

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EN BÜYÜK AGREGA BOYUTUNUN BETONUN KURUMA RÖTRESİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağın SAĞLAM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EN BÜYÜK AGREGA BOYUTUNUN BETONUN KURUMA RÖTRESİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağın SAĞLAM
(501201003)**

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 MAXIMUM AGGREGATE SIZE ON CONCRETE
SHRINKAGE**

M.Sc. THESIS

**Çağın SAĞLAM
(501201003)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Dr. Ünal Anıl DOĞAN

SEPTEMBER 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501201003 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Çağın SAĞLAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “EN BÜYÜK AGREGA BOYUTUNUN BETONUN KURUMA RÖTRESİNE 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. Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Beykent Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür EKİNCİOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

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





Değerli Selen'e,



ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince bana kıymetli zamanını ayıran, her zaman desteğini esirgemeyen ve değerli bilgisiyle yol gösteren danışmanım Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecimde sürekli yanımda olan meslektaşım Ubeydullah AYVAZ'a minnettarlığımı sunmak isterim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve karşılaştığım her zorlukta yanımda olan babam Necati SAĞLAM'a ve annem Havva Nur Sağlam'a sevgilerimi, saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2024

Çağın SAĞLAM
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	9
2.1 Malzemeler.....	9
2.1.1 Agregalar.....	9
2.1.2 Karışım oranları	10
2.2 Numune Üretimi ve Taze Beton Deneyleri.....	11
2.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	13
2.3.1 Elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri.....	13
2.3.2 Boy ve ağırlık değişimi ölçümleri.....	13
2.3.3 Kılcallık deneyi.....	13
3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	15
3.1 Boy Değişimi Ölçümleri	15
3.2 Ağırlık Ölçümleri	16
3.3 Elastisite Modülü.....	18
3.4 28 Günlük Basınç Dayanımı Değerleri	19
3.5 Su Miktarı & Rötire İlişkisi.....	20
3.6 Çimento Miktarı & Rötire İlişkisi	21
3.7 Kalker Tozu & Rötire İlişkisi	22
3.8 Elastisite Modülü & Rötire İlişkisi.....	24
3.9 Elastisite Modülü & Rötire İlişkisi.....	24
3.10 Kılcallık Katsayısı	25
3.11 Su Miktarı & Kılcallık Katsayısı İlişkisi.....	26
3.12 Agrega Hacmi & Kılcallık Katsayısı İlişkisi.....	27
3.13 Kalker Tozu & Kılcallık Katsayısı İlişkisi	27
3.14 Rötire Miktarı & Kılcallık Katsayısı İlişkisi	28
4. SONUÇLARIN MEVCUT MODELLERLE İNCELENMESİ	31
4.1 Amerikan Beton Enstitüsü - ACI-209R Rötire Modeli.....	31
4.2 Avrupa Uluslararası Beton Komitesi – CEB-FIP2010 Rötire Modeli	36
4.3 Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği–AASHTO-2012 Rötire Modeli	40
4.4 Model B4 Rötire Tahmin Modeli.....	43
4.5 Modellerin Birbirleriyle Karşılaştırılması	47
5. SONUÇLAR.....	49

KAYNAKLAR.....	51
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	73



KISALTMALAR

S/Ç	: Su/Çimento Oranı
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
CEB	: Avrupa Uluslararası Beton Komitesi
AASHTO	: Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği





SEMBOLLER

W	: Ağırlıkça su/çimento oranı
A	: Hacimce agrega oranı
L	: Hacimce kalker tozu oranı
X	: Hacimce agrega miktarı
C	: Çimento ağırlığı
D16	: Maksimum 16 mm agrega çaplı numune
D32	: Maksimum 32 mm agrega çaplı numune
Dort	: Numune rötre miktarı
kPa	: Kilopascal
GPa	: Gigapaskal
ϵ	: Şekil değiştirme
$\epsilon_{sh}(t, t_{sh}, 0)$	: Birim rötre deformasyonu
t	: Zaman (gün)
tsh,0	: Kuruma başlangıcı (gün)
ϵ_{shu}	: Son birim rötre deformasyonu
ϵ_{cso}	: Portland çimentosunun kuruma rötresi
ϵ_s	: Bağlı nem-rötre tablosundan elde edilen kuruma rötresi
β_{sc}	: Çimento türüne bağlı katsayı
β_{RH}	: Bağlı nem katsayısı
f_{cm}	: 28 günlük basınç dayanımı



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Elek analizi sonuçları.	9
Çizelge 2.2 : S/Ç oranı 0,4 olan numunelerin karışım oranları.	10
Çizelge 2.3 : En büyük 16 mm çaplı agregaya içeren numunelerin teorik ve gerçek karışım miktarları.	12
Çizelge 2.4 : En büyük 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin teorik ve gerçek karışım miktarları.	12
Çizelge 3.1 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin elastisite değerleri.	18
Çizelge 3.2 : 28 günlük basınç dayanımı değerleri.	19
Çizelge 3.3 : Su hacmi & rötre miktarları.	20
Çizelge 3.4 : Kalker oranı & rötre miktarları.	23
Çizelge 3.5 : Numunelerin kılcallık katsayıları.	26
Çizelge 3.6 : D16 numunelerin kılcallık katsayısı ve rötre miktarı.	28
Çizelge 3.7 : D32 numunelerin kılcallık katsayısı ve rötre miktarı.	29
Çizelge 4.1 : Büzülme düzeltme faktörleri ilk nemli kütleme.	32
Çizelge 4.2 : Tüm faktörleri ile aci-209r'ye göre maksimum 16 mm agregaya içeren numunelerin rötre hesabı.	33
Çizelge 4.3 : Tüm faktörleri ile aci-209r'ye göre maksimum 32 mm agregaya içeren numunelerin rötre hesabı.	33
Çizelge 4.3 (devam) : Tüm faktörleri ile aci-209r'ye göre maksimum 32 mm agregaya içeren numunelerin rötre hesabı.	34
Çizelge 4.4 : Maksimum 16 mm çaplı agregaya içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.	34
Çizelge 4.5 : Maksimum 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.	34
Çizelge 4.5 (devam) : Maksimum 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.	35
Çizelge 4.6 : Denklemlerde kullanılan katsayılar.	36
Çizelge 4.7 : Maksimum 16 mm çaplı agregaya içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve çimento sınıfı katsayıları.	37
Çizelge 4.8 : Maksimum 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve çimento sınıfı katsayıları.	38
Çizelge 4.9 : Maksimum 16 mm agregaya içeren numunelerin ceb-fib 2010'a göre hesaplanan rötre değerleri.	38
Çizelge 4.10 : Maksimum 32 mm agregaya içeren numunelerin ceb-fib 2010'a göre hesaplanan rötre değerleri.	39
Çizelge 4.11 : Tüm numuneler için hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.	39
Çizelge 4.12 : ASSHTO rötre denklemleri.	41
Çizelge 4.13 : Maksimum 16 mm agregaya içeren numunelerin AASTHO 2012'ye göre rötresi.	41

Çizelge 4.14 : Maksimum 32 mm agrega çaplı numunelerin AASTHO 2012'ye göre rötresi.	42
Çizelge 4.15 : Tüm numuneler için hesaplanan ve ölçülen rötire değeri.	42
Çizelge 4.16 : B4 model rötire hesaplama denklemleri.	44
Çizelge 4.17 : Beton türüne göre kuruma rötresi faktörleri.	44
Çizelge 4.18 : Beton türüne göre otojen rötire faktörleri.	45
Çizelge 4.19 : B4 rötire modeline göre hesaplanan ve ölçülen rötire değeri.	46



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Su/çimento oranına göre elde edilen kuruma rötreleri.	5
Şekil 1.2 : Numunelerin kuruma rötresi (11:10% kalker tozu, 12: 20% kalker tozu, 13: 30% kalker tozu).	6
Şekil 2.3 : Beton döküm aşaması.....	11
Şekil 2.4 : Numune boy değişimi ölçümü.	13
Şekil 3.1 : W40A60L0 numune rötire ölçümleri.	15
Şekil 3.2 : W40A60 karışım oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.	16
Şekil 3.3 : W40A70 oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.	16
Şekil 3.4 : W50A60 oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.	17
Şekil 3.5 : W50A70 oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.	17
Şekil 3.6 : S/Ç 0,4 ve agrega oranı hacimce 0,6 olan ve kalker tozu içermeyen numunenin gerilme - şekil değiştirme grafiği [GPa-ε].	18
Şekil 3.7 : D16-D32 numunelerin su miktarı & rötire grafiği.	21
Şekil 3.8 : Çimento miktarı ve rötire ilişkisi.....	22
Şekil 3.9 : Kalker oranı & rötire miktarları.	23
Şekil 3.10 : Elastisite modülü & rötire miktarları.....	24
Şekil 3.11 : Ağırlık değişimi ve rötire ilişkisi.....	25
Şekil 3.12 : Su miktarı ve kılcallık katsayısı ilişkisi.....	27
Şekil 3.13 : Agrega hacmi ve kılcallık katsayısı ilişkisi.....	27
Şekil 3.14 : Kılcallık katsayısı ve kalker oranı ilişkisi.	28
Şekil 3.15 : Numunelerin rötire miktarı ve kılcallık katsayısı karşılaştırması.....	29
Şekil 4.1 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri grafik karşılaştırması.	35
Şekil 4.2 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri grafik karşılaştırması.	40
Şekil 4.3 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri grafik karşılaştırması.	43
Şekil 4.4 : B4 model 200 günlük rötire hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.....	46
Şekil 4.5 : Maksimum 16 mm çaplı agrega içeren numunelerin modellere göre hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri.	47
Şekil 4.6 : Maksimum 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin modellere göre hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri.	48
Şekil E.1 : W40A60L05 numune rötire ölçümleri.	56
Şekil E.2 : W40A60L10 numune rötire ölçümleri.	56
Şekil E.3 : W40A70L0 numune rötire ölçümleri.	57

Şekil E.4 : W40A70L05 numune rötre ölçümleri.....	57
Şekil E.5 W40A70L10 Numune Rötre Ölçümleri.....	58
Şekil E.6 : W50A60L0 numune rötre ölçümleri.....	58
Şekil E.7 : W50A60L05 numune rötre ölçümleri.....	59
Şekil E.8 : W50A60L10 numune rötre ölçümleri.....	59
Şekil E.9 : W50A70L0 numune rötre ölçümleri.....	60
Şekil E.10 : W50A70L05 numune rötre ölçümleri.....	60
Şekil E.11 : W50A70L10 numune rötre ölçümleri.....	61
Şekil E.12 : W40A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	61
Şekil E.13 : W40A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	62
Şekil E.14 : W40A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	62
Şekil E.15 : W40A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	63
Şekil E.16 : W40A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	63
Şekil E.17 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil E.18 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil E.19 : W50A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	65
Şekil E.20 : W50A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	65
Şekil E.21 : W50A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	66
Şekil E.22 : W40A60L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	66
Şekil E.23 : W40A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	67
Şekil E.24 : W40A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	67
Şekil E.25 : W40A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	68
Şekil E.26 : W40A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	68
Şekil E.27 : W40A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	69
Şekil E.28 : W50A60L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	69
Şekil E.29 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	70
Şekil E.30 : W50A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	70
Şekil E.31 : W50A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	71
Şekil E.32 : W50A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	71
Şekil E.33 : W50A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	72

EN BÜYÜK AGREGA BOYUTUNUN BETONUN KURUMA RÖTRESİNE ETKİSİ

ÖZET

Beton, çeşitli dış etkenlere maruz kaldığında, özellikle sıcaklık değişimleri, rüzgar, düşük nem oranı ve çimento hidratasyonu gibi faktörler, beton yüzeyinde terleme oluşumuna neden olmaktadır. Bu terleme, betonun iç yapısındaki suyun yüzeye doğru hareket etmesi ve buharlaşması ile meydana gelir. Terleme süreci, betonun henüz taze olduğu ilk aşamalarda daha belirgin olmakla birlikte, suyun yüzeyde buharlaşması sonucu beton içerisinde içsel gerilimler oluşur. Bu gerilimler, betonun büzülmesi yani rötre olarak bilinen çatlakların ortaya çıkmasına yol açar.

Bu rötre çatlakları, betonun dayanımını etkiler ve zamanla betonun servis ömrünü azaltır. Çatlaklar, yapı malzemesinin bütünlüğünü bozar ve yapıya zarar verir. Bu durum, betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyerek yapısal zayıflıklara neden olur. Dolayısıyla, rötre oluşumu betonun performansını ve uzun vadeli sağlamlığını etkiler, bu da yapıya bakım veya onarım gerekliliğini doğurur.

Rötre çatlaklarının önlenmesi ve kontrol altına alınması, betonun performansını korumak ve uzun vadede yapının sürdürülebilirliğini sağlamak açısından büyük önem taşır. Rötreyi minimize etmek için beton karışımında kullanılan malzemelerin özellikleri, su/çimento oranı, agrega türü ve boyutu gibi faktörlerin dikkatle seçilmesi gerekmektedir.

Betonun rötresini etkileyen faktörler arasında çimento hamurunun hacmi, ortamın koşulları, kullanılan çimento türü, kullanılan inert madde oranı, su/çimento oranı ve agrega özellikleri önemli bir yer tutar. Bu çalışmanın odak noktası, betonun bileşimindeki çimento miktarı, su/çimento oranı, agrega konsantrasyonu ve maksimum agrega çapı gibi parametrelerin betonun kuruma rötresi üzerindeki etkisini açıklamaktır.

Çimento miktarı, beton karışımındaki çimento yoğunluğunu belirlerken, su/çimento oranı suyun beton içindeki dağılımını ve betonun rötre oluşumunu etkiler. Agrega yoğunluğu ve en büyük agrega çapı ise betonun iç yapısını ve boşlukların büyüklüğünü belirleyerek rötre oluşumu üzerinde etkilidir.

Yapılan çalışma kapsamında agrega çapı 16 mm ve 32 mm olan iki farklı numune grubu hazırlanmıştır. Bu numune gruplarında su/çimento oranı 0.4 ve 0.5, agrega konsantrasyonu oranı 0.6 ve 0.7 ve kalker tozu oranı bağlayıcıya göre ağırlıkça 0.0, 0.05 ve 0.10 olacak şekilde karışım oranları hazırlanmıştır. Deneyler için her numuneden 3 adet üretilmiştir. Numuneler sabit nem oranı ($35 \pm 5\%$) ve sabit sıcaklık ($24 \pm 5^\circ\text{C}$) koşulları altında incelenmiştir. Bu koşullar altında toplamda 24 farklı beton karışımı üretilmiştir ve elde edilen numunelerin yarısında çapı maksimum 16 mm, diğer yarısında çapı maksimum 32 mm olan agregalar kullanılmıştır.

Hazırlanan bu numuneler üzerinde elastisite modülü, basınç dayanımı, boy ve ağırlık değişimleri ve kılcallık deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, boy değişimi (rötre) deneyi için numuneler üzerinde 200 gün boyunca boy ölçümü deneyi yapılmıştır ve maksimum agrega çapının artmasıyla rötre azaldığı, su/çimento oranının artmasıyla rötre arttığı, agrega konsantrasyonunun artmasıyla rötre azaldığı ve kalker tozu oranının artmasıyla rötre nispeten azaldığı sonuçlarına varılmıştır. Rötre üzerindeki en belirleyici faktörün maksimum agrega çapı ve agrega konsantrasyonu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), AASTHO (Amerikan Devlet Yolları ve Ulaşım Görevlileri Birliği) ve CEB-FIP (Avrupa Beton Birliği - Uluslararası Beton Birliği) gibi uluslararası yönetmeliklerde yer alan rötre hesap modelleri incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ölçülen değerlere en yakın değerleri B4 Rötre Modeli vermiştir. B4 modelinin başarısının temel sebeplerinden biri, agrega çapını modelde hesaba katmasıdır. Diğer modeller, ölçülen rötre değerlerinden daha küçük sonuçlar vermiştir. ACI modeli, genellikle temel ve genel uygulamalar için geniş bir yaklaşım sunarken, CEB-FIB modeli, daha kapsamlı ve detaylı bir analiz sağlar. AASTHO modeli ise özellikle altyapı projeleri için özelleştirilmiş hesaplamalar sunar.

THE EFFECT OF MAXIMUM AGGREGATE SIZE ON CONCRETE SHRINKAGE

SUMMARY

Concrete, when subjected to various environmental conditions, particularly temperature variations, wind, and low humidity, undergoes a process known as surface sweating due to cement hydration. This sweating results from water within the concrete migrating to the surface, where it eventually evaporates. The continuous evaporation and movement of water from the interior of the concrete create internal stresses, which ultimately lead to the development of shrinkage cracks. These cracks, commonly referred to as drying shrinkage cracks, have detrimental effects on the mechanical properties and durability of concrete, and over time, they compromise the structural integrity and service life of the concrete.

The presence of shrinkage cracks in concrete affects its mechanical behavior in several ways. Firstly, cracks reduce the compressive and tensile strength of the concrete, making it more vulnerable to external forces and loads. Additionally, these cracks act as pathways for aggressive agents such as water, chlorides, and sulfates, which can penetrate the concrete and accelerate deterioration mechanisms such as corrosion of reinforcement and freeze-thaw damage. Over time, the cumulative effects of these processes degrade the overall structural performance, leading to higher maintenance costs and the need for repairs. Therefore, understanding and controlling the factors that contribute to shrinkage is critical to enhancing the long-term durability and sustainability of concrete structures.

Shrinkage in concrete is influenced by a variety of factors, including the volume of cement paste, environmental conditions, the type and amount of cement used, the water/cement ratio, the presence of inert materials, and the properties of the aggregates. This study focuses on investigating how variations in cement content, water/cement ratio, aggregate concentration, and maximum aggregate size affect the drying shrinkage behavior of concrete. The primary objective is to identify which of these parameters play the most significant role in controlling shrinkage and to propose methods for reducing shrinkage through optimized mix design.

The cement content in a concrete mix determines the overall paste density, which in turn affects the amount of shrinkage that occurs during hydration. A higher cement content generally leads to greater shrinkage due to the larger volume of paste that undergoes drying and contraction. The water/cement ratio is another critical factor, as it influences the distribution of water within the concrete matrix and the rate at which water evaporates from the surface. A higher water/cement ratio typically results in increased shrinkage because more free water is available to evaporate, leading to greater volume changes in the cement paste.

The characteristics of the aggregates, including their concentration and size, also play a crucial role in controlling shrinkage. Aggregates serve as the skeleton of the concrete, providing stability and reducing the overall volume of cement paste. Higher aggregate

concentrations lead to lower shrinkage by reducing the amount of paste that undergoes volume changes. Additionally, larger aggregates tend to restrain shrinkage more effectively than smaller ones, as they create a more stable internal structure that resists deformation. The use of supplementary materials such as limestone powder can further influence shrinkage behavior by modifying the microstructure of the cement paste and altering its drying characteristics.

In this study, two distinct sets of concrete samples were prepared with different maximum aggregate sizes, namely 16 mm and 32 mm. For each set, multiple mix designs were developed with varying water/cement ratios of 0.4 and 0.5, aggregate concentrations of 0.6 and 0.7, and limestone powder contents of 0%, 5%, and 10% by weight of the binder. For each mix design, three specimens were cast, and all samples were subjected to identical environmental conditions, with controlled temperature and humidity levels. Various properties were measured, including the modulus of elasticity, compressive strength, changes in length and weight, and capillary absorption.

One of the key experiments conducted in this study was the shrinkage test, which measured the change in length (shrinkage) of the concrete specimens over a 200-day period. The results showed a clear trend: as the maximum aggregate size increased, the overall shrinkage of the concrete decreased. This is attributed to the fact that larger aggregates provide greater internal restraint against volume changes, reducing the magnitude of shrinkage. Conversely, increasing the water/cement ratio led to an increase in shrinkage, as expected, due to the greater availability of free water for evaporation.

Additionally, the study found that as the aggregate concentration increased, the shrinkage decreased. This is consistent with the understanding that higher aggregate content reduces the volume of cement paste, which is the primary source of shrinkage in concrete. The incorporation of limestone powder also had a positive effect on reducing shrinkage, particularly at higher dosages. The results suggest that limestone powder may help to refine the pore structure of the cement paste, reducing water evaporation and mitigating shrinkage. However, the impact of limestone powder was found to be relatively minor compared to the effects of aggregate size and concentration.

The findings of this research provide important insights for the design of concrete mixes that are more resistant to drying shrinkage. By optimizing the mix design parameters, such as using larger aggregates, increasing aggregate concentration, and adjusting the water/cement ratio, it is possible to significantly reduce shrinkage and improve the overall performance of concrete structures. The use of limestone powder as a supplementary material also offers potential benefits, particularly in reducing the environmental impact of concrete production by partially replacing cement.

Furthermore, the study highlights the importance of considering the specific environmental conditions to which the concrete will be exposed. Shrinkage is a time-dependent phenomenon that is influenced not only by the initial mix design but also by the curing conditions, ambient temperature, and humidity levels. Proper curing practices, such as maintaining adequate moisture levels during the early stages of hydration, are essential to minimizing shrinkage and ensuring long-term durability.

In conclusion, this study emphasizes the critical role that aggregate size and concentration play in controlling shrinkage in concrete. While the water/cement ratio and the use of supplementary materials such as limestone powder also influence shrinkage behavior, the most significant reductions in shrinkage can be achieved by optimizing the aggregate characteristics. These findings have important implications for the construction industry, particularly in the design of durable concrete structures that require minimal maintenance over their service life. Future research could explore the long-term effects of shrinkage on different types of concrete, as well as the potential for innovative materials and technologies to further mitigate shrinkage and enhance the sustainability of concrete construction.





1. GİRİŞ

Beton, çimento, su, agrega ve katkı maddelerinin bir araya gelmesiyle oluşan heterojen bir yapı malzemesidir. Betonun içerdiği su miktarının, çimento hidratasyonunda kullanılması, agrega tarafından emilmesi ve buharlaşma gibi etkenlerle azalması sonucu çimento matrisinde hacimsel değişiklikler meydana gelir. Betonda su kaybıyla ortaya çıkan hacimsel değişime “rötre” adı verilir. Rötre, farklı sebeplere bağlı olarak çeşitli tiplerde ortaya çıkabilir. Genel olarak, üç ana kategoride incelenir: plastik rötre, kuruma rötresi ve kimyasal rötre [1].

Plastik rötre, beton karışımında plastik durumundan sertleşme sürecine geçerken meydana gelen bir tür rötredir. Betonun henüz tam sertleşmemiş olduğu yerleştirme aşamasından sonra, sertleşme sürecinde oluşan bir durumdur ve betonun yüzeyinde görülür.

Plastik rötrenin temel sebebi, suyun betonun yüzeyinden buharlaşma hızının terleme hızından fazla olmasıdır. Beton yerleştirildiğinde, fazla suyun bir kısmı betonun üst yüzeyine çıkar. Betonun yüzeyindeki suyun buharlaşması, terleme hızından daha yüksek olduğunda, beton yüzeyi kurur ve plastik rötre başlar. Alt kısımlarda bulunan daha plastik beton, yüzey ile aynı oranda kuruma gösteremez, bu durumda yüzeyde çekme gerilmeleri oluşur ve beton çatlaklar meydana gelir.

Kuruma rötresi ise betonun ortam şartlarına maruz kalarak içerdiği suyun buharlaşması sonucu oluşur. Bu rötrenin sebebi genellikle betonun yüzeyinin buharlaşma yoluyla suyunu kaybetmesidir. Kuruma sürecinde, çimento jelinde bir büzülme meydana gelir. Başlangıçta fark edilmeyen kılcal çatlaklar, zamanla genişler.

Kimyasal rötre ise çimento hidratasyonu sürecinde kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkar. Kimyasal rötre, reaksiyon ürünlerinin hacminin, bileşenlerinin toplam hacminden daha küçük olması temeline dayanır. Bu hacim azalması, hidratasyon derecesi ile neredeyse doğru orantılıdır. Betonda, kimyasal reaksiyonların ardından oluşan ürünlerin hacmi, çimento ve su karışımının başlangıçtaki ilk hacminden daha düşüktür [2]. Bu fark, betonun sonraki evrelerinde bir büzülmeye ve çatlak oluşumuna yol açar.

Betonun rötresini etkileyen faktörler arasında çimento hamurunun hacmi, dış çevre şartları (sıcaklık, nem), kullanılan çimento türü, su/çimento oranı ve agrega özellikleri önemli bir yer tutar. Yapılan bir çalışma kapsamında geliştirilen modelde, silis dumanı, uçucu kül veya cüruf içeren 3062 adet yüksek dayanımlı numunenin rötre değerleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda basınç dayanımının artmasıyla rötrenin azalacağı sonucuna varılmıştır. Bu durum düşük su/çimento değeri, düşük geçirimsizlik ve agregaların büzülmeyi azaltmasıyla açıklanmıştır [3].

Bu faktörlerin bir araya gelmesi, betonun rötresi üzerinde karmaşık bir etkiye sahiptir. Betonun kullanım alanı, bileşimi ve çevresel koşulları göz önünde bulundurarak rötre oluşumunu anlamak ve kontrol etmek, yapısal dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Yapılan çalışmada agrega çapı 16 mm ve 32 mm olan iki farklı numune grubu hazırlanmıştır. Bu numune gruplarında su/çimento oranı 0.4 ve 0.5, agrega konsantrasyonu oranı 0.6 ve 0.7 ve kalker tozu oranı çimento kütlelerine oranla 0.0, 0.05 ve 0.10 olacak şekilde karışım oranları hazırlanmıştır. Deneyler için her karışım türünden 7x7x28 cm boyutlarında 3 adet numune üretilmiştir. Numuneler sabit nem oranı ve sıcaklık koşulları altında saklanmıştır. Hazırlanan bu numuneler üzerinde elastisite modülü, basınç dayanımı, boy ve ağırlık değişimleri deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmanın temel hedefi, betonun bileşiminde belirleyici olan çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega konsantrasyonu ve maksimum agrega çapı gibi değişkenlerin, özellikle betonun kuruma rötresi üzerindeki etkilerini analiz etmektir.

Üretilen numuneler, 35 ± 5 nem seviyeleri ve 24 ± 5 °C sıcaklık koşulları altında saklanmıştır. Bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler, betonun elastisite modülü, basınç dayanımı, kuruma etkisiyle meydana gelen boyut değişimleri ve ağırlık değişimleri gibi çeşitli parametreleri ölçmeyi hedeflemektedir.

Elastisite modülü, basınç dayanımı, boy ve ağırlık değişimleri deneyleri, betonun bileşenlerindeki değişkenlerin, özellikle agrega çapı, su/çimento oranı, agrega konsantrasyonu ve kalker tozu oranının, betonun rötresi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemek üzere gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın kapsamı, betonun bileşenlerinden olan çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega konsantrasyonu ve maksimum agrega çapı gibi faktörlerin, özellikle betonun kuruma rötresi üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu parametrelerin farklı kombinasyonlarının incelenmesi, betonun dayanıklılığı ve davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Kuruma rötresi, çimento esaslı malzemelerde çatlama ve uzun vadeli performansın bozulmasına yol açabilen önemli bir sorun teşkil etmektedir ve kuruma rötresinin başlıca sebepleri arasında, katmanlar arası su hareketi yer alır [4]. Çimento esaslı malzemelerin kuruma rötresini etkileyen temel faktör boşluklu yapıdaki dış çevrenin bağıl nem etkisiyle oluşan su hareketidir. Bu durum, kür, porozite, gözeneklerdeki su içeriğinin davranışı tarafından etkilenir, ayrıca yüzey serbest enerjisindeki değişimler (Gibbs-Bangham etkisi), kılcallık ve C-S-H jelinden katmanlar arası su hareketi gibi mekanizma tabanlı teoriler de önemli faktörler arasındadır.

Gibbs-Bangham mekanizması, %40'ın altındaki bağıl nemde büzülme gerilmesine katkıda bulunan bir etkidir. Bağıl nem %40'ın altında olduğunda, C-S-H parçacıklarının dış tabakasında su filminin ayrılması ve tutulması yoluyla yüzey serbest enerjisindeki değişiklikler nedeniyle büzülme oluşur. [4]. Kuruma devam ettikçe, jel parçacığının yüzeyindeki emilen su tabakasının ayrılması hacim dengesizliğine neden olur [5]. Bu dengesizlik sonucu, çimento jel parçacıkları içinde gerilim oluşur ve dolayısıyla belirgin bir hacim değişikliğine neden olur.

Rötre oluşumunda etkili parametrelerden biri su/çimento oranıdır. Su/çimento oranı, betonun performansı üzerinde oldukça önemli bir faktördür ve rötre oluşumu üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Daha yüksek su/çimento oranları genellikle betonun işlenebilirliğini artırırken, aynı zamanda rötre oluşumuna da zemin hazırlar.

Çimento hamurundaki artış rötreyi artırır. Yapılan bir çalışmada su/çimento oranı sabit tutularak çimento hamurundaki $100 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ 'lük bir düşüş 60 günlük kür yapıldığı durumda rötrede $95 \cdot 10^{-6}$ 'lık bir düşüş yarattığı gözlemlenmiştir. [6].

Kioumarsı vd. yaptığı rötre azaltıcı katkı maddelerinin farklı su/çimento oranlı numuneler üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada kuruma kaynaklı rötrenin azaltılması için su/çimento oranının azaltılmasını gerektirmeden rötre azaltıcı katkı maddeleri kullanılarak da başarılabileceğini göstermektedir [7]. Ancak yapılan başka bir çalışmada beton numunelerin toplam serbest büzülmesi su-çimento oranının azalmasıyla artarken, içsel kürlenme uygulanan betonlarda tam tersi bir eğilim gözlemlenmiştir. Serbest büzülme tek başına betonun çatlama hassasiyetini belirlemede tek bir parametre olarak işlev göstermese de, serbest büzülmenin betonun çatlama potansiyelini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir [8].

Su/ çimento oranının yanı sıra agrega özellikleri ve konsantrasyonu rötre üzerinde etkilidir. Agregaların sertliği ve hacmi, betonun büzülmesini engelleyen ana faktörler olarak kabul edilmektedir [9].

Agregalar, betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve rötre davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, agregaların boyutu, şekli, yüzey özellikleri ve mineral bileşimi gibi özelliklerinin beton karışımının özelliklerini belirlemesidir. Agregaların boyutu, büyük ölçüde betonun iç yapısını etkiler. Büyük agregalar genellikle çimento hamurunu doldurur ve daha az miktarda çimento gerektirir, bu da potansiyel olarak rötre oluşumunu azaltabilir. Ancak, aşırı büyük agregaların kullanımı, homojen bir karışım elde etmeyi zorlaştırabilir ve rötre oluşumuna sebep olur. Yapılan bir çalışmada agrega hacminin artmasıyla, gerilme oluşabilecek alanların daha homojen hale geldiği ve agregaların kuruma büzülmesini sınırladığı görülmüştür [10].

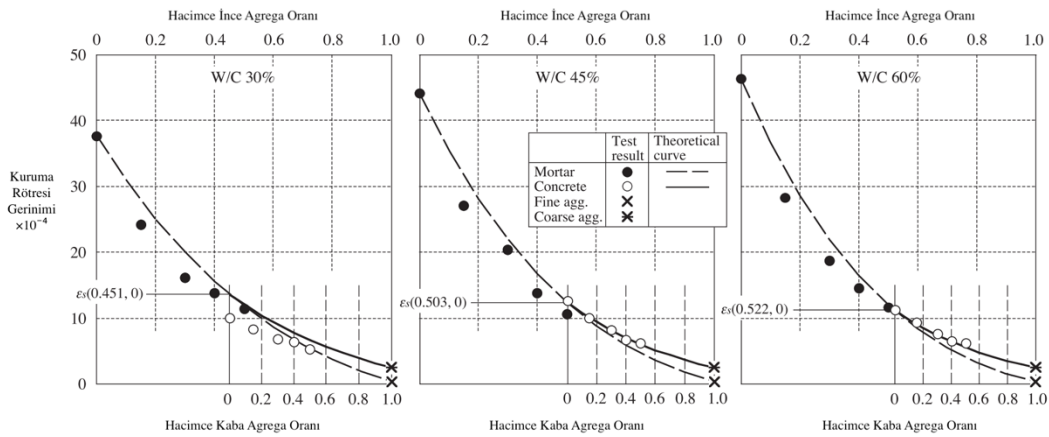
Agregaların su emme kapasitesi ve yüzey özellikleri de önemlidir. Yüksek poroziteli agregalar, su emebilir ve depolayabilir, depolanan fazla su daha sonra buharlaşarak rötre oluşumuna katkı sağlar.

Sonuç olarak, agregaların özellikleri, betonun rötre özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, beton karışımı tasarlarken, kullanılan agregaların özelliklerinin dikkate alınması, betonun istenen performansı elde etmede önemli bir faktördür.

Başka bir çalışmada büyük çaplı agregaların kullanıldığı numunelerde kuruma rötresi gerilimlerinin az olmasının yanı sıra büyük çaplı agregaların betonun kışalmasını da sınırlamada rol oynadığı gözlemlenmiştir [11].

Zhang vd. yaptığı çalışmada, betonun kuruma rötresi, su kaybının artmasıyla ve elastisite modülünün azalmasıyla artabildiği, kalkerin su kaybına sahip beton numunelerinin kuruma rötresini etkili bir şekilde azaltabildiği ve kalker ve çimento hamuru arasındaki arayüz bölgesindeki gerilimi düşürebileceği sonucuna varılmıştır [11].

Eguchi ve Teranishi kuruma büzülmesini tahmin edebilmek üzerine yaptıkları çalışmada çimento hamurunun kuruma büzülmesini, t kuruma süresi (gün), W/C su/çimento oranı, α , β , λ , δ çimentonun türüne göre belirlenmiş sabitlere göre hesaplamıştır. Şekil 1.1’de elde edilen grafikler yer almaktadır [12].



Şekil 1.1 : Su/çimento oranına göre elde edilen kuruma rötreleri.

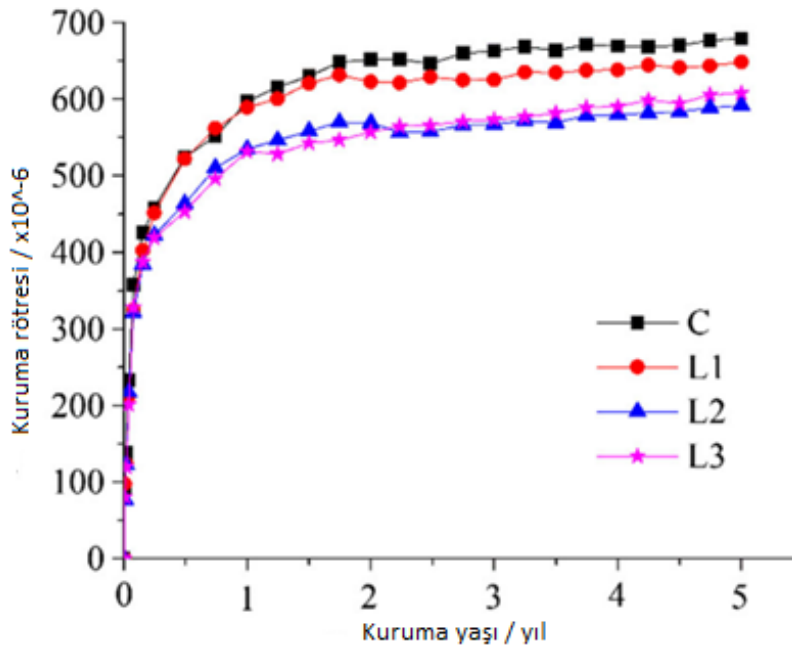
Kuruma rötresi çimento inceliği ile artmaktadır. Çimento harcının hacim stabilitesi, çimento özgül yüzey alanının artmasıyla bozulur [13]. Çimento tanelerinin ince yapısının, çimento harcı veya betonun kuruma büzülme özellikleri üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak, çimento performansını değerlendirmek ve tasarım uygulamalarını geliştirmek amacıyla önemli bir adımdır. Bu kapsamda, çimento tanelerinin yüzey alanının artmasıyla ilişkilendirilen incelik, suyun adsorbe edilmesi ve kuruma büzülme miktarının artırır [14].

Agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak için kalker tozu gibi bir dolgu maddesinin ilavesi, beton üretmek için gereken çimento harcı hacmini azaltabilir. Önceki çalışmalarda, çimento harcı hacmini azaltmak için kalker tozu ilavesinin küp

dayanımını önemli ölçüde artırdığı, betonun ısı üretimini azalttığı ve çekme gerilmelerini azalttığı bulunmuştur [15].

Betonda geçirimsizlik ve porozite de rötreye üzerinde etkilidir. Katılacak uçucu kül, cüruf ve silis dumanı, hidrasyon ısısını düşürerek ve ince yapıları sayesinde C-S-H jelinin çimento hamuru ve agrega arasındaki geçiş bölgesindeki boşlukları aktif bir biçimde doldurmasına yardımcı olur [16].

Wang ve arkadaşları yaptığı deneyde 5 yıl süresince, %20 ve %30 kalker tozu içeren betonların kuruma rötresinin, kalker tozu içermeyen betonundan gözle görülür bir şekilde daha az olduğunu ortaya koymuştur [17]. Şekil 1.2’de elde edilen sonuçlar yer almaktadır [18].



Şekil 1.2 : Numunelerin kuruma rötresi

(l1:10% kalker tozu, l2: 20% kalker tozu, l3: 30% kalker tozu).

Beton numunelerde agrega miktarının ve boyutunun artmasıyla, büzülme yapacak hamur matrisi miktarı azalacağından, meydana gelen rötreye azalır. Beton üretiminde kullanılan agregaların rötreye üzerindeki etkileri, yalnızca agreganın cinsine değil, aynı zamanda şekline ve sertliğine de bağlıdır.

Büyük boyutlu agregalar, küçük boyutlulara kıyasla daha az su emme eğilimindedir. Su emme kapasitesinin düşük olması, rötreyi azaltıcı bir etki gösterir. Hafif agregalar genellikle gözenekli bir yapıya sahip olup suyu emmeye yatkındır. Bu yapı, beton dökümünden sonra agreganın içinde su depolanmasına olanak tanır [19].

Küçük boyutlu agrega taneleri, daha fazla üniform rötreye oluşumuna neden olmaktadır. Agreganın tipinin etkisi, agreganın boyutuna kıyasla daha belirgindir. Sertliği düşük agregalar, rötreyi artırma eğilimindedir. Bu tür agregaların su emme kapasiteleri de yüksek olup, bu durum yüksek rötreye değerlerine yol açmaktadır.

Elastisite modülü yüksek agregaların rötreyi azalttığı yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur; çünkü düşük elastisite modülüne sahip agregalar, rötreyi kısıtlama konusunda yetersiz kalmaktadır. Su ihtiyacı düşük olan agregalar, düşük rötreye karakteristiği sergilemektedir. Yapılan incelemeler, artan agreganın miktarının rötreyi azalttığını göstermiştir [20].

Uluslararası inşaat projelerinde güvenilir ve kapsamlı bir rötreye analizi yapmak için çeşitli yönetmeliklerde önerilen hesap modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller, betonun özelliklerini, çevresel koşulları ve zamanla değişen faktörleri dikkate alarak rötrenin olası etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, uluslararası standartlarda yer alan çeşitli rötreye hesap modelleri arasındaki benzerlikler ve farklılıklar, yapı mühendisliği pratiğinde etkili bir rötreye kontrolü için önemlidir.

Bu çalışmada, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), AASTHO (Amerikan Devlet Yolları ve Ulaşım Görevlileri Birliği) ve CEB-FIP (Avrupa Beton Birliği - Uluslararası Beton Birliği) gibi uluslararası yönetmeliklerde yer alan rötreye hesap modelleri incelenecek ve bu modellerin beton yapıların tasarımı ve uygulamasında nasıl kullanılabileceği üzerine bir değerlendirme yapılacaktır.

CEB-FIP rötreye modeli hesaplamasında kritik parametreler, 28 günlük basınç dayanımları, bağıl nem koşulları, çimento sınıfı katsayıları ve zamana bağlı katsayılarıdır. Aynı zamanda hesaplara otojen rötrenin etkisi de dahil edilmiştir. Amerikan Beton Enstitüsü'nün rötreye modelinde, betonun yaşını, bağıl nemini, kür yöntemini, hacim/yüzey alanı oranını, ince agreganın oranını, çimento dozajını, yayılma miktarını ve hava miktarını içeren parametrelerle rötreye hesaplaması yapılmaktadır.

ASTHO rötre modeli, yol yapılarında meydana gelecek rötreyi gerçeğe daha yakın bir şekilde tahmin edebilmek için geliştirilmiştir. Rötre, betonun zamanla su kaybetmesi sonucu meydana gelen hacim küçülmesi olup, betonun uzun vadeli performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu model, farklı çevresel ve malzeme parametrelerini dikkate alarak, özellikle altyapı projelerinde, yol betonlarının uzun süreli büzülme davranışını tahmin etmeyi amaçlar.

AASTHO rötre modeli içerisinde belirleyici parametreler arasında bağıl nem, hacim/yüzey alanı oranı, betonun basınç dayanımı, zamana bağlı değişkenler, bağıl nem faktörü ve betonun ya lanması yer alır. Bağıl nem,  evre şartlarına bağlı olarak betonun su kaybını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Hacim/yüzey alanı oranı ise, betonun yüzey alanına oranla ne kadar büyük olduğunu gösterir; yüzey alanı arttıkça beton daha hızlı su kaybeder ve rötre oranı artar. Beton basınç dayanımı ise betonun kalitesini ve dayanıklılığını ifade eder. Zamana bağlı değişkenler ve bağıl nem faktörü de bu parametrelerle birlikte rötre tahminlerini daha kesin hale getirir.

Model B4 ise rötre tahmininde daha detaylı bir yaklaşıma sahiptir. B4 modelinde, betonun otojen rötresi ve kuruma rötresi ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu sayede, betonun çevresel şartlardan bağımsız olarak ve çevresel etkilere bağlı olarak nasıl davrandığı daha ayrıntılı şekilde incelemektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan bu çalışma kapsamında su/çimento oranı 0.4 ve 0.5, agrega oranları hacimce 0.7 ve 0.6, kalker tozu oranı hacimce 0, 0.05 ve 0.1 olacak şekilde bağlayıcı miktarı azaltılarak kullanılmıştır ve en büyük agrega çapı 16 mm ve 32mm olacak şekilde toplam 24 seri numune hazırlanmıştır ve deneyler her seriden 3 adet numune üretilerek tamamlanmıştır. Bu numuneler üzerinde basınç dayanımı, elastisite modülü, boy değişimi(rötre) ve ağırlık değişimi deneyleri yapılmıştır.

2.1 Malzemeler

Numune üretiminde kullanılacak olan kum ve kırmataşlar için elek analizi, birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır ve karışım granülometrisi hazırlanarak 1000 dm³ ve 20 dm³'lük hacimler için karışım oranları hazırlanmıştır.

2.1.1 Agregalar

Yapılan çalışmalarda en büyük agrega boyutu 16 mm ve 32 mm olan kırmataş ve ince taneli doğal kum kullanılmıştır. Elek analiz sonuçları, incelik modülü ve özgül ağırlıklar Çizelge 2.1 üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Elek analizi sonuçları.

Elek Çapı (mm)	Elekten Geçen (g)	
	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)	2,3912	5,2108
Özgül Ağırlık (gr/dm ³)	2,704	2,63

2.1.2 Karışım oranları

Beton örnekleri için iki farklı su/çimento oranı belirlenecektir: 0,40 ve 0,50. Her iki su/çimento oranı için iki ayrı karışım grubu oluşturulacaktır. Birinci grup, agrega hacminin %60'ını, ikinci grup ise %70'ini içerecek şekilde hazırlanacaktır. Ayrıca, her grup için ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranlarında kalker tozu eklenerek beton karışımları hazırlanacaktır. Bu karışımların teorik detayları Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Bu sistematik yöntem, su/çimento oranı, agrega hacmi ve kalker tozu oranı gibi kritik parametrelerin betonun özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve deneysel sonuçları güvenilir bir şekilde analiz edebilmek için kullanılmaktadır. Karışım hesabında 2.1 denklemi kullanılmıştır.

$$(1000 - X) \text{ Çimento Hamuru} = \left(\frac{C}{d_c} \right) \text{Çimento Hacmi} + (c * W) \text{Su Hacmi} + \left(C * \frac{\%L}{d_k} \right) \text{Kalker Tozu Hacmi} \quad (2.1)$$

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

Çizelge 2.2 : S/Ç oranı 0,4 olan numunelerin karışım oranları.

Numune Adı	Çimento Ağırlığı(kg)	Kalker Ağırlığı(kg)	Su Ağırlığı(kg)	Hapsolmuş Hava(dm ³)	S/Ç Oranı	Kalker Oranı
W40-A70-L0	413,59	0,00	165,44	2	40%	0%
W40-A70-L10	404,60	17,51	161,84	2	40%	5%
W40-A70-L20	395,98	34,27	158,39	2	40%	10%
W40-A60-L0	552,38	0,00	220,95	2	40%	0%
W40-A60-L10	540,37	23,38	216,15	2	40%	5%
W40-A60-L20	528,86	45,77	211,54	2	40%	10%
W40-A70-L0D32	413,59	0,00	165,44	2	40%	0%
W40-A70-L10D32	404,60	17,51	161,84	2	40%	5%
W40-A70-L20D32	395,98	34,27	158,39	2	40%	10%
W40-A60-L0D32	552,38	0,00	220,95	2	40%	0%
W40-A60-L10D32	540,37	23,38	216,15	2	40%	5%
W40-A60-L20D32	528,86	45,77	211,54	2	40%	10%

Karışım kodlarında üzerinde W: su/çimento oranını, A: hacimce agrega oranını ve L: hacimce kalker tozu oranını ifade etmektedir.

2.2 Numune Üretimi ve Taze Beton Deneyleri

Numune üretimi sırasında çökme ve beton karışımı birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Sonrasında teorik taze birim hacim ağırlıkları ile gerçek taze birim hacim ağırlıkları karşılaştırılarak gerçek hava miktarlarına ulaşılmıştır.

Betonun işlenebilirliğini veya akıcılığını ölçen bir test olan çökme deneyi, betonun kıvamını ölçer. Kıvam, karışımda ne kadar su kullanıldığını gösterir. Beton karışımının kıvamı, nihai ürün kalitesi için belirleyicidir. [20].

Beton karışımları, yağlanmış kalıplara dökülmüştür. Numuneler, kalıplara titreşim sehpası kullanılarak yerleştirilmiştir. Beton numuneler nem kaybı olmayacak şekilde üstü ve etrafı örtülerek korunmuştur.



Şekil 2.1 : Beton döküm aşaması.

Çizelge 2.3 : En büyük 16 mm çaplı agregaya içeren numunelerin teorik ve gerçek karışım miktarları.

	Teorik Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Gerçek Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çimento Ağırlığı (kg)	Kalker Ağırlığı (kg)	Su Ağırlığı (kg)	Kum (kg)	KT1 (kg)	Hava Miktarı (dm ³)
W40A60L0	2,37	2,36	550,38	0,00	220,15	785,79	808,31	5,29
W40A60L05	2,38	2,37	537,75	23,27	215,10	784,82	807,32	6,51
W40A60L10	2,39	2,37	526,23	45,54	210,49	784,72	807,22	6,63
W40A70L0	2,45	2,44	412,21	0,00	164,88	917,01	943,29	4,96
W40A70L05	2,45	2,45	403,82	17,47	161,53	918,33	944,65	3,53
W40A70L10	2,46	2,45	395,31	34,21	158,12	918,52	944,85	3,31
W50A60L0	2,33	2,32	482,90	0,00	241,45	785,12	807,63	6,13
W50A60L05	2,33	2,32	473,57	20,49	236,78	784,99	807,50	6,29
W50A60L10	2,34	2,33	464,84	40,23	232,42	785,29	807,80	5,92
W50A70L0	2,41	2,41	362,62	0,00	181,31	918,64	944,97	3,19
W50A70L05	2,42	2,41	355,88	15,40	177,94	919,18	945,52	2,60
W50A70L10	2,42	2,42	349,67	30,26	174,83	920,44	946,82	1,23

Çizelge 2.4 : En büyük 32 mm çaplı agregaya içeren numunelerin teorik ve gerçek karışım miktarları.

	Teorik Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Gerçek Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çimento Ağırlığı (kg)	Kalker Ağırlığı (kg)	Su Ağırlığı(kg)	Kum (kg)	KT1 (kg)	KT2 (kg)	Hava Miktarı (dm ³)
W40A60L0D32	2,37	2,36	550,11	0,00	220,04	785,39	161,58	646,32	5,79
W40A60L05D32	2,38	2,37	539,09	23,33	215,64	786,78	161,87	647,47	4,03
W40A60L10D32	2,39	2,37	526,31	45,55	210,52	784,85	161,47	645,87	6,48
W40A70L0D32	2,45	2,42	412,87	0,00	165,15	918,47	188,96	755,83	3,37
W40A70L05D32	2,45	2,43	402,86	17,43	161,14	916,13	188,48	753,91	5,91
W40A70L10D32	2,46	2,44	393,82	34,08	157,53	915,07	188,26	753,04	7,06
W50A60L0D32	2,33	2,31	482,78	0,00	241,39	784,94	161,49	645,95	6,36
W50A60L05D32	2,33	2,31	473,48	20,49	236,74	784,85	161,47	645,88	6,48
W50A60L10D32	2,34	2,32	464,13	40,17	232,07	784,10	161,31	645,26	7,43
W50A70L0D32	2,41	2,40	362,00	0,00	181,00	917,08	188,67	754,69	4,88
W50A70L05D32	2,42	2,40	354,94	15,36	177,47	916,75	188,61	754,42	5,23
W50A70L10D32	2,42	2,41	348,02	30,12	174,01	916,11	188,47	753,90	5,93

2.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.3.1 Elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri

Bu çalışma kapsamında, silindir numuneler üzerinde 28 günlük elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri için numunelere uygulanabilecek en büyük yüke ulaşılmıncaya kadar sabit hızda eksenel yük uygulanmıştır. Göstergeden okunan en büyük yükler kaydedilmiştir.

Elastisite modülü deneyinde uygulanacak kuvvet beton numunelerin basınç dayanımından elde edilen referans değerlere göre belirlenmiştir. Şekil değiştirmeler, numune üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında şekil değiştirmedeği haline geri döndüğü elastik bölgede kalacak şekilde ölçülerek hesaplanmıştır.

2.3.2 Boy ve ağırlık değişimi ölçümleri

Su/çimento oranı 0.4 ve 0.5, hacimce agregası konsantrasyonu 0.6 ve 0.7 ve bağlayıcıya göre ağırlıkça %0, %5 ve %10 kalker tozu olacak şekilde karışım reçetelerine göre hazırlanan ve en büyük agregası çapı 16 mm ve 32 mm olan numuneler 200 gün boyunca sabit %35 nem ve 24 °C sıcaklıkta ağırlık ve boy değişimleri günlük ölçümlerle kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.2 : Numune boy değişimi ölçümü.

2.3.3 Kılcallık deneyi

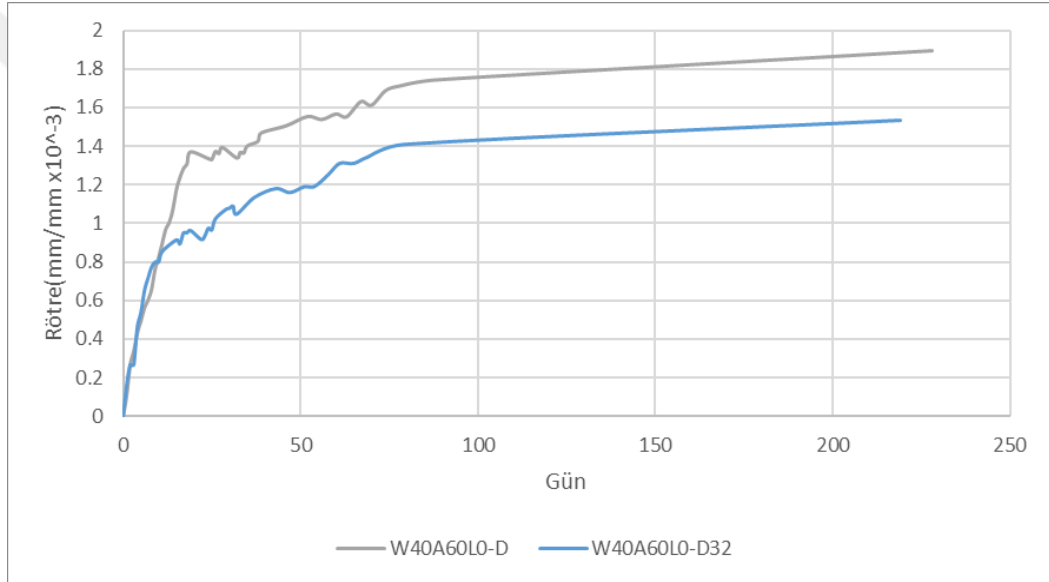
Bu çalışma kapsamında, 7x7x9 cm numuneler üzerinde sadece 7x7 cm'lik yüzeylerinden su emecek şekilde kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 ve 1440 dakikada emdiği su miktarı ölçülmüştür.



3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

3.1 Boy Değişimi Ölçümleri

Su/çimento oranı (W) 0.4 ve 0.5, hacimce agrega konsantrasyonu(A) 0.6 ve 0.7 ve bağlayıcıya göre ağırlıkça %0,5 ve 10 kalker tozu(L) olacak şekilde karışım reçetelerine göre hazırlanan ve en büyük agrega çapı 16 mm ve 32 mm olan numunelerin 200 günlük rötre ölçümleri yapılmıştır.



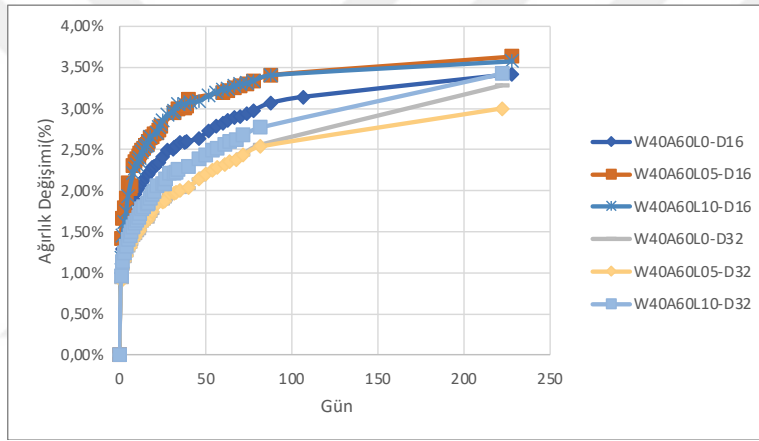
Şekil 3.1 : W40A60L0 numune rötre ölçümleri.

Diğer numuneler için 200 günlük rötre grafikleri eklerde gösterilmiştir. Şekil 3.5'ten de görüldüğü üzere W40A60L0-D ile temsil edilen maksimum agrega çapı 16 mm olan numuneler W40A60L0-D32 ile temsil edilen maksimum agrega çapı 32 mm olan numunelerden daha fazla rötre yapmıştır. Beton karışımlarında kullanılan farklı agrega boyutlarının rötre özellikleri üzerindeki etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, agrega boyutunun betonun büzülme davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Örneğin, yapılan bir çalışmada büyük agrega çaplarının kullanıldığı beton karışımlarında rötre oranlarının daha düşük olduğu belirlenmiştir [21]. Bu durum, büyük agrega tanelerinin betonun iç yapısındaki büzülme miktarını sınırlaması ile açıklanabilir. Küçük agrega boyutları ise, beton matrisinin daha yüksek yüzey alanı ve

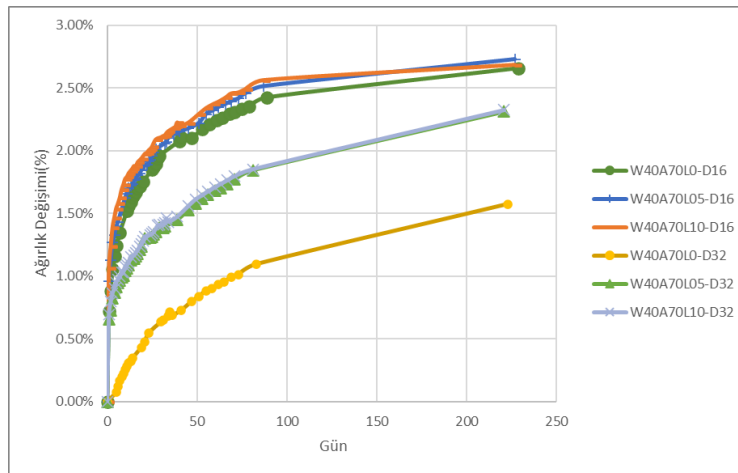
daha fazla gözenekli bölgeye sahip olmasına neden olarak, suyun daha hızlı buharlaşmasına ve dolayısıyla daha yüksek rötreye yol açar. Bu etki, küçük agregaların betonun kuruma rötresini artırabileceğini ve büyük agregaların bu etkileri sınırlayabileceğini gösterir [25].

3.2 Ağırlık Ölçümleri

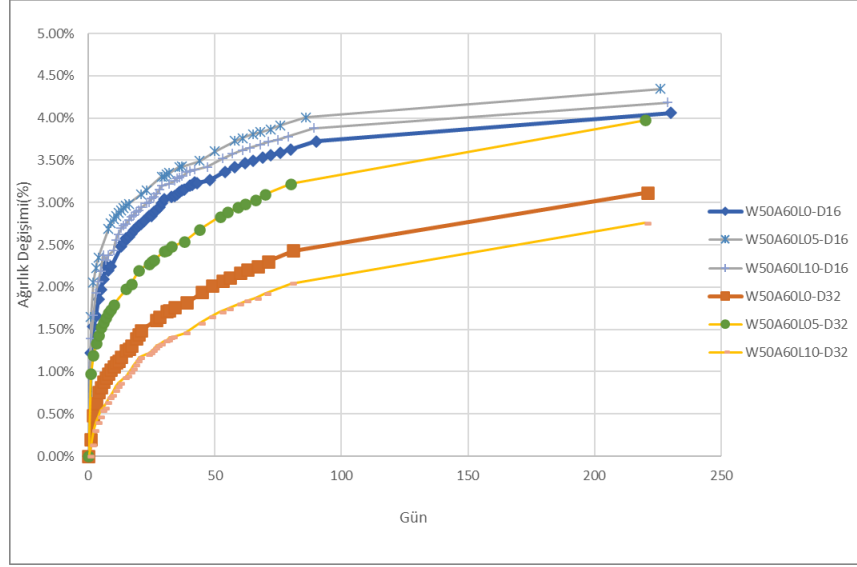
Numuneler üzerinde ağırlık değişimi ölçümleri yapılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Şekil 3.6.'da s/ç oranı 0,4 ve agrega konsantrasyonu 0,6 olan numuneler, Şekil 3.6.' da s/ç oranı 0,4 agrega konsantrasyonu 0,7 olan, Şekil 3.8.'da s/ç oranı 0,5 ve agrega konsantrasyonu 0,6 olan, Şekil 3.7.' de s/ç oranı 0,5 agrega konsantrasyonu 0,7 olan numuneler yer almaktadır.



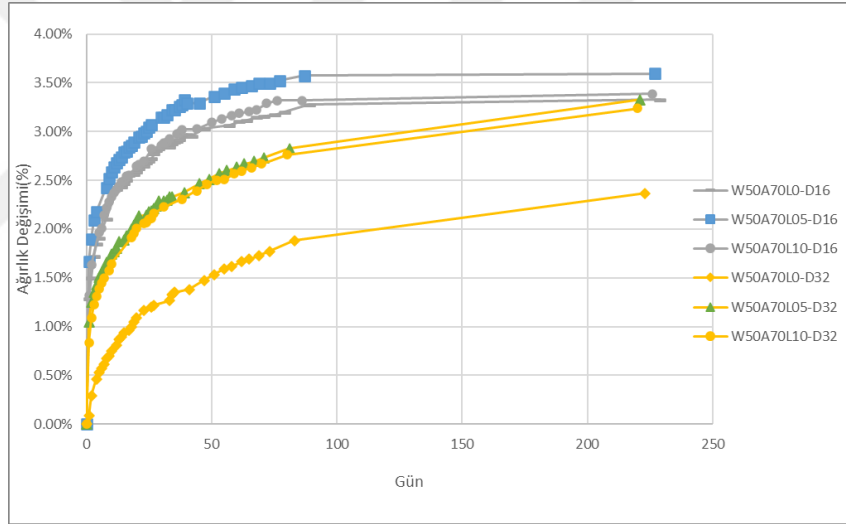
Şekil 3.2 : W40A60 karışım oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.



Şekil 3.3 : W40A70 oranlı 16 mm ve 32 mm agrega çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agrega çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.



Şekil 3.4 : W50A60 oranlı 16 mm ve 32 mm agregâ çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agregâ çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.

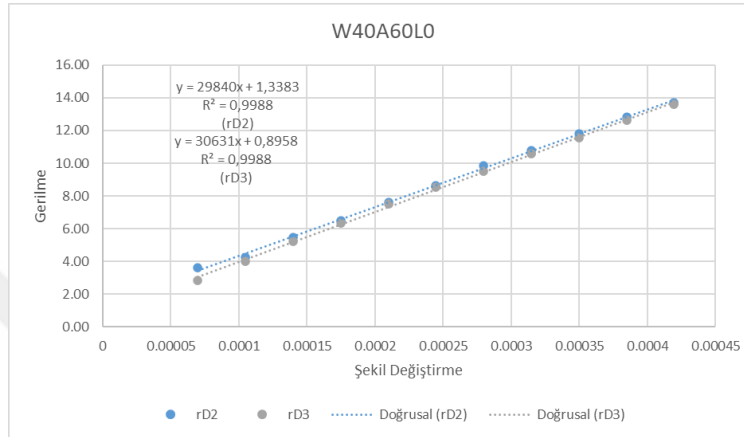


Şekil 3.5 : W50A70 oranlı 16 mm ve 32 mm agregâ çaplı numunelerin kalker tozu ve en büyük agregâ çapının kuruma sonucu ağırlık değişimine etkisi.

Grafiklerden görüldüğü üzere en büyük agregâ çapı 32 mm olan numuneler, beton matrisinin büzülmesini 16 mm maksimum agregâ çaplı numunelere göre daha fazla kısıtlayarak su kaybını azalttığı için ağırlık değişimi daha düşüktür. İlâveten s/ç oranı arttıkça jelde hapsolan su miktarı arttığı için ağırlık değişiminin arttığı gözlemlenmektedir. Yapılan bir çalışmada daha büyük agregâ boyutlarına sahip betonlar, daha düşük büzülme eğilimi göstermiştir, bu durum, beton matrisinin azalması ve agregâların sağladığı içsel kısıtlamadan kaynaklanmaktadır [23].

3.3 Elastisite Modülü

Bu çalışma kapsamında, silindir numuneler üzerinde 28 günlük elastisite modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, beton numuneleri üzerine eksenel yük uygulanmıştır ve bu yükler altında meydana gelen deformasyon miktarları ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında gerilme şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir ve oluşan doğrunun eğimiyle elastisite modülü hesaplanmıştır.



Şekil 3.6 : S/Ç 0,4 ve agrega oranı hacimce 0,6 olan ve kalker tozu içermeyen numunenin gerilme - şekil değiştirme grafiği [GPa-ε].

Diğer numuneler için elastisite modülü grafikleri eklerde gösterilmiştir. Tüm numunelerin elastisite modülü deneylerinden elde edilen değerler Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Maksimum 16ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin elastisite değerleri.

Numune	E (GPa)	Numune	E (GPa)
W40A60L0	30,24	W40A60L0D32	24,42
W40A60L05	31,67	W40A60L05D32	27,37
W40A60L10	32,01	W40A60L10D32	30,62
W40A70L0	31,20	W40A70L0D32	30,55
W40A70L05	31,65	W40A70L05D32	30,73
W40A70L10	32,69	W40A70L10D32	37,67
W50A60L0	25,20	W50A60L0D32	25,02
W50A60L05	27,20	W50A60L05D32	27,78
W50A60L10	29,64	W50A60L10D32	29,10
W50A70L0	24,95	W50A70L0D32	26,15
W50A70L05	25,08	W50A70L05D32	27,31
W50A70L10	26,80	W50A70L10D32	28,90

Düşük su çimento oranında ve büyük agrega çaplı ve yüksek agrega konsantrasyonlu numunelerde elastisite modülleri yüksektir. Su çimento oranının düşmesiyle ve agrega miktarının ve çapının artmasıyla düşük yüzey alanı ve daha az gözenekli bölge olacağından betonda bulunan boşluklar azalır ve elastisite modülünde artış gözlemlenir.

3.4 28 Günlük Basınç Dayanımı Değerleri

Bu çalışma kapsamında, silindir numuneler üzerinde 28 günlük basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonuçları Çizelge 3.6’ da gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 : 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

Numune	Maksimum Basınç Dayanımı(Mpa)
W40A60L0	45,90
W40A60L05	45,89
W40A60L10	37,84
W40A70L0	46,07
W40A70L05	50,01
W40A70L10	47,20
W50A60L0	36,27
W50A60L05	42,81
W50A60L10	38,08
W50A70L0	30,47
W50A70L05	31,73
W50A70L10	37,62
W40A60L0D32	48,93
W40A60L05D32	39,47
W40A60L10D32	45,07
W40A70L0D32	43,66
W40A70L05D32	47,71
W40A70L10D32	52,89
W50A60L0D32	41,89
W50A60L05D32	40,53
W50A60L10D32	41,02
W50A70L0D32	38,34
W50A70L05D32	41,02
W50A70L10D32	41,02

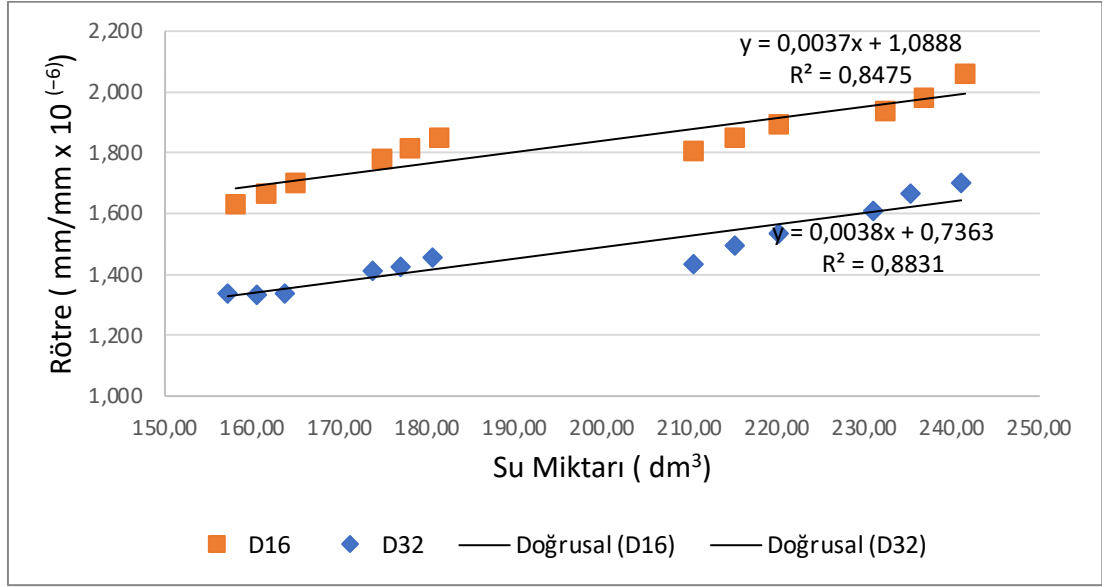
3.5 Su Miktarı & Rötre İlişkisi

Üretilen karışımlarda bulunan su miktarının rötre üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve analizler sonucunda Çizelge 3.8 ve Şekil 3.12’de yer alan sonuçlar elde edilmiştir. Su miktarının, betonun rötre oluşumu üzerinde kritik bir faktör olduğu gözlemlenmiştir.

Bu analizler, su miktarının betonun içsel özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak ve rötre oluşumunun mekanizmasını daha detaylı olarak açıklamak adına önemli bir bakış açısı sunmaktadır. Beton karışımında su miktarının artması, su-çimento oranını yükseltir ve bu durum, betonun porozitesini artırır. Artan porozite, betonun içindeki suyun daha kolay buharlaşmasına yol açar ve bu da daha fazla rötreye neden olur. Mindess, Young ve Darwin (2003)’e göre artan su içeriği beton matrisinde daha büyük gözenekler oluşturur ve bu da suyun buharlaşmasıyla birlikte rötre potansiyelini yükseltir [24]. Ayrıca, Neville (2011), fazla suyun beton içinde geniş kapiler boşluklar oluşturduğunu ve suyun bu boşluklardan buharlaştıkça betonun daha fazla büzülmesine neden olduğunu belirtir [14].

Çizelge 3.3 : Su hacmi & rötre miktarları.

Numune	Su Hacmi(dm ³)	Dort (mm/mm x 10 ⁻⁶)
W40A60L0	220,15	1,894
W40A60L05	215,10	1,849
W40A60L10	210,49	1,807
W40A70L0	164,88	1,701
W40A70L05	161,53	1,668
W40A70L10	158,12	1,629
W50A60L0	241,45	2,059
W50A60L05	236,78	1,982
W50A60L10	232,42	1,937
W50A70L0	181,31	1,850
W50A70L05	177,94	1,815
W50A70L10	174,83	1,780
W40A60L0D32	220,04	1,533
W40A60L05D32	215,64	1,495
W40A60L10D32	210,52	1,436
W40A70L0D32	165,15	1,339
W40A70L05D32	161,14	1,334
W40A70L10D32	157,53	1,339
W50A60L0D32	241,39	1,701
W50A60L05D32	236,74	1,664
W50A60L10D32	232,07	1,611
W50A70L0D32	181,00	1,456
W50A70L05D32	177,47	1,426
W50A70L10D32	174,01	1,412

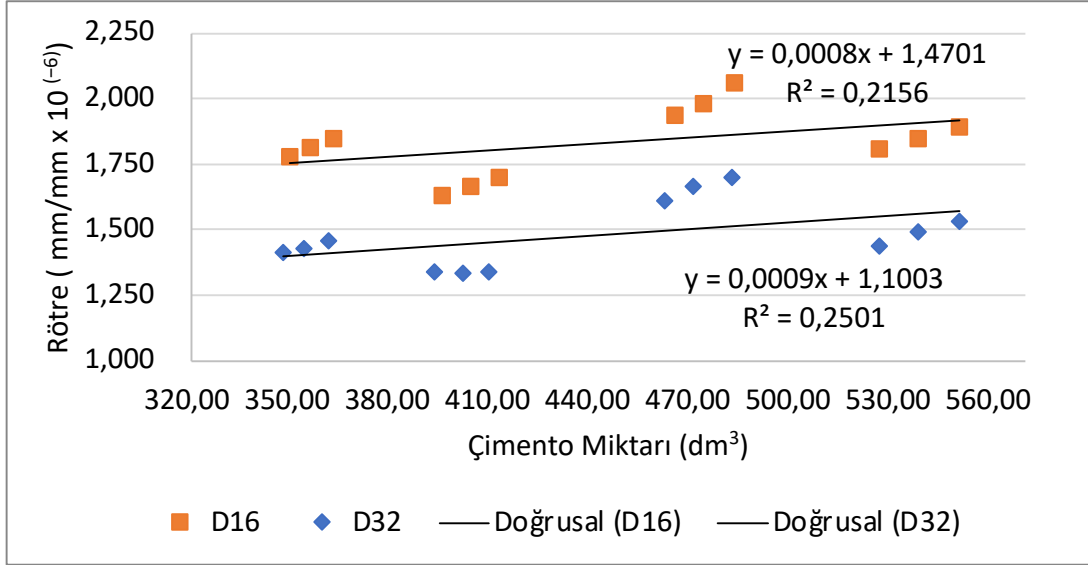


Şekil 3.7 : D16-D32 numunelerin su miktarı & rötre grafiği.

Ayrıca Şekil 3.12’den de görüldüğü üzere, aynı su çimento oranına sahip numunelerde en büyük agrega boyutu 32 mm olan numunelerdeki rötre miktarının, en büyük agrega boyutu 16 mm olan numunelere göre anlamlı derecede az olduğu belirlenmiştir. Bu durum, farklı agrega boyutlarının betonun rötre özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Büyük agregalar genellikle çimento hamurunu doldurur ve daha az miktarda çimento gerektirir, bu da potansiyel olarak rötre oluşumunu azaltmaktadır. Mehta ve Monteiro (2014)’e göre, beton karışımında büyük agrega kullanımı, daha az rötreye yol açar çünkü daha büyük agregalar, daha az su ve çimento gerektirir, bu da daha düşük rötre oranlarıyla sonuçlanır [23]. Yapılan başka bir çalışmada agrega hacminin artmasıyla, gerilme oluşabilecek alanların daha homojen hale geldiği ve agregaların kuruma büzülmesini sınırladığı görülmüştür [10].

3.6 Çimento Miktarı & Rötre İlişkisi

Çimento içeriği arttıkça, betonun su ihtiyacı da artar. Daha fazla çimento, hidrasyon sürecinde daha fazla su gerektirir. Su miktarının fazla olması, betonun sertleşme aşamasında daha fazla su kaybı anlamına gelir. Bu su kaybı, özellikle kuruma rötresini artıran bir faktördür. Sonuç olarak, yüksek çimento içeriğine sahip betonlar daha fazla rötre gösterme eğilimindedir. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere çimento miktarı arttıkça rötre artmıştır.



Şekil 3.8 : Çimento miktarı ve rötre ilişkisi.

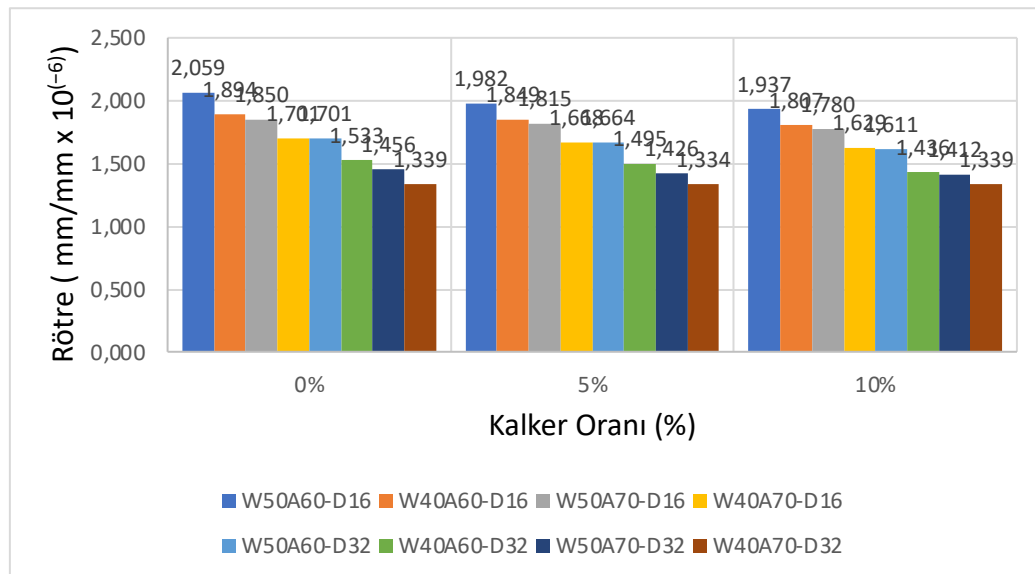
3.7 Kalker Tozu & Rötre İlişkisi

Bu çalışma, bağlayıcıya göre ağırlıkça %0, %5 ve %10' u arasında değişen kalker tozu içeriğinin beton numunelerindeki rötre miktarına etkisini gözlemlenmiştir. Beton içindeki hamur fazının azaltılmasının rötre üzerindeki etkisini agrega miktarını değiştirmeden görebilmek amacıyla inert madde olarak kabul edilen kalker tozu değişen oranlarda çimento ile yer değiştirilmiştir. Çizelge 3.9 ve Şekil 3.13 kalker tozu miktarındaki artışın rötre miktarında nispeten bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Ancak, %5'lik kalker tozu artışlarının rötre oluşumunda tek başına baskın bir rol oynamadığı sonucuna varılmıştır. %5'ten %10'a çıkan kalker tozu miktarıyla rötre değişimi %2'dir.

Yapılan bir çalışmada, kalker tozu ilavesiyle betonun plastik rötre üzerinde belirgin bir azalma olduğunu göstermiştir. Kalker tozu, beton karışımının işlenebilirliğini iyileştirir ve betonun su kaybını azaltır, bu da dolaylı olarak plastik rötrenin azalmasına yol açar şeklinde belirtilmiştir. Bu çalışma, kalker tozunun plastik rötreyi azaltmada etkili olabileceğini göstermektedir. Yapılan başka bir çalışmada Bonavetti ve arkadaşları kalker tozunun, betonun işlenebilirliğini artırarak su/çimento oranını düşürdüğünü, bu sayede rötrenin azaldığını belirtmiştir. Ancak, bu etki su/çimento oranına göre ikincil bir etkidir [25]. Kalker tozu oranındaki artışın, rötre miktarındaki azalmayla ilişkilendirilmesine rağmen, rötre oluşumunda diğer faktörlerin de önemli olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3.4 : Kalker oranı & rötre miktarları.

	Kalker Oranı	Dort (mm/mm x 10^{-6})
W40A60L0	0%	1,894
W40A60L05	5%	1,849
W40A60L10	10%	1,807
W40A70L0	0%	1,701
W40A70L05	5%	1,668
W40A70L10	10%	1,629
W50A60L0	0%	2,059
W50A60L05	5%	1,982
W50A60L10	10%	1,937
W50A70L0	0%	1,850
W50A70L05	5%	1,815
W50A70L10	10%	1,780
W40A60L0D32	0%	1,533
W40A60L05D32	5%	1,495
W40A60L10D32	10%	1,436
W40A70L0D32	0%	1,339
W40A70L05D32	5%	1,334
W40A70L10D32	10%	1,339
W50A60L0D32	0%	1,701
W50A60L05D32	5%	1,664
W50A60L10D32	10%	1,611
W50A70L0D32	0%	1,456
W50A70L05D32	5%	1,426
W50A70L10D32	10%	1,412

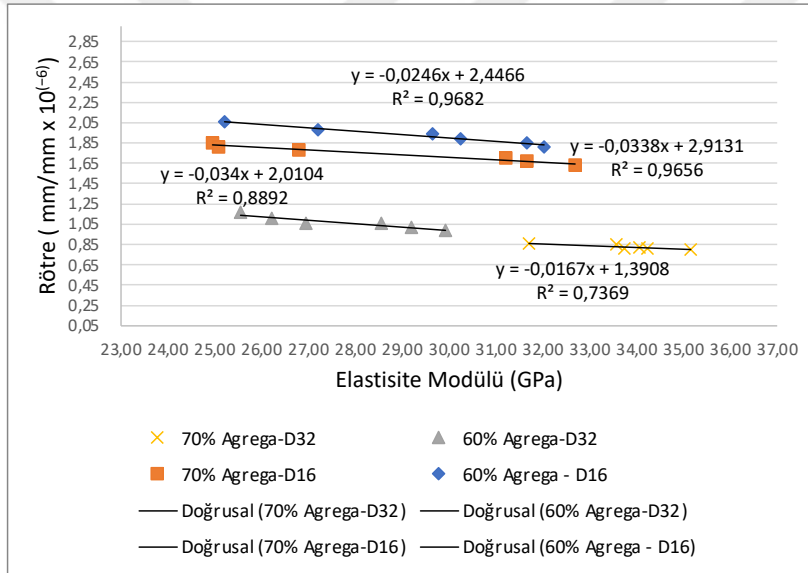


Şekil 3.9 : Kalker oranı & rötre miktarları.

3.8 Elastisite Modülü & Rötre İlişkisi

Elastisite modülü ile rötre arasındaki ilişki incelendiğinde, elastisite modülünün azalmasıyla birlikte numunelerdeki rötre değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek su çimento oranında ve küçük agrega çaplı ve düşük agrega konsantrasyonlu numunelerde elastisite modülleri düşüktür. Şekil 3.14'te görüldüğü üzere düşük elastisite modülü, betonun daha esnek bir yapıya sahip olmasını ve boşluk oranının yüksek olmasını sağlar ve bu durum, rötre oluşumunu artırır.

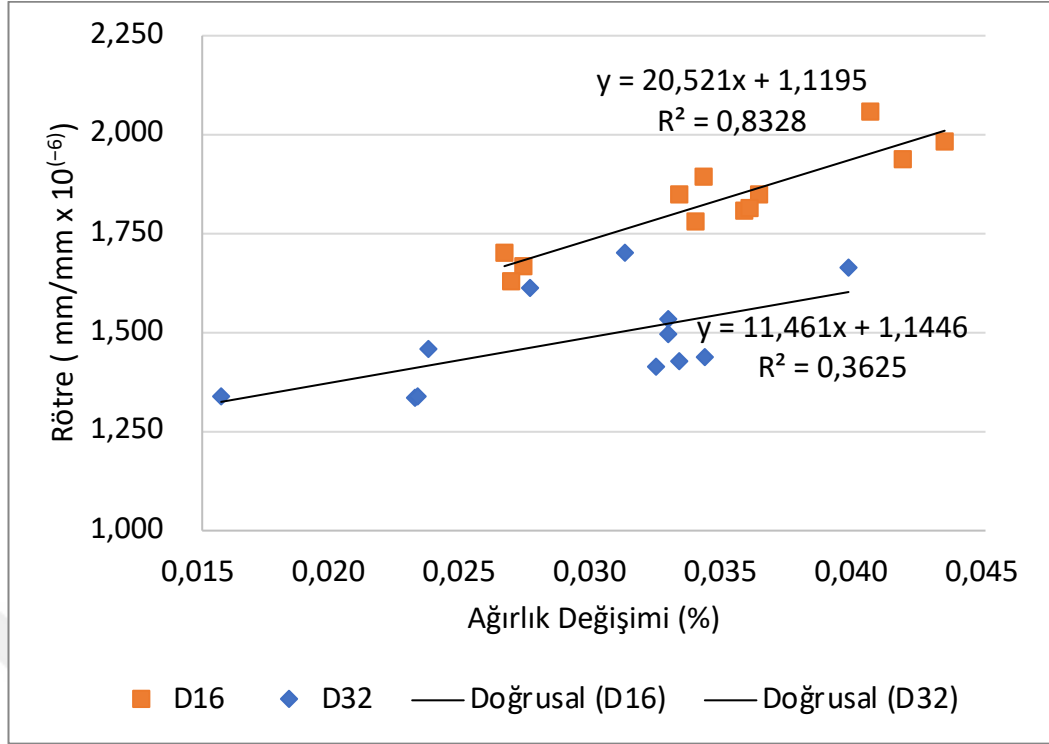
Ayrıca, agrega konsantrasyonunun artmasıyla birlikte rötrenin azaldığını, ancak su/çimento oranının artmasıyla rötrenin arttığı görülmüştür. Agrega konsantrasyonundaki artış betonun içerisindeki boşlukların azalmasına bağlı olarak rötre oluşumunu kısıtlamaktadır.



Şekil 3.10 : Elastisite modülü & rötre miktarları.

3.9 Ağırlık Değişimi & Rötre İlişkisi

Beton üretiminden sonra hidratasyon süreci başlar ve betonda bulunan suyun bir kısmı çimentonun kimyasal reaksiyonlarıyla bağlanır. Betonda serbest halde bulunan su, zamanla buharlaşır. Bu su kaybı, betonda hem hacimsel küçülmelere (rötre) hem de ağırlık kaybına neden olur. Şekil 3.15'te 200 gün boyunca ölçülen ağırlık değişimi ve rötre ilişkisi incelenmiştir ve ağırlık değişimi artışıyla rötrenin doğru orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 3.11 : Ağırlık değişimi ve rötre ilişkisi.

3.10 Kılcallık Katsayısı

Kılcallık katsayısı, betonun suyu emme ve suyun kılcal boşluklar içinde taşınma yeteneğidir. Betonun kılcallık katsayısı, porozite ve mikro yapı ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek porozite, beton içinde daha fazla kılcal boşluk oluşturur, bu da suyun daha kolay hareket etmesine neden olur. Betonun kılcallık katsayısı, betonun mikro yapısındaki boşlukların boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Daha yoğun ve daha az boşluk içeren bir mikro yapı, kılcallık katsayısını azaltarak betonun su geçirmezliğini artırır [23].

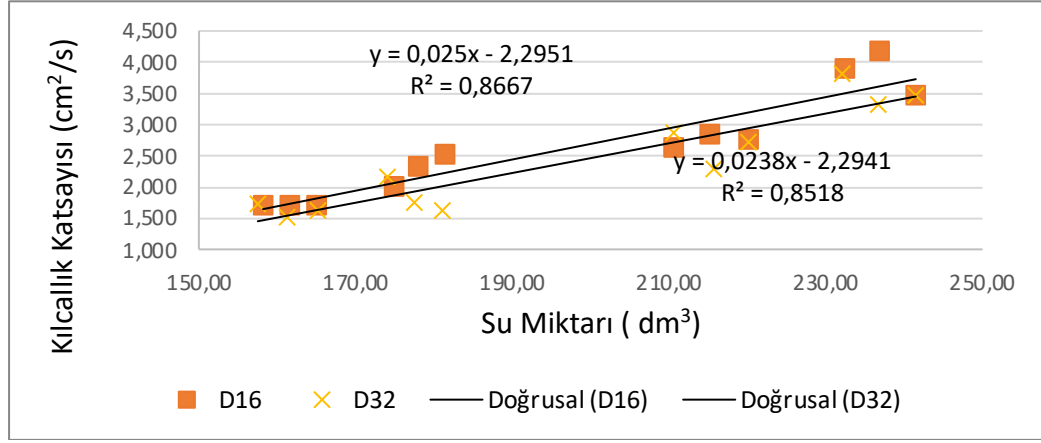
Ayrıca yüksek su/çimento oranı, betonun daha fazla boşluklu ve geçirgen olmasına neden olur, bu da kılcallık katsayısının artmasına yol açar. Düşük su/çimento oranı ise betonun kılcal geçiş yollarını minimize ederek kılcallık katsayısını düşürür [14]. Çalışma kapsamında kılcallık katsayıları hesaplanmıştır. Numuneler için hesaplanan kılcallık katsayısı değerleri aşağıdaki Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

Çizelge 3.5 : Numunelerin kılcallık katsayıları.

Seri	Kılcallık Katsayısı
W40A60L0	2,755
W40A60L05	2,858
W40A60L10	2,63
W50A60L0	3,464
W50A60L05	4,171
W50A60L10	3,895
W40A70L0	1,713
W40A70L05	1,709
W40A70L10	1,712
W50A70L0	2,535
W50A70L05	2,335
W50A70L10	2,014
W40A60L0D32	2,717
W40A60L05D32	2,295
W40A60L10D32	2,866
W50A60L0D32	3,464
W50A60L05D32	3,313
W50A60L10D32	3,81
W40A70L0D32	1,627
W40A70L05D32	1,515
W40A70L10D32	1,725
W50A70L0D32	1,623
W50A70L05D32	1,748
W50A70L10D32	2,166

3.11 Su Miktarı & Kılcallık Katsayısı İlişkisi

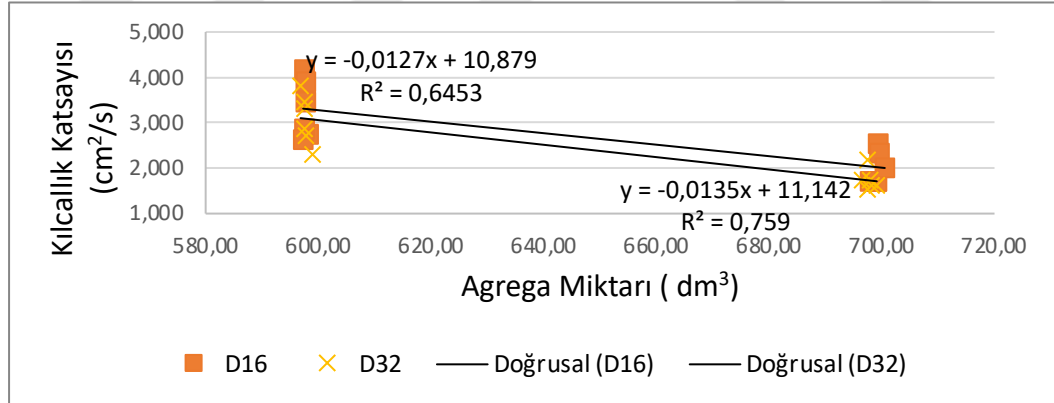
Yüksek su/çimento oranı, betonun porozitesini artırır, bu da kılcallık katsayısının artmasına yol açar. Şekil 3.16'da görüldüğü üzere su/çimento oranı yüksek olan numunelerdeki kılcallık katsayısı miktarının, düşük olan numunelere göre daha yüksek olmuştur. Yüksek su/çimento oranına sahip beton, daha büyük ve daha bağlantılı kılcal boşluklar içerir, bu da suyun beton içine daha kolay girmesine ve kılcallık katsayısının artmasına neden olur [26].



Şekil 3.12 : Su miktarı ve kılcallık katsayısı ilişkisi.

3.12 Agreg a Hacmi & Kılcallık Katsayısı İlişkisi

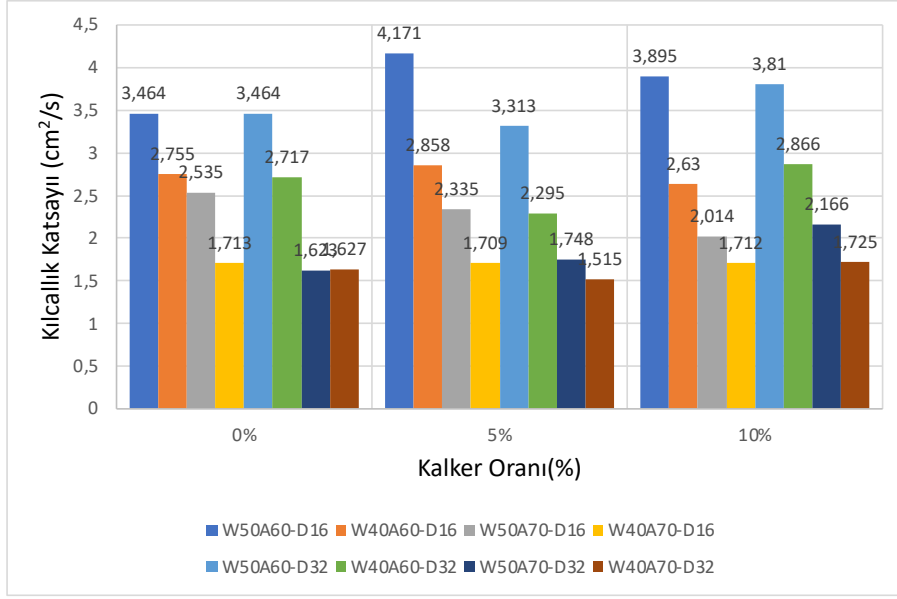
Numunelerdeki agreg a hacmi ile kılcallık katsayısı miktarı arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla Şekil 3.17'deki grafik oluşturulmuştur. Agreg a miktarındaki artışın kılcallık katsayısı miktarında bir düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Bu durum kılcal boşlukları içeren çimento hamuru fazının agreg a artışı sonucunda azalması nedeniyle oluşmuştur.



Şekil 3.13 : Agreg a hacmi ve kılcallık katsayısı ilişkisi.

3.13 Kalker Tozu & Kılcallık Katsayısı İlişkisi

Ağırlıkça %0, %5 ve %10' u arasında değişen kalker tozu içeriğinin beton numunelerindeki kılcallık üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 3.18'de görüldüğü gibi kalker tozu oranındaki artış kılcallık katsayısını düşürmüştür.



Şekil 3.14 : Kılcallık katsayısı ve kalker oranı ilişkisi.

3.14 Rötire Miktarı & Kılcallık Katsayısı İlişkisi

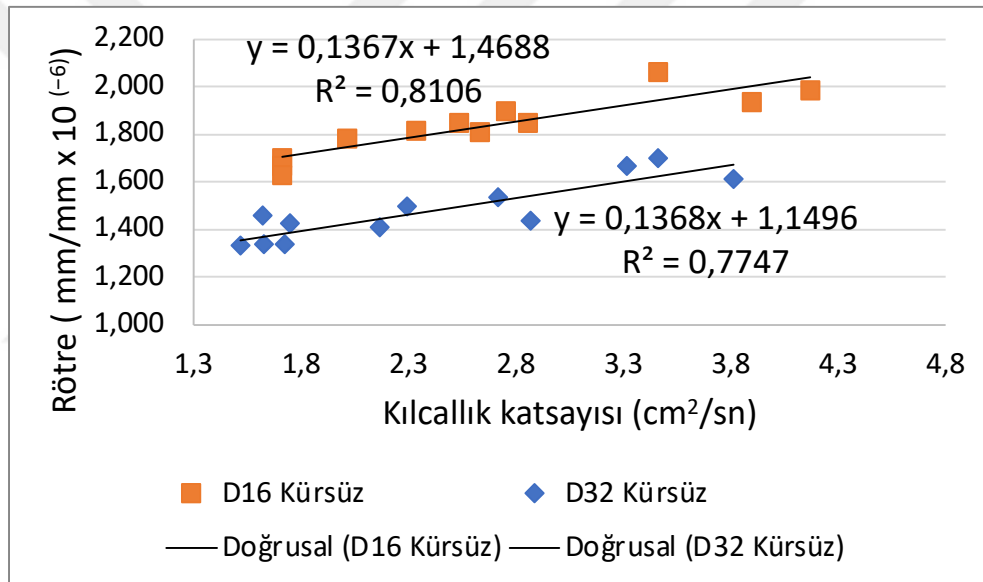
Kılcallık katsayısı, suyun beton içinde hızlı hareket etmesinde ve buharlaşmasında belirleyici faktörlerden biridir. Yüksek kılcallık katsayısı, betonun hızlı su kaybına uğramasına ve kuruma rötresinin artmasına neden olur. Bu nedenle, kılcallık katsayısının kontrolü, betonun rötire davranışını yönetmek için kritik bir öneme sahiptir [27]. Çizelge 3.10’da numunelerin kılcallık katsayılarıyla rötire miktarlarının ilişkisi gösterilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere kılcallık katsayısının artışıyla rötire miktarları artmıştır.

Çizelge 3.6 : D16 numunelerin kılcallık katsayısı ve rötire miktarı.

Numune	Kılcallık Katsayısı(cm ² /s)	Dort (mm/mm x 10 ⁻⁶)
W40A60L0	2,755	1,876
W40A60L05	2,858	1,769
W40A60L10	2,63	1,826
W40A70L0	1,713	1,666
W40A70L05	1,709	1,491
W40A70L10	1,712	1,646
W50A60L0	3,464	2,084
W50A60L05	4,171	1,976
W50A60L10	3,895	1,884
W50A70L0	2,535	1,769
W50A70L05	2,335	1,829
W50A70L10	2,014	1,776

Çizelge 3.7 : D32 numunelerin kılcallık katsayısı ve rötre miktarı.

Numune	Kılcallık Katsayısı(cm^2/s)	Dort ($\text{mm}/\text{mm} \times 10^{-6}$)
W40A60L0D32	2,717	1,589
W40A60L05D32	2,295	1,529
W40A60L10D32	2,866	1,375
W40A70L0D32	1,627	1,293
W40A70L05D32	1,515	1,334
W40A70L10D32	1,725	1,371
W50A60L0D32	3,464	1,664
W50A60L05D32	3,313	1,629
W50A60L10D32	3,81	1,607
W50A70L0D32	1,623	1,529
W50A70L05D32	1,748	1,546
W50A70L10D32	2,166	1,475



Şekil 3.15 : Numunelerin rötre miktarı ve kılcallık katsayısı karşılaştırması.

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi yüksek miktarda rötre yapan karışımların kılcal su emme katsayılarının da yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca su/çimento oranı yüksek olan, agrega konsantrasyonu düşük olan ve maksimum agrega çapı daha düşük olan numunelerde kılcallık katsayılarında artış görülmektedir. Betonun kuruması sırasında kaybolan suyun, iç yapıda kılcal boşluk olarak kalması nedeniyle fazla su kaybeden, dolayısıyla kılcal boşluk miktarı fazla olan beton karışımlarının kılcal su emme katsayılarının daha yüksek olması beklenen durumdur.



4. SONUÇLARIN MEVCUT MODELLERLE İNCELENMESİ

4.1 Amerikan Beton Enstitüsü - ACI-209R Rötre Modeli

ACI Teknik Komitesi tarafından kuruma etkisinde rötre oluşumunun tahmin edilmesi için geliştirilmiş modelde yer alan parametreler arasında kürlleme yöntemi, ortamın bağıl nemi, hacim-yüzey oranı (mm), betonun çökme değeri (mm), ince agreg a yüzdesi (%), çimento içeriği (kg/m³), betonun hava içeriği (%), çimento türü, betonun kurumaya başladığı yaş (genellikle kür süresi, gün) ve betonun yaşı (gün) yer almaktadır.

Amerikan Beton Enstitüsü rötre modeli aşağıdaki denklemde yer almaktadır [28].

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)^\alpha}{f+(t-t_c)^\alpha} \times \varepsilon_{shu} \quad (4. 1)$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_c)$: Birim rötre deformasyonu

t : Zaman (gün)

t_c : Kuruma başlangıcı (gün)

ε_{shu} : Son birim rötre deformasyonu

f : Rötre eğrisinin formunu belirleyen sabit.

Şekil ve boyut etkilerinin hesaba katılması için α değeri, denklemlerde 1 olarak belirlenmiştir. Beton numuneler için toplam kür süresi $t_c = 0$ alınmıştır. Denklem içerisinde kullanılacak f sabiti Denklem 4.2 ile 32,42 olarak belirlenmiştir. Bu sabit rötre eğrisinin formunu belirler ve deneysel verilere veya standartlara göre belirlenir. V numune hacmini ve S yüzey alanını temsil etmektedir.

$$f = 26.0e^{\{1.42 \times 10^{-2} \left(\frac{V}{S}\right)\}} \quad (4. 2)$$

$$\varepsilon_{shu} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} mm/mm \quad (4. 3)$$

Maksimum rötrenin hesabında, Denklem 4.3 kullanılacaktır. Denklemde yer alan γ_{sh} değeri, Denklem 4.4 üzerinde gösterilen düzeltme faktörleri ile hesaplanacaktır.

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,Rh} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (4. 4)$$

Kürlenme faktörü $\gamma_{sh,tc}$ değeri, Çizelge 4.12'ye göre belirlenir. Bu tabloya göre, kür uygulanmayan numuneler için $\gamma_{sh,tc} = 1,2$ olmaktadır.

Çizelge 4.1 : Büzülme düzeltme faktörleri ilk nemli kürlenme.

Nemli Kürlenme 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 4.5 ile hesaplanacaktır. Bu faktör, farklı nem koşullarında betonun rötre davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılan düzeltme faktörüdür.

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02h & 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,0h & 0,80 < h \leq 1 \end{cases} \quad (4. 5)$$

V numune hacmini ve S yüzey alanını temsil etmektedir. Hacim-yüzey alanı faktörü $\gamma_{sh,vs}$ 70*70*280 mm boyutlu numuneler için Denklem 4.6 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{sh,vs} = 1,2e^{\{-0,00472(\frac{V}{S})\}} \quad (4. 6)$$

Yayılma faktörü $\gamma_{sh,s}$ için Denklem 4.7 kullanılmıştır, s çökme sonuçlarının milimetre cinsinden değeridir.

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s \quad (4. 7)$$

İnce agrega faktörü $\gamma_{sh,\psi}$ Denklem 4.8 ile elde edilecektir, Ψ düzeltme faktörü ağırlıkça ince agreganın iri agregaya oranıdır.

$$\gamma_{sh,\psi} = \begin{cases} 0,30 + 0,014\Psi & \Psi \leq \%50 \\ 0,90 + 0,002\Psi & \Psi > \%50 \end{cases} \quad (4. 8)$$

Çimento faktörü $\gamma_{sh,c}$ Denklem 4.9 ile bulunacak olup c sembolü numunelerin içerisindeki çimentonun kg/m3 cinsinden değerini temsil etmektedir.

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061c \quad (4.9)$$

α , hava miktarının yüzdesel temsili olmak üzere hava faktörü $\gamma_{sh,\alpha}$ Denklem 4.10 ile hesaplanacaktır. Değerlerin 1'den küçük çıktığı tüm durumlarda hava faktörü 1 kabul edilmiştir.

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0,95 + 0,008\alpha \geq 1 \quad (4.10)$$

Çizelge 4.2 : Tüm faktörleri ile aci-209r'ye göre maksimum 16 mm agreg a çaplı numunelerin rötre hesabı.

Seriler	Kürlenme Katsayısı (K�rs�z Numuneler)	Bağıl Nem Faktörü	Hacim-Yüzey Alanı Faktörü	Yayılma Faktörü	�nce Agreg a Faktörü	Çimento Faktörü	Hava Faktörü	Maksimum Rötre (x10 ⁻⁶)
W40A60L0	1,2	1,043	1,115	1,180	0,902	1,086	1	1.258
W40A60L05				1,228	0,902	1,078	1	1.300
W40A60L10				1,199	0,902	1,071	1	1.261
W40A70L0				1,236	0,902	1,001	1	1.215
W40A70L05				1,228	0,902	0,996	1	1.201
W40A70L10				1,180	0,902	0,991	1	1.148
W50A60L0				1,276	0,902	1,045	1	1.309
W50A60L05				1,228	0,902	1,039	1	1.253
W50A60L10				1,196	0,902	1,034	1	1.214
W50A70L0				1,180	0,902	0,971	1	1.125
W50A70L05				1,180	0,902	0,967	1	1.120
W50A70L10				1,180	0,902	0,963	1	1.116

Çizelge 4.3 : Tüm faktörleri ile aci-209r'ye göre maksimum 32 mm agreg a çaplı numunelerin rötre hesabı.

Seriler	Kürlenme Katsayısı (K�rs�z Numuneler)	Bağıl Nem Faktörü	Hacim-Yüzey Alanı Faktörü	Yayılma Faktörü	�nce Agreg a Faktörü	Çimento Katsayısı	Hava Faktörü	Maksimum Rötre (x10 ⁻⁶)
W40A60L0D32	1,2	1,043	1,115	1,164	0,902	1,086	1	1.240
W40A60L05D32				1,212	0,902	1,079	1	1.284
W40A60L10D32				1,164	0,902	1,071	1	1.224

Çizelge 4.3 (devam) : Tüm faktörleri ile aci-209r’ye göre maksimum 32 mm agreganın çaplı numunelerin rötre hesabı.

W40A70L0D32	1,164	0,902	1,002	1	1.145
W40A70L05D32	1,164	0,902	0,996	1	1.138
W40A70L10D32	1,196	0,902	0,990	1	1.163
W50A60L0D32	1,180	0,902	1,044	1	1.210
W50A60L05D32	1,212	0,902	1,039	1	1.236
W50A60L10D32	1,228	0,902	1,033	1	1.246
W50A70L0D32	1,196	0,902	0,971	1	1.140
W50A70L05D32	1,164	0,902	0,967	1	1.104
W50A70L10D32	1,212	0,902	0,962	1	1.145

Çizelge 4.4 : Maksimum 16 mm çaplı agreganın içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.

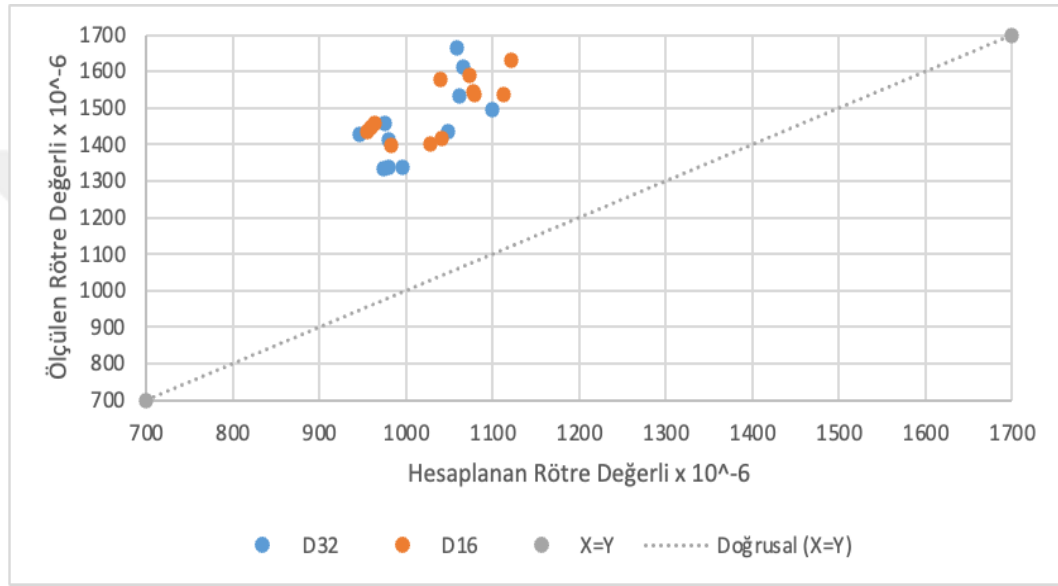
Seriler	200 Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	200 Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)
W40A60L0	1077	1543
W40A60L05	1113	1537
W40A60L10	1080	1536
W40A70L0	1041	1418
W40A70L05	1029	1400
W40A70L10	983	1396
W50A60L0	1121	1632
W50A60L05	1072	1590
W50A60L10	1039	1576
W50A70L0	963	1456
W50A70L05	959	1446
W50A70L10	955	1436

Çizelge 4.5 : Maksimum 32 mm çaplı agreganın içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.

Seriler	200 Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	200 Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)
W40A60L0D32	1062	1533
W40A60L05D32	1099	1495
W40A60L10D32	1048	1436
W40A70L0D32	980	1339
W40A70L05D32	974	1334

Çizelge 4.5 (devam) : Maksimum 32 mm çaplı agregâ içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.

W40A70L10D32	995	1339
W50A60L0D32	1036	1701
W50A60L05D32	1058	1664
W50A60L10D32	1067	1611
W50A70L0D32	976	1456
W50A70L05D32	945	1426
W50A70L10D32	980	1412



Şekil 4.1 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agregâ içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri grafik karşılaştırması.

Amerikan Beton Enstitüsü'nün rötre modeline göre yapılan hesaplamalarda, elde edilen sonuçların ölçülen değerlere göre kısmen daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Model, betonun yaşını, bağıl nemini, kür yöntemini, hacim/yüzey alanı oranını, ince agregâ oranını, çimento dozajını, yayılma miktarını ve hava miktarını içeren parametrelerle rötre hesaplaması yapmaktadır. Ancak, tüm numunelerde bağıl nem, yayılma miktarı ve hacim/yüzey alanı değerleri aynı olduğundan, ölçülen değerlerden sapmalar görülmüştür.

4.2 Avrupa Uluslararası Beton Komitesi – CEB-FIP2010 Rötire Modeli

Avrupa Uluslararası Beton Komitesi rötire modeli aşağıdaki denklemlerde görülmektedir [29].

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cds}(t, t_s) + \varepsilon_{cas}(t) \quad (4.15)$$

Kuruma büzülmesi $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ ve otojen rötire $\varepsilon_{cas}(t)$ fonksiyonları kullanılarak, toplam rötire $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ Denklem 4.15 ile hesaplanır. Otojen rötire $\varepsilon_{cas}(t)$ Denklem 4.16 ve $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ kuruma rötresi Denklem 4.17 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \times \beta_{as}(t) \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \times \beta_{RH}(RH) \times \beta_{ds}(t - t_s) \quad (4.17)$$

Denklem 4.16’da gösterilen otojen rötire hesabında yer alan $\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$, Denklem 4.18 ile ve zaman faktörü $\beta_{as}(t)$ Denklem 4.19 ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{\frac{f_{cm}}{10}}{6 + \frac{f_{cm}}{10}} \right)^{2,5} * 10^{-6} \quad (4.18)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 * t^{0,5}) \quad (4.19)$$

Denklem 4.18’ de yer alan f_{cm} değeri numunelerin 28. gün basınç dayanımlarıdır. α_{as} katsayısı çimento sınıfı özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir ve Çizelge 4.14’ te yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Denklemlerde kullanılan 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 katsayısı $\varepsilon_{cds}(f_{cm})$ Denklem 4.20, bağıl nem katsayısı $\beta_{RH}(RH)$ Denklem 4.21 ve zamana bağlı değişim katsayısı $\beta_{ds}(t - t_s)$ Denklem 4.22’de yer almaktadır.

$$\varepsilon_{cds}(f_{cm}) = [(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times e^{(-\alpha_{ds2} \times f_{cm})}] \times 10^{-6} \quad (4. 20)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)\right] & 40 < RH < 99\% \\ 0.25 & RH > 99\% \end{cases} \quad (4. 21)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{t - t_s}{(0.035 \cdot h^2 + (t - t_s))} \right)^{0.5} \quad (4. 22)$$

Denklemlerde yer alan α_{ds1} ve α_{ds2} Çizelge 4.14' te yer almaktadır. RH değeri yüzde olarak bağıl nem, t beton yaşı, t_s kür süresi ve h değeri Denklem 4.23'te yer alan 7x7x28 cm numunelerin çevre-yüzey alanı ilişkisidir.

$$h = \frac{2A}{u} \quad (4. 23)$$

A değeri mm^2 cinsinden alan ve u değeri mm cinsinden havayla temasta olan çevreyi temsil etmektedir.

Çizelge 4.7 : Maksimum 16 mm çaplı agregası içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve çimento sınıfı katsayıları.

Seriler	t			ts			t-ts			f_{cm28}	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
	56	118	200	56	118	200	56	118	200				
W40A60L0										41,6			
W40A60L05										44,5			
W40A60L10										38,6			
W40A70L0										48,9			
W40A70L05										50,4			
W40A70L10										47,1			
W50A60L0	56	118	200	7	49	111	193			35,6	600	6	0,012
W50A60L05										39,9			
W50A60L10										39,0			
W50A70L0										29,8			
W50A70L05										30,8			
W50A70L10										37,3			

Çizelge 4.8 : Maksimum 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve çimento sınıfı katsayıları.

Seriler	t			ts			t-ts			f_{cm28}	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
	56	118	200	56	118	200	56	118	200				
W40A60L0D32										47,1			
W40A60L05D32										40,6			
W40A60L10D32										44,9			
W40A70L0D32										45,1			
W40A70L05D32										47,6			
W40A70L10D32										53,0			
W50A60L0D32	56	118	200		7		49	111	193	40,1	600	6	0,012
W50A60L05D32										37,2			
W50A60L10D32										38,5			
W50A70L0D32										38,4			
W50A70L05D32										40,4			
W50A70L10D32										36,6			

Çizelge 4.9 : Maksimum 16 mm agrega çaplı numunelerin ceb-fib 2010'a göre hesaplanan rötre değerleri.

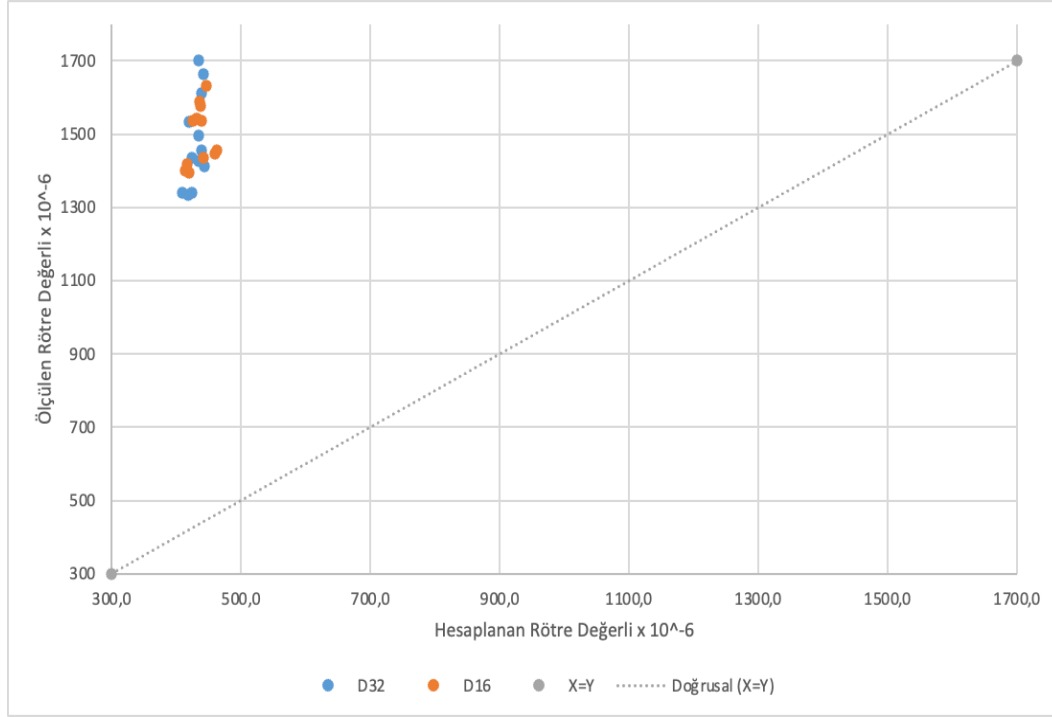
Seriler	$\varepsilon_{cs}(t, t_s) \times 10^{-6}$		
	56 gün	118 gün	200 gün
W40A60L0	254,527	352,681	431,749
W40A60L05	252,677	348,437	425,277
W40A60L10	256,749	357,523	439,016
W40A70L0	250,370	342,769	416,459
W40A70L05	249,643	340,864	413,446
W40A70L10	251,229	344,938	419,859
W50A60L0	259,217	362,651	446,592
W50A60L05	255,754	355,386	435,824
W50A60L10	256,412	356,805	437,947
W50A70L0	265,174	374,257	463,349
W50A70L05	264,064	372,161	460,358
W50A70L10	257,785	359,704	442,254

Çizelge 4.40 : Maksimum 32mm agrega çaplı numunelerin ceb-fib 2010’a göre hesaplanan rötre değerleri.

Seriler	$\varepsilon_{cs}(t, t_s) \times 10^{-6}$		
	56 gün	118 gün	200 gün
W40A60L0D32	251,267	345,032	420,005
W40A60L05D32	255,200	354,175	434,005
W40A60L10D32	252,455	347,912	424,469
W40A70L0D32	252,340	347,639	424,048
W40A70L05D32	250,968	344,285	418,839
W40A70L10D32	248,574	337,925	408,740
W50A60L0D32	255,610	355,072	435,354
W50A60L05D32	257,849	359,837	442,450
W50A60L10D32	256,799	357,629	439,175
W50A70L0D32	256,849	357,736	439,333
W50A70L05D32	255,397	354,608	434,656
W50A70L10D32	258,403	360,984	444,143

Çizelge 4.11 : Tüm numuneler için hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.

Seriler	D32-200	D32-200	D16-200	D16-200
	Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)
W40A60L0	420,0	1533	431,7	1543
W40A60L05	434,0	1495	425,3	1537
W40A60L10	424,5	1436	439,0	1536
W40A70L0	424,0	1339	416,5	1418
W40A70L05	418,8	1334	413,4	1400
W40A70L10	408,7	1339	419,9	1396
W50A60L0	435,4	1701	446,6	1632
W50A60L05	442,4	1664	435,8	1590
W50A60L10	439,2	1611	437,9	1576
W50A70L0	439,3	1456	463,3	1456
W50A70L05	434,7	1426	460,4	1446
W50A70L10	444,1	1412	442,3	1436



Şekil 4.2 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri grafik karşılaştırması.

CEB-FIP rötre modeli hesabında belirleyici parametreler 28 günlük basınç dayanımları, bağıl nem koşulları, çimento sınıfı katsayıları ve zamana bağlı katsayılarıdır. Hesaplar ve ölçülen sonuçlar karşılaştırıldığında hesapların ölçümlerden oldukça küçük olduğu görülmüştür. Agrega çapı, su/çimento oranı direkt olarak hesaplara katılmadığından daha uzak sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan bir çalışmada CEB-FIP rötre modeli, geleneksel betonlar için makul bir tahmin sağladığı; ancak, yüksek dayanımlı betonlar ve aşırı çevresel koşullar altında, ampirik verilere dayalı bazı uyarlamalar yapılmasını gerektiği öne sürülmüştür [30]. Bu durum modelin betonun rötre davranışını açıklama yeteneğinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

4.3 Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği–AASHTO-2012 Rötre Modeli

Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği rötre modeli Çizelge 4.23'te yer almaktadır [31]. AASHTO modeline göre Denklem 4.24 kullanılarak toplam rötre hesaplanmıştır. Çizelge 4.24 ve 4.25'te hesaplanan rötre değerleri yer almaktadır. Karşılaştırmalı değerler Çizelge 4.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 : ASSHTO rötre denklemleri.

Toplam Rötre	$\varepsilon_{cs} = 0.48 \times 10^{-3} k_{hs} k_f k_s k_{td}$	(4. 24)
Bağıl Nem Faktörü	$k_{hs} = 2.0 - 0.014H$	(4. 25)
Dayanıklılık Düzeltmesi	$k_f = \frac{5}{1 + f_c}$	(4. 26)
Boyut Düzeltmesi	$k_s = 1.45 - 0.13 \left(\frac{V}{S} \right) \geq 1.0$	(4. 27)
Zaman Düzeltmesi	$k_{td} = \frac{t}{12 \left(\frac{100 - 4f_c}{f_c + 20} \right) + t}$	(4. 28)

k_{hs}	: Bağıl nem faktörü
k_s	: Hacim/Yüzey Alanı etki faktörü
k_f	: Beton basınç dayanımı faktörü
k_{td}	: Zamana bağlı düzeltme katsayısı
H	: Ortamın bağıl nem değeri
$\frac{V}{S}$	: Hacim/Yüzey Alanı oranı
f'_{ci}	: Beton basınç dayanımı

Çizelge 4.13 : Maksimum 16 mm agregâ çaplı numunelerin AASTHO 2012'ye göre rötresi.

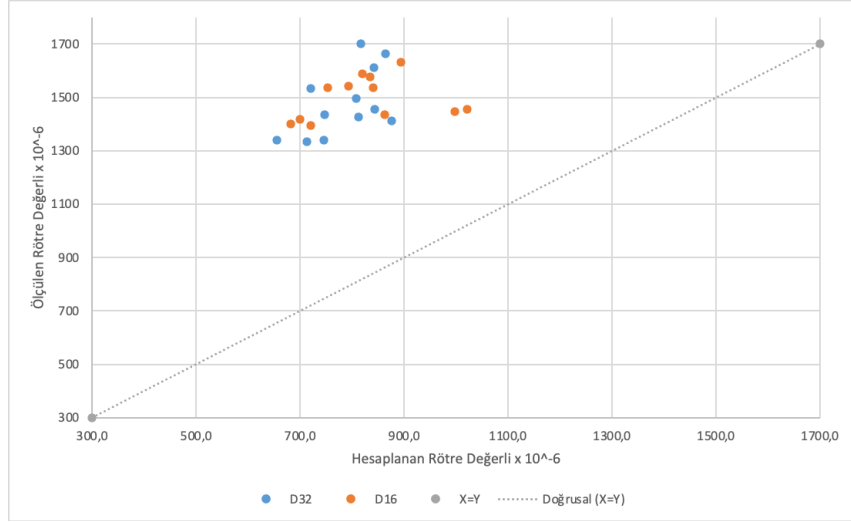
Seriler	ε_{cs}		
	56 gün	118 gün	200 gün
W40A60L0	574	719	793
W40A60L05	582	684	752
W40A60L10	565	760	841
W40A70L0	595	639	700
W40A70L05	599	624	682
W40A70L10	590	656	720
W50A60L0	556	805	894
W50A60L05	569	741	820
W50A60L10	566	754	834
W50A70L0	539	914	1022
W50A70L05	542	893	997
W50A70L10	561	779	863

Çizelge 4.14 : Maksimum 32 mm agrega çaplı numunelerin AASTHO 2012'ye göre rötresi.

Seriler	56 gün	ε_{cs}	
		118 gün	200 gün
W40A60L0	530	657	721
W40A60L05	513	731	808
W40A60L10	524	680	748
W40A70L0	525	678	745
W40A70L05	532	651	714
W40A70L10	546	601	656
W50A60L0	512	739	817
W50A60L05	504	780	864
W50A60L10	508	761	842
W50A70L0	508	762	843
W50A70L05	513	735	812
W50A70L10	503	790	876

Çizelge 4.15 : Tüm numuneler için hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.

Seriler	D32-200	D32-200	D16-200	D16-200
	Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Hesaplanan Rötre ($\times 10^{-6}$)	Günlük Ölçülen Rötre ($\times 10^{-6}$)
W40A60L0	721	1533	793	1543
W40A60L05	808	1495	752	1537
W40A60L10	748	1436	841	1536
W40A70L0	745	1339	700	1418
W40A70L05	714	1334	682	1400
W40A70L10	656	1339	720	1396
W50A60L0	817	1701	894	1632
W50A60L05	864	1664	820	1590
W50A60L10	842	1611	834	1576
W50A70L0	843	1456	1022	1456
W50A70L05	812	1426	997	1446
W50A70L10	876	1412	863	1436



Şekil 4.3 : Maksimum 16 ve 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri grafik karşılaştırması.

AASHTO rötre modelindeki belirleyici parametreler bağıl nem, hacim yüzey alanı oranı, beton basınç dayanımı, zamana bağlı değişken, bağıl nem faktörü, beton basınç dayanımıdır. Hesap modelinden elde edilen sonuçlar diğer modellerde olduğu gibi daha küçük sonuçlar elde edilmiştir. CEB-FIP hesap modeline benzer parametreleri içermektedir.

Modeller arasında ölçüm sonuçlarına en yakın değerler ACI modelinden elde edilmiştir. Modelde yayılma, agrega çapı, çimento dozajı parametreleri etkin rol oynadığından ve üretilen numunelerde de bu değişkenler etkili olduğundan ACI modeli ölçümlere yakın sonuçlar çıkarmıştır.

4.4 Model B4 Rötre Tahmin Modeli

Model B4, Model B3'ün geliştirilmiş bir versiyonudur. Bazant-Baweja B3 modeli, betonun rötre deformasyonu ve sünmesini zaman fonksiyonu olarak tahmin eden ampirik ve teorik modellerin bir hibritidir. Bu model, rötre deformasyonu ve sünmenin nihai değerlerini hesaplarken, sünmenin temel ve kuruma bileşenlerini de ayırt etmektedir. B4 modelinde B3 modeline göre otojen ve kuruma rötresi ayrı olarak hesaplara dahil edilmiştir [32].

Çizelge 4.16 : B4 model rötre hesaplama denklemleri.

Toplam Rötre	$\varepsilon = \varepsilon_{au}(t', t'_0) + \varepsilon_{sh}(t', t'_0)$
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 Rötre 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	$k_h = \frac{1 - h^3}{12,94(1 - h) - 0,2} \quad \begin{matrix} h \leq 0,98 \\ 0,98 \leq h \leq 1 \end{matrix}$ $h = \text{bağıl nem}$
Kuruma Rötresi Yarılama Faktörü	$\tau_{sh} = \tau_0 k_{\tau_a} (k_s D / 1mm)^2, D=2V/S$
Maksimum Yarılama Faktörü	$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a}{6c}\right)^{p_{ra}} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{p_{rw}} \left(\frac{6,5}{p}\right)^{p_{rc}}, p = 2,350 \text{ kg/m}^3$
Numune Şekil Faktörü	$k_s = \begin{matrix} 1 & \text{sonsuz zemin} \\ 1,15 & \text{sonsuz silindir} \\ 1,25 & \text{sonsuz kare prizme} \\ 1,3 & \text{küre} \\ 1,55 & \text{küp/prizma} \end{matrix}$
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	$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \left(\frac{w}{0,38c}\right)^{r_{tw}}$
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 Süresi)	$t' = t B_{Ts}, B_{Ts} = \exp\left(\frac{U_s}{R} (1/293 - 1/(T + 273))\right),$ $U_s/R = 4000K$

Çizelge 4.27’de yer alan denkelmlerde kullanılacak olan katsayılar Çizelge 4.28 ve Çizelge 4.29’da gösterilmiştir. Beton türüne göre katsayılar değişmektedir. Hesaplamalarda normal (tip 1) beton türüne tekabül eden değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.17 : Beton türüne göre kuruma rötresi faktörleri.

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

Çizelge 4.18 : Beton türüne göre otojen rötre faktörleri.

Parametre	R (Normal)	RS (Yavaş priz alan)	SL(Hızlı priz alan)
$\tau_{cem, gün}$	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

p_a : Atmosferik basınç ile ilişkili katsayı. Betonun bulunduğu çevrenin atmosferik basıncını dikkate alır.

p_{tw} : Islak tutulma periyodunu etkileyen parametre. Betonun kürlenme işlemi sırasında ne kadar süre ıslak tutulduğunu ifade eder.

p_{tc} : Kürlenme süresine ilişkin parametre. Betonun kürlenme işlemi tamamlanana kadar geçen süreyi belirtir.

e_{cem} : Çimento tipi ve miktarını dikkate alan bir parametre. Çimento miktarı ve tipi, betonun rötre ve sünme davranışını etkileyen önemli faktörlerdir.

p_{ea} : Rötreye neden olan içsel etkenler için parametre. Betonun kimyasal bileşimi ve katkı maddeleri gibi içsel etkenleri dikkate alır.

p_{ew} : Su miktarını ve su/çimento oranını etkileyen parametre. Beton karışımındaki su miktarının rötre üzerindeki etkisini belirler.

p_{ec} : Çimento içerikli bileşenlerin etkisini tanımlayan parametre. Çimentonun ve diğer bağlayıcı malzemelerin rötre üzerindeki etkisini açıklar.

$\tau_{au, cem, gün}$: Nihai rötre değerine ulaşma zamanı için kullanılan zaman sabiti. Betonun rötre davranışında çimentonun etkisini zamanla ifade eder.

r_{tw} : Islak tutulma periyodunun rötre üzerindeki etkisini tanımlayan parametre. Rötrenin, betonun ıslak tutulma süresiyle nasıl değiştiğini gösterir.

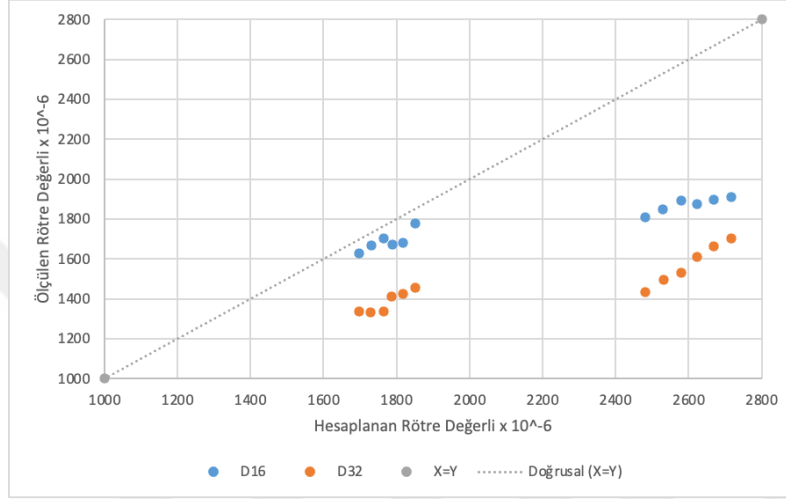
r_t : Rötre hızının zamanla değişimini ifade eden parametre. Rötrenin zamanla nasıl geliştiğini belirtir.

r_a : Atmosferik koşulların rötre üzerindeki etkisini temsil eden katsayı. Hava koşulları, nem, ve sıcaklığın rötreyi nasıl etkilediğini tanımlar.

ε_{au} , cem : Rötrenin nihai değerini belirleyen parametre. Rötrenin uzun vadede ulaşacağı maksimum değeri ifade eder.

r_{ea} : Erken yaşta meydana gelen rötreyi etkileyen parametre. Genç yaştaki rötreye davranışını belirler.

r_{ew} : Suyun rötreye üzerindeki etkisini belirleyen faktör. Beton karışımındaki su miktarının rötreye sürecindeki rolünü açıklar.



Şekil 4.4 : B4 model 200 günlük rötreye hesapları ve ölçülen deney sonuçlarının karşılaştırılmalı dağılımları.

Çizelge 4.19 : B4 rötreye modeline göre hesaplanan ve ölçülen rötreye değerleri.

Seriler	D16		D32	
	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen
W40A60L0	2580	1894	2580	1533
W40A60L05	2530	1849	2531	1495
W40A60L10	2482	1807	2482	1436
W40A70L0	1764	1701	1765	1339
W40A70L05	1730	1668	1730	1334
W40A70L10	1698	1629	1697	1339
W50A60L0	2716	1912	2716	1701
W50A60L05	2669	1898	2669	1664
W50A60L10	2624	1876	2624	1611
W50A70L0	1851	1776	1850	1456
W50A70L05	1819	1681	1818	1426
W50A70L10	1788	1673	1787	1412

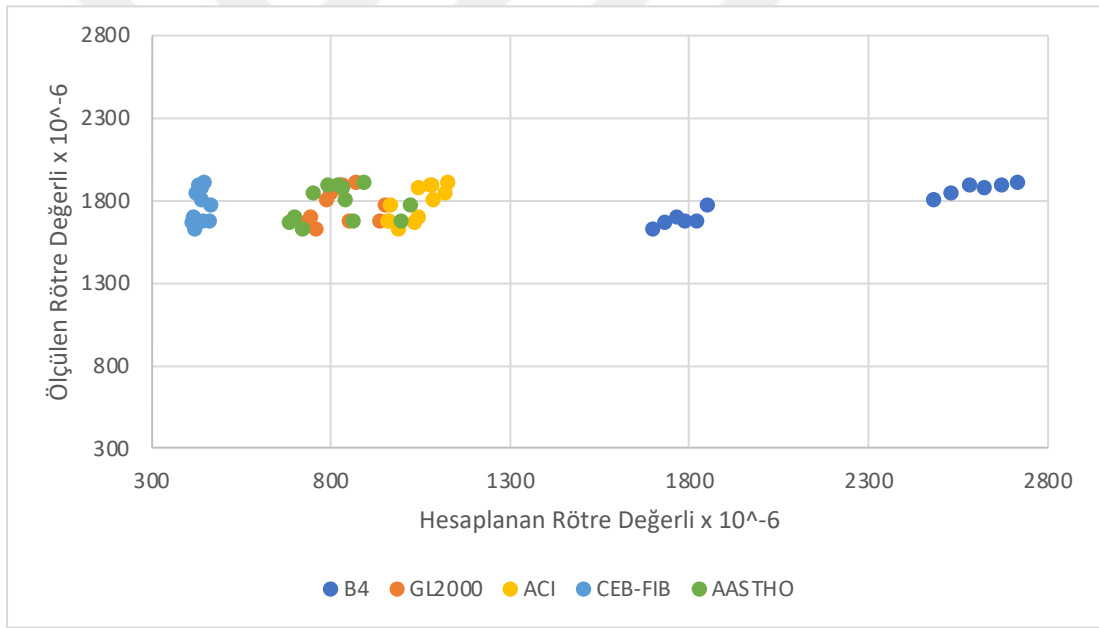
Şekil 4.21 ve Çizelge 4.30’da görüldüğü üzere hesaplanan ile ölçülen değerlerin en yakın sonuçlar verdiği model B4 olmuştur. Agrega boyutunun etkisi hesaplara dahil

edildiğinden model üzerindeki etkisi yüksektir. B4 modeli, geniş bir deneysel veri setine dayandığından, betonun uzun vadeli davranışlarını daha iyi tahmin edebilir. B4 modeli, önceki modellere göre önemli bir iyileştirme sunmakta ve özellikle çeşitli beton karışımları ve çevresel koşullar altında uzun vadeli rötre ve sünmeyi daha kapsamlı ve güvenilir bir şekilde tahmin etmektedir [30].

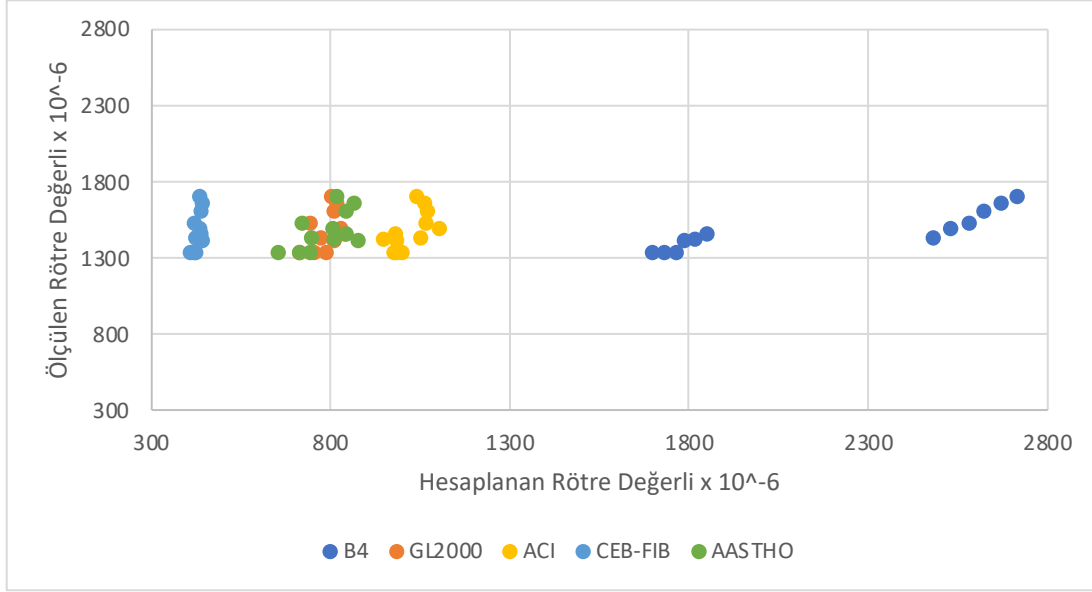
Öte yandan B4 modelinin karmaşıklığı, doğruluğuna katkı sağlamakla birlikte, özellikle daha basit modellerin yeterli olabileceği durumlarda pratik mühendislik uygulamaları için zorluk yaratmaktadır [33].

4.5 Modellerin Birbirleriyle Karşılaştırılması

Modellerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : Maksimum 16 mm çaplı agregası içeren numunelerin modellere göre hesaplanan ve ölçülen rötre değerleri.



Şekil 4.6 : Maksimum 32 mm çaplı agrega içeren numunelerin modellere göre hesaplanan ve ölçülen rötire değerleri.

Grafiklerden görüldüğü üzere, ölçülen değerlere en yakın sonuçları veren modeli B4 Rötire Modelidir. B4 modelinin başarısının temel sebeplerinden biri, agrega çapını modelde hesaba katmasıdır. Diğer modeller, ölçülen rötire değerlerinden daha küçük sonuçlar vermiştir. ACI modeli, genellikle temel ve genel uygulamalar için geniş bir yaklaşım sunarken, CEB-FIB modeli, daha kapsamlı ve detaylı bir analiz sağlar. AASHTO modeli ise özellikle altyapı projeleri için özelleştirilmiş hesaplamalar sunar.

B4 modeli, daha fazla parametre ve etkiyi dikkate alarak daha detaylı sonuçlar sağlarken, ACI modeli daha genel tahminler sunar. AASHTO modeli, pratik uygulamalar için optimize edilmiştir. ACI, geniş bir uygulama yelpazesi sunarken, CEB-FIB genellikle daha büyük ve karmaşık yapılar için tercih edilir. AASHTO ise otoyol ve köprü projeleri için özel olarak uyarlanmıştır. Ayrıca, ACI, CEB-FIB ve AASHTO modellerine agrega boyutu parametresi eklenerek daha gelişmiş hesaplama modelleri elde etmek mümkündür.

5. SONUÇLAR

Yapılan 200 günlük rötre ölçümleri, betonun bileşimindeki çeşitli parametrelerin betonun rötreye olan tepkisini detaylandırmı tır. Betonun su/ imento oranındaki artış, rötre oluşumunu arttırmıştır; bu durum, betonun içerisindeki su miktarının artmasıyla birlikte rötre oluşumunun daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Öte yandan, büyük agrega çapının rötre üzerindeki etkisi gözlemlenmiş ve bu etkinin azaltıcı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan gözlemler, büyük çaplı agregaların beton içinde daha az su gerektirdiğini ve bu durumun rötre oluşumunu sınırlayıcı bir faktör olduğunu vurgulamıştır.

Agrega konsantrasyonunun artmasıyla rötre oluşumunun azaldığı gözlenmiştir. Daha yüksek bir agrega yoğunluğu,  imento hamuru ile dolu boşlukları azaltarak rötre oluşumunu sınırlayabilir. Bu durum, betonun dayanıklılığını artırıcı bir etki göstermektedir.

Ayrıca, kalker tozu oranının artmasıyla nispeten rötre oluşumunun azaldığı belirlenmiştir. Kalker tozunun beton karışımına eklenmesi, belirli koşullar altında rötre oluşumunu azaltabilir. Bu durum, kalker tozunun betonun su tutma kapasitesini düzenleyerek rötre oluşumunu olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

 laveten betonun kuruması sırasında kaybolan suyun, iç yapıda kılcal boşluk olarak kalması nedeniyle fazla su kaybeden, dolayısıyla kılcal boşluk miktarı fazla olan beton karışımlarının kılcal su emme katsayılarının daha yüksek olmuştur. Yüksek kılcallık katsayısı, betonun hızlı su kaybına uğramasına ve kuruma rötresinin artmasına neden olur.

Sonuç olarak, bu çalışma betonun bileşimindeki faktörlerin betonun rötre özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Büyük agrega çapı ve agrega konsantrasyonunun, rötre oluşumu üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve bu faktörlerin betonun bileşiminde dikkate alınmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] **Kadioğlu, T.** (2006). Rötire Azaltıcı Katkı Maddeleri. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Zhang, T., Gao, P., Luo, R., Guo, Y., Wei, J., & Yu, Q.** (2013). Measurement of chemical shrinkage of cement paste: Comparison study of ASTM C 1608 and an improved method. *Construction and Building Materials*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.086>
- [3] **Kiani, B., Sajedi, S., Gandomi, A. H., Huang, Q., & Liang, R. Y.** (2017). Optimal adjustment of ACI formula for shrinkage of concrete containing pozzolans. *Construction and Building Materials*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.082>
- [4] **Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., Setunge, S., & Cwirzen, A.** (2021). A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102210>
- [5] **K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi.** (2008). Time-dependent mechanics of cement concrete composites. Multi-scale Modeling of Structural Concrete. CRC Press.
- [6] **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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.033>
- [7] **Kioumars, M., Azarhomayun, F., Haji, M., & Shekarchi, M.** (2020). Effect of shrinkage reducing admixture on drying shrinkage of concrete with different W/C ratios. *Materials*, 13(24), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma13245721>
- [8] **Zhutovsky, S., & Kovler, K.** (2017). Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 144, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.203>
- [9] **Yıldırım, S. T., Meyer, C., & Herfellner, S.** (2015). Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045>
- [10] **Chen, Y., Wei, J., Huang, H., Jin, W., & Yu, Q.** (2018). Application of 3D-DIC to characterize the effect of aggregate size and volume on non-uniform shrinkage strain distribution in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.005>

- [11] **Zhang, W., Zakaria, M., & Hama, Y.** (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069>
- [12] **Eguchi, K., & Teranishi, K.** (2005). Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model. *Cement and Concrete Research*, 35(3). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.002>
- [13] **Maruyama, I., Sugimoto, H., Umeki, S., & Kurihara, R.** (2022). Effect of fineness of cement on drying shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106961>
- [14] **Neville, A. M.** (1995). *Properties of Concrete* (4th ed.). Pearson Education.
- [15] **Li, L. G., & Kwan, A. K. H.** (2015). Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 60, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.006>
- [16] **Cohen, M. D., & Bentur, A.** (1988). DURABILITY OF PORTLAND CEMENT-SILICA FUME PASTES IN MAGNESIUM SULFATE AND SODIUM SULFATE SOLUTIONS. *ACI Materials Journal*, 85(3). <https://doi.org/10.14359/1809>
- [17] **Wang, Q., Yang, J., & Chen, H.** (2017). Long-term properties of concrete containing limestone powder. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(3).
- [18] **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.
- [19] **Yatağan, S.** (2010). Beton ve Harçlarda Agrega Dane Boyutunun Rötire ve Durabiliteye Etkisi. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Haseeb Jamal.** (2017). Concrete Slump Test Procedure, Applications & Types of Slump. In *Aboutcivil.Org* (pp. 1–10). <https://www.aboutcivil.org/concrete-slump-test.html>
- [21] **Zeng, Q., Li, K., Fen-Chong, T., & Dangla, P.** (2012). Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.012>
- [22] **Zhang, W., Zakaria, M., & Hama, Y.** (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069>
- [23] **Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M.** (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). *McGraw-Hill Education*.
- [24] **Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D.** (2003). *Concrete*, Prentice Hall, s. 355.

- [25] **Bonavetti, V., Donza, H., Menéndez, G., Cabrera, O., & Irassar, E. F.** (2003). Limestone filler concrete: Effect of the filler content and type of cement on the workability, drying shrinkage, and resistance to carbonation. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1649-1657.
- [26] **Chindaprasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H. T., & Sirivivatnanon, V.** (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 21(2), 356-361.
- [27] **Bentz, D. P., & Jensen, O. M.** (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 677-685.
- [28] **ACI Committee 209.** Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. ACI Manual of concrete practice, Part 1, 1997, 209R 1-92
- [29] **CEB-FIP Model Code.** Comité euro-international du béton. Design Code, 1993.
- [30] **Bazant, Z. P., & Baweja, S. (2000).** Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. *Materials and Structures*, 33(2), 203-211.
- [31] **AASHTO Model Code.** American Association of State Highway and Transportation Officials. Design Code, 2012.
- [32] **The B4 Model for Creep And Shrinkage Of Masonry Assemblage.** RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. 2013.
- [33] **Gilbert, R. I.** (2002). "Creep and Shrinkage Models for High Strength Concrete." *Australian Journal of Structural Engineering*, 4(2), 1-20.

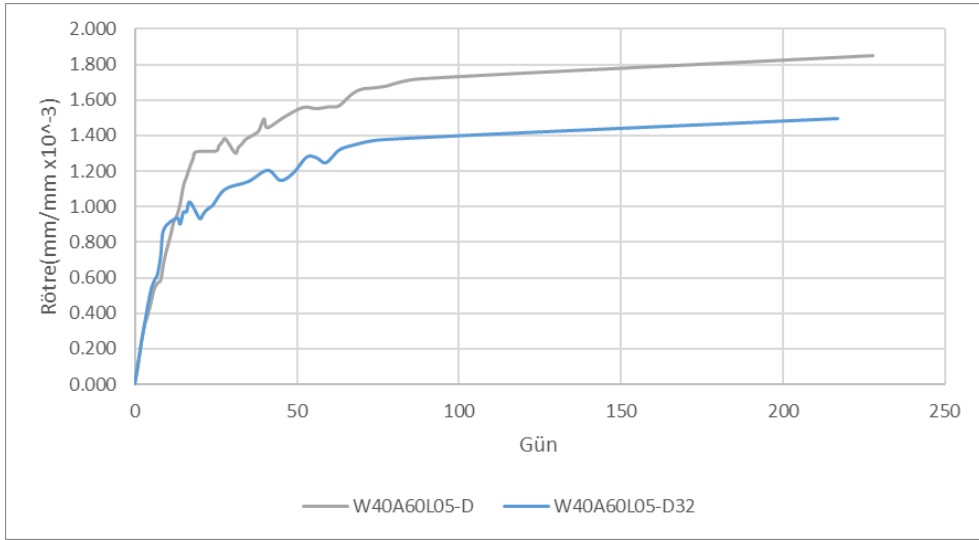


EKLER

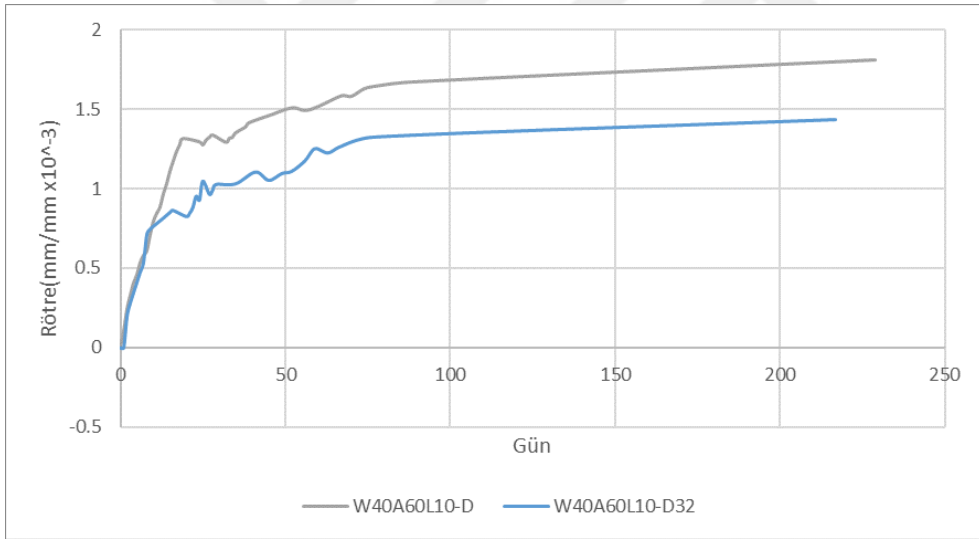
EK A : Numune Ölçümleri



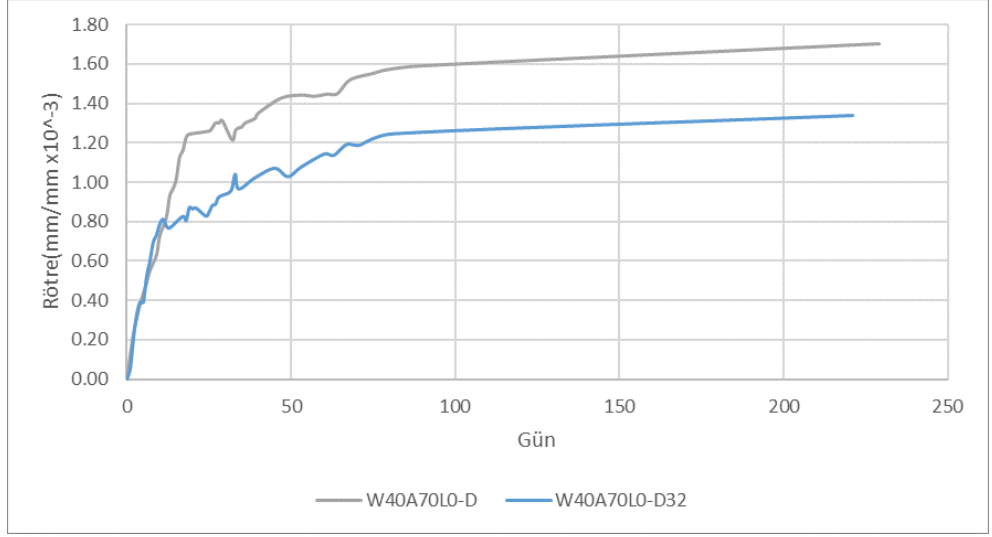
EK A



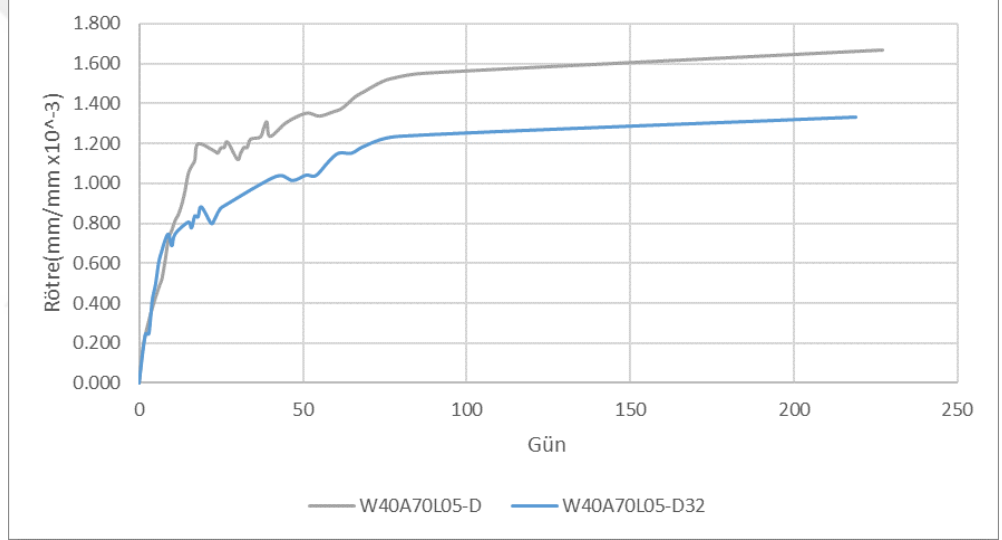
Şekil E.1 : W40A60L05 numune rötre ölçümleri.



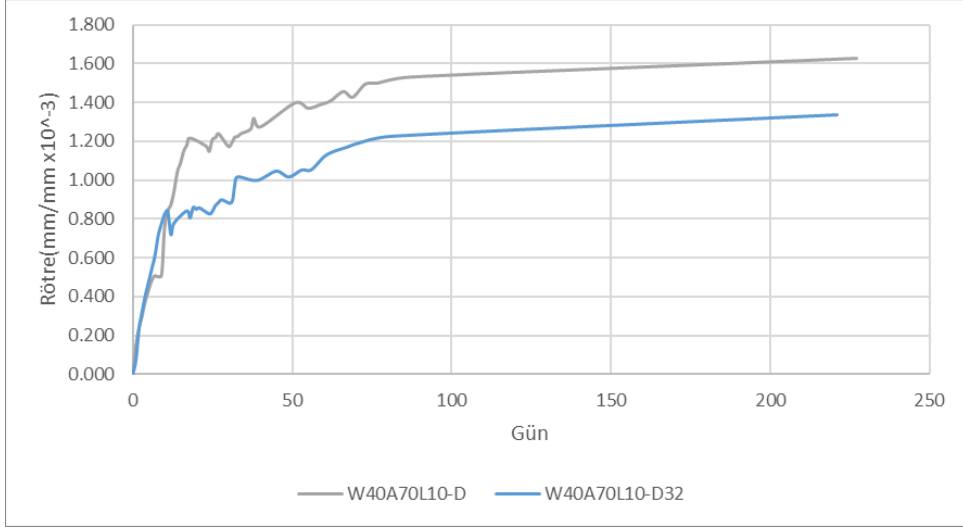
Şekil E.2 : W40A60L10 numune rötre ölçümleri.



Şekil E.3 : W40A70L0 numune rötre ölçümleri.



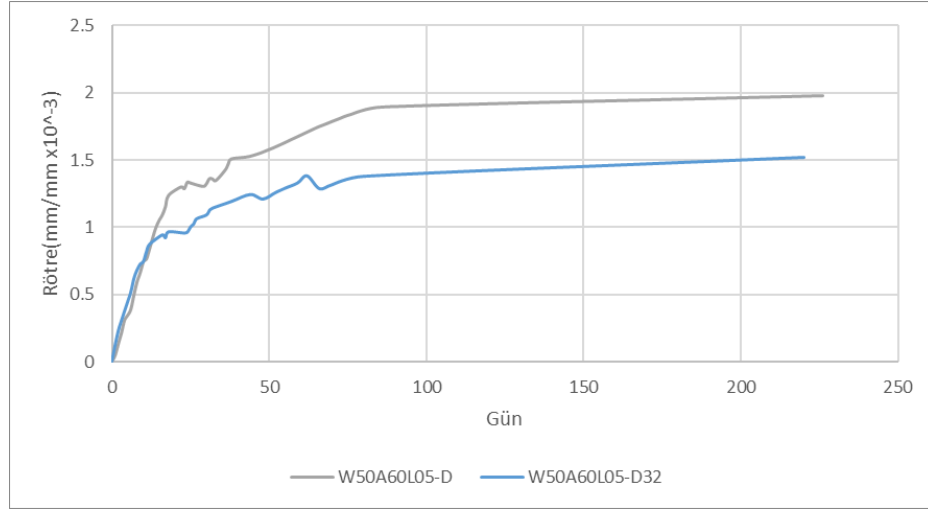
Şekil E.4 : W40A70L05 numune rötre ölçümleri.



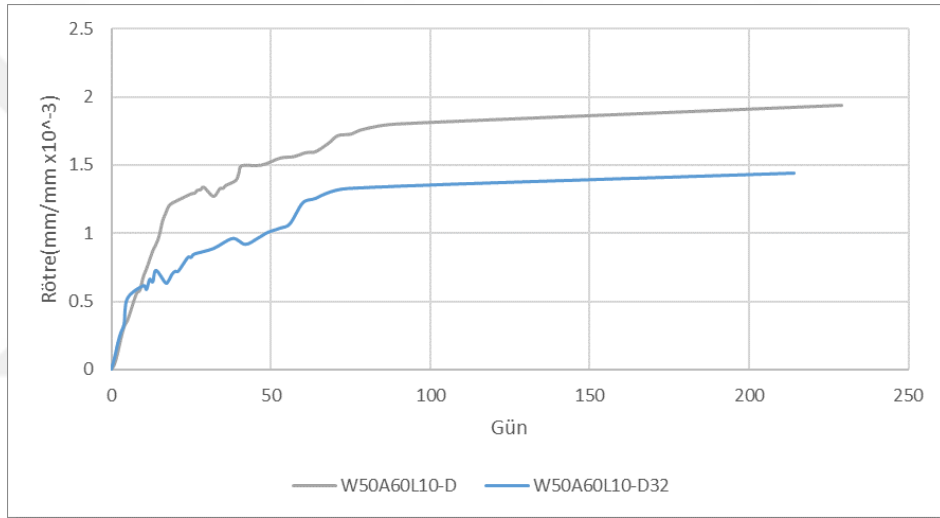
Şekil E.5 W40A70L10 Numune Rötre Ölçümleri



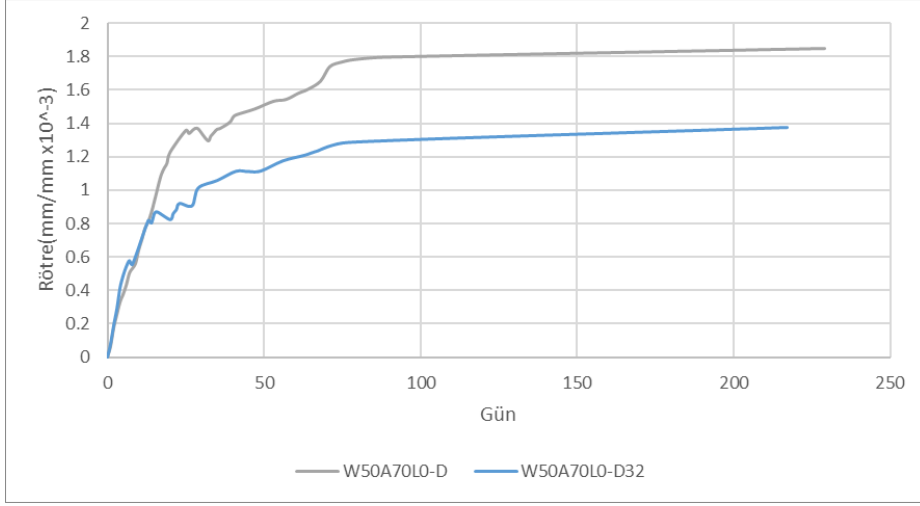
Şekil E.6 : W50A60L0 numune rötre ölçümleri.



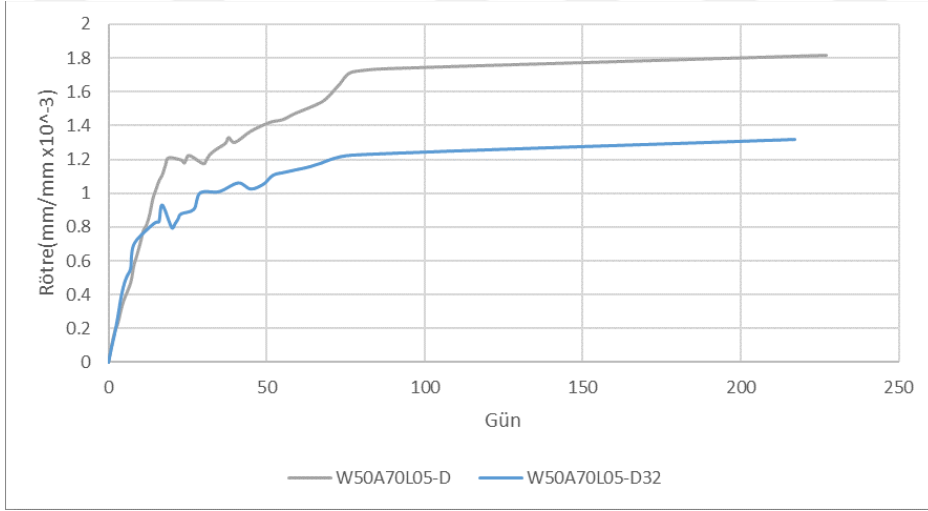
Şekil E.7 : W50A60L05 numune rötre ölçümleri.



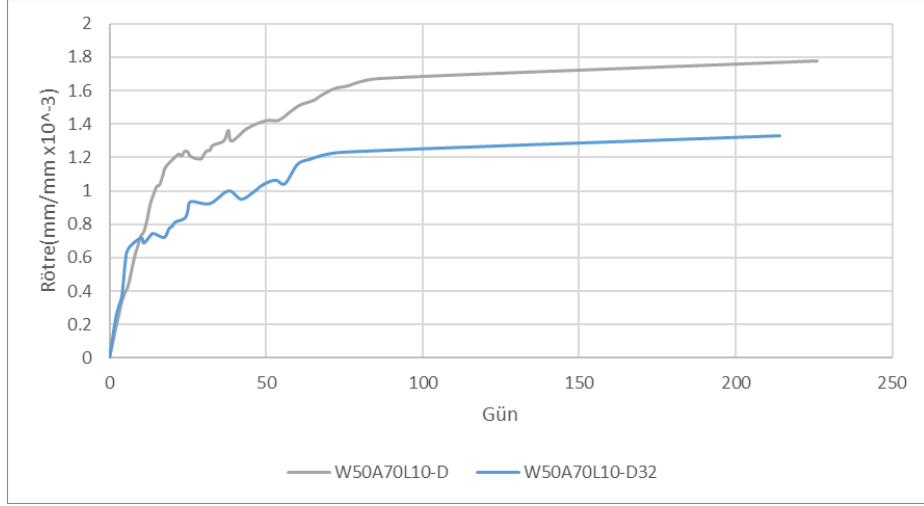
Şekil E.8 : W50A60L10 numune rötre ölçümleri.



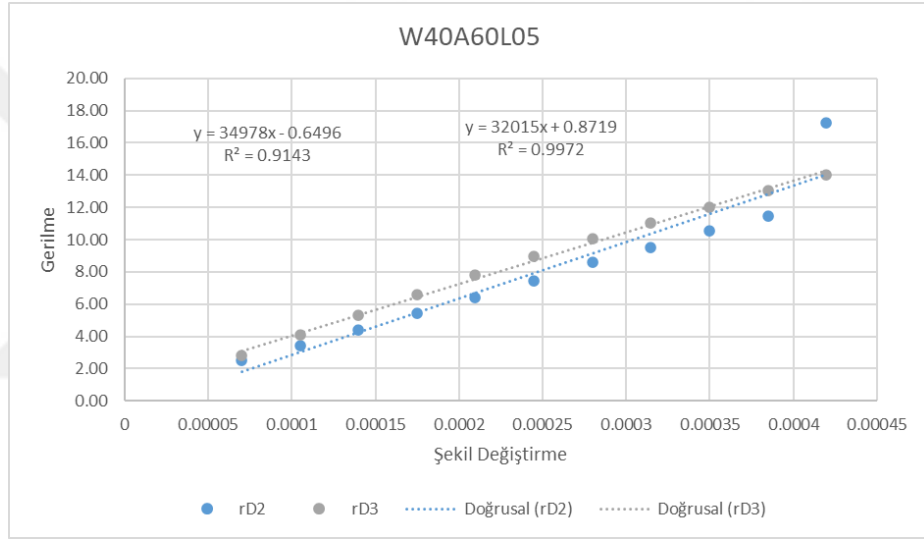
Şekil E.9 : W50A70L0 numune rötre ölçümleri.



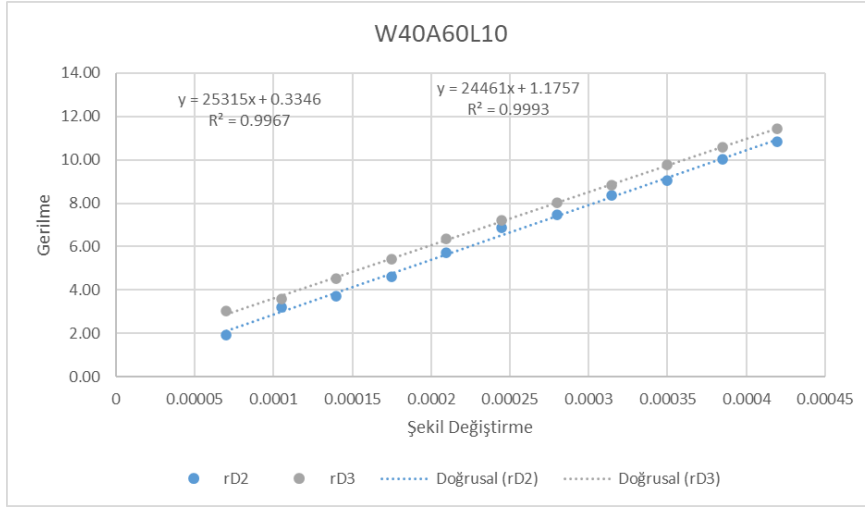
Şekil E.0.10 : W50A70L05 numune rötre ölçümleri.



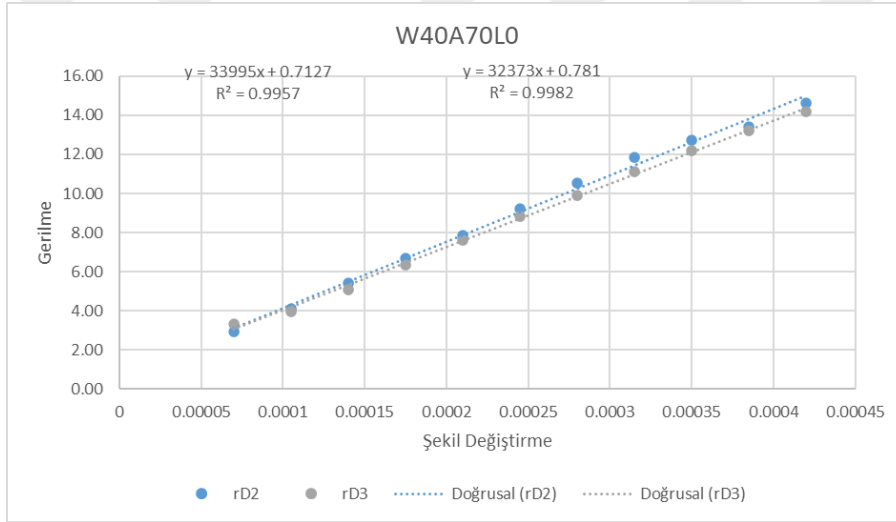
Şekil E.11 : W50A70L10 numune rötre ölçümleri.



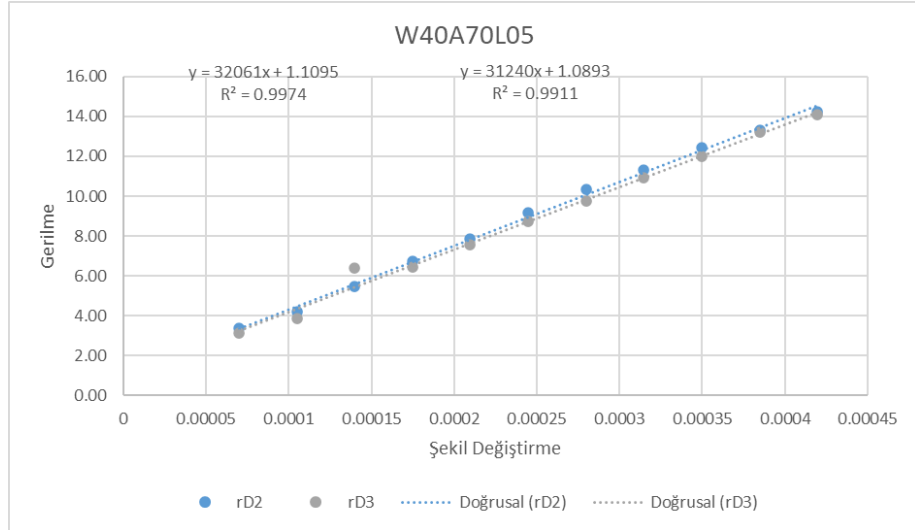
Şekil E.12 : W40A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



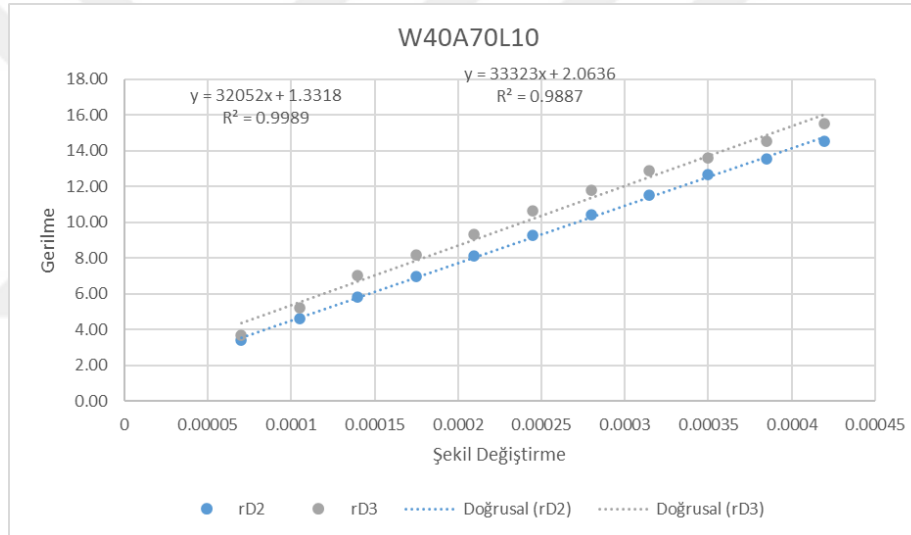
Şekil E.13 : W40A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



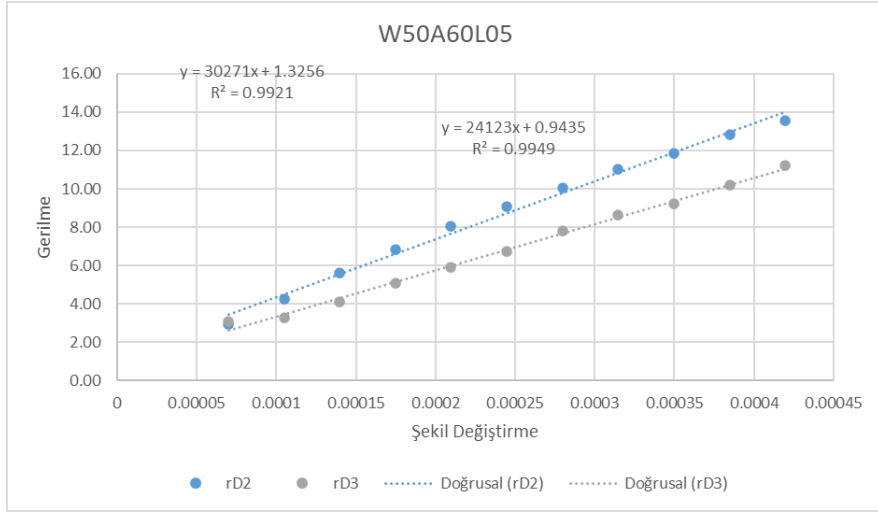
Şekil E.14 : W40A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



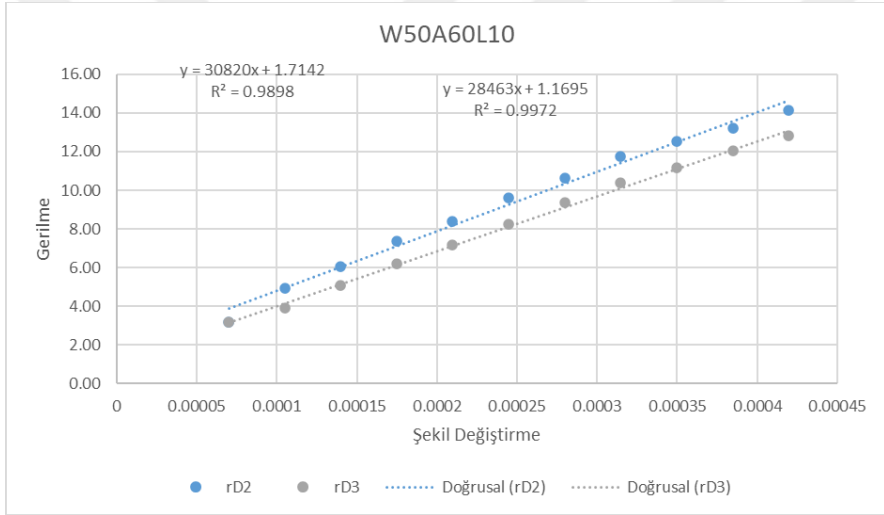
Şekil E.15 : W40A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



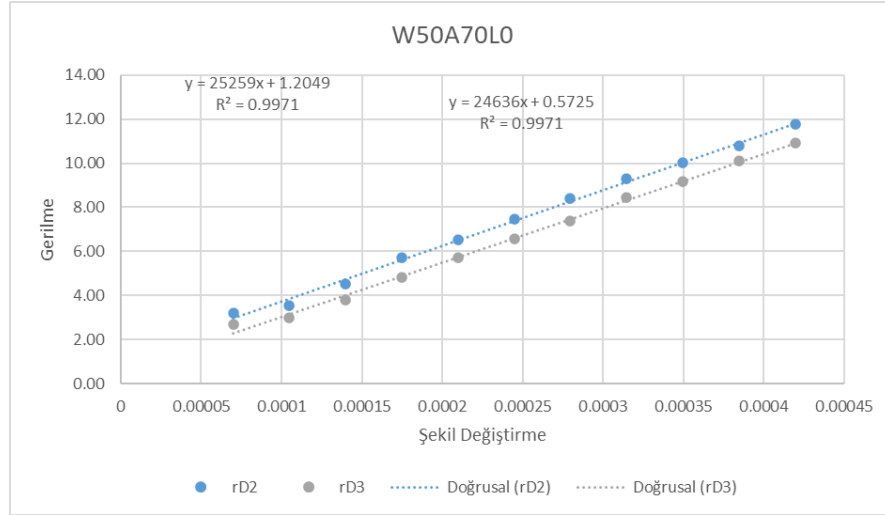
Şekil E.16 : W40A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



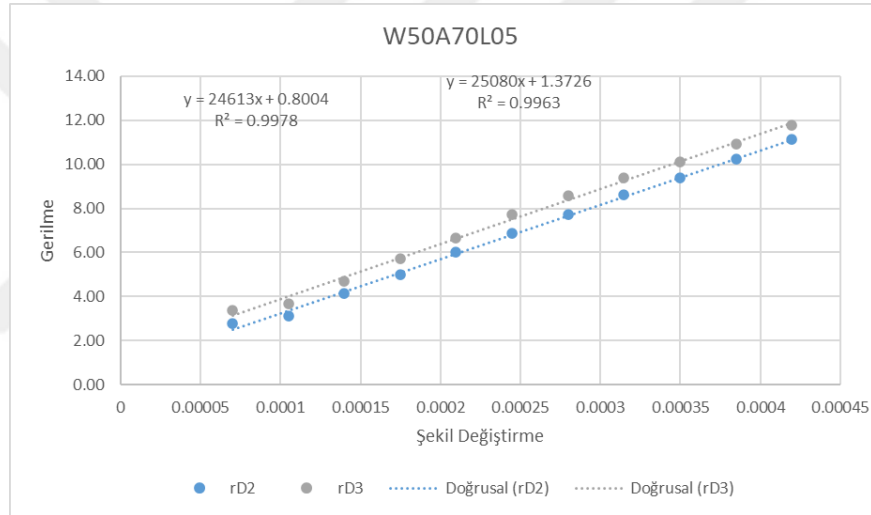
Şekil E.17 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



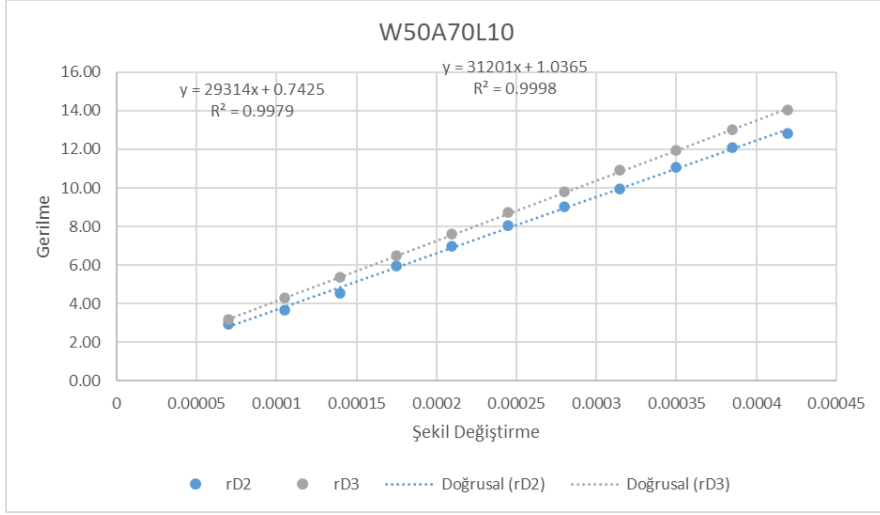
Şekil E.18 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



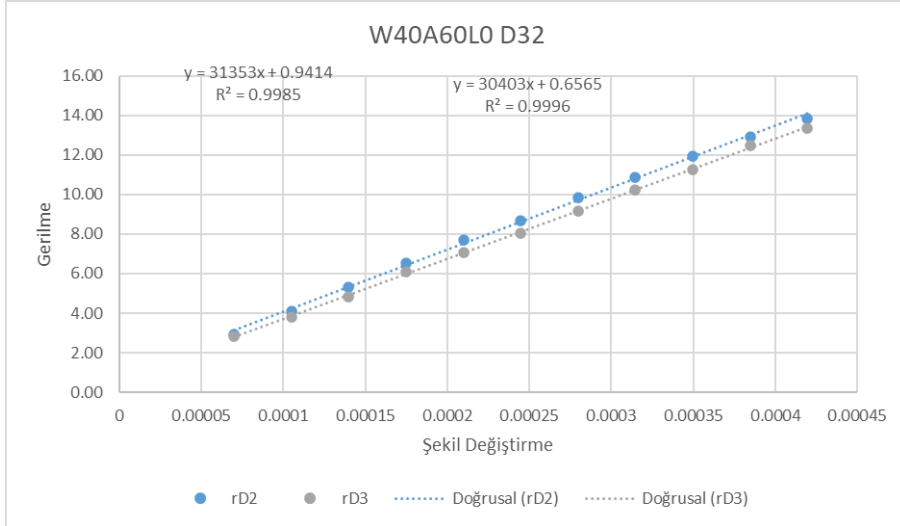
Şekil E.19 : W50A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



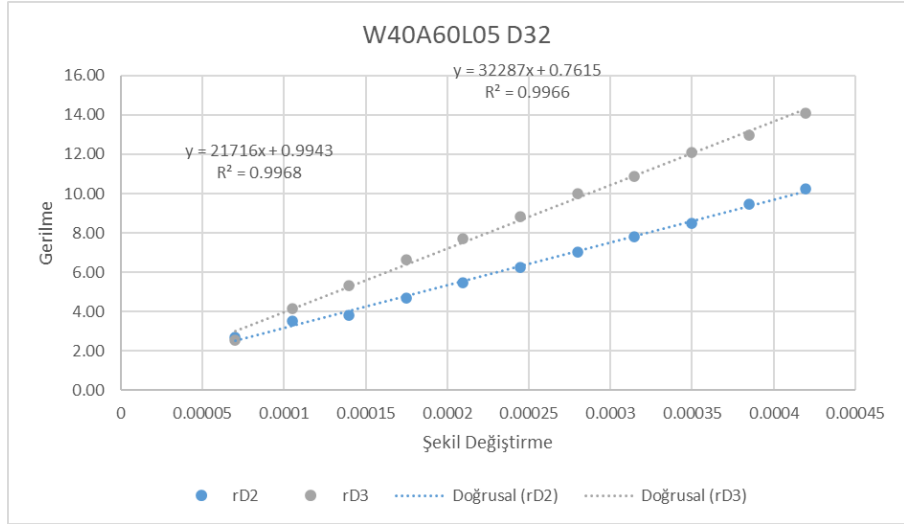
Şekil E.20 : W50A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



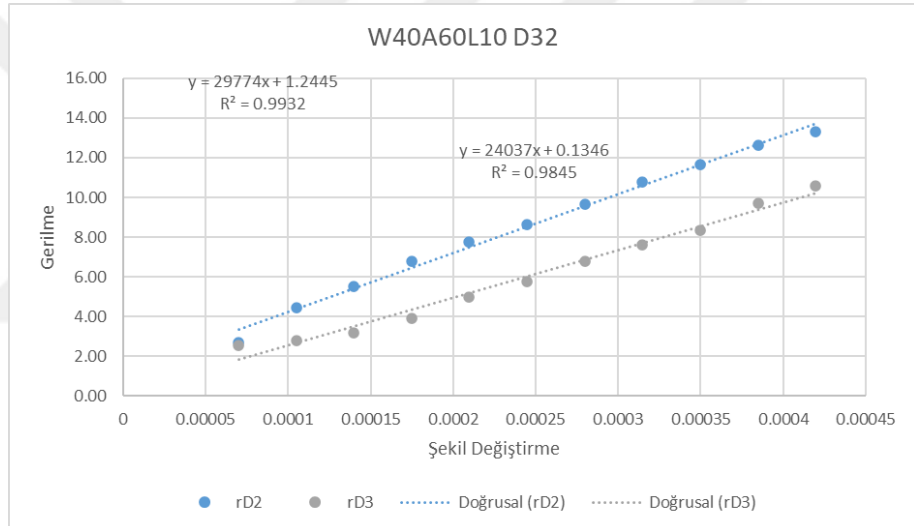
Şekil E.21 W50A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği



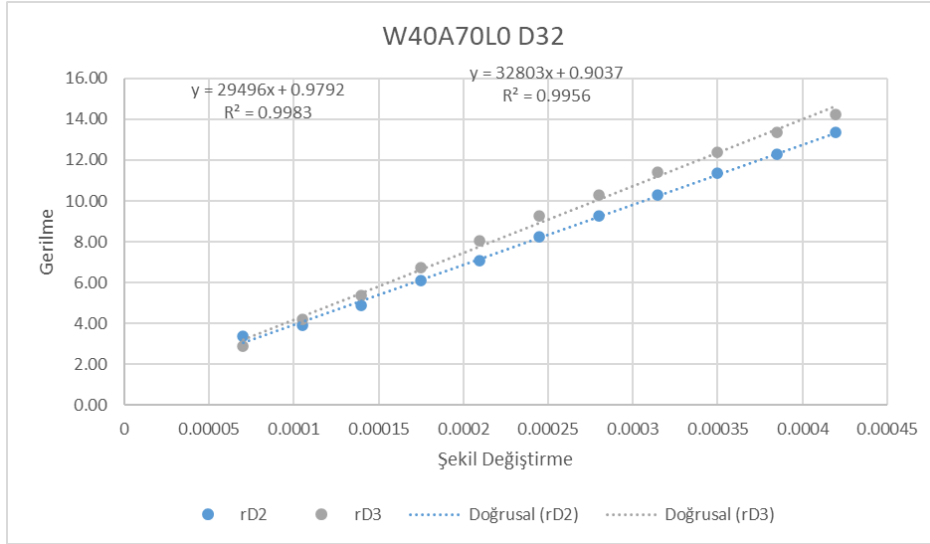
Şekil E.22 : W40A60L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



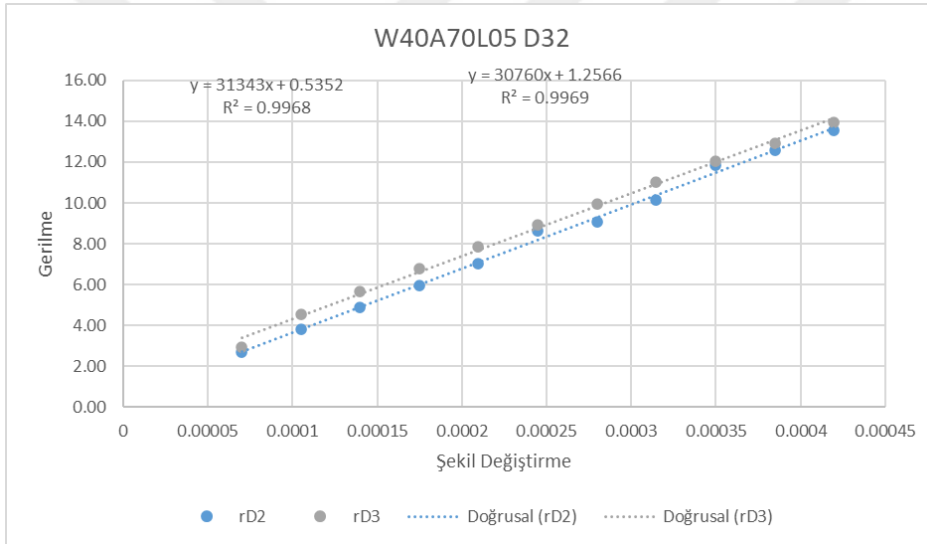
Şekil E.23 : W40A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



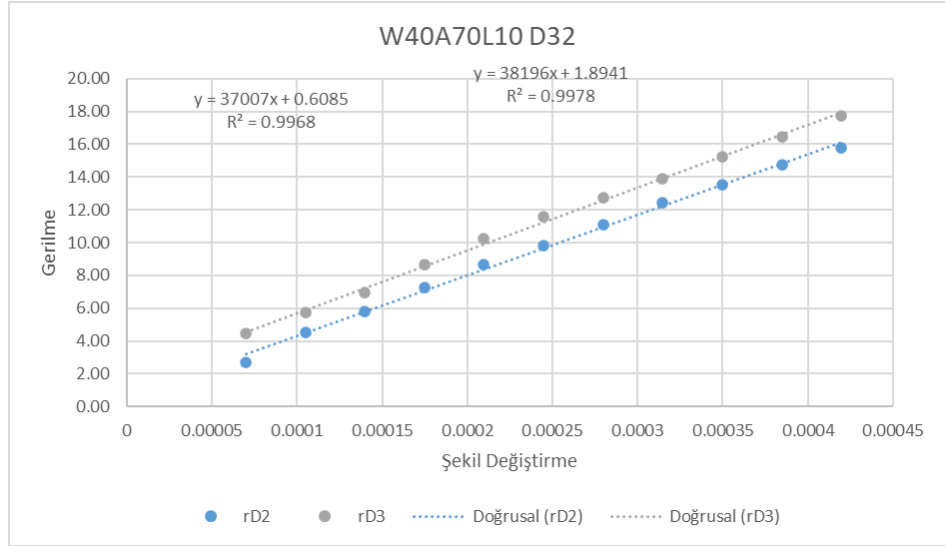
Şekil E.24 : W40A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



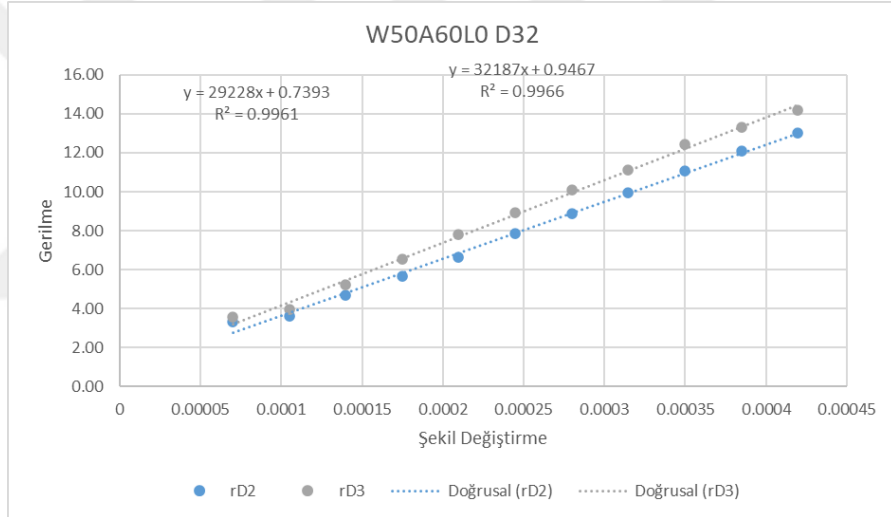
Şekil E.25 : W40A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



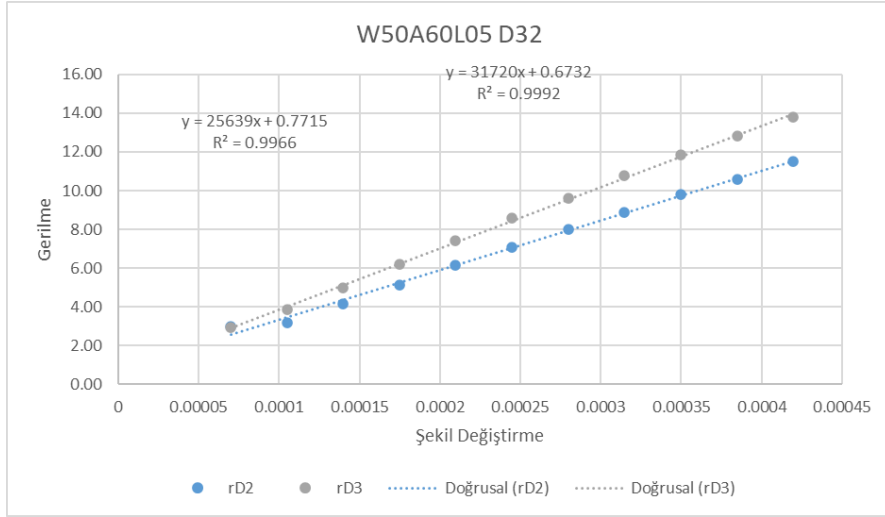
Şekil E.26 : W40A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



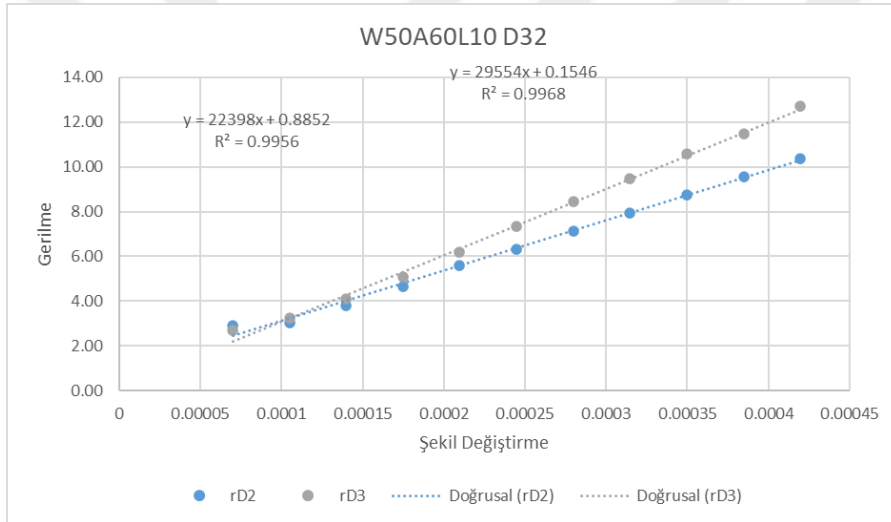
Şekil E.27 : W40A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



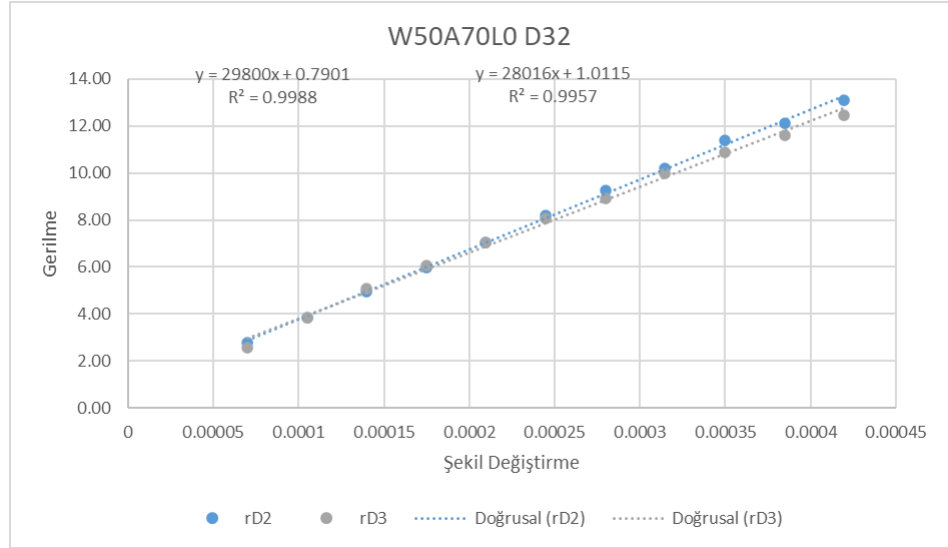
Şekil E.28 : W50A60L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



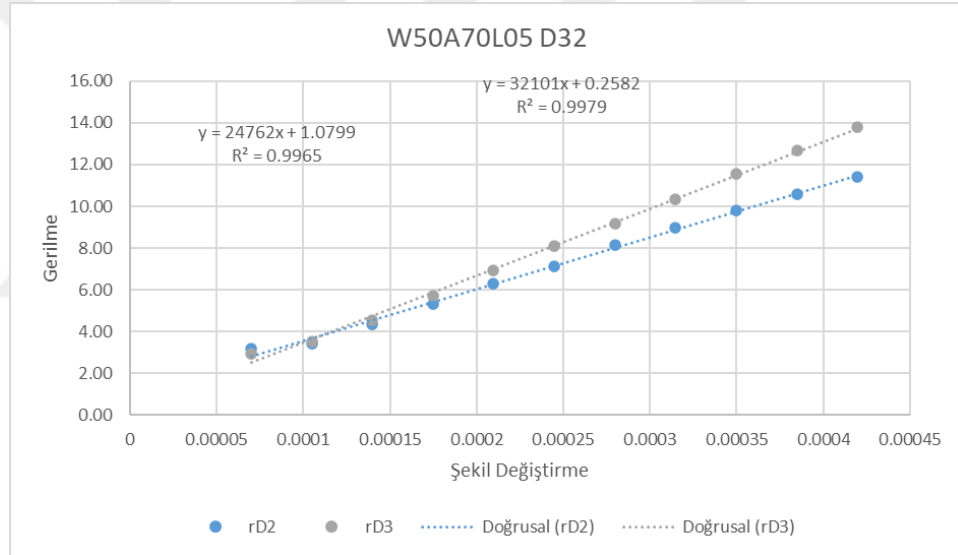
Şekil E.29 : W50A60L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



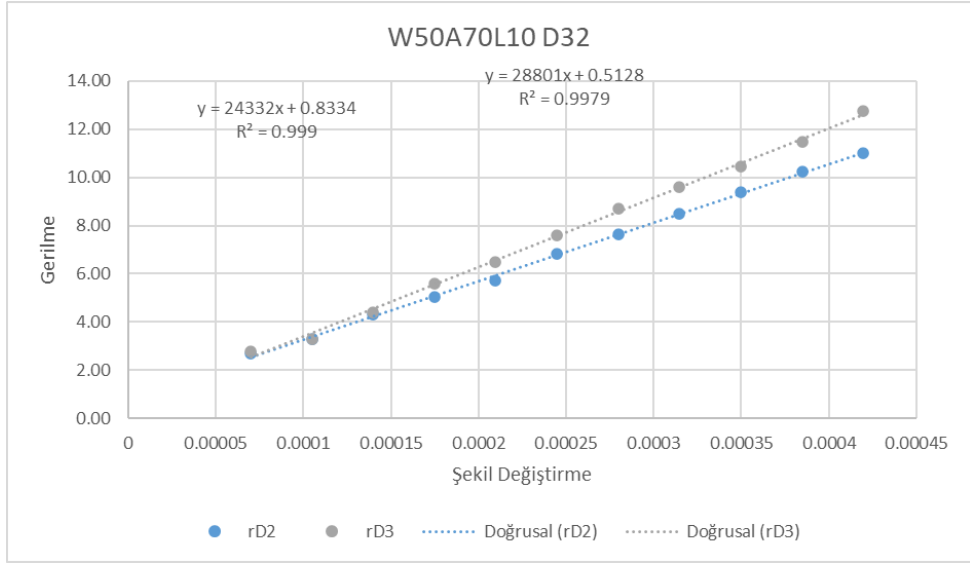
Şekil E.30 : W50A60L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



Şekil E.31 : W50A70L0 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



Şekil E.32 : W50A70L05 gerilme - şekil değiştirme grafiği.



Şekil E.33 : W50A70L10 gerilme - şekil değiştirme grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çağın SAĞLAM

ÖĞRENİM DURUMU:

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

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020- devam ediyor, Yapı Teknik Proje Müşavirlik ve Mühendislik, Yapısal Tasarım Mühendisi

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sağlam, Ç., Doğan, Ü. A.** (2023). En Büyük Agrega Boyutunun Betonun Kuruma Rötresine Etkisi. 12. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi 2023,23-24-25 Aralık, İstanbul, Türkiye. ISBN NO: 978-625-6471-17-7.