



BETONDA DONMA-ÇÖZÜLME ETKİSİ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILAR REHBERİ

2025

KATKI ÜRETİCİLERİ BİRLİĞİ

BETONDA DONMA-ÇÖZÜLME ETKİSİ VE HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILAR REHBERİ

HAZIRLAYAN

Katkı Üreticileri Birliği Teknik Komitesi

EDİTÖR

Yasin Engin

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Bağlarbaşı Mah. Atatürk Cd. Sakarya Sk. No: 35 D:18, 34844 Malte Plaza, Maltepe /
İstanbul

Tel: +90 216 456 43 24

www.kub.org.tr / info@kub.org.tr

© Nisan 2025

Katkı Üreticileri Birliği (KÜB) yayınıdır.

Tüm yayın hakkı KÜB' e aittir.

Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

İzinsiz çoğaltılamaz ve basılamaz.



İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
2. DONMA-ÇÖZÜLME OLAYI: MEKANİZMA VE ETKİLER	2
3. BETONDA DONMA-ÇÖZÜLMEYE KARŞI DAYANIKLILIĞI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	4
4. DONMA-ÇÖZÜLME HASAR TÜRLERİ	7
5. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILAR: TANIM VE ÖZELLİKLER	10
6. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİNE ETKİSİ	14
7. DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİ AÇISINDAN UYGULAMA ESASLARI	16
8. HAVA İÇERİĞİ KONTROL YÖNTEMLERİ VE STANDARTLAR	17
9. KATKI SEÇİMİ VE UYGUNLUK KRİTERLERİ	19
10. GENEL DEĞERLENDİRME	21
KAYNAKLAR	22

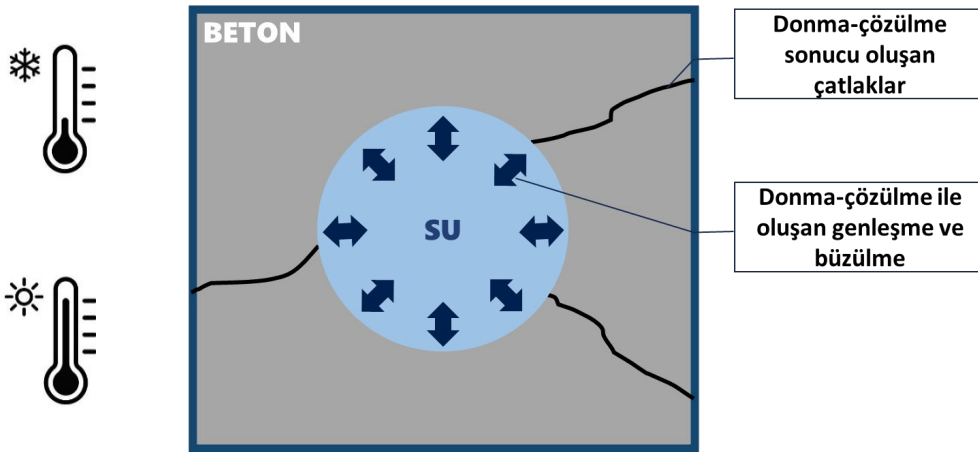


1.GİRİŞ

Beton; dayanıklılığı, yanmazlığı, çelik ile uyumu, şekil verilebilirliği gibi birçok üstün özelliği nedeniyle en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Ancak, özellikle soğuk iklim koşullarında sıkça karşılaşılan donma-çözülme döngüleri, betonun uzun vadeli performansını ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu rehber, betonun donma-çözülme etkisine karşı dayanımını artırmak amacıyla kullanılan hava sürükleyici katkıların işlevini, uygulamasını ve etkilerini ele almayı amaçlamaktadır. Rehberde, mühendisler, teknisyenler, akademisyenler ve uygulayıcılar için temel bilgiler sunulurken aynı zamanda saha uygulamalarında dikkat edilmesi gereken kritik noktalar da vurgulanmaktadır.

Donma-Çözülme Problemi Neden Önemlidir?

Betonun içinde bulunan serbest su, sıcaklık 0°C 'nin altına düştüğünde donarak genişir. Bu genişleme sonucu oluşan iç gerilmeler, zamanla betonda çatlaklara, yüzeyde pullanmaya ve taşıyıcı kapasitenin azalmasına neden olur. Bu etkiler, özellikle betonun suya doymun olduğu ve tekrar eden donma-çözülme döngülerine maruz kaldığı durumlarda daha belirgin olmaktadır.



Şekil 1. Beton içindeki suyun donma-çözölmeye maruz kalması

Donma-çözölme etkilerine karşı betonun dayanıklılığını artırmak için kullanılan hava sürükleyici katkılar, beton içinde çok küçük ve düzgün dağılmış hava boşlukları oluşturarak, donan suyun oluşturduğu basıncın bu boşluklara yönlenmesini sağlar. Bu sayede iç gerilmeler azaltılır ve betonun donma-çözölme dayanımı artırılır. Bu katkılar, özellikle dış hava koşullarına açık yüzey betonlarında (yollar, köprüler, havaalanı pistleri vb.) büyük önem taşır.

Tablo 1'de beton içerisinde bulunan çeşitli boşluk türleri büyüklükleri, ölçekleri, oluşum şekilleri ve betona etkileri açısından kıyaslaması yapılmaktadır.



Tablo 1. Beton içindeki boşluk tipleri – ölçek ve özellik kıyaslama tablosu

Boşluk Tipi	Büyüklik Aralığı	Ölçek Düzeyi	Şekil	Oluşum Şekli	Beton Performansına Etkisi
Hapsolmuş Hava Boşlukları	1–10 mm	Makro	Düzensiz	Karıştırma sırasında doğal olarak oluşur	Dayanımı azaltır, geçirgenliği artırır
Sürüklenmiş Hava Boşlukları	10–300 µm	Mikro	Küçük, düzgün dağılmış	Hava sürükleyici katkılarla oluşturulur	Donma-çözölmeye karşı direnç sağlar, işlenebilirlik sağlar
Kılcal Boşluklar	10 nm – 10 µm	Mikro / Nano	İnce, kanallar şeklinde	Hidrasyon sonrası boşluk suyu	Geçirgenliği belirler, kuruma büzölmesine neden olabilir
Jel Boşluklar	< 10 nm	Nano	Çok küçük, düzensiz	C-S-H jeli içinde doğal olarak oluşur	Mekanik etkisi düşüktür ancak yaygındır

2. DONMA-ÇÖZÜLME OLAYI: MEKANİZMA VE ETKİLER

Beton gözenekli bir yapıya sahiptir ve bu gözeneklerin içinde su bulunabilir. Sıcaklık 0°C'nin altına düştüğünde, gözeneklerdeki serbest su donar ve yaklaşık %9 oranında genişir. Bu genişleme sonucu, çevreleyen katı yapı üzerinde hidrolik ve osmotik basınçlar oluşur. Eğer suyun donduğu ortamda yeterli boşluk yoksa, oluşan basınç betonda mikro çatlakların meydana gelmesine neden olur. Sıcaklık tekrar yükseldiğinde buz erir ve çatlaklardan içeri daha fazla su girer. Bu döngü her tekrarlandığında hasar ilerler ve sonunda betonun dayanıklılığı ciddi biçimde azalır. Donma-çözölme döngüsünde iki temel hasar mekanizması etkili olur:

1. Hidrolik Basınç Teorisi

Donan suyun hacimsel genişmesi sonucu beton içinde oluşan basınç, gözenekler arası su transferine neden olur. Eğer suyun hareket edebileceği yeterli boşluk yoksa, bu basınç 3–4 MPa'ya kadar çıkabilir ve betonda çatlaklara yol açar [1].

2. Osmotik Basınç Teorisi

Buz kristalleri çevresinde suyun yüzey geriliminden kaynaklanan osmotik etkilerle su çekilir ve su-buz sınırında yoğunluk artar. Bu da mikro düzeyde gerilmelere neden olur. Betonun donma-çözölme dayanımını belirleyen en önemli faktörlerden biri aşağıda sınıflandırılan gözenek yapısıdır:

- **Kapiler gözenekler:** Büyük boşluklardır, suyu tutar ve donma sırasında çatlamaya yol açabilir.
- **Jel gözenekleri:** Çok küçük boyutludur, genellikle donma etkisinden daha az etkilenir.



- **Hava boşlukları:** Kontrollü şekilde oluşturulursa donma-çözölmeye karşı tampon görevi görür.

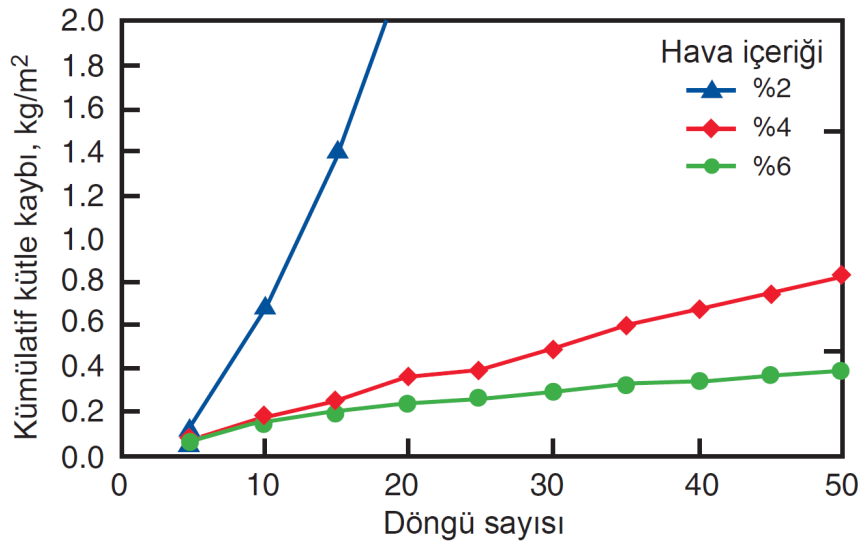
Donma-çözölme hasarı, betonun sadece ilk döngüde değil, tekrar eden döngüler sonucunda birikerek artar. Bu nedenle ilk bakışta gözle görölmeyen mikro hasarlar, zaman içinde yüzeyde pullanma ve daha sonra iç çatlaklar ve parçalanmalara dönüşebilir.

Donma hasarının şiddeti, betonun doygunluk oranına doğrudan bağlıdır. Betonun doygunluk derecesi %91'in üzerindeyse, donma-çözölme hasarına uğrama riski oldukça yüksektir [2]. Düşük geçirgenlik ve su/çimento oranı, bu riski azaltan faktörlerdendir.

Donma-çözölme hasarının oluşumunda aşağıdaki dış etkenler de rol oynar:

- Günlük sıcaklık değişimleri (ör. gece don, gündüz çözölme)
- Yüzey suya maruziyet (yağmur, eriyen kar suyu vs.)
- Kimyasal buz çözücüler (örn. NaCl, CaCl₂ → donmayı hızlandırıp tuz hasarını tetikler)
- Döngü sayısı (300 döngüye kadar testler yapılmakta, 100'den fazla döngüye dayanabilen betonlar dayanıklı sayılmaktadır.)

Şekil 2'de döngü sayısının farklı hava içeriğine sahip olan betonlarda kütle kaybına etkisi görölmektedir. Döngü sayısı arttıkça kütle kaybı artmaktadır. Hava içeriği arttıkça kütle kaybının göreceli olarak daha az olduğu görölmektedir. %2 hava içeriğine sahip betonlarda döngü sayısının artması sonucu daha şiddetli kütle kaybı meydana gelmektedir. Bu çalışma betonun hava içeriğinin donma-çözölme hasarında ne kadar etkili bir parametre olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 2. Su/çimento oranı 0,45 olan beton karışımları için kümülatif kütle kaybı [3]



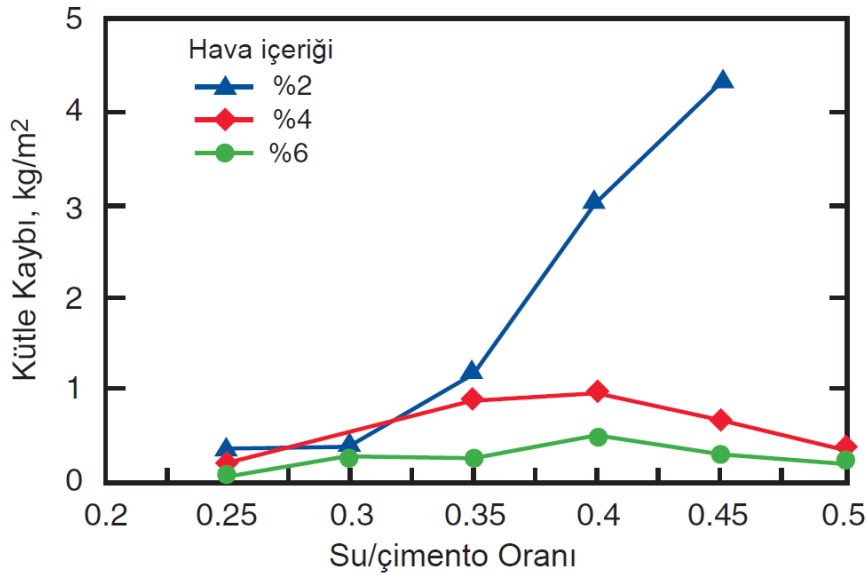
3. BETONDA DONMA-ÇÖZÜLMEME KARŞI DAYANIKLILIĞI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Betonun donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı, yalnızca çevresel koşullara değil; aynı zamanda betonun içsel özelliklerine, karışım tasarımına ve uygulama koşullarına da bağlıdır. Bu bölümde donma-çözülme karşı dayanıklılığı doğrudan etkileyen başlıca faktörler incelenmektedir.

3.1. Su/Çimento (Su/Bağlayıcı) Oranı

Su/çimento (S/Ç) oranı veya daha doğru bir ifade ile su/bağlayıcı (S/B) oranı, betonun geçirgenliği ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek S/B oranı, beton içerisinde daha fazla kapiler boşluk oluşmasına neden olur. Bu boşluklar suyun beton içine daha kolay nüfuz etmesine ve donarak iç gerilmeler oluşturmaya yol açar [4]. Düşük S/B oranı ise daha yoğun bir yapı sağlayarak su girişini ve donma hasarını sınırlar. ACI 201.2R'ye göre donma-çözülme dayanımı yüksek betonlar için $S/B \leq 0.45$ olmalıdır [5].

Şekil 3'te 40 çevrim donma-çözülme maruz kalan farklı hava içerikli betonlarda su/bağlayıcı oranının kütle kaybına etkisi görülmektedir. %4 ve %5 hava içeren betonlarda su/bağlayıcı oranının kütle kaybına etkisi düşük seviyede gerçekleşirken, %2 hava içeren betonda su/bağlayıcı oranının artmasını kütle kaybını ciddi seviyede arttırmaktadır.



Şekil 3. Çeşitli su/çimento oranlarında 40 çevrim donma-çözülme maruziyeti sonrası betonun ölçülen kütle kaybı [3]

3.2. Betonun Geçirimliliği

Geçirimlilik, suyun beton içinde ne kadar kolay hareket ettiğini belirler. Düşük geçirimsizlik, donma riski taşıyan su miktarını azaltır. Geçirimlilik; çimento tipi, katkı maddeleri, hidratasyon derecesi ve kür koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yüksek geçirimsizlik, dış ortamdan gelen suyun beton içerisine hızla sızmasına neden olarak donma-çözülme hasarlarını artırır [6].



3.3. Doygunluk Durumu ve Gözenek Yapısı

Betondaki serbest su miktarı ve bu suyun yerleştiği gözenek tipi büyük önem taşır. Özellikle büyük kapiler gözeneklerde bulunan suyun donmasıyla ortaya çıkan gerilmeler, mikro çatlaklara yol açar.

Suyun buza dönüşümünde meydana gelen hacim artışı ve buna bağlı su hareketleri, tamamen doygun beton içerisinde karşılanamaz. Beton ne kadar kuruyorsa, buz oluşumu ve su akışıyla ilişkili basınçları o kadar fazla absorbe etme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, gözenek yapısının doygunluk derecesinin en aza indirilmesi, kontrol edici önemli bir parametredir.

En büyük doygunluk riski taşıyan beton yapılar, sürekli olarak suya maruz kalanlar ya da zaman zaman basınçlı suya maruz kalanlardır. Buz çözücü maddeler de doygunluğu teşvik eder çünkü, belirli bir yarıçapa sahip gözenek için kurumanın başladığı kritik bağıl nem seviyesi, gözenek sıvısının çözeltik konsantrasyonu arttıkça yükselir. Betondaki serbest su, sadece çevre koşullarından değil, aynı zamanda yapının detaylandırılmasından da etkilenir. Özellikle, su ile beton arasındaki temas süresini en aza indiren drenaj detayları buna bir örnektir.

Gözeneklilik ve geçirgenlik orantılı değildir. Yüksek geçirimli beton genellikle olumsuz değerlendirilse de yüksek gözenekliliğe sahip betonun, beton doygun değilse, buzun genişlemesi için güvenli kaçış alanları sağlama avantajına sahip olması ilginçtir. Bu durum, hava sürükleme işleminin bir kontrol yöntemi olarak kullanılmasının temelini oluşturur.

Gözenek çapı, suyun hangi sıcaklıkta donacağını etkiler. En büyük gözeneklerdeki su, belirli bir sıcaklıkta ilk olarak donmaya başlar. Sıcaklık daha da düştüğünde, kapiler ağdaki su donar, ancak jel gözeneklerdeki su donmadan kalır. Su tahliyesi için mevcut boşlukların hacmi ve yakınlığı, hasara karşı direnç derecesini büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, yüksek gözeneklilik ile düşük geçirgenlik arasında bir denge gereklidir.

3.4. Hava Sürükleme

Hava sürükleyici katkılar, beton içine çapı 10–500 mikron arasında değişen küresel hava boşlukları kazandırır. Bu boşluklar, donma sırasında suyun genişlerken oluşturduğu basıncı absorbe eder ve betonun hasara uğramasını önler [7].

3.5. Çimento ve Mineral Katkı Türleri

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik katkılar, gözenekli yapıyı iyileştirerek geçirimsizliği düşürür, ancak yüksek dozajda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu erken yaşta dayanımı düşürerek ilk donma hasarına açık hale getirebilir [8].

3.6. Kür Koşulları

Uygun kür, çimentonun tam hidrasyonunu sağlayarak boşluk yapısını yoğunlaştırır ve geçirimsizliği düşürür. Özellikle ilk 7 gün boyunca etkin kür uygulanmayan betonlarda gözenekli yapı oluşur ve donma-çözülme hasarına zemin hazırlanır.

TS 13515 Standardına göre taze betonun, en az 4 MPa dayanıma ulaşınca kadar donmadan korunması ve sürekli su ile temas halinde olan ve donma-çözölmeye



maruz kalacak genç betonun, en az 24 MPa dayanıma ulaşınca kadar dona karşı korunması önerilmektedir.

3.7. Betonun Yaşı ve Donma Zamanı

Yeni dökülmüş beton, henüz yeterli dayanımı kazanmadığı için erken yaşta donmaya maruz kalırsa geri dönüşü olmayan hasarlar oluşabilir. Bu durum özellikle açık alanda dökülen yol ve saha betonlarında kritik bir sorundur.

Sonbaharda ve ilkbaharda, en düşük günlük sıcaklığın 0 °C'un altına indiği ilk günden sonra, ortalama sıcaklığın art arda en az iki gün süre ile + 5 °C 'un altında kalması halinde, beton yerleştirildikten sonra en az 24 saat dona karşı korunmalıdır. Bu şartların devam etmesi halinde, 24 saatlik koruma süresi, betonun gerekli dayanımına erişmesi için yeterli değildir. Bu nedenle, özellikle daha soğuk hava şartlarının beklendiği hallerde, betonun kürü ve dona karşı koruma süresi uzatılmalıdır [9].

3.8. Yüzey Koruma ve Kaplamalar

Beton yüzeyine uygulanan su itici kaplamalar veya geçirimsiz malzemeler (epoksi, poliüretan, silan/siloksan bazlı koruyucular), suyun betona nüfuzunu azaltarak donma-çözülme hasarını önlemeye yardımcı olur. Ancak bu yöntemler, betonun içsel kalitesine ek bir koruma sağlar; kendi başına yeterli değildir.

3.9. İklim Koşulları

Soğuk iklimlerde betona yönelik en büyük tehdidi temsil eden maruz kalma koşulları, birden fazla parametrenin bir araya geldiği durumlardır. Bunlar, donma-çözülme çevrimlerinin sıklığını, ulaşılan mutlak en düşük sıcaklığı, donma süresini ve soğuma hızını içerir. Sıcaklık ne kadar düşük ve donma süresi ne kadar uzun olursa, potansiyel olarak zararlı koşullara maruz kalan gözenek hacmi üzerindeki etkiler de o kadar büyük olur. Beton düşük bir ısı iletim oranına sahiptir, bu nedenle buz cephesinin önemli ölçüde ilerlemesi için çok düşük sıcaklıklar, uzun süreli donma ya da her ikisinin birleşimi gereklidir. Soğuma hızı da bir faktör olabilir. Soğuma hızı ne kadar yavaş olursa, genişmeden ve kapillerlerden suyun dışarı atılmasından kaynaklanan basınçların dağılması için o kadar fazla zaman tanınır. Bu, betonun dayanım kapasitesini aşan çekme gerilmelerinin kümülatif olarak oluşmasını önleyebilir. Donma-çözülme çevrimlerinin kümülatif etkisi, çevrim sıklığını düşük sıcaklıkta geçirilen süreden daha önemli hale getirir.

3.10. Buz Çözücü Maddeler

Beton yüzeylerinde meydana gelen ciddi yüzey soyulmaları, birçok durumda buz çözücü maddelerin uygulanmasıyla ilişkilendirilir. Bu maddeler, kar ve buz üzerine serpilerek suya göre daha düşük bir donma noktasına sahip bir çözelti oluştururlar, böylece erime daha erken gerçekleşir. Buz çözücü maddeler klorür bazlı olabilir. Bu buz çözücü tuzlar, gömülü donatının pasifliğini bozmadaki zararlı etkileriyle kötü bir üne sahip olmalarının yanı sıra, yüzey soyulmasına da neden olabilirler. Bunun nedeni, buz çözücü maddelerin temas ettikleri betonun doygunluk derecesini artırılabilmeleri, katmanların donmaya karşı farklı tepkiler vermesini teşvik etmeleri, beton yüzey tabakalarını termal şoka maruz bırakmaları ve ozmotik basıncı artırılabilmeleridir.



Betonun doygunluk derecesi, su alma hızı ve buharlaşma hızıyla ilişkilidir. Belirli bir sıcaklık ve dış bağıl nem altında, tuzla kirlenmiş gözenek suyu içeren betonda doygunluk derecesi, buz çözücü tuzların etkisinden arınmış betona göre daha yüksektir. Bu nedenle, tipik kuruma koşullarında, gözenek yapısının daha büyük bir bölümü suyu tutar ve yüksek doygunluk derecesine sahip olur.

Buz çözücü maddelere düzenli olarak maruz kalan betonda, katmanların donma sıcaklıklarına verdiği farklı tepkiler, önceki çevrimlerden gelen eriyik suyun içeri girmesinden kaynaklanır. İyi drene edilen kaplama ve döşemelerde bile, buz çözücü madde içeren eriyik su yüzeye nüfuz eder ve yüzeyin hemen altındaki katmanlara ilerler. Emdirilmiş bu katmanlar, suya doygun katmanlara kıyasla daha düşük bir donma noktasına sahip olacaktır. Zamanla yağmur suyu, buz çözücü maddeyi üst yüzey katmanlarından yıkayarak uzaklaştırır; bu da sonraki don olaylarında bu katmanların altındaki katmanlara göre daha saf su içermesiyle sonuçlanabilir. Bu yüzey katmanlarının farklı tepkiler vermesi, genişleyen dış katmanın ayrılarak yüzey soyulmasına yol açmasına neden olabilir.

Termal şok, buz çözücü maddenin işlevini yerine getirirken kaçınılmaz bir sonuçtur. Kar veya buzun yüzeyde buz çözücü tuz ile eritilmesi enerji gerektirir. Bu enerji betondan çekilir ve bu da betonun yüzeye yakın katmanlarında ani bir sıcaklık düşüşüne neden olur. Durum geçici olsa da ortaya çıkan termal şok, betonda gerilmelere neden olabilir ve bu da çatlama ve yüzey soyulmasına yol açabilir.

Buz çözücü maddenin betondaki dağılımı homojen değildir çünkü betona dış yüzeyden giriş yapar. Bu düzensiz dağılım, donma çevrimleri sırasında daha da belirginleşir çünkü buz oluşumu, buz çözücü kimyasalların dışlanmasıyla birlikte olur ve bu da daha yüksek konsantrasyon farklarına neden olur. Bu durum ozmotik basıncı artırır. Buz kristali büyümesine ozmotik basıncın katkısı, buz çözücü tuz uygulamasının gözenek suyundaki çözeltik konsantrasyon farkını artırması durumunda açıkça daha da kötüleşir [4].

4. DONMA-ÇÖZÜLME HASAR TÜRLERİ

4.1. Yüzeyde Pullanma

Pullanma, beton yüzeyinin ince tabakalar hâlinde kalkması ve dökülmesi şeklinde ortaya çıkar. Özellikle tuzlu buz çözücülerin (ör. NaCl, CaCl₂) kullanıldığı ortamlar bu hasarı şiddetlendirir.

- Pullanma genellikle yüzeyin ilk 3–6 mm'lik kısmında başlar.
- Estetik açıdan rahatsız edicidir, ancak ilerlemesi durumunda yapının yüzey korumasını kaybettirir.
- En çok görüldüğü yerler; yaya yolları, otopark zeminleri, dış cephelerdir.



Şekil 4. Donma-çözülme nedeniyle beton yüzeyinde pullanma

Belirtileri:

- Yüzeyde ince tabakaların kalkması
- Gözle görülür düzensizlikler, pürüzler
- Renk solmaları ve kumlanma

Nedenleri:

- Yetersiz hava sürükleme
- Erken yaşta donma
- Yetersiz kür uygulaması
- Yüzey suyu ve tuz etkisi (buz çözücü maddeler)

4.2. İçsel Mikro Çatlaklar ve Dışa Doğru Parçalanma

Donma sonucu betonun iç bölgelerinde gözle görülemeyen ancak ilerleyici etkiye sahip mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar, tekrar eden döngülerde büyüyerek betonun:

- Basınç dayanımını azaltır,
- Geçirgenliğini artırır,
- Donatıya ulaşan klorür miktarını yükselterek korozyonu tetikler.

D-çatlaması (D-cracking) adı verilen özel bir hasar türü, betonun iç kısmında oluşur ve dışa doğru genişler. Genellikle agregat tipiyle ilişkilidir. Düşük kaliteli, donmaya karşı dirençsiz agregalar bu hasarı kolaylaştırır [7]. Bu tür çatlamalar, temeller, yollar ve kaldırımlar gibi zemin seviyesindeki betonlarda meydana gelmeye daha yatkındır. Hava sürükleyici katkı kullanımı, D-çatlamasını önlemeye yardımcı olur. Diğer bir önlem de donma-çözülme döngülerinde daha iyi performans gösteren agregaların seçilmesi veya betonu güçlendirmek için agregaların parçacık boyutunun küçültülmesidir. D-çatlaması, genellikle ilk olarak uzunlamasına ve enine derz kesişimlerinde ve daha sonra enine çatlaklarda bulunur. Şekil 5'te görüleceği üzere bozulma köşelerde başlar ve enine derzlerde genellikle en hızlı hasarı gösteren derzler boyunca ilerler.



Şekil 5. Zemin betonunda D-çatlama oluşumu

4.3. Yüzey Kabarması ve Ayrılımlar

Yüzeyde bulunan iri agrega parçalarının altında biriken suyun donması, lokal kabarmalara yol açar. Bu durumda agreganın çevresindeki harç ayrılarak agreganın yüzeye yakın bölgesi dışarı itilir.



Şekil 6. Beton yüzeyinde kabuk atma

Belirtileri:

- Noktasal kabarıklıklar
- Yüzeyde çukurcuk oluşumu
- Agrega tanelerinin yerinden oynaması

Nedenleri:

- Donmaya karşı zayıf agrega kullanımı (örn. su emmesi yüksek agregalar)
- Yüzeydeki su birikimi
- Yetersiz sıkıştırma veya uygun olmayan karışım

4.4. Donma Kaynaklı Donatı Korozyonu

Beton içinde tekrarlayan donma-çözülme döngüleri, mikro çatlakların ilerlemesine



ve bu çatlaklar üzerinden agresif iyonların (özellikle klorür) donatıya ulaşmasına neden olur. Bu durum donatı çeliğinde paslanmaya ve zamanla kesit kaybına yol açar [10]. Bu süreçte donma-çözülme sadece fiziksel değil, kimyasal dayanıklılığı da olumsuz etkiler.

Süreç aşağıdaki şekilde meydana gelir:

1. Mikro çatlaklar oluşur
2. Su ve iyonlar donatıya ulaşır
3. Korozyon başlar → hacimsel genleşme → çatlak genişlemesi → daha fazla korozyon

4.5. Yapısal Dayanım Kaybı

Donma-çözülme etkileri uzun vadede betonun mekanik özelliklerinde önemli azalmaya yol açar:

- Basınç dayanımında düşüş
- Elastisite modülünde azalma
- Yük taşıma kapasitesinde kayıplar

ASTM C666'ya göre 300 döngü sonrasında dayanım %25'e kadar düşebilir. TS EN 206'da XF sınıflandırması ile betonun bu etkilere karşı nasıl tasarlanması gerektiği tanımlanmıştır.

5. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILAR: TANIM VE ÖZELLİKLER

Hava sürükleyici katkıları, beton karışımına mikroskobik hava kabarcıkları kazandırmak amacıyla kullanılan kimyasal katkı maddeleridir. Bu katkıları, donma-çözülme döngülerine karşı betonun dayanıklılığını artırmakla kalmaz, aynı zamanda işlenebilirlik gibi bazı taze beton özelliklerine de katkı sağlar. Bu bölümde hava sürükleyici katkıların tanımı, işleyiş mekanizması, sınıflandırmaları ve beton üzerindeki etkileri bilimsel temelde açıklanmıştır.

5.1. Tanım ve Genel Özellikler

Hava sürükleyici katkıları, beton karışımı sırasında binlerce mikroskobik, düzgün dağılmış ve kararlı hava kabarcığının oluşmasını sağlar. Bu kabarcıklar suyun donması sırasında oluşan iç basıncı absorbe ederek betonun çatlamasını engeller.

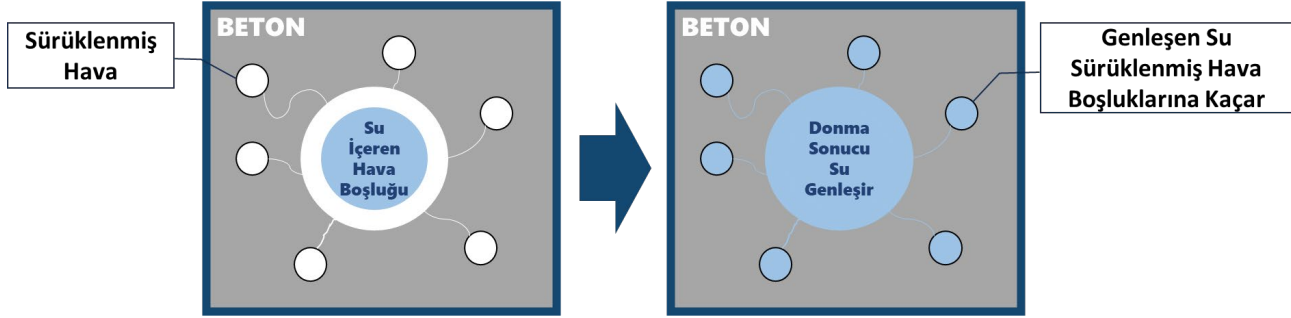
- **Kabarcık çapı:** Genellikle 10–500 mikron aralığında
- **Hacimsel hava içeriği:** %4–%8 arası (donma-çözülme şiddetine, agrega tipi ve maksimum tane büyüklüğüne göre değişir)
- **Kararlılık süresi:** Betonun priz süresi boyunca hava kabarcıklarının bozulmaması esastır

5.2. Çalışma Mekanizması

Hava sürükleyici katkıları, yüzey aktif maddeler içerir. Bu maddeler suyun yüzey

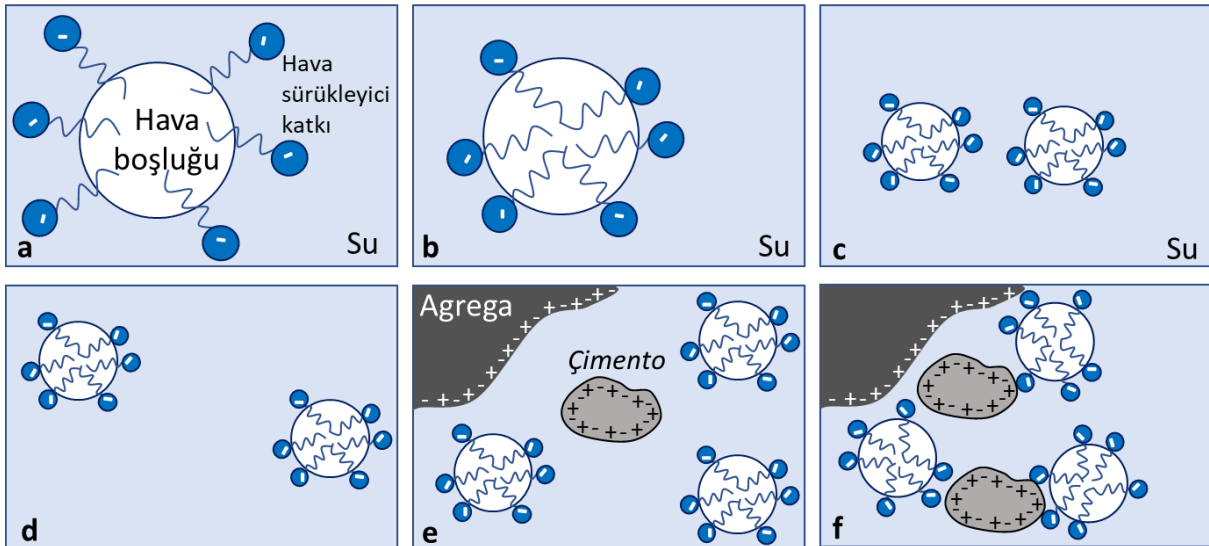


gerilimini azaltarak hava kabarcıklarının karışım içinde kalıcı olmasını sağlar. Mikserin çalkalama hareketi sırasında beton içerisine doğal olarak giren hava, bu katkıları sayesinde küçük ve stabil kabarcıklar hâline gelir. Bu kabarcıklar donan suyun genişlemesiyle oluşan basıncı yumuşatarak betonun hasar görmesini engeller.



Şekil 7. Sürüklenmiş hava boşlukları

Hava sürükleyici katkıları, hava-su arayüzünde etki eder. Hava sürükleyici katkıları tipik olarak hidrofilik olan ve suyu çeken negatif yüklü bir başlığa ve suyu iten hidrofobik bir kuyruğa sahiptir. Şekil 8’de gösterildiği gibi; hidrofobik uç, karıştırma işlemi sırasında oluşan kabarcıklar içindeki havaya çekilir. Hidrofilik olan kutup ucu, kendisini suya doğru yönlendirir (a). Hava sürükleyici katkı, hava kabarcıklarını tutmak ve stabilize etmek için yeterli dayanım ve esnekliğe sahip, sabun filmine benzer, sert, su itici bir film oluşturur. Hidrofobik film ayrıca suyu kabarcıklardan uzak tutar (b). Mekanik karıştırma hava kabarcıklarını dağıtır. Her kabarcığın etrafındaki yük, kabarcığın birleşmesini önleyen itici kuvvetlere yol açar (c&d). Yüzey yükü, hava kabarcığının çimento ve agrega parçacıklarının yüklü yüzeylerine yapışmasına neden olur. İnce agrega parçacıkları ayrıca karışımındaki kabarcıkları tutmaya yardımcı olmak için üç boyutlu bir ızgara görevi görür (e). Bu, karışımın kohezyonunu geliştirir ve hava kabarcıklarını daha da stabilize eder (f).



Şekil 8. Hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizması



5.3. Katkı Türleri

Hava sürükleyici katkıları genel olarak Tablo 2'de belirtilen kimyasal gruplara ayrılmaktadır. Ağaç türevi katkıları en yaygın kullanılan doğal kaynaklı katkılardır. Vinsol reçinesi, bu grup içinde en bilinenidir ve trisiklik asitler, fenolik bileşikler ve terpen karışımından oluşur. Hızlı kabarcık oluşumu sağlar ve diğer katkı maddeleriyle genellikle uyumludur. Ağaç reçinesi de benzer bileşime sahip olup, Vinsol reçinesine benzer performans gösterir. Tall yağı ise esas olarak yağ asitlerinden oluşur ve daha küçük çaplı, yavaş hava oluşumu sağlar. Ağaç türevi asit tuzları ise alkali ya da alkanolamin formlarında bulunur ve katkı sınıfları arasında yer alır.

Bitkisel yağ asitleri ise hindistan cevizi yağı gibi doğal yağlardan elde edilir. Genellikle alkanolamin tuzları şeklinde formüle edilirler. Bu katkıları, kaba kabarcık yapısı oluşturur ve karıştırma sırasında orta düzeyde hava kaybına neden olabilir.

Sentetik deterjanlar, endüstriyel olarak üretilen ve genellikle alkil-aril sülfonatlar ve sülfatlar (örneğin sodyum dodesil benzen sülfonat) içeren katkılardır. Bu tür katkıları hızlı kabarcık oluşumu sağlar, ancak iri hava boşlukları oluşturma eğilimindedir ve bazı süper akışkanlaştırıcılarla uyumsuzluk gösterebilirler.

Son olarak, günümüzde nadiren kullanılan katkıları arasında lignosülfonatların tuzları, oksitlenmiş petrol atıkları, protein bazlı malzemeler ve donmuş hayvan yağı gibi bileşenler yer alır. Bu katkıları tarihsel olarak kullanılmış olsa da modern beton teknolojisinde yerlerini daha etkili ve uyumlu katkı maddelerine bırakmışlardır.

Tablo 2. Hava sürükleyici katkı türleri [11]

Katkı Türü	Kimyasal Yapı	Özellikler
Ağaç türevi asit tuzları	Alkali veya alkanolamin tuzlar	-
Vinsol reçinesi	Trisiklik asit, fenolikler ve terpen karışımı	Hızlı kabarcık oluşumu. Başlangıçtaki karıştırma ile az hava kazancı. Uzun karıştırma süresi sonucu hava kaybı. Orta boyutlu kabarcık oluşumu. Diğer kimyasal katkılarıyla çoğunlukla uyumlu.
Ağaç reçinesi	Trisiklik asit – esas veya minör bileşen	Vinsol reçinesi ile benzer.
Tall yağı	Yağ asiti – esas bileşen, trisiklik asit – minör bileşen	Yavaş hava oluşumu. Karıştırma süresi arttıkça hava miktarı artabilir. Çok küçük çaplı kabarcık oluşumu. Diğer katkıların çoğunluğuyla uyumlu.
Bitkisel yağ asitleri	Hindistan cevizi yağı asiti, alkanolamin tuz	Ağaç reçinesine kıyasla daha yavaş ve daha kaba kabarcık oluşumu. Karıştırmada orta şiddette hava kaybı. Diğer kimyasal katkıların çoğunluğuyla uyumlu.
Sentetik deterjanlar	Alkil-aril sülfonatlar ve sülfatlar (sodyum dodesil benzen sülfonat)	Hızlı kabarcık oluşumu. Karıştırmada çok az hava kaybı. İri boşluk oluşumu. Yüksek oranda su azaltıcı katkıların bazılarıyla uyumsuz.



5.4. Hava Sürükleyici Katkılarının Etkin Kullanımı

- **Doğru Hava İçeriği Hedeflenmeli**
 - ✓ Tipik olarak hedef hava içeriği %4-%8'dir.(özellikle dış ortamda kullanılacak donatısız betonlar için)
 - ✓ Hava içeriği, maksimum agrega boyutuna ve kullanım amacına göre değişir.
- **Katkı Dozajı Kontrollü Ayarlanmalı**
 - ✓ Aşırı katkı → dayanım kaybı
 - ✓ Yetersiz katkı → yeterli hava boşluğu oluşmaz, koruma azalır
 - ✓ Katkı dozu, çimento cinsine, karışım oranlarına ve karıştırma süresine göre optimize edilmelidir.
- **Karıştırma Süresi ve Hızı Önemlidir**
 - ✓ Yeterli karıştırma süresi: hava kabarcıklarının düzgün dağılması için gereklidir.
 - ✓ Ancak çok uzun süre karıştırmak hava kabarcıklarının patlamasına neden olabilir.
- **Agrega ve Malzeme Seçimi Etkiler**
 - ✓ Özellikle ince malzemeler, katkının etkisini azaltabilir.
 - ✓ Uygun granülometri, hava kabarcıklarının düzgün dağılması açısından önemlidir.
- **Saha Kontrolleri Yapılmalı**
 - ✓ Zamana bağlı beton hava içeriğindeki değişimi de kontrol edilmelidir.
 - ✓ Taze betonun hava içeriği, basınçlı hava ölçüm cihazı (TS EN 12350-7, ASTM C231) ile kontrol edilmelidir.
 - ✓ Beton döküldükten sonra da yapı içindeki hava boşluk yapısı, mikroskopla incelenebilir (TS EN 480-11, ASTM C457).
- **Hedef: Uygun Hava Boşluk Yapısı**
 - ✓ Sadece hava miktarı değil, kabarcıkların boyutu ve dağılımı da önemlidir.
 - ✓ Uygun hava boşluk yapısı → küçük, eşit dağılmış, bağlantısız kabarcıklar

5.5. Beton Özelliklerine Etkisi

- **Donma-Çözülme Dayanımı:**
 - ✓ En büyük avantajı budur. Mikro kabarcıklar, buzun genleşme basıncını absorbe eder.
 - ✓ ASTM C666 testlerine göre hava içeriği yeterli olan betonlar 300 döngü sonunda dahi bütünlüğünü koruyabilir.
- **İşlenebilirlik:**
 - ✓ Hava kabarcıkları topaklanmayı azaltır, karışıma "kayganlık" kazandırır.
 - ✓ Daha az suyla daha kolay yerleşebilen bir karışım oluşur.
- **Basınç Dayanımı:**
 - ✓ Hava hacmi arttıkça dayanım genellikle %5-%6 civarında azalır.



Betonda Donma-Çözülme Etkisi ve Hava Sürükleyici Katkılar Rehberi

- ✓ Ancak %4-%6 aralığındaki hava miktarı ile bu kayıp minimum düzeydedir ve dayanıklılık artışı ile telafi edilir.
- ✓ ACI 212-3R'ye göre, hava içeriğindeki %1'lik artış, basınç dayanımında yaklaşık %5 azalmaya neden olabilir.
- **Ayrışma Direnci ve Homojenlik:**
 - ✓ Karışımda ayrışmayı önler, agrega ve çimentonun dengeli dağılmasını sağlar.

5.5. Uygulama Önerileri ve Kontrol

- Hedef hava içeriği, beton sınıfına, agreganın tane dağılımına ve uygulama koşullarına göre belirlenmelidir.
- TS EN 934-2 standardına göre hava sürükleyici katkıların performansları belgelendirilmelidir.
- Beton yerinde döküldükten sonra hava içeriği TS EN 12350-7 veya ASTM C231 Standartlarına göre kontrol edilmelidir.

6. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİNE ETKİSİ

Donma-çözülme dayanımı söz konusu olduğunda hava sürükleyici katkılar (AEA), betonun uzun ömürlü olmasında en kritik katkı türlerinden biridir. Mikroskobik hava kabarcıkları, donan suyun oluşturduğu iç gerilmeleri emerek beton iç yapısının zarar görmesini önler. Bu bölümde, bu katkıların donma-çözölmeye karşı nasıl koruma sağladığı ve etkili olabilmesi için hangi koşulların sağlanması gerektiği açıklanmaktadır.

6.1. Hava Kabarcıklarının Koruyucu Mekanizması

Donma sırasında serbest suyun hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Bu genleşme, kapalı bir sistem olan beton içinde önemli iç basınçlara neden olur. Eğer beton içinde bu basınca karşı koyacak boşluklar yoksa mikro çatlaklar gelişmeye başlar.

Hava kabarcıklarının işlevi:

- Basıcı emen yastıklar gibi çalışır.
- Suyun donması sonucu oluşan basıncı emerek çevre yapıyı çatlamaktan korur.
- Bu işlev, kabarcıkların çapı ve birbirine olan mesafesi ile doğrudan ilişkilidir.

6.2. Kritik Boşluk Aralığı

Betonda donma-çözölmeye karşı etkili olabilmesi için hava kabarcıklarının yalnızca miktarı değil, dağılımı da çok önemlidir. Kritik boşluk mesafesi ≈ 200 mikron olmalıdır. Bu değerin üzerindeki boşluklar etkisiz kalır [12].

- Kritik Boşluk Aralığı ($\bar{L}$): Hava kabarcıkları arasındaki ortalama mesafe
- ASTM C457 standardı ile incelenir.
- $\bar{L} \leq 200 \mu m \rightarrow$ Yeterli koruma sağlar.



Tablo 3. Hava içeriği ve donma dayanımı arasındaki ilişki [6]

Hava İçeriği (%)	Kritik Boşluk Aralığı (µm)	Donma-Çözülmeye Dayanım	Not
2	>300	Yetersiz	Mikro çatlaklar hızla gelişir
4	~200	Orta düzeyde	Marjinal koruma sağlar
5-6	<200	Yüksek	Tavsiye edilen seviye (XF sınıfları)

6.3. Donma-Çözülme Dayanım Testleri

- **ASTM C666**

- ✓ Beton numuneleri 300 döngü boyunca donma ve çözölmeye maruz bırakılır.
- ✓ Kütle kaybı ve dinamik elastisite modülündeki azalma izlenir.
- ✓ Dayanım kaybı %15'in altındaysa beton dayanıklı kabul edilir.

- **ASTM C672**

- ✓ Pullanma (scaling) testidir. Özellikle buz çözöcö kimyasallar ile yapılan testlerde kullanılır.

- **TSE CEN/TR 15177**

- ✓ Beton numuneleri belirli sıcaklık aralıklarında (örneğin -20 °C ile +20 °C) çok sayıda donma-çözölme döngüsüne tabi tutulur.
- ✓ Test öncesi ve sonrası, numunenin dinamik elastisite modülü ölçölerek iç yapısal hasar tespit edilir.

- **TS EN 12390-9**

- ✓ Betonun donma-çözölme döngülerine ve özellikle buz çözöcö tuzların (örneğin NaCl) etkisiyle oluşın yüzey hasarlarını (pul pul dökölme, yani scaling) değeriendirmek için kullanılır.

6.4. İklim ve Uygulama Koşullarına Göre Uyum

Soğuk iklimlerde betona yönelik en büyük tehdidi temsil eden maruz kalma koşulları, birden fazla parametrenin bir araya geldiğı durumlardır. Bunlar, donma-çözölme çevrimlerinin sıklığını, ulaşın mutlak en düşük sıcaklığı, donma süresini ve soğuma hızını içerir. Sıcaklık ne kadar düşük ve donma süresi ne kadar uzun olursa, potansiyel olarak zararlı koşullara maruz kalan gözenek hacmi üzerindeki etkiler de o kadar büyük olur. Beton düşük bir ısı iletim oranına sahiptir, bu nedenle buz cephesinin önemli ölçölde ilerlemesi için çok düşük sıcaklıklar, uzun süreli donma ya da her ikisinin birleşimi gereklidir. Soğuma hızı da bir faktör olabilir. Soğuma hızı ne kadar yavaş olursa, genişmeden ve kapilerlerden suyun dışarı atılmasından kaynaklanan basınçların dağılması için o kadar fazla zaman tanınır. Bu, betonun dayanım kapasitesini aşın çekme gerilmelerinin kümölatif olarak oluşmasını önleyebilir.

Donma-çözölme çevrimlerinin kümölatif etkisi, çevrim sıklığını düşük sıcaklıkta geçirilen süreden daha önemli hale getirir.



Betonda Donma-Çözülme Etkisi ve Hava Sürükleyici Katkılar Rehberi

- Soğuk iklimlerde (özellikle XF3 ve XF4 sınıfı çevre koşullarında) AEA kullanımı zorunludur.
- Açık alanlarda ve yoğun trafik alanlarında tuzla etkileşim riski yüksek olduğundan hava içeriği kritik hâle gelir.

TS EN 206'ya göre, donma-çözölmeye maruz betonlar için minimum hava içeriği %4, maksimum su/bağlayıcı oranı 0,50 olmalıdır.

6.5. Hava Sürükleyici Katkıların Etkinliğini Azaltan Faktörler

- **Aşırı karıştırma süresi:** Hava kabarcıklarının dağılmasına neden olur.
- **Yüksek sıcaklık:** Havanın beton karışımı içindeki çözünürlüğünü artırarak baloncukların yok olmasına yol açabilir.
- **Uygun olmayan agrega tipi:** Kaba veya emici agregalar kabarcıkları tahrip edebilir.
- **Süper akışkanlaştırıcıların etkisi:** Özellikle polikarboksilat bazlı katkılar hava yapısını bozabilir; birlikte kullanıldığında dengelemeye ihtiyaç vardır.
- **Betonun pompalanması:** Beton pompa ile iletilirken, betonun içindeki sürüklenmiş hava miktarı, pompa sistemindeki yüksek basınca ve boru içindeki sürtünmeye maruz kalarak azalabilir.

7. DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİ AÇISINDAN UYGULAMA ESASLARI

Laboratuvarda hazırlanan ideal bir betonun sahada da aynı performansı göstermesi, ancak doğru uygulama esaslarına uyulmasıyla mümkündür. Donma-çözölme dayanımı, yalnızca hava sürükleyici katkının varlığıyla değil, bu katkının etkinliğinin korunmasıyla da ilgilidir. Bu bölümde sahada dikkat edilmesi gereken esaslar, kontrol yöntemleri ve hata kaynakları ele alınmıştır.

7.1. Beton Karışım Tasarımı Aşamasında Dikkat Edilecekler

- Çevresel maruziyet sınıfı (TS EN 206'ya göre XF1–XF4) belirlenmelidir.
- Hedef hava içeriği (%4–%8) aralığında olmalıdır.
- Su/çimento oranı $\leq 0,50$ olacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Hava sürükleyici katkı ve varsa diğer kimyasal katkıların uyumluluk testine tabi tutulmalıdır.
- Karışımındaki agregalar, donmaya dayanıklı ve su emmesi düşük olmalıdır. Ayrıca temiz ve organik madde içermeyen türde olması sağlanmalıdır.

7.2. Karıştırma ve Yerleştirme Aşamasında Yapılacaklar

- Karıştırma süresi kısa tutulmalı, aşırı karıştırma baloncukları yok edebilir
- Yerleştirme sırasında aşırı vibrasyon yapılmamalı
- Hava içeriğinin korunması için şantiyede kullanılan vibratörlerin çapı ve frekansı uygun seçilmeli ve vibratör beton yüzeyine dik yerleştirilmeli, çapraz hareketlerden kaçınılmalıdır.



7.3. Soğuk Hava Koşullarında Uygulama İpuçları

- Beton dökümünden önce kalıplar ve donatılar buz ve kardan arındırılmalı
- Beton sıcaklığı $\geq 5^{\circ}\text{C}$ olmalı (TS EN 13670 – Betonarme Yapım Kuralları)
- Döküm sonrası kür için:
 - ✓ Termal battaniyeler, sıcaklık kontrollü kür sistemleri kullanılmalı
 - ✓ Donma riski taşıyan ilk 48 saat özellikle kritik

Don olayları, priz aşamasında gerçekleşirse betonun içyapısı tamamen bozulabilir!

7.4. Sık Yapılan Hatalar

- Karışım sıcaklığının yüksek olması
- Hava sürükleyici katkı ile uyumsuz diğer katkı maddelerinin birlikte kullanımı
- Karışım suyuna hava sürükleyici katkının eklenmemesi
- Teslim süresinin uzun olması
- Aşırı vibrasyon (sıkıştırma) uygulaması
- Donmuş zemin/kalıp üzerine döküm

8. HAVA İÇERİĞİ KONTROL YÖNTEMLERİ VE STANDARTLAR

Hava sürükleyici katkıların betonda etkili olabilmesi için yalnızca karışıma eklenmeleri değil, sahada ve laboratuvarında kontrol edilmeleri de şarttır. Bu nedenle hava içeriğinin doğru ölçülmesi ve yorumlanması, donma-çözülme direnci açısından kritik bir süreçtir. Bu bölümde, taze ve sertleşmiş betonda kullanılan başlıca test yöntemleri, ulusal/uluslararası standartlar ve dikkat edilmesi gereken noktalar açıklanmaktadır.

8.1. Taze Betonda Hava İçeriği Ölçüm Yöntemleri

- **Basınç Yöntemi (ASTM C231 / TS EN 12350-7)**
 - ✓ Genellikle kum oranı yüksek olmayan betonlar için uygundur.
 - ✓ Prensipte: Beton içindeki hava boşlukları, uygulanan basınca göre ölçülür.
 - ✓ Avantaj: Kullanımı pratik ve sahada hızlı sonuç verir.
- **Volümetrik Yöntem (ASTM C173 / TS EN 12350-7)**
 - ✓ Hafif agrega içeren betonlarda tercih edilir.
 - ✓ Su ve alkol kullanılarak karışımındaki hava hacmi hesaplanır.
 - ✓ Daha doğru sonuç verir ancak uygulaması daha zahmetlidir.

8.2. Sertleşmiş Betonda Hava Boşluklarının İncelenmesi

Donma-çözülme direnci için en önemli parametrelerden biri olan hava kabarcıklarının dağılımı, yalnızca sertleşmiş beton üzerinde yapılan detaylı analizlerle belirlenebilir.



- **ASTM C457 / TS EN 480-11: Mikroskopik Analiz**
 - ✓ Hazırlanan ince kesit üzerinde şunlar ölçülür:
 - Toplam hava içeriği (%)
 - Kabarcık çapı (μm)
 - Boşluk aralığı (L)
 - ✓ Mikroskop altında 1000'den fazla kabarcık incelenir.

8.3. Diğer Yardımcı Testler ve Gözlemler

- **Ultrases dalga hızı ölçümü:** Mikroyapıdaki bozulmayı dolaylı olarak gösterebilir.
- **Termal analizler:** Donma etkisiyle oluşan boşlukları tespit eder.
- **Görüntü işleme teknikleri:** Dijital mikroskoplarla kabarcık dağılımı otomatik olarak analiz edilebilir.

8.4. TS EN 206 ve TS 13515'e Göre Kabul Kriterleri

Donma ve çözülme etkisine karşı direnç için hava sürükleyici katkı veya hava sürükleyici katkıya ilave olarak betonda bir veya daha fazla sayıda kimyasal katkı kullanılması durumunda katkının/katkı kombinasyonunun sertleşmiş betondaki hava boşluk özelliklerine etkisi, TS EN 480-11'e göre deney yapılarak değerlendirilmelidir. TS EN 480-1'de belirtildiği şekilde hazırlanan numuneler üzerinde TS EN 480-11'e göre yapılan deney sonucunda betondaki hava içeriği en az %4 ve hava boşluk faktörü en fazla 0,20 mm olmalıdır. Betonun gerçek ortam şartlarında maruz kalacağı donma-çözülme etkilerine dayanıklılığının tayini amacıyla ilgili tarafların karşılıklı mutabık kalması halinde TSE CEN/TS 12390-9 teknik şartnamesi ve/veya TSE CEN/TR 15177 teknik raporundan uygun olanına göre deneyler yapılarak donma ve çözülme etkilerine karşı dayanıklılığının ispatlanması gereklidir.

Tablo 4. TS EN 206 ve TS 13515'e göre buz çözücü maddenin de bulunduğu veya bulunmadığı donma/çözülme etkisi ve gereklilikleri

Maruziyet Sınıfı	Açıklama	Hava İçeriği (%)	Su/Çimento Oranı (maks)	Asgari Beton Sınıfı
XF1	Buz çözücü madde içermeyen suyla orta derecede doymun	-	0,55	C30/37
XF2	Buz çözücü madde içeren suyla orta derecede doymun	min. %4	0,55	C25/30
XF3	Buz çözücü madde içermeyen suyla yüksek derecede doymun	min. %4	0,50	C30/37
XF4	Buz çözücü madde içeren su veya deniz suyu ile yüksek derecede doymun	min. %4	0,45	C35/45



9. KATKI SEÇİMİ VE UYGUNLUK KRİTERLERİ

Hava sürükleyici katkılar, donma-çözülme direncini artıran önemli bileşenlerdir. Ancak doğru katkının seçilmesi, betonun uzun süreli performansını doğrudan etkiler. Bu bölümde, katkıların çeşitleri, seçim kriterleri ve uygunluk testleri hakkında kapsamlı bilgiler verilecektir.

9.1. Hava Sürükleyici Katkıların Türleri

Hava sürükleyici katkılar, genellikle iki ana kategoride sınıflandırılır: doğal (yüzey aktif) katkılar ve sentetik katkılar.

- **Doğal Katkılar (Yüzey Aktif Ajanlar)**
 - ✓ **Prensip:** Su molekülleri ile etkileşime girerek havayı beton karışımına entegre eder.
 - ✓ **Özellikler:**
 - Piyasada en yaygın olan katkı türüdür.
 - Genellikle organik maddeler içerirler.
 - Hava içeriği stabilizasyonu sağlar.
- **Sentetik Katkılar**
 - ✓ **Prensip:** Polimer esaslı katkılar kullanarak, beton karışımına entegre edilen havayı daha etkili bir şekilde tutar.
 - ✓ **Özellikler:**
 - Genellikle daha düşük dozajlarla etkili olurlar.
 - Hava kabarcıkları daha küçük ve homojen olur.
- **Kombine Katkılar (Doğal + Sentetik)**
 - ✓ **Prensip:** Hem doğal hem de sentetik katkıların birleşimi kullanılarak daha stabil hava içeriği sağlanır.
 - ✓ **Özellikler:**
 - Hava içeriğini daha geniş bir sıcaklık aralığında stabil tutabilir.
 - Çeşitli çevresel etkilere karşı dayanıklılığı artırır.

9.2. Hava Sürükleyici Katkı Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Kriterler

9.2.1. Çevresel Koşullar

Betonun döküleceği yerin çevresel koşulları, katkı seçiminde kritik rol oynar:

- Donma-çözülme döngülerine maruz kalan bölgeler için hava içeriği %4-%8 arası olmalıdır. En uygun hava içeriği, agrega tane büyüklüğüne ve donma-çözülme şiddetine göre hesaplanmalıdır.
- Sıcak iklimlerde, katkı miktarı minimize edilebilir ancak hava kabarcıklarının stabilitesi korunmalıdır.



9.2.2. Betonun Sınıfı ve Amaçlanan Dayanım

- Düşük dayanım gereksinimi olan betonlar (C25/30) için daha az katkı kullanılabilir.
- Yüksek dayanım sınıfı (C40/50 ve üstü) betonlar için daha güçlü hava sürükleyici katkı gerekebilir.

9.2.3. Katkı Tipi ve Kimyasal Etkileşimler

- Katkılar arasında kimyasal uyumsuzluklar betonun mekanik özelliklerine zarar verebilir.
- Süper akışkan katkı ile hava sürükleyici katkı arasında dikkatli bir denge kurulmalıdır.

9.2.4. Saha Koşulları ve Uygulama Teknikleri

- Vibrasyon ve karıştırma süresi betonun hava içeriğini doğrudan etkiler, katkı seçimi bu faktörlere göre yapılmalıdır.
- Sahada sıcaklık ve nem koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda daha fazla hava sürükleyici katkı gerekebilir.

9.3. Katkılarının Etkinliğini Test Etme

9.3.1. Laboratuvar Testleri

Beton karışımına eklenen katkıların etkinliği, laboratuvar ortamında test edilmelidir. En yaygın testler şunlardır:

- **Hava içeriği ölçümü (TS EN 12350-7 / ASTM C231):** Hedeflenen hava içeriği oranı doğrultusunda katkıların performansı ölçülür.
- **Mikroskopik analiz (TS EN 480-11 / ASTM C457):** Hava kabarcıklarının yapısı ve dağılımı değerlendirilir.

9.3.2. Saha Testleri

- **Zaman içinde performans takibi:** Katkıların sahada uzun dönemli performansı, özellikle donma-çözülme etkilerine karşı izlenmelidir.
- **Donma-çözülme döngüsüne karşı dayanım testi (ASTM C666):** Beton, sırasıyla donma ve çözülme işlemlerine tabi tutulur ve dayanım kaybı gözlemlenir.

9.4. Katkı Seçimi ve İnovasyon

Teknolojik gelişmeler, yeni tür hava sürükleyici katkıların piyasaya girmesine olanak sağlamaktadır. Nanoteknoloji, mikro-polimerler ve biyolojik katkı gibi yenilikçi çözümler, betonun performansını artırmak için kullanılan katkı arasında yer alabilir.

- **Nanoteknolojik katkı:** Hava kabarcıklarının daha stabil hale gelmesini sağlar.
- **Biyolojik katkı:** Betonun uzun ömürlü olmasını sağlarken, çevresel sürdürülebilirlik sağlar.



10. GENEL DEĞERLENDİRME

Donma-çözülme etkisi, özellikle soğuk iklim koşullarında betonun ömrünü doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Betonun bu çevresel zorluklara karşı dayanıklı olabilmesi için doğru malzeme seçimi, uygun karışım oranı ve etkin hava sürükleyici katkıların kullanımı gereklidir. Bu kılavuzda sunulan bilgiler, sektördeki profesyonellerin beton karışımlarını optimize etmesine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

10.1. Donma-Çözülme Etkilerine Karşı Betonun Performansını Artırma Yöntemleri

- **Hava Sürükleyici Katkıların Seçimi ve Kullanımı:** Katkıların doğru seçimi, donma-çözülme direncini artırmak için en kritik adımlardan biridir. Katkı tipi, beton sınıfı, çevresel koşullar ve uygulama tekniği göz önünde bulundurularak doğru katkı kullanılmalıdır.
- **Yüksek Performanslı Beton Karışımları:** Düşük su/çimento oranı ve uygun agrega seçimi ile betonun genel dayanımı artırılmalıdır. Donma-çözülme döngülerine karşı direnci, uygun hava içeriği seviyeleri ile desteklenmelidir.
- **Uygulama Aşamasında Dikkat Edilmesi Gerekenler:** Karışımın homojenliği sağlanmalı, vibrasyon süresi ve karıştırma tekniklerine özen gösterilmelidir. Ayrıca, betonun kür edilme süreci, hava içeriğinin stabil kalmasına yardımcı olur.

10.2. Uzun Vadeli Performans İzleme

- **Saha İzleme:** Betonun donma-çözülme döngülerine karşı gösterdiği performans, uzun süreli izlemelerle takip edilmelidir. Düzenli saha testleri ve hava içeriği ölçümleri, kullanılan katkıların etkinliğini doğrular.
- **Yapısal Değerlendirme:** Özellikle kış koşullarında, betonun yüzeyinde oluşabilecek herhangi bir bozulma, kırılma veya çatlama erken dönemde tespit edilmelidir. Yapıdaki donma-çözülme etkilerini gözlemlerken, mekanik testler (basınç dayanımı, elastik modül) ve görsel incelemeler yapılmalıdır.

10.3. Çevresel ve Ekonomik Etkiler

- **Sürdürülebilirlik:** Hava sürükleyici katkıların kullanımı, yalnızca dayanımı artırmakla kalmaz, aynı zamanda betonun çevresel sürdürülebilirliğini de destekler. Düşük karbonlu beton karışımları, çevreye zarar vermeden yüksek performans sağlar.
- **Maliyet Etkinliği:** Başlangıçta hava sürükleyici katkıların eklemek, betonun uzun vadeli dayanımını artırarak, bakım ve onarım masraflarını azaltabilir. Bu, özellikle kış koşullarının zorlu olduğu bölgelerde daha da belirgindir.



KAYNAKLAR

1. Powers, T.C., & Helmuth, R.A. (1953). Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing. Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 32, pp. 285–297.
2. Fagerlund, G. (1977). The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Matériaux et Construction, 10(58), 217–229.
3. Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C. (2003) Design and Control of Concrete Mixtures. 14th Edition, Portland Cement Association, Skokie.
4. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
5. ACI 201.2R - 16 Guide To Durable Concrete, American Concrete Association, 2016.
6. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
7. Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
8. Thomas, M. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. Portland Cement Association.
9. TS 1248: Betonun Hazırlanması, Dökümü ve Bakımı Kuralları - Anormal Hava Şartlarında
10. Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
11. Whiting, D.A., ve Nagi, M.A. (1998). Manual on control of air content in concrete, Portland Cement Association (PCA EB116), Skokie, Illinois, USA.
12. Powers, T. C. (1949). *The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete*, PCA Bulletin.

KÜB ÜYELERİ

Akkim

chryso
SAINT-GOBAIN

EGECRETE
A licensee of EUCLID CHEMICAL

FOSROC
BY SCC

LYKSOR
Innovation & Trust

MAPEI
YAPITICILAR-INDUSTRIEL-DEKAT KIRKALLARI

onbironendüstriyel

Polisan
YAPIKIM

Sika®
BUILDING TRUST

YAPICHEM

kub.org.tr