

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA
ERKEN YAŞ ISI GELİŞİMİ VE RÖTRE**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özlem Ezgi DURAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA
ERKEN YAŞ ISI GELİŞİMİ VE RÖTRE**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özlem Ezgi DURAN
(501181038)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181038 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özlem Ezgi DURAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA ERKEN YAŞ ISI GELİŞİMİ VE RÖTRE” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr.Oğuz Güneş**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr.Yuşa Şahin
Yozgat Bozok Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Haziran 2022
Savunma Tarihi : 14 Haziran 2022





Varlığıyla bana güç veren aileme ve üniversite eğitimimin başından bugüne değin ailemizin bir parçası olan, yakın zamanda kaybettiğimiz papağanım Bay Pipo'ya,



ÖNSÖZ

Üniversite yaşamım boyunca ilgilenmekten zevk duyduğum uzun soluklu bir emeğin parçası olan Yapı Malzemesi alanındaki çalışmamı tamamlamış olmaktan dolayı onur duyuyorum. Çalışmam sırasında karşılaştığım zorluklar ve olumsuzluklara rağmen öğrendiğim bir şey var ki o da sabrın, istikrarla çalışmaktan yorulmamanın ve asla vazgeçmemenin önemidir. Bu zorlu yolda akademik çalışmamın en iyi hale gelmesinde bana zamanını ayırıp bilgisini ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof.Dr. Yılmaz Akkaya'ya teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında desteğiyle hep yanımda olan arkadaşlarım Muzaffer Umur Dalgıç'a ve Cansu Çolak'a, yardımlarını esirgemeyen tüm Marmaray laboratuvarı çalışanlarına özellikle Rıfat Özer ve Gülden Keskin Güngör'e teşekkür ederim.

Bu zamana kadar çalışmam sırasında tez sürecinin dünyanın içinden geçtiği sıkıntılı bir döneme denk gelmesi sonucu yaşadığım bu süreçte, bana anlayış ve sabır gösteren ve yılmadan çalışmayı öğreten, hayatımın en değerlileri annem ve babama sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2022

Özlem Ezgi DURAN
Jeofizik ve İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Yüksek Performanslı Betonlar	3
2.2 Betonun Erken Yaş Isı Gelişimi.....	4
2.2.1 Hidratasyon	5
2.2.1.1 Portland çimentosu bileşimi.....	5
2.2.1.2 Hidratasyon mekanizması	5
2.2.1.3 Puzolanik katkılı çimentolarda hidratasyon mekanizması.....	8
2.2.2 Hidratasyonu etkileyen faktörler.....	9
2.2.3 Adyabatik ısı gelişimi	18
2.3 Betonun Erken Yaş Rötresi	20
2.3.1 Rötire çeşitleri	21
2.3.1.1 Kuruma rötresi	22
2.3.1.2 Otojen rötire	23
2.3.1.3 Termal rötire.....	26
2.3.2 Erken yaş rötreyi etkileyen faktörler.....	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
3.1 Kullanılan Malzemeler	33
3.1.1 Çimento.....	33
3.1.2 Karışım suyu	34
3.1.3 Katkı maddeleri.....	34
3.1.3.1 Kimyasal katkıları	34
3.1.3.2 Puzolanik katkıları.....	35
3.1.4 Agregalar.....	35
3.2 Beton Karışımları	38
3.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıralama	38
3.4 Taze Beton Deneyleri.....	41
3.4.1 Çökme (slump) deneyi	41
3.4.2 Yayılma tablası deneyi.....	41
3.4.3 Birim ağırlık deneyi	42

3.4.4 Hava içeriği deneyi.....	42
3.4.5 Priz süresi tayini	43
3.5 Kalorimetre Deneyleri	43
3.5.1 Yarı Adyabatik Kalorimetre Deneyi	44
3.6 Diğer Deneyler	44
3.6.1 Termal Genleşme Katsayısı Deneyi.....	45
3.6.2 Erken Yaş Rötire Deneyi.....	45
3.6.3 Aktivasyon Enerjisi Deneyi	46
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....	47
4.1 Taze Beton Deneylerinin Sonuçları.....	47
4.2 Kalorimetre Deneylerinin Sonuçları.....	47
4.3 Diğer Deneylerin Sonuçları	48
4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49
4.4.1 Erken yaşlarda ısı gelişimine bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi	49
4.4.2 Erken yaşlarda ısı gelişimine s/b oranının etkisi	51
4.4.3 Erken yaşlarda ısı gelişimine agreganın (Dmaks, tür, su emme) etkisi	52
4.4.4 Erken yaşlarda ısı gelişimine taze beton özelliklerinin etkisi	55
4.4.4.1 Priz süresi	55
4.4.5 Otojen rötreye bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi	57
4.4.6 Otojen rötreye s/b oranının etkisi	58
4.4.7 Otojen rötreye agreganın (Dmaks, tür, su emme) etkisi	58
4.4.8 Otojen rötire-hidratasyon arasındaki ilişki	60
4.4.9 Karışımların otojen rötiresine model yaklaşımı	61
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	63
5.1 Simülasyon Yazılımının Özellikleri	63
5.2 Simülasyon Girdileri	65
5.3 Simülasyon Sonuçları.....	69
6. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....	71
6.1 İleri Çalışmalar İçin Öneriler.....	73
KAYNAKLAR.....	75
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ.....	87

KISALTMALAR

A/Ç	: Agrega/Çimento oranı
Dmaks	: Maksimum Agrega Tane Boyutu
HS	: Hava Sürükleyici
LVDT	: Doğrusal Şekil Değiştime Probu
MK	: Metakaolin
NIST	: National Institute of Standarts and Technology
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
S/B	: Su/Bağlayıcı oranı
S/Ç	: Su/Çimento oranı
VCCTL	: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory
Voksel	: Volümetrik Piksel
YMSA	: Yüksek Miktarda Su Azaltıcı
YPB	: Yüksek Performanslı Betonlar



SEMBOLLER

C_2S	: Dikalsiyum silikat
C_2A	: Dikalsiyum alüminat
C_3S	: Trikalsiyum silikat
C_4AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit
CH	: Kalsiyum hidroksit
$C-S-H$	: Kalsiyum silika hidrat
$\epsilon_{top}, \epsilon_s$	: Toplam şekil değiştirme, Rötre deformasyonu
ϵ_{termal}	: Termal şekil değiştirme
$\epsilon_{otojen}, \epsilon_m$	: Otojen şekil değiştirme
$E_a, E(Q)$	: Görünen aktivasyon enerjisi
ΔT_{ad}	: Adyabatik sıcaklık artışı
ΔQ_n	: Yaratılan toplam ısı miktarı
$\Delta Q_{beton,n}$	: Betonda gelişen ısı enerjisi
$\Delta Q_{ısı kaybı,n}$	: Çevresine kaybettiği ısı enerjisi
Δt_n	: Zaman aralığı
Δl	: Düzeltilmiş uzunluk değişimi
l_0	: Başlangıç uzunluğu
Q_c	: Kg çimento/bağlayıcı başına üretilen ısı
C	: 1 m ³ beton başına bağlayıcı içeriği
ρ_c	: Beton özgül ağırlığı
c_p	: Beton ısı kapasitesi
M	: Betonun eşdeğer yaşı (olgunluk)
R	: Evrensel gaz sabiti
τ_e	: Zaman sabiti
τ_{ref}, T_{ref}	: Referans reaksiyon oranı, Referans sıcaklık
τ_c, T_c	: Belirli bir sıcaklıkta reaksiyon oranı, Betonun sıcaklığı
α	: Eğim parametresi
α_t, α_c	: Termal genleşme katsayısı
β	: Zaman dönüşüm faktörü
n	: Hesaplamalı döngü sayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çimentodaki anabileşenlerin relatif özellikleri [7].....	8
Çizelge 2.2 : Çimento ana bileşenlerinin tipik hidrasyon ısısı [11].....	12
Çizelge 3.1 : Beton karışımlarında kullanılan çimentoların fiziksel özellikleri.	33
Çizelge 3.2 : Beton karışımlarında kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri.	33
Çizelge 3.3 : Beton karışımlarında kullanılan katkıların teknik özellikleri.....	35
Çizelge 3.4 : Karışımlarda kullanılan agregaların özgül ağırlıkları (g/cm^3).	35
Çizelge 3.5 : Karışımlarda kullanılan agregaların su emme oranı (%).	36
Çizelge 3.6 : Agregalı karışım oranları (%).	37
Çizelge 3.7 : Beton karışım tasarımları.	40
Çizelge 4.1 : Taze beton deneylerinin sonuçları.....	47
Çizelge 4.2 : Termal genişleme katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri.	48
Çizelge 4.3 : Karışım 4 ve 5'in agregalı su emme oranları.	53
Çizelge 5.1 : Deney karışımlarının özellikleri.	66
Çizelge 5.2 : Modellerin simülasyon girdileri.	66
Çizelge B.1 : Karışım 1 ve 4 için elekten geçen malzeme (%).	84
Çizelge B.2 : Karışım 2 ve 3 için elekten geçen malzeme (%).	84
Çizelge B.3 : Karışım 5 ve 6 için elekten geçen malzeme (%).	85
Çizelge B.4 : Karışım 7 için elekten geçen malzeme (%).	85
Çizelge B.5 : Karışım 8 için elekten geçen malzeme (%).	86
Çizelge B.6 : Karışımların (k) incelik modülü.	86



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Portland çimentosunun hidratasyon süreci [9].	6
Şekil 2.2 : C_3S 'in hidratasyonuna sıcaklığın etkisi [9].	7
Şekil 2.3 : ASTM Tip 1 ve Tip 3 portland çimentosu tipik tane boyut dağılımı [4].	10
Şekil 2.4 : S/Ç oranı 0,40 olan çimento pastasının ısı gelişiminde inceliğin etkisi [4].	10
Şekil 2.5 : S/Ç oranı 0,40 olan çimento pastasının ısı gelişiminde çimento bileşiklerinin etkisi [4].	11
Şekil 2.6 : Çimento kompozisyonunun hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi [4].	11
Şekil 2.7 : 21 °C (70 °F)'de kürlü S/Ç oranı 0,40 olan farklı çimento tiplerinin hidratasyon ısı gelişimi [14].	13
Şekil 2.8 : Uçucu kül ve cüruf katkılı çimentoların beton sıcaklığına etkisi [9].	14
Şekil 2.9 : Çimento tipine göre (tip I, tip III ve katkılı) hidratasyon davranışı [12].	15
Şekil 2.10 : S/ç oranının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi [17].	15
Şekil 2.11 : Sıcaklığın ısı gelişimi üzerindeki etkisi [12].	16
Şekil 2.12 : (a) Farklı çimentoların (tip I, cüruf katkılı, tip III) ve (b) farklı miktardaki uçucu küllü çimentoların priz başlangıç ve bitiş zamanları [12].	17
Şekil 2.13 : Farklı çimento tipine göre betonda adyabatik sıcaklık artışı [28].	20
Şekil 2.14 : Erken yaş rötre fazları : sıvı hal, prizle sertleşmeye geçiş, sertleşen katı [4].	21
Şekil 2.15 : Kuruma rötresinde çimento hamurundaki suyun kaybolma safhaları [9].	22
Şekil 2.16 : Otojen ve kimyasal rötreye neden olan reaksiyonlar. C=hidrate olmamış çimento, W=hidrate olmamış su, H_y =hidratasyon ürünleri ve V=hidratasyon sonucu oluşan boşluklar [29].	23
Şekil 2.17 : Hidrate olan çimento hamurunun şematik kesiti [33].	24
Şekil 2.18 : Betonda otojen deformasyona uçucu kül dozajının etkisi [28].	25
Şekil 2.19 : Betonun ömrü sürecince farklı fazları ve sıcaklık gelişimi [23].	27
Şekil 2.20 : Termal genleşme katsayısının karakteristik davranışı [50].	28
Şekil 2.21 : Otojen rötrene s/ç oranına göre değişimi [55].	30
Şekil 3.1 : $D_{maks}=12,5$ mm kireçtaşı kökenli agregalar.	36
Şekil 3.2 : $D_{maks}=22$ mm kireçtaşı kökenli agregalar.	37
Şekil 3.3 : $D_{maks}=22$ mm kumtaşı kökenli agregalar.	37
Şekil 3.4 : Su sütun metodu deney düzeneği [64].	42
Şekil 3.5 : Priz süresi tayini deney düzeneği [65].	43
Şekil 3.6 : Haybox kalorimetresi [24].	44
Şekil 3.7 : Erken yaş rötre deney düzeneği.	46
Şekil 4.1 : Sertleşmekte olan betonun 14 günlük ısı gelişimi.	48
Şekil 4.2 : Sertleşmekte olan betonun 14 günlük ısı gelişim hızı.	48
Şekil 4.3 : 28 günlük otojen rötre.	49
Şekil 4.4 : Farklı tip ve incelikteki çimentolu betonların hidratasyon ısısı.	49
Şekil 4.5 : Farklı tip ve incelikteki çimentolu betonların ısı gelişim hızı.	50

Şekil 4.6 : Farklı s/b oranlarına sahip betonların hidratasyon ısısı.....	51
Şekil 4.7 : Farklı s/b oranlarına sahip betonların ısı gelişim hızı.	51
Şekil 4.8 : Farklı tür agregalı benzer özellikteki betonların hidratasyon ısısı.	52
Şekil 4.9 : Farklı tür agregalı benzer özellikteki betonların ısı gelişim hızı.....	52
Şekil 4.10 : Farklı Dmaks'lı, aynı çimentoya sahip karışımların hidratasyon ısısı. ..	53
Şekil 4.11 : Farklı Dmaks'lı, aynı çimentoya sahip karışımların ısı gelişim hızı.....	54
Şekil 4.12 : Farklı Dmaks'lı, farklı s/b ve aynı çimentoya sahip karışımların hidratasyon ısısı.	55
Şekil 4.13 : Farklı Dmaks'lı, farklı s/b ve aynı çimentoya sahip karışımların ısı gelişim hızı.....	55
Şekil 4.14 : Karışımların priz başlangıç ve bitiş zamanları.	56
Şekil 4.15 : Erken yaşlarda karışımların ısı gelişim hızları.	56
Şekil 4.16 : Otojen rötreye bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi.	57
Şekil 4.17 : Otojen rötreye s/b oranının etkisi.	58
Şekil 4.18 : Otojen rötreye agrega türünün etkisi.	59
Şekil 4.19 : Otojen rötreye Dmaks'ın etkisi.	59
Şekil 4.20 : Otojen rötreye Dmaks ve s/b oranının etkisi.	60
Şekil 4.21 : Otojen rötre ile hidratasyon arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.22 : Gerçek rötre verilerine model yaklaşımı.	62
Şekil 5.1 : Simülasyon ile tahmin için girdi ve çıktılar.	65
Şekil 5.2 : Adım 1: karışımın malzemelerinin tanımlanması.	66
Şekil 5.3 : Adım 2: karışımların deney özelliklerinin girilmesi.	67
Şekil 5.4 : Adım 3: Simülasyon sonuçlarının alınması.....	68
Şekil 5.5 : Deney karışımı 2 ve simülasyon modeli 2'nin ısı gelişimi kıyası.	69
Şekil 5.6 : Deney karışım 5 ve simülasyon modeli 5'in ısı gelişimi kıyası.	69
Şekil 5.7 : Deney karışım 7 ve simülasyon modeli 7'nin ısı gelişimi kıyası.	70
Şekil 5.8 : Deney karışım 8 ve simülasyon modeli 8'in ısı gelişimi kıyası.	70
Şekil A.1 : Karışımların rötre model yaklaşımı.....	82
Şekil A.2 : VCCTL simülasyon modellerinin ısı sonuçları	83

YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA ERKEN YAŞ ISI GELİŞİMİ VE RÖTRE

ÖZET

Yüksek performanslı beton, uzun servis ömrü istenen özel yapılarda mineral katkıların ilavesiyle düşük su/çimento oranının elde edildiği ve kimyasal katkılarla işlenebilirliği artırılan, dayanımı yüksek bir betondur. Üretim sırasındaki yüksek maliyetine rağmen ileride uzun servis ömrü sayesinde daha ekonomik sonuçlar elde edilmektedir.

Tez çalışmasında yüksek performanslı betonların erken yaştaki ısı gelişimi ve erken yaş rötresi ele alınmıştır. Bu tür betonlarda erken yaş davranışının incelenmesi ve önceden tahmin edilebilmesi, ileri yaşlardaki dayanım ve dayanıklılığının öngörülebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda beton bileşenlerinin özelliklerinin erken yaş davranışına etkisi araştırılmıştır. Erken yaş rötreye ve ısı gelişimi davranışının tahmin edilebilmesi için ek çalışmalar yapılmıştır. Rötreye için genel bir fonksiyon denklemi bulmaya çalışılmıştır. Isı gelişimi için ise bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

Betonun erken yaştaki ısı gelişiminin çimento hidratasyonu ile ilgisi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ekzotermik bir reaksiyon olan hidratasyonun nasıl ve ne hızda gerçekleştiği, bu reaksiyonun nelerden etkilendiği ve ortaya çıkardığı ısı miktarı araştırılmıştır. Hidratasyon mekanizması incelendiğinde, bir miktar çimento kimyasına da giriş yapılmaktadır. Burada çimentonun klinker yapısını oluşturan ana bileşenlerin hidratasyonda önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Çimentodaki (C_2S , C_3S , C_2A , C_4AF) karmaoksitlerin bulunma miktarlarına göre çimentonun beton davranışı üzerindeki etkisi çeşitlenmektedir. Yüksek miktarda C_3S ve C_3A içeren çimentolu betonlarda daha yüksek ısı çıkışı olacağı bilinmektedir. Betonda erken yaşta oluşan bu yüksek ısınnın erken yaş çatlağına sebep olacağı tahmin edilmektedir. Yüksek ısınnın açığa çıktığı durumlarda hidratasyon reaksiyonunu yavaşlatmak için puzolanik katkıların eklenmesi de bir seçenektir. Genel olarak puzolanik katkıların ilavesi çimentonun hidratasyonu yavaşlatmakta ve ısıyı düşürmektedir. Ayrıca çimentoda boşlukları doldurucu etkisiyle su/çimento oranını düşürmekte ve betonun kalitesini artırmaktadır. Bu yüzden puzolanik katkılar yüksek performanslı betonlarda sık kullanılmaktadır. Bunun yanında su/çimento oranının düşmesi hidratasyon reaksiyonlarını azaltacağı için ısıyı da düşürmektedir.

Betonun ısı gelişiminde agrega varlığı da önemli bir etkidir. Beton içeriğindeki agreganın tane boyutunun artması ve agrega hacminin artması, çimento miktarını düşüreceği için su ihtiyacı da azalmaktadır. Bu da hidratasyon reaksiyonu oranını azaltarak betonda gelişen ısıyı düşüreceklerdir. Bunun yanında agrega türüne göre değişkenlik gösteren su emmesi fazla agregaların iç yapıdaki mevcut suyu depolaması, çimentodan suyu uzaklaştırarak hidratasyonu azaltmaktadır. Genellikle priz süresi kısa olan betonlarda ise daha hızlı bir ısı gelişimi olduğu görülmektedir.

Çalışmada araştırılan bir diğer ana konu ise erken yaş rötresi ve erken yaş rötne özelinde de otojen rötredir. Düşük su/çimentolu betonlarda hidratasyon reaksiyonu sırasında su tüketildiği düşünülürse betondaki suyun azalmasının rötreye sebep olacağı tartışılmazdır. Bu durumda erken yaşlardaki rötne davranışının sebebini yakından incelemek ve başka nelerden etkilendiğini öğrenmek önemli olmaktadır. Erken yaşta sıklıkla kuruma, termal ve otojen rötne gözlenmektedir. Erken yaşlardaki otojen rötne kendiliğinden kuruma ve kimyasal rötrenin de bir toplamıdır. Çalışmada otojen rötne üzerinde durulmasının sebebi literatürde düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonlardaki yüksek otojen rötrenin beton kalitesinin düşmesi üzerinden oluşturduğu kaygıdır. Erken yaşta meydana gelen yüksek otojen rötrenin çatlaklara sebep olacağı ve çatlakların ilerlemesi ile ileri yaşlarda durabilite bakımından zayıf bir beton elde edileceği düşünülmektedir. Bu durum ise yüksek performanslı betonların durabilite bakımından geleneksel betonlara karşı daha verimli olma iddiasını olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle çalışmada otojen rötne davranışına nelerin sebep olduğu ve erken yaş rötrelerle birlikte otojen rötrenin nelerden etkilendiği konusu üzerinde durulmuştur. Erken yaşta ısı gelişimini artıran hususların otojen rötreyi de doğru orantılı olarak artırdığını düşünmek doğru bir yaklaşımdır.

Toplamda sekiz deney betonu; s/b oranı 0.32-0.40 aralığında CEM I ve CEM III çimentolu, agrega tipi ve boyutu değişken malzemeleri içermektedir. Betonların taze haldeki özelliklerinin tespiti için taze beton deneyleri yapılmıştır. Taze beton deneylerinden çökme deneyi, yayılma tablası deneyi, birim ağırlık deneyi, hava içeriği deneyi ve priz süresinin tayini deneyleri uygulanmıştır. Deney betonlarının erken yaş ısı gelişimi için yarı adyabatik kalorimetre deneyi yapılmıştır. Erken yaş rötne için ise lvdt (doğrusal şekil değiştirme probu) yardımıyla ölçüm alınmıştır.

Betonların otojen rötresinin tahmini için bir model üzerinde çalışılmıştır. Literatürde de yer alan bu modelin yaklaşımı değerlendirilmiştir. Isı verileri ise hidratasyon tahmini için kullanılan genel hidratasyon modeli ile optimize edilmiştir. Değerlendirme ve yorumlar bu optimizasyon üzerinden gerçekleşmiştir. Betonların ısı gelişimini deney yapmadan tahmin edebilmek için ise bir simülasyon modeliyle hidratasyon davranışı taklit edilmeye çalışılmıştır. Bunu sağlamak amacıyla bilim insanları için oluşturulmuş sanal bir laboratuvarı VCCTL yazılımı ile mevcut malzemelerin kullanılabildiği bir ortamda simülasyon hazırlanmıştır. Bu yazılımın içindeki mevcut verilerin deney betonlarına benzemesi için yakın malzemeler seçilmiştir. Sonucunda simülasyon ve deney betonları kıyaslanmıştır. Mevcut deney betonlarının ısı gelişimi, bir simülasyon modeliyle yaklaşık tahmin edilebilirliğinin değerlendirmesi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre;

Deney betonlarının; çimento inceliği ve s/b oranı arttıkça hidratasyon ısı ve ısı gelişim hızı artmaktadır. CEM III çimentolu betonların hidratasyonu ilk saatlerde daha hızlı ve yüksek ısıdır. Maksimum agrega tane boyutu (D_{maks}), agrega su emmesi arttıkça ve puzolanik katkıların eklenmesiyle hidratasyon ısısında düşüş gerçekleşmekte ve hidratasyon gecikmektedir.

Çimento inceliği ve hidratasyon ısısı artarken ve maksimum agrega tane boyutu (D_{maks}), s/b oranı ve agrega su emme oranı azalırken otojen rötne yükselmektedir. Genel çıkarımları sağlamayan istisnalar mevcuttur. Deney betonlarının davranışındaki farklılıklar için mikroyapının incelenmesine ihtiyaç vardır.

Erken yaş rötreyi tahmin edebilmek için bir model üzerinde çalışıldığında rötne verilerine uygun bir yaklaşım yapılabilmektedir. Bu model ile su/çimento oranı,

agrega/imento oranı ve katkı miktarının etkisiyle otojen rötrenin artış veya azalışı tahmin edilebilmektedir.

Isı gelişimini tahmin edebilmek için VCCTL yazılımında bir simülasyon ile deney betonlarının hidratasyonu taklit edilmeye alışılmış olup ilk 48 saatte oldukça iyi yaklaşım sağlanmışır. Ancak ileri yaşlarda simülasyonun iyi alıştığı s ylenememektedir.





EARLY AGE HEAT DEVELOPMENT AND SHRINKAGE IN HIGH PERFORMANCE CONCRETE

SUMMARY

High-performance concrete is a high-strength concrete in which a low water/cement ratio is obtained with the addition of mineral additives in special structures where a long service life is required, and the workability is increased with chemical additives. Despite its high cost during production, more economical results are obtained thanks to its long service life in the future.

In the thesis study, early age heat development and early age shrinkage of high performance concretes are discussed. Examining and predicting the early age behavior in such concretes is important in terms of predicting the strength and durability at later ages. In this direction, the effect of the properties of concrete components on the early age behavior was investigated. Additional studies have been performed to predict early age shrinkage and heat development behavior. An attempt has been tried to find a general equation of function for the shrinkage. A simulation study has been performed for heat development.

It is known that early heat development of concrete is related to cement hydration. Therefore, how and at what rate hydration that is an exothermic reaction come true, what this reaction was affected and produced amount of heat were investigated. When the hydration mechanism is examined, cement chemistry is also introduced. Here, it is seen that the main components that make up the clinker structure of the cement play an important role in hydration. The effect of cement on concrete behavior varies according to the amount of oxide compositions of cement (C_2S , C_3S , C_2A , C_4AF). It is known that there will be higher heat output in concrete containing high amounts of C_3S and C_3A . It is estimated that this high temperature which occurs at an early age in concrete, will cause early age cracking. Adding pozzolanic additives is also an option to slow down the hydration reaction in situations where high heat is released. Generally, the addition of pozzolanic additives slows down the hydration of the cement and reduces heat of hydration. In addition, it reduces the water/cement ratio and increases the quality of concrete with its effect of filling the voids in cement. Therefore, pozzolanic additives are frequently used in high performance concrete. Besides the decrease in the water/cement ratio decreases the heat as it will reduce the hydration reactions.

The presence of aggregate is also an important factor in the heat development of concrete. As the maximum particle size of the aggregate in the concrete content and the aggregate volume increase, the amount of cement decreases, so the need for water also decreases. This will reduce the heat developed in the concrete by reducing the hydration reaction rate. In addition, storing the actual water in the internal structure of the aggregates with high water absorption reduce hydration by removing water from the cement. Generally, it is also a real seen that there is a faster heat development in concrete with a short setting time.

Another main subject investigated in the study is early age shrinkage and in particular autogenous shrinkage. Considering that water is consumed during the hydration reaction in concrete with low water/cement, it is inevitable that the decrease in water in the concrete will cause shrinkage. In this case, it is important to closely examine the cause of the shrinkage behavior at an early age and to learn what else is affected by it. Drying, thermal and autogenous shrinkage are frequently observed at an early age. Autogenous shrinkage at an early age is a combination of self-drying and chemical shrinkage. The reason for emphasizing autogenous shrinkage in the study is the concern in the literature that high autogenous shrinkage reduces the quality of concrete in high performance concrete with low water/cement ratio. It is thought that high autogenous shrinkage occurring at an early age will cause cracks and with the progression of cracks, a concrete with poor durability will be obtained in later ages. This situation will negatively affect the claim of high performance concrete to be more efficient in terms of durability compared to conventional concrete. For this reason, in this study, it is focused on what causes autogenous shrinkage behavior and what affects autogenous shrinkage. It is a correct approach to think that the factors that increase heat development at an early age also increase autogenous shrinkage in direct proportion.

Eight test concretes in total; it contains CEM I and CEM III cementitious materials with variable aggregate type and size in the range of 0.32-0.40 w/b ratio. Fresh concrete experiments were carried out to determine the fresh properties of the concrete. Among the fresh concrete tests; slump test, spreading table test, unit weight test, air content test and determination of setting time tests were applied. A semi-adiabatic calorimetry test was carried out for the early age heat development of the test concrete. For early age shrinkage, measurements were taken with the help of lvdt (linear strain probe).

For the estimation of autogenous shrinkage of concrete, a model which is also in the literature has been studied. The heat data is optimized with the general hydration model used for hydration prediction. Evaluation and comments were made on this optimization. In order to predict the heat development of concrete without experiment, the hydration behavior was tried to be imitated with a simulation model. For this, a simulation was prepared in a virtual laboratory created for scientists with VCCTL software. Similar materials have been selected so that the available data in this software is similar to the test concrete. As a result, simulation and test concrete were compared. The approximate predictability of the heat development of the existing test concrete with a simulation model was evaluated.

According to the results obtained;

As cement fineness, w/b ratio, aggregate water absorption, fresh concrete temperature and ambient temperature increase, hydration heat and heat development rate of test concretes increase. Hydration of CEM III cemented concrete is faster and at higher heat in the first hours. As the maximum aggregate particle size (D_{max}) increases and the addition of pozzolanic additives, the heat of hydration decreases and hydration is delayed.

Autogenous shrinkage increases as cement fineness, heat of hydration, ambient temperature increase and maximum aggregate particle size, w/b ratio and aggregate water absorption rate decrease. There are exceptions that do not provide general findings. There is a need to examine the microstructure for the differences in the behavior of test concretes.

When working on a model to predict early age shrinkage, an appropriate approach could be made to the shrinkage data. With this model, the increase or decrease of autogenous shrinkage can be estimated with the effect of water/cement ratio, aggregate/cement ratio and additive amount.

In order to predict the heat development, the hydration of the test concretes was tried to be imitated with a simulation in the VCCTL software, and a good approach was obtained in the first 48 hours. However, it cannot be said that the simulation works well in later ages.





1. GİRİŞ

Tüm dünyada beton, en yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak bilinmektedir. Dayanımı yüksek, çevresel koşullara dayanıklı, işlenebilir ve ekonomik olması gibi sebeplerle yaygın kullanımı halen devam etmektedir.

Günümüzde beton teknolojisi zaman geçtikçe ilerlemekte ülkemizde de uzun servis ömrü istenen özel yapılarda (köprü, tünel vb.) yüksek performanslı betonlar kullanılmaktadır.

Yüksek performanslı betonlar; düşük su/çimento oranına sahip, geçirimsizliği düşük, yüksek erken dayanım ve genellikle yüksek nihai dayanıma sahip betonlardır [1]. Genellikle uçucu kül, silis dumanı veya cüruf gibi puzolanik katkıların beton karışımına eklenmesi sonucu düşük s/ç oranı ve akışkanlaştırıcı katkıların ilave edilerek akıcı ve işlenebilir bir beton elde edilmektedir [2,3]. Mineral katkıların karışıma dahil edilmesiyle çimento miktarı azalacak, daha ekonomik ve daha çevreci bir beton elde edilmiş olacaktır.

Beton, birden fazla bileşeni olan kompozit bir malzeme olduğundan yüksek kalitede bir beton üretmenin yolu doğru bileşenlerin seçilmesiyle mümkündür. Doğru malzemelerin seçilmesiyle betonun erken yaşlarda hidrasyon reaksiyonu sonucu sıcaklık artışı ve rötresi kontrol edilebilecektir. Özellikle geniş hacimli kütle betonlarında hidrasyon sırasında betonun iç sıcaklığının çok yükselmesi ve yüzey sıcaklığı ile arasındaki fark termal rötreye ve erken yaş çatlaklarına sebep olmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonların yüksek erken dayanıma sahip olanları yüksek otojen rötreye ve termal rötreye nedeniyle erken yaş çatlaklarına meyillidirler [4]. Çünkü çimento hidrasyonu sırasında ortamdaki suyun azalması düşük su/çimento oranına sahip betonlarda otojen rötreye sebep olmaktadır [5]. Bu nedenle betonun erken yaşlarda ısı gelişim davranışının ve rötrenin iyi tespit edilmesi, ileri yaşlardaki beton davranışının anlaşılmasında önemli olacaktır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada; bağlayıcı, agrega ve taze beton özelliklerinin ısı gelişimi ve otojen rötre üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bununda yanında erken yaş ısı gelişimi ve rötre ilişkisi incelenmiştir. VCCTL yazılımının sanal laboratuvarından malzemeler seçilerek hidrasyon davranışının taklidi olan bir simülasyon hazırlanmıştır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçları kıyaslanarak ısı gelişiminin önceden tahmini değerlendirilmiştir. Son olarak erken yaş rötrenin bir tür fonksiyonla önceden tahmin edilebilmesi üzerine çalışılmıştır.

Çalışmada betonun hidrasyon ısı, yarı adyabatik kalorimetre deneyi ile elde edilen sıcaklık değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Erken yaş rötre değerleri ise lvd (doğrusal şekil değiştirme probu) yardımıyla ölçülmüştür. Erken yaşta termal ve otojen rötre birlikte ölçülmesinden dolayı otojen rötrenin tespiti için sıcaklık değişimi kaynaklı olan termal rötre deformasyonunun etkisi çıkarılmaktadır.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm tez konusunun giriş bölümüdür. İkinci bölüm tez konusuna ışık tutacak literatür araştırmasını, üçüncü bölüm deneysel çalışmaları, dördüncü bölüm deney sonuçları ve değerlendirmeleri, beşinci bölüm ise simülasyon çalışmasını içermektedir. Genel sonuçların anlatıldığı bölüm de son bölümdür. Bu bölümde ileri çalışmalara yönelik öneriler de mevcuttur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde; yüksek performanslı betonlar, betonun ısı gelişiminde etkili olan çimento hidratasyonu, hidratasyon mekanizması, hidratasyonu etkileyen faktörler, betonda erken yaşlarda ısı gelişimi, ne tür özelliklere bağlı olduğu, rötre kavramı, erken yaş rötre çeşitleri ve betonda erken yaş rötre yi etkileyen faktörler anlatılmaktadır.

2.1 Yüksek Performanslı Betonlar

Yüksek performanslı betonlar; geleneksel betonların dayanım ve dayanıklılık (durabilite) sınırlarını aşan günümüzde köprü, tünel ve yol gibi uzun servis ömrü gerektiren ve yüksek yapısal kapasiteye ihtiyaç duyulan yapılarda tercih edilen bir beton türüdür. Bu tip betonlar, düşük su/çimento oranı, düşük geçirimsizlik, yüksek erken dayanım ve genellikle yüksek nihai dayanıma sahiptirler [1].

Yüksek performanslı betonlar, genellikle uçucu kül, silis dumanı veya cüruf gibi puzolanik katkıların beton karışımına eklenmesi ve düşük su/çimento oranı yakalanmasıyla elde edilmektedir [2]. Bu tür betonların su/bağlayıcı oranı 0.20 ile 0.45 aralığındadır. Akıcı ve işlenebilir olması için akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır [3].

Son zamanlarda YPB'ler, işlenebilirlik bakımından çok iyi, geçirimsizliği düşük ve geleneksel betona kıyasla dış etkenlere karşı daha dayanıklı oluşu yönünden yaygın olarak kullanılmaktadır. Başka bir deyişle; yüksek performanslı beton, çevresel etkilere karşı dayanıklılığı da olan yüksek dayanımlı bir betondur. Başlangıç maliyeti yüksek olmasına karşın uzun servis ömrü sayesinde daha ekonomik sonuçlar elde edilebilmektedir [1]. Ancak beton dayanımının geliştiği erken yaşlardaki çimento hidratasyonu sırasında mevcut su miktarının azalıyor oluşu gözönünde bulundurulduğunda bu betonların düşük su/çimento oranına sahip olmasının rötre ye sebep olan itici gücü oluşturduğu söylenebilmektedir. Bu da betonda erken yaş çatlak riskini artırmaktadır.

Erken yaş çatlaklarının oluşumu, düşük permeabilitesi ile geleneksel betona karşı durabilite ve dayanım bakımından daha verimli olan bu betonların önemli bir avantajını ortadan kaldıracaktır [5]. Ayrıca yüksek erken dayanıma sahip olanları ise yüksek otojen rötre ve yüksek termal rötre nedeniyle erken yaşta çatlamaya meyilli olmaktadır [4].

Yüksek erken dayanıma sahip yüksek performanslı betonlarda dayanım, CEM III çimento ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak elde edilir. Bir deneysel çalışmaya göre ortalama dayanım 1 günde 43 MPa'a, 21 günde ise 49 MPa'a ulaşmaktadır.

Günümüzde çoğu ileri teknoloji inşaat yapısı, 100-120 yıllık uzun servis ömrüne sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Zorlu çevresel etkilere maruz kalan yapıların uzun süre geçirimsiz ve çatlak oluşmadan kalması önem arz etmektedir. Bu nedenle durabilitesi ve dayanımı yüksek olan yüksek performanslı betonlar; açık deniz petrol sondaj platformlarında, uzun açıklıklı köprülerde, karayolu köprü ayaklarının yapımında tercih edilmektedir. Örneğin; sondaj platformlarında deniz suyunun korozif etkisine, yüksek dalgaların gelgitinin yaratacağı erozyon ve etkilerine maruz kalacak devasa yağ depolama hücreleri ve öngerilmeli beton şaftları mevcuttur. Bu tip agresif çevre koşullarında yüksek performanslı betonlar kullanılmaktadır. Bunun yanında; yine deniz yapısı olan dünyadaki uzun açıklıklı köprülerin çoğunun köprü iskele temeli, ana açıklık ve kirişlerinde, köprü ayaklarında, yol ve otopark yapılarında kullanılmaktadır [5].

2.2 Betonun Erken Yaş Isı Gelişimi

Beton; çimento, su, agrega ve gerekli olması halinde istenilen özelliklere ulaşması için bazı katkı maddelerinin belirli şartlara göre karılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Birden fazla bileşeni olmasının yanında bileşenlerinin özelliklerini de taşıyan heterojen bir malzeme olan betonun kimyasını anlayabilmek için su ile çimento arasında meydana gelen reaksiyonun kimyasını detaylıca irdelemek gerekmektedir. İçeriğinde bulunan çimento ve suyun etkileşimi ile betonda erken yaşlarda ısı artışı meydana gelmektedir. Yani; çimento ve su arasındaki bu reaksiyon bir miktar ısı açığa çıkarmakta ve betonda dayanım kazanma sürecini de başlatmaktadır. Bu nedenle, betonda erken yaşlarda meydana gelen hidratasyon mekanizmasının anlaşılması, hem erken yaşlarda meydana gelecek rötre hem de ileri yaşlardaki mekanik ve fiziksel özelliklerin doğru tahmin edilebilmesi açısından önem taşımaktadır.

2.2.1 Hidratasyon

Hidratasyon; beton bileşenlerinin karıştırılmasıyla birlikte çimento ve suyun etkileşiminden meydana gelen ekzotermik bir kimyasal reaksiyondur. Çimento tanecikleri kısmen suda çözünmektedir. Çözünen çimentonun klinker bileşikleri, su ile farklı hız ve oranlarda ayrı ayrı reaksiyona girmektedir. Gerçekleşen bu reaksiyonlara hidratasyon reaksiyonları denilmektedir. Bu reaksiyonları daha iyi anlayabilmek için çimentoyu oluşturan ana bileşenleri de bilmek gerekmektedir.

2.2.1.1 Portland çimentosu bileşimi

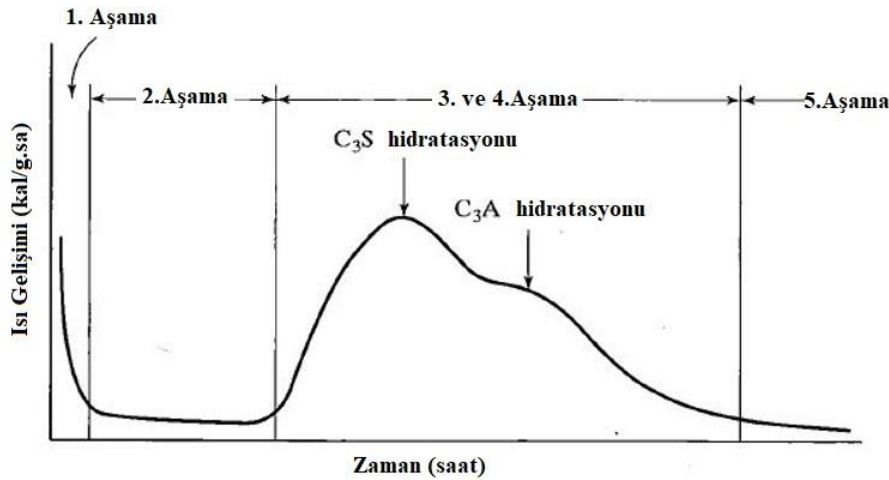
Portland çimentosunun klinker yapısını oluşturan ana bileşenler; dikalsiyum silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) şeklindeki karmaoksitlerdir. Dikalsiyum silikat ve trikalsiyum silikat portland çimentosunun %75-80'ini oluşturmaktadır [6].

Çimento kimyasında dikalsiyum silikat C_2S , trikalsiyum silikat C_3S , trikalsiyum alüminat C_3A ve tetrakalsiyum alüminoferrit ise C_4AF olarak kısaltmalarla ifade edilmektedirler. Bahsedilen her bir anabileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmektedir. Çizelge 2.1'de de gösterildiği gibi her bir bileşenin reaksiyon hızı, açığa çıkardığı ısı ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünün çimento bağlayıcılığına katkısı farklı olmaktadır [7].

2.2.1.2 Hidratasyon mekanizması

Hidratasyon süreci, beton karıştırıldığında çimento ve suyun ilk etkileşimiyle beraber başlamaktadır. Bu süreç, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi karıştırma, uyku, sertleşme, soğuma ve yoğunlaşma olmak üzere toplamda 5 aşamada incelenmektedir. İlk aşamada; C_3S su ile temas eder etmez çözülme gerçekleşmekte, çözeltiye Ca ve OH iyonları salınarak hızlı bir ısı gelişimi olduğu gözlemlenmekte ve 15-20 dakika içinde durmaktadır. Bu aşama ön-indüksiyon periyodu olarak adlandırılmaktadır. İkinci aşama olan uyku veya indüksiyon evresinde ise reaksiyon hızı oldukça yavaştır. Birkaç saat süren bu evrede çözülme devam etmekte ve pH değeri 12,5 gibi yüksek bir değere varmaktadır. Çimento işlenebilir ve plastik haldedir. Bu aşamada çok fazla silika çözünmemektedir. Numunenin hidratasyon davranışını anlamada ilk iki evre çok önemlidir.

Bu evrelerde katkı kullanımı, davranışı etkileyebilmektedir. Kullanılacak sükröz, kalsiyum glukonat gibi priz geciktirici katkıları indüksiyon periyodunu uzatabilmekte ve ivmelenme genliğini azaltabilmektedir. İlk sertleşmenin meydana gelmeye başladığı (priz başlangıcı) üçüncü evrede ise çözeltide Ca ve OH iyonları kritik bir değere varınca hızlı bir reaksiyon ile kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) kristallenmesi meydana gelmektedir [6]. Çimentodaki C₃S ve C₂S'in de hidrate olması sonucu oluşan bu yeni hidratasyon ürünleriyle birlikte ısı artışı da meydana gelmektedir. İlâveten oluşan hidratasyon ürünleri, betonun dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Bu ürünler birbirleri ile bağlanarak agregaları da sarmakta betonda sertleşme ve katılaşmayı başlatmaktadır [8]. Priz sonu, üçüncü evrenin sonunda gerçekleşmektedir. Dördüncü yani soğuma evresinde reaksiyonda bir yavaşlama olmakla birlikte açığa çıkan ısı miktarı düşmekte ama hidratasyon ürünleri oluşmaya devam etmektedir. Son aşamada ise reaksiyon ürünlerinin oluşumu yavaşlamış ve sabitlenmiş bir şekilde kontrol altında olmaktadır [6]. Ancak reaksiyonların devam edebilmesi için betonda yeterli miktarda su bulunması önemlidir.



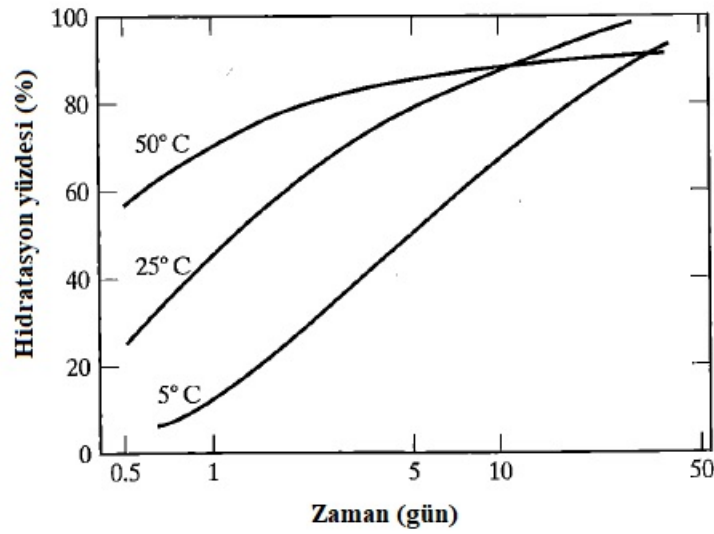
Şekil 2.1 : Portland çimentosunun hidratasyon süreci [9].

Çimento ana bileşenlerinin su ile girdikleri tepkimeleri tipik reaksiyon denklemleriyle ifade etmek mümkündür. Sınırlı miktar suyun varlığında trikalsiyum silikat (C₃S) ve dikalsiyum silikat (C₂S)'ın su (H) ile reaksiyonu denklem 2.1 ve 2.2'deki gibidir.



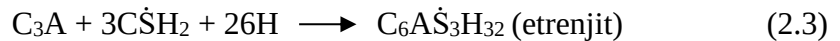
Kalsiyum silikatların (C_3S ve C_2S) su ile reaksiyonları sonucu oluşan ürünler $C_3S_2H_8$ (C-S-H jeli) ve CH [$Ca(OH)_2$] aynıdır. Yalnızca oluşan CH miktarı farklıdır. Bunun yanında daha az reaktif bileşene sahip olduğu için C_2S 'in reaksiyon hızı, C_3S 'e göre daha yavaştır. Dolayısıyla tepkime sonucu açığa çıkardığı ısı C_3S 'e göre daha azdır. Denklemlerdeki tipik gösterim su içeriğine göre çeşitlenebilmektedir. Burada ana hidratasyon ürünü zayıf kristalli, koloidal, lif şekilli katı bir malzeme olan (C-S-H jeli) kalsiyum-silika-hidrattır. Çimento hamuru, bağlayıcılık özelliğini C-S-H jelinin oluşmasıyla kazanmaktadır. Hidratasyon süresince C-S-H jellerinin miktarı artmakta iken çimento hamurunun dayanımı da artmaktadır. Diğer hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit (CH) ise karışık kompozisyonlu kristalize bir malzemedir [9]. Suda kolayca çözünmektedir.

Kimyasal reaksiyonlar, sıcaklığa duyarlıdır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi C_3S hidratasyonunda $100^\circ C$ 'ye kadar sıcaklık arttıkça hidratasyon miktarı artmaktadır [9].



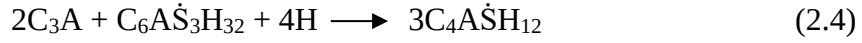
Şekil 2.2 : C_3S 'in hidratasyonuna sıcaklığın etkisi [9].

Portland çimentosunda C_3A 'nın hidratasyonu ise C-S-H jelinin çözünmesiyle beslenen sülfat iyonlu reaksiyonları içermektedir. Reaksiyonun büyük bir hızla çok büyük miktarda ısı açığa çıkartacak şekilde gerçekleşme potansiyeli olduğundan klinkere bir miktar alçıtaşı (CSH_2) katılarak reaksiyon hızı azaltılmaktadır. C_3A 'nın yüksek sülfatın bulunduğu ortamlarda temel reaksiyonu denklem 2.3'te verilmiştir.



Etrenjit denilen ürünün oluşması, bünyesinde bulunan 32 mol su molekülünden dolayı çimento hamurunun içinde çok büyük genleşmelerin meydana gelmesine sebep

olmaktadır. Çimento hamurunda etrenjitin oluşumu ortamdaki sülfat miktarıyla ilişkilidir. Fazla miktardaki SO₃ (sülfat) etrenjit oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle sülfatlı ortamlardaki betonlar için kullanılacak çimentolarda C₃A miktarı daha az istenmektedir [7]. Eğer C₃A hidratasyonu tamamlanmadan ortamda tüm sülfat tüketilirse etrenjit daha az sülfat içeren kalsiyum-alumino-monosülfohidrate dönüşmektedir. Bu durumda reaksiyon denklem 2.4'teki gibi olmaktadır.



C₄AF ana bileşenin hidratasyonu C₃A'nın gösterdiği hidratasyon reaksiyonuna benzer şekilde gerçekleşmektedir. Reaksiyonlar daha yavaş ve daha az ısı açığa çıkarmaktadır. C₃A'ya göre daha yavaş reaksiyon gösterse de oldukça hızlı ve büyük miktarda ısı açığa çıkartan bir bileşiktir. Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmış ise ani priz önlenebilmektedir. C₃A'daki alumina yerine içerisinde bulunan demiroksitler hidratasyon miktarını etkilemektedir. Demir içeriği arttıkça hidratasyon yavaşlamaktadır. C₃A oranı düşük ancak C₄AF oranı yüksek olan çimentolu betonlarda sülfat etkisine oldukça dayanıklı olduğu bilinmektedir. Sebebi kesin olarak bilinmemekle birlikte demir iyonu içeren kalsiyum-alumino-monosülfat ürünlerinin, sülfatlı ortamlarda etrenjite dönüşmemesi şeklinde yorumlanmaktadır [9].

Portland çimentosunun ana bileşenlerinin hidratasyon davranışları gözönüne alındığında birbirleriyle kıyaslanan reaksiyon özellikleri ve erken-ileri yaşlarda beton dayanımına katkıları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Çimentodaki anabileşenlerin relatif özellikleri [7].

	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon hızı	yavaş	orta	hızlı	orta
Hidratasyon ısısı	az	orta	çok yüksek	orta
Dayanıma katkısı:				
Erken yaşlarda	düşük	yüksek	düşük	düşük
İleri yaşlarda	yüksek	yüksek	düşük	düşük

2.2.1.3 Puzolanik katkılı çimentolarda hidratasyon mekanizması

Puzolanlar, günümüzde beton üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılan tek başına bir bağlayıcı özelliği bulunmayan malzemelerdir. Bu nedenle çimento yapısına katılabilirdiği gibi betona sonradan da ilave edilebilmektedir. Bunlardan uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık kökenli mineral katkıları en çok tercih edilen çeşitleridir.

Puzolanların tercih edilme sebeplerinden en önemlisi, çimento ile puzolanların belirli oranlarda yer değiştirmesiyle hem daha ekonomik hem de çevreye karşı duyarlı bir şekilde beton üretme isteğidir. Uçucu kül; termik santrallerde kömürün yanması ile ortaya çıkan baca gazlarının filtre edilmesiyle elde edilen, en yaygın olarak kullanılan inorganik bir puzolandır. Silis dumanı ise silisyum metalinin ve demir silisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen metalurji endüstrisinin bir atığıdır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu da demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür [4]. Puzolanik malzemelerin betonda iki önemli etkisi vardır. Bunlar; çimento hidrasyon ürünleriyle etkileşerek başlattığı puzolanik reaksiyon sonucu oluşan puzolanik etki ve beton kapiler boşluklarını doldurarak oluşturduğu filler etkisidir. Bir puzolanın ana bileşeni olan amorf veya camsı silika (S), kalsiyum silikatların hidrasyonundan oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile tepkimeye girmektedir.

Tipik puzolanik reaksiyon denklem 2.5'teki gibidir.



Puzolanik reaksiyon oldukça yavaş ve hidrasyon ısını azaltacak yapıdadır. Bu durum erken dayanım ve sertleşme sürecini etkileyecektir. Erken ısı gelişimi ve erken dayanımı azaltacaktır. Faydası ise suda kolaylıkla çözünüp beton içinde boşluk oluşturabilecek zayıf bir malzeme olan hidrasyon ürünü kireci bağlayıp beton dayanımını sağlayan C-S-H jeline dönüştürmesidir. Tüm bu etkileriyle puzolanlar poroziteyi azaltıp betonun durabilitesini artırmakta ve daha yüksek dayanım sağlamaktadır [9]. Ancak bu özellikleri sağlarken yüksek içsel beton sıcaklıklarına sebep olmadan yüksek dayanım elde etmek dolayısıyla betonda istenmeyen hacimsel değişimleri önlemek gerekmektedir.

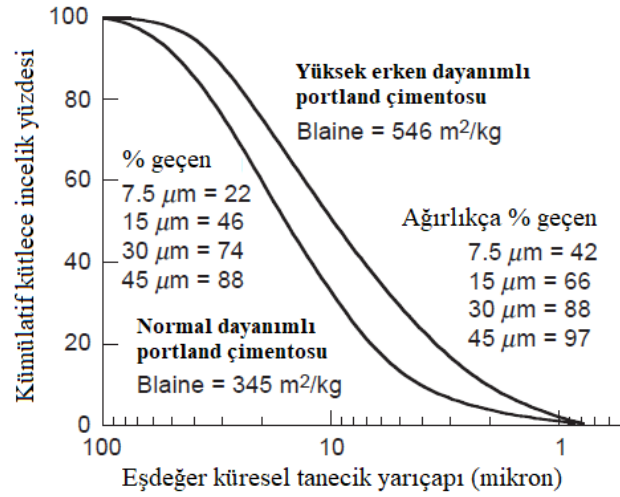
2.2.2 Hidratasyonu etkileyen faktörler

- **Çimento İnceliği**

Çimentonun inceliği, çimentonun suyla etkileşimini etkilemektedir. İnceliği yüksek bir çimentonun su ile daha hızlı reaksiyona girmesi beklenmektedir. Hidrasyon reaksiyon hızının artışı ile daha hızlı dayanım gelişimi görülecektir. Ancak çimentonun ince hale getirilmesi için öğütme maliyeti ve hidrasyon reaksiyonu sırasında ortaya çıkan ısı, çimento inceliği açısından bazı sınırlandırmaları da

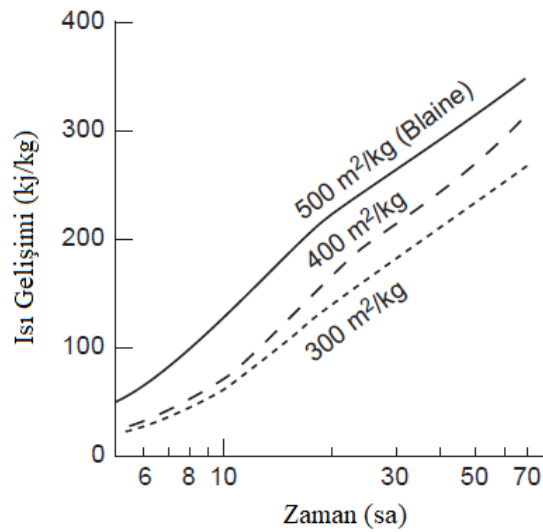
doğurmaktadır. Çimento endüstrisi, çimentonun inceliğinin tespiti amacıyla Blaine Hava Geçirgenliği Metodunu (ASTM C204) kullanmaktadır [4].

Endüstride üretilmiş Portland çimentolarının tipik tane boyutu dağılımı ve Blaine inceliği Şekil 2.3'teki gibidir.



Şekil 2.3 : ASTM Tip 1 ve Tip 3 portland çimentosu tipik tane boyut dağılımı [4].

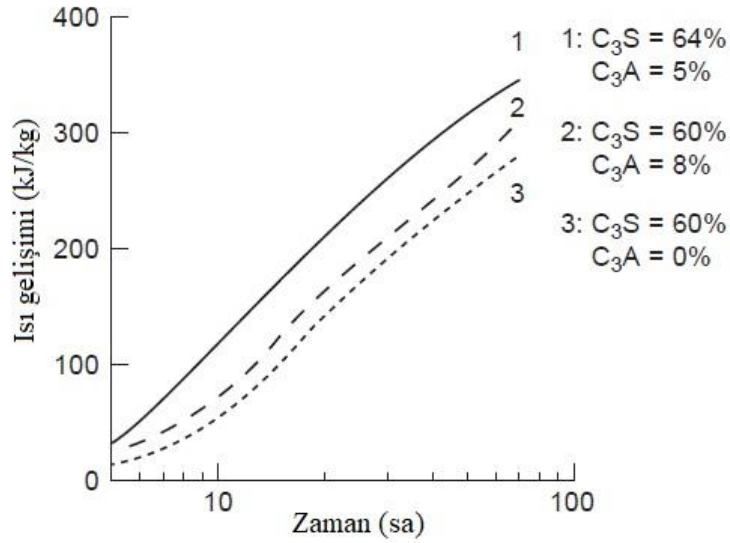
Blaine metoduna göre belirlenmiş farklı çimento inceliğine sahip çimentolarda hidratasyon ile oluşan ısıнын değişimi Şekil 2.4'te görülmektedir. Buna göre çimento inceliği arttıkça çimento pastasındaki ısı gelişimi ve hidratasyon ısısı artmaktadır.



Şekil 2.4 : S/Ç oranı 0,40 olan çimento pastasının ısı gelişiminde inceliğin etkisi [4].

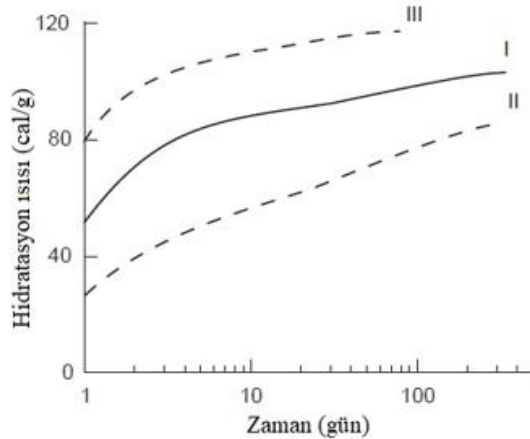
- **Çimento kompozisyonu**

Çimentonun hidratasyonu sırasındaki oluşan toplam ısı miktarını ve gelişimini çimentonun klinker bileşiklerinin kompozisyonu etkilemektedir [4]. Şekil 2.5’de çimentonun klinker bileşiklerinden olan C_3S ve C_2A ’nın bulunma yüzdelere göre zamanla ısı gelişimi verilmiştir. Buna göre çimentoda C_3S ve C_2A miktarının düşük olmasının hidratasyon ısısını azalttığı görülmektedir.



Şekil 2.5 : S/Ç oranı 0,40 olan çimento pastasının ısı gelişiminde çimento bileşiklerinin etkisi [4].

Şekil 2.6’da üç farklı çimento kompozisyonunun hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Çimento No	Bileşik Kompozisyonu			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	49	25	12	8
II*	30	46	5	13
III	56	15	12	8

* Çimento II, ASTM tip 4 portland çimentosuna karşılık gelir.

Şekil 2.6 : Çimento kompozisyonunun hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi [4].

İçeriğinde yüksek miktarda C_2S ve C_4AF bulunan çimentolar, genellikle düşük ısıli çimento olarak bilinirken C_3S ve C_3A miktarı fazla olan çimentolar yüksek ısı yayılımını göstermektedir [10]. Çimentonun klinker yapısını oluşturan ana bileşenlerin tipik hidrasyon ısı değerleri Çizelge 2.2'deki gibidir.

Çizelge 2.2 : Çimento ana bileşenlerinin tipik hidrasyon ısısı [11].

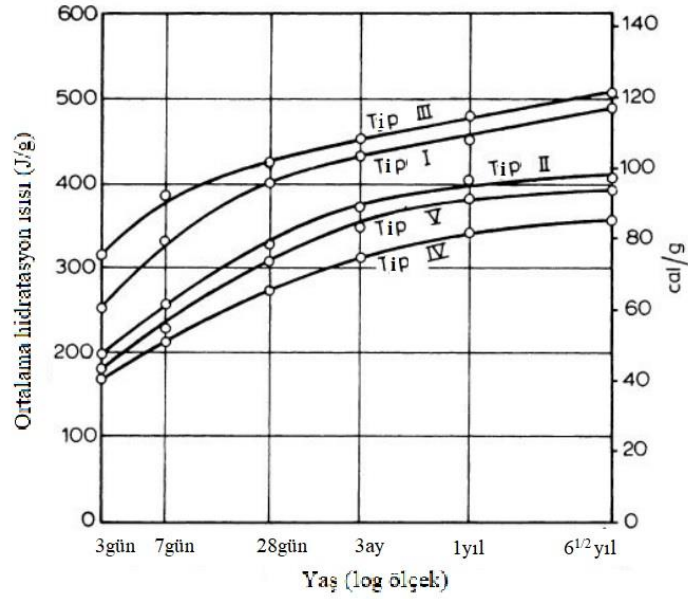
Bileşen	Hidrasyon ısısı (J/g)
C_3S (trikalsiyum silikat)	500
C_2S (dikalsiyum silikat)	260
C_3A (trikalsiyum alüminat)	850
C_4AF (tetrakalsiyum alüminoferrit)	420
C (serbest kireç)	1165
MgO (magnezyum oksit)	850

- **Çimento tipi**

Çimentolar arasındaki farklar, sahip oldukları fiziksel özellikler ve kimyasal kompozisyonlarındaki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Tip 1 ve Tip 3 çimentolar benzer kimyasal özelliklere sahip olmalarına rağmen Tip 3 çimento daha yüksek inceliğe sahiptir. Çimento inceliğinin yüksek olması, su ile temas geçecek daha fazla yüzey alanı olması anlamına geldiğinden ince çimentolar daha yüksek oranda hidrasyon reaksiyonu göstermektedir. Dolayısıyla tip 3 çimentonun tip 1 çimentoya nazaran ısı gelişiminin daha yüksek oranda olduğu söylenebilir [12].

Bunun yanında Portland tip 1 çimentoya puzolanik katkıları katılarak hidrasyon ısısını kontrol etmenin amaçlandığı portland tip 4 çimento gibi puzolanik çimentolar düşük ısıli çimentolar olarak bilinmektedir [13].

Benzer olarak başka bir çalışmada, Şekil 2.7'de farklı çimento tiplerinin ortalama hidrasyon ısıları görülmektedir.



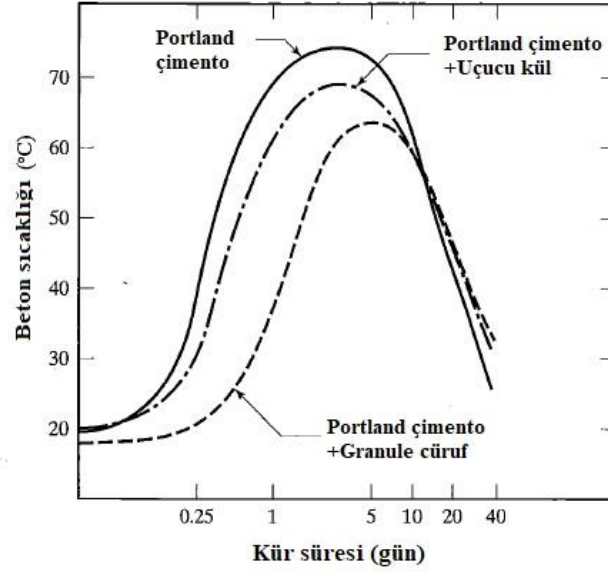
Şekil 2.7 : 21 °C (70 °F)'de kürlü S/Ç oranı 0,40 olan farklı çimento tiplerinin hidrasyon ısı gelişimi [14].

- **Mineral katkı**

Çimentoda mineral katkı kullanımına; çimentonun CO₂ salınımının yüksek olması, üretim maliyetinin yüksekliği gibi sebeplerle ve büyük hacimli betonlardaki yüksek hidrasyon ısını kontrol etmek amacıyla sınırlı miktarlarda çimentoya eklenmesiyle başlanmıştır. Buna göre, çimentonun yerine kısmen mineral katkı kullanımıyla hidrasyon ısının düşürülmesi sağlanmıştır.

Mineral katkı kullanımı çimentoda C₂S miktarı artırmaya eşdeğer davranış göstermekte ve hidrasyon ısını düşürmektedir.

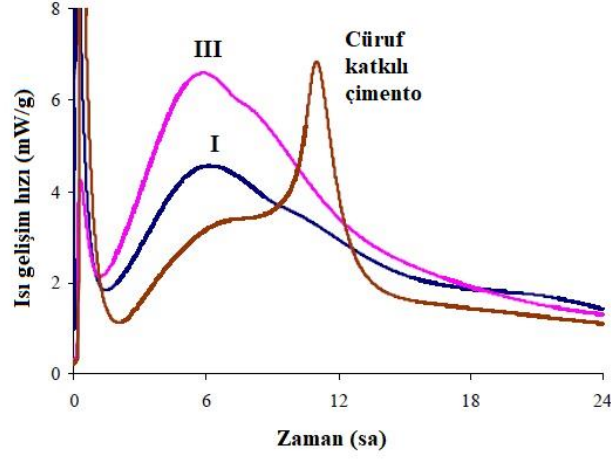
Puzolanik reaksiyon yavaş olduğu için ısı yavaşça artmaktadır. Ancak puzolan tipine göre betonda yaratılan sıcaklık artışı Şekil 2.8'teki gibi farklı olabilmektedir [9].



Şekil 2.8 : Uçucu kül ve cüruf katkılı çimentoların beton sıcaklığına etkisi [9].

Silis dumanının eklenmesi ise, hidrasyon ısısını ve çimentonun hidrasyonunu hızlandırırken yüksek fırın cürufunun eklenmesi genellikle tersi bir trend göstermektedir [15]. Silis dumanı varlığında çimentonun ilk hidrasyonu hızlanmaktadır. S/ç oranı yükseldikçe silis dumanının hızlandırıcı etkisi artmaktadır. Düşük s/ç oranında silis dumanı çimento hidrasyonunun uyku aşamasını uzatarak hidrasyonu geciktirmektedir. Uçucu kül, uyku ve hızlanma periyodunu geciktirmektedir. S/ç oranı yükseldikçe hidrasyon geciktirici etkisi artmaktadır. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımı ise çimento hidrasyonunu önemli miktarda geciktirmektedir. Bu da hidrasyon ısısını azaltmakta ve silis dumanının ilk hidrasyonu hızlandırmasını engellemektedir. Böylece silis dumanının hidrasyon hızlandırıcı etkisi ertelenmektedir [16].

Yine başka bir çalışmada tip 1 çimentoya kısmen cüruf eklenmesiyle erken yaşlarda hidrasyon hızı azalmaktadır. Pozolanik çimentolarda Şekil 2.9'da görüldüğü üzere ilk pik çimentonun C_3A hidrasyonudur. İkinci pik ise cürufun pozolanik reaksiyonundan kaynaklanmaktadır [12].



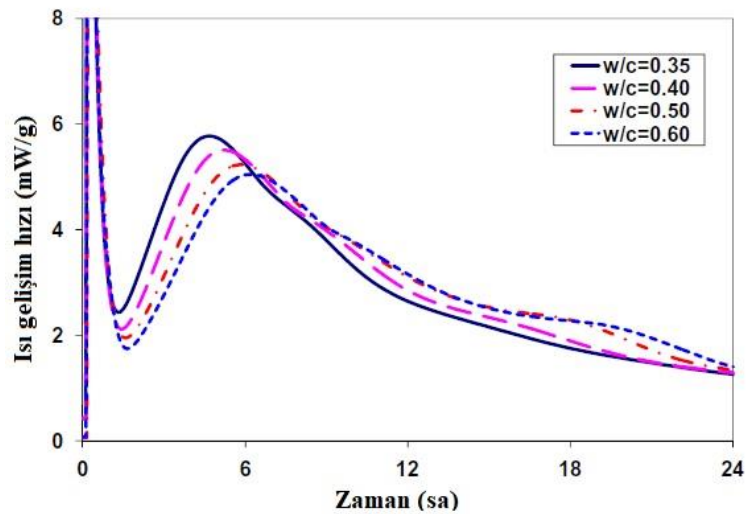
Şekil 2.9 : Çimento tipine göre (tip I, tip III ve katkı) hidratasyon davranışı [12].

- **Kimyasal katkılar**

Kimyasal katkılar; hidratasyon davranışını, buna bağlı olarak hidratasyon ısısını ve ısı gelişimini etkilemektedir. Priz geciktirici ajanlar erken yaşlarda hidratasyonu yavaşlatmaktadır. Bu da hidratasyon ısısını azaltacaktır. Priz hızlandırıcı katkılar ise benzer mantık ile hidratasyon ısısını artırmaktadır. Ancak uzun vadede genellikle ısı gelişimini çok fazla değiştirmemektedir [10].

- **S/Ç oranı**

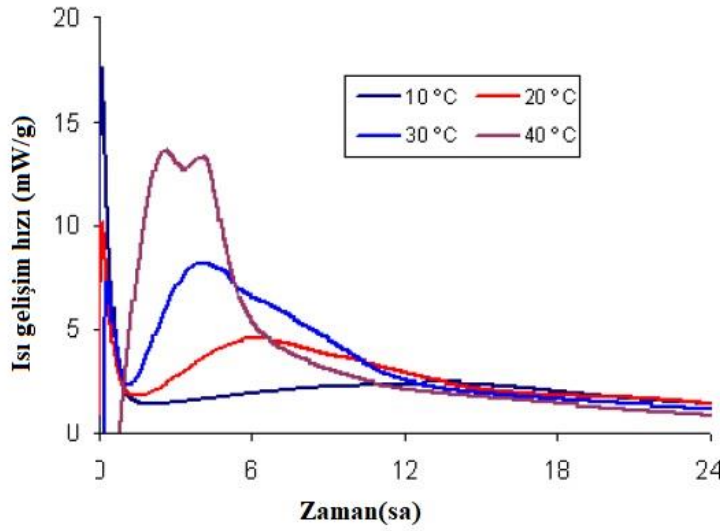
Düşük s/ç oranına sahip numuneler, daha yüksek oranda ısı gelişimi göstermektedir. Hidratasyon eğrisinin tepe noktasına varış Şekil 2.10'da görüldüğü gibi s/ç oranı arttıkça gecikmektedir [12].



Şekil 2.10 : S/ç oranının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi [17].

- **Ortam sıcaklığı**

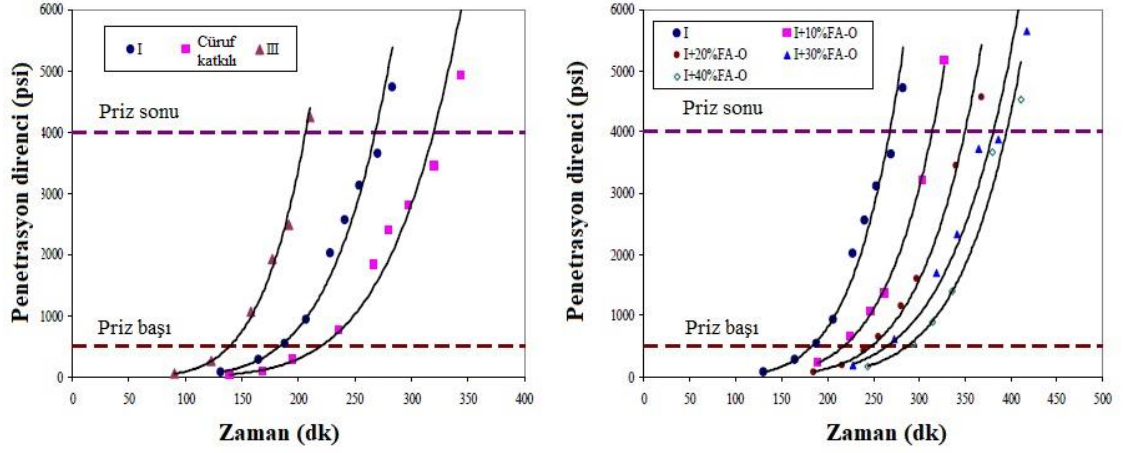
Ortam sıcaklığının erken yaşlardaki ısı gelişiminde önemli etkisi vardır. Sıcak hava koşullarında çimento hidratasyonu erken yaşlarda hızlanmakta ve daha sonra yavaşlamaktadır. C₃S'in hidratasyonuna atfedilen ana pik, daha erken bir zamana kaydırılmakta ve sıcaklık arttıkça değer büyük ölçüde artmaktadır. Ana tepe noktası çok daha geniştir ve daha düşük bir sıcaklıktadır. Şekil 2.11'de görüldüğü üzere sabit sıcaklık 40 °C'den 10°C'ye düştükçe tepe değerinin konumu ileri doğru olmakta ve tepe değeri küçülmektedir. Soğuk hava koşullarında ise hidratasyon yavaşlamakta ve daha az ısı oluşmaktadır. Bu nedenle aşırı priz gecikmesi ve dayanım kazanımının gecikmesinden kaçınmak için hızlı hidrate olan çimentolar kullanılmaktadır [12,18].



Şekil 2.11 : Sıcaklığın ısı gelişimi üzerindeki etkisi [12].

- **Priz süresi**

Çimentolu malzemenin priz başlangıç zamanı ASTM C403'e göre numunenin 500 psi (3,5 MPa) penetrasyon direncine ulaştığı zaman olarak kabul edilmektedir. Priz sonu ise 4000 psi (27,6 MPa) penetrasyon direncine ulaştığı zaman olarak belirlenmektedir. Şekil 2.12'de farklı çimentoların priz zamanları görülmektedir.



Şekil 2.12 : (a) Farklı çimentoların (tip I, cüruf katkılı, tip III) ve (b) farklı miktardaki uçucu küllü çimentoların priz başlangıç ve bitiş zamanları [12].

Şekil 2.12 (a)'da görüldüğü üzere tip III çimento, inceliğinden ötürü daha fazla yüzey alanına sahip olması sebebiyle en düşük başlangıç ve bitiş zamanına sahiptir. Çimento inceliğinin daha fazla olması hidratasyon hızını artırmaktadır. Bu da priz sürelerini kısaltmaktadır. Yani çimento tanecikleri ile suyun daha fazla yüzeyde etkileşime geçecek uygun zemini bulmaları hidratasyon reaksiyonlarının hızlıca gerçekleşip erken priz almasını sağlamaktadır. Cüruf katkılı çimentoda ise tip I çimentoya nazaran daha uzun priz süreleri ile karşılaşılmaktadır. Yukarıda puzolanik katkıların hidratasyona etkilerinden bahsedilirken hidratasyon sırasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonun hidratasyonu yavaşlatıcı etkisi olduğu ve hidratasyon ısısını da düşürdüğü anlatılmıştı. Bu durum priz sürelerinin artmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.12 (b)'de ise uçucu külün hidratasyonu geciktirici etkisi nedeniyle priz süreleri artmaktadır [12].

- **Taze beton sıcaklığı**

Taze beton, 15-20 °C sıcaklık aralığında optimum kabul edilmektedir. Bu sıcaklıklar için ± 5 °C tolerans payı vardır. Sıcaklık 25 °C'yi aştığında hidratasyonu ve katılaşma süresini hızlandırmaktadır. Taze betonun sıcaklığı arttıkça hidratasyon sonucu nihai sıcaklık da artacaktır [19].

- **Agrega özellikleri**

YPB karışımlarında, agrega hacminin artması ve çimento hamurunun hacminin azalmasıyla birlikte suyun tane yüzeyinde absorpsiyonu (su emme), çimento hamurunun kuruma sürecini hızlandırmaktadır.

Agregaların büyük miktarda su emmesi ile suyun çimento hamurundan uzaklaşması, düşük s/ç oranına sahip YPB'lerde çimento hidratasyon derecesini azaltabilmektedir [20].

Agreganın tane boyutunun artması yüzey/hacim oranını düşürmektedir. Bu nedenle karışımında çimento hamuru ihtiyacı ve onunla birlikte su ihtiyacı da azalmaktadır [21]. Yine başka bir çalışmada da belirli bir su/çimento oranı için maksimum iri agrega boyutunun artması gerekli çimento miktarını azaltacaktır denilmektedir [22]. Çimento miktarının azalması daha az su ihtiyacı ile birlikte daha az hidratasyon reaksiyonu dolayısıyla ısı oluşumun daha az olması demektir.

2.2.3 Adyabatik ısı gelişimi

Hidratasyon reaksiyonları ile ortaya çıkan ısı, beton sıcaklığında artışa sebep olmaktadır. Çevreye ısı kaçışının olmadığı adyabatik koşullar altında sıcaklık ve ısı arasındaki ilişki denklem 2.6'daki gibidir.

$$\Delta T_{ad} = \frac{Q_c \times C}{\rho_c \times c_p} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'daki parametreler; ΔT_{ad} (°C) adyabatik sıcaklık artışı, Q_c (kJ/kg) kg çimento veya kg bağlayıcı başına üretilen ısı, C (kg/m³) 1 m³ beton başına bağlayıcı içeriği, ρ_c (kg/m³) beton özgül ağırlığı ve c_p [kJ/(kg.°C)] beton ısı kapasitesi anlamına gelmektedir.

Ancak pratikte beton ve çevresi arasında bir ısı transferi meydana gelmesi beklenmektedir [23].

Betondaki adyabatik sıcaklık artışı, yaratılan ısı miktarın bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Yaratılan toplam ısı miktarı (ısı gelişimi) (ΔQ_n) veya adyabatik ısı, denklem 2.7'deki gibi betonda gelişen ısı enerjisi ($\Delta Q_{beton,n}$) ve çevresine kaybettiği ısı ($\Delta Q_{ısı kaybı,n}$) enerjisinin toplamı olarak belirlenmektedir.

$$\Delta Q_n = \Delta Q_{beton,n} + \Delta Q_{ısı kaybı,n} \quad (2.7)$$

Belirli bir Δt_n zaman aralığı sırasında yaratılan adyabatik ısı (Q), denklem 2.8'deki gibi ΔQ_n 'lerin toplamıdır.

$$Q = \sum_{n=1}^{n-1} \Delta Q_n \quad (2.8)$$

Hidratasyon reaksiyonu sırasında betonda gelişen ısı miktarını ve ısı kaybını kalorimetre deneyleriyle ölçmek mümkündür [24].

Isı gelişimi, kg çimento veya toplam bağlayıcı miktarı (çimento+uçucu kül+silis dumanı) başına ortaya çıkan enerji şeklinde belirtilmektedir. Betonda ortaya çıkan bu ısı enerjisi, betonun eşdeğer yaşının (olgunluk) bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. “Eşdeğer yaş (olgunluk), referans sıcaklıkta bakımı yapılmış betonun, gerçek sıcaklık koşullarında bakımı yapılan beton ile aynı dayanım değerlerine sahip olması için gereken süredir” [25].

Olgunluk fonksiyonu, betonun ısı gelişimine bağlı olarak dayanım gelişimini tahmin etmek için denklem 2.9’daki gibi ifade edilmektedir.

$$M = \sum_{i=0}^n H(Q_i) \cdot \Delta t_i \quad (2.9)$$

Burada M (olgunluk), Δt_i (zaman aralığı), Q_i (ortalama sıcaklık) ve $H(Q_i)$ (hız fonksiyonu) olmak üzere;

$$H = \exp\left[\frac{E(Q)}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+Q}\right)\right] \quad (2.10)$$

Denklem 2.10’da R evrensel gaz sabiti ve E(Q) karışımın görünen aktivasyon enerjisidir.

Betonda ısı gelişimi ise denklem 2.11’deki gibi ifade edilmektedir.

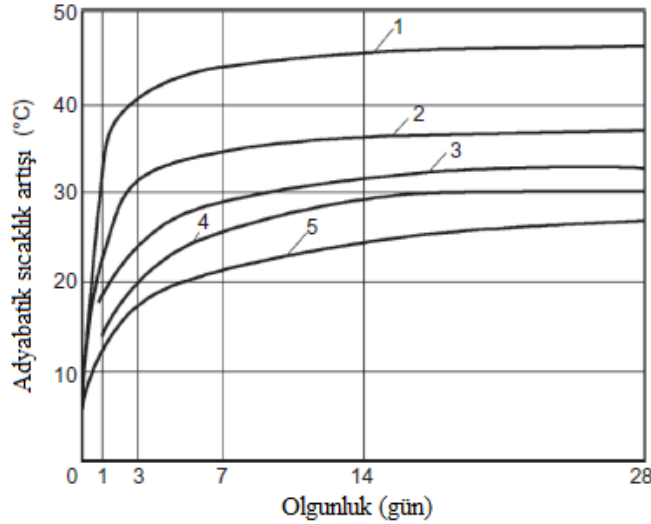
$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}\right] \quad (2.11)$$

Bu denklemde Q(M) betonun eşdeğer yaşına bağlı ısı gelişimi, Q_{∞} toplam ısı gelişimi, τ_e zaman sabiti, α eğim parametresi ve M olgunluktur [26].

Denklemlerde yer alan görünen aktivasyon enerjisi (E), beton dayanım gelişiminde sıcaklığın etkisini tanımlayan bir terimdir. Betonda belirli bir reaksiyonun sıcaklığa duyarlılığını tanımlamak için kullanılmaktadır. Yani aktivasyon enerjisi yüksek bir betonun, sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkileneceği söylenebilir [25,27].

Betonda ısı gelişiminin tahmini, meydana gelen sıcaklık artışının bir çok parametreye bağlı olmasından ötürü zor olmaktadır. Isı gelişimi; çimento miktarı ve türü, katkı ve yerleşme sıcaklığına bağlı olarak değişebilmektedir. Şekil 2.13’te aynı miktardaki farklı çimento türüne göre betonda adiabatik sıcaklık artışı görülmektedir. Şekildeki grafikte çimento tipleri 1’den 5’e kadar numaralandırılmıştır.

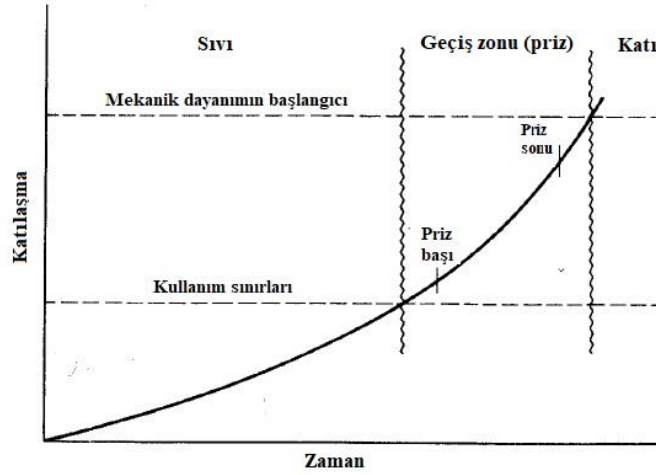
Bunlar; tip-3 çimento (1 nolu gösterim), tip-1 normal çimento (2 nolu gösterim), tip-2 çimento (3 nolu gösterim), %75 normal çimento ve %25 uçucu küllü tip-2 çimento (4 nolu gösterim), tip-4 çimento (5 nolu gösterim) şeklindedir.



Şekil 2.13 : Farklı çimento tipine göre betonda adyabatik sıcaklık artışı [28].

2.3 Betonun Erken Yaş Rötresi

Beton içerisindeki suyun çeşitli nedenlerle azalması sonucu beton hacminde ve boyunda meydana gelen büzölmeye rötire denilmektedir. Rötire, betonun yaşına göre erken yaş ve uzun dönem (ileri yaşlar) olarak iki faza ayrılabilir. Erken yaş genellikle betonun mekanik özelliklerinin geliştiği dökümden sonraki ilk 24 saat olarak ifade edilmektedir. Betonun 24 saat ve sonraki zamanları için ise uzun dönem (ileri yaş) tabiri kullanılmaktadır. Erken yaş süreci; Şekil 2.14’de görüldüğü gibi betonun sıvı halindeki zamanı, iskelet formunun oluşması ile erken katılaştırmanın meydana geldiği bir geçiş dönemini ve betondan kalıbın kaldırıldığı rijitleşmeye doğru giden ilk sertleşmenin meydana geldiği zamanı içermektedir [8].



Şekil 2.14 : Erken yaş rötre fazları : sıvı hal, prizle sertleşmeye geçiş, sertleşen katı [4].

Betonun erken yaş rötresi genellikle buharlaşma (kuruma rötresi) veya içsel reaksiyonlar (otojen rötre) sonucu su kaybindan dolayı gerçekleşmektedir. Bu durum çimento hamurunda çekme gerilmeleri oluşturarak taneleri birbirine yakınlıştırmaktadır. Bu da hacim büzülmesine sebep olmaktadır. Betonun erken yaşlarında rötre, henüz yeterince dayanım kazanmaması sebebiyle daha kritiktir. Bu yaşlarda betonda oluşacak en küçük gerilme bile dev rötre deformasyonlarına sebep olmaktadır. Bunun yanında hidratasyona uğramış çimento hamurundaki içsel kapılarite sistem, erken ve ileri yaşlarda beton rötresini oldukça etkilemektedir. İçsel kapılarite basıncı, hacim değişikliklerine sebep olan gerilmeleri yaratmaktadır.

Erken yaşlarda görülen rötre, mikro çatlaklara sebep olabilmektedir. Eğer erken yaşlarda betonda içsel ve mikroskopik çatlaklar mevcut ise bu durum ileri yaşlarda betonun çoğunlukla çatlaklara açık hale geldiğini ve bunun bir durabilite problemine sebep olabileceğini göstermektedir. Bu açıdan erken yaş rötre konusu ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır [29].

2.3.1 Rötre çeşitleri

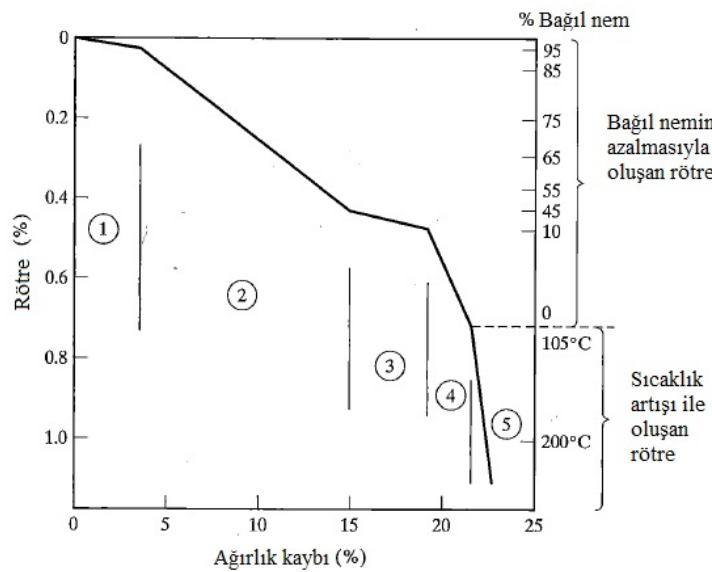
Betonun bir yapı malzemesi olarak zayıflıklarından biri rötre dir. Erken veya ileri yaşlarda betonda meydana gelen rötre, oluşma şekline göre çeşitlenmektedir. Bunlar; plastik rötre, otojen rötre, karbonatlaşma rötresi, kuruma rötresi ve termal rötre dir. Betonda erken yaşlarda kuruma rötresi, otojen rötre ve termal rötre daha yaygındır [29].

2.3.1.1 Kuruma rötresi

Kuruma rötresi, sertleşmiş betonda bulunan suyun buharlaşarak kaybolması sonucunda beton hacminde meydana gelen azalma şeklinde ifade edilmektedir. Hava sıcaklığının yüksekliği, bağıl nem oranının düşük olması ve rüzgar hızının yüksekliği, beton içerisindeki suyun buharlaşarak kaybolmasına sebep olmaktadır. Betonun bu şekilde su içeriğinin düşmesi yani kuruması beton hacminde büzülme meydana getirmektedir [7].

şekil 2.15’de görüldüğü üzere  imento hamurundan su kaybı, beş aşamada gerçekleşmektedir. Hava sıcaklığının artması ve bağıl nemin azalması durumunda önce  imento hamurunun içerisindeki makro boşluklardan serbest su buharlaşmakta (1.safha) ve sonra da mikro boşluklardaki (kapiler boşluklar) su kaybolmaya başlamaktadır (2.safha). İkinci safhanın sonunda boşluk sisteminin tamamında tutulan su kaybolmaktadır.

Kurumanın devam etmesi halinde  imento hamurundaki C-S-H jellerinde absorbe edilmiş su da kaybolmaya başlamaktadır (3.safha). Dördüncü safhada, C-S-H jellerinin iç yapısında bulunan suyla dolu jel boşluklarındaki su kaybolmaktadır. Beşinci safhada ise C-S-H jellerinin yapısı bozulmaktadır. 4. ve 5. safhalardaki su kaybı, çok uzun süre çok düşük bağıl nem koşullarında veya yangına maruz betonlarda oluşmaktadır. Uygulamada beton çok uzun süre çok düşük neme maruz olmadığından betondaki su kaybı ilk üç safhadaki gibi gerçekleşmektedir [9].

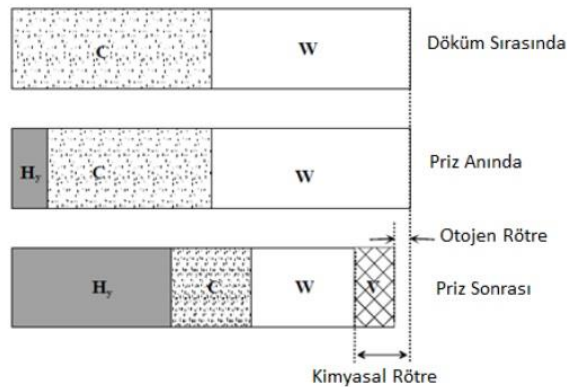


şekil 2.15 : Kuruma r tresinde  imento hamurundaki suyun kaybolma safhaları [9].

2.3.1.2 Otojen rötre

Otojen rötre kavramı; çimento miktarı yüksek, su/çimento oranı düşük (0,40'dan daha az) olan yüksek performanslı betonların üretimiyle önem kazanmaya başlamıştır. Dış etkilere (sıcaklık, nem vb.) bağımsız bir ortamda; su/çimento oranları çok düşük çimento hamurları, su ve çimentonun karışmasıyla hidratasyonu için gerekli olan suyu, kılcal boşluklardaki serbest suyu absorbe ederek elde etmektedir. Böylece çimento hamuru kendiliğinden kurumakta, kılcal boşlukların çapları azalarak katı çeperlere etkiyen çekme kuvvetleri artmakta ve makro boyutta bir büzülme meydana gelmektedir.

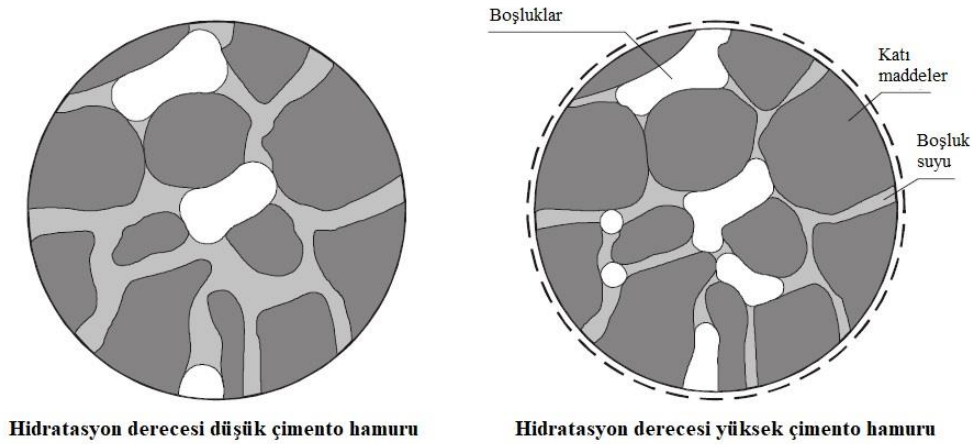
Bu nedenle otojen rötre, kimyasal değişimle oluşan rötre ile kendiliğinden oluşan kurumanın sebep olduğu rötrenin bir toplamı olmaktadır [30]. Mihashi ve Leite'a göre otojen rötre, çimento hidratasyon reaksiyonlarının devamı için kapiler boşluklardaki nemin çekilmesinin bir sonucu olarak ilk priz sonrası meydana gelen makroskopik hacim değişikliğidir [31]. Otojen rötre tanımı bilim insanları arasında tartışmalı bir konudur. Önceden bünyesel rötre denilen bu rötre, otojen rötre veya kimyasal rötre gibi kavramlarla açıklanmaya çalışılmıştır. Japon araştırmacılara göre kimyasal rötre; hidratasyon sonucu oluşan ürünlerin hacminin çimento ve suyun hidratasyon öncesi hacimleri toplamından daha küçük olması olayıdır. Kimyasal rötre, otojen rötrenin ana itici mekanizması olarak kabul edilir. Otojen rötre, kimyasal rötrenin bir parçası olarak düşünülmektedir. Ancak Şekil 2.16'da da görüldüğü gibi otojen rötre, görünür yani makroskopik bir hacim değişimi iken kimyasal rötre, içsel yani mikro ölçekte bir hacim değişimini ifade etmektedir [29].



Şekil 2.16 : Otojen ve kimyasal rötreye neden olan reaksiyonlar. C=hidrate olmamış çimento, W=hidrate olmamış su, H_y=hidratasyon ürünleri ve V=hidratasyon sonucu oluşan boşluklar [29].

Şekil 2.17’de ise çimento hidratasyonu sonucu çimento hamurunun şematik görünümü verilmektedir. Buna göre, boşluk suyu açık gri ile, hidratasyon ürünleri, hidrate olmamış çimento ve puzolanik katkıları gibi katı maddeler koyu gri ile ve boşluklar ise beyaz ile gösterilmiştir.

Çimento hidratasyon derecesi¹ arttıkça (hidratasyon ilerledikçe) çimento hamurunda boşluk suyunun azaldığı, mevcut boşlukların küçüldüğü ve kimyasal rötreyle bağlı yeni boşlukların şekillendiği ve toplam çimento hamurunun hacminin ise makro ölçekte azaldığı görülmektedir [33].



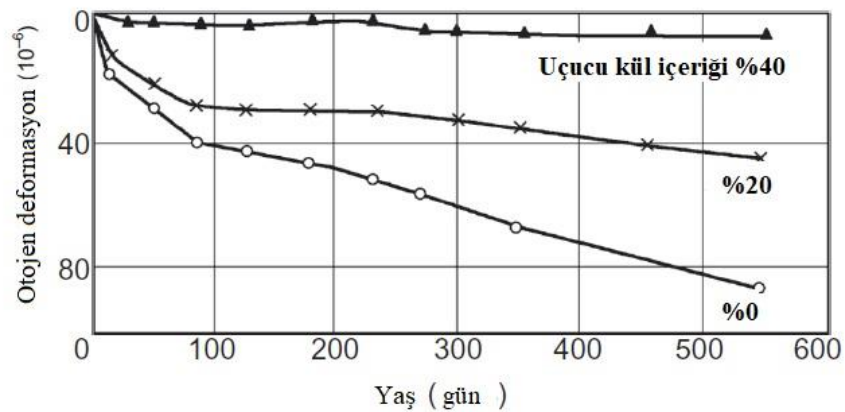
Şekil 2.17 : Hidrate olan çimento hamurunun şematik kesiti [33].

Çimento pastasında otojen rötre üzerinde; su/çimento oranı, çimento özellikleri, mineral ve kimyasal katkıları, ortam sıcaklığı, betondaki agregalar ve lif kullanımının etkilerini araştıran çok sayıda çalışma yapılmıştır. Pekmezci ve arkadaşlarının bir çalışmasında su/çimento oranı yükseldikçe otojen rötrenin azaldığı görülmektedir [30]. Bu nedenle çimento miktarı yüksek, su/çimento oranı düşük olan yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlarda otojen rötreye daha çok rastlanmaktadır. Ayrıca birim hacim başına daha yüksek bağlayıcı içeriğine sahip yüksek dayanımlı betonlarda rötre daha fazla olmaktadır [33]. Çimento miktarı yüksek bu tip betonlarda agregalar karışıma eklendiğinde çimento hamuru miktarı azalacağı için otojen rötrenin de azalması beklenmektedir.

¹ Hidratasyon derecesi, çimento hidratasyonunun ne oranda gerçekleştiğinin bir ölçüsüdür [32].

Agrega mevcudiyeti betonda rötreyi sınırlayan bir etken olması yanında bazı çalışmalarda agreganın su emme kapasitesi, agrega şekli ve tipinin de otojen rötreyi etkileyen faktörler olduğu anlaşılmıştır. Agregaların su emme kapasitesi arttıkça otojen r tredeki düşüş ivmelenmektedir. Agregaların içinde hapsolan su, hidrasyon sırasında kullanılabilir. Ayrıca benzer şekilde hafif agregaların da boşluklu yapıları sebebiyle içinde su depolayabilmesi sonucu hidrasyon sırasında ortama saldığı su sayesinde kendiliğinden kuruma olayı   lenenebilmektedir. Bu nedenle hafif agregalar diğer agregalara kıyasla otojen rötre büyüklüğünü azaltmada daha etkindir [34–36].

Yüksek dayanımlı betonların düşük poroziteli yapısı, karışıma silis dumanı vb. puzolanlar ekleyerek ve süperakışkanlaştırıcı yardımıyla düşük su/ imento oranı oluşturarak sağlanmaktadır. Bununla ilgili çalışmalarda karışıma puzolan eklenmesiyle aynı su/ imento oranına sahip normal Portland çimentosuna kıyasla  imento ile yer değiştiren uçucu külün otojen rötreyi azalttığı görülmektedir [37]. Mineral katkılarının otojen rötre üzerindeki etkileri gözönüne alındığında katkının inceliği önemli bir etken olmaktadır. Beton içindeki kılcal boşluklar mineral katkılarının inceliği arttıkça daralmakta ve boşluk içi gerilmeler artmaktadır. Bu da otojen rötrenin makroskopik ölçekte fiziksel değişiminin görülmesine neden olmaktadır. Silis dumanı gibi tane boyutu çok küçük mineral katkılarının kullanımı otojen rötreyi artırırsa da metakaolin gibi ince taneli katkının kullanımında ise genleşme eğiliminden dolayı otojen rötreyi oldukça azalttığı hacim genleşmesine bile neden olduğu belirtilmektedir. Bunun yanında kullanılan mineral katkılarının dozajının da önemli olduğu ifade edilmektedir [35,38–43]. Katkı dozajının etkisi, şekil 2.18’de uçucu kül miktarına bağlı olarak değişen otojen deformasyon grafiğinde gösterilmektedir.



şekil 2.18 : Betonda otojen deformasyona uçucu kül dozajının etkisi [28].

Otojen rötre üzerindeki çalışmalarda mineral katkıların yanında kimyasal katkıların etkisi de araştırılmıştır. Örneğin; süperakışkanlaştırıcı eklenmiş çimento pastasında ise otojen rötrenin arttığı görülmektedir [29]. Bunun aksine, Tazawa ve arkadaşlarının bir çalışmasında süperakışkanlaştırıcı (SA) katkıların otojen rötre büyüklüğü üzerinde bir etkisi olmadığı ancak otojen rötre gelişimini etkileyebileceği belirtilmiştir. Buna göre SA katkı kullanıldığında otojen rötrenin ivmelenme periyodunun başlangıcı uzayabilmektedir [39].

Bunların dışında, betonun otojen rötresini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Çimento inceliği üzerine yapılan bir çalışmada; ince taneli çimentoya sahip bir numunede otojen rötre daha yüksek iken iri taneli çimentolu numunelerde erken yaşlarda rötre yerine genleşme tespit etmişlerdir [44].

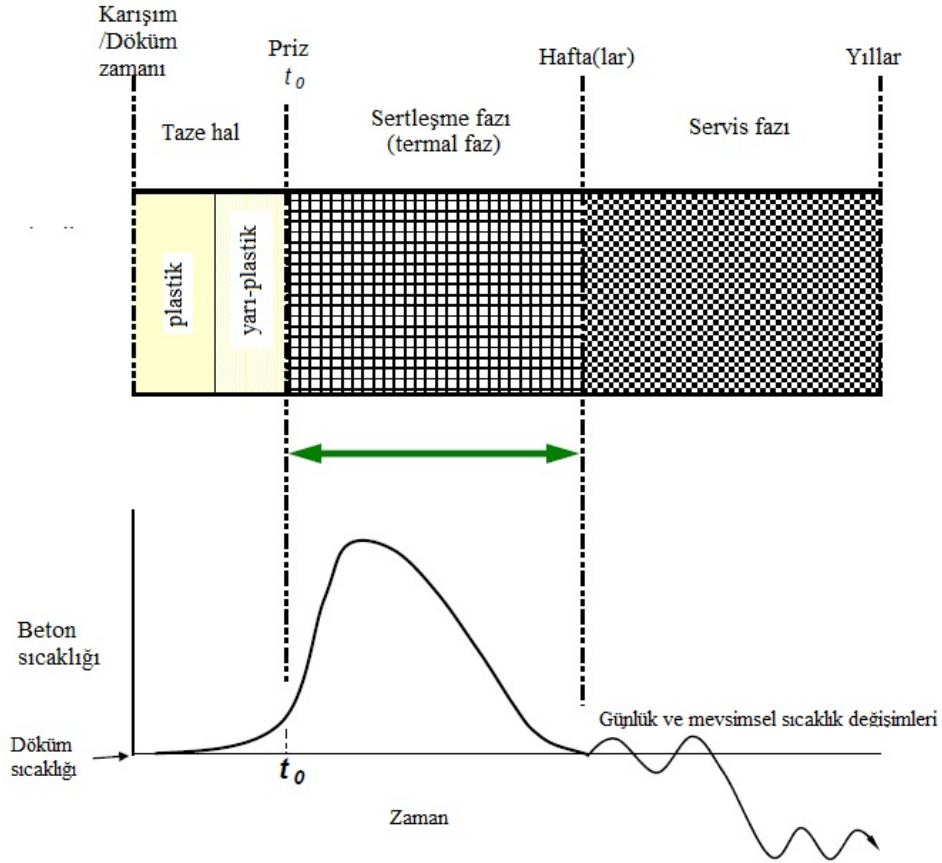
Ortam sıcaklığının çimento hamurundaki etkisi ve otojen rötre ile ilişkisi üzerine yapılan bir araştırmada; dış ortam sıcaklığının artışıyla çimento hidratasyonunun ivmelendiği ve buna bağlı olarak otojen rötre büyüklüğünün arttığı söylenmektedir. Ancak çimento tipine bağlı olarak istisnaların olabileceği belirtilmektedir [45–47].

Yüksek performanslı betonlarda lif kullanımı ve otojen rötre arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalarda ise lif kullanıldığında otojen rötre büyüklüklerinde düşüşler olduğu, lifsiz betona kıyasla otojen rötre gelişiminin daha erken sonlanarak sabit bir değere yakınsadığı belirtilmektedir [45,48].

2.3.1.3 Termal rötre

Termal rötre, beton sıcaklık değişimlerine maruz kaldığında meydana gelen hacim değişimi anlamına gelmektedir. Bu olay, sıklıkla beton sıcaklığının artışı sebebiyle oluşan termal genleşme şeklinde ifade edilmektedir. Betonda sıcaklık artışı, hacim artışına yani genleşmeye, soğuma ise hacim daralmasına sebep olmaktadır. Betonda sıcaklık değişimi, erken yaşlarda çimento hidratasyonu sebebiyle olmaktadır. Çimento hidratasyonu ile birlikte hidratasyonu aşırı geciktirecek ortam koşulları olmadığı sürece tipik olarak betonun ilk 12 saatinde bir ısı artışı oluşmaktadır. Beton hidratasyonu gerçekleşip soğumaya başladığında ise rötre başlamaktadır. Ancak termal genleşme olayının bir kısmında beton soğutulduğunda orijinal boyutlarına geri dönebilmektedir. Bu anlamda, termal genleşmenin bir kısmı elastik davranış göstermekte, olayın plastik davranış gösteren kısmında ise erken yaş rötre meydana gelmektedir.

Erken yaşlarda beton numunesindeki düzensiz sıcaklık değişimleri -çevresel faktörlerden ötürü dış yüzey ve iç bölge arasındaki farklı sıcaklıklar- termal deformasyonlara sebep olmaktadır. Gerilim yaratan bu durum özellikle geniş hacimli kütle betonlarında çatlak riskine sebep olmaktadır [29]. Beton ömrü boyunca termal deformasyonlara neden olan sıcaklık gelişimi şematik olarak Şekil 2.19'daki gibidir [23].



Şekil 2.19 : Betonun ömrü sürecince farklı fazları ve sıcaklık gelişimi [23].

Betonda erken yaşlardaki ısı artışının çimento hidratasyonu kaynaklı olduğunu, düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonlarda çimento hidratasyonunun aynı zamanda otojen rötreye de sebep olduğunu, dış ortam koşullarının da etkisiyle betondaki sıcaklık değişiminin de termal rötreye sebep olduğu bilinmektedir. Betonun ısı gelişimini etkileyen dış ortam koşulları da dikkate alındığında betonda hem içsel hidratasyon reaksiyonları sebebiyle meydana gelen otojen rötreye hem de termal rötrenin ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle sıcaklık değişimlerine maruz normal koşullar altındaki sertleşen bir betonda denklem 2.12'deki gibi termal ve otojen rötreye

eş güdümlü olarak deformasyon yaratmaktadır. Ancak adyabatik koşullarda (dış ortamla ısı alışverişinin olmadığı) yalnızca otojen rötre gözlenmektedir.

$$\varepsilon_{\text{top}} = \varepsilon_{\text{termal}} + \varepsilon_{\text{otojen}} \quad (2.12)$$

Denklemde, ε_{top} = toplam deformasyon, $\varepsilon_{\text{termal}}$ = termal deformasyon ve $\varepsilon_{\text{otojen}}$ = otojen deformasyon şeklinde gösterilmektedir.

Sertleşme fazında gelişen betonun termal deformasyonu denklem 2.13'deki gibi, betonun sıcaklık gelişimi ve termal (ısıl) genişleme katsayısı ile belirlenmektedir.

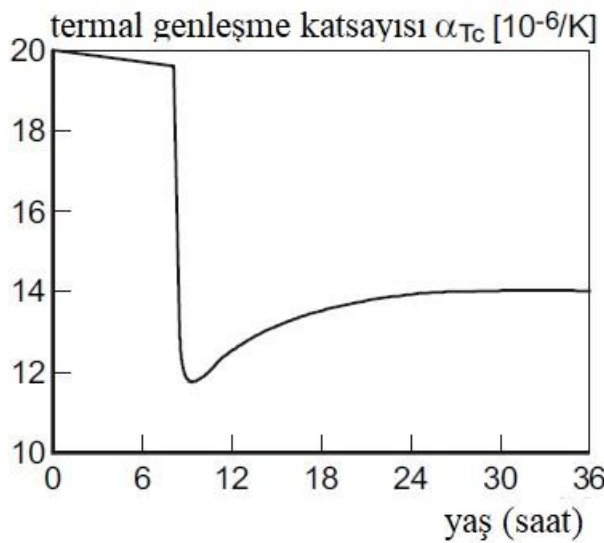
Termal genişleme katsayısı

Termal genişleme katsayısı (TGK), sıcaklık değişimleri nedeniyle betonun boyutlarının değişme oranını tanımlayan bir özelliğidir.

$$\varepsilon_T(t) = \Delta T \times \alpha_{T(t)} \quad (2.13)$$

ε_T = termal deformasyonu, ΔT = sıcaklık değişimini ve α_T = termal genişleme katsayısının t zamandaki değerlerini ifade etmektedir.

TGK değeri; agregat tipine, su/çimento oranına, betonun olgunluğuna ve nemli ortam koşullarına bağlıdır [29,49]. Nolting'in bir çalışmasına göre TGK'nın karakteristik davranışı Şekil 2.20'deki gibi, priz ardından hızlıca düşmekte ve beton yaşı ilerledikçe artarak bir değerde sabitlenmektedir. Daha yüksek bir TGK değeri, erken yaşlarda kendiliğinden kuruma sebebiyle düşük su/çimento oranına sahip betonlar için görülmektedir.



Şekil 2.20 : Termal genişleme katsayısının karakteristik davranışı [50].

Bazı mineral ve kaya türleri için ise TGK değeri değişmektedir. Genellikle kuvars yüksek TGK değerine sahipken kalsit düşük TGK değerine sahiptir. Agregalar arasındaki bu değişken TGK değerleri, yaklaşık %70'ini kapladığı betonun davranışını da etkilemektedir. Literatürde betonun TGK değeri için $5,6-13.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ değer aralığı kabul edilmektedir. Ayrıca çimento hamurunun sahip olduğu nem faktörü de termal genleşme katsayısını etkilemektedir. Yarı kuru çimento hamuru, (bağıl nem %60-80) suya doymuş olandan daha yüksek bir TGK değerine sahiptir [23].

2.3.2 Erken yaş rötreyi etkileyen faktörler

- **Bağlayıcı tipi, içeriği ve hidrasyon hızı**

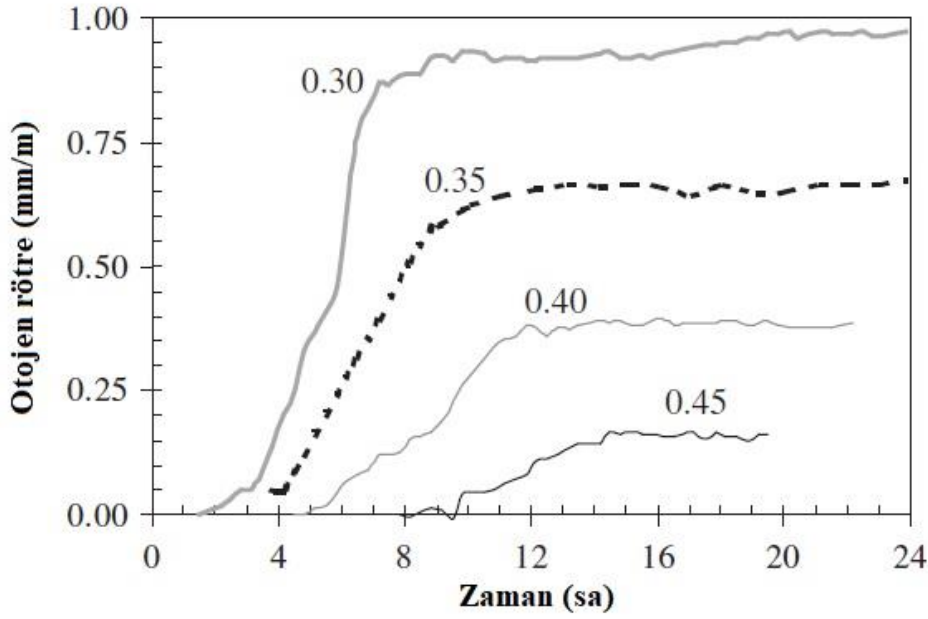
Hidrasyon hızı arttıkça otojen ve kuruma rötresi de artmaktadır. Bunun sebebi, hidrasyon hızı arttıkça su tüketiminin artması ve hidrasyon ürünlerinin hacminin azalması kaynaklıdır [36,51–54]. Yüksek erken dayanımlı çimentolarda, yüksek ve erken otojen rötre görülmektedir. Orta ve düşük ısıllı çimentolar daha küçük otojen rötre göstermektedir. Çimento inceliği $4000\text{ cm}^2/\text{g}$ ve daha yüksek olan yüksek fırın cürufllu çimentolar, uzun bir süre boyunca yüksek otojen rötre sergilerken inceliği $3000\text{ cm}^2/\text{g}$ olan cürufllu çimentolarda otojen rötre artmamaktadır [39].

- **Agrega içeriği**

Agregalar rötreye karşı kısıtlayıcı bir görev yapmaktadır. Betonda agrega varlığı çimento hacmini azaltacağından kimyasal rötreyi azaltmaktadır [29,52]. Bunun yanında yüksek su emme kapasitesine sahip hafif agregaların içsel bir kür kaynağı görevi yaparak otojen rötreyi azalttığı bulunmuştur [34–36].

- **Su/çimento oranı**

Beton içindeki serbest suyun ve gözenek sisteminin kontrolü, boşluk gerilmelerini etkilemesi sebebiyle erken yaş rötreye üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha düşük su/çimento oranına sahip betonlar, otojen rötre riskini artırmaktadır [49]. Şekil 2.21'de s/ç oranının otojen rötre üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 2.21 : Otojen rötrenin s/ç oranına göre değişimi [55].

- **Kimyasal katkı içeriği**

Betonda rötrenin azaltıcı katkı kullanılması, kılcal gözeneklerin yüzey gerilmesini azaltarak kapiler gerilmenin azalmasını sağlamaktadır. Bu katkıların hem otojen hem de kuruma rötresini azalttığı bulunmuştur [36,44,51,52]. Süperakışkanlaştırıcı (SA) katkıların karışıma eklenmesiyle daha yüksek erken yaş otojen rötresi gözlenmiştir [36,52]. Bunun yanında aşırı dozda SA kullanımının, prizi geciktirdiği ve daha yüksek erken yaş kuruma rötresi gösterdiği ortaya çıkmıştır [55]. Hava sürükleyici katkıların erken yaş rötrenin üzerindeki etkisine ilişkin genel trend, otojen rötrenin hızının artıp daha sonra azalması şeklinde olmaktadır. Ancak başka bir çalışmada hava sürükleyici katkıların önemli ölçüde otojen rötrede azalmaya yol açtığı görülmüştür [56].

- **Mineral katkı içeriği**

Silis dumanı, betonun gözenek yapısını doldurmasından dolayı otojen rötrenin artışında önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur [53]. Otojen rötrenin üzerindeki etkisi bakımından öğütülmüş yüksek fırın cürufu da benzer bir davranış göstermektedir [57]. Gleize ve arkadaşlarının bir çalışmasına göre metakaolin (MK) eklenmesiyle MK parçacıklarının yüzeyinde hidrasyon ürünlerinin heterojen çekirdekler oluşturmasının bir sonucu olarak otojen rötrenin arttığı gözlenmiştir [58]. Uçucu külün betonun otojen rötresini azalttığı bulunmuştur [59]. Ancak çok ince uçucu kül tanelerinin silis dumanına benzer bir etkisi olduğu belirlenmiştir [53].

- **Kür koşulları**

Erken yaş rtrede kr şekli, süresi ve sıcaklığı önemli bir etkiye sahiptir. Beton dökümünden sonraki ilk 5 ile 10 saat boyunca rötrenin artan kr sıcaklığı ile arttığı ve daha sonra sıcaklık artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek kr sıcaklığı, nem kaybındaki artış ile plastik rötrenin gelişimine de neden olabilmektedir [60]. Bunun yanı sıra kr süresi uzadıķa daha az rötre deformasyonuna sebep olmaktadır [53]. Diğer kr şekillerine kıyasla çuval bezi veya pamuklu hasırlarla nemli krlemenin su tutmayı artırıp erken yaş rötre yi azalttığı bulunmuştur [61].





3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölüm, yüksek performanslı betonların üretiminde kullanılan malzemelerin özelliklerini, taze beton özelliklerinin tespiti için uygulanan taze beton deneylerini, erken yaş ısı gelişimi ve rötrenin tayini için yapılan deneyleri içermektedir.

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Deneysel çalışmalarda, TS-EN 197-1 standardına uygun, CEM III/B (S) 32,5 N-SR, CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 N tipi olmak üzere üç farklı tip çimento kullanılmıştır. Karışım 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 için CEM III/B (S) 32,5 N-SR tipi, 7 ve 8 için sırasıyla CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 N tipi Portland çimentoları kullanılmıştır. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Beton karışımlarında kullanılan çimentoların fiziksel özellikleri.

Özellik	CEM III/B (S) 32,5 N-SR	CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,95	3,19	3,13
Priz başı (dk)	183	195	165
Priz sonu (dk)	-	230	220
Özgül yüzey (cm ² /g)	5509	3832	3593
0,045 mm elekten kalan (%)	1,0	3,7	3,7

Çizelge 3.2 : Beton karışımlarında kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri.

Kimyasal (%)	CEM III/B (S) 32,5 N-SR	CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N
SiO ₂	32,31	19,5	20,34
Al ₂ O ₃	9,49	4,34	4,67
Fe ₂ O ₃	1,95	5,12	3,41
CaO	50,34	63,84	64,18
MgO	2,36	1,36	2,34
SO ₃	1,68	2,95	2,53
Na ₂ O	0,44	0,22	0,12
K ₂ O	0,55	0,55	0,4
Kızdırma Kaybı	0,29	1,51	1,77
Çözünmeyen Kalıntı	0,79	0,52	0,35
Katkı miktarı	67,27	-	-
Cl ⁻	0,0136	0,0189	0,01

3.1.2 Karışım suyu

Beton üretiminde, kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı beton özelliklerini etkilemektedir. TS EN 1008 standardı, beton üretiminde kullanılabilecek suları sınıflandırmaktadır. Bunlardan biri de deneysel çalışmalarımızda kullanılan içilebilen sulardır. İçilebilen sular, beton yapımında uygun kabul edilebilmektedir. Bu tür sularda deney yapmaya gerek duyulmaz [62]. Ayrıca karışım suyu; betonda istenen kıvama ulaşılabilecek, çimento hidratasyonunu sağlayabilecek miktarda kullanılmalıdır.

3.1.3 Katkı maddeleri

Betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirerek performansını (dayanım, dayanıklılık vb.) artırabilmek ve daha ekonomik olmasını sağlamak amacıyla kullanılan, betonu oluşturan temel malzemelerin karılmasından hemen önce veya karılma sırasında karışıma eklenen malzemelere beton katkı maddeleri denir. Çimento ağırlığının %5'inden fazla olmamak üzere karışıma eklenen kimyasal malzemelere ise kimyasal katkılar denilmektedir [63]. Yalnız başına bağlayıcı olmayan, karışıma eklendiğinde çimentodaki serbest kireç ile reaksiyona giren uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardan elde edilmiş puzolanik maddelere ise mineral katkı denilmektedir.

3.1.3.1 Kimyasal katkılar

Bu çalışmada, kimyasal katkı olarak karışımlarda farklı dozajlarda hava sürükleyici ve yüksek miktarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Karışım 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 8'in dizaynları için Chryso Air G 100 marka hava sürükleyici katkı ve yüksek miktarda su azaltıcı katkı olarak ise Chryso Optima 100 marka süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Yalnız karışım 8'de hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Karışım 7 için Glenium Sky 506 M marka yüksek oranda su azaltıcı katkı ile Micro Air 200B marka hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Çizelge 3.3'te beton karışımlarında kullanılan katkıların teknik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 3.3 : Beton karışımlarında kullanılan katkıların teknik özellikleri.

	Chryso Air G100	Chryso Optima 100	Glenium Sky 506 M	Micro Air 200B
Malzeme içeriği	Amidler, sülfonik asitler, sodyum tuzları	Modifiye fosfonat esaslı	Polikarboksilik eter esaslı	Yağ alkolü ve amonyum tuzu esaslı
Renk	Açık sarı	Sarı	Opak	Açık kahverengi
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,005±0,005	1,06±0,02	1,074- 1.134	0,98-1,02
pH	7,00±1,00	4,00±1,00	5,00-7,00	9,00-11,00
Klor İçeriği % (EN 480-10)	≤0,1	<0,1	≤0,1	<0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	≤0,5	-	≤3	<10

3.1.3.2 Puzolanik katkılar

Bu çalışmada, 7 ve 8 nolu karışımlara puzolanik (mineral) katkı ilave edilmiştir. 7 nolu karışımda mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı, 8 nolu karışımda ise öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır.

3.1.4 Agregalar

Agregalar beton hacminin yaklaşık %65-70'ini oluşturmaktadır. Beton karışımlarında kullanılan agregalar; doğal kum, kırma kum, kumtaşı ve kireç taşı kökenli kırmataşları içermektedir. Beton üretiminde kullanılan agregalarda, özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Agregaların özgül ağırlık ve su emme deneyi TS EN 1097-6'e uygun olarak gerçekleştirilmiş olup Çizelge 3.4 ve 3.5'te agregalara ait özgül ağırlık değerleri ve su emme oranı verilmiştir. Agregaların elek analizi deneyleri TS EN 933-1 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımların elek analizi sonuçları Ek B'de verilmiştir.

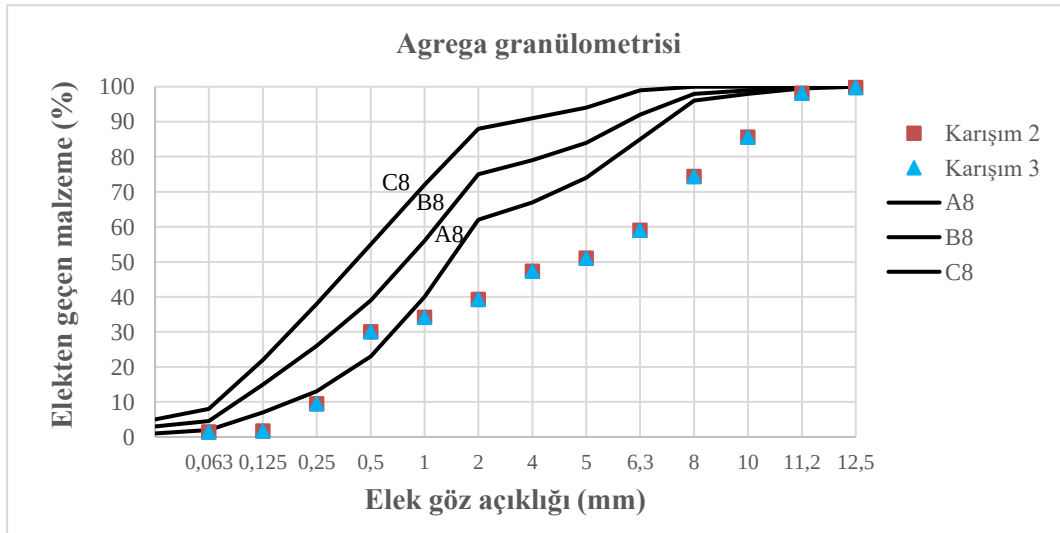
Çizelge 3.4 : Karışımlarda kullanılan agregaların özgül ağırlıkları (g/cm³).

Karışım	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^b	6 ^b	7 ^a	8 ^a
Dmaks (mm)	22	12,5	12,5	22	22	22	22	22
Doğal kum	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,60
Kırma kum	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,70
Kırmataş 1	2,72	2,72	2,72	2,72	2,73	2,73	2,72	2,71
Kırmataş 2	2,74	-	-	2,74	2,73	2,73	2,74	2,71
^a Kireçtaşı agregası	^b Kumtaşı agregası							

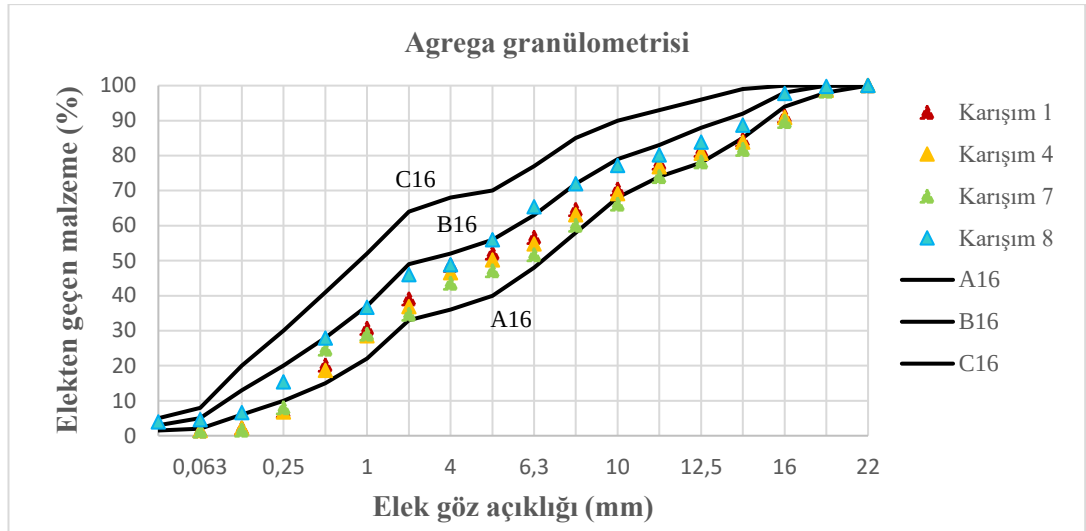
Çizelge 3.5 : Karışımlarda kullanılan agregaların su emme oranı (%).

Karışım	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^b	6 ^b	7 ^a	8 ^a
Dmaks (mm)	22	12,5	12,5	22	22	22	22	22
Doğal kum	1,06	1,04	1,04	1,06	1,06	1,06	1,04	1,03
Kırma kum	0,94	0,94	0,94	0,94	0,99	0,99	0,94	1,36
Kırmataş 1	0,48	0,48	0,48	0,48	0,56	0,56	0,48	0,45
Kırmataş 2	0,39	-	-	0,39	0,54	0,54	0,39	0,32
^a Kireçtaşı agregası	^b Kumtaşı agregası							

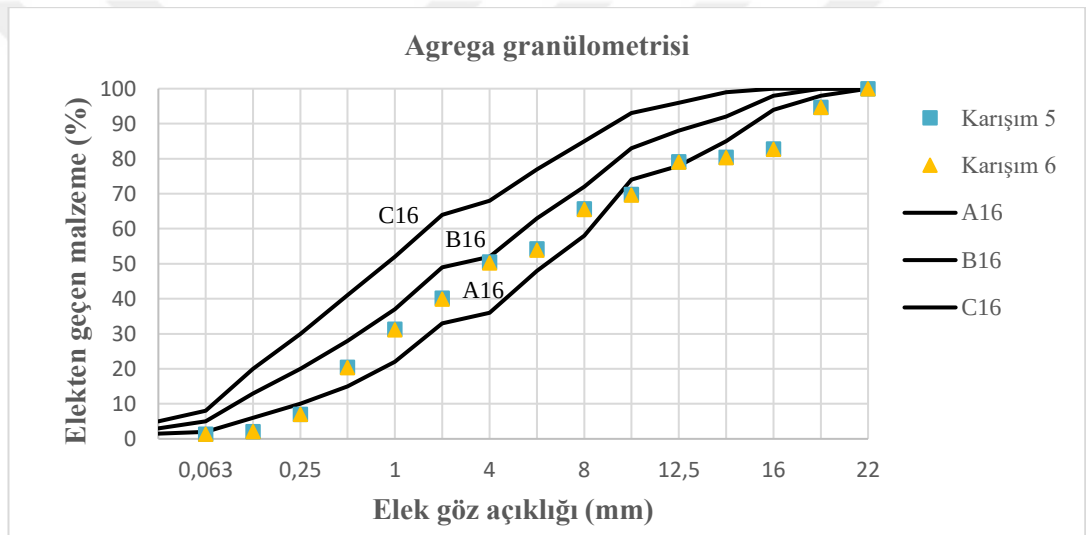
Karışımlarda maksimum agrega dane çapı (D_{maks}), yalnızca 2 ve 3 nolu karışımlarda 12,5 mm boyutlarındadır. Diğer karışımların maksimum agrega dane çapı ise 22 mm'dir. Agreganın kökeni bakımından yalnızca 5 ve 6 nolu karışımlar kumtaşı kökenli kırmataş agregası içermektedir. Diğer karışımlar ise kireçtaşı kökenli kırmataş agregası içermektedir. Karışımlarda kullanılan agregaların tane boyutu granülometrisi için elek analizi sonuçları, maksimum agrega dane çapı (D_{maks}) ve agreganın kökenine göre ayrılarak verilmiştir. Buna göre; kireçtaşı kökenli D_{maks} 'ı 12,5 mm agregalı karışımlar, kireçtaşı kökenli D_{maks} 'ı 22 mm agregalı karışımlar ve kumtaşı kökenli D_{maks} 'ı 22 mm agregalı karışımların agregalarına ait referans eğrileriyle birlikte çizilen granülometri eğrileri sırasıyla Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Tüm karışımların elek analizi sonuçları ise Ek B'de verilmiştir.



Şekil 3.1 : D_{maks} = 12,5 mm kireçtaşı kökenli agregalar.



Şekil 3.2 : $D_{maks}=22$ mm kireçtaşı kökenli agregalar.



Şekil 3.3 : $D_{maks}=22$ mm kumtaşı kökenli agregalar.

Yukarıda özgül ağırlık, su emme ve granülometri eğrileri yer alan agregaların karışımlarda bulunma yüzdeleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. İnce agregalar olarak doğal kum ve kırma kum kullanılırken kaba agregalar olarak da No 1 ve No 2 kırmataş kullanılmıştır.

Çizelge 3.6 : Agregalar karışım oranları (%).

Karışım	1	2	3	4	5	6	7	8
Doğal kum	28,3	27,1	27,1	25,3	30,4	30,2	21,2	25,4
Kırma kum	23,1	22,2	22,2	24	23,4	23,2	25,1	20,1
Kırmataş 1	26,3	50,7	50,7	27,3	24,8	25,1	27,4	29,2
Kırmataş 2	22,3	-	-	23,4	21,4	21,5	26,3	25,3

3.2 Beton Karışımları

Bu çalışmada; s/b oranı, çimento miktarı ve içeriği, maksimum agrega dane boyutu, katkı içeriği ve agrega kökeni bakımından benzer ve farklı özellikler barındıran toplam 8 adet karışım incelenmek üzere hazırlanmıştır. Üretilen karışımların 1 m³ beton için ağırlıkça miktarları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Buna göre; s/b oranı 1, 2, 4, 5, 6 ve 7 nolu karışımlarda 0.37 iken en düşük s/b oranına 0.32 ile 8 nolu karışım, ve en yüksek s/b oranına 0.40 ile 3 nolu karışım sahiptir. Maksimum agrega dane boyutu 2 ve 3 nolu karışımlarda 12,5 mm iken diğer karışımlarda 22 mm’dir. Karışımlarda agregalar doğal kum, kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2’den oluşmaktadır. Kırmataşlar kireçtaşı kökenli ve kum taşı kökenli olmak üzere farklı çeşitte kullanılmıştır. Karışım 5 ve 6, kum taşı kökenli kırmataş agregalarına sahip iken diğer karışımlarda kırmataş agregaları kireçtaşı kökenlidir. Çimento türü bakımından 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 nolu karışımlar CEM III/B 32,5 N-SR tipi Portland çimentosu ile üretilmesine rağmen 7 ve 8 nolu karışımlar sırasıyla CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 N tipi katkısız çimentolardan üretilmiştir. Çimento tipi diğer karışımlardan farklı olan 7 ve 8 nolu karışımlarda puzolanik katkıları ilave kullanılmıştır. Karışım 7’de uçucu kül ve silis dumanı, karışım 8’de ise yalnızca öğütülmüş yüksek fırın cürufu karışıma ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda (karışım 8 hariç) yüksek miktarda su azaltıcı ve hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Karışım 8’de hava sürükleyici katkı ilave edilmemiştir. Karışım 4 ve 6’nın HS (hava sürükleyici) ve YMSA (yüksek miktarda su azaltıcı) miktarları ise aynıdır.

3.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıralama

- İlk olarak malzemelerin (çimento, agrega ve varsa uçucu kül) kuru olarak karıştırılması,
- Karışım suyunun bir kısmının eklenmesi,
- Su ile karıştırılan (varsa) silis dumanının eklenmesi,
- Karışım suyunun bir kısmının eklenmesi,
- Hava sürükleyici katkının eklenmesi,
- YMSA katkının eklenmesi,
- Karışım suyunun kalanının eklenmesi,

- Betonun önceden yağlanmış kalıplara yerleştirilmesi ve vibrasyonu.

Üretilen betonlarda; taze beton deneyleri kapsamında çökme (slump) deneyi, yayılma tablası deneyi, birim ağırlık deneyi, hava içeriği deneyi ve priz süresi tayini deneyi uygulanmıştır. Taze beton deneyleri dışında uygulanan aktivasyon enerjisi ve termal genişleme katsayısı deneyleri ise sırasıyla taze haldeki 100 x 200 mm küp ve 100 x 100 x 400 mm boyutlu prizma numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yine taze haldeki beton, yarı adyabatik kalorimetrelere yerleştirilerek beton yüzeyinin ısı alıcılarıyla teması sağlanmış, bilgisayara bağlanan alıcılar vasıtasıyla numunelerin erken yaş ısı gelişimi izlenmiştir. Erken yaş rötire deneyi ise 70 x 130 mm boyutlarındaki silindir numunelerde gerçekleştirilmiştir.



Çizelge 3.7 : Beton karışım tasarımları.

	Malzeme türü	Birim	1.Karışım ¹	2.Karışım ¹	3.Karışım ¹	4.Karışım ¹	5.Karışım ²	6.Karışım ²	7.Karışım ¹	8.Karışım ¹
S/B			0,37	0,37	0,40	0,37	0,37	0,37	0,37	0,32
Dmax		mm	22	12,5	12,5	22	22	22	22	22
Su	Şehir şebeke suyu	kg/m ³	144	141	152	144	144	144	123	141
Çimento	CEM III/B (S) 32,5 N-SR	kg/m ³	390	380	380	390	390	390	-	-
	CEM I 42,5 N	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	285	-
	CEM I 52,5 N	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	146
Mineral katkı	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	294
	Uçucu kül	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	50	-
	Silis dumanı	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	12	-
Agrega	Doğal kum	kg/m ³	508	486	479	458	540	540	386	470
	Kırma kum	kg/m ³	414	398	392	434	415	415	456	373
	No 1	kg/m ³	472	910	897	493	440	450	498	542
	No 2	kg/m ³	401	-	-	423	380	385	479	469
Kimyasal katkı	Yüksek miktarda su azaltıcı	kg/m ³	6,6	6,1	6,6	6,2	7	6,2	3,5	5,2
	Hava sürükleyici	kg/m ³	0,55	0,35	0,35	0,6	0,6	0,6	0,3	-

¹Kireçtaşı agrega ²Kumtaşı agrega

3.4 Taze Beton Deneyleri

Betonun taze hal özelliklerini belirlemek amacıyla tüm karışımlarda taze beton deneyleri uygulanmıştır. Taze beton numunelerinde; çökme deneyi, yayılma deneyi, birim ağırlık, hava içeriği tayini ve priz deneyleri yapılmıştır. Her bir karışım için ortam sıcaklığı ve beton sıcaklığı ölçülmüştür.

3.4.1 Çökme (slump) deneyi

Çökme deneyi, taze betonun kıvamının tespiti amacıyla uygulanmaktadır. Taze beton numunelerinde uygulanan bu deney, TS EN 12350-2 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Taze beton; üst taban çapı 10 cm, alt taban çapı 20 cm, yüksekliği 30 cm olan kesik koni şeklindeki düz ve su emmeyen yüzeye oturtulan bir çökme hunisine üç eşit tabaka halinde doldurulur. Huni içine doldurulan her tabaka, çapı 16 mm ve uzunluğu 60 cm olan özel deney çubuğu ile 25 kez şişlenerek sıkıştırılır. Huni tamamen doldurulduğunda yüzeyi mala ile düzeltilir. Ardından huni sarsılmadan yavaşça çekilerek betonun kendi ağırlığıyla çökmesi sağlanır. Taze betonun huni içindeyken ölçülen başlangıç yüksekliği ve huni çekildikten sonraki yüksekliği arasındaki farkın mm cinsinden değeri ölçülür. Ölçülen değer, TS EN 206 standardına göre değerlendirilerek betonun kıvam sınıfı tespit edilmiştir. Çökme deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

3.4.2 Yayılma tablası deneyi

Taze haldeki betonun işlenebilirliğini değerlendirebilmek amacıyla uygulanan yayılma tablası deneyi, TS EN 12350-5 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Ölçüleri 700x700 mm olan düz bir yayılma tablası ve üzerine üst taban çapı 10 cm, alt taban çapı 20 cm, yüksekliği 30 cm olan kesik koni şeklindeki kalıp kullanılmıştır. Kalıp; düz, yatay ve sabit bir zemin üzerindeki yayılma tablasının üst parçasının merkezine yerleştirilir. Taze beton, kalıba iki eşit tabaka halinde doldurulurken her tabakada sıkıştırma çubuğu ile 10 defa hafifçe tokmaklanarak sıkıştırılır. Kalıptan taşan beton içi sıkıştırma çubuğu kullanılarak yüzeyi düzeltilir. Üst yüzeyi fazla betondan sıyrılmış olan kalıp, 30 saniye sonra düşey şekilde yukarı çekilir. Kalıp çekildikten sonra taze haldeki beton, 1 cm yükseklikten 15 defa düşürülür.

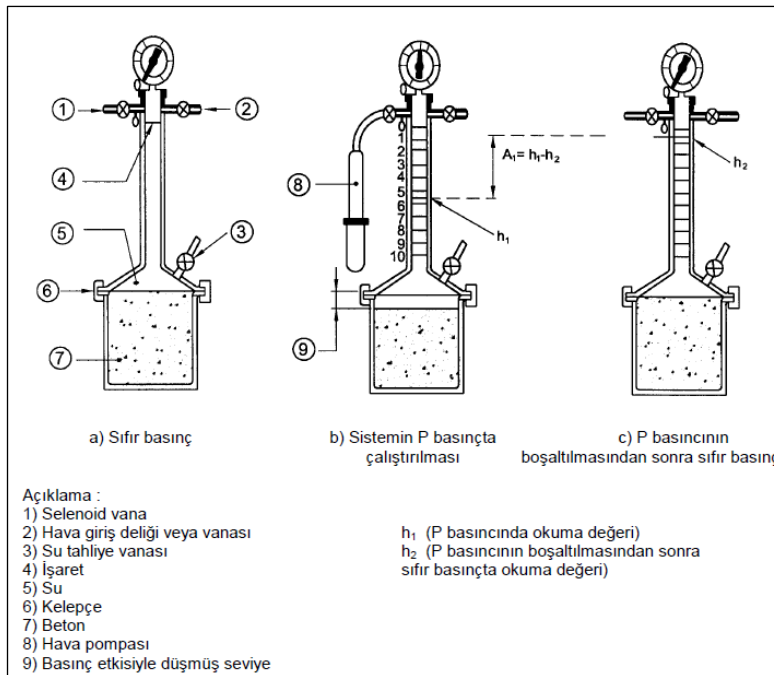
Yayılma tablasının üst plakasına yayılan beton tabakasının en büyük boyutları iki doğrultuda da ölçülür. Yayılma değeri, iki doğrultuda alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak bulunmaktadır. Yayılma tablası deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

3.4.3 Birim ağırlık deneyi

Taze betonun birim ağırlığı; hacmi ve kütlesi bilinen silindirik bir kabın içerisine sıkıştırılarak yerleştirilen betonun tartılmasıyla bulunur. Taze beton doldurulmuş kabın ağırlığından, boş kabın ağırlığı çıkarılarak betonun net ağırlığı tespit edilir. Bu ağırlık, numune hacmine bölündüğünde taze betonun birim hacim ağırlığı belirlenmiş olur. Birim ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

3.4.4 Hava içeriği deneyi

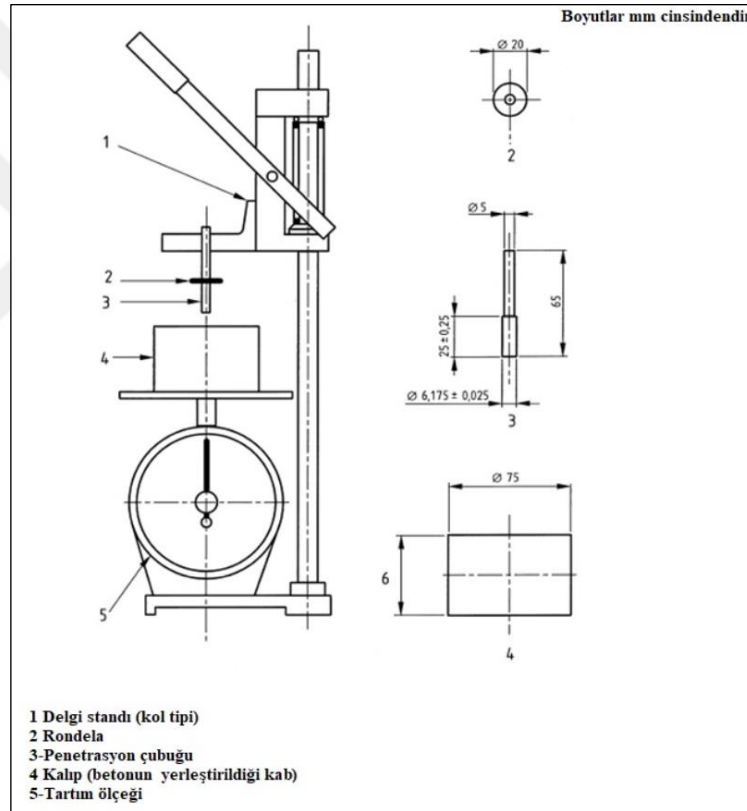
Hava içeriği tayini deneyi, TS EN 12350-7 standardında bulunan su sütunu metoduyla yapılmıştır. Beton, hava ölçer kabına içinde hapsolmuş hava kalmayacak şekilde eşit 3 tabaka halinde sıkıştırılarak doldurulur. Kaba su ilave edilir ve deney hava basıncı P, hava pompası yardımıyla uygulanır. Şekil 3.4’te verilen deney düzeneğinden anlaşılacağı üzere uygulanan basınçla betonun sıkışması sebebiyle hava hacminde meydana gelen azalma, gözlem borusundaki su seviyesindeki düşme miktarı gözlemlenerek ölçülmektedir. Hava içeriği deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Su sütunu metodu deney düzeneği [64].

3.4.5 Priz süresi tayini

Taze betonun priz süresinin tayini deneyi BS EN 13294 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.5’de verilmiştir. Taze beton numunesi, bir tartım terazisine yerleştirilmiş bir kabın içine koyulur. Bir penetrasyon çubuğu periyodik olarak belirli bir derinliğe kadar numuneye batırılır. Tartım ölçeğindeki kütle okumasından bir penetrasyon direnci hesaplanır. Çimentolu bileşenlerin hidrasyonundan dolayı numune sertleştikçe penetrasyon direnci artacaktır. Böylece taze betonun sertleşme (priz alma) süresi, penetrasyon direncinin zamana bağlı olarak kaydedilmesiyle belirlenebilmektedir. Priz süresinin tayini deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Priz süresi tayini deney düzeneği [65].

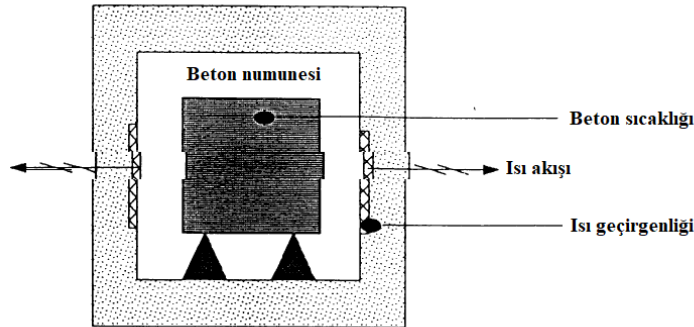
3.5 Kalorimetre Deneyleri

Sertleşmekte olan betonun hidrasyon ısısını belirlemek amacıyla yarı adyabatik kalorimetre deneyi uygulanmıştır. Taze haldeki beton numunelerinin, yalıtılmış yarı adyabatik kalorimetreye yerleştirilerek beton sıcaklığındaki değişim kayıt altına alınmıştır. Buna göre betonun hidrasyonu sırasındaki ısı gelişimi tespit edilebilmiştir.

3.5.1 Yarı Adyabatik Kalorimetre Deneyi

Sertleşmekte olan betonun hidrasyon ısısının belirlenmesi amacıyla NT BUILD 388'e göre üretilmiş yarı adyabatik kalorimetre kullanılmıştır. Taze haldeki beton numuneleri, içinde silindirik beton numunesi için boşluk bulunan ve boşluk etrafı yalıtımlı olan çelik bir varile yerleştirilmiştir. Bu kalorimetre, Şekil 3.6'da gösterilen betondaki sıcaklığı ölçen ve bir kalibrasyon faktörü aracılığıyla betondan ısı kaybının korele edildiği aygıtlarla donatılmıştır. Sabit 20 °C oda sıcaklığında kalorimetre kabına yerleştirilen beton numunesindeki sıcaklık artışları, numune sıcaklığı 20 °C'ye ulaşana kadar belirli aralıklarla alıcılar tarafından toplanmıştır.

Alıcılardan alınan veriler ise veri toplayıcılar aracılığıyla bir bilgisayara aktarılmıştır. Yarı adyabatik kalorimetre içinde betonun sertleşmesi sırasında yaratılan ısıнын bir kısmı beton sıcaklığını yükseltmek için kullanılırken diğer kısmı betonun çevresine yayılan ısı transferinden doğan ısı kaybında kullanılmıştır. Yaratılan ısı miktarı, betonda biriken ısı ve betonun çevresine yayarak kaybettiği ısı miktarının toplamıdır. Betondaki sıcaklık artışı, biriken ısıнын bir ölçüsü olarak kullanılırken yalıtılmış kabın duvarına yerleştirilmiş sıcaklık dönüştürücüsü ise ısı kaybı miktarını elde etmek için kullanılmaktadır [24].



Şekil 3.6 : Haybox kalorimetresi [24].

3.6 Diğer Deneyler

Çalışmada, betonun erken yaşlardaki otojen rötresinin incelenmesi amacıyla tüm taze haldeki beton karışımlarına erken yaş rötre deneyi uygulanmıştır. Elde edilen ham rötre okumaları üzerinde termal genleşme katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri kullanılarak erken yaşlarda betonun otojen rötresi hesaplanmıştır.

3.6.1 Termal Genleşme Katsayısı Deneyi

Betonun termal genleşme katsayısının tayini için yapılan bu deney, TI-B 101 metoduna uygun olarak yapılmıştır. Deney sonuçları çizelge 4.2'deki gibidir. Termal genleşme, 100 x 100 x 400 mm boyutlarındaki en az üç prizmatik beton numunesinde üç farklı sıcaklıkta ölçülmektedir. Numunenin öncelikle deney başlangıcında 20°C'de başlangıç uzunluğu ölçülmektedir. Deney esnasında 5°C-30°C aralığında sıcaklık değişimine maruz bırakılmaktadır. Deney başı, sonu ve ortasında tekrar 20°C'de ölçüm alınmaktadır. Sıcaklık değişiminin sebep olduğu ölçülen yeni uzunluk ile başlangıç uzunluğu kıyaslanmaktadır. Ölçülen termal genleşme katsayısı üzerinde ölçüm aygıtının sıcaklık hassasiyeti ve beton rötresine bağlı olarak düzeltme yapılmaktadır. Termal genleşme katsayısı denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \times \Delta T} \quad (3.1)$$

Denkleme göre; α , termal genleşme katsayısı, Δl , düzeltilmiş uzunluk değişimi, l_0 , başlangıç uzunluğu, ΔT , ölçüm uzunluklarındaki sıcaklık değişimi olarak ifade edilmektedir.

3.6.2 Erken Yaş Rötre Deneyi

Erken yaş rötre deneyi, TI-B 102 metoduna göre 70 x 130 mm boyutlarında silindir numunelerde uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Deney, üç farklı numunede LVDT (doğrusal şekil değiştirme ölçüm probu) yardımıyla veri kaydı alınarak yapılmıştır. Ardından bu veriler üzerinden betonun olgunluk yaşına bağlı olarak denklem 3.2'ye göre erken yaş rötre değerleri hesaplanmıştır. TI-B 102 standardına göre; $\varepsilon_s(t)$, t zamandaki rötre deformasyonunu, $\varepsilon_m(t)$, betonun otojen gerilmelerden oluşan deformasyonu, α_c , betonun termal genleşme katsayısını, $T_c(t)$, betonun t zamandaki sıcaklığını, $T_c(t_0)$, t_0 başlangıç zamanındaki sıcaklığı olarak ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_m(t) + \alpha_c(T_c(t) - T_c(t_0)) \quad (3.2)$$

Deneyde rötre, betonun sertleşmesi esnasında -çevre ile nem değişimi veya sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan deformasyonlar hariç- oluşan deformasyonları içermektedir. Bu nedenle deney numunesi ile ortam arasında nem değişimini engellemek için numune üzeri kaplanmıştır.

Sıcaklık değişiminin beton büzölmesindeki etkisini yok etmek için termal genleşme katsayısı bilinmelidir. Termal genleşme katsayısı ise TI-B 101 standardına göre belirlenmiştir.



Şekil 3.7 : Erken yaş rötre deney düzeneği.

3.6.3 Aktivasyon Enerjisi Deneyi

Betonun görünen aktivasyon enerjisi TI-B 103 metoduna uygun olarak 100 x 200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar çizelge 4.2'deki gibidir. TI-B 103 metodu, betonun sıcaklığa bağlı gelişiminin anlaşılmasında betonun eşdeğer yaşında (olgunluk) aktivasyon enerjisinin hesaplanması için belirlenen prosedürleri içermektedir. Belirli zaman aralıklarında seçilen sıcaklıklarda üç adet numunenin priz zamanları ve kürlleme işleminde reaksiyon oranları ölçülmektedir. Aktivasyon enerjisi, denklem 3.3'e göre hesaplanmaktadır.

$$E_a = - \frac{\ln \frac{\tau_{ref}}{\tau_c}}{\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)} \times R \quad (3.3)$$

E_a , aktivasyon enerjisi, R , evrensel gaz sabitini, T_{ref} , referans sıcaklığını, T_c , belirli bir sıcaklık değerini, τ_c , belirli bir sıcaklıktaki reaksiyon oranını ve τ_{ref} , referans reaksiyon oranını temsil etmektedir.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada beton karışımlarına uygulanan deneylerin sonuçları ve bu sonuçlara ilişkin değerlendirmeler ve tartışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

4.1 Taze Beton Deneylerinin Sonuçları

Beton karışımları üzerinde uygulanan taze beton deneylerinin sonuçları Çizelge 4.1'deki gibidir.

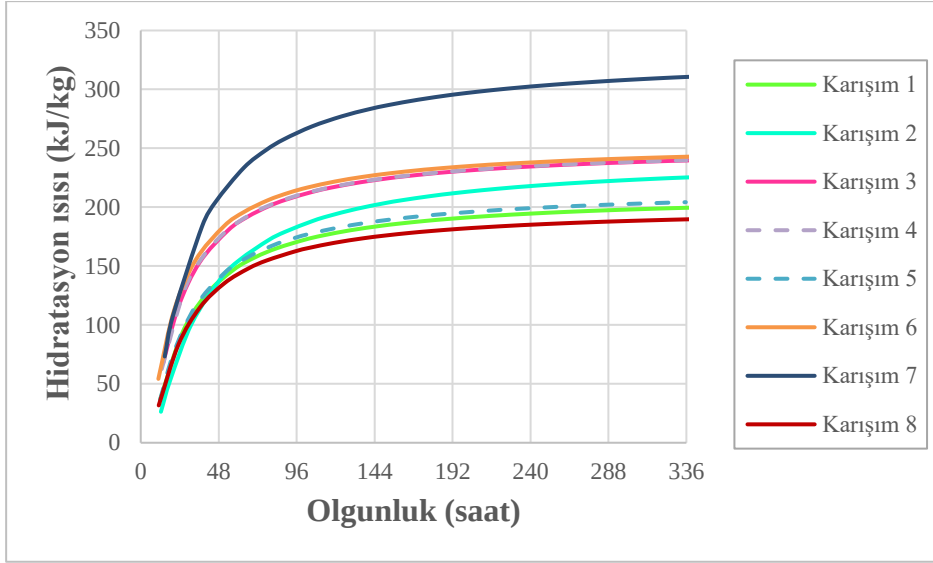
Çizelge 4.1 : Taze beton deneylerinin sonuçları

Karışım No	Kıvam sınıfı	Çökme (cm)	Yayılma Tablası Bitiş (cm)	Hava İçeriği (%)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Beton Sıcaklığı (°C)	Priz Zamanı (20°C'de) başl/bitiş (dk)
1	S5	22	54	4,8	2379	16,7	21,2	345 450
2	S5	24	39	3	2459	21	25	405 480
3	S4	20	47	5	2418	14,5	19,7	300 390
4	S4	19	48	4	2421	19,2	25,1	270 375
5	S4	18	50	5,4	2331	19	24,8	360 465
6	S4	18	41	4,6	2394	9,7	16,5	300 390
7	S4	21	-	-	2430	20,4	22,2	375 495
8	S5	23	50	1,3	2513	13,2	11	240 330

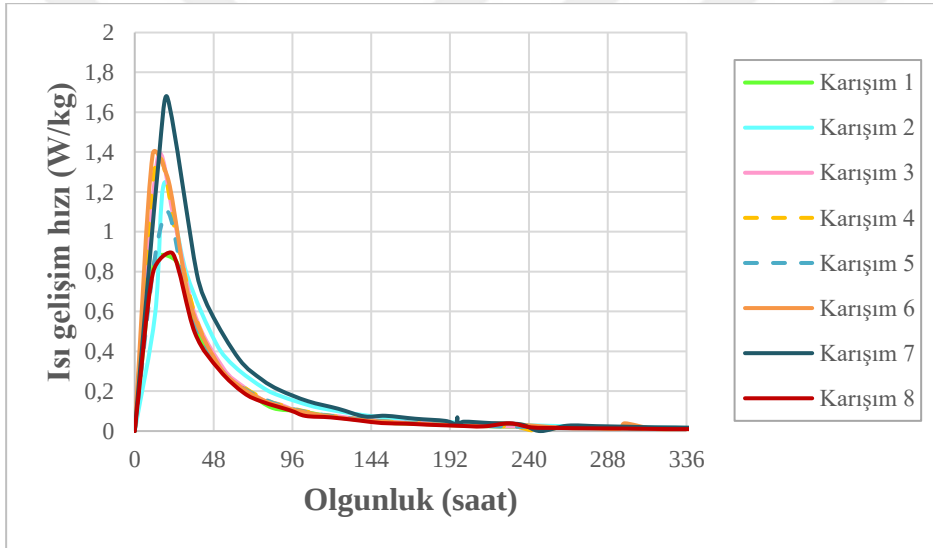
4.2 Kalorimetre Deneylerinin Sonuçları

Çalışmada sertleşmekte olan beton numuneleri üzerinde yarı adyabatik kalorimetre deneyi uygulanmıştır. Deneyde, adyabatik koşullar altında toplam sekiz karışımın 14 günlük sıcaklık ölçümü sonuçlarından hidrasyon sırasındaki ısı gelişimi hesaplanarak $f(x)=a \cdot e^{\left(\frac{b}{x}\right)^c}$ hidrasyon modeline göre üç parametre yöntemiyle optimize edilmiştir.

Deney karışımlarına ait beton eşdeğer yaşına (olgunluk) göre ısı gelişimi ve ısı gelişim hızı sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Sertleşmekte olan betonun 14 günlük ısı gelişimi.



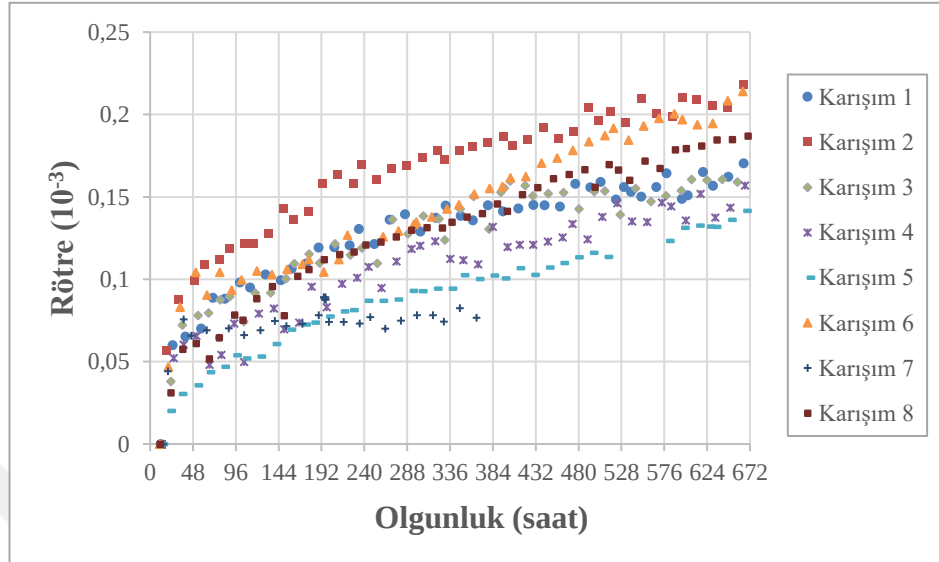
Şekil 4.2 : Sertleşmekte olan betonun 14 günlük ısı gelişim hızı.

4.3 Diğer Deneylerin Sonuçları

Çizelge 4.2 : Termal genleşme katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri.

Karışım No	Termal genleşme katsayısı (1/°C)	Aktivasyon Enerjisi (J/mol)
1	7,57E-06	27545
2	6,15E-06	31274
3	7,21E-06	25729
4	6,19E-06	24031
5	9,80E-06	31507
6	9,57E-06	26208
7	7,79E-06	33227
8	7,26E-06	28088

Sertleşmekte olan beton üzerinde uygulanan otojen rötre deneyi ile uzama-kısalmalar ölçülerek betonun otojen rötresi hesaplanmıştır. Buna göre 28 günlük otojen rötre sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir.

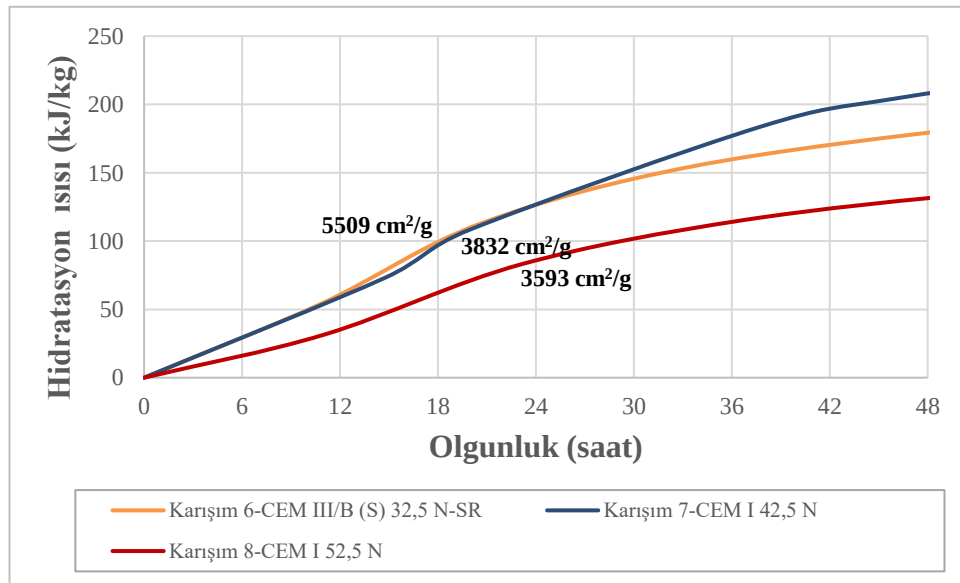


Şekil 4.3 : 28 günlük otojen rötre.

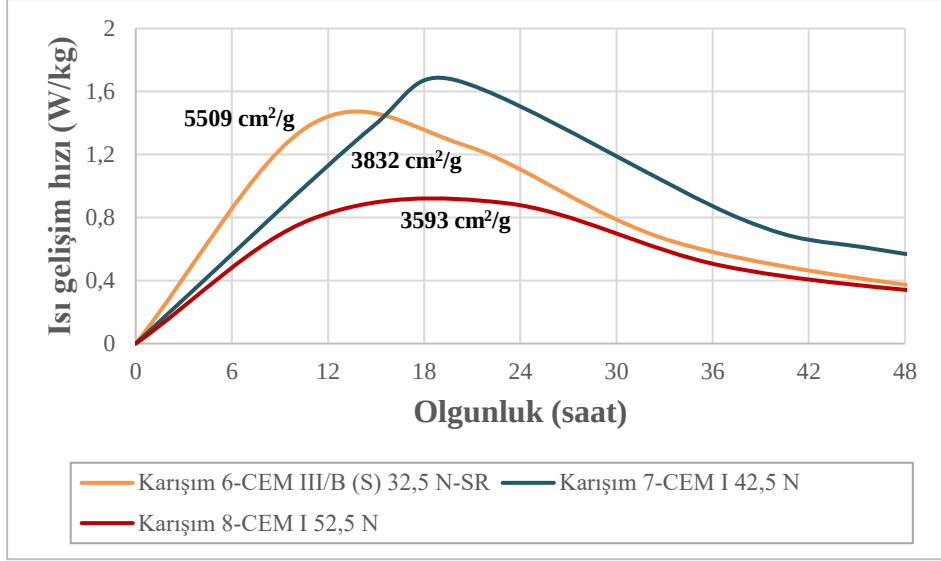
4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.4.1 Erken yaşlarda ısı gelişimine bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi

Deneylerde kullanılan farklı tip ve incelikteki çimentolu betonların ısı gelişimi Şekil 4.4 ve 4.5’te incelenmiştir.



Şekil 4.4 : Farklı tip ve incelikteki çimentolu betonların hidrasyon ısıları.



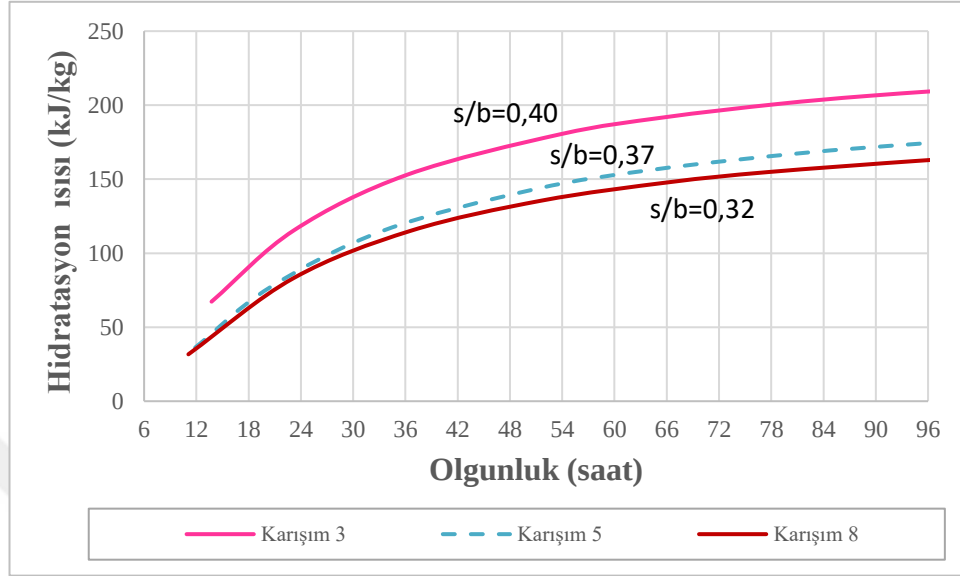
Şekil 4.5 : Farklı tip ve incelikteki çimentolu betonların ısı gelişim hızı.

CEM III/B (S) 32,5 N-SR, CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 N tip çimentoların sırasıyla incelikleri 5509, 3832, 3593 cm^2/g 'dır.

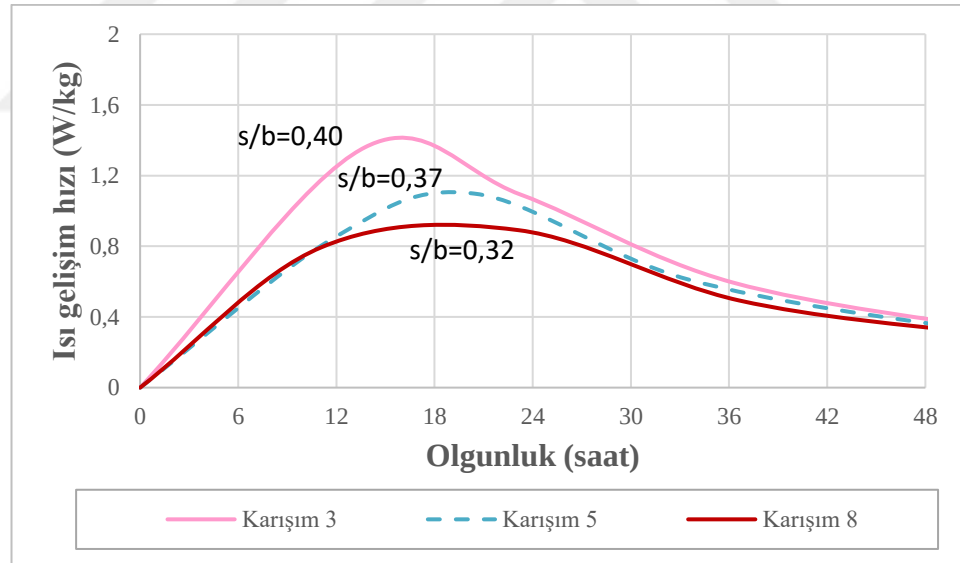
Sonuçlar incelendiğinde sülfata dayanıklı yüksek erken dayanımlı CEM III/B (S) 32,5 N-SR çimentolu beton, diğer karışımlara göre daha erken ısı gelişimine başlayarak zirve noktasına çabuk ulaşmıştır. CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 N çimentolu betonlar ise incelikleri azaldıkça ısı gelişim hızları da yavaşlamıştır. Çimento inceliğinin yüksek olması, su ile temasa geçecek daha fazla yüzey alanı olması anlamına geldiğinden ince çimentolar daha yüksek oranda hidrasyon reaksiyonu göstermektedir. Dolayısıyla CEM III/B çimentonun CEM I çimentoya nazaran ilk saatlerde ısı gelişiminin daha yüksek oranda olduğu söylenebilir [12]. İncelik etkisinin yanında şekil 4.5'de açıkça görülen davranışta CEM I çimentolu betonlarda pozolanik katkıların ilave edilmiş olmasının da etkisi olduğu söylenebilir. Karışım 7'ye uçucu kül ve silis dumanı, karışım 8'e ise yüksek fırın cürufu ilave edilmiştir. Karışım 7'de içeriğinde bulunan silis dumanının hızlandırıcı etkisinden söz edilebilir. Hidratasyon ısı, hızlı hidrate olan karışımlarda priz aldıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. İlk saatlerde karışım 6'da ısı, karışım 7'ye göre nispeten yüksek iken belirli bir saatten sonra ısı gelişim hızının azalması ve hidrasyon ısının düşüşü, CEM I çimentolu olan karışım 7'den daha erken prizini aldığını göstermektedir. Cüruf etkisinin ise karışım 8'de görüldüğü üzere hidrasyon ısını düşürmede daha etkili olduğu görülmektedir.

4.4.2 Erken yaşlarda ısı gelişimine s/b oranının etkisi

Deneylerde kullanılan s/b oranları farklı betonların ısı gelişimi Şekil 4.6 ve 4.7’de incelenmiştir.



Şekil 4.6 : Farklı s/b oranlarına sahip betonların hidratasyon ısısı.



Şekil 4.7 : Farklı s/b oranlarına sahip betonların ısı gelişim hızı.

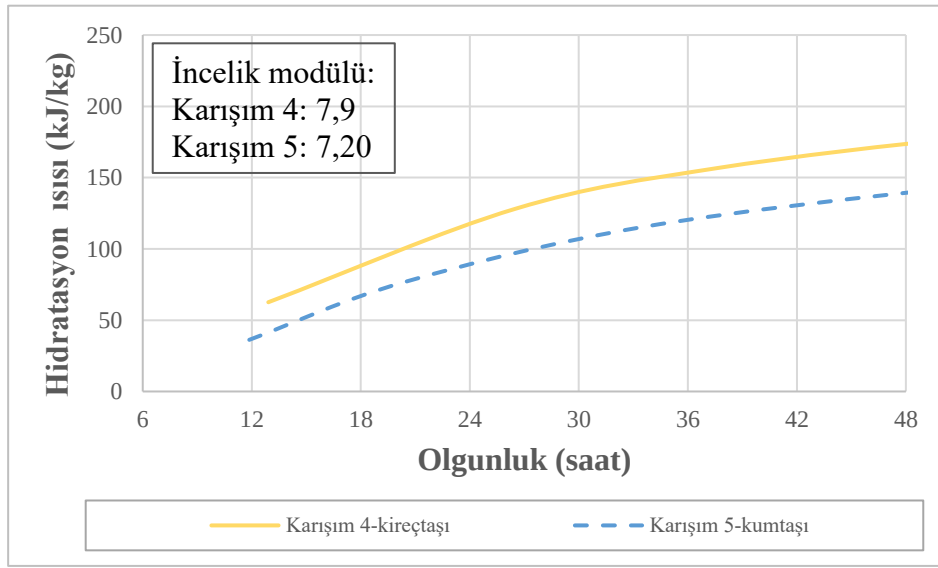
Isı gelişimleri incelenen karışım 3,5 ve 8’in s/b oranları sırasıyla 0.40, 0.37 ve 0.32’dir. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi s/b oranı arttıkça hidratasyon ısısı artmaktadır. Bununla doğru orantılı olarak s/b oranı arttıkça ısı gelişim hızının yani hidratasyon hızının daha da arttığı görülmektedir.

Düşük su/çimento oranına sahip betonlarda, kılcal boşluklar daha küçük boyuttadır. Anhidr çimentonun C-S-H jelinin oluşması ile meydana gelen genleşme, boşluklara

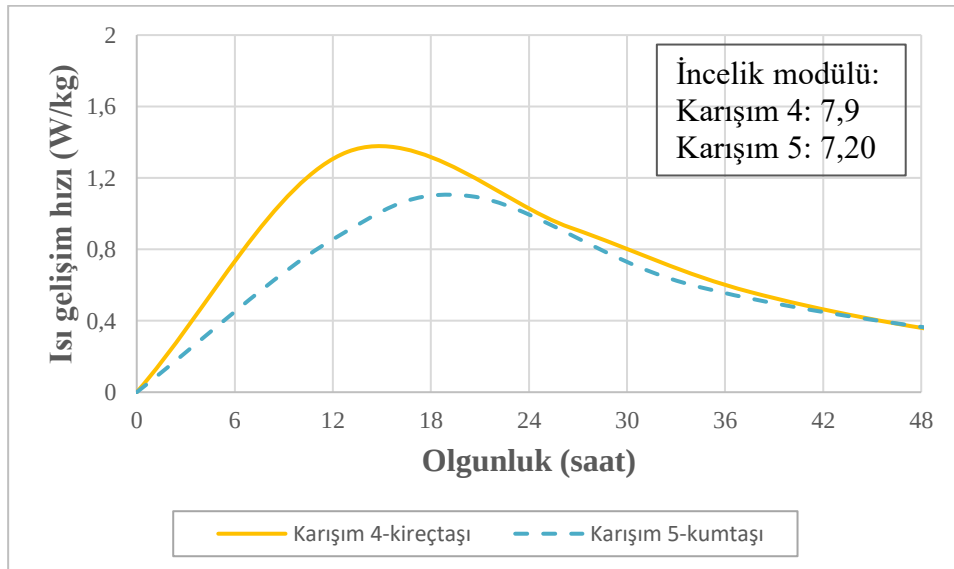
hapsolan su ile engellendiği için gecikebilmektedir. Yaşın ilerlemesi ve aynı yaşa sahip numunelerde su/çimento oranının artmasıyla hidrasyon derecelerinin görünür bir artış sergilediği görülmüştür [66]. İlâveten CEM I çimentoya sahip olan karışım 8'in hidrasyon ısısının ve ısı gelişim hızının düşük olduğu gözlenmektedir.

4.4.3 Erken yaşlarda ısı gelişimine agreganın (Dmaks, tür, su emme) etkisi

Deneylerde kullanılan agregâ türü farklı olan benzer özellikteki betonların ısı gelişimi Şekil 4.8 ve 4.9'da incelenmiştir.



Şekil 4.8 : Farklı tür agregalı benzer özellikteki betonların hidrasyon ısısı.



Şekil 4.9 : Farklı tür agregalı benzer özellikteki betonların ısı gelişim hızı.

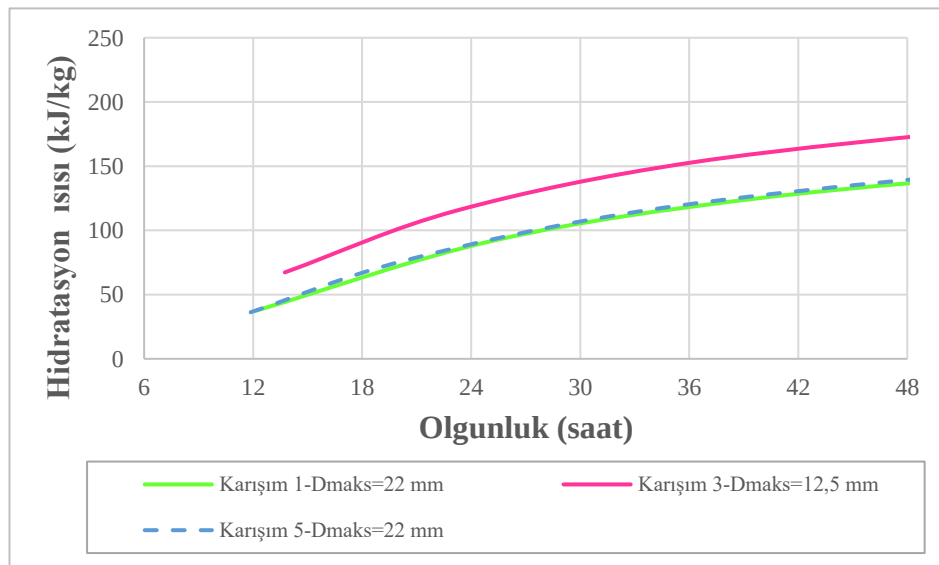
Karışım 4 ve 5'in s/b oranı, Dmaks, su ve çimento miktarı aynı, yüksek miktarda su azaltıcı katkı ve hava sürükleyici katkı miktarı yakındır.

Ancak ısı gelişiminde farklılıklar görülmüştür. Karışım 4, kireçtaşı agregası içerirken karışım 5’de ise kumtaşı agregası kullanılmıştır. Şekil 4.8 ve 4.9’da görüldüğü üzere kumtaşı agregalı betonun hidrasyon ısı, kireçtaşı agregalı betonunkinden düşük kalmıştır. Bunun sebebi Çizelge 4.3’teki agregası su emme oranları da incelendiğinde kumtaşı agregasının su emme oranının kireçtaşından bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun ise hidrasyon ısını düşürmede ve hidrasyonun daha yavaş olmasını sağlamada etkili olduğu söylenebilir. Bunun yanında elek analizi sonuçlarına göre kumtaşı agregalı karışım 5’in incelik modülünün karışım 4’ten daha fazla olduğu da bilinmektedir. Agregası inceliğinin artması su emme oranını da artırmaktadır. Buna ilişkin elek analizi sonuçları ve (k) incelik modülü Ek B’de verilmiştir.

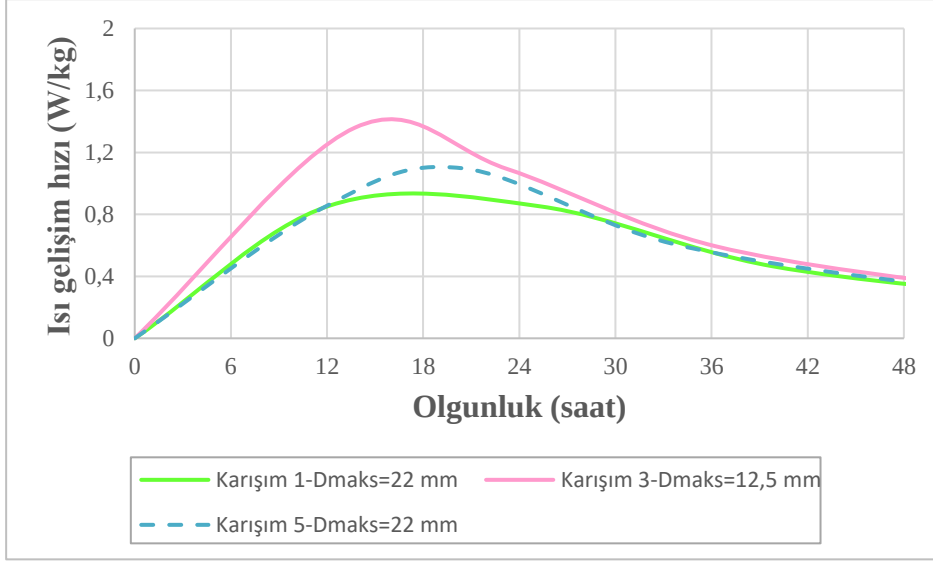
Çizelge 4.3 : Karışım 4 ve 5’in agregası su emme oranları.

Karışım	4	5
Doğal kum	1,06	1,06
Kırma kum	0,94	0,99
Kırmataş 1	0,48	0,56
Kırmataş 2	0,39	0,54

Agregaların büyük miktarda su emmesi ile suyun çimento hamurundan uzaklaşması, düşük s/ç oranına sahip YPB’lerde çimento hidrasyon derecesini azaltabilmektedir [20]. Şekil 4.10 ve 4.11’de çimentosu aynı karışımların Dmaks’ları bakımından kıyası incelenmiştir. Burada 3 nolu karışımın Dmaks’ı 12,5 mm iken 1 ve 5 nolu karışımların Dmaks’ı 22 mm’dir.



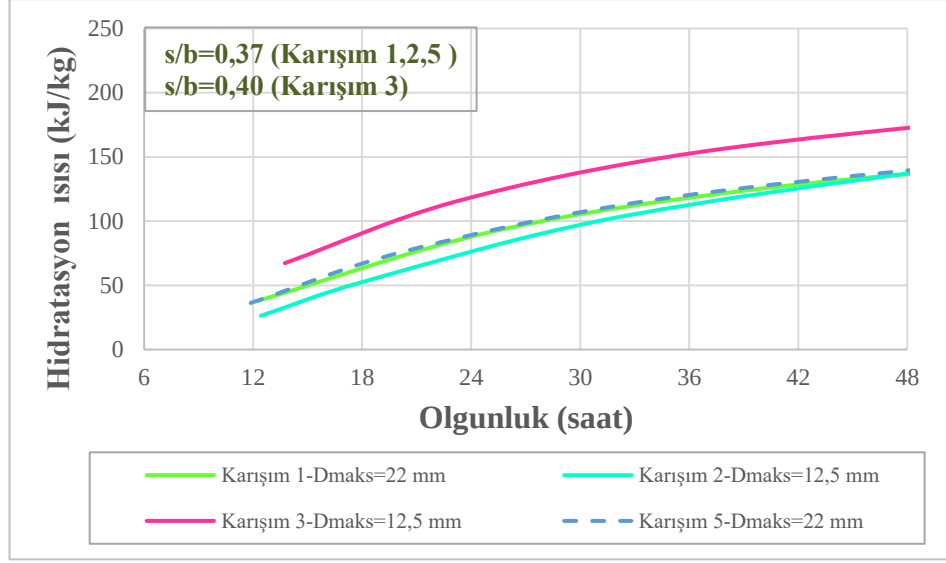
Şekil 4.10 : Farklı Dmaks’lı, aynı çimentoya sahip karışımların hidrasyon ısı.



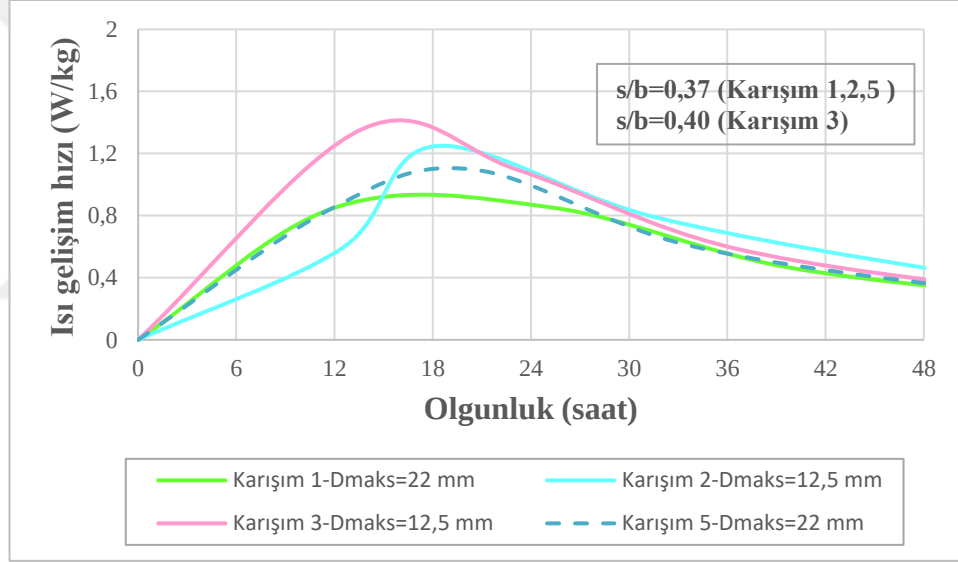
Şekil 4.11 : Farklı Dmaks'lı, aynı çimentoya sahip karışımların ısı gelişim hızı.

Grafikler incelendiğinde Dmaks'ı küçük olan karışımın daha yüksek hidrasyon ısıyı oluşturduğu ve hidrasyonunun daha hızlı olduğu görülmektedir. Literatürde de bu durum ile ilgili; “belirli bir su/çimento oranı için maksimum iri agrega boyutunun artması gerekli çimento miktarını azaltacaktır”denilmektedir [22]. Çimento miktarının azalması daha az su ihtiyacı ile birlikte daha az hidrasyon reaksiyonu dolayısıyla ısı oluşumun daha az olması anlamına gelmektedir. İncelenen karışımların literatürle doğru orantılı olduğu görülmüştür. Deney karışımlarında genel olarak s/b oranının arttıkça hidrasyon ısısının arttığının gözlemlendiği de dikkate alınarak karışım 3'ün hidrasyon gelişiminin yüksek olmasının sebebinin Dmaks dışında s/b oranının (0,40) diğerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı da söylenebilir.

Ancak Şekil 4.12 ve 4.13'de karışım 1,2,3 ve 5'i birlikte incelediğimizde; Dmaks'ı 3 nolu karışım gibi 12,5 mm olan karışım 2'nin ise Dmaks'ı 22 mm olanlara yakın veya daha düşük ısı gelişimi gösterdiği görülmektedir. Bu durumda karışım 2'nin Dmaks'ı 22 mm olan karışımlara nazaran ince malzeme miktarının daha yüksek olmasını da gözönünde bulundurmak yerinde olacaktır.



Şekil 4.12 : Farklı Dmaks'lı, farklı s/b ve aynı çimentoya sahip karışımların hidratasyon ısıları.



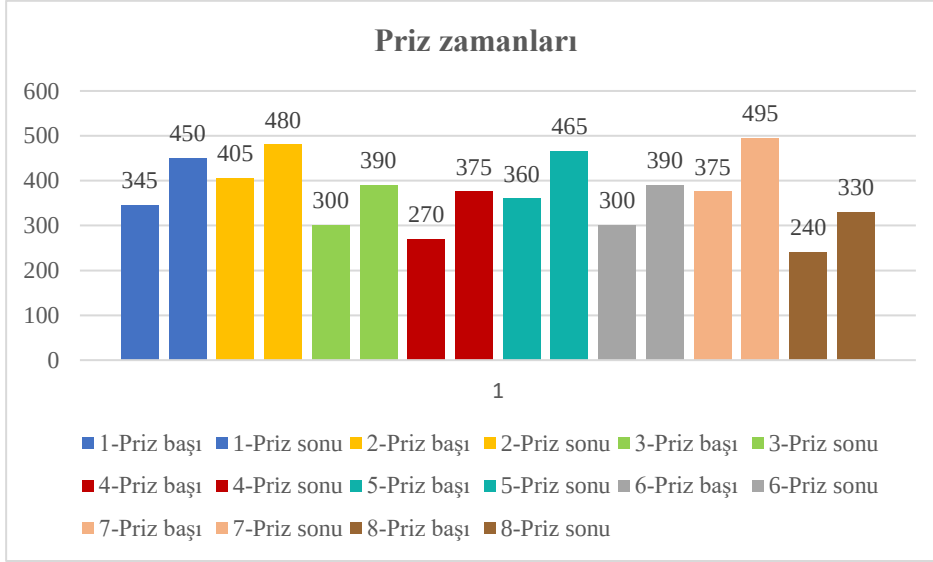
Şekil 4.13 : Farklı Dmaks'lı, farklı s/b ve aynı çimentoya sahip karışımların ısı gelişim hızı.

4.4.4 Erken yaşlarda ısı gelişimine taze beton özelliklerinin etkisi

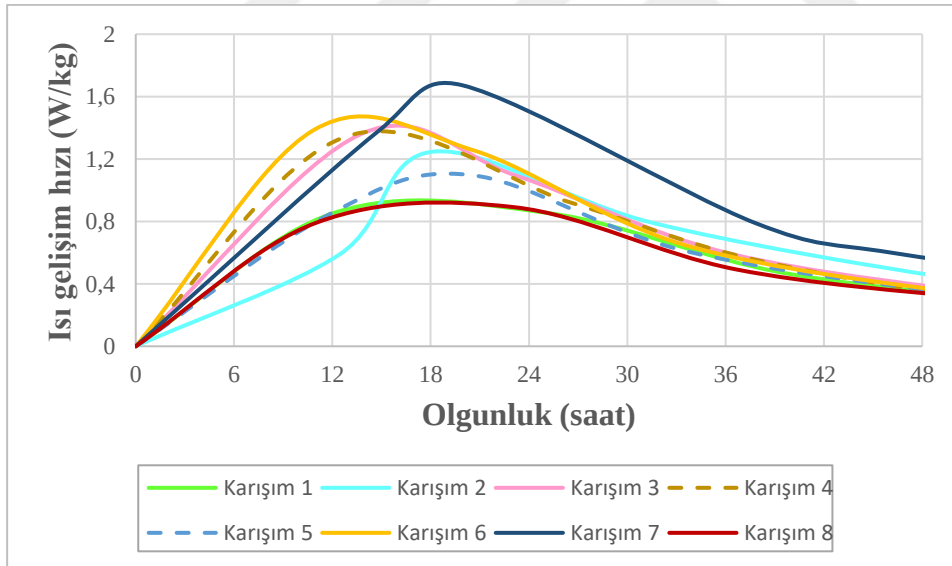
4.4.4.1 Priz süresi

Şekil 4.14'de karışımların priz başlangıç ve priz bitiş süreleri verilmiştir. Buna göre, prize en erken başlayan karışım 8 iken en geç prize başlayan ise karışım 2'dir. Prize başlangıç süreleri kıyaslandığında karışımlar arasında $8 < 4 < 6 = 3 < 1 < 5 < 7 < 2$ şeklinde bir sıralama yapılabilir. Priz bitiş süreleri dikkate alındığında karışımlar arasında $8 < 4 < 6 = 3 < 1 < 5 < 2 < 7$ bir sıralama mevcuttur. Prize başlangıç süresi ile bitimleri doğru orantılı gitmektedir.

Karışım 7'nin hidratasyonu, nispeten bazı CEM III/B çimentolu karışımlardan hızlı başlamıştır. İçeriğindeki silis dumanının ilk hidratasyon evresinde hidratasyonunu oldukça hızlandırmasından kaynaklandığı düşünülebilir.



Şekil 4.14 : Karışımların priz başlangıç ve bitiş zamanları.



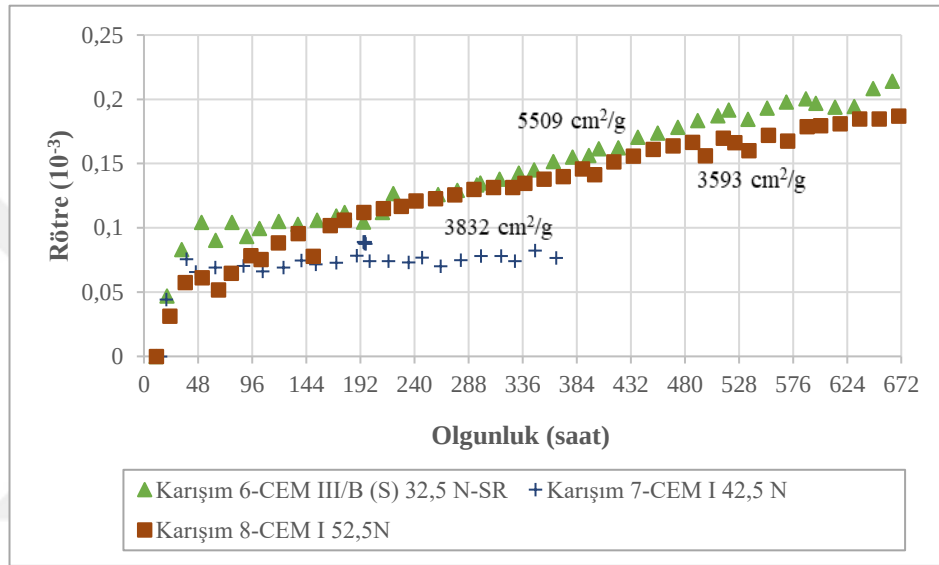
Şekil 4.15 : Erken yaşlarda karışımların ısı gelişim hızları.

Şekil 4.15'deki karışımların erken yaşlarda ısı gelişim hızları incelendiğinde; karışımların her birinin içerdiği özelliklerin farklı olduğunu düşünerek yorumlamak gerekmektedir. Benzer karışımlarda bile ufak davranış farklılıkları gözlenmiştir. Genel olarak CEM III/B çimentoya sahip karışım 1,2,3,4,5 ve 6'nın pozolanik katkıli betonlardan daha hızlı hidratasyon davranışı gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.15'te uçucu kül ve silis dumanlı CEM I çimentoya sahip olan karışım 7'nin hidrasyon pik noktasına daha geç ulaşmasıyla hidrasyonunun daha yavaş olduğu görülmüştür. Şekil 4.14'te de prizini en geç tamamlayan karışım olduğu görülmektedir.

4.4.5 Otojen rötreye bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi

Şekil 4.16'da otojen rötrenin bağlayıcı tipi ve inceliği farklı olan numunelerdeki sonuçları verilmiştir.

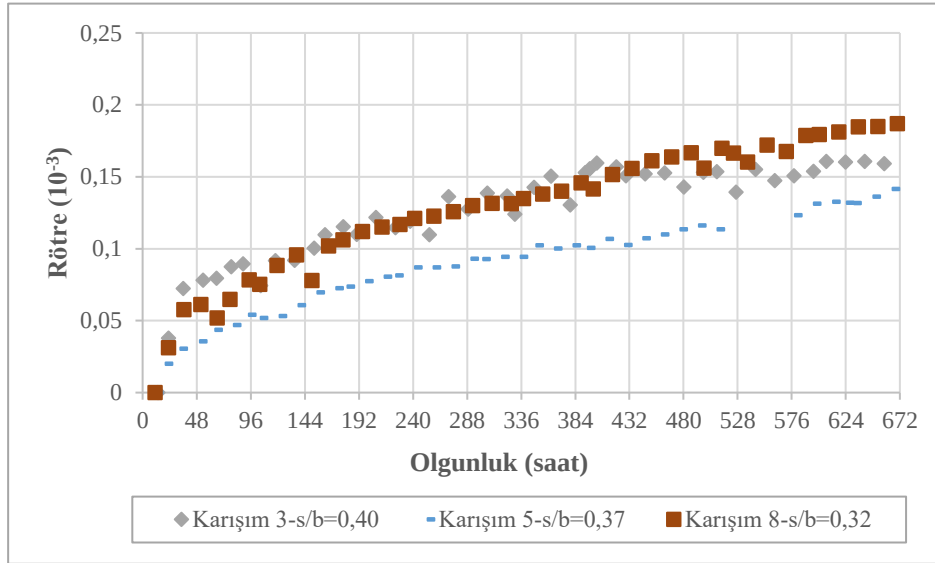


Şekil 4.16 : Otojen rötreye bağlayıcı tipi ve inceliğinin etkisi.

Karışım 6,7 ve 8 sırasıyla CEM III/B (S) 32,5 N-SR, CEM I 42,5N ve CEM I 52,5 N tip çimentoları içermektedir. Karışım 6,7 ve 8'in çimento incelikleri de sırasıyla 5509, 3832 ve 3593 cm²/g'dir. CEM III/B (S) 32,5 N-SR tip çimento, inceliği yüksek, hızlı ve erken dayanım kazanan bünyesinde yüksek fırın cürufunu barındıran bir tür çimentodur. Bu tür çimentoya sahip betonların otojen rötresinin CEM I çimentolara nazaran daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Karışım 8 ise CEM I katkısız çimento içerir ancak yüksek fırın cürufu beton karışımına ilave edilmiştir. Yine CEM I katkısız çimentoya sahip Karışım 7'de ise uçucu kül ve silis dumanı ilavesi yapılmıştır. Şekil 4.16'da cürufu numunelerin daha yüksek rötreye davranışı sergilediği görülmektedir. Özellikle karışım 8'in hidrasyon ısısı düşük olmasına rağmen otojen rötresinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda cüruf inceliğinin yüksek olmasının, s/b oranının ve bağlayıcı tipinin otojen rötreyi artırdığı yorumu getirilebilir. Sonuçlar, başka parametrelerin de otojen rötreye davranışını etkilemesinden dolayı çimento inceliğinin direk rötreyi artırıcı bir etkisi olduğu söylenememektedir.

4.4.6 Otojen rötreye s/b oranının etkisi

Şekil 4.17’de karışımların s/b oranının otojen rötreye etkisi incelenmiştir.

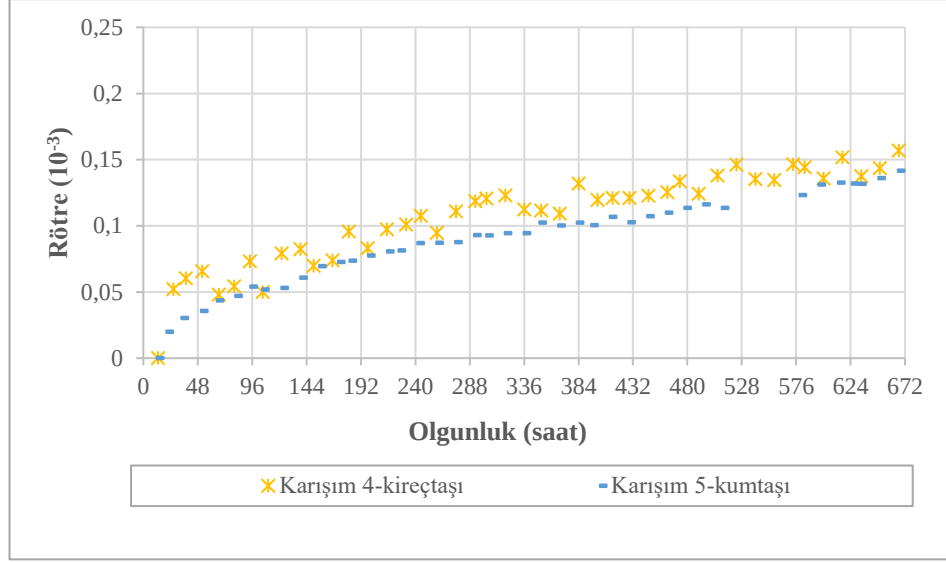


Şekil 4.17 : Otojen rötreye s/b oranının etkisi.

Deney karışımlarından farklı s/b oranlarına sahip karışımlar incelendiğinde; s/b oranına direkt bağlı bir davranış görülememektedir. S/b oranı 0,40 olan karışım 3’ün ısı gelişimi sonuçlarının incelendiği bölümde hidrasyon ısısının yüksek olmasından da anlaşılacağı üzere otojen rötresi de yüksektir. Isı gelişim hızı yüksek olan bu karışımların otojen rötreyi direkt etkilediği bilinmektedir. Isı gelişim hızı yüksek karışımların genellikle otojen rötreleri de yüksektir. Ancak karışım 8’in s/b oranı düşük olmasına rağmen hidrasyon ısısı da düşük buna rağmen rötresinin yüksek olmasının içerdiği cüruv katkısının inceliğinden, bağlayıcı tipi ve s/b oranından kaynaklanabileceği söylenebilir. Bunun yanında literatürde de s/b oranı düşük karışımların otojen rötresinin yüksek olduğu ifade edilmektedir. Karışım 5’in otojen rötresinin en düşük olduğu görülmektedir. Bu durum hidrasyon ısısı karışım 8’den çok da farklı olmamasına rağmen agrega cinsi ve su emme oranının daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir.

4.4.7 Otojen rötreye agreganın (Dmaks, tür, su emme) etkisi

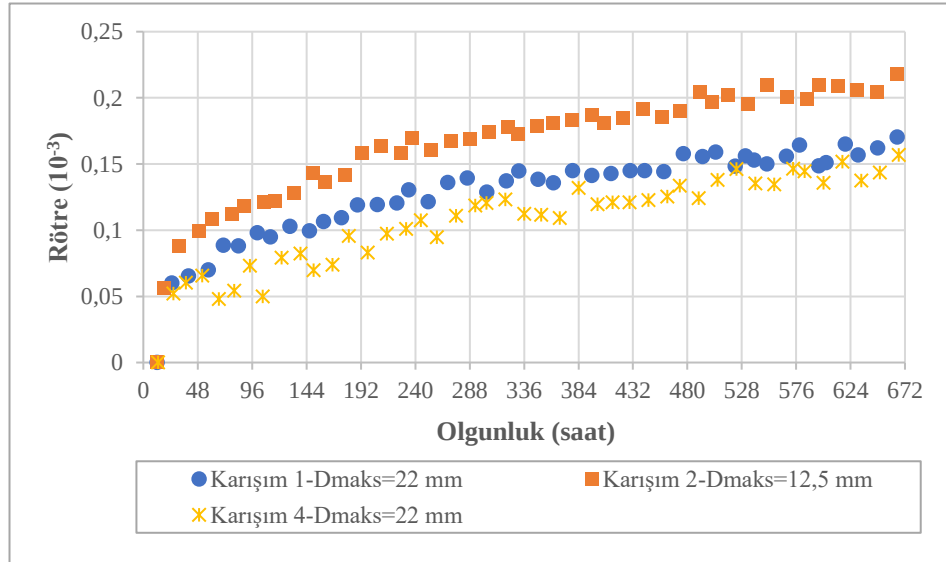
Şekil 4.18’de agrega türleri farklı iki karışımın otojen rötreye davranışı incelenmiştir. Karışım 4 kireçtaşı kökenli agregaya sahipken karışım 5 ise kumtaşı agregalarını içermektedir.



Şekil 4.18 : Otojen rötreye agrega türünün etkisi.

Otojenin rötrene kumtaşı agregalarını içeren karışım 5’de daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum agrega su emme oranı ve agrega inceliği daha yüksek olan karışımların otojen rötrelerinin de düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca ısı gelişimi sonuçlarının incelendiği bölümde hidrasyon ısısının da karışım 4’e göre düşük olduğu bilinmektedir.

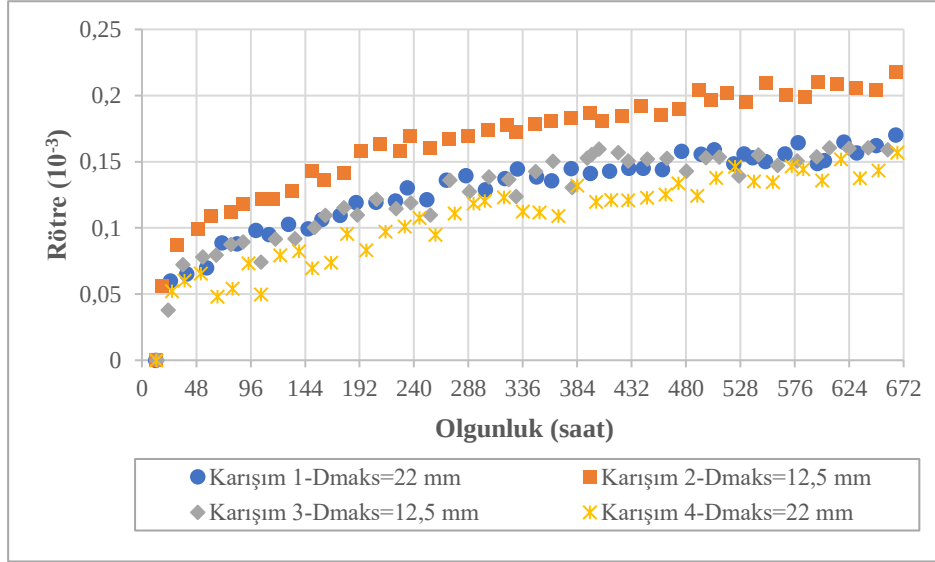
Şekil 4.19’da karışımların Dmaks’ına göre otojen rötreye etkisi kıyaslanmıştır.



Şekil 4.19 : Otojen rötreye Dmaks’ın etkisi.

Şekil 4.19’da Dmaks’ı 12,5 ve 22 mm olan karışımların otojen rötreye etkisi incelendiğinde Dmaks’ı küçük olan karışım 2’nin daha yüksek rötre davranışı gösterdiği görülmektedir.

Dmaks'ı küçük olan karışımların ısı gelişiminin yüksek olduğu bilgisinden hareketle otojen rötrelere de yüksek olacağı beklentisi yerinde olacaktır. Çünkü agrega varlığının azalması çimento hacmini artıracaktır. Bu da hidrasyon ısını yükselterek otojen rötreye sebep olacaktır. Dmaks'ı 22 mm olan karışımların ise çimento hacmi daha düşük olduğundan otojen rötrelere de daha düşüktür.

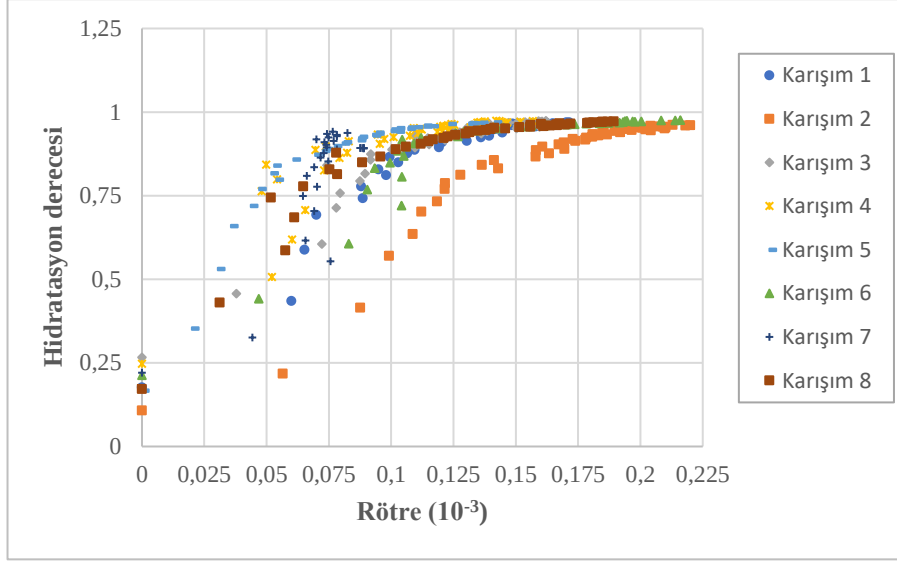


Şekil 4.20 : Otojen rötreye Dmaks ve s/b oranının etkisi.

Şekil 4.20'de ise Dmaks'ı 12,5 mm olan karışım 3'ün Dmaks'ı 22 mm olan karışımlarla yakın rötreye davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu karışım ısı gelişiminde de karışım 4 ile neredeyse aynı ısı gelişimi trendini izlemiştir. Bu durumun karışım 3'ün s/b oranının (0,40) yüksek olması dolayısıyla otojen rötresinin düşmüş olabileceği düşünülebilir.

4.4.8 Otojen rötreye-hidrasyon arasındaki ilişki

Şekil 4.21'de hidrasyon ilerledikçe otojen rötrenin davranışı incelenmiştir. Karışımların genel davranışı hidrasyon derecesi arttıkça (hidrasyon ilerledikçe) otojen rötrenin arttığı görülmektedir. Rötrenin belirli bir değerinde hidrasyon reaksiyonlarının yavaşladığı, prizın tamamlanıp sertleşmenin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.21 : Otojen rötre ile hidrasyon arasındaki ilişki.

4.4.9 Karışımların otojen rötresine model yaklaşımı

Elde edilen rötre datalarına en uygun modeli bulmak için yapılan denemelerin sonunda bir power fonksiyonu ile otojen rötreinin gelişimini tahmin etmenin mümkün olduğu görüldü. Denklem 4.1'deki fonksiyonda belirtilen değişkenler, karışım tasarımlarında yerine konduğunda sonuçlar Rasoolinejad ve arkadaşlarının bu konudaki çalışmasını doğrular niteliktedir.

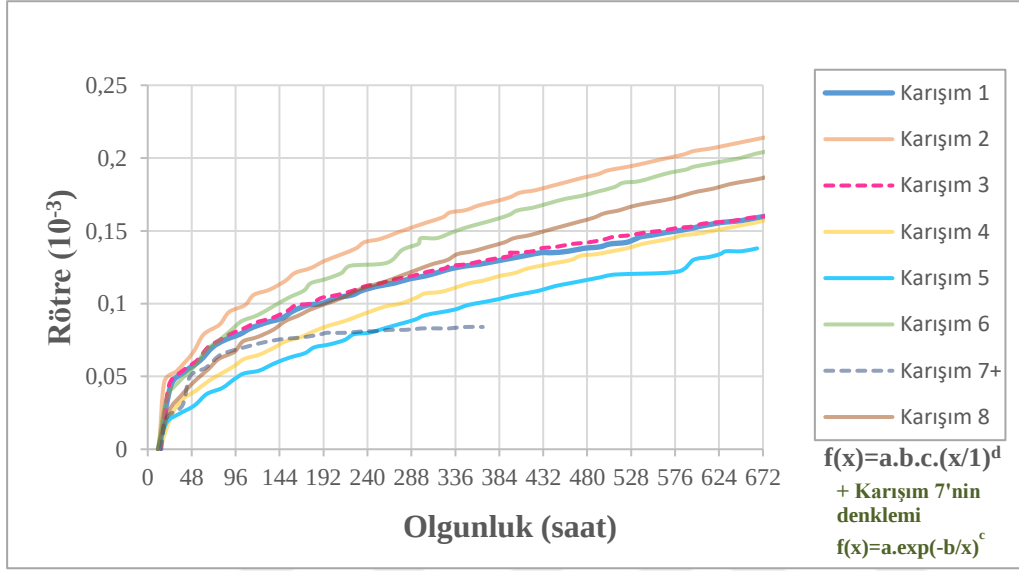
$$f(x)=a.b.c.\left(\frac{x}{1}\right)^d \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de x betonun eşdeğer yaşı (olgunluk), a çimento tip faktörü, b beton katkılarının etkisini, c ön faktör ve d beton türüne göre değişen boyutsuz bir parametre anlamına gelmektedir. Formüldeki d ve c değerleri birbiri ile ilişkili ve agrega/çimento oranına bağlıdır. Agrega/çimento oranı, d sabit iken c ile ters orantılıdır.

$$c = \frac{100}{\left(\frac{s}{c}\right)^{2.5} + \left(\frac{a/c}{10}\right)^{1.5}} \quad (4.2)$$

Agrega/çimento ve su/çimento oranındaki artış c ön faktörünü de azaltacaktır. Çimento ve katkı tipinin etkisinin zayıf olduğu düşünülürse c faktörünün azalması otojen rötreinin azalması anlamına gelmektedir. Elde edilen verilere iyi bir optimizasyon için $d=p+q\ln c$ fonksiyonu ve p,q ampirik parametreler için de $p=1.2-0.1(a/c)$ ve $q=-0.14+0.005(a/c)$ fonksiyonları verilmiştir. Ön faktör c için ise Denklem 4.2 eşitliği verilmiştir. Bu eşitlik s/ç oranı 0.2-0.8 ve a/ç 0-7 aralığında ise uygulanabilmektedir [67].

Karışımların rötre verilerinin optimizasyonu için Denklem 4.1'deki modelle yaklaşım yapılmıştır. Yalnızca karışım 7'nin rötre verilerine hidratasyon modeli ile daha iyi bir yaklaşım sağlanmıştır. Modellerle yapılan optimizasyon sonucunda rötre verileri için Şekil 4.22'deki grafik elde edilmiştir. Model ile gerçek verilerin yaklaşımı tüm betonlar için Ek A'da verilmiştir.



Şekil 4.22 : Gerçek rötre verilerine model yaklaşımı.

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Beton için yapılan laboratuvar deneyleri; malzeme kaynağı, para ve insan gücü gerektiren, sonuçlarının elde edilmesi zaman alan, çevresel atık oluşturan maliyetli bir süreci içermektedir. Paranın, zamanın ve kaynakların verimli ve çevreci kullanılması açısından betonun özelliklerinin bir simülasyon yardımıyla tahmin edilebilmesi oldukça önem arz etmektedir.

(NIST) National Institute of Standards and Technology, 2001 yılında Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (VCCTL) çalışmasını başlatmıştır. Buna göre çimentolu malzemeleri en iyi şekilde kullanarak değerlendirmek amacıyla VCCTL ismiyle dünyanın her yerinden erişilebilen web tabanlı bir sanal laboratuvar yazılımı geliştirilmiştir. VCCTL yazılımı, mühendislere ve bilim insanlarına bir sanal deney laboratuvarı ortamı sağlamaktadır. VCCTL; betonun hidratasyon davranışını, mekanik, reolojik vb. özelliklerini tahmin etmek üzere tasarlanmış farklı modülleri içermektedir.

Bu çalışmada, seçilmiş deney numuneleri VCCTL yazılımı ile modellenerek hidratasyon davranışı simüle edilmiştir. Simülasyon ve deney sonuçları birbiriyle kıyaslanarak deney betonlarının hidratasyon ısısının optimum bir şekilde önceden tahmin edilebilirliği araştırılmıştır.

5.1 Simülasyon Yazılımının Özellikleri

VCCTL yazılımında simülasyon; agrega, puzolanik katkıları, çimento ve çimento esaslı malzemelerin oluşturulması, malzemelerin farklı koşullar altında kürlenmesi, termal, mekanik ve iletim özelliklerinin hesaplanması aşamalarından oluşmaktadır. Yazılımın sağladığı sanal laboratuvar; agrega, çimento, puzolanik katkıları gibi beton malzemelerinin seçilebildiği bir veri tabanına sahiptir. Çimentonun faz bileşimi, s/b oranı ve tane boyutu dağılımı ile agrega miktarı, agrega granülometrisi ve fiziksel özellikleri kullanıcı tarafından girdi olarak sağlanmaktadır.

Yazılım; sistemdeki klinker fazların çözünmesini, difüzyonunu ve çökmesini taklit etmek için bir dizi olasılık kuralına dayanan ajan tabanlı bir model kullanarak çimento hamuru hidratasyonu sırasında mikro yapı gelişimini simüle etmektedir. Simülasyonda oluşturulan mikroyapı, 1 µm/voksel doğrusal çözünürlüğe sahip düzenli bir kübik kafes yapısı olarak işlenmektedir.

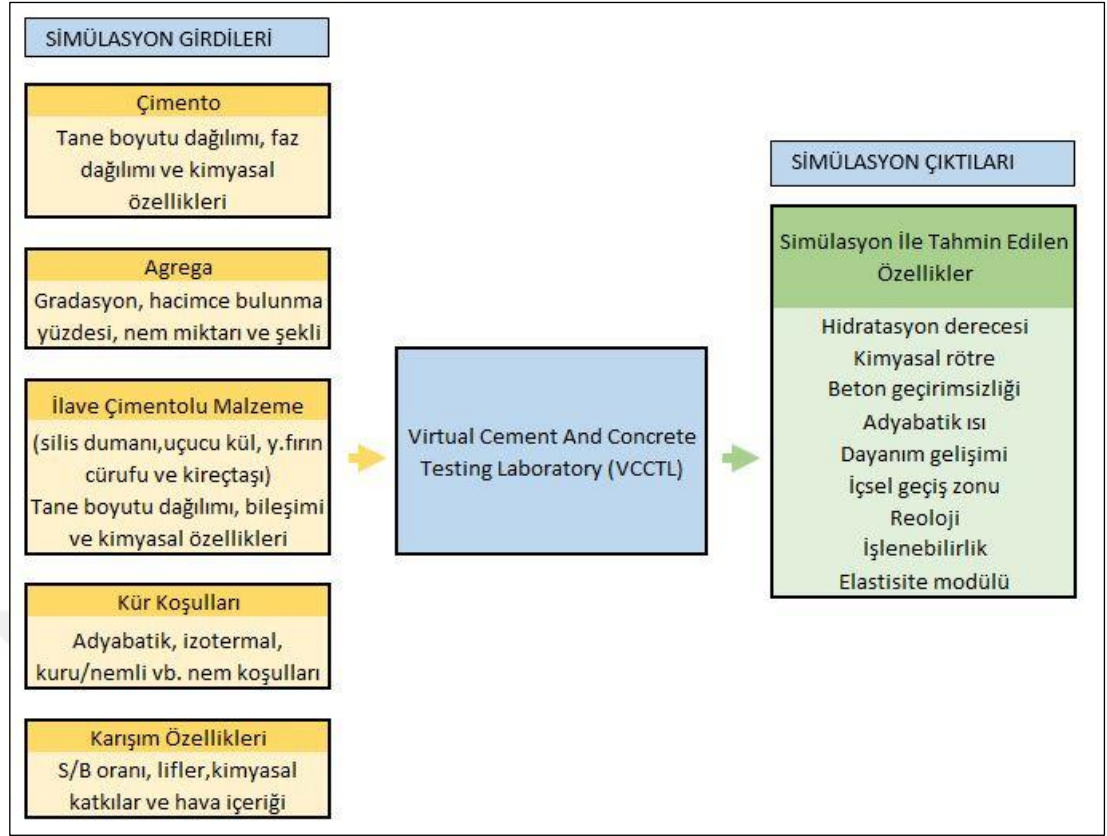
Voksel (volümetrik pikselin kısaltması), bir noktayı üç boyutlu uzayda tanımlayan grafik bilgisini ifade eden hacim elemanı, üç boyutlu bir imge işlemede en küçük görüntü ögesidir. Simülasyonda hesaplama alanının boyutları 100 µm ile 200 µm arasındadır. Her boyutta periyodik sınır koşulları uygulanmaktadır. Simülasyon modeliyle hidratasyon sırasında gerçekleştirilen (yineleme) iterasyon sayısı, her bir zaman dilimindeki simüle edilen klinker faz kompozisyonu ve her bir fazın çökme-çözünme entalpisinde açığa çıkan ısı esas alınarak hesaplanıp fiziksel zamana çevrilmektedir. Fiziksel zamana dönüşüm, tahmin edilen ısı eğrisinin kalorimetre ile elde edilen deneysel eğrilere kalibre edilmesiyle gerçekleştirilmektedir [68].

NIST hidratasyon modeli, çözünmenin olmadığı adım, çözelti içindeki çözünmemiş bileşenlerin taşındığı difüzyon adımı ve reaksiyon adımlarının her biri için tekrarlayan döngülerle ilerlemektedir. Bu döngülerin içsel zaman skalası mevcut olmadığından hesaplamalı döngüler ve gerçek zaman arasında bir ilişki varsayılmış olmalıdır. VCCTL yazılımının son sürümündeki kabule göre; denklem 5.1'de de görüleceği üzere hidratasyon zamanının hesaplamalı döngülerin sayısı ile arasında parabolik bir ilişki vardır.

$$t = \beta n^2 \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'deki t (saat) hidratasyon zamanını, β (saat/döngü²) zaman dönüşüm faktörünü, n hesaplamalı döngü sayısını ifade etmektedir. Zaman dönüşüm faktörü ile simülasyonun zaman ölçeğini değiştirerek deneysel sonuçlara bir tür kalibrasyon sağlanmaktadır. Bu faktörün simülasyon zaman ölçeğini genişletmek veya daraltmak dışında başka bir etkisi yoktur. Sıklıkla simülasyonda zaman dönüşüm faktörünün kalibrasyonu ile deneysel sonuçlara iyi bir yaklaşım elde edilmektedir [69].

VCCTL yazılımında simülasyon oluşturabilmek için çimentolu malzemenin bazı deneysel verilerine ihtiyaç vardır. Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere çimento, agrega, kür koşulları, ilave puzolanik katkıları ve karışım özellikleri tanımlandığında betonun belirli özellikleri tahmin edilebilmektedir.



Şekil 5.1 : Simülasyon ile tahmin için girdi ve çıktılar.

Yazılım, deneysel veriler ve deney koşullarına göre simülasyonu gerçekleştirerek sanal bir üç boyutlu mikro yapı elde etmekte ve şekil 5.1'deki beton özelliklerini tahmin etmektedir.

5.2 Simülasyon Girdileri

Çalışmada; çizelge 5.1'de gösterilen s/b oranı, çimento tipi, puzolanik katkı, Dmaks ve agrega kökeni bakımından farklı özellikler barındıran seçilmiş dört deney karışımı simüle edilmiştir. Simülasyon içinde kullanılan malzeme özellikleri, deney karışımlarına uygun şekilde seçilmiştir. Çalışmadaki 2,5,7 ve 8 nolu deney karışımlarının hidratasyon sırasındaki ısı gelişimi, buna benzer özelliklere sahip olan simülasyon modelleriyle kıyaslanmıştır. Simülasyon girdisi olarak yazılımın içindeki veri tabanından faydalanılmıştır. Buna göre yazılım veri tabanındaki cement151 karışım 2,5 ve 7, cement152 çimento ise karışım 8 için kullanılmıştır. Deney verilerine en iyi uyumu sağlayabilmek için de β zaman dönüşüm faktörüyle kalibrasyon yapılmıştır. Çizelge 5.2'de simülasyon karışımlarının girdileri verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deney karışımlarının özellikleri.

Karışım No	S/B	Çimento	Puzolan katkı	Dmaks	Agrega
2	0,37	CEM III/B (S) 32,5 N-SR	-	12,5	kireçtaşı
5	0,37	CEM III/B (S) 32,5 N-SR	-	22	kumtaşı
7	0,37	CEM I 42,5 N	uk., sd.	22	kireçtaşı
8	0,32	CEM I 52,5 N	yfc	22	kireçtaşı
sd: silis dumanı		yfc: yüksek fırın cürufu	uk: uçucu kül		

Çizelge 5.2 : Modellerin simülasyon girdileri.

Model No	S/B	Çimento	Puzolan katkı	Hava (%)	Başl.sıcaklığı	Ortam	β
2	0,37	cement 151	-	0,056	20	Kuru	0,0006
5	0,37	cement 151	-	0,056	20	Kuru	0,0005
7	0,37	cement 151	uk., sd.	0,074	20	Kuru	0,00035
8	0,32	cement 152	yfc	0,02	20	Kuru	0,00057
β : zaman dönüşüm faktörü							

Çizelge 5.2'deki girdiler kullanılarak aşağıdaki adımlar izlenerek simülasyon modeli oluşturulmaktadır. Herhangi bir karışım için aynı yol izlenmektedir.

Simülasyon adımları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

Şekil 5.2'te 1.adım olarak karışım malzemelerinin tanımlanması (çimento ve bileşimi, s/b oranı, agrega ve hava içeriği) anlatılmaktadır.

Home | Lab Materials | **Mix** | Measurements | My Operations | My Files | Logout

1. Prepare Mix | 2. Hydrate Mix

Step 1: Prepare mix

Binder

Choose a cement: cement151

▼ Modify phase distribution in the clinker

	Phase Volume fraction	Surface area fraction
C ₃ S	0.6324	0.5525
C ₂ S	0.1898	0.2585
C ₃ A	0.0474	0.0582
C ₄ AF	0.1256	0.1240
K ₂ SO ₄	0.0047	0.0068
Na ₂ SO ₄	0.0001	0.0001
Sum:	1.000	1.000

Fraction that is orthorhombic: 0.0

► Modify calcium sulfate amounts in the cement

► Add SCM or filler to the binder

Şekil 5.2 : Adım 1: karışımın malzemelerinin tanımlanması.

Mix ?

	Mass fraction	Volume fraction
Binder	0.1664	0.1282
Water	0.0616	0.1542
Water/Binder ratio	0.37	
☒ Add Coarse Aggregate	0.392	0.3597
► Change properties		
☐ Add Coarse Aggregate 2	0.0	0.0
☒ Add Fine Aggregate	0.209	0.1991
► Change properties		
☒ Add Fine Aggregate 2	0.171	0.1587
► Change properties		
Air		0.056

► **Simulation parameters** ?

File name: Model2 ? Notes: ?

Create the mix

Şekil 5.2 (devamı) : Adım 1: karışımın malzemelerinin tanımlanması.

Karışımın s/b oranı, agrega bulunma yüzdesi, gradasyonu ve hava yüzdesi bilgileri girildikten sonra “create mix” komutuyla karışım oluşturulur. Bu sırada simülasyon oluşturma işlemi henüz tamamlanmamıştır.

Şekil 5.3’te 2.adım olarak karışımların deney özelliklerinin girilmesi anlatılmaktadır.

1. Prepare Mix 2. Hydrate Mix

Step 2: Hydrate my mix ?

Mix properties ?

Choose a mix: Model2

► Reaction activation energies

► Hydration behavior options

► Surface deactivation

► CSH Nucleation Seeding

Curing conditions ?

Thermal

Conditions:

☐ isothermal

☒ semi-adiabatic

☐ adiabatic

Initial temperature: 20 °C

Ambient temperature: 20 °C

Heat transfer coefficient: 10

▼ Aggregate

Initial temperature of aggregate: 20 °C Heat transfer coefficient: 10 W/g/°C

Şekil 5.3 : Adım 2: karışımların deney özelliklerinin girilmesi.

Şekil 5.3 (devamı) : Adım 2: karışımların deney özelliklerinin girilmesi.

Bu adımda kür koşulları, başlangıç ve ortam sıcaklığı, zaman dönüşüm faktörü ve istenilen simülasyon deneyi süresi vb. bilgiler tanımlanmaktadır. Ardından “hydrate the mix” komutuyla simülasyon başlatılmaktadır.

Şekil 5.4’te 3. Adım olarak simülasyon sonuçlarının alınması anlatılmaktadır.

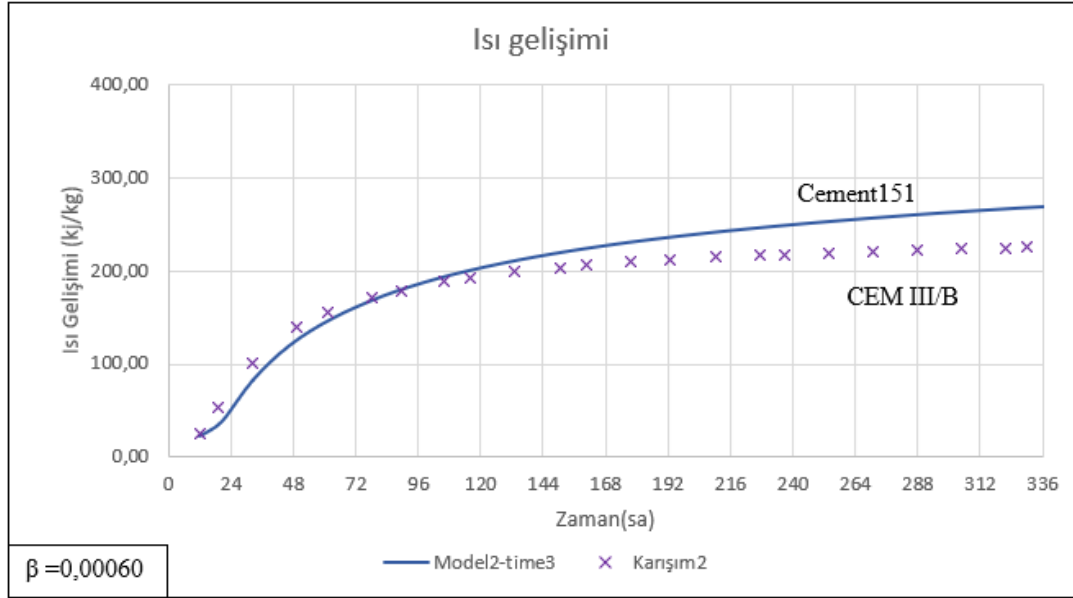


Şekil 5.4 : Adım 3: Simülasyon sonuçlarının alınması.

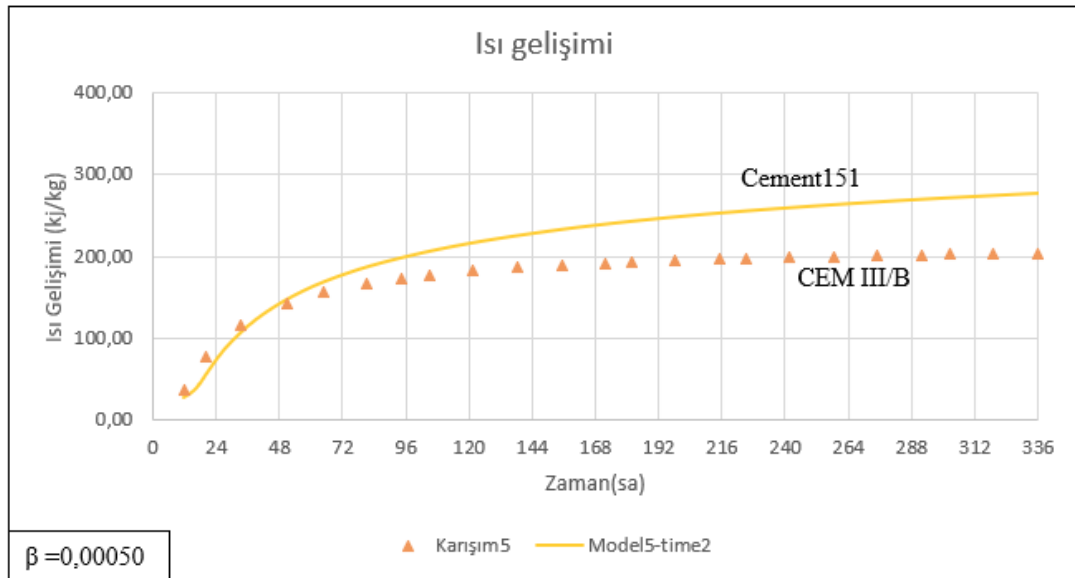
Yazılımdaki “my operations” sekmesinden devam etmekte olan simülasyonun ne aşamada olduğu takip edilmekte ve “my files” sekmesinden sonuçlar “export data” yapılarak dışarı aktarılabilir.

5.3 Simülasyon Sonuçları

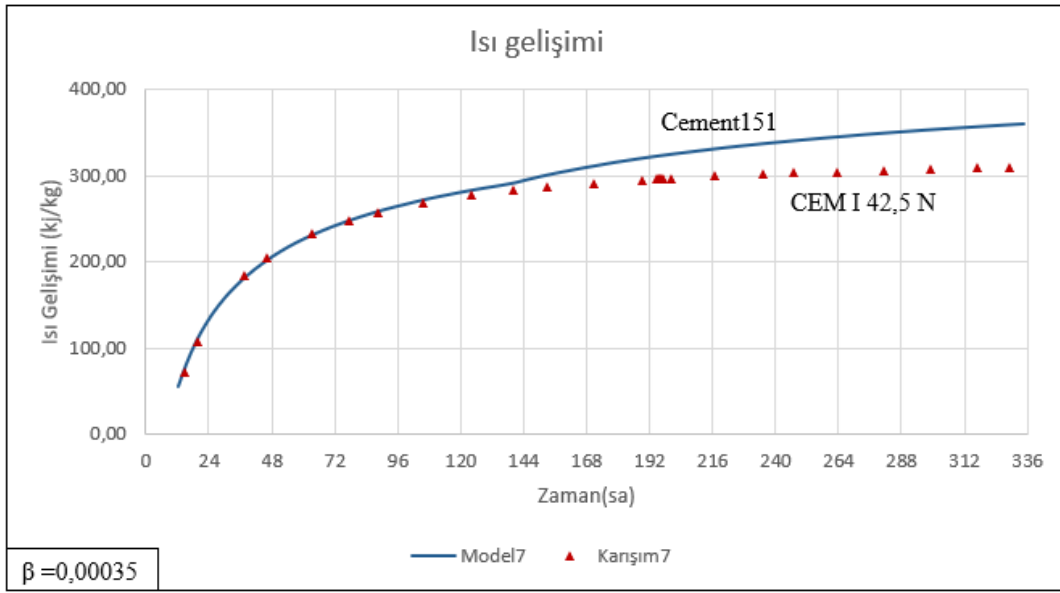
Seçilen deney karışımlarına benzetilerek oluşturulan simülasyon modellerinin ısı sonuçları Ek A’da verilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7’te deney karışımları ile simülasyon modellerinin ısı gelişimi açısından kıyası görülmektedir.



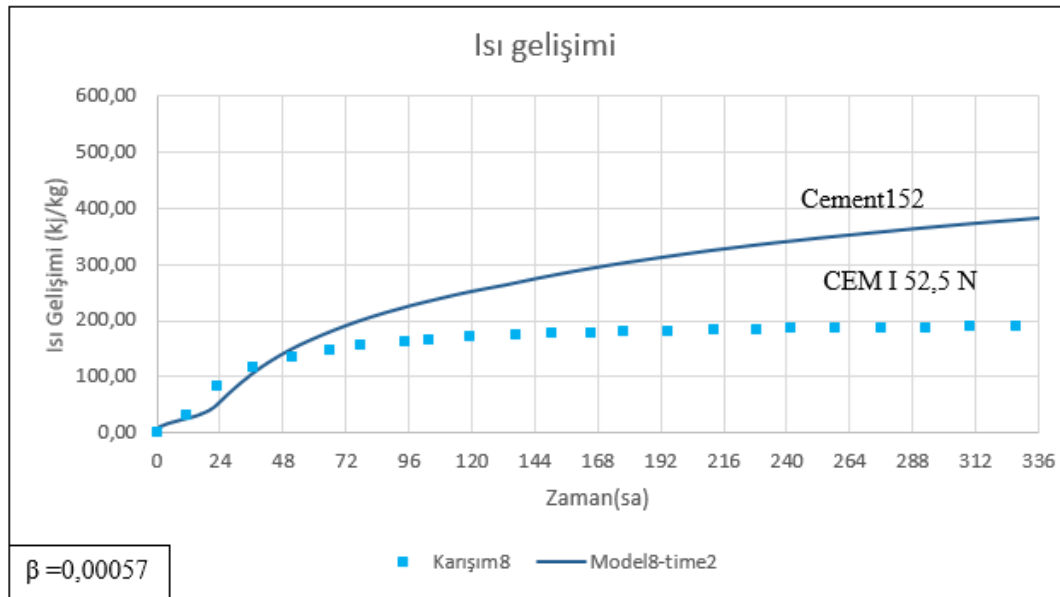
Şekil 5.5 : Deney karışımı 2 ve simülasyon modeli 2'nin ısı gelişimi kıyası.



Şekil 5.6 : Deney karışım 5 ve simülasyon modeli 5'in ısı gelişimi kıyası.



Şekil 5.7 : Deney karışım 7 ve simülasyon modeli 7'nin ısı gelişimi kıyası.



Şekil 5.8 : Deney karışım 8 ve simülasyon modeli 8'in ısı gelişimi kıyası.

Simülasyonda cement 151 ve cement152 çimento kullanılarak en uygun uyumu sağlayacak $\beta =0.00035$, $\beta =0.00060$, $\beta =0.00050$, $\beta =0.00057$ zaman dönüşüm faktörleri kullanılmıştır. Tüm karışımlarda ilk 48 saatte iyi bir uyum yakalanmasına rağmen karışım 8'de ileri yaşlarda simülasyon modeliyle iyi bir uyum yakalanamamıştır. β zaman dönüşüm faktörünün değeri arttıkça eğriyi yataylaştırma etkisi vardır. Deney verisine en uygun yaklaşımı yakalamak için deneysel ölçümlerin herhangi bir özelliğinin manipüle edilmesi yerine sabit bir β değeri seçilmektedir [70].

6. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu tezde ilk olarak malzeme özellikleri değişken yüksek performanslı betonların 0-48 saat aralığındaki erken yaş ısı gelişimi ve rötresi; bağlayıcı tipi ve inceliği, s/b oranı, agrega özellikleri ve taze beton özellikleri bakımından incelenmiştir. İkincisi, erken yaş ısı gelişimi ve rötre arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Üçüncüsü, ısı gelişimi VCCTL yazılımında simüle edilerek deney sonuçları ile kıyaslanmış ve bu doğrultuda ısı gelişiminin önceden tahmini değerlendirilmiştir. Bunun yanında son olarak erken yaşta otojen rötrenin tahmin edilebileceği bir model üzerinde çalışılmıştır.

Çalışmada ısı gelişimi yarı adyabatik kalorimetre deneyi ile erken yaş rötresi ise lvd (doğrusal şekil değiştirme ölçüm probu) yardımıyla ölçülmüştür. Bu çalışmadaki erken yaş rötre, sıcaklık etkisinin toplam rötreden düşülerek termal rötrenin dışlandığı, hesaplanmış otojen rötredir.

Çalışma için üretilen betonlar;

S/b oranı 0.37 olup CEM III çimentolu, Dmaks'ı 22 mm, kireçtaşı agregalı (1,4)

S/b oranı 0.37 olup CEM III çimentolu, Dmaks'ı 12,5 mm, kireçtaşı agregalı (2),

S/b oranı 0.40 olup CEM III çimentolu, Dmaks'ı 12,5 mm, kireçtaşı agregalı (3),

S/b oranı 0.37 olup CEM III çimentolu, Dmaks'ı 22 mm, kumtaşı agregalı (5,6),

S/b oranı 0.37 olup CEM I çimentolu, Dmaks'ı 22 mm, kireçtaşı agregalı, uçucu kül ve silis dumanı katkılı (7),

S/b oranı 0.32 olup CEM I çimentolu, Dmaks'ı 22 mm, kireçtaşı agregalı, yüksek fırın cürufu katkılı (8) malzeme özelliklerine sahiptirler.

Çalışmada tespit edilen önemli bulgular aşağıdaki gibidir:

- Her bir betonun davranışını etkileyen birden fazla özelliği mevcuttur. Değerlendirirken bu özelliklerin bütünüyle değerlendirilmelidir.
- Çimento inceliği arttıkça hidrasyon ısı ve ısı gelişim hızı yükselmektedir. CEM III çimentoya sahip betonun ilk saatlerden prizini alana kadar ısı gelişimi yüksek ve hızlıdır. Puzolanik katkılı betonların ısı gelişim hızı düşük ve

hidratasyonu gecikmektedir. Cüruf etkisinin hidratasyon ısısını düşürmede daha etkili olduğu söylenebilir.

- S/b oranı arttıkça ısı gelişim hızı ve hidratasyon ısısı artmaktadır. Bunun düşük s/b oranına sahip betonların küçük kılcal boşluklarında hapsolan suyun çimento jelleşmesini engelleyerek jel oluşumundan kaynaklı hacim artışını geciktirdiği ve dolayısıyla s/b oranı arttıkça hidratasyon derecesinin de artabileceği söylenebilir.
- Agregada su emmesi yüksek olan kumtaşı agregaya sahip betonların ısı gelişiminin kireçtaşı agregalı betonlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. İstisnalar mevcuttur (karışım 6). Burada ince agrega miktarı da bir etkidir. İnce malzeme miktarı daha fazla olan karışımda agrega su emmesi de yüksek olacağından daha düşük hidratasyon ısısı gözlenmektedir.
- Dmaks arttıkça hidratasyon ısısının düştüğü görülmektedir. İstisnalar mevcuttur (karışım 2). İnce malzeme miktarı daha fazla olan karışımda daha düşük hidratasyon ısısı gözlenmektedir.
- Cüruf ilave edilen betonda priz erken başlayıp erken bitmiş iken ısı gelişim hızı ve hidratasyon ısısı bünyesinde cüruf barındıran CEM III çimentolu betonlara göre daha düşük kalmıştır. Uçucu kül ve silis dumanı ilave edilmiş karışımın ise diğerlerinden daha geç prize başlayıp daha geç tamamladığı ve hidratasyonunun geciktiği görülmüştür.
- Çimento inceliği yüksek CEM III çimentoya sahip betonlarda otojen rötre yüksektir. Ancak çimento inceliği daha düşük CEM I çimentoya sahip yüksek fırın cürufu katkılı betonda da otojen rötre yüksek bulunmuştur. Burada cürufun rötreyi artırdığı görülmektedir. Bu durumun cürufun inceliğinin yüksek oluşundan, s/b oranının düşük olmasından ve düşük ısılı bir çimento varlığından kaynaklandığı söylenebilir. Bu nedenle söz konusu betonda çimento inceliğinin direk rötreyi artırdığı söylenemez.
- Erken yaşlarda hidratasyon ısısı yüksek betonlarda otojen rötre de yüksek bulunmuştur. Ancak düşük hidratasyon ısısına sahip bazı betonlarda rötrenin yine de yüksek olduğu görülmüştür. Bunun mineral katkı inceliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Bunun yanında benzer hidratasyon davranışı gösteren bir betonun da otojen rötresi daha düşüktür. Bu betonlarda da agrega

su emme oranının ve agrega türünün incelenmesi yerinde olacaktır. Agrega su emme oranı yüksek betonların otojen rötrelerinin düşük olduğu gözlenmiştir.

- S/b oranı yüksek betonların otojen rötrelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- Dmaks'ı düşük agregalı betonlarda otojen rötre yüksek gözlenmiştir.
- Hidratasyon ilerledikçe otojen rötrenin arttığı, belirli bir otojen rötre değerinden sonra priz sonlanıp sertleşme gerçekleştiğinde hidratasyon derecesinin de yatay bir dengeye ulaştığı görülmektedir.
- Beton tasarımlarında ampirik bir model yaklaşımıyla önceden rötrenin tahminini yapmak mümkündür. Çalışmadaki beton karışımları için uygun bir power fonksiyonu ile rötre verilerine yakın bir tahmin yapılabilmektedir.
- Beton tasarımlarında betonun ısı gelişimini önceden tahmin edebilmek amacıyla simülasyonlarla analiz yapmak mümkündür. VCCTL yazılımı ile ilk 48 saatteki ısı gelişimi verilerine oldukça yakın bir tahmin yapılabilmiş ancak ileri yaşlarda çok iyi bir yaklaşım yakalanamamıştır.

6.1 İleri Çalışmalar İçin Öneriler

- Betonların istisna davranışlarının mevcut olduğu görüldüğünden bağlayıcıların (mineral katkıları, çimento) tane boyutu analizinin, çimento pastasının homojenitesinin, çimento-agrega ara yüzünün ve boşluk yapısının mikroskobik ölçekte incelenmesi yerinde olacaktır.
- Betonların ısı gelişimi, çimento kompozisyonundan oldukça etkilenmektedir. İçeriğindeki çimento klinker ana bileşenlerinin -özellikle hidratasyonda önemli rol oynayan ve C₃A ve C₃S bileşiminin- araştırılması, ısı gelişimine sebep olan hidratasyon davranışını mikroyapısal açıdan daha iyi analiz etmeyi sağlayabilir.
- Simülasyonla hidratasyon davranışının taklit edildiği modelde ileri yaşlarda iyi uyum sağlanamamasının sebeplerini araştırmak için simülasyondaki veri havuzundaki tüm malzemelerin etkisi araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **SHRP-C/FR-91-103.** (1991). *High Performance Concretes, A State of the Art Report*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- [2] **Ma, L., Zhao, Y., & Gong, J.** (2018). Restrained early-age shrinkage cracking properties of high-performance concrete containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 191, 1-12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.154
- [3] **H.Steven Kosmatka, Kerkhoff, B., & Panarese, C. W.** (2002). High-Performance Concrete. İçinde *Design and Control of Concrete Mixtures* (14. bs, s. 299). Illinois, USA: Portland Cement Association.
- [4] **Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M.** (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [5] **Maruyama, I., Kanematsu, M., Noguchi, T., Iikura, H., Teramoto, A., & Hayano, H.** (2009). Evaluation of water transfer from saturated lightweight aggregate to cement paste matrix by neutron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 605(1-2), 159-162. doi:10.1016/j.nima.2009.01.138
- [6] **Vangi S. Ramachandran, & Feldman, R. F.** (1996). Concrete-Admixtures-Handbook. İçinde *Concrete Science* (C. 1-2, ss. 1-66). Ottawa, Kanada.
- [7] **Erdoğan, Turhan Y.** (2013). *Beton* (4. bs). Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- [8] **Taylor, P., Dam, T. V., Sutter, L., & Fick, G.** (2019). *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A state of the practice manual*. Iowa State University.
- [9] **Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D.** (2003). *Concrete* (2. bs). Sidney: Pearson Education.
- [10] **RILEM Commission 42-CEA.** (1981). Properties of set concrete at early ages state-of-the-art-report. *Matériaux et constructions*, 14(6), 399-450. doi:10.1007/BF02476348
- [11] **McCullough, B., & Rasmussen, R.** (1999). *Fast Track Paving: Concrete Temperature Control and Traffic Opening Criteria for Bonded Concrete*

Overlays Volume I-Final Report (ss. 98-167). Washington DC: Federal Highway Administration.

- [12] **Wang, K., Ge, Z., Grove, J., Ruiz, J. M., Rasmussen, R., & Ferragut, T.** (2007). *Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field Applications* (No. FHWA DTF61-01-00042 (Project 17, Phase II)) (s. 62). Center for Transportation Research and Education Iowa State University.
- [13] **ASTM C150.** (t.y.). Standard Specification for Portland Cement.
- [14] **Neville, A. M.** (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Harlow, England ; New York: Pearson.
- [15] **Alshamsi, A. M.** (1997). Microsilica and ground granulated blast furnace slag effects on hydration temperature. *Cement and Concrete Research*, 27(12), 1851-1859. doi:10.1016/S0008-8846(97)00195-6
- [16] **Langan, B. W., Weng, K., & Ward, M. A.** (2002). Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1045-1051. doi:10.1016/S0008-8846(02)00742-1
- [17] **Hu, J., Ge, Z., & Wang, K.** (2014). Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. *Construction and Building Materials*, 50, 657-663. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011
- [18] **Schindler, A.** (2004). Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials. *ACI Materials Journal*, 101, 72-81.
- [19] **Akman, S.** (t.y.). Yüksek Performanslı Betonların Teknolojisi Özellikleri, Sorunları, Geleceği. İstanbul.
- [20] **Piasta, W., & Zarzycki, B.** (2017). The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 395-402. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.033
- [21] **Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K.** (2012). Agreganın En Büyük Tane Boyutu ve Numune Boyutunun Betonun Karot Dayanımına Etkisi (s. 11). Program adı: İnşaat Mühendisliği'nde 100. Yıl Teknik Kongresi.
- [22] **Kosmatka, H. S., Kerkhoff, B., & Panarese, C. W.** (2002). Aggregates for Concrete. İçinde *Design and Control of Concrete Mixtures* (s. 299). Illinois, USA: Portland Cement Association.
- [23] **Bjøntegaard, Ø.** (2011). *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures – State of the art* (Project report). Oslo: Norwegian Public Roads Administration.

- [24] **NT BUILD 388.** (1992). Nordest Method-Concrete: Heat Development.
- [25] **Carino, N. J., & Lew, H. S.** (2001). The Maturity Method: From Theory to Application. İçinde *Structures 2001* (ss. 1-19). Program adı: Structures Congress 2001, Washington, D.C., United States: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40558(2001)17
- [26] **Demirel, C.** (2008). *Sertleşen Betonda Çatlak Riskinin Simülasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [27] **Poole, J. L., Riding, K. A., Folliard, K. J., Juenger, M. C., & Schindler, A.** (2007). Methods for Calculating Activation Energy for Portland Cement. *ACI Materials Journal*, 104(1). doi:10.14359/18499
- [28] **Bofang, Z.** (2014). Conduction of Heat in Mass Concrete, Boundary Conditions, and Methods of Solution. İçinde *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete* (ss. 11-47). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-407723-2.00002-6
- [29] **Holt, E. E.** (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete, VTT publications, 197.
- [30] **Pekmezci, B. Y., Mehmet Uyan, & Akman, S.** (2005). Çimento Karakteristiklerinin Otojen Rötre Büyüklüğüne Etkileri (ss. 437-446).
- [31] **Mihashi, H., & Leite, J. P. de B.** (2004). State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(2), 141-154. doi:10.3151/jact.2.141
- [32] **Pekmezci, B. Y.** (2006). *Yüksek performanslı çimentolu ürünlerin otojen rötre özellikleri* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [33] **Jensen, O. M., & Hansen, P. F.** (2001). Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1859-1865. doi:10.1016/S0008-8846(01)00501-4
- [34] **Bentur, A., Igarashi, S., & Kovler, K.** (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, 31, 1587-1591.
- [35] **Koenders, E. A. B., Van Breugel, K., de Vries, J., & Soen, H.** (1998). Mix optimization for concrete bridge in view of reduction of risk of cracking at early ages. Program adı: Proceedings of the 13th FIP Congress, Amsterdam.
- [36] **Holt, E.** (2005). Contribution of Mixture Design to Chemical and Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages. *Cement and Concrete Research*, 35, 464-472. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.009
- [37] **Lu, T., Li, Z., & Huang, H.** (2020). Effect of Supplementary Materials on the Autogenous Shrinkage of Cement Paste. *Materials*, 13(15), 3367. doi:10.3390/ma13153367

- [38] **Brooks, J. J., Cabrera, J. G., & Megat Johari, M. A.** (1998). Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high strength concrete (ss. 195-202). Program adi: Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan.
- [39] **Tazawa, E., & Miyazawa, S.** (1995). Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, 25(2), 7.
- [40] **Jensen, O. M., & Hansen, P. F.** (1996). Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement paste. *ACI Materials Journal*, 93(6), 539-543.
- [41] **Wild, S., Khatib, J. M., & Roose, L. J.** (1998). Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement—Metakaolin pastes. *Advances in Cement Research*, 10(3), 109-119. doi:10.1680/adcr.1998.10.3.109
- [42] **Akkaya, Y., Konsta-Gdoutos, & Shah, S. P.** (2004). The pore structure and autogenous shrinkage of high-performance concrete with ternary binders (ss. 233-249). Program adi: Proc. of Eight Canmet ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, USA.
- [43] **Yang, Q.-B., & Zhang, S.-Q.** (2004). Self-desiccation mechanism of high-performance concrete. *Journal of Zhejiang University. Science*, 5(12), 1517-1523. doi:10.1631/jzus.2004.1517
- [44] **Bentz, D. P., Jensen, O. M., Hansen, K. K., Olesen, J. F., Stang, H., & Haecker, C.-J.** (2001). Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(1), 129-135. doi:10.1111/j.1151-2916.2001.tb00619.x
- [45] **Loukili, A., Chopin, D., Abdelhafid, K., & Touzo, J.-Y.** (2000). A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at Early Age Considering Temperature History. *Cement and Concrete Research*, 30, 915-922. doi:10.1016/S0008-8846(00)00241-6
- [46] **Jensen, O. M., & Hansen, P. F.** (1999). Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 567-575. doi:10.1016/S0008-8846(99)00021-6
- [47] **Lura, P. J., Maruyama, I., & Breugel, K. van.** (2001). Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 1867-1872.
- [48] **Paillère, A., Buil, M., & Serrano, J.** (1989). Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume. doi:10.14359/2295
- [49] **Riding, K. A.** (2007, Agosto). *Early Age Concrete Thermal Stress Measurement and Modeling* (PhD). The University of Texas.

- [50] **Nolting, E. H.** (1989). Zur Frage der Entwicklung lastunabhängiger Verformungen und Wärmedehnzahlen junger Betone. *İçinde Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung* (C. Heft 56). University of Hannover.
- [51] **Bentur, A.** (2003). *Early-age Cracking in Cementitious Systems*. RILEM Technical Committee 181-EAS.
- [52] **Esping, O.** (2007). Early age properties of self-compacting concrete—Effects of fine aggregate and limestone filler.
- [53] **Tazawa, E. & Japan Concrete Institute (JCI) (Ed.).** (1999). *Autogenous shrinkage of concrete*. E & FN Spon.
- [54] **Topçu, İ., & Elgün, V.** (2004). Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. *Cement and Concrete Research*, 34, 275-281. doi:10.1016/j.cemconres.2003.07.004
- [55] **Holt, E., & Leivo, M.** (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 521-530. doi:10.1016/S0958-9465(03)00068-4
- [56] **Kronliif, A., Leivo, M., & Sipari, P.** (1995). EXPERIMENTAL STUDY ON THE BASIC PHENOMENA OF SHRLNKAGE AND CRACKING OF FRESH MORTAR. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1747-1754.
- [57] **Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., & Kim, G. Y.** (2006). Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1279-1285. doi:10.1016/j.cemconres.2006.01.005
- [58] **Gleize, P. J. P., Cyr, M., & Escadeillas, G.** (2007). Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 80-87. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.09.005
- [59] **Lee, H. K., Lee, K. M., & Kim, B. G.** (2003). Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash. *Magazine of Concrete Research*, 55(6), 507-515. doi:10.1680/mac.2003.55.6.507
- [60] **Zhao, J.** (1990, Mart). *Mechanical Properties Of Concrete At Early Ages* (Master Thesis). University of Ottawa.
- [61] **Huo, X. S., & Wong, L. U.** (2006). Experimental study of early-age behavior of high performance concrete deck slabs under different curing methods. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1049-1056. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.04.001
- [62] **TS EN 1008.** (2003). Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları.

- [63] **TS EN 934-2.** (2013). Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet için—Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları- Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- [64] **TS EN 12350-7.** (2002). Beton-Taze Beton Deneyleri- Bölüm 7: Hava muhtevasının Tayini.
- [65] **BS EN 13294.** (2002). Products and Systems For The Protection and Repair of Concrete Structures-Test Methods-Determination of Stiffening Time.
- [66] **Atahan, H. N., Taşdemir, M. A., & Oktar, O. N.** (2003). Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamurunun boşluk yapısının beton özelliklerine etkisi, 2(1), 23-34.
- [67] **Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., & Bažant, Z. P.** (2019). Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4. *Materials and Structures*, 52(2), 33. doi:10.1617/s11527-019-1331-3
- [68] **Valentini, L., Parisatto, M., Russo, V., Ferrari, G., Bullard, J. W., Angel, R. J., ... Artioli, G.** (2014). Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling. *Cement and Concrete Composites*, 52, 54-63. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.05.005
- [69] **Bullard, J. W.** (2014). *Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory: Version 9.5 user guide* (No. NIST SP 1173) (s. NIST SP 1173). National Institute of Standards and Technology. doi:10.6028/NIST.SP.1173
- [70] **Bullard, J. W., & Stutzman, P. E.** (2006). Analysis of CCRL proficiency cements 151 and 152 using the Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1548-1555. doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.024

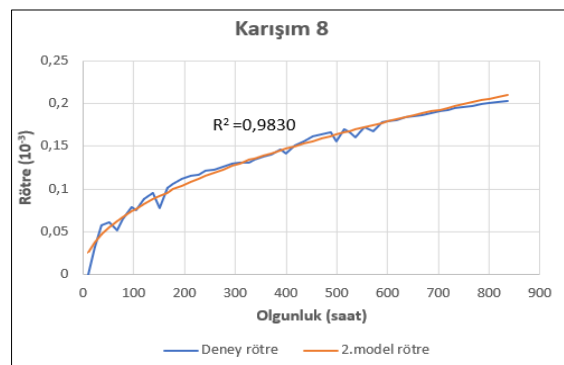
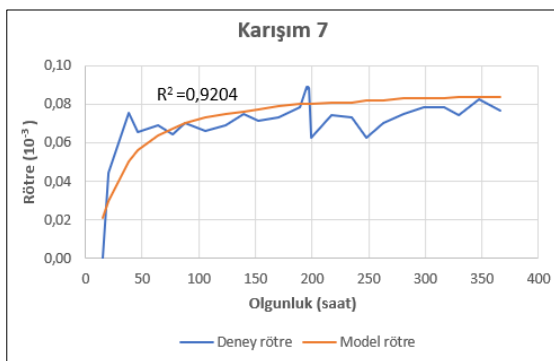
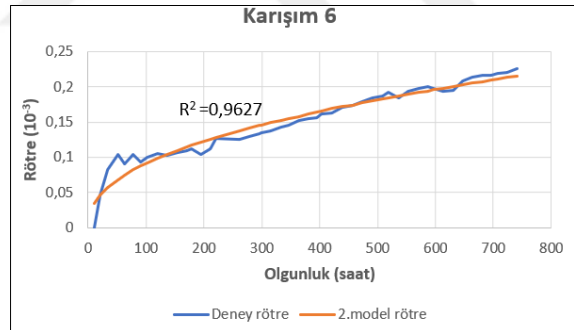
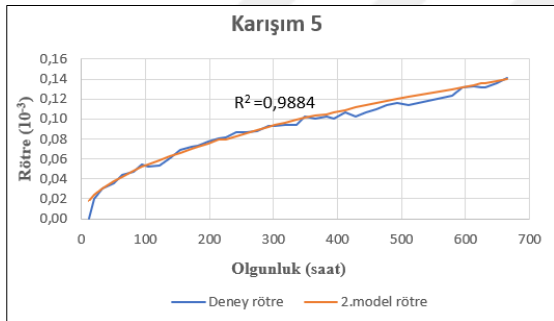
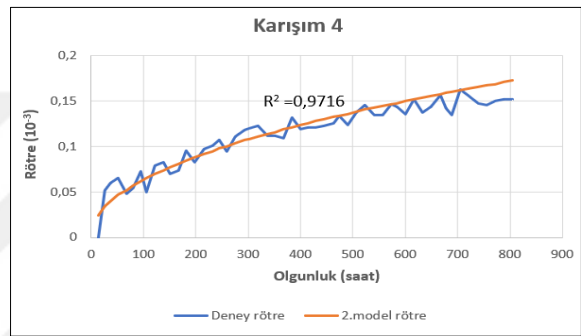
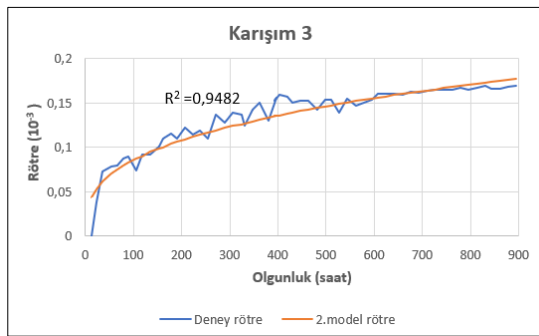
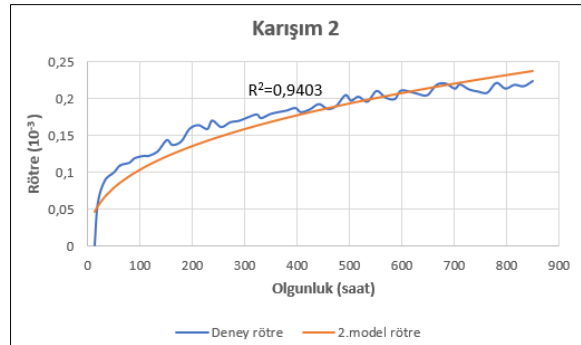
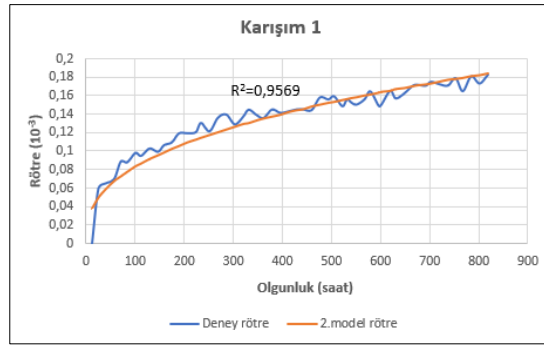
EKLER

EK A : Rtre ve Isı Gelişiminin Tahmin Edilmesine Ynelik alışmaların Sonuları

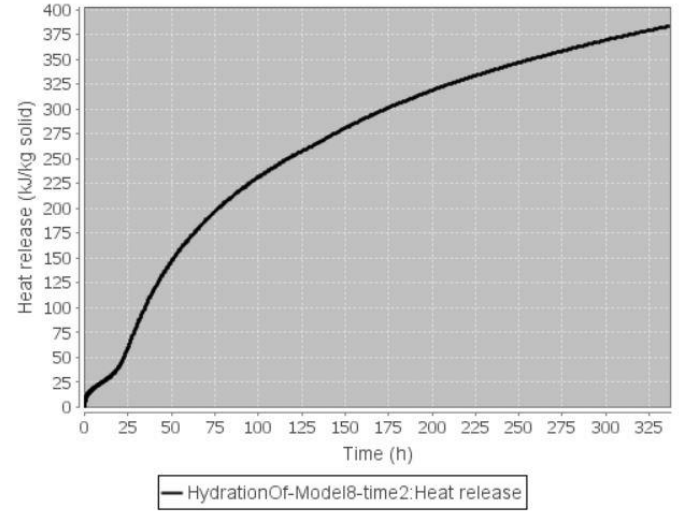
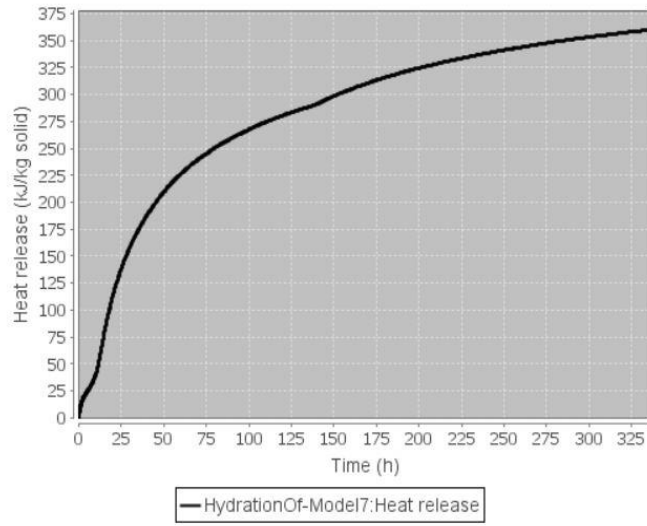
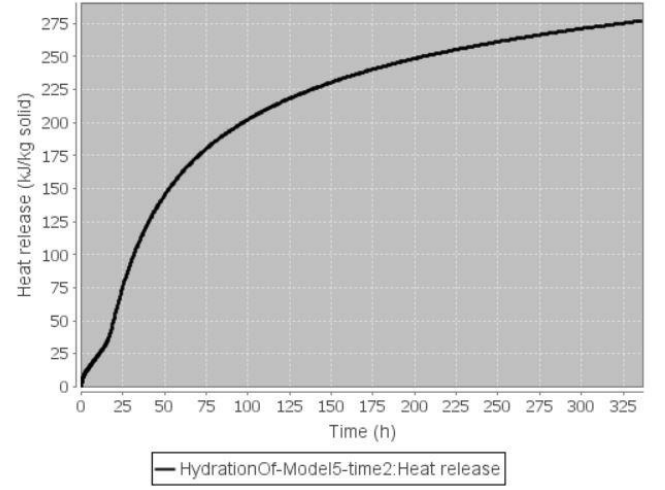
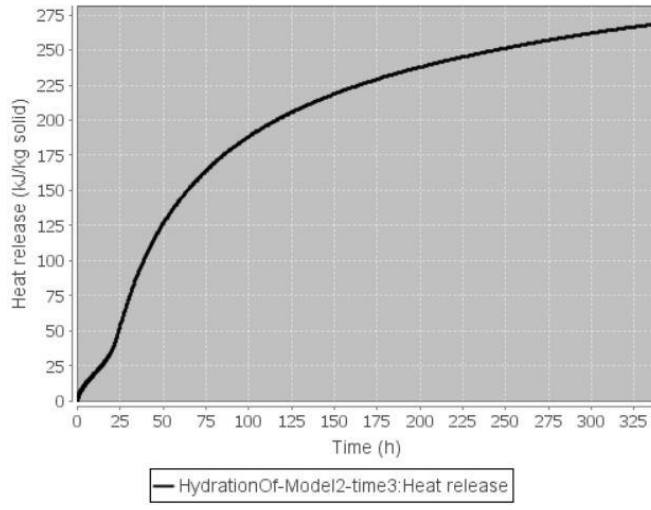
EK B : Karışımların Elek Analizi Sonuçları



EK A



Şekil A.1 : Karışımların rötür model yaklaşımı.



Şekil A.2 : VCCTL simülasyon modellerinin ısı sonuçları.

EK B**Çizelge B.1 : Karışım 1 ve 4 için elekten geçen malzeme (%).**

Karışım 1 (yığışımli)	Karışım 4 (yığışımli)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Doğal kum	Kırmakum	No 1	No 2
100	100	32	100	100	100	100
100	100	22	100	100	100	100
98,7	98,7	20	100	100	100	94,3
91,3	90,9	16	100	100	100	61,0
84,6	83,8	14	100	100	100	30,9
81,5	80,6	12,5	100	100	99,6	17,8
77,9	76,8	11,2	100	100	96,4	5,2
70,5	69,1	10	100	100	71,6	1,2
64,7	63,1	8	100	100	49,5	1,1
56,6	54,8	6,3	100	100	19,1	1,0
52,2	50,2	5	99,9	97,5	4,7	1,0
48,7	46,6	4	99,0	85,6	2,6	1,0
39,1	36,8	2	93,5	52,0	1,8	1,0
30,7	28,5	1	81,9	29,8	1,7	1,0
20,2	18,7	0,5	56,1	16,0	1,6	1,0
7,2	6,8	0,25	16,7	7,9	1,5	1,0
2,2	2,2	0,125	2,8	3,6	1,4	0,9
1,5	1,5	0,063	1,1	2,7	1,4	0,8

Çizelge B.2 : Karışım 2 ve 3 için elekten geçen malzeme (%).

Karışım 2 (yığışımli)	Karışım 3 (yığışımli)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Doğal kum	Kırmakum	No 1	No 2
100	100	14	100	100	100	
99,8	99,8	12,5	100	100	99,6	
98,2	98,2	11,2	100	100	96,4	
85,6	85,6	10	100	100	71,6	
74,4	74,4	8	100	100	49,5	
59,0	59,0	6,3	100	100	19,1	
51,1	51,1	5	100	97,5	4,7	
47,3	47,3	4	99,6	85,6	2,6	
39,3	39,3	2	99,0	52,0	1,8	
34,2	34,2	1	98,7	29,8	1,7	
30,0	30,0	0,5	94,8	16,0	1,6	
9,5	9,5	0,25	25,6	7,9	1,5	
1,7	1,7	0,125	0,6	3,6	1,4	
1,4	1,4	0,063	0,5	2,7	1,4	

Çizelge B.3 : Karışım 5 ve 6 için elekten geçen malzeme (%).

Karışım 5 (yığışımli)	Karışım 6 (yığışımli)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Doğal kum	Kırmakum	No 1	No 2
100	100	32	100	100	100	100
100	100	22	100	100	100	100
94,7	94,7	20	100	100	100	75,3
82,8	82,7	16	100	100	100	19,6
80,5	80,4	14	100	100	99,6	9,2
79,1	79,0	12,5	100	100	98,2	4,6
69,9	69,6	10	100	100	63,9	1,0
65,7	65,5	8	100	100	47,4	0,9
54,3	54,0	5	99,9	96,0	5,4	0,7
50,6	50,2	4	99,0	84,5	2,2	0,7
40,2	40,0	2	93,5	48,3	1,5	0,7
31,4	31,2	1	81,9	25,4	1,5	0,7
20,5	20,4	0,5	56,1	12,6	1,4	0,7
7,0	7,0	0,25	16,7	6,3	1,4	0,7
2,1	2,1	0,125	2,8	3,4	1,3	0,6
1,4	1,3	0,063	1,1	2,6	1,2	0,5

Çizelge B.4 : Karışım 7 için elekten geçen malzeme (%).

Karışım 7 (yığışımli)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Doğal kum	Kırmakum	No 1	No 2
100	22	100	100	100	100
98,5	20	100	100	100	94,3
89,8	16	100	100	100	61,0
81,8	14	100	100	100	30,9
78,3	12,5	100	100	99,6	17,8
74,1	11,2	100	100	96,4	5,2
66,2	10	100	100	71,6	1,2
60,1	8	100	100	49,5	1,1
51,8	6,3	100	100	19,1	1,0
47,2	5	100,0	97,5	4,7	1,0
43,6	4	99,6	85,6	2,6	1,0
34,8	2	99,0	52,0	1,8	1,0
29,1	1	98,7	29,8	1,7	1,0
24,8	0,5	94,8	16,0	1,6	1,0
8,1	0,25	25,6	7,9	1,5	1,0
1,7	0,125	0,6	3,6	1,4	0,9
1,4	0,063	0,5	2,7	1,4	0,8

Çizelge B.5 : Karışım 8 için elekten geçen malzeme (%).

Karışım 8 (yığılımlı)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Doğal kum	Kırmakum	No 1	No 2
100,0	28	100	100	100	100
99,7	22	100	100	100	98,9
97,8	20	100	100	100	91,2
88,7	16	100	100	100	55,2
83,8	14	100	100	100	36,0
80,2	12,5	100	100	99,9	21,9
77,2	11,2	100	100	99,4	10,7
72,0	10	100	100	87,7	3,6
65,4	8	100	100	66,8	1,6
55,9	6,3	100	100	34,6	1,3
48,8	5	100,0	99,6	10,5	1,2
46,0	4	99,5	94,2	5,0	1,2
36,7	2	89,7	63,6	2,8	1,1
27,9	1	71,3	44,4	2,2	1,1
15,4	0,5	31,4	32,6	1,9	1,1
6,6	0,25	2,5	25,5	1,8	1,0
4,6	0,125	0,8	18,1	1,6	0,9
4,0	0,063	0,5	15,8	1,6	0,9

Çizelge B.6 : Karışımların (k) incelik modülü.

	k
Karışım 1	7,7
Karışım 2	6,7
Karışım 3	6,7
Karışım 4	7,9
Karışım 5	7,20
Karışım 6	7,22
Karışım 7	8,09
Karışım 8	7,89

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özlem Ezgi DURAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yapı Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 yılında Jeofizik Mühendisliği bölüm üçüncüsü oldu.
- 2015-2019 yılları arasında özel sektörde büyük çaplı mühendislik projelerinde inşaat mühendisi olarak çalıştı.
- 2019-halen kamuda inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır.