

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜRÜN BETONUN KURUMA ETKİSİNDE BÜZÜLME DAVRANIŞINA
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ubeydullah AYVAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜRÜN BETONUN KURUMA ETKİSİNDE BÜZÜLME DAVRANIŞINA
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ubeydullah AYVAZ
(501201029)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN

EYLÜL 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THE EFFECT OF CURING ON THE SHRINKAGE BEHAVIOR OF
CONCRETE**

M.Sc. THESIS

**Ubeydullah AYVAZ
(501201029)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Dr. Ünal Anıl DOĞAN

SEPTEMBER 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501201029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ubeydullah AYVAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜRÜN BETONUN KURUMA ETKİSİNDE BÜZÜLME DAVRANIŞINA ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL**
Beykent Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür EKİNCİOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 21 Ağustos 2024
Savunma Tarihi : 19 Eylül 2024





Değerli Ebru'ya,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca değerli vaktini ayıran, desteklerini ve bilgisini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca her daim yanımda olan Prof. Dr. Hasan YILDIRIM'a ve meslektaşım Çağın SAĞLAM'a teşekkürü borç bilirim.

Eylül 2024

Ubeydullah AYVAZ
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Rötire	2
1.1.1 Plastik rötire	2
1.1.2 Otojen rötire	3
1.1.3 Karbonatlaşma rötresi	3
1.1.4 Termik rötire	3
1.1.5 Kuruma rötresi	4
1.2 Rötreyi etkileyen faktörler	5
1.2.1 Tasarım özellikleri	5
1.2.2 Çimento özellikleri.....	6
1.2.3 Su/çimento oranı, su ve çimento miktarının etkisi.....	6
1.2.4 Agregat türü ve oranı	8
1.2.5 Kalker tozu kullanımı.....	9
1.2.6 Ortam sıcaklığı.....	9
1.2.7 Bağıl nem	10
1.2.8 Kür.....	10
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	13
2.1 Malzemeler.....	13
2.2 Beton Karışım Oranları	14
2.3 Beton Üretimi	16
3. DENEYLER.....	17
3.1 Taze Beton Deneyleri.....	17
3.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri	17
3.2.1 Rötire ve ağırlık kaybı ölçümleri	18
3.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyi	18
3.2.3 Kılcallık deneyi	19
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	21
4.1 Ağırlık Kaybı Ölçüm Sonuçları	21
4.2 Elastisite ve Basınç Deneyi Sonuçları.....	23
4.3 Boy Değişimi Deney Sonuçları.....	24
4.4 Kılcallık Deney Sonuçları	26
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	29
5.1 Elastisite Modülü ve Rötire Karşılaştırılması	29
5.2 Elastisite Modülü & Kalker Oranı İlişkisi.....	30

5.3 Kalker Oranı ve Rötire Değişimi.....	31
5.4 Su Miktarı ve Rötire İlişkisi	32
5.5 Çimento Hamuru ve Rötire İlişkisi.....	33
5.6 Çimento Miktarı ve Rötire İlişkisi.....	34
5.7 Agregası Miktarı ve Ağırlık İlişkisi	34
5.8 Agregası Miktarı ve Rötire İlişkisi.....	35
5.9 Kılcallık ve Rötire İlişkisi.....	36
5.10 Kılcallık ve Su Miktarı & Agregası Miktarı&Kalker Oranı İlişkisi	36
5.11 Ağırlık Değişimi ve Rötire İlişkisi	38
6. RÖTİRE SONUÇLARININ ULUSLARARASI RÖTİRE MODELLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	39
6.1 American Concrete Institute (ACI) ACI-209R.92 Rötire Modeli.....	39
6.2 CEB-FIP 2010 Rötire Tahmin Modeli	44
6.3 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Rötire Tahmin Modeli	47
6.4 GL2000 Rötire Tahmin Modeli.....	49
6.5 Model B4 Rötire Tahmin Modeli	51
6.6 ACI-209R.92, CEB-FIP 2010, AASHTO, GL2000 ve Model B4 Modelleri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	54
6.7 Tüm Modellerin Kendi İçerisinde Karşılaştırılması.....	55
7. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

S/Ç	: Su/Çimento Oranı
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
OPC	: Standart Portlan Çimentosu
TS	: Türk Standartı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
CEB	: Avrupa-Uluslararası Beton Komitesi
FIB	: Uluslararası Ön-germe Federasyonu
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği



SEMBOLLER

X	: Hacimce agregat Miktarı
W	: Ağırlıkça su/çimento oranı
L	: Hacimce kalker tozu oranı
C	: Çimento ağırlığı
A	: Hacimce agregat oranı
D	: Kür uygulanmayan beton numuneler
K	: Kür uygulanan beton numuneler
E	: Elastisite modülü
D_{max}	: Kür uygulanmayan numune dayanımı
K_{max}	: Kür uygulanan numune dayanımı
D_{ort}	: Kür uygulanmayan numune rötre miktarı
K_{ort}	: Kür uygulanan numune rötre miktarı
GPa	: Gigapaskal ($/N/m^2$)
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
CaCO₃	: Kalsiyum karbonat
H₂O	: Su
V	: Hacim
S	: Yüzey alan
h	: Bağlı nem
b	: Sabit değişken
m	: Eğim
t	: Beton yaşı (ACI)
t_c	: Kür süresi (ACI)
f	: Yüzey-hacim oranı sabiti (ACI)
ε_{sh}	: Toplam rötre
ε_{shu}	: Maksimum rötre
γ_{sh}	: Düzeltme faktörü (ACI)
γ_{sh,tc}	: Kürlenme faktörü (ACI)
γ_{sh,Rh}	: Bağlı nem faktörü (ACI)

$\gamma_{sh,vs}$	: Hacim-yüzey alanı faktörü (ACI)
$\gamma_{sh,s}$	: Yayılma faktörü (ACI)
$\gamma_{sh,\Psi}$	: İnce agregâ faktörü (ACI)
$\gamma_{sh,c}$	: Çimento faktörü (ACI)
$\gamma_{sh,\alpha}$	: Hava faktörü (ACI)
$\epsilon_{cs}(t, t_s)$	: Toplam rötre (CEB-FIP)
$\epsilon_{cds}(t, t_s)$	: Kuruma rötresi (CEB-FIP)
$\epsilon_{cas}(t)$	: Otojen rötre (CEB-FIP)
f_{cm}	: 28 günlük basınç dayanımı
α_{as}	: Çimento katsayısı (CEB-FIP)
$\epsilon_{cds0}(f_{cm})$	: Kuruma rötre katsayısı (CEB-FIP)
$\beta_{RH}(RH)$	: Bağıl nem katsayısı (CEB-FIP)
$\beta_{ds}(t - t_s)$	: Zamana bağıl değışim katsayısı (CEB-FIP)
k_{hs}	: Bağıl nem faktörü (AASHTO)
k_f	: Dayanıklılık düzeltmesi (AASHTO)
k_s	: Boyut düzeltmesi (AASHTO)
k_{td}	: Zaman düzeltmesi (AASHTO)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Agregaların fiziksel özellikleri ve elek analiz sonuçları	14
Çizelge 2.2 : 1 m ³ için teorik birleşim	15
Çizelge 3.1 : Gerçek karışım oranları	17
Çizelge 4.1 : Maksimum basınç dayanımları ve elastisite modülleri (D: kür uygulanan, K: kür uygulanmayan).....	24
Çizelge 4.2 : 7 gün su kürü uygulanan ve uygulanmayan numunelerin 200 gün sonunda boy değişim değerleri	24
Çizelge 6.1 : ACI-209R.92 modelinin esas aldığı değişkenler.....	41
Çizelge 6.2 : Büzülme düzeltme faktörleri ilk nemli kütleme [53].....	41
Çizelge 6.3 : Tüm faktörler ve maksimum rötre değerleri	43
Çizelge 6.4 : 200 günlük hesaplanan ve ölçülen nihai rötre sonuçları	43
Çizelge 6.5 : Denklemlerde kullanılan çimento ile ilgili katsayılar [54].....	45
Çizelge 6.6 : CEB-FIB 2010 200 günlük nihai rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılması	46
Çizelge 6.7 : AASHTO 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	48
Çizelge 6.8 : GL2000 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	50
Çizelge 6.9 : B4 Model rötre hesaplama denklemleri	51
Çizelge 6.9 (devam) : B4 Model rötre hesaplama denklemleri	52
Çizelge 6.10 : Çimento tipine göre kuruma rötresi için faktörler [58].	52
Çizelge 6.11 : Çimento tipine göre otojen rötre için faktörler [58].	52
Çizelge 6.12 : B4 Model günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçları	53
Çizelge A.0.1 : İçme Suyu Arıtma Tesisleri Aylık Ortalama Analiz Raporları – Şubat 2023	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Geleneksel Betonlarda Rötire [17].	4
Şekil 1.2 : Hacim/eleman yüzey alanının rötreye etkisi [11].	5
Şekil 1.3 : Farklı taneli çimentolar ile üretilen harçlarda görülen toplam rötire miktarı ile su emme kapasitesi olan yüzey alanı ilişkisi [18].	6
Şekil 1.4 : Su/çimento, çimento miktarı ve su miktarının uzun dönemli büzülme üzerindeki etkisi [23].	7
Şekil 1.5 : Agregas/çimento oranı ve su/çimento oranının kuruma rötresi üzerindeki etkileri [24].	8
Şekil 1.6 : Kalker tozunun betonun kuruma rötresine etkisi (L1:10% Kalker Tozu, L2: 20% Kalker Tozu, L3: 30% Kalker Tozu, C: Referans) [14].	9
Şekil 2.1 : Karışım tane boyut dağılımı	14
Şekil 2.2 : Priz aşamasındaki numuneler	16
Şekil 3.1 : Ölçüm cihazı ve örnek numune ölçümü	18
Şekil 4.1 : Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanmayan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları	21
Şekil 4.2 : 8. 1 Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları	22
Şekil 4.3 : Su/çimento oranı 0.50 olan ve kür uygulanmayan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları	22
Şekil 4.4 : Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları	22
Şekil 4.5 : 0.4 su/çimento oranında kür uygulanan ve uygulanmayan numunelere ait rötire grafikleri	25
Şekil 4.6 : 0.5 su/çimento oranında kür uygulanan ve uygulanmayan numunelere ait rötire grafikleri	26
Şekil 4.7 : Beton numunelerin kılcallık katsayıları	27
Şekil 5.1 : Elastisite modülü ve rötire değerleri karşılaştırılması	30
Şekil 5.2 : Elastisite modülü ve kalker oranı karşılaştırılması	31
Şekil 5.3 : Kalker oranı değişiminin rötire miktarına etkisi	32
Şekil 5.4 : Su miktarının rötire ile ilişkisi	33
Şekil 5.5 : Çimento hamurunun rötire değişimi ile ilişkisi	33
Şekil 5.6 : Çimento miktarı ve rötire ilişkisi	34
Şekil 5.7 : Agregas miktarları ve ağırlık değişimi ilişkisi	35
Şekil 5.8 : Agregas miktarı ile rötire ilişkisi	35
Şekil 5.9 : Kılcallık katsayıları ve rötire ilişkisi	36
Şekil 5.10 : Kılcallık ve su miktarı ilişkisi	37
Şekil 5.11 : Kılcallık katsayısı & agregas miktarı ilişkisi	37
Şekil 5.12 : Kılcallık katsayısı&kalker oranı ilişkisi	37
Şekil 5.13 : Ağırlık değişimi & rötire ilişkisi	38
Şekil 6.1 : Yapılan rötire ölçümleri ile ACI209R.92 modeline göre yapılan rötire hesabının karşılaştırmalı dağılımı	44

Şekil 6.2 : CEB-FIB 2010 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	47
Şekil 6.3 : AASHTO 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	49
Şekil 6.4 : GL2000 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	51
Şekil 6.5 : B4 Model 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	53
Şekil 6.6 : Tüm modellemelerin ölçülen değerler ile karşılaştırılması (kür uygulanmayan numuneler için)	55
Şekil 6.7 : Tüm modellemelerin ölçülen değerler ile karşılaştırılması (kür uygulanan numuneler için).....	55
Şekil 6.8: Tüm modellerin karşılaştırmalı grafiği (kür uygulanmayan)	56
Şekil 6.9: Tüm modellerin karşılaştırmalı grafiği (kür uygulanan)	57



KÜRÜN BETONUN KURUMA ETKİSİNDE BÜZÜLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

ÖZET

Betonarme yapıların uzun hizmet süreleri boyunca maruz kaldığı içsel ve dışsal etkenler, yapıların hasar görmesine neden olabilir. Bu hasar mekanizmaları arasında, özellikle betonun erken yaşlarında sıkça karşılaşılan bir durum olan büzülme (rötre), çimento hidratasyonunda kullanılan su miktarının ve çevresel etkilerin neden olduğu su kaybından kaynaklanan hacimsel değişiklikleri içerir.

Su-çimento (S/C) oranı, çimento hamuru hacmi, agrega hacmi gibi bileşen parametreleri yanı sıra bağıl nem, sıcaklık, kür uygulaması gibi çevresel faktörler, büzülme üzerinde etkili olan kritik faktörlerdir. Bu bağlamda gerçekleştirilen çalışmada, kür uygulamasının, su-çimento oranının, agrega hacminin ve kalker tozu kullanımının büzülme üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan beton karışımlarında su/çimento oranları 0.40 ve 0.50, agrega hacimleri %60 ve %70, kalker tozu ise hacimce %0, %5 ve %10 oranlarında değişiklik göstermiştir. Bu parametreler doğrultusunda toplamda 24 farklı beton karışımı üretilmiş ve elde edilen numunelerin yarısı kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün süreyle su kürüne tabi tutulmuş, diğer yarısı ise sadece laboratuvar koşullarında açık havada bekletilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan boy değişimi ölçümü, ağırlık kaybı ölçümü, elastisite modülü deneyi ve basınç dayanımı deneyi, kılcalık deneyi betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan araştırmalar, uzun süreli kür uygulamasının betonun kuruma rötresini %10 ile %20 arasında azaltılabileceğini ortaya koymuştur [1]. Bu bağlamda, kür uygulamasının özellikle betonun kuruma etkisinde rötre üzerinde önemli bir azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. 200 günlük ölçümler sonucunda, kür uygulanan numunelerin kür uygulanmayan numunelere göre yaklaşık olarak %20 daha az kuruma rötresi gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın diğer sonuçlarına göre, ağırlık kaybının 200 gün boyunca devam ettiği ancak bu kaybın %50-%70'lik kısmının ilk 10 gün içerisinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kür uygulanan numunelerde, kür uygulanmayan numunelere göre su kaybının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Benzer su/çimento oranlarına sahip numunelerde, agrega miktarının artmasıyla birlikte ağırlık kaybında azalma gözlemlenmiştir.

Elastisite modülü ile rötre arasında ters orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kür uygulanan numunelerin, kür uygulanmayanlara göre daha tutarlı ve lineer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Hamur fazına eklenen kalker miktarının artmasıyla elastisite modülünün arttığı ve rötrenin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, bu değişimlerin oldukça düşük seviyelerde

gerçekleşmesi nedeniyle, kalker tozu kullanımının elastisite modülü ve rötre üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

Kalker tozu kullanımı basınç dayanımını düşürmekle beraber, poroziteyi arttırmakta ve hidratasyon ürünlerini azaltmaktadır

Çimento hamuru ve/veya içerisindeki su miktarının artmasıyla birlikte rötre miktarında bir artış gözlemlenmektedir. Kür uygulamasının bu ilişkiyi etkilemediği, ancak nihai sonuçlarda daha az rötre oluşumunu sağladığı anlaşılmaktadır.

Agrega miktarındaki artışla birlikte, hem ağırlık değişiminde hem de nihai rötrede belirgin bir azalma kaydedilmiştir.

Kılcallık katsayısının rötre ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Su miktarındaki artış, kılcallık katsayısını en fazla etkileyen faktörlerden biri olarak saptanmıştır. Betondaki agrega miktarının artışı, betonun hacimce daha fazla katı malzeme içermesine yol açmakta; bu durum, çimento hamurunun miktarını azaltarak kılcal boşlukların sayısını düşürmektedir. Kalker tozu kullanımı ise tüm değişkenler arasında en az etkiyi gösteren unsurdur. Kalker tozu, çimento hamurunun daha yoğun ve homojen bir mikroyapıya sahip olmasını sağlamakta; bu da kılcal boşlukların azalmasına ve dolayısıyla betonun kılcallığının düşmesine sebep olmaktadır.

Ağırlık değişimi arttıkça rötre miktarlarının arttığı gözlemlenmiştir. Rötre, betondaki nem kaybıyla doğru orantılıdır; dolayısıyla ağırlık kaybı ne kadar fazla olursa rötre miktarı da yüksek olacaktır.

Betonun dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından rötrenin önceden tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Rötre, güvenlik, ekonomik ve estetik bakımdan kritik bir unsurdur ve çatlakların onarımı yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenle, rötre tahmin modelleri mühendislerin uygun tasarım ve malzeme seçiminde yardımcı olarak yapısal güvenliği artırmakta ve ekonomik fayda sağlamaktadır. Bu alanda birçok çalışma gerçekleştirilmiş olup, tez kapsamında farklı rötre tahmin modelleri incelenmiştir. Bu modellerin sonuçları karşılaştırılarak, çeşitli tahmin yöntemlerinin doğrulukları değerlendirilmiş ve her bir modelin rötre tahminlerindeki hassasiyeti ve güvenilirliği ortaya konmuştur. Bu sayede, uygulama ile tasarım açısından en uygun yaklaşım belirlenmiştir.

Ölçülen rötre değerlerinin, uluslararası standart rötre modellerinin çoğunun tahminlerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak, modelleme sırasında daha fazla değişkeni dikkate alan Model B4 ve ACI modelleri, gerçek değerlere daha yakın tahminler sunmuştur.

Sonuç ve bulgular, betonarme yapıların tasarım kullanılan yapı malzemelerin seçimi ve uygulama yöntemlerinin büzülme etkilerini en aza indirmek amacıyla dikkate alınması gerektiğini vurgular niteliktedir.

THE EFFECT OF CURING ON THE SHRINKAGE BEHAVIOR OF CONCRETE

SUMMARY

The internal and external factors to which reinforced concrete structures are exposed over their long service lives can lead to damage. Among these damage mechanisms, shrinkage (also known as deformation) is a common phenomenon, especially in the early ages of concrete, and it involves volumetric changes resulting from the loss of water caused by the amount of water used in cement hydration and environmental influences.

Critical factors affecting shrinkage include component parameters such as the water-cement (W/C) ratio, the volume of cement paste, the volume of aggregate, as well as environmental factors like relative humidity, temperature, and curing practices. In this context, the study investigated in detail the effects of curing application, water-cement ratio, aggregate volume, and the use of limestone powder on shrinkage.

In the concrete mixes used in this study, the water-cement ratios varied at 0.40 and 0.50, aggregate volumes at 60% and 70%, and limestone powder at volumetric ratios of 0%, 5%, and 10%. A total of 24 different concrete mixtures were produced according to these parameters, and half of the obtained samples were subjected to water curing for 7 days after being removed from the mold, while the other half were left exposed to laboratory conditions. Measurements of dimensional changes, weight loss, modulus of elasticity, compressive strength, and capillarity were performed on the samples to evaluate their mechanical and physical properties.

The research revealed that long-term curing could reduce the drying shrinkage of concrete by between 10% and 20% [1]. In this context, it was determined that curing application has a significant reducing effect on shrinkage, particularly regarding the drying effect on concrete. As a result of 200 days of measurements, it was concluded that the samples subjected to curing exhibited approximately 20% less drying shrinkage compared to those that were not cured.

According to other findings of the study, weight loss continued for 200 days, with 50% to 70% of this loss occurring within the first 10 days. It was observed that the water loss in samples with curing was lower compared to those without curing. In samples with similar water-cement ratios, an increase in aggregate content resulted in a reduction in weight loss. In concrete specimens that are fully exposed to the air, the evaporation rate will be higher compared to those that have undergone curing. Consequently, the weight loss in the uncured specimens will be greater than that observed in the cured specimens.

A reverse proportional relationship between the modulus of elasticity and shrinkage was identified. As the modulus of elasticity of concrete decreases, it allows for a reduction in resistance to elastic deformation. Consequently, this leads to greater

shrinkage and, thus, increased shrinkage due to internal stresses caused by water loss. Furthermore, it was determined that the samples with curing provided more consistent and linear results compared to those without curing.

With an increase in the amount of limestone added to the paste phase, an increase in the modulus of elasticity and a reduction in shrinkage were observed. However, due to the relatively low levels of these changes, it was concluded that the use of limestone powder does not have a significant effect on the modulus of elasticity and shrinkage.

The use of limestone powder reduces compressive strength, increases porosity, and decreases the production of hydration products.

An increase in the amount of cement paste and/or the amount of water contained within it was observed to result in an increase in the amount of shrinkage. It was understood that curing application does not affect this relationship but rather ensures a lower occurrence of shrinkage in the final results. With sufficient curing, the water within the concrete reacts with cement particles, promoting the formation of additional calcium silicate hydrate (CSH). This leads to a denser microstructure, fewer capillary voids, and a reduction in shrinkage. This relationship explains why the effect of water content on shrinkage diminishes when curing is applied.

With the increase in aggregate content, a significant reduction was recorded in both weight changes and final shrinkage.

It was determined that the coefficient of capillarity is directly proportional to shrinkage.

An increase in the amount of water was identified as one of the most influential factors affecting the coefficient of capillarity. A high water-cement ratio leads to a greater water content in the concrete mix. This excess water evaporates after the hydration process, creating capillary voids within the concrete.

The increase in aggregate content in concrete leads to a greater volume of solid material, which reduces the amount of cement paste and decreases the number of capillary voids. It has been observed that the aggregate content has a more pronounced effect on shrinkage compared to the limestone content, but is less influential when compared to the water content.

The use of limestone powder showed the least effect among all variables. Limestone powder contributes to a denser and more homogeneous microstructure of the cement paste, which leads to a reduction in capillary voids and, consequently, a decrease in the capillarity of concrete.

As weight change increases, the amounts of shrinkage were observed to rise. Shrinkage is directly proportional to the moisture loss in concrete; therefore, the greater the weight loss, the higher the amount of shrinkage will be.

The ability to predict shrinkage in advance is crucial for the durability and longevity of concrete. Shrinkage is a critical element from safety, economic, and aesthetic perspectives, and the repair of cracks incurs high costs. For this reason, shrinkage prediction models assist engineers in making appropriate design and material choices, enhancing structural safety and providing economic benefits. Numerous studies have been conducted in this area, and various shrinkage prediction models have been examined in this thesis. By comparing the results of these models, the accuracies of various prediction methods have been evaluated, and the sensitivity and reliability of

each model in shrinkage predictions have been revealed. This enables the determination of the most suitable approach in terms of application and design.

It has been established that the measured shrinkage values exceed the predictions of most international standard shrinkage models. The results show that ACI 209R-92 and B3&B4 models provide the most accurate results in shrinkage estimations compared to other models. The GL 2000 model, although a simpler and more direct approach, may not provide as much accuracy in shrinkage estimations as more complex models such as B4 [59]. These comparisons reveal that Model B4, ACI and GL2000 are the most suitable and accurate estimation models. Among these 3 models, Model B4 is seen to provide the best results. However, the more advanced approach, B4 model, although it shows improved accuracy for high-performance concretes, requires careful application due to its complexity.

The results and findings emphasize that the design of reinforced concrete structures, the selection of construction materials used and application methods should be taken into consideration in order to minimize the effects of shrinkage. It is seen that the effect of curing application on shrinkage behavior in drying is important. In addition, the amount of aggregate, water/cement ratio and the amount of cement paste in the matrix affect shrinkage to different degrees. Among the models used to predict shrinkage, models that take more variables into account have obtained more consistent results.



1. GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan kimyasal yapı malzemesidir. Çimento, su, agrega, kum, mineral ve kimyasal katkı maddelerinin karışımıyla oluşturulur. Bu malzemelerin özellikleri, betonun dayanıklılığı ve dayanımı üzerinde etkili olabilir. Betonun dayanıklılığı, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından "Betonun hava koşullarına, kimyasal etkilere, aşınmaya ve diğer hizmet koşullarına dayanma yeteneği" olarak tanımlanmıştır [2]. Betonun dayanımı, gelecekteki yüklerle başa çıkma yeteneğini ifade eder ve betonun hizmet süresini etkiler.

Betonun hizmet süresi çevresel etkenlere bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilir ancak birçok çalışma, beton tasarımının hizmet süresini genellikle 50 yıl olarak öngörmektedir [3]. Bir betonun hizmet süresi, iç yapısındaki çatlaklar ve bu çatlakların miktarı ile ilişkilidir.

Beton çatlakları, dış yüklerden kaynaklanabileceği gibi betonun iç yapısı, kimyasal etkiler ve diğer nedenlerle de oluşabilir. Taze beton çatlakları ve oturma çatlakları gibi birçok çatlak türü arasında, rötrenin neden olduğu rötre çatlakları en önemli bir çatlak türlerindendir.

Rötre çatlakları, genellikle betonun içerisindeki suyun azalması nedeniyle oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar, betonun kuruma sürecindeki hacim değişiklikleriyle ilişkilidir. Bu durum, betonun dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu nedenle rötre konusunun araştırılması, bunu etkileyen faktörlerin incelenmesi önem arz etmektedir.

Tez literatürdeki bilgileri göz önünde bulundurarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulguları analiz etmeyi ve yorumlamayı hedeflemektedir. Bu çalışma, betonun rötre davranışını anlamak ve bu alandaki bilgiye katkıda bulunmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, betonun dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğünü artırmak için pratik uygulamalara ve tasarım yönergelerine ışık tutabilecek önemli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

Bulunan sonuçlar, uluslararası alanda kabul gören rötre modelleriyle karşılaştırılacak ve modeller arasındaki farklılıklar belirlenecektir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçlar üzerinden modeller arasında ilişki kurulacak ve tahmin modellemelerinin eksik veya geliştirilmeye açık yönleri detaylı bir şekilde incelenecektir.

1.1 Rötre

Amerikan Beton Enstitüsü'nün yaptığı tanıma göre rötre, nem içeriğindeki değişiklikler ya da kimyasal değişiklikler nedeniyle malzemenin boyutunda veya hacminde meydana gelen azalmayı ifade eder [2]. Çimento esaslı malzemelerde ise bu durum beton içerisindeki suyun hidratasyon nedeniyle kullanılması veya çevresel etkiler nedeniyle azalması sonucu çimento hamuru matrisinde meydana gelen su kaybından ortaya çıkar. Su kaybı hacimde azalmaya yani rötreye neden olur.

Birçok rötre tipi olmasına karşın Mokarem ve diğerlerinin yaptığı çalışmaya göre beton ile ilgili 4 ana tip rötre bulunabilir; plastik rötre, otojen rötre, kuruma rötresi ve karbonatlaşma rötresi [4].

Ancak bir başka çalışmada rötrenin karmaşık bir yapıda ve bir çok nedene bağlı olduğu farklı birçok rötre çeşitleri bulunduğu belirtilmiştir [5]. Bu rötre türleri arasında termik rötre örnek verilebilir.

1.1.1 Plastik rötre

Taze beton kalıba yerleştirildikten sonra yüzeye su çıkmasına terleme adı verilir. Çevresel etkiler nedeniyle yüzey suyunun buharlaşma hızı beton içerisindeki suyun terlemesinden daha hızlı gerçekleşir. Bu olay sonucunda beton yüzeyinde kuruma dolayısıyla büzölmeye başlar. Büzölmenin etkisiyle beton yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler betonun çekme dayanımını aştığında plastik rötre çatlakları meydana gelir.

Taze betonun kuruması aşamasında oluşan bu rötre genel olarak rötre çeşitleri arasında en erken zamanda görölmektedir. Genel olarak beton yüzeyinde ağsı bir yapıda çatlak oluşumuna neden olurlar. Bu tarz çatlaklar yüzeyde oluşması nedeniyle betonun basınç dayanımını yüksek mertebelerde etkilemezler. Ancak çatlaklar nedeniyle beton iç yapısı çevresel etmenlere karşı daha savunmasız hale gelecek ve hizmet ömrü etkilenecektir.

Betonun plastik rötre çatlamasını etkileyen faktörler arasında ortam sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı, beton sıcaklığı ve betonun terleme özellikleri bulunmaktadır [6].

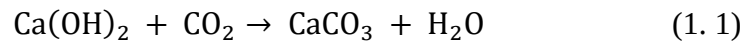
1.1.2 Otojen rötre

Otojen Rötre tanımı bundan yaklaşık 80 yıl önce, ilk olarak 1934 yılında Lyman tarafından yapılmıştır [7]. Betonun hidratasyonu aşamasında su tüketiminin bağıl nemde azalmaya sebep olduğu ve bu durumun bünyesel kuruma etkisiyle büzölmeye neden olduğu kabul edilmektedir [8]. Otojen rötrede temel prensip hidratasyon sırasında gerçekleşen kimyasal tepkimelerin neden olduğu hacimsel değişiktir. Tepkimeye giren su ve çimento hacmi tepkime sonucu oluşan ürünlerin hacminden daha düşük seviyededir. Yaşanan bu hacimsel değişiklik beton iç yapısında büzölmeye neden olur [9].

Otojen rötre hidratasyon ile eş zamanlı gerçekleştiği ve hidratasyon hızı ile ilişkili olduğu için Chandra ve arkadaşlarının da belirttiği gibi genellikle düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento içeriği tarafından etkilenir diğer bir ifadeyle su/çimento oranı arttıkça, otojen rötrenin azaldığı gözlemlenir [10]. Genel kabul olan su/çimento etkisinin yanında, Pekmezci'nin yaptığı çalışmada kullanılan agrega çeşidinin yüksek su tutabilme kapasitesine sahip olması ve lif kullanımının otojen rötreyi sınırlayabileceği belirtilmiştir [9].

1.1.3 Karbonatlaşma rötresi

Çimento matrisindeki kalsiyum hidroksitin Ca(OH)_2 atmosferdeki karbon dioksit CO_2 ile reaksiyonu sonucu karbonatlaşma meydana gelir [11]. Bu reaksiyon sonucunda Denklem (1.1) ile göröleceği gibi bir miktar H_2O ve CaCO_3 açığa çıkar.



Açığa çıkan su bir zaman sonra buharlaşmaya başlar. Çimento hamuru, içerdği suyun bir kısmını kaybetmişse bir miktar rötre sergiler [12]. Karbonatlaşma rötresi sonucu oluşan çatlaklar tıpkı plastik rötrede olduğu gibi yüzeysel ve ağısı yapıda oluşum sergilerler.

1.1.4 Termik rötre

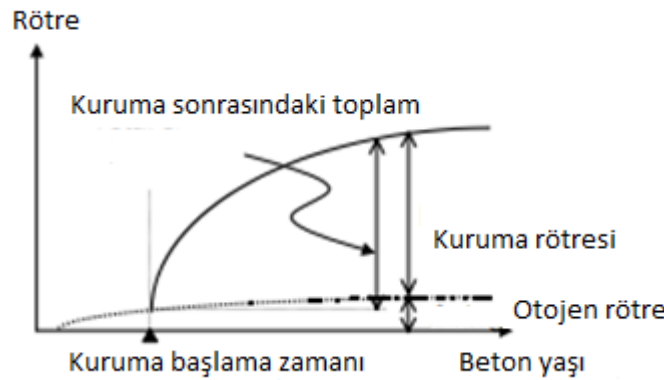
Termik veya diğer adıyla termal rötre, betonun ortam sıcaklığı etkisi ve çimento hidratasyonundan kaynaklanan ısı nedeniyle ortaya çıkar. Çimento ve suyun kimyasal

reaksiyonu sonucunda, betonun genişmesine neden olan ısı açığa çıkar ve süreç ilerledikçe gerçekleşen soğuma ile yüzeyde büzülme meydana gelir. Beton yüzeyi ile iç kısmı arasındaki sıcaklık farkından dolayı yaşanan rötre erken yaşlarda (ilk günler) meydana gelir [5].

1.1.5 Kuruma rötresi

Kuruma rötresi, sertleşmiş betonun kılcal nem kaybına bağlı olarak hacminin azalması veya büzülmesidir [13]. Başka bir ifade ile sertleşmiş beton içerisindeki suyun zaman içerisinde buharlaşması sonucu oluşan rötre türüdür. Bu rötre türü beton içerisindeki suyun buharlaşmaya başladığı ilk andan itibaren başlar ve kurumanın devam ettiği sürece devam eder. Yapılan çalışmalarda kuruma rötresini dökümden itibaren 5 yıl sonunda bile devam ettiği görülmüştür [14]. Dolayısıyla, kuruma rötresi hem erken dönem hem de uzun vadeli bir rötre türüdür [15].

Kılcal boşluklar içerisinde bulunan suyun hacimce nispeten büyük yer kaplaması nedeniyle betonda gerçekleşen toplam rötrein büyük bir kısmının kuruma rötresinden oluşacağı söylenebilir. Bilir ve Topçu'nun yapmış olduğu çalışmada normal dayanımlı betonlarda yaşanan rötrein tamamının kuruma rötresinden kaynaklandığı varsayılmıştır [16]. Benzer bir varsayım Şekil 1.1'de görüldüğü gibi [17] normal dayanımlı betonlarda otojen rötre seviyesi, kuruma rötre seviyesinin çok altında kalmaktadır.



Şekil 1.1 : Geleneksel Betonlarda Rötre.

Kuruma sonucu büzülme değerleri $2-6 \times 10^{-6}\mu\epsilon$ mertebesinde olup birçok farklı parametreye bağlıdır [5]. Çimento özellikleri, su/bağlayıcı oranı, agrega tipi ve oranı, sıcaklık, nem gibi faktörler, genel olarak kuruma rötresini etkileyebilir.

1.2 Rötreyi etkileyen faktörler

Çimento özellikleri, su/bağlayıcı oranı, agrega tipi ve oranı, sıcaklık, nem gibi faktörler, genel olarak kuruma rötresini etkileyebilir. Rötrenin oluşumunu ve büyüklüğünü etkileyen pek çok etmen vardır. Beton elemanın boyutu ve şekli gibi tasarım özellikleri, su/çimento oranı ve agrega tipi gibi karışım özellikleri, bağıl nem, sıcaklık ve rüzgâr hızı gibi dış faktörler rötre üzerinde etkili olan başlıca etmenlerden sayılmaktadır.

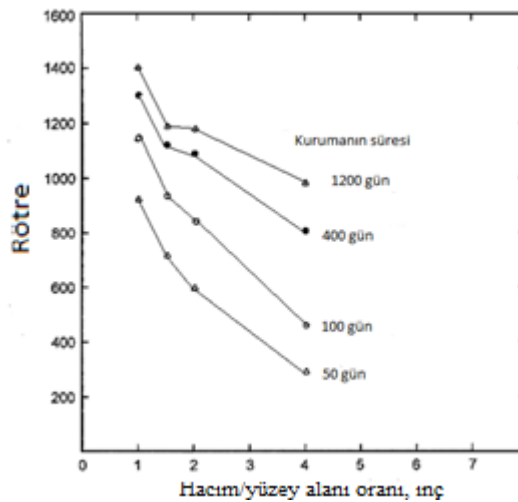
1.2.1 Tasarım özellikleri

Beton elemanın şekli ve boyutları rötre üzerinde etkilidir. Oluşturulan beton elemanın boyutunun büyümesi daha yavaş kurumaya neden olacak ve daha az rötre yapmasını sağlayacaktır. Bunun temel nedeni büyük boyuttaki numunelerin kuruma hızının küçük boyuttaki elemanlara göre daha yavaş olmasıdır. Rötrenin oranının genellikle, Denklem (1.2) de gösterildiği gibi, numune hacminin kuruyan yüzey alanına oranıyla ters orantılı olduğu öne sürülmektedir. [11]

$$Rötre \propto \frac{1}{(V/S)^2} \quad (1.2)$$

Bu denklem üzerinde gösterilen S=yüzey alanı ve V= Hacim tanımlamaktadır.

Farklı hacim-yüzey alanı oranına sahip beton numunelerin rötreleri ile ilgili veriler Şekil 1.2 üzerinde [11] gösterilmiştir.



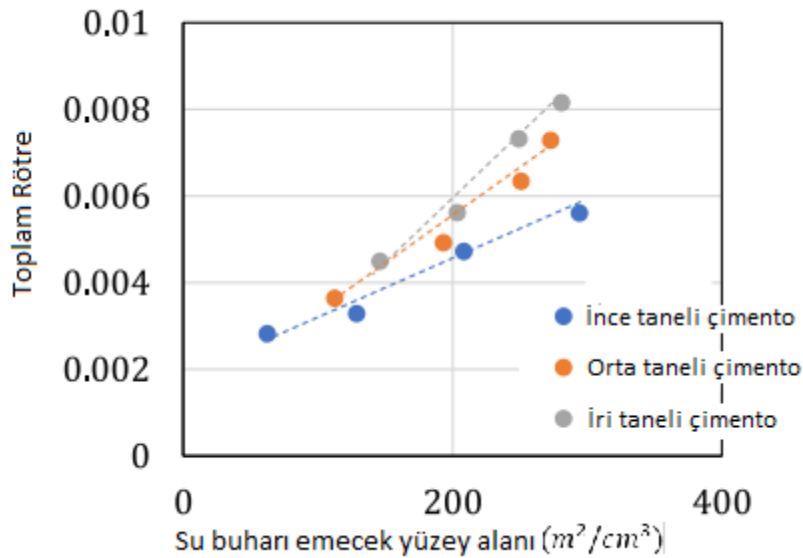
Şekil 1.2 : Hacim/eleman yüzey alanının rötreye etkisi.

Büzölme numunesinin geometrisi, nemin ortamdan uzaklaşması gereken mesafeyi etkiler. Aynı zamanda, numunenin veya elemanın kesiti boyunca meydana gelen homojen olmayan büzölmeye bağlı olarak kuruyan beton içindeki gerilim yığılmalarını da etkiler. [11]

1.2.2 Çimento özellikleri

Çimento tipi daha çok hidratasyon nedeniyle görülen otojen rötre üzerinde etkilidir. Hidratasyon oluşumunda tepkimeye girecek madde özelliklerinin değişimi yaşanacak olan hacimsel değişimi etkileyerek otojen rötrenin oluşumu azaltabilir veya arttırabilir.

Çimentoların düşük sülfat içeriği, kuruma rötresini artırabilir. Alüminyum içeriği yüksek olan çimentolarda genellikle rötre çok hızlı ve etkili bir şekilde meydana gelir [16]. Ayrıca çimento inceliğinin artmasıyla birlikte rötre de artar. Yapılan çalışmalarda çimento inceliğinin artmasıyla hidratasyon derecesinin artacağı bu nedenle daha fazla rötre yapabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 1.3'den görüleceği [18] üzere daha ince taneli yapıya sahip karışımlar daha fazla rötre oluşturmuştur. Aynı grafikten bu karışımların daha yüksek eğime sahip olduğu görülmüştür [18].



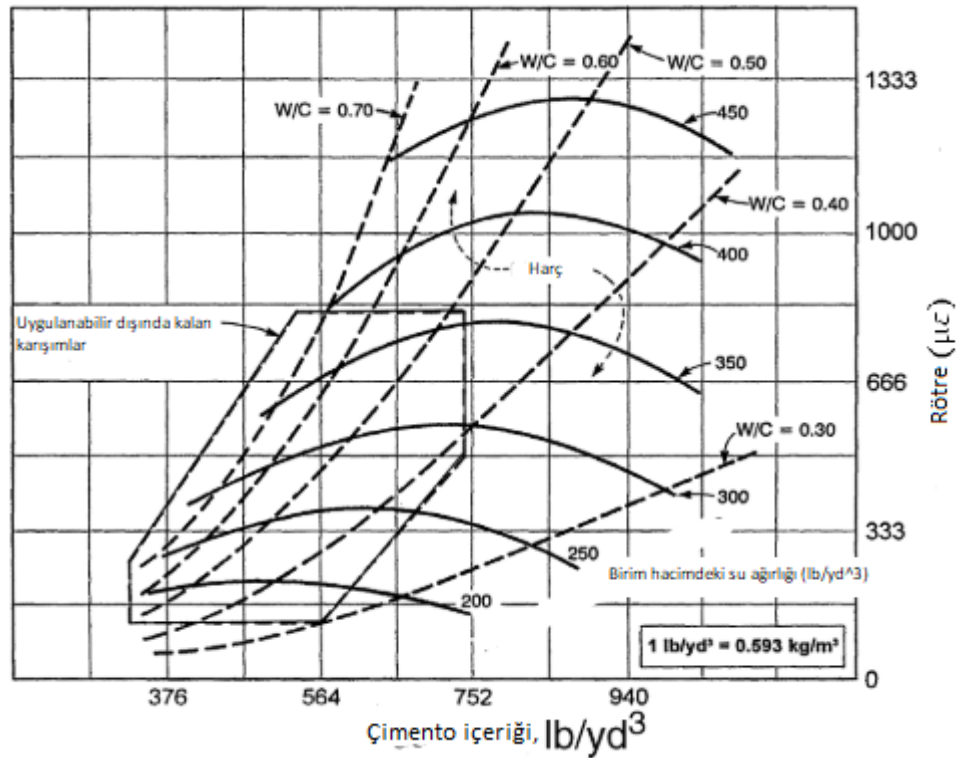
Şekil 1.3 : Farklı taneli çimentolar ile üretilen harçlarda görülen toplam rötre miktarı ile su emme kapasitesi olan yüzey alanı ilişkisi.

1.2.3 Su/çimento oranı, su ve çimento miktarının etkisi

Piasta ve Zarzycki' nin yaptığı çalışmalarda 120 günlük rötre deneylerinde su/çimento oranı arttıkça rötrenin arttığını gözlemlemişlerdir [19]. Bu noktada rötrenin

artmasındaki temel etkenin kuruma rötresinden kaynaklanmaktadır. Su/çimento oranının artmasıyla çimento matrisindeki su miktarı artacak ve kuruma miktarının artmasına sebep olacak, bu da kuruma rötresini arttıracaktır. Kuruma rötresine karşı olarak ise düşük su/çimento oranına sahip betonların yüksek su/çimento oranına sahip betonlara göre daha fazla otojen rötre ve plastik rötre yaptığı gözlemlenmiştir [20,21]. Zhang ve arkadaşları düşük dayanımlı betonlar (yüksek su/çimento oranı) için, kuruma rötresi toplam büzülmeyi oluşturan ana bölümü temsil ederken yüksek dayanımlı betonlarda (düşük su/çimento oranı), otojen rötre genellikle toplam büzülmenin büyük kısmını oluşturduğunu göstermiştir [22].

Karışım içindeki toplam su ve çimento miktarının artması, rötreyi arttırma eğilimindedir çünkü eklenen su ve/veya çimento, karışımdaki agrega içeriğini azaltacaktır [11]. Şekil 1.4'te [23] su ve çimento içeriklerinin rötreye etkisi görülmektedir.

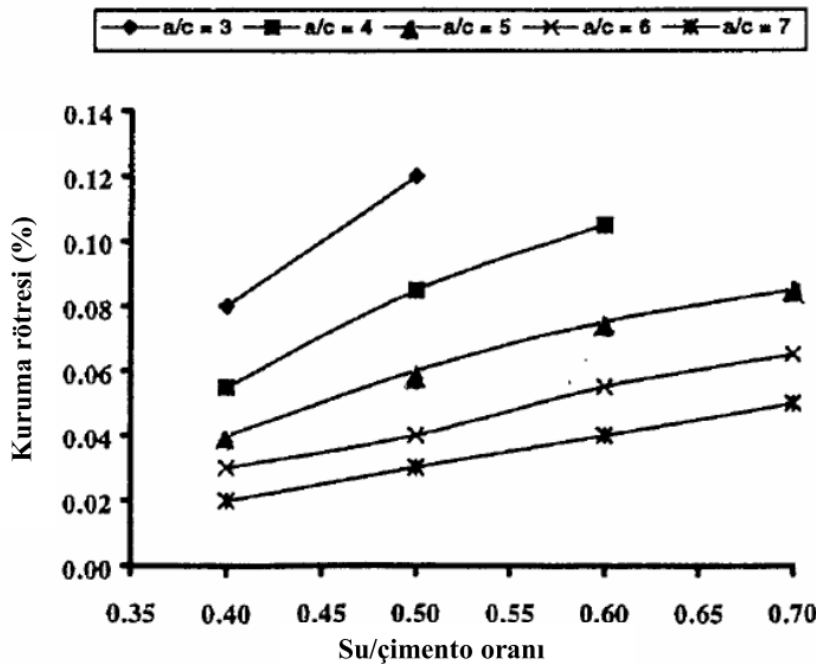


Şekil 1.4 : Su/çimento, çimento miktarı ve su miktarının uzun dönemli büzülme üzerindeki etkisi.

Şekil 1.4 üzerinde görülebileceği üzere 0.40 su/çimento oranında çimento miktarı 376 lb/yd^3 ($223 kg/m^3$)'ten 564'e ($334 kg/m^3$) çıkması durumunda rötre miktarında 150 $\mu\epsilon$ artış görülmektedir.

1.2.4 Agregat türü ve oranı

Belirli bir yaş için iri agregat miktarının artmasıyla otojen ve kuruma rötresi azalacaktır [22]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde agregat miktarının artmasıyla matris içerisindeki hamur miktarının azaldığı ve gerçekleşen büzülme miktarının düştüğü görülmektedir. Şekil 1.5'te üzerinde görüleceği gibi sabit bir su/çimento oranında agregat oranının artmasına bağlı olarak rötre azalmaktadır [24].



Şekil 1.5 : Agregat/çimento oranı ve su/çimento oranının kuruma rötresi üzerindeki etkileri.

Beton üretiminde kullanılan agregaların rötre üzerindeki etkileri, sadece agreganın türüne değil, aynı zamanda şekline ve sertliğine de dayanmaktadır. Ayrıca aynı hacimdeki büyük boyutlu agregalar küçük boyutlu agregalara göre yüzey alanlarının daha düşük olması nedeniyle daha düşük su tutarlar. Bunun sonucunda daha düşük rötre yapmış olurlar [25].

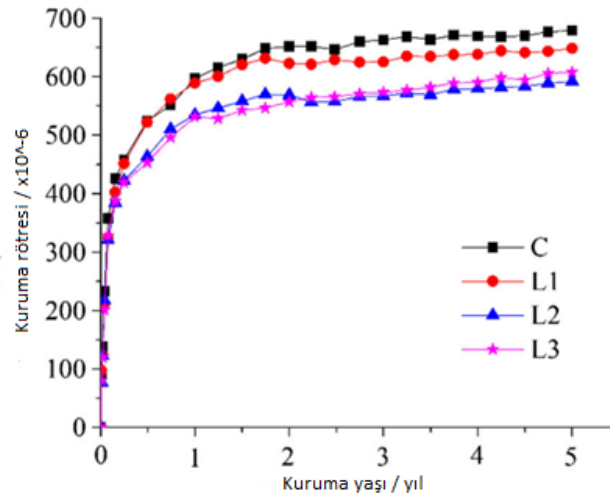
Hafif agregalar genellikle su emme eğiliminde olan gözenekli bir dokuya sahiptir. Bu yapı beton dökümünden sonra agregat içerisinde su depolayabilme olanağı sağlar, depolanan su ise daha sonrası için iç kürlenmeye olanak tanır [26-28]. İç kürlenme sayesinde beton özellikleri olumlu yönde gelişerek rötre oluşumunu engelleyebileceği düşünülmektedir.

1.2.5 Kalker tozu kullanımı

Kalker tozunun rötre üzerine etkisini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde özellikle düşük su/ imento oranlarında  imento hamuruna kalker tozunun eklenmesi nihai rötrenin %28 civarlarında azalmasını sağladığı görülmüştür [29].

Kalker tozu kullanıldığında  imento hamuru hacmi azaldığı için rötre yapabilme kapasitesi azalmaktadır. Kalker tozu miktarının yüksek seviyelerde olması bu etkiyi arttıracaktır.

Wang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada 5 yıl süresince, %10 kalker tozu içeren betonun kuruma r tresinin, kalker tozu içermeyen referans betonundan biraz daha az olduğunu, ancak, %20 ve %30 kalker tozu içeren betonların kuruma r tresinin, referans betonundan belirgin bir şekilde daha düşük olduğunu göstermişlerdir [14]. şekil 1.6'da uzun süreli ölçümlerde bu farkın belirginleştiği açıkça görülmektedir [14].



şekil 1.6 : Kalker tozunun betonun kuruma rötresine etkisi (L1:10% Kalker Tozu, L2: 20% Kalker Tozu, L3: 30% Kalker Tozu).

1.2.6 Ortam sıcaklığı

Ortam sıcaklığı betonda oluşacak rötre miktarını ve hızını etkilemektedir. Sıcaklığın artışı ile betondan daha fazla suyun buharlaşması nedeniyle rötre artarken, hidrasyon hızı artması ile rötre oluşum süresi kısalmaktadır.

Uzun süreli yüksek sıcaklık maruziyeti, geleneksel betonda rötrenin oluşma hızında yaklaşık %6 ve nihai rötre miktarında %15'lik bir artışa neden olmaktadır [11].

1.2.7 Bağıl nem

Beton içerisindeki suyun uzaklaşması bulunduğu ortamın bağıl nemi ile ters orantılıdır. Bu nedenle bağıl nem miktarı arttıkça rötre miktarı azalır [30].

Rötrenin bağıl nem ile ilişkisi AASHTO modellemesinde kullanılan k_{hs} bağıl nem katsayısından da anlaşılabilmektedir, Denklem (1.3) ile katsayı hesabı gösterilmiştir [31].

$$k_{hs} = 2.0 - 0.014H \quad (1.3)$$

Denklem içerisinde H bağıl nemi ifade eder. Bu denklem üzerinden bağıl nemin yükselmesi durumunda rötrenin azalacağı görülmektedir.

1.2.8 Kür

Betonda istenen özelliklerin gelişmesi için hidrasyonun yeterli sürede gerçekleşmesini sağlamak adına uygun sıcaklık ve nem koşullarının oluşturulmasına kür denir [2].

Kür uygulamasının beton dayanımı üzerindeki etkisi bilinen bir gerçektir. Saha uygulamalarında daha yüksek dayanımlı beton elde edilebilmesi adına kür uygulaması tavsiye edilmektedir. Kür uygulamasının dayanıma etkileri olduğu gibi rötre üzerinde de etkisi bulunmaktadır.

Betona yeterince kür uygulaması yapılmazsa, yüzey tabakasının geçirgenliği beş katından daha fazla artabilir [32]. Yüzey tabakasının geçirgenliğinin azalması benzer şekilde iç yapıda bulunan suyun çıkışını, dolayısıyla, suyun kaybını azaltmaya yarayacaktır.

Visagie ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, herhangi bir kürlenme uygulamasının, potansiyel plastik rötre çatlağının hafifletilmesine yardımcı olduğu belirtilmiştir [33]. Bu doğrultuda kürlenme süresinin etkisini araştırmak adına Carlson su/çimento oranı 0.40 olan numunelere, sırasıyla 2 gün ve 28 gün boyunca kapalı ortamda kür uygulamıştır. Sonuç olarak 90 günlük rötrelere 2 gün kür uygulanan numunede 3500 $\mu\epsilon$ ve 28 gün kür uygulanan numunede 2210 $\mu\epsilon$ olarak bulunmuştur [34].

Uzun süreli kür uygulaması genel olarak kuruma rötresini 10%-20% arasında azaltır [16]. Ancak bu etki farklı su çimento oranına sahip betonlar için değişiklik gösterebilir.

Tez kapsamında, betonun önemli özelliklerini etkileyerek dayanıklılığını ve performansını belirleyen kür uygulamalarının betonun kuruma sürecindeki büzülme davranışına olan etkilerini inceleyeceğiz. Bu çerçevede, agrega oranı, su/çimento oranı, çimento hamuru miktarı ve kalker oranı gibi temel bileşenlerin, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştıracağız. Bu çalışma, betonun dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını optimize etmek amacıyla kür uygulamalarının ve malzeme bileşenlerinin seçiminin rötre üzerindeki önemini vurgulamayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, inşaat sektörüne bir katkı sağlamak ve beton teknolojisinin gelişimine yönelik pratik bilgiler sunmak amacıyla kullanılacaktır. Bu nedenle, kür uygulaması, agrega oranı, su/çimento oranı, çimento hamuru miktarı ve kalker oranının betonun genel performansına olan etkilerini anlamak, inşaat endüstrisinde daha sürdürülebilir ve dayanıklı beton tasarımları için temel bir adım olacaktır.



2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında su/çimento oranının etkisini görmek amacıyla hazırlanan, oranları 0.40 ve 0.50 olan karışımlara, agrega miktarının değişimini gözlemlemek için hacimce %60 ve %70 olarak değişen agrega kullanılmıştır. Son olarak oluşturulan karışımlardaki çimento hamuru etkisini görebilmek amacıyla kalker tozu inert madde olarak hacimce %0, %5 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda kürün betonun kuruma etkisinde büzülme davranışına etkisini gözlemleyebilmek adına toplam 24 farklı beton karışımı üretilmiş ve elde edilen numunelerin yarısı kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün süreyle su kürüne tabi tutulmuş, diğer yarısı ise sadece laboratuvar koşullarında açık havada bekletilmiştir. $24^{\circ}\text{C} \pm 3$ sıcaklık ve $\%35 \pm 5$ bağıl nemdeki ortamda bekletilen 70mm x 70mm x 280mm prizma numuneler üzerinde boy değişimi ölçümü, ağırlık kaybı ölçümü yapılmıştır. 100mm x 200mm silindir numuneler üzerinde elastisite modülü deneyi ve basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Kılcallık deneyi için ise prizma numuneler kesilerek 70 mm x 70mm x 140mm prizma numuneler elde edilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.1 Malzemeler

Üretilen beton karışımlarda özgül ağırlığı $3,12 \text{ kg/dm}^3$ olan CEM I 42.5 R tipi çimento, özgül ağırlığı $2,710 \text{ kg/dm}^3$ olan kalker tozu ve Rheocon firması tarafından temin edilen süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

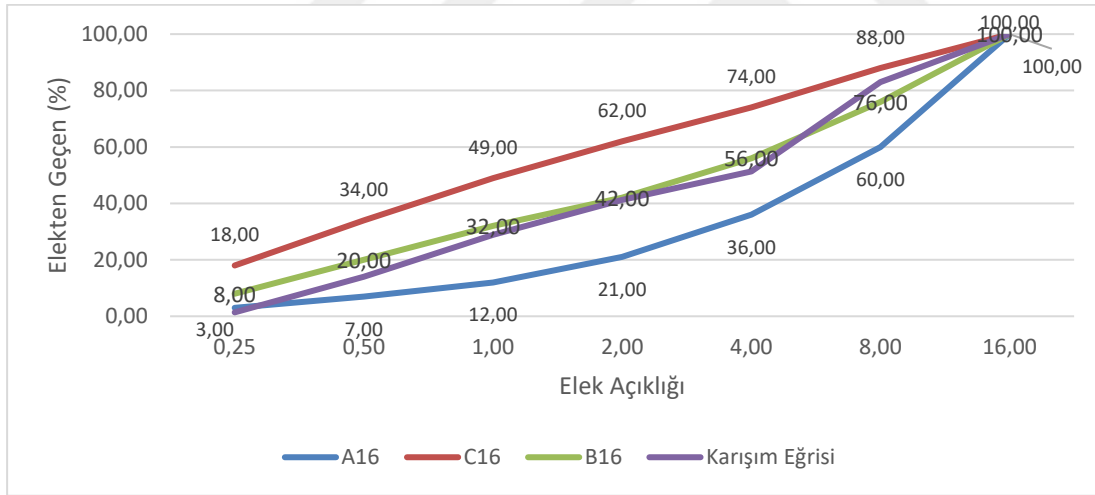
Beton karışım suyu olarak kullanılan şebeke suyunun özellikleri, deneyin yapıldığı tarih olan Şubat 2023 tarihli İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin resmi sitesinden alınan içme suyu arıtma tesisleri aylık ortalama analiz raporu (Şubat 2023) Çizelge A.1 ile EKLER bölümü içerisinde gösterilmiştir. [35].

Yapılan çalışmalarda en büyük agrega boyutu 16mm olan kırmataş ve 4mm olan doğal kum kullanılmıştır. Elek analiz sonuçları, incelik modülü ve özgül ağırlıklar Çizelge 2.1 üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Agregaların fiziksel özellikleri ve elek analiz sonuçları.

Elek Çapı (mm)	Elekten Geçen (Gr)	
	Doğal Kum	Kırmataş
0,2	1,74	1,05
0,5	26,26	1,86
1	55,8	1,88
2	80,52	2,03
4	96,56	6,18
8	100	65,92
16	100	100
İncelik Modülü (k)	2,39	5,21
Özgül Ağırlık (gr/dm ³)	2,704	2,63

Agrega ve doğal kum karışımlarının gradasyon eğrisi TS 706 EN ve TS 707 standard limitlerine [36,37] uygun olacak şekilde standartta belirtilen B16 eğrisine en yakın olan karışım doğal kum ve kırmataşın kütlece eşit olduğu durumda elde edilmiştir. Tane boyut dağılımı eğrisi Şekil 2.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Karışım tane boyut dağılımı.

2.2 Beton Karışım Oranları

Beton karışımlarının tasarımında iki farklı su/çimento oranı seçilmiştir (0.40 ve 0.50). Her bir su/çimento oranı için toplam hacmin %60 ve %70'ini oluşturacak şekilde iki ayrı agrega konsantrasyonu kullanılmıştır. Ayrıca beton karışımlarında çimento hamuru hacmini değiştirmek amacıyla inert madde olarak kabul edilen kalker tozu, çimento hacminin %0, %5 ve %10'u oranında çimento ile yer değiştirmiştir.

Oluşturulan beton karışımlarının teorik olarak hesaplanmış detayları Çizelge 2.2 ile gösterilmiştir. Bu sistematik yaklaşım, su/çimento oranı, agrega hacmi ve kalker tozu oranı gibi kritik parametrelerin beton özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla benimsenmiştir.

1 m³ için örnek karışım hesabı Denklem (2.1) ile gösterilmiştir. Denklem içerisinde gösterilen (1000-X) değeri çimento hamuru hacmini ifade etmektedir.

$$(1000 - X) = \left(\frac{C}{d_c} \right) + (C * W/C) + (C/d_c) * \%L \quad (2.1)$$

C: Çimento kütlesi (kg/m³) X: Hacimce agrega miktarı W/C: Ağırlıkça su/çimento oranı L: Hacimce kalker tozu oranı d_c: Çimento özgül ağırlığı d_c: Kalker özgül ağırlığı

Çizelge 2.2 : 1 m³ için teorik birleşim.

Karışım Kodu	Çimento Ağırlığı (kg)	Kalker Ağırlığı (kg)	Su Ağırlığı(lt)	Kum (kg)	Kırmataş (kg)
W40A60L0	552,5	0	221	788,5	811
W40A60L05	540,5	23,5	216	788,5	811
W40A60L10	529	46	211,5	788,5	811
W40A70L0	413,5	0	165,5	920	946,5
W40A70L05	404,5	17,5	162	920	946,5
W40A70L10	396	34,5	158,5	920	946,5
W50A60L0	485	0	242,5	788,5	811
W50A60L05	476	20,5	238	788,5	811
W50A60L10	467	40,5	233,5	788,5	811
W50A70L0	363	0	181,5	920	946,5
W50A70L05	356	15,5	178	920	946,5
W50A70L10	349,5	30	175	920	946,5

Karışım kodlarında üzerinde W: su/çimento oranını, A: hacimce agrega oranını ve L: hacimce kalker tozu oranını ifade etmektedir. Örnek olarak W40 ifadesi 0.4 s/ç oranına sahip karışımı, W40A60 ifadesinde 60% agrega oranına sahip karışımı, W40A60L05 ifadesinde hacimce 5% oranında çimentonun kalker ile yer değiştirildiği karışımı ve W40A60L05 D ifadesin de numune için kür uygulanmadığını göstermektedir.

2.3 Beton Üretimi

Üretilen her betondan elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri için 6 adet 100 mm x 200 mm boyutlarında silindir , rötre ve ağırlık ölçümleri için 6 adet 70mm x 70mm x 280 mm boyutlarında prizma numuneler alınmıştır.

Beton karışımları eşeksenli karıştırıcıda harmanlanmıştır. Hazırlanan karışım 8-10 dk karıştırıldıktan sonra çökme deneyi yapılarak kıvamı ölçülmüştür. Sarsma tablası kullanılarak yerleştirilen numuneler ertesi gün kalıptan sökülüne kadar plastik örtü altında Şekil 2.2 de görüldüğü üzere saklanmıştır.



Şekil 2.2 : Priz aşamasındaki numuneler.

Kalıplardan çıkarılan 3 adet silindir ve 3 adet prizma numune, 7 gün boyunca sıcaklığı $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan havuzda tutulmuştur. Geriye kalan 3 adet silindir ve 3 adet prizma numune ise $24^{\circ}\text{C} \pm 3$ sıcaklık ve $\%35 \pm 5$ nemin sabit tutulduğu kapalı odaya götürülerek ağırlık ve boy ölçümlerine başlanmıştır.

Kür havuzuna bırakılan numuneler, 7 gün su kürüne tabi tutulduktan sonra $24^{\circ}\text{C} \pm 3$ sıcaklık ve $\%35 \pm 5$ bağıl nemin sabit tutulduğu odada saklanmıştır. Bu ağırlık ve boy ölçümlerine 200 gün boyunca devam edilmiştir.

3. DENEYLER

Çalışma kapsamında taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

Beton taze haldeyken birim hacim ağırlık ve çökme değerleri ölçülmüştür. Beton prizini alıp sertleşmesi akabinde rötre, ağırlık kaybı, elastisite modülü, basınç dayanımı ve kılcallık değerleri ölçülmüştür.

3.1 Taze Beton Deneyleri

Tüm karışımlarda $18 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$ çökme elde edilecek şekilde akışkanlaştırıcı dozajları değiştirilmiştir. Taze birim hacim ağırlık ve çökme değerleri ile karışım oranları Çizelge 3.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Gerçek karışım oranları.

	Çimento (kg)	Kalker (kg)	Su (kg)	Kum (kg)	Kırmataş (kg)	Hava Miktarı (dm^3)	Çökme (cm)	Birim Hacim Ağırlık (kg/dm^3)
W40A60L0	550	0	220	786	808	5,3	18	2,36
W40A60L05	538	23	215	785	807	6,5	21	2,37
W40A60L10	526	46	210	785	807	6,6	19,2	2,37
W40A70L0	412	0	165	917	943	5,0	21,5	2,44
W40A70L05	404	17	162	918	945	3,5	21	2,45
W40A70L10	395	34	158	919	945	3,3	18	2,45
W50A60L0	483	0	241	785	808	6,1	24	2,32
W50A60L05	474	20	237	785	808	6,3	21	2,32
W50A60L10	465	40	232	785	808	5,9	19	2,33
W50A70L0	363	0	181	919	945	3,2	18	2,41
W50A70L05	356	15	178	919	946	2,6	18	2,41
W50A70L10	350	30	175	920	947	1,2	18	2,42

3.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Kür uygulanmayan numuneler, kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra, kür uygulanan numuneler ise 7. gün sonunda rötre ve ağırlık kaybı ölçümlerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı ve elastisite modülü ölçümleri ise 28. gün sonunda

gerçekleştirilmiştir. Tüm bu ölçümlerin tamamlanmasını takiben kılcallık deneyleri yapılmıştır.

3.2.1 Rötire ve ağırlık kaybı ölçümleri

Hazırlanmış olan 12 farklı beton karışımının her birinden 6 adet silindir ve 6 adet prizma eleman üretildi. Üretilen numunelerin yarısı kalıptan çıkartıldıktan sonra 7 günlük kür uygulandı ve akabinde rötire ve kütle kaybı ölçümlerine başlandı. Diğer yarısı ise kalıptan çıkartıldığı gibi ölçümlere başlandı. Ölçüm süresi boyunca numuneler 24°C sıcaklık ve 35% bağıl nem ortamında saklandı. Ölçümler, milimetrenin $10^{-3} mm$ hassasiyetinde elektronik değişim ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, toplamda 200 gün boyunca tekrarlanmış olup, özellikle boy değişiminin en fazla yaşandığı ilk 2 hafta içinde günlük ölçümler yapılmıştır. Ölçüm aleti ve numune ölçüm örneği Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. Numunelerin boy değişimleri ile birlikte kütle kayıpları da belirlenmiştir.



Şekil 3.1 : Ölçüm cihazı ve örnek numune ölçümü.

3.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyi

Silindir (100mm x 200mm) numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyleri 28. günde gerçekleştirilmiştir. Aynı tip 3 karışımdan bir tanesine doğrudan yükleme yapılmış ve göçme gerçekleşene kadar yükleme devam edilmiştir.

İlk numunenin basınç dayanımının %35'i hesaplanmıştır. Kalan 2 numuneye, bu hesaplanan yük uygulanmıştır. Bu aşamada numunelerin elastik deformasyonu not edilmiştir. %35 yük seviyesine kadar uygulanan yük ve karşılık gelen deformasyonlar kaydedilmiştir. Uygulanan yük ve deformasyon verilerinden yük-deformasyon eğrisi oluşturulmuş, elastik davranış gösteren bölgeden elastisite modülü bulunmuştur.

3.2.3 Kılcallık deneyi

Kılcal su emme deneylerinde 70mm x 70mm x 280 mm boyutlu numunelerden kesilerek elde edilen parçalar kullanılmıştır. Numuneler, ilk olarak 2 gün boyunca 80°C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuş akabinde oda sıcaklığına gelene kadar 1 saatlik soğumaya bırakılmıştır. Numuneler sadece bir yüzeyden su girişine izin verilecek şekilde hazırlanması amacıyla numunelerin su ile temas edecek yükseklikte yan yüzeyleri parafinle kaplanmıştır. Deney başlangıcında ilk ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra, 15. ve 30. dakikalarda ölçümler yapılmış, devamında ise 30 dakika aralıklarla 240 dakikaya kadar ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu sürecin ardından, numunelerin 24 saatlik ölçümleri yapılmıştır.

Kılcallık katsayısı kabul edilen hesaplama yöntemi olan Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır [38].

$$k_c = (Q/A)^2 * 1/t \quad (3.1)$$

k_c = kılcal su emme katsayısı (cm^2/sn)

Q = t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)

A = kılcal su emme yüzey alanı (cm^2)

t = ölçüm aralığı süresi (sn)



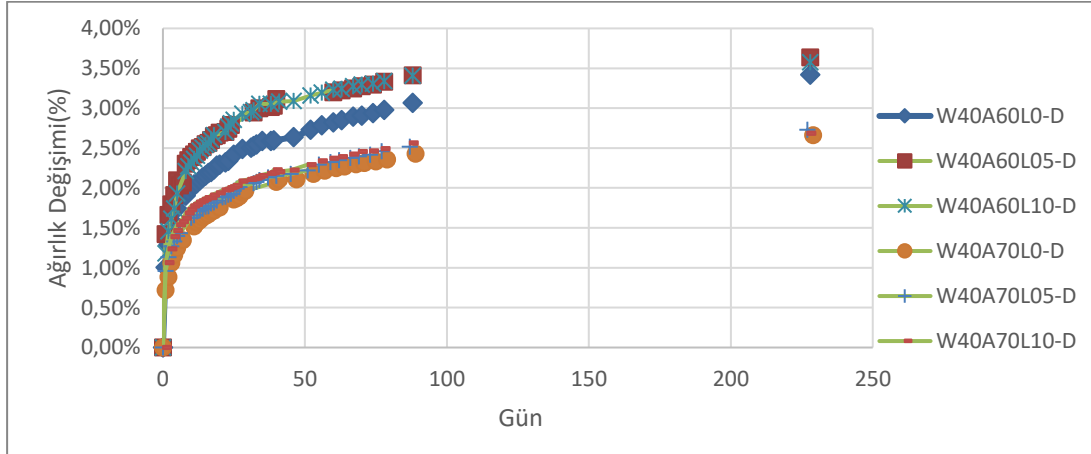
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Deney sonuçlarının daha anlaşılır bir şekilde incelenebilmesi için, veriler kür uygulanma koşulları ve su/çimento oranlarına göre ayrı grafiklerde sunulmuştur. Bu veriler, ilişkilerinin değerlendirilmesi amacıyla Bölüm 5'te karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşım, deneysel bulguların daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

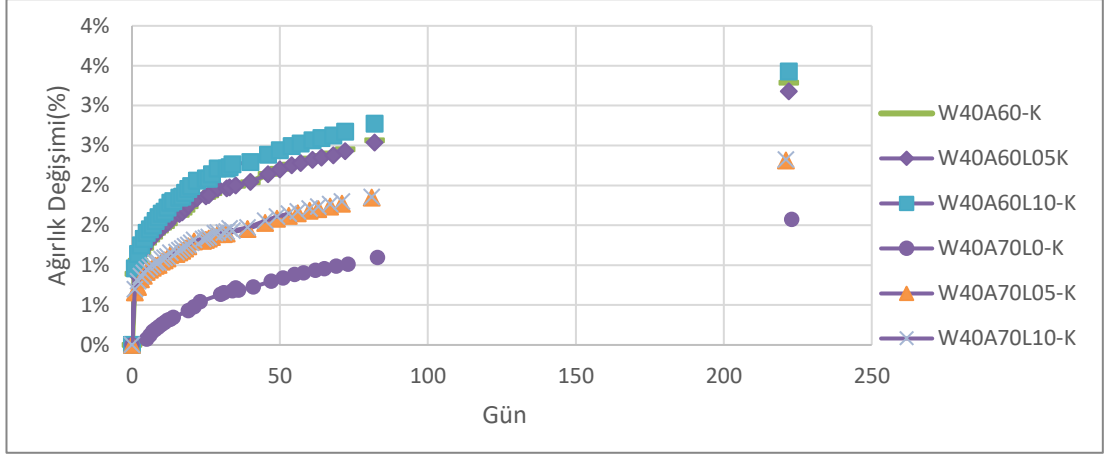
4.1 Ağırlık Kaybı Ölçüm Sonuçları

Kalıplardan çıkartılan beton numunelerde kür uygulanmayanlar direkt olarak kür uygulananlar ise 7. günün sonunda ağırlık ölçümlerine başlanmıştır. Ağırlık kaybı değerleri beklenildiği gibi ilk günlerde yüksek seviyede ve devam eden günlerde düşük seviyede gerçekleşmiştir.

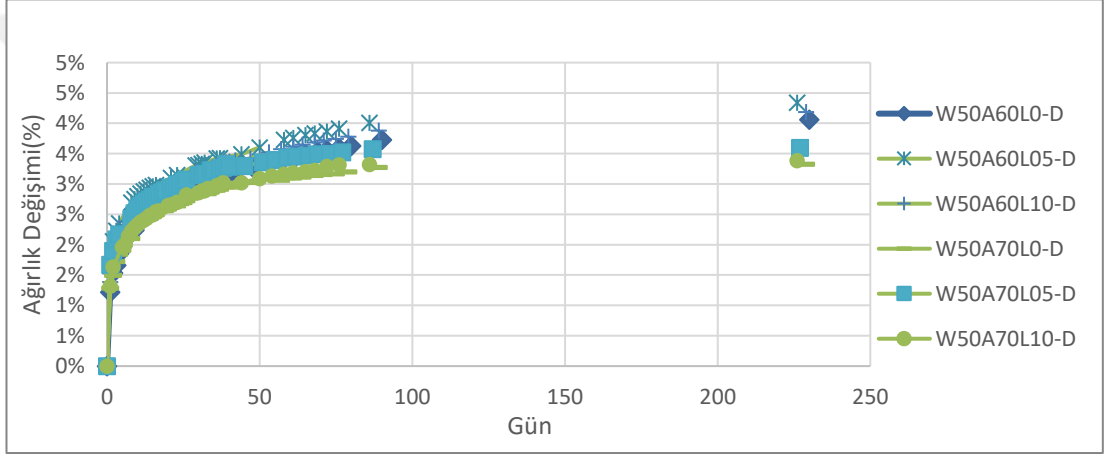
S/Ç oranı 0.40 ve 0.50 olan karışımların değişimleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de sunulmuştur.



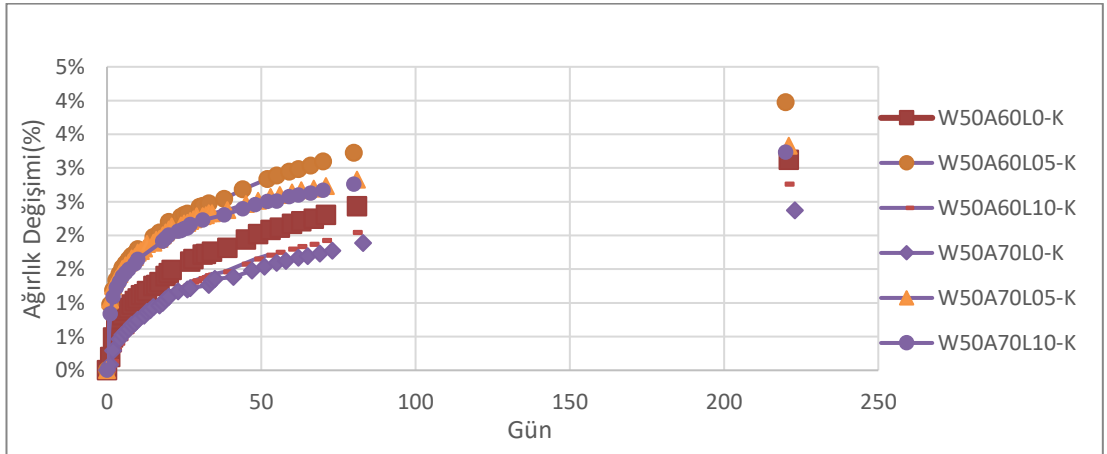
Şekil 4.1 : Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanmayan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları.



Şekil 4.2 : 8. 1 Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları.



Şekil 4.3 : Su/çimento oranı 0.50 olan ve kür uygulanmayan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları.



Şekil 4.4 : Su/çimento oranı 0.40 olan ve kür uygulanan numunelerin ağırlık kaybı sonuçları.

Bu grafiklerde gösterilen verilere göre, 200 günlük toplam su kaybının yaklaşık %50-%70'i ilk 10 gün içerisinde gerçekleşmiştir.

Ayrıca, kür uygulanan numunelerle kür uygulanmayan numuneler arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Kür uygulanan numunelerde su kaybının, kür uygulanmayan numunelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tamamen havaya maruz bırakılan beton numunelerinde, kür uygulanan numunelere kıyasla buharlaşma oranı daha yüksek olacaktır [39]. Bu durum sonucunda, kür uygulanmayan numunelerdeki ağırlık kaybı, kür uygulanan numunelere kıyasla daha fazla olacaktır.

Benzer su/çimento oranlarına sahip numunelerde agrega miktarı arttıkça porozitenin azaldığı gözlemlenmiştir [40]. Bu ilişki göz önüne alındığında düşük poroziteye sahip yüksek agrega içeren numunelerin su kaybı daha düşük olmasıyla ilişkilendirilebilir.

Su/çimento ve kalker oranı değişimi ile ilgili numuneler üzerinde belirgin bir etki gözlemlenmemiştir.

4.2 Elastisite ve Basınç Deneyi Sonuçları

Basınç dayanımları, su/çimento oranının artmasıyla beklenildiği gibi azalmıştır. Su/çimento oranı 0.4 olan grup için agrega miktarındaki artış, dayanımın artmasına neden olmuştur; ancak su/çimento oranı 0.5 olan karışımlarda bu durum tersine dönmüştür. Mostonejad ve diğerleri, su/çimento oranı 0,25 ve 0,3 olan numunelerde, silis dumanı içeriğinin artırılmasıyla betonun mikroyapısının daha yoğun ve gözeneksiz hale geldiğini ve bu durumun beton dayanımını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Ancak, su/çimento oranı 0,5 olan numunelerde, mikroyapının daha gözenekli ve çimento hamurunun daha gevşek olması nedeniyle dayanımda bir azalma gözlenmiştir. Bu durum su/çimento oranındaki artışa bağlı olarak agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzeyin zayıflayarak dayanımı olumsuz etkilemesini açıklamaktadır [41]. Literatürde belirtilen kür uygulamasının, Çizelge 4.1 ile açıkça gözlemlenebilen bir şekilde dayanımı artırdığı iddiası desteklenmektedir.

Çizelge 4.1 : Maksimum basınç dayanımları ve elastisite modülleri (D: kür uygulanan, K: kür uygulanmayan).

Karışımlar	Elastisite Modülleri		Basınç Dayanımları	
	E-D(GPa)	E-K(GPa)	D(MPa)	K(MPa)
W40A60L0	30,24	31,52	39,17	49,41
W40A60L05	31,67	32,98	42,52	51,61
W40A60L10	32,01	33,37	43,45	54,14
W40A70L0	31,2	37,09	48,93	60,79
W40A70L05	31,65	37,22	50,52	62,27
W40A70L10	32,69	37,91	47,21	62,37
W50A60L0	26,94	29,79	35,84	50,14
W50A60L05	27,2	30,1	39,95	50,79
W50A60L10	29,64	31,83	40,31	52,37
W50A70L0	24,95	27,64	29,91	38,26
W50A70L05	25,08	28,24	30,88	46,68
W50A70L10	26,8	30,3	37,36	49,38

4.3 Boy Değişimi Deney Sonuçları

Boy değişim ölçümleri, 200 günlük bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Kür uygulanan numunelerde, ölçümlere 7. gün başlanmıştır. Çizelge 4.2, 200 günlük rötre değerlerini göstermektedir.

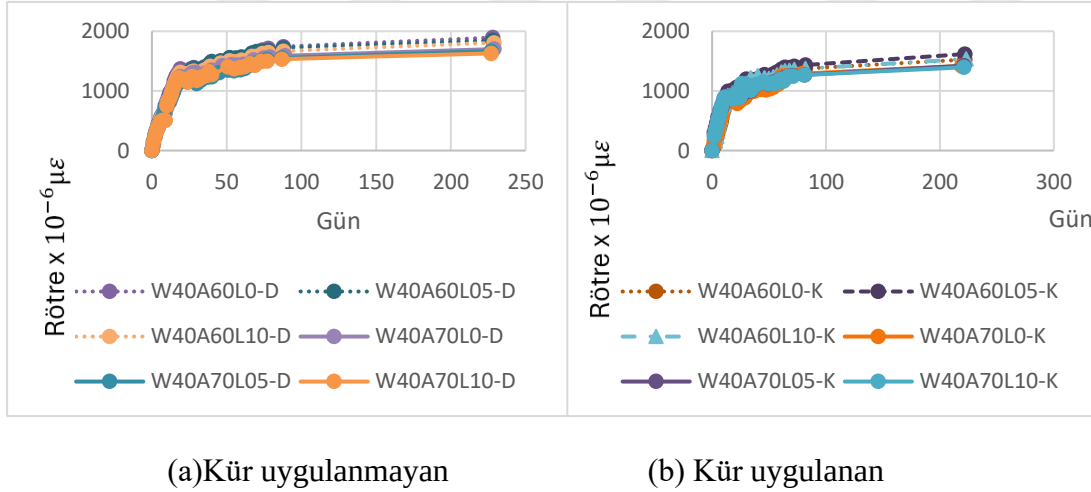
Çizelge 4.2 : 7 gün su kürü uygulanan ve uygulanmayan numunelerin 200 gün sonunda boy değişim değerleri.

Karışımlar	Kür uygulanan($10^{-6}\mu\epsilon$)	Kür uygulanmayan($10^{-6}\mu\epsilon$)
W40A60L0	1.894	1.543
W40A60L05	1.849	1.537
W40A60L10	1.807	1.536
W40A70L0	1.701	1.418
W40A70L05	1.668	1.400
W40A70L10	1.629	1.396
W50A60L0	1.912	1.632
W50A60L05	1.898	1.590
W50A60L10	1.876	1.576
W50A70L0	1.776	1.456
W50A70L05	1.681	1.446
W50A70L10	1.673	1.436

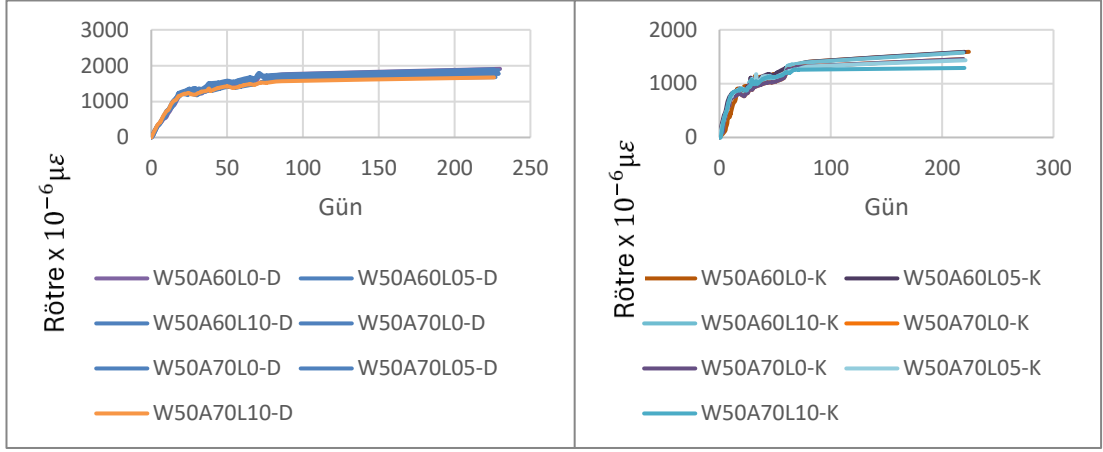
Çizelge 4.2'deki örnek olarak W40A60L0 numunesi ele alındığında; kür uygulanmış grup için rötre değeri 1543, kür uygulanmamış grup için ise rötre değeri 1894 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, literatürde belirtildiği gibi kür uygulamasının, rötre değerini yaklaşık olarak %15-20 seviyesinde azalttığını göstermektedir.

Buharlaşmayan su (w_n) içeriği, çimentonun hidratasyon ürünleriyle kimyasal olarak bağlanmış su miktarını ifade etmektedir ve kr uygulama süresi arttıkça w_n içeriğinde bir artış gözlemlenmektedir [42]. Buharlaşmayan su miktarındaki bu artış, hidratasyon ürünlerinin miktarı ile doğru orantılıdır. Kr uygulama süresi uzadııka, buharlaşmayan su miktarı ve dolayısıyla hidratasyon derecesi artmaktadır. Beton yüzeyindeki suyun buharlaşmasının önlenmesi, imento hidratasyonu için gerekli suyun sağlanması temin eder [43]. Bu durum, betonun iç yapısının daha kompakt hale gelmesine, boşluk miktarının azalmasına ve numune içindeki su hareketinin kısıtlanmasına neden olmaktadır. Neticede, bu olguların bir araya gelmesi rötre miktarının azalmasına yol açmaktadır.

şekil 4.5 ve şekil 4.6 ile rötre sonuçlarının 200 günlük ölçümleri gösterilmiştir. şekil 4.5 ve şekil 4.6’de sunulan grafiklerden anlaşılacağı üzere, yaklaşık olarak 80 gün sonrasında boy değişim hızında belirgin bir azalma gözlemlenmiş ve eğriler yatay bir duruma gelmiştir. Bununla birlikte, boy değişimi süreci, ölçüm süresi olan 200. güne kadar devam etmiştir. Kr uygulanan numunelerin, kr uygulanmayan numunelere oranla daha az boy değişimine maruz kaldığı bu grafiklerden açıkça okunabilmektedir.



şekil 4.1 : 0.4 su/imento oranında kr uygulanan ve uygulanmayan numunelere ait rötre grafikleri.



(a)Kür uygulanan

(b) Kür uygulanmayan

Şekil 4.2 : 0.5 su/çimento oranında kür uygulanan ve uygulanmayan numunelere ait rötre grafikleri.

Berman ve D. çalışmasında, betonun kür yöntemlerinin basınç dayanımı ve rötre üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırma, çeşitli kür yöntemlerinin betonun mukavemetini artırabileceğini ve rötre çatlaklarının oluşum riskini azaltabileceğini göstermektedir. Özellikle, etkili kür uygulamalarının betonun hidratasyon sürecini tamamlayarak dayanımını artırdığı ve böylece rötre çatlaklarının oluşumunu azalttığı belirtilmiştir [44].

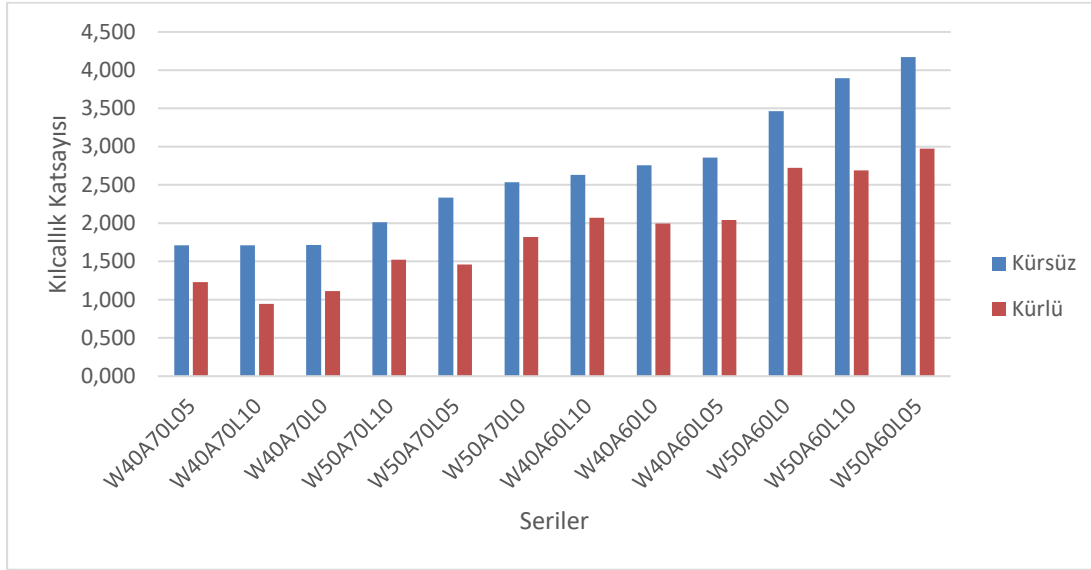
Kür uygulaması, betonun dış etkenlere karşı direncini artırarak çatlak oluşumunu minimize etmektedir [45]. Bu direncin artışı, dış kaynaklı rötre çeşitlerinden biri olan karbonatlaşma rötresi gibi etmenlerin etkisini azaltabilir.

Bu doğrultuda herhangi bir kür uygulamasının, potansiyel rötre çatlaklarını hafifleteceği [33] ve kür süresinin artışına bağlı olarak rötre miktarının azalacağı [34] anlaşılmaktadır. Elastisite modülü ve boy değişim sonuçları ilerleyen bölümlerde karşılaştırılacaktır.

4.4 Kılcallık Deney Sonuçları

Şekil 4.7'te, 240 dakikalık süre boyunca yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan kılcallık katsayıları gösterilmektedir. Kılcallık katsayısının yüksek olması, ilgili numunenin daha fazla su emme eğiliminde olduğunu ifade etmektedir. Bu sonuçlardan açıkça anlaşıldığı üzere, su/çimento oranının artması ve/veya matris içerisindeki agrega miktarının azalması, kılcallık katsayısının artmasına neden olmaktadır. Başka bir ifadeyle betonun geçirimliliği artmaktadır. Kür uygulanmayan numunelerde yüzey

geçirgenliğinin artması nedeniyle [32] daha yüksek oranda kılcallık katsayısına sahiptirler. İlerleyen bölümlerde kılcallık ve sonuçlar karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.7 : Beton numunelerin kılcallık katsayıları.



5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

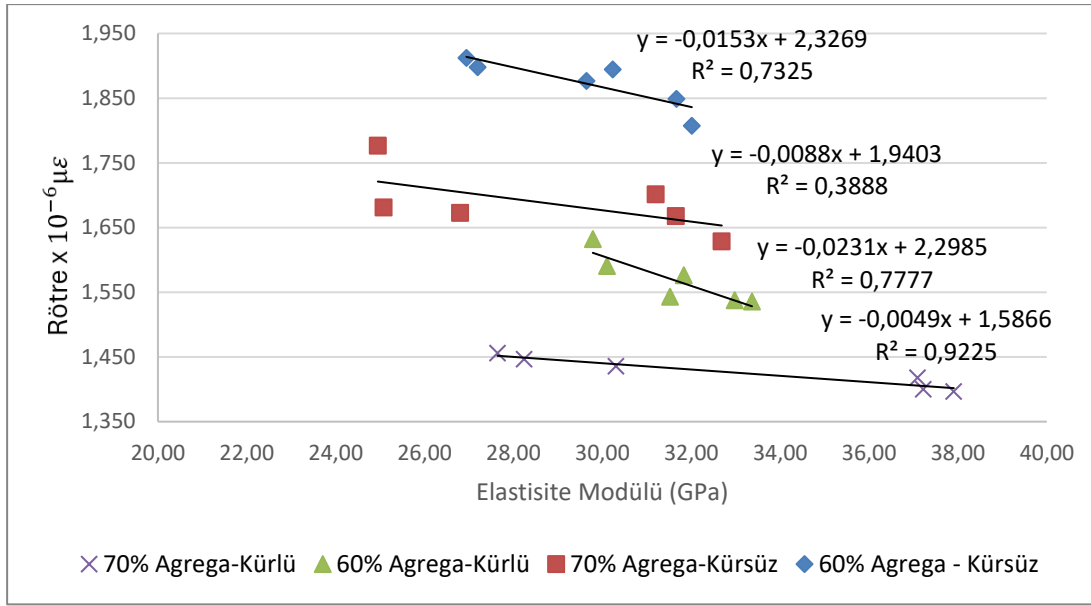
Elde edilen deney sonuçları, agrega miktarı, su/çimento oranı, kalker katkı oranı ve kür uygulamasının etkilerini daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deney bulgularının kapsamlı bir değerlendirmesi, bu parametreler arasındaki ilişkilerin literatürde yer alan çalışmalar ışığında ele alınmasıyla yapılacaktır. Bu yaklaşım, sonuçların mevcut literatür ile uyumunu ve potansiyel farklılıkları ortaya koymayı hedeflemektedir.

5.1 Elastisite Modülü ve Rötire Karşılaştırılması

Elastisite modülü ile rötire arasındaki ters orantılı ilişki Şekil 5.1’de görülmektedir. Elastisite modülü, gerilme ile linear deformasyon arasındaki orandır [46]. Diğer bir ifadeyle elastisite modülü betonun elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Betonun elastisite modülü azaldıkça elastik şekil değiştirmeye karşı direncin azaldığını ve bu nedenle su kaybından kaynaklanan iç gerilmeler nedeniyle daha fazla büzülme, dolayısıyla daha fazla rötireye neden olduğu sonucuna varmamıza olanak tanımaktadır.

Ayrıca, kür uygulanan numunelerin, kür uygulanmayan numunelere göre daha doğrusal ve tutarlı sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir. Kür uygulaması 4.1 bölümünde belirtildiği üzere ağırlık kaybını azalttığı gözlemlenmişti. Bu durum buharlaşacak su miktarındaki azalışı göstermekte ve hidrasyon oranını arttırmaktadır. Neticede, hidrasyon oranının artışıyla birlikte rötire miktarı azalmıştır.

Rötire üzerindeki en etkili değişkenin agrega oranı olduğu belirlenmiştir. Sabit bir su/çimento oranında agrega oranının artmasına bağlı olarak rötrenin azalması [24] matris içerisindeki hamur miktarının azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Agrega oranı %70 olan serilerin, %60 agrega oranına sahip serilere göre daha fazla rötire gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1 : Elastisite modülü ve rötre değerleri karşılaştırılması.

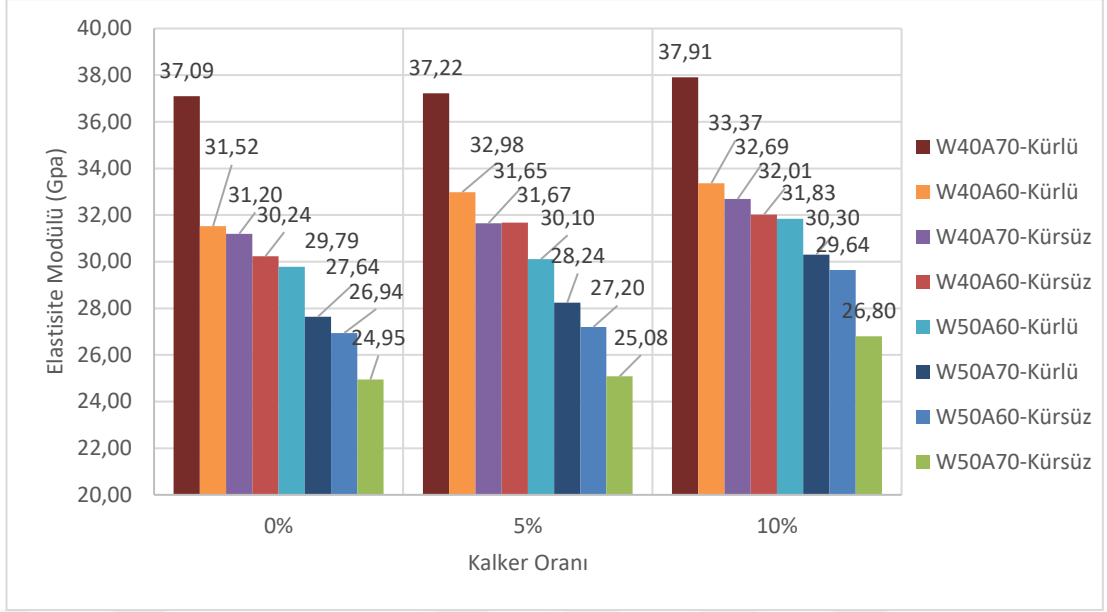
5.2 Elastisite Modülü & Kalker Oranı İlişkisi

Kalker tozu kullanım oranlarının (%0, %5 ve %10) elastisite modülü üzerindeki etkisi Şekil 5.2’de görülmektedir. Kalker tozu miktarının hamur içerisindeki artışına bağlı olarak, elastisite modülü değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kalker tozu kullanımı basınç dayanımını düşürmekle beraber, poroziteyi arttırmakta ve hidratasyon ürünlerini azalmaktadır [47].

Kalker tozu, çimento partikülleri arasında boşlukları doldurarak betonun kompaktlığını artırır [48]. Daha yoğun ve homojen bir mikroyapıya sahip olan betonun elastisite modülü olumlu yönde etkilenir.

Örneğin, W40A70 kürsüz serisinde 0%, 5% ve 10% kalker oranları için sırasıyla elastisite modülleri 37.09 GPa, 37.22 GPa ve 37.91 GPa olarak belirlenmiştir, burada azalış seviyesinin çok az olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, 0.5 su/çimento oranına sahip betonların genel olarak 0.4 su/çimento oranına sahip betonlardan daha düşük elastisite modülüne sahip olduğu söylenebilir. Örnek olarak W40A70 kürlü seride 37,09 GPa elastisite modülüne ulaşılırken, W50A70 kürlü seride bu değer 27,64 GPa olmaktadır. Ancak, W50A60 kürlü ve W50A60 kürsüz serileri bu duruma ters bir sonuç göstermiştir.



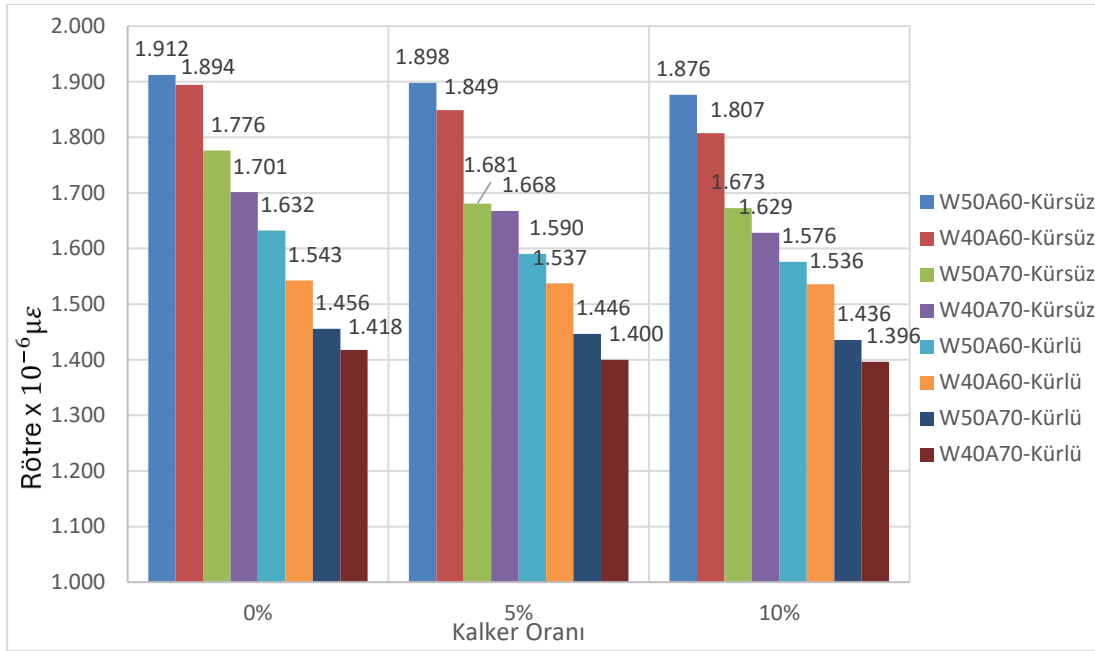
Şekil 5.2 : Elastisite modülü ve kalker oranı karşılaştırılması.

5.3 Kalker Oranı ve Rötire Değişimi

Kalker miktarının artışıyla birlikte rötire miktarlarının azaldığı Şekil 5.3'te gözlemlenmektedir. Kalker oranındaki artışın, çimento içerisindeki bağlayıcı miktarının azalması ve buna bağlı olarak rötire oluşturabilme kapasitesinin azalmasıyla ilişkilendirilebileceği görülmektedir.

Kür uygulanan numunelerin genel olarak kür uygulanmayan numunelerden daha az rötire gösterdiği, agrega miktarının artışıyla rötire miktarının azaldığı ve su/çimento oranının artışıyla rötrenin arttığı gözlemlenmektedir. Ancak kür değişimi ve agrega miktarındaki değişim, rötire açısından birincil etkenler iken, su/çimento oranındaki değişim ise daha az etkili olmaktadır.

Örnek olarak kür uygulamasının etkisini değerlendirmek amacıyla, W50A60 kürsüz ve W50A60 kürlü numuneleri %0 kalker oranında karşılaştırıldığında, kürsüz numune %17 daha fazla rötire göstermiştir. Benzer şekilde, agrega oranının etkisini incelemek için W50A60 kürsüz ve W50A70 kürsüz numuneleri %0 kalker oranında karşılaştırıldığında, W50A60 kürsüz numune %12 daha fazla rötire yapmıştır. Ancak, su/çimento oranının etkisini değerlendirdiğimizde, W50A60 kürsüz ve W40A60 kürsüz serileri %0 kalker oranında karşılaştırıldığında, W50A60 kürsüz numune %1 daha fazla rötire sergilemiştir.

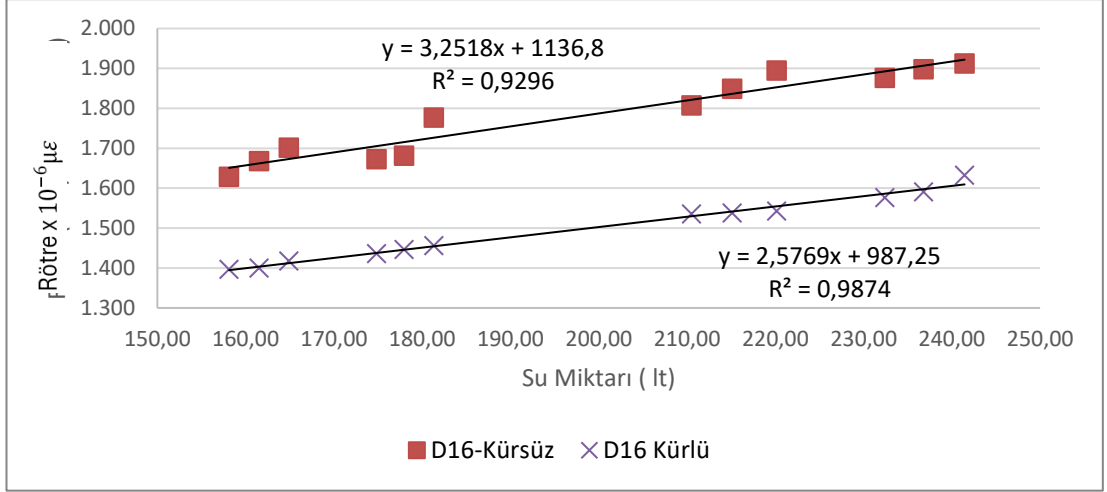


Şekil 5.3 : Kalker oranı değişiminin rötre miktarına etkisi.

5.4 Su Miktarı ve Rötre İlişkisi

Karışım suyu miktarının rötre ile olan ilişkisi Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Çimento hamuru içerisindeki su miktarının artışıyla birlikte rötre miktarının arttığı gözlemlenmektedir. Kür uygulamasının bu ilişkiyi değiştirmedığı, ancak nihai sonuçlarda daha az rötre yapmasını sağladığı anlaşılmaktadır.

Kür uygulanan ve uygulanmayan numunelerde meydana gelen rötre miktarı ile karışım suyu miktarı arasındaki ilişkinin ayrı ayrı belirlendiği Şekil 5.4'te belirlenen doğruların eğimine bağlandığında, kür uygulanmayan numunelere ait eğimin $m=3,2518$ değeriyle daha fazla olduğunu görülmektedir. Kür, betonun hidratasyon sürecini tamamlamasına olanak tanır. Yeterli kürlenme ile, beton içindeki su, çimento partikülleri ile reaksiyona girerek daha fazla kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumu sağlar. Bu da betonun mikroyapısının daha sıkı olmasına ve rötrenin azalmasına yol açar [49]. Bu ilişki kür uygulaması yapıldığı durumda su miktarındaki değişimin rötreye etkisinin azalmasını açıklamaktadır.

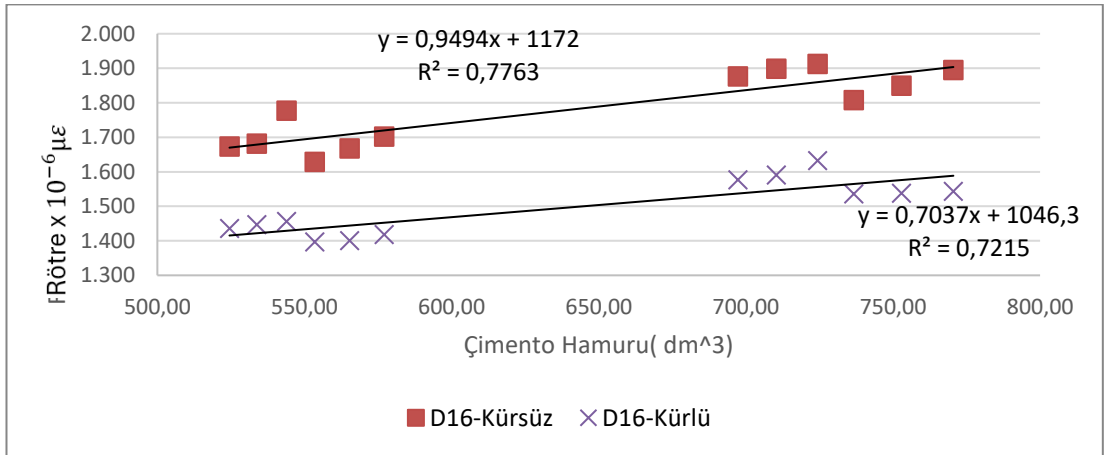


Şekil 5.4 : Su miktarının rötre ile ilişkisi.

5.5 Çimento Hamuru ve Rötre İlişkisi

Çimento hamuru ve rötre ilişkisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Karışım içerisindeki çimento hamuru miktarı tahmin edildiği üzere su miktarının değişimine benzer davranış göstermiştir. Düşük çimento hamuruna sahip numunler daha az rötre yapmıştır.

Kür uygulamasının etkisi değerlendirildiğinde, rötre miktarlarının kür uygulanan durumlarda daha az olduğu gözlemlenmiştir. Çimento hamurunun rötre miktarını kontrol etmek için uygun kütleme teknikleri kullanılır. Bu teknikler, nem kaybını minimize ederek betonun büzülmesini engeller [48]. Bu nedenle kür uygulaması çimento hamuru değişiminden kaynaklanan rötreyi daha etkili bir şekilde kontrol etmiş ve sınırlamıştır.

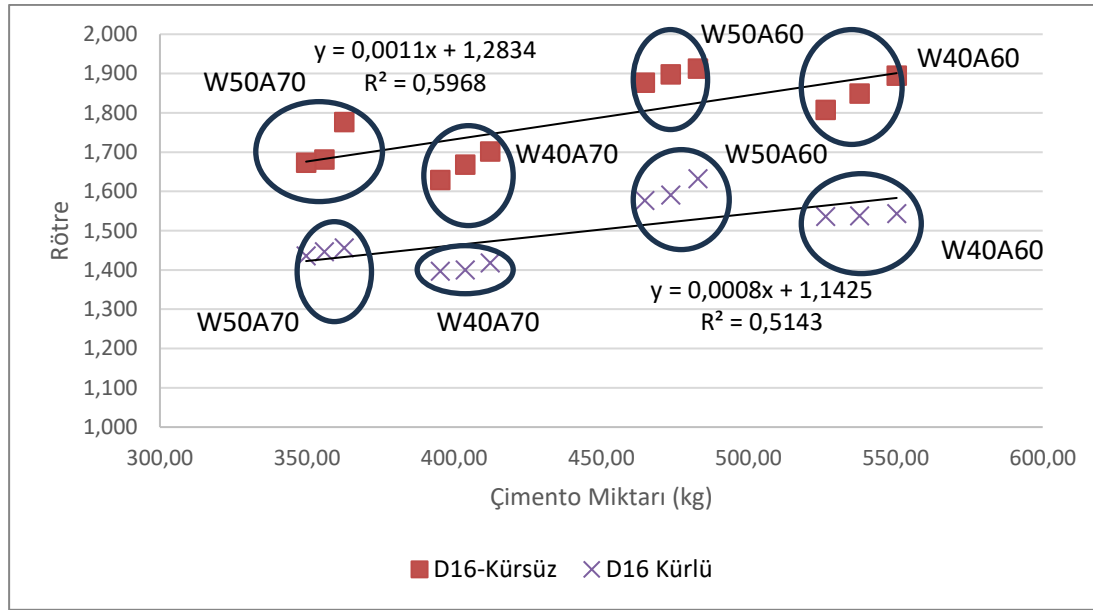


Şekil 5.5 : Çimento hamurunun rötre değişimi ile ilişkisi.

5.6 Çimento Miktarı ve Rötre İlişkisi

Şekil 5.6 ile çimento miktarı ve rötre ilişkisi gösterilmiştir. Bölüm 5.5’te gösterilen çimento hamuru ve rötre ilişkisini benzer şekilde çimento miktarı artışı ile beraber rötre miktarında artış gözlemlenmiştir.

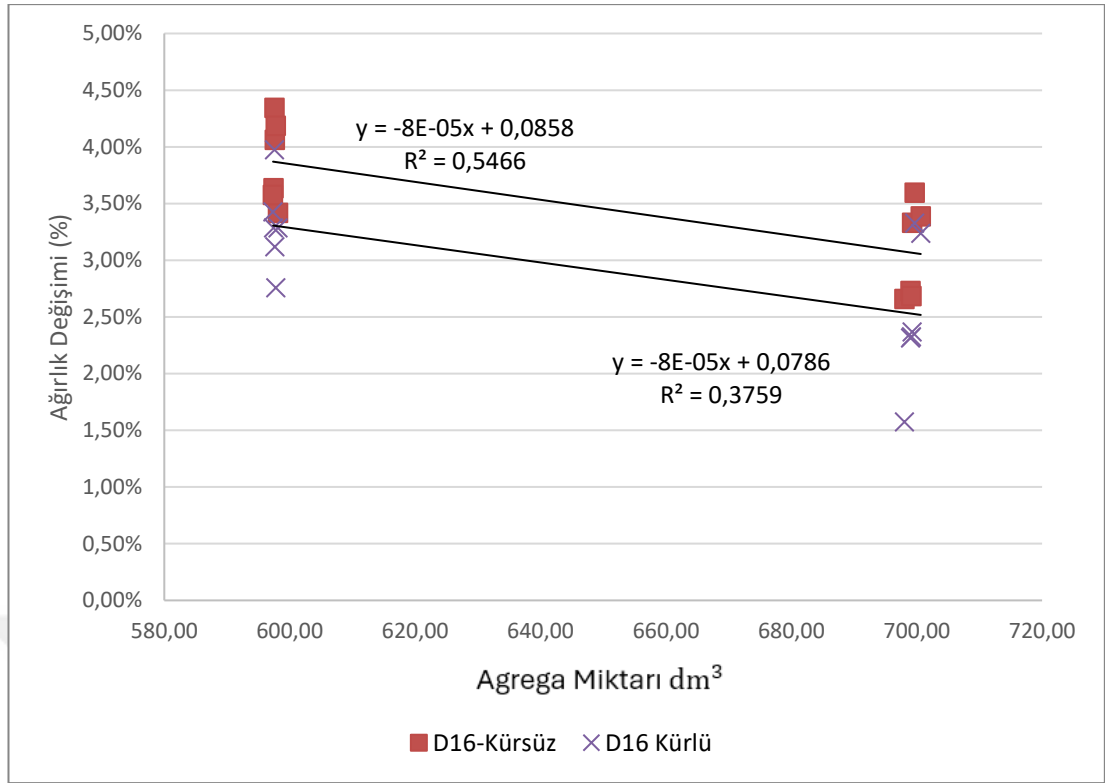
Sabit su/çimento oranında agrega miktarının artışına bağlı olarak çimento miktarı azalmıştır. Bu ilişki de agrega miktarındaki artış ve çimento miktarında azalış ile rötre miktarı azaldığı anlaşılmaktadır. Sabit agrega miktarında ise su/çimento oranı fazla olan numunelerde rötre miktarı artmıştır.



Şekil 5.6 : Çimento miktarı ve rötre ilişkisi.

5.7 Agrega Miktarı ve Ağırlık İlişkisi

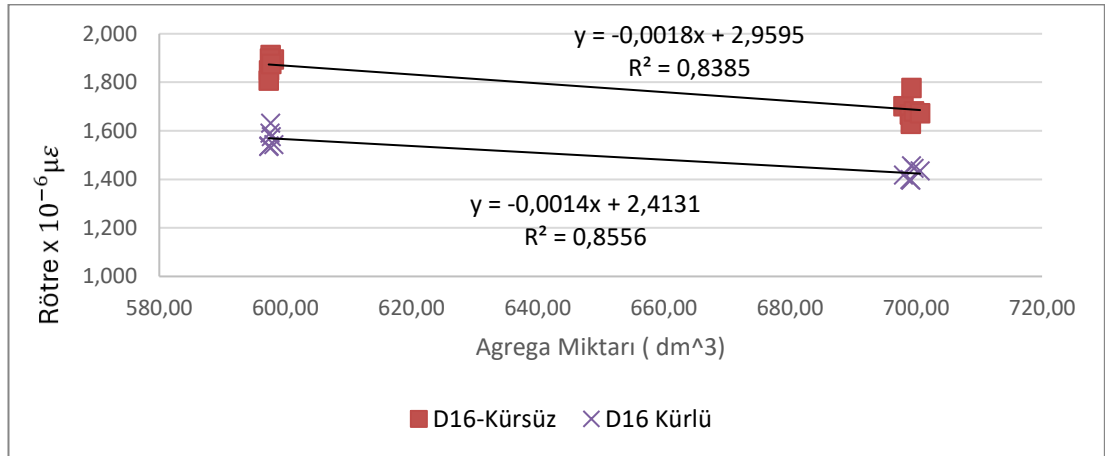
Şekil 5.7, matris içindeki agrega miktarı ile numunelerin nihai ağırlıklarının ilişkisini göstermektedir. Karışım numuneleri 1000 dm^3 için 600 dm^3 ve 700 dm^3 agrega hacimleri içermektedir. Agrega miktarının artmasıyla birlikte nihai ağırlıkta meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda agrega miktarı su kaybını kısıtlamış dolayısıyla nihai ağırlık kaybını azalttığı görülmüştür. Kür uygulaması'nın ilişkiyi etkilemediği anlaşılmış ancak nihai kaybın daha düşük seviyede olmasını sağlamıştır.



Şekil 5.6 : Agrega miktarları ve ağırlık değişimi ilişkisi.

5.8 Agrega Miktarı ve Rötire İlişkisi

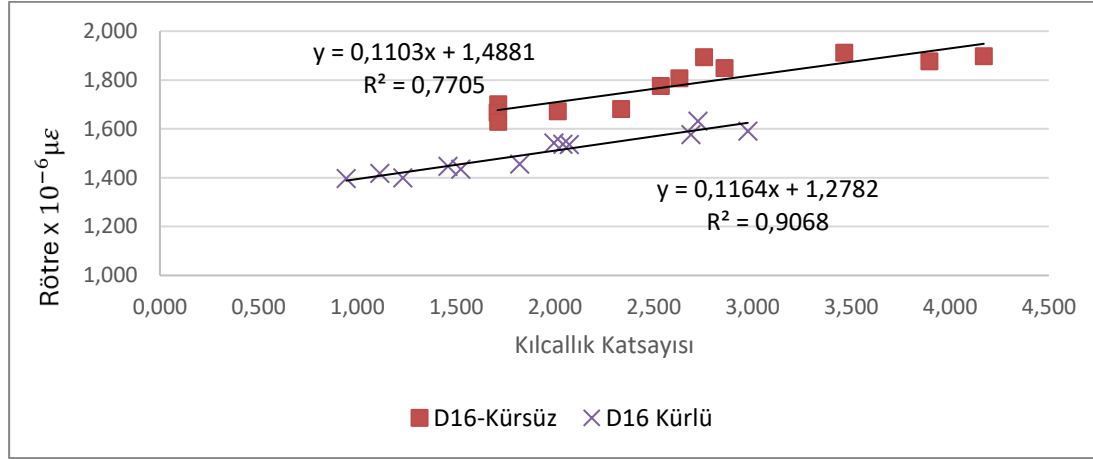
Beton içerisinde bulunan agrega hacminin artmasıyla birlikte rötire miktarının azaldığı Şekil 5.8’de gözlemlenmiştir. Agrega miktarının artmasıyla matris içerisindeki hamur miktarı azalmakta ve dolayısıyla rötire azalmaktadır [24]. Kür uygulamasının benzer şekilde nihai rötreyi etkilediği ancak agrega miktarı ve rötire arasındaki ilişkiyi değiştirmedeği görülmektedir.



Şekil 5.7 : Agrega miktarı ile rötire ilişkisi.

5.9 Kılcallık ve Rötre İlişkisi

Agrega miktarı, s/ç oranı ve kür uygulamasının etki ettiği kılcallık değeri ölçülmüş olup bu değerler karşılaştırmalı olarak Şekil 5.9’de sunulmuştur.



Şekil 5.8 : Kılcallık katsayıları ve rötre ilişkisi.

Kılcallık katsayısı arttıkça yani beton yapısındaki geçirimlilik arttıkça rötre miktarının arttığı görülmektedir. Agreganın artması ve kür uygulaması kılcallık ile ters orantılı iken s/ç oranı doğru orantılıdır.

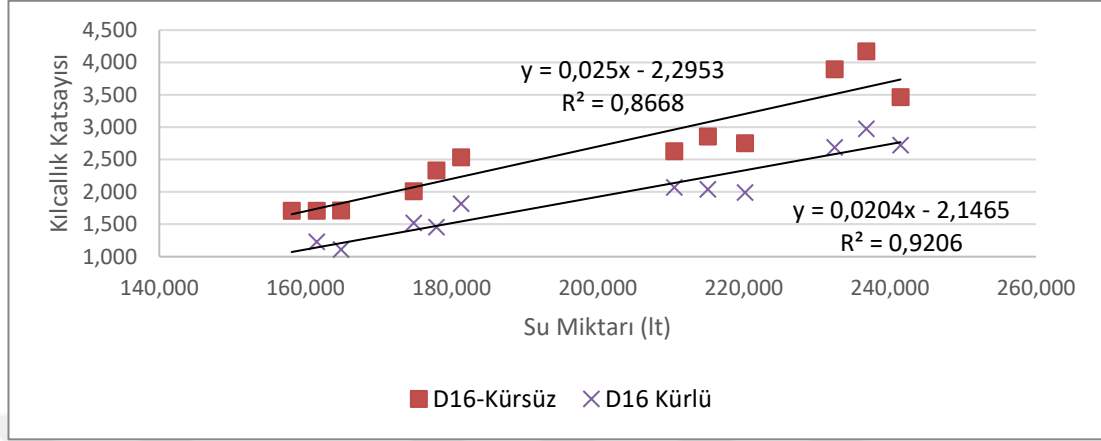
5.10 Kılcallık ve Su Miktarı & Agreganın Miktarı & Kalker Oranı İlişkisi

Kılcallık ve su miktarı ilişkisi Şekil 5.10 ile, agreganın miktarı ilişkisi 5.11 ile ve kalker oranı 5.12 ile gösterilmiştir. Su miktarının artışıyla kılcallık artmış, agreganın artışıyla kılcallık azalmış ve kalker miktarının artışıyla kılcallık azalmıştır.

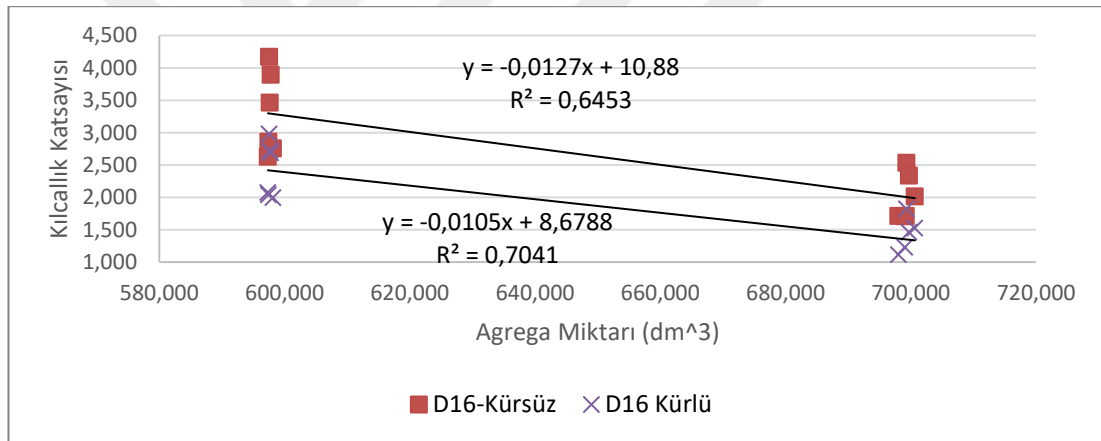
Su miktarının artışı kılcallık katsayısını en çok etkileyen faktörlerden biridir. Yüksek su-çimento oranı, beton karışımının daha fazla su içermesine yol açar. Bu fazla su, hidratasyon sürecinden sonra buharlaşarak beton içinde kılcal boşluklar oluşturur. Wang ve diğerleri yapmış olduğu çalışmalarda ise kılcal boşlukların, kılcallık ve geçirimlilikteki ana etmen olduğunu göstermişlerdir [50].

Agreganın, rötre üzerinde kalker oranına kıyasla daha belirgin bir etkiye sahip olduğu, su miktarına kıyasla ise daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir. Betondaki agreganın artması, betonun hacimce daha fazla katı malzeme içermesine yol açar. Bu durum, çimento hamurunun miktarını ve dolayısıyla kılcal boşlukları azaltır.

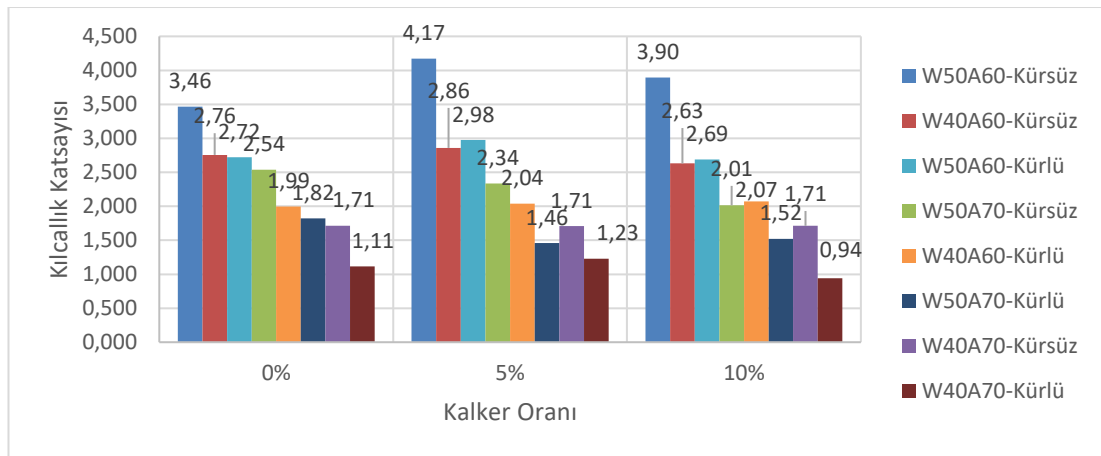
Kalker tozu kullanımı tüm değişkenler arasında en az etkili olandır. Kalker tozu, çimento hamurunun daha yoğun ve homojen bir mikroyapıya sahip olmasını sağlar. Bu, kılcal boşlukların azalmasına ve betonun kılcallığının düşmesine neden olur [48].



Şekil 5.9 : Kılcallık ve su miktarı ilişkisi.



Şekil 5.10 : Kılcallık katsayısı & agrega miktarı ilişkisi.

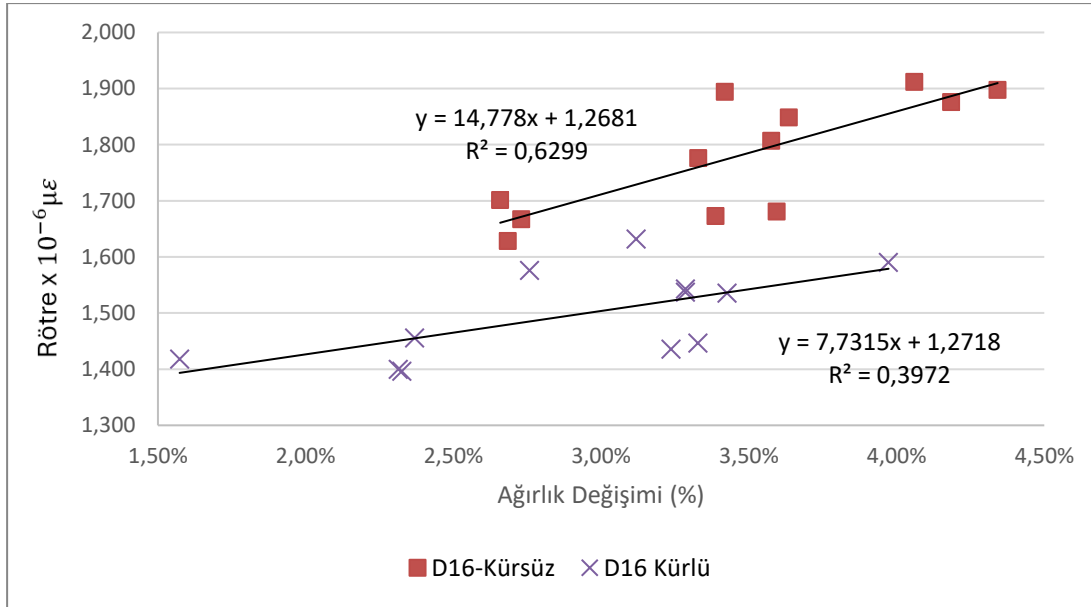


Şekil 5.11 : Kılcallık katsayısı&kalker oranı ilişkisi.

5.11 Ağırlık Değişimi ve Rötre İlişkisi

Şekil 5.13 ile 200 günlük nihai ağırlık değişimi sonuçlarının rötre ile ilişkisi gösterilmiştir.

Ağırlık değişimi arttıkça rötre miktarlarının arttığı gözlemlenmiştir. Betonun ağırlık değişimi, çoğunlukla içerisindeki serbest suyun buharlaşması ve ortamdan su kaybı sonucu gerçekleşir. Sertleşme sürecinde betonun içinde kalan suyun miktarı azaldıkça, betonun ağırlığı da azalır. Buna bağlı olarak, beton kurudukça hacimsel küçülme yani rötre gerçekleşir. Rötre, betondaki nem kaybıyla doğru orantılıdır; dolayısıyla ağırlık kaybı ne kadar fazla olursa rötre miktarı da yüksek olacaktır.



Şekil 12 : Ağırlık değişimi & rötre ilişkisi.

6. RÖTRE SONUÇLARININ ULUSLARARASI RÖTRE MODELLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Betonun dayanıklılığı, uzun ömürlülüğü ve yapıların korunumu açısından rötrenin önceden tahmin edilebilmesi büyük önem taşır. Yapılarda oluşacak rötrenin önlenmesi güvenlik, ekonomik ve estetik açıdan kritik bir faktördür. Rötre çatlaklarının önlenmesi ve onarılması yüksek maliyet gerektirdiğinden rötre tahmin modellemeleri ekonomik fayda sağlar. Rötre tahminleri, mühendislerin uygun tasarım ve malzeme seçimleri yapmalarına yardımcı olarak, yapısal güvenliği artırır. Bu nedenle modellemeler üzerine uzun yıllardır yapılmış bir çok farklı çalışma mevcuttur [51].

Bölüm 6 ile farklı rötre tahmin modellerinin sonuçları karşılaştırılarak çeşitli tahmin yöntemlerinin doğrulukları değerlendirilmiştir. Karşılaştırma ile, her bir tahmin modelinin rötre tahminlerindeki hassasiyeti ve güvenilirliği ortaya koyularak, uygulama ve tasarım açısından en uygun yaklaşım belirlenmiştir.

6.1 American Concrete Institute (ACI) ACI-209R.92 Rötre Modeli

Branson ve Christason [52] tarafından geliştirilen model, ACI 209R-82 standardındaki bazı küçük değişikliklerle birlikte sunulmuştur. Bu model, daha sonra ACI Komitesi tarafından yapılan incelemeler sonucunda ACI 209R-92 standardına dahil edilmiştir [53]. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından geliştirilen rötre tahmin modelinde esas alınan parametreler aşağıdaki gibidir:

- Kürleme yöntemi
- Ortam bağıl nemi
- Hacim-yüzey oranı (mm veya inç)
- Betonun slump değeri (mm veya inç)
- İnce agrega yüzdesi (%)
- Çimento içeriği (kg/m³ veya lb/yd³)
- Betonun hava içeriği (%)

- Çimento tipi
- Betonun kurumaya başladığı yaş, genellikle kür sonunda alınan yaş (gün)
- Betonun yüklenme anındaki yaşı (gün)

Betonun yaşı t (gün) ve kurumaya başlama yaşı olan t_c (gün) değerlerine bağlı olarak toplam rötre değeri $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ Denklem 6.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} \times \varepsilon_{shu} \quad (6.1)$$

Şekil ve boyut etkilerinin zaman oranında tam olarak dikkate alınabilmesi için α değeri, ilgili denklemlerde 1 olarak belirlenmiştir. Beton örnekleri için kurumaya başlama yaşı, 7 gün havuz içinde tutulan numuneler için $t_c = 7$ ve kalıptan çıkarıldıktan sonra doğrudan $24^\circ\text{C} \pm 3$ sıcaklık ve $\%35 \pm 5$ bağıl neme sahip ortama sokulan numuneler için $t_c = 1$ olarak alınmıştır.

Denklem 6.1 içerisinde kullanılacak f parametresi 70mm x 70mm x 280mm olan numuneler için yüzey alanı (S) ve hacim (V) bulunarak Denklem 6.2 ile 32,42 olarak hesaplanmıştır.

$$f = 26xe^{\{1.42 \times 10^{-2}(\frac{V}{S})\}} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} \text{ mm/mm} \quad (6.3)$$

Maksimum rötre değeri, 6.3'te gösterilen sabit ile belirlenir. Ancak, Çizelge 6.1'de belirtilen optimum değerlere ulaşılamazsa, nihai rötre değeri Denklem 6.4 kullanılarak hesaplanır. Denkleminde tanımlanan γ_{sh} değeri, Denklem 6.5'de gösterilen 7 farklı düzeltme faktörü ile hesaplanmaktadır.

Denklem 6.5'de bulunan $\gamma_{sh,tc}$ kür faktörünü, $\gamma_{sh,Rh}$ bağıl nem faktörünü, $\gamma_{sh,vs}$ hacim-yüzey alanı faktörünü, $\gamma_{sh,s}$ yayılma faktörünü, $\gamma_{sh,\psi}$ ince agrega faktörünü, $\gamma_{sh,c}$ çimento faktörünü, $\gamma_{sh,\alpha}$ hava faktörünü göstermektedir.

7 günlük kür süresi için kürlenme faktörü $\gamma_{sh,tc}$ değeri, Çizelge 6.2'de [53] belirtilen değerlere göre belirlenir. Bu tabloya göre, 7 gün kür uygulanan numuneler için $\gamma_{sh,tc} = 1$, kür uygulanmayan numuneler için 1,2 olarak belirlenir. Bu değerler, belirli bir

kür süresindeki beton numunelerinin rötre davranışlarını daha doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla kullanılır.

Çizelge 6.1 : ACI-209R.92 modelinin esas aldığı değişkenler.

Faktörler			Dikkate alınan değişkenler	Standart koşullar
	Beton Bileşimi	Çimento hamuru içeriği	Çimento çeşidi	Tip I ve III
		Su/çimento oranı	Sl ump	70 mm (2,7 inç)
		Karışım oranları	Hava içeriği	67r
		Agrega özellikleri	İnce agrega yüzdesi	509a
		Sıkıştırma derecesi	Çimento içeriği	279 tc' 446 kg/in' (470 ila 7fi2 lb/vd')
Beton (sünme ve büzülme)	İlk kürlenme	İlk kürlenme süresi	Nemli kürlenmiş	7 gün
			Buharla kürlenmiş	1 ila 3 gün
		Kürlenme sıcaklığı	Nemli kürlenmiş	23.2 + 2 °C (73.4 + 4 °F)
			Buharla kürlenmiş	100 °C (< 212 °F)
		Kürlenme nemi	Bağıl nem	>=95%
Üye geometrisi ve ortamı (sünme)	Çevre	Beton sıcaklığı	Beton sıcaklığı	23.2 + 2 °C (73.4 + 4 °F)
		Beton su içeriği	Ortam bağıl nemi	4 9p
		Boyut ve şekil	Hacim-yüzey oranı	U/S = 38 mm (1,5 inç)
			veya	
			minimum kalınlık	1.50 mm (L9 inç)
Yüklemeye (sadece sünme)	Yüklemeye süreci	Yük uygulamasında beton maymunu	Nemli kürlenmiş	7 gün
			Buharla kürlenmiş	1 ila 3 gün
		Yüklemeye anında	Sürdürülebilir kafa	Sürekli yük
		Boşaltma süresi		
		Yük döngüsü sayısı		
Stres koşulları		Gerilme tipi ve kesit boyunca dağılımı	Basınç gerilmesi	Eksenel sıkıştırma
		Gerilme/dayanım oranı	Gerilme/dayanım oranı	0.10

$$\varepsilon_{shu} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} \text{ mm/mm} \quad (6.4)$$

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,Rh} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (6.5)$$

Çizelge 6.2 : Büzülme düzeltme faktörleri ilk nemli kürlenme.

Nemli Kür Süresi	$\gamma_{sh,tc}$
1	1,2
3	1,1
7	1
14	0,93
28	0,86
90	0,75

Bağıl nem faktörü $\gamma_{sh,RH}$ Denklem 6.6 ile hesaplanacaktır. Ancak, model tanımında ifade edildiği üzere, bağıl nemin %40'tan küçük olduğu durumlar için düzeltme faktörünün 1'den büyük olacağı belirtilmiştir. Çalışmamızda bağıl nem ortalama olarak %35 seviyesindedir. Ancak Denklem 6.6 için alt sınır %40 olarak verilmesi nedeniyle bağıl nem ortalama olarak 0.40 kabul edilmiştir. Denklem 6.6'da bu değer yerine konulduğunda, $\gamma_{sh,RH}$ değeri 1,043 olarak elde edilir.

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02h & 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,0h & 0,80 \leq h \leq 1 \end{cases} \quad (6. 6)$$

V numune hacmini ve S yüzey alanını göstermek üzere hacim-yüzey alanı faktörü $\gamma_{sh,vs}$ 70*70*280 mm boyutlu numuneler için Denklem 6.7 ile 1,115 olarak hesaplanmıştır.

$$\gamma_{sh,vs} = 1,2e^{\{-0,00472(\frac{V}{S})\}} \quad (6. 7)$$

Yayılma faktörü $\gamma_{sh,s}$ Denklem 6.8 ile elde edilir, s değeri (mm) çökme değerini temsil etmektedir. Her bir seri için bulunan sonuçlar Çizelge 6.3 ile gösterilmiştir.

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s \quad (6. 8)$$

İnce agrega faktörü $\gamma_{sh,\psi}$, Denklem 6.9 ile elde edilir, Ψ ifadesi ağırlıkça ince agreganın iri agregaya oranını ifade eder.

$$\gamma_{sh,\psi} = \begin{cases} 0,30 + 0,014\Psi & \Psi \leq \%50 \\ 0,90 + 0,002\Psi & \Psi > \%50 \end{cases} \quad (6. 9)$$

Beton numuneler içerisinde ağırlıkça ince agrega oranı her bir seri için 50%'den büyük olup tüm karışımlar için $\gamma_{sh,\psi}$ değeri 0,902 olarak hesaplanmıştır.

Çimento dozajının etkisini hesaplamak için kullanılan çimento faktörü $\gamma_{sh,c}$ Denklem 6.10 ile bulunacak olup c sembolü karışım içerisindeki çimentonun kg/m^3 cinsinden değerini ifade etmektedir. Bulunan sonuçlar Çizelge 6.3 ile gösterilmiştir.

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061c \quad (6. 10)$$

α , yüzde olarak hava miktarını temsil etmek üzere hava faktörü $\gamma_{sh,\alpha}$ Denklem 6.11 ile hesaplanmış ancak değerler 1'den küçük çıktığı için tüm hava faktörü değerleri 1 olarak kabul edilecektir.

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0,95 + 0,008\alpha \geq 1 \quad (6. 11)$$

Elde edilen tüm faktörler kullanılarak daha önce ifade edilmiş olan Denklem 6.5'de verilen nihai düzeltme faktörü bulunur. Bağlı nem faktörü, hacim-yüzey alanı faktörü, hava faktörü ve kür faktörü tüm seriler için ortaktır. Seriler arasında rötrei etkileyen faktörler; yayılma, ince agrega ve çimento faktörü olmaktadır. Elde edilen tüm

faktörler ve maksimum rötre miktarları Çizelge 6.3 ile gösterilmiştir. Nihai düzeltme faktörü Denklem 6.4'e yerleştirilerek elde edilebilecek maksimum rötre değerlerine ulaşılmıştır.

Çizelge 6.3 : Tüm faktörler ve maksimum rötre değerleri.

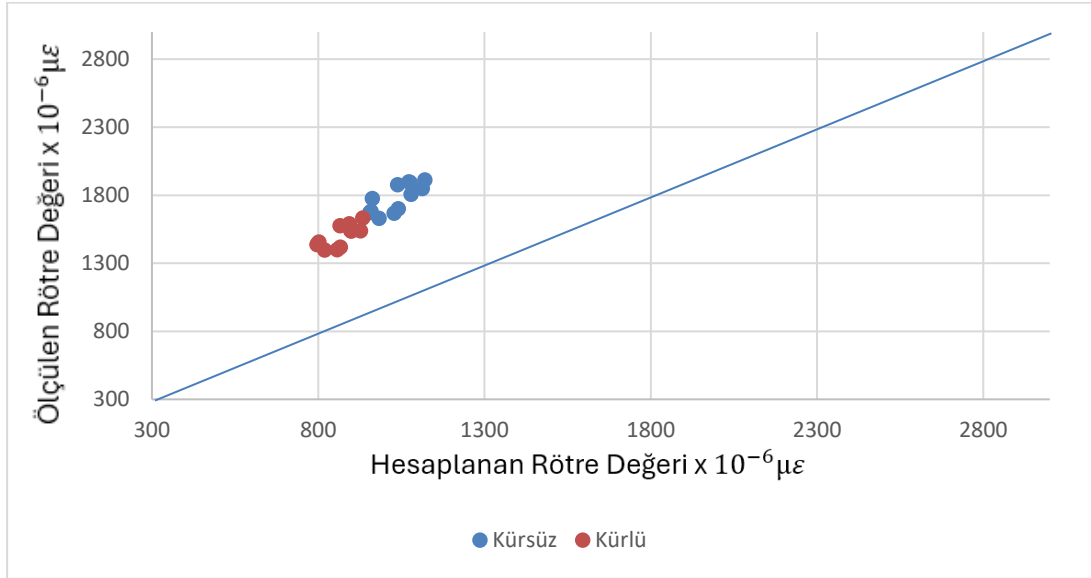
Seriler	$\gamma_{sh,tc}$ (Kür Uygulanmayan)	$\gamma_{sh,tc}$ (Kür Uygulanan)	$\gamma_{sh,RH}$	$\gamma_{sh,vs}$	ϵ_{shu} (Kür Uygulanmayan)	ϵ_{shu} (Kür Uygulanan)
W40A60L0	1,2	1	1,043	1,115050098	1,180 0,902 1,086 1	1.258 1.048
W40A60L05					1,228 0,902 1,078 1	1.300 1.083
W40A60L10					1,199 0,902 1,071 1	1.261 1.051
W40A70L0					1,236 0,902 1,001 1	1.215 1.013
W40A70L05					1,228 0,902 0,996 1	1.201 1.001
W40A70L10					1,180 0,902 0,991 1	1.148 957
W50A60L0					1,276 0,902 1,045 1	1.309 1.091
W50A60L05					1,228 0,902 1,039 1	1.253 1.044
W50A60L10					1,196 0,902 1,034 1	1.214 1.011
W50A70L0					1,180 0,902 0,971 1	1.125 937
W50A70L05					1,180 0,902 0,967 1	1.120 934
W50A70L10					1,180 0,902 0,963 1	1.116 930

ACI 209R.92 modeline göre 200 günlük hesaplanan ve deney sonucunda ölçülen nihai rötre değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.4 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.4 : 200 günlük hesaplanan ve ölçülen nihai rötre sonuçları.

Doğrudan Kurumaya Bırakılan Seriler				7 Gün Kür Uygulanan Seriler		
Seriler	ϵ_{shu} $\times 10^{-6}$	ϵ_{sh} (Hesaplanan) $\times 10^{-6}$	ϵ_{sh} (Ölçülen) $\times 10^{-6}$	ϵ_{shu} $\times 10^{-6}$	ϵ_{sh} (Hesaplanan) $\times 10^{-6}$	ϵ_{sh} (Ölçülen) $\times 10^{-6}$
W40A60L0	1258	1081	1.894	1048	897	1543
W40A60L05	1300	1118	1.849	1083	927	1537
W40A60L10	1261	1084	1.807	1051	900	1536
W40A70L0	1215	1045	1.701	1013	867	1418
W40A70L05	1201	1033	1.668	1001	857	1400
W40A70L10	1148	987	1.629	957	819	1396
W50A60L0	1309	1126	1.912	1091	934	1632
W50A60L05	1253	1077	1.898	1044	894	1590
W50A60L10	1214	1044	1.876	1011	866	1576
W50A70L0	1125	967	1.776	937	803	1456
W50A70L05	1120	963	1.681	934	799	1446
W50A70L10	1116	959	1.673	930	796	1436

Elde edilen sonuçlar 7 gün kür uygulanan ve doğrudan kurumaya bırakılan olmak üzere hesaplanan ve ölçülen değerleri Şekil 6.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Yapılan rötire ölçümleri ile ACI209R.92 modeline göre yapılan rötire hesabının karşılaştırmalı dağılımı.

ACI 209R.92 modeli, rötire değerlerini gerçek değerlere kıyasla daha düşük bir düzeyde tahmin etme eğilimindedir. Çalışmamızdaki bağıl nemin, bu modelin öngördüğü sınırların dışında olması nedeniyle kuruma süreci daha hızlı gerçekleşmiş ve bu durum, rötire değerlerinin daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

6.2 CEB-FIP 2010 Rötire Tahmin Modeli

Euro-International Committee for Concrete (CEB) ve International Federation for Pre-Stressing (FIP) tarafından ilk olarak 1990 yılında oluşturulan CEB-90 modeli, Mart 2010 tarihinde yapılan geliştirmelerle CEB-FIB 2010 adı altında güncellenmiştir [54]. CEB-FIB 2010 modeli, beton teknolojisi ve mühendislik uygulamalarındaki gelişmeleri yansıtarak, daha güvenilir ve kapsamlı tahminler sunma hedefini taşımaktadır.

Kuruma büzülmesini ifade eden $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ ve otojen rötreyi temsil eden $\varepsilon_{cas}(t)$ fonksiyonları kullanılarak, toplam rötire $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ ikisinin toplamı ile elde edilir (Denklem 6.12).

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cds}(t, t_s) + \varepsilon_{cas}(t) \quad (6.12)$$

Otojen rötre $\varepsilon_{cas}(t)$ Denklem 6.13 ve $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ kuruma rötresi Denklem 6.14'de tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \times \beta_{as}(t) \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \times \beta_{RH}(RH) \times \beta_{ds}(t - t_s) \quad (6.14)$$

Otojen rötre hesaplaması için kullanılacak olan otojen rötre katsayısı $\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$ Denklem 6.15 ve zaman faktörü $\beta_{as}(t)$ Denklem 6.16 ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{\frac{f_{cm}}{10}}{6 + \frac{f_{cm}}{10}} \right)^{2,5} * 10^{-6} \quad (6.15)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 * t^{0,5}) \quad (6.16)$$

Denklem üzerinde kullanılan f_{cm} değeri numunelerin 28. gün basınç dayanımlarını ifade etmek üzere α_{as} katsayısı çimento sınıfı özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermekte olup Çizelge 6.5 üzerinden alınacaktır [54].

Çizelge 6.5 : Denklemlerde kullanılan çimento ile ilgili katsayılar.

Çimento Türü	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
32.5 N	800	3	0,013
32.5 R, 42.5 N	700	4	0,012
42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	600	6	0,012

Kuruma rötresi hesabı için kuruma rötresi katsayısı $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$ Denklem 6.17, bağıl nem katsayısı $\beta_{RH}(RH)$ Denklem 6.18 ve zamana bağlı değişim katsayısı $\beta_{ds}(t - t_s)$ Denklem 6.19 ile hesaplanacaktır.

$$\varepsilon_{cds}(f_{cm}) = [(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times e^{(-\alpha_{ds2} \times f_{cm})}] \times 10^{-6} \quad (6.17)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right) \right] & 40 < RH < 99\% \\ 0.25 & RH > 99\% \end{cases} \quad (6.18)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{t - t_s}{(0.035 \cdot h^2 + (t - t_s))} \right)^{0.5} \quad (6.19)$$

Denklem 6.17’de yer alan α_{ds1} ve α_{ds2} Çizelge 6.5 üzerinden elde edilecektir. RH değeri yüzde olarak bağıl nem, t beton yaşı, t_s kür süresi ve h değeri Denklem 6.20 de gösterildiği gibi hesaplanan, çevre yüzey alanı ilişkisini gösteren etkin yüzeyi temsil etmektedir. Etkin yüzey, beton elemanın biçiminin rötire üzerine etkisini değerlendirmektedir.

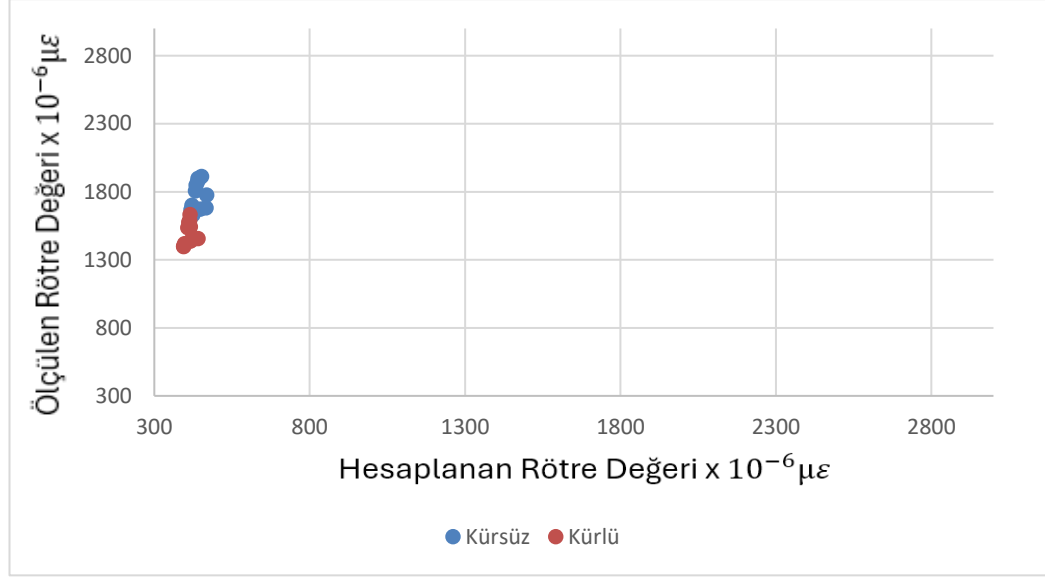
$$h = \frac{2A}{u} \quad (6.20)$$

A değeri mm^2 cinsinden beton elemanın yüzey alanı ve u değeri mm cinsinden havayla temasta olan çevreyi ifade etmektedir.

İlgili denklemler kullanılarak otojen ve kuruma rötrelere ilişkin hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ardından, Denklem 6.12’ye yerine konarak, kür uygulanan ve uygulanmayan numuneler için CEB-FIB 2010 modeline göre 200 günlük bir süre için rötire değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen rötire değerleri ile ölçülen rötire değerleri Çizelge 6.6 üzerinde sunulmuştur. Hesaplanan rötire değerleri ile ölçülen rötire değerlerinin karşılaştırılmalı dağılım grafiği Şekil 6.2 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.6 : CEB-FIB 2010 200 günlük nihai rötire hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Seriler	Doğrudan Kurumaya Bırakılan Seriler		7 Gün Kür Uygulanan Seriler	
	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen
W40A60L0	443	1894	415	1543
W40A60L05	435	1849	411	1537
W40A60L10	433	1807	407	1536
W40A70L0	421	1701	396	1418
W40A70L05	418	1668	394	1400
W40A70L10	425	1629	394	1396
W50A60L0	452	1912	414	1632
W50A60L05	441	1898	413	1590
W50A60L10	440	1876	410	1576
W50A70L0	469	1776	440	1456
W50A70L05	466	1681	421	1446
W50A70L10	448	1673	416	1436



Şekil 6.2 : CEB-FIB 2010 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

CEB-FIB 2010 modeli tarafından elde edilen sonuçlar, ölçülen değerlere kıyasla belirgin bir düşüklük sergilemiştir. Ayrıca, kür uygulanan ve uygulanmayan serilere ait hesaplanan rötre değerleri arasında gözlemlenen farklılıkların çok küçük olması bu modelin kür uygulamasının etkisini yeterli seviyede dikkate almadığını göstermektedir.

6.3 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Rötre Tahmin Modeli

Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (AASHTO) tarafından ilk kez 1931 yılında tanıtılan model, 2017 yılında gerçekleştirilen güncellemelerle revize edilmiş ve yeniden oluşturulmuştur [31].

Model için toplam rötre değeri için kullanılacak olan denklemler Denklem (6.21-6.25) ile gösterilmiştir.

$$\text{Toplam Rötre} \quad \varepsilon_{cs} = 0.48 \times 10^{-3} k_{hs} k_f k_s k_{td} \quad (6.21)$$

$$\text{Bağıl Nem Faktörü} \quad k_{hs} = 2.0 - 0.014H \quad (6.22)$$

$$\text{Dayanıklılık Düzeltmesi} \quad k_f = \frac{5}{1 + f_c} \quad (6.23)$$

Boyut Düzeltmesi

$$k_s = 1.45 - 0.13 \left(\frac{V}{S} \right) \geq 1.0 \quad (6.24)$$

Zaman Düzeltmesi

$$k_{td} = \frac{t}{12 \left(\frac{100-4f_c}{f_c+20} \right) + t} \quad (6.25)$$

Denklem (6.21-6.25) üzerinde gösterilen sembollerin tanımları aşağıdaki gibidir:

H = bağıl nem (%)

t = kür süreci hariç toplam beton yaşı (gün)

v/s = hacim-yüzey alanı oranı (inç)

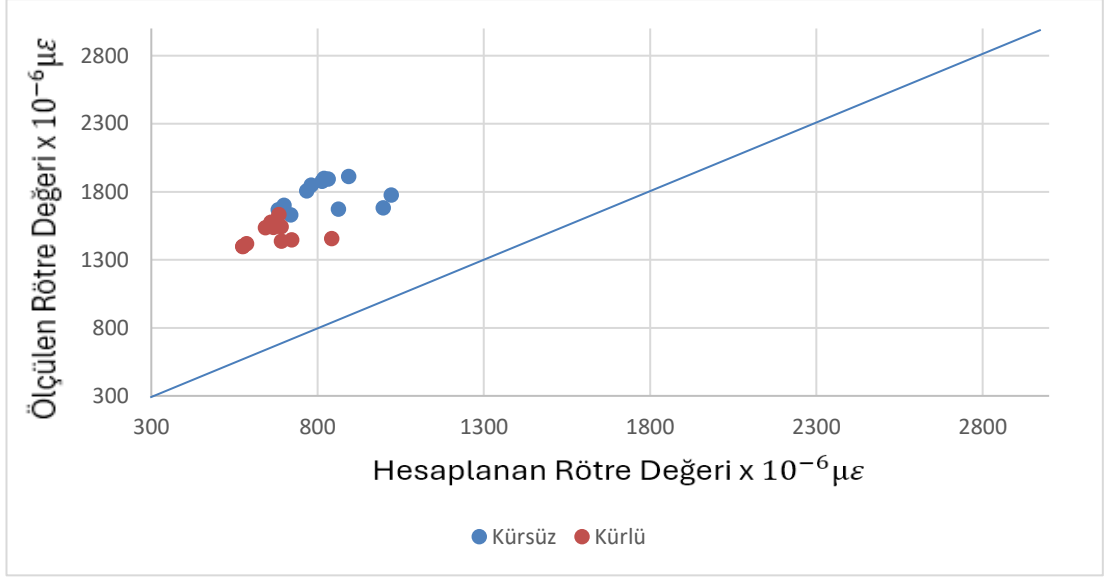
f_c = 28 günlük beton dayanımları (ksi).

AASHTO modeline göre Denklem (6.21-6.25) kullanılarak 200 günlük rötre sonuçları her 2 kür uygulaması için hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar ve ölçülen rötre değerleri Çizelge 6.7 üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca hesaplanan ve ölçülen değerlerin karşılaştırılmalı dağılımları Şekil 6.3 üzerinde gösterilmiştir.

Analiz sonuçları, AASHTO modelinin performansını değerlendirmek ve modelin doğruluğunu artırmak için potansiyel iyileştirmeler üzerinde daha fazla çalışma yapma gerekliliğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda modelin gerçek verileri tahmin edebilmesi için yeterli parametrelere sahip olmadığı belirtilmiştir [55].

Çizelge 6.7 : AASHTO 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

Seriler	Doğrudan Kurumaya Bırakılan Seriler		7 Gün Kür Uygulanan Seriler	
	$\epsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\epsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen	$\epsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\epsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen
W40A60L0	832	1894	691	1543
W40A60L05	781	1849	668	1537
W40A60L10	768	1807	643	1536
W40A70L0	699	1701	587	1418
W40A70L05	682	1668	575	1400
W40A70L10	719	1629	575	1396
W50A60L0	893	1912	684	1632
W50A60L05	819	1898	676	1590
W50A60L10	814	1876	660	1576
W50A70L0	1021	1776	842	1456
W50A70L05	997	1681	722	1446
W50A70L10	863	1673	691	1436



Şekil 6.3 : AASHTO 200 günlük rötire hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

AASHTO rötire modelinin doğruluğunu artırmak için daha geniş ve çeşitli beton karışımlarına dayalı veri setlerinin kullanılması önemlidir. Farklı su-çimento oranları, çimento türleri, agrega boyutları ve çevresel koşullara göre elde edilen veriler, modelin farklı senaryolarda daha doğru tahminler yapmasını sağlayabilir.

6.4 GL2000 Rötire Tahmin Modeli

Gardner ve Lockman tarafından 2001 yılında ortaya çıkarılan ve daha sonra 2004 yılında Gardner tarafından geliştirilen GL 2000 modeli, ACI 209 yönergelerine uyum sağlayacak şekilde parametreleri ve katsayıları geliştirilmiştir [56].

ε_{shu} maksimum rötreyi, $\beta(h)$ nem düzeltme faktörünü ve $\beta(t - t_c)$ zaman bağlı düzeltme faktörünü göstermek üzere toplam rötire miktarı Denklem 6.26 ile hesaplanmaktadır. Toplam rötreyi bulmak için gerekli parametreler Denklem (6.27-6.29) ile gösterilmiştir.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - t_c) \quad (6.26)$$

$$\text{Maksimum Rötire} \quad \varepsilon_{shu} = 900k \left(\frac{30}{f_{cm28}} \right)^{0,5} \times 10^{-6} \quad (6.27)$$

$$\text{Nem Faktörü} \quad \beta(h) = (1 - 1,18h^4) \quad (6.28)$$

$$\text{Zaman Faktörü} = \frac{\beta(t - t_c)}{\left((t - t_c) + 0,12 \left(\frac{V}{S} \right)^2 \right)^2} \quad (6.29)$$

Denklem (6.27-6.29) üzerinde gösterilen sembollerin tanımları aşağıdaki gibidir:

f_{cm28} = 28 günlük dayanım (MPa)

t = beton yaşı (gün)

t_c = kür süresi (gün)

h = bağıl nem (%)

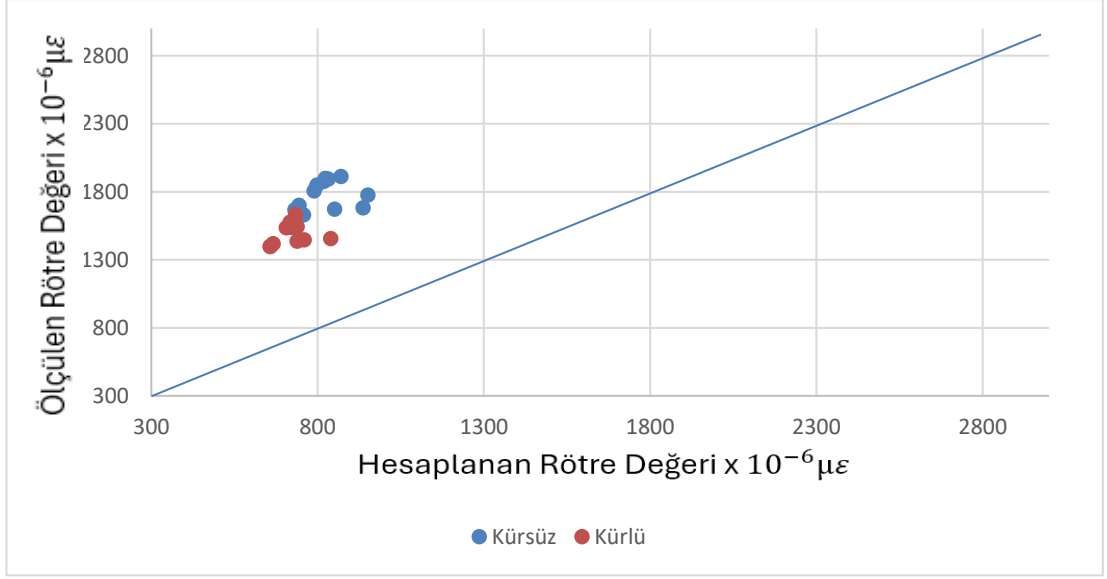
V/S = hacim/yüzey alanı oranı (%)

k = çimento katsayısı (Tip-1 = 0,75, Tip-2 ve Tip-3 = 1,15)

GL-2000 modeli kullanılarak hesaplanan 200 günlük rötre sonuçları ve ölçülen sonuçlar Çizelge 6.8 ile gösterilmiştir. Hesaplanan rötre değerleri ile ölçülen rötre değerlerinin karşılaştırılmalı dağılım grafiği ise Şekil 6.4 ile gösterilmiştir. Yapılan modelleme ölçülen değerlerin altında bulunmasına karşın en yakın sonuçların elde edildiği modellemelerden biri olarak gözükmektedir. GL 2000 modeli, farklı beton türleri ve kür koşulları altında geniş bir uygulama alanı sunmaktadır ve bu da modelin rötre tahminlerinde daha doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır [57].

Çizelge 6.8 : GL2000 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

Seriler	Doğrudan Kurumaya Bırakılan Seriler		7 Gün Kür Uygulanan Seriler	
	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen
W40A60L0	831	1894	739	1543
W40A60L05	798	1849	723	1537
W40A60L10	789	1807	706	1536
W40A70L0	744	1701	666	1418
W40A70L05	732	1668	658	1400
W40A70L10	757	1629	657	1396
W50A60L0	871	1912	734	1632
W50A60L05	823	1898	729	1590
W50A60L10	820	1876	717	1576
W50A70L0	952	1776	839	1456
W50A70L05	936	1681	760	1446
W50A70L10	851	1673	739	1436



Şekil 6.4 : GL2000 200 günlük rötire hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

6.5 Model B4 Rötire Tahmin Modeli

RILEM önerisi olan Model B3'ün geliştirilmiş bir versiyonu olarak 2015 yayınlanmıştır. İlk modele göre otojen ve kuruma rötresini ayırarak daha detaylı bir hesaplama sunmuştur [58].

Model için kullanılacak denklemler Çizelge 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 : B4 Model rötire hesaplama denklemleri.

Toplam Rötire	$\varepsilon_{\square} = \varepsilon_{au}(t', t'_0) + \varepsilon_{sh}(t', t'_0)$
Kuruma Rötresi	$\varepsilon_{sh}(t', t'_0) = \varepsilon_{sg\infty}(t'_0) k_h S(t')$
Zaman Düzeltmesi	$S(t') = \tanh \sqrt{\frac{t'}{\tau_{sh}}}$
Maksimum Kuruma Rötresi	$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a}{6c}\right)^{p_{ea}} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{p_{ew}} \left(\frac{6,5}{p}\right)^{p_{ec}} , p$ $= 2,350 \text{ kg/m}^3$
Elastisiteye Göre Rötire Düzeltme Faktörü	$\varepsilon_{sh\infty}(t'_0) = -\frac{\varepsilon_0 k_{ea} E(7B_{Th} + 600B_{Ts})}{E(t'_0 + \tau_{sh} B_{Ts})}$
Elastisite Modülü	$E(t) = E_{28} \sqrt{\frac{t}{4days + \left(\frac{6}{7}\right)t}}$
Bağıl Nem Faktörü	$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & h \leq 0,98 \\ 12,94(1 - h) - 0,2 & 0,98 \leq h \leq 1 \end{cases}$ $h = \text{bağıl nem}$
Kuruma Rötresi Yarılama Faktörü	$\tau_{sh} = \tau_0 k_{\tau_a} (k_s D / 1mm)^2 , D=2V/S$

Çizelge 6.10 (devam) : B4 Model rötre hesaplama denklemleri.

Maksimum Yarılama Faktörü	$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a}{6c}\right)^{p_{ta}} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{p_{tw}} \left(\frac{6,5}{p}\right)^{p_{tc}}, p = 2,350 \text{ kg/m}^3$	
Numune Şekil Faktörü	1	<i>sonsuz zemin</i>
	$k_s = 1,15$	<i>sonsuz silindir</i>
	1,25	<i>sonsuz kare prizme</i>
	1,3	<i>küre</i>
	1,55	<i>küp/prizma</i>
Otojen Rötre	$\varepsilon_{au}(t', t'_0) = \varepsilon_{au\infty} (1 + (\tau_{au}/(t' + t'_0))^{\alpha})^{r_1}, \alpha$ $= r_{\alpha}(w/0,38c)$	
Maksimum Otojen Rötre	$\varepsilon_{au\infty} = -\varepsilon_{cem} \varepsilon_{cem} \left(\frac{a}{6c}\right)^{r_{ea}} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{r_{ew}}$	
Otojen Rötre Yarılama Faktörü	$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{\tau_{tw}}$	
Sıcaklığın Yaş Etkisi (Kür Süresi)	$t'_0 = t_0 B_{Th}, B_{Th} = \exp\left(\frac{U_h}{R} (1/293 - 1/(T_{cur} + 273))\right),$ $U_h/R = 4000K$	
Sıcaklığın Yaş Etkisi (Beton Yaşı)	$t'_s = t_s B_{Ts}, B_{Ts} = \exp\left(\frac{U_s}{R} (1/293 - 1/(T_s + 273))\right),$ $U_s/R = 4000K$	

Çizelge 6.9’da kullanıcak olan parametreler Çizelge 6.10 [58] ve Çizelge 6.11 [58] ile gösterilmiştir. Çimento türüne göre parametreler değişecek olup Normal (Tip-1) beton değerleri alınmıştır.

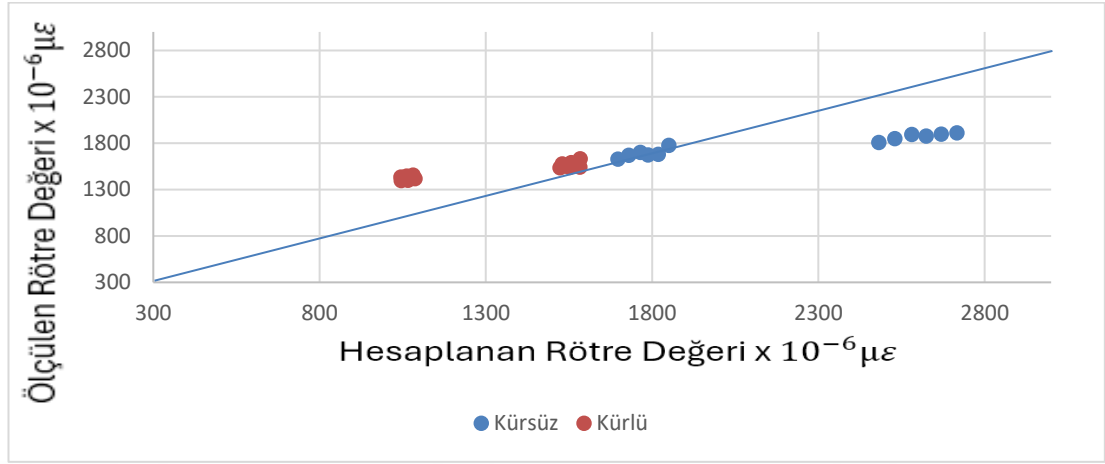
Çizelge 6.11 : Çimento tipine göre kuruma rötresi için faktörler.

Parametre	R (Normal)	RS (Yavaş priz alan)	SL(Hızlı priz alan)
$\tau_{au}, \text{cem, days}$	1	41	1
r_{tw}	3	3	3
r_t	-4,5	-4,5	-4,5
r_a	1	1,4	1
$\varepsilon_{au}, \text{cem}$	0,00021	-0,000084	0
r_{ea}	-0,75	-0,75	-0,75
r_{ew}	-3,5	-3,5	-3,5

Çizelge 6.12 : Çimento tipine göre otojen rötre için faktörler.

Parametre	R (Normal)	RS (Yavaş priz alan)	SL(Hızlı priz alan)
$\tau_{\square}, \text{cem, days}$	0,016	0,11	0,01
p_a	-0,33	-0,33	-0,33
p_{tw}	-0,06	-2,4	3,55
p_{tc}	-0,1	-2,7	3,8
e_{cem}	0,00036	0,00086	0,00041
p_{ea}	-0,8	-0,8	-0,8
p_{ew}	1,1	-0,27	1
p_{ec}	0,11	0,11	0,11

B4 modeli ile bulunan sonuçlar ve ölçülen değerler Çizelge 6.12 ve Şekil 6.5 ile karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : B4 Model 200 günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

Çizelge 6.13 : B4 Model günlük rötre hesapları ve ölçülen deney sonuçları.

Seriler	Doğrudan Kurumaya Bırakılan Seriler		7 Gün Kür Uygulanan Seriler	
	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Hesaplanan	$\varepsilon_{sh}(t, t_s) \times 10^{-6}$ Ölçülen
W40A60L0	2580	1894	1583	1543
W40A60L05	2530	1849	1552	1537
W40A60L10	2482	1807	1523	1536
W40A70L0	1764	1701	1087	1418
W40A70L05	1730	1668	1066	1400
W40A70L10	1698	1629	1046	1396
W50A60L0	2716	1912	1584	1632
W50A60L05	2669	1898	1556	1590
W50A60L10	2624	1876	1530	1576
W50A70L0	1851	1776	1081	1456
W50A70L05	1819	1681	1062	1446
W50A70L10	1788	1673	1045	1436

Hesaplanan sonuçlar ölçülen rötre değerleri ile en yakın sonuçları vermiştir. Rötre hesaplama modelinde, rötre yaşının hesaba katılmasına rağmen, yaşın doğrudan rötre üzerinde belirleyici bir etkisi olmadığı; bunun yerine, sıcaklık, nem ve rüzgar hızı gibi yaş ile birlikte değişebilen çevresel faktörlerin daha güçlü bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Beton yaşına bağlı olarak bu çevresel koşullar zamanla değişebileceğinden, yaşa bağlı değişimlerin dikkate alınmasıyla daha gerçekçi

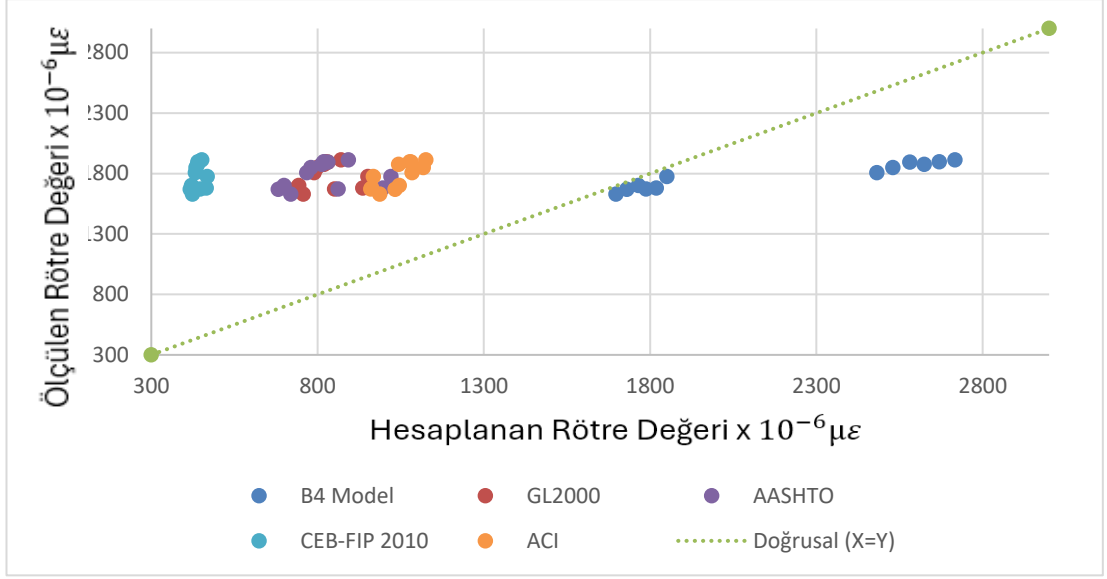
sonuçlara ulaşılabilir. Agrega boyutunun etkisi modelleme üzerinde yüksek seviyede görülmektedir.

6.6 ACI-209R.92, CEB-FIP 2010, AASHTO, GL2000 ve Model B4 Modelleri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

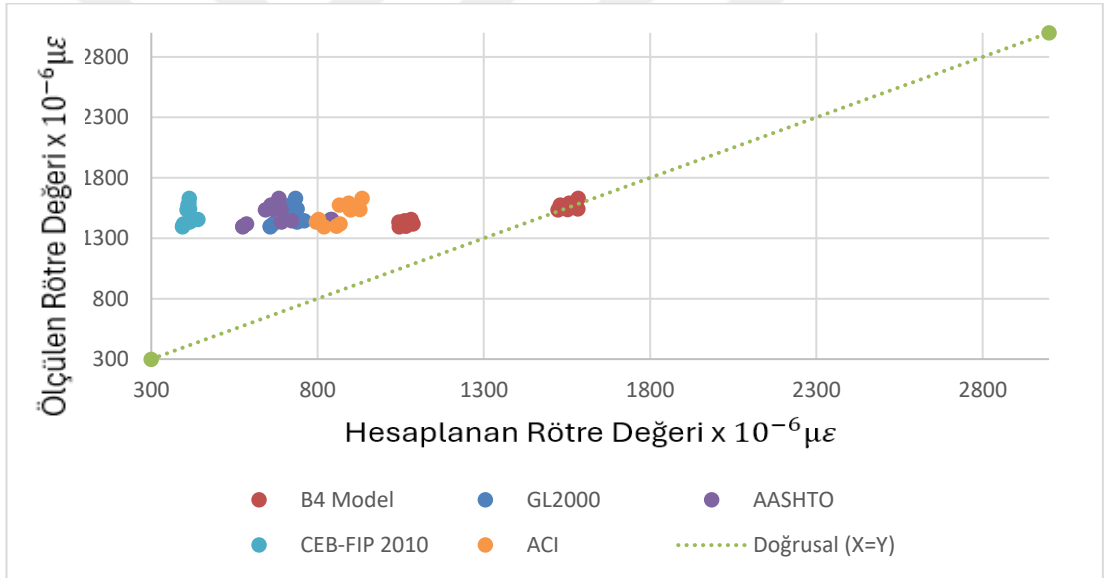
Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de gözlemlendiği üzere, elde edilen sonuçlar ACI-209R.92 ve Model B4 standardına en yakın değerleri yansıtmaktadır. AASHTO, CEB-FIP 2010 ve GL2000 modelleriyle elde edilen sonuçlar, bu değerlere yakın olmakla birlikte daha düşük çıkmıştır. Ancak, tüm modellemeler, ölçülen sonuçların genelinde bir alt sınıra sahiptir.

Modellerde kür etkisi farklı seviyelerde değerlendirilmiştir. ACI-209R.92 ve CEB-FIP 2010 kür uygulamasını doğrudan ve ayrıntılı bir şekilde ele alır. Her iki model de kür süresi ve koşullarına bağlı olarak rötre tahminlerinde önemli düzeltmeler yapar. GL2000 ve Model B4 kür etkilerini dikkate alan gelişmiş modellerdir. GL2000, kürün rötre üzerindeki etkisini zamana bağlı fonksiyonlarla değerlendirirken, Model B4 kür süresi ve koşullarını daha geniş bir perspektiften ele alarak rötre tahminlerini yapar. AASHTO kür uygulamasının rötre üzerindeki etkilerini dolaylı olarak hesaba katsa da, spesifik kür koşulları için detaylı düzeltmeler sunmaz. Diğer modellere göre kür etkilerini daha az ayrıntılı şekilde ele alır.

ACI-209R.92 ve AASHTO modelleri, beton dayanımının rötre tahminlerine doğrudan etkisini dikkate almaz veya çok sınırlı bir şekilde ele alır. ACI-209R.92 modeli dolaylı etkiler üzerinden dayanımı hesaba katarken, AASHTO modeli ise dayanım faktörünü doğrudan içermemektedir. CEB-FIP 2010 beton dayanımını dikkate alan ve bu parametreye göre rötre tahminlerinde düzeltmeler yapan bir modeldir. Dayanımın rötre üzerindeki etkisini açıkça belirten katsayılar ve formüller içerir. GL2000 ve Model B4 modelleri, beton dayanımının rötre tahminlerinde önemli bir faktör olduğunu kabul eder ve dayanımı doğrudan tahmin modellerine entegre eder. Her iki model de yüksek dayanımlı betonlar için daha düşük rötre tahminleri yapar ve dayanımın etkilerini detaylı bir şekilde analiz eder.



Şekil 6.6 : Tüm modellemelerin ölçülen değerler ile karşılaştırılması (kür uygulanmayan numuneler için).



Şekil 6.7 : Tüm modellemelerin ölçülen değerler ile karşılaştırılması (kür uygulanan numuneler için).

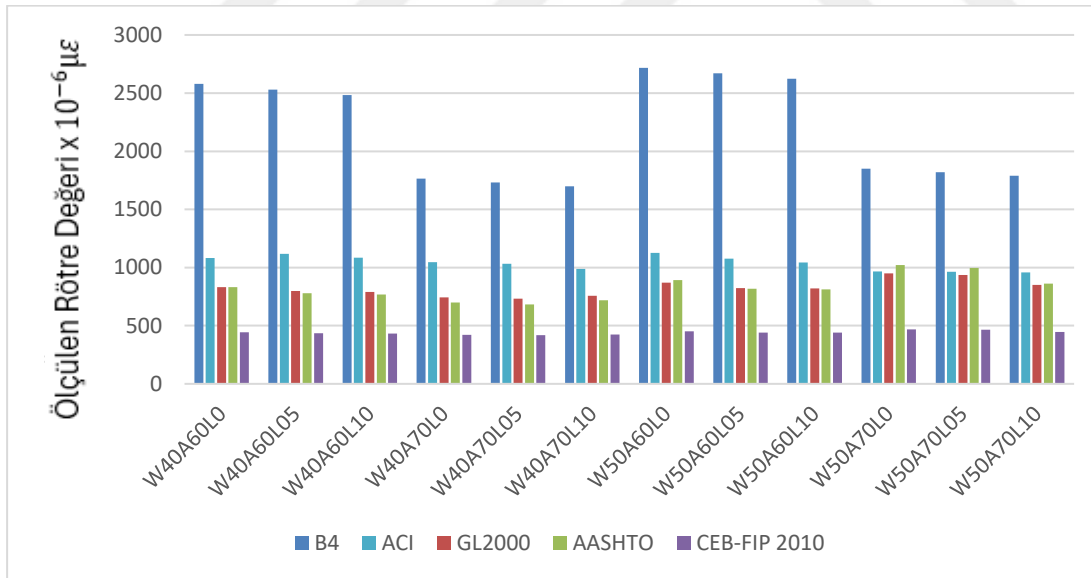
6.7 Tüm Modellerin Kendi İçerisinde Karşılaştırılması

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9 ile tüm modeller kendi içerisinde yapabileceği 200 günlük hesaplanan rötire değerleri gösterilmiştir.

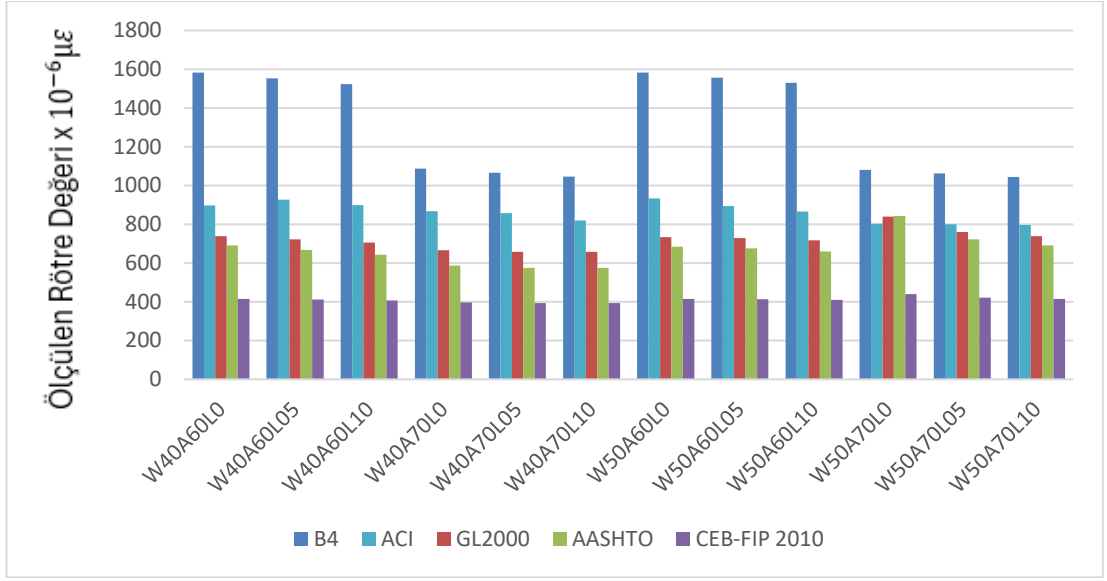
ACI-209R-92 modeli, çevresel koşullar ve beton karışım özelliklerini dikkate alarak rötire tahminleri yapar, ancak modern yüksek dayanımlı betonlar için sınırlı hassasiyet sunabilir. CEB-FIP 2010 modeli ise beton dayanımını ve çevresel etkileri daha kapsamlı bir şekilde ele alarak tahminler sağlar ve hem erken yaşta hem de uzun

vadede performansı iyileştirir. AASHTO modeli, genellikle pratik uygulamalarda kullanılan ampirik bir yaklaşımdır ve beton dayanımının doğrudan etkisini dikkate almaz, bu nedenle modern beton teknolojileri için sınırlı hassasiyet gösterebilir. GL2000 modeli, betonun mikroyapısal özelliklerini ve çevresel etkileri detaylı bir şekilde inceleyerek modern betonlar için daha hassas tahminler sunar. Model B4 ise betonun mikroyapısal özelliklerini, dayanımını ve çevresel etkileri daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirerek yüksek dayanımlı betonlar için en gelişmiş tahminleri sağlar

Sonuçlar, ACI 209R-92 ve B3&B4 modellerinin, diğer modellere kıyasla rötre tahminlerinde en doğru sonuçları verdiğini göstermektedir. GL 2000 modeli ise, daha basit ve doğrudan bir yaklaşım olmasına rağmen, rötre tahminlerinde, B4 gibi daha karmaşık modeller kadar doğruluk sağlamayabilir [59]. Bu karşılaştırmalar, Model B4, ACI ve GL2000 modelinin en uygun ve hassas tahmin modelleri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu 3 model arasında model B4'ün en iyi sonuçları verdiğini görülmektedir. Ancak daha gelişmiş bir yaklaşım olan B4 modeli, yüksek performanslı betonlar için geliştirilmiş doğruluk gösterse de, karmaşıklığı nedeniyle dikkatli bir uygulama gerektirmektedir [60].



Şekil 6.8: Tüm modellerin karşılaştırmalı grafiği (kür uygulanmayan).



Şekil 6.9: Tüm modellerin karşılaştırmalı grafiği (kür uygulanan).



7. SONUÇLAR

Kürün betonun kuruma etkisinde büzülme davranışına ve s/ç oranı, agrega oranı, çimento hamuru miktarı ve kalker tozu kullanımının büzülme davranışına etkilerini inceleyen çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Kuruma etkisinde betonda görülen kütle kaybının önemli bir kısmı ilk 10 gün içerisinde gerçekleşmiştir. Kütle kaybı 200 gün boyunca yavaşlayarak devam etmiş, belirli bir süre sonunda ise ağırlık kaybını gösteren eğri yataylaşmıştır. Ancak sonuçlar ağırlık kaybının küçük mertebelerde de olsa uzun süreler boyunca devam ettiğini göstermiştir.
2. Betona ait 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde s/ç oranı arttıkça dayanım azalmıştır. Agrega miktarının artmasıyla dayanımlar artmıştır.
3. Betona ait elastisite modülleri 0%, 5% ve 10% kalker oranında karşılaştırıldığında kalker miktarı arttıkça elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bu değişim çok küçük seviyelerde olması nedeniyle kalker tozu kullanımının elastisite modülünü yüksek miktarda etkilemediği sonucuna varılmıştır.
4. Elastisite modülü ve rötre ilişkisine bakıldığında, beton numuneye ait elastisite modülü azaldıkça rötre arttığı görülmüştür. Bu yapı içerisinde elastik şekil değiştirmeye karşı direncin artmasının rötre yapabilme kapasiteni azalttığı sonucunu kuvvetlendirmektedir.
5. Çimento hamuru ve/veya su miktarı artması durumunda rötre yapabilme kapasitenin matris içerisindeki çimento hamuru ve/veya su miktarının artmasına bağlı olarak arttığını göstermiştir.
6. Agrega miktarının artmasına bağlı olarak ağırlık değişimi ve nihai rötre arttığı gözlemlenmiştir. Agrega miktarının su kaybını kısıtlaması ile bu sonucun elde edildiği anlaşılmaktadır.
7. Kılcallık katsayısı ve rötre doğru orantılı olduğu görülmektedir. Buradan beton yapısı içerisindeki geçirimsizlik arttıkça rötre yapabilme kapasitesinin arttığı sonucuna varılmıştır.

8. Tüm deney sonuçları dikkate alındığında 7 günlük kür uygulamasının betonun kuruma etkisinde büzülme davranışını olumlu etkilediği, kür uygulanmış numunelerin uygulanmamış numunelere göre 20% seviyesinde daha az rötre yaptığı anlaşılmıştır.
9. Ölçülen rötre değerleri uluslararası standart rötre modellerinin birçoğunun tahmin ettiği sonuçların üstünde çıkmıştır. Modelleme esnasında kullanılan değişkenlerin yüksek sayıda olduğu Model B4 ve ACI modelleri daha yakın tahminlerde bulunmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] **Perenchio, W. F. (1997).** “The Drying Shrinkage Dilemma-Some Observations and Questions About Drying Shrinkage and its Consequence,” Concrete
- [2] **ACI (t.y.)** CT-13 ACI Concrete Terminology. www.concrete.org
- [3] **de Medeiros-Junior, R. A., de Lima, M. G., & de Medeiros, M. H. F. (2015).** Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment, Development and Sustainability*, 17(5), 1103–1119.
- [4] **Mokarem, D. W., Cousins, T. E., Dillard, J. G., Wightman, J. P., & Lane, D. S. (2002).** DEVELOPMENT OF CONCRETE SHRINKAGE PERFORMANCE SPECIFICATIONS.
- [5] **Markovski, G., Čećez, M., University, C., Bijedić, D., Mostar, in, & Šahinagić-Isović, M. (t.y.).** Shrinkage strain of concrete-causes and types Deformacije skupljanja betona-uzroci i vrste.
- [6] **Almusallam, A. A., Maslehuddin, M., Abdul-Waris, M., & Khan, M. M. (1998).** Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. In *Construction and Building Materials* (Vol. 12).
- [7] **Lyman, C. G. (1934).** Growth and Movement in Portland Cement Concrete. London: Oxford University Press.
- [8] **Hai, Y., & Zhu, Y.-M. (2009).** Mesocosmic study on autogenous shrinkage of concrete with consideration of effects of temperature and humidity. *Water Science and Engineering*, 2(4), 85–94.
- [9] **Pekmezci Y. (2006)** YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTOLU ÜRÜNLERİN OTOJEN RÖTRE ÖZELİKLERİ. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul
- [10] **Chandra, S. (1997).** INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (Vol. 27, Issue IO).
- [11] **ACI (t.y.),** ACI 209.1R-05: Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete, Farmington Hills, USA, 12p.
- [12] **Erdoğan, T.Y. (2003).** Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, Ankara, 741 s.
- [13] **Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014).** Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 68, pp. 501–516). Elsevier Ltd.
- [14] **Wang, Q., Yang, J., & Chen, H. (2017).** Long-term properties of concrete containing limestone powder. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(3).

- [15] **Aitcin, P. C., Neville, A., & Acker, P. (1997).** Integrated view of shrinkage deformation. *Concrete International*, 19(9), 35-41.
- [16] **Topçu, L. B., & Bilir, T. (2010, October).** Experimental investigation of drying shrinkage cracking of composite mortars incorporating crushed tile fine aggregate. *Materials & Design*, 31(9), 4088–4097.
- [17] **Sakata, K., & Shimomura, T. (2004).** Recent Progress in Research on and Code Evaluation of Concrete Creep and Shrinkage in Japan. In *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 2, Issue 2).
- [18] **Maruyama, I., Sugimoto, H., Umeki, S., & Kurihara, R. (2022).** Effect of fineness of cement on drying shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 161.
- [19] **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.
- [20] **Davis, H. (1940).** Autogenous Volume Change of Concrete. 43rd Annual American Society for Testing Materials Meeting, (s. 1103-1113). New Jersey
- [21] **Samman, T.A., Mirza, W.H. and Wafa, F.F. (1996).** "Plastic shrinkage cracking of normal and highstrength concrete: a comparative study". *ACI Materials Journal*, Vol. 93(1)
- [22] **Zhang, J., Han, Y. D., & Gao, Y. (2014).** Effects of Water-Binder Ratio and Coarse Aggregate Content on Interior Humidity, Autogenous Shrinkage, and Drying Shrinkage of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(1), 184–189.
- [23] **Blanks, R. F.; Vidal, E. N.; Price, W. H.; and Russell, F.M. (1940).** “The Properties of Concrete Mixtures,” *ACI JOURNAL*, Proceedings V. 36, Apr., pp. 433-476.
- [24] **Lea, F. M. (1976, January 1).** The Chemistry of Cement and Concrete. http://books.google.ie/books?id=D8lnzwEACAAJ&dq=Chemistry+of+Cement+and+Concrete&hl=&cd=6&source=gbs_api
- [25] **Elzokra, A., al Hour, A., Habib, A., Habib, M., & Malkawi, A. B. (2020).** Shrinkage behavior of conventional and nonconventional concrete: A review. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(9), 1839–1851.
- [26] **Cusson, D., & Hoogeveen, T. (2008).** Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 757–765.
- [27] **Ye, J., Hu, S., Wang, F., Zhou, Y., & Liu, Z. (2006).** Effect of Pre-wetted Lightweight Aggregate on Internal Relative Humidity and Autogenous Shrinkage of Concrete. In *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* (Vol. 21, Issue 1).
- [28] **Al-Akhras, N. M., Jamal Shannag, M., & Malkawi, A. B. (2016).** Evaluation of shear-deficient lightweight RC beams retrofitted with adhesively

bonded CFRP sheets. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(8), 899–913.

- [29] **Kwan, A. K. H., Mckinley, M., & Chen, J. J. (2013).** Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce shrinkage of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(15), 942–950.
- [30] **Wang, T., Peng, Q., Liu, W., & Feng, L. (2011).** Study on shrinkage of concrete based on BP neural network. *Advanced Materials Research*, 163–167, 3249–3257.
- [31] **AASHTO**, “LRFD Bridge Design Specification,” 8th Edition, Washington, DC, 2017.
- [32] **Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M. R., & Al-Mehthel, M. H. (2013).** Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 634–641.
- [33] **Visagie, J. W., Moelich, G. M., Meyer, D. M., Kanyenze, S. S., Kayondo, M., Boshoff, W. P., & Combrinck, R. (2023, January).** Effect of surface curing timing on plastic shrinkage cracking of concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1).
- [34] **Carlson, R. W. (1938).** “Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors,” *Proceedings, ASTM*, Vol. 38, Part II, pp. 419-437.
- [35] **İÇME SUYU ARITMA TESİSLERİ AYLIK ORTALAMA ANALİZ RAPORU - ŞUBAT 2023. (2023, February).** In İSKİ, <https://Iski.Istanbul/>. İstanbul Büyükşehir Belediyesi. Retrieved December 18, 2023, from https://cdn.iski.istanbul/uploads/Su_Kalite_Raporu_2023_Subat_ab403f12c4.pdf?_gl=1*15191v7*_ga*MTg0ODQ3MTMwMy4xNzAyOTE4NjUy*_ga_RDP0Z933YX*MTcwMjkxODY1MS4xLjEuMTcwMjkxODY2OS4wLjAuMA.
- [36] **Türk Standartları Enstitüsü, (1980, December 19).** TS 707 Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi. TSE.
- [37] **Türk Standartları Enstitüsü (2009, April 24).** TS 706 EN 12620+A1 Beton Agregaları. TSE.
- [38] **Sümer, M. (1994).** Harçlarda Kılcal ve Basınçlı Su Altındaki Geçirimsizliğin Su Çimento Oranı ile Değişimi. 5(21).
- [39] **Lai, W. L., Kind, T., & Wighenhauser, H. (2010).** A study of concrete hydration and dielectric relaxation mechanism using ground penetrating radar and short-time Fourier transform. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2010.
- [40] **Al-Lami, M. S. (2021).** Correlation between permeability and porosity with other properties of concrete. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 538–546.

- [41] **Mostonejad, D., Nasrollahi, M., Bahmani, H., Zajshoor, Z., & Sadeghi, M. (2024).** Enhancing concrete strength and durability of normal and high-strength concrete: Exploring combined effects of optimized silica fume and slag.
- [42] **Yang, J., Wang, Q., & Zhou, Y. (2017).** Influence of Curing Time on the Drying Shrinkage of Concretes with Different Binders and Water-to-Binder Ratios. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- [43] **Nilimaa, J., & Zhaka, V. (2023).** An Overview of Smart Materials and Technologies for Concrete Construction in Cold Weather. *Eng*, 4(2), 1550–1580.
- [44] **Berman, M., & D., J. E. (2004).** Concrete curing methods: Effects on the compressive strength and shrinkage. *Journal of Civil Engineering*, 33(2), 123-135.
- [45] **ACI Committee 308. (2001).** Guide to Curing Concrete. American Concrete Institute.
- [46] **Tia, M., Hossiney, N., & Bekoe, P. (2009).** Modulus of Elasticity, Creep and Shrinkage of Concrete: Phase II.
- [47] **Souza, A. T., Barbosa, T. F., Riccio, L. A., & Santos, W. J. dos. (2020).** Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 847–856.
- [48] **Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., & Irassar, E. (2003).** Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 979-986.
- [49] **Chen, J., Li, Y., Wen, L., Guo, H., & Li, K. (2022).** Effect of Different Curing Processes on Hydraulic Concrete Performance. *ACI Materials Journal*,
- [50] **Wang, Y., Li, L., An, M., Sun, Y., Yu, Z., & Huang, H. (2022).** Factors Influencing the Capillary Water Absorption Characteristics of Concrete and Their Relationship to Pore Structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4).
- [51] **Zhang, G., Chen, P., Si, X., Wang, J., & Han, Y. (2022).** Research on Shrinkage and Shrinkage Models of Reinforced Concrete Specimens. *The Open Civil Engineering Journal*, 16(1).
- [52] **Branson, D. E., and Christiason, M. L., 1971,** “Time Dependent Concrete Properties Related to Design—Strength and Elastic Properties, Creep and Shrinkage,” *Creep, Shrinkage and Temperature Effects*, SP-27, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 257-277
- [53] **James, E., Rhodes, K., Carreira, D.J., Beaudoin, J.J., Brauson, D.E., Gamble, B.R., Geymayer, H.G., Goyalt, B.B., Hope, B.B., & Keeton, J.R. (1998).** **ACI 209 R-92 (Reapproved 1997) Prediction of Creep , Shrinkage , and Temperature Effects in Concrete Structures Reported by ACI Committee 209.**

- [54] **Fédération internationale du béton., Comité euro-international du béton., & Fédération internationale de la précontrainte. (2010).** Model code 2010 : first complete draft. Fédération internationale du béton.
- [55] **Shurbert-Hetzel, C., Daneshvar, D., Robisson, A., & Shafei, B. (2023).** Data-enabled comparison of six prediction models for concrete shrinkage and creep. *Case Studies in Construction Materials*, 19.
- [56] **American Concrete Institute., & ACI Committee 209--Creep and Shrinkage. (2008).** Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete. American Concrete Institute.
- [57] **Gardner, N. J., & Lockman, M. J. (2018).** Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete. *ACI Materials Journal*,
- [58] **RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Zdeněk, P. B. chair). (2015).** RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis*: Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 48(4), 753–770.
- [59] **Tahsin, A. (2022).** Comparative Study Between the Creep and Shrinkage Prediction Models.
- [60] **Pan, Z., Zhang, H., Zeng, B., & Wang, Y. (2023).** Statistical Evaluation of CEB-FIP 2010 Model for Concrete Creep and Shrinkage. *Materials*, 16(4).



EKLER

EK A: İçme Suyu Arıtma Tesisleri Aylık Ortalama Analiz Raporları – Şubat 2023



Çizelge A.0.1 : İçme Suyu Arıtma Tesisleri Aylık Ortalama Analiz Raporları – Şubat 2023.

		Yönet melik	Ömerli							Kağ ıthane		İkitelli			
Parame tre	Biri m		1	2	3	4	5	Cumh uriyet	El malı	1	2	1	2	Taş oluk	Büyükçe kmece
MİKROBİYOLOJİK PARAMETRELER															
Kolifor m Bakteri	kob/1 00ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E.coli	kob/1 00ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enterok ok	kob/1 00ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C.perfri ngens (Sporla r Dahil)	kob/1 00ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KİMYASAL PARAMETRELER															
Akrila mid	µg/L	0,1	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0,02	<0,02	<0,0 2	<0,0 2	<0, 02	<0, 02	<0,02	<0,02
Antimo n	µg/L	5	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Arsenik	µg/L	10	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Benzen	µg/L	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Benzo (a) piren	µg/L	0,01	<0, 005	<0, 005	<0, 005	<0, 005	<0, 005	<0,005	<0,00 5	<0,0 05	<0,0 05	<0, 005	<0, 005	<0,00 5	<0,005
Bor	mg/L	1	0	0	0	0	0	0,04	0,03	0	0,04	0	0	0,02	0,07
Bromat	µg/L	10	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Kadmiy um	µg/L	5	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Krom	µg/L	50	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Bakır	mg/L	2	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0,01	<0,01	<0,0 1	<0,0 1	<0, 01	<0, 01	<0,01	<0,01
Siyanür	µg/L	50	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
1,2- dikloret an	µg/L	3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Epiklori din	µg/L	0,1	<0, 1	<0, 1	<0, 1	<0, 1	<0, 1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0, 1	<0, 1	<0,1	<0,1
Florür	mg/L	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	0,07	0,1	0,07	0,1	0,1	0,04	0,19
Kurşun	µg/L	10	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Civa	µg/L	1	<0, 2	<0, 2	<0, 2	<0, 2	<0, 2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0, 2	<0, 2	<0,2	<0,2
Nikel	µg/L	20	<2, 0	<2, 0	<2, 0	4,7	<2, 0	5,36	3,54	<2,0	5,08	<2, 0	<2, 0	<2,0	<2,0
Nitrat	mg/L	50	7,1	5,6	5,2	8,3	7,1	6,39	3,68	1,5	5,84	1,6	0,9	0,9	1,34
Nitrit	mg/L	0,5	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0, 02	<0,02	<0,02	<0,0 2	<0,0 2	<0, 02	<0, 02	<0,02	<0,02

Çizelge A.1 (devam) : İçme Suyu Arıtma Tesisleri Aylık Ortalama Analiz Raporları – Şubat 2023.

Parametre	Birim	Yönetmelik	Ömerli					Cumhuriyet	Elmalı	Kağıthane		İkitelli		Taşoluk	Büyükçekmece
			1	2	3	4	5			1	2	1	2		
Selenyum	µg/L	10	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
Tetrakloreten	µg/L	10	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Trikloretan			<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Toplam Trihalometanlar	µg/L	100	19	13	20	19	30	19,4	25	18	19,8	<10	11	10,7	22,5
Vinil Klorür	µg/L	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
GÖSTERGE PARAMETRELERİ															
Alüminyum	µg/L	200	77	42	82	<20	75	<20	26,4	43	28,7	66	76	48,7	37,8
Amonyum	mg/L	0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Klorür	mg/L	250	54	52	34	80	45	65	205,7	84	73,5	41	29	30,1	130,2
Renk (Pt-Co)	mg/L	TKED	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
İletkenlik	µS/cm ⁻¹	2500	534	479	306	580	521	440	911	627	528	419	354	363	804
pH		≤9,5-6,5≤	7,5	7,4	5	7,2	7,5	6,81	6,8	7,1	7,03	7,2	7,2	7,25	7,37
Demir	µg/L	200	<20	<20	<20	<20	<20	39,94	<20	<20	30,2	<20	<20	<20	<20
Mangan	µg/L	50	11	<10	<10	<10	15	<10	16,1	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Koku	TKED		Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Sülfat	mg/L	250	41	40	37	21	45	21,9	58,2	80	29	48	38	38,6	96,1
Sodyum	mg/L	200	38	39	44	29	32	27,8	160,2	72	51,9	25	20	19,6	97,3
Tat	TKED		Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Toplam Organik Karbon	mg/L	ADY	2,9	2,7	2,8	2,7	2,9	2,33	3,92	3,6	2,86	3,2	3,1	2,91	3,66
Bulanıklık	NTU	1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,1	0,23	0,19	0,2	0,15	0,3	0,3	0,29	0,19
RADYOAKTİVİTE PARAMETRELERİ															
Trityum	Bq/L	100	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
Toplam gösterge dozu	mSv/yıl	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ubeydullah AYVAZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm

MESLEKİ DENEYİM:

- **2021-2022** : Marsh Reasürans Sigorta ve Brokerlik, Client Representative
- **2022-2023** : Anadolu Sigorta A.Ş., Underwriter
- **2023 -** : Axa Sigorta A.Ş., Underwriter