

HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BETON DAYANIKLILIĞINDAKİ YERİ

Dr. Çelik ÖZYILDIRIM

Principal Research Scientist

Virginia Department of Transportation

Virginia, ABD

ÖZET

Bu bildiri de, 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 bildiriye 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 çatlamlar olabilir ve bu çatlamlar 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 genişmesini karşılayacak boşluğu olmayan beton, kritik doygunluğa erişir ve hacim genişmesi 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 doyumluktaki betonun donma ve çözülme etkisinden korunması gerekir. Gereken tedbirler: yeterli hava boşluğu parametreleri, uygun agregalar, ve betonun yeterli olgunluğa erişmesini sağlamaktır (Bryant, 1990).

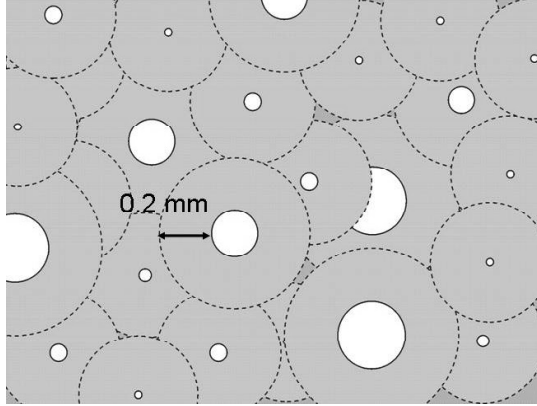
Hava Boşlukları

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.

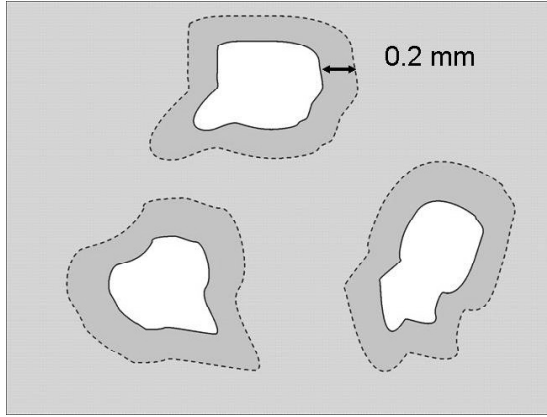
Hava boşluklarının miktarı, boyutu, ve dağılımı beton dayanıklılığı açısından önemlidir. Bunların tanımlanması hava boşluğu parametreleri ile mümkündür. (r) toplam hava boşluğu miktarı, boşluklar arası mesafe (L) ve yüzey alanı (α) önemli parametrelerdir. L donma nedeniyle itilen suyun bir hava boşluğuna 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

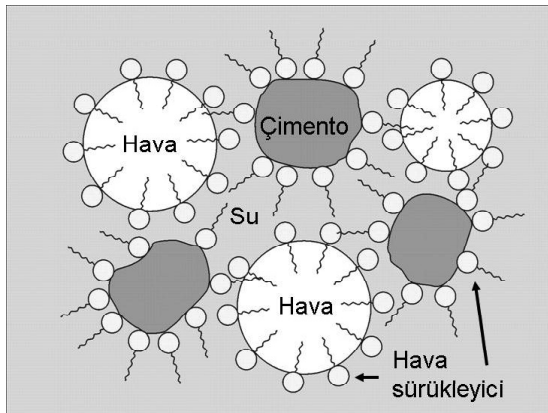


Şekil 2. Hapsolmuş hava boşlukları ve korudukları bölge

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 katkılar ilk olarak 1930'larda geliştirilmiş olup genellikle betonun üretimi sırasında eklenir. Bu katkılar yüzey gerilmelerini azaltır, hava boşluklarının bir araya gelmesini önler, ve hava boşluklarını çimento ve agrega parçalarına sabitleyler. 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 katkılar "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 katkılar değişik hammaddelerin birleşmesinden meydana gelir. Başlıca hammaddeleri ise: ağaç reçinesi tuzları (çam kütüklerinden), sentetik deterjan (petrol fraksiyonunda), linyosülfonatlar (kağıt endüstrisinden), asitli tuzlar (petrol artımadan), 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 katkılarla 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 katkıların 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 zayıflattığı 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). Sürüklenmiş 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 düşüğe 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 bildiriye 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).

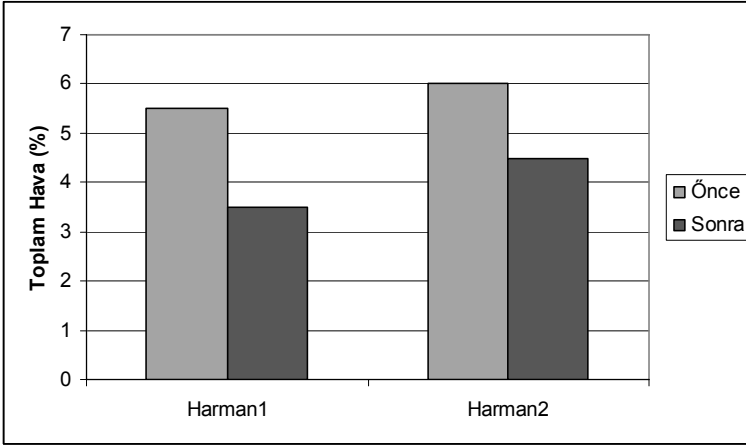
Pompalanabilen Beton

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 köprünün 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.

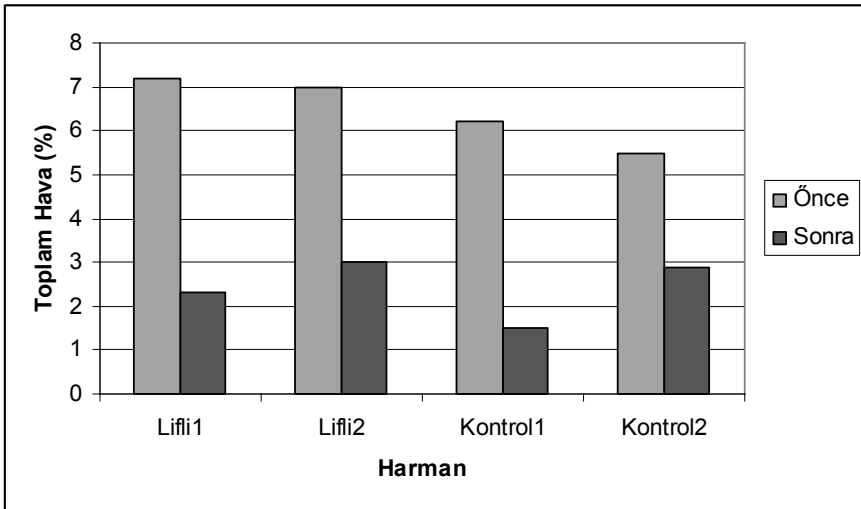
| Beton | Parti | Hava Boşluğu (%) | | | α (mm ⁻¹) | L (mm) |
|---------|----------|------------------|------|--------|------------------------------|--------|
| | | <1mm | >1mm | Toplam | | |
| Lifli | 2 | 2.6 | 0.7 | 3.3 | 21.0 | 0.29 |
| | 4a* | 5.2 | 0.7 | 5.9 | 29.7 | 0.16 |
| Kontrol | 4b* | 4.4 | 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

sebepl 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. Ozyıldırım, 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. Ozyıldırım, 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.