

I. Gün
12 Nisan 2007 • Perşembe

I. Oturum

Oturum Başkanı:
Prof. Dr. Turhan Y. ERDOĞAN

HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BETON DAYANIKLILIĞINDAKİ YERİ

Dr. Çelik ÖZYILDIRIM

Principal Research Scientist

Virginia Department of Transportation

Virginia, ABD

ÖZET

Bu bildiride, betonda önemli bir dayanıklılık problemi olarak karşımıza çıkan donma-çözülme problemi ele alınacaktır. Betonun donma-çözülme direncini belirleyen parametreler ve betonun hava-boşluk özellikleri irdelenerek, hava sürükleyici katkıların önemi vurgulanacaktır. Betonun hava-boşluk özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan metodlar ve şartnamelere göre bu özelliklerin önemlerinden bahsedilecektir. Ayrıca, Virginia'dan uygulama örnekleri verilerek çeşitli Virginia Karayolları İdaresinin donma-çözülme problemine yönelik yaptığı bazı çalışmalar açıklanacaktır.

GİRİŞ

Beton asırlardır yapılarda başarı ile kullanılan dayanıklı bir malzemedir. Fakat ağır çevre koşullarında betonun dayanıklılığı azalabilir. Çevre etkilerinin başında donma ve çözülme, donatının korozyonu, alkali-silika reaksiyonu ve sülfat hücumu gelir (Özyıldırım, 1993). Bu çalışmada donma direnci ve hava sürükleyici katkıların etkisi anlatılacaktır.

Kuru bir çevrede, uygun dayanımı olan beton çok uzun yıllar fazla bakıma ihtiyaç duyulmadan hizmet verebilir. Fakat aynı beton gereken tedbirler alınmazsa, içerisine su veya diğer zararlı sıvıların girip tekrar eden donma ve çözülme olaylarına maruz kalırsa, kısa zamanda kullanılmaz hale gelebilir. Özellikle, buz çözücü tuz kullanılan yerlerde dayanıklılık daha hızlı bir şekilde azalır.

Betonun donmaya karşı dayanıklılığı numunelerin tekrarlı donma ve çözülmesini öngören ASTM C 666 standardına göre belirlenir. Betonun bu deneyde başarılı olması ve dolayısı ile su ile temas ettiği bölgelerde donma direnci gösterebilmesi için sürüklenmiş hava kabarcıkları ile korunması gerekir. Donma deneyinin yapılmasının mümkün olmadığı zamanlarda veya daha farklı bir yöntem istendiğinde hava boşluk parametrelerinin hesaplanması ile donma direnci tahmin edilir.

Betonlarda uygulamaya göre değişen karma, taşıma, ve yerleştirme gibi işlemlerde hava parametreleri değişebilir ve dolayısıyla beton dayanıklılığı etkilenir. Örneğin katı kıvamdaki betonda hava sürükleyici katkıların etkisi azalır ve istenen parametreleri elde etmek zorlaşır. Vibrasyon sırasında iyi tasarlanmamış bir betonda hapsolmuş hava boşlukları ile birlikte sürüklenmiş hava boşlukları da kaybolabilir. Karışıma ilave su eklenmesi, pompalama, akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması, hava sürükleyicilerini ve dolayısıyla hava parametrelerini etkiler.

AMAÇ

Bu bildiride hava sürükleyici katkıları ve bu katkıların beton dayanıklılığına olan etkileri irdelenecektir. Katı kıvamdaki beton, pompalanan beton, ve süper akınlaştırıcı kullanılan betonlar incelenecek ve Virginia Karayolları'nın bu durumlarda aldığı önlemler anlatılacaktır.

TEMEL BİLGİLER

Donmaya Karşı Dayanıklılık

Buza dönüşen suyun hacmi artar ve beton içerisinde gerilmelere yol açar. Betonda suyun bulunacağı yerler genellikle çimento hamuru içerisindeki jel ve kapiler boşluklar ile agregalar içinde ve arasındaki boşluklardır. Agregalarda donma sonucunda çatlamalar olabilir ve bu çatlamalar D-çatlaması olarak adlandırılır. Bu durum, zamanla agrega içine suyun girmesi ancak kısa bir zaman içerisinde kolayca çıkamaması yüzünden kaynaklanır. Bu tip agregalar deneylerle belirlenir ve genellikle agrega boyutları küçültülüp suyun kaçma olanağı kolaylaştırılarak gerekli direnç sağlanır (NCHRP, 1987; Janssen and Snyder, 1994). Buza dönüşen suyun hacmi yüzde 9 artar. Bu hacim genişlemesini karşılayacak boşluğu olmayan beton, kritik doygunluğa erişir ve hacim genişlemesi sonucu itilen suyun yaptığı hidrolik basınç yüzünden yüksek gerilmeler meydana gelir (Kosmatka et. al, 2002). Buz çözücü tuz kullanılan yerlerde ek olarak osmotik basıncın da oluşması betondaki gerilmeyi daha da artırır (Powers, 1975). Beton çekme dayanımı düşük olan

bir malzeme olduğundan, bu yüksek gerilmelere karşı gelemmez. Tek bir donma karşısında betonun tahminen 3.5 MPa, fakat sert iklimde birkaç donma ve çözülme karşısında ise tahminen 28 MPa basınç dayanımı olması istenir (ACI 201.2R). Önlem alınmazsa betonda çatlama ve patlamalar meydana gelebilir ve sonuç olarak beton kullanılamaz bir hale gelebilir. Dolayısıyla kritik uygunluktaki betonun donma ve çözülme etkisinden korunması gerekir. Gereken tedbirler: yeterli hava boşluğu parametreleri, uygun agregalar, ve betonun yeterli olgunluğa erişmesini sağlamaktır (Bryant, 1990).

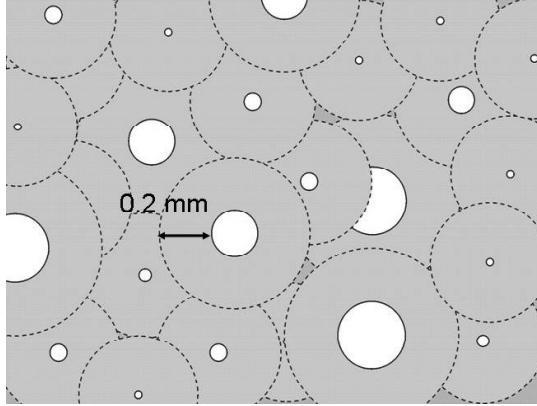
Hava Boşlukları

Betonun donma direncini artırmak için donma sırasında itilen suyun, yakındaki bir boşluk içine girmesini sağlamak gerekir (Whiting and Nagi, 1998). Bunun için beton içerisine düzenli bir şekilde dağılmış küçük hava boşluklarına ihtiyaç vardır. Bir cm^3 'lük hava sürülenmiş bir betonda çoğunlukla küçük boşluklardan oluşan 60,000'den fazla hava boşluğu vardır (Whiting and Nagi, 1998). Beton karışımı sırasında hava boşlukları farklı şekillerde meydana gelir. Bu boşluklar değişik boyutlarda kendini gösterir. Genellikle 1 mm çapından büyük veya küçük diye ikiye ayrılır: 1 mm çapından büyük olanlar düzensiz bir şekle sahiptir, 1 mm çapından küçük olanlar ise küre şeklindedir. Beton içindeki bu büyük çaptaki boşluklara hapsolmuş hava boşlukları denir ve iyi yerleşmiş bir betonda hapsolmuş hava boşlukları genellikle yüzde ikiden az olmaktadır. Hava boşlukları bilhassa küçük olanlar birbirleriyle bir araya gelir, yok olur veya içlerindeki yüksek basınçtan dolayı çözelti içerisinde kaybolur. Karıştırmadan doğan küçük hava boşluklarının yok olmaması ve beton içinde kalmasını temin etmek için betona hava sürükleyici katkıları eklenir ve bu tip küçük hava boşluklarına sürüklenmiş hava denir.

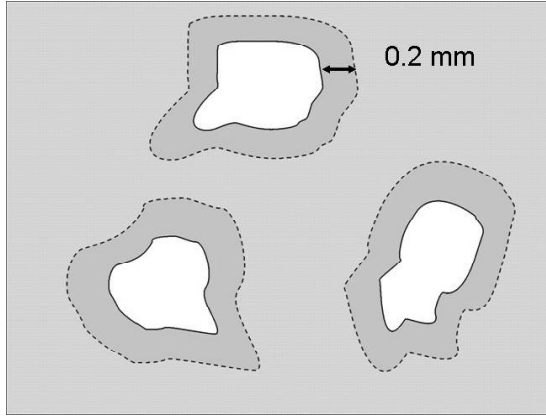
Hava boşluklarının miktarı, boyutu, ve dağılımı beton dayanıklılığı açısından önemlidir. Bunların tanımlanması hava boşluğu parametreleri ile mümkündür. (r) toplam hava boşluğu miktarı, boşluklar arası mesafe (L) ve yüzey alanı (α) önemli parametrelerdir. L donma nedeniyle itilen suyun bir hava boşluğuna erişebilmesi için alması gereken mesafeyi, α ise hava boşluklarının boyutunu belirtir. Yeterli direnç için L 'nin 0.20 mm'den az ve α 'nın $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ 'ten yüksek olması önerilir (Whiting and Nagi, 1998). Hava boşluklarının küçük olmaları önemlidir aksi halde kapladıkları büyük hacim betonun dayanımını büyük bir oranda azaltır.

Her boşluk, çevresindeki 0.2 mm genişliğinde bir bölgeyi korur. Şekil 1, betona iyi bir şekilde yayılmış sürüklenmiş hava boşluklarının betonu nasıl koruduğunu, Şekil 2 ise hapsolmuş hava boşluklarını göstermektedir. Şekil

2'den görüleceği üzere hapsolmuş hava boşluklarının koruma bölgesi de 0.2 mm dir. Aynı toplam hacimdeki sürüklenmiş hava boşluklarının ne kadar daha fazla bölgeyi koruduğu görülür.



Şekil 1. Sürüklenmiş hava boşlukları ve korudukları bölge

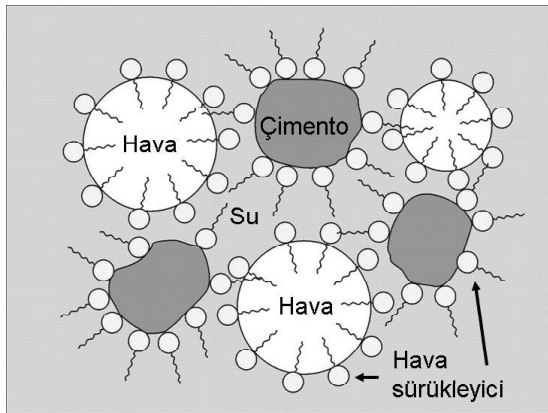


Şekil 2. Hapsolmuş hava boşlukları ve korudukları bölge

Betondaki hava miktarı bir çok faktöre bağlıdır: betonda kullanılan malzemeler, örneğin çimentonun ve uçucu kül ve cüruf gibi ek bağlayıcı maddelerin miktarı, kimyasal oluşumu ve inceliği; kimyasal katkıları, örneğin normal ve süper akınkanlaştırıcılar ve priz geciktiriciler; agregaların miktarları, nominal tane büyüklüğü, ve tane boyutu dağılımı; karışım suyundaki kimyasal maddeler; su-çimento oranı; su miktarı ve kıvamı; imalat yöntemleri, örneğin malzemelerin ekleniş sırası, karıştırıcı kapasitesi, karıştırma süresi ve hızı; ve yapım yöntemleri ve saha koşulları, örneğin taşıma, su ekleme, yerleştirme, yüzey düzeltme, ve ısı durumu (Whiting and Nagi, 1998).

Hava Sürükleyici Katkılar

Hava sürükleyici katkıları ilk olarak 1930'larda geliştirilmiş olup genellikle betonun üretimi sırasında eklenir. Bu katkıları yüzey gerilmelerini azaltır, hava boşluklarının bir araya gelmesini önler, ve hava boşluklarını çimento ve agrega parçalarına sabitletler. Böylece küçük hava boşluklarının beton içinde kalmasını sağlarlar. Bu küçük boşlukların çapı 1 mm'den az olup çoğunlukla 0.01 mm ile 0.1 mm arasındadır. Hava sürükleyici katkıları "sür-faktant" denilen kimyasal gruba dahildirler. Moleküllerin bir ucu hidrofildir (su isteyen) ve artı veya eksi elektrik yükü taşır. Diğer ucu suyla karışmaz ve hidrofobiktir. Hava boşluklarının etrafında su iten (repel) bir film oluştururlar. Şekil 3 hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizmasını göstermektedir. Bu katkıları değişik hammaddelerin birleşmesinden meydana gelir. Başlıca hammaddeleri ise: ağaç reçinesi tuzları (çam kütüklerinden), sentetik deterjan (petrol fraksiyonunda), linyosülfonatlar (kağıt endüstrisinden), asitli tuzlar (petrol arıtmadan), proteinli tuzlar (hayvan derisinden), yağlı ve reçineli tuzlar (kağıt endüstrisi, hayvan derisinden), sülfonatlı hidrokarbon tuzlarıdır (petrol rafinesinden) (Kevorkian, 2006). Bu katkıların hava boşlukları üzerinde değişik faktörlere bağlı olarak değişik etkileri görülür. Örneğin katkıların cinsi, ilave miktarı, diğer katkıları olan uyumu, ve karma süresi; boşlukların boyutunu, yayılımını, ve sürekliliğini belirler. Önemli olan küçük boşlukların uygun bir dağılımla beton içerisinde bulunmasıdır. Yayılım ve boyut, hava parametreleri olan L ve α ölçüleriyle mümkündür. Fakat şartnameler genellikle daha kolay hesaplanabilir olmalarından dolayı toplam hava boşluklarını içerir.



Şekil 3. Hava sürükleyici katkıları küçük boşlukları stabilize ederler Beton Özelliklerine Etkisi

Hava sürükleyicilerin betonun donma direncini artırmasının yanında daha başka faydaları da bulunmaktadır. Yuvarlak şekillerinden dolayı beto-

nun işlenebilirliğini yükseltirler. Dolayısıyla daha düşük su-çimento oranı veya daha iyi işlenebilirlik elde edilir. Böylece daha yüksek dayanım ve dayanıklılık elde edilmiş olur. Ayrışma ve terleme daha azdır çünkü daha az su kullanılır ve hava boşlukları küçük çimento ve agrega parçalarının çökmesini önler (Kosmatka et al., 2002). Ayrıca hava boşlukları reaksiyon sonucu meydana gelen genişlemelere yer sağlar; bu da betonun sülfat ve alkali-silika reaksiyonlarına karşı direncini artırır.

Hava boşluklarının dayanım üzerindeki olumsuz etkisi de unutulmamalıdır. Hava boşluğundaki her yüzde 1'lik artışın beton dayanımını yüzde 2 ile 6 arası zayıflatığı görülür (Kosmatka et al, 2002). Genellikle yüzde 1'lik hava boşluğu artışı için dayanımda yüzde 5'lik düşüş dikkate alınır. Gerektiğinde bu kayıp deney yapılarak da belirlenebilir. Dayanım kaybı yüzünden fazla miktarda hava sürükleyici katkı kullanımından kaçınılmalıdır. Son zamanlarda görülen bir başka problem ise hava kabarcıklarının birleşmelerinden dolayı, zayıf bir bölgenin oluşması ve dayanımın azalmasıdır. Bu birleşmeler iri agregaların etrafında oluşur ve agrega ile çimento hamuru arasındaki bağı zayıflatır. Bu olay hava sürükleyici katkıların cinsi ile ilgilidir ve ağaç reçineli katkılarda görülmez. Ağaç reçinesi içermeyen katkılarda ise, betona su eklendiğinde, ve daha uzun karıştırma işlemi yapıldığında görülür (Camposagrado, 2006). Sürüklemiş hava boşluğunun artması ile de birleşmenin çoğaldığı görülür.

Hava Parametreleri ve Ölçümü

Taze betondaki toplam hava miktarının tayini basınç veya hacim yöntemi ile ölçülür. Agrega içlerinde yüksek miktarda boşluk olursa, örneğin hafif agregalar kullanılan beton için, hacim yöntemi kullanılır. Ayrıca birim ağırlık yöntemi ile de taze betondaki hava miktarının tayini mümkündür. Bu metod için betondaki malzemelerin yoğunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Bu metodlarla toplam hava miktarları ölçülür. Fakat önemli olan L ve α 'dır. Bunların ölçümü genellikle sertleşmiş betonda yapılır. Fakat yeni bir yöntemle hazır betonda hava parametreleri ölçümü denenmektedir. Bu yeni cihazın ismi AVA (air void analyzer: hava boşluğu çözümleyicisi) dir (Magura, 1966; Kevorkian, 2006). Bu cihazla sürüklenmiş hava boşluklarının dağılımı (L değeri) beton taze iken bulunmaktadır. Fakat bu cihaz ısı ve sarsılmaya karşı çok hassas olduğundan açık alanda kullanılması zor olup henüz ASTM'e göre standart bir metod olarak benimsenmemiştir.

Sertleşmiş betonda hava parametrelerinin hesaplanması, hazırlanmış düz beton yüzeyindeki hava boşluklarına mikroskop altında bakılarak yapılır. ASTM C 457 hava parametrelerinin hesaplanması için iki farklı yöntem içerir: birincisinde düz bir çizgi (kiriş) üzerinden hava boşluğu kırışlarının

uzunluğu hesaplanır. İlgili formüllerle; toplam hava, çapı 1 mm den az olan ve çapı 1 mm çok olan hava miktarları, L , ve α hesaplanır. İkinci yöntemde ise geliştirilmiş nokta sayımı ile belirli aralıklarda hava boşluklarının varlığı belirlenir ve hava parametreleri hesaplanır. Bu metodlara göre betonda hava parametrelerinin hesaplanması çok zaman almaktadır. Öte yandan yeni yöntemler, otomatik olarak hava boşluklarını belirlemeye çalışır. Bunlardan biri olan RapidAir 457 sisteminde, düz beton yüzeyi özel bir şekilde hazırlanır; böylece hava boşlukları beyaz ve geri kalan yüzey siyah olarak görülür. Sistem video kamerası ile hazırlanmış yüzey taranır ve bilgisayar sayesinde hava parametreleri bulunur (Kevorkian 2006). Ayrıca daha ekonomik bir yöntemle otomatik olarak hava boşluklarını ölçme denemeleri de yapılmaktadır. Kontrastlı bir şekilde hazırlanmış yüzey, ofislerde yaygın olarak kullanılan optik tarama cihazında taranıp bilgisayarda hava parametreleri bulunur (Peterson et al, 2001).

Şartnameler

Şartnameler genellikle daha kolay ölçülebilmesinden dolayı toplam hava boşluklarının ölçümünü temel alır. Genellikle agregre tanelerinin büyüklüğü ve çevre sertliğide göz önünde bulundurulur (ACI 318). Ayrıca dayanımı yüksek betonlarda (35 MPa dan fazla) toplam hava miktarında yüzde 1 gibi bir düşüşe izin verilir (ACI 318). Agregre büyüklüğü su ve çimento hamuru miktarını belirler. İri agregalarda daha az çimento hamuru olduğundan dolayı daha az toplam hava boşluğu gerekir.

Ancak esas önemli olan ölçekler L ve α dır. Bazı kurumlar bu değerleri araştırmalarda ve dayanıksız betonların incelenmesinde kullanırlar. Örneğin Kanada standartlarında donma direnci gereken betonlarda ortalama L 'in 0.23 mm den az ve tek L değerinin de 0.26 mm'den az olması istenir (CSA A23.1). Ontario Ulaştırma Bakanlığı bu kıstasları şartnamelerine koymuştur. L ve α parametreleri sertleşmiş betonda belirlenmektedir. Fakat taze betonda da belirlenememesi için çalışmalar sürdürülmektedir.

Bir diğer önemli husus da beton numunelerinin nereden alınacağıdır: transmikserden mi yoksa taşıma işleminden sonra mı (örneğin pompadan)? Genellikle hazır beton sahaya geldiğinde numune alınır. Fakat betonun transmikserden sonra kalıplara yerleştirilmesi esnasında yapılan taşıma işlemleri hava parametrelerini etkiler. Bu yüzden bazı kuruluşlar numuneleri beton kalıba girerken almaktadırlar. Bu olay dahi, kalıp içerisinde karşılaşılan yerleştirme ve yüzey bitirme usullerinin etkilerini kapsamaz. Bunları da dahil etmek için karot numunesi alıp, hava parametrelerini ölçmek gerekir. Yüzeyi tesviye etmek için yapılan gereğinden fazla düzeltme işlemi, beton yüzeyindeki hava

boşluklarının kaybolmasına ve bu bölgede donma direncinin azalmasına sebep olabilir.

UYGULAMALAR

Bu bildiride hava sürükleyiciler ve donma direnci ile ilgili üç uygulama örneği sunulacaktır: ilk olarak, katı kıvamdaki betonlarda karşılaşılan zorluklar ve vibratörlerin hava boşluklarına olan etkisi; ikinci olarak pompalabilen beton içerisindeki hava boşluklarındaki azalma ve dayanıklılığa olan etkisi; ve üçüncü örnek olarak ise süper akışkanlaştırıcıların hava boşluğu ve donma direncine olan etkileri.

Katı Kıvamlı Beton

Katı kıvamdaki betonlarda hava boşluklarını stabilize etmek zorlaşır. Ayrıca katı kıvamdaki beton daha fazla yerleştirme çabası gerektirir ve genellikle yüksek frekanslı vibratör kullanılır. Vibrasyon hava boşluklarını etkiler, büyük boşlukların kaybolmasına ve küçük boşlukların da azalmasına sebep olabilir. Virginia'da kayar kalıp kullanılan yol yapımında 10,000 rpm'lik yüksek frekanslar kullanılmaktadır. Halbuki yüksek frekans Iowa eyaletindeki yol betonunda hava kabarcıklarının kaybolmasına ve donma direncinin azalmasına sebep olmuştur. Yapılan çalışmalarda vibratörlerin hareket ettiği yol izinde hava boşluklarının kaybolduğu ve donma direncinin düştüğü belirlenmiştir. Bu nedenle frekans 5000 ile 8000 rpm arasına düşürülmüştür (Steffes and Tymcowics, 1997).

Araştırmalar iyi karışım oranına sahip betonlarda vibrasyonun hava boşluklarını azaltsa da hava parametrelerinde fazla bir olumsuzluğa yol açmadığını göstermektedir. Tynes betonun yüzde 8 toplam boşluk miktarını, vibrasyon ile yüzde 1.5'e indirmiş ve betonda, hâla yeterli miktarda küçük hava kabarcıklarının olduğunu göstermiştir (Tynes, 1975). Başka bir çalışmada da hava boşluklarının vibrasyon kullanımı ile azaldığını fakat donma direncinin hâla yeterli olduğu vurgulanmaktadır (Simon et al., 1992). Iowa'daki problem, betonda kullanılan malzemelerin iyi bir şekilde tasarlanmış olmamasından kaynaklanmaktadır. O bölgede agregalarda D-çatlama durumu gözlenmiştir. Bu yüzden iri agregalar kullanılmamakta ve betonda ince agrega miktarı yüksek tutulmaktadır. Bu tür betonlarda vibrasyonun çok küçük hava kabarcıklarını da kaybettirmesi mümkün olabilir, ve yeterli L 'in sağlanması mümkün olmayabilir. Virginia'da ise yol betonları iyi bir şekilde tasarlanmış olup, 25 mm ve 50 mm iri agregalar kullanılmaktadır. I-64 karayolunda yüksek vibrasyondan (10,000 rpm'den) sonra alınan karotlarda istenilen L değerleri görülmüştür (Özyıldırım, 2001).

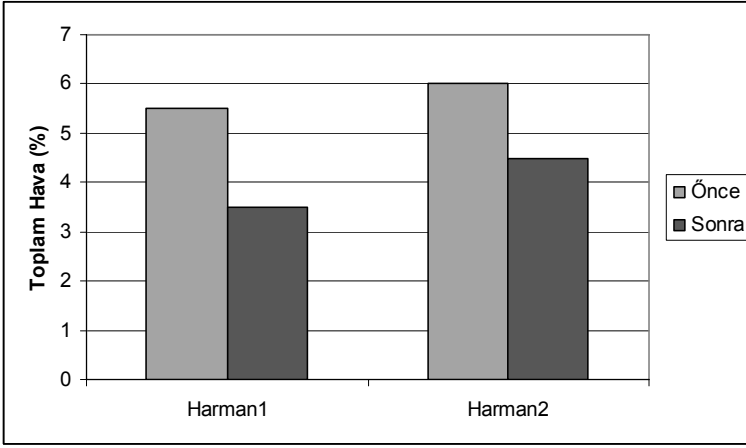
Pompalanabilen Beton

Pompalanma sonucunda betondaki hava boşluklarında bir azalma görülür. Bunun sebebi pompa hortumundaki basıncın hava boşluklarını daraltması, yaratılan vakumun hava boşluklarını büyütüp yok olmasına sebep olması, ve betonun düşmesi ile boşlukların ezilmesidir (Yingling et al, 1992). Dikey olarak yüksek mesafeden yapılan dökümlerde beton hava boşluklarının yarısı kaybolabilmektedir. Pompalamanın hava boşluklarına olan etkisini göstermek için Virginia'da pompa kullanılan iki köprüde üst döşemelerdeki betonu inceleyelim.

Richlands Köprüsündeki döşeme betonunda hava sürükleyiciler (ağaç reçinesinden) ve geciktirici (mısır şurubu/lignin tipi) katkıları kullanılmıştı. Pompa aleti köprü ile aynı hizada olup numuneler köprünün başında, pompadan alındı. Pompa hortumundaki betonda 10 metre den az bir düşüş oldu. Betonlar pompalama işleminden önce ve sonra denendi. Köprü betonlarındaki toplam hava boşluğu yüzdesi, şartnamede 6.5 ± 1.5 olarak belirtilmiştir. Toplam hava boşluğu yüzdesi, pompalamadan önce elde edildi, fakat pompalamadan sonra toplam hava miktarında azalma görüldü ve şartnamenin düşük sınırına ulaşmadı (Şekil 4). Hava parametrelerine bakıldığında küçük boşlukların kaybolmadığı, L nin fazla değişmediği ve 0.2 mm civarında olduğu görüldü, Çizelge 1 (Özyıldırım and Gomez, 2000). Ayrıca donma ve çözülme deneyi sonucunda (ASTM C 666) betonların yüksek dirence sahip olduğu belirlendi.

Çizelge 1: Richlands döşemesinde hava boşluğu parametreleri

Harman	Boşluk > 1mm (%)	Toplam Boşluk (%)	L (mm)	α (mm ⁻¹)	Dayanıklılık Faktörü (ASTM C666)
1	0.6	4.5	0.19	28.9	109
2	0.4	3.4	0.22	28.7	107



Şekil 4. Richlands Köprüsü döşemesinde pompalamadan önce ve sonra ölçülen hava miktarı

Lexington Köprüsündeki döşeme betonunda ise hava sürükleyici (kağıt endüstrisinden elde edilen yağ, genellikle çok küçük hava boşluğu stabilize eden), akışkanlaştırıcı (lignin) ve priz geciktirici (polimer tipi) katkıları kullanıldı. Bu köprüde, çatlamlar üzerindeki etkisini görmek için beş temel ayaktan birinin üzerindeki döşeme betonuna lif eklenmişti. Pompa donanımı köprü'nün altında bulunmaktaydı. Bu yüzden numuneler alınırken pompa hortumundaki düşüş 25 metre civarındaydı. Burada hava boşluklarında yüzde 5'e yaklaşan azalma görüldü (Şekil 5). L , 0.2 mm den daha az olduğu durumlarda (örneğin 4. Parti) dayanıklılık faktörü de yüksekti (Çizelge 2 ve 3). 2. Parti de yüksek L ve düşük dayanıklılık gösterdi. Ayrıca döşemeden alınan taze beton numunesinde L değerinin düşük olduğu görüldü.

Çizelge 2: Lexington Köprüsü döşemesinde hava boşluğu parametreleri.

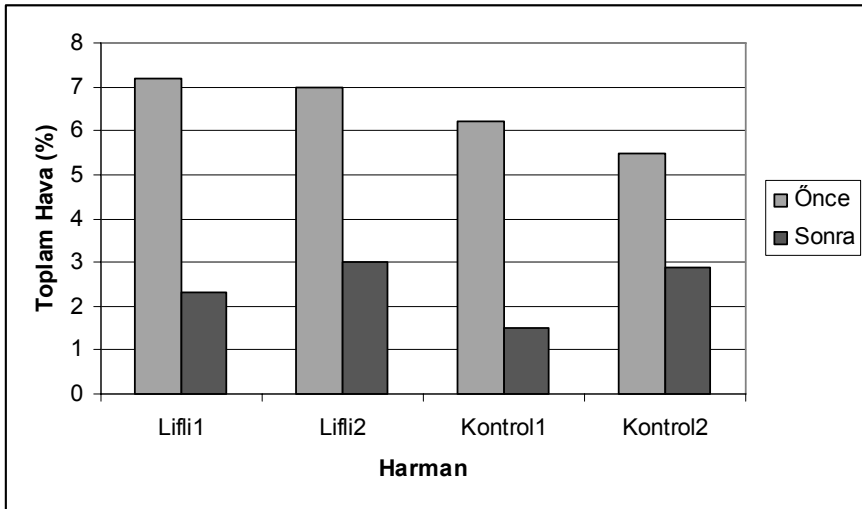
Beton	Parti	Hava Boşluğu (%)			α (mm ⁻¹)	L (mm)
		<1mm	>1mm	Toplam		
Lifli	2	2.6	0.7	3.3	21.0	0.29
	4a*	5.2	0.7	5.9	29.7	0.16
Kontrol	4b*	4.4	0.9	5.3	24.4	0.20
	Döşemede	9.7	0.7	10.4	35.2	0.08

*Parti 4 iki ayrı silindirde denendi, 4a ve b

Çizelge 3: Lexington Köprüsü döşemesinde ASTM C 666 değerleri.

Beton	Parti	Ağırlık Kaybı (%)	Dayanıklılık Faktörü*
Lifli	1	30	40
	2	32	30
Kontrol	3	45	25
	4	11	98

*ASTM C 666, A metodu, numuneler 2 hafta su küründen sonra en az 1 hafta hava temasında bırakıldılar ve deney sıvısında %2 NaCl vardı.

**Şekil 5. Lexington Köprüsü döşemesinde pompalamadan önce ve sonra ölçülen hava**

Bu iki köprüden numuneler alınırken beton akışı sürekli değildi. Pompa hortumu kullanılarak sadece numune alabilmek için el arabasının içine az bir miktar beton alınmıştı. Araştırmalar kesintili akan yani sürekli olmayan beton akışlarında hava boşluğu azalmalarının daha fazla olduğunu gösteriyor. Lexington döşemesinde pompalama sonrası alınan numunelerde hava miktarındaki azalma Richlands döşemesindeki numunelerden daha fazlaydı. Lexington'da döşeme içerisinden alınan numunede hava boşluklarının yeterli olduğu görüldü. Dolayısıyla deneylerde görülen düşük direnç, numune alımı ile ilgili olabilir.

Yukarıda verilen örneklerden görüldüğü üzere, pompalama sonucu hava boşluklarında bir azalma olabilmekte ve bunun neticesinde şartnamelere uyum zorlaşabilmektedir. Fakat bu sonuç beton direncinde azalma olduğunu göstermez (Hover and Phares, 1996; Lessard et al, 1996). Toplam hava azal-

sa da L 'nin yeterli olması mümkündür. Direncin düşmesi daha ziyade hava miktarı düşüşünün yüzde 3 ten fazla olduğu durumlarda görülür (NRMCA CIP 21, 2005). Hava boşluğunun azalması, L 'nin sınır değerinin üstünde olması, veya direncin azalması daha ziyade uzun hortum kullanıldığında, sürekli olmayan yerleştirmelerde, ve yüksek mesafeden beton düşüşlerinde bir sorun olabilir (NRMCA CIP 21, 2005; Yingling et al, 1992). Bu durumlarda pompa sonundan veya döşemelerden alınacak numunelerden elde edilen L den veya donma direnci (ASTM C 666) deneyi sonucundan bir sorun olup olmadığını belirlenebilir. Sürekli akışı sağlamak ve yüksek düşüşü önlemek için pompa hortumunun son kısmının (3.5 metre kadar) döşeme üzerinde yatay durması veya pompa hortumunun sonunda akışı yavaşlatıcı önlemler alınması, örneğin 2 metre çapında bir döngü yapılması tavsiye edilir.

Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton

Süper akışkanlaştırıcılar kullanıldığı zaman betondaki sürükleyici hava boşluklarının genellikle büyüdüğü görülür (ACI 212.4R) ve L değeri yükselir. Süper akışkanlaştırıcıların (HRWRA) ilave edildiği betonlarda, genellikle düşük çimento su oranı kullanılır, az geçirgenlik gösterirler ve kritik doyuma gelmeleri zorlaşır. L değerlerinde artış olsa da donma dirençleri (ASTM C 666) yeterli olabilir (Emmanuel et al, 1992). Hava boşluklarının HRWRA kullanıldığı zaman büyümesi yüzünden Virginia'da şartmanelere ek yapılmış ve HRWRA eklendiği betonda toplam hava kabarcıklarının üst sınırı yüzde 1 artırılmıştır. HRWRA etkileri kendiliğinden yerleşen betonda (SCC) kolaylıkla görülür. Bu betonlarda akışkanlığı kolaylaştırmak için çok miktarda HRWRA kullanılır.

Virginia'da yapılan önyapımlı SCC beton elemanlardan oluşan köprüde toplam hava kabarcıkları şartname sınırları içindeydi, fakat donma direnci (ASTM C 666) deneyinde uygun netice alınamadı (Özyıldırım, 2003). Hava boşlukları çoğunlukla büyüktü ve küçük boşluklar azdı. Yeteri kadar hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmamıştı; çünkü HRWRA hava boşluklarına ve hava boşluklarının büyümesine sebep oluyordu. Bu da toplam hava boşlukları miktarını artırıyordu. Her zamanki hava sürükleyici miktarı kullanıldığında toplam hava boşluklarının artıp üst sınırı geçeceği ve dayanımı düşüreceği düşünülüyordu. Gereken hava parametrelerini elde etmek için sonradan yapılan çalışmalarda iki yaklaşım düşünüldü: birincisinde, daha fazla hava sürükleyici eklenmesiyle toplam hava miktarının yükselmesi ve yeterli dayanım için düşük su çimento oranının kullanılması; ikinci yaklaşımda ise farklı hava sürükleyicisi ve HRWRA kullanılması. Çalışmalarda yeni bir HRWRA kullanıldı. İçinde daha fazla köpük azaltıcı kimyasal katkıları vardı. Böylece HRWRA yüksek miktarda hava boşluğuna

sebeup olmuyordu ve yeterli hava sürükleyici katkısı ekleniyordu. Çizelge 4 de kullanılan malzeme miktarları gösterilmektedir. Çizelge 5 de ise L ve α daki gelişmeler özetlenmiştir.

Çizelge 4: Kendiliğinden yerleşen betonun karışım tasarımı

Malzeme	Cürufllu Beton	Yeni HRWRA
Çimento	488	476
Curuf	262	
Pozzolan		204
İri agrega	1451	1450
İnce agrega	1451	1392
Su	279	270
W/CM	0.37	0.40
AEA (mL/kg)	0.13	0.26 ve 0.33
HRWRA (mL/kg)	5.22	5.22

Çizelge 5: Kendiliğinden yerleşen betonun kiriş ölçümü değerleri

Malzeme	Hava Boşluğu (%)			α (mm ⁻¹)	L (mm)
	<1mm	>1mm	Toplam		
Cüruf	3.3	2.0	5.3	12.1	0.41
Kontrol	3.3	3.0	6.3	10.6	0.44
Yeni HRWRA	6.6	0.3	6.9	27.0	0.17
Yeni HRWRA	8.9	0.3	9.2	24.2	0.14

SONUÇ

Betonun donmaya karşı direncini tayin etmek için ASTM C 666 deneyi yapılmaktadır. Bu deneyde başarılı olmak için betonda hava sürükleyicilerle stabilize edilmiş yeterli miktarda küçük hava boşlukları gerekmektedir. Şartnameler, kolayca hesaplanabilir olmalarından dolayı genellikle toplam hava miktarını içermektedir. Hava parametrelerinden L ve α betonun dayanıklılığı bakımından toplam hava miktarından daha önemli olup hava boşluklarının boyutunu ve dağılımını belirtirler. Kritik bir doygunluğa erişmiş betonun donma direnci için belirli L ve α değerlerine ihtiyaç vardır. Beton geliştirilirken L ve α değerlerini ölçmekte fayda vardır. Yeni bir cihaz olan, AVA, L ve α nın hazır betonda da ölçülebileceği ümidini vermektedir. Fakat bu değerler genellikle sertleşmiş betonda tayin edilirler. L nin 0.2' mm den az olduğu zamanlarda ve tabiki gereken olgunluğa erişmiş ve dayanıklı agrega

kullanılmış ise betonun donmaya karşı direncinin iyi olduğu görülür. L 'nin 0.2'den fazla olduğu zamanlarda da bazı betonlarda yeterli donma direnci olabilir. Bu ASTM C 666 standardı ile belirlenebilir. Bütün bu deneyler zor olup özel yetiştirilmiş eleman ister, ve uzun zaman alır. Bu yüzden deneme karışımları geliştirilirken bu değerler bulunursa ve toplam hava miktarı ile bağlantısı belirlenirse saha da toplam hava miktarı ölçülmesiyle kalite kontrolü yapılabilir.

Beton içerisine düzgün bir şekilde yayılmış küçük hava boşluklarının sağlanması için hava sürükleyici katkıları gerekmektedir. Bu katkıların cinsi ve miktarı, diğer betonda kullanılan malzemeler, ve beton hazırlamasında ve uygulanmasındaki usuller hava parametrelerini ve dolayısı ile betonun dayanıklılığını etkiler. Yapı uygulamalarına örnek olarak verilen katı kıvamdaki beton, pompalanmış beton, ve süper akışkanlaştırıcılar ilave edilmiş beton, hava parametrelerinde değişikliklere sebep olur ve betonun dayanıklılığını etkileyebilir. Katı kıvamda ve yüksek vibrasyonla yerleştirilmiş ve içinde hava sürükleyici katkıları olan betonlar eğer karışım tasarımı iyi seçilmiş ise toplam hava boşlukları az olsada direnç gösterebilir; L ve α değerlerinin belirlenmesi veya direnç deneyinin yapılmasında da (ASTM C 666) fayda vardır. Bunlar yeterli sayıda küçük ve iyi bir şekilde yayılmış hava boşluklarının varlığını ve yeterli direnç olduğunu belirtebilir. Bunun bir benzeri de pompalama sonucu toplam hava boşluklarında düşüşler olsa da L ve α veya direnç deneyi yeterli boşlukların varlığını ve yeterli direnç olduğunu gösterir. Süper akışkanlaştırıcı içeren karışımlarda da hava boşlukları normal, fakat L ve α da direncin olmadığı görülebilir ve bu deneylerle belirlenir. Hava sürükleyici katkıları ilave edilmiş ve gerekli hava parametrelerine sahip, uygun malzeme ve orantılarla yapılmış, ve uygun olgunluğa erişmiş beton sahada uzun yıllar donmaya karşı dayanıklılığını korur.

KAYNAKLAR

1. ACI 201.2R *Guide to Durable Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2001
2. ACI 212.4R. *Guide to the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1993.
3. ACI 318. *Building Code and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
4. Bryant, M. How to Make Concrete That Will Be Immune to the Effects of Freezing and Thawing. *Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI SP-122*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1990.

5. Camposagrado, Gabriel R., *An Investigation on the Cause and Effect of Air-Void Coalescence in Air-Entrained Concrete Mixes*, R&D Serial No. 2624, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2006, 136 pages.
6. CSA A 23.1. *Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/ Methods of Test and Standard Practices for Concrete*. Canadian Standards Association, 2004.
7. Emmanuel, K.A., K.N. Charles, and T.G. Frank. Air Void System Parameters and Freeze-Thaw Durability of Concrete Containing Superplasticizers. *ACI Concrete International*, Vol. 14, No. 7, 1992, pp. 57-61.
8. Hover, K. C., and Phares, R. J. Impact of Concrete Placing Method on Air Content, Air-Void System Parameters, and Freeze-Thaw Durability. In *Transportation Research Record 1532, Advancements in Concrete Materials Technology*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 1-8.
9. Janssen, D.J., and M.B. Snyder. *Resistance of Concrete to Freezing and Thawing*. SHRP-C-391. Strategic Highway Research Program, National Science Foundation, Washington, D.C., 1994.
10. Kevorkian, A. A. Air-Entraining Admixtures. *ASTM STP 169D*. American Society for Testing and Materials 2006, pp. 474-483.
11. Kosmatka, S., B. Kerkhoff, and W.C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures, 14th ed.* Portland Cement Association, Skokie, Ill., 2002.
12. Lessard, M, Baalbaki M., and Aitcin P. C. Effect of Pumping on Characteristics of Conventional Concrete. In *Transportation Research Record 1532, Advancements in Concrete Materials Technology*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 9-14.
13. Magura, D., D. Evaluation of the Air Void Analyzer. *ACI Concrete International*. August 1966 pp 55-59.
14. NCHRP, *D-Cracking of Concrete Pavements*, NCHRP Synthesis Report 134, Transportation Research Board, Washington, DC, 1987.
15. NRMCA CIP 21, Loss of Air in Pumped Concrete, NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association, 2005.
16. Ozyildirim, C. Durability of Concrete Bridges in Virginia, ASCE Structures XI Proceedings: Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., 1993, pp. 996-1001.
17. Ozyildirim, C., and J. Gomez. High-Performance Concrete in the Richlands Bridge in Virginia. In *Transportation Research Record 1698, Concrete 2000*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 17-23.

18. Ozyıldırım, C. Evaluation of High-Performance Concrete Pavement in Newport News, Virginia. In *Transportation Research Record 1775, Concrete 2001*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001, pp. 118-124.
19. Ozyıldırım, C., SCC Application in an Arch Bridge in Virginia, *3rd International Symposium on High Performance Concrete*, PCI National Bridge Conference, October 19-22, 2003, Orlando, Florida.
20. Peterson, K.W., Swartz, R.A., Sutter, L.L., and Van Dam, T.J., Hardened Concrete Air Void Analysis with a Flatbed Scanner. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1775, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001, pp 36-43.
21. Powers T.C. Freezing Effects in Concrete. *Durability of Concrete, ACI SP 47*, 1975 pp. 1-11.
22. Simon, M.J., R.B. Jenkins, and K.C. Hover. The Influence of Immersion Vibration on the Void System of Air-Entrained Concrete. *Durability of Concrete, G. M. Idorn Symposium, ACI SP-131*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.
23. Steffes, R., and S. Tymcowics. Vibrator Trails in Slipformed Pavements. *Concrete Construction*, April 1997, pp. 361-368.
24. Tynes, W.O. *Investigation of High-Strength Frost-Resistant Concrete*. Miscellaneous Paper C-75-6. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1975.
25. Whiting, D.A., and M.A. Nagi. *Manual of Control of Air Content in Concrete*. Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1998.
26. Yingling, J., G.M. Mullings, and R.D. Gaynor. Loss of Air Content in Pumped Concrete. *ACI Concrete International*, Vol. 14, No. 10, 1992, pp. 57-61.

BETON ÜRETİMİNDE ALTERNATİF SU GEÇİRİMSİZLİK KATKILARININ KULLANIMI

Burak FELEKOĞLU

Araş. Gör.
Dokuz Eylül Üniversitesi,
İnş.Müh. Böl.
İzmir, Türkiye

Bülent BARADAN

Prof. Dr.
Dokuz Eylül Üniversitesi, İnş.
Müh. Böl.
İzmir, Türkiye

ÖZET

Beton üretiminde su geçirimsizlik katkısı olarak çoğunlukla modifiye lignosülfonat kökenli katkıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı bir su geçirimsizlik katkısının belli oranlarda kullanımının çimento harcı ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan katkı, modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi esteri karışımından oluşmaktadır. İlk aşamada bu katkı ile harç örnekleri hazırlanıp örneklerin; kılcal su emme, klor iyonu penetrasyon derinliği, toplam su emme, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Su emme özellikleri ile ilgili deney sonuçları sadece klasik modifiye lignosülfonattan oluşan bir katkı kullanılarak hazırlanan harçlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, katkının değişik kriterlere göre en uygun kullanım oranı belirlenmiştir. İkinci aşamada ise katkısız, %3 ve %5 oranında su geçirimsizlik katkısı kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Bu karışımlardan alınan örnekler üzerinde basınçlı su geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda uygun oranda modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi esteri karışımı kullanımının harç ve betonun su geçirimsizlik özelliğini olumlu etkileyebileceği, ancak basınç dayanımında bir miktar azalma meydana geleceği belirlenmiştir.

GİRİŞ

Beton üretiminde su geçirimsizlik katkıları özellikle havuz betonu, su deposu, temel betonu ve son kat döşeme betonu üretimlerinde zaman zaman talep edilmektedir. Ancak uygulamada su geçirimsizlik katkısı olarak çoğunlukla sadece modifiye lignosülfonat kökenli katkılar kullanılmaktadır. Bu katkıların betonda su geçirimsizliği sağlama mekanizmaları dolaylıdır. Su azaltma performansları ile beton bünyesinde oluşacak kapiler boşlukların miktar ve boyutunu küçültmektedirler [1]. Böylece betonun bünyesine su ve benzeri zararlı maddelerin girişi zorlaşmaktadır. Dolayısıyla su geçirimsizlik performansları üretimde sağladıkları su azaltma miktarı ile orantılıdır. Modifiye lignosülfonat kökenli katkıların su azaltma performansları da kullanım oranına bağlı olarak genellikle %10-12'yi geçmediğinden, su geçirimsizlik açısından çok etkili oldukları söylenemez. Bu çalışmada alternatif bir su geçirimsizlik katkısının belli oranlarda kullanımının harç ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir. Kullanılan katkı modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi esteri karışımından oluşmaktadır. Bu katkının kullanımı ile sertleşmiş betonun su geçirimsizlik özelliklerindeki değişiklikler karşılaştırmalı deneylerle ortaya konulmuştur.

AMAÇ

Bu çalışmada, pratikte en sık kullanılan su geçirimsizlik katkılarına alternatif olabilecek ve daha iyi performanslı beton üretimine olanak sağlayabilecek bir kimyasal katkının çimento harcı ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Kullanılan katkı modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi esteri karışımından (WRC) oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında WRC ve LS katkılı çimento harcı örneklerinin kılcal su emme, klor iyonu penetrasyon derinliği, toplam su emme, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Bu kapsamda WRC ve LS katkılarının çimento harcındaki performansı, şahit harç örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında WRC katkısının su geçirimsizliği sağlama açısından LS katkısına göre daha etkili olduğu görülmüş ve en uygun kullanım oranı belirlenmiştir. Ardından, beton üretiminde kullanılması halinde, WRC katkısının basınçlı su geçirimsizliğini ve basınç dayanımını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar

Kullanılan malzemeler

Çimento harcı ve beton üretimlerinde CEM I 42.5 tipi normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur. Harç karışımlarında kırma kum, beton karışımlarında da kırma kuma ilave olarak 5-15 mm ve 15-25 mm tane boyutlarında kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agreganın özellikleri Tablo 2’de ve tane boyut dağılımları Şekil 1’de verilmiştir. Beton üretiminde kullanılan agreganın tane boyut dağılımı da Şekil 1’de görülmektedir.

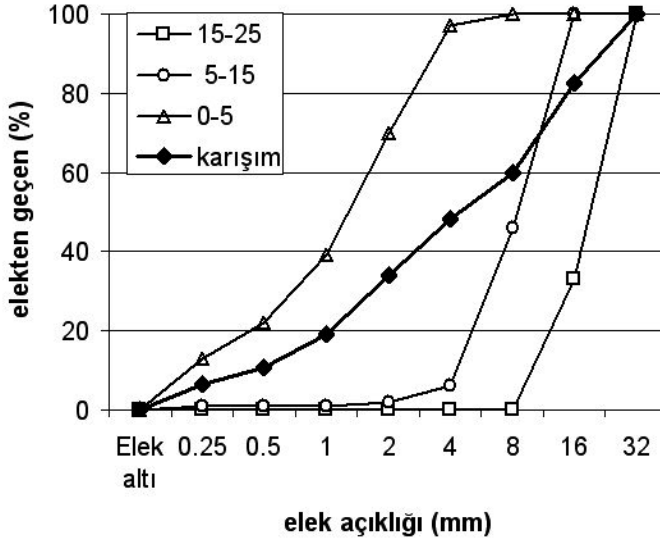
Tablo 1. CEM I 42.5 çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Karma oksit kompozisyonu	C ₃ S (%)	56.40	Fiziksel ve mekanik özellikler	Özgül ağırlık	3.11
	C ₂ S (%)	15.80		Blaine - Özgül yüzey (m ² /kg)	340
	C ₃ A (%)	10.95		Priz başlangıcı (dak.)	145
	C ₄ AF (%)	7.53		Priz bitişi (dak.)	215
				28 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	48.5

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	kırma kireçtaşı iri agregası		kırma kum
	15-25 mm	5-15 mm	0-5 mm
özgül ağırlık (kuru)	2.68	2.70	2.59
özgül ağırlık (K.Y.D)	2.69	2.71	2.62
su emme (%)	0.25	0.39	1.21

Su geçirimsizlik katkısı olarak aynı firmanın ürünü iki farklı katkı kullanılmıştır. İlki sadece modifiye lignosülfonat kökenli bir ürün (LS) iken diğeri modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi ester karışımından oluşmaktadır. WRC isimli ikinci katkı uygulamada kullanılan katkılardan farklı bir kimyasal yapıya sahiptir. WRC ve LS katkılarının özgül ağırlıkları ve pH değerleri sırasıyla 1.35, 1.16 ve 8.2, 5.6 olarak ölçülmüştür. Her iki katkının da suda çözülebilir klor içerikleri 3000 ppm’in altındadır.



Şekil 1. Agregaların tane boyut dağılımları

Deney programı

Çimento harcı karışımları deney programı

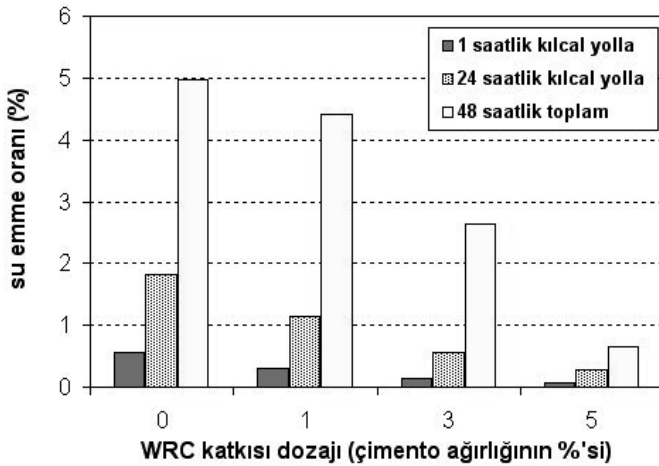
İlk aşamada farklı oranlarda WRC ve LS katkıları içeren harç karışımlarının kılcal ve toplam su emme özellikleri standart harç karışımı ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan harç karışım oranları Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'den görüleceği üzere WRC katkısı için katkı ağırlığının bir kısmı su olduğu için karışım suyundan katkı ağırlığı kadar azaltma yapılmıştır. LS katkısının kullanıldığı karışımlarda ise katkı dozajına bağlı olarak su azaltması yapılmıştır. Katkıların deneysel çalışma kapsamında taranan kullanım oranları değişkenlik göstermektedir. LS için (sadece modifiye lignosülfonat kökenli) %1'in üzerinde kullanımın priz geciktirici ve hava sürükleyici etki yapacağı dikkate alınarak üst sınır %0.8 olarak belirlenmiştir. WRC katkısında ise modifiye lignosülfonat miktarının katkıdaki oranı düşük düzeylerde dir. Bu yüzden kullanım oranı taramasında %5'e kadar çıkılmıştır. Ancak WRC katkısının da yüksek oranda kullanımda hava sürüklenme etkisi olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçları sonraki bölümlerde sunulacaktır.

Hazırlanan harç karışımlarının ASTM C187 [2]'ye göre yapılan sarsma tablası kıvam deneyi sonuçları da Tablo 4'de verilmiştir. Karışım suları yayılma çapı 115 ± 5 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Her karışımından altışar adet $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Bunlardan yarısı 28 gün boyunca suda, diğer yarısı ise 7 gün boyunca suda

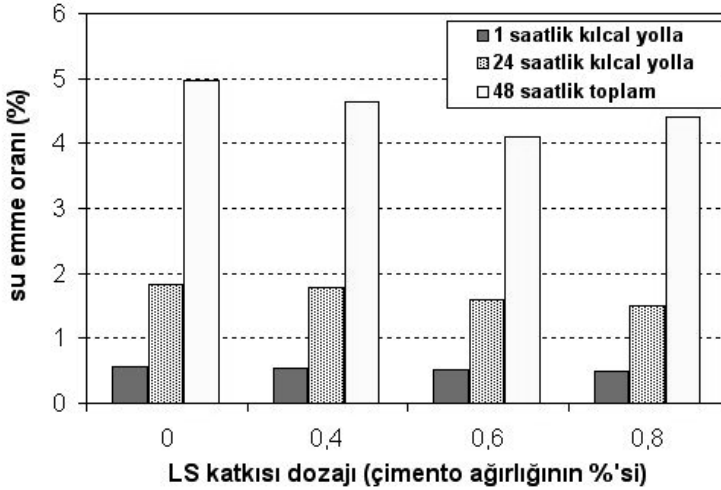
ve izleyen 28 gün boyunca %5 NaCl çözeltisinde bekletilmiştir. İlk set 28 gün sonunda sudan çıkartılıp kurutulmuştur. Ardından kuru örnekler, kılcal su emme deneyleri için tabandan 1-2 mm kadar suya dokunacak şekilde plastik çıtalar üzerine yerleştirilmiştir. 1 ve 24 saat sonraki ağırlıkça su emme miktarları belirlenmiştir. 24 saatin sonunda örnekler tamamen suya gömülerek 24 saat daha beklenmiştir. Sudan çıkartılan örneklerin ağırlık artışları toplam su emme olarak kaydedilmiştir. WRC ve LS katkıları içeren örneklerin su emme deney sonuçları Şekil 2 ve 3'de görülmektedir. Su emme ile ilgili deneyler tamamlandıktan sonra WRC katkılı örnekler 35. güne kadar tekrar suda bekletilmiştir. Daha sonra bu örneklerin ASTM C348 [3] ve C349 [4] standardına göre eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4'de sunulmuştur. İkinci set (tuzlu suda bekletilen) örnekler de 35. günde çözeltiden çıkartılıp ortadan ikiye bölünmüştür. Örneklerin kırık yüzeyine 0.1 N'lik gümüş nitrat (AgNO_3) çözeltisi püskürtülerek renk farkının oluşması beklenmiştir [5]. Renk farklılığı oluşan alan ölçülerek klor iyonu işleme derinlikleri tüm örnekler için belirlenmiştir. Şekil 5'de WRC katkısının klor iyonu penetrasyon bölgesine etkisi görülmektedir.

Tablo 4. Harç karışımları ve özellikleri

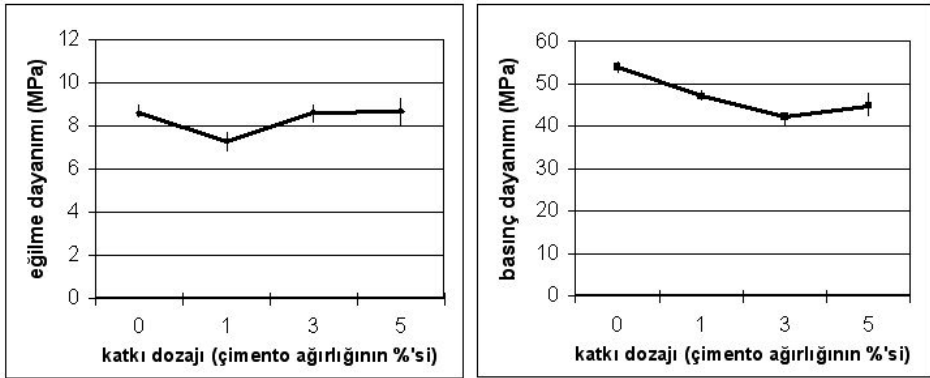
Karışım bileşenleri (g)	%0	%1 WRC	%3 WRC	%5 WRC	%0.4 LS	%0.6 LS	%0.8 LS
Çimento	675	675	675	675	675	675	675
Kum	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
Su	338	331	318	300	331	318	300
Katkı	0	7	20	38	3	4.5	6



Şekil 2. WRC katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri



Şekil 3. LS katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri

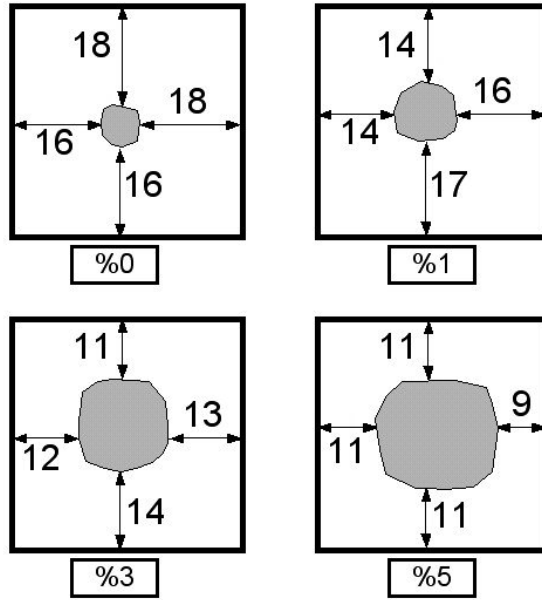


Şekil 4. WRC katkısının çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi (35 günlük)

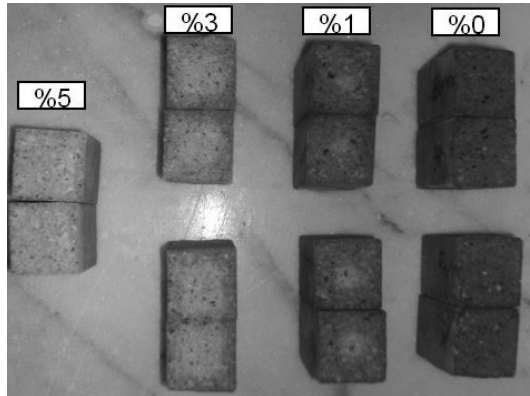
Çimento harcı karışımları deney sonuçları ve tartışma

Kılcal ve toplam su emme özelliklerini belirlemeye yönelik olarak yapılan her iki deney sonucunda da WRC katkısı dozajının artışı ile su emme değerleri azalmaktadır. %5 katkı kullanımı ile toplam su emme 3 kat azalmıştır. 24 saatlik kılcal yolla su emme oranında ise yaklaşık 7 kat azalma görülmüştür. 1 saatlik kılcal su emme değerleri ise katkısız kontrol örneğine kıyasla %7.5-8 oranında azaltmıştır. Ancak LS katkısı kullanılan karışımlarda su emme özelliklerinde belirgin bir azalma söz konusu değildir. Şekil 2 ve 3'den hem kılcal hem de toplam su emme oranlarında WRC katkısının su geçirimsizliği sağlamada sadece modifiye lignosülfonat (LS) kökenli katkıya

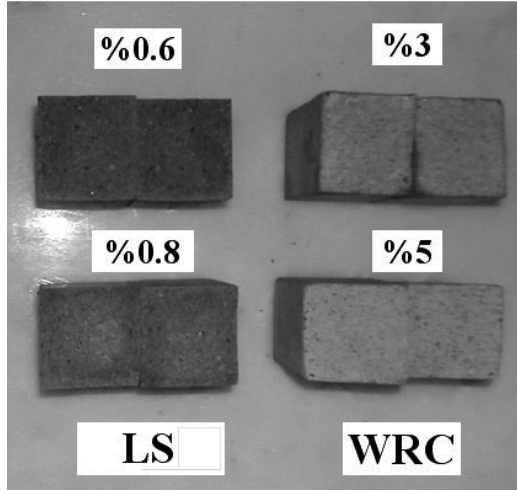
kıyasla çok daha etkili olduğu görülmektedir. WRC katkısının kullanım oranının arttırılması ile etkinliğinin nasıl arttığı görsel olarak Şekil 6'da verilen fotoğrafta görülmektedir. 35 gün suda bekletildikten sonra, sudan çıkan prizmatik örnekler eğilme deneyi düzeneği ile ortadan ikiye bölünmüştür. Kırıldıktan hemen sonraki yüzey görünümleri incelendiğinde, %5 WRC katkısı kullanımı ile suda bekleyen örneğin bünyesine su penetrasyonunun çok düşük oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7'de verilen fotoğrafta ise LS katkılı örneklerle WRC katkılı örneklerin kırık yüzey görüntüleri karşılaştırılmıştır. Aradaki fark görsel olarak da ortaya konulmuştur.



Şekil 5. WRC katkısının klor iyonu penetrasyon derinliğine etkisi



Şekil 6. Sudan çıkan WRC katkılı prizmatik örneklerin ortadan ikiye bölündükten sonraki yüzey görünümleri



Şekil 7. Sudan çıkan WRC ve LS katkılı prizmatik örneklerin ortadan ikiye bölündükten sonraki yüzey görünümleri

Şekil 5’de WRC katkılı çimento harcı örneklerinin 35 gün %5’lik NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra ortadan ikiye bölünüp yüzeye gümüş nitrat püskürtülmüş ve renk farkı oluşmuş alanları görülmektedir. Klor iyonlarının işlediği bölge WRC katkısı kullanımı ile azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar su emme özellikleri ile paralellik göstermektedir.

Hem su emme hem de klor iyonu penetrasyonu ölçümleri, WRC katkısındaki organik yağ asidi esterinin, beton bünyesinde oluşan boşlukların çeperlerinde hidrofobik bir tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Böylece su ve taşıdığı diğer zararlı maddeler beton bünyesindeki bağlantılı boşluklar arasında rahat hareket edememektedir.

WRC katkısının kullanım oranının artması çimento harcı örneklerinin eğilme dayanımlarında önemli bir değişiklik yaratmazken, örneklerin basınç dayanımları %3 ve %5 kullanımda yaklaşık %15-20 oranlarında azalmaktadır (Şekil 4). Basınç dayanımındaki bu azalmanın iki nedeni olduğu düşünülmektedir. İlk nedenin WRC katkısının hava sürükleyici etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu etki bir sonraki bölümde sunulacak olan hava içeriği ölçümleri ile ispatlanmıştır. İkinci neden ise su iticiliği nedeniyle hidrasyon için gerekli ilave kür suyunu bünyesine alamaması ve sadece bünyesel su ile kür olması olarak sıralanabilir.

Hem su emme özellikleri hem de dayanım gelişimi dikkate alındığında çalışmanın ikinci aşamasında LS katkısının kullanılmamasına karar verilmiştir. Çimento harcının kılcal su emme özelliklerini olumlu etkileyen WRC katkısı

kullanılarak beton karışımları hazırlanıp basınçlı su geçirimsizlik ve dayanım özellikleri incelenmiştir:

Beton karışımları deney programı ve sonuçlar

%0, %3 ve %5 WRC katkılı beton karışımları üretilmesi amacıyla Tablo 5’de verilen karışım oranları kullanılmıştır. Ayrıca taze beton karışımlarının çökme değerleri ve hava içerikleri de ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir. Her karışımdan üçer adet 15 cm ayrıtlı küp örnek ve üçer adet 20 cm çaplı ve 12 cm yükseklikli silindir örnekler hazırlanmıştır. Küp formundaki örnekler 2 tabaka ve her tabakada 25’er şiş darbesi ile, silindir formundaki örnekler ise 2 tabaka ve her tabakada 31’er şiş darbesi ile sıkıştırılmıştır. Bu örnekler sırasıyla 28 günlük iken basınç dayanımı ve 60 günlük iken su geçirimsizlik deneylerinde kullanılmıştır.

Hazırlanan beton örnekler üzerinde 60 günlük iken basınçlı su geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır [6]. Şekil 8’de görülen aynı anda üç örneğin test edilebildiği ölçüm düzeneği kullanılmıştır. 60 gün suda kür edilen örnek kurutulup deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Örnekler silindir formu 20 cm çap 12 cm yükseklikte olup, her bir örnek üst yüzeyinden 10 cm çaplı bir alan su basıncına maruz kalacak şekilde ve deney örneklerinin üst ve alt yüzeylerinde su geçecek kısımlar dışında tamamen parafinle yalıtılarak cihaza yerleştirilmiştir. Kapak vidaları üniform olarak iyice sıkılarak, kapakla deney numunesi arasında sızdırmazlık sağlanmıştır. Sonra, kompresör çalıştırılarak 1 atmosfer basıncındaki su örneklerle uygulanmıştır. Kompresör basıncı sabit tutma amacıyla gerektikçe otomatik olarak çalışmaktadır.

Tablo 5. WRC katkılı betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri

Karışım bileşenleri (kg/m ³)	WRC katkısı oranı		
	%0	%3	%5
Çimento	300	300	300
Su	200	195	190
Kum	892	892	892
5-15 iri agrega	469	469	469
15-25 iri agrega	467	467	467
WRC katkısı	0	9	15

Çökme (cm)	15	17	17
Hava içeriği (%)	1.1	2.8	4.5



Şekil 8. Permeabilite katsayısı ölçüm düzeneği

Deney başlangıcından itibaren zamana bağlı olarak beton bünyesine basınçla penetre olan su miktarları belirlenmiştir. Bu amaçla aygıtın bölmelendirilmiş camlı kısmındaki su azalması belirli zamanlarda okunarak kaydedilmektedir. Bu ölçümler grafik hale getirilip zamana bağlı akışın kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Ancak akış sözü edilen su basıncı altında kararlı hale gelip beton bünyesinden geçerek alt tabana ulaşamamıştır. Sadece betona deney süresince penetre olan su miktarı ölçülebilmektedir.

Katkısız ve katkılı betonların 1 atmosfer basınç altında 3 gün sürede bünyelerine penetre olan su miktarları ve 28 günlük basınç dayanımları Tablo 6'da sıralanmıştır. Tablo 6'dan görüleceği üzere WRC katkısının %3 oranında kullanımı ile basınçlı suyun penetrasyonuna karşı yaklaşık 3 kat, %5 oranında kullanımı ile yaklaşık 10 kat dirençli beton üretimi mümkün olmaktadır. Ancak, beton geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyen WRC katkısı basınç dayanımını bir miktar azaltmıştır. Yaklaşık olarak %18'lik bir basınç dayanımı kaybı söz konusudur.

Tablo 6. WRC katkısının beton bünyesine basınçlı yolla penetre olan su hacmine ve basınç dayanımına etkisi

WRC katkısı kullanım oranı	Beton bünyesine 3 günde penetre olan 1 atmosfer basınçlı su hacmi (cm ³)	Basınç dayanımı (MPa)
%0	185	24
%3	60	21.5
%5	20	19.6

SONUÇ

Modifiye lignosülfonat ve organik yağ asidi esteri karışımından oluşan WRC katkısının kullanımı ile çimento harcının kılcal ve toplam su emme direncinin önemli oranda arttığı, çimento harcına klor iyonu penetrasyonunun azaldığı belirlenmiştir. WRC katkısı betonda %5 oranında kullanılması halinde de basınçlı yolla su geçirimsizliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Organik yağ asidi esteri beton bünyesinde oluşan boşlukların çeperlerinde hidrofobik bir tabaka oluşturmakta ve suyun iç kısımlara ilerlemesini engellemektedir. Öte yandan WRC katkısının çimento harcında kullanımı eğilme dayanımını önemli derecede etkilemezken, basınç dayanımını bir miktar azaltmıştır. WRC katkısının beton üretiminde %3 ve %5 oranlarında kullanılması halinde de çimento harcından elde edilen sonuçlara paralel şekilde basınç dayanımının yaklaşık %10-20 oranında azaldığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar deneysel çalışmalarda kullanılan katkıların teminindeki desteklerinden dolayı KONSAN Bilgi ve Teknoloji Üretimi A.Ş.'ye; çimento harcı ve beton deneylerinin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı İnş.Yük.Müh. Ayşegül Akgül ve İnş. Müh. Berna Kızıllığın'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

1. Erdoğan, T.Y., Admixtures For Concrete, Middle East Technical Univesity Press, Ankara, Turkey, 1997, 188 p.
2. ASTM Standards, Standard test method for normal consistency of hydraulic-cement (ASTM C187), Annual Book of ASTM Standards, 2002, 2 p.
3. ASTM Standards, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars (ASTM C348), Annual Book of ASTM Standards, 2002, 6 p.
4. ASTM Standards, Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars - Using portions of prisms broken in flexure (ASTM C349), Annual Book of ASTM Standards, 2002, 4 p.
5. Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. Constr Build Mater 1993;7(4): 195–201.
6. Türk Standartları, Betonda geçirimsizlik katsayısı tayin metodu (TS 3455), Türk Standartları Enstitüsü, 1981, 7 sayfa.

SIFIR SLUMP BETON ÜRÜNLERİ İÇİN KİMYASAL KATKILAR VE UYGULAMALARI

Osman Onur TEZEL

Ürün Sorumlusu
BASF Yapı Kim.
San. A.Ş.
İstanbul,Türkiye

Okan DUYAR

Ürün Müdürü
BASF Yapı Kim.
San. A.Ş.
İstanbul,Türkiye

Gülnihal AYKAN

Ar-Ge Müdürü
BASF Yapı Kim.
San. A.Ş.
İstanbul,Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada sıfır slump beton endüstrisi için nano teknoloji kullanılarak geliştirilmiş kimyasal beton katkılarının sıfır slump beton ürünlerine etkisi anlatılmıştır. Yeni geliştirilen bu katkıların çalışma mekanizması, sıfır slump betonun üretimine ve elde edilen nihai üründe yaptığı iyileştirmelerden bahsedilmiştir. Ayrıca yeni katkılar geliştirilirken kullanılan, sıfır slump beton ürünleri üretim prosesini yansıtabilen laboratuvar test metodu hakkında bilgi verilmiş, taze ve sertleşmiş beton özellikleri, ürünün/üretimin iyileştirilmesinde kullanılacak değerlerin elde edilmesi ve yorumlanması anlatılmıştır. Son olarak bu katkılar endüstriyel ortamda denenmiş, sıfır slump beton ürünlerin yüzeylerinde iyileştirmeler, erken ve nihai dayanımlarında (yarmada çekme dayanım) artışlar elde edilmiştir.

GİRİŞ

Beton; dünyada en çok kullanılan inşaat malzemesidir. Betonun inşaat sektöründe kullanımı ön üretimli ve sahada üretilmiş olarak ikiye ayrılabilir. Parke, kilit taşı, briket,bordür ve boşluklu döşeme gibi ürünlerin üretiminin en önemli ortak yanı ürünlerin üretildikten hemen sonra şekillendirilmesi ve/veya sıkıştırılmasıdır. Sıfır slump beton ile yapılan üretimler, ön üretim ve sahada üretim sektörlerinden çok daha farklı üretimlerdir. Genellikle

üretiminin düşüklüğü, teknolojisinin farklılığı ve ürün değerlendirmesinin sahada üretilen betondakine göre olan güçlüğü nedeni ile genelde ihmal edilmiştir.

Sıfır slump beton ürünlerinin, ön üretim elemanları ve hazır betondan ayıran üç özelliği vardır. Birincisi, üretim sırasında sıkıştırma ve vibrasyon için yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. İkincisi üretim prosesleri otomatik ve çok hızlıdır. Sıfır slump beton ürünlerin en önemli üçüncü özelliği; son ürünün kalitesinde üretim prosesinin etkisinin fazla olmasıdır. Daha etkili bir proses ,yani sıkıştırma ve vibrasyonun daha iyi yapılması, nihai ürünün kalitesinin daha iyi olmasını sağlar.

Beton katkısı üreticileri; önceleri sıfır slump ürünlerin üretimini laboratuvar ortamında yansıtabilecek uygun bir test metodu olmadığı için laboratuvarda yeni ürün geliştirmekte zorlanmaktadırlar.(1)(4)

Ön üretim ve hazır betonda üretimin laboratuvarda yansıtılması çok iyi uygulanırken, sıfır slump'lı ürünlerde bunu yapmak imkansızdır. Bu da bu önemli sektör için yeni bir kimyasal katkı gelişimini engellemektedir. Direkt üretimde yeni katkıların test edilmesinden başka bir alternatif yoktur. Bu amaç için; üreticiler üretim ve verimlilik kaybını kabul ederek; normal üretimlerini kesmek zorunda kalmaktadırlar. Ayrıca bu testler laboratuvarda elde edilmiş ön sonuçlar olmaması nedeni ile çok risklidir. Bu da sıfır-slump'lı betonda neden yenilikten uzak, eski hammaddelemlerden oluşan katkıların yaygınca kullanılmasını açıklamaktadır.(1),(2)

Geliştirilen bu katkılar, sadece son ürünlerin kalitesinin geliştirilmesi için değil, üretim prosesinin iyileştirilmesi amacına yönelik bir hedef belirlenerek geliştirilmiştir. (1)

AMAÇ

Bu çalışmada Avrupa'da sıfır-slump ürünler için yeni geliştirilen beton kimyasal katkıların çalışma mekanizması, laboratuvar denemeleri ve Türkiye'deki üretim teknolojisi ile uyumu incelenerek elde edilen sonuçların yorumlanması yapılacaktır.

Avrupa'da uzun yıllar çalışma yapılarak sıfır slump'lı beton üretimlerinin bir çok türü için geçerli olabilecek bir deney prosedürü geliştirilmiştir. Bu deney prosedürüne dayanılarak geliştirilen ürünlerin saha denemeleri Türkiye'de de yapılmıştır. Bu çalışmada laboratuvar deney prosedürünün bilgisi verilecek, Türkiye'de elde edilen saha denemelerinin ürün geliştirme hedeflerini sağlayıp sağlamadığının incelenmesi amaçlanmıştır.

Kimyasal Katkının Çalışma Mekanizması

Nano teknoloji sayesinde beton katkı kimyasalları bilimi için yeni ufuklar açılmıştır. Nano teknoloji kullanılarak moleküllerin her parametresini kontrol etmesini sağlayan bir teknoloji geliştirilmiştir. Polimerin yapısını belirleyen bir çok parametre vardır. Polimerin fiziksel ve kimyasal parametreleri kontrol edilebilen özellikler aşağıdadır:

- Zincir Uzunluğu
- Yan zincir uzunluğu
- Elektrik Yükleri
- Yan zincir Yoğunluğu
- Serbest Fonksiyonel gruplar

Polimerin tüm parametreleri sıfır slump betonda kullanılması için optimize edilmiştir.

Bu yeni polimer molekülleri 4 farklı şekilde çalışır:

1. Tane Yayılması: Yeni geliştirilmiş polimer çimento tanelerini çok iyi yayılmasını sağlayarak çimento tanelerine çift etki yapar. Bunlar, elektrostatik ve sterik etkilerdir. Bu polimerlerin güçlü yayılma etkisi sıfır slump betonlarda kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu yayılma etkisi sayesinde ürünlerde bulunan pigment taneciklerin homojen bir yayılarak daha estetik ürünler elde edilebilir.
2. Üçlü Etki: Sıfır Slump betonda katı tanecikleri arasındaki sürtünme ve enerjiyi azaltarak ürünlerin daha iyi sıkışmasını sağlar. Bu da sıkıştırma sırasında daha az enerji ile ürünlerin daha iyi sıkışmasına olanak verir. Ayrıca bu etki sayesinde karışımların suya olan toleransı artar ve bu da ürünlerin sıkışmasına ve yüzeyin görüntüsünün gelişmesine yardımcı olur.
3. Gözenek Dağılım Optimazasyonu: Sıfır Slump betonda oluşan gözeneklerin oluşmasını azaltarak optimize eder ve ürünün dayanımı ve dayanıklılığını arttıran etkiyi sağlar.
4. Gelişmiş Çimento Hidratasyonu: Polimerin bu etkisi sayesinde hidratasyon ürünlerinin çimento taneleri arasında daha derine penetre olmasını sağlayarak hidrate çimento parçası sayısını artırır. Bu da beton dayanımı azaltmaksızın çimento miktarını azaltma imkanı sağlar. (1)

Yeni Laboratuvar Test Metodu

Hazır beton ve ön üretimli beton sektörlerinde üretimin laboratuvarda yansıtılması sayesinde üretim şartlarının iyileştirilmesi/geliştirilmesi daha

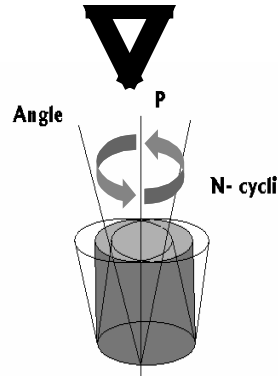
kolay olmaktadır. Sıfır Slump Beton sektörü içinde böyle bir test metodunun olması üretimin iyileştirilmesini ve sektörün yeniliklere daha açık olmasını sağlayacaktır.(1)

Buna göre; endüstriyeldeki üretimi yansıtan ve üretim sonunda elde edilecek sonuçların önceden tahmin edilmesine yardımcı olan bir laboratuvar test metodu geliştirilmiştir. Geliştirilen test metodu ile, beton numuneleri; üretimdeki sıkışma, değişik yönlü basınç ve dönme gibi etkileri laboratuvarda üretebilen bir teknoloji ile sıkıştırmaktadır. (Resim1 ve Resim 2) Bu sayede endüstriyel ortamdaki üretim prosesi laboratuvar ortamında canlandırılmaktadır.

Bu test metodunda; hedeflenen birim ağırlık değeri ve ihtiyaç duyulan enerji veya sıkışma elde edilmeye veya taze betonun birim ağırlığını arttırmak için üretim prosesi kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntem ile sıfır slump betonların reolojiside değerlendirilmektedir.(3)



Resim 1: Laboratuvar Test Aleti



Resim 2: Numuneye uygulanan basınç ve dönme etkisi

Bu test metodu ile üretim ile ilgili çok önemli iki bilgiye ulaşılabilir:

İlk olarak, doldurulabilirlik ölçülebilir. Doldurulabilirlik, betonun kalıplara dolma özelliğini gösteren bir parametredir. Yüksek doldurulabilirlik, kalıpların daha hızlı doldurulabileceğini belirtir. Bu sayede verimlilik artırılabilir veya doldurulabilirlik düşürülerek enerji daha verimli kullanılabilir. Böylece prosesin etkinliği geliştirilir.

İkinci önemli bilgi ise sıkıştırılabilirliktir. Yani; ürünün istenilen birim ağırlığa ulaşabilmesi için betonun sıkıştırılabilme kolaylığına sıkıştırılabilirlik denir. Endüstriyelde bunun karşılığı; basınç ve vibrasyona maruz kalan kalıplardaki beton karışımının sıkıştırılabilirliğidir.

Bu test metodu sayesinde; sıkıştırma işleminin maruz kalan betonun reaksiyonu ve katkı ile bu reaksiyonun nasıl geliştirilebileceği değerlendirilebilir. Elde edilen değerler, katkının performansının geliştirilmesinde önemli bir avantaj sağlar.(1,3)

Laboratuvar Uygulaması:

Laboratuvar çalışması için üreticinin kullandığı hammaddeler ve karışım dizaynları alınır. Daha sonra üreticinin isteklerine göre üretim prosesinin iyileştirilmesi veya karışım optimizasyonu ihtiyacına göre uygun karışım ve/veya çevrim sayısı belirlenmeye çalışılır.

Örnek verecek olursak Tablo 1'de çevrim sayısı sabit tutularak hedeflenen birim ağırlıktan daha yüksek bir ürün elde edilmiştir. Bu da bize karışım optimizasyonuna gitmemize olanak sağlamıştır. Ayrıca karışımdan çimento miktarı azaltılmasına rağmen dayanımlarda bir düşüklük gözlenmemiştir. (R esim3,4,5)

Tablo 2'de ise referans karışımında bir değişiklik yapılmadan önce birim ağırlık değerleri sabit tutularak, üretim prosesi hızlandırılma yoluna gidilmiştir. Birde çevrim sayısı referans ile aynı yapıp daha yüksek birim ağırlıklı ürünler üretilmiştir. (3,5)

Tablo:1 Çevrim sayısı sabit tutulup, karışım optimizasyonu yapılan çalışmalar

Katkı	Beton Karışımı	Birim Ağırlık (Kg/m ³)	Su (L/m ³)	Çevrim	Yüzeye Çıkan Şerbet Mik. (gr.)	Rc 24h 10°C (MPa)	Rc 24h 20°C (MPa)
Referans	Std. Karışım	2198	75,6	50	0,7	10,4	14,4
Katkılı	40 kg çim. azaltılmış	2234	75,6	50	0,8	10,7	16,1

Tablo:2 Birim ağırlık ve çevrim sayısı sabit tutularak yapılan çalışmalar

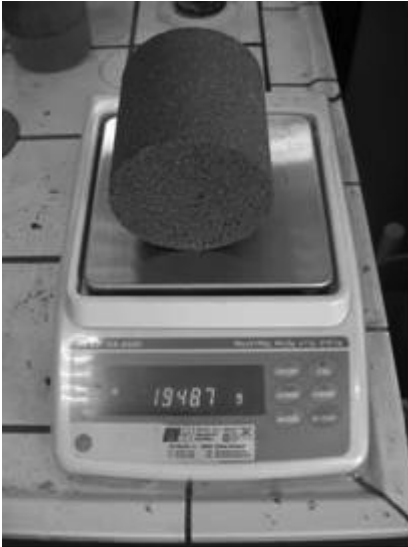
Katkı	Beton Karışımı	Birim Ağırlık [Kg/m ³]	Su (L/m ³)	Çevrim	Yüzeye Çıkan Şerbet Mik. (gr.)	R 24h 20° C (MPa)
Referans	Std. Karışım	2100	199	43,45	0,6	11,8
Katkı	Std. Karışım	2100	199	19,21	0,8	12,9
Katkı	Std. Karışım	2173,5	199	44	0,9	16,4
Katkı	Std. Karışım	2156,5	199	44	0,7	18,3



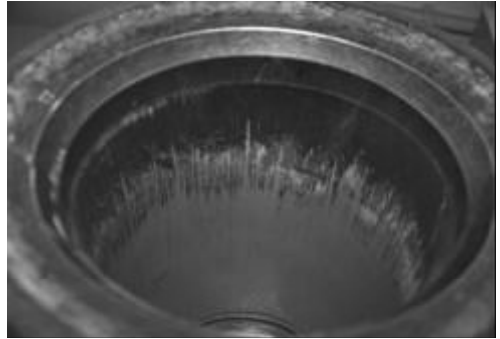
Resim 3: Malzemeler haznede



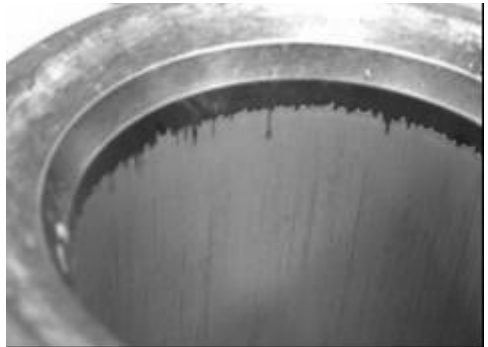
Resim 4: Numune sıkıştırıldıktan sonra



Resim 5: Numunenin ağırlığı



Resim 6: Katkılı Yüzey Şerbeti Miktarı



Resim 7: Katkisız Yüzey Şerbeti Miktarı

Bu çalışmada numune kabının yüzeyine yapışan şerbet miktarı belirlenerek katkının suya olan toleransı ve üretilen ürünlerin yüzey kaliteleri hakkındada bilgi sahibi olunmaktadır. Numune kalıbının yüzeyi ne kadar şerbetli ise bu karışım ile üretilcek ürünlerin yüzeyleride o kadar kaliteli ve homojen olacağı tahmin edilebilir.(Resim6,7)

Endüstriyel Saha Çalışmaları

Bu yeni ürünün Türkiye koşullarına adaptasyonunu sağlamak ve için seçilen bazı firmalarda bu ürünün kullanılan malzeme, karışım ve üretim prosesine uyumu araştırılmıştır. Yapılan uygulamalarda ürünün taze halde betonun ağırlığına, mekanik dayanımlara, sıkıştırmaya etkisi ve ürünlerin yüzey görüntüsünde yaptığı iyileştirme gözlenmiştir.

1. Saha Çalışması:

Tablo 3 : 1. Saha çalışmasının yarmada çekme sonuçları

	Ürün İsmi	Ort.Kalınlık (mm)	Ort.Ağırlık (gr.)	Yarmada Çekme 2g (MPa)	Yarmada Çekme 7g (MPa)
1	Referans	80,25	5015	1,81	2,47
2	Katkı I %0.5	80,4	5137,5	2,6	2,9
3	Katkı I % 0.5	79,8	5157,5	2,05	3,08
4	Katkı II%1	80	5015	1,94	2,88

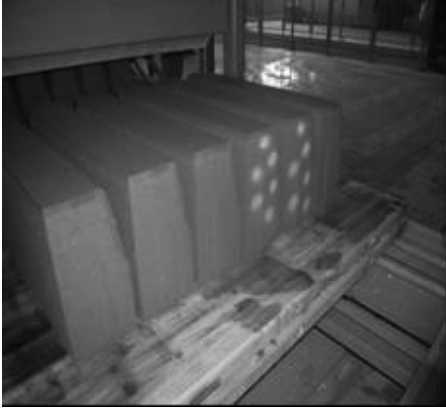
Yapılan endüstriyel çalışmada özellikle referans katkı ile yeni ürün karşılaştırıldığında ürünlerin ortalama ağırlıklarında % 2- % 3 arasında bir artış olduğu gözlenmiştir. Yarmada çekme dayanımlarında ise hem 2 günlük hemde 7 günlük kırınlarında ortalama % 20 oranında artış olduğu gözlenmiştir. Her deneme için 6 adet numune alınmıştır.

2. Saha Çalışması:

Tablo 4 : 2. Saha çalışmasının yarmada çekme sonuçları

	Ürün İsmi	Yarmada Çekme Dayanımı 2g (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı 7 g (MPa)
1	Katkı I %0,4	3,0	3,7
2	Katkı II %1,2	3,4	3,8
3	Katkı III %0,4	2,9	3,1
4	Referans	2,6	2,7

Yapılan ikinci çalışmada özellikle yeni ürün ile üretilen parke taşlarının yarmada çekme dayanımlarında hissedilir oranda bir artış gözlenmektedir. 2 günlük ve 7 günlük dayanımlarında ortalama % 20 ile % 30 oranında artışlar gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmalarda firmaların kullandığı karışımlar esas alınmıştır. Her deneme için 5'er adet numune alınmıştır.



Resim 7: Bordür Taşı Uygulaması



Resim 8: Önden Görünüş

SONUÇ

- Sıfır-Slump Beton sektörüne yeni bir açılım getiren bu katkı teknolojisi sayesinde daha kaliteli, durabilitesi yüksek, daha düşük maliyetli ve daha estetik ürünlerin elde edilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.
- Yeni geliştirilen katkıların karışımın suya olan toleransını artırarak, karışım içindeki agregaların rutubet değişikliklerinden kaynaklanan üretim hatalarını daha fazla tolere ederek ürünlerin daha yüksek su/çimento oranında sıkışmasını sağlar.
- Geliştirilen laboratuvar metodu ile üretim prosesi laboratuvar ortamına yansıtılarak ürün için doğru karışım dizaynı, doğru katkı ve doğru sıkıştırma süresinin bulunması ürünlerin kalitesinde iyileştirmesi ve üretim sürecinin optimize edilmesi sağlanır.
- Saha denemeleri sonucunda; laboratuvarda elde edilen sonuçların sahada da elde edildiği ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

1. Dr. Magaratto R., Dr. Zeminian N., "New Products For The Manufactured Concrete Products Industry" Concrete Technology 05/2006 p.40
2. Berrie I., "RheoFIT for MCP production" Concrete Engineering International, 04 2006 p 26
3. Dr. Zeminian N., "Innovative Lab Testing System" BASF MCP Internal Training Notes 11/2005
4. Dr. Magaratto R., Dr. Corradi M., "Looking at MCP from a New Perspective" BASF MCP Internal Training Notes 11/2005
5. BS EN 1338 : Concrete Paving Blocks Requirements and Test Methods.

SÜLFONE POLİAMİN BİLEŞİKLERİNİN BETON PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Gamze ERZENGİN

Kimya Yüksek Müh.
Karayolları 1.Bl.Md.
İstanbul / Türkiye

Emin ARCA

Prof.Dr.
Marmara Üniv.
İstanbul / Türkiye

Meral ARCA

Prof. Dr
Mavi Kimya A.Ş.
İstanbul / Türkiye

Afife GÜVENÇ

Doç.Dr.
Ankara Üniv.
Ankara / Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada sülfone poliamin (SPA) bileşiklerinin beton performansına etkileri, polinaftalin sülfonat (PNS) ve polimelamin sülfonat (PMS) süperakışkanlaştırıcılarına göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Polimelamin sülfonat ve polinaftalin sülfonat gerek herbiri ayrı olarak, gerekse sülfone poliamin bileşiği ile ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılarak beton karışımına eklenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkıları ile hazırlanan betonlara ait özellikler TS EN 934-2 “Kimyasal Katkıları – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Bölüm 2: Beton Katkıları – Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme” standardına uygun olarak belirlenmiş; karışım suyunu azaltma ve basınç dayanımı sonuçları TS EN 480-1 “Kimyasal Katkıları – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Deney Metotları – Bölüm 1- Deneyler İçin Şahit Beton ve Şahit Harç” standardına göre kontrol betonları hazırlanarak değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Yapılara dayanım veren ve özelliklerinde olumlu iyileştirmelere neden olan yapı kimyasallarının üretimi son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. İnşaat ve hazır beton sektörünün büyüme eğilimini koruduğu günümüzde,

kaliteli ve yüksek dayanım sınıfındaki betonların kullanım oranlarında olumlu artışlar yaşanmaktadır.

Beton katkı kimyasallarından akışkanlaştırıcılar, karışım suyunu yüksek oranda azaltarak betonun çökme (slump) kayıplarını minimum tutan, erken yüksek mukavemet almasını sağlayan, yüksek dayanıklılığa ve yüzey kalitesine sahip, beton yapımı için geliştirilmiş malzemelerdir. Kimyasal katkılarda yüksek oranda su azaltıcı özelliklerin 1970'li yıllarda bulunmasıyla birlikte bu katkılar, yüksek dayanımlı beton teknolojisinde beklenen yerlerini almışlardır.

Süperakışkanlaştırıcılar, sülfonat bazlı (SO_3^-) ve karboksilat (COO^-) bazlı olanlar olmak üzere iki grupta toplanmıştır. Polinaftalin sülfonat (PNS), bu alanda üretilen ilk süperakışkanlaştırıcıdır [1]. Sülfonat grubuna sahip olan diğer önemli süperakışkanlaştırıcı ise polimelamin sülfonattır (PMS).

Sülfonat bazlı süperakışkanlaştırıcılarda (PNS ve PMS) çimento içindeki elektrostatik etki daha ön plandadır [2,3]. Bu yapılar, çimento tanelerinden aluminat (C_3A) fazına adsorplanarak yüzeyde negatif elektriksel yüklerden oluşan bir potansiyel meydana getirirler. Yüzey potansiyelleri, taneler arasında elektrostatik itme kuvveti oluşturarak dağılımı sağlarlar. Çimento tanelerinde topaklaşma engellendiğinden su ile taneler arasındaki etkileşim artar sonuçta, düşük dozlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcılar bile çimento hidratasyon hızını arttırmaktadır [4].

Sülfone poliamin bileşikleri, sülfonat bazlı olup Mavi Kimya A.Ş. tarafından üretilmekte; PMS ve PNS ile birlikte kullanılabilir. Özellikle priz sürelerini hızlandıran bir yapıya sahiptir.

Yüksek oranda su azaltma özellikleri ile, betonun basınç dayanımında artışlara neden olarak performansının iyileşmesini sağlayan süperakışkanlaştırıcı katkılar optimum dozda kullanılmalıdır. Optimum doz, betonda iyi bir işlenebilirlik özelliği sağlayan, uygulama zamanına kadar kıvamını koruyan, geciktirme ve buna bağlı olarak basınç dayanımında azalma oluşturmeyen katkı miktarı olarak tanımlanır [5]. Gerek betonun fiziksel özellikleri ve fonksiyonunun tam olarak sağlanması, gerekse üretimde en uygun maliyetin oluşturulabilmesi için katkının optimum dozunun belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

AMAÇ

Sülfone poliamin bileşiği, polinaftalin sülfonat ve polimelamin sülfonat süperakışkanlaştırıcıları ile farklı oranlarda karıştırılarak katkılı beton numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada, bu bileşiğin betonun işlenebilirliği,

dayanımı ve üretim maliyetine nasıl katkıda bulunduğunun araştırılması amaçlanmaktadır.

DeneySEL Çalışma

Malzemeler

Deney sisteminde kullanılan agregalar (No.1, No.2, kırma kum) Ayhanlar Gebze Aytaş Taş Ocağından temin edilmiştir. Doğal kum olarak Kemerburgaz dağ kumu ve bağlayıcı olarak CEM I 42.5 Lafarge Aslan çimento kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcılardan polimelamin sülfonat (PMS) ve sülfone poliamin bileşiği (SPA) Mavi Kimya A.Ş.'de üretilmiş, naftalin sülfonat (PNS) ise piyasadan temin edilmiştir. Agrega özelliklerini içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Agrega Özellikleri

	Kaba Agrega		İnce Agrega	
Sınıf	No.2	No.1	Kırma Kum	Doğal Kum
Özgül Ağırlık	2.861	2.865	2.772	2.488
İncelik Modülü			3.38	1.47
Su Absorpsiyonu (%)	0.53	0.80	0.79	1.39
D _{maks.} (mm)	25	12	5	2

Deney Planı

Deney numuneleri üç grup halinde oluşturulmuştur. İlk olarak PMS üç farklı oranda beton karışımına eklenerek, çalışma için en uygun katkı miktarı belirlenmiştir. İkinci deney setinde; PMS, SPA ve PMS-SPA bileşiği farklı oranlarda karıştırılarak beton karışımında kullanılmıştır.

Son deney setinde ise, PNS, SPA ve PNS-SPA bileşiği karışımları kullanılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Her deney seti için kimyasal katkı içermeyen kontrol betonları dökülmüştür. Beton küp numunelerinin 1, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, her bir deney seti göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, süperakışkanlaştırıcı tür ve miktarına bağlı olarak beton karışım suyundaki azalmalar belirlenmiştir.

Deney Setlerinin Hazırlanması

Hazırlanan katkılı ve kontrol betonlarda, TS EN 480-1 “Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Deney Metotları – Bölüm 1- Deneyler İçin Şahit Beton ve Şahit Harç” standardında belirtilen 350 kg/m³ çimento miktarı kullanılmıştır. Beton karışımları kontrol betonları ile eşit kıvamda (çökme=70

mm) hazırlanmış ve katkıdan dolayı ortama giren su miktarı karışım suyuna ilave edilmiştir. Katkılı beton numunelerine ait özellikler Tablo-2 ve Tablo-3'te verilmektedir.

Tablo 2. Farklı Miktarlarda PMS Katkılı Beton Numunelerine Ait Özellikler

	Katkı Türü	Katkı Miktarı (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Su/Çimento	Çökme (mm)	İnce Agregası (kg/m ³)	Kaba Agregası (kg/m ³)
Set 1	PMS	1.5	350	195	0.56	70	869	1104
	PMS	1.8	350	191	0.54	70	869	1104
	PMS	2.0	350	178	0.51	70	869	1104

Tablo 3. Ağırlıkça Farklı Oranlarda PMS, PNS ve SPA Katkılı Beton Numunelerine Ait Özellikler

	Katkı Türü	Katkı Bileşenlerinin Ağırlıkça Oranı	Katkı Miktarı (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Su/Çimento	Çökme (mm)	İnce Agregası (kg/m ³)	Kaba Agregası (kg/m ³)
Set 2	PMS	-	2.0	350	184	0.52	70	869	1104
	PMS/SPA	3/1	2.0	350	191	0.54	70	869	1104
	PMS/SPA	2/2	2.0	350	192	0.55	70	869	1104
	PMS/SPA	1/3	2.0	350	213	0.61	70	869	1104
	SPA	-	2.0	350	216	0.62	70	869	1104
Set 3	PNS	-	2.0	350	165	0.47	70	869	1104
	PNS/SPA	3/1	2.0	350	179	0.51	70	869	1104
	PNS/SPA	2/2	2.0	350	211	0.60	70	869	1104
	PNS/SPA	1/3	2.0	350	212	0.61	70	869	1104
	SPA	-	2.0	350	216	0.62	70	869	1104

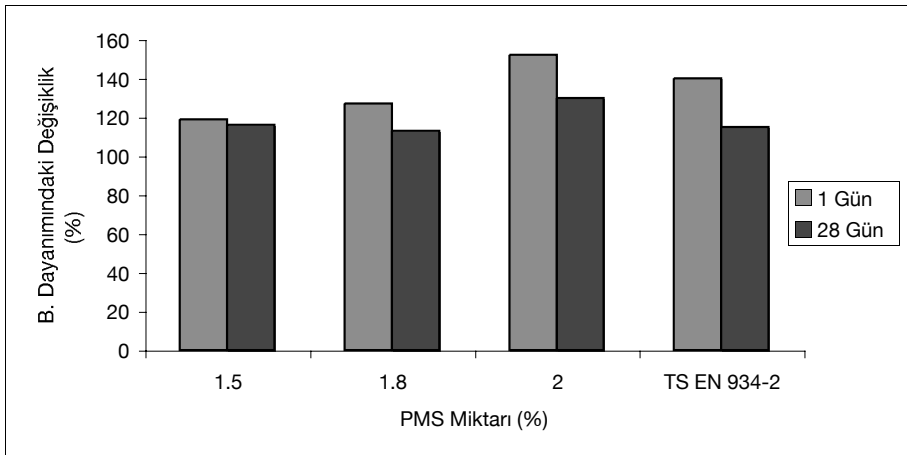
SONUÇ

Farklı tür ve miktarlarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan betonlara ait basınç dayanımı, kontrol numunesine göre basınç dayanımındaki değişiklik ve karışım suyu azaltma yüzdeleri sırasıyla Tablo-4, Tablo-5 ve Tablo-6'da verilmektedir.

Tablo 4. Farklı Miktarlarda PMS'nin Kullanıldığı Çalışma Sonuçları

	Katkı Türü	Katkı Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)			Kontrol Num. Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik (%)			Su Azaltma (%)
			1 gün	7 gün	28gün	1 gün	7 gün	28gün	
Set 1	PMS	1.5	13.5	35.8	43.4	119	118	116	11.4
	PMS	1.8	14.3	38.6	42.2	127	127	113	13.2
	PMS	2.0	17.2	41.9	48.6	152	138	130	19.1
TS EN 934-2						140		115	12

Polimelamin sülfonatin çimento ağırlığının yüzde 1.5 , 1.8 ve 2.0'si oranında kullanıldığı çalışmada, katkı miktarındaki artışa bağlı olarak beton numunelerinin basınç dayanımı ve karışım suyunu azaltma değerlerinde bir yükseliş görülmüştür (Şekil-1). Bu veriler ışığında, sülfone poliamin bileşiğinin, naftalin ve melamin bazlı süperakışkanlaştırıcılar ile karıştırılarak kullanılacağı çalışmalar için katkı miktarı yüzde 2.0 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. PMS Miktarı ve Kontrol Numunesine Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik İlişkisi

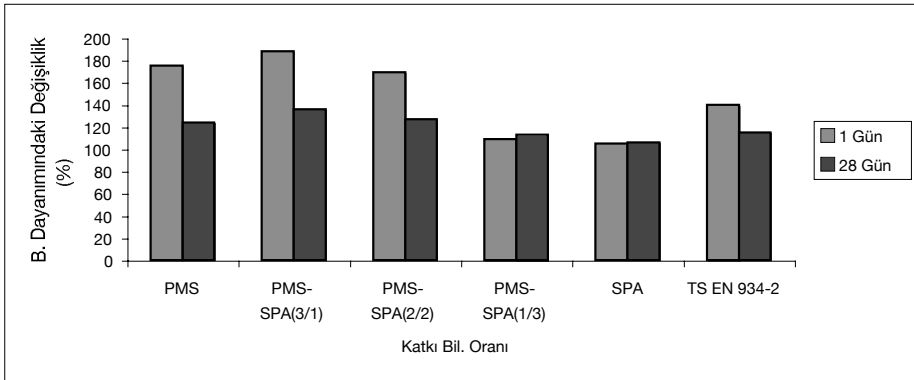
PMS, SPA ve PMS – SPA Karışımı

Sülfone poliamin (SPA) bileşiğinin beton performansına etkilerinin belirlenmesi amacıyla, SPA gerek tek bileşen olarak gerekse polimelamin sülfonat (PMS) ile ağırlıkça 3:1, 2:2 ve 1:3 oranlarında karıştırılarak kullanılmıştır. SPA bileşiğinin katı madde oranı ile PMS katı madde oranı birbirine eşittir, dolayısıyla katkıdan ötürü karışıma katılan su miktarı tek bir bileşenden elde edilene göre aynı olmaktadır.

Tablo-5'e göre, PMS ve PMS/ SPA karışımlarından 3:1 ve 2:2 oranlarında hazırlananlar TS EN 934-2 standardı kriterlerine uymaktadır. Ağırlıkça 2:2 oranında PMS/ SPA karışımının kullanıldığı betonlarda, basınç dayanımı ve karışım suyunu azaltmaya yönelik etkilerin yeterli olması, bu karışımı maliyeti düşürmesi açısından tercih edilebilir kılmaktadır. Katkı karışımları ile ilgili karşılaştırmalı sonuçlar Şekil-2'de verilmektedir.

Tablo 5. Ağırlıkça Farklı Oranlarda PMS ve SPA'nın Kullanıldığı Çalışma Sonuçları

	Katkı Türü	Katkı Bil. Ağırlıkça Oranı	Katkı Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)			Kontrol Num. Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik (%)			Su Azaltma (%)
				1 gün	7 gün	28 gün	1 gün	7 gün	28 gün	
Set 2	PMS	-	2.0	16.5	57.2	61.7	175	144	124	19.5
	PMS/SPA	3/1	2.0	16.2	48.5	50.6	188	150	136	16.2
	PMS/SPA	2/2	2.0	16.4	44.2	52.5	169	127	127	15.8
	PMS/SPA	1/3	2.0	10.5	39.1	46.5	109	112	113	6.6
	SPA	-	2.0	9.9	44.2	52.9	105	112	106	5.4
TS EN 934-2							140		115	12



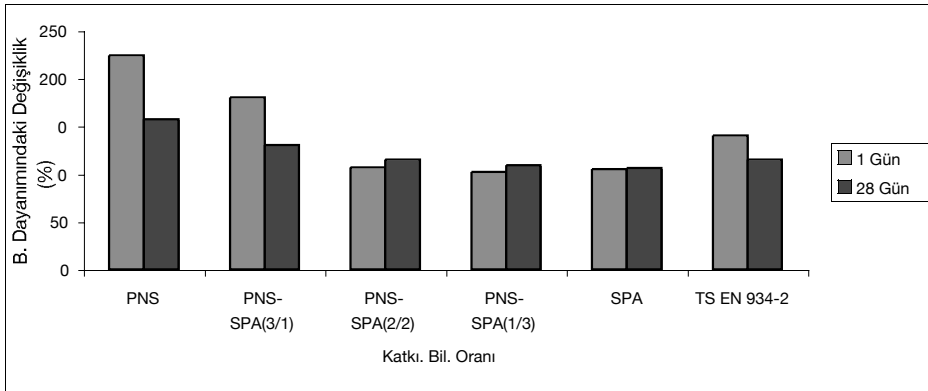
Şekil 2. Ağırlıkça PMS-SPA Oranı ve Kontrol Numunesine Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik İlişkisi

PNS, SPA ve PNS – SPA Karışımı

Ağırlıkça 3:1, 2:2 ve 1:3 oranlarında karıştırılarak kullanılan PNS/ SPA ile, sadece PNS veya SPA kullanılan çalışmalarda betonun mekanik özelliklerindeki değişim Tablo-6 ve Şekil-3'te karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir.

Tablo 6. Ağırlıkça Farklı Oranlarda PNS ve SPA'nın Kullanıldığı Çalışma Sonuçları

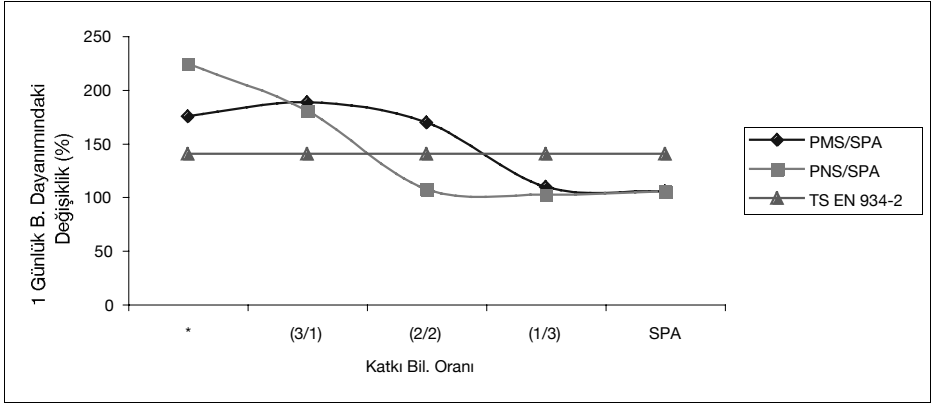
	Katkı Türü	Katkı Bil. Ağırlıkça Oranı	Katkı Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)			Kontrol Num. Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik (%)			Su Azaltma (%)
				1 gün	7 gün	28 gün	1 gün	7 gün	28 gün	
Set 3	PNS	-	2.0	20.9	56.7	72.2	224	142	157	23.3
	PNS/SPA	3/1	2.0	16.8	55.4	59.9	180	139	130	16.8
	PNS/SPA	2/2	2.0	10.0	40.4	46.4	107	112	115	2.0
	PNS/SPA	1/3	2.0	9.7	37.7	43.8	102	114	109	1.60
	SPA	-	2.0	9.9	44.2	52.9	105	112	106	5.4
TS EN 934-2							140		115	12



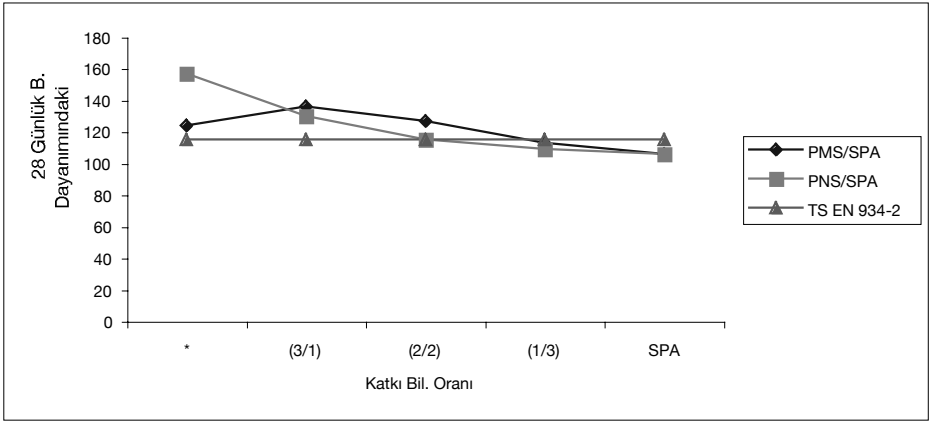
Şekil 3. Ağırlıkça PNS-SPA Oranı ve Kontrol Numunesine Göre Basınç Dayanımındaki Değişiklik İlişkisi

Elde edilen sonuçlar ışığında, sadece PNS ve 3:1 oranında PNS/ SPA karışımı kullanıldığında TSE EN 934-2 standardına uygunluk sağlanmaktadır.

Polimelamin sülfonat ve polinaftalin sülfonat ile karışımları hazırlanan sülfone poliamin bileşiklerinin, Şekil-4'te verilen 1.gün ve Şekil-5'te verilen 28.gün dayanım sonuçlarına bakılarak PNS/ SPA karışımlarının (3:1 ve 2:2) PNS/ SPA karışımlarına göre daha etkin ve standarda uyumlu olduğu görülmektedir.

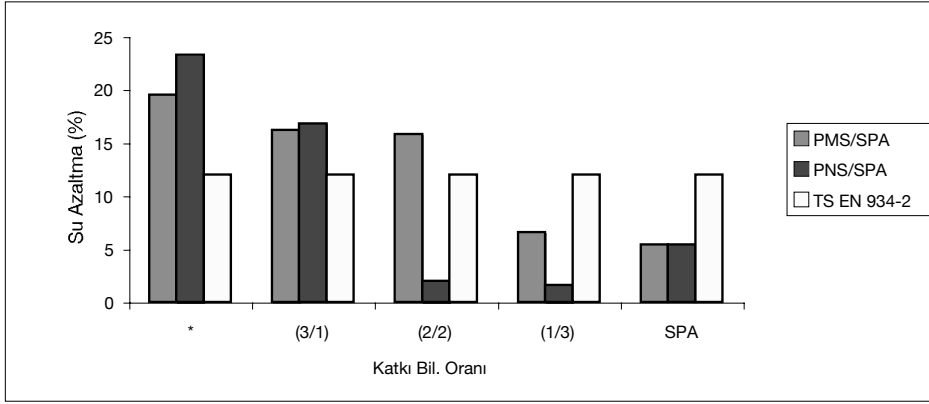


Şekil 4. Ağırlıkça Katkı Bileşen Oranı ve İlk Gündeki Basınç Dayanımı İlişkisi



Şekil 5. Ağırlıkça Katkı Bileşen Oranı ve 28. Gündeki Basınç Dayanımı İlişkisi

PMS, PNS ve SPA karışımlarının betonun karışım suyunu azaltma ilişkisi Şekil-6'da verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, PMS/ SPA karışımlarının PNS/ SPA'ya göre 3:1 oranı için hemen hemen eşit olduğu ancak, SPA miktarının arttığı karışımlarda PMS'nin karışım suyunu azaltma dolayısıyla basınç dayanımındaki yükselme açısından önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Ağırlıkça Katkı Bileşen Oranı ve Karışım Suyundaki Azalma İlişkisi

Sonuçlar özetlenirse;

- Aynı kıvam ve işlenebilirlik özelliğindeki polimelamin sülfonat-sülfone poliamin bileşiği 1:3 oranı hariç, betonun mekaniksel dayanımı baz alındığında TSE EN 934-2 standardı gereklerini sağlamaktadır.
- İlk gün dayanımının PMS/ SPA katkılı betonlarda, PNS/ SPA katkılı olanlara göre yüksek olduğu görülmüştür, burada PMS ve SPA'nın priz süresini hızlandırıcı özelliklerinin etkisi söz konusudur.
- PMS/ SPA karışımının ağırlıkça 3:1 ve 2:2 oranında kullanıldığı durumlarda, sadece PMS veya PNS kullanımına kıyasla maliyet açısından olumlu iyileştirmeler sağlanmaktadır.

Yapılan çalışma, sülfone poliamin bileşiklerinin betonun işlenebilirlik, mekanik dayanım ve üretim maliyeti açısından kullanılabilirliğinin araştırılması ve sonuçta, PMS ile hazırlanan karışımının bir alternatif olması açısından önemlidir.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı AYHANLAR Yol Asf. A.Ş. ve MAVİ KİMYA A.Ş.'ye çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Spiratos, N., Page, M., Mailvaganam, N., Malhotra, V.M., and Jolicoeur, C., Superplasticizers for Concrete – Fundamentals, Technology, and Practice, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2003, pp 28-34.

2. Jolicoeur, C., Nkinamubanzi, P.C., Simard, M.A., and Pottie, M., "Progress in Understanding the Functional Properties of Superplasticizers in Fresh Concrete", Proceedings of the 4th CANMET / ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI SP-148, Montreal, Canada, 1994, V.M. Malhotra, Editor, pp 63-88.
3. Pierre, A., Mercier, R., Foissy, A., and Lamarche, J.M., "The Adsorption of Cement Superplasticizers on to Mineral Dispersions", Adsorption Science and Technology, Vol. 6, No. 4, 1989, pp 219-231.
4. Simard, M.A., Nkinamubanzi, P.C., Jolicoeur, C., Perraton, D., and Aitcin, P.C., "Calorimetry, Rheology and Compressive Strength of Superplasticized Cement Pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 4, 1993, pp 939-950.
5. Gagne, R., Boisvert, A., and Pigeon, M., "Effect of Superplasticizer Dosage on Mechanical Properties, Permeability and Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concretes With and Without Silica Fume", ACI Materials Journal, Vol. 93, 1996, pp 111-120.
6. TS EN 934-2 "Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Bölüm 2: Beton Katkıları – Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme", Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Mart 2002.
7. TS EN 480-1 "Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Deney Metotları – Bölüm 1- Deneyler İçin Şahit Beton ve Şahit Harç", Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.