



## Agrega Tane Boyut Dağılımı ve PP Lif Kullanımının Betonda Plastik Rötre Çatlağı Oluşumu Üzerine Etkileri

### *Effects of Aggregate Particle Size Distribution and Use of PP Fiber on the Plastic Shrinkage Cracking in Concrete*

Hasan Nuri TÜRKMEÑOĞLU<sup>1\*</sup>, Hakan Nuri ATAHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. [turkmenoglu@itu.edu.tr](mailto:turkmenoglu@itu.edu.tr)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4765-8590>

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. [atahanh@itu.edu.tr](mailto:atahanh@itu.edu.tr)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7917-3021>

#### MAKALE BİLGİLERİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 1 Temmuz 2022  
Revizyon 20 Temmuz 2022  
Kabul 21 Temmuz 2022  
Online 30 Eylül 2022

##### Anahtar Kelimeler:

beton, plastik rötre, çatlak, çatlak azalma oranı, polipropilen lif

#### ÖZ

Plastik rötre betonun henüz sertleşmediği zaman diliminde meydana gelen yüzeysel bir çatlak türüdür. Temel nedeni beton yüzeyindeki buharlaşma hızının betonun terleme hızından yüksek olmasına bağlı olarak yüzeyin kurumasıdır. Böylece beton yüzeyi büzölmeye başlarken, alt kısımlarda kalan beton plastik kıvamda olduğu için yüzey ile benzer büzölmeyi gösteremez ve yüzeyde harita şeklinde çatlaklar oluşur. Yapılan çalışmada, toplam agrega hacminin sabit olduğu 3 farklı agrega tane boyut dağılımına sahip beton ve 2 farklı polipropilen lif değişik oranlarda kullanılarak plastik rötre üzerine etkileri incelenmiştir. Deneylerde yöntem olarak ASTM C1579 standardı esas alınmış olup çatlak parametreleri deney sırasında çekilen fotoğraflar işlenerek elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha iri agrega tane boyut dağılımının çatlak oluşumunu önlemede daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Fakat çatlağı önlemek için kullanılan liflerin etkinliği agrega tane boyut dağılımı irileştikçe azalmıştır. Diğer yandan kullanılan lifler plastik rötre çatlağını belirgin bir şekilde engellemişlerdir ancak aynı boydaki liflerden narinliği daha yüksek olan monofilament lifin kullanıldığı betonlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 1 July 2022  
Received in revised form 20 July 2022  
Accepted 21 July  
Available online 30 September 2022

##### Keywords:

concrete, plastic shrinkage, crack, crack reduction rate, polypropylene fiber

#### ABSTRACT

Plastic shrinkage is a type of crack that occurs on the concrete surface before hardening. The main reason for plastic shrinkage is the drying of the surface due to the evaporation rate on the concrete surface being higher than the bleeding rate of the concrete. Thus, while the concrete surface begins to shrink, the concrete remaining in the inner part cannot show the same shrinkage as the surface because it has a plastic consistency, and eventually, map-shaped plastic shrinkage cracks form on the surface. In the current study, the effects on plastic shrinkage were investigated by using 3 different aggregate particle size distributions and 2 different polypropylene fibers in different ratios, where the total aggregate volume is constant. The method specified in the ASTM C 1579 standard was taken into account and the crack parameters were obtained by processing the photographs taken during the experiment. The obtained results revealed that the coarser aggregate particle size distribution was more successful in preventing crack formation. However, the effectiveness of the fibers used to prevent cracking decreased as the aggregate particle size distribution became coarser. On the other hand, all the fibers used significantly prevented plastic shrinkage cracking, but better results were obtained from the concretes in which monofilament fiber with higher slenderness was used than the other fiber of the same length.

Doi: 10.24012/dumf.1138905

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Kompleks yapısı nedeniyle beton kullanımında pek çok problemle karşılaşmaktadır. Bu problemlerden bir tanesi olan plastik rötre çatlağı (PRÇ), beton henüz sertleşmeden önce yüzeyde meydana gelen çatlak türüdür. Beton kalıplara yerleştirildiğinde özgül ağırlığı yüksek olan katı beton bileşenleri aşağıya doğru çökerken su yukarı doğru hareket eder ve bu olaya betonun terlemesi adı verilir. Eğer betonun bulunduğu ortamdaki buharlaşma hızı betonun terleme hızından daha yüksek ise beton yüzeyi kuruyacak ve su kaybından dolayı beton yüzeyi büzülme çalışacaktır. Diğer yandan hala plastik kıvamda olan betonun iç kısımlarında yüzeyde meydana gelen büzülme oluşamayacağı için beton yüzeyinde harita şeklinde plastik rötre çatlakları oluşacaktır. Bu çatlakların gözle görülebilir boyuta gelmesi genellikle priz başlangıcından itibaren olmakta ve priz bitene kadar genişlemeye devam etmektedir [1].

PRÇ ile sıcak ve rüzgârlı hava gibi buharlaşma hızının yüksek olduğu çevresel etkilere maruz kalan geniş yüzeyli beton elemanlarda sıklıkla karşılaşmaktadır [2]. PRÇ her ne kadar yüzeyel bir çatlak olsa da oluştuktan sonra zararlı sıvı ve gazların betona girişini hızlandırmakta ve böylece betonun durabilitesini ve servis ömrünü düşürmektedir [3], [4]. Bununla birlikte bu çatlaklar oluştuktan sonraki tamirat işlemleri çok fazla zamana ve paraya mal olmaktadır [5]. Farklı türde betonlarda PRÇ riskini azaltmak için, karışım tasarımı, kür yöntemleri, kimyasal veya mineral katkı kullanımı, lif kullanımı ve yüzey düzeltme yöntemleri gibi pek çok parametreyi inceleyen çalışmalar yapılmıştır.

Lif kullanımı PRÇ riskini önlemede kullanılan en etkili yöntemlerden biridir [6]. Bilindiği üzere plastik haldeki betonun çekme dayanımı çok düşüktür ve artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte daha da düşmektedir [7]. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda yüksek dayanım sağlaması beklenmeyen kısa boylu liflerin PRÇ riskini azaltmak amacıyla harç ve betonlarda kullanımı artmıştır ve genellikle çelik, cam, bazalt, sentetik veya doğal lif (keten lif, selülozik lif vb.) gibi lif türleri kullanılmaktadır [8], [9]. Yapılan çalışmalarda daha çok kullanım oranı, geometri ve lif türü gibi parametrelerin farklı kombinasyonlarının PRÇ riskine karşı etkinliği araştırılmıştır. Örneğin aynı geometrik özelliklere sahip liflerin kullanılması durumunda lifler incelikle ve boyları uzadıkça PRÇ riskini önleme performansları artmıştır [10], [11]. Fakat lif boyunun etkinliği, belirli bir uzunluk değerinden sonra azalma göstermektedir [9].

Kimyasal katkıların PRÇ üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalara göre priz hızlandırıcı ve kıvam düzenleyici katkıları PRÇ miktarını artırırken priz geciktirici, rötre azaltıcı ve kür katkıları azaltmaktadır [12]–[14]. Rötre azaltıcı katkıların etki mekanizması, karışım suyunun yüzey gerilimini düşürerek buharlaşmayı, betonun oturma miktarını ve yüzeyde gerilme oluşumunu azaltma şeklindedir [15]–[17]. Örneğin, suya %1 gibi düşük oranlarda eklendiğinde bile suyun yüzey gerilimini etkin bir şekilde azaltmaktadır. Bu durum kapiler gerilmelerin oluşumunu azaltır ve böylece katı tanecikler arasındaki mesafe korunmuş olur [18].

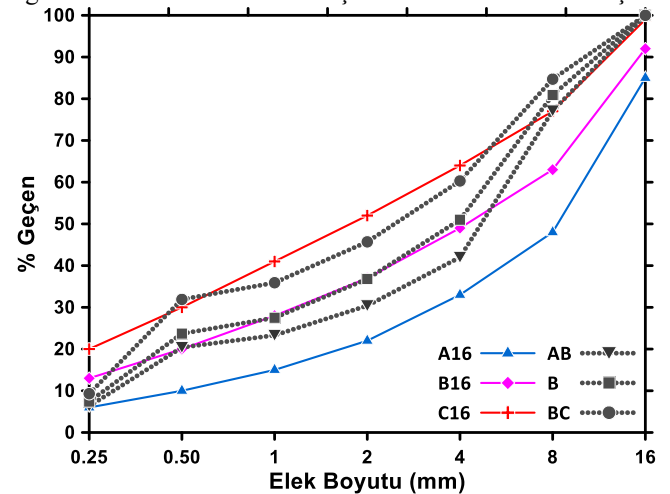
Mineral katkıların etkisine bakılacak olursa mikro silika ve nano silika kullanımı su ihtiyacını artırdığı ve negatif kapiler

basıncın daha erken oluşmasına neden olduğu için PRÇ riskini artırırken [19]–[21], su ihtiyacını azaltan ve priz süresini uzatan uçucu külün kullanımı PRÇ riskini azaltmıştır [22]. Benzer şekilde karışıma mineral katkı olarak kil eklenmesi de su ihtiyacını artırdığı için PRÇ oluşumunu ciddi bir oranda artırmıştır [23]. Diğer yandan, su/bağlayıcı oranının düşmesi ile priz süresi kısalmakta ve terleme miktarı azalmaktadır bu durum da PRÇ riskini artırmaktadır [9], [24]. Bunlarla birlikte yüzey düzeltme hızı, düzeltme yönü ve yüzey bitirme işlemlerinin de PRÇ oluşumu üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Örneğin yüzey düzeltme hızının artması veya düzeltme işlemini uzun kenar doğrultusunda yapma çatlak miktarını artırırken ikincil veya kısa kenar doğrultusunda yüzey düzeltme işlemleri çatlak miktarını azaltmıştır [25]. Son yüzey düzeltme işleminin PRÇ miktarını azaltması, oluşmaya başlayan çatlakların dolarak yarı akışkan betonun yüzeyi kaplaması ile ilişkilendirilmiştir [26]. Ayrıca beton sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkın artması da PRÇ riskini artırmaktadır [14].

Yukarıdaki paragraflarda görüldüğü üzere PRÇ'yi etkileyen pek çok parametre vardır. Yapılan çalışmalar arasında karışım tasarımında agrega tane boyut dağılımının etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda, yapılan çalışmanın hedefi agrega tane boyutu dağılımının ve aynı türden farklı geometriye sahip liflerin PRÇ oluşumuna karşı etkinliklerinin araştırılmasıdır. Aynı zamanda farklı agrega tane boyutu dağılımlarının, polipropilen (PP) liflerin PRÇ'yi engelleme performansı üzerine etkisi de irdelenecektir.

## Malzeme ve Karışım Özellikleri

Yapılan çalışma kapsamında, en büyük tane boyutu ASTM C 1579 [27] standardında belirtilen 19 mm şartını sağlayacak şekilde, 4-16 mm kırma taş (kum taşı), 0-4 mm kırma kum (kum taşı) ve 0-4 mm doğal kum olmak üzere 3 tip agrega kullanılmıştır. Agrega tane boyutu dağılımları belirlenirken toplam agrega hacmi içerisindeki iri agrega oranı %40, %50 ve %60 olacak şekilde 3 farklı agrega karışımı belirlenmiş ve bu agrega karışımlarının kullanıldığı betonlar sırasıyla BC, B ve AB olarak adlandırılmıştır. Karışımlara ait agrega tane boyutu dağılım grafikleri, TS 802'de [28] tanımlanan standart eğriler ile birlikte Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Karışımlara ait agrega tane boyutu dağılım eğrileri.

Şekil 1’de agrega tane boyutu dağılım eğrileri verilen BC, B ve AB karışımlarına ait incelik modülü değerleri sırasıyla 3.32, 3.73 ve 4.01’dir. Çalışmada bağlayıcı olarak CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Tüm karışımlarda çimento miktarı  $350 \text{ kg/m}^3$  ve su miktarı  $192.5 \text{ kg/m}^3$  olmak üzere sabit tutulmuştur (su/çimento=0.55). Beton karışımları hazırlanırken Sika marka Sikament RMC210 kodlu süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. BC, B ve AB kodlu referans beton karışımlarında eşit kıvam elde edilecek şekilde, kimyasal katkı kullanım miktarları çimento ağırlığına oranla sırasıyla %1.1, %0.9 ve %0.8 olarak belirlenmiş ve her bir gruptaki tüm betonlarda bu oranlar sabit tutulmuştur.

Referans betonlardan en yüksek çatlak genişliğini elde edebilmek için gerekli karışım parametrelerine karar verebilmek amacıyla farklı s/ç oranı, çimento dozajı ve kıvam değerlerine sahip 18 deneme betonu üretilip plastik rötre deneyine tabi tutulmuştur. Karışımlarda kullanılan malzemelere ait özgül ağırlık değerleri Tablo 1’de ve deneme üretimleri sonrası belirlenen beton karışım tasarım bilgileri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Özgül ağırlık değerleri ( $\text{g/cm}^3$ ).

Malzeme	Özgül Ağırlık
Çimento	3.17
Doğal Kum	2.64
Kırma Kum	2.76
Kırma Taş	2.76
Akışkanlaştırıcı	1.19
PP Lif	0.91

Tablo 2. Beton karışım bilgileri ( $\text{kg/m}^3$ ).

Karışım Kodu	Çim.	Su	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş	Lif
Ref			267	466	1117	0
AB 600	350	192.5	267	465	1116	0.6
900			267	465	1116	0.9
1100			267	465	1115	1.1
B Ref			303	614	931	0
600	350	192.5	302	614	930	0.6
900			302	613	929	0.9
1100			302	613	929	1.1
BC Ref			445	651	744	0
600	350	192.5	444	650	743	0.6
900			444	650	743	0.9
1100			444	650	743	1.1

Betonların üretiminde fibrile ve monofilament olmak üzere 2 farklı geometriye sahip PP lif kullanılmış olup liflere ait fotoğraf Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Monofilament (A) ve fibrile (B) life ait fotoğraf.

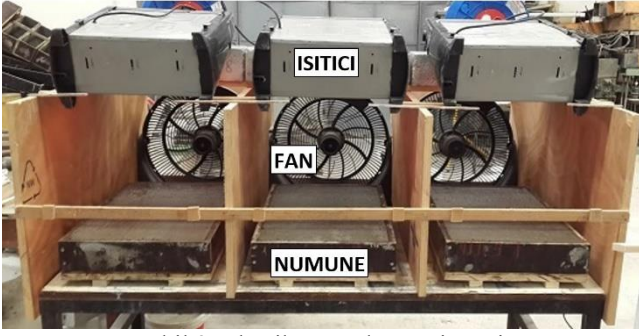
Çalışmada kullanılan liflerin uzunlukları eşit olup  $12 \text{ mm}$ ’dir. Fibrile lifin denyesi 1200 iken monofilament lifin denyesi 2.5 – 6 aralığındadır (ortalama çap  $25 \mu\text{m}$ ). Her bir karışım grubunda kullanılacak lif dozajları 600, 900 ve  $1100 \text{ g/m}^3$  olarak seçilmiştir.

## Deneysel Çalışma ve Kullanılan Yöntemler

Tablo 2’de görüldüğü üzere, her bir agrega tane boyut dağılımı grubu içerisinde, 1 adet referans ve 3 farklı kullanım oranına sahip 2 tip PP lifin kullanıldığı 7 adet beton karışımı üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen toplam karışım sayısı 21 olup plastik rötre deneyi için her bir karışımdan 2 adet numune alınmıştır. Beton üretimleri  $40 \text{ lt}$  kapasiteli düşey eksenli mikser kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemeler mikserin kazanına yerleştirildikten sonra kısa bir süre kuru halde karıştırılmış, ardından içerisine kimyasal katkı eklenmiş olan karışım suyu ve son olarak lifler kontrollü bir şekilde eklenmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra TS EN 12350-2 [29] standardına göre kıvam ve TS EN 12350-6 [30] standardına uygun bir şekilde birim ağırlık deneyleri yapılmış, sonrasında bir miktar daha karıştırılan beton hazırlanan kalıplar içerisine 2 katman halinde yerleştirilmiştir. Her bir katman sabit süre ile sarsma işlemine tabi tutulmuş ve son yüzey düzeltilmesi tüm betonlarda aynı yönde ve aynı şekilde yapılmıştır. Ek olarak, farklı agrega tane boyutu dağılımına sahip olan referans betonlardan ek üretimler yapılmıştır. Bu üretimlerden, basınç dayanımını belirlemek için 3’er adet  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  küp numune alınmış ve kalan kısım betonda priz süresinin belirlenmesi deneyi için kullanılmıştır.

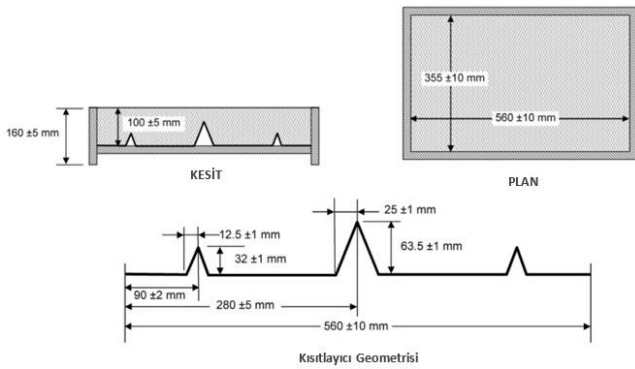
Priz süresi deneyleri TS 2987 [31] standardında belirtilen yonteme göre gerçekleştirilmiştir. Priz süresi deneyi kapsamında, ek olarak üretilen referans betonlardan basınç numuneleri alındıktan sonra kalan kısımlar  $5 \text{ mm}$  göz açıklıklı elekten elenmiş ve elek altına geçen beton  $75 \text{ mm}$  çapındaki deney kapları içerisine yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler plastik rötre deneylerinin yapıldığı test çemberi içerisinde bekletilmiş ve standarda uygun penetrasyon düzeneği kullanılarak priz süreleri belirlenmiştir. Kalıplardan söküldükten sonra 28. güne kadar  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklığa sahip kür havuzunda bekletilen sertleşmiş beton numuneleri üzerinde ise TS EN 12390-3 [32] standardına uygun bir şekilde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Plastik rötre deneyinde, Şekil 3’te gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır. Verilen şekilde görüldüğü üzere hazırlanan numuneler tünel şeklindeki kanalların içerisine yerleştirilmiştir. Kanalların uç kısmına rüzgâr akışını sağlamak için fanlar ve kanalların üst kısmına numune yüzeyini ısıtmak için infrared ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Oluşturulan deney düzeneğindeki buharlaşma hızı, yüzey alanı  $0.12 \text{ m}^2$  olan su dolu kap kullanılarak  $1.1 \text{ kg/m}^2$ .sa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, fanların numune yüzeyinde oluşturduğu rüzgâr hızı anemometre yardımıyla  $17 \text{ km/sa}$  olarak belirlenmiştir. Bu değerler, ASTM C1579 [27] standardında belirtilen koşulları sağlamaktadır. Bunlara ek olarak her bir deney süresince el tipi veri toplayıcı kullanılarak beton yüzeyindeki sıcaklık ve bağıl nem değerleri de kaydedilmiştir. Bu verilere göre yüzeyde tespit edilen ortalama sıcaklık değeri  $43^\circ\text{C}$  ve rölatif nem oranı %17’dir.



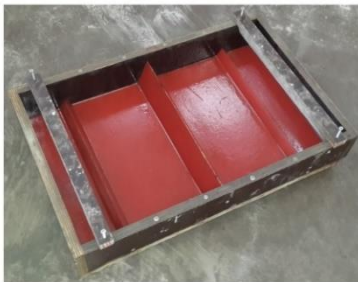
Şekil 3. Plastik rötre deney sistemi.

Plastik rötre deneyinde kullanılan kalıplar ASTM C1579 [27] standardında verilen ölçülere (Şekil 4) uygundur. Ayrıca, ilgili standartta referans betonun elde edilmesi gereken minimum 0.5 mm ortalama çatlak genişliği şartını daha kolay sağlayabilmek için kalıba iki engel daha ilave edilmiştir.



Şekil 4. ASTM C 1579 kalıp boyutları.

Bu engel kalıbın uç kısmı ile küçük engelin tam orta hizasına denk gelecek şekilde kalıbın üst yüzeyine beton yerleştirme işleminden önce vidalar yardımıyla sabitlenmiştir. Ayrıca kalıbın uzun kenarları üzerine, deney sonunda çekilen fotoğrafları işlerken koordinatları belirli referans noktaları oluşturması amacıyla 4'er adet raptiye yerleştirilmiştir. Kullanılan kalıba ait fotoğraf ve kesit görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Plastik rötre deneyi kapsamında kullanılan kalıp ve sematik boyuna kesit görüntüsü.

Kalıplara yerleştirilen betonlar, plastik rötre deney düzeneğindeki kanallara yerleştirildikten sonra fan ve ısıtıcılar çalıştırılarak plastik rötre deneyi başlatılmıştır. Deney başladıktan sonra 4 saat süreyle numuneler takip edilmiş ve belirli aralıklarla yüksek çözünürlüklü fotoğraflar çekilmiştir. Ek olarak, numuneler sisteme yerleştirildikten sonra çatlakların gözle görülebilir olduğu ana kadar geçen

süreler de kaydedilmiştir. Deney sonunda numunelerden çekilen fotoğraflar MATLAB kodu yardımıyla ortografik bir şekilde ölçeklendirilmiş ve bu görüntüler AutoCAD programına aktarılıp çatlak parametreleriyle ilgili ölçümler hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler neticesinde, her bir karışıma ait çatlak boyu, maksimum çatlak genişliği, toplam çatlak alanı gibi değerler belirlenmiştir. Ortalama çatlak genişliği değerleri ise toplam çatlak alanının çatlak boyuna oranlanması ile elde edilmiştir. Karışım parametrelerinin PRÇ'yi önleme performansları belirlenirken ASTM C1579 [27] standardında verilen çatlak azaltma oranı (ÇAO) formülleri kullanılmış olup bu formüller formül (1) ve (2)'de verilmiştir.

$$\text{ÇAO}(\text{Ortalama Çatlak Genişliği}) = \left[ 1 - \frac{(\text{lif katkılı betonun ort. çatlak genişliği})}{(\text{referans betonun ort. çatlak genişliği})} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ÇAO}(\text{Toplam Çatlak Alanı}) = \left[ 1 - \frac{(\text{lif katkılı betonun toplam çatlak alanı})}{(\text{referans betonun toplam çatlak alanı})} \right] \times 100 \quad (2)$$

## Deneyel Sonuçlar ve Değerlendirme

Deneyel çalışmada elde edilen çökme (slump), birim ağırlık ve çatlak başlangıcına kadar geçen süre bilgileri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çökme, birim ağırlık ve ortalama çatlak başlangıç süreleri.

Karışım Kodu	Çökme (Slump) (cm)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Ort. Çatlak Başlangıcı (dk)
REF	15.0	2367	100
BC	600	6.0	2376
	900	3.0	2369
	1100	3.0	2387
B	REF	16.0	2388
	600	4.0	2394
	900	3.0	2406
AB	1100	3.0	2425
	REF	16.0	2397
	600	5.0	2406
AB	900	3.5	2411
	1100	3.0	2426

Daha önce belirtildiği gibi kimyasal katkı miktarı referans karışımlar için benzer çökme değerini elde edecek şekilde BC, B ve AB karışımları için sırasıyla %1.1, %0.9 ve %0.8 olarak belirlenmiş ve lifli karışımlarda da aynı oranlarda kimyasal katkı kullanılmıştır. Tablo 3'te verilen çökme değerlerine bakıldığında, çok az miktardaki lif katkısının bile çökme değerini çok belirgin bir şekilde azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte, 900 ve 1100 g/m<sup>3</sup> lif kullanılan karışımlardan elde edilen çökme değerleri 600 g/m<sup>3</sup> lif kullanılan betona göre biraz daha azalmış olsa da eşit sonuç vermiştir. Bu durum, az miktarda da kullanılsa liflerin kohezyonu etkin bir şekilde artırdığının bir göstergesidir. Fakat burada belirtilmesi gereken önemli bir husus, her ne kadar çökme değerleri çok düşmüş olsa da betonlara sarsma işlemi uygulandığında kolay bir şekilde yerleştikleri gözlemlenmiştir. Diğer yandan karışımlardan elde edilen

birim ağırlık değerlerinin ortalamaları, BC, B ve AB karışımları için sırasıyla 2375, 2403 ve 2410 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Çatlak başlangıcına kadar geçen süreler incelendiğinde ise, BC ve B karışımlarında eklenen lif miktarı arttıkça çatlak başlangıç süresi uzarken AB karışımında genel olarak benzer çıkmıştır. Lif miktarının 600 g/m<sup>3</sup> olduğu karışımlarda ise priz süresi ya değişmemiş ya da kısalmıştır. Ayrıca bütün referans karışımlardan elde edilen priz süreleri 135 dakikadır.

Referans betonlardan alınan 150x150x150 mm boyutlu küp numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ortalamaları, BC karışımı için 45.6 Mpa (st. sap. 2.2 MPa), B karışımı için 48.6 Mpa (st. sap. 0.6 MPa) ve AB karışımı için 46.4 Mpa (st. sap. 1.4 MPa) olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında üretilen betonların basınç dayanımlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

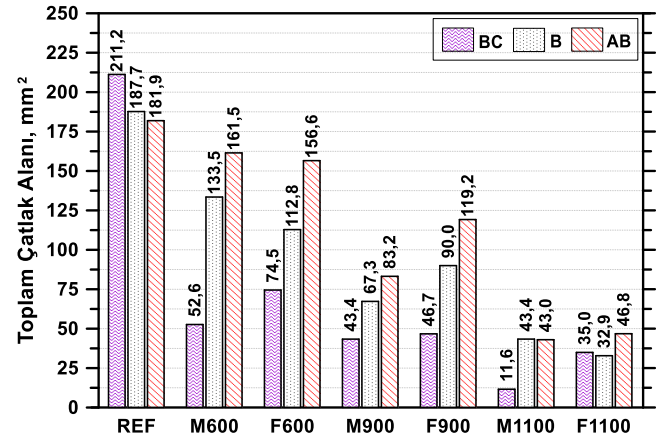
Hatırlanacağı üzere çalışmanın temel hedefi, çatlak alanı ve ortalama çatlak genişliğindeki değişimlere bağlı olarak agrega tane boyut dağılımı, lif geometrisi ve kullanım miktarının PRÇ'yi önlemedeki etkinliklerinin belirlenmesi ile birlikte, agrega tane boyut dağılımının liflerin PRÇ'yi önleme performansı üzerine etkisinin araştırılması olarak belirtilmiştir. Bu doğrultuda PRÇ deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. PRÇ deneyinden elde edilen sonuçlar.

Karışım Kodu	Toplam Çatlak Alanı (mm <sup>2</sup> )	Toplam Çatlak Uzunluğu (mm)	Ort. Çatlak Genişliği (mm)	Maks. Çatlak Genişliği (mm)	Alan ÇAO (%)	Ort. Çatlak Genişliği (%)	
BC	REF	221.2	420	0.50	0.96	-	-
	M600	52.6	307	0.17	0.34	75.1	65.9
	M900	43.4	324	0.13	0.39	79.5	73.4
	M1100	11.6	148	0.08	0.31	94.5	84.4
	F600	74.5	331	0.22	0.48	64.7	55.3
	F900	46.7	344	0.14	0.32	77.9	73.0
	F1100	34.9	358	0.10	0.38	83.5	80.6
B	REF	187.7	450	0.42	0.98	-	-
	M600	133.5	425	0.31	0.79	28.9	24.7
	M900	67.3	410	0.16	0.44	64.1	60.6
	M1100	43.4	342	0.13	0.47	76.9	69.5
	F600	112.8	424	0.27	0.74	39.9	36.2
	F900	90.0	468	0.19	0.48	52.1	53.9
	F1100	32.8	347	0.09	0.34	82.5	77.3
AB	REF	181.9	419	0.43	0.93	-	-
	M600	161.5	428	0.38	0.87	11.2	13.1
	M900	83.2	593	0.14	0.40	54.3	67.7
	M1100	43.0	328	0.13	0.43	76.4	69.8
	F600	156.6	479	0.33	0.94	13.9	24.8
	F900	119.2	483	0.25	0.60	34.5	43.2
	F1100	46.8	379	0.12	0.41	74.3	71.6

Tablo 4'te referans karışımlar için verilen sonuçlar incelendiğinde, agrega tane boyut dağılımı irileştikçe oluşan maksimum çatlak genişliği değeri çok fazla fark etmezken toplam çatlak alanı ve ortalama çatlak genişliği değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Referans BC karışımına göre referans B ve AB karışımlarından elde edilen ortalama çatlak genişliğindeki azalma oranları sırasıyla %16 ve %14 iken, toplam çatlak alanı değerlerindeki azalma

oranları ise sırasıyla %15 ve %18'dir. Bilindiği üzere agrega tane boyut dağılımı irileştikçe karışımdaki ince madde miktarı azalmakta dolayısıyla agregaların oluşturduğu özgül yüzey alanı azalmaktadır. Bu nedenle, agregaların yüzeyinde tutulabilen su miktarı da azalmakta ve böylece betonun terleme miktarında artış meydana gelmektedir. Giriş bölümünden de hatırlanacağı üzere bu durum, sabit buharlaşma hızına maruz kalan numunelerin yüzeyinde su filminin daha uzun süreli olarak kalmasını sağlamaktadır. Böylece, negatif kapiler basıncın artışı, menisk oluşumu gibi mekanizmalar gecikmekte ve menisk sistemi çok daha geç bozulmaktadır. Sonuç olarak bu durum, ince tane boyut dağılımına sahip karışımlara göre iri tane boyut dağılımına sahip karışımda çok daha az miktarda çatlak oluşmasına neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre lif geometrisi ve kullanım miktarının toplam çatlak alanına etkisini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen grafik incelendiğinde, kullanılan lif miktarı arttıkça PRÇ'yi önleme konusunda liflerin etkinliğinin arttığı görülmektedir. Agrega tane boyutu dağılımının en ince olduğu BC karışımında, monofilament lif tüm kullanım oranlarında fibrile liften daha iyi performans sergilerken, B kodlu karışımlarda 600 ve 1100 g/m<sup>3</sup> kullanım oranlarında fibrile lif daha iyi sonuçlar vermiştir. 900 g/m<sup>3</sup> lif kullanımında ise, tüm agrega tane boyutu dağılımlarında en iyi sonuçlar monofilament lif katkılı betonlardan elde edilmiştir. Burada gözden kaçırılmaması gereken bir husus ta 1100 g lif kullanımında oluşan çatlak değerlerinin BC-M1100 karışımı hariç birbirine çok yakın değerlerde olmasıdır.

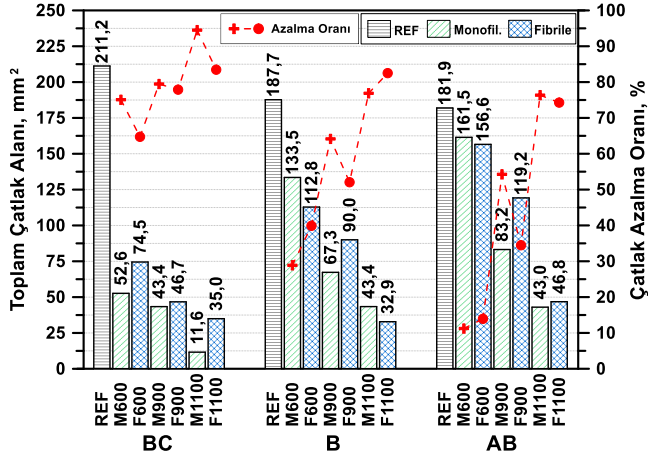


Şekil 6. Lif geometrisi ve kullanım miktarının toplam çatlak alanına etkisi.

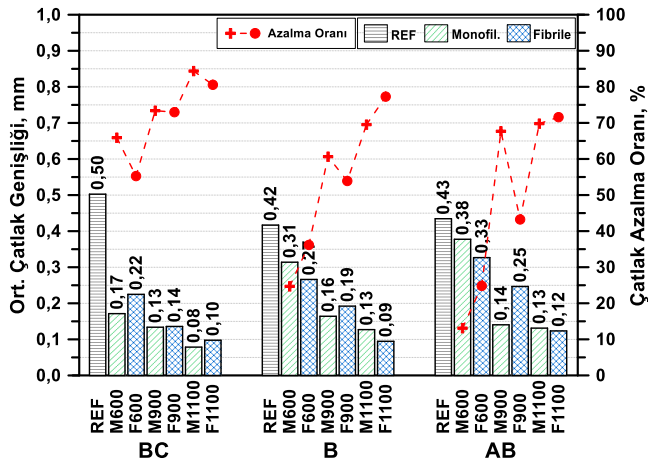
Bu durum, belirli bir kullanım miktarından sonra liflerin geometrisine bağlı bir farklılığın oluşmadığını göstermektedir. Agrega tane boyut dağılımının, liflerin toplam çatlak alanına ve ortalama çatlak genişliğine etkisi sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Ayrıca, bu şekillerde her bir çatlak özelliğinin ASTM C1579 [27] standardına göre hesaplanan ÇAO değerleri de çizgi grafik olarak verilmiştir.

Agrega tane boyut dağılımına göre liflerin toplam çatlak alanı üzerindeki etkisinin gösterildiği Şekil 7'ye bakıldığında, referans betonlar arasında en fazla çatlak oluşan BC karışımına en düşük miktarda lif eklenmesi ile birlikte toplam çatlak alanının çok belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yani referans betonlar arasındaki eğilim karışımlara lif eklenmesi ile birlikte tersine dönmüştür.

Örneğin, karışıma 600 g monofilament lif eklenmesiyle birlikte BC, B ve AB karışımları için ÇAO değerleri sırasıyla %75, %29 ve %11 iken, 900 g eklenmesiyle birlikte bu değerler %80, %64 ve %54'tür. Bu sonuçlar göstermektedir ki eğer karışım tane boyut dağılımı yeteri kadar ince ise çok düşük miktarda dahi lif kullanımı, PRÇ'yi önlemede ciddi bir fayda sağlamaktadır.



Şekil 7. Agregatane boyutu dağılımının toplam çatlak alanına etkisi.

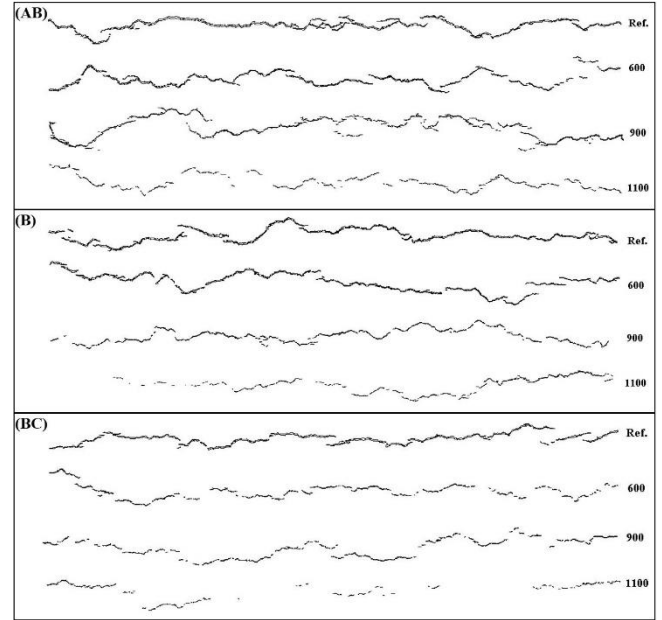


Şekil 8. Agregatane boyutu dağılımının ortalama çatlak genişliğine etkisi.

Şekil 8 incelendiğinde, benzer etkinliğin ortalama çatlak genişliği değerleri için de geçerli olduğu görülmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen en yüksek ÇAO değerleri, BC dağılımında %95 ile M1100 karışımından, B dağılımında %82 ile F1100 karışımından ve AB dağılımında %76 ile M1100 karışımından elde edilmiştir. Ortalama çatlak genişlikleri incelendiğinde ise çatlak alanları ile benzer bir durum söz konusudur. Kullanılan liflerin ince tane boyut dağılımına sahip betonda çok daha iyi performans göstermelerinin sebebi olarak, agregatane özgül yüzey alanının daha ince tane boyut dağılımına sahip karışımda çok daha yüksek olması ve böylece lif ile harç fazı arasındaki temas alanının artmasına bağlı olarak aderansın daha iyi olması gösterilebilir. Ayrıca, monofilament lif te benzer şekilde fibrile life göre çok daha ince en kesite sahip olduğundan daha yüksek özgül yüzey alanına sahiptir. Böylece, karışım içerisinde daha iyi dağılıp daha fazla harç fazı ile temas yüzeyi oluşturmakta ve sonuç olarak daha iyi performans sergilemektedir. Agregatane boyut dağılımı irileştikçe azalan

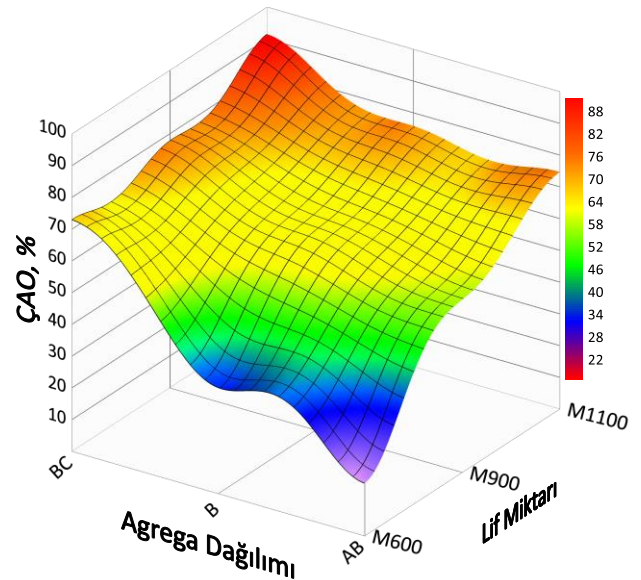
ince malzeme miktarına bağlı olarak lifler tutunabilecek daha az yüzey bulabilmiş ve böylece ÇAO değerleri özellikle düşük lif kullanım oranlarında daha düşük seviyede kalmıştır.

Şekil 9'da monofilament lif kullanımının, beton karışımı agregatane dağılımına bağlı olarak PRÇ'yi önlemedeki etkinliğini gösteren örnek çatlak izleri verilmiştir. Örnek çatlak izlerine ait görüntüler, fotoğrafların işlenmesi ile elde edilmiştir. Üstte AB, ortada B ve altta BC karışımlarına ait görüntüler yukarıdan aşağıya doğru artan lif oranına göre sıralanmıştır.

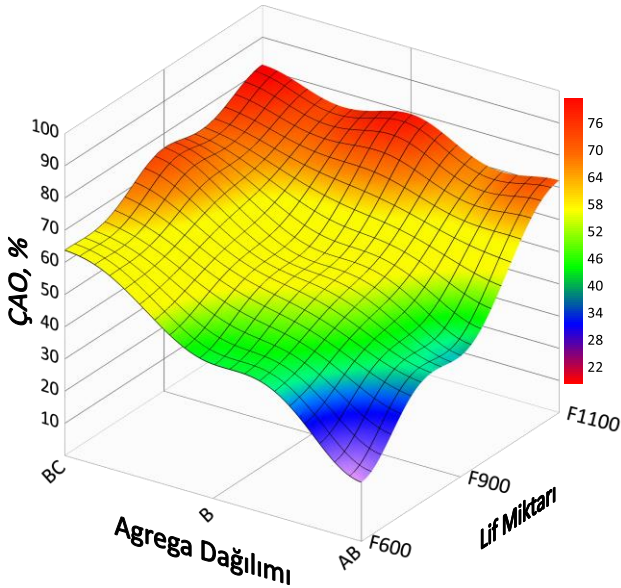


Şekil 9. Deney sonunda monofilament lif kullanılan karışımlardan elde edilen örnek çatlak izleri.

Verilen şekilden görüldüğü üzere, her bir agregatane boyut dağılımına sahip karışımda artan lif miktarı çatlak miktarını azaltmıştır ve AB'den BC karışımına doğru geçtikçe lifler çok daha etkin bir şekilde çatlak oluşumunu engellemiştir. Şekil 10 ve 11'de sırasıyla monofilament ve fibrile lifin, agregatane boyut dağılımına bağlı olarak ÇAO (çatlak alanına göre) değerlerini gösteren yüzey grafikleri verilmiştir.



Şekil 10. Monofilament lifin, agregatane boyut dağılımına bağlı çatlak azaltma oranı (ÇAO) değerlerini gösteren yüzey grafiği (toplam çatlak alanına göre).



Şekil 11. Fibrile lifin, agregatane boyut dağılımına bağlı çatlak azaltma oranı (ÇAO) değerlerini gösteren yüzey grafiği (toplam çatlak alanına göre).

Verilen yüzey grafiklerine bakıldığında, lif kullanımının ince agregatane boyut dağılımına sahip beton karışımlarının PRÇ'yi çok daha etkin bir şekilde önleyebildikleri açık bir şekilde görülmektedir. Hem monofilament lif hem de fibrile lif kullanımında ÇAO değerleri, lif dozajı arttıkça ve beton karışımının agregatane boyut dağılımı incelidikçe belirgin bir şekilde artmıştır. Özellikle agregatane boyutu dağılımının incelenmesi liflerin performansını çok etkilemiştir. Örneğin BC-M600 karışımından elde edilen ÇAO ile AB-M1100 karışımından elde edilen neredeyse eşit çıkmıştır.

## Sonuçlar

Agregatane boyut dağılımı ve PP lif kullanımının betonda plastik rötre çatlağı oluşumu üzerine etkilerinin incelendiği çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Betonlara çok düşük oranlarda bile lif eklenmesi beton kıvamını önemli ölçüde düşürmüştür.
2. Referans betonlarda, agregatane boyutu dağılımı incelidikçe, toplam PRÇ alanı artmıştır.
3. Lifli betonlarda, kullanılan lif miktarı arttıkça toplam PRÇ alanı azalmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan liflerden monofilament lif aynı boya sahip olmalarına rağmen fibrile life göre daha etkili sonuçlar vermiştir.
4. Agregatane boyutu dağılımının liflerin etkinliğine etkisi incelendiğinde, tane boyutu dağılımı incelidikçe liflerin etkinliği artmıştır. Fakat, 1100 g/m<sup>3</sup> lif katkısı yapıldığında agregatane boyut dağılımına ve lif tipine bağlı belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.
5. PRÇ'yi önlemek için kullanılan liflerin etkinliği, özellikle düşük kullanım oranlarında agregatane boyut dağılımına bağlı olarak büyük farklılık göstermiştir. Bu hususun uygulamalarda göz önünde bulundurulması önemli olacaktır.

## Kaynaklar

- [1] W. P. Boshoff and R. Combrinck, "Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 48, pp. 34–39, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.02.003.
- [2] G. M. Moelich, J. E. van Zyl, N. Rabie, and R. Combrinck, "The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 123, no. July, p. 104182, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104182.
- [3] A. Sivakumar and M. Santhanam, "A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete," vol. 29, pp. 575–581, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005.
- [4] A. Leemann, P. Nygaard, and P. Lura, "Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, pp. 1–7, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.002.
- [5] W. Yiran, Z. Zhiqing, L. Juan, and Y. Lei, "Experimental Study on Preventive Measures of Plastic Shrinkage Cracking of Cement Concrete," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 96, no. Cictp, pp. 196–204, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.026.
- [6] T. Rahmani, B. Kiani, M. Bakhshi, and M. Shekarchizadeh, "Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete," pp. 635–642, 2012.
- [7] V. T. N. Dao, P. F. Dux, and P. H. Morris, "Tensile Properties of Early-Age Concrete," *ACI Mater. J.*, no. 106, 2009.
- [8] E. Boghossian and L. D. Wegner, "Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 10, pp. 929–937, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.09.003.
- [9] P. Soroushian and S. Ravanbakhsh, "Control of Plastic Shrinkage Cracking with Specialty Cellulose Fibers," no. 95, pp. 429–435, 1999.
- [10] N. Banthia and R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete," vol. 36, pp. 1263–1267, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.010.
- [11] N. Kouta, J. Saliba, and N. Saiyouri, "Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119315, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119315.
- [12] A. Kronlöf, M. Leivo, and P. Sipari, "Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 8, pp. 1747–1754, Dec. 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00170-0.
- [13] R. Combrinck, M. Kayondo, B. D. le Roux, W. I.

- de Villiers, and W. P. Boshoff, "Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 139–153, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.060.
- [14] M. Nasir, O. S. Baghabra Al-Amoudi, and M. Maslehuddin, "Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 943–953, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068.
- [15] P. Lura, B. Pease, G. B. Mazzotta, F. Rajabipour, and J. Weiss, "Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Development of Plastic Shrinkage Cracks," no. 104, pp. 187–194, 2008.
- [16] D. P. Bentz, M. R. Geiker, and K. K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars," vol. 31, pp. 1075–1085, 2001.
- [17] J. Mora-ruacho, R. Gettu, and A. Aguado, "Cement and Concrete Research Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 3, pp. 141–146, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.011.
- [18] W. Zhang *et al.*, "Influence of shrinkage reducing admixtures on the performance of cementitious composites: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 325, no. November 2021, p. 126579, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126579.
- [19] R. Bloom and A. Bentur, "Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes," no. 92, pp. 211–217, 1996.
- [20] G. Olivier, R. Combrinck, M. Kayondo, and W. P. Boshoff, "Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, pp. 85–98, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.102.
- [21] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, and P. Lura, "On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 115, no. October 2018, pp. 251–263, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.10.015.
- [22] K. Wang, S. P. Shah, and P. Phuaksuk, "Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials — Influence of Fly Ash and Fibers," no. 98, 2002.
- [23] H. Zhao *et al.*, "Effect of clay content on plastic shrinkage cracking of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 342, no. PA, p. 127989, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127989.
- [24] T. A. Samman, W. H. Mirza, and F. F. Wafa, "Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High-Strength Concrete : A Comparative Study," no. 93, pp. 36–40, 1996.
- [25] P. Soroushian, F. Mirza, and A. Alhozaimy, "Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete," no. 92, pp. 553–560, 1995.
- [26] Z. Bayasi and M. McIntyre, "Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete," no. 99, pp. 337–344, 2003.
- [27] ASTM International, "Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert) (ASTM C 1579)," 2021. doi: 10.1520/C1579-13.2.
- [28] Turkish Standards Institution, "Design of Concrete Mixes (TS 802)," 2016.
- [29] Turkish Standards Institution, "Testing fresh concrete, Part 2: Slump test (TS EN 12350-2:2019)," 2019.
- [30] Turkish Standards Institution, "Testing fresh concrete, Part 6: Density (TS EN 12350-6:2019)," 2019.
- [31] Turkish Standards Institution, "Determination of the concrete setting time by measurement of penetration resistance (TS 2987)," 1978.
- [32] Turkish Standards Institution, "Testing hardened concrete, Part 3: Compressive strength of test specimens (TS EN 12390-3:2019)," 2019.