

Microstructural Evaluation of Cement Mortars with Blast Furnace Slag Exposed to Sulfate Attack

İlhami DEMİR^{a,b}, Selahattin GÜZELKÜÇÜK^a, Özer SEVİM^{a,1}, Ahmet FİLAZİ^a, Çağrı Göktuğ ŞENGÜL^a

^aDepartment of Civil Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale 71451, Turkey

^bDepartment of Architecture, Amasya University, Amasya 05100, Turkey

Abstract

Sulfate is a major chemical threat to concrete and reinforced concrete structures. In this study, a micro-structural analysis of the effects of sulfate on cement mortars with blast furnace slag substitution was conducted. To observe the effect of blast furnace slag on cement mortar, blast furnace slag substitution was made instead of CEM I 42.5 R cement at different ratios. Mechanical properties, length change and micro-structures of samples cured in potable water and 10% Na₂SO₄ solution for 7, 28, 90 days were analyzed. When the results of compressive strength and length change were examined, it was seen that compressive strengths and length change values increased in time. The length change values were found to be higher in the sulfate environment. The blast furnace slag in the sulfate environment has reduced the percentage of length change. A comparative chemical analysis of the samples, C-S-H (Calcium Silicate Hydrate), CH (Calcium Hydroxide) and Ettringite developments were presented in terms of micro-structural properties. As a result, it was observed that CH gels develop in 7 day samples, C-S-H gels in 28 day samples, and ettringite in samples cured in % 10 Na₂SO₄ solution for 90 days.

Keywords: "Micro-structure, blast furnace slag, sulfate effect, compressive strength, length change, cement mortar"

1. Giriş

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir. Beton veya betonarme elemanların zaman içerisinde bozulmalarına çeşitli iç ve dış etkenler sebep olmaktadır. Dış etkiler; sülfat etkisi, donma-çözülme, aşınma, karbonatlaşma, asit baz ve tuz etkileri iken iç etkiler ise; alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu, agrega ve çimento harcının termal özellikleri arasındaki farklılıklar gibi etkiler sayılabilir [1].

Yapıların tasarımında, betonun tasarlanan dayanımdan daha az dayanıma sahip olmaması istenmektedir. Ancak, betonun servis süresince karşılaştığı fiziksel ve kimyasal olaylar karşısında yeterli dayanıklılık göstermesi gerekmektedir. Betonun yeterince dayanıklı olması en az betonun dayanımı kadar hatta çoğu zaman dayanımdan daha da önemlidir [2-4].

Dayanıklılığı yüksek betonların üretiminde genellikle doğal ve yapay puzolanlar kullanılmaktadır. Betonun dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek ve atık ürünlerin tamamen kullanılmasını sağlamak için uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC) vb. puzolanlar beton içerisinde kullanılmaktadır [5-9]. Yapay olarak kullanılan puzolanlar, kaynakların ve çevrenin korumasını sağlamakta ve maliyeti azalmaktadır [10]. Puzolanlar kullanılan malzemelerin miktar ve özelliklerine bağlı olarak taze ve setleşmiş betonun birçok özelliğini etkileyebilmektedir [11,12].

Betonda uçucu kül kullanımı çimento pastasının gözenek yapısını etkiler ki bu da betonun akıcılık özellikleri üzerinde etki gösteren en önemli faktörlerdendir [13]. Fakat Uçucu kül miktarı artırılıp çimento miktarı azaltıldıkça eğilme ve basınç dayanımlarının da azaldığı gözlenmiştir [14-17]. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı gün geçtikçe artmaktadır, yüksek fırın cürufu betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmektedir [18-21].

Betondaki en büyük dayanıklılık problemlerinden birisi de sülfat problemidir. Genellikle betonun çevresindeki zemin ve yeraltı suyunda erimiş halde bulunan mineral tuzlar (alkaliler) arasında en zararlı olanları magnezyum ve sodyum sülfatlardır. Bu sülfatlar çimento içerisindeki hidratasyona uğramış kalsiyum alimünatlar ile birleşerek genişleyen kristaller meydana getirirler. Zamana bağlı olarak artan bu genişlemenin betonun çatlamasına, ufalanarak dökülmesine neden olduğu birçok araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [22-24]. Yapılan bu çalışma ile yüksek fırın cürufunun çimento harçlarında %5 ve %20 oranlarında çimento yerine ikame edilerek mikro-yapısı, basınç dayanımı, boy uzamaları ve sülfat ortamında dayanıklılığı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

¹ Corresponding author. Tel.: +0-318-357-4242 (1263)

E-mail address: ozersevim@kku.edu.tr

2. Malzeme ve Metot

2.1. Malzeme

Yapılan çalışmada TS EN 197-1'e uygun CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan kum TS EN 196-1 standardında belirtilen CEN referans kumudur [25,26]. Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen yüksek fırın cürufu kullanılmış olup, kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal analiz sonuçları ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Deneyde içme suyu kullanılmış ve ASTM C 1012 standartlarında 100 g/l Na₂SO₄ çözeltisi kürü hazırlanmıştır [27].

Tablo 2.1. CEM I 42,5 R Çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal bileşim (%)	CEM I 42,5 R
SiO ₂	13.01
Al ₂ O ₃	3.470
Fe ₂ O ₃	2.740
CaO	66.04
MgO	1.230
Na ₂ O	0.270
K ₂ O	0.930
SO ₃	4.600
Fiziksel bileşim	
Özgül ağırlık	3.18
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3352
Kızdırma Kaybı (%)	1.98
Na ₂ O +0,658×K ₂ O	0.88
Priz başlama (dakika)	155
Priz sonu (dakika)	195

Tablo 2.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal bileşim (%)	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	37,17
Al ₂ O ₃	9,67
Fe ₂ O ₃	0,99
CaO	39,63
MgO	5,40
Na ₂ O	0,28
P ₂ O ₅	3,64
K ₂ O	1,19
SO ₃	1,89
Fiziksel bileşim	
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3750
Kızdırma kaybı	1,07

2.2. Metot

2.2.1 Harç Numuneleri Üretimi

Bu çalışmada boyca uzama için ASTM C 1012'ye uygun olarak 25×25×285 mm ve basınç deneyleri için TS EN 196-1 standardına uygun olarak 40×40×40 mm boyutlarında yüksek fırın cürufu ikameli çimento harçları test edilmiştir. YFC ikameli çimento harçlarının hazırlanmasında standartta belirtilen 450 gr çimento miktarına %5 ve %20 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame edilmiştir. Harç üretiminde kullanılan YFC ikameli malzeme miktarları Tablo 2.3 'de verilmiştir [26,27].

Tablo.2.3. Harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları

Malzeme	Çimento Miktarı(gr)	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Su (gr)	Kum (gr)
%5 YFC	427,5	22,5	225,0	1350±5
%20 YFC	360,0	90,0	225,0	1350±5

Tablo 2.3’de miktarları verilen YFC ikameli çimento harçları, basınç dayanım deneyi ve mikro yapı incelenmesi için TS EN 196-1’e göre hazırlanmıştır [26]. Mikro yapısal özelliklerin incelenmesi, basınç dayanımları için hazırlanan harç numunelerinden hasar görmeyen kısımlardan parça alınarak gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Basınç Dayanımının Elde Edilmesi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 196-1’de belirtilen işlemlere uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanımı cihazı deney için uygun kapasitede ve (2400±200) N/s yükleme hızında ayarlanmıştır. 40×40×40 mm boyutlarında yüksek fırın cürufu ikameli çimento harçları cihazın plakaları arasına ±5 mm’den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek yerleştirilmiştir [26]. Basınç dayanım sonuçları 7, 28 ve 90 günlük YFC ikameli çimento harçları için elde edilmiştir.

2.2.3. Boy Uzama Değerlerinin Elde Edilmesi

ASTM C 1012 standardına uygun olarak üretilen 25×25×285 mm boyutundaki harç numuneleri normal su ve % 100 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilerek 7, 28 ve 90 günlük boy ölçümleri yapılarak boy uzamaları belirlenmiştir [27].

2.2.4. Mikro-yapı İncelemesi

Normal su ve % 100 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen harç numunelerinin 2, 7, 28 ve 90 günlük mikro yapıları incelenmiştir. Mikro yapıların incelenmesi taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılan ve numune üzerine odaklanan elektron demetinin, numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan elastik ve elastik olmayan çarpışmaların meydana getirdiği etkilerin uygun algılayıcılarda toplanarak sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [28,29].

3. Araştırma Bulguları

3.1. YFC İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımının İncelenmesi

Yapılan çalışmada kullanılan çimento harç numuneleri %5 (YFC5) ve %20 (YFC20) oranında yüksek fırın cürufu çimento ile yer değiştirmiştir. YFC ikameli çimento harçları içme suyu küründe (NS) ve %10 sodyum sülfat (SS) küründe olgunlaştırılmıştır. Daha sonra harç numuneleri her bir yaş için basınç dayanım testine tabii tutulmuştur. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları elde edilerek Tablo 3.1’de verilmiştir.

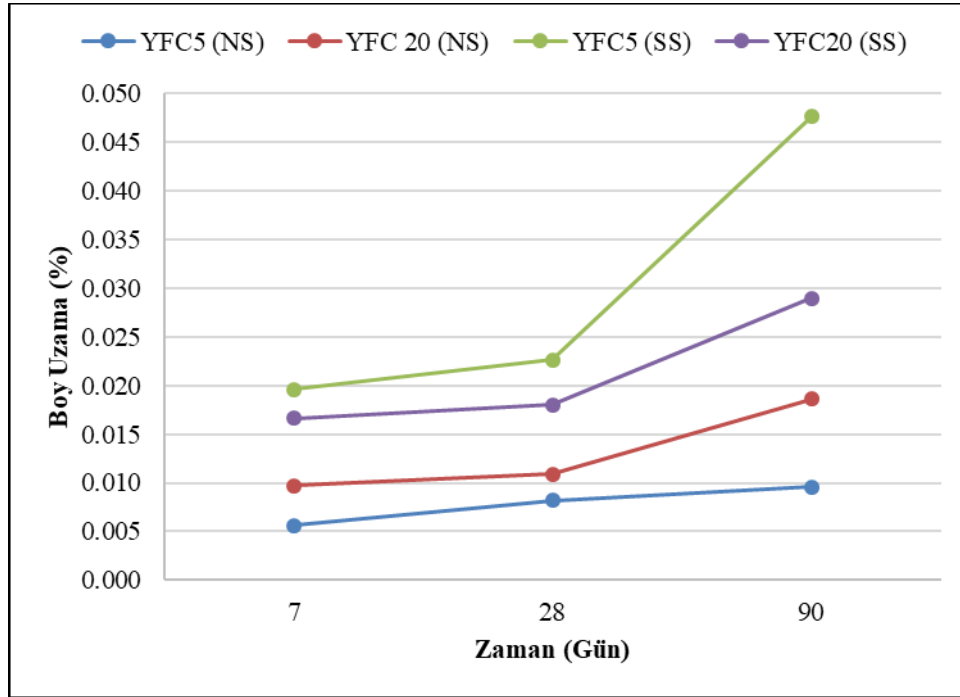
Tablo 3.1. YFC ikameli harçların basınç dayanım değerleri (MPa)

Numune	7 gün	28 gün	90 gün
YFC5 NS	34,75	45,03	53,49
YFC20 NS	34,97	44,01	53,94
YFC5 SS	38,85	42,68	53,48
YFC20 SS	33,21	43,21	53,93

Basınç dayanım değerleri 7 günlük harç numunelerinde minimum iken, 90 günlük harç numunelerinde maksimum değere ulaşmıştır. YFC ikame oranının artması 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını her iki kür (NS ve SS) ortamında da arttırmıştır. %5 YFC ikamesi SS ortamında NS ortamına göre basınç dayanımını 7 günde %11 artırmıştır. Bu da bize SS ortamının kür bakımını hızlandırdığını göstermektedir. Fakat 28 günde ise basınç dayanımını yaklaşık %6 düşürmüştür. 90. günde kayda değer bir değişiklik olmamıştır. %20 YFC ikameli SS ortamının NS ortamına göre basınç dayanımını 7. günde yaklaşık %5 düşürmüştür. 28. günde ise basınç dayanımını yaklaşık %2 düşürmüştür. Fakat 90. günde bir değişiklik olmamıştır.

3.2. YFC İkameli Çimento Harçlarının Boy Uzama Değerleri

Yapılan çalışmada %10 sodyum sülfat küründe ve normal su küründe olgunlaştırılan YFC ikameli çimento harçları boy uzama değerleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de verilen grafik incelendiğinde harçların boy uzamalarının zamanla artış gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan harçlarda boy uzama miktarının daha fazla olduğu görülmüştür.



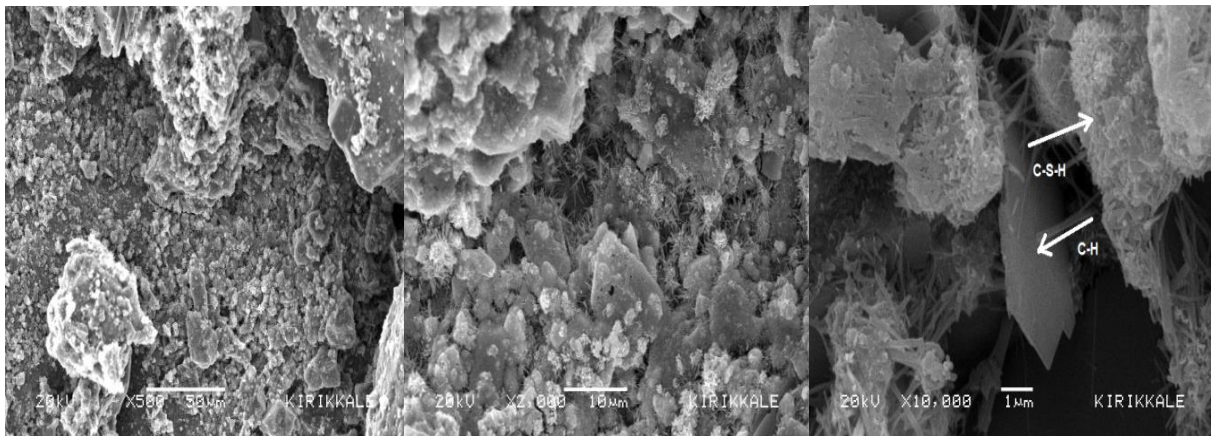
Şekil 3.1. YFC ikameli harçlarının boy uzama değerleri

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi en yüksek boy uzama yüzdesi sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan %5 YFC ikameli çimento harçlarında 90. günde %0,048 olarak ölçülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan %20 YFC ikameli çimento harçlarında ise 90. günde %0,029 boy uzama yüzdesi elde edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan çimento harçlarında ise boy uzama yüzdeleri 90. günde %5 ikame oranında %0,01 değerinin, %20 ikame oranında ise %0,02’in altında elde edilmiştir. Şekil 3.1’de de görüleceği gibi sodyum sülfat küründe yüksek fırın cürufu ikamesinin boy uzama yüzdeleri azalttığı görülmüştür.

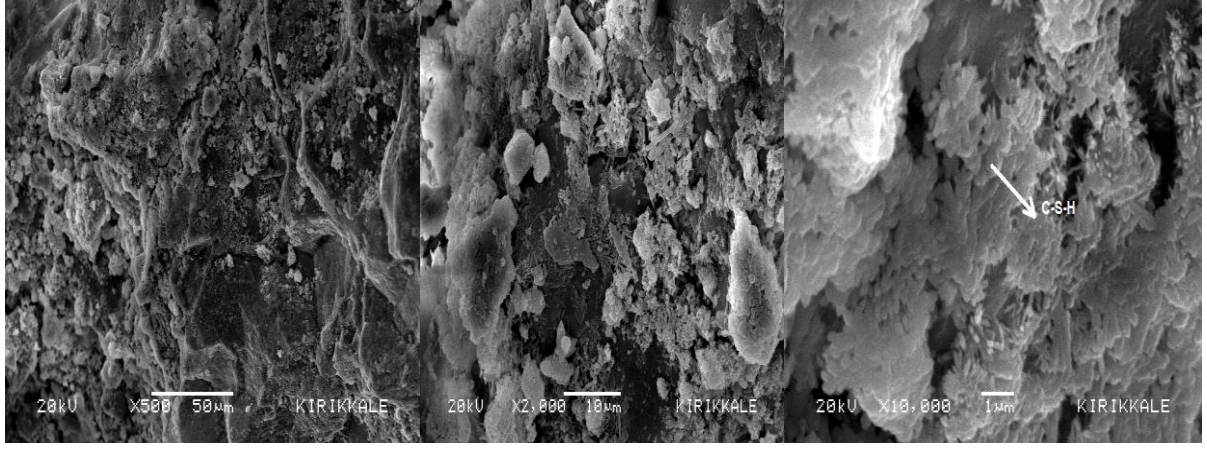
3.3. YFC İkameli Çimento Harçlarının Mikro yapısal Özellikleri

3.3.1. %5 YFC İkameli Normal Su Küründe Olgunlaştırılan Örneklerin İncelenmesi

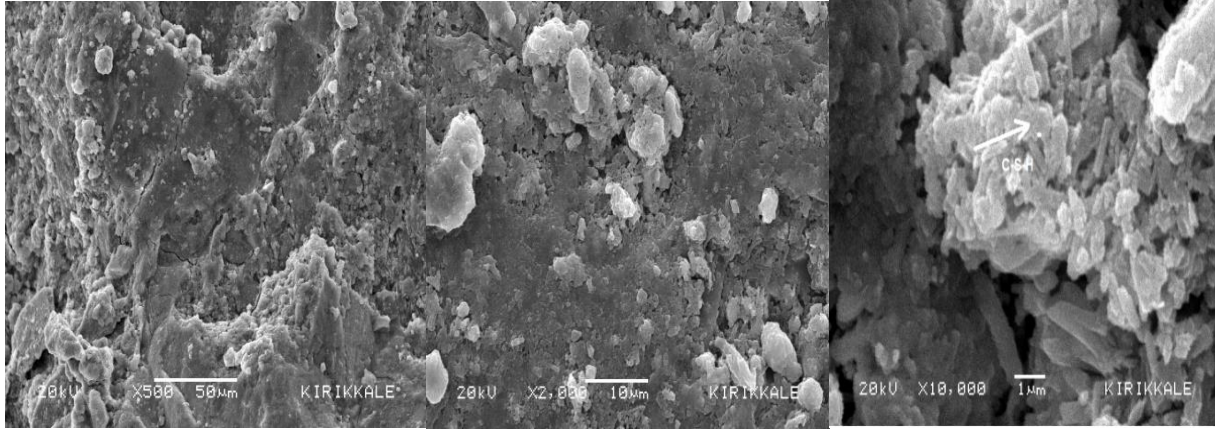
Normal su küründe olgunlaştırılan %5 YFC ikameli çimento harçlarının 2 günlük SEM görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin oluşmaya başladığı görülmüştür. Harç numuneleri 2 günlük olmasına rağmen 10 µm boyutunda alınan SEM görüntülerinde jellerin gelişimi rahatlıkla gözlenebilmiştir. 1 µm boyutunda yapılan çekimlerde C-S-H jelleri ve C-H jellerinin yapıları net görüntülenmiştir. Şekil 3.3’de SEM görüntüleri verilen 7 günlük harç numunelerinde, C-S-H jellerinin gelişiminin arttığı gözlenmiştir. 10 µm boyutundaki SEM görüntülerinde ise C-S-H jelleri daha belirgin ve iç yapıyı büyük ölçüde kapladığı belirlenmiştir. 28 günlük ve 90 günlük harç numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 3.4, Şekil 3.5) incelendiğinde ise C-S-H jellerinin yoğunluğunun arttığı ve C-H jellerini tamamen kapladığı gözlenmiştir.



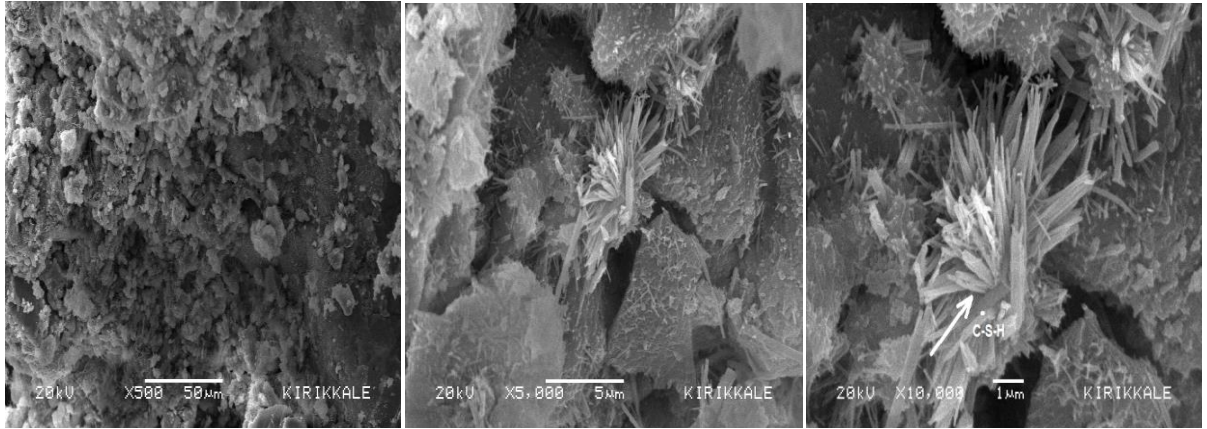
Şekil 3.2. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 2 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.3. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 7 günlük SEM görüntüleri



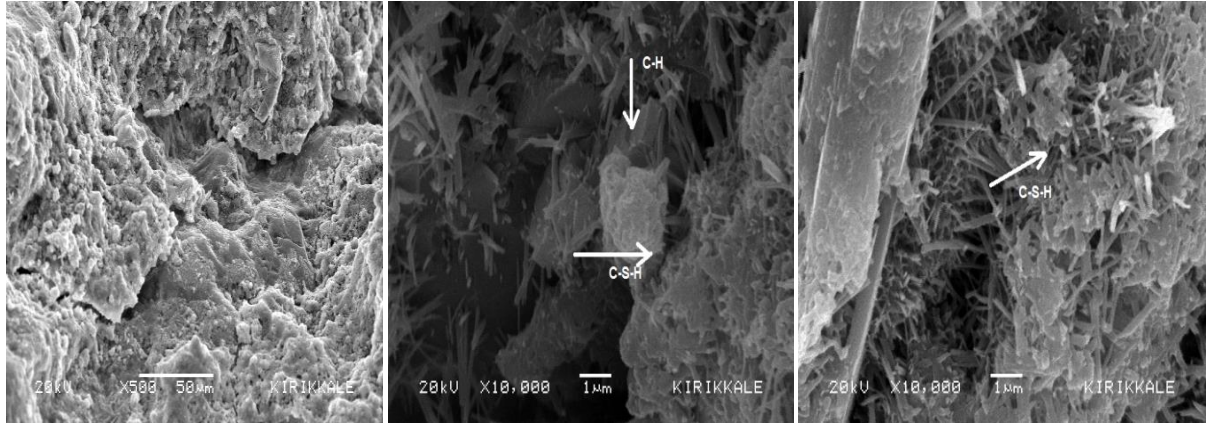
Şekil 3.4. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 28 günlük SEM görüntüleri



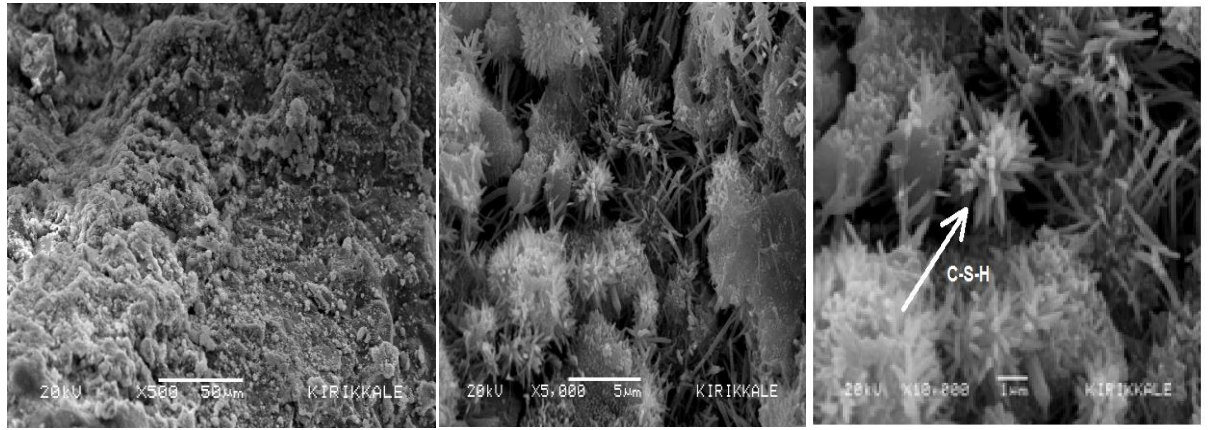
Şekil 3.5. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 90 günlük SEM görüntüleri

3.3.2 %20 YFC İkameli Normal Su Küründe Olgunlaştırılan Örneklerin İncelenmesi

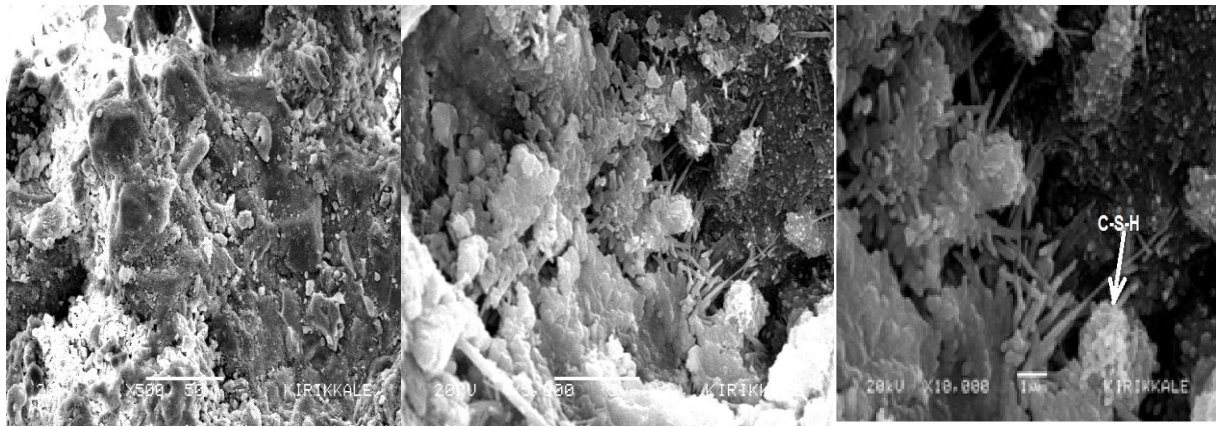
%20 YFC ikameli harç numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde 2 günlük harç numunelerinde C-H ve C-S-H jelleri gözlemlenmiştir. Jellerin yoğunluğu da 1 µm boyutundaki görüntülerde Şekil 3.6'da verilmiştir. 7 günlük %20 YFC ikameli harç numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.7 incelendiğinde 2 günlük harç numunelerinde gözlenen C-H jellerinin tamamen C-S-H jelleriyle kaplanmış olduğu gözlemlenmiştir. 28 ve 90 günlük %20 YFC ikameli harç numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 3.8, Şekil 3.9) incelendiğinde ise C-S-H jellerinin 2 ve 7 günlük harç numunelerine oranla yoğunluğunun arttığı ve jellerin boyutlarının büyüdüğü gözlemlenmiştir.



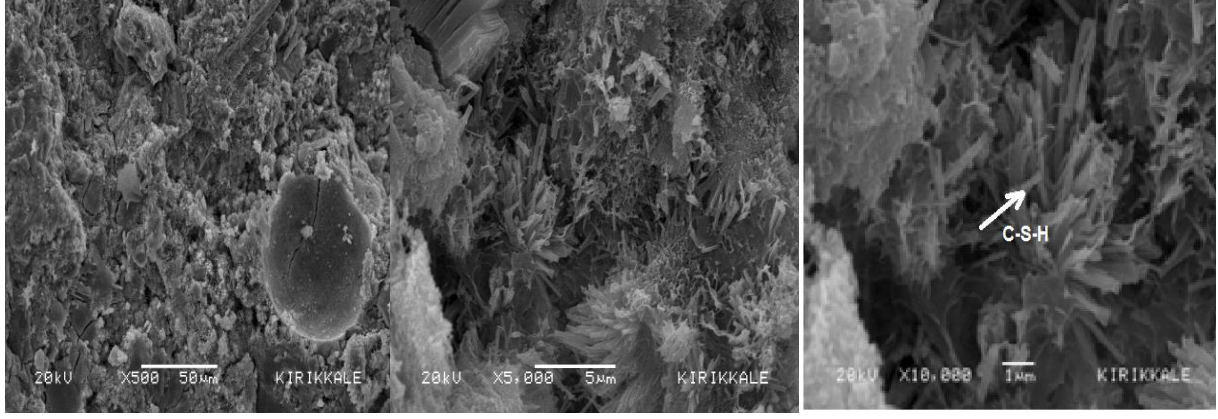
Şekil 3.6. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 2 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.7. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 7 günlük SEM görüntüleri



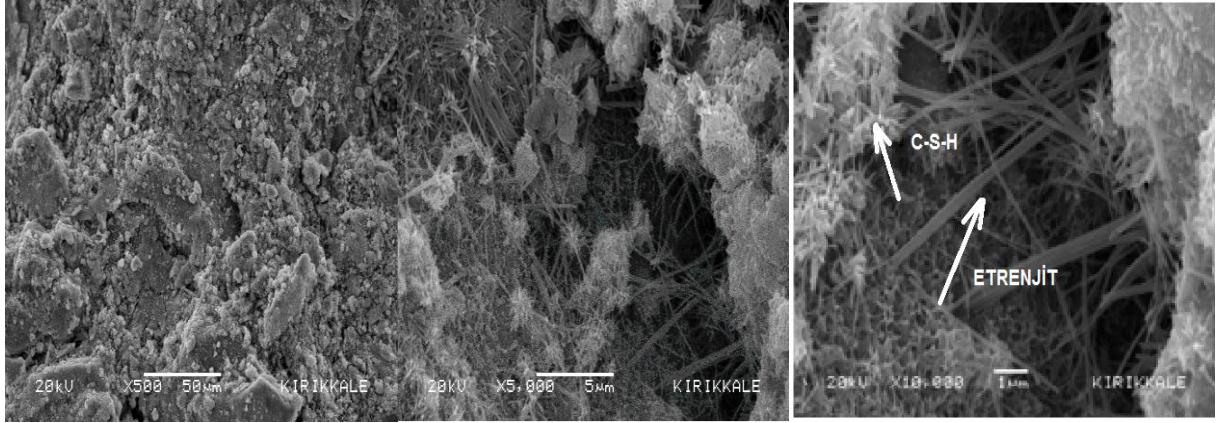
Şekil 3.8. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 28 günlük SEM görüntüleri



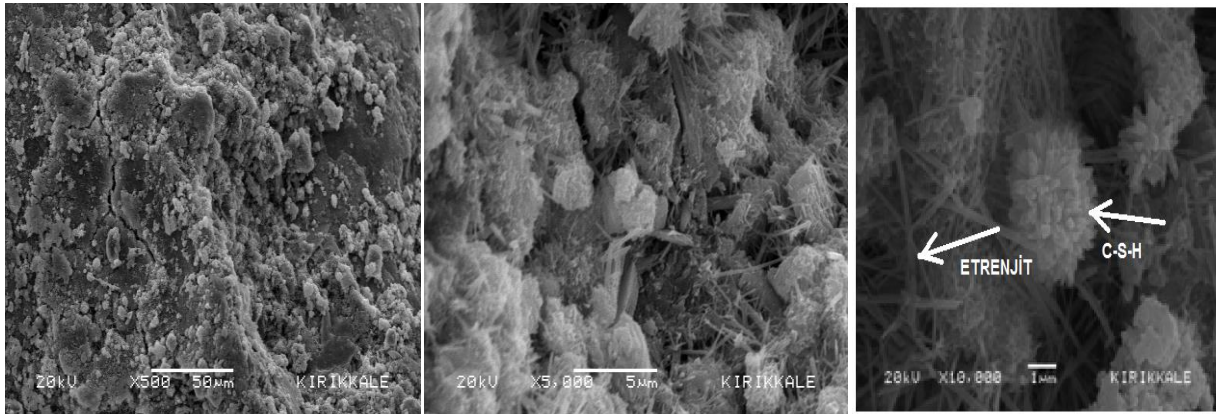
Şekil 3.9 %20 YFC ikameli çimento harçlarının 90 günlük SEM görüntüleri

3.3.3 %5 YFC İkameli %10 Sodyum Sülfat Küründe Olgunlaştırılan Örneklerin İncelenmesi

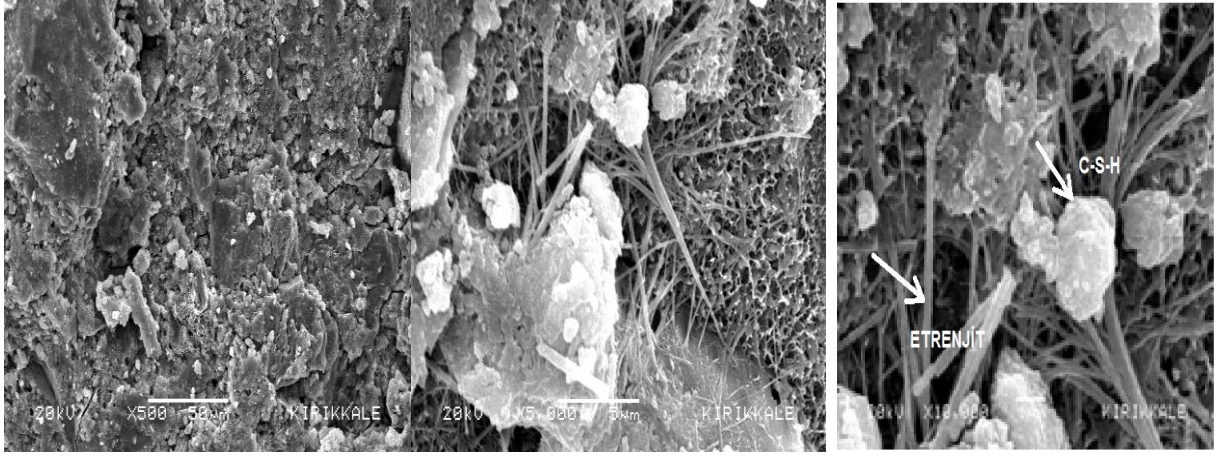
%5 YFC ikameli %10 sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan harç numunelerinin 2 günlük SEM görüntüleri şekil 3.10'da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde normal su küründe olgunlaştırılan harç numunelerinden farklı olarak etrenjit kristallerine rastlanmıştır. 2 günlük harç numunelerinde C-S-H jelleri ve etrenjit kristalleri gözlenmiş C-H jeli bulunamamıştır. 7 günlük %5 YFC ikameli harç numunelerinde (Şekil 3.11) C-S-H jellerinin yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Etrenjit kristallerinin yoğunluğu ve gelişimi de kür süresiyle orantılı olarak artmıştır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de verilen 28 ve 90 günlük harç numunelerinin SEM görüntüleri analizleri incelendiğinde boşluklarda oluşan etrenjit kristalleri 5µm boyutunda net bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Yoğun bir şekilde gözlemlenen etrenjit kristalleri C-S-H jellerinin gelişimini engellemiştir. 90 günlük harç numunelerinin SEM görüntülerinde hidrate olmamış çimento taneciklerine de rastlanmıştır.



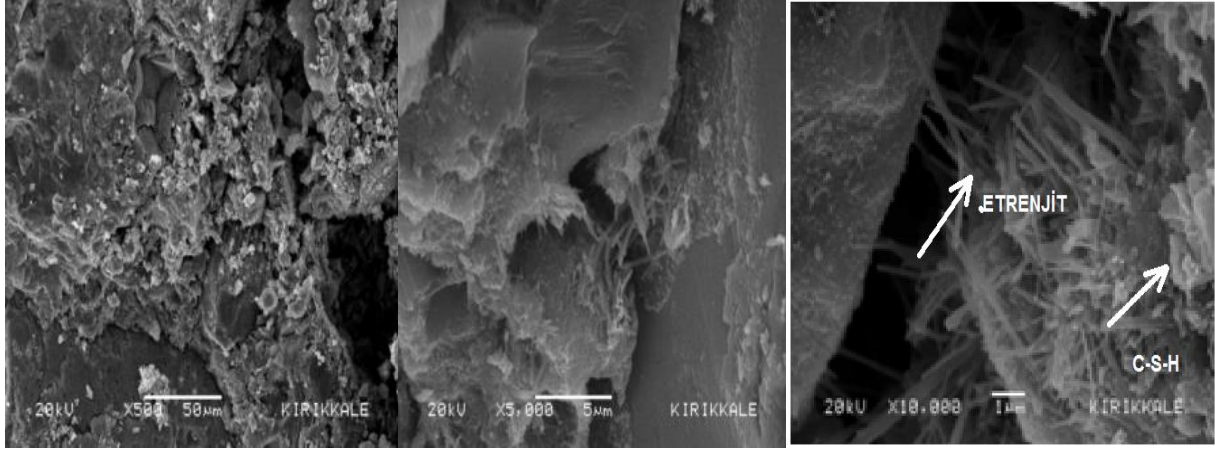
Şekil 3.10. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 2 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.11. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 7 günlük SEM görüntüleri



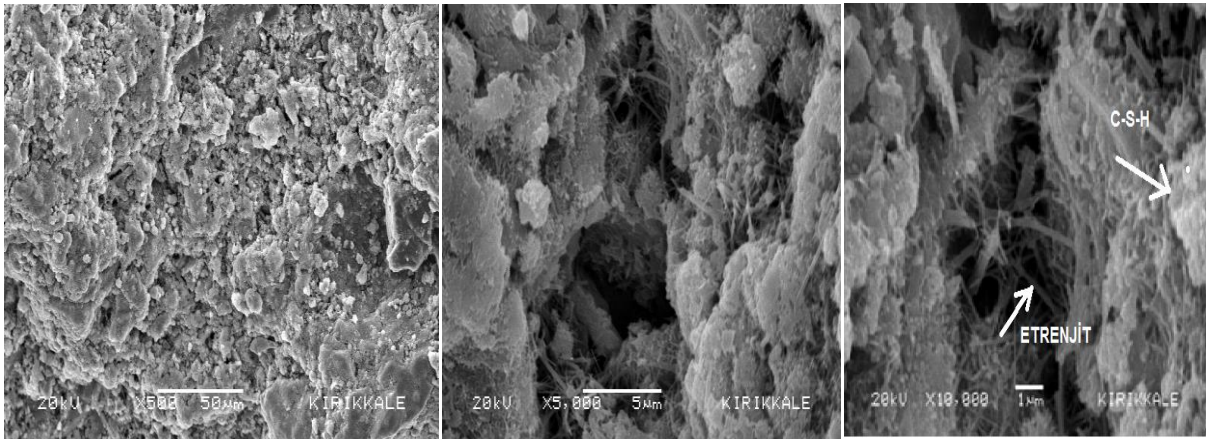
Şekil 3.12. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 28 günlük SEM görüntüleri



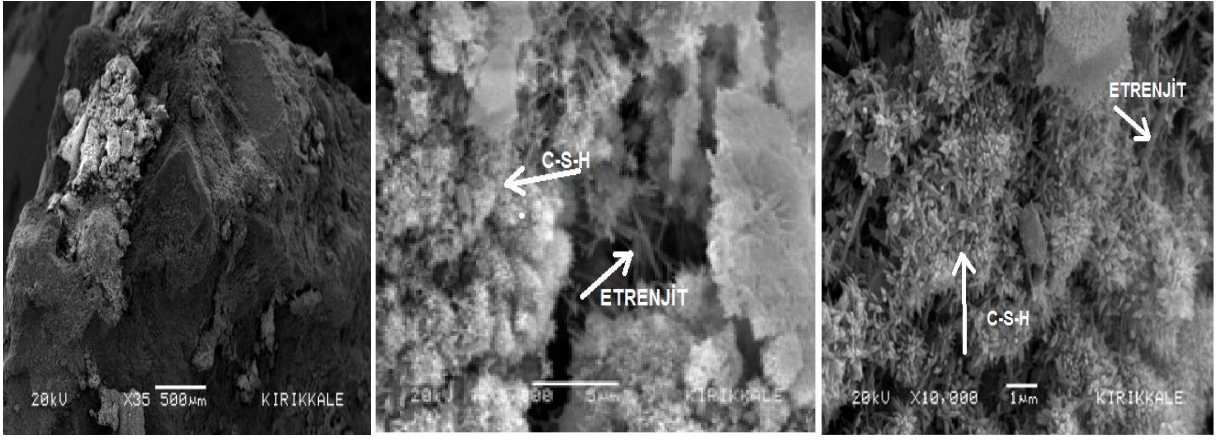
Şekil 3.13. %5 YFC ikameli çimento harçlarının 90 günlük SEM görüntüleri

3.3.4 %20 YFC İkameli %10 Sodyum Sülfat Küründe Olgunlaştırılan Örneklerin İncelenmesi

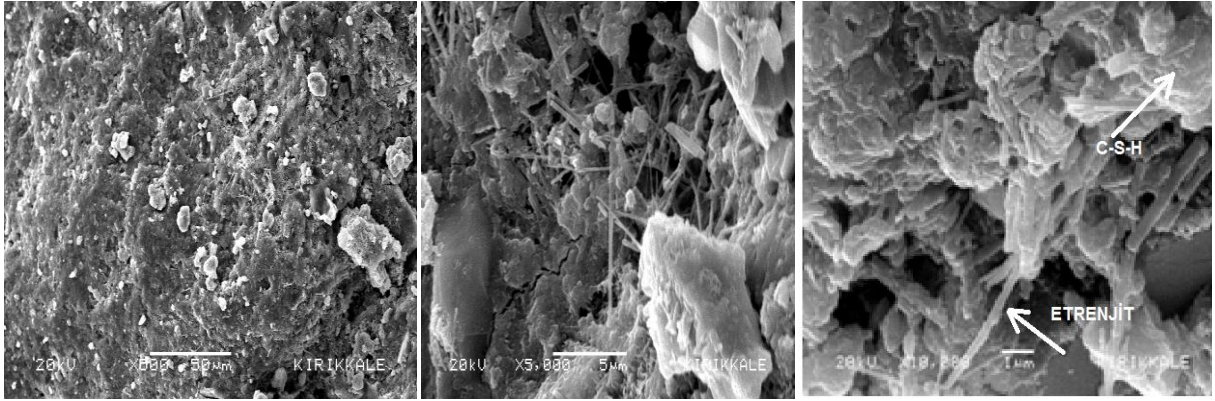
Şekil 3.14'de 2 günlük %20 YFC ikameli harç numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 5 μm boyutundaki çekimlerde C-S-H jelleri gözlemlenmiştir. 1 μm boyutundaki görüntülerde de etrenjit kristallerine rastlanmıştır. %10 sodyum sülfat küründe 2 gün olgunlaştırılan %5 YFC ikameli harç numunelerine oranla etrenjit kristallerinin gelişiminin daha az olduğu C-S-H jellerinin daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.15'de SEM görüntüleri verilen 7 günlük harç numunelerinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. 5 μm boyutundaki görüntülerde etrenjit kristallerinin harç numunelerinin içinde bulunan mikro çatlaklarda gelişim gösterdiği görülmüştür. %20 YFC ikameli %10 sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan 28 günlük ve 90 günlük harç numunelerinin (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17) SEM görüntüleri incelendiğinde etrenjit kristallerinin aynı kür şartlarında bulunan %5 YFC ikameli harç numunelerine göre yoğunluğunun az olduğu gözlemlenmiştir.



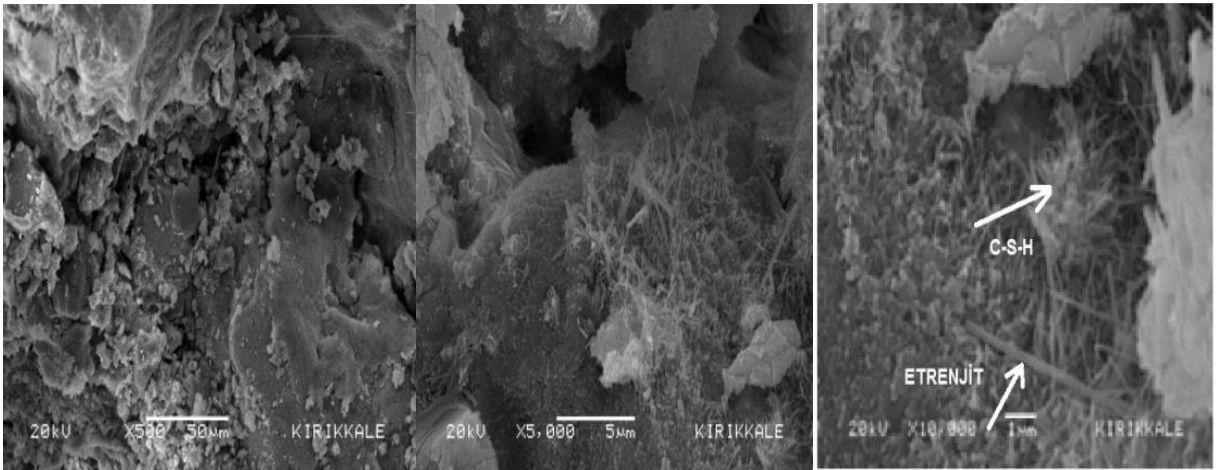
Şekil 3.14. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 2 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.15. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 7 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.16. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 28 günlük SEM görüntüleri



Şekil 3.17. %20 YFC ikameli çimento harçlarının 90 günlük SEM görüntüleri

4. Sonuçlar

Yüksek fırın cürufu ikameli çimento harçlarının sülfat etkisinde dayanım, boy uzama ve mikro-yapısal olarak incelenmesini içeren çalışmada aşağıda verilen şu sonuçlar ortaya çıkmıştır;

- Basınç dayanımı hidrasyon sürecinin ilerlemesi ile birlikte artmıştır. YFC ikame oranının artması 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını su kürü ve sodyum sülfat kürü hidrasyon sürecinin ilerlemesi ile artırmıştır. Sodyum sülfat küründe YFC ikameli harç numunelerinin basınç dayanımları normal su kürüne göre 90. Günde hemen hemen eşit çıkmıştır. Bu sonuç ileri yaşlarda sodyum sülfat kürünün olumsuz etkisinin olmadığını göstermiştir.

- Boy uzama değerleri incelendiğinde harçların boy uzamalarının hidrasyon sürecinin ilerlemesi ile birlikte zamanla artış gösterdiği gözlenmiştir. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan harçlarda boy uzama miktarının su küründe olgunlaştırılan harçlara oranla daha fazla olduğu görülmüştür. YFC ikamesinin artması boy uzama yüzdelerinin azaltmada etkili olmuştur.
- YFC ikameli harçların SEM görüntüleri incelendiğinde harç numunelerindeki etrenjit kristalleri gelişimi harçların boy uzama miktarıyla doğru orantılı bir artış göstermiştir. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan harç numunelerinde oluşan etrenjit kristalleri mikro çatlakların içerisinde gelişim göstererek çimento harçlarının kalıcılık özelliklerini azaltmıştır.
- 2 günlük harç numunelerinde C-S-H jellerinin oluşumu çok yoğun gözlenmezken 7., 28. ve 90. günde harç numunelerinde C-S-H jelleri yoğun bir şekilde gözlenmiştir. 2. günde harç numunelerinde C-H jelleri gözlenebilirken 7, 28 ve 90 günlük harç numunelerinde C-H jelleri tamamen C-S-H jelleriyle kaplanmıştır.
- Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan harç numuneleri ile normal su küründe olgunlaştırılan harç numuneleri C-S-H gelişimleri karşılaştırıldığında, normal su küründe harç numunelerinin C-S-H gelişiminin yoğun olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak; basınç ve boy uzama sonuçları incelendiğinde sülfat ortamında YFC ikame oranının artması ile boy uzama yüzdelerinin azaldığı görülmüştür. Mikro-yapı incelemesinde ise normal su küründe olgunlaştırılan 2, 7 ve 28 günlük harç numunelerinde CH kristallerinin yanı sıra C-S-H jellerine rastlanmıştır. 90. günde ise C-S-H jelleri artmıştır. %10 sodyum sülfat küründe ise sülfat etkisi ileriki günlerde kür suyunun sülfat içeriğinden dolayı yoğun bir etrenjit oluşumu gözlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N., (2011). "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", *Materials Journal*, 88(2), 186-196, 2011.
- [2] Demir İ., Sevim Ö., Tekin E., "The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability", *Construction and Building Materials*, 172, 153-165, 2018.
- [3] Mehta K.P., "Durability-critical issues for the future", *Concrete International*, 23, 27-33, 1997.
- [4] Akgungor A.P., Sevim O., Kalkan I., Demir I., "Restrained shrinkage cracking of self-consolidating concrete roads", *Science and Engineering of Composite Materials*, doi.org/10.1515/secm-2017-0146, 2017 (in press).
- [5] Demir İ., Güzelküçük S., Sevim Ö., "Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21 (3), 275-283, 2018.
- [6] Bouzoubaa N., Zhang M.H., Malhotra V.M., "Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash", *Cement and Concrete Research*, 31 (10), 1393-1402, 2001.
- [7] Mostofinejad D., Nosouhian F., Nazari-Monfared H., "Influence of magnesium sulphate concentration on durability of concrete containing micro-silica, slag and limestone powder using durability index", *Construction and Building Materials*, 117, 107-120, 2016.
- [8] Aruntaş H.Y., "The potential of fly ash usage in construction sector", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(1), 193-203, 2006.
- [9] Sevim Ö., Filazi A., Toprak B., Kartal S., "Investigating of Mechanical Properties of Mortars Based on Fly Ash and Blast Furnace Slag Activated with Alkali", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(2), 91-94, 2017.
- [10] Huang T.Y., Chiueh P.T., Lo S.L., "Life-cycle environmental and cost impacts of reusing fly ash", *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 255-260, 2017.
- [11] Mehta P.K., *Concrete. Structure, Properties and Materials*, McGraw Hill, UK, 2005.
- [12] Neville A.M., *Properties of Concrete (Vol. 4)*, Longman, London, 1995.
- [13] Yu Z., Ye G., "The pore structure of cement paste blended with fly ash", *Construction and Building Materials*, 45, 30-35, 2013.
- [14] Yu Z., Ma J., Ye G., van Breugel K., Shen X., "Effect of fly ash on the pore structure of cement paste under a curing period of 3 years", *Construction and Building Materials*, 144, 493-501, 2017.
- [15] Martin L.H., Winnefeld F., Tschopp E., Müller C.J., Lothenbach B., "Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement", *Cement and Concrete Research*, 95, 152-163, 2017.

- [16] Wang X.Y., “Effect of fly ash on properties evolution of cement based materials”, *Construction and Building Materials*, 69, 32-40, 2014.
- [17] Yu J., Lu C., Leung C.K., Li G., “Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash”, *Construction and Building Materials*, 147, 510-518, 2014.
- [18] Miyazawa S., Yokomuro T., Sakai E., Yatagai A., Nito N., Koibuchi K., “Properties of concrete using high C₃S cement with ground granulated blast-furnace slag”, *Construction and Building Materials*, 61, 90-96, 2014.
- [19] Cho B.S., Lee H.H., Choi Y.C., “Effects of aluminate rich slag on compressive strength, drying shrinkage and microstructure of blast furnace slag cement”, *Construction and Building Materials*, 140, 293-300, 2017.
- [20] Zhang W., Choi H., Sagawa T., Hama Y., “Compressive strength development and durability of an environmental load-reduction material manufactured using circulating fluidized bed ash and blast-furnace slag”, *Construction and Building Materials*, 146, 102-113, 2017.
- [21] Gholampour A., Ozbakkaloglu T., “Performance of sustainable concretes containing very high-volume class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag”, *Journal of Cleaner Production*, 162, 1407-1417, 2017.
- [22] Demir İ., Sevim Ö., “Effect of sulfate on cement mortars containing Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr”, *Construction and Building Materials*, 156, 46-55, 2017.
- [23] Santhanam M., Cohen M.D., Olek J., “Sulfate attack research-whither now?”, *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845-851, 2001.
- [24] Lawrence C.D., “Sulphate attack on concrete”, *Magazine of concrete Research*, 42(153), 249-264, 1990.
- [25] EN TS 197-1, Cement–Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, Turkish Standard Institution, Ankara, 2012.
- [26] EN TS 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength, Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- [27] ASTM C1012 / C1012M-15, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [28] Sevim Ö., Optimization of Particle Size Distributions of Fly Ash For Cementitious Systems with High Compactness, Ph.D. Thesis, in Civil Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, 2018 (in Turkish).
- [29] Demir İ., Sevim Ö., Kalkan İ., “Microstructural properties of lithium-added cement mortars subjected to alkali–silica reactions”, *Sādhanā*, 43(7), 112, 2018.