

Betonun zamana bağlı deformasyonlarının tahmini

Asker AKPEROV*, Saim AKYÜZ

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, normal ve düşük dayanımlı, katkısız ve mineral katkılı betonların sünme, temel sünme ve rötre deformasyonları incelenmekte, rötre ve sünme tahmin modelleri kullanılarak elde edilen sonuçların, deneysel rötre ve sünme değerlerine uygunluğu belirlenmektedir. Mineral katkılar olarak silis dumanı, uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu, rötre ve sünme deformasyonlarının deneysel değerlerinin tahmin edilmesi için ise ACI, CEB-FIP, B3 ve GL2000 modelleri kullanılmaktadır. Mineral katkılı ve referans betonlardan elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, mineral katkıların düşük dayanımlı betonların zamana bağlı deformasyonları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, buna karşın, normal dayanımlı betonlarda sünme ve rötre değerlerinde düşüşe neden olduğu belirlenmektedir. Rötre ve sünme tahmin modelleri ile elde edilen değerler analiz edildiğinde, B3 ve GL2000 modelleri yardımıyla elde edilen rötre tahmin sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkların kabul edilen sınırlar içerisinde kaldığı; sünme fonksiyonu tahmin değerlerinin kabul edilir sınırları aştığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sünme, rötre, zamana bağlı deformasyonlar, elastik deformasyon.

Prediction of the time dependent deformations of concrete

Abstract

In this study, the main objective is to analyze the creep, the basic creep and the shrinkage deformations of normal and low strength concretes with or without mineral admixture and to investigate of the agreement between the results that have been gained using creep and shrinkage prediction methods and the experimental values of creep and shrinkage. Eight concrete mixtures at two water/binder ratios (0,55 and 0,70) were produced by using either only cement as a binder or by partially replacing it with silica fume, fly ash or ground granulated blast furnace slag. As the experimental values taken from concretes with and without mineral admixtures are compared, it was found that the mineral admixtures did not have a significant effect on the time dependent deformations of low strength concretes, whereas in normal strength concretes they caused the creep and shrinkage values to decrease. On the other hand, comparison was made between the experimental results and the creep and shrinkage values that were obtained by applying creep and shrinkage prediction models; ACI, CEB-FIP, B3, GL2000. The results show that the differences between the experimental values of shrinkage and the values that were predicted by B3 and GL2000 models were within the accepted intervals ($\pm 100 \mu D$) whereas the values predicted by CEB-FIP and ACI 209 were outside those intervals. The deviations of the values of creep function (elastic deformation + creep deformation divided by the applied stress) from the experimental results were found to be outside the accepted intervals ($\pm 33 \mu D/MPa$).

Keywords: Creep, shrinkage, time dependent deformations, elastic deformation.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Asker AKPEROV. akperov75@yahoo.com; Tel: (536) 632 44 21.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Betonun zamana bağlı deformasyonlarının tahmini" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.08.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.10.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Beton yapılar dış çevrenin etkisi sonucu zamanla deformasyona uğrarlar. Yük etkisindeki betonda ilk anda oluşan deformasyon ani ve elastiktir, daha sonra zamana bağlı deformasyonlar oluşur. İlk anda oluşan deformasyonlar elastik, sonraki aşamada oluşan deformasyonlar ise sünme olarak adlandırılır. Betonun sünme deformasyonu temel sünme ve kuruma sünmesi olmak üzere iki kısma ayrılır (Bazant, 1989). Değişmez nem ortamında (çevre ile su alışverişinin önlenildiği durum) ve yük etkisinde betonda oluşan deformasyonlar temel sünme, değişen nem ortamında ve yük etkisinde oluşan deformasyonlar ise kuruma sünmesi olarak adlandırılır. Yük etkisi olmadan betondan su kaybı sonucu oluşan deformasyona kuruma rötresi denir (Kovler, 1997). Önceden yüklenmiş olan beton numunelerinde yük kaldırıldıktan sonra deformasyon ters yönde gelişmeye başlar; buna da sünme toparlanması denir. Gevşeme, sabit deformasyon etkisinde zamanla gerilmedeki azalmadır (Akyüz vd., 1985).

Sünme deneyleri açık (dış ortamla nem ilişkisi olan) ve kapalı (dış ortamdan yalıtılmış) numuneler üzerinde yapılabilir. Yalıtılmış numunelerde yapılan deneyler temel sünme deformasyonunu ölçmek için kullanılır, açık numunelerden elde edilen değerler ise toplam deformasyon değerleridir. Bu deformasyondan elastik deformasyonu ve kuruma rötresini çıkarmakla sünme deformasyonu elde edilir. Elastik deformasyon betona yük uygulanır uygulanmaz kaydedilir. Rötire deformasyon değerleri, beton numuneleri açık ortamda yüklenme yapılmaksızın elde edilir.

Mineral katkıların betonun sünme ve rötire deformasyonlarına etkisini incelemek için uçucu kül, silis dumanı, cüruf gibi mineral katkılar kullanılarak farklı betonlar üretilmiştir (ACI 234R-96, 1996; ASTM C 618-84, 1984).

Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında sünme ve rötrenin önceden tahmin edilebilmesinin çok büyük önemi vardır. Bu amaçla farklı tahmin modelleri ve metotları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, dört tahmin modeli kullanılmıştır; ACI (ACI Committee 209, 1982), CEB-FIP

(CEB-FIP Model Code, 1990), B3 (Bazant ve Baweja, 1994) ve GL2000 (Gardner ve Lockman, 2001). Bu modeller, deney sonuçları ile karşılaştırılarak deneylere yakınlıkları tespit edilmiştir. ACI modeli Amerika Beton Enstitüsü, CEB-FIP modeli Avrupa Beton Komitesi, B3 modeli Bazant, GL2000 modeli Gardner ve Lockman tarafından önerilmiştir.

Deneysel ve malzemeler

Beton karışımlarında, ince agrega olarak, tane boyutları 0-1 mm arasında değişen deniz kumu, gene ince agrega sınıfında, tane boyutları 0-4 mm arasında değişen incelikte kırmakum ve iri agrega olarak tane boyutları 4-16 mm arasında değişen kalker kırmataşı kullanılmıştır.

Bütün betonların üretiminde PÇ 42,5 cinsi bir çimento kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu ve mineral katkıların bu çimentonun %10'u kadarı ile yer değiştirilmesinden elde edilen bağlayıcılar kullanılmıştır. Üç tür mineral katkıdan yararlanılmıştır; silis dumanı, uçucu kül ve ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu. Bunların her biri çimento ile yer değiştirilerek üç tür mineral katkılı çimento elde edilmiştir. Taze betonda gereken işlenebilirliği elde etmek için normal dayanımlı karışık beton numunelerinde hiper akışkanlaştırıcı katkı, "Glenium 51" kullanılmıştır. Beton malzemelerinin özgül ağırlıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mineral katkı, çimento ve agregaların özgül ağırlıkları

PÇ	K.T	K.K	Kum	Silis Dumanı	Cüruf	Uçucu kül
3.14	2.7	2.68	2.62	2.06	2.86	2.03

PÇ: Portland çimentosu, K.T: Kırmataş, K.K: Kırmakumu göstermektedir.

Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve deformasyon ölçümü

Beton üretimi İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda mevcut olan beton karıştırma mikserlerinde gerçekleştirilmiştir. İlk

başta, agregalar tartılarak karıştırma kazanına konulmuş ve karışım suyunun bir miktarı ilave edilerek, 5-7 dakika karıştırılmıştır. Bundan sonra, imento ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiştir. Mineral katkılar en son karışıma katılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan ve çökme ve birim ağırlık deneyleri yapıldıktan sonra, beton karışımı kalıplara konularak vibratörle yerleştirilmiştir. Numuneler kalıba yerleştirildikten hemen sonra, hava teması açık olan yüzeyleri stretch filmle kapatılmıştır. Bunun yapılmasının esas nedeni deney başlamadan önce, numunelerin su kaybına uğramasını ve rötne oluşumunu engellemektir. Beton numuneleri 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün (19°C ± 2°C) sıcaklıkta, yani su içinde küremeye bırakılmıştır. Üretimi izleyen 28. günde numuneler sudan çıkarılarak deneylere başlanmıştır.

Numune boyutları ve sayıları

Beton numunelerinin sayısı her bir karışım için 3 silindir, 6 prizma olarak toplam 9 adettir. Silindirik numuneler beton dayanımı ve elastiklik modülünün bulunması için, kalan altı prizma ise toplam deformasyon, temel sünme deformasyonu ve serbest rötne deneyleri için kullanılmıştır. Prizma şeklindeki numunelerin boyutları 70×70×240 mm, silindirik numunelerin çapı 100 mm, yüksekliği ise 200 mm'dir.

Karışım oranları ve betonların esas özellikleri

Beton karışımları iki su / imento oranı için dökülmüştür. Birincisi düşük dayanımlı beton sınıfına dahil olan 0,70'lik, ikincisi normal dayanımlı beton sınıfına dahil olan 0,55'lik beton numuneleridir. Her bir karışım, normal portland imentosu, silis dumanı, cüruf ve uçucu kül katılmış betonlar için üretilmiştir. Beton numunelerinin basınç dayanımının bulunmasının esas amacı sünme deneylerinde uygulanacak yükü hesaplamak içindir ve numuneler bu dayanımın yaklaşık olarak %30'u kadar yüklenmiştir.

Beton numunelerinin basınç dayanımlarını ve elastiklik modülünü belirlemek amacı ile, aynı karışımlardan alınmış 3 adet silindir numunesi kullanılmıştır. ϕ 100×200 mm boyutunda olan 3

numunenin ortalama değeri alınarak basınç dayanımı ve elastiklik modülü elde edilmiştir.

Numunelerin hazırlanması

Aletlerin daha verimli kullanılması, diğer bir deyişle daha fazla numuneye yük uygulanabilmesi için numuneler ikişer ikişer sünme aletlerine yerleştirilmiştir. Bu amaçla sudan çıkarıldıktan sonra numuneler bir birine bağlanmıştır. Sünme ve temel sünme numuneleri ikişer olarak bir birine yapıştırılmış, rötne numuneleri ise serbest bırakılmıştır. Yapıştırma işlemleri için özel malzemeler kullanılmıştır. Kükürt ve grafit toz halinde önce karıştırılarak ocak üzerinde eritilmif ve bundan sonra beton numunelerinin arasına 2-3 mm kalınlıkta dökülmüştür. Numuneleri yapıştırmak için imento yerine bu malzemelerin kullanılmasının nedeni numunelerin bir birine daha hızlı olarak 2-4 dakika içinde yapışmasıdır. Çimento kullanılmış olsaydı daha uzun süre beklenmesi gerekirdi. Ancak, temel sünme numunelerinin su kaybına uğramaması için hemen yalıtılması ve deneylerin 28. günde başlaması gerektiğinden, dolayısıyla birinci yol daha uygun bulunmuştur.

Numunelerin bir birine yapıştırılması tamamlandıktan sonra temel sünme numunelerinin çevre ile nem ilişkisini kesmek amacıyla bu numuneler yalıtılmıştır. Bu amaçla numuneler stretch film kullanılarak iki kat, bundan sonra ise alüminyum yaprak ile aynı şekilde üç kat olmak üzere tekrar sarılmıştır. Bu şekilde betonun çevresi ile nem alışverişi engellenmiştir. Bundan sonra, deformasyon ölçümü yapabilmek için numuneler üzerine demir pullar yapıştırılmıştır. 3 mm çapında olan bu yuvarlak ölçüm pullarının üzerinde ölçüm cihazının iğnesinin girebileceği şekilde deliği vardır. Pullar 200 mm ara ile beton numunesinin karşılıklı iki yüzeyine yapıştırılmıştır. Deformasyonları ölçmek için 200 mm uzunluğunda deformasyon ölçme aleti kullanılmıştır. Ölçmeler ilk iki-üç hafta iki gün ara ile daha sonra haftada bir ve daha sonra ise bu aralıklar uzatılarak devam edilmiştir. Bir beton numunesinin yaptığı deformasyon, betonun karşılıklı iki yüzeyinde ölçülen deformasyonların ortalaması olarak alınmıştır.

Beton numuneleri İTÜ Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan özel sünme aletleri yardımıyla yüklenmiştir. Aletler yardımıyla 10 ve 15 tona kadar yük uygulanabilmektedir. Beton numuneleri aletlere yerleştirildikten sonra üniversal test makinesi yardımıyla ile betona dayanımının %30 oranında yük uygulanmıştır. Bundan sonra, numuneler özel nem odasına götürülerek, düşük dayanımlı beton numuneleri %76 nem oranına, normal dayanımlı beton numuneleri %65 nem oranına sahip ortamda bekletilmiştir. Numunelerin yaptığı deformasyonlardan dolayı uygulanan gerilmelerde azalma olduğu için belirli zamanlarda numuneler basınç makinelerine götürülerek tekrar yüklenmiştir. Rötne numuneleri birbirine yapıştirılmadan sünme numuneleri ile aynı yerde nem odasında bekletilmiştir. Sünme ve serbest rötne deformasyon ölçümleri 100 gün devam etmiştir. Daha sonra, 121. günde numuneler yükleme aletinden çıkarılarak serbest bırakılmış ve böylece sünme toparlanması deneyleri başlatılmış ve 70 gün süreyle devam etmiştir.

Sünme ve rötne ölçümleri

Sünmeyi ölçmek için aynı kütleme ve nem ortamına tabi tutulmuş iki aynı tür numune takımları seçilmiştir (ASTM C512-87, 1994). Birinci numune takımı beton numunesi dayanımının %30 oranına eşit yük altında tutulmuş (sünme deneyi), ikinci takım ise hiç yüklenmemiş ve serbest bırakılmıştır (rötne deneyi). Birinci takımdan, yani yük altında tutulan numunelerden elde edilen deformasyonlar toplam deformasyonlar, serbest bırakılan numunelerden elde edilen deformasyonlar ise serbest rötne veya kuruma rötresi deformasyonlarıdır. Numuneler yük altına konmadan önce deformasyon ölçümü yapılarak kayda alınmıştır. Numuneler yük altına konduktan hemen sonra ilk deformasyon ölçümü yapılmıştır. Bu deformasyon elastik veya ani deformasyon olarak adlandırılmıştır. Bundan sonra, belirli zamanlarda deformasyon ölçümleri yapılmıştır. Sünme deformasyonunu bulmak için toplam deformasyonlardan serbest rötne deformasyonları ve elastik deformasyonlar çıkarılmıştır.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} - \varepsilon_{sr} \quad (1)$$

Temel sünme ölçümü için kullanılan yalıtılmış numuneler de dayanımının %30'u oranında yüklenmiştir. Bu şekilde elde edilen deformasyonlar toplam temel sünme deformasyonlarıdır. Buradan da (2) formülü kullanılarak temel sünme deformasyonu bulunur.

$$\varepsilon_{ts} = \varepsilon_{topts} - \varepsilon_{el} \quad (2)$$

Betonlar yük altından çıkarıldıktan hemen sonra geri dönen elastik deformasyon ölçülmüştür.

İlk anlardaki elastik geri dönüşten sonra, beton numuneleri zamanla aksi yönde deformasyon yapmaya devam etmiştir. İlk günler deformasyon toparlanması daha hızlı olmuş, daha sonra giderek azalmaya başlamıştır. Deney boyunca toplam toparlanma, temel sünme toparlanması ve rötne deformasyon değerleri ölçülmüştür. Sünme değerleri ise toplam deformasyon toparlanma değerinden, elastik geri dönüş ve rötne deformasyonu değeri çıkartılarak elde edilmiştir. Bunu aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{tt} - \varepsilon_{egd} - \varepsilon_{sr} \quad (3)$$

Sünme fonksiyonunu bulmak için her hangi t anındaki sünme deformasyon değerleri (sünme+elastik deformasyon) beton numunesine uygulanan gerilmeye bölünür.

$$J(t, t_0) = \varepsilon_s(t, t_0) / \sigma_0 \quad (4)$$

Temel sünme fonksiyonu her hangi t anındaki temel sünme deformasyon değerini uygulanan gerilmeye bölerek elde edilir.

$$J_{ts}(t, t_0) = \varepsilon_{ts}(t, t_0) / \sigma_0 \quad (5)$$

Sünme toparlanma fonksiyonu, her hangi t₀ anında yüklenmiş ve t₁ anında yük altından çıkarılmış numunenin, t = t₁ anındaki elastik geri dönüş deformasyonu + herhangi t > t₁ anındaki sünme toparlanma deformasyonunun uygulanan gerilmeye oranı olarak alınmıştır. Aşağıdaki formülde bu daha açık olarak verilmektedir.

$$J_{st}(t, t_0, t_1) = \frac{\varepsilon_{egd}(t_0, t_1) + \varepsilon_{st}(t, t_0, t_1)}{\sigma_0}, t \geq t_1 \quad (6)$$

Sonuçlar ve değerlendirme

Beton numunelerinin 28. günde elde ettikleri basınç dayanımları ve elastiklik modülü Tablo 2(a,b)'de verilmektedir.

Düşük dayanımlı betonlarda en yüksek basınç dayanımının, referans betonunda, normal dayanımlı olanlarda ise silis dumanı içeren betonda kaydedildiği görülmektedir. Her iki karışım için en düşük dayanım uçucu küllü betonda elde edilmiştir.

Tablodan da görüldüğü gibi su / çimento oranındaki azalma, dayanımı önemli ölçüde arttırmıştır. Bu durum daha çok silis dumanlı betonda belirgindir, silis dumanı içeren düşük ve normal dayanımlı betonlar arasında yaklaşık olarak %47 fark vardır.

Düşük dayanımlı beton numunelerinin basınç dayanımları karşılaştırıldığında silis dumanı katılmış betonun basınç dayanımının, referans betonunkinden daha düşük değer aldığı görülmektedir. Bilindiği gibi silis dumanının filler ve puzolanik etkileri nedeniyle basınç dayanımı yükselmektedir (Taşdemir, 1995). Çimento ta-

neciklerinden daha küçük tane boyutlarına sahip silis dumanı partikülleri daha büyük yüzey alanına sahip olduğundan, daha az boşluklu ve geçirimsiz bünye oluşturmakta, çimentonun bir bölümü ile yer değiştirdiğinde, çimento tanelerinin arasını doldurarak agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmektedir. Silis dumanı ve CH arasında puzolanik reaksiyonlardan dolayı, silis dumanı içeren betonlarda CH miktarı, içermeyenlere oranla daha azdır ve böylece daha az boşluklu geçiş bölgesi oluşmaktadır. Basınç dayanımı sonuçlarından görüldüğü gibi söz konusu mineral katkının belirtilen özellikleri su / çimento oranı düşük olan betonlarda etkilidir.

Uçucu kül ve cüruf gibi mineral katkıların beton dayanımına etkisinin 28. günden sonra başlaması nedeniyle 28. günde bu betonların basınç dayanımlarını artırmadığı, sadece normal dayanımlı betonlarda cürufun az bir katkısının olduğu görülmüştür. Silis dumanı içeren betonda ise 28 günlük dayanımda yükselme saptanmıştır. Elastiklik modülleri değerlendirildiğinde ise basınç dayanımlarında olduğu gibi düşük dayanımlı betonlarda en yüksek değer referans betonunda, normal dayanımlı betonlarda ise silis dumanı katılmış olan betonda gözlemlenmiştir. En düşük elastiklik modülü her iki karışım için uçucu küllü betonda elde edilmiştir. Su / çimento oranındaki azalma elastiklik modülünde artışa neden olmuştur.

Tablo2a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinden deney sonucu elde edilen değerler

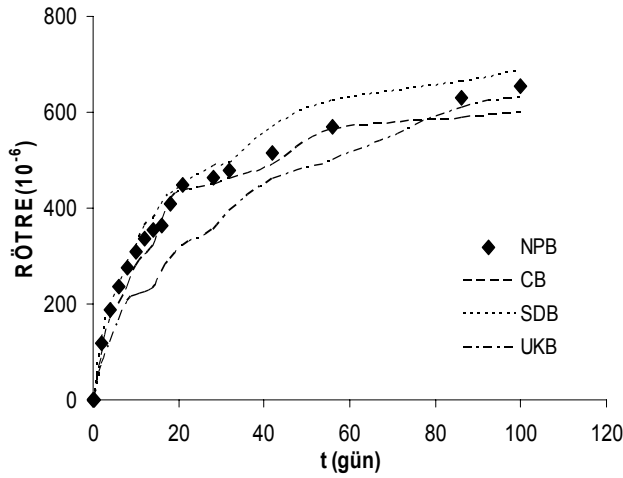
Betonlar	f ₂₈ (MPa)	E ₂₈ (GPa)	t ₀ (gün)	t-t ₀ (gün)	σ ₀ (MPa)	J _{el} (10 ⁻⁶ /MPa)	ε _{sr} (10 ⁻⁶)	J (10 ⁻⁶ /MPa)	J _{ts} (10 ⁻⁶ /MPa)
NPB	26.53	24.31	28	100	8.31	77	655	221	151
CB	26.10	22.87	28	100	8.27	70	600	225	160
SDB	24.87	21.96	28	100	7.83	68	688	207	150
UKB	22.50	21.26	28	100	7.02	65	630	207	154

Tablo2b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinden deney sonucu elde edilen değerler

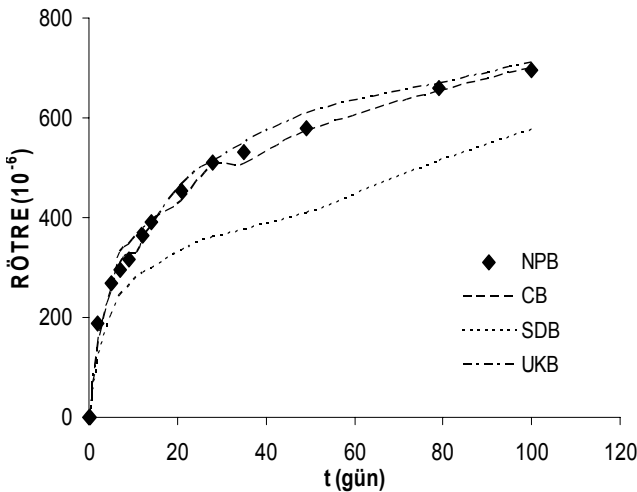
Betonlar	f ₂₈ (MPa)	E ₂₈ (GPa)	t ₀ (gün)	t-t ₀ (gün)	σ ₀ (MPa)	J _{el} (10 ⁻⁶ /MPa)	ε _{sr} (10 ⁻⁶)	J (10 ⁻⁶ /MPa)	J _{ts} (10 ⁻⁶ /MPa)
NPB	37.20	30.60	28	100	11.57	52	695	165	112
CB	39.00	31.33	28	100	12.09	49	700	141	98
SDB	47.14	34.78	28	100	14.77	46	575	105	82
UKB	34.30	29.30	28	100	10.50	54	710	168	114

Serbest rötre

Şekil 1(a, b)'de referans ve mineral katkıli betonların elde ettikleri serbest rötre değerleri verilmektedir. Düşük dayanımlı beton numunelerinin rötre eğrileri değerlendirildiğinde, 100. günde birbirinden fazla farklı olmadıkları görülmektedir. En yüksek rötre deformasyonuna silis dumanı içeren beton, en düşük deformasyon değerine ise uçucu küllü beton sahip olmuştur. Görüldüğü üzere silis dumanı katılmış beton numunesi rötre deformasyonunda artışa, diğer mineral katkıli beton numuneleri ise azalmaya neden olmuştur.



Şekil 1a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin rötre deformasyon değerleri



Şekil 1b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin rötre deformasyon değerleri

Normal dayanımlı beton numunelerinde ise 100. günde uçucu küllü, referans ve cüruf katılmış betonlar birbirine çok yakın değerler göstermiştir. Uçucu kül katılmış beton ile referans beton arasında $15 \mu D$, cüruf katılmış betonla referans beton arasında ise $5 \mu D$ fark vardır, en yüksek değer ise uçucu küllü beton numunesinde kaydedilmiştir. Bunlardan farklı olarak silis dumanı katılmış beton referans betondan $135 \mu D$ daha düşük değere sahiptir. Böylece, uçucu kül ve cürufun betona katılmasının rötre deformasyonuna nerdeyse hiç bir etkisinin olmadığı halde silis dumanının betona katılması ile 100. günde rötre deformasyonunda yaklaşık olarak %20 oranında düşüşün elde edildiği görülmektedir.

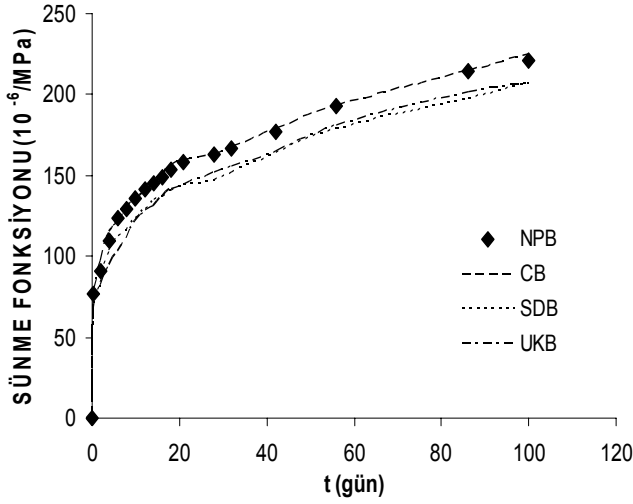
Beton numunesinde su miktarı ne kadar fazla olursa numune o kadar fazla rötre deformasyonu yapar. Yine beton numunesinin daha fazla ince parçacıklardan oluşması da daha fazla rötre deformasyonu oluşmasına neden olur. Silis dumanının çimento taneciklerine oranla daha ince parçacıklardan oluşması aslında rötre deformasyonunun artmasına neden olmalıdır, ama bu parçacıklar suyu daha fazla kendinde tuttuğu için rötre deformasyonuna kaynak sayılan suyun dışarı çıkmasını engeller ve böylece deformasyonda önemli düşüş oluşur.

Sünme ve temel sünme fonksiyonları

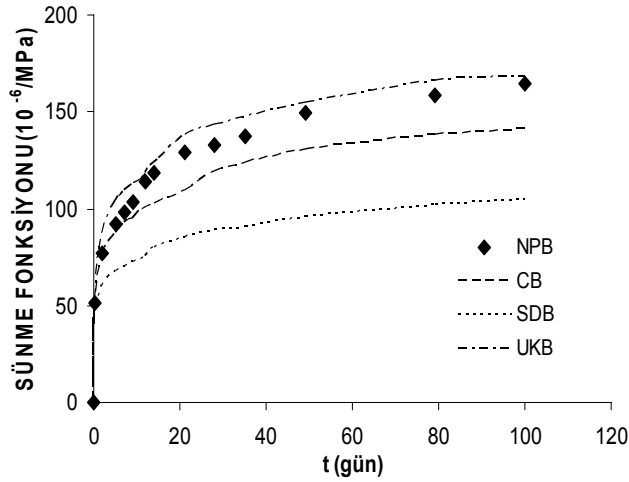
Şekil 2(a, b) ve Şekil 3(a, b)'de referans ve mineral katkıli betonların sünme ve temel sünme fonksiyonu değerleri verilmiştir.

100. günde değerler incelendiğinde düşük dayanımlı beton numunelerinde cüruf katılmış beton, normal dayanımlı olanlarda ise uçucu küllü ve referans betonun en yüksek sünme fonksiyonu değerine sahip oldukları görülmektedir. Referans betonla karşılaştırıldığında, uçucu kül ve cüruf katılmış beton düşük dayanımlı karışımlarda, silis dumanlı beton ise normal dayanımlı karışımlarda en düşük sünme fonksiyonu değerlerine sahip olmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde düşük dayanımlı betonların sünme fonksiyonu değerleri arasında fazla fark olmadığı halde, normal dayanımlı betonlarda cüruf ve

özellikle silis dumanı önemli miktarda düşüş sağlamıştır.

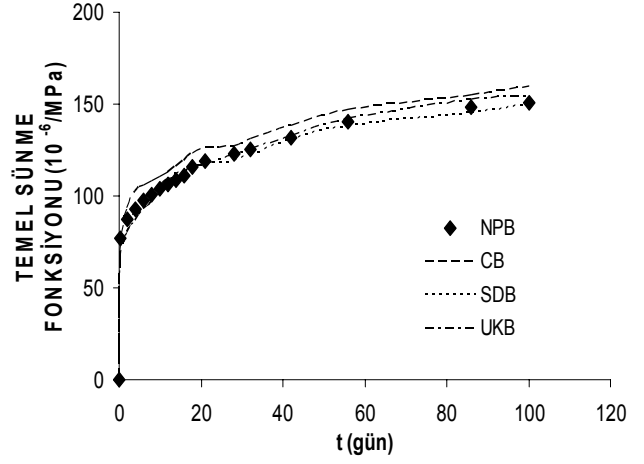


Şekil 2a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin sünme fonksiyonu değerleri

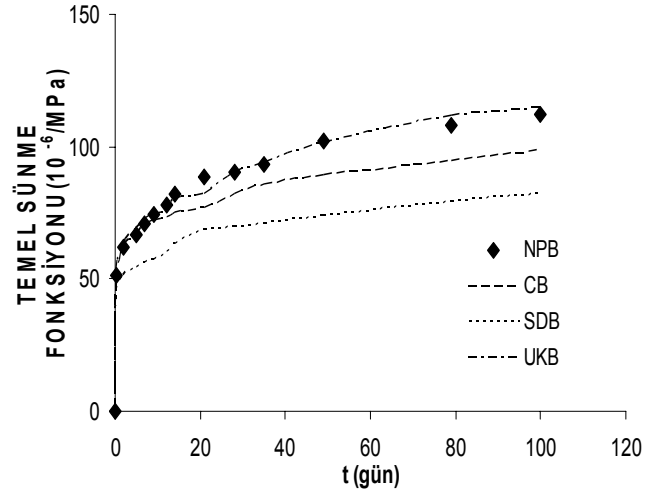


Şekil 2b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin sünme fonksiyonu değerleri

Temel sünme fonksiyonları değerlendirildiğinde ise 100. günde düşük dayanımlı karışımda cüruf katılmış betonda, normal dayanımlı karışımda ise uçucu küllü betonda en yüksek temel sünme fonksiyonu değeri kaydedildiği görülmektedir. Normal dayanımlı karışımlarda silis dumanı içeren betonun temel sünme fonksiyonunda önemli miktarda düşüş olmuştur.



Şekil 3a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin temel sünme fonksiyonu değerleri



Şekil 3b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin temel sünme fonksiyonu değerleri

Elastik geri dönüş fonksiyonları

Tablo 3(a, b)'de elastik geri dönüş fonksiyonu değerleri verilmektedir. Görüldüğü gibi beton numunelerinin elastik fonksiyonları ile elastik geri dönüş fonksiyonları birbirine eşit değildir. Düşük dayanımlı beton numunelerinde referans betonda elde edilen elastik fonksiyon değeri $77 \mu D / MPa$ olduğu halde, aynı numunenin elastik geri dönüş fonksiyonu değeri $61 \mu D / MPa$ dır.

Tablo3a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinden 70. günde elde edilen elastik geri dönüş ve sünme toparlanma fonksiyonları

Betonlar	t ₀ (gün)	t ₁ (gün)	t-t ₁ (gün)	J _{egd} (10 ⁻⁶ /MPa)	J _{st} (10 ⁻⁶ /MPa)
NPB	28	121	70	61	100
CB	28	121	70	57	96
SDB	28	121	70	58	98
UKB	28	121	70	59	95

Tablo3b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinden 70. günde elde edilen elastik geri dönüş ve sünme toparlanma fonksiyonları

Betonlar	t ₀ (gün)	t ₁ (gün)	t-t ₁ (gün)	J _{egd} (10 ⁻⁶ /MPa)	J _{st} (10 ⁻⁶ /MPa)
NPB	28	121	70	44	60
CB	28	121	70	46	56
SDB	28	121	70	41	51
UKB	28	121	70	50	65

Elastik fonksiyonlarla elastik geri dönüş fonksiyonlarının bir birinden farklı olması, sünme ve elastik deformasyonların ölçümü esnasında elastik deformasyona sünme deformasyonu da eklendiğinden sınırları tam şekilde ayırt edememe problemlerinden ileri gelebilir. Bu genel olarak karşılaşılan problemdir. İkinci bir neden beton yaşıdır. Bilindiği gibi betonun yaşı arttıkça daha az deformasyon yapar. Bu yüzden, belli bir yaştan sonra yük kaldırıldığı zaman betonun yaptığı deformasyonun elastik kısmı tam olarak geri gelmez.

Sünme toparlanma fonksiyonları

Şekil 4(a, b)'de sünme toparlanma fonksiyonları eğrileri verilmiştir. Düşük dayanımlı beton numunelerinde referans ve mineral katkılı betonlarda birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda ise silis dumanlı betonun sünme toparlanma fonksiyonunda belirgin miktarda düşüş olduğu halde, uçucu küllü olanda artış gözlemlenmiştir

Rötire ve sünme fonksiyonu tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Model yardımıyla bulunan değerlerle, deneysel değerler karşılaştırıldığında rötire için $\pm 100 \mu D$, sünme ve özgül sünme fonksiyonları için

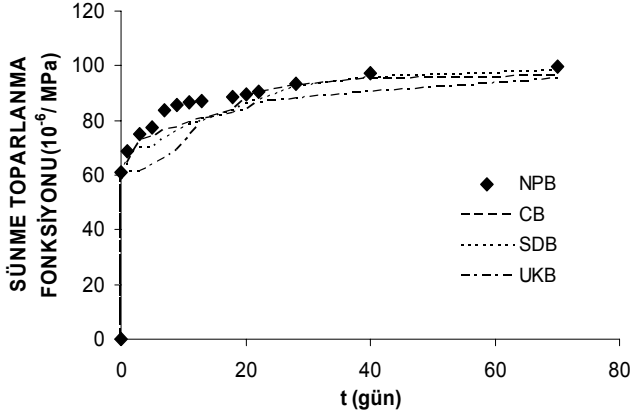
$\pm 33 \mu D /MPa$ sınırı gözönünde bulundurulmaktadır. Bu koşullar altında rötire deformasyonları değerlendirildiğinde (Şekil 5(a, b)), düşük ve normal dayanımlı betonlar için B3 ve GL2000 modellerinin deneysel değerleri iyi tahmin ettiği sonucuna varılmıştır. Bu modellerle 100 gün boyunca tahmin edilen rötire değerlerinin tamamı $\pm 100 \mu D$ sınırının içindedir. Bu iki model karşılaştırıldığında ise B3 modelinin rötreyi en iyi tahmin ettiği görülmektedir. Diğer iki model yardımıyla bulunan değerler ise $\pm 100 \mu D$ sınırını aşmıştır ve rötreyi tahmin etmekten uzaktır.

Sünme fonksiyonları (Şekil 6(a, b)) için değerlendirme yapıldığında düşük dayanımlı betonlar için tüm değerlerin $\pm 33 \mu D /MPa$ sınır değerlerini aştığı söylenebilir. Normal dayanımlı betonlar için ise CEB-FİP ve GL 2000 modellerinin bazı değerlerinin bu sınırın içinde olduğu, ancak genelde sünme fonksiyonunun iyi tahmin edilmediği belirtilebilir.

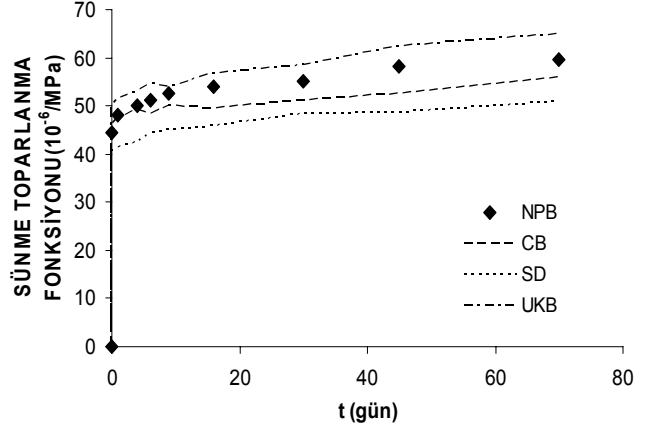
Sonuçlar

Uçucu kül ve cürufun, betonların 28. gündeki basınç dayanımına önemli etkisinin olmadığı, silis dumanının ise normal dayanımlı betonların basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. Su / çimento oranının azalması ile elastik fonksiyonlarda önemli miktarda azalma gözlemlenmiştir.

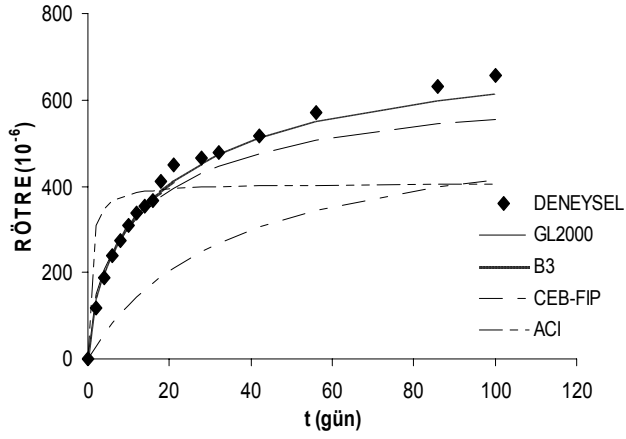
Betonun zamana bağlı davranışı



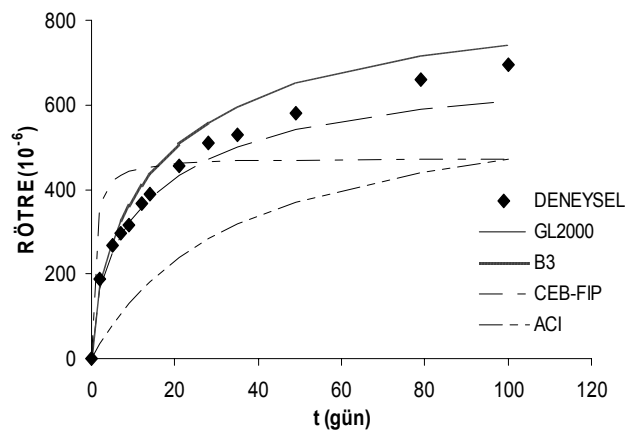
Şekil 4a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin sünme toparlanma fonksiyonu değerleri



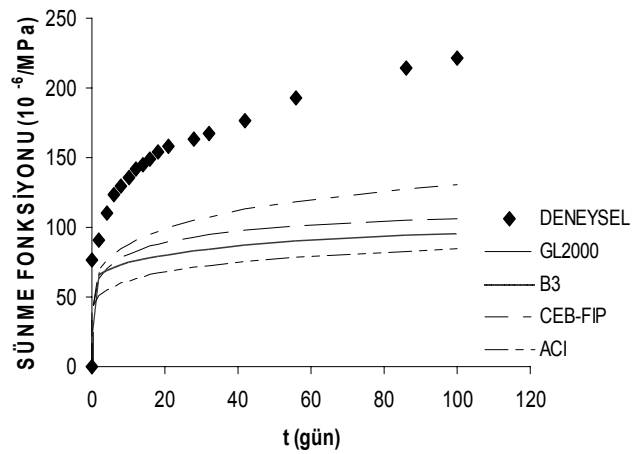
Şekil 4b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin sünme toparlanma fonksiyonu değerleri



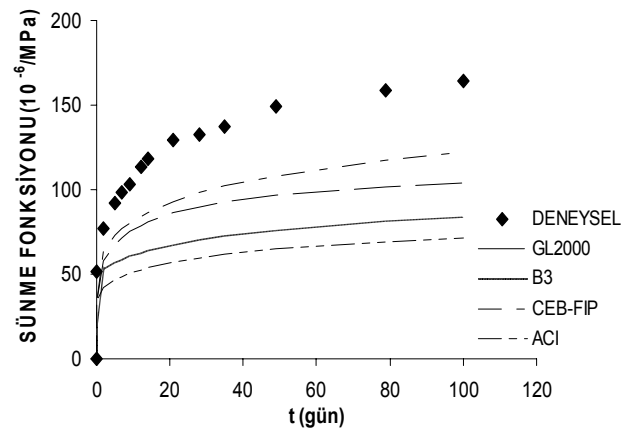
Şekil 5a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin rötre tahmin sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin rötre tahmin sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6a. Su / çimento oranı 0.70 olan beton numunelerinin sünme fonksiyonu tahmin sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6b. Su / çimento oranı 0.55 olan beton numunelerinin sünme fonksiyonu tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Mineral katkılı ve referans betonlardan elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, mineral katkıların düşük dayanımlı betonların sünme fonksiyonu, temel sünme fonksiyonu ve rötre deformasyonları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, normal dayanımlı betonlarda ise özellikle silis dumanının bu değerlerde önemli bir düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Mineral katkıların, düşük dayanımlı betonların sünme toparlanma fonksiyonu üzerinde belirgin bir etkisi olmazken; normal dayanımlı betonlarda, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun sünme toparlanma fonksiyonu değerleri üzerinde azaltıcı, uçucu külün ise yükseltici bir etkisi olduğu görülmüştür.

Sünme ve rötre tahmin modellerinin deneysel sonuçlara uygunluğu incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Düşük ve normal dayanımlı betonlarda B3 ve GL2000 modellerinin deneysel rötre değerlerini kabul edilir sınırlar içinde tahmin ettiği, CEB-FIP ve ACI modelleri ile elde edilen tahmin sonuçlarının ise bu sınırları aştığı görülmektedir. Sünme fonksiyonunun modeller yardımıyla elde edilen tahmin değerleri kabul edilen sınırların dışında bulunmuştur.

Semboller

- ε_{el} : Elastik deformasyon
 ε_{egd} : Elastik geri dönüş deformasyonu
 $\varepsilon_t(t, t_0)$: Toplam deformasyon
 $\varepsilon_s(t, t_0)$: Sünme deformasyonu
 $\varepsilon_{ts}(t, t_0)$: Temel sünme deformasyonu
 $\varepsilon_{topls}(t, t_0)$: Elastik+temel sünme deformasyonu
 $\varepsilon_{st}(t, t_0, t_1)$: Sünme toparlanması
 $\varepsilon_u(t, t_0, t_1)$: Toplam toparlanma deformasyonu
 $\varepsilon_{sr}(t, t_0)$: Rötre deformasyonu
 σ_0 : Beton numunesine uygulanan gerilme
 E_{28} : 28. gündeki elastiklik modülü
 $J_{el}(t_0)$: Elastik fonksiyon
 $J_{egd}(t_1)$: Elastik geri dönüş fonksiyonu
 $J(t, t_0)$: Sünme fonksiyonu

- $J_{ts}(t, t_0)$: Temel sünme fonksiyonu
 $J_{st}(t, t_0, t_1)$: Sünme toparlanma fonksiyonu
 f_{28} : 28. gündeki basınç dayanımı
 t_0 : Betona yükün uygulandığı zaman
 t_1 : Yük etkisinin sona erdiği zaman
 μD : Mikro-deformasyon

Kaynaklar

- ACI Committee 209, (1982). Prediction of shrinkage and temperature effects in concrete structures, ACI 209 R-82, American Concrete Institute, SP-76, Detroit.
- ACI 234R-96, (1996). Guide for the use of silica fume in concrete, ACI Committee 234, Detroit.
- Akyüz, S., Uzunhasanoğlu, N. ve Taşdemir, M.A., (1985). Değişken gerilmeler etkisinde hafif betonun zamana bağlı davranışı, Dördüncü Uluslararası Mekanik Kongresi, İstanbul.
- ASTM C512-87, (1994). Test for creep of concrete in compression, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2.
- ASTM C 618-84, (1984). Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use a mineral admixtures in portland cement concrete, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, 2.
- Bazant, Z. P., (1989). *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*, John Wiley, New-York.
- Bazant, Z.P. ve Baweja, S., (1995) Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3, *Materials and Structures*, **28**, 357-365.
- CEB-FIP Model Code, (1990). *Design code*, Thomas Telford, London.
- Gardner, N. J. ve Lockman, M. J., (2001). Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete. *American Concrete Institute, Materials Journal*, **98**, 2, 159-167.
- Kovler. K., (1997). Drying creep of concrete in terms of the age-adjusted effective modulus method. *Magazine Concrete Research*, **49**, 181, 345-351.
- Taşdemir, C., (1995). Agrega-Çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.