

ÇATLAK ÖZELİKLERİNİN ÇİMENTOLU MALZEMENİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNE ETKİSİ

EFFECTS OF CRACK PROPERTIES ON SELF-HEALING OF CEMENTITIOUS MATERIALS

Ayşegül Dağdeviren, Berkin Atahan Gökbayrak, Burcu Akçay*

Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

*Burcu.Akçay@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada kristal oluşturarak çatlaklarda kendiliğinden iyileştirme sağlayan mineral katkı malzemesi harç karışımlarına eklenmiştir. Kristal oluşturan katkıları, hidrasyon reaksiyonu sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek boşluk dolduran reaksiyon ürünleri oluşturmaktadırlar. Bu reaksiyonların gerçekleşerek kendiliğinden iyileşmenin görülebilmesi hasar olarak da nitelendirilebilen çatlakların özelliklerine bağlıdır. Değişik zamanlarda oluşmuş ve değişik büyüklüklerde çatlaklara sahip olan çimentolu karışımlarda kendiliğinden iyileşme oranlarının da farklı olması beklenir. Bu etkiyi belirleyebilmek için sabit bir su/çimento oranında işlenebilir harç karışımları hazırlanmıştır. Bu harç karışımlarında farklı genişlik ve derinlikte çatlaklar oluşturulmuştur. Daha sonra bu örneklerdeki çatlakların zamana bağlı kapanma oranları belirli aralıklarla optik mikroskop altında takip edilmiştir. Farklı özelliklerde çatlaklara sahip olan kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen harçların su geçirimsizlik özellikleri ve dayanım gelişimi de incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kristal oluşturan katkı, kendiliğinde iyileşme, kılcal su emme.

Abstract

In this study, mineral additives that provide self-healing of cracks by forming crystals were added to the mortar mixtures. Crystal-forming additives react with calcium hydroxide produced as a result of the hydration reaction, forming reaction products that fill the voids. The realization of these reactions and the possibility of self-healing depend on the characteristics of the cracks, which can also be described as damage. The degrees of self-healing are expected to be different in cementitious mixtures that have formed at different times and have cracks of different sizes. To determine this effect, workable mortar mixtures at a constant water/cement ratio were prepared. Cracks of different widths and depths were formed in these mortar mixtures. Then, the time-dependent closure rates of the cracks in these samples were monitored under the microscope at regular intervals. The permeability properties and strength development of mortars with

and without crystal-forming additives, which have cracks with different properties, were also examined.

Keywords: Crystal forming additive, self-healing, capillary water absorption.

1. GİRİŞ

En yaygın kullanılan yapı malzemesi olan betonun dürabilite sorunlarına yol açan çatlak oluşumuna eğilimli olması ve bu çatlakların artan tamirat maliyetleri nedeniyle betonda kendiliğinden çatlak iyileşmesi gündemde olan bir araştırma konusudur. Çimentolu malzemelerin tamamen otojen yollardan çatlakları iyileştirme etkisi olduğu bilinmektedir [1-3]. Suyun çatlak yüzeylerindeki anhidr çimento taneciklerine ulaşmasıyla hidrasyon ve dolayısıyla doğal ya da otojen olarak ifade edilen iyileşme başlar. Hem suyun hem de karbondioksitin çatlak içinde olduğu durumda otojen iyileşme yıkanmış kalsiyum hidroksitin karbonatlaşması ile de oluşur. Ancak çimento tanecik boyutunun geçmiş yıllara göre küçük olması nedeniyle anhidr tanecik miktarı çok daha azdır ve bu nedenle günümüz betonlarında otojen iyileşme yapılarında daha azdır. Diğer yandan yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların düşük su ve yüksek çimento miktarlarıyla üretilmesiyle otojen iyileşmede artışlar olmaktadır [4]. Ancak bu tip betonlarda otojen rötre çatlaklarının oluşması nedeniyle bu iyileşmenin etkisini değerlendirmede karışıklıklar yaşanır [5]. Betonda yaygın kullanılan mineral katkıların otojen iyileşme üzerinde etkileri vardır. Özellikle hidrasyonu yavaş olan cüruf ve uçucu külün otojen iyileşmede olumlu etkileri olur. Çatlak oluşumu ile henüz reaksiyona girmemiş olan bu mineral katkıları ortamdaki kalsiyum hidroksit ve su ile reaksiyona girerek çatlakları doldurabilecek ürünler oluştururlar, böylece su sızdırmazlık ve dayanım tekrar kazanılır [6-9].

Çimentolu malzemenin otojen olarak ifade edilen kendiliğinden iyileşmesi yeteri kadar hidrasyon ürünü oluşmaması nedeniyle çok ince olanlar dışında çatlakları tam dolduramaz. Daha da etkili olabilecek çeşitli iyileştirme yöntemleri de bulunmaktadır. Sentetik lifler ve şekil hafızalı alaşımlar kullanarak çatlak genişliği sınırlandırılarak otojen iyileştirmenin etkisi arttırılabileceği gibi süper emici polimerler kullanılarak iyileşmeyi sağlayacak su temin edilebilir [10]. Bu yöntemlerin yanı sıra genleşen ajanların, kristal oluşturan katkıların, bakteri ve besin karışımının kullanılması ile çatlakların kapanması sağlanmıştır. Bu maddelerden bir kısmı kapsül ile kaplanmış olarak veya vasküler esaslı mekanizma ile de kullanılabilir.

Bu çalışmada kullanılan kristal oluşturan katkıları ortamda bulunan su ile hidrasyonu arttırarak ve yeniden kristallenme süreci ile kendiliğinden iyileşme sağlar. Oluşan bu ürünün çatlakları doldurmasıyla su geçirimsizliğin kazanılması sağlanır ve varsa sızıntı önlenir. Kristal oluşturan bu yapılar genellikle reaktif silika içermektedir. Bu reaksiyonların gerçekleşerek kendiliğinden iyileşmenin görülebilmesi hasar olarak da nitelendirilebilen çatlakların özelliklerine bağlıdır. Çatlak yapısı ve betonun bulunduğu ortama bağlı olarak literatürde bu katkıların 500 µm'ye kadar olan çatlakları doldurabildiği belirtilirken [11] bazı araştırmacılar 150 µm'ye kadar olan çatlaklarda kendiliğinden iyileşmenin olduğunu göstermiştir [12]. Kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesi ile ilgili henüz standart bir yöntem yoktur. Çalışmalarda çatlak kapanmasının ölçülmesi, dürabilite deneyleri, mekanik geri kazanımın belirlenmesi ve mikro yapı incelemeleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Değişik zamanlarda ve değişik

büyükliklerde çatlaklara sahip olan çimentolu karışımlarda kendiliğinden iyileşme oranlarının da farklı olması beklenir. Bu etkiyi belirleyebilmek için bu çalışmada sabit bir su/çimento oranında işlenebilir harç karışımları hazırlanmıştır. Bu harç karışımlarında farklı genişlik ve derinlikte çatlaklar oluşturulmuştur. Daha sonra bu örneklerdeki çatlakların zamana bağlı kapanma oranları belirli aralıklarla mikroskop altında takip edilmiştir. Bunun yanı sıra kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen örneklerin su geçirimsizlik özellikleri ve dayanım gelişimi incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Deneysel çalışmada CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılarak su/çimento (s/ç) oranı 0,35 olan harç karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımların bir kısmında kendiliğinden iyileşmeyi sağlayacak kristal oluşturan katkı çimento ağırlığının %1,5'i kadar kullanılmıştır. Kullanılan çimento ve kristal oluşturan katkının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Çimentoca zengin olan karışımlarda hacimce %30 oranında birim ağırlığı (DYK halde) ve su emme değeri sırasıyla 2400 kg/m³ ve %2,1 olan doğal kuvarz kumu kullanılmıştır (ASTM C127 -C128 1994). Taze harçların işlenebilir olması için ticari olarak bulunan polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi

Oksit içeriği (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO
CEM I 42.5 R	65,66	23,12	4,12	3,42	0,30	0,90	2,61	1,21
Kristal oluşturan katkı	73,26	13,84	3,74	2,22	1,23	0,38	3,89	0,76

2.2. Yöntem

Standart RILEM karıştırıcısında hazırlanan harç örnekleri 10 cm çapında 2,5 cm yüksekliğindeki disk numunelerine yerleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda yarılmada çekme ön yüklemesi ile en fazla 200 µm genişliğinde olması amaçlanarak çatlak oluşturulmuş örneklerde kendiliğinden iyileşme incelenmişti. Bu çalışmada ise çatlak genişliği ve derinliğinin birlikte kontrollü olabilmesi için harçlar taze halde iken önceden boyutları hazırlanmış plastik aparatlar üst yüzeye yerleştirilmiştir. Aparatlar belirlenen günlerde dikkatlice çıkarılarak çentikler oluşturulmuştur. Bu çentikler üzerinde rasgele belirlenen farklı üç yatay doğrultu boya ile çizilerek ölçüm yapılmak üzere seçilmiştir. Daha sonra kristal ürünlerin oluşması ile temsili çatlakların kapanması optik mikroskop ile alınan fotoğraflarda görüntü analizleri ile belirlenmiştir. Yapıda gerçekte oluşan çatlak yapısına benzemeyen bu çatlak oluşturma şekliyle amaçlanan kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen karışımlarda derinlikleri bilinen ancak değişen genişlikte olan ve farklı zamanda ürünlerle dolmaya başlayan çatlaklarda kendiliğinden iyileşmenin gözlemlenmesidir. Kristal oluşturan katkıların harçların dayanımına etkisini belirleyebilmek için 40×40×160 mm ölçülerinde prizmatik örnekler dökülmüştür. Kılcallık deneyi ise 28 gün sonunda ASTM C 1585 (2013) standardına uygun olarak yapılmıştır. Her deney grubu kalıba yerleştirildikten 24 saat sonra kalıptan çıkarıldı ve standart kür prosedürü uygulandı. Disk numunelerindeki çatlakların su ile temasına 3.

veya 14. günde izin verilerek yapıda bu günlerde oluşacak çatlakların ürünlerle dolma kapasitesi temsil edilmiştir. Böylece 3 mm ve 6 mm olmak üzere iki farklı derinlikte; değişen genişlikte ve üretildikten sonra yukarıda belirtilen iki farklı günde oluşan çatlakların temsil edildiği durum harç örneklerinde gözlemlenmiştir. Serilerin isimlendirilmesinde belirtilen çatlak özellikleri kullanılmıştır. Örneğin D3-C3-N isimlendirmesinde D harfinden sonra gelen sayı çatlak derinliğini (mm), C harfinden sonra gelen sayı çatlakın oluşturulduğu günü, N harfi ince çatlak (W harfi varsa daha geniş çatlak) göstermektedir. Kristal oluşturan katkı içeren karışımları belirtmek için seri adlarına X harfi eklenmiştir.

Tablo 2. Görüntü alınan serilerin özellikleri

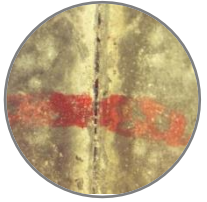
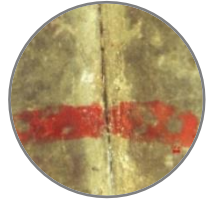
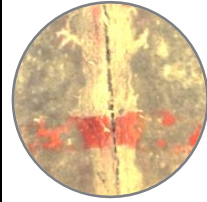
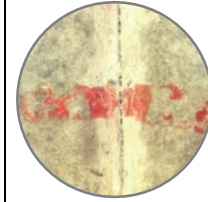
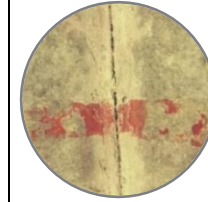
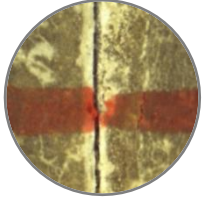
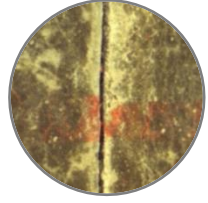
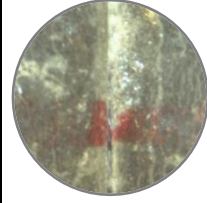
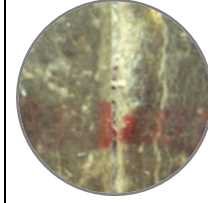
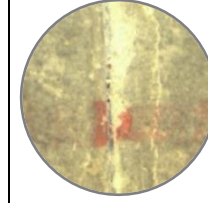
Seri ismi	Çatlak Derinliği	Çatlak oluşturma yaşı	Çatlak genişliği
D3-C3-N	3 mm	3 gün	dar
D3-C3-W	3 mm	3 gün	geniş
D3-C14-N	3 mm	14 gün	dar
D3-C14-W	3 mm	14 gün	geniş
D6-C3-N	6 mm	3 gün	dar
D6-C14-N	6 mm	14 gün	dar

3. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

3.1. Çatlak Kapanması

Temsili çatlaklar oluşturulduktan 1, 3, 7, 28 ve 90 gün sonra kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen örneklerin fotoğrafları çekilmiştir. Seçilmiş bazı örneklerin görüntüleri Tablo 3'te verilmiştir.

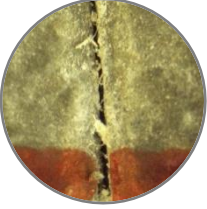
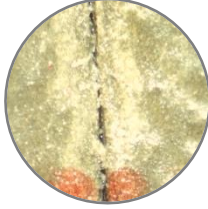
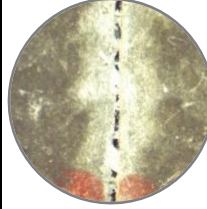
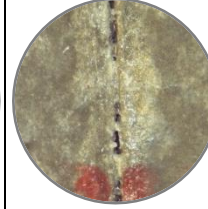
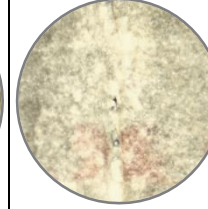
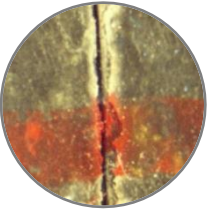
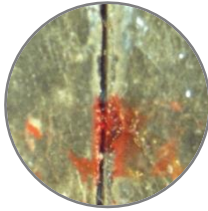
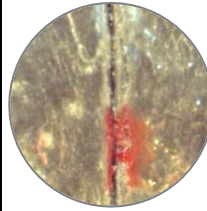
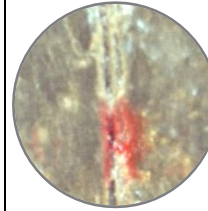
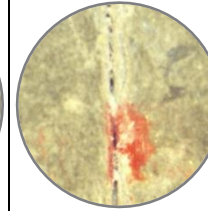
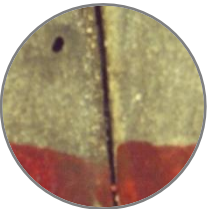
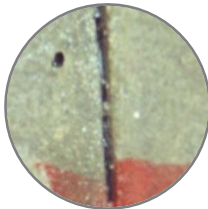
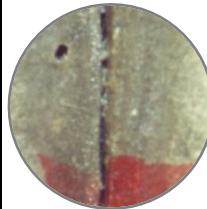
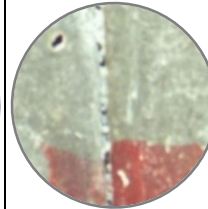
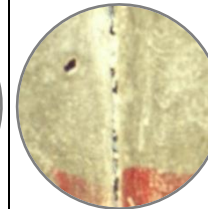
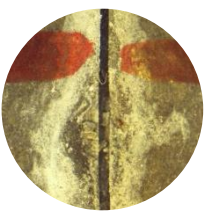
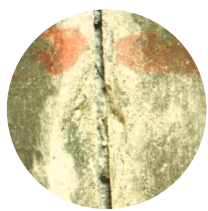
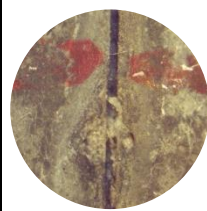
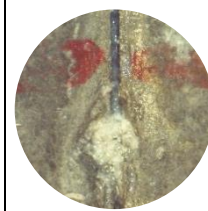
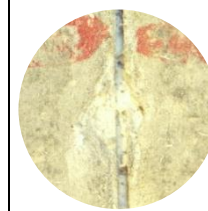
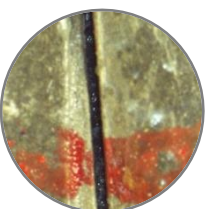
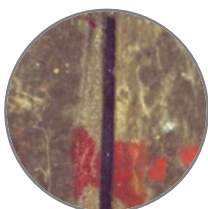
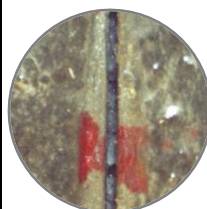
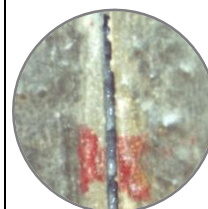
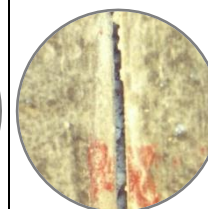
Tablo 3. Kristal oluşturan katkı içermeyen referans örnek ile içeren örneğin farklı yaşlardaki çatlakların karşılaştırmalı görüntüleri

Görüntü alınma zamanı (çatlak oluşturulduktan sonra)					
	+1 gün	+3 gün	+7 gün	+28 gün	+90 gün
D3-C3-N					
X-D3-C3-N					

Tablo 3'te 3 mm derinlikte, üretildikten 3 gün sonra oluşturulan ince çatlağın belirtilen günlerdeki mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Referans serilerin kristal oluşturan katkıların ilave edildiği X-D3-C3-N serisinin görüntüleri ile karşılaştırıldığında 7. günden itibaren bu serilerde belirgin bir kendiliğinden iyileşmenin olduğu görülmektedir.

Tablo 4'te ise kristal oluşturan katkı içeren bazı serilerden alınan fotoğraflar görülmektedir. Verilen görüntüler incelendiğinde kristal oluşturan katkı kullanımı ile 6 mm derinliğindeki çatlaklarda da ürünler oluşarak kendiliğinden iyileşmenin daha ileri yaşlarda sağlanabildiği görülmüştür (X-D6-C3-N). Çatlak genişliğinin daha büyük olduğu X-D3-C3-W ve X-D3-C14-W serilerinde ise bu iyileşmenin sınırlı olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Kristal oluşturan katkı içeren harçlarda farklı özellikteki çatlakların kapanmalarını gösteren mikroskop görüntüleri

		Görüntü alınma zamanı (çatlak oluşturulduktan sonra)				
		+1 gün	+3 gün	+7 gün	+28 gün	+90 gün
X-D6-C3-N						
						
						
						
						

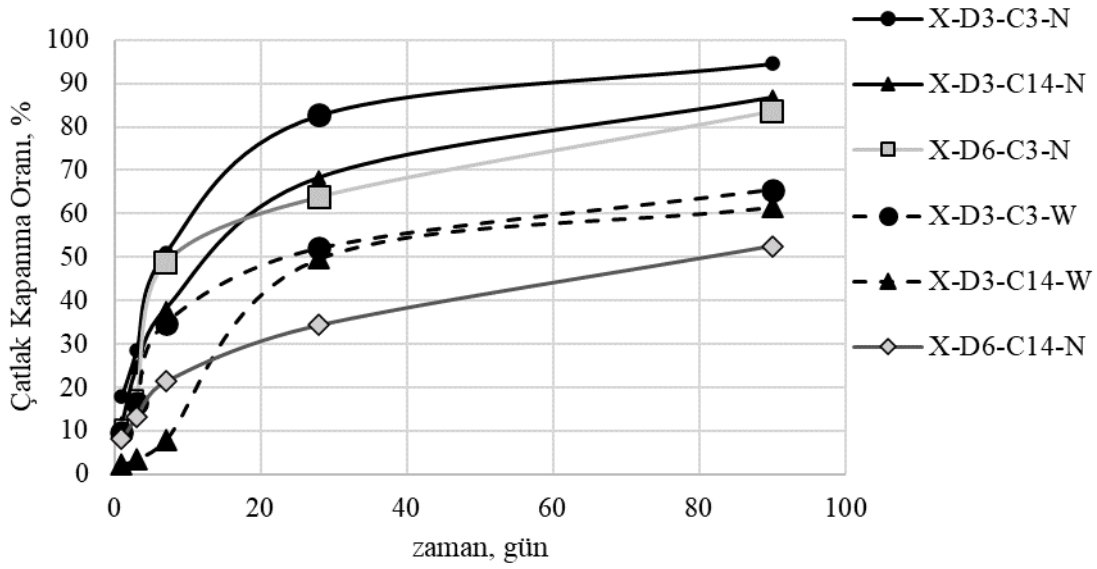
Elde edilen tüm mikroskop fotoğrafları görüntü işleme programlarında incelenmiş ve çatlak açıkları belirlenmiştir. Her bir seriden iki disk numunesi üzerinde üç farklı yerden alınan toplam 6 çatlak genişliği ölçümlerinin ortalaması alınarak zamanla oluşan kendiliğinden çatlak kapanma oranları hesaplanmıştır. Her bir seri için elde edilen sonuçlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Tüm görüntülerden elde edilen ortalama çatlak genişliği ve ortalama çatlak kapanma oranları

Seri ismi	Ortalama çatlak genişliği (μm)	Ortalama çatlak kapanma oranı (%)				
		+1 gün	+3 gün	+7 gün	+28 gün	+90 gün
D3-C3-N	340	0,90	2,62	13,53	20,39	20,39
D3-C3-W	518	0,79	2,54	11,05	18,39	18,39
D3-C14-N	287	1,26	3,57	3,57	11,59	11,59
D3-C14-W	483	0,56	2,61	3,48	3,48	3,48
D6-C3-N	175	4,58	10,03	11,11	11,11	11,11
D6-C14-N	267	0	0	1,1	1,1	1,1
X-D3-C3-N	296	17,87	28,42	51,04	82,67	94,56
X-D3-C3-W	544	9,54	16,36	34,84	52,0	65,49
X-D3-C14-N	210	11,63	24,63	38,22	68,41	86,81
X-D3-C14-W	427	2,19	3,41	7,81	49,65	61,52
X-D6-C3-N	263	10,95	17,92	48,80	63,81	83,44
X-D6-C14-N	157	8,12	13,07	21,36	34,33	52,54

Tablo 5'te görüldüğü gibi kristal oluşturan katkı içermeyen örneklerde otojen iyileşmenin olduğu ve çatlak genişliğinin az olduğu sığ çatlakların (3 mm derinlikte) erken yaşlarda oluşması durumunda kapanma oranlarının daha geç olanlara göre daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Çatlak genişliğinin artması ile beklenildiği gibi kapanma oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Daha ileri yaşlarda başlayan kendiliğinden iyileşmenin de sınırlı olduğu belirlenmiştir. Çatlak derinliğinin de etkili bir parametre olduğu, derin çatlakların 90. gün gibi ileri yaşlarda dahi dolmadığı görülmektedir.

Kristal oluşturan katkı içeren örneklerin sonuçları ise Şekil 1'de grafik olarak verilmiştir. Çatlak kapanma oranlarının yüksek olması (bazı örneklerde tam iyileşme-%100 kapanma oranları tespit edilmiştir) katkının etkin bir şekilde beklenen işlevini yerine getirdiğini göstermiştir. Ortalama çatlak kapanma oranı en yüksek olan serinin 3 gün sonra 3 mm derinliğinde ve ince çatlak içeren seri olduğu görülmektedir. Çatlak genişliği arttıkça çatlak kapanma oranının düştüğünün, ancak kristal oluşturan katkı kullanımında referans serilerinin aksine çatlak oluşma zamanının daha az etkili bir parametre olduğu; bu serilerde de yüksek kendiliğinden iyileşme değerleri görülmektedir. Bu katkılar ile özellikle erken yaşlarda oluşacak dar çatlakların ürünler ile dolarak kapanmasının gerçekleşmesi tespit edilmiştir.



Şekil 1. Kristal oluşturan katkı içeren harçların farklı zamanlardaki ortalama çatlak kapanma oranları

3.2. Mekanik Özellikler

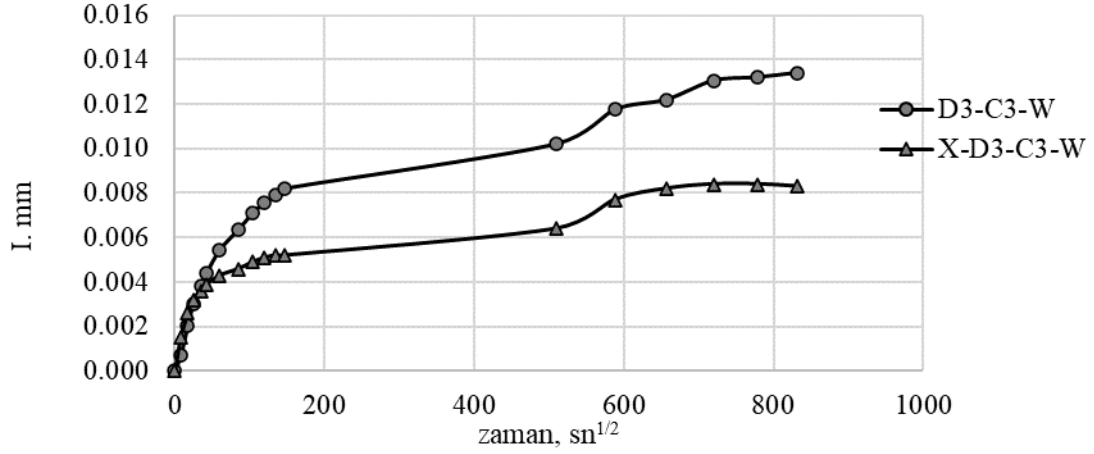
Kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımlarının 3., 7. ve 28. gündeki ortalama sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Kristal oluşturan katkı kullanımının harçların basınç ve eğilme dayanımı üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Tablo 6. Kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen referans harç örneklerinin mekanik dayanımları

	Basınç Dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
Referans	53,0	61,3	68,8
Kristal oluşturan katkı içeren	53,4	60,4	71,6
	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
Referans	12,1	14,1	14,1
Kristal oluşturan katkı içeren	12,5	13,8	12,8

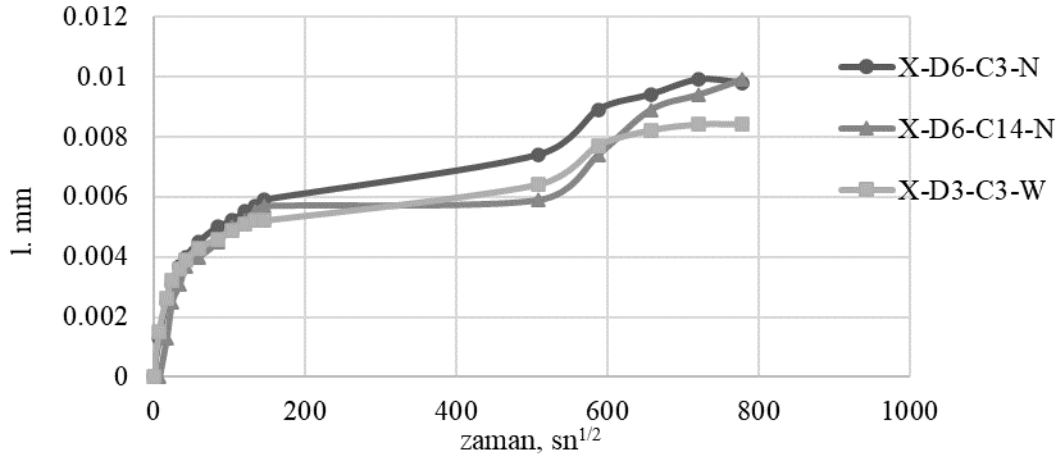
3.2. Kılcal Su Emme Deneyi

Üretilen harçların ASTM C 1585 standardına uygun olarak ölçülen kılcal su emme zaman grafikleri elde edilmiştir. Kristal oluşturan katkı içeren harçların su işleme derinlikleri (l) içermeyen harçlara göre incelenen tüm serilerde daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Şekil 2'de örnek olarak 3 mm derinliğinde çatlak içeren 3 gün sonra kendiliğinden iyileşmenin başladığı geniş çatlakla sahip örneklerin karşılaştırması verilmiştir. Görüldüğü üzere katkı içeren harçların su işleme derinliği içermeyen harca göre belirgin derecede düşüktür.



Şekil 2. Kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen harçların kılcal yolla su emme derinlikleri

Kristal oluşturan katkı içeren harçlarda ise çatlak derinliği, genişliği ve oluşturulma yaşı değişen tüm örneklerin kılcal su işleme derinliklerinin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür (Şekil 3). Bu durum kullanılan katkı sayesinde çatlakların ürünler ile dolarak kendiliğinden iyileşmenin tüm serilerde etkili olduğunu gösterir.



Şekil 3. Kristal oluşturan katkı içeren bazı harçların kılcal yolla su emme derinlikleri

4. SONUÇLAR

Temsili çatlaklar oluşturulmuş kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen harç örneklerinde yapılan deneysel incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Derinliği ve genişliği az olan erken yaşlarda oluşan çatlaklara sahip olan harçların optik mikroskop altındaki görüntüleri incelendiğinde kristal oluşturan katkı içeren karışımda 7. günden itibaren belirgin bir kendiliğinden iyileşmenin olduğu görülmüştür.

- Çatlak genişliğinin daha büyük olduğu X-D3-C3-W ve X-D3-C14-W serilerinde ise bu iyileşmenin sınırlı olduğu belirlenmiştir.
- Çatlak genişliği arttıkça çatlak kapanma oranının düştüğünün, ancak kristal oluşturan katkı kullanımında referans serilerinin aksine çatlak oluşma zamanının daha az etkili bir parametre olduğu; bu serilerde de yüksek kendiliğinden iyileşme değerleri olduğu görülmüştür.
- Kristal oluşturan katkı kullanımının harçların basınç ve eğilme dayanımı üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Kristal oluşturan katkı içeren harçların su işleme derinliği içermeyen harca göre belirgin derecede düşük bulunmuştur.

Teşekkür

Yazarlar deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin temini için Xypex-Topsit A.Ş., Nuh Çimento A.Ş. ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.’ye teşekkür ederler.

Kaynaklar

1. Hearn N., “Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?”, *Materials and Structures*, No. 31(212), pp. 563-567, 1998.
2. Edvardsen C., “Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete”, *ACI Materials Journal*, No. 96(4), pp. 448-454, 1999.
3. Neville A., “Autogenous healing – a concrete miracle?”, *Concrete International*, No. 24(11), pp. 76-82, 2002.
4. Granger S., Loukili A., Pijaudier-Cabot G., Chanvillard G., “Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: mechanical tests and acoustic emission analysis”, *Cement and Concrete Research*, No. 37(4), pp. 519-527, 2007.
5. Akcay B., Tasdemir M.A., “Effects of distribution of lightweight aggregates on internal curing of concrete”, *Cement and Concrete Composites*, No. 32(8), pp. 611-616 2010.
6. Ahn T.H., Kishi T., “Crack self-healing behaviour of cementitious composites incorporating various mineral admixtures”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, No. 8(2), pp. 171-186, 2010.
7. Sahmaran M., Keskin S.B., Ozerkan G., Yaman I.O., “Self-healing of mechanically loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, No. 30(10), pp. 872-879, 2008.
8. Van Tittelboom K., Gruyaert E., Rahier H., De Belie N., “Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation”, *Construction and Building Materials*, No. 37, pp. 349-359, 2012.

9. Tziviloglou E., Wiktor V., Jonkers, H., Schlangen E, “Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks”, *Construction and Building Materials*, No. 122, pp. 118-125, 2016.
10. Snoeck D., Steuperaert S., Van Tittelboom K., Dubruel P., De Belie N., “Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography”, *Cement and Concrete Research*, No. 42(8), pp. 1113–1121, 2012.
11. Ferrara L., Van Mullem T., Alonso M.C., Antonaci P., Borg R.P., Cuenca E., Jefferson A., Ng P.L., Peled A., Roig-Flores M., Sanchez M., Schroefl C., Serna P., Snoeck D., Tulliani J.M., De Belie N., “Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: a state of the art report by COST Action SARCOS WG2”, *Construction and Building Materials*, No. 167, pp. 115–142, 2018.
12. De Belie N., Gruyaert E., Al-Tabbaa A., Antonaci P., Baera C., Bajare D., Darquennes A., Davies R., Ferrara L., Jefferson T., Litina C., Miljevic B., Otlewska A., Ranogajec J., Roig-Flores M., Paine K., Lukowski P., P Serna., Tulliani J.- M., Vucetic S., Wang J., Jonkers H.M., “A review of self-healing concrete for damage management of structures”, *Advanced Materials Interfaces*, No. 5, pp.1-28, 2018.