



THBB AKADEMİ

TEKNİK BÜLTEN

23

KALSİYUM OKSİKLORÜR:

OLUŞUMU, HASAR MEKANİZMALARI VE ÖNLEME YAKLAŞIMLARI

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.
Ekim 2026

1. GİRİŞ VE KAPSAM

Soğuk iklimlerdeki beton kaplama ve yapılarda gözlenen bozulma uzun süre ağırlıklı donma-çözülme döngüleriyle açıklanmıştır. Araştırmalar, özellikle yol ve köprü kaplamalarının derzlerinde yoğunlaşan hasarda buz çözücü tuzlarla çimento hamurunun kimyasal etkileşiminin de rol oynayabildiğini göstermiştir [1,2]. Kalsiyum oksiklorür (CAOXY) oluşumu 1960'lardan beri bilinen, son yıllarda daha ayrıntılı incelenen mekanizmalardan biridir; donma olmadan da gerçekleşebilir. Şekil 1, iki mekanizmayı karşılaştırmaktadır.

Kriter	Klasik Donma-Çözülme Geleneksel mekanizma	CAOXY Oluşumu 1960'lardan beri bilinen mekanizma
Tetikleyici etken	Su + düşük sıcaklık (donma gerekli)	CaCl ₂ /MgCl ₂ + nem (donma gerekmez!)
Sıcaklık koşulu	0°C altı (donma)	Donma olmadan da oluşabilir Sıcaklık, nem ve tuz derişimine bağlıdır
Hasar tipi ve yeri	Yüzey pullanması Yaygın, yüzey geneli	Dökülme + kopma Derz bölgesinde lokalize!
Önleme yöntemi	Hava sürüklenme Düşük su/bağlayıcı	Reaktif mineral katkıları Uygun hava boşluk sistemi + yüzey koruma
Test yöntemi	ASTM C666 Donma-çözülme döngüleri	AASHTO T 365 (LT-DSC) TGA · Hacimsel Özdirenç
Standartta durumu	TS 13515 / ACI 318 Kapsamlı biçimde yer alır	TS 13515'te ayrı CAOXY sınıfı yok XD/XS/XF gerekleri ayrıca uygulanır
Maruziyet ve olası mekanizmalar birlikte değerlendirilir Koruma için bağlayıcı, hava boşluğu ve drenaj önemlidir		

Şekil 1. Klasik donma-çözülme ve CAOXY mekanizmalarının karşılaştırılması [2,3]

Bu bülten, CAOXY'nin oluşum kimyasından hasar mekanizmalarına, test yöntemlerinden saha uygulamalarına kadar geniş bir perspektif sunmakta ve aşağıdaki başlıkları kapsamaktadır:

- Buz çözücü tuzların beton ile kimyasal etkileşimleri
- Kalsiyum oksiklorür oluşum kimyası ve faz diyagramları
- Hasar mekanizmaları
- Test yöntemleri
- Önleme stratejileri
- Karışım tasarımı ve literatürdeki tarama göstergeleri

2. BUZ ÇÖZÜCÜ TUZLAR VE BETON

2.1. Buz Çözücü ve Buzlanma Önleyici Tuzlar

Soğuk bölgelerde kaplama yüzeylerinde donma koşullarını ortadan kaldırmak veya önlemek amacıyla buz çözücü ve buzlanma önleyici tuzlar yaygın biçimde kullanılmaktadır [2,4]. Erişilebilirlik ve maliyet avantajları nedeniyle en yaygın tercih edilen tuzlar klorür bazlı olanlardır. Bunlar arasında sodyum klorür (NaCl), kalsiyum klorür (CaCl_2), magnezyum klorür (MgCl_2) ve bunların karışımları yer almaktadır [5]. Tablo 1’de farklı tuz türlerinin özellikleri belirtilmektedir.

Tablo 1. Yaygın buz çözücü tuzların beton üzerindeki etkileri (nitel karşılaştırma) [1,2]

Tuz	CAOXY Riski	Donatı Korozyonu	Not
NaCl	Düşük	Yüksek	En yaygın kullanılan tuz
CaCl_2	Yüksek	Yüksek	CAOXY oluşumunda kritik rol
MgCl_2	Yüksek	Orta-Yüksek	CAOXY ve Mg kaynaklı bozunma riski
Karışım Tuzlar	Orta-Yüksek	Değişken	Performans, karışıma bağlıdır.

2.2. Beton Kaplamalarda Derz Hasarları

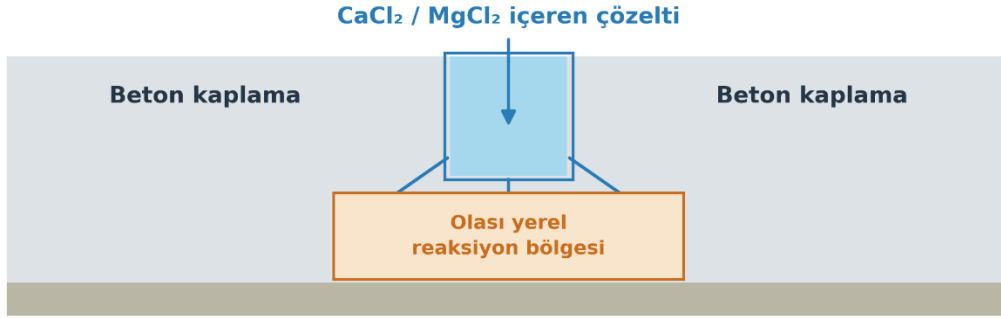
Soğuk bölgelerde beton kaplamalarda yaygın olarak incelenen üç temel bozulma mekanizması şunlardır: donma-çözülme, donatı korozyonu ve tuz kaynaklı yüzey pullanması [2,6]. Kalsiyum oksiklorür oluşumu da özellikle $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ çözeltilisinin biriktiği derzlerde ek bir kimyasal hasar mekanizması olabilir. Bu bölgelerde suyun tutulması, yüksek doygunluk ve tuz çözeltilisinin betona girişi birlikte değerlendirilmelidir [1,3].

Kaplama yüzeyinde CaCl_2 veya MgCl_2 içeren buz çözücüler kullanıldığında çözelti, yüzey akışıyla derzlerde ve mikroçatlaklarda toplanabilir. Buharlaşıma ve yeniden ıslanma çevrimleri yerel tuz derişimini artırabilir [1,3]. Literatürde verilen yaklaşık %86 kritik doygunluk değeri donma-çözülme hasarıyla ilişkilidir; CAOXY oluşumu ya da hasarı için evrensel bir eşik olarak kullanılmamalıdır. CAOXY riski ayrıca tuzun türü ve derişimi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ erişilebilirliği, sıcaklık ve nem koşullarına bağlıdır [1,16].

Derz bölgesinin hasar açısından özellikle kritik olmasının birkaç yapısal nedeni vardır. Birincisi, testere kesimiyle oluşturulan derz yüzeylerinde betonun mikroyapısı bozulmakta ve geçirgenlik artmaktadır. Bu durum tuz çözeltilisinin derz tabanına ve çevresine hızla ulaşmasını kolaylaştırmaktadır. İkincisi, derz içindeki boşluk su ve tuz birikmesi için bir rezervuar işlevi görmektedir. Drenaj yetersizliği veya derz dolgularının hasar görmüş olması bu birikimi daha da artırmaktadır. Üçüncüsü, derz tabanında kesim yüzeyine yakın bölgedeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri artan klorür derişimine doğrudan maruz kalmakta ve uygun koşullarda CAOXY oluşumu bu bölgede yoğunlaşabilmektedir [1,3]. Şekil 2’de belirtildiği gibi bu mekanizma, hasarın neden yüzey genelinde değil belirli noktalar etrafında — özellikle derz altında, testere kesim izinin tabanında — yoğunlaştığını açıklamaktadır.

Derz bölgesinde tuz çözeltisinin birikmesi

Şematik kesit · Ölçekli değildir



Riski birlikte belirleyen koşullar

Tuzun türü ve derişimi · $\text{Ca}(\text{OH})_2$ erişilebilirliği
Sıcaklık · Nem ve doygunluk · Drenaj

CAOXY için evrensel %86 doygunluk veya %20 CaCl_2 eşiğı yoktur.

Şekil 2. Derz bölgesinde tuz çözeltisi birikimi ve olası reaksiyon bölgesi ([1,3,16] temelinde hazırlanmış şematik gösterim)

Derz çevresindeki koyulaşma, kabarma, pullanma ve kenar kopmaları su ve tuz birikimine işaret edebilir; yalnızca bu belirtilere bakılarak CAOXY teşhisi konulamaz. İlerleyen olgularda katman ayrışması ve yerel hasar görülebilir. Donma-çözülme, tuz pullanması, donatı korozyonu ve diğer etkiler de benzer görünüm yaratabileceğinden maruziyet öyküsü, derz drenajı ve gerektiğinde faz analizi birlikte değerlendirilmelidir [1–3].

3. KALSİYUM OKSİKLORÜR OLUŞUM KİMYASI

3.1. Tarihsel Perspektif

Yüksek derişimli CaCl_2 çözeltilerinin çimentolu malzemelerde hasara yol açabildiğı 1960'lardan beri bilinmektedir [7]. Erken çalışmalar, incelenen koşullarda MgCl_2 ve CaCl_2 maruziyetindeki hasarın NaCl maruziyetinden daha şiddetli olabildiğini göstermiştir [8]. Bu bulgu NaCl 'nin diğer dayanıklılık sorunları bakımından zararsız olduğu anlamına gelmez [1,2].

3.2. Temel Kimyasal Reaksiyon

Kalsiyum oksiklorür, çimento hamurundaki kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nem ve CaCl_2 varlığında reaksiyonu ile oluşur. MgCl_2 maruziyetinde ise $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile etkileşim sonucu CaCl_2 oluşması CAOXY oluşumuna yol açabilir [1,11]. Yaygın bildirilen 3:1:12 bileşimi Şekil 3'te gösterilmiştir [5,9].

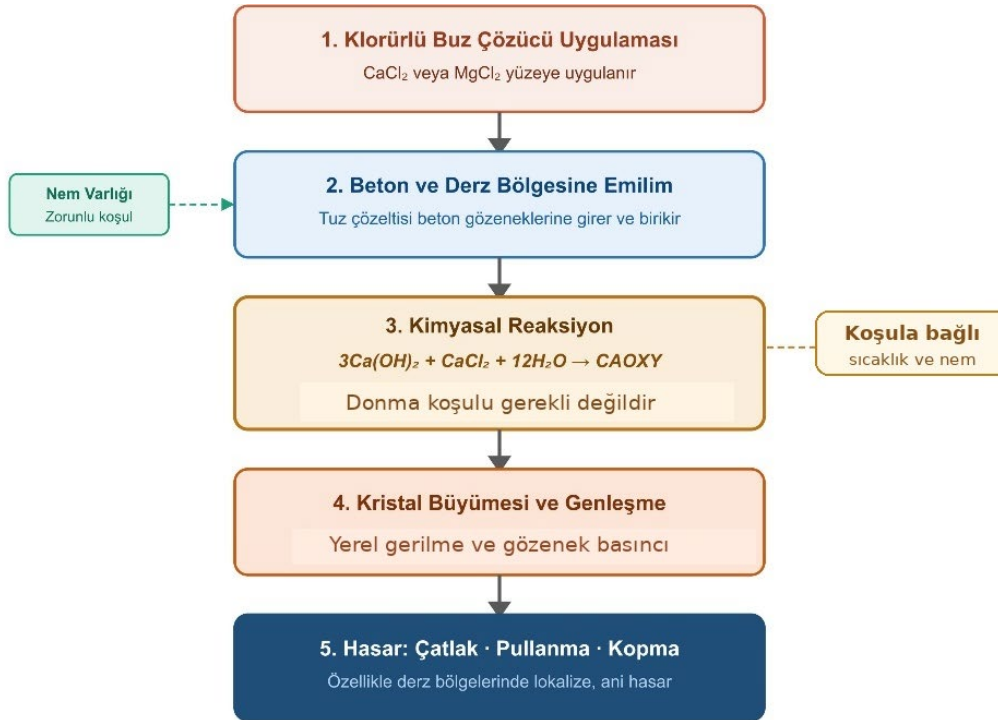
Kalsiyum oksiklorür oluşum reaksiyonu



Şekil 3. CAOXY oluşumunun stokiyometrik gösterimi ([1,9,16] temelinde hazırlanmıştır)

Bu stokiyometri en yaygın raporlanan formdur, ancak $3\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ gibi başka formlar da bildirilmiştir [1,9]. CaCl_2 ve MgCl_2 'ye maruz kalma, Friedel tuzu ve Kuzel tuzu oluşumuna da yol açmaktadır [10,11]. MgCl_2 sistemlerinde ise brisit (Mg(OH)_2) oluşabilmektedir.

Şekil 4'te gösterildiği üzere, CAOXY kaynaklı beton hasarı birbiriyle bağlantılı beş aşamalı bir süreç olarak gelişmektedir.



Şekil 4. CAOXY oluşumu ve hasar gelişiminin şematik özeti [1,16]

3.3. Oksiklorür Fazlarının Kararsızlığı

Kalsiyum oksiklorür fazlarının oluşumu ve kararlılığı sıcaklığa, bağıl neme ve tuz derişimine bağlıdır; fazlar numunenin hazırlanması sırasında da dönüşebilir [1,9,12]. LT-DSC ısıtma çevriminde 30–40 °C civarında gözlenen olay, kullanılan koşullardaki faz dönüşümünü gösterir; bütün ortamlar için sabit bir oluşum üst sınırı olarak yorumlanmamalıdır. Donma, CAOXY oluşumu için zorunlu değildir. Bu değişkenlik, XRD dahil faz tespit yöntemlerinde numune saklama ve hazırlama koşullarının önemini artırır [1,16].

Bu termodinamik kararsızlık, CAOXY'nin laboratuvar koşullarında tespit edilmesini güçleştirmekte, saha koşullarında ise çok daha zorlaştırmaktadır [1,9]. XRD analizi doğrudan faz tespit yöntemi olmakla birlikte, numune alım zamanı ile analiz süresi arasındaki değişken sıcaklık ve nem koşulları fazın kısmen ya da tamamen ayrışmasına neden olabilmektedir. Numune hazırlama sürecinde karşılaşılan bağıl nem değişimleri bile tespit için yeterli miktarda oksiklorür fazını ortadan kaldıracıdır. Bu nedenle, sahadan alınan hasarlı beton numunelerinde XRD analizi olumsuz sonuç vermiş olsa dahi hasarın CAOXY kaynaklı olmadığı sonucuna varmak doğru olmaz. Fazın zaten ayrılmış olması ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu kararsızlığın pratik sonuçları birkaç boyutta önem taşımaktadır. Birincisi, hasar oluştuktan sonra gerçekleştirilen analizlerde oksiklorür fazının belgelenememesi, hasar nedeninin yanlış tanımlanmasına yol açabilmektedir. İkincisi, anlık ölçümde bulunan CAOXY miktarı geçmişte oluşan toplam miktarı yansıtmayabilir; fazın bir kısmı analizden önce ayrılmış olabilir. Üçüncüsü, LT-DSC kontrollü koşullarda CAOXY oluşum potansiyelini ölçerek önemli bir avantaj sağlar ve fazın kararsızlığından kaynaklanan tespit güçlüğünü azaltır. Ancak sahada daha önce oluşmuş CAOXY miktarını yeniden kurmaz; betonun hava boşluk sistemini ve taşınım özelliklerini de doğrudan temsil etmez [9,16].

4. HASAR MEKANİZMALARI

4.1. Hacimsel Genleşme

CAOXY oluşumunun hasara nasıl dönüştüğü tek bir mekanizmayla açıklanamamaktadır. Literatürde bildirilen yaklaşık %303'lük değer, reaksiyon ürününe ilişkin teorik faz hacmi karşılaştırmasıdır; betonun makroskopik olarak %303 genleştiği anlamına gelmez [1,16]. Kristalleşme ve gözenek duvarı basıncı, hava boşluk sistemi, taşınım ve doygunluk birlikte etkilidir [1,13–15].

4.2. Gözenek Duvarı Basıncı

Scherer'in (2004) tuz kristalleşmesiyle oluşan gerilmeleri ele alan yaklaşımı, CAOXY hasarının yorumlanmasında kullanılan çerçevelerden biridir [14,16]. Yerel aşırı doygunluk, gözenek geometrisi ve kristal ile gözenek duvarı arasındaki sıvı filmi önemlidir. Dolayısıyla hasar yalnızca reaksiyon ürününün toplam miktarıyla açıklanamaz; gözenek yapısı, taşınım ve doygunluk koşulları da değerlendirilmelidir [13,14].

Beton gözeneklerine giren CaCl_2 çözeltisi Ca(OH)_2 ile etkileştiğinde, uygun yerel aşırı doygunluk koşullarında CAOXY kristalleri büyüyebilir. Kristalleşmenin oluşturduğu gerilmeler yerel çekme dayanımını aşarsa çatlak gelişebilir; CAOXY için her koşulda geçerli sabit bir kristalleşme basıncı verilmemelidir [14,15]. Literatürde numune yüzeyinde uzunluğu 1 mm'yi aşabilen saydam kristaller ile numune içinde çapı yaklaşık 5 μm 'ye ulaşabilen, kalınlığı 1 μm 'den küçük psödohekzagonal plakalar ayrı morfolojiler olarak bildirilmiştir. Çok ince lifsi oluşumlar da gözlenmiştir [1].

Donma-çözülme ve CAOXY kaynaklı hasar



Şekil 5. Donma-çözülme ve CAOXY kaynaklı hasarın şematik karşılaştırması [1,14–16]

Düşük geçirimsizlik tuz girişini sınırlamaya yardımcı olur; ancak tuz betona ulaştığında yerel reaksiyon, nem ve boşluk yapısı da hasarı belirler. Bu nedenle CAOXY riskini yalnızca bir geçirgenlik veya bir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ değeriyle açıklamak mümkün değildir. Reaktif mineral katkı, uygun hava boşluk sistemi ve maruziyetin kontrolü birlikte değerlendirilmelidir [1,13,16].

Derzde biriken yoğun tuz çözeltisi, yüksek nem ve yetersiz drenaj, yerel hasar olasılığını artırır. Yaklaşık %86 doygunluk sınırı burada CAOXY için bir kabul ölçütü değildir. Tasarımda su/bağlayıcı oranı ve boşluk sistemi, ilgili çevresel etki koşulları ve deneysel bulgularla birlikte ele alınmalıdır [1,13,16].

4.3. Kristalleşme Basıncı

Chatterji (1978), CaCl_2 etkisindeki hasarı kristalleşme basıncıyla ilişkilendirmiştir [15]. Scherer'in (2004) yaklaşımında da aşırı doygunluk ve termodinamik koşullar temel önemdedir; bu nedenle iki yaklaşımı yalnızca "fiziksel baskı" ve "kimyasal potansiyel farkı" olarak kesin çizgilerle ayırmak uygun değildir [14]. Kristal büyümesinin gerilmeye dönüşmesi, çözeltinin taşınımına, boşluk yapısına ve kristal-duvar etkileşimine bağlıdır. Derzde çözeltinin yenilenmesi, nem çevrimleri ve drenaj bu koşulları etkileyebilir. CAOXY hasarında farklı mekanizmaların katkıları hâlen araştırılmaktadır; tek bir açıklama bütün karışım ve maruziyetler için kesinleşmiş kabul edilmemelidir [1,14–16].

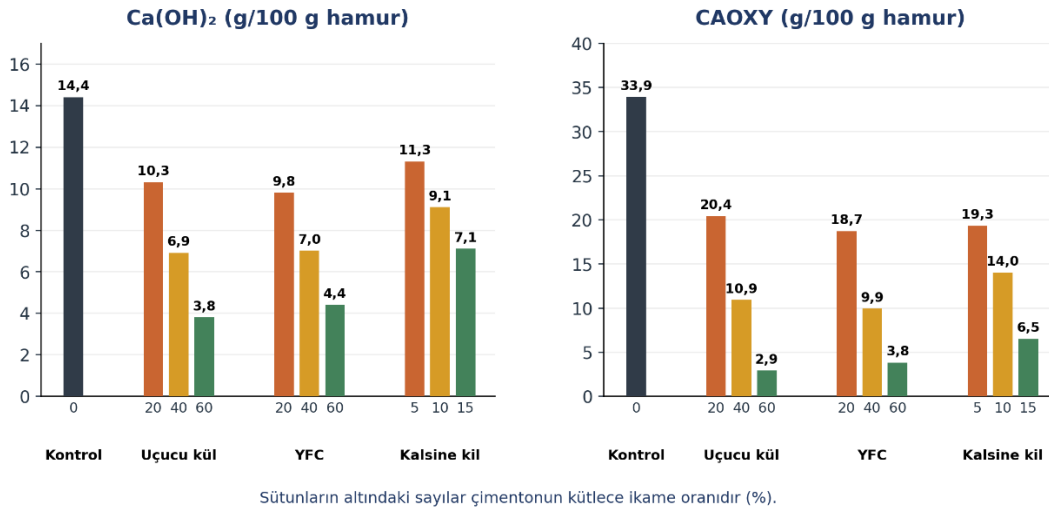
4.4. Aktif Risk Bileşeni: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCl_2 ile reaksiyona girebildiği için CAOXY oluşum potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir [1,5]. Ancak tek başına $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, betonun saha hasarına karşı yeterli veya yetersiz olduğunu belirlemez; tuz girişi, hava boşlukları ve maruziyet koşulları da dikkate alınmalıdır [13,16].

5. TEST YÖNTEMLERİ

5.1. Düşük Sıcaklık Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (LT-DSC)

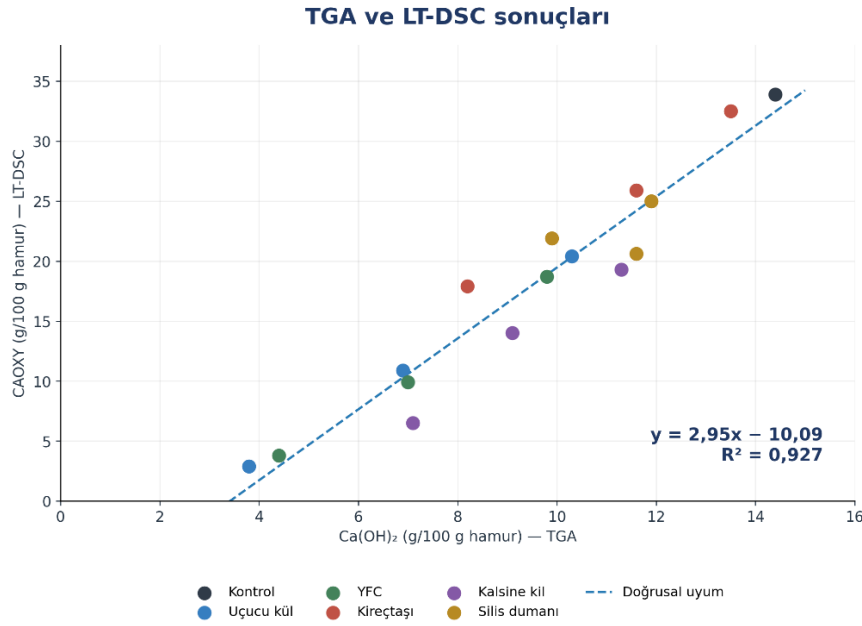
AASHTO T 365, buz çözücü tuzlara maruz bırakılan çimentolu hamurlarda CAOXY oluşum potansiyelinin LT-DSC ile nicel tayinini tanımlar [16]. Kür edilmiş hamur öğütülür; toz, yöntemde tanımlanan CaCl_2 çözeltisiyle birleştirilir. Harç veya betona uyarlama araştırmalarda incelenmiştir, ancak agrega seyreltmesi ve temsili örnekleme nedeniyle AASHTO T 365'in doğrudan standart kapsamı değildir [16]. Şekil 6'daki belirli hamur karışımlarında CAOXY miktarı, katkısız örnekte yaklaşık 34 g/100 g hamurdan bazı %60 mineral katkılı örneklerde yaklaşık 3–4 g/100 g hamura düşmüştür [5,16,17].



Şekil 6. Mineral katkı türü ve ikame oranına göre Ca(OH)_2 ve CAOXY miktarları [16]

5.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

TGA, Ca(OH)_2 'nin yaklaşık 350–500 °C aralığındaki ayrışmasından kaynaklanan kütle kaybını kullanarak miktarını belirler. Şekil 7'deki belirli hamur örneklerinde TGA ile bulunan Ca(OH)_2 ve LT-DSC ile ölçülen CAOXY arasında güçlü bir ilişki görülmektedir [5,16,17]. Korelasyon bütün karışımlar için değişmez bir kabul ölçütü değildir; numune hazırlama ve yorumlama koşulları önemlidir [16].



Şekil 7. Kaynak tablodaki 16 veri noktası için TGA–LT-DSC ilişkisi ve hesaplanan doğrusal uyum [16]

5.3. Hacimsel Özdirenç

Hacimsel özdirenç, AASHTO T 402 veya ASTM C1876 ile ölçülerek betonun CAOXY hasarına karşı deneysel taranmasında kullanılabilir. Özdirenç ile hava içeriğinin karekökünün çarpımı ($PI = R \times \sqrt{Hava}$) belirli deney serilerinde maruziyet sonundaki hasar ve dayanımla ilişkili bulunmuştur [13,16,18]. Yaş, kür ve bağlayıcının alkali içeriği gibi etkenler nedeniyle PI için genel geçer bir kabul sınırı henüz tanımlanmamıştır [16].

Gözlenen hasar ve ortalama performans indeksi

150 çevrim · 5–20 °C · %20 CaCl₂ çözeltisi

Hasar durumu	Ortalama PI = $R \times \sqrt{A}$	Dayanım (MPa)
Hasar yok	742	23,3
Hafif	288	20,1
Orta	260	9,4
Şiddetli	203	4,2
Tam bozulma	113	0,0

R: 91 günlük hacimsel özdirenç ($\Omega \cdot m$) · A: hava içeriği (%)

Değerler deney gruplarının ortalamalarıdır; kabul sınırı değildir.

Şekil 8. Deney sonunda gözlenen hasar grupları ve ortalama PI değerleri [16,18]

5.4. Diğer Yöntemler

X-ışını kırınımı (XRD), CAOXY fazının doğrudan belirlenmesi için kullanılabilir [9]. Elektron mikroskobu (SEM/EDS), reaksiyon mekanizmalarını ve hasar morfolojisini ortaya koymak açısından değerlidir [3]. Kütle değişimi ve görsel gözlem, uzun süreli maruziyet (yaklaşık 600 gün) çalışmalarında geçerli göstergeler olarak kullanılmıştır [13,18]. Termodinamik modelleme ise çimento hamuru karışımlarındaki Ca(OH)_2 miktarını tahmin etmek için kullanılabilir ancak CAOXY termodinamik sabitleri henüz tam olarak belirlenmemiştir [5].

5.5. Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması

LT-DSC, hamurda CAOXY oluşum potansiyelini doğrudan ölçer; TGA Ca(OH)_2 üzerinden dolaylı bilgi sağlar. Harç ve beton numunelerinde agrega seyreltmesi ve temsilî toz elde edilmesi her iki yöntemi de güçleştirir. Hacimsel özdirenç beton üzerinde uygulanabilir, fakat kür, yaş, bağlayıcı ve hava içeriği dikkate alınmadan tek başına hasar öngörüsü olarak kullanılamaz. Test seçimi maruziyete ve numune türüne göre yapılmalı; sonuçlar mümkünse birbirini tamamlayan ölçümlerle yorumlanmalıdır [16].



Şekil 9. CAOXY direncinin değerlendirilmesine yönelik test yöntemi seçim karar ağacı [16]

6. ÖNLEME VE AZALTMA STRATEJİLERİ

6.1. Mineral Katkı (SCM) Kullanımı

Reaktif mineral katkılar (SCM'ler), Şekil 10'da özetlenen kimyasal ve fiziksel etkilerle CAOXY riskini azaltabilir. Uçucu kül ve kalsine kil puzolanik reaksiyonla Ca(OH)_2 tüketir; yüksek fırın cürufu esas olarak latent hidrolik karakterdedir ve bağlayıcı sistemin hidratasyonunu ve faz bileşimini değiştirir. Bu malzemeler gözenek yapısını da etkileyerek tuz girişini sınırlamaya yardımcı olabilir. Etkinlik, katkı türü, dozaj, kür ve maruziyet koşullarına bağlıdır [5,13,16,17].



Şekil 10. Mineral katkı kullanımının çift etkili koruma mekanizması [16,18]

Mineral katkının türü ve ikame oranı CAOXY oluşum potansiyelini etkiler. Şekil 6'daki su/bağlayıcı oranı 0,36 olan belirli hamur serisinde %40 uçucu kül veya cüruf ikamesi CAOXY miktarını yaklaşık 10 g/100 g hamura; %60 ikame ise yaklaşık 3–4 g/100 g hamura düşürmüştür. %15 kalsine kil örneğinde yaklaşık 6,5 g/100 g, %60 kireçtaşı örneğinde ise yaklaşık 17,9 g/100 g ölçülmüştür [16,17]. Bu sonuçlar malzemeden bağımsız bir dozaj kuralı oluşturmaz; kireçtaşının etkisi incelenen seride reaktif katkılardan daha sınırlıdır.

6.2. Hava Sürüklenme

Hava sürüklenme CAOXY oluşumunu doğrudan önlemez; uygun hava boşluk sistemi maruziyet altında hasarı azaltmaya yardımcı olabilir [13,16,21]. Donma-çözülme çevresel etki sınıflarında hava sürüklenme zaten tasarımın bir parçası olabilir. Hava miktarı, boşluk dağılımı, dayanım ve uygulama koşulları birlikte doğrulanmalıdır; ek teknik veya ekonomik etkisi yokmuş gibi kabul edilmemelidir.

6.3. Yüzey Koruyucular

Yüzey koruyucular, beton ile tuz çözeltisi arasında nem bariyeri oluşturarak Ca(OH)_2 – CaCl_2 temasını engelleyebilir. Bu yöntem özellikle kritik derz bölgelerinde destekleyici bir önlem olarak değerlendirilebilir ancak periyodik yeniden uygulama gerekebilir ve etkinliği belirleyen parametrelerin standardizasyonu henüz tamamlanmamıştır [16,22].

6.4. Tercihli Karbonatlaşma

Deneyisel çalışmalarda tercihli karbonatlaşmanın Ca(OH)_2 'yi dönüştürerek CAOXY oluşumunu azaltabildiği bildirilmiştir [20]. Bu yöntem, karbonatlaşmanın donatı korumasına ve diğer dayanıklılık özelliklerine etkisi değerlendirilmeden genel bir saha önlemi olarak önerilmemelidir [16].

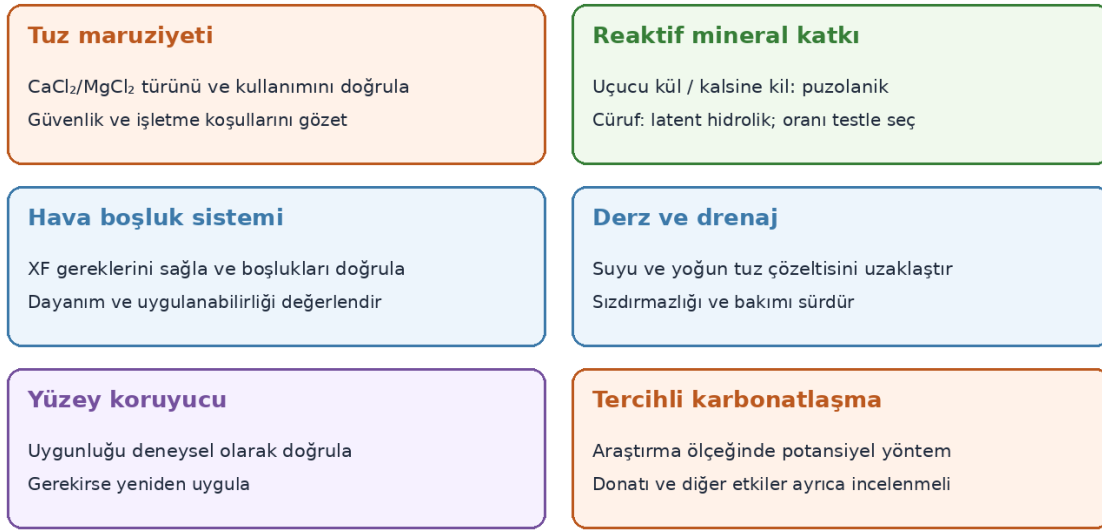
6.5. Kireçtaşı ve su/bağlayıcı oranı

İncelenen hamur sistemlerinde kireçtaşı ikamesi, reaktif katkılara kıyasla CAOXY miktarını daha sınırlı azaltmıştır [5,16,17]. Örneğin %60 kireçtaşı ikamesinde 17,9 g/100 g hamur, aynı seride %60 uçucu

kül ikamesinde 2,9 g/100 g hamur bildirilmiştir. Bu karşılaştırma kireçtaşının her bağlayıcı sisteminde etkisiz olduğunu göstermez; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ erişilebilirliği, bağlayıcının kimyası ve fiziksel taşınım birlikte değerlendirilmelidir.

Su/bağlayıcı oranını yalnızca bağlayıcıyı seyreltmek amacıyla yükseltmek güvenilir bir CAOXY önleme yöntemi değildir. Bu değişiklik gözenek yapısını, klorür taşınımını ve diğer dayanıklılık özelliklerini de etkileyebilir; sonuçlar karışıma ve maruziyete göre değerlendirilmelidir [1,16].

Şekil 11, farklı önleme yaklaşımlarının uygulama alanlarını ve sınırlamalarını özetlemektedir.



Şekil 11. CAOXY önleme yöntemleri [13,19,20]

7. TASARIM KILAVUZU

7.1. Risk Düzeyine Göre Karışım Tasarımı

Şekil 12, $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ buz çözücü maruziyetini değerlendirmek ve deneyleri seçmek için bir tasarım çerçevesi sunmaktadır. Şekildeki adımlar TS 13515'in ek bir CAOXY sınıfı veya zorunlu kabul prosedürü değildir [13,16,19].

- Önce kullanılan buz çözücü tuzun türü, uygulama sıklığı, çözeltinin derzde birikmesi, drenaj ve diğer çevresel etkiler değerlendirilir.
- Ardından uygun katkılı bağlayıcı ve ikame oranı, su/bağlayıcı oranı ve donma-çözülme koşullarına uygun hava boşluk sistemi belirlenir. Örnek çalışmalarda farklı SCM türleri için farklı etkili oranlar bildirilmiştir; bütün karışımlara uygulanacak %20 veya %60 gibi tek bir alt sınır çıkarılamaz [13,16,17,19].
- Seçilen bağlayıcı hamurunun oluşum potansiyeli LT-DSC veya TGA ile; betonun öz direnci ve hava boşluk özellikleri ise uygun ölçümlerle ayrıca incelenebilir. Sonuçlar numune türü, kür yaşı ve deney maruziyetiyle birlikte yorumlanır [16].
- ABD uygulamasına ait AASHTO R 101 açıklama kılavuzunun 6.5.4.1 maddesinde, AASHTO T 365 ile belirlenen CAOXY miktarının 15 g/100 g çimentolu hamurdan düşük olması

önerilmektedir [23, s. 13]. Bu, hamur düzeyindeki oluşum potansiyeline yönelik bir rehber ölçüttür; betonun sahadaki dayanıklılığı için tek başına bir kabul kriteri veya TS 13515 şartı değildir.

- TGA ile ölçülen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı ve betonun performans indeksi (PI) için evrensel kabul sınırları tanımlanmamıştır [16]. Karışımın performansı ilgili maruziyette doğrulanan deney sonuçları ve diğer dayanıklılık gerekleriyle birlikte değerlendirilmelidir.



Şekil 12. CAOXY riskine göre karışım tasarımı [16,18,19]

7.2. Performans indeksi ile Değerlendirme

Belirli araştırma koşullarında betonun CAOXY hasarıyla ilişkili bulunan performans indeksi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [13,16,18]:

$$PI = R \times \sqrt{A} \quad (R: \text{hacimsel özdirenç, } \Omega \cdot \text{m}; A: \text{hava içeriği, } \%)$$

Hosseinzadeh vd. (2022) çalışmasında hasarsız, hafif, orta, şiddetli ve tam bozulma grupları için ortalama PI değerleri sırasıyla 742, 288, 260, 203 ve 113 olarak bildirilmiştir [18]. Şekil 8'deki bu değerler deney gruplarının ortalamalarıdır; direnç sınıfı sınırlarına dönüştürülemez. Hesapta hava yüzdesi sayısal olarak kullanılır (örneğin %5 için $A = 5$). Özdirenç $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ olarak verilmişse $\Omega \cdot \text{m}$ 'ye çevirmek için 10 ile çarpılır.

Not: Şekil 8'de 91 günlük özdirenç ve deneyde ölçülen hava içeriği kullanılmıştır [16,18]. Yaş, kür, bağlayıcı kimyası ve nem özdirenç etkileri; farklı ölçüm koşullarında elde edilen PI değerleri doğrudan karşılaştırılmamalıdır.

8. TÜRKİYE PERSPEKTİFİ VE TS 13515

8.1. Türkiye'de CAOXY Riski

CAOXY hasarı literatürde esas olarak yüksek derişimli CaCl_2 veya MgCl_2 buz çözücülerinin kullanıldığı soğuk bölge altyapısında incelenmiştir [1,2,16]. Türkiye'deki değerlendirmede bölge veya yalnızca klorür varlığı yerine, gerçekten kullanılan tuzun türü ve derişimi ile derzde nem birikimi esas alınmalıdır. Deniz suyu maruziyeti ve kış bakımında kullanılan yoğun tuz çözeltileri eşdeğer koşullar değildir.

Kıyı ve denizel ortam: XS sınıfındaki deniz suyu maruziyeti, başta donatı korozyonu olmak üzere ayrı dayanıklılık gerekleri doğurur. Doğal deniz suyu klorürü tek başına yüksek derişimli CaCl_2 buz çözücü çözeltisiyle eşdeğer bir CAOXY maruziyeti sayılmamalıdır. Kıyı yapısında ayrıca $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ içeren kış bakım tuzları kullanılıyorsa bu özel birleşik maruziyet ayrıca incelenebilir [1,2].

Karayolu altyapısı ve kış bakımı: CaCl_2 veya MgCl_2 içeren buz çözücülerin gerçekten kullanıldığı yol ve köprülerde, özellikle derzler ile drenajı yetersiz bölgelerde konsantre çözeltinin birikmesi CAOXY açısından değerlendirilmelidir. Tuzlama uygulamasının türü ve sıklığı doğrulanmadan belirli bölge, güzergâh veya yapıların yüksek riskli olduğu varsayılmamalıdır [1,2,16].

Birleşik maruziyet: Kıyı köprüsünde denizel etkilerle birlikte $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ içeren kış bakım tuzları uygulanıyorsa derz ve drenaj ayrıntıları ayrıca incelenmelidir. Deniz suyu etkisi CAOXY için doğrudan kanıt sayılmaz; hasarın ayırıcı tanısında klorür kaynağı ve derişimi, donma-çözülme ve korozyon gibi diğer mekanizmalar da değerlendirilir [1,2].

8.2. TS 13515 Standardı Bağlamında Değerlendirme

TS 13515:2025'te klorür kaynaklı donatı korozyonu XD ve XS çevresel etki sınıflarında, donma-çözülme etkileri ise XF sınıfında ele alınır [24]. CAOXY oluşumu bu sınıflarda ayrıca adlandırılmış bir hasar mekanizması değildir. $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ içeren buz çözücülerin uygulandığı yapılarda söz konusu maruziyet, ilgili sınıfların gereklerini ikame etmeden ilave bir dayanıklılık değerlendirmesi olarak ele alınabilir. Bu bültendeki deneysel göstergeler TS 13515 hükümleri değildir.

TS 13515:2025'in ilgili maruziyetlere yönelik bileşim, su/çimento oranı, mineral katkıların hesaba katılması ve hava içeriği gerekleri karşılanmalıdır. Reaktif mineral katkılı sistemler CAOXY oluşum potansiyelini azaltabilse de etki, katkı türü ve dozajla birlikte deneysel olarak değerlendirilmelidir [5,13,16,17].

9. ÖNERİLER

Şekil 13'teki saha önerileri, literatür bulgularından türetilmiş değerlendirme adımlarıdır; TS 13515 veya başka bir standardın zorunlu CAOXY kabul kriterleri olarak okunmamalıdır.

CAOXY Hasarına Karşı Saha Önerileri

Konu	Eylem	Öncelik
Maruziyet	Tuz türünü, derişimi ve derzde birikimi doğru	İLK ADIM
Karışım	SCM seçimini ve TS 13515 gereklerini değerlendir	ÖNCELİKLİ
Hava boşluğu	XF maruziyetinde uygun boşluk sistemini doğru	ÖNCELİKLİ
Hamur taraması	LT-DSC veya TGA ile oluşum potansiyelini incele	ÖNERİLİR
Beton taraması	Özdirenç ile hava özelliklerini birlikte değerlendir	ÖNERİLİR
Derz bakımı	Drenajı ve sızdırmazlığı koru; koruyucuyu değerlendir	ÖNCELİKLİ

Şekil 13. Saha mühendisleri için literatüre dayalı uygulama önerileri [1,13,16,22]

Karışım tasarımında $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ maruziyeti doğrulanmışsa reaktif mineral katkı veya uygun katkı çimento seçenekleri incelenmelidir. Uçucu kül ve kalsine kil puzolanik, yüksek fırın cürufu ise latent hidrolik karakteriyle bağlayıcı fazlarını ve mikroyapıyı etkiler [5,17,19]. Katkı oranı ile su/bağlayıcı oranı, dayanım ve ilgili TS 13515 çevresel etki gerekleri gözetilerek seçilir; CAOXY için tek bir evrensel asgari ikame oranı veya 0,40 su/bağlayıcı sınırı önerilmez.

Donma-çözülme maruziyeti varsa uygun hava boşluk sisteminin sağlanması gerekir. Hava sürüklenme CAOXY oluşumunu durdurmaz, ancak ilgili deneylerde hasarı azaltmaya yardımcı olmuştur [13,21]. Taze beton hava yüzdesi tek başına yeterli bir doğrulama değildir.

Tasarım aşamasında çimentolu hamur için LT-DSC veya TGA ile tarama, beton içinse hava boşluk sistemi ve hacimsel özdirenç ölçümü değerlendirilebilir. Bölüm 7.1'deki AASHTO hamur ölçütü, betonun sahadaki performansını tek başına doğrulamaz. TGA ve PI sonuçları için evrensel kabul sınırları kullanılmamalı; karışım, kür yaşı, ölçüm birimleri ve tuz maruziyeti kaydedilerek sonuçlar birlikte yorumlanmalıdır [13,16,23].

Sahada derz drenajının ve sızdırmazlık malzemelerinin işlevi korunmalı, çözeltilerin uzun süre birikmesi önlenmelidir. Yüzey koruyucular seçilen sistem için doğrulanırsa destekleyici olabilir ve bakım gerektirebilir [16,22]. Periyodik özdirenç ölçümü değişimleri izlemeye yardımcı olur; tek başına mevcut yapıda CAOXY hasarı teşhisi veya kabul kararı sağlamaz [16].

10. KAYNAKLAR

1. Jones, C., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Hale, W. M. (2020). Calcium oxychloride: A critical review of the literature surrounding the formation, deterioration, testing procedures, and recommended mitigation techniques. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103663. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103663>
2. Van Dam, T. J. (2018). Chemical deicers and concrete pavement: Impacts and mitigation (FHWA-HIF-17-008). Federal Highway Administration.
3. Jones, W., Farnam, Y., Imbrock, P., Spiro, J., Villani, C., Golias, M., Olek, J., & Weiss, W. J. (2013). An overview of joint deterioration in concrete pavement: Mechanisms, solution properties, and sealers. Purdue University. <https://doi.org/10.5703/1288284315339>
4. ACI Committee 201. (2019). Joint deterioration and chloride-based deicing chemicals (ACI 201.3T-19). American Concrete Institute.
5. Suraneni, P., Azad, V. J., Isgor, O. B., & Weiss, W. J. (2016). Calcium oxychloride formation in pastes containing supplementary cementitious materials: Thoughts on the role of cement and supplementary cementitious materials reactivity. *RILEM Technical Letters*, 1, 24–30. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.7>
6. ACI Committee 201. (2016). Guide to durable concrete (ACI 201.2R-16). American Concrete Institute.
7. Lawrence, M., & Vivian, H. E. (1960). The action of calcium chloride on mortar and concrete. *Australian Journal of Applied Science*, 11(4), 490–496.
8. Smolczyk, H. G. (1968). Chemical reactions of strong chloride-solutions with concrete. *Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement* (pp. 274–280).
9. Galan, I., Perron, L., & Glasser, F. P. (2015). Impact of chloride-rich environments on cement paste mineralogy. *Cement and Concrete Research*, 68, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.017>
10. Balonis, M., Lothenbach, B., Le Saout, G., & Glasser, F. P. (2010). Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1009–1022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.002>
11. Qiao, C., Suraneni, P., Tsui Chang, M., & Weiss, J. (2018). Damage in cement pastes exposed to $MgCl_2$ solutions. *Materials and Structures*, 51(3), 74. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1191-2>
12. Farnam, Y., Dick, S., Wiese, A., Davis, J., Bentz, D., & Weiss, J. (2015). The influence of calcium chloride deicing salt on phase changes and damage development in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 64, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.006>
13. Hosseinzadeh, N., & Suraneni, P. (2021). Synergistic effects of air content and supplementary cementitious materials in reducing damage caused by calcium oxychloride formation in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104170>
14. Scherer, G. W. (2004). Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1613–1624. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.034>
15. Chatterji, S. (1978). Mechanism of the $CaCl_2$ attack on Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 8(4), 461–467. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(78\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(78)90026-1)

16. Suraneni, P. (2024). Test methods to screen concrete mixtures for calcium oxychloride damage resistance (Tech Brief). National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.
17. Suraneni, P., Azad, V. J., Isgor, O. B., & Weiss, J. (2018). Role of supplementary cementitious material type in the mitigation of calcium oxychloride formation in cementitious pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018248. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002425](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002425)
18. Hosseinzadeh, N., Montanari, L., & Suraneni, P. (2022). Durability of concretes exposed to high concentrations of CaCl_2 and MgCl_2 . *Materials and Structures*, 55, 153. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01992-y>
19. Farnam, Y., Zhang, B., & Weiss, J. (2017). Evaluating the use of supplementary cementitious materials to mitigate damage in cementitious materials exposed to calcium chloride deicing salt. *Cement and Concrete Composites*, 81, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.003>
20. Ghantous, R. M., Farnam, Y., Unal, E., & Weiss, J. (2016). The influence of carbonation on the formation of calcium oxychloride. *Cement and Concrete Composites*, 73, 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.016>
21. Ghantous, R. M., Zetterberg, K., Becker, H. H., Behravan, A., Ley, M. T., Isgor, O. B., & Weiss, W. J. (2022). The influence of air voids and fluid absorption on salt-induced calcium oxychloride damage. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104697. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104697>
22. Wang, X., Sadati, S., Taylor, P., Li, C., Wang, X., & Sha, A. (2019). Material characterization to assess effectiveness of surface treatment to prevent joint deterioration from oxychloride formation mechanism. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103394>
23. Van Dam, T., & Taylor, P. (2024). Commentary on AASHTO R 101, Developing Performance Engineered Concrete Pavement Mixtures. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University. Bölüm 6.5.4.1, s. 13. https://www.cptechcenter.org/wp-content/uploads/2024/06/commentary_on_AASHTO_R_101_manual_web.pdf
24. Türk Standardları Enstitüsü. (2025). TS 13515:2025 — TS EN 206'nın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standart. TSE, Ankara.



www.thbb.org

www.thbbakademi.org

