



STRONSIYUM ALÜMİNAT KATKILI KOMPOZİT PİGMENT BİLEŞİMİNİN ÇİMENTO ESASLI FOTOLÜMİNESAN HARCIN PERFORMANSINA ETKİSİ

Lütfullah GÜNDÜZ^{1,a}, Sevket Onur KALKAN^{1,b,*}

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, MMF, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

^alutfullah.gunudz@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2487-467X

^bsevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0250-8134

ÖZET

Parlama etkili ürünlerin gündüz güneş enerjisini soğurması ve gece bu enerjiyi açığa çıkarması ile kullanımı, geceleri daha fazla güvenlik ve aydınlatma amaçlı kullanılan enerjide tasarruf sağlayabilmektedir. Bunun yanında, içeriğinde ışık yayan pigmentler kullanılarak üretilen ürünler, yollar, otoparklar, bisiklet yolları, tehlikeli ve kötü aydınlatılmış bölümler vb. için ek bir sinyalizasyon aracı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu bağlamda, optimal olarak seçilmiş malzemeler ve pigmentler ile malzemelere ekstra ışık kaynağı özelliği kazandırılabilir. Bu çalışmada, fotolüminesan pigment içeren bir dizi çimento harcı ve pigment içermeyen bir kontrol harcı üretilerek, fotolüminesan pigment içeren ve içermeyen harçların ve değişen pigment miktarının harçların fiziko-mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle kompozit fotolüminesan pigment (KFP), stronsiyum alüminat ($SrAl_2O_4$), titanyum dioksit (TiO_2) ve stiren akrilik kopolimer emülsiyonun (SAKE) belli oranlarda karıştırılması ile elde edilmiştir. Daha sonra KFP çimento harcına eklenerek kompozit fotolüminesan harçlar üretilmiştir. Çalışma bulgularına göre, $SrAl_2O_4$ oranının artışı harçların basınç dayanımının azalmasına sebebiyet vermektedir. KFP katkılı harçlar yaklaşık 13 saat gün ışığına (06:00-19:30 arası) maruz bırakıldıktan sonra, karanlık bir ortamda ışıma süreleri 576 dakika ile 696 dakika (yaklaşık 9,5-11,5 saat) aralığında tespit edilmiştir. Harçların ışık yayma performansları özellikle KFP içerisinde bulunan $SrAl_2O_4$ pigmenti oranı artışına bağlı olarak artmıştır. Bununla birlikte, ışık yayan pigment kompozisyonundaki TiO_2 oranı arttıkça, pigment komponentinin ışık yaymadaki etkisinin daha da iyileştiği görülmüştür. Bu çalışma ile, $SrAl_2O_4$ ve TiO_2 'in birlikte kullanımı ile karanlıkta ışık yayabilen çimento harçlarının üretilmesi tespit edilmiştir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atrf (Citation): Gündüz, L., Kalkan, Ş.O., "Stronsiyum Alüminat Katkılı Kompozit Pigment Bileşiminin Çimento Esaslı Fotolüminesan Harcın Performansına Etkisi", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 5(2): 127-153, 2023.

Geliş (Received): 24/07/2023

Kabul (Accepted): 05/10/2023

Yayın (Published): 31/12/2023

Anahtar Kelimeler: Fotolüminesans, fotolüminesan harç, kompozit, pigment, stronsiyum alüminat.

EFFECT OF STRONTIUM ALUMINATE ADDED COMPOSITE PIGMENT COMPOSITION ON THE PERFORMANCE OF CEMENT-BASED PHOTOLUMINESCENT MORTAR

ABSTRACT

The use of afterglow-effect products, as they absorb solar energy during the day time and release this energy at night, can provide more security and energy savings at night for lighting purposes. In addition, products produced using light-emitting pigments can be considered as an additional signaling tool in the dangerous and worst-lit sections of roads, parking lots, and bicycle paths. In this context, with optimally selected materials and pigments, materials can be provided with an extra light source feature. In this study, a series of cement mortars containing photoluminescent pigment and a control mortar without pigment were produced, and the effects of mortars with and without photoluminescent pigments and the varying amount of pigment on the physico-mechanical properties of the mortars were investigated. In the study, firstly, composite photoluminescent pigment (KFP); strontium aluminate, titanium dioxide and styrene acrylic copolymer emulsion were mixed in certain proportions. Then, composite photoluminescent mortars were produced by adding KFP to the cement mortar. According to the study findings, the increase in the strontium aluminate ratio causes a decrease in the compressive strength of the mortars. After the KFP added, mortars were exposed to sunlight for approximately 13 hours (between 06:00-19:30), the glow times were determined in the range of 576 minutes to 696 minutes in a dark environment. The afterglow performances of the mortars were determined in proportion to the ratio of strontium aluminate pigment in the KFP. Also, as the TiO_2 ratio in the light-emitting pigment composition increased, it was observed that the effect of the pigment component on light-emitting improved. In this study, it was determined that cement mortars that can emit light in the dark can be produced with the use of strontium aluminate and titanium dioxide together.

Keywords: Photoluminescence, photoluminescent mortar, composite, pigment, strontium aluminate.

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerde enerji talebi kaçınılmaz olup, her geçen gün bu talep giderek artmaktadır. Yerleşim bölgelerinde gece boyunca aydınlatılması gerekli tüm yapı eleman veya birimleri, büyük bir enerji ihtiyacını gündeme getirmektedir. Enerji tüketimini minimize etmek amacıyla, bazı uygulama alanlarında gece karanlığında ilave enerji tüketimine ihtiyaç duyulmaksızın kendinden aydınlanabilen ürünlerin geliştirilmesi ve uygulamalarda kullanılması, günümüzde önemsenen araştırma konuları arasında yerini almaktadır. Bu amaçla, inşaat endüstrisinde, peyzaj ve yol düzenlemelerinde yenilikçi malzemeler bağlamında uygulanabilecek harç ve/veya beton türevi ürünler gelişim göstermektedir [1-6]. Bu bağlamda lüminesan beton türleri yeni ve yeterince incelenmemiş bir malzeme versiyonu olmakla birlikte, inşaat, mimari ve tasarım alanlarında farklı uygulama potansiyeline sahip bir konudur. Gün ışığında uyuyan ve gece ışıldayan bir beton, özellikle talebin en yüksek olduğu gece saatlerinde günlük enerji tüketimini verimli bir şekilde yönetmede etkili olabilmektedir. Bu beton, fosforlu malzemenin gündüzleri güneş radyasyonundan enerjiyi emdiği ve karanlıkta ışık enerjisini yeniden yaydığı temel fosforesans ilkesini uygular. Çevre dostu, uygun maliyetli ve parlaklık oluşturması nedeniyle görsel etkileri de olmaktadır [1].

Fotolüminesan harçlar, gün içerisinde güneş veya yapay ışık enerjisini gündüz yakalayıp gece karanlık ortamda görünür ışığa çevirme özelliğine sahip olan harç kompozisyonlarıdır. Bu özelliğinden dolayı fotolüminesan harçlar, ışık yayan harç veya karanlıkta parıldayan-parlayan harç olarak da bilinir. Bu özelliğe sahip harç karışımları ile yapılmış, üretilmiş ve/veya geliştirilmiş yapı malzemeleri de benzer özellikler göstermekte ve benzer tanımlamalarla adlandırılabilir. Lüminesans genel olarak, ışığın fotonlar şeklinde soğurulması ve elektronların enerji seviyelerinden sıçramasına neden olan ışık emisyonu olarak tanımlanır. Fotolüminesan malzeme, doğal veya yapay yollarla yüklenebilir. Doğal olarak bulunan güneş ışığı, fotolüminesan malzemede daha parlak bir ışıltı elde etmek için kullanılabilir [7-10]. Fotolüminesan harç kullanılarak imal edilen malzeme türevleri, estetik ve yaratıcı kullanım potansiyellerine ek olarak, karayollarında gece aydınlatma ve yol levhalarına kolay yol çözümleri sunabilir. Ayrıca, araç ve yaya güvenliğini artırmak ve enerji yoğun cadde ve sokaklarda çimentolu ve/veya çimentosuz aydınlatma yapı malzemesi ürünlerinin geliştirilmesi, bisiklet yollarının, otoyolların, bina dış aydınlatma ve iç mekanların kaplanmasında uygulamalarında kullanılabilir.

Fotolüminesan harç karışımlarında lüminesan malzeme olarak *stronsiyum alüminat* en yaygın kullanılan materyaller arasında yer almaktadır [11-13]. $SrAl_2O_4$, radyasyonun emilmesinden sonra 14 saate kadar parlama üretebilen en güçlü fosforlu maddedir. $SrAl_2O_4$ 'ın genellikle iki çeşidi vardır: Yeşil bir parlaltı oluşturan *öropiyum katkılı stronsiyum alüminat* ve su parlaltısı üreten *daha yüksek alüminatlar* içeren türüdür. Yeşil tonlar maksimum parlaklığı verir ve su tonları ise daha uzun parlama süresine sahiptir [1].

Işık yayan beton türevleri ve geliştirilmesi üzerine literatürde yer alan araştırma bulgularında özetle; Barghlame ve arkadaşları [14] ışık yayan beton bileşiminin çeşitli düzenlemelerini ve ışık yayan bir beton yapının sentezlenmesi için yeni bir yöntemi patent çalışması olarak öngörmüşlerdir. Bu çalışmada ışık yayan beton bileşimi, ışık yayan pigmentler kullanılarak geliştirilmiş olup, ışık yayan pigmentler titanyum tozu, sülfat tozu ve reçinelerin karışım kombinasyonu ile elde edilmiştir. Işık yayan pigment karışımı beton karışımına eklenerek, kalıplama yöntemiyle ışık yayan beton ürünlerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu örnekler üzerinde yapılan test bulgularının uzun süre betonun karanlık ortamda ışık yaydığı gözlenmiştir [14]. Wiese ve arkadaşları [15] beton yüzeylerde kullanım için soya bazlı bir lüminesan dolgu macununun geliştirilmesi ve parlaklığın artırılması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada ışıldayan dolgu macunu, soya metil ester polistiren ve fosforlu bir toz olan $SrAl_2O_4$ kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında kaplanmış beton yüzeyinin parlaklığının büyüklüğü ve süresini ölçmek için yeni bir test prosedürü de öngörülmüş olup, daha büyük $SrAl_2O_4$ parçacıklarının, daha küçük parçacıklardan daha uzun süre parıldadığı rapor edilmiştir [15]. Saleem ve arkadaşları [16] çimento esaslı kum gibi ince agregaların ana agrega olarak kullanıldığı ve $SrAl_2O_4$ 'ın fosfor özelliği değerlendirilerek ışıldayan beton bileşimi ve beton üretim yöntemi üzerine patent ArGe çalışması yürütmüşlerdir. Geliştirilen karanlıkta parlayan beton ürünlerin, iyi mekanik dayanım (örn. basınç dayanımı) ve kayma direnci sergilediği rapor edilmiştir. Fosforlu $SrAl_2O_4$ ilavesi ile beton ürünlerde 10 saate kadar devam eden parlaklık sağlanmış olup [16], $SrAl_2O_4$ kullanımının ışık yayma sürelerindeki etkinliği tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmada $SrAl_2O_4$ kullanımının çimento ile uyumlu olduğu ve çimentonun hidratasyonunda da olumlu etkiler sağladığı belirtilmiştir. Dipika ve arkadaşları [17] betonda foto lüminesans özelliğinin tanıtılması üzerine bir araştırma projesinin bulgularını tartışmışlardır. Önerilen konsept, koyu renkli betonda parlaltı oluşturmak için camda ışık yayan pigmentleri indüklemektir. Betona dahil edilen fotolüminesan pigmentler, lantanid serisinden nadir alkalın toprak

elementlerinden oluşmakta ve bu nedenle inert olduklarını kanıtlanmışlardır. Çevreye minimum düzeyde zarar verici bir etkisi olduğu rapor edilmiştir. Geliştirilen beton malzemenin önemli bir basınç dayanımına ve ışık yayma özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Fotolüminesans kaynaklı betonun uygulanması, gelecekte sürdürülebilir kalkınmaya değerli bir katkı yapma konusunda yüksek bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır [17].

İnşaat sektöründe son yıllarda giderek önem kazanan çimentolu ve ışık yayan fotolüminesan harç ürünlerin fiziksel, mekanik ve lüminesans özelliklerinin iyileştirilmesi önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Bu çalışmada $SrAl_2O_4$, TiO_2 ve akrilik reçine malzemelerin farklı oranlarda harmanlanmasıyla elde edilen bir seri ışık yayan pigment bileşimlerinin çimento esaslı fotolüminesan harç özelliklerine etkisi bir dizi deneysel analizlerle incelenmiştir. Elde edilen veriler detaylı bir şekilde tartışılmış olup, çimento bağlayıcılı kompozit yapıda fotolüminesan harç üretimi üzerine yapılan ArGe çalışmalarında ışık yayan pigment bileşimlerin harca katkı miktarları ve etkileri bağlamında karakterize edilebilecek bazı teknik tecrübeler paylaşılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Harç Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler

Çimento esaslı fotolüminesan harç (ÇEFH) tasarımında iki ayrı grupta malzeme bileşimi hazırlanmıştır. Birinci grup malzeme bileşimi 5 ayrı farklı malzemedен oluşmaktadır. Bunlar; CEM I-42.5R tipi Portland çimentosu, 2 ayrı tane boyutunda sınıflandırılmış doğal mika, boyutlandırılmış kuvars tozu ve selüloz malzemedен oluşmaktadır. İkinci grup malzeme bileşimi ise ışık yayan pigment bileşimidir. Bu gruptaki pigment bileşimi ise 3 ayrı malzeme türünden oluşmaktadır. Bunlar, $SrAl_2O_4$, TiO_2 ve akrilik reçinedir.

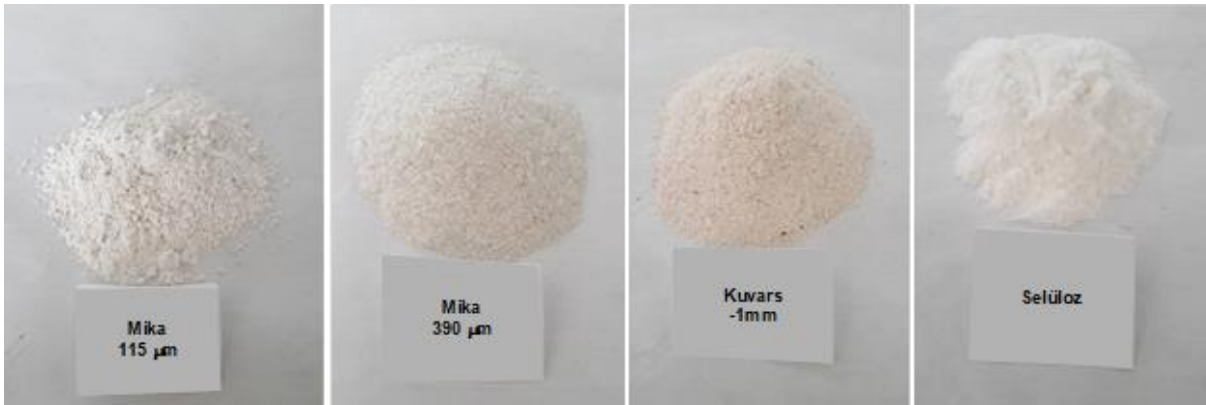
ÇEFH test örneklerinin hazırlanmasında özgül ağırlık değeri ortalama $3,0 \text{ g/cm}^3$ olan CEM I-42.5R tipi Portland çimentosu bağlayıcı ana malzeme olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan çimentonun kimyasal majör bileşenleri Tablo 1’de verilmiştir.

ÇEFH test örneklerinin hazırlanmasında ana agrega malzeme olarak $115 \mu\text{m}$ ve $390 \mu\text{m}$ tane boyutlarında sınıflandırılmış 2 ayrı boyutta doğal mika Kaltun Madencilik A.Ş. (Çine-Aydın)’dan temin edilmiştir. Mika malzemelerin özgül kütle değerleri $2,85 \text{ g/cm}^3$, Mohs sertlik değerleri 2.5 ve nem içerikleri ise ortalama %0,30’dur. $115 \mu\text{m}$ boyutlu mikanın

yığın yoğunluğu ortalama 310 kg/m^3 olup, $390 \mu\text{m}$ boyutlu mikanın yığın yoğunluğu ise ortalama 380 kg/m^3 'tür [18, 19]. Ayrıca, Malvern (Mastersizer 2000) partikül boyut ölçüm cihazı ile tanımlanmış boyut dağılım değeri $115 \mu\text{m}$ boyutlu mika malzemede $D/10=4,5 \mu\text{m}$, $D/50=15 \mu\text{m}$ ve $D/97=47,5 \mu\text{m}$ olarak tanımlanmıştır [18]. Benzer şekilde, $390 \mu\text{m}$ boyutlu mika malzemede ise tanımlanmış boyut dağılım değeri $D/10=13 \mu\text{m}$, $D/50=55 \mu\text{m}$ ve $D/97=290 \mu\text{m}$ olarak tanımlanmıştır [19]. Karışımlarda kullanılan mika malzemelerin kimyasal majör bileşenleri Tablo 1'de verilmiştir.

ÇEFH test örneklerinde ana dolgu materyali olarak 0-1 mm boyut aralığında sınıflandırılmış kuvars tozu hazır boyutlandırılmış malzeme olarak piyasa koşullarından temin edilmiştir. Kuvars tozunun ortalama yığın yoğunluğu $1480 \pm 150 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlenmiştir.

Bununla birlikte ÇEFH test örneklerinin hazırlanmasında özel kıvam arttırıcı etkiler için geliştirilerek modifiye edilmiş metil hidroksietil selüloz (MHEC) piyasa koşullarından toz formda tedarik edilerek tüm karışımlara katkı olarak ilave edilmiştir. MHEC standart eterifikasyona sahip, suda çözünür, iyonik olmayan, çok hızlı tutarlık gelişimi, orta derecede sarkma direnci ve su talebi sergileyen, çimento hidrasyonu üzerinde düşük etki değerine sahip özelliklerdedir. Test örneği karışımlarında kullanılan metil hidroksietil selülozun yığın yoğunluğu ortalama 420 kg/m^3 , vizkozite değeri 55000 – 60000 mPa.s ve pH değeri 5-8 aralığındadır. Metil hidroksietil selüloz türleri genellikle, çimento esaslı tamir tarama harç imalatları, örgü harçları, yapıştırıcı türleri, kire-çimento harçları ve alçı bağlayıcı harç uygulamalarında yaygın kullanımları görülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan mika, kuvars ve selüloz malzemelerin genel görünüşleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Mika, Kuvars ve Selüloz Malzemelerin Genel Görünüşleri

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan bazı malzemelerin kimyasal majör bileşenleri

Bileşen	CEM I-42.5R (%)	Mika (115µm)* (%)	Mika (390 µm)** (%)
SiO ₂	20,26	52,41	56,10
Al ₂ O ₃	3,65	29,67	27,20
Fe ₂ O ₃	4,38	1,14	0,98
TiO ₂	-	0,35	0,32
CaO	64,37	0,10	0,39
MgO	1,37	1,72	1,55
Na ₂ O	0,25	0,88	1,52
K ₂ O	0,49	9,65	8,20
P ₂ O ₅	-	0,07	0,25
Kızdırma Kaybı	-	4,00	3,50

*Kaltun Madencilik A.Ş., SMW.115 (KM.01.M.0015) Mika Ürünü Teknik Föyü [18]

**Kaltun Madencilik A.Ş., SMW.390 (KM.03.M.0090) Mika Ürünü Teknik Föyü [19]

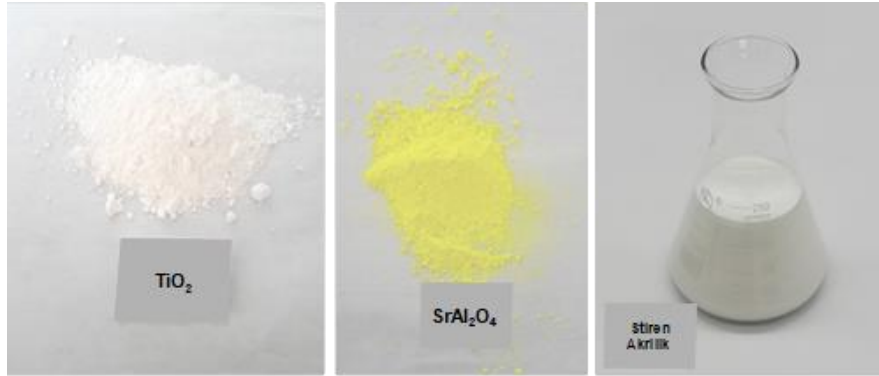
Çimento esaslı fotolüminesan harç tasarımlarında ışık yayan pigment bileşimi, SrAl₂O₄, TiO₂ ve reçine malzemelerin farklı oranlarda harmanlanmasıyla kompozit formda bir pigment olarak elde edilmiştir. Fotolüminesan betonlarda TiO₂ ve reçinenin sıklıkla kullanıldığı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [7]. Çalışma kapsamında kullanılan SrAl₂O₄ (SrO·Al₂O₃) kimyasal formülüne sahip bir alüminat bileşiği olup, kokusuz ve soluk sarı renk tonunda fosforesans özellik gösteren monoklinik kristal bir toz olarak piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Fosforesans pigmentler uygun bir katkı maddesi ile aktive edildiğinde, uzun süreli fosforesans kalıcılığı olan bir fotolüminesan fosfor görevi görürler. Genellikle teknik özellik olarak, gün içerisinde almış oldukları ışığı depolayarak karanlık ortamda soğurmuş oldukları ışığı parlayarak ve ışıdayarak ortama veren ve belirli bir süre ortamı aydınlatan özel olarak geliştirilmiş pigmentler olarak bilinmektedir [6, 8, 12, 17].

Tüm karışımlarda ışık yayan kompozit pigment bileşiminin hazırlanmasında SrAl₂O₄ kristal tozunu aktive etmek amacıyla rutil esaslı TiO₂ toz formda piyasa koşullarından temin edilerek aktivasyon katkı materyali olarak kullanılmıştır. Titanyum, bitkilerde ve hayvanlarda yaygın olarak bulunan yer kabuğundaki en yaygın elementlerden biridir. Titanyum doğal olarak oksijenle etkileşime girerek titanyum oksitler oluşturur. TiO₂ doğada farklı kristal yapılar halinde, maden olarak bulunabilen bir kimyasaldır. Doğada rutil, anatas ve brookit olmak üzere üç şekilde bulunur, ancak genellikle endüstriyel olarak anatas ve rutil formları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Maden olarak çıkarıldığında genelde siyahtır, ancak saf halde beyaz bir tozdur. Titanyum metalinin oksitlenmiş halidir ve kırılma indisi yüksektir. Bu yüzden boya yapımında, pigmentlerde kullanılır. Dünyadaki tüm pigmentlerin üçte ikisinde

kullanıldığı tahmin edilmektedir. TiO_2 rutilin kırılma indisi anatasa göre daha yüksektir. Anatasa göre daha sert yapıdadır. Bu nedenle TiO_2 rutil pigment olarak daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır [20-23].

Işık yayan kompozit pigment bileşiminin hazırlanmasında kullanılan bir diğer üçüncü bileşen, stiren akrilik esaslı kopolimer emülsiyon piyasa koşullarından temin edilerek pigment bağlayıcı materyali olarak kullanılmıştır. SAKE, stiren akrilik kopolimerin su bazlı bir dispersiyon emülsiyonudur. Stiren akrilik kopolimerleri, üstün pigment bağlama özelliklerinden dolayı iç ve dış cephe boyalarında bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. İdeal parlaklık, film kuvveti, dayanıklılık ve deterjanlar tarafından çıkarılmaya karşı direnç, yüksek UV stabilitesi, suya ve alkalilere karşı yüksek direnç gösterirler. Stiren akrilik kopolimerleri, parlak boyaların ve zemin cilalarının önemli bir bileşeni olarak kabul edilmekle birlikte, çimento esaslı iç ve dış duvar kaplama malzemelerinin imalatında da kullanılabilir. Çalışma kapsamında viskoz sıvı formunda, az kokulu, beyaza yakın renkte, suda çözünebilir özellikte, yoğunluğu $1000-1100 \text{ kg/m}^3$ aralığında, vizkozitesi $5000-12000 \text{ cP}$ ve pH değeri 7-9 olan SAKE kullanılmıştır [24, 25].

DeneySEL çalışmalarda kullanılan $SrAl_2O_4$, rutil TiO_2 ve SAKE malzemelerin genel görünüşleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Titanyum Dioksit, Stronsiyum Alüminat ve Stiren Akrilik Kopolimer Emülsiyon Malzemelerin Genel Görünüşleri

Tüm harç karışımlarının hazırlanmasında karma işlemi normal şebeke suyu ile yapılmıştır.

2.2. Kompozit Pigment Bileşenlerin Hazırlanması

Çimento esaslı fotolüminesan harc karışımlarında ışık yayan pigment bileşimi için 6 farklı karışım oranında SrAl_2O_4 , TiO_2 ve SAKE kompozit bileşimde ayrı ayrı hazırlanmış olup, çalışma kapsamında kullanılan karışım kombinasyonları Tablo 2’de verilmiştir. Kompozit Fotolüminesan Pigment (KFP) bileşiminde yer alan her bir malzeme, karışım tasarımında kullanılan çimentonun (*tüm karışımlarda çimento oranı ağırlıkça %24 oranında sabit değer olarak uygulanmıştır*) ağırlıkça oranları nispetinde kullanılarak pigment versiyonları hazırlanmıştır. KFP hazırlamada öncelikle SAKE ağırlıkça %10 distile edilmiş bir su ile seyreltilmiş ve sonrasında rutil esaslı TiO_2 belirlenen miktarda bu seyreltilmiş emülsiyona ilave edilerek 10 dakika düşük devirli bir karıştırıcı ile homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Daha sonra, bu karışıma belirlenen miktarda toz formdaki SrAl_2O_4 ilave edilerek 20 dakika süreyle düşük devirli bir karıştırıcı ile homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmaya devam edilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandığında emülsiyon şeklinde harc karışımlarında kullanılmak üzere KFP bileşimi hazır hale getirilmiş olup, uygulama için cam beherlerde etiketlenerek bekletilmiştir.

Tablo 2. Kompozit fotolüminesan pigment (KFP) bileşimleri (çimento ağırlığının % değeri olarak)

	Stronsiyum Alüminat (%)	Titanyum Dioksit (%)	Stiren Akrilik Kopolimer Emülsiyon (%)
KFP1	3	3	6
KFP2	5	3	6
KFP3	7	3	6
KFP4	3	4	6
KFP5	5	4	6
KFP6	7	4	6
KFP7	3	5	6
KFP8	5	5	6
KFP9	7	5	6

Tablo 2 irdelendiğinde görüldüğü üzere, KFP bileşimleri 3 ayrı grup olarak tasarlanmıştır. 1. grup KFP bileşimlerinde (KFP₁-KFP₃) %3 nispetinde TiO_2 kullanılmış olup, 2. ve 3. grup KFP bileşimlerinde sırasıyla (KFP₄-KFP₆) %4 nispetinde ve (KFP₇-KFP₉) %5 nispetinde TiO_2 kullanılmıştır. Bununla birlikte her bir grup KFP bileşiminde sırasıyla %3, %5 ve %7 SrAl_2O_4 kullanılmış olup, tüm KFP bileşimlerinde %6 nispetinde SAKE sabit

değer olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında bu serilerin hazırlanmasında $SrAl_2O_4$ ve aktive edici bileşen olarak rutil esaslı TiO_2 oran değişimlerinin çimento esaslı harcın gerek fiziko-mekanik gerekse ışık yayma süreleri gibi özelliklerine ne ölçütlerde etki ettiğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2.3. Harç Tasarımları ve Numune Hazırlama

$SrAl_2O_4$ katkılı kompozit pigment bileşiminin çimento esaslı fotolüminesan harcın özelliklerine etkisinin analizi amacıyla 9 ayrı karışım tasarımı yapılmıştır. Çalışma kapsamında tasarılan karışım kombinasyonları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. ÇEFH test örneklerinin hazırlanmasında karışım kombinasyonları (ağırlıkça %)

Karışım	115			390			0-1			Stiren	
	OPC (%)	µm Mika (%)	µm Mika (%)	mm Kuvars (%)	Selüloz (%)	KFP (%)	TiO_2 (%)	$SrAl_2O_4$ (%)	Akrilik (%)	Su (%)	
M0	24,00	19,04	12,69	31,73	0,30	0	0,00	0,00	0,00	12,24	
M1	24,00	18,17	12,12	30,29	0,30	2,88	0,72	0,72	1,44	12,24	
M2	24,00	18,03	12,02	30,05	0,30	3,36	0,72	1,20	1,44	12,24	
M3	24,00	17,89	11,92	29,81	0,30	3,84	0,72	1,68	1,44	12,24	
M4	24,00	18,10	12,07	30,17	0,30	3,12	0,96	0,72	1,44	12,24	
M5	24,00	17,96	11,97	29,93	0,30	3,60	0,96	1,20	1,44	12,24	
M6	24,00	17,81	11,88	29,69	0,30	4,08	0,96	1,68	1,44	12,24	
M7	24,00	18,03	12,02	30,05	0,30	3,36	1,20	0,72	1,44	12,24	
M8	24,00	17,89	11,92	29,81	0,30	3,84	1,20	1,20	1,44	12,24	
M9	24,00	17,74	11,83	29,57	0,30	4,32	1,20	1,68	1,44	12,24	

ÇEFH karışımların hazırlanmasında öncelikle KFP bileşimi içermeyen ve M0 olarak kodlanmış bir kontrol karışımı tasarlanmıştır. M0 kontrol karışımında ağırlıkça %24 oranında çimento ve %0,30 oranında selüloz malzeme kullanılmış olup, bu iki karışım bileşeni çalışma kapsamındaki diğer tüm karışım oranlarında da sabit değer olarak uygulanmıştır. Bununla birlikte, sırasıyla ağırlıkça %19,04 oranında 115 µm mika, %12,69 oranında 390 µm mika ve %31,73 oranında 0-1 mm kuvars tozu agrega+dolgu bileşenleri olarak kullanılmıştır. Bu karışım tasarımında agrega+dolgu bileşenlerin toplam değerinde ağırlıkça %30'u 115 µm mika, ağırlıkça 20'si 390 µm mika ve ağırlıkça %50'si ise 0-1 mm kuvars tozu olarak tasarlanmış olup, bu oransal dağılım diğer tüm karışımlar da korunmuştur. Tüm karışımlarda su/çimento (S/Ç) oranı 0,51 olarak sabit tutulmuştur. Karışım tasarımlarında M1 – M3 serisi 1. grup KFP bileşimlerin yer aldığı, M4 – M6 serisi 2. grup KFP bileşimlerin ve

M7 – M7 serisi ise 3. grup KFP bileşimlerin yer aldığı karışım oranlarını temsil etmektedir. Çalışma kapsamında kontrol örneği de dahil olmak üzere toplamda 10 ayrı seri ÇEFH test örnekleri hazırlanmıştır.

ÇEFH test örneklerinin hazırlanmasında öncelikle agrega+dolgu malzemeleri ve selüloz belirlenen malzeme oranlarında toz formda karıştırıcı mikserin karma kabında homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmış ve daha sonra karışımdaki çimento miktarı ilave edilerek ortalama 5 dakika düşük devirde karıştırma ile toz formda homojen bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra önceden solüsyon şekilde hazırlanmış olan KFP bileşimi karma kabına ilave edilerek 3 dakika kadar ön bir karıştırma yapılmıştır. Sonrasında karışımın S/Ç oranı 0,51 olacak şekilde karma kabına su ilave edilerek düşük devirde karıştırma işlemine ortalama 5 dakika süreyle devam edilerek homojen yaş karışımlar elde edilmiştir. Homojen taze yaş harç 7 dakika kadar dinlendirildikten sonra tekrar 40 saniyelik ilave karışım işlemi uygulanmış olup, bu işlemden sonra yaş harç test örneklerin kalıplanması için uygun forma getirilmiştir. Tüm test örnekleri karıştırma işlemi sonrası 15 dakikalık bir sürede ortalama 20°C sıcaklığa sahip bir ortamda kalıplanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen test örnekleri ilk 24 saat boyunca olumsuz dış koşullardan korunmuş olup, hızlı buharlaştırma gibi işlemler için özel bazı uygulamalar yapılmamıştır [26].

Taze harç numunelerinin yayılma özelliği TS EN 1015-3 [27] standardına uygun olarak yayılma tablası aparatı kullanılarak belirlenmiştir. Test örnekleri için hazırlanan her bir karışımdan 12 adet olmak üzere 50x50x50 mm³ boyutlarında toplamda 120 adet küp numune dökülmüştür. Bununla birlikte KFP bileşiminin ışık yayma potansiyeli özelliklerini incelemek amacıyla ortalama çapı 4 cm, yüksekliği 3 cm olan silindirik formda olan ve her bir karışımdan 6 adet test örnekleri silikon kalıplara dökülerek hazırlanmıştır. Test örneklerinin kalıplama işleminden 24 saat sonra sertleşmiş numuneler kalıplardan çıkartılmış ve laboratuvar ortamında oda sıcaklığı hava koşullarında test tarihinden bir gün öncesine kadar üzerleri ıslak ve nemli bir tekstil örtü altında muhafaza edilerek atmosfer ortam koşullarında kür işlemi uygulanmıştır. Kürleme işlemi tamamlanan test örnekleri muhafaza edildikleri ortamdan alınarak değişmez kütle değerine ulaşana kadar havalandırılmalı bir etüv içerisinde kurutma işlemine tabi tutularak, sertleşmiş birim hacim kütle değerleri belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlardan 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım analizleri ASTM C109 (2017) standardında öngörülen prensiplere göre yapılmıştır [28]. Her bir kür süresinde yapılan basınç dayanımı için her seride 3'er numune üzerinden ortalama değer alınmıştır. ASTM C642

(2017) standardına göre tüm test örneklerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri analiz edilmiştir [29]. 50 mm boyutlu küp test örnekleri kullanılarak, ortalama 72 saat süreyle su içerisinde bırakılarak doygun hale getirilmiş test örneklerinin atmosfer ortamında kütlece su emme değerleri incelenmiştir. Su emme değerleri, her bir seri için 28 gün kürlenmiş 3 adet numune üzerinde test edilmiştir.

Ayrıca yapılan basit maliyet hesaplarında, güncel malzeme birim bedelleri değerlendirildiğinde, çalışma kapsamındaki stronsiyum alüminat katkı kompozit pigment bileşimli fotolüminesan harç karışımlarına ait yaklaşık maliyet değerleri (1 USD = 26.8 TL baz alınarak) M0 karışımı için 0,17 USD/kg olarak belirlenmiştir. M1-M9 karışımlarının maliyet değerleri ise karışımlarda yer alan kompozit pigment bileşenlerin değişimine göre ortalama 0,40 USD/kg – 0,60 USD/kg aralığında değişim göstermektedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Farklı alternatif karışım tasarımlarında hazırlanan ÇEFH test örneklerinin bazı teknik bulguları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. ÇEFH test örneklerinin analiz bulguları

Karışım	KFP Bileşimi	Yaş Harç Yoğunluğu (kg/m ³)	Sertleşmiş Harç Yoğunluğu (28. gün) (kg/m ³)	Yayıllma Değeri (mm)	Gözeneklilik Oranı (%)	Su Emme Oranı (%)
M0	-	1178	1020	154	4,89	5,22
M1	KFP1	1114	998	158	5,79	5,18
M2	KFP2	1115	996	156	5,96	5,20
M3	KFP3	1113	994	153	6,08	5,24
M4	KFP4	1111	997	159	5,80	5,13
M5	KFP5	1112	994	157	5,92	5,15
M6	KFP6	1115	992	155	6,12	5,21
M7	KFP7	1109	995	162	5,93	4,97
M8	KFP8	1110	993	160	5,98	5,04
M9	KFP9	1112	991	158	6,15	5,09

3.1. Harç Karışımlarının Özellikleri

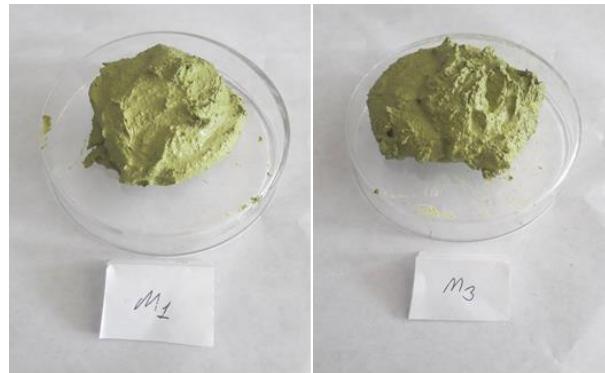
Çimento esaslı fotolüminesan harcı testleri için öncelikle bileşiminde SrAl₂O₄ katkı kompozit pigment bileşimi yer almayan M0 kodlu kontrol test örneği amaçlı hazırlanan harcın

karma işlemi sonrası yaş harç yığın yoğunluk değeri ortalama 1178 kg/m^3 ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç yoğunluğu %15,48 nem atımıyla birlikte ortalama 1020 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Kontrol harcının yaş formda genel görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. M0 Karışımına Ait Taze Yaş Harç Formu Görünümü

Karışım tasarımlarında M1 – M3 serisi 1. grup KFP bileşimlerin yer aldığı test örneklerinin karma işlemi sonrası yaş harç yığın yoğunluk değerleri ortalama $1113 - 1115 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişim göstermekte ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç yoğunluğu değerleri ise ortalama %11,62- %12,03 nem atımlarıyla birlikte $994 - 998 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Bulgulardan görüldüğü üzere, KFP bileşimindeki SrAl_2O_4 oranı arttıkça yaş harcın priz süresinde kurumadaki nem atım miktarı görece artarak daha minimum bir oranda da olsa harcın birim hacim kütle değerinin düşmesine neden olmaktadır. M1 ve M3 harç karışımlarının yaş formdaki genel görünümleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. M1 ve M3 ÇEFH Test Örnekleri Karışımlarına Ait Taze Yaş Harç Formu Görünümleri

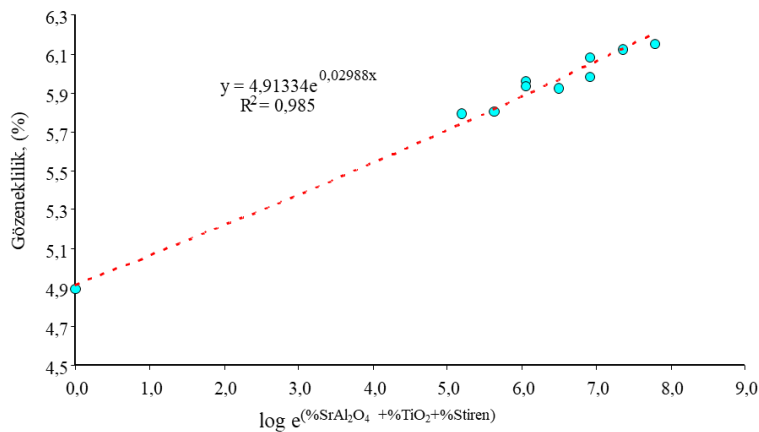
Karışım tasarımlarında M4 – M6 serisi 2. grup KFP bileşimlerin yer aldığı test örneklerinin karma işlemi sonrası yaş harç yığın yoğunluk değerleri ise ortalama 1111 - 1115 kg/m³ aralığında değişim göstermekte ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç yoğunluğu değerleri ise ortalama %11,47- %12,38 nem atımlarıyla birlikte 992 - 997 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde M7 – M9 serisi 3. grup KFP bileşimlerin yer aldığı test örneklerinin karma işlemi sonrası yaş harç yığın yoğunluk değerleri ise ortalama 1109 - 1112 kg/m³ aralığında değişim göstermekte ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç yoğunluğu değerleri ise ortalama %11,42- %12,23 nem atımlarıyla birlikte 991 - 995 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu bulgulardan incelendiğinde, KFP bileşimindeki TiO₂ oranı arttıkça, elde edilen harcın kuruma sonrası yüzeyinde oluşan titanyum etkili film tabakası katman kalınlığındaki artış sebebiyle kuruma sürecinde görece daha düşük düzeyde nem atımı özelliği sergilediği gözlenmiştir. M6 ve M9 harç karışımlarının yaş formdaki genel görünüşleri sembolik olarak Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. M6 ve M9 ÇEFH Test Örnekleri Karışımlarına Ait Taze Yaş Harç Formu Görünüşleri

ÇEFH karışımlarında kontrol harcının yayılma tablası deneyinde yayılma değeri ortalama 154 mm olarak belirlenmiştir. KFP bileşimli ÇEFH karışımların yaş harç formundaki yayılma değerleri ise 153 mm – 162 mm aralığında değişim göstermiştir. Genel bir eğilim olarak her bir grup serideki SrAl₂O₄ oranı arttıkça, harcın yayılma değerinin düştüğü görülmekle birlikte TiO₂ oran artışının ise yayılma değerini arttırdığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, karışımda SrAl₂O₄ varlığı, sabit karma suyu oranında su tutucu bir görev üstlenerek harcın kıvamını düşürücü bir etki gösterirken, TiO₂ varlığının ise sabit karma suyu oranında su azaltıcı ve kısmi bir akışkanlaştırıcı rol üstlendiği görülmüştür.

Tablo 4'ten görüldüğü üzere, kontrol harcı kapalı ve açık gözeneklerin oluşturduğu toplam gözeneklilik oranı %4,89 olarak belirlenmiştir. ÇEFH karışımlarında KFP bileşimleri ilave edildiğinde harcın matris yapısında gözeneklilik oranının da değiştiği görülmektedir. Özellikle KFP bileşiminde her bir grupta yer alan serilerde, pigment karışımındaki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, harcın gözeneklilik oranının da arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, üç grup seri arasında pigment karışımındaki TiO_2 oranı arttıkça, harcın gözeneklilik oranının da arttığı belirlenmiştir. Örneğin 1. grup seride (M1-M3) $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişim gösterdiğinde, sertleşmiş harcın matris yapısındaki gözeneklilik oranı kontrol harcına göre %24,34 artış göstererek daha gözenekli bir form oluşturduğu belirlenmiştir. Benzer bir şekilde, aynı seri içerisinde $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişiminde sırasıyla gözeneklilik oran değişimi kontrol harcına göre %18,40, %21,88 ve %24,34'tür. KFP bileşimlerinde harcın gözeneklilik oranına etken bir diğer faktörün TiO_2 oranındaki artış miktarı olduğu belirlenmiştir. Örneğin her üç grup KFP serisinde %5 $SrAl_2O_4$ oranlı harç örneklerinin kontrol harcına göre gözeneklilik oran değişimi sırasıyla %21,88, %21,06 ve %22,29'dur. Genel bir eğilim olarak, sertleşmiş ÇEFH harcın gözeneklilik oranı yoğunluk değerinin bir fonksiyonu olarak da değişmektedir. Sertleşmiş harcın yoğunluk değeri azaldıkça, matris yapının gözeneklilik oranının artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgulardaki sayısal değişimlerin detayda irdelenmesi amacıyla, KFP bileşimlerindeki 3 ana malzemenin birbiriyle etkileşimi ve harcın matris yapıya etkisini temsil etmesi bağlamında, harç örneklerinin toplam karışımındaki $SrAl_2O_4$, TiO_2 ve Stiren akrilik emülsiyon oranlarının toplamı ile harcın toplam gözeneklilik değişimi arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 6'da verilmiştir. Grafiksel analizden de görüldüğü üzere, karışım tasarımında KFP bileşimleri miktarı arttıkça, sertleşmiş harcın toplam gözeneklilik oranı artmaktadır.



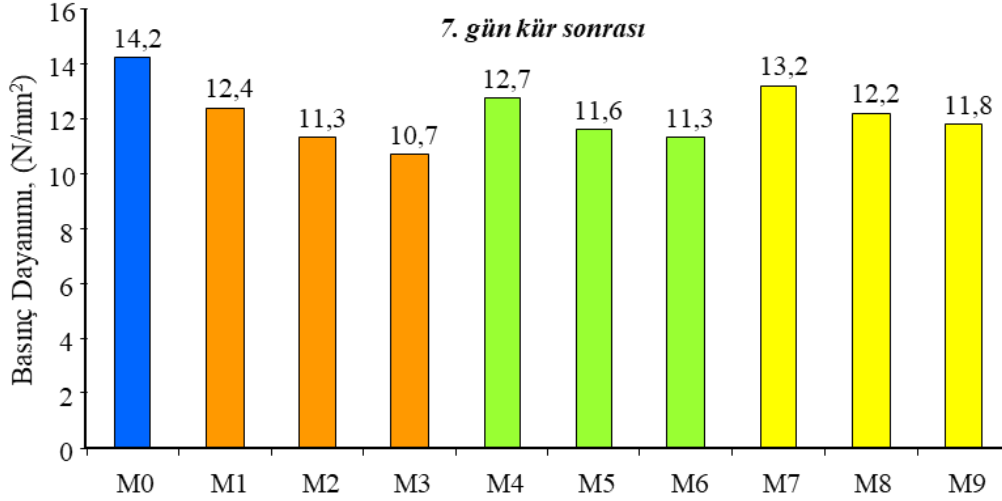
Şekil 6. KFP Bileşim Malzeme Oranları – Harcın Gözeneklilik Oranı İlişkisi

Çalışma kapsamında fiziksel bir özellik olarak incelenen bir diğer parametre ise sertleşmiş harcın atmosfer basıncı altında su emme değeridir. Elde edilen teknik bulgulara göre (Tablo 4), ÇEFH karışımlarına KFP bileşimleri ilave edildiğinde harcın su emme değerlerini azaltıcı bir rol oynadığı belirlenmiştir. Kontrol harcının su emme değeri %5,22 olup, diğer tüm KFP bileşenli ÇEFH karışımlarının su emme oranları %4,97 - %5,24 aralığında değişim göstermiştir. Özellikle KFP bileşiminde her bir grupta yer alan serilerde, pigment karışımındaki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, minimal düzeyde kabul edilebilecek oranlarda harcın su emme oranlarında artış olmasına rağmen, genel eğilim kontrol harcına göre daha düşük su emme oranına sahip olunmasıdır. Örneğin 2. grup seride (M4-M6) $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişim gösterdiğinde, sertleşmiş harcın su emme oranı kontrol harcına göre %5,22'lik değerden sırasıyla %5,13 ve %5,21 değerine değişmiştir. Harç gözenekliliğinde olduğu gibi, KFP bileşimlerinde harcın su emme oranına etken bir diğer faktörün TiO_2 oranındaki artış miktarı olduğu belirlenmiştir. Örneğin her üç grup KFP serisinde %5 $SrAl_2O_4$ oranlı harç örneklerinin kontrol harcına göre su emme oran değişimi %5,22'den sırasıyla %5,20, %5,15 ve %5,04'tür. Genel bir eğilim olarak, sertleşmiş ÇEFH harcın su emme oranı gözeneklilik değerinin bir fonksiyonu olarak da değişmektedir. Sertleşmiş harcın gözeneklilik değeri arttıkça, matris yapının su emme oranının düştüğü belirlenmiştir. Su emme oranına etkiyen faktörler detayda irdelendiğinde, $SrAl_2O_4$ miktarı, matris yapıda taneler arası bağ dokuda küçük kılcal boşlukların oluşmasına sebebiyet verdiği için yapıyı kısmen daha gözenekli bir forma büründürmekte ve buna bağlı olarak da su emme oranında kısmi artışlar oluşmaktadır. Ancak, KFP bileşimde TiO_2 miktarı arttıkça, matris yapıda ve test örneğinin kuruma yüzeyinde oluşan titanyum film tabakası, kısmi bir su geçirimsizlik özelliği kazanmakta olup, harç örneklerinin daha düşük su emme özelliğine sahip olmasını sağlamaktadır. TiO_2 miktarına ve karışımda kullanılan SAKE bağlı oluşan film tabakası kalınlığı arttıkça, bu etkileşimin daha da belirginleştiği gözlemlenmiştir.

3.2. Basınç Dayanımı Özelliği

Bileşiminde $SrAl_2O_4$ katkılı kompozit pigment içermeyen çimento esaslı fotolüminesan harcının M0 kodlu kontrol test örneklerine ait basınç dayanım değerleri kür sürelerine göre 7. gün sonrası basınç dayanımı ortalama $14,2 \text{ N/mm}^2$, 14. gün sonrası basınç dayanımı ortalama $18,1 \text{ N/mm}^2$ ve 28. gün sonrası basınç dayanımı ise ortalama $22,3 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında KFP katkılı her üç grup seri için hazırlanan test

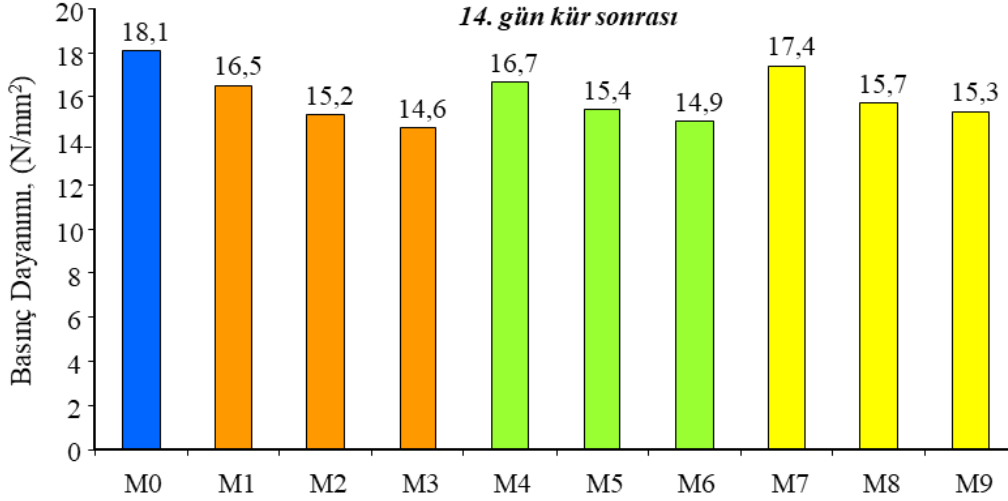
örneklerinin 7, 14 ve 28.gün kür süreleri sonrası basınç dayanım değerleri değişimi Şekil 7 – Şekil 9’da grafiksel olarak gösterilmiştir.



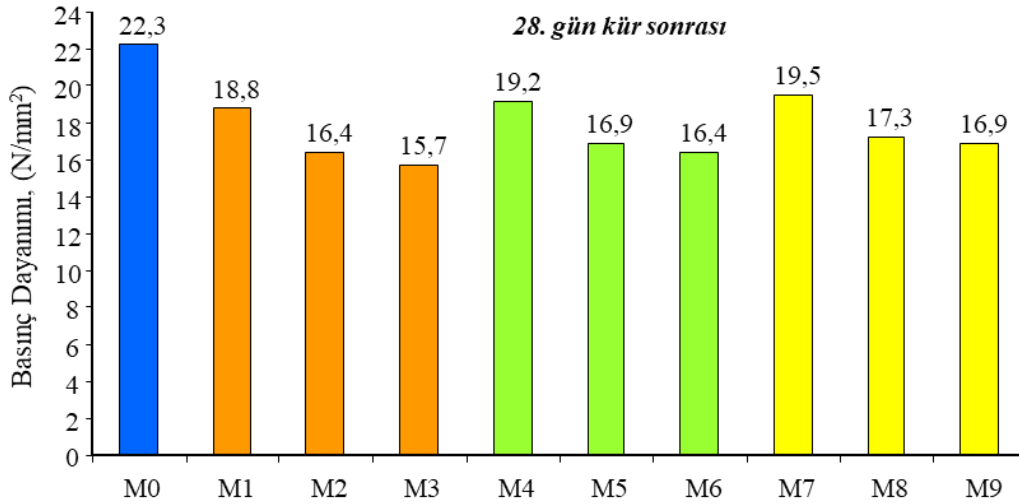
Şekil 7. ÇEFH Test Örneklerinin Basınç Dayanım Analiz Bulguları (7. Gün Kür Sonrası)

Şekil 7 irdelendiğinde görüldüğü üzere, KFP bileşiminde her bir grupta yer alan serilerde, pigment karışımındaki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, harcın 7 gün kür sonrası basınç dayanımı değerleri düşmektedir. Bununla birlikte, üç grup seri arasında pigment karışımındaki TiO_2 oranı arttıkça da harcın basınç dayanımı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Örneğin 1. grup seride (M1-M3) $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişim gösterdiğinde, 7 gün kür sonrası sertleşmiş harcın basınç dayanım değeri kontrol harcına göre %24,65 oranında düşüş göstererek dayanım kaybetmektedir. Benzer bir şekilde, diğer iki grup seri içerisinde $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişiminde sırasıyla dayanım değerleri değişimi kontrol harcına göre %20,42 ve %16,90'dır. Bu bulgular, KFP bileşimindeki $SrAl_2O_4$ ve TiO_2 oranlarının çimento esaslı fotolüminesan harcın dayanım değerlerinin değişiminde etken bir rol aldığını göstermektedir. KFP bileşimindeki $SrAl_2O_4$ oranı artışı basınç dayanım değerinin azalmasına, TiO_2 oranının artışı ise basınç dayanım değerinin iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Ancak, her bir durumda çimento esaslı fotolüminesan harcın karışımında KFP bileşiminin yer alması, harcın basınç dayanım değerini kontrol harcına göre azalmasına neden olmaktadır. Çimento esaslı fotolüminesan harcın hidrasyonunda matris yapıda $SrAl_2O_4$ varlığı bağ dokunun zayıflamasına ve $SrAl_2O_4$ oranına bağlı olarak gelişen gözeneklilik artışının da dayanım değerini zayıflattığı düşünülmüştür. Kontrol örneği de dahil olmak üzere tüm ÇEFH test örneklerinin 7. gün kür sonrası basınç dayanım değerleri, TS EN 998-1 standardında [30] 28 gün kür sonrası için öngörülen CS IV

(≥ 6 N/mm²) değerini kolaylıkla sağladığı ve yüksek dayanımlı harç kategorisinde yer alabildiğini göstermektedir.



Şekil 8. ÇEFH Test Örneklerinin Basınç Dayanım Analiz Bulguları (14. Gün Kür Sonrası)



Şekil 9. ÇEFH Test Örneklerinin Basınç Dayanım Analiz Bulguları (28. Gün Kür Sonrası)

Şekil 8 ve Şekil 9 irdelendiğinde de görüldüğü üzere, 7 gün kür sonrası tüm test örneklerinin dayanım değişim karakteristiği benzer şekilde 14 ve 28. gün kür sonrası dönemde de sergilendiği açıkça görülmektedir. ÇEFH karışım tasarımında KFP bileşiminin yer alması, test örneklerinin kür süresine bağlı dayanım artışına dezavantaj oluşturan bir etki göstermemiştir. Kür süresinin 28 gün boyunca devam eden sürecinde, tüm test örneklerinin

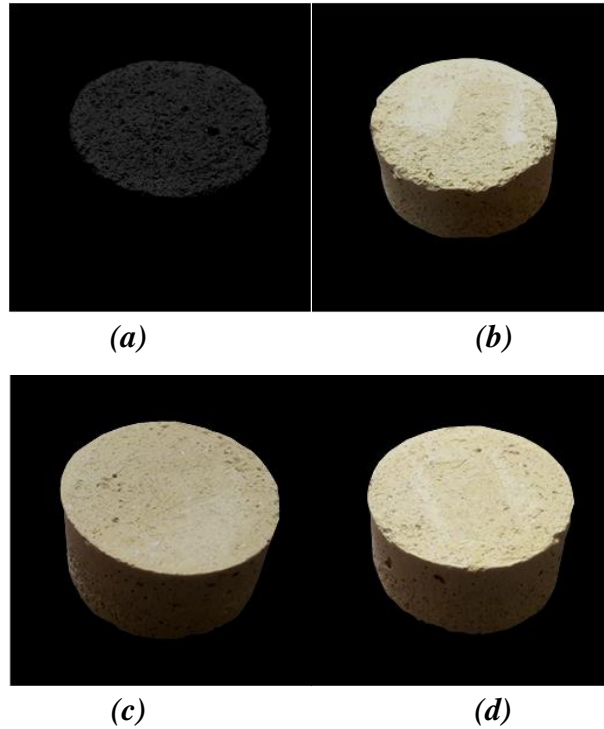
dayanım kazandığı görülmektedir. 14 günlük kür süresinde KFP bileşenli ÇEFH test örneklerinin kontrol harcına göre basınç dayanım kaybı her bir grup için ayrı ayrı sırasıyla $SrAl_2O_4$ oran değişimine bağlı şu şekilde elde edilmiştir: 1. grup seride (M1-M3) %8,84, %16,02 ve %19,34'tür. 2. grup seride (M4-M6) %7,73, %14,92 ve %17,68'dir. 3. grup seride ise (M7-M9) %3,87, %13,26 ve %15,47'dir. Benzer bulgu 28 günlük kür süresinde KFP bileşenli ÇEFH test örneklerinin kontrol harcına göre basınç dayanım kaybı her bir grup için ayrı ayrı sırasıyla $SrAl_2O_4$ oran değişimine bağlı olarak; 1. grup seride (M1-M3) %15,70, %26,46 ve %29,60'tır. 2. grup seride (M4-M6) %13,90, %24,22 ve %26,46'dır. 3. grup seride ise (M7-M9) %12,56, %22,42 ve %24,22'dir. Bu bulgular bağlamında genel bir eğilim olarak KFP bileşimindeki $SrAl_2O_4$ ve TiO_2 oranlarının çimento esaslı fotolüminesan harcın hidratasyon süreci devam ettikçe basınç dayanım değerlerinin değişimindeki etkinliğini koruduğu görülmektedir. 7 gün süreli kür dönemi için elde edilen bulgulara paralel olarak, KFP bileşimindeki $SrAl_2O_4$ oranı artışı basınç dayanım değerinin azalmasına, TiO_2 oranının artışı ise basınç dayanım değerinin iyileşmesine benzer şekilde olanak sağlamıştır. Ancak, her bir durumda çimento esaslı fotolüminesan harcın karışımında KFP bileşiminin yer alması, harcın basınç dayanım değerini kontrol harcına göre azalmasına neden olmuştur. Çimento esaslı fotolüminesan harcın 28 günlük kür dönemindeki hidratasyonunda matris yapıda $SrAl_2O_4$ varlığı bağ dokunun giderek daha fazla zayıflatmasına ve $SrAl_2O_4$ oranına bağlı olarak dayanım değerinin azalmasına sebep olmuştur. Solís ve ark. [31] benzer sonucu elde etmiş ve çimentolu ürünlerin hidratasyonu sırasında $SrAl_2O_4$ varlığında CSH üretiminin azaldığını öne sürmüşlerdir. Ancak, bu çalışma kapsamında üretilen ve kontrol örneği de dahil olmak üzere tüm ÇEFH test örneklerinin 28. gün kür sonrası basınç dayanım değerleri, TS EN 998-1 standardında [30] öngörülen CS IV ($\geq 6 \text{ N/mm}^2$) değerini yaklaşık 3 katlık bir değerle sağladığı ve yüksek dayanımlı harç kategorisinde yer aldığı belirlenmiştir.

3.3. Işık Yayma – Parlaklık Özellikleri

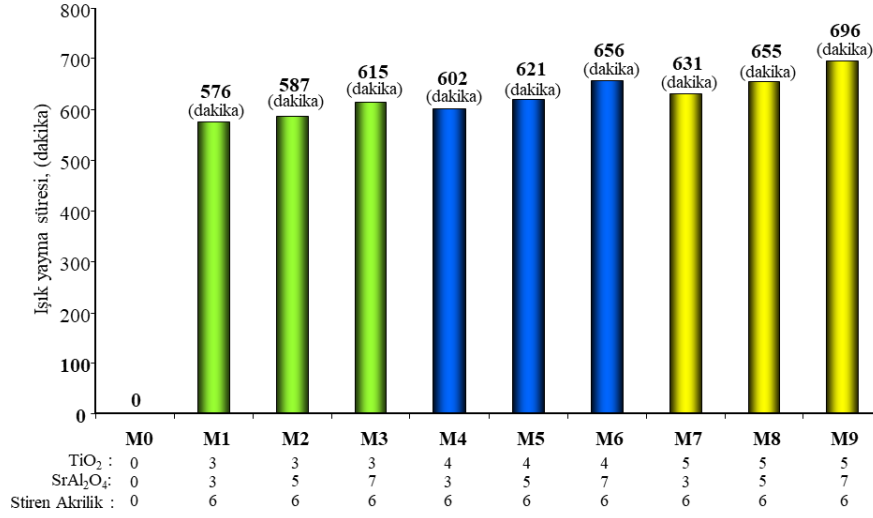
Çimento esaslı fotolüminesan harcın ışık yayma ve parlaklık performansının belirlenebilmesi için hazırlanan test örneklerinin bir ışık kaynağı tarafından uyarılması gerekmektedir. Bunun için belirli süre ve periyotta, eşdeğer bir ortamda test örneklerinin ışık kaynağı bulunan bir ortamda tutulması ve ışık soğurmasının sağlanması gerekir. Bu ortamın sağlanması amacıyla çalışma kapsamında hazırlanan tüm ÇEFH test örnekleri açık bir alanda ve ışığa bütünüyle maruz kalabilecek bir pozisyonda 24 saatlik zaman diliminde saat 06:00'dan saat 19:30'a kadar gün ışığında bırakılmış olup, bu süre sonunda ışık soğurmuş

örnekler daha sonra dışarıdan ışık sızdırmayan karanlık bir odaya alınarak örneklerin ışık yayma-parlaklık durumları süre olarak kontrol edilerek kaydedilmiştir. Bu basitleştirilmiş değerlendirme yöntemi, test örneklerinin parlaklığını gözlemlemek amacıyla temel ölçme metodu olarak uygulanmıştır. Işık yayan beton örnekleri üzerinde benzer uygulama ve ölçme metodolojisi Sundari ve Shriswarnambigai [7] tarafından yapılan analizlerde de uygulanmıştır.

Kontrol harcı (M0) karışımı da dahil olmak üzere çimento esaslı fotolüminesan silindirik geometrik formda hazırlanmış tüm harç örneklerinin 24 saatlik zaman diliminde saat 06:00'dan saat 19:30'a kadar gün ışığına maruz kalması sonrası karanlık bir oda ortamında ışık yayma-parlaklık oluşturma özelliği saat cinsinden özenle incelenerek her bir test karışımı için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Test örneklerinin ışık yayma özelliklerinin karanlık oda ortamında ışık yayma performanslarına sembolik örnekler Şekil 10'da gösterilmiştir. Elde edilen ışık yayma süresi bulguları Şekil 11'de grafiksel olarak verilmiştir.

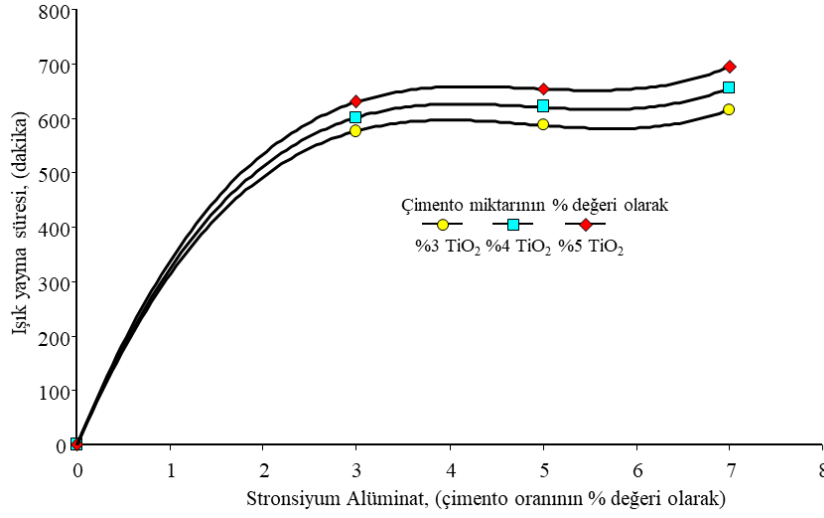


Şekil 10. (a) M0, (b) M1, (c) M5 ve (d) M9 ÇEFH Test Örneklerinin Işık Yayma Süreleri Analizi Sembolik Görünümü



Şekil 11. Çimento Miktarına Oranla KFP Bileşenli ÇEFH Test Örneklerinin Işık Yayma Süreleri Analizi

KFP bileşimi içermeyen kontrol amaçlı tasarlanan ÇEFH test örneklerinin yaklaşık 13 saat boyunca gün ışığına maruz kalmalarına rağmen, karanlık ortamda herhangi bir ışık yayma ve parlaklık özelliğinin oluşmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, farklı oranlarda ve kompozisyonlarda KFP bileşimi içeren ÇEFH test örneklerinin yaklaşık 13 saat boyunca gün ışığına maruz kaldıktan sonra, karanlık ortamda ışık yayma etkinliği sergiledikleri gözlenmiş olup, elde edilen ışık yayma-parlaklık sürelerinin 576 dakika – 696 dakika aralığında değiştiği belirlenmiştir. Benzer şekilde Naeem ve ark. [32] stronsiyum alüminat öropiyum ve disprosyum dopingi katkılı harçların maksimum 10 saate kadar lüminesans etkisini verebildiğini tespit etmişlerdir. Test örneklerinde 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç örneklerinin KFP bileşimine bağlı ışık yayma süreleri, pigment kombinasyonunda yer alan SrAl₂O₄ ve TiO₂ miktarına göre değişim gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle pigment kombinasyonunun SrAl₂O₄ içeriği ışık yayma süresine en etken faktör olduğu gözlemlenmiştir. Bu etkinin daha detay irdelenebilmesi amacıyla test örneklerinin SrAl₂O₄ miktarına bağlı ışık yayma süreleri grafiksel olarak irdelenmiş olup, Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. SrAl₂O₄ Oranı – Işık Yayma Süresi İlişkisi

Şekil 12’de gösterilen grafik, KFP bileşiminde sabit değer olarak kullanılmış olan %6 SAKE (çimento yüzdesi) katkılı karışımların ışık yayma süreleri analizini göstermektedir. Sabit oranda SAKE (%6) kullanım oranında hazırlanan pigment kombinasyonunda pigment bileşiminde kullanılan SrAl₂O₄ ve TiO₂ miktarının tüm test örneklerinin ışık yayma sürelerinin karşılaştırmalı olarak irdelendiğinde, SrAl₂O₄ yüzdesi arttıkça sertleşmiş harç örneklerinin ışık yayma süreleri artmaktadır. Bununla birlikte, ışık yayan pigment kompozisyonundaki TiO₂ oranı arttıkça, pigment bileşimindeki TiO₂ oranının ışık yaymadaki etkisinin daha da iyileştiği görülmüştür. Örneğin; %3 SrAl₂O₄ karışım oranlı pigmentin bileşiminde TiO₂ oranı %3’ten %4’e arttığında test örneklerinin ışık yayma süresinde %4.51’lik bir artış görülmüştür. Benzer şekilde TiO₂ oranı %4’ten %5’e arttığında ise test örneklerinin ışık yayma süresinde %9.55’lik bir artış görülmüştür. Bu artışın sebebi, pigment bileşimindeki TiO₂’nin harcın sertleşmesi süreci sonrasında harç yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak, gün içerisinde SrAl₂O₄’ın soğurduğu ışık miktarını görece daha uzun bir süre ışığa yapmasına olanak sağlaması olarak yorumlanmıştır. Benzer etkileşim, test örneklerindeki SrAl₂O₄ miktarı arttıkça daha da belirginleşmiştir. %5 ve %7 SrAl₂O₄ oranlı pigment bileşiminde TiO₂ oranları %3’ten %4 ve %3’ten %5’e artırıldığında harcın ışık yayma sürelerindeki değişim sırasıyla %5,79, %11,58, %6,67 ve %13,17 olarak belirlenmiştir. Bu test bulgularından elde edilen genel eğilim, çimento esaslı fotolüminesan harcın ışık yayma ve parlaklık performansının daha da iyileşmesi için karışım bileşimindeki SrAl₂O₄ miktarının artırılması önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, harcın matris yapısında ışık yaymada ışığın taşınımı ve/veya

parlaklığının daha belirginleşmesini sağlamak amacıyla karışımda ilave bir katkı materyali olarak fiber optik lifler takviye elemanı olarak düşünülebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, $SrAl_2O_4$ pigment katkıli fotolüminesan harçlar üretilmiştir. Bu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, harçların fotolüminesans özelliklerini tespit etmek amacıyla, harçların karanlık ortamda ne kadar süre boyunca ışık yaydıkları gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre:

1. KFP bileşimindeki TiO_2 oranı arttıkça, elde edilen harcın kuruma sonrası yüzeyinde oluşan titanyum etkili film tabakası katman kalınlığındaki artış sebebiyle kuruma sürecinde görece daha düşük düzeyde nem atımı özelliği sergilediği gözlemlenmiştir.
2. Genel bir eğilim olarak her bir grup serideki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, harcın yayılma değerinin düştüğü görülmekle birlikte TiO_2 oran artışının ise yayılma değerini arttırdığı görülmüştür.
3. Özellikle KFP bileşiminde her bir grupta yer alan serilerde, pigment karışımındaki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, harcın gözeneklilik oranının da arttığı belirlenmiştir. Örneğin, 1. Grup KFP'li harçlarda, $SrAl_2O_4$ oranı %3'ten %7 oranına değişiminde sırasıyla gözeneklilik oran değişimi kontrol harcına göre %18,40, %21,88 ve %24,34'tür.
4. ÇEFH karışımlarına KFP bileşimleri ilave edildiğinde harcın su emme değerlerini azaltıcı bir rol oynadığı belirlenmiştir. Kontrol harcının su emme değeri %5,22 olup, diğer tüm KFP bileşenli ÇEFH karışımlarının su emme oranları %4,97 - %5,24 aralığında değişim göstermiştir. Özellikle KFP bileşiminde her bir grupta yer alan serilerde, pigment karışımındaki $SrAl_2O_4$ oranı arttıkça, minimal düzeyde kabul edilebilecek oranlarda harcın su emme oranlarında artış olmasına rağmen, genel eğilim kontrol harcına göre daha düşük su emme oranına sahip olunmasıdır.
5. 28 günlük kür süresinde KFP bileşenli ÇEFH test örneklerinin kontrol harcına göre basınç dayanım kaybı her bir grup için ayrı ayrı sırasıyla $SrAl_2O_4$ oran değişimine bağlı şu şekilde elde edilmiştir: 1. grup seride (M1-M3) %15,70, %26,46 ve %29,60'dır. 2. grup seride (M4-M6) %13,90, %24,22 ve %26,46'dır.

6. Farklı oranlarda ve kompozisyonlarda KFP bileşimi içeren ÇEFH test örneklerinin yaklaşık 13 saat boyunca gün ışığına maruz kaldıktan sonra, karanlık ortamda ışık yayma etkinliği sergiledikleri gözlenmiş olup, elde edilen ışık yayma-parlaklık sürelerinin 576 dakika – 696 dakika aralığında değiştiği belirlenmiştir.

SrAl₂O₄ yüzdesi arttıkça sertleşmiş harç örneklerinin ışık yayma süreleri artmaktadır. Bununla birlikte, ışık yayan pigment kompozisyonundaki TiO₂ oranı arttıkça, pigment komponentinin ışık yaymadaki etkisinin daha da iyileştiği görülmüştür.

KAYNAKÇA

- [1] M. Mageswari, A. R. Rinisha, and Y. Monisha, “Glowcrete: A Modern Phosphorescent Concrete,” *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, vol. 8, no. 4, pp. 213-218, Apr. 2021.
- [2] M. Kostic, and L. Djokic, “Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1565–1572, Oct. 2009, DOI: 10.1016/j.energy.2009.06.056.
- [3] T. Subramani, R. Sathiyaraj, M. N. Suhail, M. Jestin, and T. S. Sreehari, “Transparent Concrete Concept By Replacing Fine Aggregate Of Waste Glass By Using Admixture In Optical Fibre,” *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, vol. 7, no. 2, pp. 108-115, Apr. 2018.
- [4] X. Yu, C. Zhou, X. He, Z. Peng, and S. Yang, “The influence of some processing conditions on luminescence of SrAl₂O₄:Eu²⁺ nanoparticles produced by combustion method,” *Materials Letters*, vol. 58, no. 6, pp. 1087– 1091, Feb. 2004, DOI: 10.1016/j.matlet.2003.08.022.
- [5] N. R. Nagdive, and S. D. Bhole, “To evaluate properties of translucent concrete/mortar & their panels,” *International Journal of Research in Engineering & Technology*, vol. 1, no. 7, pp. 23-30, Dec. 2013.
- [6] G. Ashok, B. Jose ravindraraj, S. Ramesh, and R. Ramkumar, “Perfomance Evaluation On Light Transmitting Concrete (Translucent Concrete),” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 515-521, Mar. 2016.

- [7] S. Sundari, and A. Shriswarnambigai, “Experimental study on Luminescent Concrete,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 8, no. 6, pp. 4188-4196, 2021.
- [8] R. E. Rojas-Hernandez, F. Rubio-Marcos, A. Serrano, A. Del Campo, and J. F. Fernandez, “Precise tuning of the nanostructured surface leading to the luminescence enhancement in SrAl₂O₄ based core/shell structure,” *Scientific Reports*, vol. 7, no. 462, pp. 1-9, Mar. 2017, DOI: 10.1038/s41598-017-00541-w.
- [9] R. E. Rojas-Hernandez, M. A. Rodriguez, and J. F. Fernandez, “Role of the oxidizing agent to complete the synthesis of strontium aluminate based phosphors by the combustion method,” *RSC Adv.*, vol. 5, no. 4, pp. 3104–3112, 2015, DOI: 10.1039/C4RA10460A.
- [10] M. P. Anesh, S. K. H. Gulrez, A. Anis, H. Shaikh, M. E. A. Mohsin, and S. M. Al-Zahrani, “Developments in Eu⁺²-doped strontium aluminate and polymer/strontium aluminate composite,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 33, no. S1, 21436(E1-E9), 2014, DOI: 10.1002/adv.21436.
- [11] M. Pagden, K. Ngahane, and M. S. R. Amin, “Changing the colour of night on urban streets - LED vs. part-night lighting system,” *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 69, no. 100692, Mar. 2020, DOI: 10.1016/j.seps.2019.02.007.
- [12] A. N. Bone, “Optimization of a Strontium Aluminate,” Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2017. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1376499>
- [13] Y. Karabulut, A. Canımoğlu, Z. Kotan, O. Akyüz, and E. Ekdal, “Luminescence of dysprosium doped strontium aluminate phosphors by codoping with manganese ion,” *J. Alloy. Compd.*, vol. 583, pp. 91–95, 2014, DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.172.
- [14] H. Barghlame, and H. H. Gavvani, “Light Emitting Concrete Composition and Method of Synthesizing Light Emitting Concrete Structure,” U.S. Patent US20170029696A1, Feb., 2, 2017.
- [15] A. Wiese, T. Washington, B. Tao, and J. Weiss, “Assessing the Performance of Glow in the Dark Concrete,” Article in *Transportation Research Record Journal of the*

- Transportation Research Board, vol. 2508, no. 1, pp. 31-38, 2015, DOI: 10.3141/2508-04.
- [16] M. Saleem, and N. I. A. Blaisi, “Luminescent concrete composition and product,” U.S. Patent, US20200109089A1, Apr., 9, 2020.
<https://patents.google.com/patent/US20200109089A1/en>
- [17] G. Dipika, S. Kaaviya, S. Kavitha Karthikeyan, and S. Indhumathi, “Exploratory Study On Photo Luminescence Induced Concrete,” International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), vol. 10, no. 3, pp. 622–628, 2019.
- [18] Kaltun. (2023). SMW.115 (KM.01.M.0015) Mika Ürünü Teknik Föyü. [Online]. Available: <http://www.kaltun.com.cn/images/Dosyalar/8299a0e4.pdf>, Erişim Tarihi: 13.02.2023.
- [19] Kaltun. (2023). SMW.390 (KM.03.M.0090) Mika Ürünü Teknik Föyü. [Online]. Available: <http://www.kaltun.com.cn/images/Dosyalar/79ec5093.pdf>, Erişim Tarihi: 13.02.2023.
- [20] MikroTeknik. (2023). TiO₂ Rutil Ürünü Teknik Föyü. [Online]. Available: <http://www.mikroteknik.com.tr/urunler/titan-dioksit-rutil/> Erişim Tarihi: 13.02.2023.
- [21] N. Berik, “Possible Harmfull Effects of Titanium Dioxide and Nano Titanium Dioxide Use on Aquatic Products,” COMU Journal of Marine Science and Fisheries, vol. 1, no. 2, pp. 59-65, 2018.
- [22] A. J. Haider, Z. N. Jameel, and I. H. M. Al-Hussaini, “Review on: Titanium diokside Applications,” Enrgy. Proced., vol. 157, pp. 17–29, Jan. 2019, DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.159.
- [23] L. M. Anaya-Esparza, Z. Villagrán-de la Mora, J. M. Ruvalcaba-Gómez, R. Romero-Toledo, T. Sandoval-Contreras, S. Aguilera-Aguirre, E. Montalvo-González, and A. Pérez-Larios, “Use of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanoparticles as Reinforcement Agent of Polysaccharide-Based Materials,” Processes, vol. 8, no. 11, pp. 1395, 2020, DOI: 10.3390/pr8111395.
- [24] T. Huang, and S. Gong, “Preparation of Emulsifier-Free Styrene–Acrylic Emulsion via Reverse Iodine Transfer Polymerization,” Polymers, vol. 13, no. 19, pp. 3348, 2021, DOI: 10.3390/polym13193348.

- [25] H. Zhang, H. Yang, J. Lu, J. Lang, and H. Gao, “Study on Stability and Stability Mechanism of Styrene-Acrylic Emulsion Prepared Using Nanocellulose Modified with Long-Chain Fatty Acids,” *Polymers*, vol. 11, no. 7, pp. 1131, 2019, DOI: 10.3390/polym11071131.
- [26] K. K. Boğazkesen, “PVA lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, TR.
- [27] Kâğır harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile), TS EN 1015-3 , 2000.
- [28] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM C109, 2020.
- [29] Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM C642, 2017.
- [30] Kâğır harcı - Özellikler - Bölüm 1: Kaba ve ince sıva harcı, TS EN 998-1, 2011.
- [31] C. G. Solís, M. Vallejo, M. Sosa, J. J. B. Alvarado, T. Fraga, G. Fajardo, and L. M. Torres-Martínez, “Development of Photoluminescence White Cement Based Materials and Physic-Mechanical Study,” *Research in Computing Science*, vol. 149, no. 2, pp. 61-70, 2020.
- [32] M. Naeem, S. Khan, I. Zekker, F. Subhan, M. Salman, ... and A. Khan, “Application of Strontium Aluminate Europium and Dysprosium Doped in Cement Mortar as a Luminescent Material for the Maintenance of Green Environments,” *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, vol. 27, no. 1, 04022032, 2023, DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000716.