İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE VE RÖTRE ÇATLAKLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Serhan ULUKAYA

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE VE RÖTRE ÇATLAKLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Serhan ULUKAYA
(501051149)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Ocak 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü)

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Her şeyden önce hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans öğrenimim boyunca da yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme en derin şükranlarımı sunarım.

Fikir ve önerileriyle çalışmalarımı destekleyen danışman hocam Doç. Dr. Yılmaz Akkaya'ya; sadece bu tezin oluşumu esnasında değil, tüm yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve birikimlerini cömertçe paylaşan değerli arkadaşım H. Oytun Yazan'a; çalışmalarımın her aşamasında ve özellikle "Impact-Echo" deneyleri için deneyimlerine sıkça başvurduğum değerli arkadaşım T. Alper Yıkıcı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında gösterdikleri ilgi ve destekten ötürü İTÜ Marmaray Laboratuvarı teknisyenleri N. Kemal Özkan, Cüneyt Yıldız, Erdoğan Kılavuz ve M. Ali Küçük'e; laboratuvar çalışanları Rıfat Özer, Erol Tokalak, Ali Çakır ve Ahmet Öztürk'e teşekkür ederim.

Ayrıca 105M136 numaralı proje kapsamında "Impact-Echo" çalışmalarıma destek veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2007 Serhan Ulukaya

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
ÖZET **ix**
SUMMARY **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON **2**
2.1. KYB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler 3
2.1.1. Çimento ve İnce Malzeme 3
2.1.2. İnce ve İri Agregalar 4
2.1.3. Katkı Maddeleri 4
2.2. Taze Haldeki KYB 5
2.2.1. Doldurma Yeteneği 5
2.2.2. Segregasyona Karşı Direnç 5
2.2.3. Geçiş Yeteneği 5
2.2.4. Taze Haldeki KYB Özellikleri ile İlgili Deney Yöntemleri 6
2.2.4.1. Çökme-Yayılma Deneyi 6
2.2.4.2. L-Kutusu Deneyi 6
2.2.4.3. J-Halkası Deneyi 7
2.3. Sertleşmiş Haldeki KYB 7
2.3.1. Mikroyapı 7
2.3.2. Basınç Dayanımı 8
2.3.3. Donma Direnci 8
2.3.4. Yangın Direnci 8
2.3.5. Aderans 9
2.4. KYB Uygulamaları ve Evrensel Ölçekte Pazar Payı 9

3. ERKEN YAŞTAKİ HACİM DEĞİŞİKLİKLERİ, RÖTRE VE RÖTRE ÇATLAKLARI **10**
3.1. Isıl Özelikler ve Erken Yaşta Isıl Deformasyonlar 10
3.2. Şişme 11
3.3. Sünme 12
3.3.1. Erken Yaştaki Çekme Sünmesi 12
3.3.2. Betonun Kuruma Sünmesi 13
3.4. Rötre 13
3.4.1. Plastik Rötre 13

3.4.1.1. Plastik Rötre Mekanizması 14
3.4.2. Karbonatlaşma Rötresi 14
3.4.2.1. Karbonatlaşma Rötresi Mekanizması 16
3.4.3. Otojen Rötre 17
3.4.3.1. Kimyasal Rötre 18
3.4.3.2. Kendiliğinden Kuruma ve Kendiliğinden Kuruma Rötresi 20
3.4.3.3. Otojen Rötrenin Oluşumu ve Etkileyen Faktörler 21
3.4.3.4. Kimyasal Rötre ve Otojen Rötre Arasındaki İlişki 22
3.4.4. Kuruma Rötresi 22
3.4.4.1. Çimento Hamurun Davranışı ve Kuruma Rötresi Mekanizmaları 23
3.4.4.2. Kuruma Rötresini Etkileyen Faktörler 29
3.5. Rötre Çatlakları 32
3.5.1. Kısıtlanmış Rötre Deneyleri 33
3.5.1.1. Halka Deneyleri 33
3.5.1.2. Levha Deneyleri 34
3.5.1.3. Çubuk Deneyleri 35

4. YENİ BİR TAHRİBATSIZ DENEY YÖNTEMİ: IMPACT ECHO 37
4.1. Gerilme Dalgaları İle İlgili Genel Bilgiler 37
4.2. Impact-Echo Metodu 39
4.2.1. Temel İlkeler 39
4.2.2. Sinyal Analizi 40
4.2.3. Kurulum ve Araçlar 42

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 44
5.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 44
5.1.1. Çimento 44
5.1.2. Uçucu Kül 45
5.1.2.1. Eşdeğer Çimento Hesabı 45
5.1.3. Agregalar 45
5.1.4. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı 46
5.2. Beton Üretimi 46
5.3. Numune Kodlarının Belirlenmesi 47
5.4. Numune Boyutları ve Şekilleri 48

6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ 49
6.1. Taze Beton Deneyleri 49
6.1.1. Birim Ağırlık Deneyi 49
6.1.2. Çökme-Yayılma Deneyi 49
6.1.3. Kısıtlanmış Yayılma Deneyi 49

6.1.4. Priz Süresi Deneyi 50
6.1.5. Terleme Deneyi 51
6.2. Sertleşen Beton Deneyi: Impact-Echo 52
6.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri 53
6.3.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Deneyi 53
6.3.2. Yarmada Çekme Deneyi 53
6.3.3. Rötre Deneyleri 58
6.4. Taze Beton Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi 63
6.5. Sertleşen Beton Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 64
6.6. Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi 64
6.6.1. Basınç Dayanımı Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 64
6.6.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 64
6.6.3. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi 64
6.6.4. Rötre Deneylerinin Değerlendirilmesi 65

7. GENEL SONUÇLAR 67

KAYNAKLAR 69

ÖZGEÇMİŞ 73

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1	C_3S Hidratasyonunda Tepkimeye Giren Maddelerin Molar Kütle ve Yoğunlukları …….....	18
Tablo 3.2	C_3A'nın Etenjite Dönüşümü Esnasında Tepkimeye Giren Maddelerin Molar Ağırlık, Yoğunluk ve Hacimleri ……...	19
Tablo 5.1	Üretimlerde Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri…….	44
Tablo 5.2	Üretimlerde Kullanılan Çimentonun Basınç Dayanımı……...	45
Tablo 5.3	Üretimlerde Kullanılan Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri ….....	45
Tablo 5.4	Üretimlerde Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri ……	46
Tablo 5.5	Üretimlerde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları ……..	46
Tablo 5.6	Üretimlerde Kullanılan Katkı Maddesinin Özellikleri…….	46
Tablo 5.7	Teorik Malzeme Miktarları ve Bileşen Oranları…….....	48
Tablo 6.1	Birim Ağırlık, Priz Süresi ve Terleme Deneyi Sonuçları…….	51
Tablo 6.2	Sertleşmiş Betonların Mekanik Özellikleri……..…....	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 : Erken Yaş Hacim Değişiklikleri..... 10
Şekil 3.2 : Çatlak Gelişiminin Şematik Gösterimi ve Sünmenin Etkisi..... 13
Şekil 3.3 : Çevresel Faktörler ve Beton Sıcaklığına Bağlı Olarak Buharlaşma Hızının Değişimi..... 15
Şekil 3.4 : Kuruma ve Karbonatlaşma Sırasının Çimento Harcının Rötresi Üzerindeki Etkileri..... 16
Şekil 3.5 : C_3S hidratasyonu Sonucu Oluşan Hacim Dengesi..... 19
Şekil 3.6 : Hidrate Olan Çimento Hamuru Kesiti..... 20
Şekil 3.7 : Kimyasal ve Otojen Rötre Arasındaki İlişki..... 22
Şekil 3.8 : Kuruma ve Islanma Durumundaki Betonun Tipik Davranışı..... 23
Şekil 3.9 : Kuruma Boyunca Çimento Hamurunda Meydana Gelen Su Kaybı-Rötre İlişkisi..... 24
Şekil 3.10 : Çimento Hamurunun Rötresine Rölatif Nemin Etkisi..... 25
Şekil 3.11 : Çimento Hamurundaki Kuruma Rötresi İçin Önerilen Üç Mekanizma..... 26
Şekil 3.12 : Agrega Miktarının "Beton Rötresi/Çimento Hamuru Rötresi" Oranına Etkisi..... 30
Şekil 3.13 : Agrega Elastiklik Modülünün Beton Rötresi Üzerindeki Etkisi... 31
Şekil 3.14 : Halka Kalıp Örneği ve Beton Halka Numune..... 34
Şekil 3.15 : Levha Deneylerinde Kullanılan Bir Modelin Şematik Gösterimi.. 35
Şekil 3.16 : Nitel Çubuk Deneylerinde Kullanılan Bir Modelin Şematik Gösterimi..... 35
Şekil 3.17 : Dikey Aktif Çubuk Deneyi Modeli..... 36
Şekil 4.1 : Impact-Echo Yönteminin Gösterimi..... 39
Şekil 4.2 : Impact-Echo Deneyi Sonuçları..... 42
Şekil 5.1 : Agrega Karışımının Granülometrisi ve Referans Eğrileri..... 47
Şekil 5.2 : Deneysel Çalışmada Kullanılan Numune ve Kalıplar..... 48
Şekil 6.1 : Üretilen Karışımların Yayılma Süreleri..... 50
Şekil 6.2 : Üretilen Karışımların Ortalama Yayılma Çapları..... 50
Şekil 6.3 : Priz Süresi ve Terleme Deneyleri..... 51
Şekil 6.4 : Impact-Echo Deneyi İçin Kullanılan Kalıp ve Donatı Yerleşim Planı.. 52
Şekil 6.5 : Üretilen Betonlara Ait Frekans-Zaman Grafiği..... 52
Şekil 6.6 : Üretilen Betonların Ortalama Basınç Dayanımları..... 54
Şekil 6.7 : Üretilen Betonların Ortalama Yarmada Çekme Dayanımları..... 55
Şekil 6.8 : Üretilen Betonların Ortalama Elastisite Modülleri..... 55
Şekil 6.9 : Üretilen Betonların Basınç ve Yarmada Çekme İlişkisi..... 56
Şekil 6.10 : Üretilen Betonların Rölatif Dayanımları..... 56
Şekil 6.11 : KYB-U32 Kodlu Betonun Rölatif Dayanım ve Frekans Değişimi..... 57
Şekil 6.12 : KYB-C40 Kodlu Betonun Rölatif Dayanım ve Frekans Değişimi..... 57

Şekil 6.13 : Üretilen Betonların Priz Süreleri ve Frekans Değişimi..... 57
Şekil 6.14 : Kısıtlanmış Rötre Modeli ve Donatı Yerleşimi..... 59
Şekil 6.15 : Serbest Rötre Numunelerinde Ölçülen Ortalama Rötre..... 60
Şekil 6.16 : Otojen Rötre Numunelerinde Ölçülen Ortalama Rötre..... 60
Şekil 6.17 : Kısıtlamış Rötre Deneyinde Ölçülen Ortalama Rötre..... 61
Şekil 6.18 : Karışımların Hesaplanan Kuruma Rötreleri..... 61
Şekil 6.19 : Üretilen Betonların Rölatif Otojen Rötre Değerleri..... 62
Şekil 6.20 : Üretilen Betonlarda Otojen Rötre-Toplam Rötre İlişkisi..... 62
Şekil 6.21 : Kısıtlanmış Rötre Modelinin Kuruma Yüzeyindeki Çatlaklar ve Donatı Doğrultusuna Dik Enkesiti..... 63

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE VE RÖTRE ÇATLAKLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda düşük su/bağlayıcı oranına sahip ve çatlak oluşumuna daha eğilimli yüksek kalitedeki betonların üretimi ile birlikte durabilite konusunda çatlak oluşumunun oynadığı zararlı rol, rötre ve erken yaş çatlakları konusuna duyulan ilginin yeniden artmasına yol açmıştır. Bu modern betonların sahip oldukları çatlak duyarlığı sahip oldukları yüksek çimento dozajı ile düşük su/bağlayıcı oranının neden olduğu otojen rötreye bağlı etkilerle ilişkili olmaktadır.

Bu çalışmada C tipi uçucu kül katkılı ve bağlayıcı olarak yalnızca portland çimentosunun kullanıldığı iki adet kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı üretilmiş; üretilen karışımların taze haldeki özellikleri, mekanik özellikleri, meydana gelen rötreler ve kısıtlanmış rötre çatlakları karşılaştırılmıştır. Karışım dizaynları yapılırken su/çimento oranı 0,40 olarak; agrega etkisini yok etmek için hacimce hamur/agrega oranı 0,55 olarak sabit tutulmuştur. Taze haldeki betonda çökme-yayılma, kısıtlanmış yayılma, terleme, priz süresi deneyleri; sertleşmiş betonda basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, serbest rötre, otojen rötre ve kısıtlanmış rötre deneyleri yapılmıştır. Kısıtlanmış rötre deneyi için literatürdeki levha deneylerine benzer bir model oluşturulmuştur. Ayrıca tahribatsız deney yöntemlerinden "Impact-Echo" ile sertleşmekte olan betondaki frekans gelişimi takip edilmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda üretilen karışımların taze haldeki özelliklerinin benzer nitelikler taşıdığı belirlenmiştir.

Üretilen karışımların 28. gündeki basınç ve yarmada çekme dayanımları ile elastisite modüllerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür. Frekans değişiminin incelendiği "Impact-Echo" deneyi sonucunda ölçülen frekans değişimi ile betonun dayanım kazanma hızları arasında benzerlik tespit edilmiştir.

Rötre deneylerinde yapılan lineer deformasyon ölçümleri incelendiğinde uçucu kül katkılı numunelerde daha çok serbest ve otojen rötre meydana geldiği görülmüştür. Kısıtlanmış rötre deneyinde ilk çatlak oluşumunun katkısız betonda daha çabuk olduğu gözlemlenmiş; buna karşın, oluşan maksimum ve ortalama çatlak genişliklerinin uçucu küllü betonda daha fazla olduğu belirlenmiştir.

RESEARCH ON SHRİNKAGE AND SHRİNKAGE INDUCED CRACKİNG IN SELF-COMPACTİNG CONCRETE

SUMMARY

Shrinkage and early age cracking is being re-visited in recent years due to several developments: greater appreciation to durability issues where cracking can play a detrimental role and the advent of high quality concretes with low water/binder (w/b) ratios which are more prone to cracking. The cracking sensitivity of these modern concretes is due to effects associated with the high cement content and the autogenous shrinkage which are characteristic to the low w/b ratio mixes.

In this study, self compacting concrete mixtures which differed in binder content were tested. One of the mixtures is produced by using C type fly ash and portland cement as binders. The other mixture is produced by using portland cement only as the binder. The properties of the mixtures at fresh state, mechanical properties, shrinkage and restrained shrinkage cracks were compared. In the mix design, the water/cement ratio was kept constant at 0,40. Nevertheless, the volume of aggregate and paste was kept constant at 0,55 in the mixtures to eliminate the influence of the aggregate. Slump-flow, restrained flow, bleeding, determination of setting time tests were performed on fresh concrete. Compressive strength, tensile splitting strength, modulus of elasticity, free shrinkage, autogenous shrinkage and restrained shrinkage tests were executed on hardened concrete samples. The new restrained shrinkage model is developed like plate tests as mentioned in the literature part of the thesis. Moreover, a relatively new non-destructive test method, namely, “Impact-Echo” was applied to hardening concrete and frequency development was observed.

The results of experiments show that both mixtures have similar properties at the fresh state.

The compressive strength, tensile splitting strength and modulus of elasticity values for both concrete were nearly equal at 28th days. Frequency development that was obtained by Impact-Echo test and strength development have indicated similar trends in the hardening concrete.

Linear deformation measurements in the shrinkage experiments revealed that the mixture with fly ash has exhibited higher free and autogenous shrinkage strains. First crack occurance was earlier in the mixture that was produced with portland cement only as binder. However, average and maximum crack widths were larger in the concrete that produced with fly ash.

1. GİRİŞ

Yeterli mukavemet ve durabilite koşullarını sağlamak için beton dökümlerinde uygun sıkıştırma ve yerleşme büyük önem kazanmaktadır. Bu ihtiyaca en iyi şekilde yanıt veren kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yapı sektörüne birçok kazanım sunmaktadır. Günümüzde KYB pazarındaki önemli gelişmeler önyapım (prefabrik) alanında yaşanmaktadır. Sektörde hızla benimsenen önyapım, hem KYB'nin gelişen süreç özeliklerinden hem de performansından faydalanmaktadır.

Betonda görülen erken yaştaki hacim değişiklikleri, birçok faktörün etkisi ile betonda çatlak oluşumuna, dolayısıyla durabilite kaybına neden olmaktadır. Isıl etkiler ile meydana gelen genleşme veya büzülme, şişme, sünme ve rötre, betonda görülen erken yaştaki hacim değişikliklerine yol açan temel olaylar olarak nitelendirilir. Bu dört etkenden biri olan ve çalışmamızın temelini oluşturan rötre, beton hem taze hâlde iken hem de sertleşmiş durumda iken meydana gelen bir olaydır ve esasında çimento hamuru ile ilgili bir özelliktir. Bununla birlikte, yapılardaki gerilme ve çatlak gelişimi yalnız otojen ve ısıl deformasyonlara değil, bunlarla birlikte yapı içerisindeki kısıtlayıcı koşullara, betonun erken yaşta kazandığı mekanik ve visko-elastik özeliklere de bağlıdır. Bu nedenle gerilme gelişimi ve çatlak oluşumu üzerinde yapılan çalışmalarda kısıtlı koşullar altındaki modeller ve bunların davranışları incelenmektedir.

Tezde yer alan deneysel çalışma, kendiliğinden yerleşen betonlardaki rötre potansiyellerini ve kısıtlanmış koşullar altındaki rötre davranışını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, hasarsız deney yöntemlerinden "Impact-Echo" deneyi ile betonun mekanik özellikleri, rötre deformasyonları ve frekans değişimi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Belirtilen amaçlar doğrultusunda hazırlanan bu tezde, öncelikle kendiliğinden yerleşen beton, erken yaştaki hacim değişiklikleri ve deneysel kısımda kullanılan "Impact-Echo" yöntemi hakkında literatür özeti sunulmuştur. Deneysel çalışmalar bölümünde numune üretiminde kullanılan malzemeler ve nitelikleri, çeşitli aşamalarda uygulanan deneyler ve bunların sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen deney sonuçları değerlendirilip yorumlanmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) düşüncesi sualtı betonu, yerinde dökülen beton kazıklar ve benzer şekilde erişimi zor olan alanların doldurulması için yapılan araştırmalar sonucu doğmuş, ilk KYB örneği 1988 yılında Japonya'da, Tokyo Üniversitesi'nde geliştirilmiştir [1,2].

Khayat ve arkadaşları kendiliğinden yerleşen betonu; yüksek akışkanlığa sahip, aynı zamanda kararlı halde olan, kolayca yayılabilen, herhangi bir konsolidasyona ve önemli bir ayrışmaya uğramadan kalıbını dolduran beton şeklinde tanımlamaktadır [1].

Çimento, su, agrega, kimyasal ve mineral katkılar gibi bileşenleri açısından normal betonla benzerlik gösteren KYB'nin taze haldeki özelikleri ve karışım kompozisyonu farklılık göstermektedir. Karşılaştırmak gerekirse; KYB normal betonlara göre daha fazla miktarda uçucu kül gibi mineral katkı ve yeni nesil süperakışkanlaştırıcı içermekte, maksimum iri agreganın boyutu ise daha küçük olmaktadır [3].

Kendiliğinden yerleşen beton, getirdiği yenilikler ve sahip olduğu üstünlükler nedeniyle beton teknolojisi açısından bir kilometre taşı olarak kabul edilmektedir. KYB'nin sunduğu avantajlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- İnşaat hızının artması, kısalan inşaat süresi ve azalan insan gücü, enerji ve teçhizat maliyeti ile ekonomik verimliliğin artması.
- Yüksek segregasyon direnci, düşük geçirgenlik, yüksek mukavemet ve durabilite ile taze ve sertleşmiş haldeki betonda yüksek performans.
- Artan yüzey kalitesi, iyi arayüzey bölgesi oluşturması ve mekanik vibrasyon kalitesinden bağımsız olduğu için gösterdiği homojen yapı.
- Karmaşık şekilli ve/veya yoğun donatılı yapılarda gösterdiği yüksek işlevsellik, dolayısıyla, yeni ve farklı tasarım seçeneklerine izin vermesi.

- Vibrasyon sonucu doğan gürültü kirliliğinin önlenmesi ile çalışma ve çevre koşullarındaki gelişmeler [1,2,4].

Beton sıkıştırılmasının sadece malzemeler üzerinde değil insan sağlığı üzerinde de etkileri olmaktadır. Zira vibratör kullananlar maruz kaldıkları yüksek ses düzeyi nedeni ile kan dolaşımı problemleri yaşamakta ve "Beyaz Parmak Sendromu"na yakalanma riskini de taşımaktadırlar [1,5].

2.1. KYB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

Kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılacak malzemeler için iki temel gereksinim oluşmaktadır. Yüksek derecede akışkan beton elde etmek için düşük akma gerilmesine sahip malzemeye; segregasyona karşı direnç gösterebilmesi içinse yüksek derecede viskoz malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Akma gerilmesini düşürmek için su eklenebilir, fakat bu işlem aynı zamanda viskoziteyi de düşürecektir. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile akma gerilmesi düşürülecek ve meydana gelecek viskozite düşüşü önemsiz miktarda olacaktır.

Karışımın viskozitesinin arttırılması karşıma giren bileşenlerin değiştirilmesiyle veya viskozite düzenleyici katkı kullanımı ile mümkün olabilmektedir; ancak viskozite düzenleyici katkı kullanımı hamurun akma gerilmesini arttıracaktır. Bu nedenlerle karışımı hazırlamak için belirtilen iki parametre arasında denge aranmaktadır [1].

2.1.1. Çimento ve İnce Malzeme

Kendiliğinden yerleşen betonların gelişimi süresince karışım içerisindeki toplam ince malzeme miktarı, agrega boyutu ve sınıfına karşı dengelenmiş; çoğunlukla, KYB içerisinde kullanılan ince malzeme miktarı normal betondaki ince malzeme miktarından daha fazla olmuştur. Fazla miktarda ince malzeme ihtiyacı ise genellikle 450–500 kg/m^3 arasında değişen yüksek miktardaki çimento dozajını beraberinde getirmektedir.

Günümüzde kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında çimentonun yanı sıra uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi ince taneli mineral katkılar kullanılmaktadır. Bu ince malzemeler taze haldeki normal betonun işlenebilirliğini arttırmakta ve karışımdaki çimento miktarını azaltarak hidratasyon ısısını düşürmektedir. Silis dumanı gibi çok ince mineral katkılar da KYB karışımlarında kullanılmaktadır. Bu

türdeki malzemeler işlenebilirliği azaltmakta, istenen işlenebilirlik akışkanlaştırıcı miktarı arttırılarak sağlanmaktadır.

KYB karışımlarındaki artan ince malzeme ihtiyacı, ince filler malzemeler kullanılarak da dengelenmiştir. Bu türdeki malzemeler içerisinde en yaygın şekilde kullanılanı, ekonomik açıdan da uygun olduğu için kireçtaşı tozudur. Kireçtaşı fillerinin kendiliğinden yerleşen betonlarda basınç mukavemetinin gelişmesinde önemli bir etkisi olmamaktadır. Bununla birlikte yüksek işlenebilirliğe sahip karışımlarda kararlılığın korunmasına ve yüksek miktarda çimento içeren karışımlarda hidratasyon ısısının düzenlenmesine yardım etmektedir [1].

2.1.2. İnce ve İri Agregalar

Kendiliğinden yerleşen betonlardaki ince agregalar, karışımların işlenebilirliğinde ve kararlı haldeki yapısında önemli bir rol oynamaktadır. Karışımdaki toplam ince tane miktarı, bağlayıcı ve filler miktarı ile ince agrega miktarının bir fonksiyonu olmaktadır ki burada ince agregaların sınıflandırılması önem kazanmaktadır. Harç içerisindeki ince agregaların sınıflandırılması hem işlenebilirliğin hem de kararlı yapının aynı zamanda korunmasına yönelik olmalıdır. KYB üretiminde, genellikle, incelik modülü 2,4 ile 2,6 arasında değişen kum kullanılmaktadır. Bununla birlikte yeterli segregasyon direncini sağlamak amacıyla daha ince kum kullanımı önerilmektedir.

Kendiliğinden yerleşen betonlarda iri agrega olarak hem çakıl hem de kırmataş kullanılmaktadır. Karışımlarda maksimum agrega çapı çoğunlukla 20 mm olmakla beraber maksimum çapı 10 mm olan iri agregalar da kullanılabilmektedir [1].

2.1.3. Katkı Maddeleri

Kendiliğinden yerleşen betonlarda bir yandan işlenebilirliğin yüksek olması istenirken bir yandan da kararlı yapının korunması istenmektedir. Bu ihtiyaca yanıt vermek amacıyla birtakım katkılar kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze akışkanlaştırıcı ve diğer katkı türlerindeki gelişmelerle KYB üretimi artık daha kolay hale gelmiştir [1].

Günümüzde sıklıkla kullanılan karboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcılar, betona istenen işlenebilirliği kazandırmakta ve karılma işleminin herhangi bir basamağında karışıma eklenebilmektedirler. Bu türdeki katkılar, poliakrilat ana polimer zincirleri

ile tarak şeklinde polieter yan bağları içermektedir. Bu yapıları sayesinde elektrostatik etkinin yanında sterik etki de oluşturarak daha yüksek performans elde edilmektedir [1,6].

Viskozite düzenleyici katkılar, betonun segregasyon direncini arttırırken aynı zamanda yüksek akışkanlığı koruduğu ve betonun dar bölgelerden geçebilmesine izin verdiği için KYB karışımlarına eklenebilmektedir [1].

2.2. Taze Haldeki KYB

Kendiliğinden yerleşen betonlarda, taze halde iken doldurma yeteneği, segregasyona karşı direnç ve geçiş yeteneği olmak üzere üç temel unsur göz önüne alınır [1].

2.2.1. Doldurma Yeteneği

Doldurma yeteneği tamamen taze haldeki betonun hareketliliği ile ilgili bir özeliktir ve betondan istenen, kendi ağırlığı altında şekil değiştirip, kalıba yerleşmesidir. Bunun için malzemelerin taneleri arasındaki sürtünmeyi azaltmak gerekmektedir. Bu da iki yolla mümkün olabilmektedir:

i. Süperakışkanlaştırıcı kullanarak yüzey gerilimi düşürülebilir.

ii. Segregasyon düzenleyici katkı ya da filler kullanarak ince tanelerin etrafının en uygun şekilde sarılması sağlanabilir [1].

2.2.2. Segregasyona Karşı Direnç

KYB hareket halinde iken kararlı halde bulunmak zorundadır. Bundan dolayı iki koşula bakılmaktadır:

i. Terlemeyi önlemek için serbest su miktarı asgariye indirilmelidir. Bunu sağlamak için süperakışkanlaştırıcı kullanarak su ihtiyacı azaltılabilmektedir.

ii. Beton hareketli iken iri tanelerin süspansiyon içersinde kalmasını sağlamak için sıvı faz viskoz halde bulunmalıdır. Bunun için karışımdaki ince tane hacminin fazla olması ve/veya viskozite düzenleyici katkı kullanmak gerekmektedir [1].

2.2.3. Geçiş Yeteneği

Kendiliğinden yerleşen betonlarda geçiş yeteneği betonun, kalıp içerisinde bulunan donatı gibi hareketsiz maddelerin arasından geçebilmesi ile ilgili bir özelliktir. Bu

özellik daha çok donatı düzeni ile ilgili olmaktadır. Bu konuda dikkate alınacak etkenler; iri agreganın şekil ve boyut seçimini etkileyecek olan donatılar arası mesafe ve harç hamurunun hacmidir. Daha tıkalı ve yoğun donatılı yapılarda, iri agregaya kıyasla hamur hacminin daha fazla olması gerekmektedir [1].

2.2.4. Taze Haldeki KYB Özellikleri ile İlgili Deney Yöntemleri

2.2.4.1. Çökme-Yayılma Deneyi

Çökme-yayılma deneyi hiçbir engelin bulunmadığı durumda, betonun kendi ağırlığı altında serbest olarak deforme olabilme yeteneğini incelemek amacı ile kullanılmaktadır. Gerçek durumda donatılar mevcut olduğu için betonun doldurma yeteneğini tam olarak ölçülemese de bu deney sayesinde öznel bir segregasyon değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Abram's konisinden ve yayılma tablasından oluşan bu deney düzeneğinde 20 cm ve 50 cm çaplı iki daire yayılma tablası üzerinde çizili olarak bulunmaktadır. Tamamen düz bir yüzeye yerleştirilen yayılma tablasının merkezine Abram's konisi yerleştirilir ve yaklaşık 5,5 litre beton ile doldurulur. Daha sonra koni tablaya dik olarak çekilir ve 50 cm çapındaki daireye yayılma süresi (T_{50}) belirlenir. Yayılma tamamen durduktan sonra birbirine dik iki yönde çap ölçülerek yayılma çapı hesaplanır. KYB için tipik yayılma çapı değeri 65 ile 80 cm arasında değişmektedir. T_{50} süresi ve yayılma çapı betonun akıcılığı hakkında bilgi verirken, gözlem yapılarak segregasyon hakkında bilgi sahibi olmak da mümkündür. İri agregaların çap boyunca dağılmaması ya da çimento hamurunun bir şerit şeklinde agregalardan ayrılması segregasyon olduğuna işaret etmektedir [1,6].

2.2.4.2. L-Kutusu Deneyi

L-kutusu deneyi ile betonun akıcılığını, tıkanma riskini, yayılma hızını ve geçiş yeteneğini değerlendirmek mümkün olmaktadır. Bu deney düzeneği yatay ve dikey olmak üzere iki hazneden meydana gelmektedir. Dikey haznenin sonunda gerçek durumdaki donatıları simgeleyen donatılar bulunmaktadır. Dikey haznenin sonunda bir de kapak bulunmaktadır. Bu kapak aracılığı ile betonun akışına izin verilmekte ve donatılar arasından akması sağlanmaktadır. Yaklaşık 13 litrelik beton dikey hazneye yerleştirilerek 1 dakika süre ile bekletilir. Bu gecikmenin amacı betonun oturmasına izin vermek ve şayet varsa belirgin bir segregasyonu gözlemlemektir. Herhangi bir

sıkıştırma uygulanmadan dikey hazneye doldurulmuş olan beton, kapağın kaldırılması ile yatay haznede bulunan donatılar arasından geçerek akmaya başlar. Kapağın kaldırılmasından sonra kapak önünden itibaren 200 mm ve 400 mm mesafeye akış için geçen süreler ölçülür. Akış tamamlandıktan sonra her iki uçtaki için beton yükseklikleri ölçülerek birbirine oranlanır. Bloklanma oranı olarak bilinen bu değer, T_{20} ve T_{40} değerleri ile birlikte tıkanma olasılığı hakkında bilgi edinilmesini sağlar [6].

2.2.4.3. J-Halkası Deneyi

J-halkası deneyi, KYB'nin geçiş yeteneğini ve bloklanma davranışını belirleyebilmek için tasarlanmıştır. Bu deney teçhizatı, yayılma tablası, yayılma tablasının merkezine yerleştirilen ve açıklıkları üretilen betonun özelliklerine göre değişen donatılardan oluşmuş bir halka ile Abram's konisinden oluşmaktadır. Gerçek durumdaki donatıları temsil eden bu halkanın çapı 300 mm ve donatı yüksekliği 100 mm'dir. J-halkası tabla üzerine sabit bir şekilde yerleştirildikten sonra içerisine konulan Abram's konisi yaklaşık 5,5 litre beton ile doldurulur. Ardından koni sabit hızla dikey olarak çekilerek betonun tabla üzerinden akması sağlanır. Donatılar arasından geçen betonun yayılması tamamlandıktan sonra birbirine dik iki yönde çap ölçümü yapılır ve bunların ortalaması alınır. Bununla birlikte, halka içinde kalan betonun yüksekliği ile halka dışındaki betonun yüksekliği 4 farklı noktadan ölçülür ve yükseklikler arasındaki fark incelenerek betonun donatılar arasından geçiş yeteneği hakkında bilgi sahibi olunur [6].

Taze haldeki KYB özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan bu deneyler için şu ana kadar herhangi bir standart veya sınıflandırma oluşturulmamıştır. Yaygın olarak kullanılan bu deney metotlarının dışında "V-Hunisi Deneyi" ve "U-Kutusu Deneyi" de taze beton özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

2.3. Sertleşmiş Haldeki KYB

2.3.1. Mikroyapı

KYB kavramının malzeme mikroyapısında gelişmelere yol açtığına dair birçok kanıt bulunmaktadır. Bu konu hakkındaki -teori ile desteklenen- önemli mekanizmalar; hidratasyon için gelişmiş çekirdeklenme, gelişmiş su tutma, daha yoğun arayüzey geçiş bölgeleri ve mikroyapıdaki gelişmiş homojenlik olarak ifade edilmektedir [7].

Normal beton vibratörle sıkıştırıldığı zaman karışımdaki su, iri agregaların yüzeylerine göç ederek boşluklu ve zayıf arayüzeylerin oluşmasına neden olur. Buna karşılık uygun şekilde dizayn edilen ve üretilen KYB homojen, hareketli ve segregasyona karşı dirençli olmakta; bununla beraber herhangi bir sıkıştırmaya gerek duyulmadan kalıbına yerleşmektedir. Bu da iri agregalar ile harç fazı arasındaki arayüzey bölgelerinin gelişmesini sağlayacaktır. Böylelikle KYB'nin mikroyapısında, mukavemetinde ve durabilitesinde gelişmeler olmakta; sonuçta betondan daha uzun bir hizmet ömrü beklenmektedir [1].

2.3.2. Basınç Dayanımı

Kendiliğinden yerleşen betonlarda düşük su/bağlayıcı oranı dikkate alındığında elde edilen basınç mukavemeti normal betonun basınç mukavemetine göre genellikle daha yüksek çıkmaktadır.

Kendiliğinden yerleşen betonların sahada karot numuneler alınarak belirlenen basınç mukavemetiyle standart küp mukavemeti arasında, normal betona göre daha yakın bir korelasyon olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan başka bir çalışmada kolon yüksekliği arttıkça basınç mukavemetindeki düşüşün normal betona kıyasla daha az olduğu ve KYB'nin iyi bir homojen nitelik sergilediği ortaya çıkmıştır [1].

2.3.3. Donma Direnci

KYB'nin donma/erime direnci, hava sürüklenmiş normal betona göre benzerlik göstermektedir. Yurugi ve arkadaşları da KYB'nin hava sürüklenmiş normal betonla karşılaştırılabilir olduğunu ifade etmişlerdir. Buna karşın Billberg rafine mikroyapısından ötürü KYB'nin donma/erime direncinin normal betona göre daha kuvvetli olduğunu bildirmiştir [1].

2.3.4. Yangın Direnci

KYB'nin mikroyapısı normal betona göre daha yoğundur. Yoğun malzeme üzerindeki yangın yükü nemli koşullar altında (hızla oluşan aşırı iç basınca bağlı olarak) malzemenin kabarıp dökülmesine neden olabilmektedir. KYB işbu sebeplerden ötürü yangın yüküne karşı daha hassas bir malzeme olarak nitelendirilmektedir [7].

2.3.5. Aderans

KYB ve aderans arasındaki ilişki hakkında öne sürülen bir hipotezde, KYB'nin düşük ayrışma eğilimi ve gelişmiş su tutma özeliği sayesinde beton ile donatı arasında yoğun bir bölge oluşacağı, dolayısıyla aderansın güçlü olacağı öngörülmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde KYB ile donatı arasındaki kenetlenmenin, aynı koşullar altındaki normal betona kıyasla daha iyi olduğu ifade edilmektedir [7,8].

2.4. KYB Uygulamaları ve Evrensel Ölçekte Pazar Payı

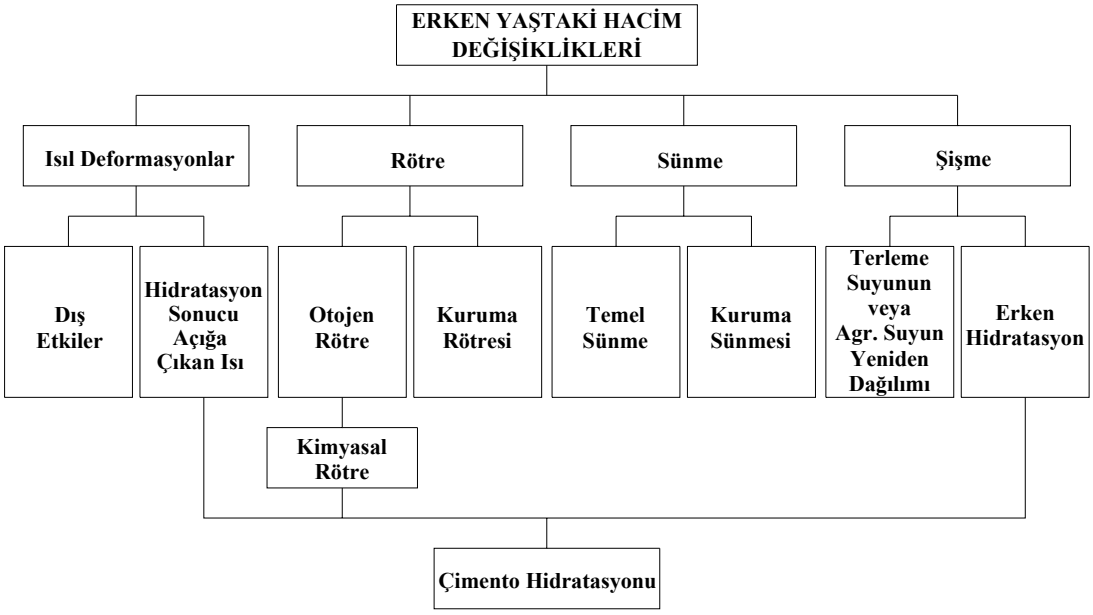
Evrensel olarak bakıldığında günümüz inşaat sektöründe (özellikle yapı inşaatlarında) daha ince yapı elemanlarının kullanıldığı görülmektedir. Böylelikle yapılarda daha fazla kullanılabilir alan oluşmakta ve yapı elemanlarının kendi ağırlığı azalmaktadır. Buna karşın daha ince yapı elemanlarının yoğun donatılı bölgelerinde, betonun sıkıştırılması ve yerleşmesi ile ilgili sorunlar çıkabilmektedir ki bu da KYB için büyük bir pazar fırsatı oluşturmaktadır [1].

Dünya çapında artan ilgiye ve bu konudaki araştırmalara katılan ülke sayısındaki artışa karşın bazı öncü ülkelerin pazarlarındaki KYB gelişiminin duraklama sürecine girmesi dikkat çekicidir. Bunun nedenleri çoğu kez yerel nedenlere dayanmaktadır, ancak duraklamanın yansıttığı başka bir gerçek de ekonominin, teşkilatlanmanın ve pazar koşullarının henüz yeterli konumda olmadığıdır. Günümüz pazarındaki önemli gelişmeler önyapım alanında yaşanmaktadır. Sektörde hızla benimsenen önyapım, hem KYB'nin gelişen süreç özelliklerinden hem de performansından faydalanmaktadır [7].

3. ERKEN YAŞTAKİ HACİM DEĞİŞİKLİKLERİ, RÖTRE VE RÖTRE ÇATLAKLARI

Betondaki erken yaş çatlakları yıllardan beri süregelen önemli bir sorundur. Yapılan araştırmalar, sorunun kökünde portland çimentosu hidratasyonunun, gelişen mikroyapının ve çevresel koşulların var olduğunu göstermektedir. Buna karşın, betondaki erken yaş davranışının gösterdiği karmaşık yapı halen tam olarak anlaşılamamıştır ve yeni araştırmalar için ilgi çeken bir konu olmaya devam etmektedir.

Erken yaştaki hacim değişiklikleri Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılabilmektedir. Isıl deformasyon, rötre, şişme ve sünme olarak belirtilen bu dört temel olgu beton içerisinde gözlenen bütün kitlesel davranışa katılmaktadır [9].



Şekil 3.1: Erken Yaş Hacim Değişiklikleri [9].

3.1. Isıl Özelikler ve Erken Yaşta Isıl Deformasyonlar

Isıl deformasyonlar, hidratasyon tepkimeleri neticesinde ortaya çıkan ısı sonucunda beton sıcaklığının değişmesiyle veya çevresel koşulların etkisiyle vuku bulmaktadır. Buradaki önemli parametre, sıcaklık değişikliklerini betondaki birim şekil

değiştirmeye çevirmek için kullanılan termik genleşme katsayısıdır (TGK; ısıl genleşme katsayısı) [9,10].

Yapılan geniş ölçekteki araştırmalar sonucunda; TGK'nın priz başlamadan önce nispeten daha yüksek değerler aldığı ve priz müddetince düştüğü gözlenmiştir. Taze haldeki betonda görülen bu yüksek değerler su fazının beton içerisindeki baskınlığına verilmiştir; zira sıvı fazın TGK'sı katılara göre daha yüksektir. Örneğin bağlanmamış suyun TGK'sı sertleşmiş betonunkinden 7 kat daha büyüktür. Bununla birlikte, mikroyapıda taşıyıcı iskelet oluştuğunda gözlenen katı davranışı neticesinde TGK çok daha düşük değerler almaktadır ve priz sonrasında daha kararlı hale gelmektedir [10].

Yakın zamanda yapılan araştırmalara göre betonun TGK değeri, önceki çalışmalarda belirtildiği üzere, erken yaşlarda oldukça yüksek değerler almaktadır. Beton sertleştikçe büyük düşüş gösteren bu değer, 48. saat dolaylarında minimum seviyeye geldikten sonra bir miktar artış göstererek 72. saat dolaylarında denge konumuna ulaşmaktadır [11].

Betonun TGK'sı karışımda kullanılan agrega türüne bağlı olmaktadır; zira farklı türdeki minerallerin TGK'sı oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. Örneğin, kireçtaşının TGK'sı 0,9-12,2x10^{-6}/°C arasında değişmekte iken granitin TGK'sı 1,8-11,9x10^{-6}/°C arasında değişmektedir. Agregaların beton hacminin %65-75'ini oluşturduğu düşünüldüğünde agrega TGK'sının beton TGK'sı üzerinde büyük etkisi olduğu görülmektedir.

Sertleşmiş çimento hamurunun TGK'sı ise boşluklu sistemdeki nem durumuna göre değişmektedir. Tamamen doygun ve kuru sistemlerin TGK'sı (10-12x10^{-6}/°C) kısmen doygun sistemlerinkine (18-25x10^{-6}/°C) göre daha düşük kalmaktadır. Kısmen doygun sistemlerde görülen (nispeten) yüksek TGK değerleri bir tür higrotermal etkiye (boşluk suyunun yeniden dağılımı ve kılcal gerilmedeki değişim) atfedilmektedir [10].

3.2. Şişme

Şişme davranışı, çok erken yaşlarda, terlemeye ve agrega boşluklarındaki suya olan ihtiyaca bağlı olarak suyun yeniden dağılması neticesinde görülebilmektedir. Yüzeyde çok miktarda terleme suyu bulunmakta iken erken hidratasyon neticesinde

su ihtiyacı doğarsa terleme suyu beton içerisine doğru emilecektir ve ölçülebilir şişme ortaya çıkacaktır [10].

Yukarıda izah edilen şişme davranışı otojen olarak nitelendirilebilmektedir. Bununla birlikte, devamlı su içerisinde bırakılan çimento hamurlarının ve betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında küçük bir miktar artış görülmektedir. Buradaki şişmenin nedeni çimento jelleri tarafından emilen sudur. Çünkü su molekülleri jel parçacıklarının arasına girerek bu parçacıkların kohezyonuna karşı koyan bir kuvvet gibi hareket etmekte ve şişmeye yol açan bir basınç oluşturmaktadır [12].

3.3. Sünme

Sünme, sabit gerilme altındaki malzemelerde zamanla oluşan şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır [13].

Betonda görülen sünme ise betonun visko-elastik özeliğinin ortaya koyduğu bir durumdur. Yük altındaki beton numunede meydana gelen sünme, toplam deformasyondan, ani elastik deformasyon ve (yük altında olmayan şahit numuneden elde edilecek) rötre deformasyonunun çıkarılması ile elde edilen deformasyon olarak tanımlanmaktadır.

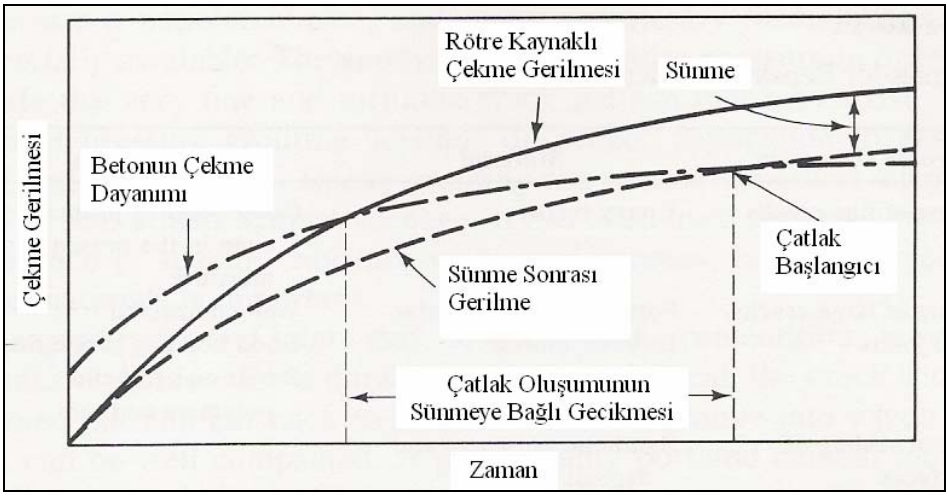
Betonun sünme deformasyonu, temel sünme ve kuruma sünmesi olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Temel sünme, yük altında ve yalıtılmış koşullar içerisindeki (ortam ile nem alışverişi olmadan) betonda görülen deformasyondur. Kurumaya bırakılmış (değişen nem ortamında) ve yük altıdaki betonda temel sünmeye ilaveten görülen deformasyon ise kuruma sünmesi olarak adlandırılmaktadır. Buna göre hâsıl olan toplam sünme, temel sünme ve kuruma sünmesinin toplamı olmaktadır [14].

3.3.1. Erken Yaştaki Çekme Sünmesi

Beton sünmesi üzerinde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu basınç sünmesi ile ilgilidir. Hâlbuki çekme sünmesi, erken yaşta, rötre ve ısıl gerilmeler nedeniyle oluşabilecek çatlakların değerlendirilmesinde büyük bir öneme sahiptir [14].

Beton elemanlarda iç ve/veya dış kısıtlar sonucunda çekme gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Çekme sünmesi, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, oluşan gerilmeleri azaltarak çatlak oluşumunu geciktirmekte veya önlemektedir. O nedenle, betonda çatlak oluşumuna dek geçen süre sadece betonun çekme mukavemetine değil,

bununla birlikte, çekme sünmesi davranışına da bağlı olmaktadır. Çünkü çekme gerilmeleri kuruma süreci boyunca artacak ve artan gerilmelerle birlikte çekme sünmesi de gelişecektir [15].



Şekil 3.2: Çatlak Gelişiminin Şematik Gösterimi ve Sünmenin Etkisi [16].

3.3.2. Betonun Kuruma Sünmesi

Sürekli yük altındaki kurumaya bırakılmış betonda görülen deformasyon, yük altında olmayan numunedeki rötre deformasyonu ile temel sünme deformasyonunun toplamından fazla olmaktadır. Bu fazla deformasyon kuruma sünmesi veya Pickett etkisi olarak tanımlanmakta ve hem serbest rötre deformasyonunun hem de temel sünmenin karmaşık yapıdaki ilişkisine bağlı olarak gelişmektedir [14].

3.4. Rötre

Beton içerisindeki suyun fiziksel ve/veya kimyasal nedenlerle azalması (kaybolması) sonucunda beton boyunda ve hacminde yer alan küçülmeye "rötre" denilmektedir. Rötre, beton hem taze hâlde iken hem de sertleşmiş durumda iken yer alan bir olaydır ve esasında çimento hamuru ile ilgili bir özelliktir [12,16].

3.4.1. Plastik Rötre

Plastik rötre, taze betonun yerine yerleştirilmesinden sonraki birkaç saat içerisinde (beton tamamen sertleşmeden önce) meydana gelen ve beton yüzeyinde yer alan rötre türüdür. Gerçekleşen rötreye plastik denmesinin sebebi, büzülmenin beton plastik (prizini tamamlamamış ve şekil verilebilir) hâlde iken meydana gelmesidir.

Plastik rötrenin oluşmasındaki başlıca neden, beton yüzeyindeki suyun çok hızlı buharlaşmasıdır. Beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı, betonun terleme hızından daha fazla olduğu takdirde, beton yüzeyi kuruyarak büzülme eğilimi göstermektedir. Ancak, yüzeyin altındaki beton kütle hâlen plastik bir durumda olduğundan ve betonun yüzeyi ile aynı ölçüde büzülme gösteremediğinden, beton yüzeyinde çatlaklar oluşmaktadır. Bu bakımdan, betonun göstereceği plastik rötre miktarı, büyük ölçüde, betonun sıcaklığına, havanın sıcaklığına, rölatif nem miktarına ve rüzgâr hızına bağlıdır. Bu dört temel etkenin, beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızına etkilerini hesaplayabilmek için Portland Cement Association tarafından bir abak geliştirilmiştir ve bu abak Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Buna göre, yüzeydeki buharlaşma hızının saatte 0,5 kg/m^2 değerini aşması halinde oluşacak su kaybı, yüzeye ulaşan terleme suyundan fazla olacaktır ve bu da plastik rötreye neden olan negatif kılcal basıncı doğuracaktır.

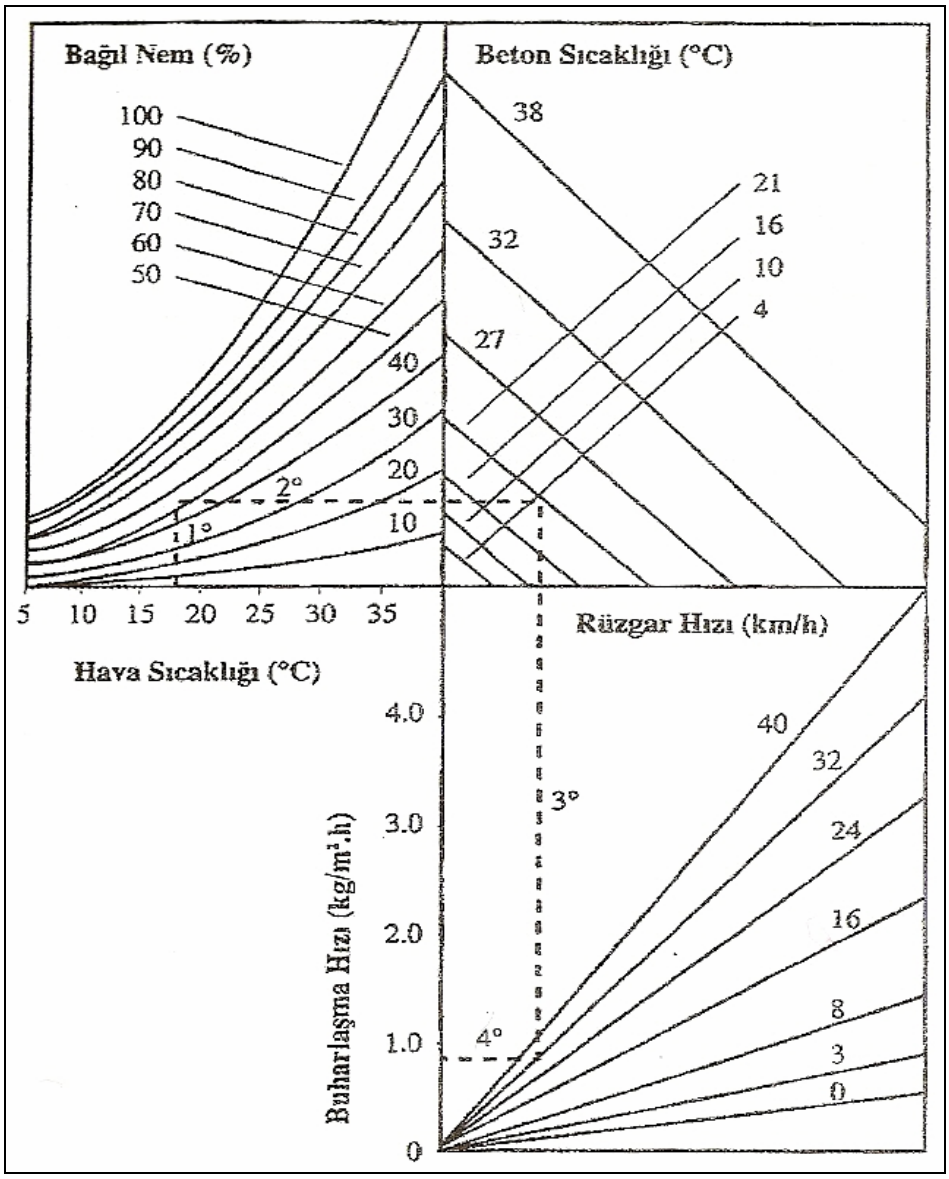
Plastik rötreye yol açabilecek bir başka neden de beton kütlesindeki suyun bir miktarının, betonun altında yer alan taban malzemesi tarafından veya kalıplar tarafından emilmesidir. Bu durum, betonda çatlamaya neden olabileceği gibi yüzeydeki buharlaşmanın etkilerini de şiddetlendirebilmektedir [12,17].

3.4.1.1. Plastik Rötre Mekanizması

Taze betonda parçacıklar arasındaki boşluk tamamen suyla kaplıdır. Beton içerisindeki su, yüzeydeki buharlaşma gibi çeşitli dış etkenler neticesinde hamurdan ayrıldığında beton içerisinde karmaşık bir menisk sistemi oluşacaktır. Bu menisk oluşumu, hamurda büzülmeye neden olacak negatif kapiler basınç doğuracaktır. Kapiler basınç gelişmeye başladıktan sonra kısa bir süre içerisinde plastik rötre başlamaktadır. Çimento hamuru içerisindeki kapiler basınç, kritik kırılma basıncı (P_c) değerine gelinceye dek artacaktır. Bu noktadan sonra beton içerisindeki su, düzgün şekilde dağılmayacak ve betondaki boşluklarla arasında ayrık bölgeler oluşturmak suretiyle yeniden düzenlenecektir. Plastik rötre maksimum hıza sözü edilen kırılma basıncından hemen önce ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra ise az miktarda rötre meydana gelmekte yani deformasyon seviyesi düşmektedir [16].

3.4.2. Karbonatlaşma Rötresi

Sertleşmiş çimento hamuru, havadaki CO_2 ile kimyasal tepkimeye girebilmektedir. Atmosferdeki CO_2 miktarı (~ % 0,04), çimento hamuruyla uzun bir müddet tepkime



Şekil 3.3: Çevresel Faktörler ve Beton Sıcaklığına Bağlı Olarak Buharlaşma Hızının Değişimi [17].

içerisinde bulunmak için yeterli olmaktadır. Bu tepkimeyle birlikte meydana gelen büzülme "karbonatlaşma rötresi" olarak ifade edilmektedir. Bu süreç su veya ağırlık kaybıyla ilgili değildir. Gerçekte, karbonatlaşma ile birlikte beton kütlesinde bir miktar artış olmaktadır.

Karbonatlaşma rötresiyle sonuçlanan tepkimelerin derecesi, bağıl nemin bir fonksiyonu olmakta ve uzunluk değişimi Şekil 3.4'te görüldüğü gibi % 50 bağıl nem civarında en büyük değerini almaktadır. Yüksek nem oranlarında, boşlukların tamamen su ile dolu olması yüzünden ve CO_2 hamurdan içeri giremediği için karbonatlaşma düşük olmaktadır. Düşük nem oranlarında ise su katmanlarının olmayışı karbonatlaşma hızını düşürmektedir. Karbonatlaşma rötresi; karbonatlaşma,

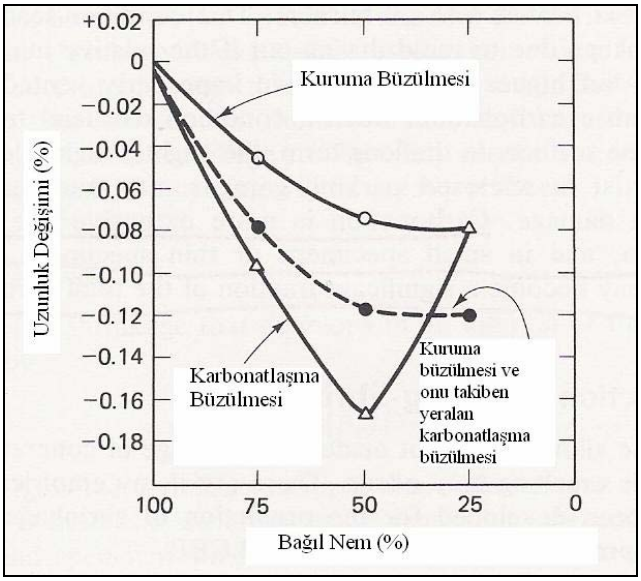
kuruma sonrası meydana geldiği zaman (düşük nem koşulları hariç) en büyük değerini almaktadır. Yine Şekil 3.4'te görülüğü gibi, eşzamanlı gerçekleşen karbonatlaşma ve kuruma neticesinde hâsıl olan toplam rötre miktarı, ardışık ilerleyen kuruma ve karbonatlaşma neticesinde oluşan rötreye göre daha az olmaktadır. Zira ilk durumda, meydana gelen karbonatlaşmanın büyük bir kısmı %50 bağıl nemin üzerinde gerçekleşmekte ve bu koşullar altında hâsıl olan karbonatlaşma rötresi miktarı nispeten düşük olmaktadır [16,17].

3.4.2.1. Karbonatlaşma Rötresi Mekanizması

Karbonatlaşmaya maruz kalmış beton su kaybetmektedir ve gerçekte maruz kaldığı bağıl nemden çok daha düşük bir bağıl nem derecesinde kuruyormuş gibi davranmaktadır. Bu koşullardaki su kaybı-rötre ilişkisi, normal kuruma için gözlemlenen durumla benzerlik göstermektedir. Bunun yanında, karbonatlaşma rötresi tamamen tersinir olmayan şekilde gerçekleşmektedir. C–S–H jelinin CO_2 ile girdiği reaksiyon:

$$C-S-H+\overline{C} \rightarrow C-S-H+C\overline{C}+H \qquad \textbf{(3.1)}$$

şeklinde gösterilmekte ve beraberinde su kaybı oluşmaktadır. Ayrıca reaksiyon boyunca C/S oranı da düşmektedir [16].



Şekil 3.4: Kuruma ve Karbonatlaşma Sırasının Çimento Harcının Rötresi Üzerindeki Etkileri [16].

C–S–H jelinin karbonatlaşması, rötrenin tersinir olmayışının nedeni de olan, malzemedeki bağ yapısının özelliklerini değiştirmektedir. Böylelikle C–S–H içerisinde, yalnızca çok düşük bağıl nem koşullarında meydana gelebilen değişiklikler, karbonatlaşma sayesinde vuku bulmaktadır. Buna ilaveten, kalsiyum hidroksit atmosferdeki CO_2 ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonata dönüşmekte ve karbonatlaşma rötresine neden olmaktadır:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad \textbf{(3.2)}$$

Buna göre, kuruma rötresi kaynaklı basınç gerilmesi altındaki $Ca(OH)_2$ kristalleri çözünerek gerilme altında olmayan bölgelerde $Ca(CO)_3$ çökeltisine dönüşmekte ve hidrate çimento hamurunun sıkışabilirliği geçici olarak artmaktadır [16,17].

Karbonatlaşma rötresi tersinir olmayan yapısından ötürü önyapımlı (prekast) betonlarda avantaj olarak değerlendirilebilmektedir. Örneğin bir beton bloğun (karbonatlaşma sürecini hızlandırmak için) CO_2 içeriği zengin havaya maruz kalması sonucu beton boyutları, sonradan gelecek ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı çok daha kararlı bir hal almaktadır. Öte yandan karbonatlaşma, yerinde dökülen betonlarda çok zararlı olmaktadır. Blok haldeki betondan çok daha az geçirgen olduğu için yerinde dökülen betonlarda karbonatlaşma, yalnızca maksimum kuruma hızının hâsıl olduğu dış ortamlarda gerçekleşmektedir. Bu sonuçla karbonatlaşma rötresi azami dereceye çıktığında ve kuruma rötresine eklendiğinde betonda şiddetli rötre çatlakları ortaya çıkmaktadır. Kış aylarında, petrol yakıtları tarafından ısıtılan kapalı ortamlarda kür edilen betonlarda karbonatlaşma hasarı görülebilmektedir. Bu durum, bağıl nem korunmadığı takdirde süratli kurumaya bağlı aşırı plastik rötre oluşumuna neden olacaktır. Yetersiz şekilde havalandırılmış kapalı ortam içerisindeki yüksek seviyedeki CO_2 de karbonatlaşmaya sebebiyet verebilmektedir. Böyle bir ortam, yüzeyin tozlanıp kirlenmesine veya çatlamasına öncülük etmektedir. Uzun dönem içerisinde, özellikle kapalı otoparklarda görülebilecek yüksek CO_2 seviyesi neticesinde yine karbonatlaşma hasarı görülebilmektedir [16].

3.4.3. Otojen Rötre

Otojen rötre, prizin başlamasından sonra bağlayıcı fazda meydana gelen makroskobik hacim küçülmesidir. Hidratasyonun başlamasıyla hemen ortaya çıkan ve ilk 24 saat zarfında en büyük etkinliği gösteren bu toplam erken rötre hâlâ

evrensel bir tanıma ve ada kavuşturulamamıştır. Bir kısım araştırmacı otojen rötreyi kimyasal ve kendiliğinden kuruma (self-dessication; iç kuruma) rötrelerinin toplamı olarak değerlendirmekte, bir diğer grup ise otojen rötre deyimini kimyasal rötreden ayırmaktadır [18].

Otojen rötre kavramının daha iyi anlaşılması için kimyasal rötre, kendiliğinden kuruma ve kendiliğinden kuruma rötresi mekanizmalarının daha ayrıntılı incelenmesi faydalı olacaktır.

3.4.3.1. Kimyasal Rötre

Kimyasal rötre, hidratasyon ürünleri mutlak hacminin bileşenlerinkinden küçük olmasına dayanan dâhili-mikroskobik hacim azalması olarak tarif edilmektedir. Hacimdeki azalma ile hidratasyon derecesi yaklaşık olarak doğru orantılı gerçekleşmektedir. Bu oluşum 1900 yılında Le Chatelier tarafından gözlenmiş ve açıklanmıştır [18,19].

Le Chatelier'nin Kimyasal Rötre Mekanizması: Hacimler Dengesi

Hidratasyon tepkimelerinde, örneğin basitleştirilmiş C_3S hidratasyon denkleminde, bileşenlerin ve ürünlerin molar kütle ve yoğunlukları kullanılarak, anhidr malzeme ve su hacminin hidrate ürünlerin hacminden daha büyük olduğu görülmektedir.

$$C_3S + 5.2H \rightarrow C_{1.7}SH_{3.9} + 1.3CH \qquad \textbf{(3.3)}$$

Tablo 3.1: C_3S Hidratasyonunda Tepkimeye Giren Maddelerin Molar Kütle ve Yoğunlukları [20].

	C_3S	H	$C_{1.7}SH_{3.9}$	CH
Molar Kütle (g/mol)	228	18	225,4	74
Yoğunluk (g/cm^3)	3,15	1	2,01	2,24

Tablo 3.1 ve (3.3) denklemine göre hacim hesapları aşağıdaki gibidir:

$$C_3S + 5.2H \rightarrow C_{1.7}SH_{3.9} + 1.3CH$$

$$72,4 + 93,6 \rightarrow 112,1 + 42,9 \ \text{cm}^3$$

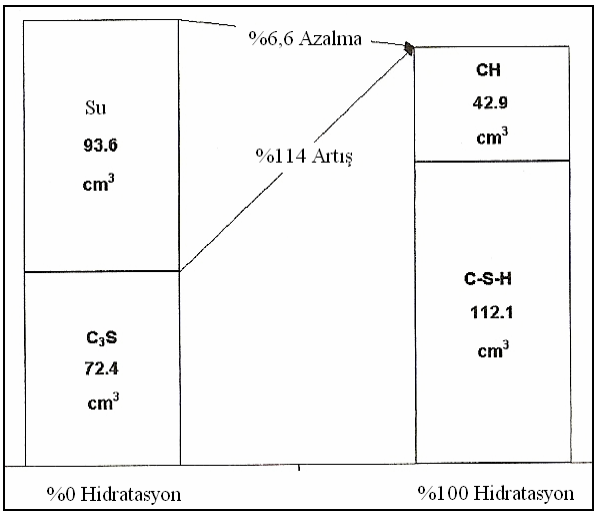
$$166 \rightarrow 155 \ \text{cm}^3$$

Buna göre hacim,

$$(\frac{166-155}{166} x100) = \%6,6$$

oranında azalma göstermektedir.

Mutlak hacimdeki azalma, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, ortaya çıkan hacim dengesinin iki sonucundan biridir. Buna göre; mutlak hacimde bir miktar düşüş görülürken, katı hacminde belirgin bir artış olmaktadır ki bu artış, mikroyapı gelişimine neden olmaktadır.



Şekil 3.5:C_3S hidratasyonu Sonucu Oluşan Hacim Dengesi [20].

Benzer sonuçlar, normal portland çimentosunu oluşturan her bir fazın dahil olduğu diğer kimyasal tepkimelerde de görülmektedir. Örneğin C_3A'nın etrenjite dönüşümü,

$$C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} \qquad \textbf{(3.4)}$$

denklemi ve Tablo 3.2'deki veriler ile birlikte incelendiğinde, ortaya çıkan mutlak hacim değişiminin, C_3A'nın gramı başına -0,273 ml olduğu görülmektedir [20].

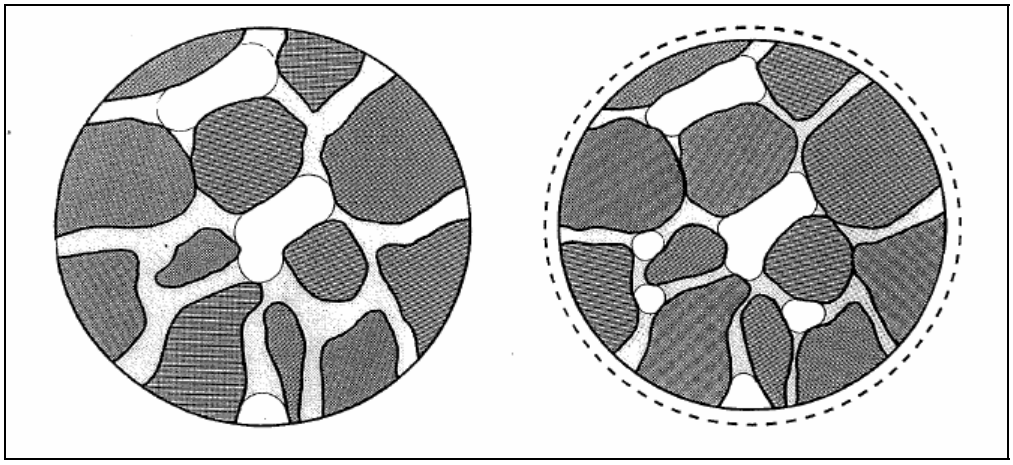
Tablo 3.2: C_3A'nın Etenjite Dönüşümü Esnasında Tepkimeye Giren Maddelerin Molar Ağırlık, Yoğunluk ve Hacimleri [20].

	C_3A	$3C\bar{S}H_2$	26H	$C_6A\bar{S}_3H_{32}$
Molar Ağırlık (g/mol)	270,2	172,17	18,02	1255,26
Yoğunluk (g/ml)	3,03	2,32	1	1,78
Hacim (ml)	0,33	0,823	1,733	2,607

3.4.3.2. Kendiliğinden Kuruma ve Kendiliğinden Kuruma Rötresi

Kendiliğinden kuruma ve kendiliğinden kuruma rötresi, çimento hidratasyonu ve beraberinde gelen kimyasal rötre neticesinde ortaya çıkan bir süreçtir. Dikkat çeken bir başka konu da kendiliğinden kuruma rötresinin, kendiliğinden kuruma olayının bir sonucu olarak görülmemesi gerektiğidir. Zira kimyasal rötre, eşzamanlı olarak, hem kendiliğinden kurumaya hem de kendiliğinden kuruma rötresine sebep olmaktadır [21].

Çimento hidratasyonu esnasında bir miktar ısı açığa çıkmakta, mutlak hacim azalmakta (kimyasal rötre) ve su molekülleri tüketilmektedir. Bu nedenle, hidratasyon sürüp boşluk yapısı inceldikçe (geçirgenlik azaldıkça) çimento esaslı karışımdaki sıvı su miktarı azalır. Kılcal boşluklar içerisinde azalan su, toplam kimyasal rötrenin bir sonucu olarak ortaya çıkan gaz fazı ile birlikte sıvı-gaz meniskleri oluşturur. İlerleyen süreçte menisklerin çapları giderek küçülür ve çevredeki katı fazda yani kılcal boru çeperlerinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Anlatılan mekanizma çerçevesinde, dışarıdan herhangi bir nem alışverişi olmadan (yalıtılmış konumda iken) sistem içerisinde vuku bulan rölatif nem düşüşüne "kendiliğinden kuruma"; boşluk suyundaki çekme gerilmelerinden ötürü çimento hamurundaki büzülmeye de "kendiliğinden kuruma rötresi" denilmektedir [18,21,22].



Şekil 3.6: Hidrate Olan Çimento Hamuru Kesiti [21].

Çimento hidratasyonunun yukarıda izah edilen sonuçları, kendiliğinden kuruma ve kendiliğinden kuruma rötresi, Şekil 3.6'da hidrate olan çimento hamurunun şematik kesiti ile gösterilmektedir. Soldaki kesitte düşük hidratasyon dereceli çimento hamuru, sağdakinde ise yüksek hidratasyon dereceli çimento hamuru görülmektedir.

Katı fazlar koyu gri ile, boşluk suyu açık gri ile ve boşluklar ise beyazla gösterilmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi hidratasyon sürecinin gelişmesiyle birlikte boşluk suyu giderek azalmakta, katı madde oranı artmakta ve mevcut boşluklar incelmektedir. Ayrıca, kimyasal rötreye bağlı olarak yeni boşluklar şekillenmekte ve menisklerin eğrilik yarıçapları küçülmektedir. Tüm bunların sonucunda ise hacimde makroskobik bir büzülme meydana gelmektedir [21,23].

3.4.3.3. Otojen Rötrenin Oluşumu ve Etkileyen Faktörler

Otojen rötre, sabit sıcaklıkta, beton numuneler ile ortam arasında herhangi bir nem alışverişi olmadan meydana gelen makroskobik hacim küçülmesidir. Bu tanımdaki önemli bir nokta süreç neticesinde sadece hacmin küçülmesi, ancak ağırlığın değişmemesi hususudur [18,24].

Bileşenleri kimyasal rötre ve kendiliğinden kuruma rötresi olan otojen rötrenin başlamasının ön koşulu, hidrate ürünlerin ve buna bağlı olarak jel fazının oluşmasıdır. Jel faz, çevresinde yeterli su bulamayınca kılcal boşluklardaki suyu transfer etmeye başlar ve bunun devamında da kendiliğinden kuruma süreci ile kendiliğinden kuruma rötresi meydana gelir.

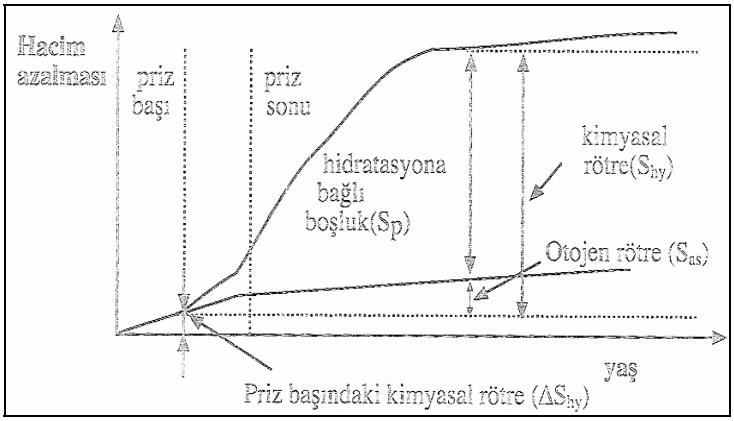
Kendiliğinden kurumaya paralele olarak gelişen diğer bir olay mikroyapının daha sık ve ince bir yapıya dönüşmesidir. Priz sürecinde iç yapı taşıyıcılık kazanınca kimyasal rötre süremez, ancak ileri düzeydeki hidratasyon mikroyapıda boşlukların oluşması ile dengelenip karşılanır. Oysa otojen rötre, hidratların morfolojisine bağlı olan mikroyapının rijitliğine göre artar veya azalır. Hidratasyon başlangıcında meydana gelen iğne yapılı etrenjit kristalleri çok miktarda fakat çok ince boşluklar oluşturur, keza CSH kristalleri de ince ve karmaşık bir kristal yapısı meydana getirirler. Bu ince boşluklar ve yoğunlaşan mikroyapı, suyun jel yapıya aktarılmasını önler. Ayrıca, çimento fazındaki boşluk çaplarının incelmesi kılcal ve jel yapılar arasındaki sürekliliğe negatif etki yapacağından otojen rötre sakıncasını arttırır. Bu nedenle, çimento inceliğinin yüksek olması, silis dumanı gibi çok ince mineral katkıların kullanımı ve çimento bileşenleri içerisinde prizi hızlandıran öğelerin (C_3A, C_3S ve çözünen alkali mineraller) bulunması otojen rötre artışında etkin rol oynamaktadır.

Otojen rötre priz başlangıcından itibaren, yani taşıyıcı çimento iskeletinin teşekkülünden sonra ortaya çıkan rötre olarak kabul edilir. Ancak ölçümler, priz öncesi sürede de (ölü bölge; uyuyan bölge) aktivitenin varlığını göstermiştir [18].

Otojen rötrenin karakteri ile kuruma rötresinin karakteri benzerdir; zira iki olay da rölatif nemin düşmesiyle ortaya çıkar. Aralarındaki tek fark kuruma rötresinde suyun dışarı buharlaşması, diğerinde ise içeride tüketilmesidir. Geleneksel betonlarda kuruma rötresine göre çok küçük mertebelerde kalan bu hacimsel büzülme, yüksek performanslı (s/ç oranı nispeten daha düşük) betonlarda kuruma rötresine eşit mertebelere ulaşmakta, hatta daha yüksek değerler alabilmektedir [23].

3.4.3.4. Kimyasal Rötre ve Otojen Rötre Arasındaki İlişki

Otojen rötre, kimyasal rötrenin oluşmasına bağlıdır ve bu iki rötre sistem akışkan tipte iken -yaklaşık olarak- eşittir. Hamur matriksinde taşıyıcı iskelet gelişimi görülüp (takriben priz başlangıcında) malzeme katı gibi davranmaya başladıktan sonra otojen rötre kimyasal rötreden daha küçük hale gelir. Ayrıca dışarıdan ek su beslenmesi olmadığı durumlarda (düşük s/ç oranlı betonlar) hidratasyonun ilerlemesi mikroyapıda yeni boşlukların oluşmasına yol açar ve bu olay kimyasal rötrenin kapsamına girer. Şekil 3.7 bu iki rötrenin zamana bağlı olarak artışını şematik olarak göstermektedir [18,19].



Şekil 3.7: Kimyasal ve Otojen Rötre Arasındaki İlişki [18].

Birbirleri arasındaki karmaşık durum nedeniyle otojen ve kimyasal rötre kavramları net bir tanıma kavuşturulamamıştır. Bu iki rötre, ayrı ayrı tanımlanmalarının dışında (kimyasal ve otojen rötrenin toplamı niteliğinde) "bünyesel rötre" veya "kimyasal" ve "dış kimyasal rötre" olarak da isimlendirilmiştir [18].

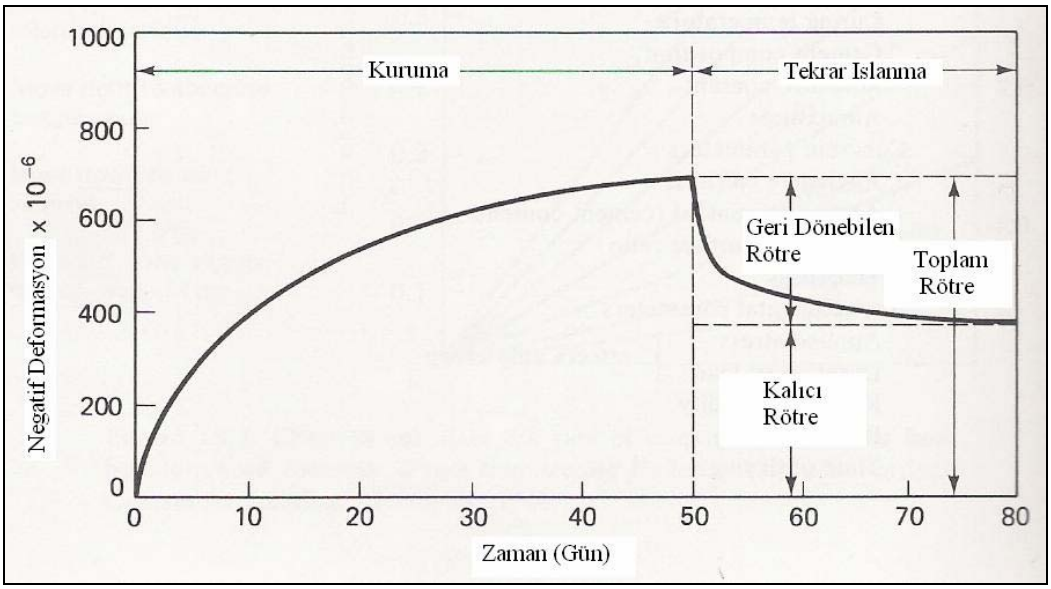
3.4.4. Kuruma Rötresi

Kuruma rötresi, sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması sonucunda yer alan büzülmedir. Bu nem hareketinin bir kısmı kalıcıdır

(tersinir olmayan; geri dönüşümsüz) ve ıslanma kuruma çevrimlerinin neden olduğu çift yönlü (tersinir; geri dönebilen) nem hareketinden ayırt edilmelidir [12,17].

3.4.4.1. Çimento Hamurun Davranışı ve Kuruma Rötresi Mekanizmaları

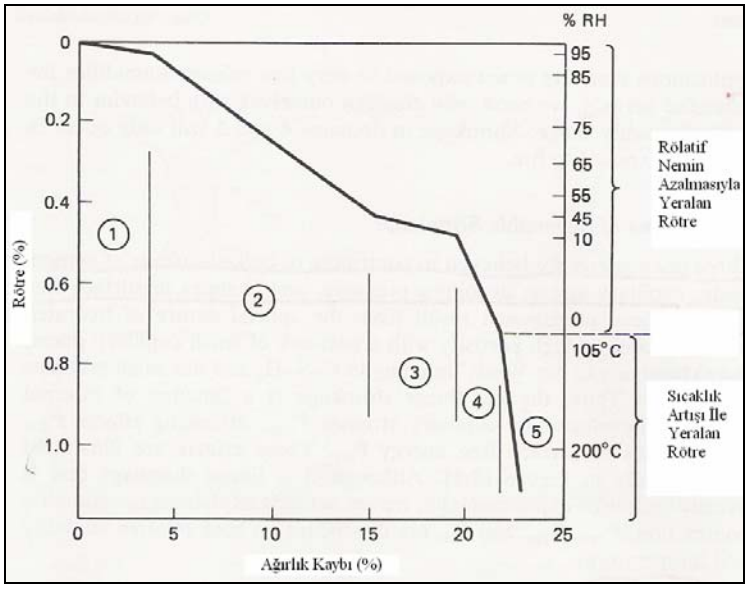
Kuruma rötresi mekanizmalarını araştırmak amacıyla normal portland çimentolu (NPÇ) hamur ve betonlar üzerinde geniş çapta birçok araştırma yapıldıysa da temel nitelikteki nano-ölçek mekanizmalar tam anlamıyla açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu konudaki önemli görüşlerden birine göre kuruma rötresi, toplam rötrenin ilk kuruma evresi sırasında meydana gelen bölümüdür ve Şekil 3.8'de görüldüğü gibi tersinir değildir. Sonrasında oluşacak ıslanma ve kuruma çevrimleri sonucunda meydana gelen hacimsel genleşme veya büzülme ise daha küçük olacaktır; zira jel parçacıklarının dizilişi ve grupları ilk kuruma esnasında değişmektedir [16,25].



Şekil 3.8: Kuruma ve Islanma Durumundaki Betonun Tipik Davranışı [16].

Kuru durumdaki betonun tekrar ıslak duruma getirilmesi ile mevcut rötrenin ne kadar telafi edileceği; ne miktarda kalıcı rötre gösterdiğine, betonun kurumaya başlamadan önce ne ölçüde kür gördüğüne ve kür sıcaklığına, çimento hamurunun porozitesine ve betonun yaşına bağlıdır. Örneğin, hidratasyonunu büyük ölçüde tamamladıktan sonra kuru ortama maruz kalan betonlar, tekrar ıslak duruma getirilmeleri sonunda nispeten daha az kalıcı rötre göstermektedir. Ayrıca, kuruma olayı ile karbonatlaşmanın birlikte yer aldığı betonlarda, kalıcı rötre miktarı daha büyük olmaktadır [12,16].

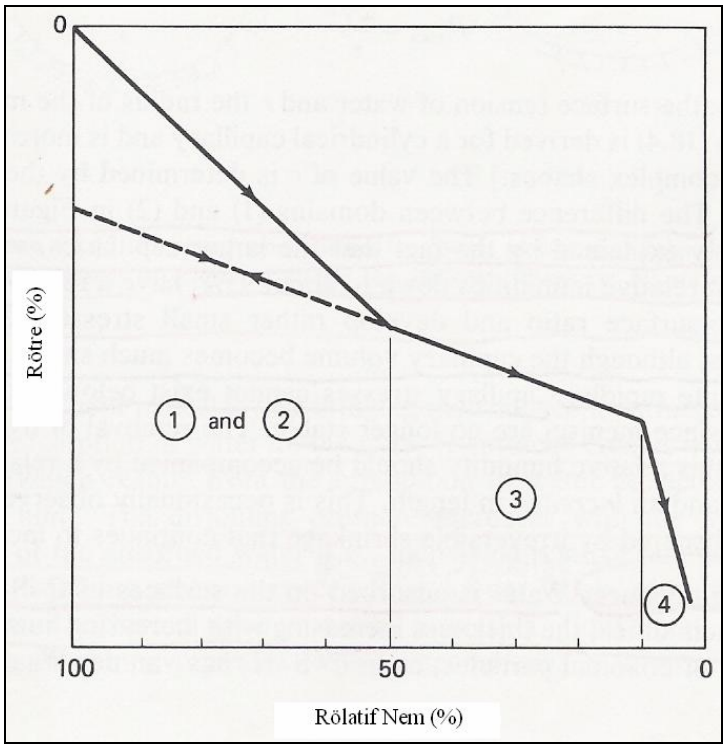
Nem kaybı kuruma rötresinin temelini teşkil etmektedir. Bununla ilgili olarak Şekil 3.9'da çimento hamuruna ait tipik ağırlık kaybı-rötre grafiği verilmektedir. Bu grafikte yaklaşık 5 çizgisel bölge gözlenmektedir. Birinci ve ikinci bölgeler, kılcal boşluklardan su kaybına atfedilmektedir. Üçüncü bölge C–S–H parçacıklarının yüzeylerindeki adsorbe suyun kaybını göstermektedir. Dördüncü bölge C–S–H jelinin yapısına katılan suyun kaybının; beşinci bölge ise C–S–H'ın ayrışmasının sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Betondaki su kaybı, birçok uygulamada, Şekil 3.9'daki ilk üç safhayı takip ederek gerçekleşmektedir. 4. ve 5. bölgelerdeki su kaybı ise beton çok uzun süre çok düşük rölatif nem koşullarında tutulduğunda veya yangın durumunda olduğu gibi sıcaklığın çok yüksek olduğu ortamlarda ortaya çıkmaktadır [16].



Şekil 3.9: Kuruma Boyunca Çimento Hamurunda Meydana Gelen Su Kaybı-Rötre İlişkisi [16].

Rölatif nemin çimento hamurun rötresi üzerindeki etkileri ve mahut bölgelerdeki farklılıklar Şekil 3.10'da ortaya konmaktadır. Çoğu inşaat mühendisliği uygulamalarında beton (uzun bir periyot boyunca) çok düşük rölatif neme maruz kalmadığından sadece üst nem sınıfı bizi ilgilendirmektedir. Şekildeki kesikli çizgi ise tekrar ıslanma durumundaki hacim değişikliğini belirtmektedir [12,16].

Çimento hamurunun rötresi için üç temel mekanizma önerilmiştir. Bunlar; kılcal gerilmeler, ayrılma basıncı ve yüzey serbest enerjisindeki değişimler (Gibbs-Bangham etkisi) olarak tanımlanmaktadır. Bu üç olay hidrate çimento hamurunun yapısındaki şu özeliklerin sonucu olmaktadır:



Şekil 3.10: Çimento Hamurunun Rötresine Rölatif Nemin Etkisi [16].

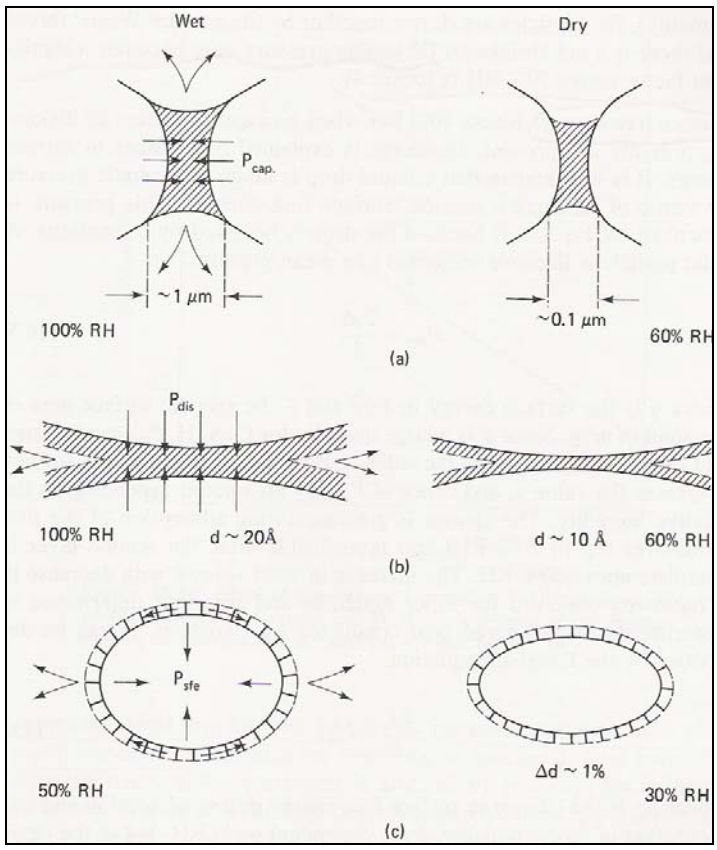
- Küçük kılcal boşluk ağı ve yüksek porozite,
- C–S–H jelindeki yaygın van der Waals bağları,
- Küçük C–S–H parçacıkları.

Ortaya çıkan kuruma rötresi; kılcal gerilmeler (P_c), ayrılma basıncı (P_d) ve yüzey serbest enerjisindeki değişim (P_{sfe}) tarafından oluşturulan iç basıncın bir fonksiyonu olmaktadır. Bu etkiler hem bağıl neme hem de sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve şematik olarak Şekil 3.11'de gösterilmektedir [16].

Hansen yaptığı araştırmalarda, rölatif nem aralığının %0-95 arasında olduğu koşullarda aktif olan yüzey serbest enerjisi etkisinin (Gibbs-Bangham etkisi) kuruma rötresi üzerindeki esas gerilme mekanizması olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, kılcal gerilmelere bağlı olarak gelişen rötrenin %25 rölatif nemin üzerinde aktif olduğu belirlenmiştir [25].

İlk kuruma rötresinin büyük bir kısmı kalıcıdır ve bu nedenle, tersinir nitelikteki Gibbs-Bangham veya kılcal gerilme etkileri ile izah edilememektedir. Hansen'e göre Gibbs-Bangham rötresi, ilk kuruma rötresinin sadece %33'ünü açıklayabilmektedir. İlk kuruma rötresinin geriye kalan %67'lik kısmı ise Gibbs-Bangham etkisi ve

kılcallık etkisi neticesinde oluşacak gerilmelerin neden olduğu kalıcı rötre olarak yorumlanabilmektedir [25].



Şekil 3.11: Çimento Hamurundaki Kuruma Rötresi İçin Önerilen Üç Mekanizma: (a) Kılcal Gerilmeler (b) Ayrılma Basıncı (c) Yüzey Gerilimi [16].

Kılcal Gerilmeler

Kılcal boşlukta menisk oluşumu sonucu gelişen hidrostatik gerilme, rijit-katı iskelet içerisinde izotropik bir basınç gerilmesine neden olmaktadır. Gelişen kılcal gerilmenin büyüklüğü:

$$P_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \qquad \textbf{(3.5)}$$

olmaktadır. Bu denklemde:

γ : suyun yüzey gerilimini

r : menisk yarıçapını

θ : suyun değme (ıslatma) açısını göstermektedir.

Silindirik kılcallığa ve suyun tamamen ıslattığı kabulüne (θ=0) dayanarak (3.5) denklemi:

$$P_c = \frac{2\gamma}{r} \qquad \textbf{(3.6)}$$

şeklinde düzenlenebilmektedir. Menisk yarıçapı (r) değeri ise bağıl nem vasıtasıyla belirlenmektedir. Böylelikle Şekil 3.9'da gösterilen 1 ve 2. bölgeler arasındaki fark açıklanabilmektedir. Bağıl nemin % 95'in altında olması durumunda boşalan geniş kılcallıklar nispeten büyük hacim/yüzey oranına sahiptirler ve oldukça küçük gerilmeler üretmektedirler. Daha düşük nem yüzdelerinde, kılcal hacmin azalmasına rağmen, gerilme artışı oldukça süratli olmaktadır. Bağıl nemin yaklaşık % 40-45'in altında olması durumunda meniskler daha fazla kararlı (sürekli) halde bulunamayacağından kılcal gerilmeler mevcut olamayacaktır. Bu bağıl nem derecesinde hidrostatik gerilmelerin kalkması katıda gevşeme ve boyca uzama ile beraber gerçekleşecektir. Bu durum ara sıra gözlemlenmekte; fakat artmaya devam eden kalıcı rötre yüzünden - genellikle- gözden kaçırılmaktadır [16].

Yüzey Serbest Enerjisi (Gibbs-Bangham Etkisi)

Bir sıvı damlası, kendi yüzey geriliminden (yüzey serbest enerjisi) dolayı hidrostatik basınç altındadır ve bu basınç (3.7) denklemi ile hesaplanmaktadır. Çünkü damla bir menisk tarafından sınırlandırılmaktadır. Bir katı parçacık ise aynı şekilde:

$$P_{sfe} = \frac{2\gamma S}{3} \qquad \textbf{(3.7)}$$

ortalama basıncına maruz kalmaktadır. Bu denklemde:

γ : yüzey enerjisini (J/m^2)

S : katının özgül yüzeyini (m^2/g) göstermektedir.

C–S–H jeli için (S) değeri büyük olduğundan (P_{sfe}) değeri de büyük olacak; bu da katıda sıkışmaya neden olacaktır. Yüzeydeki adsorbe suyun bir miktarı, bağıl neme bağlı olarak (γ) değerini dolayısıyla (P_{sfe}) değerini düşürecektir. Değişim; ilk tek-tabakanın adsorbsiyonu boyunca (% 20 bağıl neme kadar) en büyük değerini almakta ve ikinci tabaka (% 50 bağıl nemin üstünde) tamamlandıktan sonra önemsiz olmaktadır. (γ) değerinin azalmasıyla katı hacmindeki artış diğer maddelerde de

gözlemlenmiş ve Bangham tarafından yönetilen kömür tozu deneylerinde bu artış belirlenmiştir. Buna göre Bangham denklemi:

$$\frac{\Delta l}{l} = k\Delta\gamma \qquad \textbf{(3.8)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemde:

$\Delta\gamma$: adsorbsiyon boyunca yüzey serbest enerjisindeki değişimi

k : orantılılık sabitini göstermektedir.

($\Delta\gamma$) değeri, % 20 ile 40 arasındaki bağıl neme, logaritmik olarak bağlıdır ve değişim yaklaşık olarak doğrusaldır. % 40'ın üstündeki bağıl nem oranı için (γ) içerisindeki değişimler ihmal edilebilmektedir [16].

Ayrılma Basıncı

Su her bağıl nem derecesinde C–S–H jelinin yüzeyinde tutunmaktadır ve yüzey kalınlığı artan nemle birlikte artmaktadır. C–S–H jelinde olduğu gibi, kolloid(al) parçacıklarının birleşimi, komşu parçacıkları çeken ve bunların komşu yüzeyleri arasında yakın temas sağlayan van der Waals kuvvetleri içermektedir. C–S–H jelinin yüzeyindeki adsorbe su, (adsorbe tabaka içindeki su moleküllerinin yönlendirmesiyle açığa çıkan) ayrılma basıncını doğurmaktadır. Ayrılma basıncı, adsorbe suyun kalınlığının artmasıyla artmaktadır. Ayrılma basıncı, van der Waals çekme kuvvetini aştığı takdirde parçacıklar birbirinden ayrılmaya zorlanacak, sonuçta genişleme (dilatasyon) vuku bulacaktır. Tersi durumda, yani azalmakta olan ayrılma basıncı altında, parçacıklar van der Waals kuvvetince bir araya getirilecek ve rötre meydana gelecektir. Ayrılma basıncı -yalnızca- bağıl nemin % 50'nin üzerinde olması durumunda önemli bir etken haline gelmektedir [16].

Kalıcı Rötre

Önceki bölümlerde izah edilen mekanizmalar geri dönebilen nitelikte davranış öngörse de Şekil 3.8'de görüldüğü gibi ilk kurumada gözlemlenen uzunluk değişiminin önemli bir bölümü kalıcı olmaktadır. Tek yönlü deformasyon sadece ilk kurumada gerçekleşirken, sonraki ıslanma ve kuruma çevrimlerindeki deformasyonlar tersinir olmaktadır.

Çimento hamurundaki kalıcı değişimlerin nedenleri kesin olarak bilinmemekte ancak yaygın bir görüşe göre bu olayın, çimento hidratasyonu sırasında oluşan ve kararsız bir madde olan C–S–H jelinde meydana gelen bazı değişimlerin sonucu olduğu düşünülmektedir. Bunlar:

- Boşluk boyutu dağılımındaki değişimler,
- C–S–H parçacıkları arasındaki aderans değişimleri,
- C–S–H içerisindeki su dağılımındaki değişikliklerden ötürü jel parçacıklarının etrafının sarılmasında sürekli yeniden düzenlemeler olmasıdır.

Tıpkı boşluk boyutu dağılımındaki değişim sonucunda olduğu gibi, su/çimento oranında değişiklik ya da katkı kullanımı, C–S–H parçacıklarının düzenini ve bundan dolayı birbirleri arasındaki bağları değiştirecektir. Yüksek sıcaklık kürüne maruz kalma sonucunda ise C–S–H parçacıkları arasındaki kimyasal bağların miktarı artacaktır.

Feldman ve Sereda, C–S–H jelinin iç bölgesindeki katmanların rötrede (özellikle kalıcı rötrede) önemli bir rol oynadığını ifade etmekte ve özellikle düşük rölatif nem etkisi altında C–S–H katmanları arasından gerçekleşecek su kaybının rötre üzerinde baskın bir etkisi olduğunu düşünmektedirler. Islanma sırasında iç katman suyunun yeniden kazanılması, suyun uzaklaşmasından farklı bir yolla gerçekleşmekte; bu da tersinir olmayışın (kalıcı özeliğin) nedenlerinden biri olarak görülmektedir. Bununla birlikte, kalıcı değişimin büyük bir kısmı, ilk kuruma ve ıslanma boyunca C–S–H parçacıkları arasında yeni iç katman bölgeleri oluşması sonucunda gerçekleşmektedir [16].

3.4.4.2. Kuruma Rötresini Etkileyen Faktörler

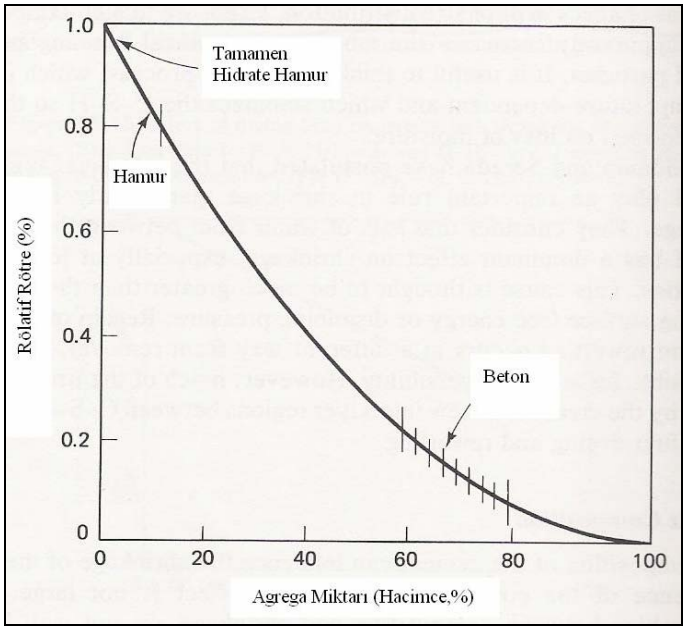
Çimento İle İlgili Faktörler

Çimento bileşiminin hamur rötresi ve dolayısıyla beton rötresi üzerindeki etkisi oldukça azdır. Yapılan gözlemlere göre, saf C_3S ve C_2S'ten oluşmuş hamurun rötresi, portland çimentosu kullanılarak hazırlanmış hamurun rötresine oranla daha az olmaktadır. Çimento hamurundaki küçük (ikincil) bileşenler, rötrenin esas kaynağı olduğu düşünülen C–S–H jelinin özeliklerini değiştirmektedir. Çimento yapısında bulunan kalsiyum hidroksitin de rötre üzerinde küçük bir etkisi bulunmaktadır. Öte yandan, çimento bileşimindeki alçı miktarının da rötre üzerindeki etkisi dikkate

alındığında, çimento hamurundaki rötreyi minimum seviyede tutmak için optimum alçı içeriği bulunmuştur [16].

Çimento inceliğinin artması ile çimento hamurunun rötresinde çok az artış olmaktadır. Ayrıca, daha hızlı hidratasyon yapan çimentolardan oluşan çimento hamurlarında, ilk günlerdeki rötre miktarı bir miktar daha fazla olmaktadır.

Beton üretiminde kullanılan su/çimento oranı yüksek olduğu takdirde çimento hamurunda yer alan kılcal boşluk miktarı daha çok olmaktadır ve kılcal boşluklardaki su, hava sıcaklığının yükselmesi ve/veya rölatif nemin düşük olması durumunda kolayca buharlaşabilmektedir. Buna göre genellemek gerekirse, sabit bir agrega hacmine sahip betonlarda su/çimento oranının yükselmesiyle kuruma rötresi artmaktadır [12].



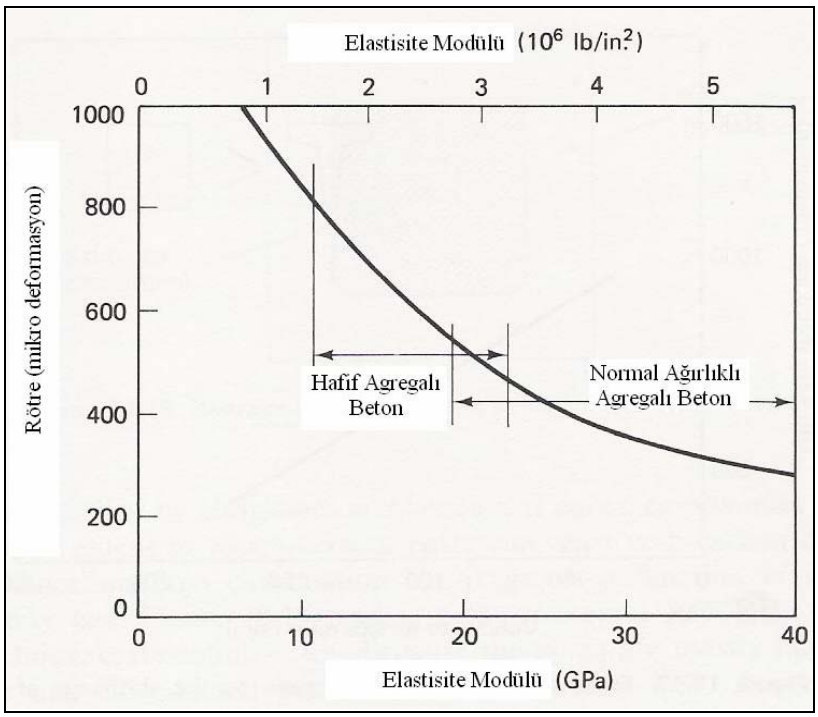
Şekil 3.12: Agrega Miktarının "Beton Rötresi/Çimento Hamuru Rötresi" Oranına Etkisi [16].

Agregaların Etkisi

Agreganın kısıtlayıcı etkisinden ötürü betonun kuruma rötresi, salt çimento hamurunun rötresinden daha az olmaktadır. İstisnalar dışında agregalar, değişen nem koşulları altında boyutsal olarak kararlı kalmaktadırlar. Agregalarca sağlanan kısıtın derecesi; Şekil 3.12'te görüldüğü gibi betondaki agrega miktarına, Şekil 3.13'te görüldüğü gibi agreganın sertliğine ve maksimum iri agrega çapına bağlı olmaktadır.

Maksimum agrega çapı arttıkça, kuruma rötresi nedeniyle hamur-agrega arayüzeyinde oluşan gerilmeler de artmaktadır. Bununla birlikte, artan iç gerilmeler, arayüzey bölgelerindeki çatlak miktarını arttıracaktır.

Hafif agregalar -çoğunlukla- boyutsal olarak kararlı halde bulunmaktadır. Buna karşın, hafif agregalarla yapılan betonlarda meydana gelen rötre, agregaların sahip olduğu düşük elastisite modülü nedeniyle normal betonlardakinden daha fazla olmaktadır.



Şekil 3.13: Agrega Elastiklik Modülünün Beton Rötresi Üzerindeki Etkisi [16].

Agrega miktarı ve sertliğinin bileşke etkisi,

$$\varepsilon_b = \varepsilon_h (1 - A)^n \qquad \textbf{(3.9)}$$

ampirik formülüyle ifade edilmektedir. Bu denklemde:

ε_b, ε_h : Sırasıyla betonun ve hamurun rötre deformasyonlarını,

A : Betondaki agrega miktarını,

n : 1,2 ile 1,7 arasında değişen katsayıları göstermektedir [16].

Ortam Koşullarının Etkisi

Ortam koşullarının çimento ve betonların yaptıkları rötre üzerinde gayet önemli etkileri vardır. Bunlardan özellikle havanın rutubetinin etkisi büyüktür. Havanın

rutubet derecesi ne kadar düşük ise buharlaşma o kadar fazla olmaktadır. Diğer taraftan sıcaklık derecesinin artması da buharlaşmayı artırdığından, rötre bu durumda da büyük değerler alır. Sonuç olarak, rölatif nem miktarının azalması ve/veya ortam sıcaklığının yükselmesi betondan kaybolan su miktarını yükseltmekte, dolayısıyla, rötrenin artmasına neden olmaktadır [12,26].

Beton Elemanın Boyutlarının Etkisi

Beton numunenin boyutu ve şekli, su kaybı hızını dolayısıyla kuruma rötresi hızını ve şiddetini belirlemektedir. Suyun katettiği difüzyon mesafesinin de nem kaybı hızı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Örneğin kütle betonun yüzeyinden 75 mm derinlikteki bir bölümün nem dengesine ulaşabilmesi ilk 1 ay içerisinde gerçekleşmektedir. Bu süre, 225 mm için 1 yıl, 600 mm içinse yaklaşık olarak 10 yıl olmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde numunedeki "hacim/yüzey alanı" oranının oldukça önemli olduğu görülmektedir ve betondaki bu oran arttıkça daha az rötre meydana gelmektedir [12,16].

3.5. Rötre Çatlakları

Betonda iki tür erken yaş çatlağı göz önüne alınmaktadır. Birincisi, betonun akışkan olarak düşünüldüğü evrede, takriben prizden önce hâsıl olan plastik rötre çatlağıdır [27].

Plastik rötre çatlakları beton yüzeyinden başlayarak iç kısımlara doğru uzanan derin çatlaklar değildirler. O nedenle, genellikle, betonun dayanımını azaltabilecek kadar etkileri yoktur; sadece beton yüzeyinin görünümünü bozmaktadırlar. Buna karşın, zaman içerisinde beton yüzeyine dışarıdan gelebilecek bazı yıpratıcı etkiler karşısında bu çatlaklar daha derin çatlaklar haline dönüşebilmekte ve beton dayanıklılığının azalmasına yol açabilmektedirler [12].

İkinci tür ise beton akışkandan visko-elastik katıya dönüştükten sonra görülen rötre çatlaklarıdır. Bu durum beton rötresinin iç ve dış etkenler tarafından kısıtlanması neticesinde meydana gelmektedir. Bir beton elemanın serbestçe rötre göstermesini engelleyen faktörlerden birkaçı aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Bir beton eleman içindeki farklı rötreler
- Beton elemanlar arasındaki farklı rötreler

- Agregalara bağlı kısıtlama
- Betonarme elemandaki çeliğin kısıtlaması
- Temel veya bir döşemeye bağlı kısıtlamalar.

Bu kısıtlamalar sonucunda doğan çekme gerilmelerinin çatlak oluşumuna yol açıp açmayacağı betonun çekme mukavemetine, kısıtlama olmadan gösterdiği (serbest) rötreye, sünmeye ve mevcut olan kısıtların derecesine bağlı olmaktadır. Oluşan çatlakların genişliği ise yukarıda sayılan faktörlerin yanı sıra elastisite modülü ve kırılma tokluğuna bağlı olarak değişmektedir [28,29].

Erken yaştaki gerilme gelişimi üzerine yapılan çalışmalar, bu süreçte hâsıl olan visko-elastik davranışın önemini açıkça ortaya koymaktadır. Zira bu çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre visko-elastik davranış neticesinde ortaya çıkan gevşeme miktarı, rötre kaynaklı (gevşeme olmadan ortaya çıkan) gerilmenin %50'sinden daha fazla olabilmektedir.

Yapılan araştırmalarda dikkat çeken bir diğer konu da beton bileşimi ile bağlayıcı maddenin rötre ve gevşeme üzerindeki etkisidir. Örneğin silis dumanı diğer mineral katkılara göre daha fazla otojen rötreye sebebiyet verirken, silis dumanının dâhil olduğu bir sistemdeki (otojen rötre esaslı) gerilme gelişimi beklenenden az olmaktadır. Bu eğilim; silis dumanlı betonun, eşit su/bağlayıcı oranına sahip ve bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren betona göre erken yaşta daha fazla sünme göstermesinin, bir başka deyişle daha ileri visko-elastik davranış sergilemesinin bir sonucu olarak gerçekleşmektedir [27].

3.5.1. Kısıtlanmış Rötre Deneyleri

Kısıtlanmış rötre deneylerini aşağıdaki gibi üç grupta toplamak mümkündür:

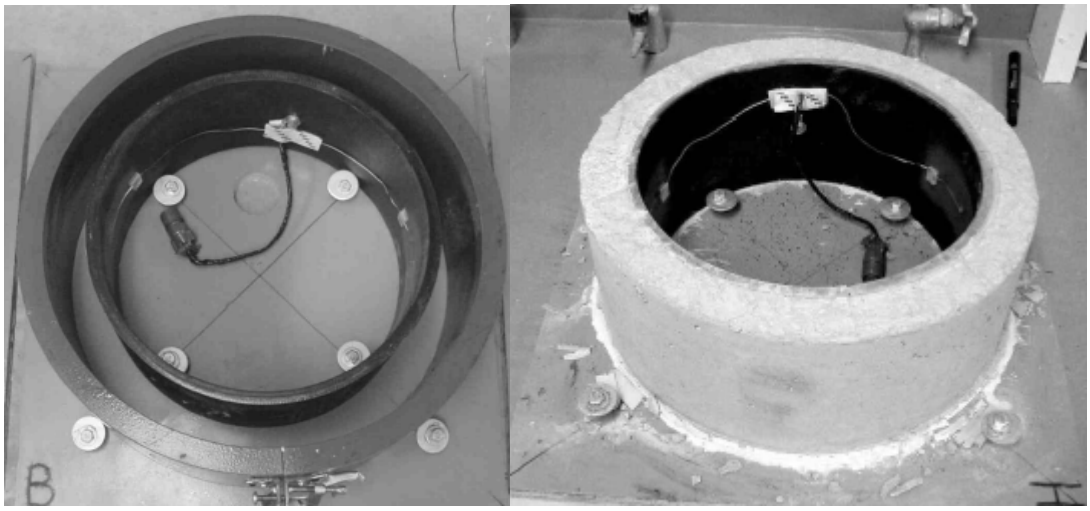
- Halka Deneyleri
- Levha (Panel) Deneyleri
- Çubuk Deneyleri

3.5.1.1. Halka Deneyleri

Halka deneyi, hem plastik rötre çatlaklarının hem de sertleşmiş betondaki rötre çatlaklarının değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Deneyde

kullanılan halka şeklindeki kalıbın içteki (genellikle çelik) kısmı, rötre esnasında sınırlayıcı nitelik göstermektedir. Bunun neticesinde çekme gerilmeleri hâsıl olmakta ve ortaya çıkan çekme gerilmelerini çatlak oluşumu takip etmektedir.

Gerilme dağılımı üniform olmadığından halka deneylerinin uygulanışı çoğu kez karşılaştırma amaçlı olmaktadır. Örneğin bu deney yöntemi ile rötre potansiyelini azaltmak için kullanılan lif veya rötre azaltıcı katkıların verimliliği üzerine karşılaştırmalar yapılabilmektedir. Bununla birlikte, yapılan bazı araştırmalarda, beton halkanın iç ve dış yüzeyleri arasındaki radyal gerilme farkının, gerilme dağılımını üniform saymak için yeterli derecede küçük olduğu ileri sürülmüştür [27].



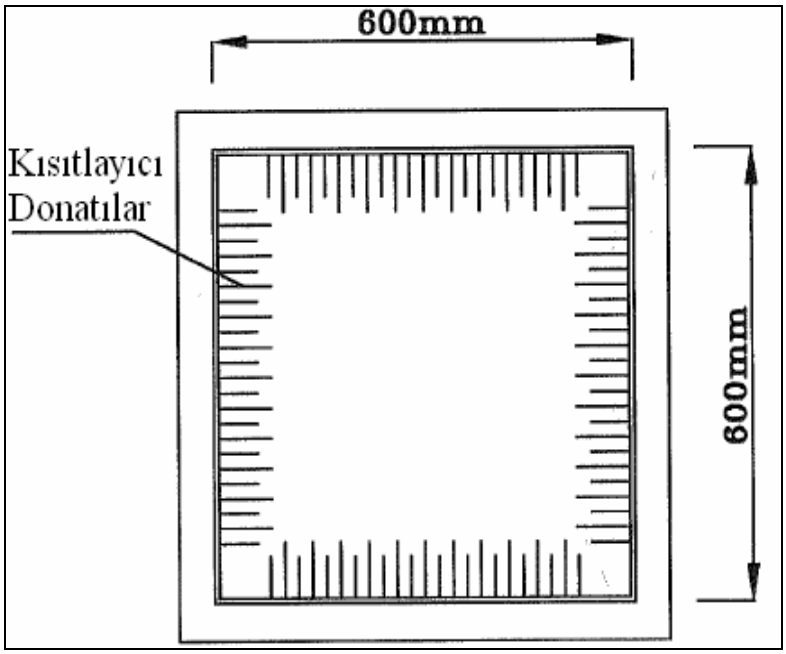
Şekil 3.14: Halka Kalıp Örneği ve Beton Halka Numune [15].

Halka deneylerinde performans değerlendirmesi maksimum çatlak genişliği, ortalama çatlak genişliği, çatlak sayısı ve çatlakların oluştuğu zaman gibi nicelikler üzerinden yapılmaktadır [30].

3.5.1.2. Levha Deneyleri

Levha deneyi başlangıçta düşük hacimdeki polimer liflerin plastik rötre çatlaklarını azaltmadaki etkinliğini araştırmak için tasarlanmıştır. Deneyde yaklaşık 1x1 metrelik (veya bir miktar daha küçük) döşeme kalıbı kullanılmakta ve kısıtlayıcı etki için levha kenarlarına donatı konmaktadır.

Deney sonucundaki beton performansı maksimum çatlak genişliği, ortalama çatlak genişliği, toplam çatlak uzunluğu, toplam çatlak alanı (çatlak genişliği ile uzunluğunun çarpımı), birim alandaki çatlak sayısı ile ifade edilmektedir [30].

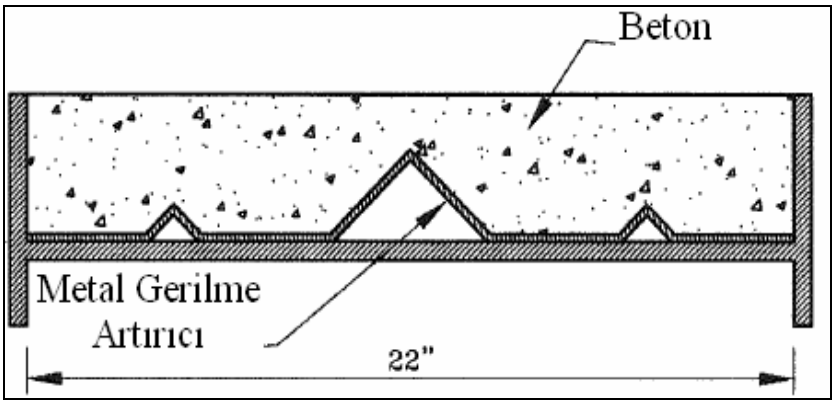


Şekil 3.15: Levha Deneylerinde Kullanılan Bir Modelin Şematik Gösterimi [30].

3.5.1.3. Çubuk Deneyleri

Bu gruptaki deneyler nitel, pasif ve aktif olarak üç gruba ayrılmaktadır.

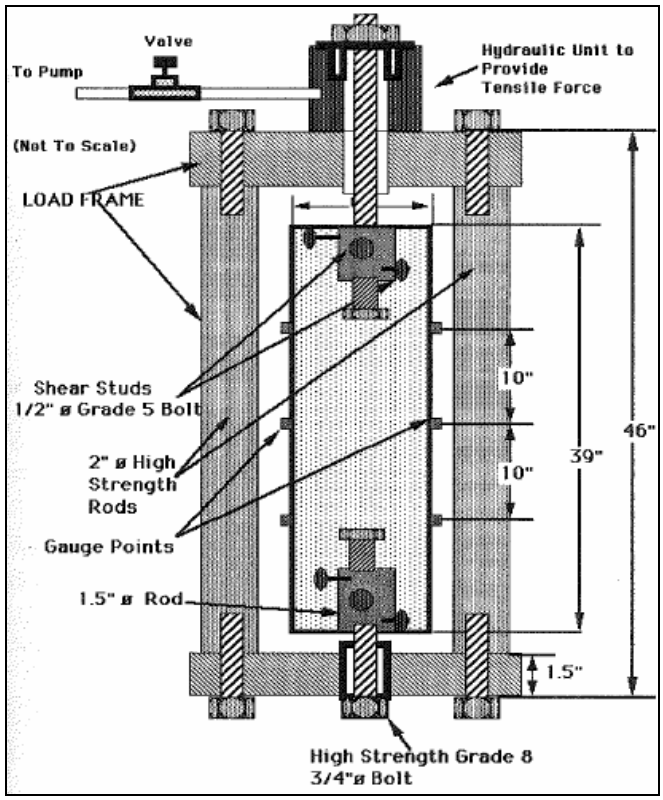
Nitel olarak adlandırılan deney yönteminde çatlak oluşumu için çubuk uçlarında veya çubuk boyunca engeller konulmaktadır. Deney sonuçlarının değerlendirmesi çatlağın boyutu, uzunluğu ve oluştuğu zaman gibi terimler üzerinden yapılmaktadır. Şekil 3.16'da bu deney yöntemi için geliştirilen bir model yer almaktadır [30].



Şekil 3.16: Nitel Çubuk Deneylerinde Kullanılan Bir Modelin Şematik Gösterimi [30].

Pasif deney yönteminde, nitel deneylerde elde edilen sonuçların yanı sıra kısıtlayıcı kuvvetler ve gerilmeler de belirlenebilmektedir. Deneyin pasif olarak tanımlanmasının nedeni kısıtlamanın sabit çelik çubuklarca sağlanıyor olmasıdır.

Aktif deney yönteminde numunenin bir ucu sabit iken diğer ucu serbest şekilde hareket edebilmektedir. Bir miktar rötre deformasyonu meydana geldikten sonra numune periyodik olarak (vida veya hidrolik bir mekanizma vasıtasıyla) ilk durumuna getirilmektedir. Deneyin aktif olarak tanımlanmasının nedeni numuneyi sıfır deformasyonda tutmak için sürekli müdahale edilmesidir. Deney sonucunda çatlak niteliklerinin yanı sıra gevşeme ve gerilme gelişimi de elde edilebilmektedir. Şekil 3.17'de bu deney yöntemi için geliştirilen bir model yer almaktadır [30].



Şekil 3.17: Dikey Aktif Çubuk Deneyi Modeli [30].

4. YENİ BİR TAHRİBATSIZ DENEY YÖNTEMİ: IMPACT ECHO

"Impact-echo" deneyi, gerilme dalgaları yayarak kullanılan tahribatsız deney metotlarından biridir. Bu metotla gerçekleştirilen diğer yaygın deneyler "Pulse-Echo" ve "Impulse-Response" olarak bilinmektedir. Bu metotların ortak özeliği betonun içyapısı hakkında edinilen sonuçların, yapının gerilme dalgalarının yayılışına verdiği yanıtlara bağlı olarak ortaya çıkmasıdır. Buna karşın gerilme dalgalarının kaynağı, deney düzeneği, kullanılan araçlar veya alınan yanıtların nitelikleri bu metotları birbirinden ayırmakta ve bu farklılıklar her bir metodu belirli uygulamalar için elverişli kılmaktadır.

İlk olarak 1929'da Solokov, metal nesneler üzerindeki hasarların araştırılmasında ultrases dalgalarının kullanımını önermiştir. 1942 yılında birbirinden bağımsız olarak yapılan çalışmalar sonucunda hem ABD'de hem de İngiltere'de "ultrasonik puls-eko" kusur algılayıcıları ortaya çıkarılmıştır. O tarihten itibaren metaller, plastikler ve diğer homojen malzemeler üzerinde yapılan "ultrasonik puls-eko" çalışmaları sonucunda verimli, güvenilir ve çok yönlü tahribatsız deney metotları geliştirilmiştir.

Ultrases dalgalarıyla geliştirilen yöntemlerde meydana gelen gelişmelere karşın betonun içyapısından ötürü uygulamalarda bazı kısıtlamalar ortaya çıkmıştır. Örneğin yüksek frekanstaki (1 MHz veya üstü) gerilme pulsları beton içerisine nüfuz edemezken, piyasadaki güç çeviricilerin hiçbiri "puls-eko" deneyleri için olumlu sonuç vermemekteydi. Bunun üzerine benimsenen başka bir yaklaşımla, mekanik darbe sağlanarak düşük frekansta gerilme dalgaları oluşturuldu. Bu konu üzerinde bugüne dek yapılan araştırmalarda beton için birçok teknik geliştirildi ve bu tekniklerin bir kısmı standart deney metotları olarak kabul edildi [31].

4.1. Gerilme Dalgaları İle İlgili Genel Bilgiler

Bir katı maddenin yüzeyine gerilme uygulandığı zaman oluşan zorlama madde boyunca (ses dalgalarının havadaki hareketine benzer şekilde) "gerilme dalgaları"

olarak hareket etmektedir. İzotropik ve elastik ortamlar boyunca üç temel şekilde gerilme dalgaları yayılımı görülmektedir. Bunlar:

- Boyuna Dalgalar
- Enine Dalgalar
- Rayleigh Dalgaları

olarak adlandırılmaktadır. Boyuna ve enine dalgalar; sırasıyla, "basınç" ve "kayma" veya "P" ve "S" dalgaları olarak da ifade edilmektedir. Ayrıca oluşan zorlamanın yayılma yönü veya dalga davranışına bağlı olarak tane hareketinin yönü de mahut dalgaların tasnifinde rol oynamaktadır. P-dalgalarında tane hareketi yayılma yönüne paralel, S-dalgalarında ise tane hareketi yayılım yönüne diktir. P-dalgaları normal gerilme ile ilgili iken S-dalgaları kayma gerilmesi ile ilgilidir. P-dalgaları her türlü ortamda yayılabilirken, S-dalgaları sadece katı cisimler içerisinde ilerleyebilmektedir.

Rayleigh dalgası, "yüzey" dalgası veya "R" dalgası olarak da tanımlanmaktadır. Rayleigh dalgaları katı yüzeyi boyunca yayılırken bir çeşit yuvarlanma hareketi yaptıklarından geçtikleri ortam içerisinde bulunan tanecikler, yayılma doğrultusu boyunca ters bir elips hareketi çizmektedirler.

Gerilme dalgası yayılım metotlarının kusurların veya süreksizliklerin ortaya çıkarılmasındaki duyarlıkları, yayılan dalgadaki bileşen frekanslarına (veya dalga boylarına) ve kusur ya da süreksizliğin boyutuna bağlı olmaktadır. Bununla birlikte bir kusurun ortaya çıkarılabilir olması için kusur boyutu yayılan dalganın boyuna eşit veya dalga boyundan büyük olmalıdır. (C) dalga hızı, (f) frekans, (λ) dalga boyu olmak üzere bunlar arasındaki bağıntı:

$$C = f \times \lambda \qquad \textbf{(4.1)}$$

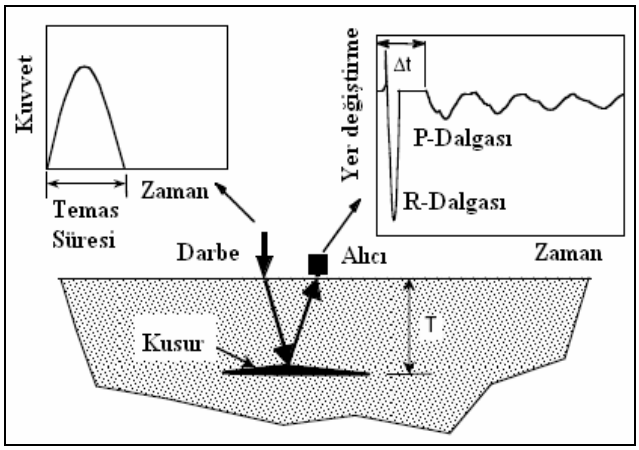
denklemi ile verilmektedir. Bu denkleme göre 0,1 m çapındaki bir kusurun ortaya çıkarılabilmesi için betona (P-dalgası hızı yaklaşık 4000 m/s) uygulanacak gerilme pulsunun frekansının 40 kHz'den büyük olması gerekmektedir.

Bir dalga katı bir cisim boyunca yayılırken genliği, alınan mesafe ile beraber dağılma ve sönümlenme gibi zayıflamalara bağlı olarak düşmektedir. Beton üzerindeki değerlendirmelerde, harç ve agrega arayüzeylerinde yansıma ve kırılmadan ötürü

oluşan dalga enerjisindeki zayıflamayı azaltmak için düşük frekanslı (uzun dalga boyuna sahip) dalgalar kullanılmalıdır. Eğer yayılan dalganın dalga boyu agrega boyutundan daha küçükse, harç ve agrega taneleri arasındaki akustik empedans uyumsuzluğu her bir harç-agrega arayüzeyine gelen dalgaları dağıtmaktadır. Bununla birlikte düşük frekanslı dalgaların kullanımı yayılan dalgaların küçük kusurlara olan duyarlığını azaltmaktadır [31].

4.2. Impact-Echo Metodu

Gerilme pulsu oluşturmak amacıyla mekanik darbe kullanılması fikri, büyük hacimli verici ve ileticilere olan ihtiyacı giderdiği için büyük önem kazanmaktadır. Bir noktaya uygulanan darbe ile oluşan gerilme pulsu ve bunun sonucu olarak oluşan enerji, malzeme içerisine her yönden yayılabilirken, yansımalar birkaç yönden olabilmektedir. Bu nedenden ötürü "darbe" metotları ilk önce kazık deneyleri için kullanılmıştır. Kazık sınırları "dalga kılavuzu" gibi davranarak enerjinin büyük çoğunluğunu kazık içerisinde hapsetmektedir. 1980'lerde Sansalone ve Carino bu darbe metodunu ince beton yapıların testleri için geliştirdiler ve bu tekniği -özgün ismiyle- "Impact-Echo" olarak adlandırdılar [31].



Şekil 4.1: Impact-Echo Yönteminin Gösterimi [31].

4.2.1. Temel İlkeler

"Impact-Echo" tekniğinin temeli, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi deney numunesinin yüzeyinde mekanik darbe oluşturarak gerilme pulsu oluşturmaktır. Oluşan gerilme pulsu malzeme içerisine P ve S-dalgaları gibi küresel dalga hareketi ile yayılmaktadır. Bununla birlikte yüzey (R) dalgası da yüzey boyunca ve darbe noktasından uzağa hareket etmektedir. P- ve S- gerilme dalgaları iç arayüzeyler veya

dış sınırlar tarafından yansıtılmaktadır. Yansıyan dalgaların, darbenin oluşturulduğu yüzeye varmasıyla birlikte, veri alıcılarla ölçülen ve kaydedilen yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Alıcı darbe noktasına yakın bir yere yerleştirilirse, P-dalgalarının yüzeye varışı ile doğan yer değiştirmeler (P- ve S-dalgalarının yayılma şekli ile bağlantılı olarak) dalga şeklini belirlemektedir [31].

4.2.2. Sinyal Analizi

Darbe sonucu oluşan gerilme pulsu betona nüfuz edebilecek düşük frekansta dalgalar içermektedir. Frekans analizinde gerilme pulsu Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kusur ve levha üst yüzeyi arasında geri ve ileriye doğru yayılmaktadır. Puls üst yüzeye her varışında tipik bir "azalan" yerdeğiştirme üretmektedir. Bu nedenle dalga şekli periyodik olmakta ve periyot da hareket mesafesinin (2T), P-dalgasının hızına bölünmesiyle elde edilmektedir. Buna göre, periyodun matematiksel tersi olan frekans, tipik bir yerdeğiştirme modeli için

$$f = \frac{C_{pp}}{2T} \tag{4.2}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada (C_{PP}), levhadaki P-dalgası hızını belirtmekte ve kalınlığı bilinen bir yapı kullanılarak "impact-echo" testi vasıtasıyla bulunmaktadır. Böylelikle dalga şekli içerisindeki baskın frekans belirlenirse levha kalınlığı (veya dalgayı yansıtan arayüzeyin uzaklığı) aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$T = \frac{C_{PP}}{2f} \tag{4.3}$$

Levha kalınlığı boyunca P-dalgası hızı (C_{PP}), P-dalgası hızının (C_P) yaklaşık %96'sı olmaktadır. Sansalone ve Streett aradaki bu farkı, P-dalgası yansımalarının levha içerisinde neden olduğu farklı titreşim şekli ve bunun sonucunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin dalga şekli içerisinde temel periyodik modeller üretmesine bağlamaktadır.

Dijital olarak kaydedilen dalga şekillerindeki frekans miktarını elde etmek için "Hızlı Fourier Dönüşümü" (FFT) tekniği kullanılmaktadır. Fourier dönüşümü esasına dayanan bu tekniğe göre herhangi bir dalga şekli, her biri ayrı genlik, frekans ve faz değişimine sahip sinüs eğrilerinin toplamı olarak temsil edilmektedir. Bununla

birlikte FFT tekniği kullanılarak dalga şekli içerisindeki bileşen frekanslarının göreceli genliklerini veren genlik spektrumu da hesaplanabilmektedir.

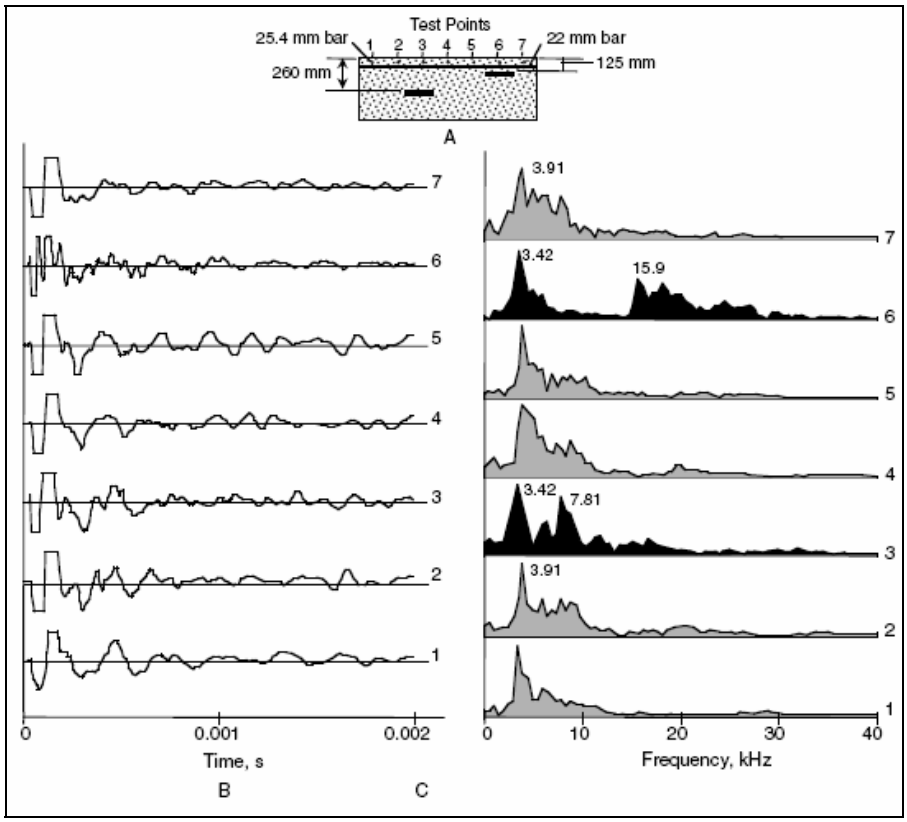
"Impact-echo" metodu kullanarak malzeme içerisindeki kusurların yerini belirlemek için numune yüzeyine çizilen tarama çizgileri boyunca düzenli olarak ayrılmış noktalar üstünde ölçümler yapılmaktadır. Bu taramalardan çıkan genlik spektrumunun incelenmesi sonucunda numunede bulunan kusurların konumu ve yaklaşık boyutu açığa çıkmaktadır. Mahut tarama çizgisi boyunca yer alan kusurların konumunu görüntülemek amacıyla uygulanan klasik yöntem ise spektrumların "şelale çizim" şeklinde oluşturulmasıdır. Bu tür çizimde tarama çizgisi boyunca test edilen noktalardan alınan spektrumlar ardışık olarak çizilmektedir. Şekil 4.2'de içerisinde iki adet disk şekilli boşluk bulunduran, incelenen kesiti 0,5 m kalınlığa sahip betonarme döşemeden elde edilen "şelale çizim" örneği görülmektedir. Her bir noktada elde edilen dalga şekli sol tarafta ve buna karşılık gelen spektrum da çizimin sağ tarafında gösterilmektedir. 1 numaralı spektrumda, döşemenin katı kısmından elde edilen 3,91 kHz'lik büyük-tekil bir genlik zirvesi görülmektedir. Buna göre (4.2) denklemi kullanılarak döşemedeki levhada P-dalgası hızı 3910 m/s bulunmaktadır. 2, 3 ve 6 numaralı spektrumlar ise mevcut olan boşlukları göstermekte ve (4.3) denklemi kullanılarak her bir boşluğun derinliği hesaplanabilmektedir. Örneğin 3 numaralı spektrumdan elde edilen 7,81 kHz'lik maksimum frekans:

$$\frac{3910}{2\times 7810} = 0,25m$$

derinlikte bir boşluktan gelen yansımaları; 6 numaralı spektrumdan elde edilen 15,9 kHz'lik maksimum frekans ise:

$$\frac{3910}{2\times 15900} = 0,12m$$

derinlikte bir boşluktan gelen yansımaları ifade etmektedir. Sonuç olarak, hesaplanan derinlik değerleri ile oluşturulan yapay boşlukların bilinen derinlik değerleri arasında yakınlık olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 3 ve 6 numaralı spektrumda görülen 3,42 kHz'lik yüksek genlik zirvesi ise P-dalgasının kusur etrafında kırılması ve döşeme tabanından yansıması ile ilgili olmaktadır [31].



Şekil 4.2: Impact-Echo Deneyi Sonuçları (A) Döşeme Enkesiti (B) Dalga Şekilleri (C) Genlik Spektrumu [31].

4.2.3. Kurulum ve Araçlar

"Impact-echo" deney metodu; darbe kaynağı, algılayıcı ve uygun yazılımla birlikte veri toplayıcı sistem olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır.

Darbe kaynağının seçimi, "impact-echo" deneyinin etkin ve başarılı olması için büyük önem taşımaktadır. Darbe ile vuku bulan "kuvvet-zaman" ilişkisi yaklaşık olarak yarım sinüs eğrisine benzemekte ve darbe devamlılığı Şekil 4.1'de görüldüğü gibi "temas süresi" olarak adlandırılmaktadır. Temas süresi, darbe tarafından oluşturulan gerilme pulsunun frekans içeriğini belirlemektedir. Daha kısa temas süresi, puls içerisindeki frekans derecesini yükseltmekte ve bunun sonucunda temas süresi, "impact-echo" deneyi ile saptanan kusurun boyutunu belirlemektedir. Temas süresi azaldıkça ve puls yüksek frekanslı (kısa dalga boylu) bileşenler içerdikçe yapıdaki küçük kusurlar saptanabilir olmaktadır. Ayrıca derinde olmayan kusurların yerini doğru olarak tespit edebilmek için kısa süreli darbelere gerek duyulmaktadır. Puls içerisindeki önemli bir genliğe ait en yüksek frekans bileşeni yaklaşık olarak temas süresinin tersi olmaktadır. Örnek olarak, 100 μs'lik bir temas süresi için önemli bir genliğin yakalandığı maksimum frekans yaklaşık 10 kHz olmaktadır. P-

dalgası hızı 4000 m/s alındığında, (4.3 denklemi kullanılarak) derinliği 0,2 m'den daha az olan kusurların belirlenebilmesi için 100 μs'den daha kısa süreli bir temas süresinin gerekli olduğu görülmektedir. Açıklanan hususların neticesi olarak "döşeme türü" yapılarda verimli bir "impact-echo" deneyi için kısa süreli darbeler tercih edilmektedir. Bununla birlikte, yapılan deneyler sonucunda temas süresi kısaldıkça genlik spektrumunun daha karmaşık bir hale geldiği görülmüştür. Uygulamada, uzun süreliden başlayıp kısa süreli ile devam eden bir temas süresi dağılımı uygun görülmektedir.

Bugüne dek yapılan deneyler boyunca birçok darbe kaynağı denenmiştir. Örneğin kazıklar üzerinde yapılan testlerde, uzun temas süreli (1 ms'den daha fazla) darbeler ürettiği için darbe kaynağı olarak çekiç kullanılmaktadır. Buna karşın uzun ve narin yapıların test süreci için kabul edilebilir olan bu süre, döşeme veya duvar gibi ince yapıların içerisindeki kusurların saptanması için uygun olmamaktadır. Kalınlıkları 0,15 ile 1 m arasında değişen döşeme ve duvarlardaki kusurların incelenmesi için kısa süreli (20 ile 60 μs arası) darbeler oluşturacak küçük çelik küreler veya yaylı, küresel uçlu darbe kaynakları kullanılmaktadır. Çelik küreler, iyi tanımlanmış pulslar (yaklaşık olarak yarım sinüs eğrisi) ürettiği ve temas süresi küre çapıyla orantılı olduğu için uygun darbe kaynağı olarak tercih edilmektedir.

Döşeme ve duvarların test sürecinde, ilk olarak Sansalone ve Carino tarafından denenen konik uçlu, piezoelektrik yerdeğiştirme algılayıcısı kullanılmaktadır. Bu algılayıcı yüzey yer deştirmesini geniş bir frekans aralığı üzerinden karşılamaktadır. Bununla birlikte, konik algılayıcı ile test yüzeyi arasındaki akustik bağlantıyı ince, kurşun bir şerit sağlamaktadır.

Veri toplayıcı sistem en az 500 kHz'lik örnek frekansa sahip olmalıdır. En uygun 'örnek frekans' değeri test numunesinin kalınlığına bağlı olmakla birlikte, göreceli ince yapıların deneyinde yüksek 'örnek frekans' değerlerinin etkili olduğu görülmüştür [31].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında İTÜ Marmaray Laboratuvarı'nda su/çimento oranı 0,40 olan 2 farklı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı üretilmiştir. İlk karışımda bağlayıcı madde olarak çimento ve uçucu kül kullanılırken, diğer karışımda sadece çimento kullanılmıştır. Aşağıda beton üretiminde kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

5.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimento, uçucu kül, agregalar, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

5.1.1. Çimento

Üretimlerde Set Çimento Fabrikası'na ait CEM I 42,5 tipinde çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.1'de, basınç dayanımları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Üretimlerde Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Özgül Ağırlık (g/cm^3)		3,21
Priz Süresi	Başlangıç (dk)	185
	Bitiş (dk)	235
Hacim Sabitliği (mm)		1
Özgül Yüzey (cm^2/g)		3090
CaO		64,71
SiO_2 (%)		22,53
Fe_2O_3 (%)		4,44
Al_2O_3 (%)		4,17
C_3A (%)		3,53
SO_3 (%)		1,68
MgO (%)		0,83
Cl^- (%)		0,0022
Kızdırma Kaybı (%)		0,64
Çözünmeyen Kalıntı (%)		0,23
Serbest Kireç (%)		0,71

Tablo 5.2: Üretimlerde Kullanılan Çimentonun Basınç Dayanımı

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)
2	12,8
7	27,9
28	47,4

5.1.2. Uçucu Kül

Deneylerde çimentoya ek olarak Kütahya Tunçbilek termik santralinden elde edilen ve özgül ağırlığı 2,20 g/cm^3 olan C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3: Üretimlerde Kullanılan Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

SiO_2 (%)	58,39
Al_2O_3 (%)	20,42
Fe_2O_3 (%)	10,20
CaO (%)	1,93
MgO (%)	5,05
K_2O (%)	1,51
SO_3 (%)	0,75
Cl^- (%)	0,0142
Serbest Kireç (%)	0,04
Kızdırma Kaybı (%)	0,76

5.1.2.1. Eşdeğer Çimento Hesabı

Üretilen her iki KYB karışımında da su/çimento oranı sabit tutulmuştur. Buna göre, ilk karışımda kullanılan uçucu kül ve çimento bileşiminin eşdeğer çimento hesabı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$C_{eşdeğer\ çimento} = C_{çimento} + 0,3 \times C_{u.kül} \quad \textbf{(5.1)}$$

5.1.3. Agregalar

Beton üretiminde ince agrega olarak doğal kum ve kırma kum, iri agrega olarak ise kireçtaşı kökenli kırmataş 1 ve 2 kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 5.4'te, elek analizleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.4: Üretimlerde Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega Türü	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Su Emme (%)
Doğal Kum	2,58	1,27
Kırma Kum	2,69	0,88
Kırmataş 1	2,70	0,43
Kırmataş 2	2,72	0,35

Tablo 5.5: Üretimlerde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)			
	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırmataş 1	Kırmataş 2
31,5	100	100	100	100
16	100	100	100	71,2
8	100	100	49,6	0,6
4	99,8	91,9	3,7	0,5
2	95,3	52,5	0,9	0,5
1	82,9	26,9	0,9	0,5
0,5	70,4	12,7	0,9	0,5
0,25	43,9	6,1	0,9	0,5

5.1.4. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Beton üretimleri sırasında, su ihtiyacını yüksek oranda azaltan ve Grace firması tarafından Marmaray Projesi'nde kullanılmak üzere geliştirilen 1210B kodlu, polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkı maddesinin özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Üretimlerde Kullanılan Katkı Maddesinin Özellikleri

Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter
Görünüm	Açık Kahverengi
Homojenlik	Homojen
Yoğunluk (20°C'de)	$1,055 \pm 0,02$ g/cm^3
pH (20°C'de)	$6,5 \pm 1$
Toplam Klor Miktarı	< 0,10 M.-% (TS EN 480-10)
Suda Çözünen Klor Miktarı	< 0,10 M.-% (TS EN 480-10)
Alkali Miktarı	Yaklaşık 2.0 m.-% (TS EN 480-12)

5.2. Beton Üretimi

Bu çalışma kapsamında 2 farklı kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı üretilmiştir. Karışımların birinde uçucu kül ile çimento birlikte kullanılırken diğerinde bağlayıcı madde olarak yalnızca çimento kullanılmıştır. Her iki karışımda da su/çimento oranı 0,40 değerinde sabit tutulmuş ve uçucu kül ikamesi için

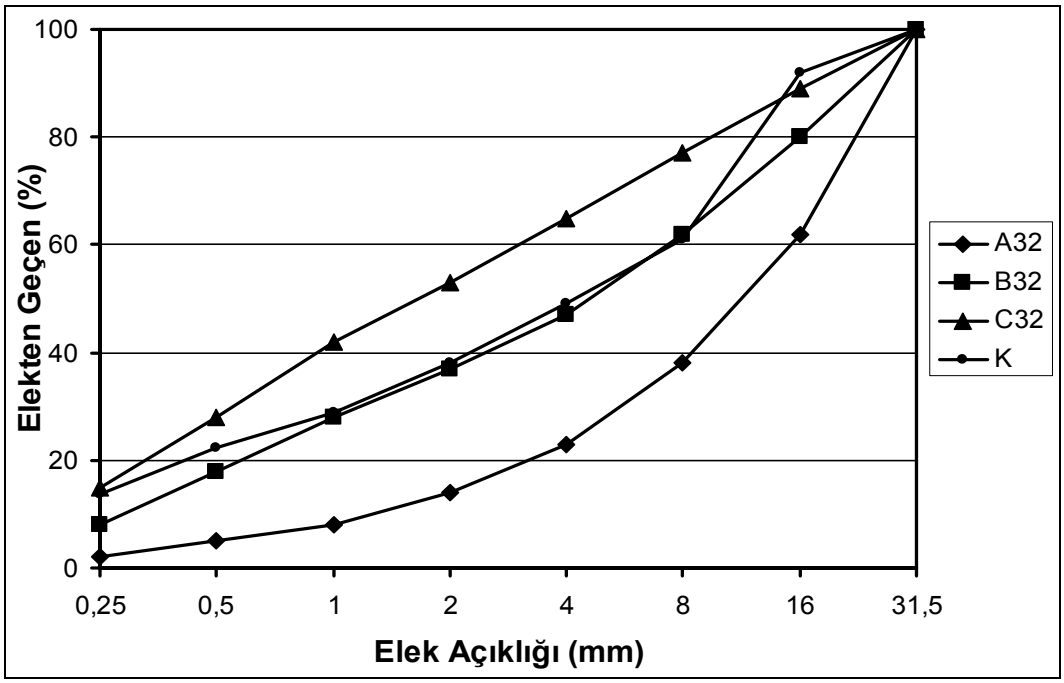
kullanılan eşdeğer çimento hesabı Bölüm 5.1.2.1'de verilen formüle göre yapılmıştır. İlk karışımda kullanılan uçucu kül miktarı ise 150 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

Karışım hesaplarında dikkat edilen bir başka kriter de agrega etkisidir [29,32]. Agrega etkisini yok etmek için hamur hacmi/agrega hacmi 0,55 değerinde sabit tutulmuştur.

Katkı miktarı bütün bileşimlerde KYB özelliklerinin elde edilebilmesi için deneme betonları yapılarak belirlenmiştir.

Agrega karışımı, TS 706'da belirtilen B32 ve C32 referans eğrileri arasında kalacak şekilde tayin edilmiştir [33]. Buna göre karışım oranları doğal kum için %27, kırma kum için %23, kırmataş 1 için %22 ve kırmataş 2 için %28 olarak belirlenmiştir. Referans eğrileri ve karışım granülometri eğrisi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.7'de üretilen karışımların 1 m^3'ü için teorik bileşim değerleri verilmiştir.



Şekil 5.1: Agrega Karışımının Granülometrisi ve Referans Eğrileri

5.3. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Üretilen iki farklı KYB bileşiminde; bağlayıcı madde olarak çimento ile birlikte uçucu külün kullanıldığı ve su/bağlayıcı oranı 0,32 olan karışım KYB-U32; sadece çimentonun kullanıldığı ve su/bağlayıcı oranı 0,40 olan karışım ise KYB-C40 olarak kodlanmıştır.

Tablo 5.7: Teorik Malzeme Miktarları ve Bileşen Oranları ($1m^3$ için)

Malzeme Miktarları (kg) ve Oranlar	KYB-U32	KYB-C40
Çimento	355	475
Uçucu Kül	150	-
Su	160	190
Doğal Kum	428	431
Kırma Kum	380	383
Kırmataş 1	365	368
Kırmataş 2	465	469
S. Akışkanlaştırıcı	3,55	3,54
Su/Çimento	0,40	0,40
Su/Bağlayıcı	0,32	0,40
Hamur/Agrega (Hacimce)	0,55	0,55

5.4. Numune Boyutları ve Şekilleri

Bu çalışmada; her bir karışım için:

- 1 adet 1000 x 1000 x 100 mm boyutlu prizmatik numune,
- 1 adet 500 x 500 x 80 mm boyutlu prizmatik numune,
- 6 adet 400 x 100 x 100 mm boyutlu prizmatik numune,
- 30 adet 150/300 mm boyutlu silindir numune üretilmiştir.



Şekil 5.2: Deneysel Çalışmada Kullanılan Numune ve Kalıplar

6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

6.1. Taze Beton Deneyleri

6.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

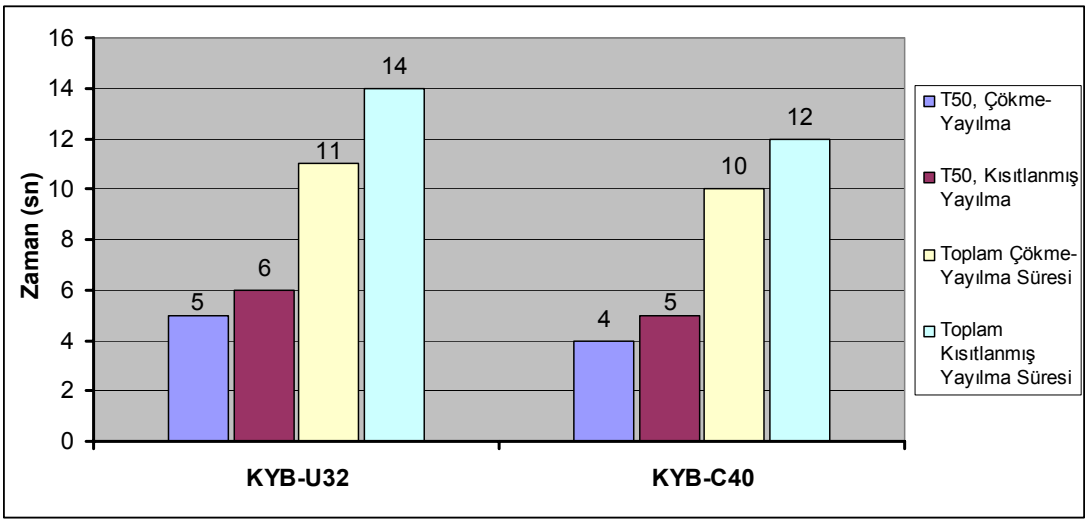
Üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmeden önce silindir şeklinde, hacmi ve darası bilinen bir kap içerisine yerleştirilerek taze beton birim ağırlıkları bulundu. Üretilen betonların birim ağırlıkları Tablo 6.1'de yer almaktadır.

6.1.2. Çökme-Yayılma Deneyi

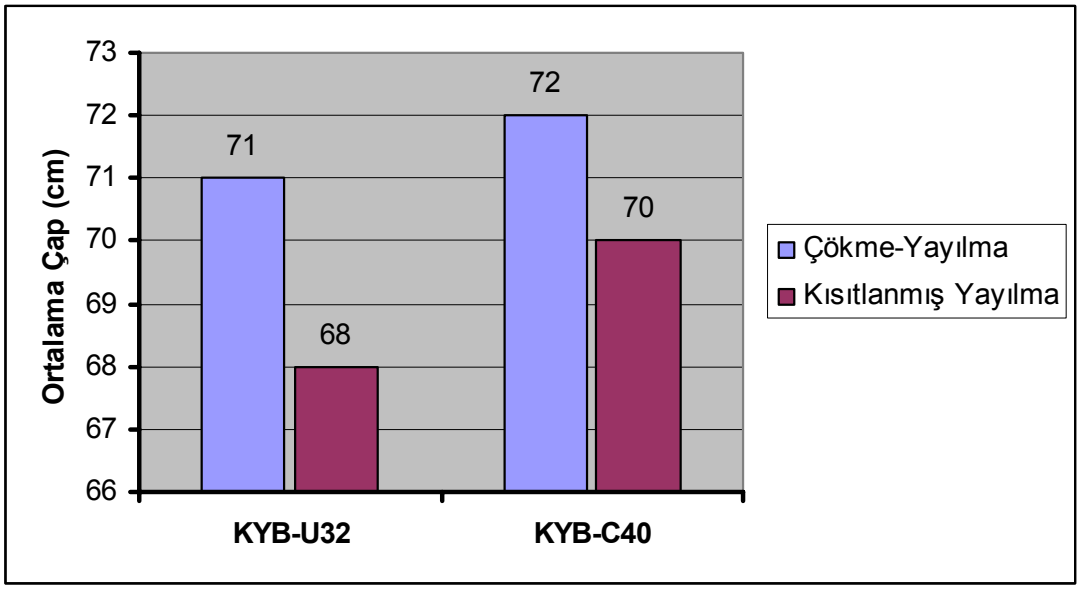
Üretilen karışımların hiçbir engelin bulunmadığı durumda, kendi ağırlığı altında serbest halde deforme olabilme yeteneğini ölçmek amacı ile çökme-yayılma deneyi uygulanmıştır. Beton kendi ağırlığı ile yayılırken betonun 50 cm'ye yayılma süresi tablanın üzerine çizilen 50 cm çaplı daire yardımıyla ölçülmüş ve T_{50} olarak kaydedilmiştir. Yayılma bittikten sonra birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapları ölçülmüştür. Bunların ortalamaları alınarak toplam yayılma çapı bulunmuş ve yayılma bitene kadar geçen süre toplam yayılma süresi olarak kaydedilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de yer almaktadır.

6.1.3. Kısıtlanmış Yayılma Deneyi

Kendiliğinden yerleşen betonun engeller arasından geçiş yeteneğini ve bloklanma davranışını incelemek amacıyla İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı'nda geliştirilen, J-Halkası deneyine benzeyen ve kısıtlanmış yayılma deneyi olarak isimlendirilen deney yöntemi uygulanmıştır. Çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi çizilen 50 cm'lik daire yardımıyla T_{50} süresi ölçülmüş, toplam yayılma süresi ve çapı bulunmuştur. Elde edilen değerler Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de yer almaktadır.



Şekil 6.1: Üretilen Karışımların Yayılma Süreleri



Şekil 6.2: Üretilen Karışımların Ortalama Yayılma Çapları

6.1.4. Priz Süresi Deneyi

Priz süresi deneyi BS EN 13294'e uygun olarak yapılmıştır [34]. 5 mm elek açıklığından geçen karışımlar standartta öngörülen bir kaba konmuş ve buharlaşma engellenmiştir. Penetrasyon direnci priz başlangıcı için 0,5 N/mm^2, prizin tamamlanması için 3,5 N/mm^2 olarak tayin edilmiştir. Buna göre yarım saatte bir ölçüm yapılmış, sonuçlar doğrusal interpolasyon ile hesap edilmiştir. Belirlenen priz süreleri Tablo 6.1'de yer almaktadır.

Tablo 6.1: Birim Ağırlık, Priz Süresi ve Terleme Deneyi Sonuçları

		KYB-U32	KYB-C40
Birim Ağırlık (g/cm^3)		2,31	2,32
Priz Süresi (dak)	Başlangıç	288	250
	Bitiş	505	367
Terleme (B)		-	0,005

6.1.5. Terleme Deneyi

Terleme deneyi TS EN 480-4'e uygun olarak yapılmıştır [35]. Silindir deney kabına alınan taze beton karışımının, ilk 40 dakika içinde her 10 dakikada bir defa, devamında ise her yarım saatte bir defa olmak üzere yüzeyindeki su cam pipet ile alınmıştır.

Terleme miktarı (B), betonun içerisindeki toplam suyun yüzdesi olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$B = \frac{m_w}{w \times m_s} \times 100 \qquad \textbf{(6.1)}$$

m_w : Terleme suyu kütlesi, g

w : Numune kütlesi, g

m_s : Taze beton içerisindeki suyun kütlece oranıdır.

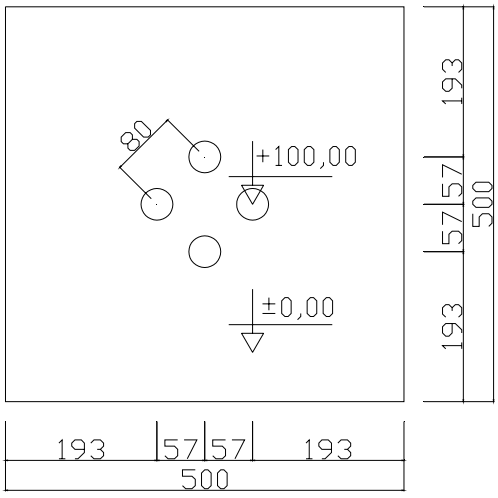
Terleme deneyi sonuçları Tablo 6.1'de verilmektedir.



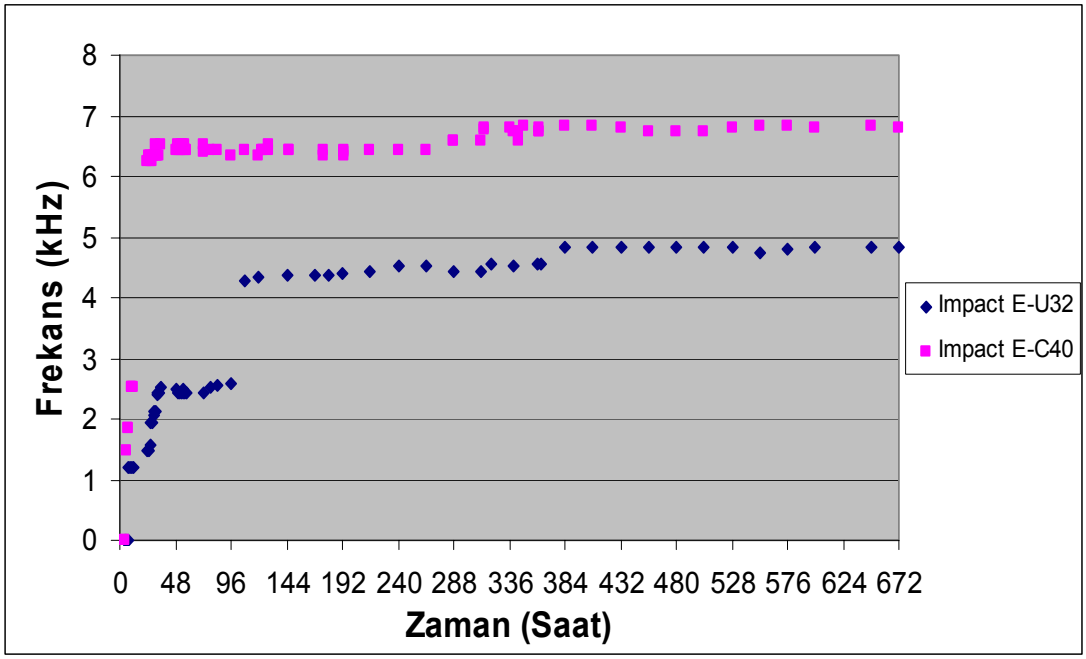
Şekil 6.3: Priz Süresi ve Terleme Deneyleri

6.2. Sertleşen Beton Deneyi: Impact-Echo

"Impact-echo" deneyi, 500x500x80 mm'lik prizmatik kalıp içerisine, Şekil 6.4'teki gibi yerleştirilen 100 mm uzunluğunda ve 40 mm çapındaki 4 adet çelik donatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Priz başlangıcından itibaren uygulanan deneyde, donatı üzerinden betondaki frekans değişimi takip edilmiş ve ölçülen baskın frekanslar Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Impact-Echo Deneyi İçin Kullanılan Kalıp ve Donatı Yerleşim Planı



Şekil 6.5: Üretilen Betonlara Ait Frekans-Zaman Grafiği

6.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

6.3.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Deneyi

Basınç deneyleri çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan silindir numuneler üzerinde, U-TEST marka yükleme makinesi kullanılarak 13,5 kN/sn sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Deney TS EN 12390-3'e uygun olarak yapılmış ve her bir numuneye ait kırma yükünden basınç dayanımı (f_c) belirlenmiştir [36]. Beton dökümünü takip eden 1, 3, 7 ve 28. günlerde her bir beton karışımına ait üç silindir numune basınç deneyine tabi tutulmuş ve sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Elastisite modülü deneyi NT BUILD 205'e uygun olarak yapılmıştır [37]. Buna göre gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki maksimum yükün %33'üne kadar olan kısmının eğimi kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Beton dökümünü takip eden 7 ve 28. günlerde her bir beton karışımına ait üç silindir numunenin elastisite modülü bulunmuş ve elde edilen değerler Tablo 6.2'de verilmiştir.

6.3.2. Yarmada Çekme Deneyi

Yarma deneyleri çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. TS EN 12390-6'ya uygun olarak gerçekleştirilen deneylerde numunelere 3 kN/sn'lik sabit bir yükleme hızı ile çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri bulunmuş ve bu kuvvetlerden (6.2) denklemi kullanılarak yarmada çekme dayanımları hesap edilmiştir [38].

$$f_{cy} = \frac{2F}{\pi DL} \qquad \textbf{(6.2)}$$

f_{cy} : Yarmada Çekme Dayanımı, N/mm^2

F : Kırma Yükü, N

L : Numunenin yükleme çizgisine temas çizgisi uzunluğu, mm

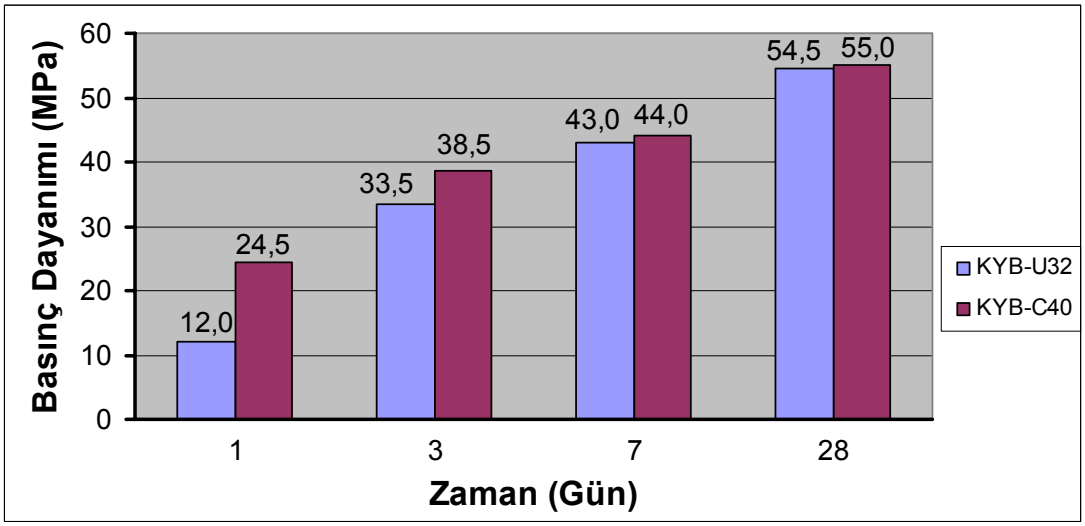
D : Numunenin seçilen enkesit boyutudur, mm.

Beton dökümünü takip eden 1, 3, 7 ve 28. günlerde her bir beton karışımına ait üç silindir numune yarma deneyine tabi tutulmuş ve sonuçlar Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

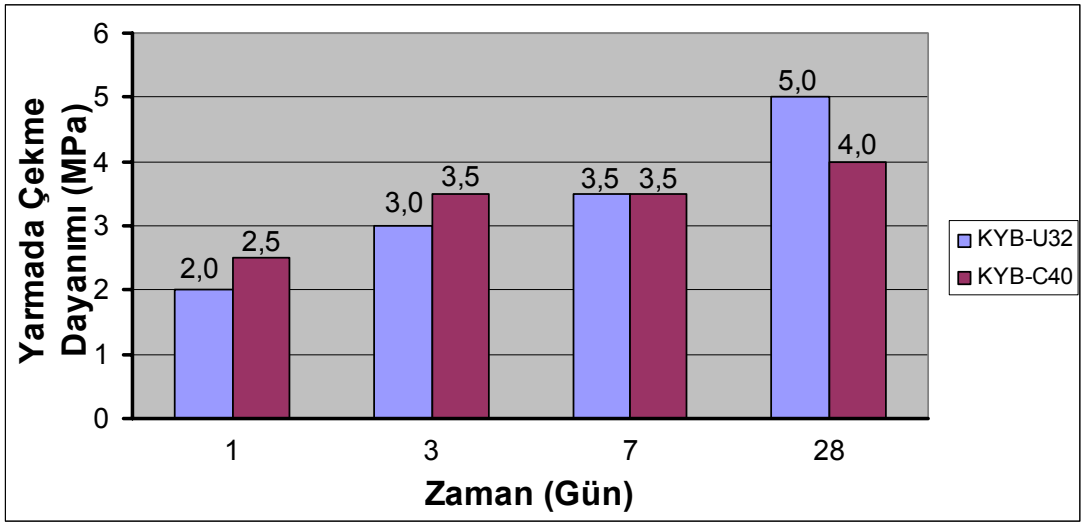
Tablo 6.2: Sertleşmiş Betonların Mekanik Özellikleri

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		Elastisite Modülü (GPa)	
	KYB-U32	KYB-C40	KYB-U32	KYB-C40	KYB-U32	KYB-C40
1	11,87	24,19	1,94	2,58	-	-
	11,95	24,46	1,93	2,71		
	11,95	25,54	2,03	2,93		
3	33,71	36,91	3,45	3,08	-	-
	32,93	39,26	3,18	3,43		
	33,19	39,25	2,97	3,27		
7	41,57	43,5	3,59	3,59	28,45	30,39
	43,16	44,11	3,86	3,61	29,89	31,26
	43,41	44,2	3,62	3,33	29,49	31,62
28	52,55	53,98	4,83	3,83	36,93	37,54
	54,9	54,42	5,26	4,22	36,88	37,37
	55,33	56,32	4,46	3,91	37,89	39,0

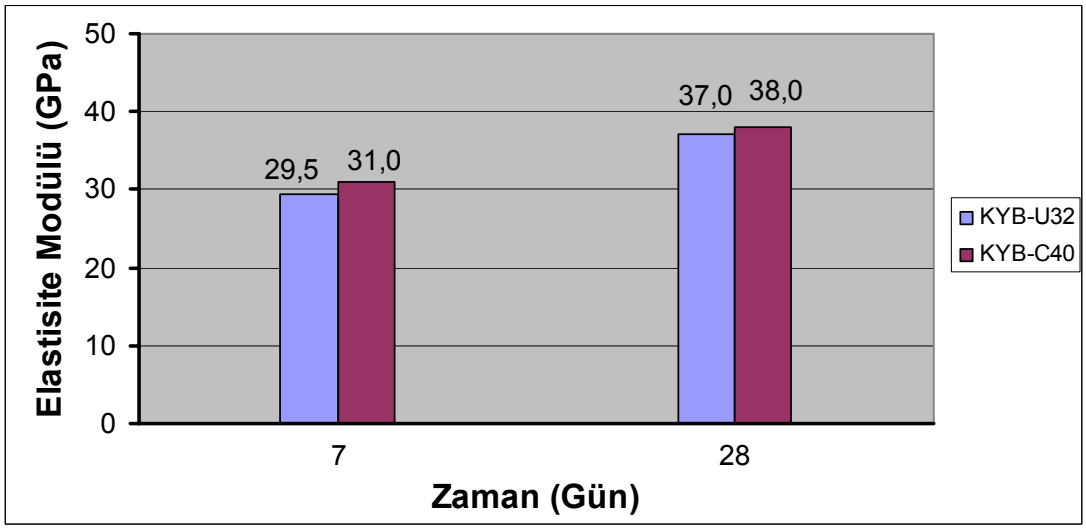
Her iki karışıma ait basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin ortalaması alınarak karşılaştırma grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler Şekil 6.6, 6.7, 6.8 ve 6.9'da yer almaktadır. Her iki karışımın 28. günde elde edilen basınç ve yarma dayanımlarına göre düzenlenen rölatif dayanım değerleri ise Şekil 6.10'da verilmektedir.



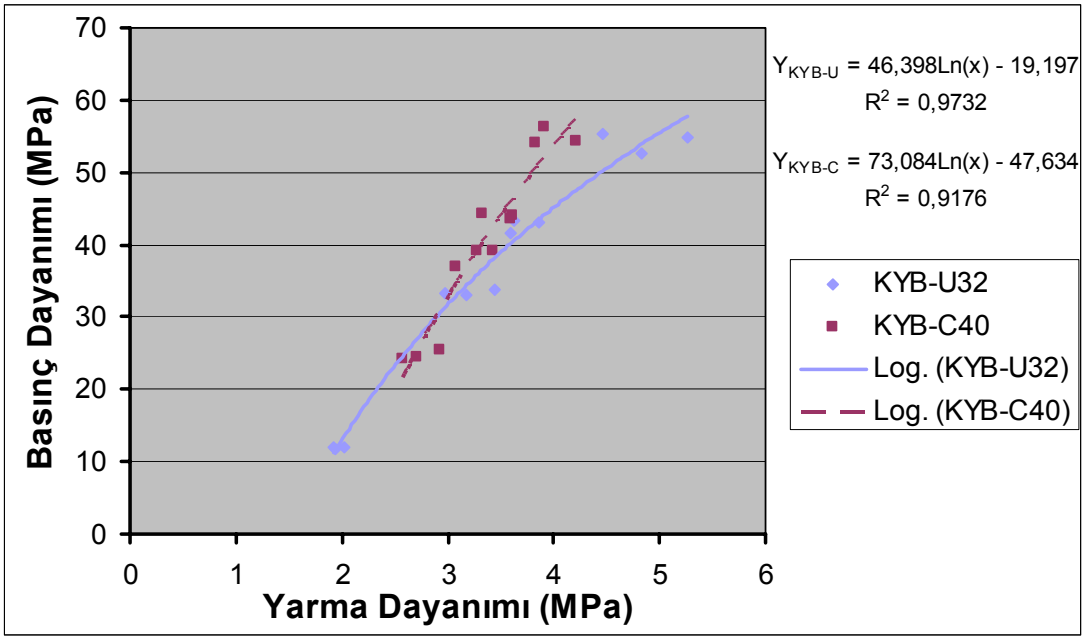
Şekil 6.6: Üretilen Betonların Ortalama Basınç Dayanımları



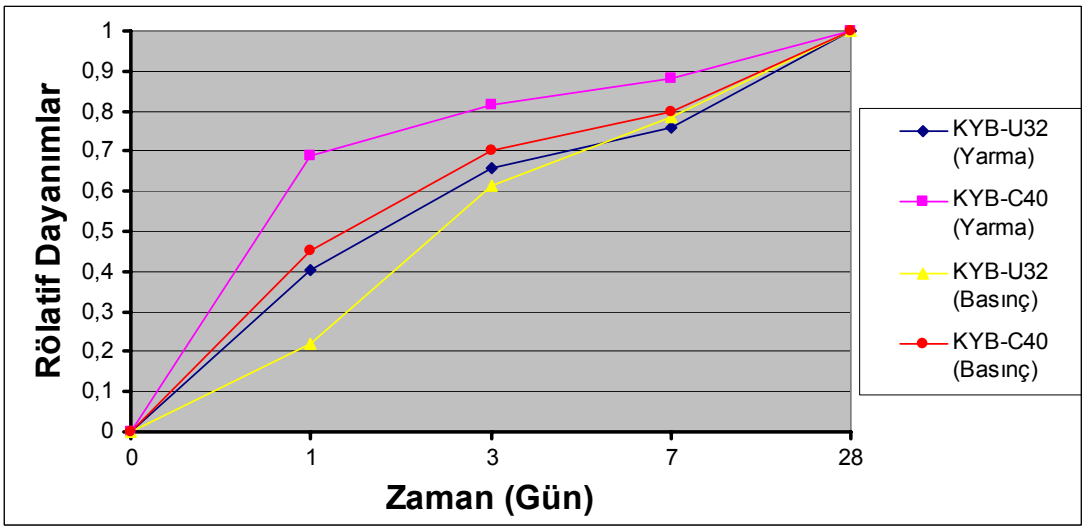
Şekil 6.7: Üretilen Betonların Ortalama Yarmada Çekme Dayanımları



Şekil 6.8: Üretilen Betonların Ortalama Elastisite Modülleri

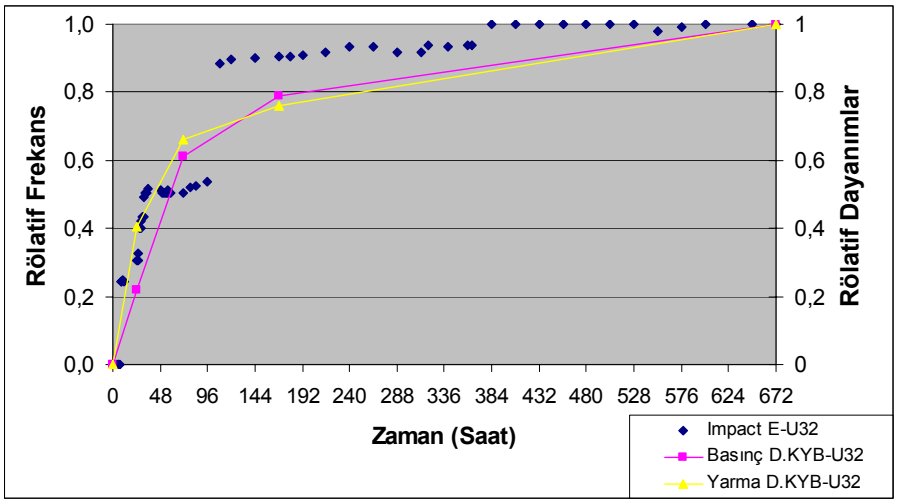


Şekil 6.9: Üretilen Betonların Basınç ve Yarmada Çekme İlişkisi

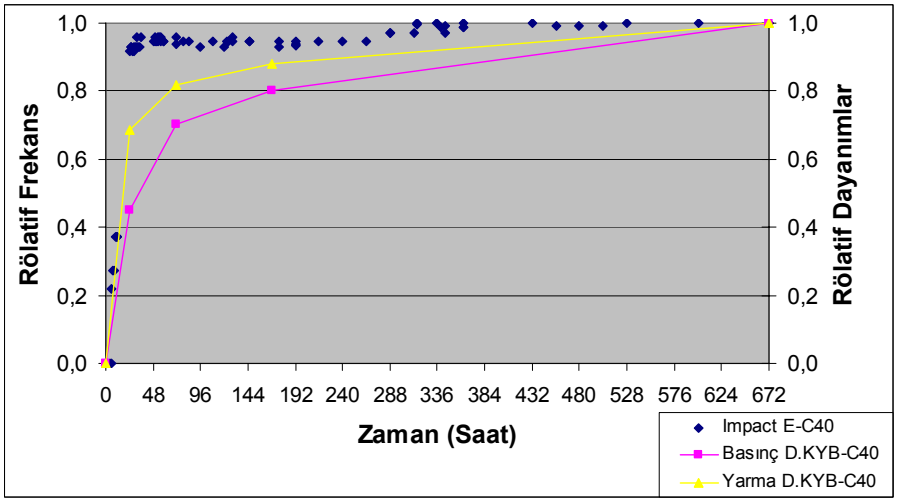


Şekil 6.10: Üretilen Betonların Rölatif Dayanımları

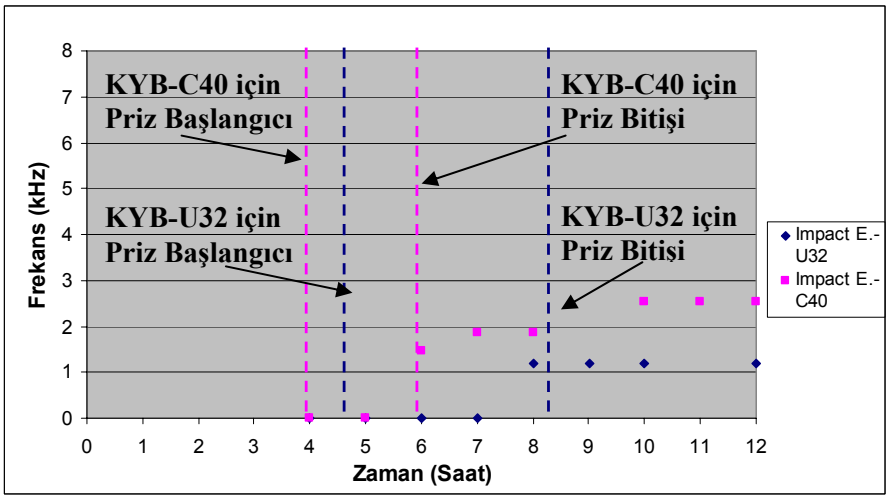
Üretilen betonların rölatif basınç ve yarma dayanımları ile rölatif frekans gelişimleri karşılaştırılmış, sonuçlar Şekil 6.11 ve 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11: KYB-U32 Kodlu Betonun Rölatif Dayanım ve Frekans Değişimi



Şekil 6.12: KYB-C40 Kodlu Betonun Rölatif Dayanım ve Frekans Değişimi



Şekil 6.13: Üretilen Betonların Priz Süreleri ve Frekans Değişimi

6.3.3. Rötre Deneyleri

Rötre deneyleri kapsamında her bir karışım için serbest rötre, otojen rötre ve kısıtlanmış rötre olmak üzere toplam 3 tür rötre deneyi yapılmıştır. Serbest rötre ve otojen rötre ölçümlerinde, numune uzunluğunun enkesit boyutlarından daha büyük olması halinde rötrenin yalnız uzunluk doğrultusunda meydana geleceği kabul edilmiş ve buna göre lineer deformasyon ölçümleri yapılmıştır [39]. Ölçümler 0,002 mm hassasiyete sahip DEMEC aleti ile kalıplara yerleştirilen ölçüm diskleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiş ve 28 gün boyunca sürmüştür.

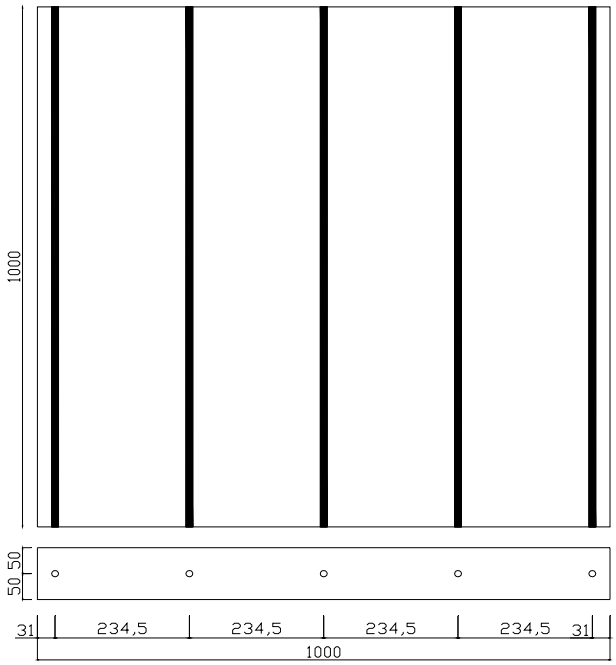
Serbest rötre deneyi için 100x100 mm'lik enkesite sahip, uzunluğu 400 mm olan prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her bir karışım için 3 adet numune alınmış, numuneler prizini tamamladıktan sonra kalıplarından çıkarılıp havada kurumaya bırakılmıştır. Bu numunelerde meydana gelen rötre, toplam rötre olarak ifade edilmiştir.

Otojen rötre deneyi için serbest rötre deneyinde olduğu gibi 100x100 mm'lik enkesite sahip, uzunluğu 400 mm olan prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her bir karışım için 3 adet numune alınmıştır. Ortamla nem ve sıcaklık alışverişini kesmek için numuneler prizini tamamladıktan sonra kalıplarından çıkarılıp önce alüminyum folyo ile kaplanmış daha sonra etrafına 2 tabaka plastik film sarılmıştır.

Kısıtlanmış rötre deneyi için levha deneylerine benzer bir model geliştirilmiştir. Döşeme türünde olan 1000x1000x100 mm boyutlarındaki bu modele, 12 mm çapında 5 adet nervürlü çelik donatı Şekil 6.14'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Betonun kalıba yerleştirilmesinden itibaren 3 gün boyunca telis bezi ile su kürü uygulanmıştır. Deformasyon ölçümleri beton yüzeyine yerleştirilen diskler sayesinde gerçekleştirilmiş ve deney değerlendirmesi ölçülen deformasyonlarla birlikte ilk çatlak oluşumunun gözlendiği süre, ortalama çatlak genişliği, maksimum çatlak genişliği gibi kavramlar üzerinden yapılmıştır.

Her üç rötre deneyinde de numunelere ısıölçer (ısılçift; termokapıl) yerleştirilerek betonda oluşan sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve her 10 dakikada bir ölçülen sıcaklık değişimleri termik genleşme katsayısı (TGK) yardımıyla deformasyona çevrilmiştir.

Yapılan tüm rötre deneyleri sıcaklığın ortalama 21±2°C, bağıl nemin ortalama %55±10 olduğu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14: Kısıtlanmış Rötre Modeli ve Donatı Yerleşimi

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, ölçülen uzunluk değişimleri termik deformasyon ve rötrenin toplamı olarak kabul edilmiştir. Buna göre ölçülen toplam deformasyondan, termik deformasyonun çıkarılmasıyla rötre deformasyonu elde edilmiştir. Isıölçer vasıtasıyla kaydedilen sıcaklık değişimleri TI-B 102 (95) standardına göre termik deformasyona çevrilmiştir [40]. Bu standarda göre rötre deformasyonu:

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_b(t) - \alpha_b[T_b(t) - T_b(t_0)] \qquad \textbf{(6.3)}$$

denklemi ile hesap edilmektedir. Denklemde:

$\varepsilon_r(t)$: (t) anında numunedeki rötre deformasyonunu,

$\varepsilon_b(t)$: (t) anında numunedeki toplam deformasyonu,

α_b : Betonun termik genleşme katsayısını,

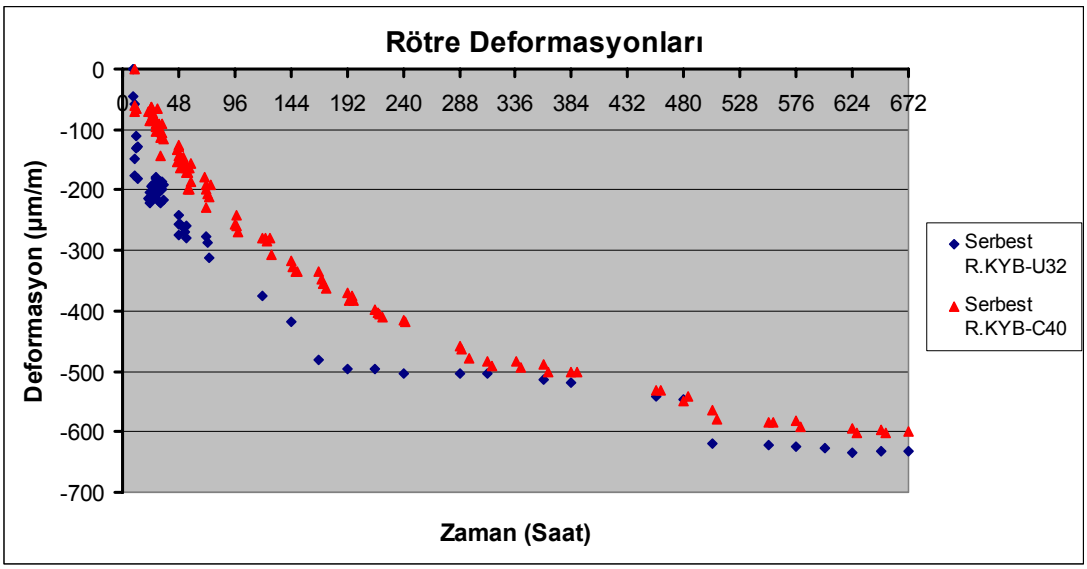
$T_b(t)$: (t) anında betonun sıcaklığını,

$T_b(t_0)$: (t_0) anında betonun sıcaklığını ifade etmektedir.

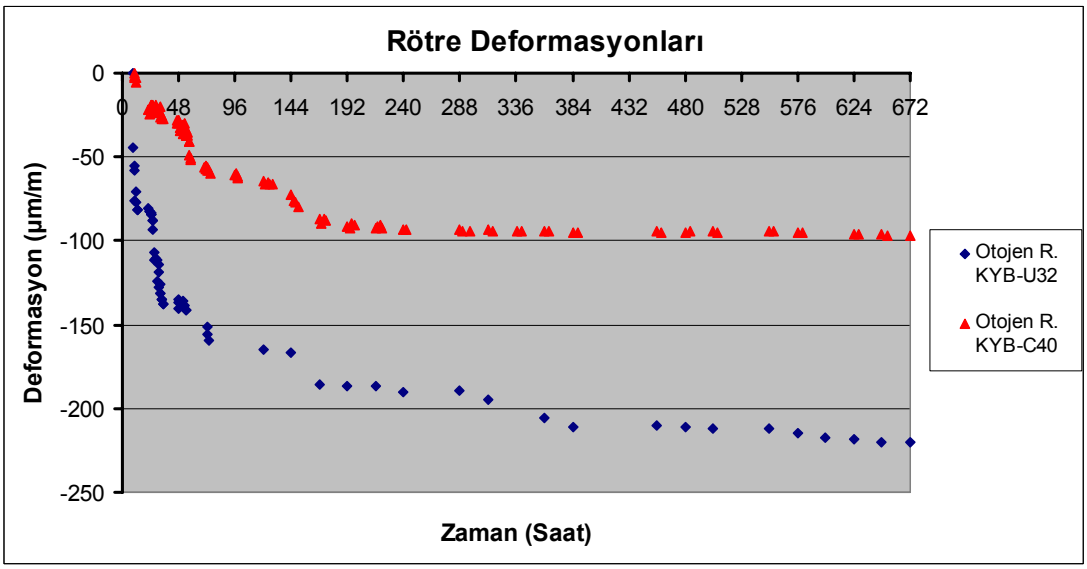
Üretilen betonların termik genleşme katsayıları deneysel olarak belirlenmiş ve her iki karışım için $6x10^{-6}$ 1/°C değeri kullanılmıştır.

Tazawa ve arkadaşlarının yaptığı çalışma baz alınarak kuruma rötresi değerleri hesaplanmıştır [41]. Buna göre kuruma rötresi değerleri, toplam rötreden otojen rötre çıkartılarak elde edilmiştir.

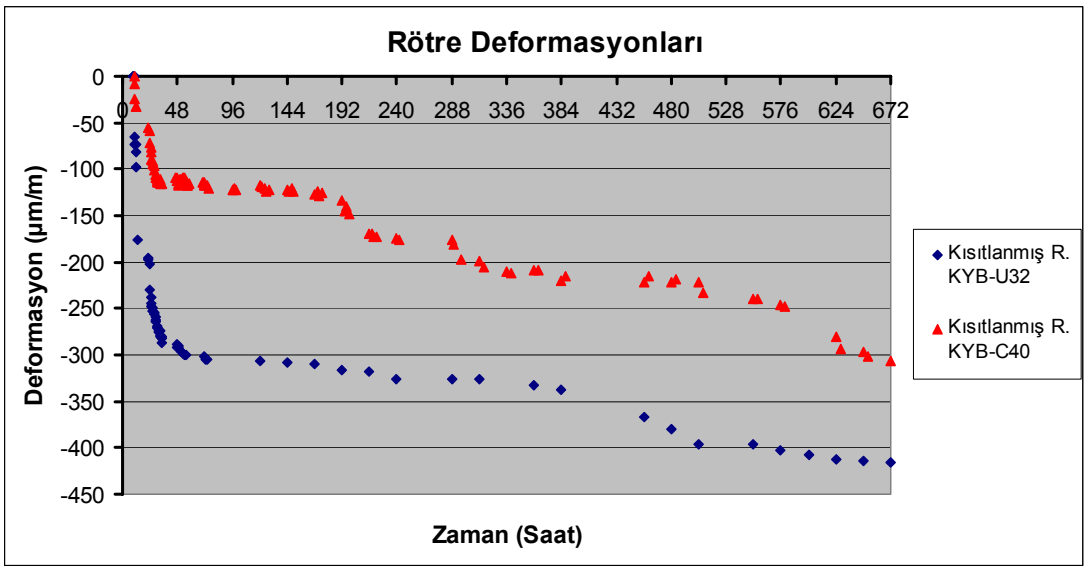
Karışımların rötre deformasyonları Şekil 6.15, 6.16, 6.17 ve 6.18'de gösterilmektedir.



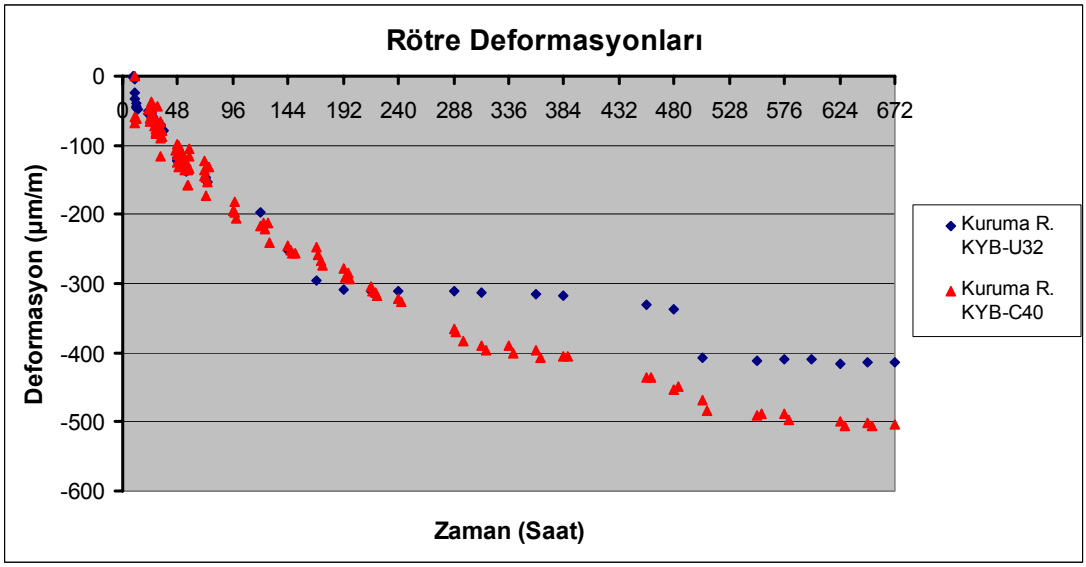
Şekil 6.15: Serbest Rötre Numunelerinde Ölçülen Ortalama Rötre



Şekil 6.16: Otojen Rötre Numunelerinde Ölçülen Ortalama Rötre

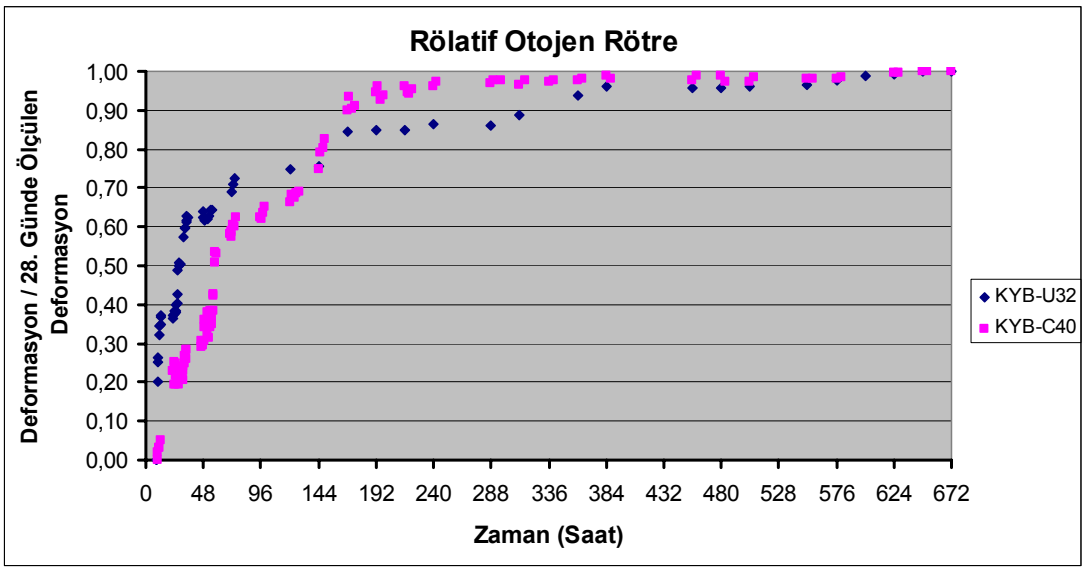


Şekil 6.17: Kısıtlamış Rötre Deneyinde Ölçülen Ortalama Rötre

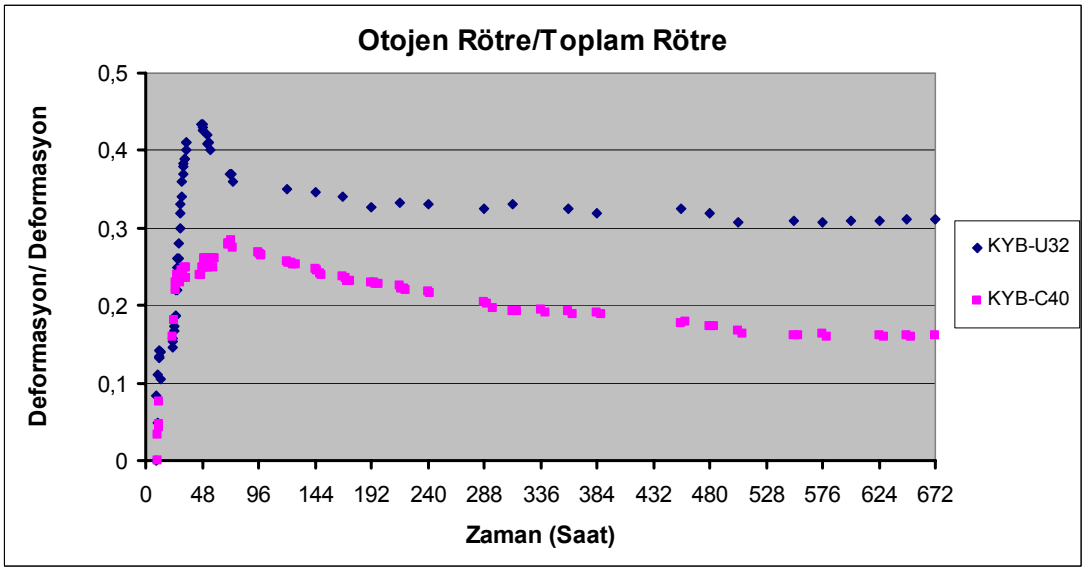


Şekil 6.18: Karışımların Hesaplanan Kuruma Rötreleri

Her iki karışımın 28. gündeki otojen rötre deformasyonuna göre düzenlenen rölatif otojen rötre değerleri Şekil 6.19'da, otojen rötrenin hâsıl olan toplam (serbest) rötreye oranı ise Şekil 6.20'de yer almaktadır.



Şekil 6.19: Üretilen Betonların Rölatif Otojen Rötre Değerleri



Şekil 6.20: Üretilen Betonlarda Otojen Rötre-Toplam Rötre İlişkisi

Kısıtlanmış rötre modelinde görülen çatlakların yüzeydeki ve enkesit içerisindeki dağılımı Şekil 6.21'de gösterilmektedir.



Şekil 6.21: Kısıtlanmış Rötre Modelinin Kuruma Yüzeyindeki Çatlaklar ve Donatı Doğrultusuna Dik Enkesiti

6.4. Taze Beton Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çökme-yayılma deneyleri neticesinde elde edilen veriler incelendiğinde iki betonun birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 6.1'de görülen yayılma süreleri incelendiğinde, KYB-U32 kodlu betonda, nispeten yüksek bağlayıcı miktarı ile birlikte artan viskoziteden ötürü yayılma süresi çok küçük bir miktar artmaktadır. Şekil 6.2'de görülen toplam yayılma çapları incelendiğinde her iki karışımın da istenen KYB özelliklerini sağladığı görülmektedir.

Kısıtlanmış yayılma deneyinde belirlenen yayılma süreleri ve çaplar karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar çökme-yayılma deneyi ile benzerlik göstermektedir. Deney süresince, her iki karışım için de, herhangi bir bloklanma veya segregasyon görülmemiştir.

Terleme deneyi sonucunda, uçucu kül katkılı betonda terleme görülmezken, mineral katkısız KYB-C40 kodlu betonda çok küçük bir oranda terleme gözlenmiştir.

6.5. Sertleşen Beton Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Impact-echo deneyinde elde edilen baskın frekansların yer aldığı Şekil 6.5 incelendiğinde KYB-C40 kodlu betonda frekans değişiminin büyük kısmının KYB-U32 kodlu betona göre daha erken tamamlandığı görülmektedir. Şekil 6.11 ve 6.12 incelendiğinde her iki betonun dayanım kazanma hızları ile frekans değişiminin benzerlik gösterdiği görülmektedir. BS EN 13294'e göre belirlenen priz süreleri göz önüne alındığında, Şekil 6.13'te de görüldüğü gibi, katı iskelet oluşup betondan frekans alınmaya başlanmasıyla priz sonu süreleri yakınlık taşımaktadır.

6.6. Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

6.6.1. Basınç Dayanımı Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Basınç deneyi sonuçlarının verildiği Şekil 6.6 incelendiğinde üretilen betonların 28. gündeki basınç dayanımları (55 MPa) yaklaşık olarak eşit çıkmaktadır. Şekil 6.10'da görüldüğü gibi dayanım kazanma hızlarının farklılık gösterdiği betonlarda, KYB-C40 kodlu beton 1. günde, 28. günde kazandığı dayanımın % 45'ine ulaşırken, aynı oran KYB-U32 kodlu betonda % 22 olmaktadır. Bu oran 7. günde her iki beton için de yaklaşık olarak % 80 değerinde eşitlenmektedir.

6.6.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarmada çekme deneyi sonuçlarının verildiği Şekil 6.7 incelendiğinde KYB-U32 kodlu betonun 28. gündeki yarmada çekme dayanımı 5 MPa olurken, KYB-C40 kodlu betonunki 4 MPa olmaktadır. Rölatif dayanımların yer aldığı Şekil 6.10 incelendiğinde KYB-C40 kodlu beton 1. günde, 28. günde kazandığı dayanımın yaklaşık % 70'ine ulaşırken, aynı oran KYB-U32 kodlu betonda % 40 olmaktadır. 7. günde bu oran KYB-C40 ve KYB-U32 kodlu betonlar için sırasıyla % 88 ve % 76 olmaktadır.

6.6.3. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Şekil 6.8 incelendiğinde mineral katkısız KYB-C40 kodlu betonun daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Karışımların 28. gün sonunda belirlenen elastisite modülleri KYB-U32 ve KYB-C40 kodlu betonlar için sırasıyla 37 ve 38 GPa olarak tespit edilmiştir. 7. günde elde edilen elastisite modülü

değerlerinin (29,5 ve 31 GPa) 28. gün sonundaki elastisite modüllerine oranı sırasıyla %80 ve %82 olmaktadır.

6.6.4. Rötre Deneylerinin Değerlendirilmesi

Kuruma ortamında tutulan numunelerdeki serbest rötre deformasyonlarının yer aldığı Şekil 6.15 incelendiğinde 28. gün sonunda KYB-U32 kodlu numunelerde daha fazla serbest rötre meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 6.16'da görüldüğü gibi KYB-U32 kodlu numunelerde görülen otojen rötre, KYB-C40 kodlu numunelerdekine göre daha fazla olmaktadır. 28. gün sonunda KYB-U32 kodlu numunelerde ölçülen otojen rötre değeri 220 μm/m olurken, aynı değer KYB-C40 kodlu numuneler için yaklaşık olarak 100 μm/m değerinde kalmaktadır. Bir başka deyişle, su/bağlayıcı oranı daha düşük olan uçucu kül katkılı betonda daha çok otojen rötre deformasyonu görülmektedir.

Kısıtlanmış rötre modeli üzerindeki lineer deformasyon ölçümlerinin neticesinde elde edilen rötre değerleri, serbest ve otojen rötre sonuçlarına benzer şekilde KYB-U32 kodlu betonda daha fazla olmaktadır. Şekil 6.17'de görüldüğü gibi, 28. gün sonunda ölçülen rötre deformasyonu KYB-U32 kodlu betonda 415 μm/m olurken, KYB-C40 kodlu betonda bu değer 305 μm/m olmaktadır.

Şekil 6.18'deki hesaplanan kuruma rötresi değerleri incelendiğinde, mineral katkısız KYB-C40 kodlu beton numunelerinde daha fazla kuruma rötresi oluştuğu görülmektedir.

Otojen rötrenin zaman içerisindeki gelişiminin yer aldığı Şekil 6.19 incelendiğinde, KYB-U32 kodlu betonun 28. gün sonundaki rötresinin yaklaşık %40'ını ilk 24 saat sonunda gerçekleştirdiği belirlenmektedir. 72. saat sonunda %70 olan bu değer, 1 hafta sonunda yaklaşık %85 olmaktadır. KYB-C40 kodlu beton aynı zaman dilimleri altında incelendiğinde rölatif rötre değerleri sırasıyla %20, %60 ve %90 olmaktadır.

Şekil 6.20'de, meydana gelen toplam rötrenin ne kadarının otojen rötre tarafından oluşturulduğu gösterilmektedir. Buna göre zirve değerler incelendiğinde, KYB-U32 kodlu numunelerde 48. saat sonunda meydana gelen toplam rötrenin yaklaşık %43'lük kısmını otojen rötre oluşturmaktadır. 28. gün sonunda bu oran yaklaşık %32 olmaktadır. KYB-C40 kodlu numuneler için bu zirve değer 72. saat sonunda %28 olurken, 28. gün sonunda bu değer %16'da kalmaktadır. İki karışım

karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranı daha düşük olan KYB-U32 kodlu betonda meydana gelen toplam rötredeki otojen kısmın daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Kısıtlanmış rötre deneyi neticesinde, her iki beton yüzeyinde de hücre tipindeki kuruma rötresi çatlakları görülmüştür. KYB-U32 kodlu betonda ilk çatlak oluşumu 15. günde olmakta iken bu süre KYB-C40 kodlu betonda 8. gün olarak gözlemlenmiştir. Oluşan çatlak genişlikleri ölçüldüğünde KYB-U32 kodlu betonda 3 ay sonundaki maksimum çatlak genişliği 0,30 mm, 6 ay sonunda ise 0,33 mm olmaktadır. KYB-C40 kodlu betonda ölçülen maksimum çatlak genişlikleri ise 3 ve 6 ay sonunda sırasıyla <0,15 mm ve 0,15 mm olarak tespit edilmiştir.

7. GENEL SONUÇLAR

- Taze beton deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre üretilen karışımların taze beton özellikleri birbirine benzemektedir. KYB-U32 kodlu uçucu kül içeren karışımda bağlayıcı dozajının artması viskozitenin artmasına, dolayısı ile T_{50} ve toplam yayılma süresinin artmasına neden olmuştur.
- Üretilen betonların mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, karışımların 28. gündeki basınç ve yarmada çekme dayanımları ile elastisite modülleri yaklaşık olarak eşit çıkmıştır; ancak uçucu kül katkılı beton, bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı betona göre daha yavaş dayanım kazanmıştır.
- Gerilme dalgaları kullanarak beton içerisindeki frekans değişiminin takip edildiği Impact-Echo deneyi neticesinde her iki karışımda da frekans gelişimi ile dayanım gelişiminin benzer nitelik taşıdığı tespit edilmiştir. Ayrıca taze beton deneylerinde bulunan priz sonu süreleri ile betondan frekans alınmaya başlandığı süreler yaklaşık olarak birbirine eşit çıkmıştır. Bu deney yöntemi, ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda farklı özelikteki betonlar için tekrarlanmalı, dayanım gelişiminin takibinde ve priz sürelerinin belirlenmesinde uygulanabilirliği araştırılmalıdır.
- Aynı su/çimento oranına sahip iki KYB karışımından; uçucu kül katkılı ve su/bağlayıcı oranı 0,32 olan KYB-U32 kodlu betonda ölçülen serbest, otojen ve kısıtlanmış rötre değerleri, su/bağlayıcı oranı 0,40 olan mineral katkısız KYB-C40 kodlu betona göre daha fazla olmaktadır. Buna ek olarak, KYB-U32 kodlu betonun sahip olduğu düşük su/bağlayıcı oranı, daha ince boşluk yapısı ve dolayısıyla daha düşük bağıl nemden ötürü otojen deformasyonun daha süratli olmasına neden olmaktadır.
- Kısıtlanmış rötre modelinde elde edilen çatlak genişlikleri karışımların rötre potansiyelleri ile paralellik göstermektedir. Yaklaşık eşit elastisite modülüne ve yarmada çekme dayanımına sahip betonlardan, serbest rötre miktarı daha fazla olan uçucu kül katkılı betonda belirlenen ortalama ve maksimum çatlak genişlikleri diğerine göre daha fazla olmaktadır. Buna karşın mineral katkısız betonda çatlak oluşumunun daha erken gerçekleşmesi, beton içerisinde hâsıl olan

çekme sünmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kısıtlanmış rötre deneylerinde meydana gelen gerilmeler ve çekme sünmesi belirlenmeli, farklı türdeki mineral katkıların gerilme gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Newman, J. and Choo, B.S.,** 2003. Advanced Concrete Technology / Processes, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[2] **Okamura, H. and Ouchi M.,** 2003. Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium,* Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, pp. 3-5.

[3] **Fernandez-Gomez, J. and Landsberger, G.A.,** 2007. Evaluation of Shrinkage Prediction Models for Self Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal,* **104**, 464-473.

[4] **Bui, V.K, Akkaya, Y. and Shah S.P.,** 2002. Rheological Model for Self Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, **99**, 549-559.

[5] **Walraven, J.,** 2003. Structural Aspects of Self Compacting Concrete, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium*, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, pp. 15- 22.

[6] **Şengül, C.,** 2005. Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ile Lif Dayanımının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Skarendahl, A.,** 2003. The Present – The Future, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium*, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, pp. 6-14.

[8] **Klug, Y. and Holschemacher K.,** 2003. Comparasion of the Hardened Properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium*, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, pp. 15- 22.

[9] **Lange, D.A.,** 2002. Overview of Driving Forces, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[10] **Lange, D.A. and Altoubat, S.A.,** 2002. Early Thermal Changes, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[11] **De Schutter, G.,** 2002. Thermal Properties, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[12] **Erdoğan, T.Y.,** 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Ankara.

[13] **Onaran, K.,** 2003. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

[14] **Lange, D.A. and Altoubat, S.A.,** 2002. Early Creep, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[15] **See, H.T, Attiogbe, E.K. and Miltenberger, M.A.,**2003. Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens, *ACI Materials Journal*, **100**, 239-245.

[16] **Mindess, S. and Young, J.F.,** 1981. Concrete, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

[17] **Neville, A. M.,** 2000. Properties of Concrete, Prentice Hall, England.

[18] **Akman, M.S.,** 2007. Yüksek Performanslı Betonlarda Otojen Rötre, *SİKA Teknik Bülten / Makaleler*, İstanbul.

[19] **Bentur, A.,** 2002. Terminology and Definitions, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[20] **Barcelo, L.,** 2002. Chemical Shrinkage, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[21] **Jensen, O.M., Christensen, S.L., Dela B.F., Hansen, J.H., Hansen, P.F. and Nielsen A.,** 1997. Shrinkage of Mortar and Concrete, *HETEK Report No: 110*, Denmark.

[22] **Baroghel-Bouny, V.,** 2002. Hydration and Moisture Distribution, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[23] **Pekmezci, B.Y., Uyan, M. ve Akman, M.S.,** 2005. Çimento Karakteristiklerinin Otojen Rötre Büyüklüğüne Etkileri, *VI. Ulusal Beton Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 16-18 Kasım, s. 437-446.

[24] **Lim, S.N. and Wee, T.H.,** 2000. Autogenous Shrinkage of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Concrete, *ACI Materials Journal*, **97**, 587-593.

[25] **Bisschop, J.,** 2002. Drying Shrinkage Cracking at Early Ages, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[26] **Postacıoğlu, B.,** 1986. Beton, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

[27] **Bentur, A.,** 2002. Overview of Early Age Cracking, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[28] **Shah, S.P., Karaguler, M.E. and Sarigaphuti, M.,** 1992. Effects of Shrinkage Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, 289-295.

[29] **Shah, S.P., Ouyang, C., Marikunte, S., Yang, W. and Becq-Giraudon, E.,** 1998. A Method to Predict Shrinkage Cracking of Concrete, *ACI Materials Journal*, **95**, 339-346.

[30] **Bentur, A.,** 2002. Early Age Cracking Tests, Early Age Cracking in Cementitious Systems, *Report of RILEM Technical Committee*, France.

[31] **Malhotra, V.M. and Carino, N.J.,** 2004. Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, USA.

[32] **Wiegrink, K., Marikunte, S. and Shah, S.P.,** 1996. Shrinkage Cracking of High Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, **93,** 1-8.

[33] **TS 706,** 2003. Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[34] **BS EN 12394,** 2002. Determination of Stiffening Time, *British Standards Institution*, UK.

[35] **TS EN 480-4,** 2001. Betonun Terlemesinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[36] **TS EN 12390-3,** 2003. Sertleşmiş Beton Deneyleri: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımını Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[37] **NT BUILD 205,** 1984. Modulus of Elasticity in Compression, *Nordisk Innovations Center*, Finland.

[38] **TS EN 12390-6,** 2002. Sertleşmiş Beton Deneyleri: Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımını Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[39] **Grzybowski, M. and Shah, S.P,** 1990. Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **87**, 137-148.

[40] **TI-B 102 (95),** 1996. Strains from Creep and Early Age Shrinkage, *Danish Technological Institute*, Denmark.

[41] **Tazawa, E., Sato, R., Sakai, E. and Miyazawa, S.,** 2000. Work of JCI Committee on Autogenous Shrinkage, *Proceedings of International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Paris, France, pp. 221-242.

ÖZGEÇMİŞ

Serhan Ulukaya, 11 Ocak 1984 tarihinde Antalya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya'da tamamladıktan sonra 2001 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. 2005 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra kısa bir süre Antalya Devlet Hastanesi inşaatında çalıştı ve 2005-2006 bahar yarıyılı başlangıcında İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başladı.