

BETON KÖPRÜ TABLİYELERİ İÇİN KİMYASAL YALITICI MALZEMELER

Haluk AKTAN

Profesör, Bölüm Başkanı
Civil and Construction Engineering
Western Michigan University, ABD

ÖZET

Beton içerisine nüfuz ederek geçirimsizliğini azaltan ve bir anlamda yalıtıcılık sağlayan kimyasal malzemelerin beton köprü tabliyelerini korumasındaki verimliliğini kontrol eden ana parametre nüfuzun derinliğidir. Kimyasal malzemenin nüfuz derinliğini etkileyen faktörler hem temel bir yaklaşımla hem de bu kimyasalların, betonun bozulması, dayanıklılığı ve geçirimsizliği ile ilişkili literatürden elde edilebilir. Beton yüzeyi yalıtıcıları olarak silan ve siloksan kullanımı ve nüfuz etme özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca, yüzey temizleme yöntemleri ve kuruma döneminin etkileri ele alınmıştır. Kimyasal yalıtıcılar, uygun yüzey temizleme ve uygulama prosedürü kullanıldığı sürece etkilidir. Ancak, ilk 6-mm derinlikteki nem durumu yalıtıcının nüfuzunu kontrol etmektedir. Bu yüzden, yalıtıcı uygulamasında önceki kuruma dönemini etkileyen faktörler tanımlanmıştır. Temel çalışmalardan ve literatürden elde edilen bilgiye dayanarak mümkün olan deney yöntemlerini de kapsayan beton içerisine nüfuz eden yalıtıcı kimyasalların seçim prosedürünün ana hatları tanımlanmıştır.

GİRİŞ

Köprü alt ve üst yapısına koruma sağlayan köprü tabliyelerinin dayanıklı ve güvenli bir sürüş yüzeyi sağlaması gerekir. Bir köprünün alt ve üst yapısı doğrudan su, çözücü tuz etkisine veya istenmeyen bir bozulmaya sebep olabilecek herşeye karşı korunmaktadır. Bu yüzden dayanıklı bir tabliye uzun ömürlü bir köprünün anahtarıdır. Dayanıklılık, ulaştırma altyapısı inşaatı için

performansla ilgili beton şartlarından bir performans parametresidir (Aktan ve diğ. 2000). Birçok beton bozulma mekanizması nemin betonun içine nüfuz etmesiyle başlar. Bu sebeple, betonun dayanıklılığının belirlenmesinde genellikle beton içerisine nüfuz eden sıvılara karşı direnç kullanılmaktadır (Mehta ve Monteiro 1993; Yaman ve diğ. 2000).

Michigan'daki ağır ve sert hava koşullarında köprü tabliyeleri çözücü tuzlara, yüksek sıcaklık değişimlerine, tekrar eden ıslanma ve kurumaya, donma ve çözülme döngülerine ve ağır hareketli yük gerilmelerine maruzdur (Yaman ve diğ. 2002). Fiziksel hareketler iç gerilmelere sebep olurken, beton içerisine nüfuz eden aktif maddelerin kimyasal hareketleri çelik donatının korozyonu gibi bozulmalara sebep olur. Özellikle, yüksek miktarda çözücü tuz kullanımı hem çatlaklardan hem de su dolu gözeneklerden donatıya kadar ulaşan klorür iyonlarını ortama sokar. Çözücü tuzlardan ve nemden dolayı oluşan klorür iyonlarının tabliyeye girişini önlemek amacıyla köprü tabliyesi koruma sistemine ihtiyaç vardır.

Köprü tabliyelerinin kimyasal malzemeler kullanımı ile yalıtımının sağlanması ve korunması ile ilgili araştırmaları ve güncel kullanımı tanımlayan bazı çalışmalar yapılagelmektedir (Cady 1994; 1993; Carter 1994; McGettigan 1992; 1990; Pferifer ve Scali 1981; Whiting ve diğ. 1992). Köprü tabliyeleri için özel olarak hazırlanacak beton karışım şartnamesinin, yüklere ve Michigan'daki çevresel etkilere dayanacak, yeterli dayanıklılık özelliklerine sahip beton üretimini sağlayacağı ileri sürülebilir. Bu yüzden, yalıtıcı kimyasallarla veya benzer ürünlerle elde edilen ek önlemlerin getirdiği kazanım önemli görülmeyebilir. Ancak, deneyim ve literatür, betonun dayanıklılık özelliklerinin, saha şartları ve yapım kısıtlamalarından dolayı tabliyenin yüzeyi içinde değişebileceği gibi, tabliyeden tabliyeye de değişim gösterebileceğini işaret etmektedir. Önceki bir çalışma (Yaman ve diğ. 2002) Michigan'daki beş köprü tabliyesi inşaatı sırasında hazırlanan standart numunelerde ölçülen gaz ve su geçirimsizliği değerlerinin değişimini göstermektedir (Tablo 1). Tablo 1'deki veriler, tabliye yüzeyi üzerinde bozucu maddelerin nüfuzu sonrası yapı dayanımını azaltmaya başlayacak zayıf kısımların varlığına işaret etmektedir. Bu yüzden, yalıtıcı kimyasalların kullanımı, tabliyenin çekme, termal çatlama ve/veya yüksek s/ç oranından dolayı daha yüksek geçirimsizliğe sahip kısımları için ek önlem sağlayabilir. Yalıtıcı kimyasal uygulanmasının, beton yüzeyinde daha düzenli dayanıklılık özellikleri sağlaması beklenmektedir.

TABLO 1. Köprü tabliye betonundaki geçirimsizlik ölçümleri (Yaman ve diğ. 2001)

Köprü	Gerçek Geçirimsizlik (10^{-17} m ²)		Su Geçirimsizliği (10^{-10} m/s)	Porozite (%)
	Gaz (b)	Su (c)	(d)	(e)
(a)				
B1	485	10.2	11.8	10.6
B2	215	4.5	5.2	9.8
B3	151	3.2	3.7	10.7
B4	34	0.7	0.8	8.8
B5	24	0.5	0.6	8.7

Silan ve siloksan esaslı kimyasal yalıtıcılar gözenek kapatıcılar ve su iticiler olmak üzere ikiye ayrılır. Gözenek kapatıcılar betonun içine sızarak gözenekleri kapatırlar. Su iticiler ise betonun içine nüfuz ederek yüzeydeki hidroksil gruplarıyla tepkir, gözenek duvarlarını kaplar ve hidrofobik duruma getirirler. Su iticiler nem girişini engeller ancak su buharı iletimine izin verir. Gözenek kapatıcılar nem girişini engelledikleri gibi betonun dayanıklılığını olumsuz etkileyebilecek su buharı iletimini de engellerler. Günümüzde köprü tabliyeleri yerinde bırakılan kalıp kullanılarak inşa edilmektedir. Diğer tabliyeler yan yana dizili kutu kirişler üzerine döküldüğünden kalıp kullanılmasına gerek yoktur. Böylece, betondan nem transferi sadece tabliyenin üst yüzeyinden mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, gözenekleri tamamen yalıtacak şekilde tabliye yüzeyinin üstünü geçirimsiz bir tabakayla kaplamak veya sızıcı tipteki bir yalıtıcı kimyasal kullanmak betonun nefes almasını engelleyerek, dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir. Dahası, gözenek kapatıcılar geniş molekül büyüklüklerinden dolayı betonun içine yeterince nüfuz edemezler (Cady 1994). Yalıtılmış yüzeyin, araç trafiği nedeniyle oluşan aşınmadan dolayı olduğu kadar ultraviyole ışınlar maruz kalması nedeniyle de etkisini kaybetme olasılığı vardır. Bu nedenle, su itici olarak görev yapan kimyasallar daha uzun ömürlü olacak ve köprü tabliyelerinin yalıtımı için tercih edileceklerdir.

Bugüne kadar, kimyasal yalıtıcı miktarı, kaplama sayısı ve kaplamalar arasındaki kuruma dönemi laboratuvar ve arazi tecrübeleriyle tahmin edilmiştir. Bu makalede, kimyasal yalıtıcı nüfuzu ve işlevi esaslarına dayalı kimyasal seçiminin önemi ele alınmıştır. Teorik bir çalışma vasıtası ile, sızıcıların beton içerisine nüfuzunu yöneten kimyasal özellikleri ve beton uyumluluk özellikleri gösterilmiştir. Bununla birlikte, kuruma dönemini belirleyen yüzey temizleme yöntemleri ve nemin beton içindeki hareketi ele alınmıştır. Dahası, belirli bir uygulama için, sızıcı kimyasal seçim prosedürü

tanımlanmıştır. Beton ve sızıcı kimyasal özellikleriyle ilgili bilgiler ve önerilen seçim kriterleri kimyasal katkı üreticileri için olduğu kadar, “karayolları idareleri” için de faydalı olacaktır. Bu makale ayrıca literatürde mevcut olan bilgilerin de bir sentezidir.

AMAÇ

Bu çalışmada köprü tabliyelerinde betona nüfuz ederek geçirimsizliği azaltan kimyasal yalıtım malzemeleri tanıtılarak, temel çalışmalardan ve literatürden elde edilen bilgiye dayanarak mümkün olan deney yöntemlerini de kapsayan sızıcı yalıtıcı kimyasal seçim prosedürünün ana hatları tanımlanacaktır.

Güncel Uygulama ve Genel Bilgiler

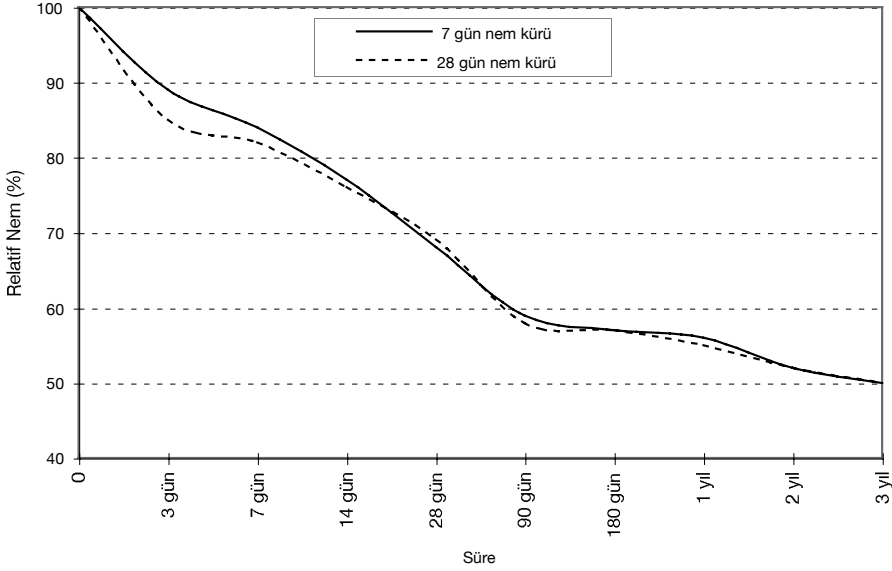
Yüzey Hazırlanması

Beton yüzeyler, kimyasal yalıtıcı uygulamasından önce özel hazırlık gerektirir. Üretici tavsiyelerine ve literatürde yayınlanmış verilere göre beton en az 28 günlük olmalıdır. Yüzey temiz, kuru ve kür bileşiklerinden ve gözenek tıkaçıcı kirleticilerden arınmış olmalıdır. Eğer beton köprü tabliyesi bir yaşından büyükse ve silan ve siloksan yalıtıcılar ilk defa uygulanacaksa, beton yüzeyindeki karbonatlaşmış tabakanın kazınması gerekir. Ayrıca, kullanımda olan tabliyeler için yüzeyin temizlenmesi yağın, gresin, lastiğin ve tabliyede bulunan diğer organik kirleticilerin uzaklaştırılması için de gereklidir. En yaygın kullanılan yüzey temizleme yöntemleri, tozsuz aşındırıcı püskürtülmesi ve tazyikli su ile yıkamadır. Örneğin, Alberta Karayolları İdaresi köprü tabliyelerini her yıl tazyikli su ile yıkamaktadır. Dört yıllık yalıtım döngüsündeki tabliyeler, tazyikli su ile yıkamanın iki gün ardından yalıtılırlar. Bu yalıtım uygulamasından önce, iki günlük ilave kuruma dönemi bir çok üretici tarafından tavsiye edilmektedir.

Kuruma süresi veya nem kayıp oranı esas olarak betonun su çimento (s/ç) oranına, yaşa, betonun kalitesine ve hava durumuna bağlıdır. Tabliye yüzeyinden nemin çıkış miktarı s/ç oranıyla artar ve kuruma süresi boyunca azalır (Brewer 1965). Nem kayıp oranı ayrıca tabliye altındaki kuruma koşullarına da bağlıdır. Brewer (1965) tabliye alt yüzeyindeki değişik kuruma koşullarının tabliye üst yüzeyindeki nem kaybına olan etkilerini incelemiştir. Burada su ile temas etme, su buharıyla temas etme ve kuru olma durumları dikkate alınmıştır. Nem çıkış oranı, şartlar su ile temas halinde olma durumundan su buharı ile temas halinde olma durumuna döndükçe azalmıştır. Brewer (1965) nemin betondan uzaklaşmasına yardımcı olan çoklu mekanizmayı tanımlamıştır; nem kaybı esas olarak üst yüzeyden kurumayla olmaktadır.

Olumsuz hava şartları altında kuruma ile uzaklaştırılabilen nem serbest nemdir. Olumsuz şartların dışında, tazyikli su ile yıkamanın hemen ardından oluşan yüzey sıcaklığındaki değişim, kararsız bir kurumaya neden olmaktadır. Kararsız kuruma dönemi, bir hayli küçüktür ve hesaplamalarda gözardı edilebilir. Çevre şartları altındaki beton, sabit ve düşen oranda şeklinde tanımlanan iki ana kuruma safhası gösterir. Sabit kuruma, beton içinden yüzeye nem sağlandığı sürece devam eder. Bu kuruma safhası sırasında, radyasyon veya iletimle ısı transferinin olmaması durumunda, beton yüzey sıcaklığı nemli hava sıcaklığına eşittir (Geankoplis 1983). Eğer nem, buharlaşma miktarının altına düşerse, düşen oranda kuruma safhası başlar. Düşen oranda kuruma safhasında suyun hareketi difüzyonla gerçekleşir ve nem kaybı miktarı önemli ölçüde azalır. Bu yüzden, sabit oranlı kuruma safhasında uzaklaştırılan nem miktarı daha önemlidir ve kimyasal yalıtıcı uygulamasındaki kuruma safhasının belirlenmesi için kullanışlıdır.

Kuruma üzerine daha fazla bilgi, 150300 mm standart beton numunelerindeki relatif nem dağılımını incelemiş olan Hanson (1968)'dan elde edilebilir. Numuneler 7 ve 28 gün boyunca nem kürüne tabi tutulmuştur. Nem küründen sonra, 23°C ve %50 nemli bir ortamda kurumaya bırakılmışlardır. Nem hareketinin numunenin ekseni boyunca gerçekleşmesi için, numunenin kenarları epoksi ile kaplanmıştır. Şekil 1'de numunelerin içine yerleştirilmiş bağıl nem ölçerlerden elde edilmiş verilerin grafiği örnek olarak verilmiştir. Grafikte ilginç olan beton silindirin %50 bağıl nemli ortamda nem dengesine ulaşması için geçen zamanın uzunluğudur. Şekil 1'de sabit oranlı (90 güne kadar) ve azalan oranlı (90 günden 30 yıla kadar) kuruma dönemleri görülmektedir. Bu veriler, köprü tabliyelerinin tazyikli yıkamadan sonraki sabit oranlı kuruma dönemlerini belirlemede faydalı olabilir. Kurumayı kontrol eden diğer parametreler hakim çevre şartları, betonun s/ç oranı ve tercih edilen yalıtıcının sızma derinliği içinde hedeflenen nem içeriğidir.



ŞEKİL 1 Nem küründen sonra 23°C ve %50 nemli bir ortamda bırakılan standart numunelerin 6-mm derinliğinde elde edilen relatif nem miktarları (Hanson 1968)

Uygulama Prosedürü

Devlet karayolları idareleri tarafından tanımlanan yalıtıcı uygulama prosedürleri birçok durumda üreticilerin tavsiyelerini temel alır. 209 no'lu NCHRP sentez raporunda belirtilen anket sonuçlarına göre devlet karayolları idarelerinin (Cady 1994) silan için en çok tercih edilen uygulama teknikleri; silindir, havasız spreyleme ve fırçalamadır. Siloksan içinse havasız spreyleme ve silindir tercih edilmektedir. Havasız spreyleme tabancasının ucu düşük basınçta yalıtkanı püskürtmekte ve fazla püskürtmeyi en az seviyede tutmaktadır. Birçok üretici ve karayolları idareleri yalıtkan uygulamasında bahçe spreylemelerinin kullanılmasını önermektedir. Yüzey üzerinde bir havuz oluşturarak uygulamak da yalıtıcının dışarı akması önlediği sürece tercih edilen bir başka yöntemdir.

Performans Değerlendirmesi

Devlet karayolları idarelerinin yalıtkan seçim ve performans değerlendirme kriterleri 244 no'lu NCHRP raporunda (Pfeifer ve Scali 1981) tanımlanan deney prosedürlerine dayanır. Bu deney prosedürü için birinci günde kalıptan çıkarılmış ve $23 \pm 17C^{\circ}$ de 50 ± 4 bağıl nemde tutulan bir ortamda nem kürü amacıyla dayanıklı plastik poşetle yalıtılmış 10 cm'lik beton küplerine ihtiyaç vardır. Küpler 7 günlük olduğunda, numuneler Portland çimentosu kabuğununu sıyırmak için hafifçe kumlanarak 0.1g hasasiyetle

tartılır. Ağırlık ölçümleri alındıktan sonra, küpler derhal plastik poşetlere geri koyulur ve şartları kontrol altında tutulan bir odaya yerleştirilir. Küpler 21 günlük olduklarında havada kurutulmak için plastik poşetlerden çıkarılır. Küpler 1, 5 ve 21 gün boyunca havada kurutulduktan sonra sızıcı yalıtkanlar uygulanır. Yalıtkan uygulamasından sonra, numuneler şartları kontrol altında tutulan odaya kuruma için geri koyulur. Havada kurutma işlemi sırasında, yalıtkan uygulaması öncesinde ve sonrasında, küplerin ağırlık ölçümleri, 0.1g hassasiyetle yaklaşık 7 günlük aralıklarla yapılır. Son olarak, bütün küpler, 54. günlerinde %15'lik NaCl çözeltisinin içine batırılır. 21 günlük ıslanma dönemin boyunca 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21. günlerde ağırlıktaki artış 0.1g hassasiyetle ölçülür. 21 günlük ıslanma dönemi sonunda, küplerin kuru yüzeyli doymuş ağırlıkları ölçüldükten sonra tekrar şartları kontrol altında tutulan odaya kuruması için geri koyulur. 21 günlük son kuruma döneminden sonra, 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21. günlerde 0.1g hassasiyetle ağırlık kaybını belirlemek için ağırlık ölçümleri yapılır. Son kuruma döneminden sonra, küpler ikiye bölünür. Her kübün bir parçası toplam klorür içeriğini belirlemek amacıyla ufalanır. Ölçülen klorür içeriği ve NaCl çözeltisi emilimi, aynı deney prosedürünün uygulandığı, ancak sızıcı yalıtkanların uygulanmadığı kontrol numuneleriyle karşılaştırılır.

NCHRP 244 deney prosedürlerinin köprü tabliyelerine uygulanabilirliği, bu prosedürlerin aşınmaya maruz kalmayan beton yüzeylerine uygulanacak olan yalıtkan seçimi ve değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş olması nedeniyle sorgulanmaktadır. Bazı devlet karayolları idareleri, özellikle sızıcı türdeki yalıtkanların köprü tabliyelerine uygulanması ile ilgili şartnameler geliştirmişlerdir. Köprü tabliyeleri durumunda, kritik performans parametresi yalıtkanın sızma derinliği olarak tanımlanmıştır.

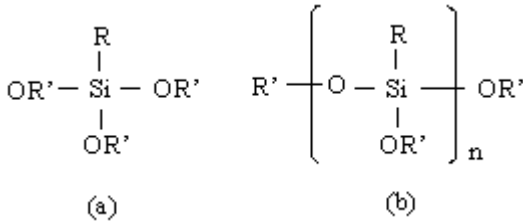
Yalıtkanın performansını değerlendirmek için görünür sızma ve gerçek sızma arasındaki farkın anlaşılması gerekir (McGettina 1992). Görünür sızma, beton numunesi bölünüp ıslanmayan şeridin ölçülmesiyle hesaplanabilir. Gerçek veya etkili sızma derinliği, Alberta Transportation & Utilities (AT&U) tarafından önerilen bir prosedürle hesaplanabilir. Bu prosedür deney numunelerin yüzeylerinin kumlanmasını gerektirir. Kumlama işlemiyle numunenin ağırlık miktarındaki azalma miktarı, küp yüzeyi ve kübün tamamı için hesaplanır. Deney küplerini suya daldırmak ve kazanılan ağırlığı ölçmek yüzey aşınmasından sonraki su geçirmezlik performansını belirler. Bu deney yöntemi çeşitli karayolları idareleri tarafından kabul edilmiş ve birçok araştırmacı tarafından yalıtkan performansının değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Mcgettingan 1992).

Malzeme Özellikleri

Hem sızıcı yalıtkanın hem de betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin uygunluğu yalıtkanın etkinliğini belirler. Dahası, beton ile sızıcı yalıtkan reaksiyon mekanizması, nem önleme özelliğini ortaya koyar.

Silan ve Siloksan Sızıcı Yalıtkanlar

Monomer olan silanlar, sadece bir silikon atomuna sahiptir. Siloksanlar birkaç silan monomerinin tekrarlandığı uzun zincirlerden oluşabilir (Şekil 2). Daha kısa zincirden (beş silikon atomuna kadar) oluşan siloksanlar, sızıcı yalıtkan olarak kullanılabilir. Silan ve siloksan molekül yapıları, doğru veya dallanmış zincir yapısına sahip organik hidrokarbon grupları olan organofonksiyonel (R) içerir. Silikon fonksiyonel grupları (OR'), silisli yüzeyle olan reaksiyonların sebebidir. Organofonksiyonel grupları gözenek çeperlerinde hidrofobik (su itici) bir tabaka oluşturur. Organofonksiyonel ve silikon fonksiyonel gruplar sırasıyla alkil ve alkoksi grupları olup, bu sınıftaki maddeler alkil trialkoksi'dir. Alkil grubunun yapısı (CH₃-, CH₃CH₂-, (CH₃)₂CHCH₂-) su iticiliğin dercesini belirlerken, sızışkanlık alkoksi grubunun büyüklüğüne bağlıdır (CH₃O-, CH₃CH₂O-) (Cady 1994).



ŞEKİL 2 Silan (a) ve siloksan (b)'in moleküler yapısı

Birkaç karbon atomuna sahip Alkil grupları alt beton tabakasında daha yüksek seviyede hidrofobiklik gösterecektir. Bununla birlikte, dallanmış yapıdaki alkil grubu, düz zincir veya dairesel yapılara tercih edilir. Bu yapı türlerinden, dairesel yapıdaki alkil grubu uygulama yüzeyinde en az hidrofobikliğe sahip olandır (McGettigan 1992). Çok kullanılan sızıcı yalıtkanlarda örneğin metil (CH₃-), etil (CH₃CH₂-), propil (C₈H₁₇-) ve i-butil ((CH₃)₂CHCH₂-) seçilen alkil gruplarının su iticilik özelliklerinin karşılaştırılması, yüksek molekül ağırlığına sahip iso-butil ve n-oktil gruplarının metil ve etil'den daha etkili olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, yüksek moleküler ağırlıklı alkil ve/veya alkoksi gruplar, sızıcı yalıtkanın molekül ağırlığını artırarak sızma derinliğini olduğu kadar sızılacak gözenek miktarını da sınırlarlar. Silanların (10-15Å) ve siloksanların (25-75 Å) molekül boyutları beton gözeneklerine (45-1000Å) sızabilecek kadar küçüktür. Hidroliz ve yoğunlaşma sırasında, silan

ve siloksan molekülleri (iki, üç ve hatta dört kata kadar) büyür ve sızma derinliği bu nedenle sınırlanır (McGettingan 1992). Daha küçük alkil ve alkoksi gruplarına sahip sızıcı yalıtkanlar, su iticilikleri nispeten düşük olsa da, daha büyük sızma derinlikleri sağlarlar.

Silan ve siloksan esaslı su iticiler, piyasada daha çok, alkol gibi taşıyıcılar içinde çözülmüş olarak bulunurlar. Esas itibariyle, alkol çözücülerin düşük yüzey gerilmelerine sahip olması ve su ile homojen olarak karışması, uygulama yüzeyindeki nemin, sızma derinliğine etkisinin düşük olmasına sebep olur. Çözücü esaslı sızıcı yalıtkanlar, çözücü buharlaştıkça vizkozlaşır ve sızmaya karşı daha dirençli olur. Düzenli silanlarda, silan beton gözenekleri yüzeyindeki silikon atomlarıyla reaksiyona girdiğinde, gözenek yüzey alanı azalır, bu da reaksiyona girmemiş silanların uygulanan yüzey içinde daha derine sızmasına imkan verir. Her durumda, düzenli silanların belli sınıfları, en iyi yalıtım ürünleri olarak görünmektedir (McGettingan 1992). Maksimum sızma derinliğinde iyi performans temin etmek için belirli sınıftaki düzenli silanların (çözücü içermeyen) veya siloksanların fiziksel ve kimyasal özelliklerini (viskozite, temas açısı, molekül büyüklüğü, hidroliz oranı gibi) optimize etmek mümkündür. Bilinen bir kimyasal kompozisyon için, yalıtkanların fiziksel özellikleri Kimya el kitabından (Dean 1987) veya ticari yazılımlar (ACD Labs 2002) kullanılarak belirlenebilir.

Beton Gözenek Özellikleri ve Geçirimsizlik

Çatlaksız bir betonda sızma esas olarak kapiler gözenekler arasından olur. Çimento jeli gözeneklerinin küçük olması betonun geçirimsizliğine katkı sağlar ancak çimento hamuru bir bütün olarak, jelden 20-100 kat daha geçirgendir. Esas olarak sertleşmiş çimento hamurunun geçirimsizliği, kapiler porositine bağlıdır (ACI). Köprü tabliyesi betonlarında kullanılan, en yaygın su/çimento oranı 0.40, 0.45 arasındadır (Yaman ve diğ. 2001). S/ç oranı 0.40 ile 0.50 arasında olan 28 günlük bir betonda, kapiler boşlukların çapları 45-1000Å arasında değişir (Mehta ve Monteiro 1993). Betonun geçirimsizliği ayrıca sertleşmiş çimento hamurundaki gözenek büyüklüğü dağılımına da bağlıdır (ACI 2001; Mehta ve Monteiro 1993; ve Neville 1995).

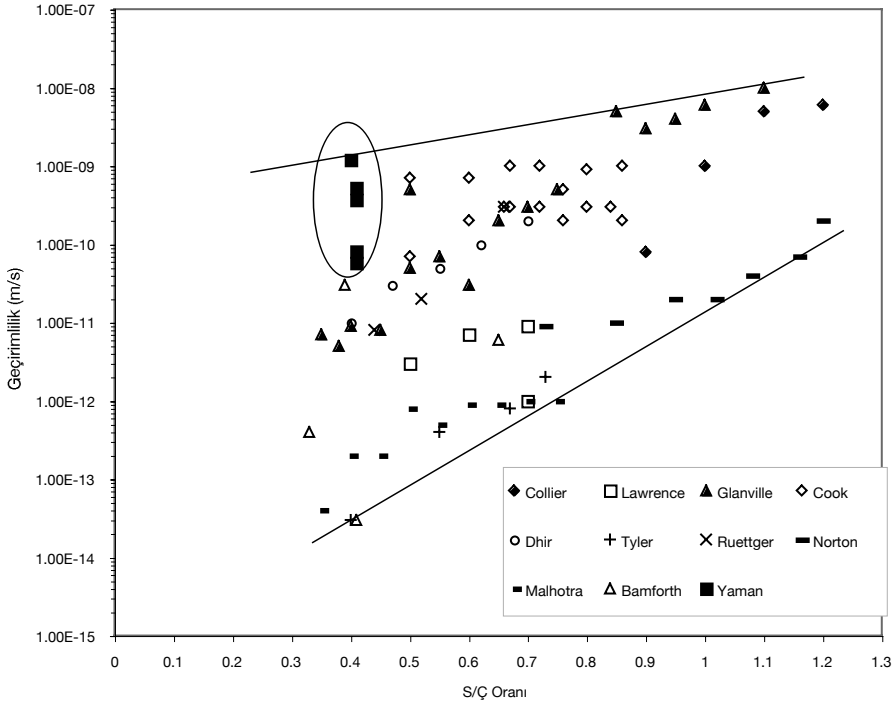
Köprü tabliyesine yalıtkan nüfuzu eğer betonun geçirimsizlik özellikleri biliniyorsa değerlendirilebilir. Michigan'daki köprü tabliyelerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu, bir dizi geçirimsizlik verisi elde edilmiştir (Tablo 1) (Yaman ve diğ. 2002). 28 gün boyunca nem kürü uygulanmış numunelere nitrojen (N_2) gazı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Tablo 1'in ikinci kolonunda, gaz geçirimsizliği deneylerinden hesaplanan geçirimsizlik katsayıları gösterilmiştir. Esas olarak, tanıma göre, gerçek geçirimsizlik akışkandan bağımsızdır (Neville 1995). Ancak, literatürdeki deneysel veriler,

betonun gerçek gaz geçirimsiliğinin gerçek su geçirimsiliğinden iki kat büyük olduğunu göstermektedir (Whitting 1998). Tablo 1'in ikinci kolonunda verilen gerçek gaz geçirimsiliği verilerini, literatürdeki gerçek su geçirimsiliği verileri ile karşılaştırmak amacı ile, eşdeğer gerçek su geçirimsiliği değerleri, gerçek gaz geçirimsiliği değerlerinin, gaz viskozitesinin su viskozitesine oranıyla çarpılması ile hesap edilmiş ve Tablo 1'in üçüncü kolonunda verilmiştir. Tablo 1'in dördüncü kolonunda verilen su geçirimsiliği (K_w) değerleri (1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır ve literatürde mevcut olan verilerle birlikte grafik olarak verilmiştir (Şekil 3).

$$K_w = k_w \rho_w g / \eta_w \quad (1)$$

Burada k_w =gerçek su geçirimsiliği; ρ_w =suyun yoğunluğu (1000 kg/m^3); g =yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2) ve η_w =suyun viskozitesi ($8.510^{-4} \text{ kg/m s}$) dir.

Şekil 3'de görüldüğü gibi, köprü tabliyelerinden elde edilen numunelerden ölçülen betonun arazi geçirimsiliği, laboratuvarında hazırlanan numunelerde ölçülen ortalama geçirimsilik değerlerinden daha büyüktür. Bu gözleme dayanarak, yalıtkan sızma amaçları için beton geçirimsiliği hesabında Şekil 3'de yer alan üst sınır verilerinin %80'i kullanılabilir.



ŞEKİL 3 Su geçirimsiliğinin s/ç oranıyla değişimi (Hearn 1992)

Taşıma Özellikleri

Saha koşulları göz önüne alındığında, üreticiler tarafından belirtilen nüfuz derinlikleri köprü tabliyesi betonlarında elde edilemez (Cady 1994 ve McGettigan 1992). Nüfuz derinliği hem yalıtkan ve betonun özelliklerine hem de hakim çevre şartlarına bağlıdır. Sızma derinliği, her bir köprü tabliyesi, yalıtkan ve yalıtkan uygulaması sırasındaki çevre şartları için farklılık gösteren bir faktördür. Kabul edilebilir sızma derinliği hesaplarına, aşağıda formülize edilen akış olayı temel bilgileri kullanılarak ulaşılabilir (Attanayaka ve diğ. 2002).

Gözenekli ağ içinde kararlı akım kabul edilerek, küçük-doygun bir hacim için Darcy yasası aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$dV_{\text{imp}} = \frac{k}{\eta} A \frac{\Delta P}{h(t)} dt \quad (2)$$

Burada dV_{imp} =doygun hacim, dt = zaman aralığı, k = gerçek geçirimsizlik katsayısı, A = yüzey akışına dik alan, η = dinamik viskozite, h = sızma derinliği, ve $\Delta P/h(t)$ sıvı içindeki basınç değişimidir.

Betonun bir sıvı ile doldurulmuş küçük bir hacmi veya boşlukları (p), etkin porozite olarak adlandırılır ve mevcut poroziteden küçüktür. Etkin porozite değişik yüzey gerilmelerine sahip sıvılar için farklıdır (Sosoro 1998). Doymun hacim, ayrıca etkin porozite ve doymun derinlik cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$dV_{\text{imp}} = pA dh \quad (3)$$

(2) ve (3) denklemlerinin birleştirilmesi ve düzenlenmesi sonucu aşağıdaki formül elde edilir:

$$h(t)dh = \frac{k}{\eta p} \Delta P dt \quad (4)$$

$h(0)=0$ sınır şartı ve zamana göre integral alındığında, sızma derinliği formülü aşağıdaki gibi zaman bağlı olarak elde edilir:

$$h^2 = \frac{2k}{\eta p} \Delta P t \quad (5)$$

Sıvı taşınımında, kapiler kuvvetler etkindir. ΔP kapiler basınç farkı ve

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \delta}{a} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada a =dairesel kılcalın yarıçapı; γ = yüzey gerilmesi; ve δ =yalıtkanın temas açısıdır.

(5) ve (6) eşitliklerinin birleştirilmesi ile sızma derinliği için, beton ve yalıtkan sabitleri cinsinden, zamana bağlı denklem

$$h^2 = \frac{4k l \gamma \cos \delta}{\eta p a} t \quad (7)$$

veva

$$h^2 = \alpha t \quad (8a)$$

elde edilir. Burada

$$\alpha = 4 \frac{\gamma k}{\eta p a} \cos \delta \quad (8b)$$

α =sızma derinliğinin karesi h^2 ve sızma süresi t arasındaki eğimdir.

(8b) eşitliği, gerçek geçirimlilik katsayısına göre aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$k = \alpha \cdot p \cdot a \frac{\eta}{4 \cos \delta \gamma} \frac{1}{l} \quad (9)$$

(9) eşitliğine göre, sızma derinliğini belirleyen gerçek geçirimlilik katsayısı, betonun özgül boşluk özelliklerinin (porozite ve ortalama boşluk yarıçapı) ve yalıtkan özelliklerinin (viskozite, yüzey gerilmesi, ve temas açısı) bir fonksiyonudur. Bu özelliklerin yanısıra, gözenek yapısının dolambaçlılığı, gözenek yapısının topolojisi ve yalıtkanın beton alt yüzeyle reaktivitesi, gerçek geçirimlilik katsayısını etkileyebilecek, hesaba katılmamış faktörlerdir. Tablo 2'de yalıtkan sızmasına etki eden bütün faktörler özetlenmiştir.

TABLO 2. Yalıtıcıların sızma derinliğini kontrol eden faktörler

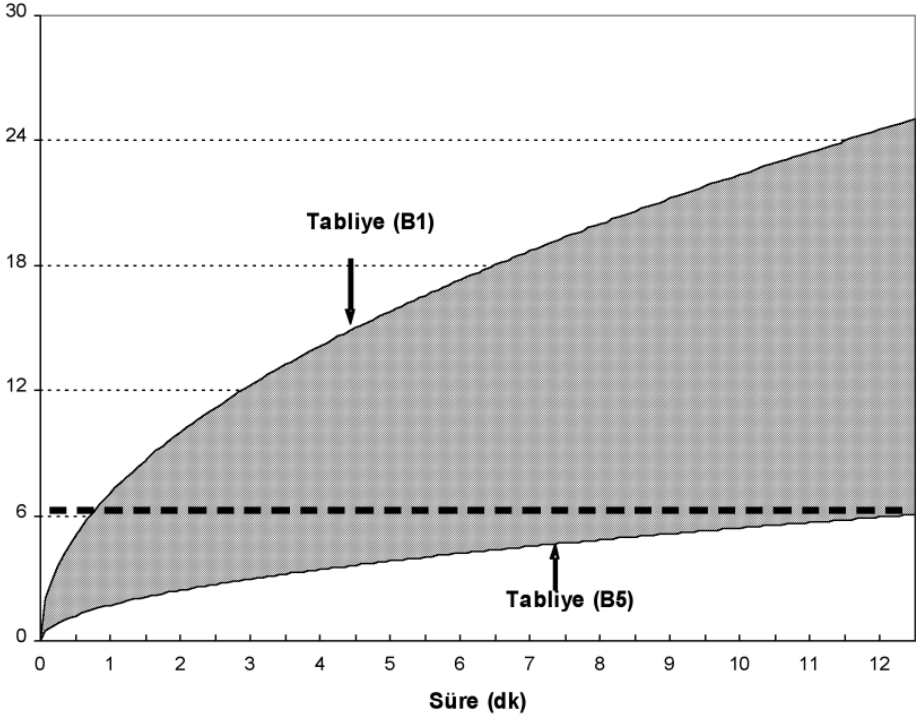
Beton (a)	Sızıcı Yalıtıcılar (b)	Çevre ve Diğer (c)
Gözenek büyüklüğü	Viskozite	Sıcaklık
Gözenek dağılımı	Temas açısı	Bağıl nem
Nem	Yüzey gerilimi	Uygulama basıncı
Çatlak genişliği ve yoğunluğu	Molekül büyüklüğü	Yalıtıcının substratla tepkimesi
Gözenek yapısının dolambaçlılığı	Molekül ağırlığı	
Gözenek yüzey topolojisi		

Sayısal Örnek

Bu örnekte (7) eşitliği kullanılarak tipik bir düzenli silanın teorik nüfuz derinliği hesaplanmıştır. Tablo 1'de verilen deneysel geçirimlilik katsayı değerleri kullanılarak, silanın, zamana bağlı bir dizi nüfuz derinliği değeri hesaplanmıştır. Hesaplarda kullanılan silanın fiziksel özellikleri; yüzey

gerilmesi ($\gamma=0.02$ N/m), yoğunluğu ($\rho=900.4$ kg/m³), temas açısı ($\delta=0^\circ$) ve viskozitesi ($\eta=1.7910^{-3}$ kg/m s)'dir. Yalıtkan fiziksel özelliklerinden bir kısmı deneysel olarak belirlenmiş, bir kısmı da Gerdes ve diğ.(1999)'den alınmıştır. Betonun etkin porozitesi (p), sızan sıvının yüzey gerilimine bağlıdır. Bu hesaplamalarda, etkin porozite beton hacminin %10'una eşit olarak alınmıştır. Etkin porozite ASTM C642'de tanımlanan su emme deneyine göre arazi numunelerinden hesaplanmış değerlerin ortalamasıdır (Yaman ve diğ. 2001). Mehta ve Monteiro'ya göre (1993) iyi hidrate olmuş bir çimento hamurundaki kapiler boşluklar 10 ila 50 nm arasında değişir. Betonun etkin gözenek çapı, çimento hamurununkinden oldukça fazladır. Bu yüzden, ortalama gözenek yarıçapı (a), 2510^{-3} m olarak tahmin edilmiştir. Gerçek silan geçirimsizliği, Tablo 1'in ikinci kolonunda verilen gerçek gaz geçirimsizliği değerlerinin, gaz viskozitesi/silan viskozitesi oranıyla çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Gaz ve silanın viskoziteleri sırasıyla 1.7810^{-5} ve 1.7810^{-3} kg/m s'dir. Şekil 4'de (7) eşitliğiyle hesaplanan, zamana göre yalıtkan sızma derinlikleri dizisi, grafik olarak gösterilmiştir. Üst ve alt sınır sızma eğrileri, Tablo 1'de verilen B1 ve B5 köprülerinin geçirimsizlik sınırlarına karşılık gelmektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi, 45 s, 12 dakika arası tabliyeye yüzey üzerinde bir havuz oluşturarak yalıtkan uygulandığında, 6mm sızma derinliğine ulaşılmıştır. Buna karşın, s/ç 0.41 oranı için, Şekil 3'de verilen bazı nüfuz derinliği verileriyle çok düşük bir sızma oranı gözlenmiş ve 6 mm sızma derinliğine ulaşmak için gerekli olan silan uygulama süresi 1 saatin üzerine çıkmıştır. Belli bir tabliye içinde, geçirimsizlikte değişim olabileceği varsayılabilir. Farklı tabliyeler üzerinde yapılan geçirimsizlik ölçümleri, belli bir tabliye içindeki geçirimsizlik farklılığının göstergesidir. Tablo 1'deki geçirimsizlik değişimlerini göz önüne alındığında uygulama süresi, 6mm sızma derinliğinin gerekmediği, oldukça düşük sınırlı geçirimsizliğe dayanıyor olabilir. Örneğin, 1.010^{-17} m² geçirimsizlik sınırı (Şekil 4) ve 6mm sızma derinliği için 7 dakikalık uygulama süresi gerekir. Buradan sınırlı geçirimsizliğin, yalıtkan kullanılsa da yeterli korumayı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Daha uzun uygulama süreleri için, yalıtkanın buharlaşma miktarı daha büyük olacaktır ve maliyet açısından dikkate alınması gerekir.



ŞEKİL 4 Silan'ın nüfuz derinliğinin zamana karşı değişimi

Önerilen Seçim ve Değerlendirme Kriterleri

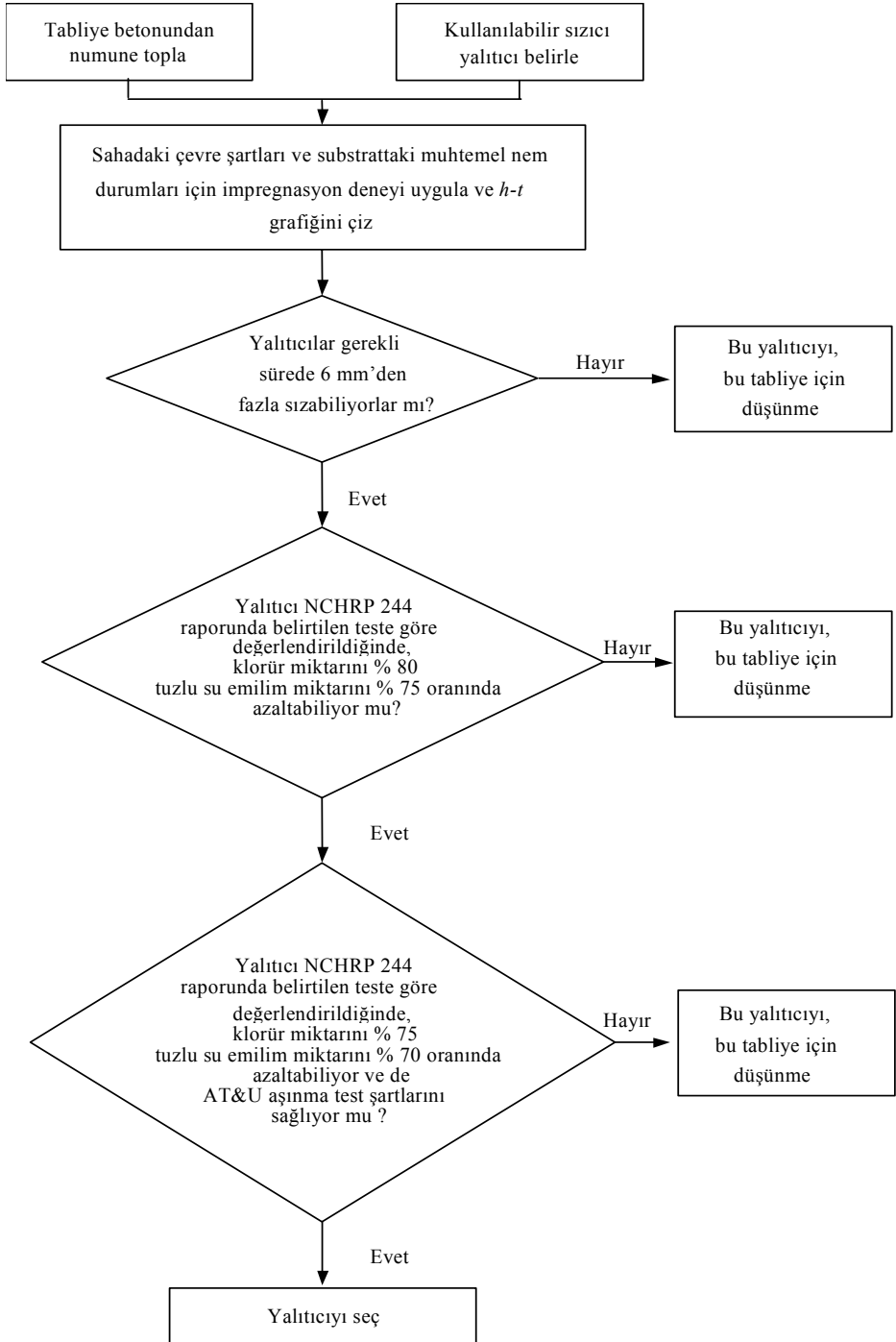
Yalıtkan Seçim Prosedürü

Tablo 3'de yalıtılmış beton yüzeyi için dikkate alınması gerekli performans faktörleri özetlenmiştir. Belirli bir köprü tabliyesinde sızıcı yalıtkan seçimi için bu faktörlere dayalı bir akış şeması (Şekil 5) sunulmuştur. Tablo 3'de tanımlanan bazı performans faktörleri birbiriyle çelişmektedir. Örneğin, seçilen yalıtkan, klorür girişine ve su sızmasına karşı gerekli beton korumasını sağlayabilir ama yalıtkan dayanıklılığı dikkate alındığında uygun olmayabilir. Şekil 5'deki akış şeması, yalıtkanın korunması ve dayanıklılık ilişkisindeki benzer performans çelişkilerini görmek açısından yararlıdır.

TABLO 3. SIZICI yalıtıcı seçiminde göz önüne alınması gereken faktörler

(Cady 1994 and Basbeer ve diğ. 1997)

Özellik (a)	Önem (b)
Orjinal substrat	Yeni inşaat veya güçlendirme Tabliyenin durumu Daha önceki yüzey iyileştirmeleri Yüzey kirlenmesi
Çevre	Atmosferik, denize yakınlık, vb. Nem varlığı Kirleticilerin varlığı
Yalıtıcı dayanıklılığı	Nüfuz derinliği Ultraviyole ışınlarla karşı dayanım Hidrate olmuş çimento hamuruyla tepkime Akıntı Alkalilere karşı dayanım
Betonun korunması	Klorür emilimi Su emilimi Su buharı iletimi Buz çözücü tuzlara karşı pullanma dayanımı
Servis	Kaymaya karşı dayanım
Uygulama özellikleri	Yüzey hazırlama şartları Yüzey üzerinde havuz oluşturma ya da sprey özellikleri Substrat nemine karşı dayanım Sıcaklığa bağlılığı Sahaya erişim ve şerit kapatma süresi
Yaşam döngü maliyeti	Malzeme birim fiyatı Uygulama sayısı İşçi maliyeti Bakım maliyeti



ŞEKİL 5 Sızıcı yalıtıcı seçim prosedürü

Yüzey Hazırlanması ve Uygulama Prosedürü

Yüzey yalıtımıyla ilgili daha önce anlatılan güncel uygulamalar, yüzeyi kirleticilerden ve tozdan arındıracak gerekli önlemler alındığı takdirde kabul edilebilir. Yeni yapılan tabliyelerde, yalıtım uygulamasının engellenmemesi için kaldırılabilir kür bileşenleri kullanılmalıdır. Basıncılı suyla yıkanan bir tabliye, belirli bir süre kurumaya bırakılmalıdır. Bu süre, hakim olan çevre şartlarına ve tercih edilen sızma derinliği içinde gerekli olan nem muhtevasına bağlıdır. Kuruma süresi, istenilen sıcaklık ve nem şartları altında, nem aktarım oranının bilinmesiyle hesaplanabilir. Esas olarak, daha iyi sızma derinliğine, yalıtıcı reaksiyonu için gerekli olacak kadar suyun gözeneklerde bulunması şartı ile daha kuru bir yüzeyle ulaşılabilir.

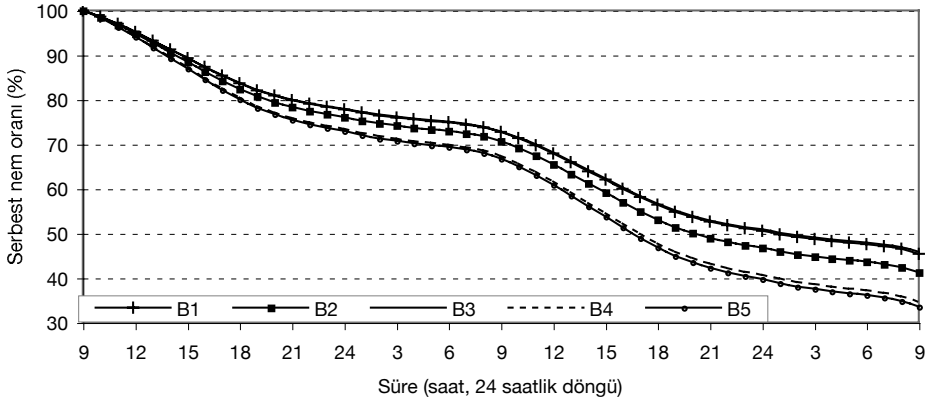
Nem muhtevası tabliye yüzeyine yakın kısımlarda, tazyikli su ile yıkama sırasında artar. Tazyikli su ile yıkama sonrasında tabliye yüzeyindeki beton gözeneklerinin suya doymun olacağı kabul edilebilir. Tabliye, çevre şartlarına açık olduğu için, serbest nem olarak düşünülebilecek gözenekler içindeki su buharlaşır. Tabliye nemini gerekli seviyeye düşürmek için gerekli olan zaman hesaplanabilir. Sabit oranlı kuruma dönemi dikkate alındığında, serbest nemin zaman içindeki değişimi aşağıda verilen (10) ve (11) formülleriyle hesaplanabilir.

$$R_c = (3,600 h)/(1,000\lambda) \times (T - T_w) \quad (10)$$

$$X_2 = X_1 - (AR_c t)/L_s \quad (11)$$

Burada, R_c = kuruma oranı, h =ısı dağılımı katsayısı, T =çevre sıcaklığı, T_w = ıslak hava sıcaklığı, λ =suyun ısısı, X_1 ve X_2 = başlangıç ve son nem içeriği, t =kuruma zamanı, A =tabliye alanı, L_s =kuru betonun ağırlığıdır.

Şekil 6'da güneydoğu Michigan'da tipik bir yaz günü (2004 hava verileri) çevre şartları için yapılan hesaplamalar gösterilmiştir. Kuruma zamanının hesaplanmasında, 48 saatlik (2 gün) bir kuruma süresi sonunda, yalıtkan uygulaması için tazyikli su ile yıkamanın sabah 9:00'da başladığı kabul edilmiştir. Şekil 6'ya göre, serbest nem oranının %30'ı aşan kısmı, örnekte belirtilen çevre şartları altında yalıtım yüzeyinde kalacaktır. Yalıtkanı uygulamadan önce, serbest nemin tamamının yüzeyden uzaklaştırılması tercih edilir. Bu durumda iki günlük kuruma süresi yeterli olmayabilir ve tozsuz aşındırıcı püskürtülmesi gibi kuru temizleme yöntemlerinden birinin kullanımı seçilebilir.



ŞEKİL 6 Güneydoğu Michigan'da tipik yaz günü çevre şartları için tabliye betonu serbest nem oranının zamana karşı değişimi

En çok tercih edilen sızıcı yalıtkan uygulama yöntemleri yüzey taşıma ve havasız sprey kullanımındır. Temiz yüzeye en az iki tabaka halinde yalıtkan uygulaması tercih edilir. İki uygulama arasında yeterli kuruma süresinin olması gerekir. Bu süre (10) ve (11) eşitlikleri kullanılarak belirli bir beton porozitesi ve beklenen çevre şartları için belirlenebilir.

ÖZET VE SONUÇ

Yalıtıcı uygulanan köprü tabliyeleri, çözücü tuzların ve yüzeyden sızan diğer bozucu maddelerin etkilerine karşı tekdüze dayanıklılık gösterebilir. Beklenen tabliye korunma süresi, yalıtkan sızma derinliğine bağlıdır. Betonun içine yalıtkan sızması, yalıtkanların spesifik beton için doğru seçimine bağlıdır; böylece sızma miktarı hesaplanabilir.

Beton tabliye yüzeyine yalıtkan uygulama prosedürü buluşsal olarak tanımlanmıştır. Esas olarak, mümkün olan bütün şartlar altında başarılı bir uygulama sağlamak için bir tasarım prosedürüne ihtiyaç vardır. Bu makalede ele alınan tespitlerin yardımıyla, yalıtkan uygulama işlemi için, belirli şartlar altındaki köprü tabliyelerine uygulanabilecek beton karışım tasarımına benzer bir tasarım prosedürü düzenlenebilir. Kullanımda olan köprü tabliyelerini yalıtma durumunda, güçlü yıkama ve yalıtkan uygulaması arasındaki kuruma dönemi tasarım prosedürünün bir parçasıdır ve makalede verilen formüllerle hesaplanabilir. Uzun kuruma dönemlerinin gerektiği, nem oranı yüksek bölgelerde, tozsuz aşındırıcı püskürtülmesi gibi kuru temizleme yöntemlerinden birinin kullanımı seçilebilir. Ard arda taşıma prosedürüyle uygulanan yalıtkanlar, nemli beton tabliyede ilave sızmaya yol açacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Michigan Department of Transportation (MDOT) tarafından, Wayne State Üniversitesi Yapısal Dayanıklılık Merkezi aracılığıyla finanse edilmiştir. Burada belirtilen görüşler, yazara aittir ve sponsorların bakış açısını yansıtmak durumunda değildir. Alberta Department of Transportation'dan M.J.Wong'a teşekkür ederim. Sika Corporation, Lone Star Epoxies, endur-O-seal ve Fox Industries araştırma boyunca sürdürülen deneysel çalışmalar için gerekli olan sızıcı yalıtkanları sağlayarak destek vermişlerdir. Yazar ayrıca, Kimya Mühendisliği Bölümünden çalışmada emeği geçen araştırma görevlileri Vipuik Kishore ve Linfeng Zhang'a teşekkür eder.

Notasyon:

Makalede aşağıdaki semboller kullanılmıştır:

A	=	alan (m^2)
a	=	silindirik kılcalın gözenek yarıçapı (m)
db	=	dt zaman aralığındaki derinlik (m)
dt	=	zaman artışı
dV_{imp}	=	dt zaman aralığındaki doymun hacim(m^3)
H	=	ısı iletimi katsayısı(W/m^2K)
b	=	sızma derinliği(m)
k	=	gerçek permeabilite katsayısı(m^2)
L_s	=	kuru betonun kütlesi (kg)
p	=	porozite
R_c	=	kuruma oranı ($kg H_2O/h m^2$)
T	=	ortam sıcaklığı (K)
T	=	kuruma zamanı (h)
T_w	=	çiy oluşması için gerekli olan sıcaklık (K)
X_1, X_2	=	başlangıç ve son serbest nem muhtevası ($kg H_2O/kg$ kuru beton)
γ	=	yüzey gerilmesi (N/m)
ΔP	=	kapiler basınç farkı (N/m^2)
$\Delta P/b(t)$	=	sıvıdaki basınç değişimi (N/m^3)
δ	=	temas açısı(derece)
η	=	suyun sınır ısısı($kJ/kg.$)

KAYNAKLAR

1. ACD Labs. (2002). <http://www.acdlabs.com/> December 2002.
2. ACI. (2001). "Causes, evaluation and repair of cracks in concrete structures." *ACI manual of concrete practice, ACI 244.1R-93*, Detroit.
3. Aktan, H. M., Yaman, O., and Staton, J. (2000). "Ultrasonic pulse velocity method for the quantification of new concrete bridge deck durability." *Proc., Int. Conf. on Application of Geophysical & NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, Federal Highway Administration, St. Louis, Mo.
4. Attanayake, U., Aktan, H., and Ng, S. (2002). "Criteria and benefits of penetrating sealants for concrete bridge decks." *MDOT RC-1424, CSD-2002-03*, Michigan Department of Transportation, Construction and Technology Division, Lansing, Mich.
5. Basheer, P. A. M., Basheer, L., Cleland, D. J., and Long, A. E. (1997). "Surface treatments for concrete: assessment methods and reported performance." *Constr. Build. Mater.*, 11 (7-8), 413-429.
6. Brewer, H. W. (1965). "Moisture migration-concrete sabl-on-ground construction." *J. PCA Res. Dev. Lab.*, 7 (2), 2-17.
7. Cady, P. D. (1993). "Condition evaluation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion." *Procedure manual, SHRP-S-330*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
8. Cady, P. D. (1994). "Sealers for portland cement concrete highway facilities." *NCHRP Synthesis 209*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
9. Carter, P. D. (1994). "Evaluation of dampproofing performance and effective penetration depth of silane sealers in concrete." *Special Publication 151 (SP-151)*, ACI, Detroit, 95-117.
10. Dean, J. A. (1987). *Handbook of organic chemistry*, McGraw-Hill, New York.
11. Geankopolis, C. J. (1993). *Transport processes and unit operations*, 3rd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
12. Gerdes, A., Wittmann, F. H., and Lehmann, E. H. (1999). "Characterisation of transport processes in surface near zones of concrete by means of neutron radiography." *PSI Annual Rep.*, Annex VI, [_http://neutra.web.psi.ch/publication/](http://neutra.web.psi.ch/publication/) November 22, 2004.
13. Hanson, J. A. (1968). "Effects of curing and drying environments on splitting tensile strength of concrete." *J. Am. Concr. Inst.*, 65, 535-543.
14. Hearn, N. (1992). "Saturated permeability of concrete as influenced by cracking and self-sealing." Ph.D. thesis, Univ. of Cambridge, Cambridge, U.K.

15. McGettigan, E. (1990). "Application mechanism of silane weatherproofers." *Concr. Int.*, ACI, 12 (10), 66–68.
16. McGettigan, E. 1992. "Silicon-based weatherproofing materials." *Concr. Int.*, ACI, 14 (6), 52–56.
17. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. (1993). *Concrete: Structure, properties, and materials*, 2nd Ed., Prentice–Hall, Englewood Cliffs, N.J.
18. Michigan Department of Transportation MDOT. (2003). *Standard specifications for construction*, Lansing, Mich.
19. Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*, 4th Ed., Longman's, London.
20. Pfeifer, D. W., and Scali, M. J. (1981). "Concrete sealers for protection of bridge structures." *NCHRP Rep. No. 244*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
21. Sosoro, M. (1998). "Transport of organic fluids through concrete." *Mater. Struct.*, 31, 162–169.
22. "Weather data." (2004). <http://www.intellicast.com> August 15, 2004.
23. Whiting, D. (1988). "Permeability of selected concretes." *ACI Special Publication, Permeability of Concrete, SP-108*, Detroit, 195–222.
24. Whiting, D., Ost, B., Nagi, M., and Cady, P. D. (1992). "Condition evaluation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion: methods for evaluating the effectiveness of penetrating sealers." *SHRP-S/FR-92-107*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
25. Yaman, I. O., Birgul, R., Aktan, H. M., Hearn, N., and Staton, J. F. (2002). "A test method to appraise the future durability of new concrete bridge decks." *Transportation Research Record. 1798*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 56–63.
26. Yaman, I. O., Karaca, H., and Aktan, H. M. (2001). "Evaluation of concrete permeability by ultrasonic testing techniques." *Phase IV Final Rep.*, Wayne State Univ., Detroit.
27. Yaman, I. O., Udegbunam, O., and Aktan, H. M. (2000). "Assessing concrete permeability from ultrasonic pulse velocity measurements." *Paper No: 00-1190*, Transportation Research Board CD ROM, Washington, D.C.