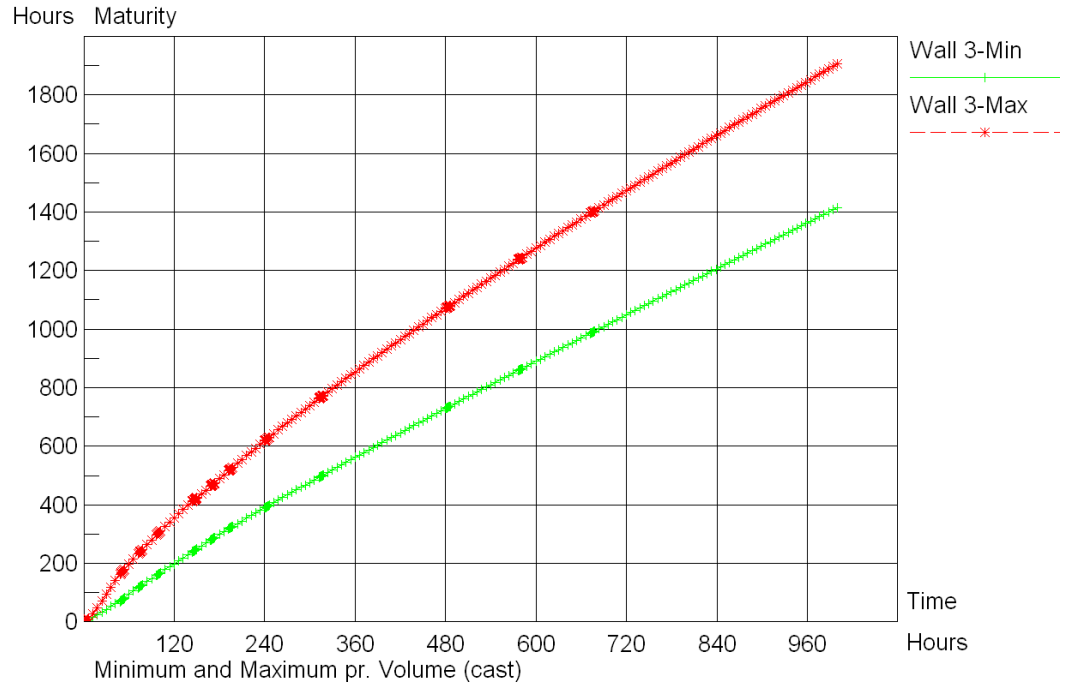
Şekil A.17 : Perde 3 kesiti için yaz koşulları altında maksimum-minimum sıcaklıklar ($T_{\min} - T_{\max}$).



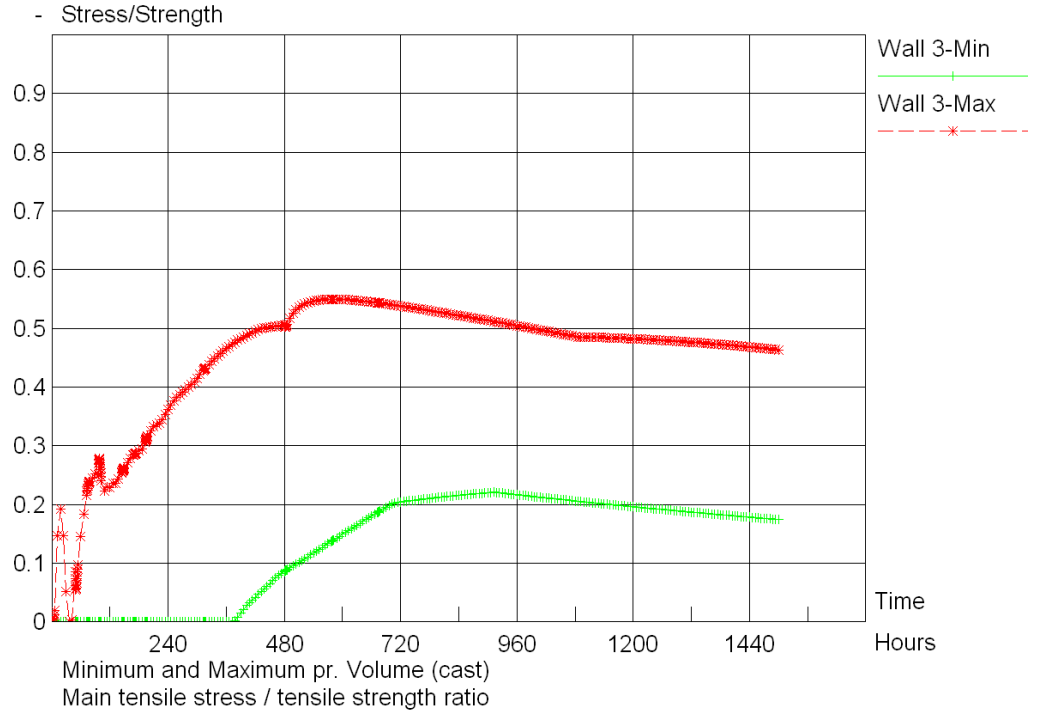
Şekil A.18 : Perde 3 kesiti için yaz koşulları altında iç-dış sıcaklık farkı (D_{int}).



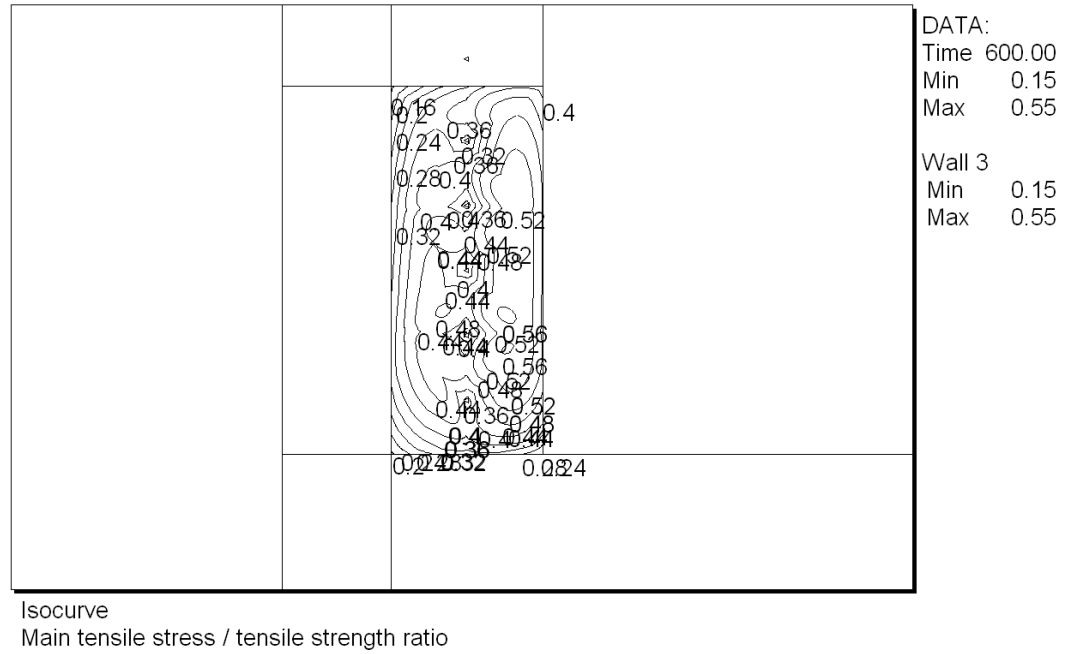
Şekil A.19 : Perde 3 kesiti için bahar/güz koşulları altında olgunluk gelişimi.



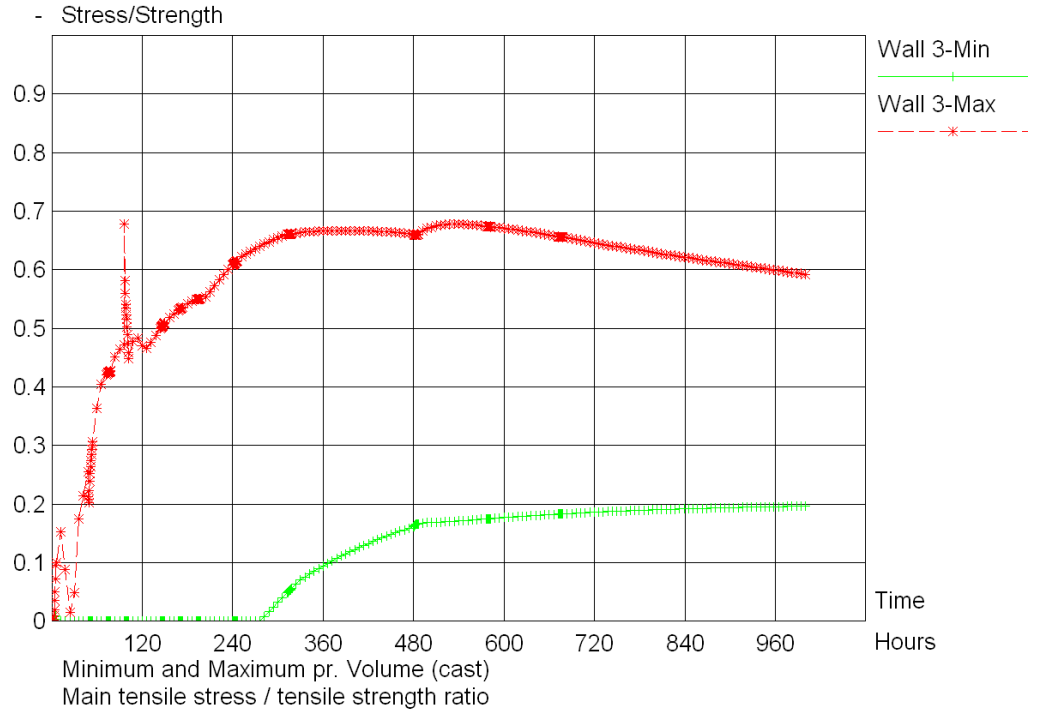
Şekil A.20 : Perde 3 kesiti için yaz koşulları altında olgunluk gelişimi.



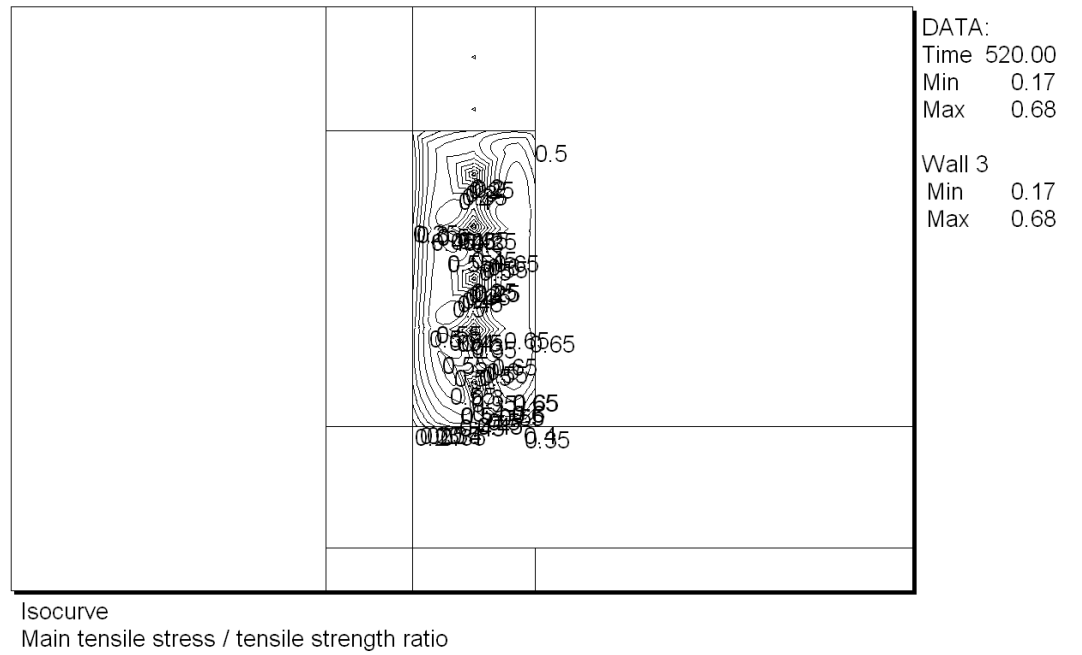
Şekil A.21 : Perde 3 kesiti için bahar/güz koşulu çatlak riski grafiği.



Şekil A.22 : Perde 3 kesiti için bahar/güz koşulu çatlak riski gerilim dağılımı
- eş eğriler.



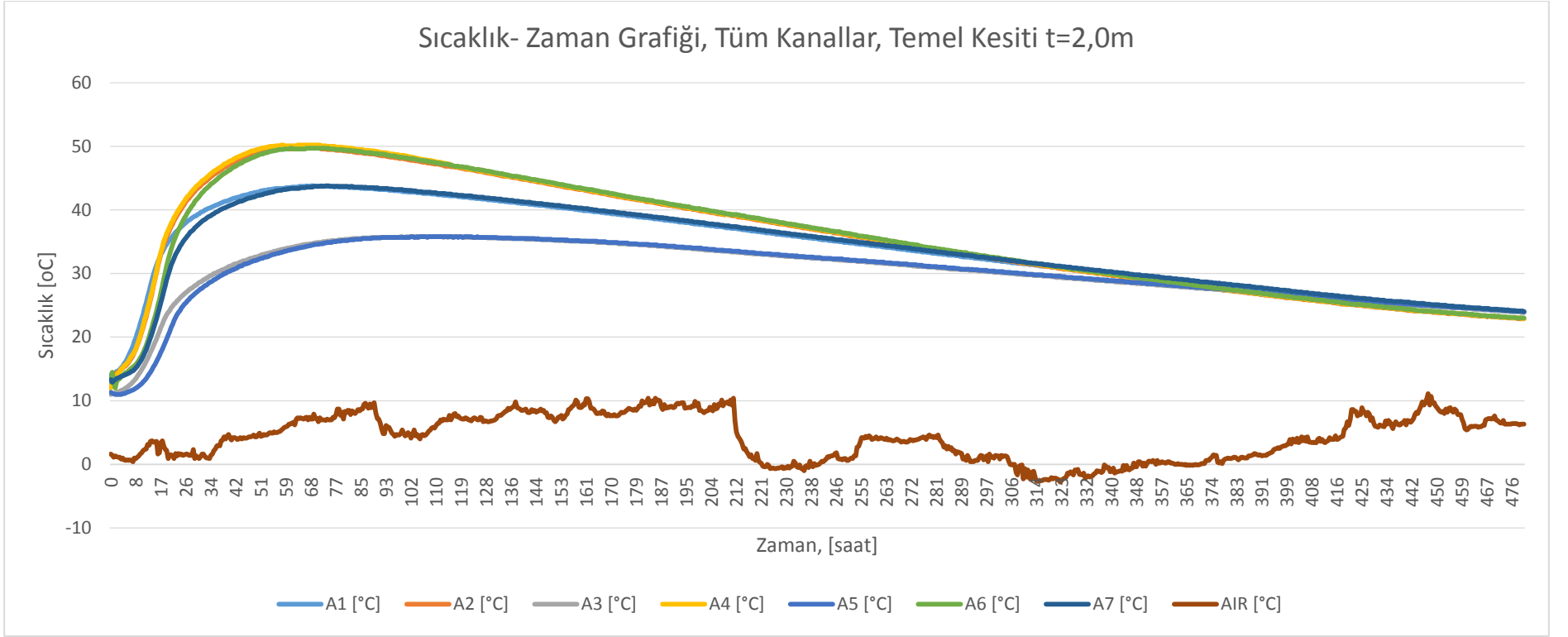
Şekil A.23 : Perde 3 kesiti için yaz koşulu çatlak riski grafiği.



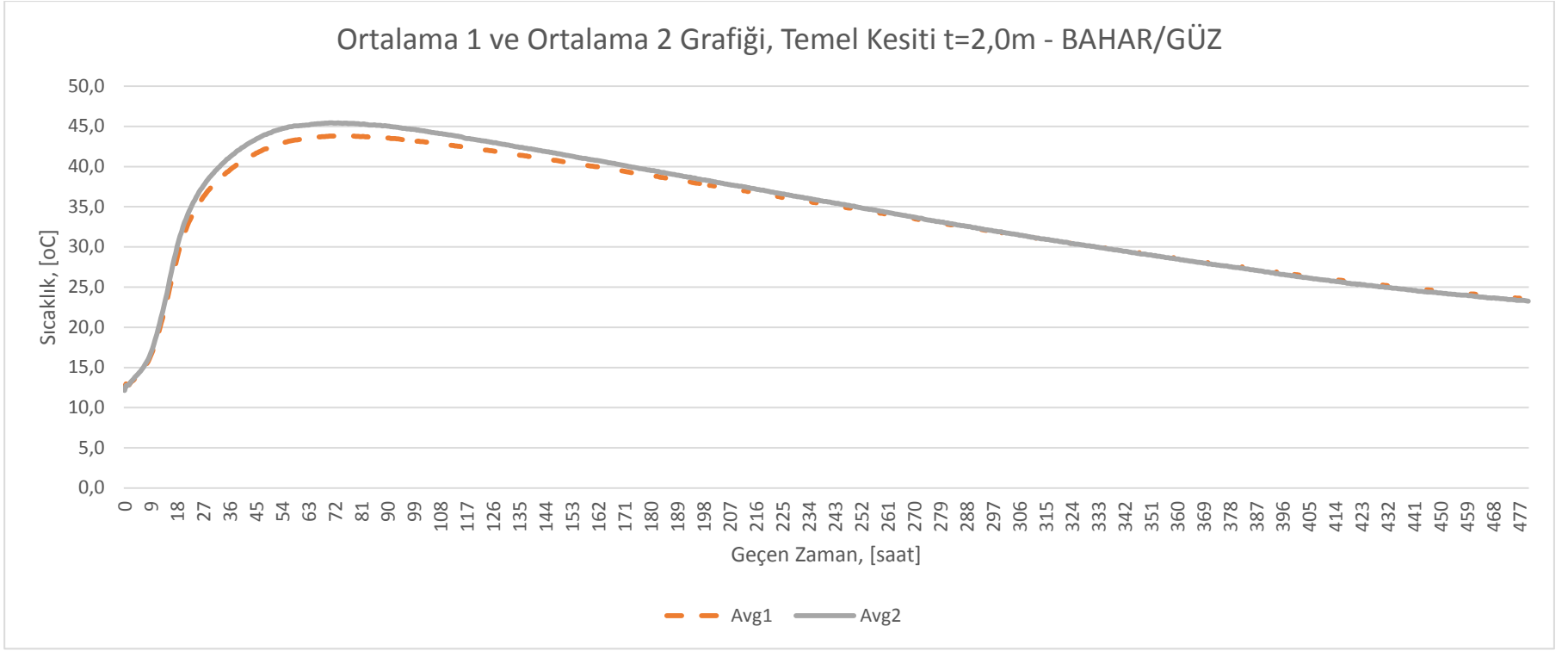
Şekil A.24 : Perde 3 kesiti için yaz koşulu çatlak riski gerilim dağılımı - eş eğriler.

EKLER

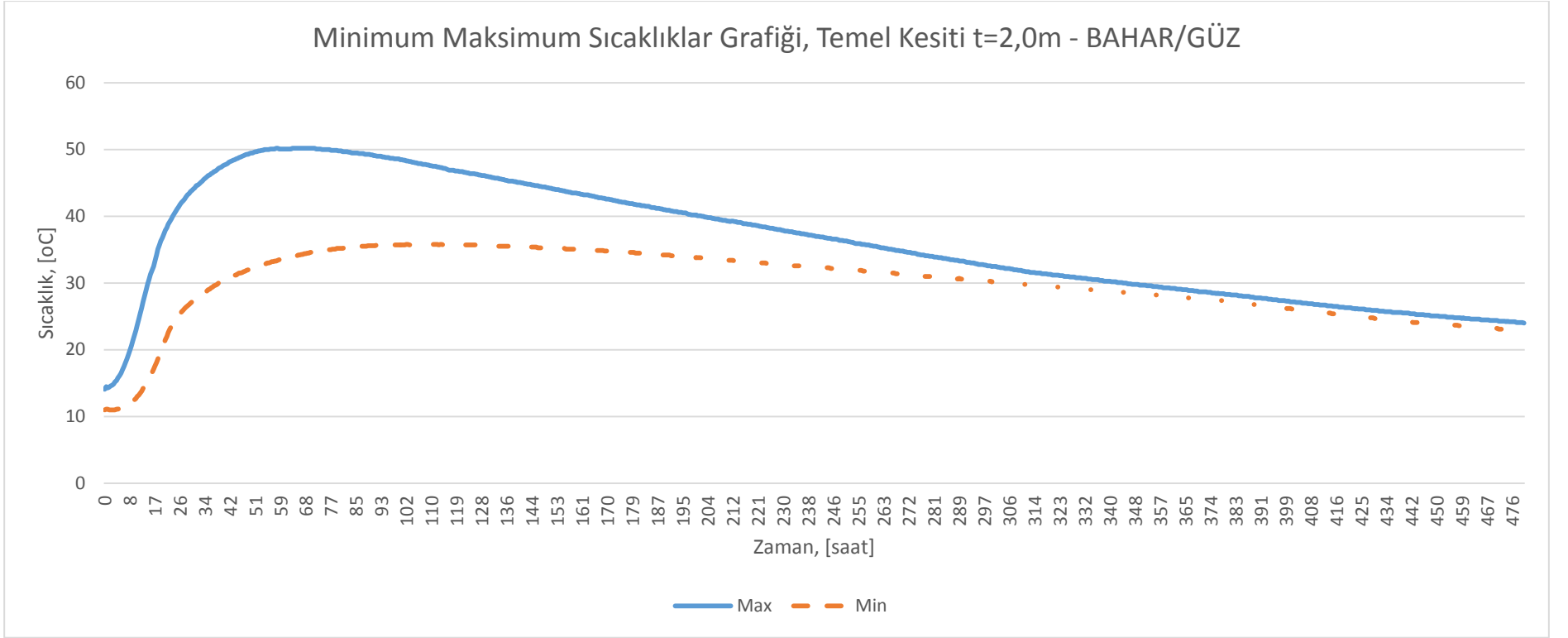
- **EK-B:** Uygulama/Ölçüm Sonuç Grafikleri



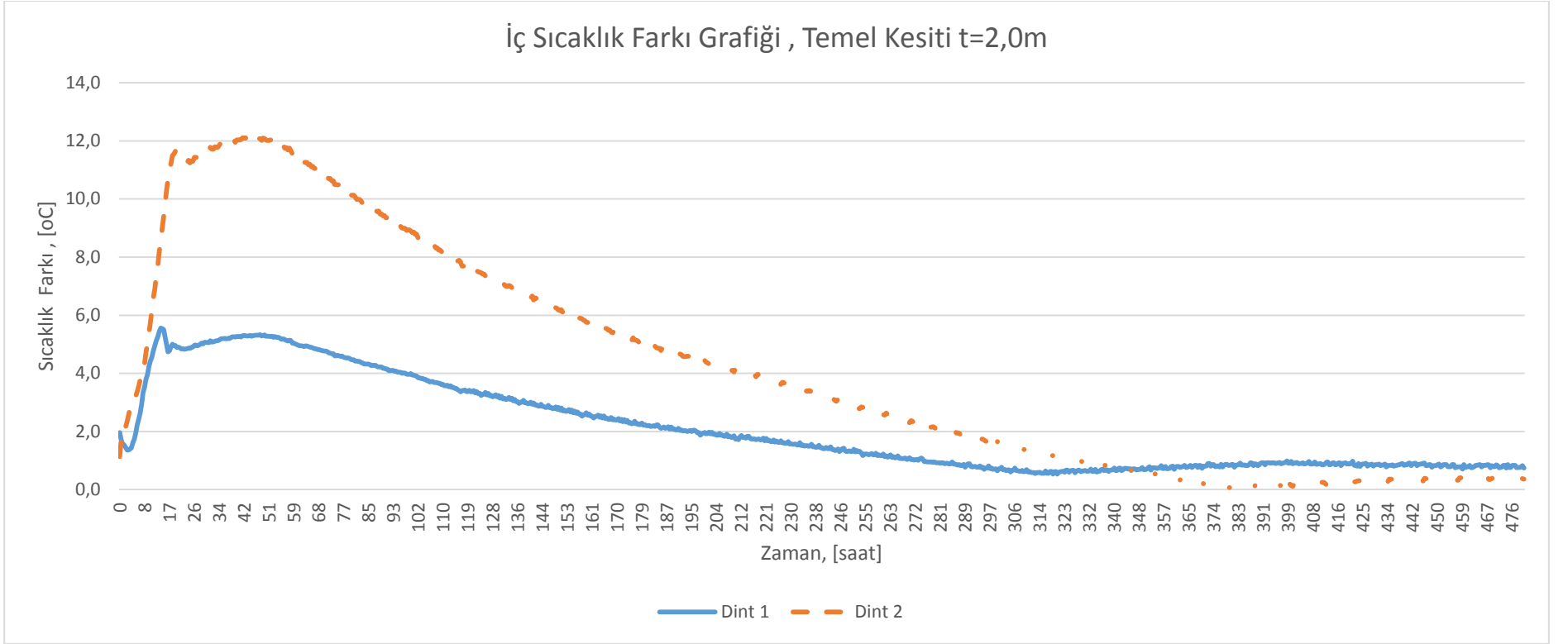
Şekil B. 1 : Temel kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - tüm kesit kanalları ve ortam.



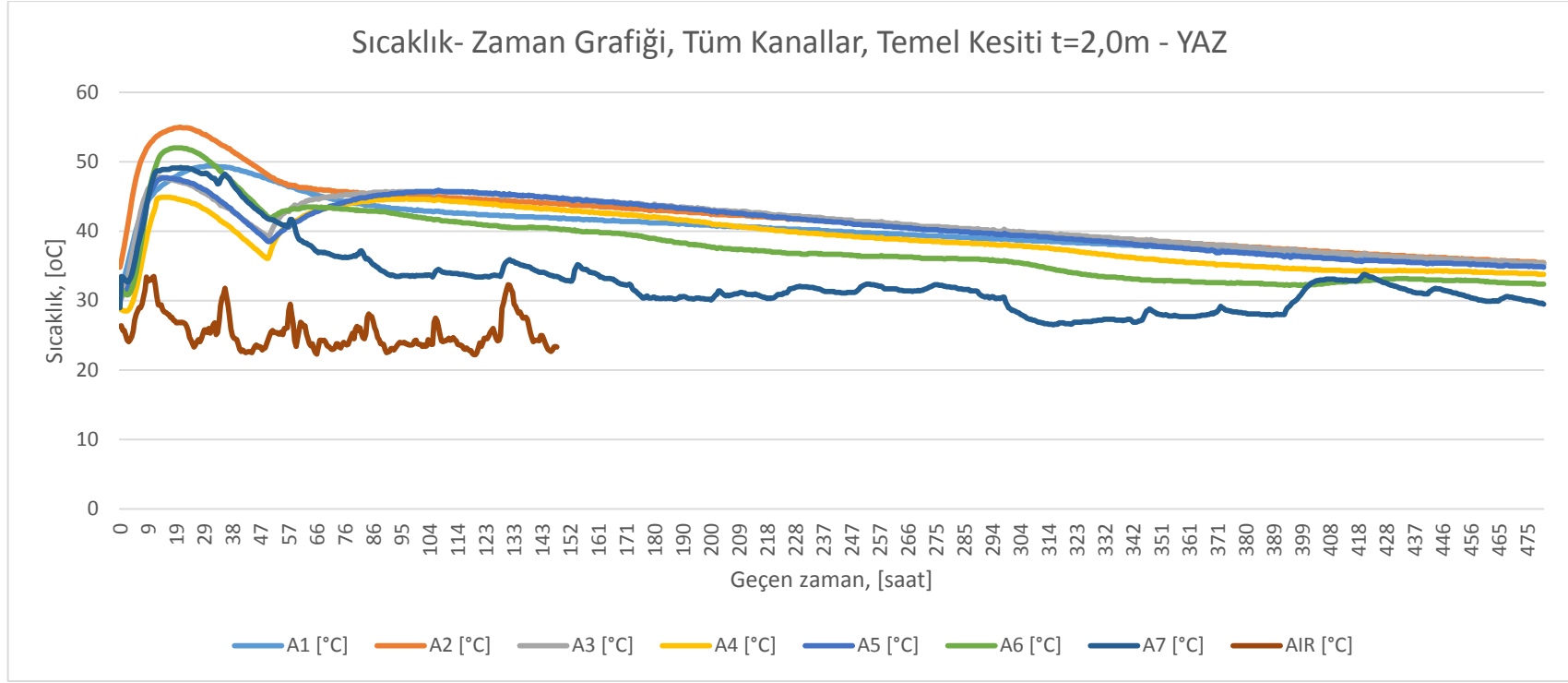
Şekil B. 2 : Temel kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - ortalama sıcaklıklar.



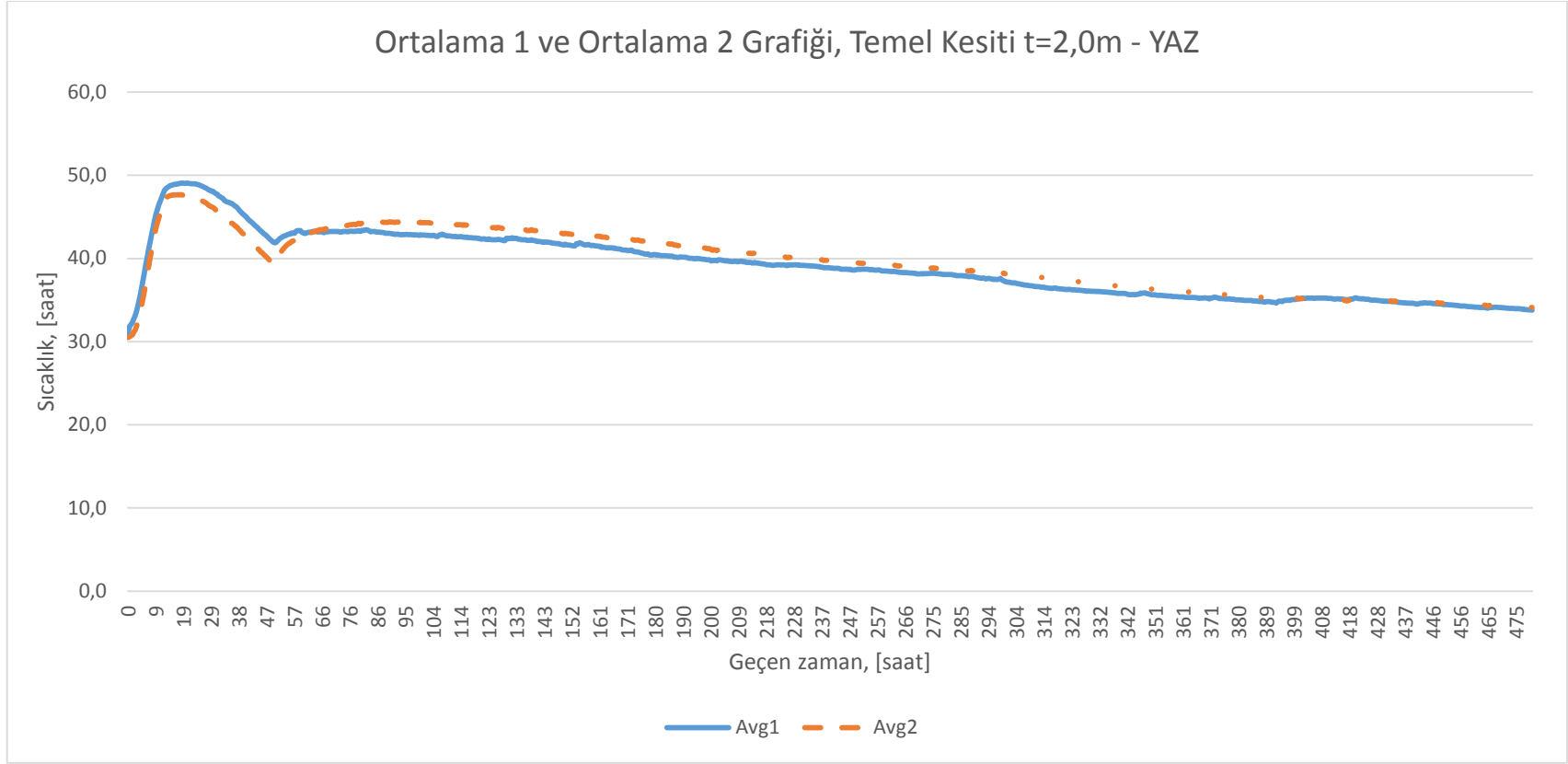
Şekil B. 3: Temel kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - minimum maksimum sıcaklıklar.



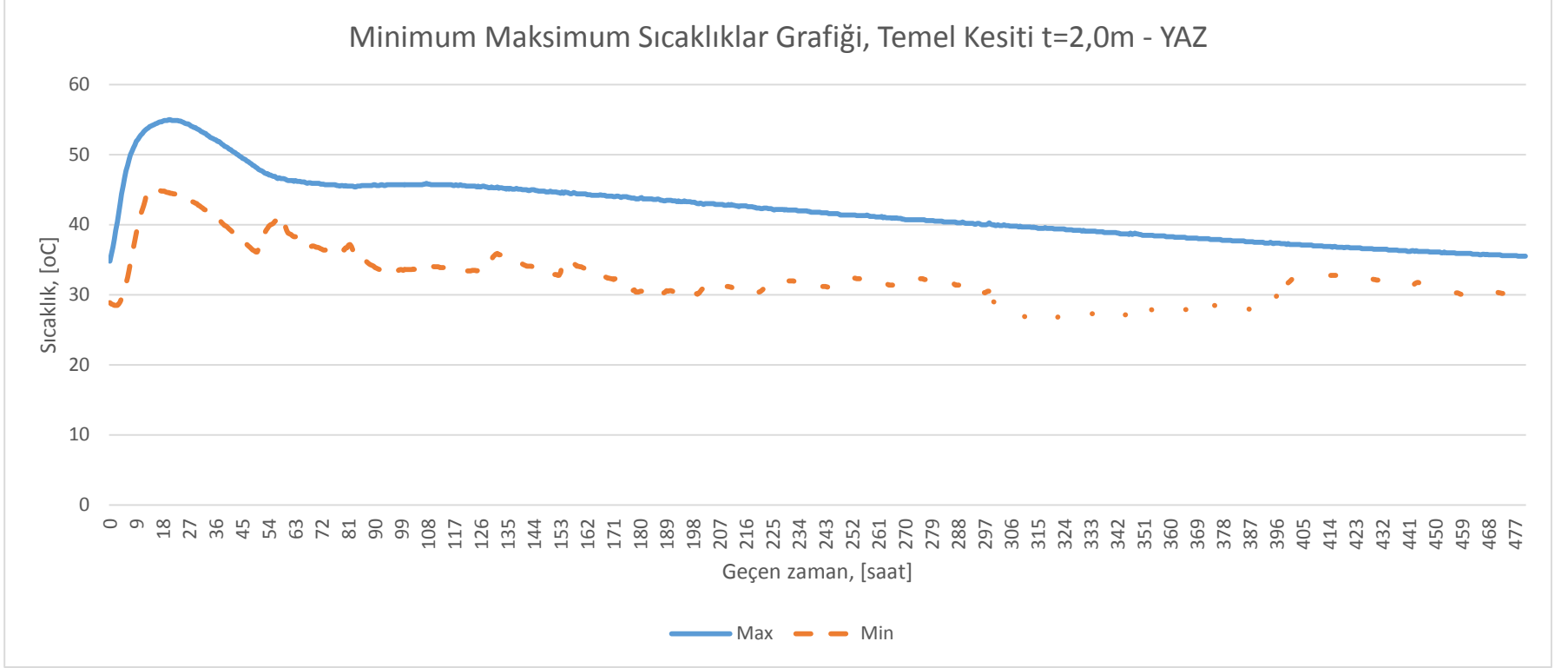
Şekil B. 4 Temel kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - iç sıcaklık farkları.



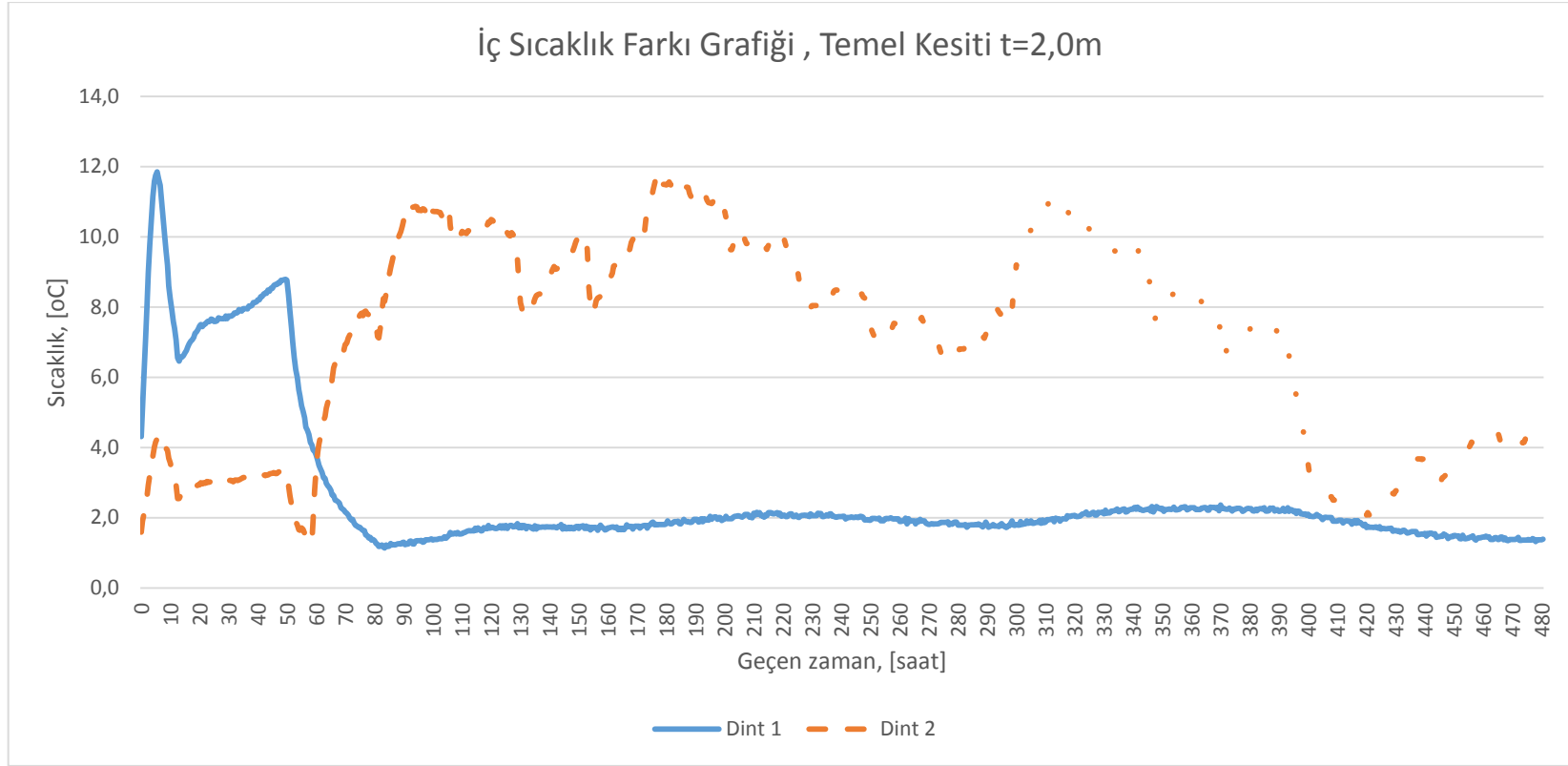
Şekil B. 5: Temel kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - tüm kesit kanalları ve ortam.



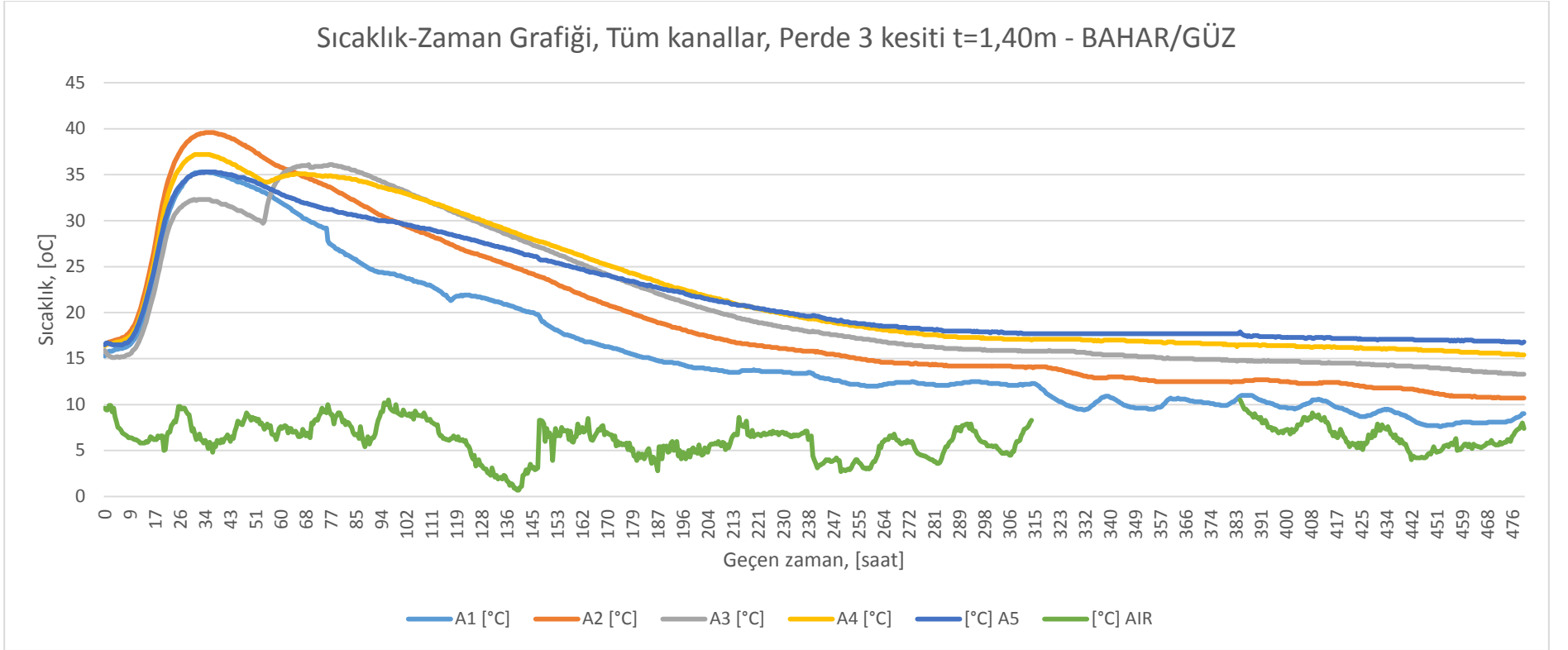
Şekil B. 6. Temel kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - ortalama sıcaklıklar.



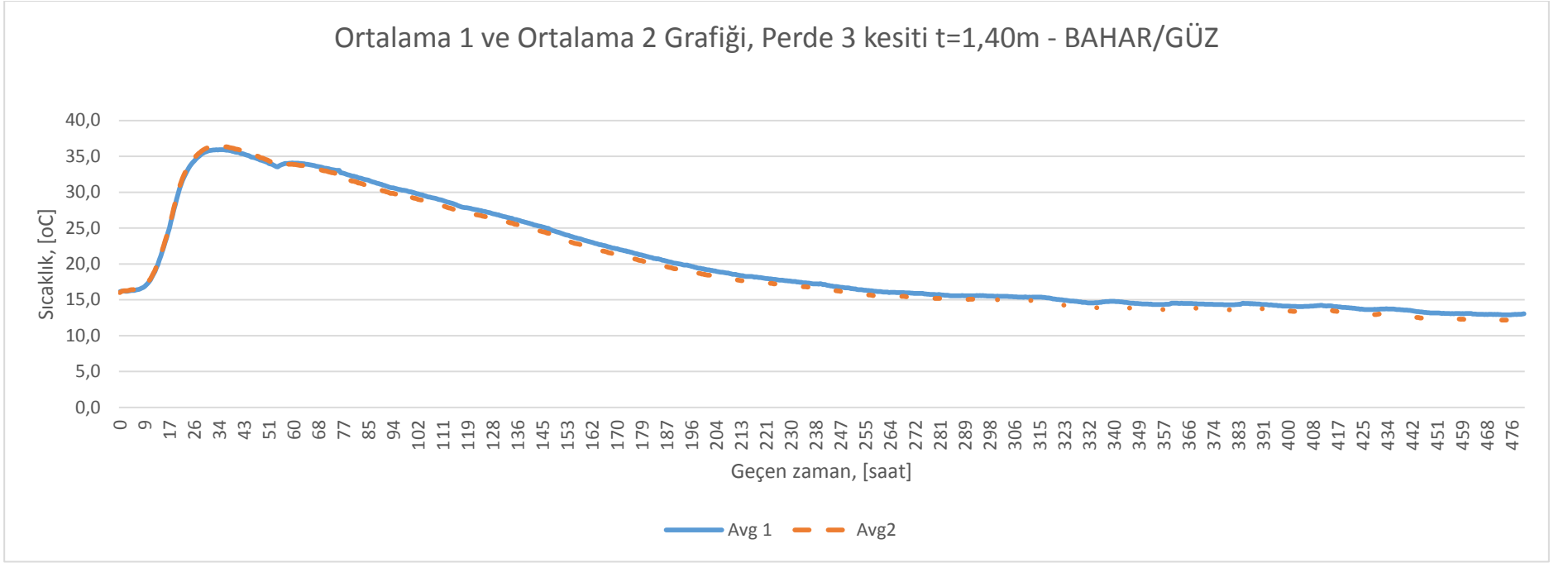
Şekil B. 7 Temel kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - minimum maksimum sıcaklıklar.



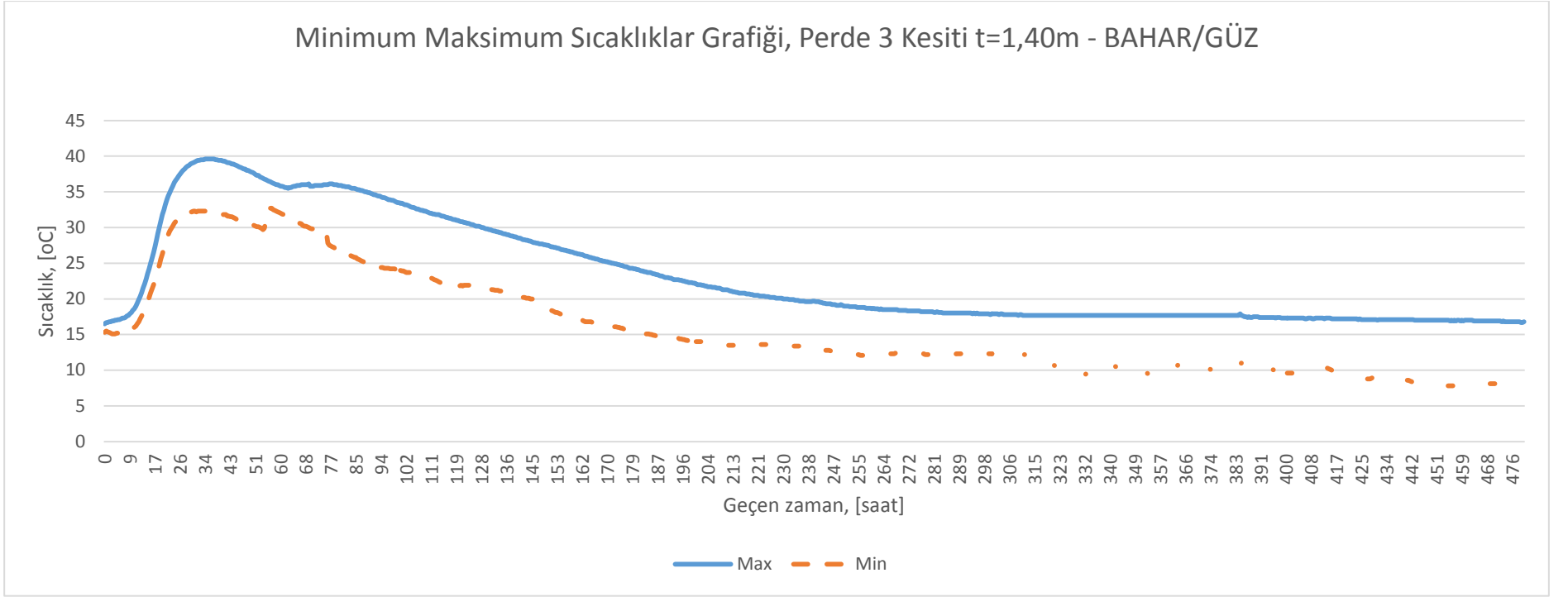
Şekil B. 8 : Temel kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - iç sıcaklık farkları.



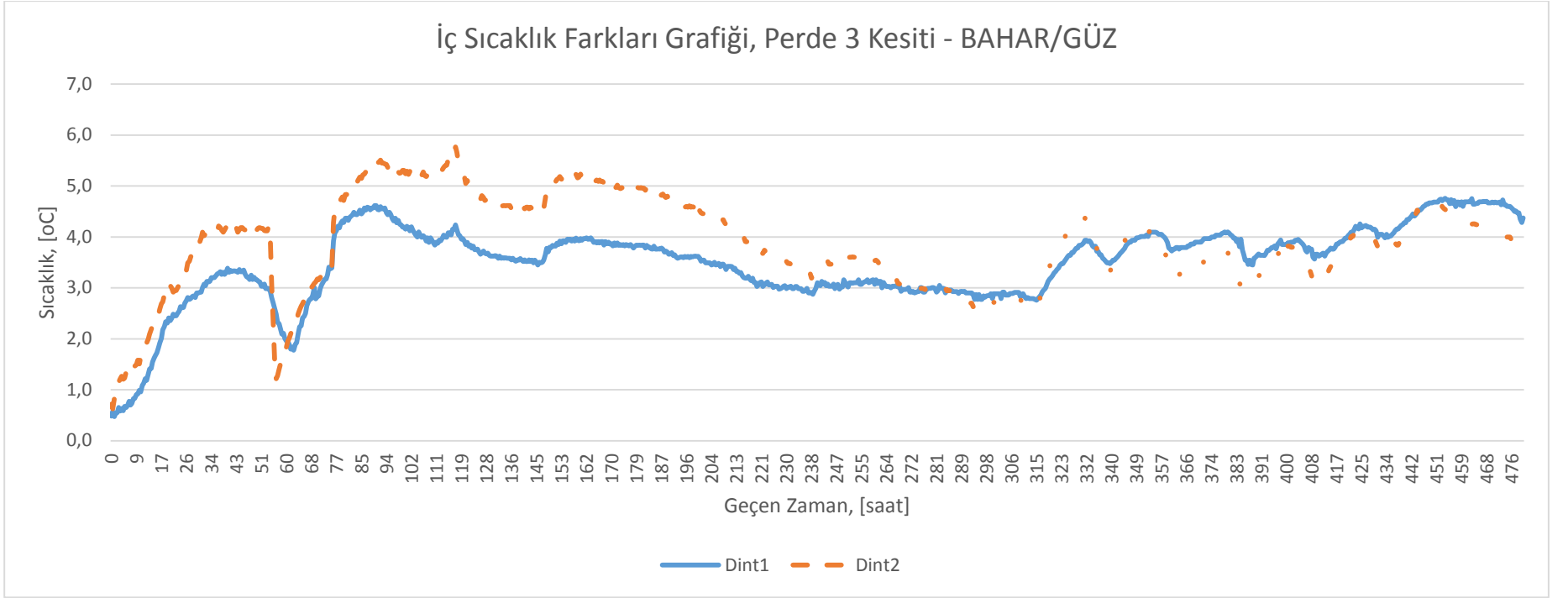
Şekil B. 9: Perde 3 kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - tüm kanallar.



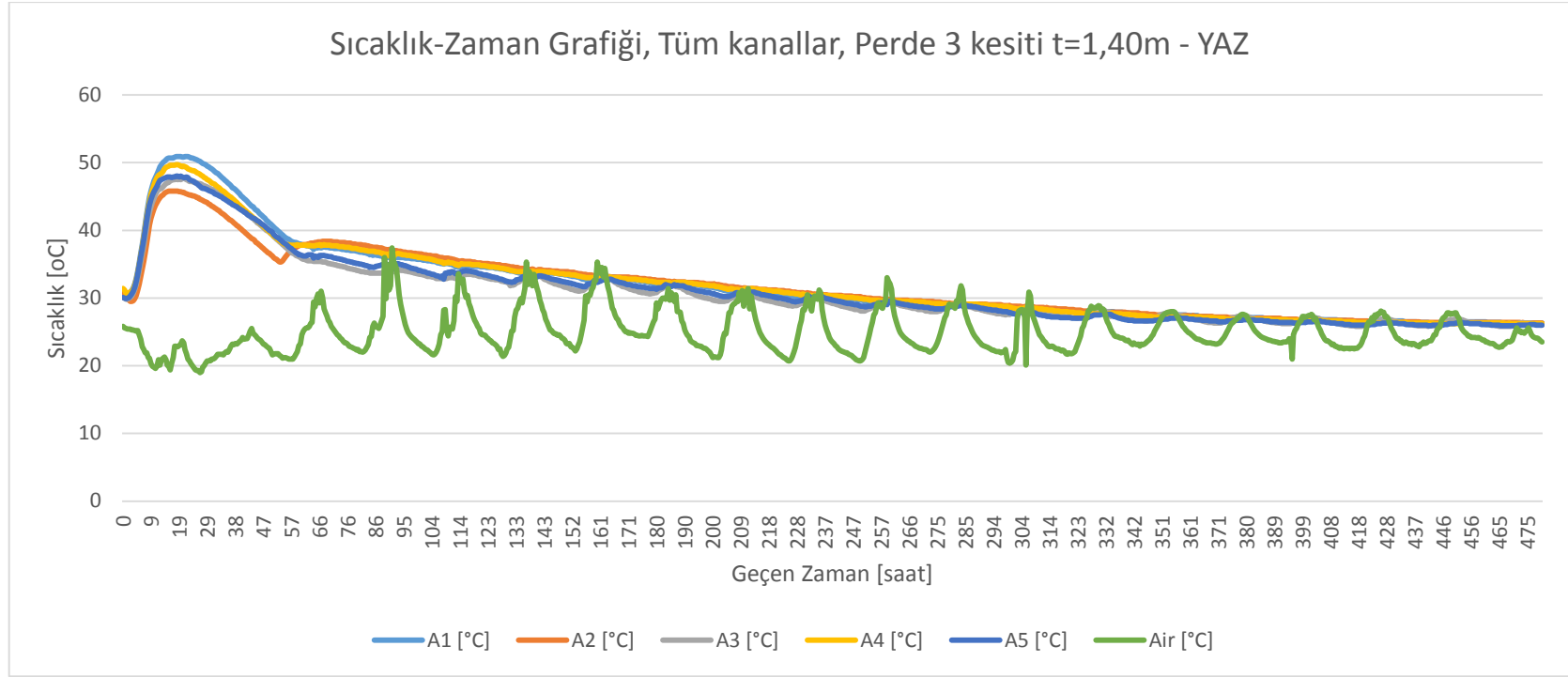
Şekil B. 10: Perde 3 kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - ortalama sıcaklıklar.



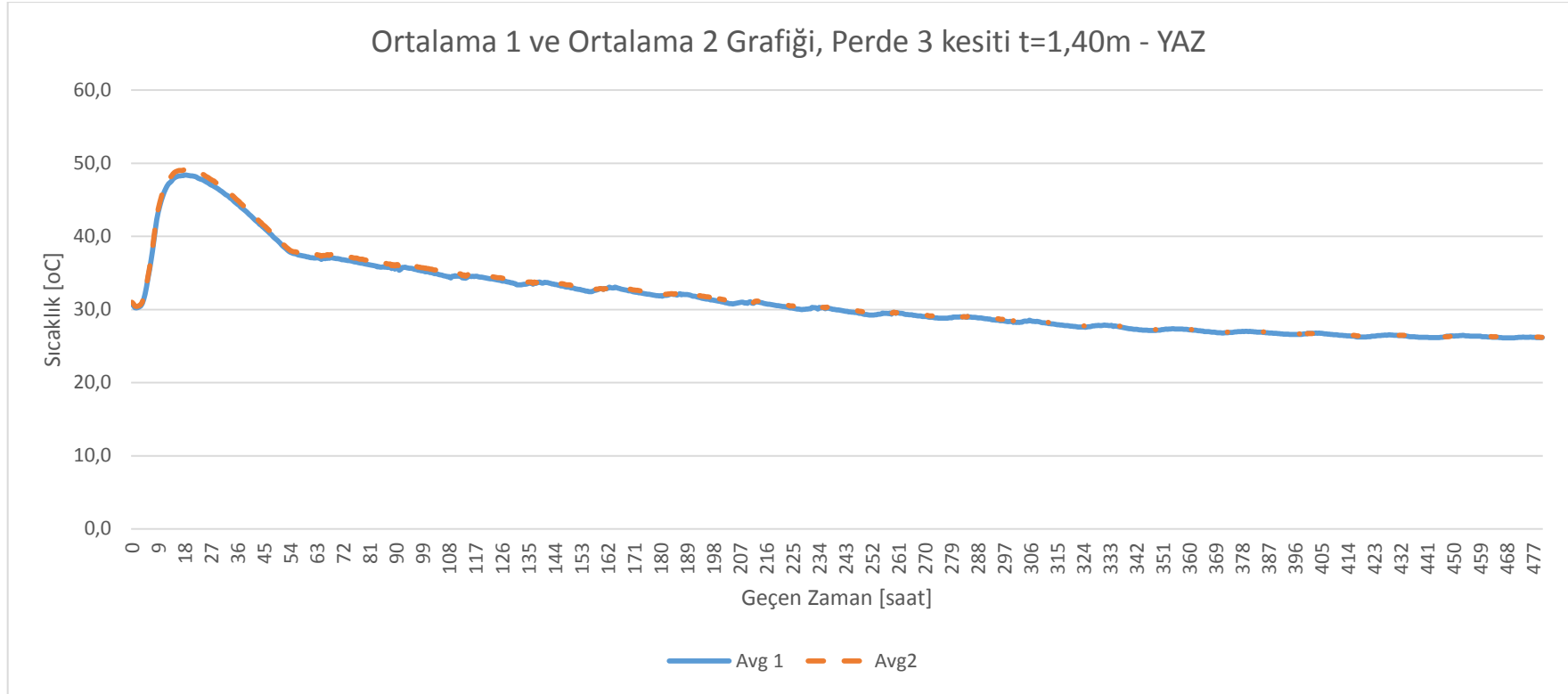
Şekil B. 11: Perde 3 kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - minimum maksimum sıcaklıklar.



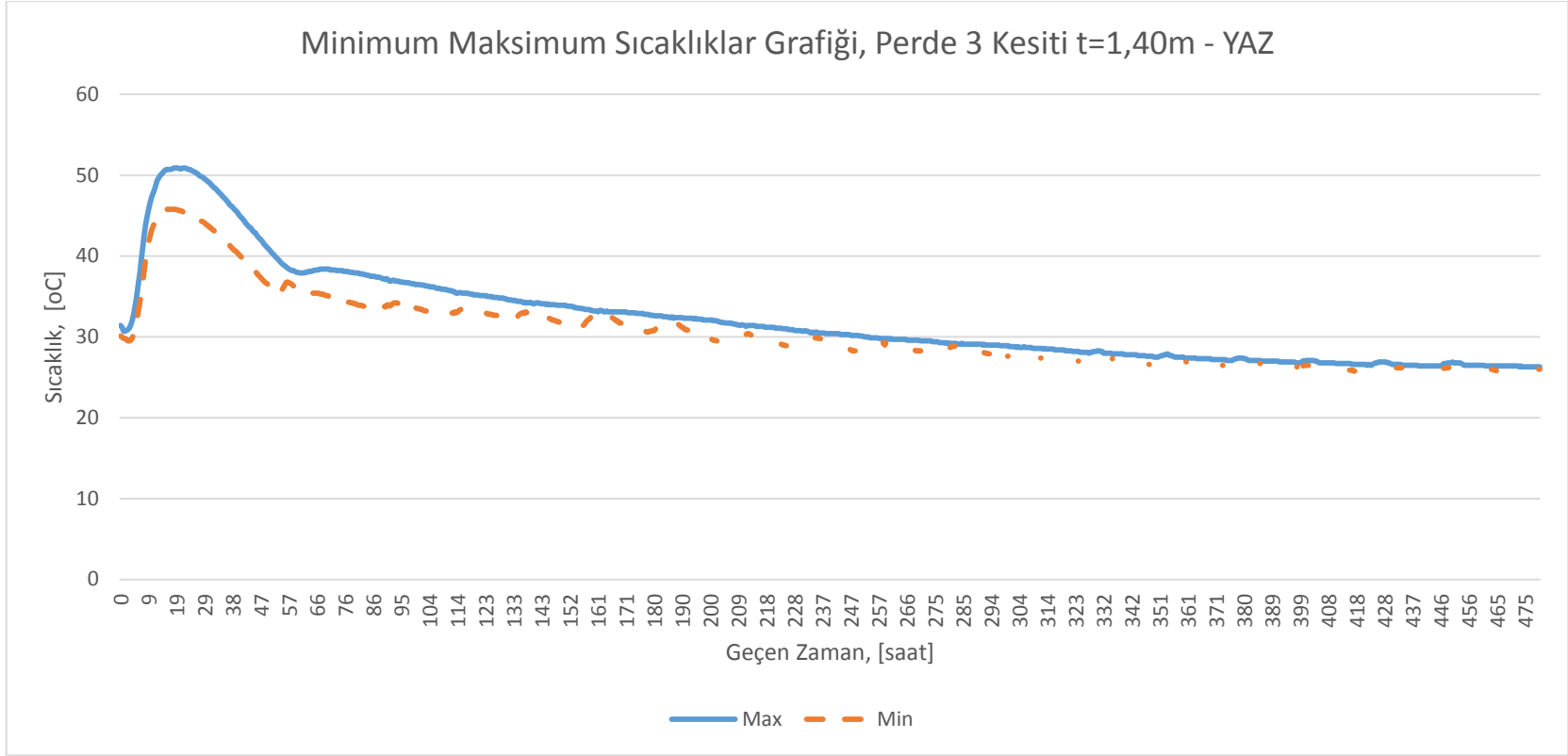
Şekil B. 12: Perde 3 kesiti için bahar/güz koşullarında uygulama sonucu - iç sıcaklık farkları.



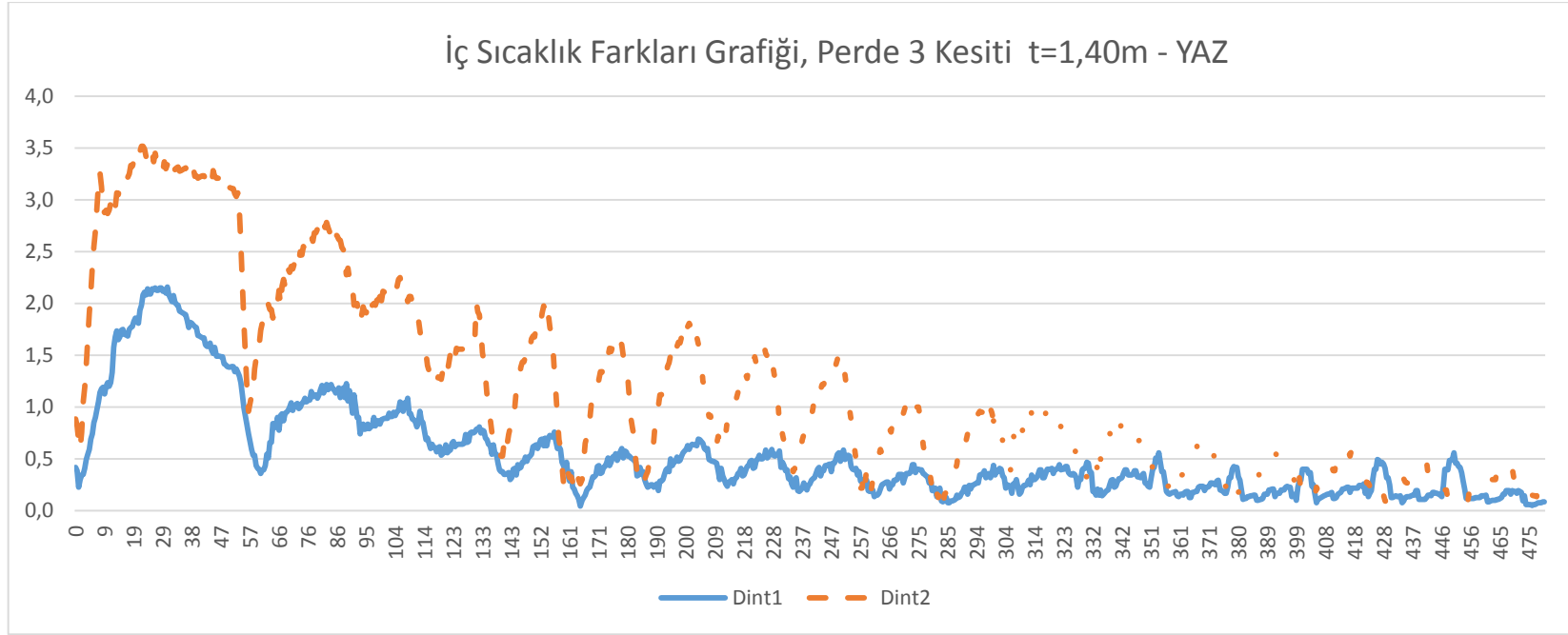
Şekil B. 13 : Perde 3 kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - tüm kesit kanalları ve ortam.



Şekil B. 14 : Perde 3 kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - ortalama sıcaklıklar.



Şekil B. 15 : Perde 3 kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - minimum maksimum sıcaklıklar.



Şekil B. 16: Perde 3 kesiti için yaz koşullarında uygulama sonucu - iç sıcaklık farkları.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Can BİLAL

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1987

E-Posta: canbilal87@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi 2005 Eylül – 2010 Şubat

İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi 2010 Şubat – 2013 Haziran

Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- 2010 Şubat – 2010 Temmuz / Doğu İnşaat / Marmaray CR1 Projesi Kalite Kontrol Müh.
- 2010 Aralık – 2013 Şubat /Gama-Nurol A.O / Marmaray BC1 Projesi Kalite Kontrol Müh.