



Kristalize Geçirimsizlik Katkılarının Betonun Taşıma Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Effect of Crystalline Waterproofing Admixture on the Transport Properties of Concrete

Oğuzhan Şahin^{1*}

¹Ankara Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 16/01/2023

Kabul / Accepted: 17/03/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2023

Öz

Bu çalışmada kristalize geçirimsizlik katkılarının beton malzemesinin geçirimsizlik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda iki farklı kristalize geçirimsizlik katkısı kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımlar kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, basınçlı su geçirimsizliği ve klor iyon geçirimsizliği testleri uygulanmış ve bu testlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu testlere ilaveten karışımlara mikroyapısal analizler uygulanarak katkılı beton karışımlarındaki kristal yapı oluşumları gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımlarında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur. Katkı kullanımıyla birlikte karışımların çatlak iyileştirme potansiyelleri artmıştır. Genel olarak çalışma sonuçlarından katkıların geçirimsizliği azaltma konusunda oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Geçirimsizlik, kristalize geçirimsizlik katkıları, taşıma özellikleri, çimento esaslı sistemler, mekanik özellikler”

Abstract

In this study, the effect of crystalline waterproofing admixture on the permeability and transport properties of cementitious systems was investigated. In this regard, concrete mixtures were produced by using two different crystalline waterproofing admixtures. Compressive strength test, test for determination of resistance of capillary absorption, pressurized water permeability test and chloride ion permeability test were performed on the concrete specimens, and the obtained results were presented. In addition to these tests, microstructural analyzes were applied to the specimens to illustrate the crystal structure formation in the concrete mixtures containing admixtures. According to the results of this study, the changes in the compressive strength test results depending on the use of additives were limited. The crack healing potential of the mixtures increased with the use of additives. In general, it can be deduced from the results of this study that the crystalline waterproofing admixtures are quite effective in reducing permeability.

Key Words

“Permeability, crystalline waterproofing admixture, transport properties, cementitious systems, mechanical properties”

1. Giriş

Dünyadaki bütün ülkeler, sürdürülebilirlik yönünden verimsizliğe neden olan kalkınma problemlerine çözüm üretmeye çalışmaktadırlar. Gün geçtikçe gelişen ve hızlıca büyüyen ekonomilere sahip ülkelerde bu çözümlerin getirdiği sonuçlar daha açık görülebilmektedir. Genellikle, gelişmiş ekonomilerde otoyollar, sanayi yapıları, havaalanları, yer altı toplu taşıma sistemleri, köprüler, barajlar, atık su arıtma tesisleri, deniz yapıları ve altyapı sistemleri, ticareti destekleyen ve dış kaynaklı yatırımı destekleyen unsurların başında gelmektedir. Bu sebeple, tüm bu yapıların üretiminde kullanımı söz konusu olan beton, ekonomik gelişmenin temel yapıtaşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Betonun ve üretiminde kullanılan ana bileşenlerden olan çimentonun üretimleri sırasında çevreye vermiş oldukları ciddi zararlara rağmen özellikle gelişmekte olan ülkelerin inşaat sektörlerindeki canlanmalarla birlikte, küresel olarak betona olan rağbet kayda değer seviyede artmış ve mevcut durumda dünyada en geniş çapta kullanılan inşaat malzemesi olmuştur. Çok yaygın olarak farklı amaçlarda kullanılmasından dolayı özellikle konvansiyonel betonun performans özellikleri birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve bu malzemenin servis ömrü içerisinde göstereceği performansın iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Gelişmiş ülkelerde yaşlanmış ve ömrünü tamamlamış altyapılarla ilgili sorunlar ortaya çıkmaktadır. Karayolları, havaalanları, köprüler, metro geçiş sistemleri, barajlar, atıksu arıtma tesisleri, kıyı yapıları ve hayatımızda çok geniş yer kaplayan binalar şeklinde gelişen altyapılar, mekanik zorlamalar, yer değiştirmeler ve çevresel faktörler nedeniyle sürekli hasar ve deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu bağlamda, , daha uzun servis ömrü ve onarım işlerinin daha az sıklıkla yapılabilmesi adına yüksek dayanıklılığın önemli bir parametre olduğu belirtilebilir. Gerçek altyapısal sürdürülebilirliğin ancak çevresel etkileri düşük malzemelerin üretimi ve yüksek yapısal ve işlevsel dayanıklılığın sağlanması yoluyla sağlanabileceği düşünülmektedir. Çok sayıda farklı altyapısal uygulamalarda kullanılan beton malzemesi, tarihsel olarak, servis ömrünün başında belirli özellikleri bünyesinde taşıyacak ve önceden belirlene bir servis ömrünü sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Sürekli artan insan nüfusu nedeniyle insanlar her ne kadar ömür boyu kullanılacak yapıların inşa edilebilmesi arzu etse de Avrupa standartlarına göre geniş çaplı kamusal işlerde kullanılan beton malzemelerinden en az 75 yıllık kullanım ömrü beklenmektedir (Alexander ve Stanish, 2005; Bossio v.d., 2021). Ancak, kullanıma bağlı mekanik ve çevresel yüklerin ortak etkisi altında 20 ila 30 yıl arasında bozulmanın başladığı göz önünde bulundurulduğunda (Mehta ve Burrows, 2001), bir önceki yüzyılın son yarısında inşa edilen çok sayıda yapının sürekli olarak azalmakta olan işlevsellik nedeniyle hizmet ömürlerinin sonuna yaklaştıkları belirtilebilir. Yapıların kendilerinden beklenen işlevsellik seviyesini karşılayamamaları hizmet süresi boyunca bozulan yapısal elemanların sürekli olarak tekrarlanan bakım, onarım ve/veya yenileme işlemlerini beraberinde getirerek yüksek trafik yoğunluğu, yakıt tüketimi, gaz salınımı vb. sorunları doğurmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, tekrarlı olarak uygulanan bu işlemler uzun ömürlü olmayabilmekte ve bu durum yapıların yıkılması ve yeniden inşa edilmesi gibi sonuçları doğurabilmektedir. Bu bağlamda yapıların servis ömrünün uzaması adına dayanıklılık özelliğinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Dayanıklılık, su basıncı, asit, klorür ve sülfat saldırıları dahil olmak üzere agresif ortamlara maruz kalan beton yapılar için ana tasarım kriterlerinden biridir (Nematzadeh v.d., 2021). Uygun malzeme veya karışım içeriği seçimleri ile yapıların yapısal kapasitenin artması ve hizmet ömrünün uzaması sağlanabilmektedir (Shi v.d., 2015). Kapiler gözeneklerin, jel gözeneklerinin ve potansiyel olarak gözenekli çimento-agrega arayüzey bölgelerinin varlığı nedeniyle beton normalde gözenekli olarak kabul edilmekte ve gözeneklilik durumu betonun geçirgenlik özelliklerini belirleyen temel unsurların başında gelmektedir (Nyame ve Illston, 1981; Jiang v.d., 2022). Betonda geçirgenliğin yüksek olması zararlı maddelerin beton ve donatı çeliğine ulaşmasına ve buna bağlı olarak yapının hizmet ömrünün kısılmasına neden olmaktadır (Basher v.d., 2001; Al-Akhras v.d., 2022). Betonun dayanıklılığı; tipik olarak yoğun bir beton matrisle, yani geçirgenliği düşürmesi ve aşındırıcıların çeliğe taşınmasını azaltması beklenen çok kompakt bir mikro yapı ile ilişkilidir (Oh v.d., 2002; Beeldens ve Vandewalle, 2001; Nematzadeh v.d., 2021; Kumar v.d., 2022). Bu kompakt mikro yapı, iyi derecelendirilmiş bir parçacık boyutu dağılımı (Hwang v.d., 1996; Rathore v.d., 2022), betonda uçucu kül ve silis dumanı kullanımı (Chang v.d., 2001; Pal v.d., 2020; Saran ve Demiröz, 2023) veya düşük su/bağlayıcı oranlarının seçilmesi (Mehta, 1986; Liu v.d., 2019) gibi yöntemlerle başarılabilmektedir. Geçirimliliği azaltılmış bir mikro yapı elde etmek için ayrıca çimento bağlayıcı kompozitlerin içerisine üretimi sırasında kimyasal ve mineral katkıların ilave edilmesi de kolay ve uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir (Hassani v.d., 2017; Tibbetts v.d., 2021). Kullanılan bu kimyasal ve mineral katkıları ile beton malzemesinin geçirimsizliği düşürülerek dayanıklılık açısından kısıtlamaları/yetersizlikleri ortadan kaldırılmaktadır. Geçirimsizlik katkısı (GK) da beton dayanıklılığını artırmak ve yapılara su ve zararlı materyal girişini azaltmak için bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. GK'lar geçirimsizliği azaltmalarına ek olarak kuruma büzülmesi ve klorür iyon geçirimsizliğini de azaltmakta ve donma çözünme etkilerine karşı daha dayanıklı bir beton malzemesi elde edilmesini sağlamaktadır (Ramachandran, 1995; Rixom and Mailvaganam, 1999; Munn v.d., 2003; Matar ve Barhoun, 2020; Gojević v.d., 2021). Bu yönü de dikkate alındığında GK'ların beton malzemesi üretiminde kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. GK'lar maruz kaldıkları koşullar göz önüne alınarak hidrostatik olmayan koşullara maruz kalan beton için GK'lar ve hidrostatik koşullara maruz kalan beton için GK'lar olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmıştır (Tibbetts v.d., 2021). Bunun yanında GK'lar mekanizma, performans ve beton endüstrisi tarafından kabulü açısından farklılık gösteren çok çeşitli mineral ve kimyasal katkıları kapsamaktadır. ACI Kimyasal Katkılar Komitesi 212 raporunda GK'lar hidrofobik su iticiler, polimer geçirimsizlik ürünleri, ince yapıdaki katılar, hidrofobik gözenek engelleyiciler ve kristalize ürünler olmak üzere beş ana kategoride sınıflandırılmıştır (ACI, 2016). Bu GK çeşitleri arasından kristalize ürünler daha az bilinen kimyasal katkıları olduğundan bu inceleme makalesinin odak noktası olmuştur. Kristalize katkıları hidrofilik özellikte olup ve bu katkı malzemelerinin aktif bileşenleri, mevcut mikro çatlaklar ve kılcal kanallarda gözenek tıkayan çökeltiler oluşturmak için betondaki su ve çimento parçacıkları ile reaksiyona girmektedir (Almusallam v.d., 2003; Muhammad v.d., 2021). Bu malzemelerin hidrofilik doğası, kalsiyum silikat hidratın yoğunluğunu artırmalarına ve/veya su penetrasyonuna direnen gözenek bloke edici tortular (suda çözünmeyen kristaller) oluşturmalarına neden olmaktadır. Bu katkıları beton gözeneklerinde kristalleşme yoluyla beton geçirgenliğini

azaltan mikro yapı değiştirici olarak sınıflandırılmaktadır. Söz konusu katkıların çalışma mekanizması kalsiyum silikat hidratların oluşumuna benzemektedir ve reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan kristal tortular çimento hamuru ile bütünsel olarak bağlanmaktadır. Oluşan bu tortular ile ortaya çıkan betonun basınç altında su penetrasyonuna karşı direnci önemli ölçüde artırılmış olmaktadır. Reaksiyon sonucu oluşan kristal tortular betonun derinliği boyunca gelişmekte ve beton kütesinin kalıcı bir parçası haline gelmektedir. Kristal tortular, hidrostatik basınca karşı su penetrasyonuna direnebildiklerinden hidrostatik koşullara maruz kalan beton için GK'lar olarak kategorize edilebilmektedir. Betonun ömrü boyunca kılcal çatlaklar oluştuğundan, kristal katkıların nem varlığında aktifleşmeye devam edebilmekte ve ek boşlukları kapatabilmektedir (Kubal, 2000; Skoglund ve Johansson, 2003; Gojević v.d., 2021).

Kristalize katkıların yaygın olarak kullanılması maliyet ve zaman verimliliği nedeniyle son birkaç on yılda önemli ölçüde artmış ve performanslarına ilişkin mevcut bilgiler günden güne genişlemektedir. Bu kapsamda bu çalışmada da bu tür katkıların beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkilerinin ortaya çıkarılması adına iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkıları kullanılarak beton karışımları geliştirilmiş ve kullanılan bu katkıların beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkisi katkı kullanılmayan beton karışımının özellikleri ile karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Yapılan bu inceleme kapsamında üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, basınçlı su geçirimsizliği ve klor iyon geçirimsizliği testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu testlere ilaveten karışımlara mikroyapısal analizler uygulanarak katkılı beton karışımlarındaki kristal oluşumu tespit edilmiş ve gösterilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışma kapsamında üretilen bütün karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak TS-EN-197-1:2012 çimento standartlarında belirtilen nitelikleri karşılayan CEM I 52,5N tipi yüksek dayanıma sahip Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Karışımlarda doğal kum, kırma taş kumu ve kırma taş agregası olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu agregaların granülometrik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada ayrıca katı (GK1) ve sıvı (GK2) olmak üzere iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkıları kullanılmıştır. GK1 (yığın yoğunluğu: $1,350 \pm 0,02$ gm/cm³), hidrofilik kristal toz katkı maddesi olup Portland çimentosu, çok ince işlenmiş silis kumu ve çeşitli aktif kimyasallardan oluşmaktadır. GK2 ise sıvı formda kristalize kapiler geçirimsizlik katkısıdır.

Tablo 1. Karışımların üretiminde kullanılan Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Çözünmeyen Kalıntı	Kimyasal Kompozisyon											Fiziksel Özellikler	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Kızdırma kaybı	Klorür (Cl)	Na ₂ Eq	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Blaine İnceliği (cm ² /g)
0,2-0,5	18,5-20,0	5,0-5,7	2,5-3,2	62,0-65,0	1,2-2,0	2,6-3,2	0,1-0,2	0,4-0,6	1,5-2,5	0,01-0,03	0,4-0,6	3,14	4000-5300

Tablo 2. Çalışma kapsamında karışımlarda kullanılan agregaların granülometrik özellikleri

Agrega Cinsi	Elek Göz Boyutları (mm), Elekten Geçen (%)						
	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	4,75 (No: 4)	2 (No: 10)	0,075 (No:200)
Doğal kum	100	100	100	100	99	99	98
Kırmetaş kumu	100	100	100	100	97	90	0,5
Kırmetaş	100	100	100	76,5	2	0	0

2.2. Karışım Oranları

Çalışma kapsamında sıvı ve katı olmak üzere iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkıları kullanılarak karışımlar üretilmiştir. Ayrıca kullanılan bu katkı malzemelerinin beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla herhangi bir katkı kullanılmadan şahit bir karışım da üretilmiştir. Tüm karışımların hazırlanmasında 0.5 (ağırlıkça) olacak şekilde sabit su/çimento oranı (S/Ç) kullanılmıştır. Karışımlara kristalize geçirimsizlik katkısının katılım oranı %2 (çimentonun toplam ağırlığına göre) olarak seçilmiştir. Agregası/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için yaklaşık 4,4 olacak şekilde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen karışımların karışım oranları ve bazı karakteristik özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

2.3. Numunelerin Üretilmesi ve Saklanması

Çalışma kapsamında üretilen karışımların farklı özelliklerini test etmek amacıyla çeşitli ebatlarda numuneler üretilmiştir. Karışım içerikleri ve yapılan testler için performans karşılaştırmasının yapılabilmesi için katkı içeren beton karışımlarına ek olarak benzer sayılarda herhangi bir geçirimsizlik katkısı bulundurmayan referans numuneleri de üretilmiştir. Hazırlanan karışımlardan basınç dayanımı testlerinde kullanılmak üzere 150×150×150 mm boyutlarında olacak şekilde küp numuneler üretilmiştir. Her bir karışım için 3, 7 ve 28 günlük kür yaşlarında her bir kür durumu ve yaş için 6'şar adet numune test edilecek şekilde numuneler hazırlanmıştır.

Kılcal geçirimsizlik testi için $75 \times 80 \times 400$ mm boyutlarında giriş numuneler üretilmiştir. Ayrıca hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında ($\emptyset 100 \times 50$ mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 3. Teorik 1 m^3 için beton bileşimi ve özellikleri

Karışım Oranları			
Malzemeler (kg/m^3)	Şahit (Kontrol) betonu (KB)	Geçirimsizlik katkıli beton 1 (GKB1)	Geçirimsizlik katkıli beton 2 (GKB2)
Çimento	395	395	395
Kırma taş	528	528	528
Kırma taş kumu	522	522	522
Doğal kum	695	695	695
Su	197	197	197
GK1	-	7,1	-
GK2	-	-	7,1
S/Ç	0,5	0,5	0,5
Taze Betonun Özellikleri			
Birim Ağırlık (kg/m^3)	2460	2470	2468
Çökme (cm)	14	15	15

Dökümlerin tamamlanmasının ardından, numuneler kalıplar içerisinde 24 saat süresince $50 \pm 5\%$ nem, 23 ± 2 °C sıcaklığa sahip bir ortamda bekletilmiştir. 24 saatin tamamlanmasının ardından, kalıplarından çıkarılan numuneler, 23 °C'de laboratuvar şartlarında ve 23 °C suda olacak şekilde iki farklı kür ortamında belirlenen süreler boyunca kür edilmiştir.

2.4. Numunelerin Test Edilmesi

2.4.1. Basınç dayanımı testi

Çalışma kapsamında üretilen karışımların temel mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda her bir karışımdan basınç dayanımı testinde kullanılmak üzere 6 özdeş küp ($150 \times 150 \times 150$ mm) numunesi üretilmiş ve üretilen bu numuneler 3, 7 ve 28 günlük kür yaşlarında ASTM C39 standardına uygun olarak 100 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak basınç testine tabi tutulmuştur. Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri her bir durum için 6 özdeş numune kullanılarak elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.

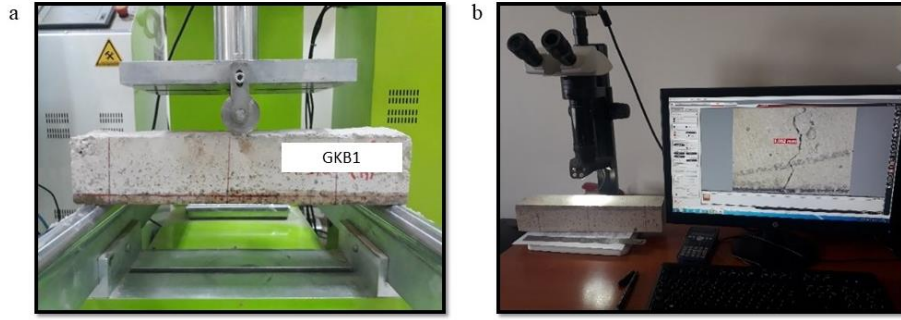
2.4.2. Basınçlı su geçirimsizlik testi

Çalışma kapsamında üretilen küp numuneler 28 gün boyunca belirtilen kür ortamında muhafaza edilmelerinin sonunda 5 bar basınçlı su altında basınçlı su geçirimsizlik testine tabi tutulmuştur. Söz konusu test gerçekleştirilirken "TS EN 12390-8: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini" standardı kullanılmıştır. Test için öncelikle deney numuneleri manuel ve mekanik bir sıkıştırma sistemi ile basınçlı su geçirimsizlik testi cihazının deney haznesine sabitlenmiştir. Daha sonra kompresörlü sistem vasıtasıyla numunelere 5 bar basınç altında su verilmiş ve basınç altında numunelerdeki su işleme (nüfuz etme) derinliğinin tayini yapılmıştır.

2.4.3. Kılcal geçirimsizlik testi

Katkısız ve katkıli karışımlar kullanılarak hazırlanan numuneler 7 gün iki farklı kür koşullarında (havada ve suda) bekletildikten sonra deformasyon kontrollü yükleme test cihazı ile çatlatılmış ve kılcal geçirimsizlik tayini yapılmıştır. Çatlatıldıktan 28 gün sonra aynı kür koşullarında bekletilen çatlatılmış numuneler üzerinde tekrar kılcal geçirimsizlik tayini yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Kılcal geçirimsizlik deneyi TS EN 13057 "Beton yapılar-korunma ve tamir için mamul ve sistemler- deney metodları- kılcal su emme direnci tayini" standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Bu standarda göre belirli aralıklarla 24 saat süresince ölçümler alınmıştır.

Katkılı ve katkısız betonlar deformasyon kontrollü yükleme test cihazı kullanılarak Şekil 1a.'de görüldüğü gibi çatlatılmıştır. Her numunede yaklaşık $0,04-0,10$ mm civarında kalıcı çatlak oluştuğu görülmüştür. Oluşturulan çatlakların ölçümü mikroskop ile Şekil 1b'de gösterildiği şekilde yapılmıştır. Çatlak oluşturulduktan sonra 28 gün aynı kür koşullarında bekletilen numunelere ait çatlaklar kılcal geçirimsizlik deneyi öncesi mikroskop yardımıyla tekrar kontrol edilmiştir.



Şekil 1. (a) Kontrollü çatlak oluşturulması; (b) Çatlak ölçümü

2.4.4. Klor iyon geçirimsizliği testi

Çalışma kapsamında klor iyon geçirimsizliği testi de numunelerin geçirgenliklerini incelemek adına uygulanmıştır. Bu kapsamda havada ve suda kür edilen $\text{Ø}100 \times 50$ mm boyutlarındaki silindirik numunelerin 3. gün ve 28. gün sonundaki klor iyon geçirimsizliği ASTM C 1202 standardı göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu test yapılırken ilk önce numuneler hızlı klor iyonu geçirimsizlik testi test hücrelerine yerleştirilmiş ve yerleştirilen bu numunelerin bir ucu %3,0 tuz (NaCl) solüsyonuna diğer ucu da 0,3 M sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonuna daldırılacak şekilde sistem hazneleri ilgili solüsyonlarla doldurulmuştur (Şekil 2). Bu test sırasında, $\text{Ø}100 \times 50$ mm silindirik numunenin iki karşılıklı ucu boyunca 60 V'lık doğru akım (DC) olacak şekilde sabit potansiyel farkı uygulanmıştır. 6 saat sonra numunelerden geçen akım miktarı Coulombs (C) olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2. Klor iyonu geçirimsizlik deney düzeneği

2.4.5. Mikroyapısal analizler

Üretilen katkılı ve katkısız betonların katkı kullanımına bağlı olarak içyapısında oluşan değişimler mikroyapısal analizler yardımıyla analiz edilmiştir. Mikroyapısal analizler için üretilen numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu-SEM (Scanning Electron Microscope) kullanılarak görüntüleme yapılmıştır. Söz konusu analizler için 28 günlük kürlenme yaşında basınç dayanımı testine tabi tutulan kübik numunelerden örnekler alınmıştır. Numune alınırken ilk olarak nispeten büyük boyutlardaki basınç dayanımı testi numuneleri küçük parçalara ayrılmış ve kırılan parçalar arasından 20-25 gram ağırlığında olacak şekilde rastgele numuneler seçilmiştir. Bir gün boyunca fırında kurutulduktan sonra bu numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu ile (Tescan-GAIA3+Oxford XMax 150 EDX) analizler yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basınç Dayanımı Testi

Tablo 4, katkısız ve katkılı beton numunelerin basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Deney sonuçları incelendiğinde beklenildiği gibi kür süresi uzadıkça üretilmiş numunelerin karışım içeriğinden bağımsız olarak basınç dayanımlarında artma eğilimi olduğu görülmektedir. 28 günün sonunda, havada kür edilmiş numuneler için kaydedilen maksimum basınç dayanımı sonuçları 60,1 MPa (KB), 59,8 MPa (GKB1), 58,6 MPa (GKB2) iken suda kür edilmiş numuneler için kaydedilen maksimum basınç dayanımı sonuçları 65,7 MPa (KB), 64,6 MPa (GKB1), 62,7 MPa (GKB2) olmuştur.

Tablo 4. Basınç dayanımı test sonuçları

Numune yaşı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)					
	23 °C'de havada kür edilmiş numuneler			23 °C'de suda kür edilmiş numuneler		
	KB	GKB1	GKB2	KB	GKB1	GKB2
3 gün	35,9 (2,87)*	35,4 (2,72)	35,1 (3,01)	36,1 (2,96)	36,8 (3,14)	35,8 (2,91)

7 gün	41,2 (2,93)	43,5 (2,94)	44,1 (3,83)	46,2 (1,77)	48,5 (3,45)	48,4 (2,76)
28 gün	60,1 (3,66)	59,8 (3,78)	58,6 (3,91)	65,7 (4,00)	64,6 (3,42)	62,7 (2,96)

*Standart sapma

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde numune yaşından bağımsız olarak suda kür edilmiş numunelerin havada kür edilmiş numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sonuçları sergilediği görülmektedir. Tüm karışımlar için geçerli olan bu durum numune yaşı arttıkça daha belirgin bir hal almıştır. Genel olarak, bulgular, karışım tasarımıyla bağımsız olarak, katkılı beton numunelerin, katkısız numunelerle karşılaştırılabilir basınç dayanımları sergilediğini göstermektedir. Her iki kür koşulunda da katkılı beton karışımlarında katkı kullanımına bağlı olarak sadece 28 günlük dayanım değerlerinde ihmal edilebilecek derecede düşüşler tespit edilmiştir. Katkı kullanımına bağlı olarak gözlemlenen bu düşüşler GKB2 numunelerinde nispeten daha belirgin olmuştur. 7 günlük numune yaşlarında katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmiş olsa da genel olarak katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur.

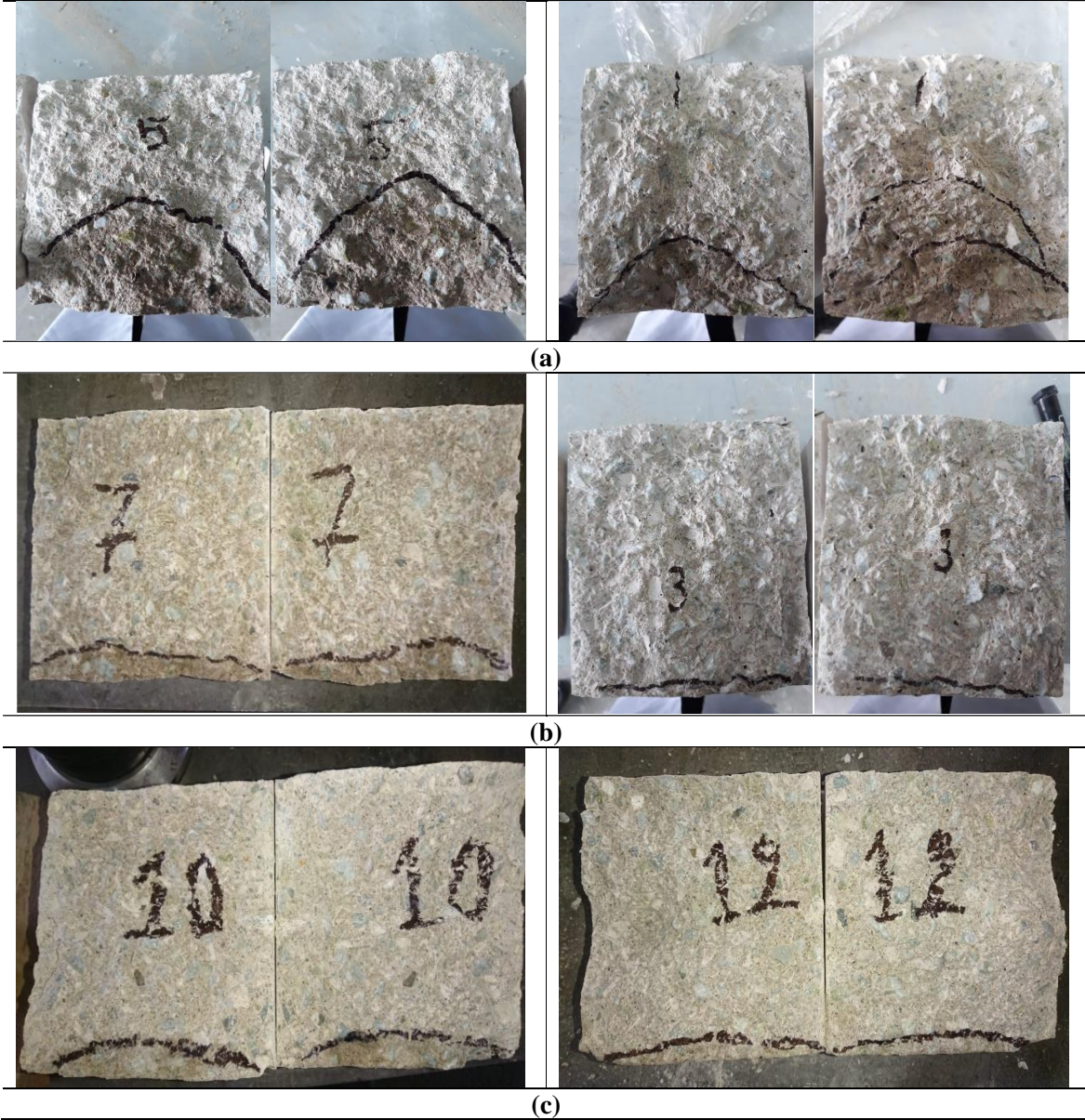
3.2. Basınçlı Su Geçirimsizlik Testi

23 °C'de laboratuvar şartlarında ve 23 °C suda kür koşullarında 28 gün bekletilen katkılı ve katkısız beton numunelerine basınçlı su altında uygulanan su geçirimsizlik testlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te ve test numunelerine ait test sonrası görüntüler de Şekil 3'te sunulmuştur.

Tablo 5. Basınçlı su geçirimsizlik deney sonuçları

Numuneler	23 °C de havada kür edilmiş	23 °C de suda kür edilmiş
	Ortalama Su Derinliği (mm)	Ortalama Su Derinliği (mm)
KB	69,0	44,7
GKB1	12,5	4,7
GKB2	15,0	9,5

Tablo 5'ten beton numunelerine ait basınçlı su geçirimsizlik deney sonuçları incelendiğinde katkılı numuneler üzerinde gözlemlenen ortalama su derinliklerinin katkısız numunelere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Şekil 6'dan da işaretlenmiş su derinlikleri incelendiğinde katkı kullanımına bağlı olarak numune içerisindeki su hareketinin kısıtlandığı anlaşılmaktadır. Buradan katkı kullanımına bağlı olarak numunelerin mikroyapısının değiştiği, boşluk miktarının azaldığı ve buna bağlı olarak geçirimsizlik özelliklerinin kayda değer ölçüde iyileştiği açıkça söylenebilir. Katkılı numuneler kendi içerisinde kıyaslandığında GKB1'in GKB2'ye göre daha geçirimsiz bir özellikte olduğu söylenebilir. Kür koşulları açısından numunelerin basınçlı su geçirimsizlik deney sonuçları incelendiğinde ise suda kürlenmiş numunelerin geçirimsizliğinin daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.



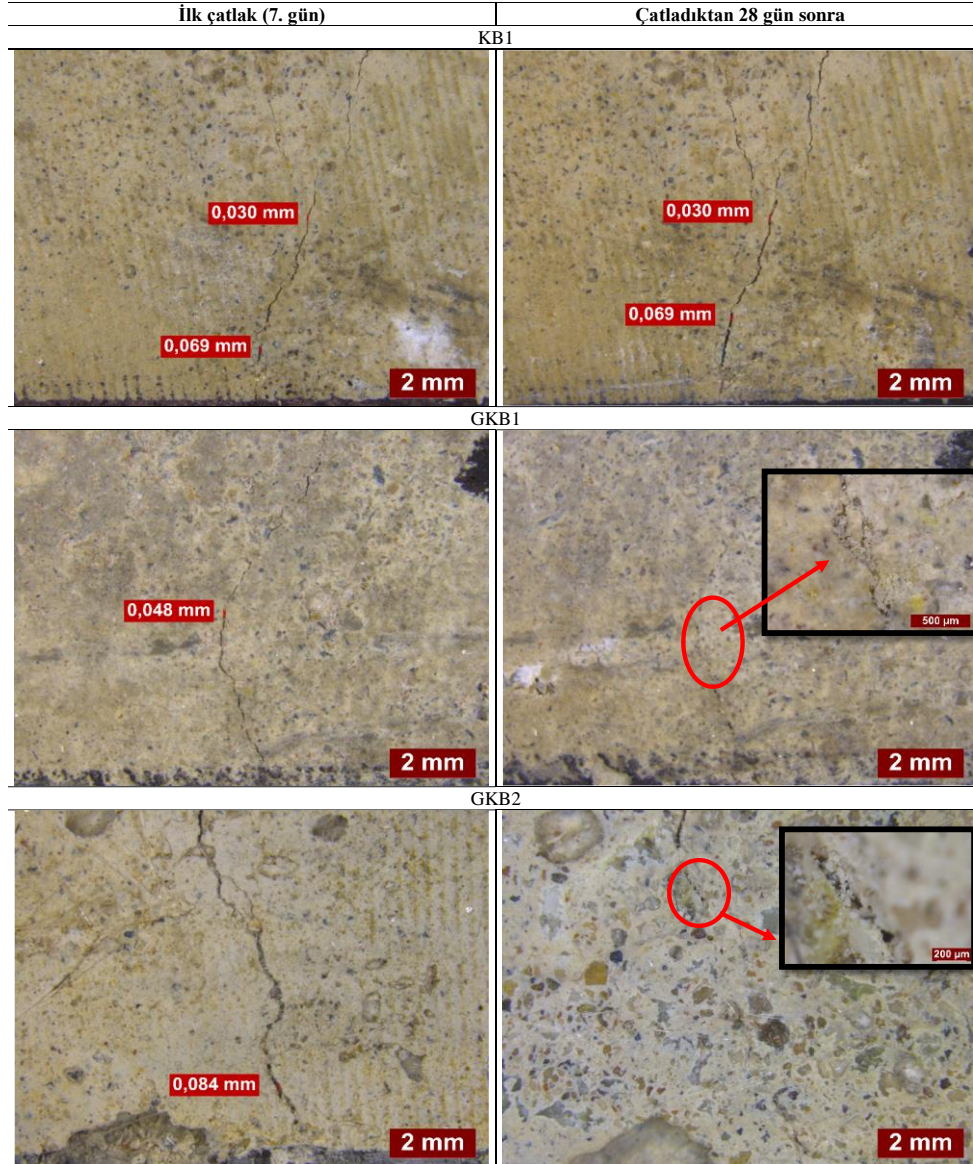
Şekil 3. Karışımlara ait ortalama su derinlikleri: (a) KB; (b) GKB1; (c) GKB2 [havada kür (sol), suda kür (sağ)]

3.3. Kılcal Geçirimlilik Testi

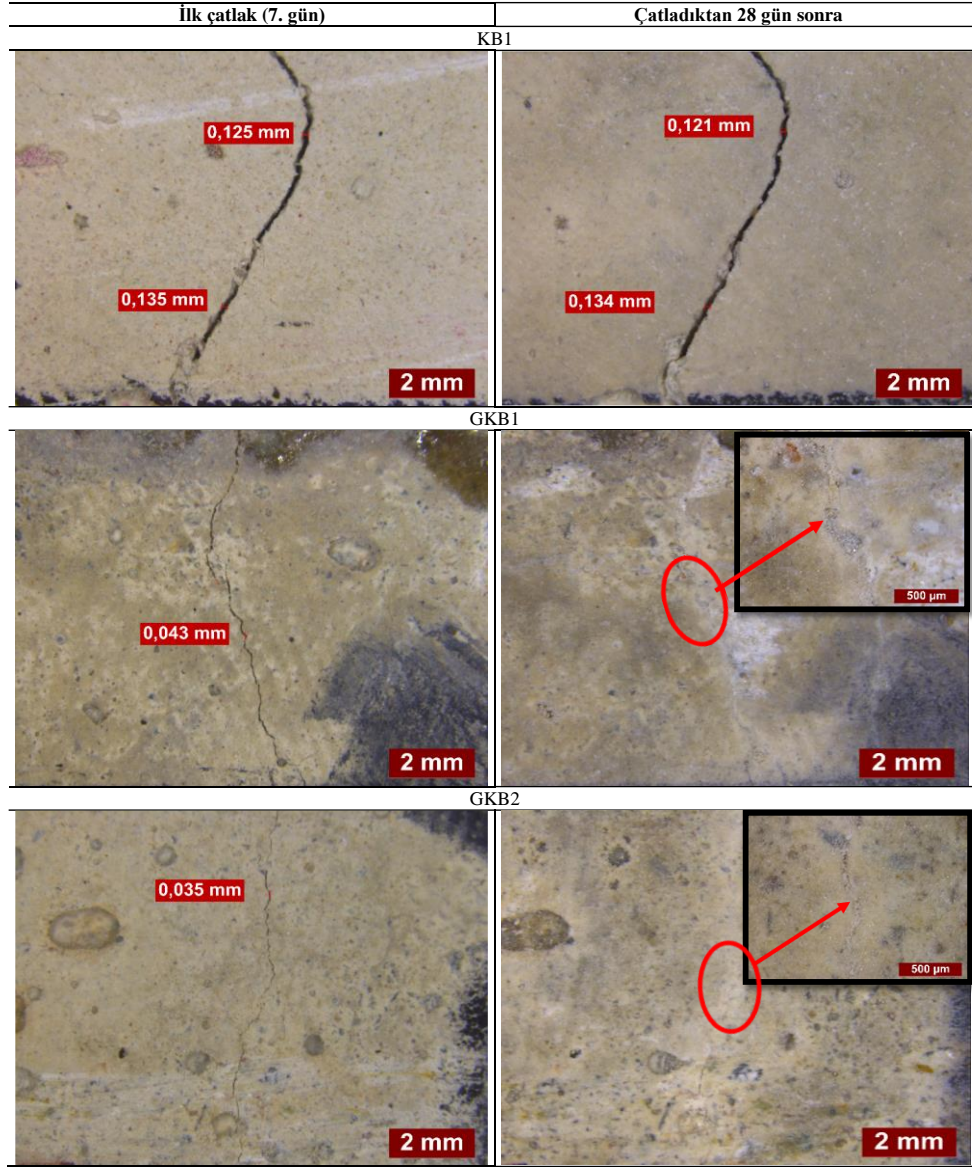
Katkılı ve katkısız numunelerden elde edilen ortalama kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri Tablo 6'da sunulmuştur. Ayrıca çatlak ölçümleri yapılan havada ve suda kür edilmiş numunelere ait görüntüler Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Katkısız numunelerden elde edilen ortalama kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri incelendiğinde çatlattıldıktan sonra 28 gün kadar devam eden kür sürecinin bu numunelerin kılcal geçirimsizliğini azaltma yönünde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu kılcal geçirimsizliğin artan yaşa göre azalmaması durumu havada kür edilmiş katkısız numune için daha belirgin olmuştur. Aynı durum katkılı numuneler özelinde değerlendirildiğinde katkı kullanımına bağlı olarak çatlattılmış numunelerin geçirimsizliğinin devam eden ilave kür süreci sonrasında azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum GKB1 karışımı için daha belirgin olmuştur ve kullanılan katkıların çatlattılmış beton numunelerinin mikroyapısını geçirimsizlik lehine iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Katkılı numuneler açısından kür türünün etkisi değerlendirildiğinde çatlattılmış beton numunelerinin geçirimsizliklerinin suda küreme sonrasında daha fazla iyileştiği anlaşılmaktadır. Şekil 4 ve Şekil 5'ten çatlak ölçümleri yapılan havada ve suda kür edilmiş numunelere ait görüntüler incelendiğinde ise kılcal geçirimsizlik testine paralel olarak katkı kullanılmış beton numunelerinin zamana bağlı olarak çatlaklarının incelendiği açıkça görülmektedir.

Tablo 6. Katkılı ve katkısız numunelerde ortalama kılcal geçirimsizlik katsayıları [$g/(m^2 \times s)$]

Numuneler	23°C de havada kür edilmiş numuneler			23°C de suda kür edilmiş numuneler		
	Çatladıktan Hemen Sonra	Çatladıktan 28 gün Sonra	İyileşme yüzdesi	Çatladıktan Hemen Sonra	Çatladıktan 28 gün Sonra	İyileşme yüzdesi
KB1	0,117	0,115	%1,7	0,10	0,096	%4,00
GKB1	0,135	0,100	%25,9	0,11	0,057	%48,2
GKB2	0,085	0,065	%23,5	0,097	0,060	%38,1



Şekil 4. 23 °C'de havada kür edilmiş numuneler



Şekil 5. 23°C'de suda kür edilmiş numuneler

3.4. Klor İyon Geçirirliği Testi

Bu çalışma kapsamında katkı ve katkısız olarak üretilmiş beton numunelerinin klor iyonundaki zamana ve katkı kullanımına bağlı olarak oluşan değişimler Tablo 7'de sunulmuştur. Sonuçlardan kür koşulundan bağımsız olarak artan yaş ile hızlı klorür iyonu geçirirlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Her iki numune yaşı içinde havada kür edilmiş numunelerden daha yüksek hızlı klorür iyonu geçirirlik değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç daha önce detaylandırılan basınçlı su geçirirlik testi ve kılcak geçirirlik testi sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Katkı kullanımının beton numunelerin geçirirliği üzerindeki etkileri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde 3 gün ve 28 gün sonunda farklı eğilimler gözlemlenmiştir. 3 günlük sonuçlara göre katkı kullanımı beton numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirirlik değerlerini artırırken 28 günlük sonuçlara göre bu değerler katkı kullanımına bağlı olarak kayda değer düzeyde düşmüştür. ASTM C1202, hızlı klorür iyonu geçirirliğini, hesaplanan Coulomb değerlerine dayanılarak, “Yüksek klor geçirgenliği”nden “İhmal edilebilir klor geçirgenliği”ne kadar olmak üzere beş sınıf olarak sınıflandırılmaktadır. Bu açıdan sonuçlar değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile karışımların hızlı klorür iyonu geçirirliği sınıfları 28 gün sonunda orta düzeyden çok düşük seviyesine geçmiştir. Her iki kür durumu içinde 28 gün sonunda en düşük hızlı klorür iyonu geçirirlik değerleri GKB1 karışımından elde edilmiştir.

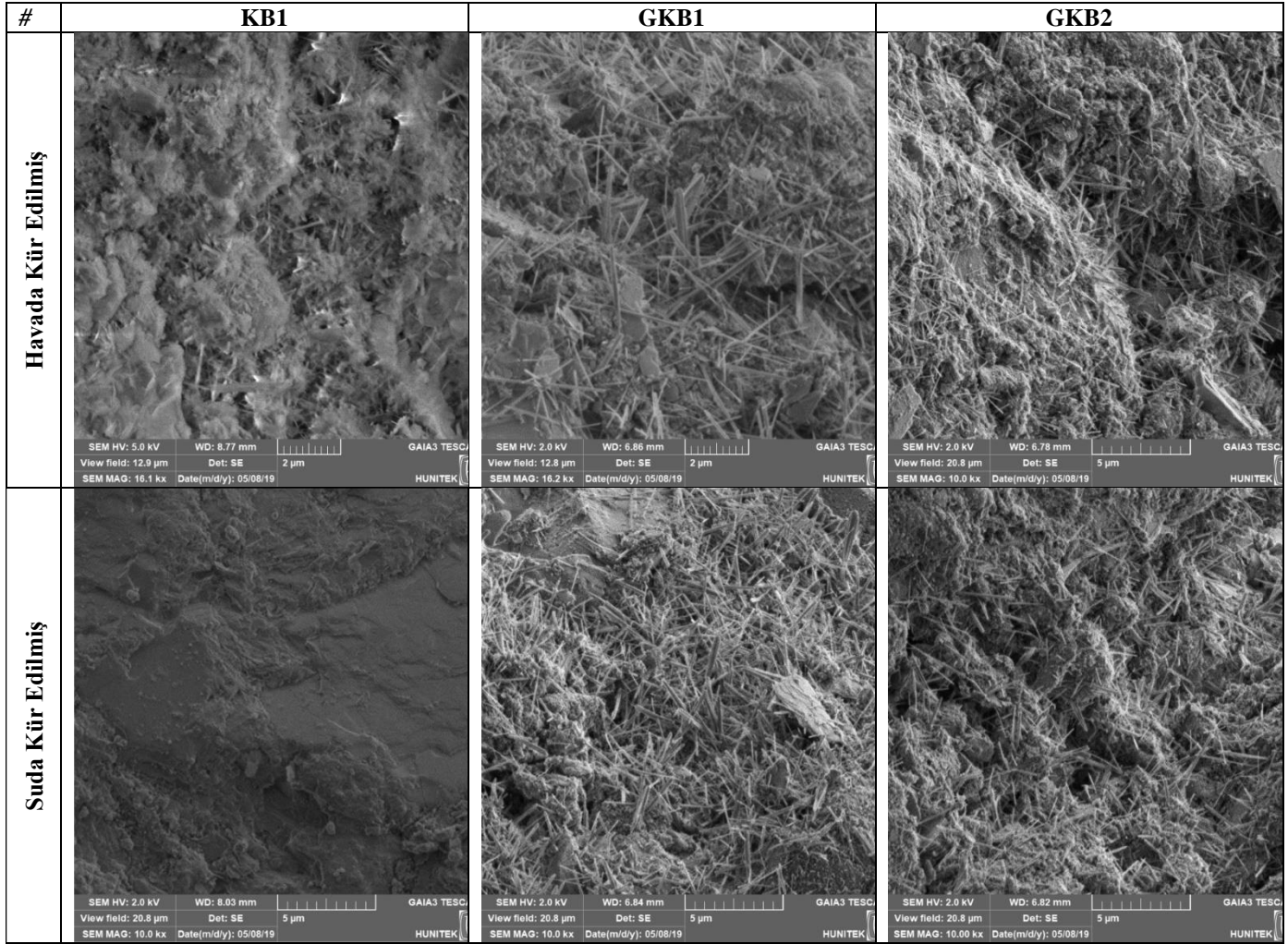
Tablo 7. Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik değerleri

Numuneler	Geçen akım Coulomb (Ortalama)*			
	23°C de havada kür edilmiş numuneler		23°C de suda kür edilmiş numuneler	
	3 gün	28 gün	3 gün	28 gün
KB1	2452	1120	2350	980
GKB1	2510	650	2410	520
GKB2	2550	720	2450	570

* Coulomb Değerlerine Göre Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizliği Sınıfları: >4.000: Yüksek, 2.000-4.000: Orta, 1.000-2.000: Düşük, 100-1.000 :Çok Düşük, <100: İhmal Edilebilir (ASTM C1202)

3.5. Mikroyapısal Analiz Testi

Katkısız ve kristalize geçirimsizlik katkıları kullanılarak oluşturulan numunelerden 28 gün sonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen görüntüler Şekil 6'da gösterilmiştir. Görüntülerden katkı beton karışımlarında katkı kullanımına bağlı olarak ciddi oranda kristal oluşumu tespit edilmiştir.



Şekil 6. SEM analizi sonuçları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı kristalize geçirimsizlik katkısının beton malzemesinin geçirimsizlik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisi basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, basınçlı su geçirimsizliği ve klor iyon geçirimsizliği deneyleri ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımlarında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur. 7 günlük numunelerde katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmişken 28 günlük numunelerin dayanım değerlerinde ihmal edilebilecek derecede düşüşler tespit edilmiştir.

- Basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçlarından geçirimsizlik katkısı kullanımına bağlı olarak numunelerin mikroyapısının değiştiği, boşluk miktarının azaldığı ve buna bağlı olarak geçirimsizlik özelliklerinin kayda değer ölçüde iyileştiği görülmüştür. Katkı kullanılan numunelerde katkı kullanılmayan numunelere kıyasla daha kısa mesafede su nüfuzu olmuştur.
- Kılcal geçirimsizlik deneyi sonuçları çatlatılmış numunelerin geçirimsizliğinin katkı kullanımına bağlı olarak devam eden ilave kür süreci sonrasında azaldığını ortaya koymaktadır. Yapılan görsel incelemelerden katkı kullanılmış beton numunelerin zamana bağlı olarak çatlaklarının katkı kullanımına bağlı olarak incelendiği görülmüştür.
- Geçirimsizlik katkısı kullanımı 28 gün sonunda beton numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimsizlik değerlerini kayda değer düzeyde düşürmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, geçirimsizlik katkısı kullanımının geçirimsizliği azaltma konusunda oldukça etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Buradan geçirimsizlik katkılarının beton malzemesinin dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabileceği açıkça anlaşılmaktadır.

Referanslar

ACI Committee, (2016). Report On Chemical Admixtures For Concrete, 212, ACI International.

Al-Akhras, N., Makableh, Y., & Dagamseh, D. A. (2022). Evaluating composite nanomaterials to control corrosion of reinforcing steel using different tests. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00963. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00963

Alexander, M. G., & Stanish, K. (2005, August). Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factor approach. In *Mindess Symposium, Third Int. Conference on Construction Materials*, Vancouver.

Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulaijan, S. U., & Al-Amoudi, O. S. B. (2003). Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement and concrete composites*, 25(4-5), 473-481. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00087-2

Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and building materials*, 15(2-3), 93-103. doi: 10.1016/S0950-0618(00)00058-1

Beeldens, A., & Vandewalle, L. (2001). Durability of high strength concrete for highway pavement restoration. In *Third International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading-CONSEC 01* (pp. 1230-1238).

Bossio, A., Faella, G., Frunzio, G., Guadagnuolo, M., & Serpieri, R. (2021). Diagnostic reliability in the assessment of degradation in precast concrete elements. *Infrastructures*, 6(11), 164. doi: 10.3390/infrastructures6110164

Chang, P. K., Peng, Y. N., & Hwang, C. L. (2001). A design consideration for durability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 375-380. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00089-5

Gojević, A., Ducman, V., Netinger Grubeša, I., Baričević, A., & Banjad Pečur, I. (2021). The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-healing and permeability of concrete. *Materials*, 14(8), 1860. doi: 10.3390/ma14081860

Hassani, M., Vessalas, K., Sirivivatnanon, V., & Baweja, D. (2017). Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete. *ACI Mater. J*, 114, 911-922.

Hwang, C. L., Liu, J. J., Lee, L. S., & Lin, F. Y. (1996). Densified mixture design algorithm and early properties of high performance concrete. *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 8(2), 217-219.

Jiang, Z. L., Pan, Y. J., Lu, J. F., & Wang, Y. C. (2022). Pore structure characterization of cement paste by different experimental methods and its influence on permeability evaluation. *Cement and Concrete Research*, 159, 106892. doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106892

Kubal, M. T. (2000). *Construction Waterproofing Handbook*, McGraw-Hill, 544.

Kumar, M., Anand, A., Chatterjee, R., Sharma, S., Maiti, T. K., Dwivedi, S. P., Saxena, A., Li, C., & Eldin, E. M. T. (2022). Investigation on Carbonation and Permeability of Concrete with Rice Husk Ash and Shop Solution Addition. *Materials*, 15(17), 6149. doi: 10.3390/ma15176149

Lohtia, R., Joshi, R., & Ramachandran, V. (1995). *Concrete Admixtures Handbook—Properties*. Science and Technology. Second edition, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1153.

Liu, B., Qin, J., & Sun, M. (2019). Influence of silane-based impregnation agent on the permeability of concretes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 3443-3450. doi: 10.1007/s12205-019-1121-z

Mailvaganam, N. P., Rixom, M. R., Manson, D. P., & Gonzales, C. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. E&FN Spon, London, UK, 437.

- Matar, P., & Barhoun, J. (2020). Effects of waterproofing admixture on the compressive strength and permeability of recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101521. doi: 10.1016/j.job.2020.101521
- Mehta, P. K., & Burrows, R. W. (2001). Building durable structures in the 21st century. *Concrete international*, 23(3), 57-63.
- Mehta, P.K., (1986). "Concrete: structure, properties, and materials" Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 353-367.
- Muhammad, N. Z., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Shafaghat, A., & Mirza, J. (2015). Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. *Construction and Building Materials*, 101, 80-90. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048
- Munn, R. L.; Kao, G.; & Chang, Z. T. (2003), "Performance and Compatibility of Permeability Reducing and Other Chemical Admixtures in Australian Concretes," Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP-217, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 361-379.
- Nematzadeh, A., Aytakin, B., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Effect of mineral additives and permeability reducing admixtures having different action mechanisms on mechanical and durability performance of cementitious systems. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(5), 1277-1291. doi: 10.1007/s11709-021-1752-2
- Nyame, B. K., & Illston, J. M. (1981). Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste. *Magazine of Concrete Research*, 33(116), 139-146. doi: 10.1680/mac.1981.33.116.139
- Oh, B. H., Cha, S. W., Jang, B. S., & Jang, S. Y. (2002). Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. *Nuclear Engineering and Design*, 212(1-3), 221-231. doi: 10.1016/S0029-5493(01)00484-8
- Pal, S., Shariq, M., Abbas, H., Pandit, A. K., & Masood, A. (2020). Strength characteristics and microstructure of hooked-end steel fiber reinforced concrete containing fly ash, bottom ash and their combination. *Construction and Building Materials*, 247, 118530. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118530
- Rathore, K., Agrawal, V., & Nagar, R. (2022). Effect of waste sandstone microfines on mechanical strength, abrasion resistance, and permeability properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 61, 571-578. doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.299
- Saran, O., & Demiröz, A. (2023). Enhancement of the Strength and Permeability Properties of an Expansive Soil Using Chopped Basalt Fibers and Silica Fume. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(1), 9. doi: 10.1007/s40891-023-00431-4
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741-751. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088
- Skoglund, P., & Johansson, L. (2003). "Research Regarding the Automatic Correction (Self-Healing) of Cracks in Concrete," Project No. 2003-75, Swedish Cement and Concrete Institute.
- Tibbetts, C. M., Riding, K. A., & Ferraro, C. C. (2021). A critical review of the testing and benefits of permeability-reducing admixtures for use in concrete. *Cement*, 6, 100016. doi: 10.1016/j.cement.2021.100016