

**KİMYASAL KATKI MADDELERİNİN ÇİMENTO
İLE UYUMLULUĞUNUN VE HARÇ ÜRETİMİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ece GİRAY

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2015

“Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 1406F316 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.”

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ece Giray'ın “Kimyasal katkı maddelerinin çimento ile uyumluluğunun ve harç üretimine etkisinin incelenmesi” başlıklı **Kimya Mühendisliği** Anabilim dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 11/09/2015 tarihinde, aşağıdaki jüri üyeleri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. Ö. METE KOÇKAR	
Üye :	Prof. Dr. Berrin BOZAN	
Üye :	Doç. Dr. Murat KARACASU	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİMYASAL KATKI MADDELERİNİN ÇİMENTO İLE UYUMLULUĞUNUN VE HARÇ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ece GİRAY

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR
2015, 105 sayfa

Bu çalışmada, çimento ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı uyumu araştırılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı türünün ve dozajının betonun basınç dayanımına, işlenebilirliğine ve mikroyapısal özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Sabit su/çimento oranında, katkısız ve farklı oranlarda katkı kullanılarak hazırlanan taze çimento harçlarının işlenebilirliği test edilmiştir. Katkı oranı artışının işlenebilirliği arttırdığı gözlenmiştir. Çimento harçlarının 7 ve 28 günlük küre tabi tutulmasının ardından sertleşmiş harç numunelerine basınç dayanım testleri uygulanmıştır. Numunelerinin mikroyapısal ve morfolojik analizleri Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR), X-Işını Kırınım cihazı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerle, kullanılan katkının betonun mikroyapısında meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir. SA, SB ve SC katkıları ile hazırlanan 7 ve 28 günlük harç numuneleri için en uygun katkı miktarı %1 (g/g çimento), SD katkısı için %1,2 (g/g çimento) olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal Katkıları, Süper Akışkanlaştırıcılar, İşlenebilirlik, Mekanik ve Mikroyapısal Özellikler

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CHEMICAL ADMIXTURES ON THE CEMENT-ADMIXTURE COMPATIBILITY AND MORTAR PRODUCTION

Ece GİRAY

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Chemical Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR
2015, 105 pages**

In this study, compatibility between cement and superplasticizer chemical admixture were investigated. The effects of superplasticizer type and dosage on the concrete compressive strength, workability and micro-structural properties were examined. At constant water/cement ratio, workability of fresh cement mortars prepared with different superplasticizer ratio and without superplasticizer were tested. It has been observed that increase in rate of admixture improves workability. After 7 and 28 days of hydration, samples were subjected to compressive strength tests. Microstructural and morphological analysis of samples were performed by Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR), X-ray diffractometer (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). With these analysis, the changes in the microstructure of concrete caused by admixture that used were examined. The most proper superplasticizer amount for 7 and 28 days of mortar samples prepared with 1% (g/g cement) of SA, SB and SC superplasticizer, 1,2% of SD superplasticizer (g/g cement), respectively.

Keywords: Chemical Admixtures, Superplasticizers, Workability, Mechanical and Microstructural Properties

TEŞEKKÜR

Danışmanlığımı üstlenen ve tezimi yürütebilmem için ihtiyacım olan çalışma ortamını sağlayan, anlayışını ve tecrübesini benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR'a, çalışmalarım esnasında sağladığı teknik destekten dolayı Doç. Dr. Ömer ARIÖZ'e, bugüne kadar benden yakın ilgisini ve tecrübesini asla eksik etmeyen, çalışmalarım süresince gösterdiği gayretinden ve manevi desteğinden dolayı değerli hocam Araş Gör. Dr. Evren ARIÖZ'e,

Son olarak, her zaman yanımda olup sevgilerini ve güvenlerini her zaman hissettiren tüm dostlarıma ve değerli AİLEME sonsuz teşekkürlerimle...

Ece GİRAY

Eylül, 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix

1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
------------------	---

2. BETON	4
----------	---

2.1. Beton Harcını Oluşturan Malzemeler.....	4
2.1.1. Çimento	4
2.1.2. Agregası	6
2.1.3. Karışım suyu	7
2.1.4. Katkı maddesi.....	8
2.2. Hidratasyon Mekanizması.....	9
2.3. Beton Özellikleri	13
2.3.1. Taze beton özellikleri	13
2.3.2. Mekanik özellikler.....	16
2.4. Beton Katkı Maddeleri	18
2.4.1. Mineral katkı maddeleri	18
2.4.2. Kimyasal katkı maddeleri.....	19
2.5. Çimento-Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler	27
2.5.1. Çimento kaynaklı etkiler	27
2.5.2. Süper akışkanlaştırıcı kaynaklı etkiler	31
2.6. Beton Harcının Mikroyapısal Özellikleri	34
2.6.1. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazı	35
2.6.2. Kalsiyum hidroksit (CH) fazı	35
2.6.3. Kalsiyum sülfat hidratlar (Etrenjit ve monosülfat fazları) .	35
2.6.4. Tamamen hidrate olmayan çimento partikülleri	36

3. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	37
4. SERTLEŞMİŞ BETON NUMUNELERİNİN YAPISAL ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER	42
4.1. X Işınları Kırınımı (XRD)	42
4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	43
4.3. Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR)	45
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	47
5.1.1. Çimento	47
5.1.2. Kum	48
5.1.3. Kimyasal katkı	48
5.2. Deney Yöntemleri	49
5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	49
5.2.2. Yayılma testi	50
5.2.3. Basınç dayanımı testi	51
5.2.4. Sertleşmiş betonun karakterizasyonu	53
6. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN BULGULAR	54
6.1. Yayılma Testi Sonuçları	54
6.2. Basınç Dayanımı Testi Sonuçları	55
6.3. XRD Analizleri Sonuçları	60
6.4. FTIR Analizleri Sonuçları	74
6.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları	86
7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile elde edilen su azalması	21
2.2. Sülfone melamin formaldehit yapısı	24
2.3. Sülfone naftalin formaldehit yapısı	24
2.4. Polikarboksilat yapısı	25
2.5. Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur	26
2.6. Katkıların sterik etkisi	27
4.1. Bir kristalde X-ışını kırınımı	43
4.2. Taramalı elektron mikroskobu	44
4.3. FT-IR spektrometresi şeması	46
5.1. Yayılma tablası	51
5.2. Beton test presi	52
6.1. SA, SB, SC, SD katkılı harçların katkı oranı - yayılma grafiği	55
6.2. SA katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	57
6.3. SB katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	57
6.4. SC katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	58
6.5. SD katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	59
6.6. Süper akışkanlaştırıcı katkı tipi ile 7 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	59
6.7. Süper akışkanlaştırıcı katkı tipi ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki	60
6.8. Portland çimentosu XRD paterni	62
6.9. 7 ve 28 günlük katkısız çimento harcının XRD paterni	63
6.10. Katkısız çimento harcı kompozisyonunun zamanla değişimi	64
6.11. 7 günlük SA çimento harcının XRD paterni	64
6.12. 28 günlük SA çimento harcının XRD paterni	65
6.13. Artan SA katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidrasyon ilişkisi	66
6.14. 7 günlük SB çimento harcının XRD paterni	67
6.15. 28 günlük SB çimento harcının XRD paterni	67
6.16. Artan SB katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidrasyon ilişkisi	68

6.17. 7 günlük SC çimento harcının XRD paterni	69
6.18. 28 günlük SC çimento harcının XRD paterni	70
6.19. Artan SC katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi.....	71
6.20. 7 günlük SD çimento harcının XRD paterni	72
6.21. 28 günlük SD çimento harcının XRD paterni	73
6.22. Artan SD katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi.....	74
6.23. Portland çimentosu FTIR spektrumu	76
6.24. Katkısız harcın FTIR spektrumu	77
6.25. SA katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları	79
6.26. SA katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları	80
6.27. SB katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları	81
6.28. SB katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları	82
6.29. SC katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları	83
6.30. SC katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları	84
6.31. SD katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları	85
6.32. SD katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları	86
6.33. Katkısız 7 ve 28 günlük harçların SEM görüntüleri	87
6.34. SA katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri	88
6.35. SA katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri	89
6.36. SB katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri	90
6.37. SB katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri	91
6.38. SC katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri	92
6.39. SC katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri	93
6.40. SD katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri	94
6.41. SD katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları	5
2.2. Çimentonun anabileşenleri.....	6
2.3. Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri.....	10
2.4. Çimentoların dayanım ve priz başlama süresi özellikleri	18
5.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu	48
5.2. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı	48
5.3. Çimento harçlarının katkı oranına ve süper akışkanlaştırıcı maddesine göre kodlanması	50
6.1. Yayılma testi sonuçları.....	54
6.2. Katkılı ve katkısız harç karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımları...	56
6.3. Beton numunelerin XRD paternlerinde bulunan fazların pikler üzerinde numara olarak karşılıkları ve kart numaraları	61
6.4. Çimento harcındaki karakteristik bantlar	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C-S-H : Kalsiyum silikat hidrat

C-H : Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2)

AFt : Etrenjit ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$)

AFm : Monosülfat ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$)

FTIR : Fourier Transform Infrared Spektrometresi

XRD : X-Işını Kırınımı

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

C_2S : Dikalsiyum Silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)

C_3S : Trikalsiyum Silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)

C_3A : Trikalsiyum Alüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)

C_4AF : Tetrakalsiyum Alümino-Ferrit

ACI : American Concrete Institute

ASTM : American Society for Testing and Materials

TS EN : Türk Standartları Enstitüsü

MPa : Megapaskal

MLS : Modifiye lignosülfonatlar

SMF : Sülfone melamin formaldehit kondensesi

SNF : Sülfone naftalin formaldehit kondensesi

PC : Polikarboksilat süper akışkanlaştırıcı

$\text{\AA}$: Angström

n : Kırınım mertebesi

λ : Dalga boyu

d : Düzlem aralığı

θ : Gelme-yansıma açısı

IR : Infrared

KBr : Potasyum bromür

CEM II : Portland kompoze çimento

CEN : European Committee for Standardization

EFNARC : European Federation of National Associations Representing for
Concrete

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yapı sektörü Avrupa ve dünya çapında en büyük sektörlerden biridir. Yıllık 750 milyon avro iş hacmi ile Avrupa endüstrisinde üretimin %25'ini oluşturarak %52'lik pazar payına sahiptir. Ülkemizde ise en hızlı büyüyen sektör yapı sektörüdür ve Türkiye ekonomisi için önemi giderek artmaya devam etmektedir. Bu sektörün temel girdisi ise beton üretimidir.

En önemli yapı malzemelerinden biri olan betona dayanım, dayanıklılık ve kullanım amacına uygun özellikler kazandırabilmek için günümüzde çok çeşitli katkılar kullanılmaktadır. Beton katkı maddeleri; 'betona, üretim sırasında su, agrega ve çimento dışında, küçük miktarlarda, betonun niteliklerinde istenilen yönde değişiklik sağlamak için düşük miktarlarda katılan maddeler' olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal katkılar betonun veya harcın taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini iyileştiren, suda çözünebilen maddelerdir. Son dönemde hazır beton sektöründe su azaltıcı (akışkanlaştırıcı) kimyasal katkı kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Özellikle son elli yılda gelişmekte olan katkı endüstrisi sayesinde betonun hem taze hal hem de sertleşmiş hal özellikleri geliştirilebilmektedir.

Akışkanlaştırıcılar beton karışımındaki su/çimento oranını azaltarak betona daha yüksek mukavemet kazandırabilmek veya aynı işlenebilmeyi sağlamak, çimento miktarının azaltılarak hidrasyon ısını düşürmek için ya da kolay yerleşmeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. Akışkanlaştırıcılar kimyasal dizilişlerinden dolayı su içerisinde eriyen ve suyun yüzey gerilimini düşüren organik maddelerdir. Aynı zamanda çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek homojen bir beton bünyesi oluşumu sağlar.

Beton üretiminde istenilen, çimento miktarı azaltılmaksızın veya beton dayanımından ödün vermeksizin üretilen betonun, akıcı ve kolay yerleşebilir olmasıdır. Aynı akıcılığın sağlanabilmesi için karışım suyu miktarını %5-11 oranında azaltan su azaltıcı katkılar (akışkanlaştırıcılar), %12 ve daha fazla oranda azaltan yüksek oranda su azaltıcı katkılar (süper akışkanlaştırıcılar) kullanılmaktadır. Bu katkılar uygun koşullarda kullanılarak beton içerisine katıldığında aynı işlenebilmeyi sağlamak koşulu ile karışım suyu miktarında

azalmalar sağlayabilmektedirler. Karışım suyunu azaltmadan kullanıldıklarında ise işlenebilirliği önemli ölçüde arttırarak pompalanabilirliği arttırırlar. Su azaltıcı katkı kullanımı, beton karışımında kullanılacak su/çimento oranını sabit tutarak, su ve çimento miktarını azaltıp ekonomik yararlar sağlamaktadır (Topçu ve ark., 2004).

Basınç dayanımı, betonun basınç altında dayanabileceği maksimum gerilmedir. Beton, mümkün olan en yüksek kuvvete mukavemet gösterebilecek şekilde dizaynı ve üretimi yapılmaktadır. Dayanıklılığa göre tasarım ilkesi, daha düşük su/çimento oranı kullanılarak daha yüksek dayanımlı betonların üretimini zorunlu kılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkıları bu açıdan bakıldığında, malzemenin işlenebilirliğini ve mukavemetini arttıran kimyasal katkı maddeleridir. Bu durum süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanımını arttırmaktadır (Gamze Erzengin, 2010).

Her akışkanlaştırıcı katkı için uygun bir çalışma dozajı aralığı mevcuttur. Kullanım aralığı aşıldığında priz süresinde aşırı gecikme veya kısalma, erken mukavemette düşüş, kalıp alma süresinde uzama, ayrışma gibi bazı yan etkilerle karşılaşılabilir. Katkıların uygun dozajlarda kullanılmalıdır. Akışkanlaştırıcı katkıların su azaltma oranının arttırılması mukavemetin artışını bir dereceye kadar sağlar, daha yüksek su azaltma girişimlerinde karışım suyundaki aşırı azalma katkının etkinlik derecesine göre farklı şiddette olmak üzere taze ve sertleşmiş beton özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Felekoğlu ve Baradan, 2006).

Betonun basınç dayanımına ilişkin verileri ne kadar önemliyse, çimento hamurunun mikroyapısal boyutta incelenmesi de o kadar önem taşımaktadır. Sertleşmiş çimento hamurunun mikroyapısı, içerdiği çeşitli türlerdeki katı bileşenleri, farklı boyut ve şekillerdeki gözenekleri ile sudan oluşan heterojen bir sistemdir. Çimento hamurundaki katı hacminin büyük bir bölümünü, amorf bir yapıya sahip, bileşim ve morfolojik açıdan çeşitlilik gösteren temel hidratasyon ürünü olan C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli oluşturmaktadır. Diğer önemli hidratasyon ürünü ise kristal bir yapıya sahip kalsiyum hidroksit (CH)'tir. Kalsiyum hidroksit, C-S-H jeline göre çimento hamuru bileşiminde saf olarak yer almaktadır. AFt (etrenjit) ve AFm (monosülfat) fazları ise daha az miktarda bulunmaktadır (Gamze Erzengin, 2010).

Bu çalışmada süper akışkanlaştırıcı katkı çeşidinin ve katkı miktarının beton üzerindeki etkileri incelenmiştir. 4 farklı oranda, 4 farklı süper akışkanlaştırıcı kullanılmış olup, süper akışkanlaştırıcıların beton dayanımına, işlenebilirliklerine ve betonun mikroyapısal ve morfolojik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Beton numunelerinin mikroyapısal ve morfolojik analizleri Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR), X-Işını Kırınımı cihazı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerle, kullanılan katkının betonun mikroyapısında meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir.

2. BETON

‘Beton’, agrega, çimento, su ve bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir.

Çimento, bağlayıcı özelliğe sahip bir malzemedir ve çimentonun sağlayabileceği bağlayıcılık özelliği, su ile birlikte karıştırılması sonucunda elde edilmektedir. Çimento ve suyun oluşturduğu malzeme ‘çimento hamuru’ olarak adlandırılmaktadır.

Beton karışımında çimento hamuru, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplayarak agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmakta ve agrega tanelerini bir arada tutacak şekilde bağlayıcılık görevi görmektedir. Bu nedenle, beton, agrega ve çimento hamurundan meydana gelen kompozit bir malzeme olarak tanımlanmaktadır.

Çimento, su ve ince agreganın karışımından oluşan, içinde agrega bulunmayan malzemeye ‘harç’ adı verilir. Çimento hamuru, başlangıçta plastik (yumuşak, şekil verilebilir) bir malzemedir. Fakat, çimentonun su ile temas etmesiyle başlayan ve devam eden hidrasyon reaksiyonlarının etkisiyle başlangıçtaki plastik özelliği zamanla azalır. Çimento hamuru bir veya birkaç saat içerisinde katılaşmakta ve daha sonraki zaman zarfında tamamen sertleşmiş bir hal almaktadır (Erdoğan, 2007).

2.1. Beton Harcını Oluşturan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan, hidrolik kalsiyum silikat içeren ve ‘klinker’ olarak adlandırılan malzemenin kalsiyum sülfat (alçı taşı) ile öğütülerek toz haline getirilmesiyle elde edilir (Mehta ve Monteiro, 2001).

Çimento ve suyun birleşmesiyle birlikte bu iki malzeme arasında ‘hidrasyon’ olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve devam etmektedir. Malzemeler ilk karıştırıldığında yumuşak ve plastik durumda olan

çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma gelmekte ve katılaşp, sertleşmektedir. Priz alma, çimento hamurunun katılaşmasıyla şekil verilemez bir duruma gelmesine denir. Çimento hamurunun katılaşmaya başladığı an'a kadarki haline 'taze beton', katılaşma olayından sonraki evredeki durumu 'sertleşmiş çimento hamuru' olarak adlandırılmaktadır.

Çimento hamurunda uygun sıcaklık ve nemlilik ortamı mevcut olduğu sürece hidrasyon devam etmekte ve dayanım artışı olmaktadır (Erdoğan, 2007).

Portland çimentosunun içerisinde genel olarak yer alan oksitler ve yaklaşık miktarları Çizelge 2.1'deki gibidir.

Çizelge 2.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları (Erdoğan, 2007)

	Oksit	Çimento Kimyasına Göre Sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60 – 67
Silis	SiO ₂	S	17 – 25
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3 – 8
Demir	Fe ₂ O ₃	F	0,5 – 6
Kükürt Trioksit	SO ₃	S	1 – 3
Magnezi	MgO	M	0,1 – 4
Alkaliler	Na ₂ O + K ₂ O	N + K	0,2 – 1,3

Çimentonun üretimi sırasında oksitler birbirleriyle birleşerek Portland çimentolarının dört ana bileşenini oluştururlar. Bu bileşenler Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Çimentonun anabileşenleri (Erdoğan, 2007)

Anabileşenler	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum Silikat $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Belit)	C_2S
Trikalsiyum Silikat $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Alit)	C_3S
Trikalsiyum Alüminat $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (Selit)	C_3A
Tetrakalsiyum Alümino Ferrit $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Brownmillerit)	C_4AF

2.1.2. Agregas

Beton hacminin yaklaşık olarak %75'ini oluşturan, kum, kırmataş ve çakıl gibi malzemelerden oluşan agregalar önemli bir bileşendir. Agregalar partikül boyutuna göre ince (kum) ve kaba (çakıl) olmak üzere ikiye ayrılır. Partikül çapı 4 mm den küçük olanlar 'ince agrega', çapı 4 mm den büyük olanlar ise 'iri agrega' olarak adlandırılır. Betonarme yapının maruz kaldığı basınca iri agregalar karşı koyarak asıl mukavemeti sağlar. İnce agrega olan kumun görevi, iri agregalar arasındaki boşlukların doldurulması iken, çimento hamuru ise kum ve iri agrega arasındaki boşlukları doldurulması ve tüm agrega tanelerini birbirine bağlanması görevini sağlar.

Beton kompozisyonunda agrega kullanılmasının nedenleri; agreganın çimentodan ucuzluğu sebebiyle hacimsel olarak daha fazla yer alması, rötreyi ve sünmeyi azaltması, beton karışımına iyi bir hacimsel kararlılık vermesi, kimyasal reaksiyona girmedeği için beton dayanıklılığının daha iyi olmasını sağlamasıdır.

Agrega tanelerinin yüzeyi, tanelerin formu, granülometrisi ve fiziksel özellikleri agrega kalitesini belirler. Agregas ile çimento arasında kuvvetli bağların (aderansın) olması beton mukavemetinin artışını sağlar. Agrega yüzeyinin pürüzlülüğü, yüzey girinti ve çıkıntıları çimento hamurunun ayrılmasını güçleştirerek aderans artırır ve betonda mukavemet artışı meydana gelir. En uygun agrega biçimi küp veya küre şeklindeki agregalardır. Yassı ve uzun şeklindeki agregalar beton mukavemetinde düşüşe neden olur.

İstenilen özelliklerde beton elde etmek için öncelikle kullanılacak olan agreganın özellikleri iyi bilinmelidir. Özgöl ağırlığı fazla olan agregalar betona daha yüksek mukavement ve dayanıklılık kazandırmakadır. Agregaya dayanımı çimento dayanımından düşük olduğu durumda agregaya kırılarak betonun gücünün azalmasına sebebiyet verir (Özdemir, 2006).

2.1.3. Karışım suyu

İçilebilir özellikte olan bütün sular beton üretiminde kullanılabilir niteliktedir. Fakat betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şartı yoktur. Analizlerinin yapıldığı takdirde içilemeyen sularla da kaliteli beton üretmek mümkündür. Bununla birlikte karışım suyu içinde bulunabilecek ağır metal tuzları ve asitleri, organik maddeler, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilir. Karışım suyunun tahlillerle belirlenmesi ve kalitesini belli aralıklarla denetlenmesi şarttır.

Beton üretiminde kullanılan karma suyu;

- Hidratasyonun başlayıp devam etmesini sağlar,
- İnce ve iri agregaya tanelerini ıslatır,
- Betonun işlenebilme özelliğinin artışı sağlar,

Belirli miktarda çimento, kum ve iri agregaya kullanarak beton üretimi istendiğinde en uygun gelen bir optimum su miktarı vardır ki, bu miktarda suyun kullanılmasıyla mukavemeti maksimum olan beton elde edilir (Özdemir, 2006).

Gerekli miktardan daha az su kullanılması durumunda;

- Yeterli oranda su bulunmamasından dolayı hidratasyon tamamlanamaz,
- Su, agregaya yüzeyini tam olarak ıslatamayacağından çimento-agregaya arasındaki bağ kuvveti azalır,

- Yeterli seviyede işlenebilirlik elde edilemez,
- Bunun sonucunda mukavemette düşüş gözlenir.

Betona konulan suyun optimum miktardan büyük olması halinde ise;

- Çimento hamurunun dayanımı azalır,
- Bünyedeki fazla su boşlukları tıkar ve betonun sıkışmasını engeller.

Hidratasyon için beton karışımına, çimento ağırlığının %36-42'si arasında karma suyu kullanılması uygundur. Bu orandan daha fazla su kullanımı işlenebilirlik özelliğini geliştirir. Karışım suyu, çimentonun inceliği ve agregadaki çok ince malzeme ile doğru orantılı olarak kullanılır. Hidratasyon sonunda kimyasal olarak bağlanamayan su, katılaşmış çimento hamurunda büzülmelere ve buharlaşma dolayısıyla istenmeyen boşluklara sebep olur (Değirmenci, 2006).

2.1.4. Katkı maddesi

Katkı maddeleri, su, agreg, hidrolik çimento ve fiber takviye dışında çimento veya beton harcına hemen karıştırma öncesinde veya karıştırma sırasında ilave edilen maddeler olarak tanımlanmaktadır (Ramachandran, 1996a). Günümüzde çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilere karşı dayanıklı, kaliteli ve yüksek performanslı beton üretimi, kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile mümkündür.

Beton; işlenebilir, güçlü, dayanıklı, su geçirmez ve aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Uygun beton bileşeni ve katkı seçimi ile kolaylıkla istenilen özelliklerde ekonomik olarak beton elde edilebilir.

Katkılar, taze veya sertleşmiş betonun bir veya birden fazla özelliğini geliştirebilir. Katkılar, genel olarak aşağıdaki amaçlarla betonda kullanılır:

1. Beton üretim maliyetini azaltmak için,
2. Betondan istenilen bazı özellikleri sağlamak için,
3. Betonun karıştırılması, nakliyesi, yerleştirilmesi ve kür edilmesi aşamalarında olumsuz hava koşullarından betonun kalitesini korumak için,

4. Beton dökümü sırasında birtakım acil durumlar ile başa çıkmak için

Beton katkılarının yaratacağı etki katkı tipi, katkı markası, çimento miktarı, su içeriği, agrega şekil ve oranı, karıştırma süresi, çökme ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır (Kosmatka ve ark., 1988) ; (Ramyar, 2007).

2.2. Hidratasyon Mekanizması

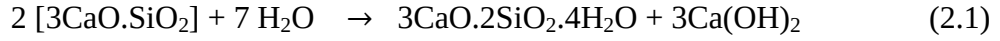
Portland çimentosunun hidratasyonu; çimentodaki anhidrit haldeki kalsiyum silikat ve kalsiyum alimünat fazlarının su ile reaksiyonu sonucu hidrat fazlarının oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Silikat bileşikleri, hidratasyon sonunda çimentonun dayanımını sağlayan esas bileşenler olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ile sönmüş kireci (Ca(OH)_2) oluştururlar. Su içinde çözülerek yerinin boş kalmasına neden olup beton dayanımını ve dayanıklılığını azalttığı için. Ca(OH)_2 'in varlığı istenmez. Prizel ilk başlayan çimento bileşeni C_3A 'dır. C_3A su ile çok hızlı reaksiyona girerek, çok fazla ısı açığa çıkarmakta ve çimento hamurunun çok çabuk katılaşmasına neden olmaktadır. C_3A 'nın reaksiyonunun yavaşlatmak için klinker, alçıtaşı ile birlikte öğütülmektedir. C_3A 'nın bağlayıcılık değeri az olup sülfatların yıpratıcı etkilerine karşı çimentonun direncini azaltmaktadır. C_3S 'in su ile reaksiyonu sırasında açığa çıkan ısı orta değerdedir. C_3S 'in yüksek bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkili olmaktadır. C_2S 'in su ile reaksiyonu yavaştır ve reaksiyon sırasında az miktarda ısı açığa çıkarmaktadır. C_2S 'in sahip olduğu yüksek bağlayıcılık özelliği kendini ancak betonun ileriki yaşlarında gösterebilmektedir. C_4AF 'nin bağlayıcılık değeri azdır ve su ile çok fazla bir reaksiyonu yoktur (Azizi, 2007) ; (Değirmenci, 2006).

Çizelge 2.3.'te çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.3. Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri (Erdoğan, 2007)

	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
İlk günlerdeki dayanım	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Son günlerdeki dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Trikalsiyum silikat ve dikalsiyum silikat birlikte Portland çimentosunun % 75-80'ini oluşturmaktadır. Su varlığında C₃S ve suyun reaksiyonu Eşitlik 2.1'de verilmektedir.



Eşitlik 2.1'deki kimyasal denklik yaklaşık olarak alınmaktadır, çünkü C-S-H (3CaO.2SiO₂.4H₂O) kompozisyonu (C/S ve S/H oranının) zor tayin edilmektedir. Tamamen hidratize olmuş bir çimento ya da C₃S hamuru %60-70 oranında C-S-H fazı içerir. C₃S hidratasyon derecesi, C₃S ve Ca(OH)₂ yapılarının X Işını Kırınımı cihazıyla (XRD) analiz edilmesiyle belirlenir. C-S-H fazı koloidal boyutta partiküller içerir. Az oranda kristalleştiğinden dolayı XRD'de iki küçük pik verir (Ramachandran, 1996b).

C₃S'in hidratasyonu beş basamaktan oluşmaktadır. İlk basamakta, C₃S'in su ile karşılaştığı 15-20 dakika içinde hızlı bir şekilde ısı açığa çıkmaktadır. Bu basamak 'önindüksiyon basamağı' olarak adlandırılır. İkinci basamak ise, reaksiyonun çok yavaş olduğu, pasif ve indüksiyon süreci olarak da bilinen basamaktır. Bu basamak bir saati geçebilir. Bu aşamadaki malzeme plastik ve işlenebilirdir. Üçüncü basamakta reaksiyonlar aktifleşerek zamanla hızlanan hızlandırıcı sürece geçerler. Reaksiyon hızı güçlü olduğunda ilk priz oluşur. Son priz ise, üçüncü basamağın sonlanmasından önce gerçekleşir. Dördüncü basamak hızın azaldığı basamaktır. Reaksiyonların ilk iki basamağını anlamak,

hidratasyonun ardışık reaksiyonlarıyla ilgisinden dolayı oldukça önemlidir. Kullanılan katkılar bu basamakları etkilemektedir. Priz geciktirici katkıların (sükroz, fosfonik asit, kalsiyum glukonat, sodyum heptonat vb.) indüksiyon basamağını uzattığı ve maksimum hızın gözlemlendiği tepe noktasını düşürdüğü bilinmektedir (Ramachandran, 1996b).

Birinci basamakta trikalsiyum silikatın su ile reaksiyonu sonucu ortamda kalsiyum ve hidroksil iyonları serbest kalmaktadır. İkinci basamakta çözünme devam etmekte ve pH yüksek bir değer olan 12,5 olmaktadır. Bu basamakta daha fazla silika çözünmesi gerçekleşmemektedir. Ortamda yeterli miktarda bulunduğu, kalsiyum ve hidroksil iyonları hızlı bir kristalleşme ile Ca(OH)_2 (CH) ve C-S-H oluşmaktadır. Dördüncü basamakta, hidratasyon ürünleri sürekli bir şekilde oluşmaktadır. Son basamak, ürünlerin oldukça yavaş meydana geldiği ve difüzyon kontrollü reaksiyonların olduğu basamaktır (Ramachandran, 1996b).

C_2S hidratasyonunda, tıpkı C_3S hidratasyonunda olduğu gibi C-S-H'nin stokiyometrisinin tayininde belirsizlikler mevcuttur. C_2S 'in su ile reaksiyonu Eşitlik 2.2'deki gibi gösterilmektedir.



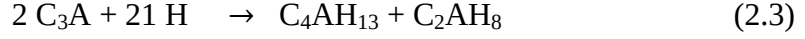
Eşitlik 2.2'deki reaksiyonda oluşan Ca(OH)_2 , C_3S reaksiyonunda oluşandan Ca(OH)_2 'den daha azdır. C_2S fazı C_3S 'ten çok daha yavaş hidratize olmaktadır.

C_3A bileşeni Portland çimentosunun yaklaşık %4-11'ini oluşturmaktadır ve C_3A erken reaksiyonlarda etkili bir bileşendir.

C_3A 'nın reaksiyonları sonucu kalsiyum alüminat hidratlar ile kalsiyum karbo- ve sülfö-alüminatlar oluşumu çimento hamurunda ani prize neden olmaktadır. C_3A 'nın Portland çimentosunda yüksek oranda bulunması, beton için gelecekte durabilite sorunları ortaya çıkabilmektedir. Örneğin sülfat çözeltisine maruz kalan çimentoda %5 oranından daha fazla C_3A bulunmamalıdır.

Trikalsiyum alüminatın su ile reaksiyonu sonucu oluşan ve hegzogonal fazda olan C_4AH_{13} ve C_2AH_8 bileşenleri termodinamik açıdan kararsız

olmalarından dolayı kübik fazlı C_3AH_6 yapısına dönüşmektedir (Eşitlik 2.3 ve Eşitlik 2.4.).

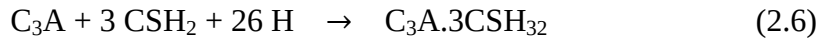


Doygun $Ca(OH)_2$ çözeltilerinde duruma bağlı olarak, C_2AH_8 ile $Ca(OH)_2$ reaksiyona girerek C_4AH_{13} veya C_3AH_6 bileşenlerini oluşturmaktadır. $80^\circ C$ ve üzeri sıcaklıklarda ise C_3A 'ın hidratasyonu ile doğrudan kübik formulu C_3AH_6 oluşmaktadır (Eşitlik 2.5).

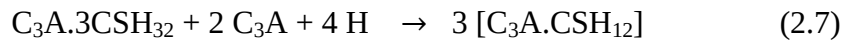


Normal hidratasyon koşullarında C_3A hamurları silikat fazlarına göre daha düşük dayanım göstermektedir. Bu durum kübik fazın oluşumuna dayanmaktadır. Düşük su/katı oranında ve yüksek sıcaklıklarda C_3A hidratasyonu sırasında C_3AH_6 'ın oluşumu ile tanecikler arasında doğrudan bağlanma gerçekleşmektedir ve bu yapı malzemenin dayanımını büyük ölçüde artırmaktadır.

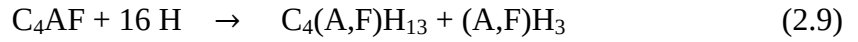
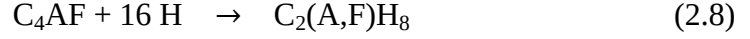
Portland çimentosunda C_3A fazı hidratasyonu nedeniyle oluşan ani prizi kontrol altına almak için için ortama alçıtaşı- $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (CSH_2) eklenmektedir. C_3A 'nın alçı taşı ile birkaç dakika içinde gerçekleşen reaksiyonu sonucu etrenjit ($C_3A \cdot 3CSH_2$) oluşur (Eşitlik 2.6).



Alçıtaşının tümünün etrenjite ($C_3A \cdot 3CSH_2$) dönüşmesinden sonra, kalan C_3A ile etrenjitin reaksiyonu sonucu sülfat-alüminat hidratlar (monosülfat- $C_3A \cdot CSH_{12}$) oluşmaktadır (Eşitlik 2.7). Bu ekzotermik dönüşüm 12-36 saat sürmekte ve dönüşüm sırasında ilave edilen katkılar dönüşümü hızlandırmakta ya da geciktirebilmektedir (Ramachandran ve Beaudoin, 2000).

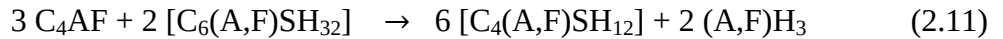
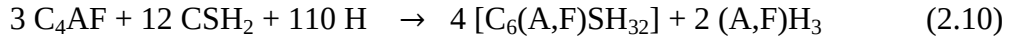


Ferrit fazı Portland çimentosunun %8-13'ünü oluşturmaktadır. Ferrit fazı hidratasyon ve fiziko-mekanik davranışa göre çimento mineralleri içerisinde daha az rol oynamaktadır. Ferrit fazı, C₃A fazı ile benzer davranışlar sergiler.



C₄AF'nin hidratasyon reaksiyonları yavaştır (Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9). Amorf demir ve alüminyum hidroksitler, tetrakalsiyum alümino ferritin reaksiyonları sonucu oluşmaktadır. Düşük su/katı oranlarında ve yüksek sıcaklıkta C₄AF hidratasyonu kübik fazın doğrudan oluşumunu arttırmaktadır.

C₄AF, alçıtaşının varlığında C₃A'a göre daha yavaş reaksiyona girer ve hidratasyon gecikmesini C₃A'dan daha etkili bir şekilde gerçekleştirir. Alçıtaşının C₄AF ile reaksiyonları Eşitlik 2.10 ve Eşitlik 2.11'de belirtilmektedir (Ramachandran, 1996b).



2.3. Beton Özellikleri

2.3.1. Taze beton özellikleri

Taze beton, henüz tamamen katılaşmamış, şekil verilebilir (plastik) durumdaki betondur. Betonun taşınıp kalıplardaki yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması yüzeyinin düzeltilmesi gibi işlemler, beton şekil verilebilir durumdayken yapılabilir (Erdoğan, 2007).

Sertleşmiş durumdaki betondan istenilen dayanımın, dayanıklılığın ve hacim sabitliğinin elde edilebilmesi için taze betonun aşağıdaki özellikleri göstermesi gerekmektedir.

- Beton kolay karıştırılabilir ve karıştırılan tüm malzemelerin homojen bir şekilde dağılımı olmalıdır.
- Karışımın tam yerleştirilebilmesi için kıvam kaybı olmadan yeterli işlenebilirlikte olmalıdır.
- Karışımın yerleşebilmesi çok fazla enerji gerektirmemelidir.
- Bu işlemler sırasında betonda (segregasyon) ayrışma gözlenmemelidir.

Beton teknolojisindeki gelişmeler, özellikle çok çeşitli kimyasal katkıların işin içine girmesi ve mineral bağlayıcı katkıların kullanılabilirliğinin ortaya çıkmasıyla, taze karışım özelliklerinin önemini arttırmıştır (Doğan, 2000).

a. İşlenebilme ve kıvam

Taze betonun özelliklerinin en önemlilerinden biri de ‘işlenebilme’dir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan taze beton, sertleştiğinde yeterli dayanım ve dayanıklılığı göstermez. Genel olarak işlenebilirlik; betonun homojenliğini yitirmeden ve ayrışma gözlenmeden minimum enerji ile karıştırma, yerleştirme işlemlerinin yapılabilmesidir (Şahin ve ark., 2007).

ACI tanımına göre işlenebilirlik; taze beton karışımı ya da harcının karıştırma, yerleştirme ve katılaştırma kolaylığıdır (ACI 116R-90, 1990). ASTM tanımına göre taze betonu minimum homojenite kaybı ile işlemek için gerekli kuvveti belirleyen özelliktir (ASTM C125-93, 1993).

İşlenebilme, taze betonun katılaşma göstermeden önceki durumuyla ilgili bir özellik olduğundan, betonun karılma işleminden itibaren ne kadar süre içerisinde katılaşma göstereceği, betonun kullanılacağı yapı tipi için oldukça önemli olmaktadır. Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların hızı, priz süresinin kısalığı veya uzunluğunu etkileyen önemli bir faktördür (Erdoğan, 2007).

İşlenebilmeyi etkileyen önemli faktörler; çimento miktarı, çimento özellikleri, karma suyu miktarı, agrega gradyasyonu ve en büyük agrega tane

boyutu, ince agreganın miktarı ve tane dağılım oranı, agregaların tane şekli, beton yapımında kullanılan ince taneli mineral katkıları ve kimyasal katkıları, hava sürüklenmiş betonlardaki sürüklenen hava miktarı, sıcaklık ve zamandır (Erdoğan, 2007).

Kıvam, taze beton karışımının ıslaklık derecesi, yani betonun ne ölçüde ıslak veya kuru olduğunu tanımlayan bir terimdir. Kıvamı çok yüksek bir beton, daha düşük kıvamdaki betona göre daha rahat pompalanabilir, daha rahat karıştırılabilir ve yerleştirilebilir betondur. Betonun kıvamı işlenebilirlik derecesini önemli ölçüde etkiler. Fakat yüksek kıvamlı betonun işlenebilirliği iyi olduğu anlamına gelmez. Su oranı çok fazla olan bir betonda çimento harcı ile iri agregalar arasında ayrışma gözlemlenmekte dolayısıyla işlenebilirlik kaybı yaşanmaktadır.

Kıvam kavramı betonun işlenebilirlik hakkında bilgiler sağlamakla birlikte işlenebilirlik özelliğini tam olarak açıklayamaz. İşlenebilirliği tayin etmek amacıyla beton kıvamı deneysel olarak ölçülmektedir.

Taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini ölçmek amaçlı kullanılan deneysel yöntemler:

- Çökme deneyi
- Vebe deneyi
- Sıkıştırma derecesi deneyi
- Yayılma deneyi
- Sıkıştırılabilirlik derecesi deneyi (Erdoğan, 2007).

b. Terleme ve segregasyon (Ayrışma)

Taze betonun içerisinde yer alan iri agregalar ile çimento harcının herhangi bir nedenle ayrışma göstermesi ‘segregasyon’ olarak adlandırılmaktadır.

Taze betonun segregasyona uğraması, beton yapısındaki iri agregalar ve çimento hamurunun heterojen bir şekilde dağılımına yol açar. Betonun bazı bölgelerinde iri agregalar, bazı bölgelerde ise çimento hamuru birikmiş olur. Bu durumda, beton bünyesinde dayanım ve dayanıklılık farklılıkları ortaya çıkmaktadır.

Betonun yerleştirilmesi sonrasında, bünyedeki suyun kanallar vasıtasıyla yukarı doğru, katı formun ise yerçekimi etkisiyle birlikte aşağı doğru hareket etme eğilimi vardır. Beton bünyesindeki suyun y zeyeye çıkma eğilimine ‘terleme’ adı verilir. Beton yüzeyine çıkan su buharlaşıp kaybolma eğilimindedir. Aynı zamanda y zeyeye çıkan su, bu bölgede su/ imento oranını arttırarak dayanım azalmasına neden olmaktadır. Terleme sırasında  imento ve kum gibi ince malzemeler de yukarı çıkabilmektedir. Terleme olayı aslında, su ile katı parçacıklar arasında bir çeşit segregasyon sayılabilmektedir (Erdoğan, 2007).

c. Priz

Betonu oluşturan malzemelerin karıştırılmasıyla elde edilen karışım plastik (şekil verilebilen) durumdadır. Hidratasyon reaksiyonları sonucunda ilk durumdaki plastiklik giderek azalmakta ve bir süre sonra beton katılaşarak şekil verilemeyecek duruma gelmektedir.

Priz alma, su ile çimentonun birleştiği andan itibaren 3-5 saat gibi bir sürede gerçekleşmektedir. Malzemenin karılmaya başlandığı andan, betonda katılaşmanın başladığı ana kadar geçen s reye ‘priz başlama süresi’ adı verilir. Karılmanın başladığı ana kadar geçen süre ise ‘priz sona erme süresi’ olarak adlandırılmaktadır.

Priz başlama süresi işlenebilirlik açısından önemlidir. Priz süresi betonun katılaşmasından önceki süreyi ifade ettiği için, bu süre betonun kalıplanmasını, yüzeyinin d zeltilebilmesini ve sıkıştırılabilmesini sağlayacak uzunlukta olmalıdır. Priz başlama süresinin bir saatten az olmaması istenmektedir. Çimentoların priz başlama süreleri  izelge 2.4’teki gibidir (Erdoğan, 2007).

2.3.2. Mekanik  zellikler

Sertleşmiş beton bazı mekanik özelliklere sahip olmak zorundadır. Bunlar basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, statik elastisite modülü, Poisson oranı, üç eksenli yük altında mekanik özellikleri, basınç altında

sünme, aşınma direnci, çelik ile bağ gelişimi, penetrasyon direnci, çekme dayanımı vb.dır.

Betonun mekanik davranışına kompozit malzeme açısından bakılmalıdır. Bir kompozit malzeme kimyasal ve mekanik olarak en az iki farklı malzemenin birleşiminden oluşan malzemedir. Bu çok fazlı materyal orijinal bileşenlerin özelliklerinden farklı özelliklere sahip olur.

Betonun mekanik davranışını etkileyen faktörler şunlardır: partikül şekli, partiküllerin büyüklüğü ve dağılımı, konsantrasyon, topolojisi, dispers ve sürekli fazlar ve fazların gözenek yapısı (Yeniay, 2008).

Betonun mekanik özellikleri arasında en çok inceleneni basınç dayanımıdır. ‘Beton dayanımı’, betonun veya harç örneğinin, birim kesitine uygulanan yüklemeye karşı gösterdiği maksimum direnç olarak açıklanmaktadır (ACI, 1990).

Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı yük taşıma kapasitesinin bir ölçütüdür. Dayanım beton kalitesini belirleyen, servis ömrü boyunca göstereceği performansı etkileyen mekanik özelliktir. Yükleme testinde gerilmenin maksimum değeri dayanım olarak alınır. Çimentoların dayanım özellikleri Çizelge 2.4’te gösterilmiştir.

Betonun basınç dayanımı betonun porozite ve su geçirimsizlik gibi özellikleriyle paralellik gösterir. Porozite ve su geçirimsizliğin az olduğu beton yüksek dayanım ve dayanıklılık gösterir. Basınç dayanımını belirleme, betonun diğer özelliklerini belirlemeye kıyasla kolaydır. Basınç dayanımı testi, sertleşmiş beton özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın testtir.. Beton basınç dayanımının belirlenmesi ile beton eğilme dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve geçirimsizlik gibi özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilir (Kılınç, 2010).

Çizelge 2.4. Çimentoların dayanım ve priz başlama süresi özellikleri (Erdoğan, 2007)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32,5 N	-	≥16	≥32,5	≤52,5	≥75	≥10
32,5 R	≥10	-				
42,5 N	≥10	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5 R	≥20	-				
52,5 N	≥20	-	≥52,5	-	≥45	
52,5 R	≥30	-				

2.4. Beton Katkı Maddeleri

2.4.1. Mineral katkı maddeleri

Mineral katkılar, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir (Uğur, 2002).

Elde edildikleri kaynaklara göre mineral katkı maddelerini üç grupta toplayabilmek mümkündür.

1. Doğal malzemeler (volkanik küller, traslar, diatomlu topraklar ve taşunu),
2. Yan ürün olarak elde edilen endüstriyel malzemeler (uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)),
3. Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl) (Erdoğan, 2007).

Betonda katkı maddesi olarak kullanılacak mineral malzemeler mutlaka ince taneli olmalıdır. Yan ürün olarak elde edilem uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemeler ince taneli malzemelerdir. Volkanik tüf, granüle yüksek fırın cürufu, pişirilmiş kil gibi malzemelerin mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmeleri için, öğütülmeleri ve tanelerinin en az portland çimentosu inceliğinde olmalıdır (Erdoğan, 2007).

Mineral katkı maddeleri beton karışımına temel bileşenlerle doğrudan karıştırılarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2007). Mineral katkı maddesi, çimento kullanımını azaltarak beton karışımında çimento yerini almakta, böylelikle ekonomik yarar sağlamaktadır.

Mineral katkılar genellikle çimento yarı mamulü klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütülerek karışıma eklenirler. Katkı kullanımı çimento eldesinde daha az hammadde ve daha az enerji kullanımını sağlayarak, daha az sera gazı salınımı ve enerji tasarrufu sağlar. Bu nedenle endüstriyel atık olan katkı maddelerin çevresel yararları daha fazla olmaktadır.

Mineral katkılarının etkileri katıldıkları klinker veya çimentonun özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca atıl olarak sınıflandırılan bazı katkılar, örneğin kalker tozunun, çimento hidratasyonu ve hamur oluşumu üzerinde olumlu etki yapabildikleri anlaşılmaktadır (Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

Mineral katkılar taze ve katılaşıp betonun birçok özelliğini etkileyebilmektedir. Bunlar; taze betonun işlenebilmesini artırmak, terleme ve segregasyonu azaltmak, hidratasyon ısını azaltmak, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genleşmeyi azaltmak, su geçirgenliği azaltmak, nihai dayanımı artırmak, sülfatlara karşı dayanıklılığı artırmak ve daha ekonomik bir beton elde etmek gibi özelliklerdir (Özdemir, 2006). Volkanik kül, ponza taşı, pişmiş kil, uçucu kül gibi puzolanik maddelerdeki reaktif silika, Portland çimentosu hidratasyonu sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlarla oluşan Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon; dayanım artışı, düşük geçirgenlik, porozitenin azalması, kimyasal etkilere daha güçlü direnç ve alkali-agrega genişlemesini sağlar (Newman ve Choo, 2003).

2.4.2. Kimyasal katkı maddeleri

Beton teknolojisinde, kimyasal katkı maddeleri, ‘su içerisinde erime özelliği gösteren katkı maddeleri’ olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal katkılar daha çok sulu çözelti halinde bulunmaktadır çünkü çözelti formundaki katkılar beton içinde daha iyi bir şekilde dağılmaktadır. Bu maddeler, beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5’ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir.

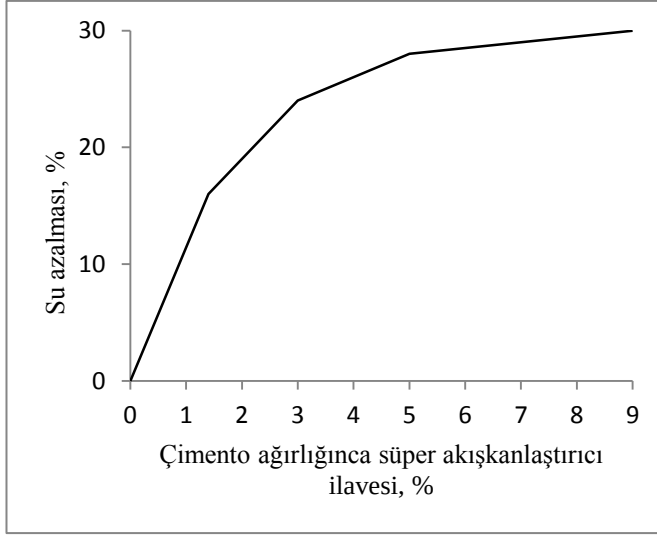
Ancak tipik aralık, %0,3-1,5'tir ve çoğu katkı maddesi %2 oranından daha az kullanılır. Kimyasal katkı maddeleri, genellikle çimento miktarının %0,5'inden az veya beton ağırlığının %0,02'sini oluşturur (Newman ve Choo, 2003).

Kimyasal katkılar TS EN 934-2'ye göre kendi içinde; su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar, yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar, su tutucu katkılar, hava sürükleyici katkılar, priz hızlandırıcı katkılar, sertleşmeyi hızlandırıcı katkılar, priz geciktirici katkılar, su geçirimsizlik katkısı, priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar, priz geciktirici/yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar, priz hızlandırıcı/su azaltıcı /akışkanlaştırıcı katkılar, viskozite modifiye edici katkılar olarak sınıflandırılırlar (TS EN 934-2, 2013).

a. Su azaltıcı katkılar

Su azaltıcı katkılar su-bağlayıcı oranını düşürmek, suyu ve çimentoyu azaltmak veya su-bağlayıcı oranını değiştirmeksizin betonun işlenebilirliğini iyileştirmek için kullanılırlar.

Karışım suyu miktarını %5-11 oranında azaltan su azaltıcı katkılara akışkanlaştırıcı, %12 ve üzeri azaltan katkılar ise süper akışkanlaştırıcı olarak adlandırılmaktadır (TS EN 934-2). Bu tür katkılar, yapılan beton dizaynına göre, belirli bir kıvamda karışım suyunu azaltarak yüksek performanslı bir beton üretimi sağladığı için su azaltıcı; aynı su/çimento oranında beton karışımına akışkanlık sağlayarak taze betonun kalıplara boşluksuz bir şekilde ve kolay yerleşmesini sağladığı için ise süper akışkanlaştırıcı olarak adlandırılmaktadır (Topçu ve ark, 2004). %30'a kadar su kesme sağlayan yeni kuşak akışkanlaştırıcılar ise '*hiper akışkanlaştırıcılar*'. Diğer akışkanlaştırıcılara oranla betonda daha yüksek oranda su azaltmakta, daha fazla akışkanlık sağlamaktadır. Hiper akışkanlaştırıcılar suyu olağanüstü azaltma yeteneği ile işlenebilirliği şimdiye kadar ulaşılamayan su/çimento oranlarında elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile beton karışımındaki su azalması Şekil 2.1'deki gibidir (Yılmaz, 2003) ; (Ramachandran, 1996c).



Şekil 2.1. Süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile elde edilen su azalması (Ramachandran, 1996c)

Ülkemizde hazır beton sektöründeki gelişmelerle birlikte akışkanlaştırıcı kimyasal katkı uygulaması yaygın hale gelmiştir. 90'lı yıllarda betonda katkı kullanımı çok düşük seviyelerde iken günümüzde bu oranın artışıyla katkı kullanımı vazgeçilmez duruma gelmiştir (Uysal ve Yılmaz, 2012).

Akışkanlaştırıcı katkıları kimyasal yapılarına göre farklı su azaltma özelliği sergiler. Su kesme miktarı; katkı tipi, su/çimento oranı, katkı oranı, ortam sıcaklığı ve agrega boyutu ile ilişkilidir. Her akışkanlaştırıcı katkı için uygun bir çalışma dozajı aralığı bulunmaktadır. Önerilen değerler dışında katkı kullanımda priz süresinde aşırı gecikme veya kısılma, erken mukavemette düşüş, kalıp alma süresinde uzama, ayrışma gibi durumlarla karşılaşılabilir (Felekoğlu ve Baradan, 2006). Kimi zaman ise betonun çökme değeri aşırı artmakta, beton stabilitesini kaybederek ayrışabilmekte, hava sürüklenme etkisinde değişiklikler olabilmektedir. Bazı durumlarda ise kimyasal katkıların aşırı dozajda kullanımı, betonda stabilite kaybına neden olmadan betonun priz almasını aşırı geciktirip kalıp alma süresini haftalarca uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle katkıları önerilen dozaj aralığında kullanılmalıdır (Türkel ve Felekoğlu, 2004).

b. Süper akışkanlaştırıcılar

Süper akışkanlaştırıcılar, çimento hamurundaki kümelenmiş hidratize olan çimento tanelerinin ayrışması yoluyla işlenebilirliği arttırması ile beton kimyasal katkılarının önemli bir sınıfıdır. Süper plastikleştiricilerin ana işlevi çimento hamurunun akıcılığını ve kıvamını kaybetmeden su/çimento (w/c) oranının düşürerek daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlamaktır.

Süper akışkanlaştırıcılar su içerisinde çözünebilen, suyun yüzey gerilimini düşüren organik maddelerdir. Süper plastikleştiriciler aynı zamanda beton içerisine hava sürükleyerek çimento topaklaşmasını önlemektedirler (Topçu ve ark, 2004). Su azaltıcı beton katkıları kullanılan beton sistemlerinde, katkı çimento taneleri yüzeyine tutunarak adsorbe olması sonucu sistem hidrofob özellik kazanır. Böylelikle beton bünyesinde homojen bir dağılım elde edilir (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003).

Yapı sektöründe yüksek performanslı beton üretmek için iki önemli amaç vardır. Dayanımdan ödün vermeksizin karışımdaki su/çimento oranını mümkün olduğu ölçüde azaltmak, beton bünyesinde ayrışma olmadan boşluksuz bir biçimde kalıplamaktır (Ramyar, 2007).

Süper akışkanlaştırıcılar kimyasal kökenine bağlı olarak dört gruba ayrılır:

1. Modifiye lignosülfonatlar (MLS)
2. Sülfone melamin formaldehit kondensatı (SMF)
3. Sülfone naftalin formaldehit kondensatı (SNF)
4. Sülfonik asit esterler, poliakrilatlar, polistren sülfonatlar, polikarboksilatlar (Ramachandran, 1996c) ; (Ramyar, 2007).

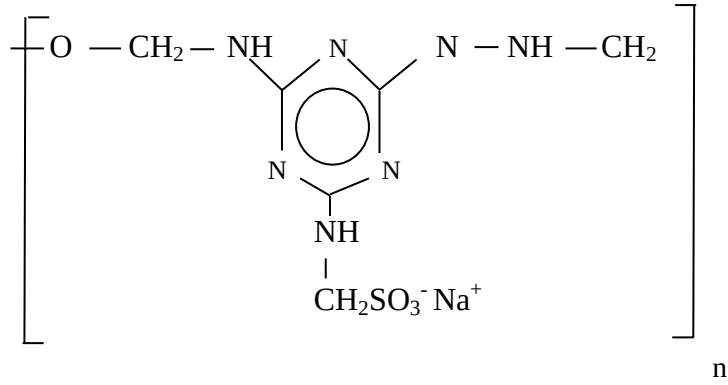
Su indirgeyici kimyasal katkı maddelerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde; ilk akışkanlaştırıcılar lignosülfonat bazlı katılardır. Lignosülfat bazlı katılar yüksek şeker içeriğinden dolayı priz gecikmesi yaratırlar. Bununla birlikte lignosülfatlar betonun bünyesinde hava sürükleyerek dayanım ve dayanıklılık kaybına sebep olurlar. Lignosülfat üzerine çalışan araştırmacılar şekeri rafine ederek ayırtırmış ve modifiye lignosülfatlar (MLS) geliştirilmiştir. Modifiye lignosülfatlar %10 oranında su kesme sağlar. Aşırı oranda kullanım

durumunda stabilite kaybı ve priz gecikmesi gibi önemli problemler yaratmaktadır (Türkel ve Felekoğlu, 2004).

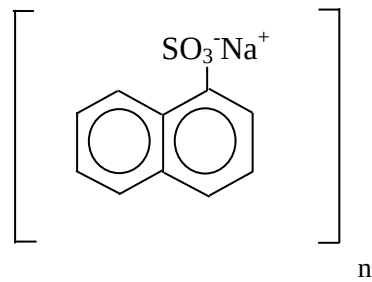
1960'lı yıllarda, sülfone naftalin formaldehit (SNF) Japonlar tarafından ve sülfone melamin formaldehit esaslı akışkanlaştırıcılar (SMF) ise Almanlar tarafından geliştirilmişlerdir. SMF ve SNF süper akışkanlaştırıcıları %20'ye kadar su azaltma sağlarlar. Betonda su azalması arttıkça betonun porozitesi azalmaya devam etmekte ve dayanımı artmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkıların uzun molekül zincirlerine sahip olması onların molekül ağırlıklarının yüksek olmasına ve bunun da çimento tanecikleri üzerinde absorbe olarak iyi bir elektriksel itme gücü ile dispersif etki yaratmasına imkan vermiştir (Sağlık, 2014).

Sülfone melamin formaldehit akışkanlaştırıcılar %16-25 aralığında su azaltma sağlarken karışım içinde kohezyonu azaltıp kuma ve segregasyon eğilimini arttırır. SMF'nin priz geciktirici özelliği yoktur. Erken dayanımın kritik olduğu yerde ve düşük sıcaklıklarda etkilidir. Hazır betonda yüksek sıcaklıklarda hızlı bir şekilde işlenebilirlik kaybeder. SMF genellikle renksizdir ve beton yüzeyini iyileştirir ve beyaz betonun lekelenmesine sebep olmaz. Bu nedenle görünüşün önemli olduğu yerlerde kullanılır.

Sülfone naftalin formaldehit akışkanlaştırıcılar büyük, kararsız hava kabarcıklarının sürüklenmesini arttırma eğiliminde olup, kohezyonu artırıp yüzey kusurlarına neden olabilmektedir. SNF'nin priz geciktirme özelliği SMF'den daha fazladır fakat bu süre yüksek doz kullanılmasına rağmen 90 dakikayı geçmemektedir. Priz geciktirici gibi katkılarla birlikte kullanımı işlenebilirliği geliştirmede etkilidir. Fiyat uygunluğu ve kararlılığıyla sülfone naftalin formaldehit akışkanlaştırıcılar hazır beton ya da şantiye betonu uygulamaları gibi bir çok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Newman ve Choo, 2003).



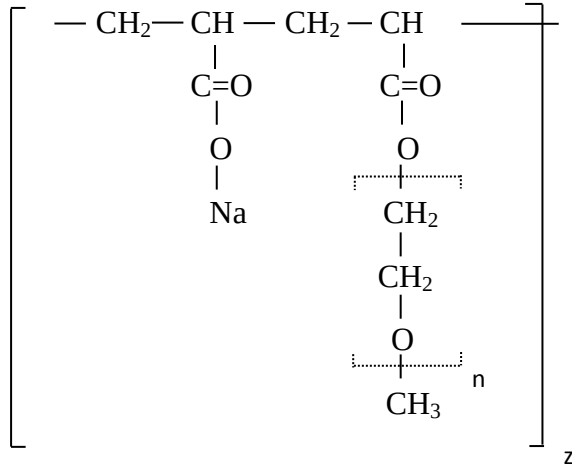
Şekil 2.2. Sülfone melamin formaldehit yapısı (SMF)



Şekil 2.3. Sülfone naftalin formaldehit yapısı (SNF)

1980’lerde polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılar (PC) üçüncü nesil süper akışkanlaştırıcılar olarak yerini almış ve son derece düşük poroziteli ve su/çimento oranlarında oldukça akışkan veya akıcı, kendiliğinden yerleşen betonlar elde etmek mümkün hale gelmiştir. Böylece, günümüzde PC’ler çimento sistemlerinde melamin ve naftalin esaslı katkı maddelerinin yerini almış ve son yıllarda büyük araştırma konusu olmuştur. PC’ler polietilen glikol yan zincirli tarak tipi kimyasal yapısına sahiptir ve partiküller arasında sterik itici güç oluşturur. PC’ler düşük dozajlarda çökme kaybı gelişiminde etkilidir Polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcılar (PCE) tipik olarak %20-35 oranında su kesme sağlar. Litre başına daha pahalı olmakla birlikte düşük dozda kullanımı yaygın kullanım olanağı sağlamaktadır. Hazır beton sektöründe hedeflenen su kesmeyi temin etmektedir ve az oranda priz geciktirmekle birlikte işlenebilirliği iyileştirmektedir. PCE bazlı süper akışkanlaştırıcılar geliştirilen en son katkılardır ve piyasada gelişimini sürdürmeye devam etmektedir. Hazır beton, öndöküm ve kendiliğinden yerleşen beton pazarında

önemli bir konum elde etmiştir. PC'ler, SNF tipi akışkanlaştırıcılara kıyasla daha pahalı ve düşük kararlılıkta olmalarına rağmen, düşük karışım dizaynı ve uyumluluklarından dolayı PC pazarı giderek büyümektedir (Newman ve Choo,2003) ; (Liu ve ark., 2014).



Şekil 2.4. Polikarboksilat yapısı

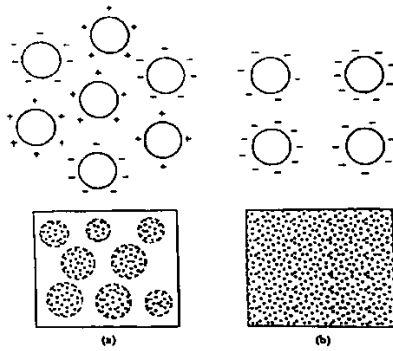
c. Süper akışkanlaştırıcıların etki mekanizması

Süper akışkanlaştırıcılar beton karışımındaki iri topaklar oluşturan çimento tanelerinin ayrışmasını sağlar. Ayrıştırma etkisinden dolayı çimento karışımının akışkanlığı artar (Collepari, 2005a). Süper akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması temel olarak iki aşamadan oluşur. Katkının çimento tanelerini dağıtma özelliği hem elektrostatik hem de sterik itkidenden kaynaklanmaktadır. Karboksilat grubu elektrostatik itkiyi, eter grubu ise sterik itkiyi sağlamaktadır. Sterik itki polikarboksilat esaslı katkılara özgü bir özelliktir ve diğer katkılara göre yüksek oranda su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı özelliği ve ayrıca daha uzun süre kıvam koruma sağlamaktadır (Yamada ve ark., 2000).

Süper akışkanlaştırıcıların molekül ağırlığı dağıtıcı özelliği etkilemektedir. Yüksek molekül ağırlıklı yapı daha fazla yüzey alanı oluşturacağından çimento taneleri üzerine tutunma (adsorpsiyon) oranı artmakta, böylelikle daha yüksek dağılım özelliği göstermektedir.

Süper akışkanlaştırıcı kullanımı reolojik özellikleri etkilemektedir. Kayma gerilmesini düşürerek viskoziteyi değiştirir. Plastik viskozitenin düşmesiyle ve sürtünme kuvvetinin azalmasıyla betonun boru ile transferinde kolaylık sağlanır. Plastik viskozitenin düşmesi aynı zamanda beton bünyesinde meydana gelebilecek ayrışmayla boruların tıkanma tehlikesine yol açar (Doğan, 2000).

Elektrostatik etki : Süper plastikleştiriciler çimento hamurundaki iri topakların küçük çimento partiküllerine ayrılmasına neden olur. Dağıtıcı etkiden dolayı çimento karışımının akışkanlığı artar. Çimento tanelerinin topaklaşmasına neden olan çekim kuvvetleri, negatif yüklü SNF ve SMF gibi polimerlerin çimento tanesi üzerinde tutunması sonucu, nötr veya negatif yüklü hale gelmekte ve böylece dağıtma etkisi gerçekleşmektedir (Collepardi, 2005b). Katkının etkisiyle katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan kuvvetler, karışımın kararlılığını etkiler. Askıdaki çimento tanesi aynı tipte elektriksel yük taşır ve bunların arasında bir itme kuvveti oluşur. Bu elektriksel yükler yeterince fazla ise taneler birbirinden ayrı kalır ve topaklaşma oluşmaz (Ramyar, 2007). SNF ve elektrostatik itkinin çimento tanelerinin dağılmasına etkisinin şematik gösterimi Şekil 2.5'teki gibidir.

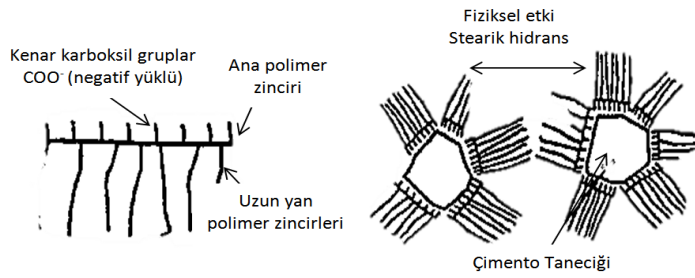


Şekil 2.5. Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur (Ramyar, 2007)

Sterik etki : Polikarboksilat esaslı katkılarda dağıtma etkisi elektrostatik etki ile birlikte sterik (fiziksel) engelleme etkisi görülmektedir. Sterik etki sadece polikarboksilat bazlı katkılara özgü bir nitelikdir ve daha etkilidir. PC bazlı süper akışkanlaştırıcıların ayrıştırma mekanizması çimento taneleri üzerinde polimer adsorpsiyondan sorumlu negatif yüklü anyonik grubun (COO^-) varlığından daha

çok sterik itki (uzun graft zincirinin nötr tarafında oluşan) ile ilgilidir. Bir başka deyişle çimento yüzeyinde bulunan polimer moleküllerinin graft zincirleri çimento tanelerinin düzensiz büyük şekilde topaklanarak kümelenmesini önler (Collepardi, 2005b). Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, polimer molekülündeki yan zincirler çimento taneleri arasında fiziksel bir etki oluşturmakta ve topaklaşmayı önlemektedir (Ramyar, 2007).

Sterik etkiyi etkileyen faktörler; ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu ve yan zincirler arasındaki mesafedir (Ramyar, 2007).



Şekil 2.6. Katkıların sterik etkisi (Ramyar, 2007)

2.5. Çimento-Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler

2.5.1. Çimento kaynaklı etkiler

Çimentonun kimyasal kompozisyonu, inceliği ve içerdiği sülfatların çözünürlüğü gibi faktörler, yüksek performanslı betonların reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir (Ramyar, 2007).

a. Çimentonun kimyasal kompozisyonu

Portland çimentosundaki C_3A bileşeni, genel olarak kübik ve ortorombik kristal yapının karışımı olarak bulunmaktadır. Kübik yapı, ortorombik yapıya göre daha reaktiftir. Kübik yapıda olan C_3A , sülfat iyonları ile hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakası sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylece, çimento hidrasyonu durgunluk devresinde, çok fazla kıvam

kaybı oluşmadan betonun taşınması ve yerleştirilmesi mümkün olur. Ortorombik yapıda olan C_3A ise kübik forma göre biraz daha yavaş tepkime gösterir ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna neden olur. Süper akışkanlaştırıcı varlığında, kübik C_3A yapının sülfat iyonlarıyla olan reaksiyonu daha kolay kontrol edilebilir. Genel olarak çimentonun C_3A içeriğinin az olması, süper akışkanlaştırıcı içeren sistemde istenen bir durumdur.

C_3A 'nın reaksiyonuyla oluşan iğne formundaki etrenjit, ortamdaki suyu tüketir ve hamurun işlenebilirliğini azaltır. Süper akışkanlaştırıcılar oluşan etrenjit formlarının üzerinde tutunarak bunların iğnemsî yapıya dönüşmesini geciktirir. Bazı araştırmacılara göre, süper akışkanlaştırıcı varlığında iğne şekilli etrenjit yerine, kübik forma yakın ve küçük boyutlarda etrenjit kristalleri oluşur. Bu masif yapı, iğne şekilli yapıya göre akışkanlığa daha az zarar verir.

Süper akışkanlaştırıcının dağıtma etkisinin kararlı ve sürekli olabilmesi için asıl olarak C_3S ve C_2S bileşenleri üzerinde tutunması gerekmektedir. Ancak $C_3F + C_4AF$ içeriği fazla olan çimentolarda, katkının bu bileşenlere tutunması nedeniyle, C_3S ve C_2S bileşenleri üzerinde tutunan göreceli miktarı dolayısıyla, hamurun akışkanlığı azalır. Çok sayıda araştırmaya rağmen süper akışkanlaştırıcı katkılar ve C_3A bileşeni arasındaki etkileşimi kontrol eden temel prensipler net olarak anlaşılmamıştır.

Süper akışkanlaştırıcı moleküllerinin hidrate olmamış çimento bileşenlerinin yanısıra, hidrasyon ürünleri tarafından da tutulduğu bilinmektedir. Hidrasyon ürünleri üzerindeki bu tutunma, etrenjit gelişimini oldukça yavaşlatır, hatta durdurabilir. Karışımda mevcut olan süper akışkanlaştırıcı moleküllerinin tükenmesiyle birlikte etrenjit tekrar normal olarak gelişmeye devam eder (Ramyar, 2007).

b. Çimentonun inceliği

Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren çimento hamurunun viskozitesi çimento inceliğine de bağlıdır. Çimento inceliği arttıkça karışımın viskozitesi artar. Yapılan çalışmalar, 11 μm 'den küçük tane boyutuyla viskozite arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Aynı işlenebilmeyi sağlamak için çimentonun

inceliğine bağlı olarak daha fazla süper akışkanlaştırıcı kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte inceliğin reolojik özellikler üzerindeki etkisinin her zaman aynı olmadığı da vurgulanmıştır. Çimento inceliğinin hidratasyon hızını arttırdığı bilinmektedir. Buna rağmen, çimento iyi bir tane dağılımına sahipse akışkanlıkta artış meydana gelebilir. Bu durum, boşlukların azalmasıyla su ihtiyacının azalmasına bağlanmıştır. Göreceli olarak düşük C_3A içeriğine ve düşük inceliğe sahip çimentoların daha iyi akışkanlık özelliği gösterdiği bildirilmiştir. Çimento taneleri şeklinin de akışkanlık üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Göreceli olarak daha küresel tanelerden oluşan çimentonun daha düşük yüzey alanına sahip olmasından dolayı daha az katkı gereksinimi olduğu belirtilmiştir (Ramyar, 2007).

c. Kalsiyum sülfat miktarı ve formu

Üretim esnasında priz dengeleyici olarak çimentoya eklenen kalsiyum sülfatın tipi (alçıtaşı- $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, hemihidrat- $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ veya anhidrit- $CaSO_4$) karışımın viskozitesini etkilemektedir. Hemihidrat ve çözünebilir anhidritin çözünürlüğü alçıtaşına göre yaklaşık üç kat daha fazladır. Bunların çimentodaki miktarının değişimi kimyasal reaksiyonları ve buna bağlı olarak işlenebilmeyi etkilemektedir. Bu değişimler, aynı zamanda akışkanlaştırıcı ve çimento arasında uyumsuzluğa sebep olmakta, yalancı veya ani prize yol açabilmektedir. Karışımın reolojik özelliklerini kontrol edebilmek için bazı durumlarda alçıtaşının hemihidrata dönüşmesi elverişli olabilir. Hemihidratın çözünme hızı fazla olduğundan hidratasyonun ilk evrelerinde etrenjit oluşumu hızlanır, buna karşın, C_3AH_6 oluşumu yavaşlar. Genel olarak, alçıtaşının %40-50 oranında hemihidrata dönüşmesi optimum olarak kabul edilmektedir.

Düşük su/çimento oranına sahip süper akışkanlaştırıcı katkılı çimento hamurlarında, çimento-katkı uyumsuzluğunun çimentodaki kalsiyum sülfat yetersizliğinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Hamurda yeterli miktarda kalsiyum sülfat bulunduğu C_3A ve C_4AF bileşenlerinin yüzeyinde tutunan katkı miktarının azaldığı, bunun sonucunda çimentodaki silikat fazlarının daha iyi dağıldığı ve akışkanlığın arttığı belirtilmiştir. Temel olarak sülfatların reoloji

üzerindeki etkisinin sistemdeki toplam SO_3 miktarından ziyade SO_4^{2-} iyonlarının çözünme oranına bağlı olduğu açıklanmıştır.

Süper akışkanlaştırıcılar, çimento tanelerini dağıtma etkisi yanında hidratasyon kinetiğini ve alçıtaşının çözünübilirliğini de değiştirmektedir.

Diğer bir araştırmada hemihidrat formundaki sülfatların çok daha çözünbildiği için, süper akışkanlaştırıcı varlığında daha fazla etrenjit oluşturacağı belirtilmiştir. Buna ilaveten, katkının dağıtma sistemindeki etkileşim yüzeyinin artmasından dolayı toplam reaktivite artmaktadır. Sonuçta, artan etrenjit oluşumu tane betonun eşik kayma gerilmesi değerini arttırmaktadır

On dört farklı çimento ve üç farklı kökünde süper akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan hamurlar üzerinde yapılan bir çalışmada, sülfat morfolojisinin (alçıtaşı, hemihidrat ve anhidritin bağıl miktarlarının) işlenebilme üzerinde fazla etkili olmadığı, çimento özgül yüzey alanının etkisinin ise daha önemli olduğu gösterilmiştir. Hemihidratın süper akışkanlaştırıcı içermeyen hamurlarda önemli olduğu vurgulanmıştır. Araştırmada, literatürde verilen bilgilere paralel olarak, alüminat fazının oldukça etkili olduğu ve genel olarak, çimentonun alümin içeriğinin azalması ile işlenebilirliğin arttığı belirtilmiştir (Ramyar, 2007).

d. Çimentonun alkali içeriği

Süper akışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlarda yüksek oranda alkali içeren çimentoların genellikle daha kötü reolojik davranış gösterdiği bilinmektedir. Benzer şekilde süper akışkanlaştırıcı içeren karışımların işlenebilirliğinin de çimentonun azalan alkali içeriği ile arttığı bildirilmiştir. Araştırmacılar, boşluk çözeltisindeki alkali içeriğinin artması ile C_3A 'nın çözünübilirliğinin, dolayısıyla etrenjit oluşumunun arttığını belirtmiştir.

Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren çimento hamurlarının akışkanlığını ve akışkanlık kaybını kontrol eden ana parametrenin ilk zamanlarda boşluk çözeltisine geçip çözünabilen alkali miktarı olduğu bildirilmiştir. Başlangıç akışkanlığını arttırma ve zamanla akışkanlık kaybını azaltma bakımından, optimum çözünabilen alkali içeriğinin süper akışkanlaştırıcı dozajı ve çimento

tipinden bağımsız olarak %0,4-0,5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşdeğer}}$ olduğu bulunmuştur. Ayrıca, optimum miktarda çözünebilen alkali içeren çimentolarda, C_3A içeriğinin akışkanlık kaybı üzerinde kayda değer etkisi olmadığı görülmüştür.

Bazı araştırmacılar, düşük alkalin çimento ve SNF esaslı süper akışkanlaştırıcı içeren karışımların reolojik özelliklerinin karışıma bir miktar alkali sülfat ilave edilerek geliştirilebildiğini söylemiştir. Alkali sülfat tarafından hızla ortama salıverilen SO_4^{-2} , hızlı bir şekilde C_3A ve C_4AF üzerinde tutunduğu bildirilmiştir. Bu durumda, katkının çimento bileşenleri üzerinde tutunma oranı azalmakta ve karışımın akışkanlığı artmaktadır (Ramyar, 2007).

e. Öğütmeyi kolaylaştırıcı katkıların etkisi

Çimento üretiminde öğütmeyi kolaylaştırmak amacıyla klinkere katılan katkılar, süper akışkanlaştırıcı katkıların çimentoya tutunma özeliğini dolayısıyla işlenebilmeyi değiştirmektedir. Öğütmeyi kolaylaştırıcı olarak kullanılan trietanol amin asetat katkının, hamurun eşik kayma gerilmesini %25 mertebesinde azalttığı belirtilmiştir (Ramyar, 2007).

2.5.2. Süper akışkanlaştırıcı kaynaklı etkiler

Katkı üreticisi tarafından verilen katkı madde oranı, yoğunluk, pH, sülfat ve klorür içeriği gibi özellikler, ürünün performansı hakkında kayda değer bilgi vermez. Süper akışkanlaştırıcının etkinliğini belirleyen en önemli özellikleri bağlı sülfonat grubunun pozisyonu, polimer zincirinin uzunluğu ve bunların çapraz bağlanmaları, artık sülfat miktarı ve nötrleştirme işleminde kullanılan karşıt iyon tipidir (Ramyar, 2007).

a. Katkı kökeni, moleküler ağırlık, sülfonasyon ve polimerizasyon derecesi etkisi

Süper akışkanlaştırıcılar kökenleri dolayısıyla birbirinden farklı olabilecekleri gibi aynı kökenden olan katkılar da, moleküler ağırlık ve kimyasal

kompozisyonlarındaki değişkenlikten, farklılık gösterebilir. Süper akışkanlaştırıcılar ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunu yorumlamadaki en büyük sorunun katkıların kimyasal yapıları ve özellikle de moleküler ağırlıklarının bilinmemesidir (Chandra ve Björnstörn, 2002).

Katkı viskozitesinin genel olarak moleküler ağırlığı hakkında fikir verdiği; moleküler ağırlığının ise katkı performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Katkının molekül ağırlığının artmasıyla akışkanlığın arttığı ancak bir noktadan sonra, moleküler ağırlığın artmasının viskozitede artışa yol açtığı söylenmiştir. Çok yüksek moleküler ağırlığına sahip katkıdaki uzun polimer zincirinin çimento tanelerine tutunarak topaklaşmaya yol açabileceği açıklanmıştır.

Belirli bir su/çimento oranına sahip polikarboksilat esaslı katkı içeren karışımın, en iyi akışkanlığı için optimum bir moleküler ağırlığı değerinden söz edilmiştir. Su/çimento oranının azalmasıyla moleküler ağırlığı az olan katkıların daha fazla akışkanlık sağladığı vurgulanmıştır. Katkının sülfonasyon derecesinin göreceli olarak moleküler ağırlığından daha fazla işlenebilirliği etkilediği belirtilmiştir.

Katkının polimerizasyon derecesinin, karışımın dayanım gelişmesine olan etkisinin polimerin tipine bağlı olarak değiştiği, ayrıca düşük moleküler ağırlıklı polimerlerin çimento tanelerini dağıtmada daha etkili olduğu açıklanmıştır. Asidik sülfonat grubunun (HSO_3), naftalin molekülüne bağlanma pozisyonu katkının verimini etkilemektedir (Ramyar, 2007).

b. Süper akışkanlaştırıcının çimento üzerinde tutunması

Süper akışkanlaştırıcının etkinliği, katkının çözeltideki konsantrasyonuna bağlıdır. Hidratasyonun ilk aşamalarında, hızla çimento taneleri ve hidratasyon ürünlerine tutunmasıyla katkının konsantrasyonu önemli ölçüde azalabilir. Negatif yüklü süper akışkanlaştırıcı polimeri, çimento bileşenleri üzerine tutunur. Ancak, C_3S 'e göre daha az negatifliğe sahip C_3A üzerindeki tutunma oranı daha fazladır. Başka bir araştırmada C_3A ve C_4AF bileşenleri üzerinde C_3S ve C_2S bileşenlerine

göre daha fazla katkı tutunduğu, bunun tüm süper akışkanlaştırıcılar için geçerli olduğu vurgulanmıştır.

Süper akışkanlaştırıcı molekülleri, sadece hidrate olmamış çimento bileşenleri üzerinde değil, aynı zamanda oluşan hidratasyon ürünleri üzerinde de tutunur. Bu durumda, iğne şeklindeki etrenjit kristallerinin oluşumundan ziyade büyüklü küçüklü etrenjit kümeleri oluşur. Sistemdeki süper akışkanlaştırıcı tükendiğinde, olağan iğne formundaki etrenjit oluşumu tekrar başlar. Katkı molekülleri, etrenjitin yanında C_3A 'nın diğer hidrate fazları (hegzagonal C_2AH_8 ve C_4AH_{13}) üzerinde de tutunmaya eğilimlidir. Ancak, hegzagonal yapı üzerindeki tutunma hızı C_3A üzerindeki göre çok düşüktür.

Katkının çimento taneleri üzerinde tutunma özelliği, çimentonun alkali içeriğinden önemli ölçüde etkilenir. Çimentodaki alkalilerin, suda çözünebilen olması veya ana bileşenlere bağlı olması farklı etkiler yaratabilir (Ramyar, 2007).

c. Süper akışkanlaştırıcının karışıma eklenme zamanı

Katkının, karışım suyundan birkaç dakika sonra betona ilave edilmesi, çimento tanelerini dağıtma yeteneğini artırır. Bu süre içinde çimentonun reaktif bileşenleri üzerini ince bir hidrat tabakası kaplar. Böylece, süper akışkanlaştırıcı moleküllerinin reaktif bileşenler tarafından tutunma oranı azalır. Ortamda kalan katkı molekülleri, C_3S ve C_2S üzerine tutunarak bu bileşenlerin etkili bir şekilde dağılmasını sağlar.

Süper akışkanlaştırıcının en uygun ekleme zamanının su ve çimentonun temasından 10-15 dakika sonra olduğu, bu sürenin çimento ve katkı tipinden bağımsız olduğu belirtilmiştir. Katkının karışım suyu ile beraber eklenmesi durumunda C_3S üzerinde tutunan katkı tabakası kalınlığının 50 nm, C_3A ve C_4AF üzerindeki tabakanın ise 300 nm civarında olduğu söylenmiştir. Katkının gecikmeli eklenmesi durumunda tüm fazlar üzerindeki kalınlığı yaklaşık 20 nm değerine düştüğü görülmüştür. Katkının gecikmeli olarak eklenmesi, çökme kaybı miktarını ve oluşma zamanını da etkileyebileceği bildirilmiştir (Ramyar, 2007).

d. Sıcaklık etkisi

Genel olarak sıcaklığın artması, karışımın akışkanlığını azaltır ve çökme kaybını artırır. Bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Sıcaklık artışı, süper akışkanlaştırıcı katkının tutunma oranını arttırdığından akışkanlıkta artma sağlayabilir. Fakat sıcaklığın artışıyla tutunma oranının artmasının tutarlı bir sonuç olmadığı diğer araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Ramyar, 2007).

2.6. Beton Harcının Mikroyapısal Özellikleri

Katılaşmış çimento hamurunun mikroyapısı beton performansı açısından önemlidir. Beton davranış özelliklerinin ve servis ömrünü tahmini mikroyapısal özellikler ile ilişkilidir.

Katılaşmış çimento hamuru çeşitli türdeki katılar, farklı boyutta ve şekildeki gözenekler ve sudan oluşan yüksek heterojen bir sistemdir. Katı hacminin büyük bir bölümünü, başlıca hidratasyon ürünü zayıf kristal yapıda çeşitli kompozisyonlarda ve morfolojide bulunan C-S-H jeli oluşturur. Diğer önemli hidratasyon ürünü ise kristal ve saf yapıdaki kalsiyum hidroksit (CH)'dir. Bunların yanında yapıda daha az miktarda genellikle kristal yapıda ve morfoloji ve boyut açısından çeşitlilik gösteren etrenjit ve monosülfat fazları (AFt ve AFm) bulunmaktadır. Katı hacminin diğer kısmını ise su/çimento oranına ve yaşa göre hidrate olmamış çimento taneleri oluşturmaktadır.

Gözenekler katılaşmış çimento hamurunun önemli bileşenleridir. İki tip gözenek tanımlanır. İlki, 10 nm'den küçük C-S-H jelinin yapısında bulunan gözenekler, diğer tip gözenek ise 10 nm ile 10 µm arasındaki büyük kapiler boşluklardır.

Bu gözenekleri hidratasyon ürünleri ya da hidratasyon sonucu arta kalan çimento tanelerinin dolduramadığı su dolu boşlukların oluşturduğu düşünülmektedir. Bunun yanında istenmeyen ya da kasten sürüklenen hava ve betonun iyi yerleştirilemediğinden kaynaklanan oluşan büyük boşluklar oluşabilmektedir. Toplam gözenek hacmi su/çimento oranına, hidratasyon derecesine, kür koşullarına ve katkı ile etkileşime bağlıdır (Wang 1995).

2.6.1. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazı

Hidratasyonunu tamamlamış çimento hamurunda C-S-H jelleri, %50-60 katı hacmi ile sistemdeki en büyük hacmi kapsayan fraksiyondur. C-S-H fazı betona bağlayıcılık özelliği sağladığı için betondaki en önemli fazdır. Van der Waals kuvvetleri etkisiyle dayanım artar. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) C-S-H fazının morfolojisi ve kimyasal özelliklerini karakterize etmede son derece yaygındır. C-S-H fazı normal sıcaklıklarda jel yapısına sahip olup yüksek sıcaklıklarda zayıf kristal yapıya dönüşür. Normal sıcaklıkta SEM analizinde C-S-H fazı lifli yapıdan ağsı yapıya kadar çeşitli şekillerde bulunabilmektedir. C-S-H fazındaki molar olarak kalsiyumun silisyuma oranı, su/çimento oranına ya da mineral katkı varlığına bağlı olarak değişebilir (Ramachandran, 1996b) ; (Kılınç, 2010).

2.6.2. Kalsiyum hidroksit (CH) fazı

Kalsiyum hidroksit kristalleri genel olarak düz hekzagonal kristaller veya büyük ince uzamış kristaller olarak görülmektedir. CH oranı hacimsel olarak katı hacminin %20-25 oranında yer almaktadır (Ramachandran, 1996b).

2.6.3. Kalsiyum sülfoalüminat hidratlar (Etrenjit ve monosülfat fazları)

Etrenjit (AFm) ve monosülfat (AFt) kalsiyum sülfoalüminat hidrat fazını oluşturan bileşiklerdir. Etrenjit erken hidratasyonda boş alanlarda oluşan iğnemsî yapılardır. Etrenjit kristalleri suyu emer ve genişlerken bozulmaya neden olur. Monosülfatlar ise hekzagonal yapılı yassı kristallerdir. Erken oluşan monosülfat demetler içinde hekzagonal levha halinde büyüyerek gelişir. AFt ve AFm fazları, diğerlerine kıyasla çimento hamurunda daha düşük miktarda bulunan bileşenlerdir ve çimento hamuru hacminin %5'ini geçmemektedir (Ramachandran, 1996b).

2.6.4. Tamamen hidrate olmayan imento partikülleri

Bu partiküller karışım suyunun büyük bir kısmını emebilir ve bunun sonucunda su/imento oranında farklılıklar meydana gelebilir. Heterojen bir gözenek yapısı oluşturur. Su/imento oranına bağlı olarak hidrate olmamış imento tanecikleri miktar olarak toplam hacmin %5 ile %20 aralığındaadır (Ramachandran, 1996b).

3. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Süper akışkanlaştırıcı kullanım amacı, taze betonun reolojik özelliklerinde gelişim sağlamaktır. Puertas ve ark. polikarboksilat esaslı katkının (PC) Portland çimento hamurunun mekanik, minerolojik, mikroyapısal ve reolojik davranışlarına etkisi çalışmasını yürütmüşlerdir. Polikarboksilat esaslı katkının çimento hidratasyon reaksiyonlarını geciktirdiğini belirlemişlerdir. PC katkıları, beton yapısı ve kompozisyonunda oluşan C-S-H jelinde değişiklikler meydana gelmiştir. %1 oranında eklenen PC daha güçlü silikat köprüsü oluşumuna sebep olmuştur. Elektron mikroskobu ile katkı kullanımının çimento hamurunda poroziteyi azaltan mikroyapısal değişikliklere neden olduğu tespit edilirken, 2 veya 28 günlük mekanik mukavemette değişiklik gözlenmemiştir. Yapılan XRD ve FTIR analizlerinde PC katkı kullanımının minerolojik modifikasyonlara sebep olmadığı görülmüştür. Reolojik olarak değerlendirildiğinde az miktarda katkı kullanımı ile akma geriliminde %70 oranında kaydadeğer bir düşüş gözlenmiştir (Puertas ve ark., 2005).

Tkaczewska ve ark. farklı tipte süper akışkanlaştırıcıların uçucu kül katkılı çimento özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Sülfonlu melamin formaldehit (SMF), sülfonlu naftalin formaldehit (SNF), polikarboksilat (PC) ve polikarboksilat eter (PCE) bazlı süper akışkanlaştırıcıların su azaltma, hidratasyon ısısı, priz süresi ve basınç dayanımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. İşlenebilirlik aynı kalmak koşuluyla beton harcı bünyesinde %46 su azaltma oranı ile en etkili su azaltıcı katkının PCE olduğu görülmüştür. Yeni nesil PCE ve PC katkı kullanımı SMF ve SNF'ye göre, hidratasyon ısını daha az düşürdüğü, priz süresini daha az uzattığı ve mekanik özellikleri daha fazla arttırdığı belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkıların düşük su/çimento oranındaki çimento hamurunun kıvamını iyileştirdiği gözlenmiştir (Tkaczewska, 2014).

Şahmaran ve ark. çeşitli mineral ve kimyasal katkıların kendiliğinden yerleşen beton üretimine etkisini araştırmışlardır. Taze çimento harcının işlenebilirliğini mini çökme testi ile belirlemişlerdir. Kullanılan uçucu kül ve kalker tozu mineral katkılarının işlenebilirliği önemli derecede arttırdığı gözlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen harcın işlenebilirliğinin çoğunlukla

kullanılan süper akışkanlaştırıcı tipine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. İşlenebilirliği arttırmada, modifiye edilmiş polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcıların kullanımı polikarboksilik eter ve melamin formaldehit gibi süper akışkanlaştırıcılara göre daha iyi sonuç elde edildiği bulunmuştur (Şahmaran ve ark., 2006).

Süper akışkanlaştırıcılar çimento hidratasyonunu etkilemektedir. Mollah ve ark. polimerik sodyum lignosülfat bazlı süper akışkanlaştırıcının (SP) Portland çimentosu hidratasyonuna etkisini XRD ve FTIR teknikleriyle incelemişlerdir. Polimerik sodyum lignosülfat süper akışkanlaştırıcısı hidrate olan çimento partikülleri ile etkileşerek hidratasyon reaksiyonlarını etkilemekte ve hidratasyonu yavaşlatmaktadır. Yapılan çalışmalar orto silikat (SiO_4^{4-}) anyonlarının düşük polimerizasyon derecesi belirlenip Ca(OH)_2 oluşumunu azalttığını göstermiştir (Mollah ve ark., 1995).

Yeni nesil polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılar polinaftalin akışkanlaştırıcılara göre betonun taze hal ve reolojik özelliklerini iyileştirme açısından çok daha etkilidir. Costas iki farklı süper akışkanlaştırıcının reolojik ve mukavemet özellikleri araştırmasını yürütmüştür. Polikarboksilat süper akışkanlaştırıcı (PCE) ile polinaftalin süper akışkanlaştırıcıyı (SNF) karşılaştırılarak katkıların reolojik özellikler, mekanik mukavemet, çimento hamurunda terleme ve priz süresi üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneyler farklı süper akışkanlaştırıcı dozlarında elde edilen çimento harcı ile 0,33, 0,4 ve 0,5 su/çimento oranında yapılmıştır. PCE'nin güçlü geciktirici etkisinden dolayı priz süresinde uzamaya sebep olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda, PCE'li harç SNF ile karşılaştırıldığında PCE'li harcın daha yüksek viskozite, daha fazla terleme miktarı ve uzun priz süresine sahip olduğu gözlenmiştir. 0,5 su/çimento oranında %1 PCE katkılı çimento harcında en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. PCE katkılı harçlarda SNF katkılı harçlara göre daha yüksek 3, 7 ve 28 günlük mukavemet gözlenirken, 0,4 ve 0,5 su/çimento oranına sahip harçlarda akma geriliminin düştüğü gözlenmiştir (Anagnostopoulos, 2014).

Süper akışkanlaştırıcılar akışkanlığı arttırarak ve çimento ürünlerinin su ihtiyacını azaltarak çimento davranışını iyileştirir. Prados ve ark. yüksek poroziteye sahip uçucu kül katkılı çimento ile sıvı polikarboksilat (LPC) ve katı

polikarboksilat (SPC) süper akışkanlaştırıcı arasındaki etkileşimi analiz etmişlerdir. SPC katkılı çimento harçlarının LPC katkılı ve katkı kullanılmayan harçlara göre daha yoğun bir yapıda olmasıyla daha yüksek basınç dayanımına ve daha düşük absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu gözlemişlerdir. İki süper akışkanlaştırıcının (SP) kullanımı su ihtiyacını azaltmıştır ve harcın akışkanlığını arttırmıştır. SP oranı arttıkça yayılma oranı da artmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen kompakt yapı ile farklı oranlarda kullanılan SPC'nin basınç dayanımını etkilediği belirlenmiştir (Prados ve ark., 2013).

Polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı (PCA) katkıların çimento hidratasyonunu kontrol eden katkılar ile birlikte kullanım etkinliğini belirlemek için Felekoğlu ve Sarıkahya geniş bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Kıvam kaybı olmadan priz hızlandırma ve yüksek erken dayanım elde etmede en etkili kombinasyon %1,8 PCA ve %1,6 oranında nitrit ve nitrat tuzlarının kullanımı ile elde edilmiştir. PCA katkısı kullanımında en yüksek basınç dayanımı %1,2 katkı oranında gözlenmiştir (Felekoğlu ve Sarıkahya, 2008).

Fiat ve ark. polimerik süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımının, katkı kullanılmayan standart beton ile karşılaştırılmasıyla betonun fiziksel ve mekanik karakteristiğine olan etkisini açıklayıcı bir çalışma yapmışlardır. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcı olan polikarboksilat eter akışkanlaştırıcısı ile %40 oranında su kesme elde edilmiştir. Aynı dozda çimento harcına eklenen polikarboksilat eter ile modifiye edilmiş polikarboksilat karşılaştırıldığında, polikarboksilat eter eklenen harcın daha akışkan olduğu görülmüştür. Kullanılan Na-lignosülfat, naftalin sülfonat akışkanlaştırıcıların %1 olan maksimum dozajına kadar basınç dayanımı artarken daha yüksek oranlarda bu değer azaldığı görülmüştür. Basınç dayanımı katkı kullanılmayan standart betona göre iki kat artmıştır. Çimento ilavesi olmadan katkı kullanımıyla beton sınıfı C16/20' den C40/50'ye yükselmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kendiliğinden yerleşen beton elde etmedeki en etkili akışkanlaştırıcının polikarboksilat eter olduğunu vurgulamışlardır (Fiat ve ark., 2012).

Süper akışkanlaştırıcının molekül ağırlığı çimento yüzeyindeki adsorpsiyonu etkilemektedir. Andersen ve Roy yaptıkları çalışmada dört farklı moleküler ağırlıktaki (4000, 16,000, 31,000 ve 70,000 g/mol) süper

akışkanlaştırıcı çimento katkısı kullanarak molekül ağırlığının süper akışkanlaştırıcıların performansına etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek molekül ağırlığına sahip süper akışkanlaştırıcı en yüksek negatif zeta potansiyeli ve çimento taneleri arasında topaklanmayı önleyici özellik göstermiştir (Andersen ve Roy, 1988).

Süper akışkanlaştırıcılardaki yan zincirin yapısının ve uzunluğunun önemi büyüktür. Mardani-Aghabaglou ve ark. yaptığı bir araştırmada farklı tipteki süper akışkanlaştırıcıların kendiliğinden yerleşen beton üzerindeki taze özellikleri, reolojik ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Aynı polimer yapısına ve ana zincire sahip fakat farklı yan zincir yoğunluğuna sahip karboksilik asit grupları kullanılmıştır. Taze beton özellikleri V hunisi, L kutusu, çökme testi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kendiliğinden yerleşen betonunun V hunisi akış süresi, plastik viskozitesi ve çökme tutulumu polimerin yan zincir yoğunluğuna bağlı olarak oldukça değiştiği gözlenmiştir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı çeşitlerinin dayanım özelliklerini az oranda etkilediği görülmüştür. (Mardani-Aghabaglou ve ark., 2013).

Ma ve ark. polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı katkı (PCS) ile sülfaloüminat belit çimentosunun priz süresi ve hidrasyon özellikleri arasındaki uyumunu incelemişlerdir. Priz süresinin PCS kullanımı ile ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. PCS 1 günlük basınç dayanımını azaltırken, 28 günlük basınç dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. PCS'nin 28 günlük çimento hamurundaki makro gözeneklerin mikro gözeneklere dönüşerek gözenek morfolojisini düzenlediğini gözlemlemişlerdir (Ma ve ark., 2014).

Ran ve ark. kopolimer seyrelticilerin (dağıtıcıların) yan zincir uzunluğunun çimento tanelerini seyreltme gücünü etkilediğini belirten çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre dağıtıcı etki, adsorplanan yan zincir yoğunluğuyla arttığı için uzun yan zincire sahip polimerlerin kısa zincirlere göre çimento tanelerini daha güçlü dağıtıcı etkisine sahip olduğunu görmüşlerdir (Ran ve ark., 2009).

Beton karışımında kullanılacak olan süper akışkanlaştırıcının çimento ile uyumlu olması gerekmektedir. Alonso ve ark. farklı yapıdaki polikarboksilat esaslı katkıları ile katkılı ve katkısız çimentoların uyumunu, çimento pastasını

reolojik açıdan ve erken yaşlardaki hidrasyon reaksiyonlarındaki değişimlerle araştırmayı amaçlamışlardır. Adsorpsiyon eğrileri sonucunda katkı içinde yüksek oranda bulunan karboksilat grupları çimento hamuruna daha yoğun şekilde adsorbe olmuştur. Polikarboksilat dozajı artırıldığında çimento hidrasyonundaki gecikmenin arttığı gözlenmiştir. Kullanılan poliakrilat asit türevi tüm katkıların kullanımı ile toplam reaksiyon ısısının arttığı görülmüştür. Katkıların çimento hamurunda oluşan topakları ayırıp tutulmuş suyun serbest kalmasını sağlayarak hidrasyonu arttırabildiğini belirlemişlerdir (Alonso ve ark., 2013).

Çimentonun spesifik yüzey alanı, C_3A , Na_2O_e ve SO_3 içeriği polietir ve polikarboksilat asit süper akışkanlaştırıcı performansında etkilidir. Golaszewski'nin gerçekleştirdiği çalışmada çimentonun spesifik alanı, C_3A , Na_2O_e , SO_3 ve içeriği arttıkça süper akışkanlaştırıcı performansının azaldığı görülmüştür. Çimentonun C_3A içeriği arttıkça karışımın kayma gerilimi artarken plastik viskozite değeri düşmüştür. Elde edilen sonuçların çimento karışımlarının işlenebilirliğinin kontrolü ve karışım dizaynı için kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermiştir (Golaszewski, 2012).

Reese ve ark. iyi kalitede yapışkan bağ elde etmek için süper akışkanlaştırıcıların gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Süper akışkanlaştırıcıların, çimento partiküllerini dağıtarak parçacıkların geçiş bölgesine girmesini sağladığını ve bölgeyi mineralize ettiğini göstermişlerdir. Adhezyon bağının yüzey gerilimini etkilediği ve C_3A içeriğinin taze çimentoda etrenjit oluşumunda etkili olduğu için önemli olduğunu belirlemişlerdir (Reese ve ark., 2013).

4. SERTLEŞMİŞ BETON NUMUNELERİNİN YAPISAL ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1. X Işınları Kırınımı (XRD)

Kristal yapıdaki bir malzemenin atomik yapısının incelenmesinde X ışınları kırınımı (XRD) önemli bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntemle metallerin, polimer maddelerin ve diğer katıların fiziksel özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. XRD analiz metodu, analiz sırasında numuneye zarar vermez ve çok az miktardaki sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki numunelerinde analizlerinin yapılmasını sağlayan bir metoddur. Toz difraksiyon yöntemi maddedeki fazların belirlenmesi için uygundur.

Toz difraksiyon yöntemiyle katı madde çok ince toz haline getirilir ve monokromatik X-ışınları demeti içine konulur. X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, ışınlar katı yüzeyinden küçük geliş açılarıyla tam yansımaya uğrayarak ışınlar kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristal yapıdaki saçılımlara kırınım adı verilir. Kırınım çok sayıda atomu içeren saçılmalardan meydana gelir. X-ışınlarının kristal yapıda kırınımı Bragg eşitliğini sağlamalıdır. Bragg kanunu Eşitlik 4.1’de verilmiş ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir (Arslan, 2010) ; (Gülcan, 2012).

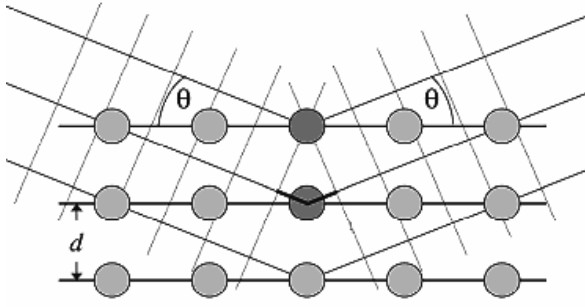
$$n\lambda=2d\sin\theta \quad (4.1)$$

n : Yansıma mertebesi

λ : Dalga boyu

d : Düzlem aralığı

θ : Işınlara geliş açısı

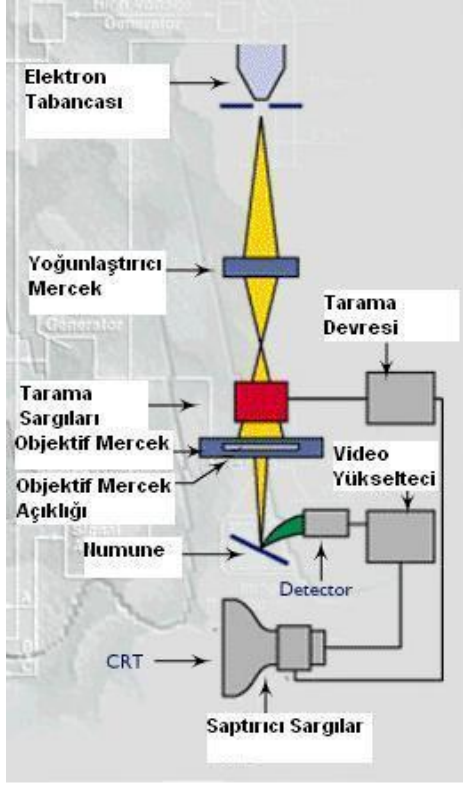


Şekil 4.1. Bir kristalde X-ışını kırınımı

4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlarla katı numune yüzeyinin taranması ile yüzey topografisi, bileşimi ve elektriksel iletkenliği gibi özellikleri hakkında bilgiler elde edilir. Elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılması ile görüntü elde edilir. Ayırım gücü, odak derinliği, görüntü ve analizi birleştirebilme, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişleten özelliklerdir.

Taramalı Elektron Mikroskobunu, optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel bölüm oluşturur. Optik kolon kısmında; elektron tabancası, anot plakası, manyetik mercekler ve tarama bobinleri bulunur. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa vakum sistemi içinde tutulmaktadır. Elektron demetinin numune yüzeyine ulaşabilmesi için ortam vakumlanmalıdır. Elektronlar 0,5 keV – 40 keV enerji ile elektron tabancasından çıkar ve anot plakasından yüksek gerilim uygulanarak hızlandırılırlar. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, sinyal çoğaltıcılar ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler yer almaktadır.



Şekil 4.2. Taramalı elektron mikroskobu

Numune üzerine odaklanan elektron demeti, numune atomları ile ayrıca elastik girişimlerde de bulunabilir. Bu girişimlerde demet elektronları, numune atomlarının çekirdeğinin çekim kuvveti ile sapıtılarak numune yüzeyinden geri saçılmaktadır. Bu elektronlar geri saçılmış elektronlar olarak tanımlanır. Geri saçılmış elektron dedektörleri tarafından toplanan elektron miktarı, numunenin atom numarasıyla orantılıdır. Bu nedenle geri saçılmış elektron görüntüsü özellikle çok fazlı sistemlerde atom numarası farkından dolayı zıtlık içeren bileşim görüntüsüdür. Geri saçılmış elektronlar, ikincil elektronlara göre numune yüzeyinin daha derin bölgesinden geldiği için görüntünün ayırım gücü düşüktür. Bu nedenle geri saçılmış elektron görüntüleri en fazla 2000 büyötmeye kadar olan yüzey analizlerinde kullanılırlar (Anonim, 2014) ; (Gölcan, 2012).

4.3. Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), endüstride yaygın olarak kullanılan titreşim spektroskopisidir. FTIR kimyasal yapı ve fiziksel nitelikler hakkında kalitatif (parmakizi), kantitatif ve yarı kantitatif bilgiler sağlar. Katı, sıvı veya gaz örnekleri yığın ya da ince film formunda analiz edilir (Nasrazadani ve ark., 2010).

İnfrared spektroskopisi organik, inorganik ve biyolojik yapıların tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan analitik bir tekniktir. IR spektroskopisi, numune moleküllerinin titreşim hareketleri ile ışığın absorblanması mantığına dayanır. IR ölçümleri geçirgenlik veya reflektans olarak yapılabilmektedir. Geçirgenlik daha yaygındır. IR ışığının 0,78-1000 μm ($12500-10\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı) dalga boyunda olan aralığı; yakın ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$), orta ($4000-100\text{ cm}^{-1}$) ve uzak ($100-10\text{ cm}^{-1}$) infrared olarak üç bölüme ayrılır. Yakın ve orta IR bölgeleri en yaygın kullanılan kısımlardır.

İnfrared (IR) spektroskopisi yapıdaki farklı fonksiyonel grupların varlığını belirlemede kullanılan spektroskopik bir yöntemdir. Bu yöntem, moleküllerin ya da atomların elektromanyetik ışınla etkileşmesini temel alır.

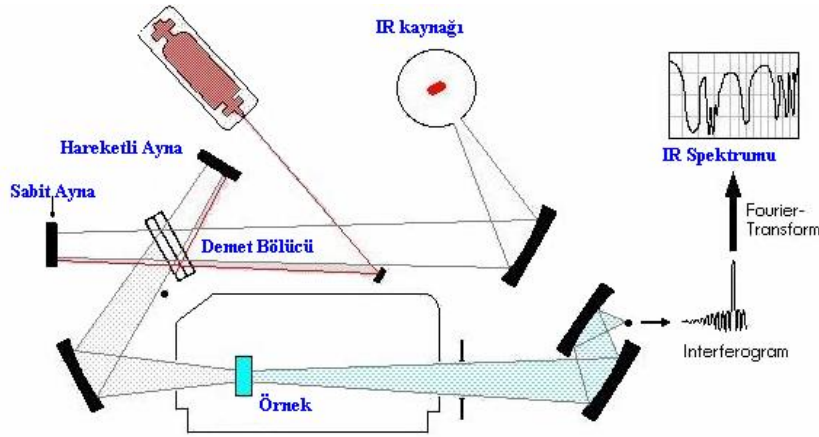
Moleküller değişik şekilde titreşebilir. Kovalent bağla bağlı iki atom, bir yayla bağlı varsayılan atomların ileri geri hareketlerinde olduğu gibi, gerilme titreşimi yapar.

Bir moleküldeki titreşimler ikiye ayrılır

1. Gerilme titreşimleri : Bağı iki yanındaki atomların arasındaki uzaklığın sürekli değişmesidir.
 - Simetrik gerilme; atomların aynı anda birbirinden uzaklaşıp yakınlaştığı gerilmedir.
 - Asimetrik gerilme; iki yandaki bağlardan birinin birisinin uzarken birinin kısaldığı ya da bunun tam tersinin olduğu gerilmedir.
2. Eğilme titreşimleri : İki bağ arasındaki açının değişmesidir.
 - Düzlem içi açı bükülme (Kesilme, bükülme)
 - Düzlem dışı açı bükülme (Sallanma, burulma)

Bileşiklerin IR spektrumlarının alınması maddenin formuna, gaz, sıvı, katı halinde olmasına göre çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Katı örneklerin spektrumunu almak için kullanılan üç yöntem (i) KBr peleti hazırlanması, (ii) pasta hazırlanması ve (iii) NaCl diski üzerine katı filmi oluşturulmasıdır. En iyi katı örnek hazırlamak için 0,5-1 mg katı numune ve 100-200 mg nemi alınmış KBr ile karıştırılarak agat havanda ince toz elde edilir. Karışım hidrolik pres ile 4500 kg/cm^2 'lik bir basınç altında birkaç dakika bekletilerek yaklaşık kütlece %0,1-0,2 KBr içeren pellet oluşturulur. Elde edilen pellet cihaza yerleştirilerek IR spektrumu alınır.

FTIR cihazlarını IR cihazlarından ayıran, monokromatörün kullanılmayıp ışık kaynağından gelen tüm frekansların numune ile aynı anda etkileşmesidir. Bu frekansları kapsayan bilgilerin zamanla değişimi izlenmesiyle spektrum frekans ölçeği yerine zaman ölçeğinde oluşur. Zaman ölçeğinde bilgilerin elde edilmesiyle, absorpsiyon spektrumunun inferogram adı verilen fourier transformu elde edilir (Turhan, 2008).



Şekil 4.3. FT-IR spektrometresi şeması

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada farklı süper akışkanlaştırıcıların ve süper akışkanlaştırıcı dozajlarının elde edilen çimento harçlarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çimento harcı üretiminde dört farklı süper akışkanlaştırıcı katkı, dört farklı katkı oranı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada sırasıyla çimento harç numunelerinin üretilmesi, işlenebilirlik testi, numunelerin kür edilmesi, basınç dayanımı testi, XRD, FTIR ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Çimento harcı üretiminde, ince agrega olarak kum, CEM II 42,5, Portland çimentosu, kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı ve saf su kullanılmıştır.

5.1.1. Çimento

Portland çimentosu olarak Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası T.A.Ş.'den temin edilen TS EN 197-1 standardına uygun uçucu kül katkılı CEM II 42,5 dökme çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal analizi Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü XRD Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Çimentonun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu

Oksit	% (Ağırlıkça)
SiO ₂	22,65
Al ₂ O ₃	7,55
Fe ₂ O ₃	3,51
CaO	56,70
MgO	1,19
SO ₃	3,49
Na ₂ O	0,49
K ₂ O	1,09

5.1.2. Kum

Harç üretiminde ince agrega olarak CEN referans kumu kullanılmıştır. CEN Referans Kumu, yuvarlak taneciklerden meydana gelen, silisyum dioksit oranı en az %98 olan doğal silisli kumdur. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 5.2'deki gibidir (TS EN 196-1, 2009).

Çizelge 5.2. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elekte kalan yığılmı (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

5.1.3. Kimyasal katkı

Deneylerde kullanılan kimyasal katkıları, farklı üreticilerinden temin edilen, TS EN 934-2'de belirtilen özelliklere sahip dört farklı polikarboksilat bazlı su azaltıcı (süper akışkanlaştırıcı) beton katkılarıdır. Süper akışkanlaştırıcılar harç suyuna katılarak kullanılmıştır (TS EN 934-2, 2013).

5.2. Deney Yöntemleri

5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Çimento harcı, kütlece bir kısım çimento (450 ± 2 g), üç kısım CEN Standard Kumu (1350 ± 5 g) ve yarım kısım su (225 ± 1 g) (su/çimento oranı 0,50) oranları kullanılarak hazırlanmıştır (TS EN 196-1, 2009). Sabit su/çimento oranında katkısız (şahit) çimento harcı ve kütlece % 0,8, 1, 1,2 ve 1,5 oranlarında ilave edilen süper akışkanlaştırıcı katkıları ile numuneler hazırlanmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında üretilen çimento harç karışımları 50 dm^3 kapasiteli laboratuvar tipi mikser ile TS EN 196-1 ve ASTM C305’de belirtilen şekilde oluşturulmuştur. Her bir harç harmanı, karıştırıcı ile mekanik olarak karıştırılmıştır. Su ve çimento birbiriyle temas eder etmez karıştırıcı düşük hızla (140 ± 5 r/dk) çalıştırılmaya başlanmıştır. Katkı karışım suyunun 1/3’lük kısmına karıştırarak kullanılmıştır. 30 saniyelik karıştırmanın ardından, kumun tamamı 30 saniye içinde kaba ilave edilmiştir. Karıştırıcı yüksek hıza (285 ± 10 r/dk) getirilmiş ve karıştırmaya bu hızda 30 saniye daha devam edilmiştir. Karıştırıcı durdurulduktan sonra 90 saniye beklenmiştir. Bu sürenin ilk 30 saniyelik kısmında, kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç lastik veya plastik bir sıyrıcı ile sıyrılıp kabın ortasında toplanmıştır. Karıştırmaya 60 saniye daha yüksek hızda devam edilerek çimento harcı elde edilmiştir (TS EN 196-1, 2009) ; (ASTM C305-14, 2014).

Elde edilen çimento harcı $4 \times 4 \times 16$ cm prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir ve harç içinde kalan hava kabarcıklarının uzaklaşması sağlanmıştır. Kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra numuneler sökülerek geciktirilmeden, içerisinde ($20,0 \pm 1,0$) °C sıcaklıkta su bulunan kaba yatay olarak daldırılmış ve numuneler 7 ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Numunelerin katkı oranına ve süper akışkanlaştırıcı maddesine göre kodlanması Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Çimento harçlarının katkı oranına ve süper akışkanlaştırıcı maddesine göre kodlanması

Süper akışkanlaştırıcı Adı	Katkı Oranı (%)	Karışım (7 Günlük)	Karışım (28 Günlük)
	0	B7	B28
SA	0,8	SA1-7	SA1-28
	1	SA2-7	SA2-28
	1,2	SA3-7	SA3-28
	1,5	SA4-7	SA4-28
SB	0,8	SB1-7	SB1-28
	1	SB2-7	SB2-28
	1,2	SB3-7	SB3-28
	1,5	SB4-7	SB4-28
SC	0,8	SC1-7	SC1-28
	1	SC2-7	SC2-28
	1,2	SC3-7	SC3-28
	1,5	SC4-7	SC4-28
SD	0,8	SD1-7	SD1-28
	1	SD2-7	SD2-28
	1,2	SD3-7	SD3-28
	1,5	SD4-7	SD4-28

5.2.2. Yayılma testi

Taze çimento harcının işlenebilirliği sabit su/çimento oranında (0,5), TS EN 1015-3'te belirtilen yayılma tablası yöntemi ile belirlenmiştir. Standart şekil ve ölçüye sahip yayılma tablası ve kalıbı Şekil 5.1'de verilmiştir. Taze harç numunenin yayılma değeri, yayılan harç numunenin ortalama çapının ölçülmesiyle belirlenmiştir. Paslanmaz çelik veya prinçten, 60 mm $\pm$ 0,5 mm yükseklikte, alt yüz (taban) iç çapı 100 mm $\pm$ 0,5 mm ve üst yüz iç çapı 70 mm $\pm$ 0,5 mm olan kesik koni şekilli kalıp, yayılma tablasının dairesel levhası üzerine merkezlenerek yerleştirilirmiş ve harç, kalıp içerisine iki tabaka halinde her harç tabakasına tokmak ile harç yüzeyine düzgün şekilde dağılan en az 10 kısa vuruş yapılarak sıkıştırılmak suretiyle doldurulmuştur. Yaklaşık 15 saniye sonra, kalıp düşey olarak yukarıya doğru yavaşça çekilerek alınmış ve dairesel levha üzerinde kalan harç kütlesi, yayılma tablası yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere, sabit sıklıkta 15 defa düşürülerek levhaya yayılmıştır. Yayılan harç numunesinin birbirine dik doğrultuda iki çap değeri alınarak aritmetik ortalaması alınmıştır.

Harcın yayılma oranı Eşitlik 5.1'deki formül ile hesaplanır. Katkısız ve % 0,8, 1, 1,2 ve 1,5 katkı oranlarındaki dört farklı akışkanlaştırıcıyla hazırlanan harçlar ile yayılma testleri gerçekleştirilmiştir (TS EN 1015-3, 2000).

$$\text{Yayılma oranı (\%)} = (d-d_0) \times 100 / d_0 \quad (5.1)$$

d_0 : koninin alt yüz (taban) çapı

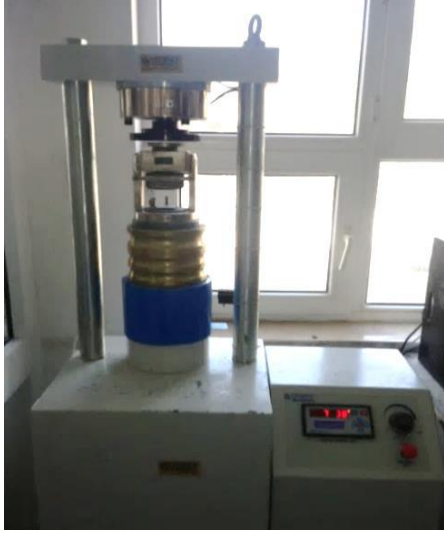
d : harcın son çapı



Şekil 5.1. Yayılma tablası

5.2.3. Basınç dayanımı testi

40x40x160 mm'lik standart prizmatik numunelerin basınç dayanımları 7 ve 28 günlük kür işleminin sonunda Şekil 5.2'deki UTEST marka beton test presi kullanılarak ölçülmüştür. Numunelerin yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna eksenini mesnet silindirlerine dik olarak yerleştirilmiştir. Yük, yükleme silindiri vasıtasıyla numunenin mesnetlere oturan yüzünün karşıt yüzüne düşey olarak uygulanmıştır ve (50 ± 10) N/s sabit hızla numune kırılıncaya kadar artırılmıştır. İki parçaya bölünen prizma şekilli numunenin her bir parçası TS EN 196-1'de belirtilen şekilde basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.2. Beton test presi

Parçaların her biri, yan yüzlerine yük uygulanmak suretiyle deneye tabi tutulmuştur. Prizma şekilli numune parçaları, parça eksenini ile cihazın eksenini arasında $\pm 0,5$ mm'den daha fazla sapma olmayacak ve parçanın boyuna yönde yükleme plakaları veya uzatma plakalarından çıkıntısı 10 mm kadar olacak şekilde yükleme plakaları arasına yatay konumda yerleştirilmiştir. Yük, tüm deney boyunca, prizma kırılıncaya kadar (2400 ± 200) N/s sabit hızla uygulanır. Basınç dayanımı R_c , megapaskal birimde aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır (TS EN 196-1, 2009):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (5.2)$$

R_c : Basınç dayanımı (gerilme), MPa,

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, N,

1600 : Yükleme plakaların veya uzatma plakalarının alanı ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), mm^2 .

5.2.4. Sertleşmiş betonun karakterizasyonu

Sertleşmiş betonun XRD analizi : Öğütülerek toz haline getirilen numunelerin mi yapısının belirlenmesi amacı ile Rigaku marka Rint 2200 model X-ışını kırınımı cihazı kullanılmıştır. Sertleşmiş beton harçlarının difraksiyonu, 2-80° dereceleri arasında 4°/dakika hızla, 40 kV ve 30 mA'de Cu-K α X-ışını kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Difraksiyon ardından, JADE yazılımı kullanılarak numunedeki faz eşleştirmeleri yapılmıştır.

Sertleşmiş betonun mikroyapısının taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi : Beton numunelerinin yüzey yapısının ve fazların gözlemlenmesi amacıyla SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri Zeiss Evo 50 VP mikroskobu ile alınmıştır. Görüntüler alınmadan önce örnekler karbon bant ile tutucuların üzerine yerleştirilmiş ve Agar marka kaplama cihazında altın ile kaplanmıştır.

Sertleşmiş betonun FT-IR spektrumu : Beton numunelerinin FT-IR analizleri Bruker Tensor 27 model FTIR cihazı ile KBr kullanılarak, 4000-400 cm⁻¹ çalışma aralığında gerçekleştirilmiştir. Her bir beton bünyeden yaklaşık 2 mg toz alınıp bir agat havan içerisinde 100 mg KBr ile karıştırılarak peletler hazırlanmıştır. Bu peletler 2 cm⁻¹ çözünürlükte, 64 adet tarama sayısı ile oda sıcaklığında analiz edilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN BULGULAR

Deneysel çalışmalarda elde edilen taze çimento harçlarının işlenebilirliği, prizmatik numuneler üzerinde standart basınç dayanımı testleri ve prizmatik numunelerden alınan örneklerin XRD, SEM ve FTIR analizleri yapılmıştır.

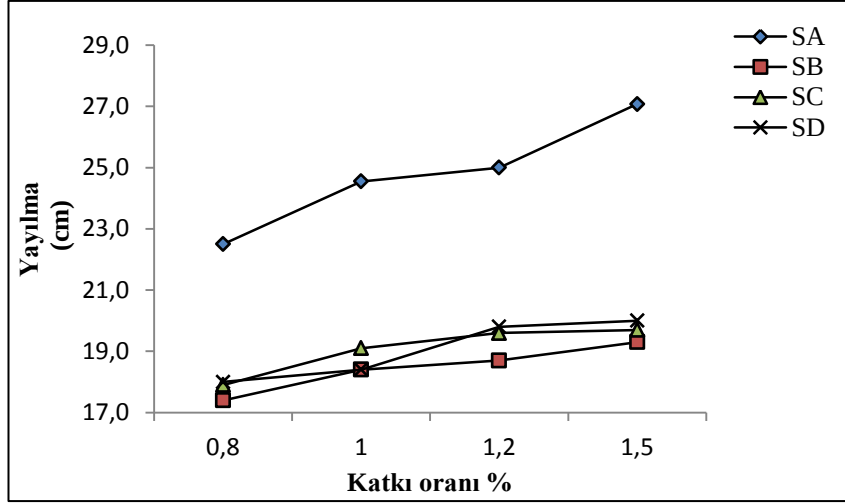
6.1. Yayılma Testi Sonuçları

Çimento harçlarının akıcılığı sabit su/çimento oranında yapılan yayılma testi ile ölçülmüştür. Yayılma testi sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre süper akışkanlaştırıcı kullanımı akıcılığı arttırmaktadır. Kullanılan tüm süper akışkanlaştırıcılar, katkısız hazırlanan çimento harcına göre yayılma oranını arttırmıştır.

Çizelge 6.1. Yayılma testi sonuçları

Karışım	d (cm)	Yayılma oranı (%)
Katkısız	15,0	50
SA1	22,5	125
SA2	24,6	146
SA3	25,0	150
SA4	27,1	171
SB1	17,4	74
SB2	18,4	84
SB3	18,7	87
SB4	19,3	93
SC1	17,9	79
SC2	19,1	91
SC3	19,6	96
SC4	19,7	97
SD1	18,0	80
SD2	18,4	84
SD3	19,8	98
SD4	20,0	100

Yayılma testi sonuçları incelendiğinde, yayılma oranının farklı katkıları kullandıkça değiştiği görülmektedir. En yüksek yayılma çapı 27,1 cm ile SA4 harcında, en düşük yayılma çapı ise 17,4 cm ile SB1 harcında görülmüştür.



Şekil 6.1. SA, SB, SC, SD katkılı harçların katkı oranı - yayılma grafiği

Şekil 6.1’de katkı oranı ile yayılma oranı arasındaki ilişki görülmektedir. Tüm harçlarda katkı oranı arttıkça yayılma oranının da arttığı gözlenmektedir. SB katkısı kullanılan tüm harçlarda en düşük yayılma oranı görülürken SA katkısı bütün katkı oranlarında en yüksek yayılma oranı gözlenmiştir. EFNARC kendiliğinden yerleşen harç kriterlerine göre 24,6 ve 25 cm yayılma çapına sahip SA2 ve SA3 harçları kendiliğinden yerleşen harç standardına uygundur. SA katkısı işlenebilirliği arttırmada en etkili katkıdır (EFNARC, 2002).

%1,5 katkılı SA4 harcı yayılma testi sonunda en yüksek yayılma oranı vermesine rağmen, çimento harcında katkı dozajı artışıyla su kusması gözlenerek bu suyun beton bünyesini ile ayrılması sonucu harcın homojenliğini kaybettiği belirlenmiştir.

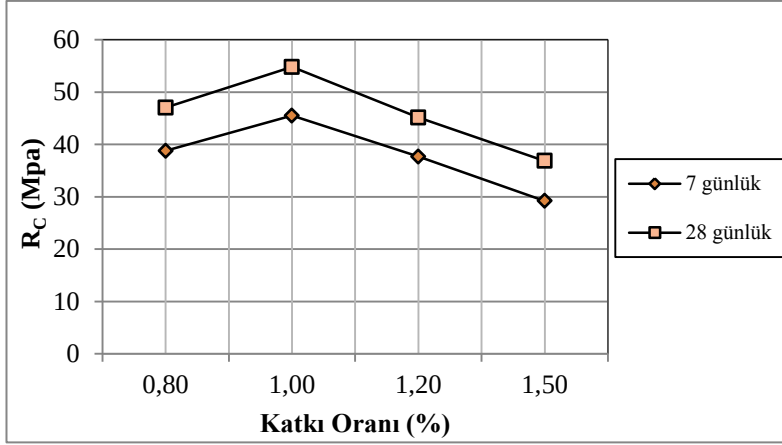
6.2. Basınç Dayanımı Testi Sonuçları

Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük 40x40x160 mm prizmatik numunelerin yük (F_c) ve basınç dayanımı (R_c) değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Değerler 6 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Katkı kullanımı, katkısız harca göre çimento harcının basınç dayanımını arttırmıştır. Katkı oranı artışıyla farklı yaşlardaki basınç dayanımında meydana gelen değişiklikler Şekil 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.2. Katkılı ve katkısız harç karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

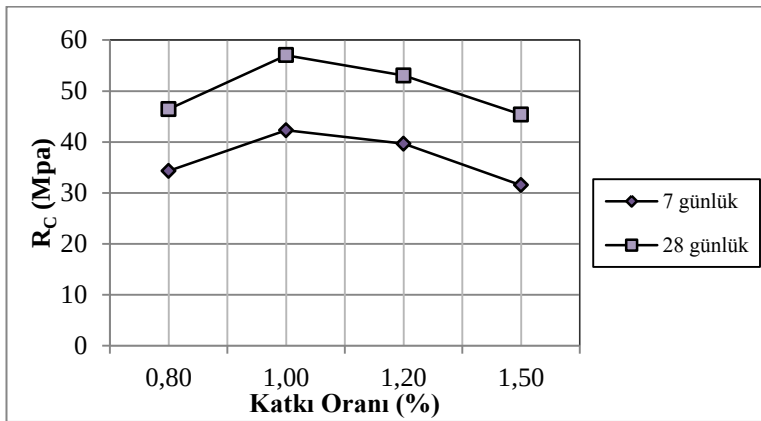
Karışım	Yük, F_c (N)	Basınç Dayanımı, R_c (MPa)	Karışım	Yük, F_c (N)	Basınç Dayanımı, R_c (MPa)
B7	44,62	27,89	B28	60,72	37,95
SA1-7	62,04	38,78	SA1-28	75,23	47,02
SA2-7	72,80	45,50	SA2-28	87,68	54,80
SA3-7	60,28	37,67	SA3-28	72,20	45,12
SA4-7	46,74	29,21	SA4-28	58,93	36,83
SB1-7	54,91	34,32	SB1-28	74,28	46,43
SB2-7	67,68	42,30	SB2-28	91,25	57,03
SB3-7	63,44	39,65	SB3-28	84,86	53,04
SB4-7	50,43	31,52	SB4-28	72,57	45,36
SC1-7	62,03	38,77	SC1-28	77,36	48,35
SC2-7	63,31	39,57	SC2-28	87,19	54,49
SC3-7	62,88	39,30	SC3-28	62,06	46,60
SC4-7	60,22	37,63	SC4-28	83,18	51,98
SD1-7	58,23	36,39	SD1-28	70,97	44,36
SD2-7	59,84	37,40	SD2-28	78,44	49,03
SD3-7	66,89	41,81	SD3-28	78,37	48,98
SD4-7	64,11	40,11	SD4-28	77,84	48,65

Şekil 6.2’de SA katkısı ile hazırlanan harcın artan katkı oranına göre R_c değerleri görülmektedir. %1 oranında katkı eklenen SA2-7 ve SA2-28 harçları 7 ve 28 günlük kür işlemi sonunda en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. SA süper akışkanlaştırıcısı 7 ve 28 günlük basınç dayanımını, katkısız harca göre sırasıyla %63 ve %44 oranında arttırmıştır. Katkı oranının %1’den %1,2’ye artışı 7 ve 28 günlük harçların basınç dayanımında %17’lik düşüş gözlenmiştir. Katkı oranının %1,2’den %1,5’e artışı 7 günlük dayanımda %22, 28 günlük dayanımda ise %18’lik bir düşüşe neden olmuştur. En düşük gerilme değeri her iki kür süresinde de %1,5 katkı oranında gözlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı oranı artışıyla dayanım kaybının sebebi beton harcında kuma gözlenmesi, suyun ayrılarak harcın homojenliğini kaybetmesi olarak düşünülmektedir.



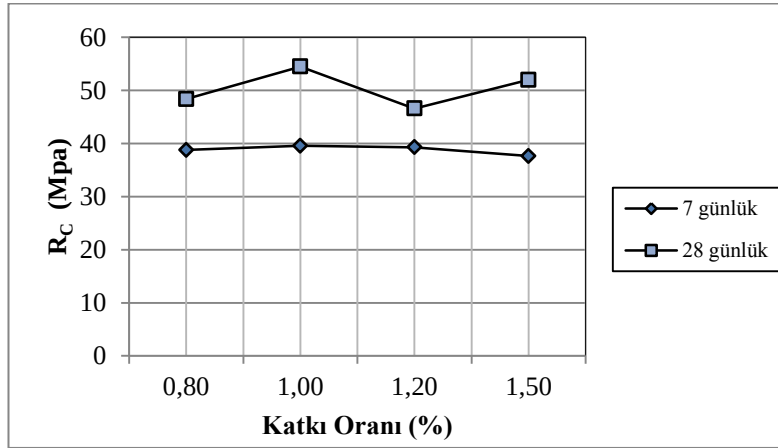
Şekil 6.2. SA katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 6.3'te SB katkısı ile hazırlanan harcın artan katkı oranına göre R_c değerleri görülmektedir. % 1 oranında katkı eklenen SB2-7 ve SB2-28 harçları 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının ikisinde de en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. SB süper akışkanlaştırıcısı 7 ve 28 günlük basınç dayanımını, katkısız harca göre sırasıyla %52 ve %50 oranında arttırmıştır. Katkı oranının %1'den %1,2'ye artışı 7 günlük dayanımda %6, 28 günlük dayanımda ise %7'lik bir düşüşe neden olmuştur. Katkı oranının %1,2'den %1,5'e artışı 7 günlük dayanımda %21, 28 günlük dayanımda ise %14'lük bir düşüşe neden olmuştur. En düşük dayanım her iki kür süresinde de %1,5 katkı oranında görülmüştür.



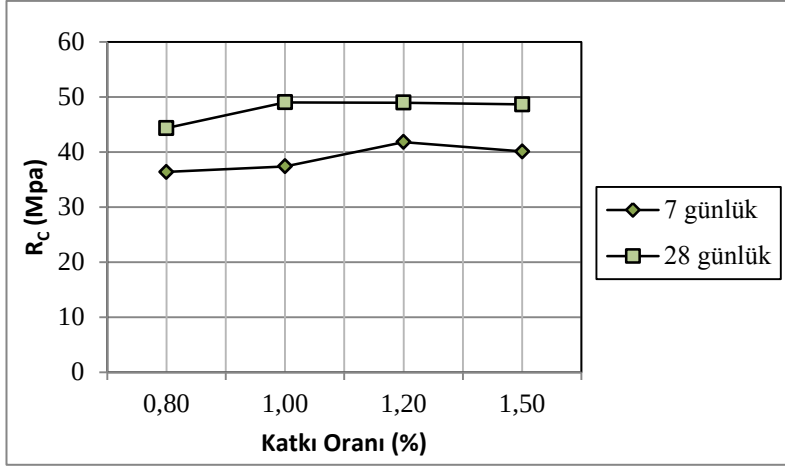
Şekil 6.3. SB katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 6.4'te SC katkısı ile hazırlanan harcın artan katkı oranına göre R_c değerleri görülmektedir. 7 günlük numunelerde katkı oranı artışı dayanımı fazla etkilememişken, 28 günlük numunelerde daha belirgin dayanım farklılıkları tespit edilmiştir. %1 oranında katkı eklenen SC2-7 ve SC2-28 harçları ile 7 ve 28 günlük kür süresinde en yüksek dayanım değeri elde edilmiştir. 7 günlük numunelerde %1 katkı oranından fazla değerlerde, katkı oranı arttıkça dayanımda az bir düşüş gözlenmiştir. 28 günlük numunelerde %1'den %1,2'ye artan katkı oranıyla birlikte basınç dayanımında %14'lük düşüş, %1,2'den %1,5'e artan katkı oranıyla basınç dayanımında %12'lik artış görülmüştür. En düşük gerilme değerleri; 7 günlük kür süresinde %1,5 katkılı SC4-7 numunesinde görülürken, 28 günlük kür süresinde %1,2 katkılı SC3-28 numunesinde görülmüştür.



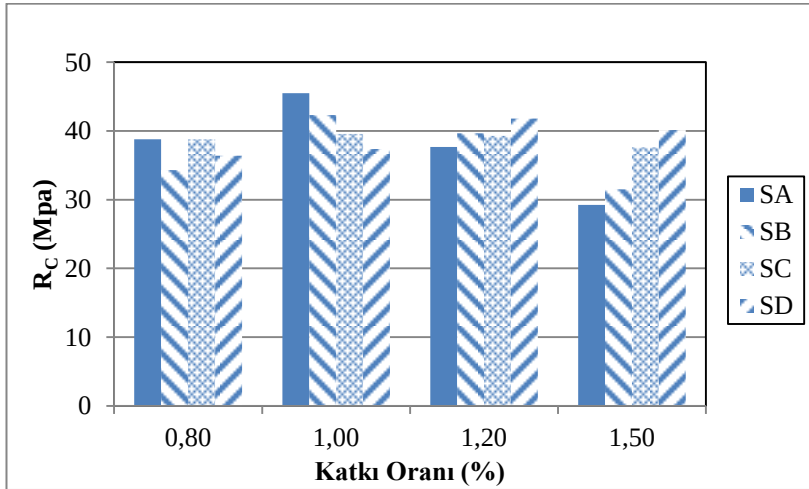
Şekil 6.4. SC katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 6.5'te SD katkısı ile hazırlanan harcın artan katkı oranına göre R_c değerleri görülmektedir. SD3-7 ve SD2-28 numunelerinin en yüksek gerilme değerine sahip olduğu belirlenmiştir. 28 günlük numunelerde %1 katkı oranından daha fazla katkı kullanımı basınç dayanımında kayda değer bir düşüş gözlenmemiştir. 7 ve 28 günlük numunelerin her ikisinde de %0,8 katkı oranı bulunan harç en düşük basınç dayanımına sahiptir.



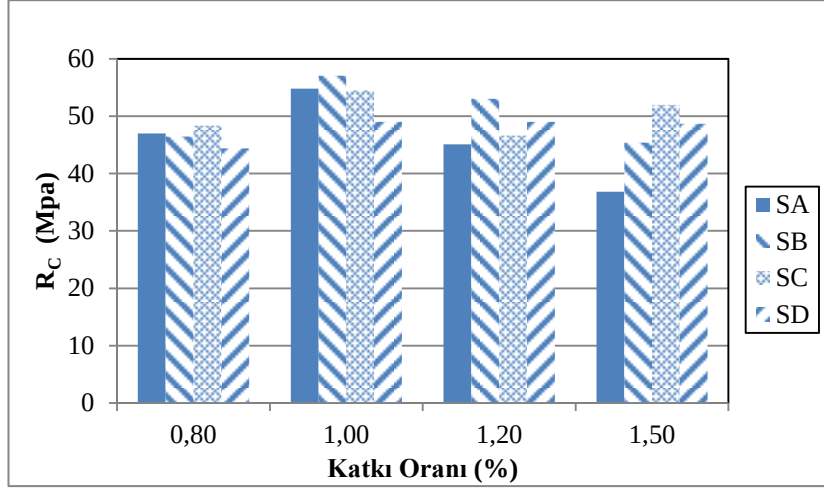
Şekil 6.5. SD katkı miktarı ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmada kullanılan tüm akışkanlaştırıcılar ile elde edilen harçların 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin (R_c) katkı oranları ile değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir. SA, SB ve SC katkıları için en yüksek basınç dayanımının kaydedildiği değer %1 katkı oranı olurken, SD katkısında bu değer %1,2 oranı olduğu belirlenmiştir. %1 katkı oranındaki basınç dayanımları katkılara göre kıyaslandığında dayanımı arttırmada en etkili katkının SA katkısı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Süper akışkanlaştırıcı katkı tipi ile 7 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

Tüm akışkanlaştırıcılar ile elde edilen harçların 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin (R_c) katkı oranları ile değişimi Şekil 6.7’da verilmiştir. En yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği en uygun katkı oranı tüm katkıları için %1’dir. Katkı oranındaki dayanımı arttırmada en etkili katkının SB katkısı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.7. Süper akışkanlaştırıcı katkı tipi ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

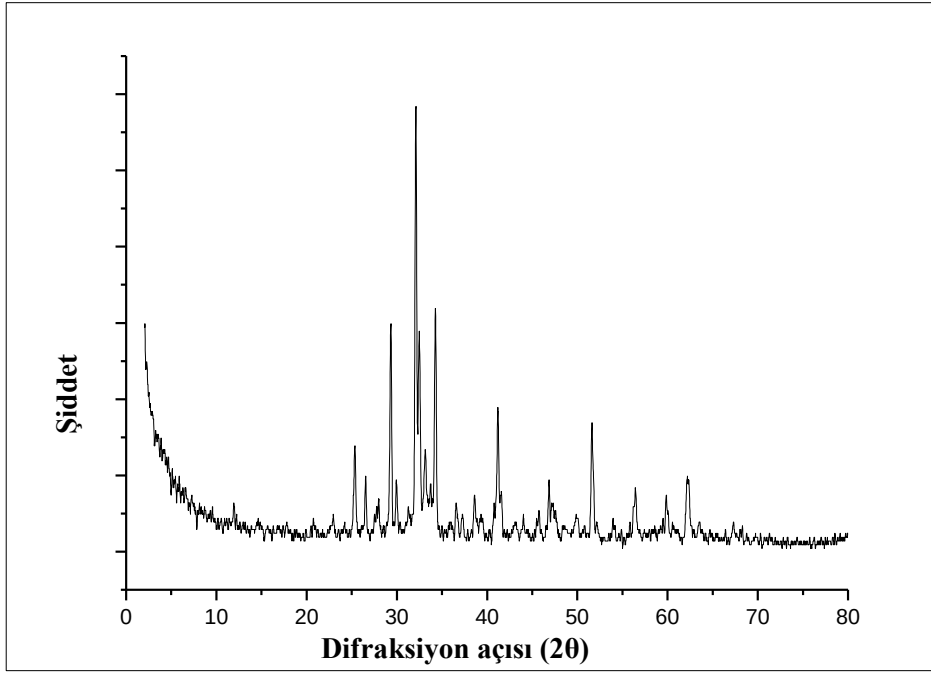
6.3. XRD Analizleri Sonuçları

XRD analizi sonucu beton numunelerin bünyelerinde varlığı tespit edilen fazlar, XRD paternleri üzerindeki simgelerle işaretlenmiştir. Bulunan fazların paternler üzerindeki numara olarak karşılığı ve numaraları Çizelge 6.3’te verilmiştir. Deneylerde kullanılan Portland çimentosunun, süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan elde edilen beton harcına ait numunenin ve SA, SB, SC ve SD süper akışkanlaştırıcıları ile %0,8, 1, 1,2, 1,5 katkı oranları kullanılarak elde edilen beton numunelerinin 7 ve 28 günlük XRD paternleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Çizelge 6.3. Beton numunelerin XRD paternlerinde bulunan fazların pikler üzerinde numara olarak karşılıkları ve kart numaraları

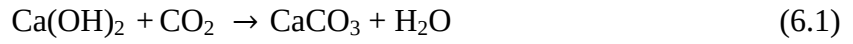
Numara	Faz	No
1	Trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) (Alit)	49-0442
2	Larnite ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) (Belit)	33-0302
3	Trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$)	33-0251
4	Brownmillerite ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$)	30-0226
5	Kuvars (SiO_2)	46-1045
6	Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	44-1481
7	Kalsit (CaCO_3)	47-1743
8	Etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} 26\text{H}_2\text{O}$)	41-1451

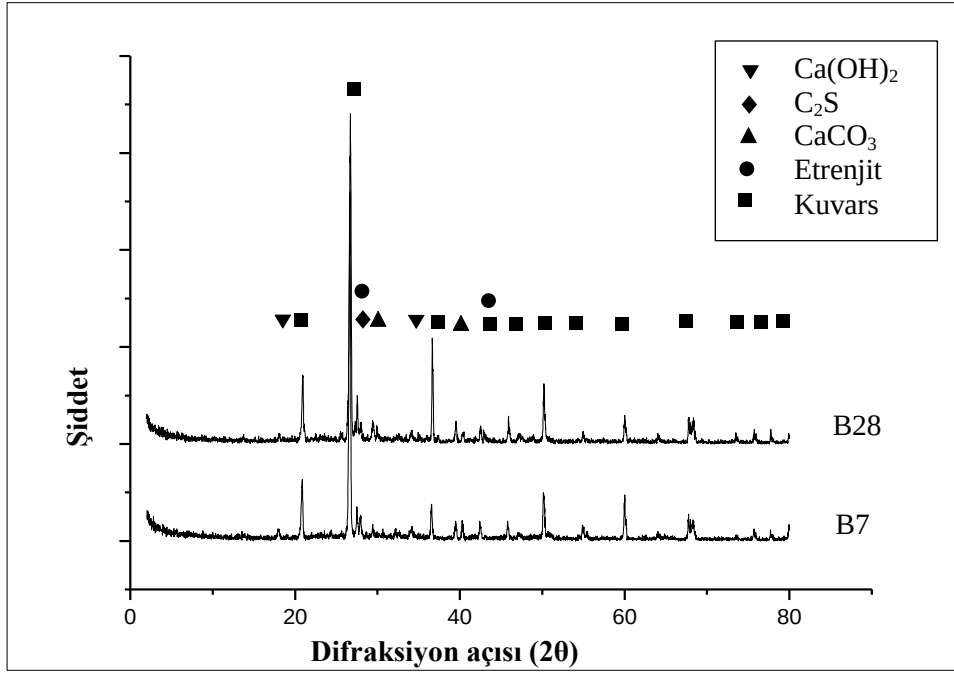
Portland çimentosu ana bileşenlerini alit, belit, trikalsiyum alüminat, brownmillerit oluşturmaktadır (Şekil 6.8). Alit; 25,378, 29,340, 32,098, 32,461, 34,298, 41,219, 46,898, 51,621, 56,475, 59,836, 62,127, belit; 26,505, 29,340, 36,582, 41,219, trikalsiyum alüminat; 26,505, 33,163, brownmillerit; 11,886, 33,738 açılarında görülmektedir. Portland çimentosunun yaklaşık % 75-80'ini oluşturan trikalsiyum silikat ve dikalsiyum silikat pik şiddetlerinin yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.8. Portland çimentosu XRD paterni

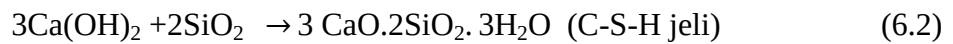
Katkısız Portland çimentosu ile 0,5 su/çimento oranında hazırlanan harçların 7. ve 28. günlerdeki hidratasyon fazları gelişimini incelemek için yapılan XRD analizi paternleri Şekil 6.9’da verilmiştir. Hidrate olmuş harçlar kristal fazdaki hidratasyon ürünleri olan portlandit (Ca(OH)_2), etrenjit ile birlikte hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit içermektedir. Harç yapısındaki SiO_2 kuvars formunda bulunmaktadır. Kalsit fazını oluşumu karbonatlaşmanın göstergesidir. Karbonatlaşma hidratasyon ürünlerinin ve özellikle Ca(OH)_2 ’nin havadaki CO_2 gazı ile birleşerek Eşitlik 6.1’deki reaksiyonla kalsiyum karbonata dönüşmesidir.

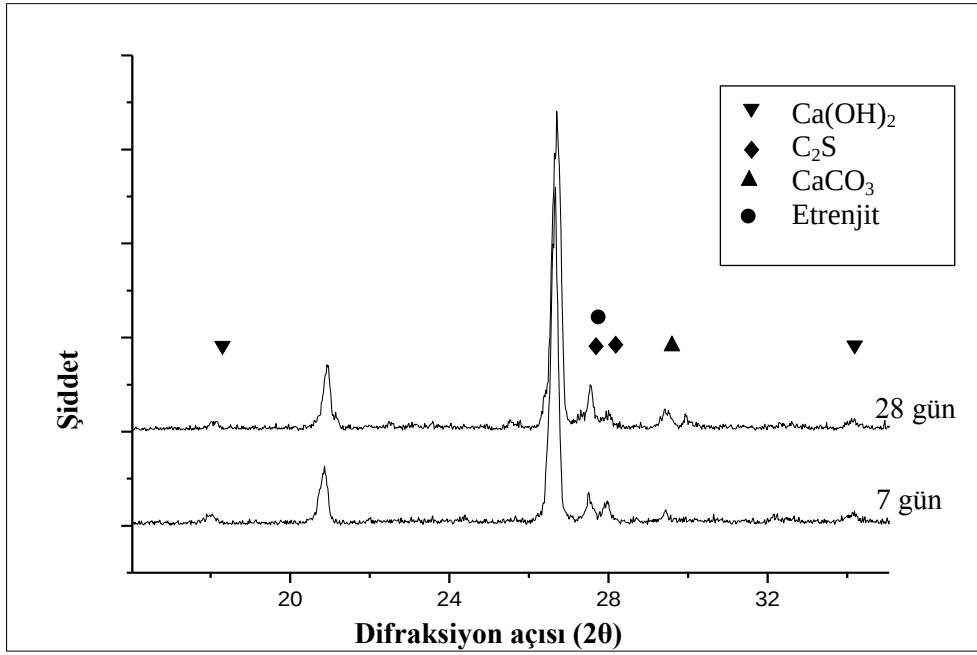




Şekil 6.9. 7 ve 28 günlük katkısız çimento harcının XRD paterni

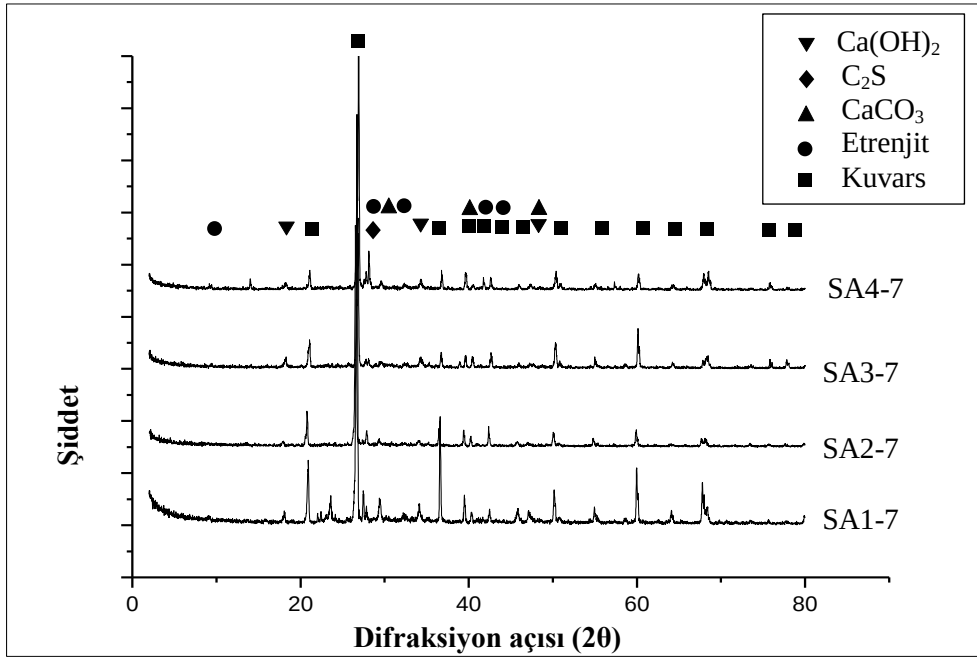
Katkısız çimento harcı kompozisyonunun kür zamanıyla değişimi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. 28 gün kür süresi ile hazırlanan harçtaki C_2S 'in 7 gün kür süresi ile hazırlanan harçtaki C_2S 'e göre azaldığı görülmektedir. Bu azalma hidratasyonun devam etmesi ile C_2S 'in reaksiyona girerek hidratasyon ürünü oluşturduğunun ve dayanım artışının göstergesidir. Katkısız çimento harcındaki portlandit ($Ca(OH)_2$) piklerinin hidratasyon süresi ilerledikçe azaldığı görülmüştür. Portlandit şiddetinin azalması çimento bünyesindeki uçucu kül ile kalsiyum hidroksitin Eşitlik 6.2'deki puzolanik reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır (Thiruppathi, 2009). Puzolanik özelliğe sahip uçucu kül, hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturur ve beton bünyesindeki boşlukları tıkar. Bu nedenle zamana bağlı olarak dayanım ve dayanıklılık artmaktadır. Basınç dayanım testleri dayanım artışını doğrulamaktadır.





Şekil 6.10. Katkısız çimento harcı kompozisyonunun zamanla değişimi

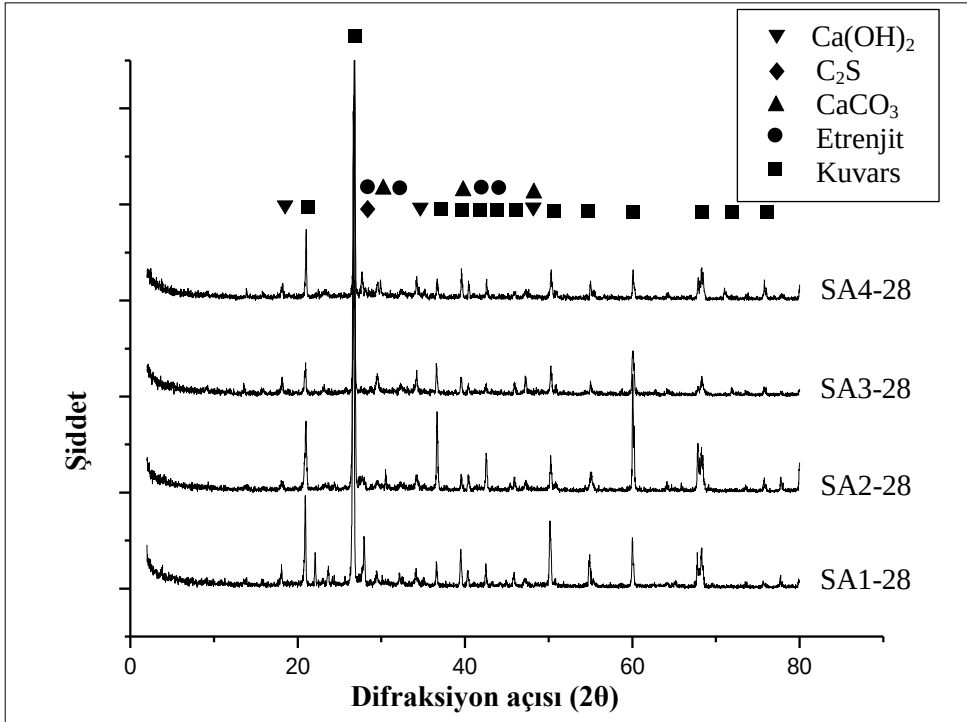
Farklı oranlarda SA süper akışkanlaştırıcısı ile elde edilen 7 günlük çimento harçlarının XRD paternleri Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. 7 günlük SA çimento harcının XRD paterni

Tüm numunelerde kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri gözlenmiştir. Kalsit pikleri bütün numunelerde karbonatlaşma gerçekleştiğini göstermektedir. En güçlü $Ca(OH)_2$ piki SA1-7 numunesinde, en zayıf pik ise SA2-7 numunesinde gözlenmiştir.

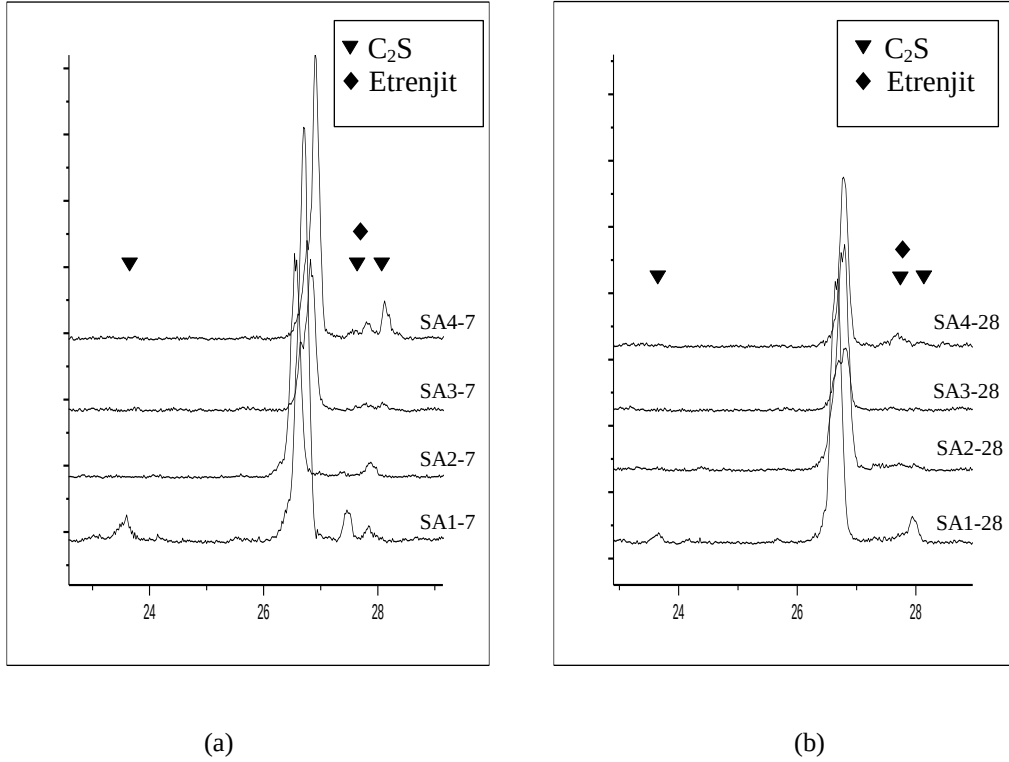
Şekil 6.12 farklı SA süper akışkanlaştırıcı olanları ile elde edilen 28 günlük çimento harçlarının XRD paternlerini göstermektedir. Tüm numunelerde kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri gözlenmiştir. Kalsit pikleri bütün numunelerde karbonatlaşmanın olduğunu gösterir. En güçlü $Ca(OH)_2$ piki SA1-28 numunesinde, en zayıf pik ise SA2-28 numunesinde görülmüştür.



Şekil 6.12. 28 günlük SA çimento harcının XRD paterni

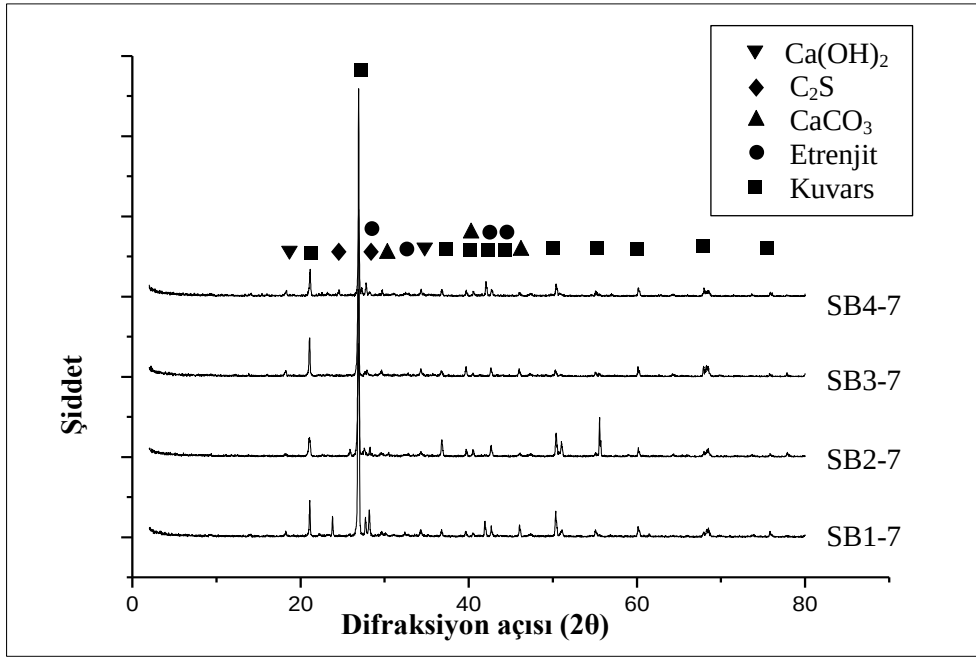
Şekil 6.13'te artan SA katkı oranına karşı 7 günlük ve 28 günlük harçlardaki hidratasyon ilişkisi görülmektedir. Çimentodaki C_2S (belit) bileşeninin pik şiddetinin azalması hidratasyonun gerçekleştiğini gösterir (Mollah ve ark., 1995). %1,2 katkı içeren SA3-7 ve SA3-28 harçları en zayıf C_2S piki içermektedir. Bu numunelerde yüksek oranda hidratasyon gerçekleşerek C_2S

hidratize olmuştur ve dayanım artışı sağlanmıştır. 7 günlük numuneler 28 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında C_2S 'in zamanla hidratasyonunun devam ederek pik şiddetlerinin azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanım testleri XRD analizi sonuçlarını desteklemektedir. Hidratasyon süresi arttıkça etrenjit piklerindeki azalma etrenjitin zamanla çözündüğünü göstermektedir.



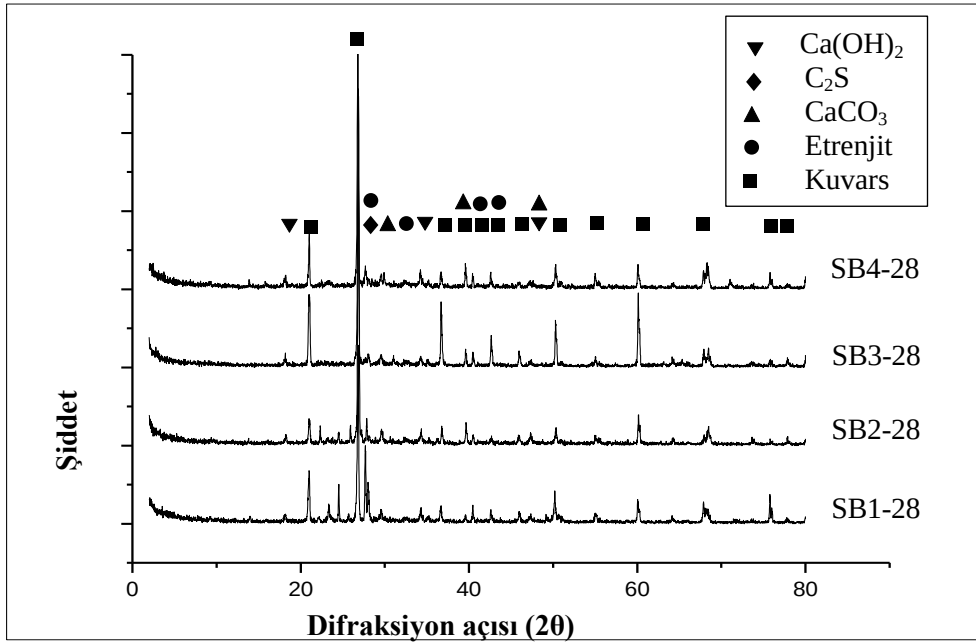
Şekil 6.13. Artan SA katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi

Farklı SB süper akışkanlaştırıcı olanları ile elde edilen 7 günlük çimento harçlarının XRD paternleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri tüm numunelerde gözlenmiştir. Numunelerde karbonatlaşma gerçekleşerek kalsit pikleri oluşmuştur. SB1-7 numunesinde güçlü $Ca(OH)_2$ piki görülürken, SB2-7 numunesinde çok zayıf $Ca(OH)_2$ piki belirlenmiştir.



Şekil 6.14. 7 günlük SB çimento harcının XRD paterni

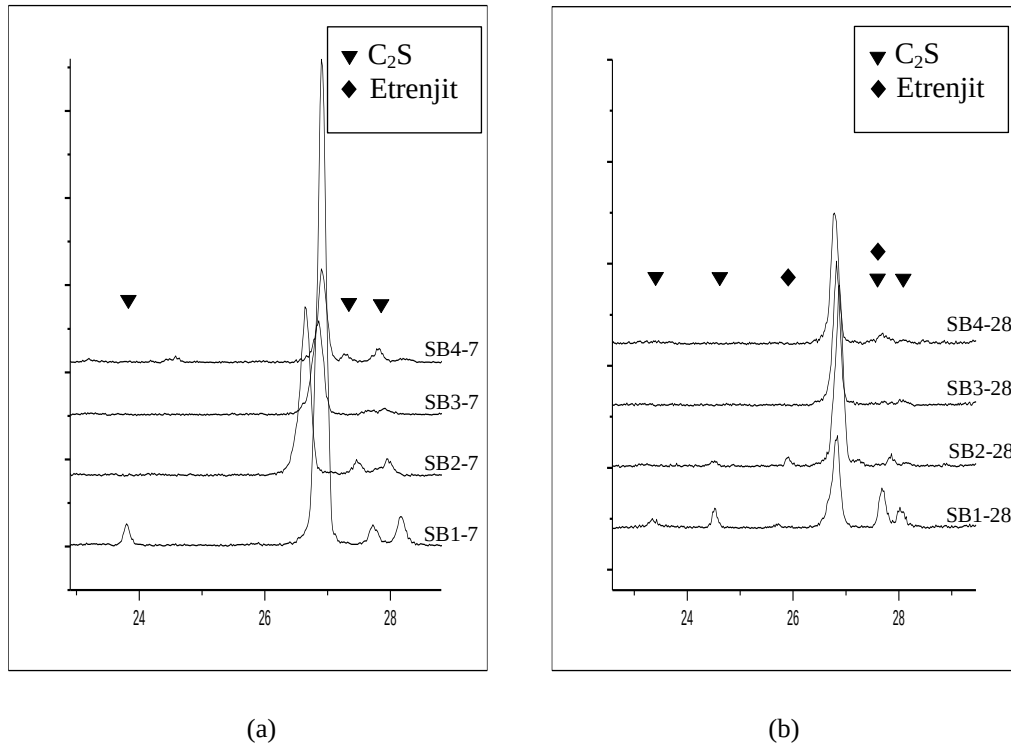
Şekil 6.15 farklı SB süper akışkanlaştırıcı olanları ile elde edilen 28 günlük çimento harçlarının XRD paternlerini göstermektedir.



Şekil 6.15. 28 günlük SB çimento harcının XRD paterni

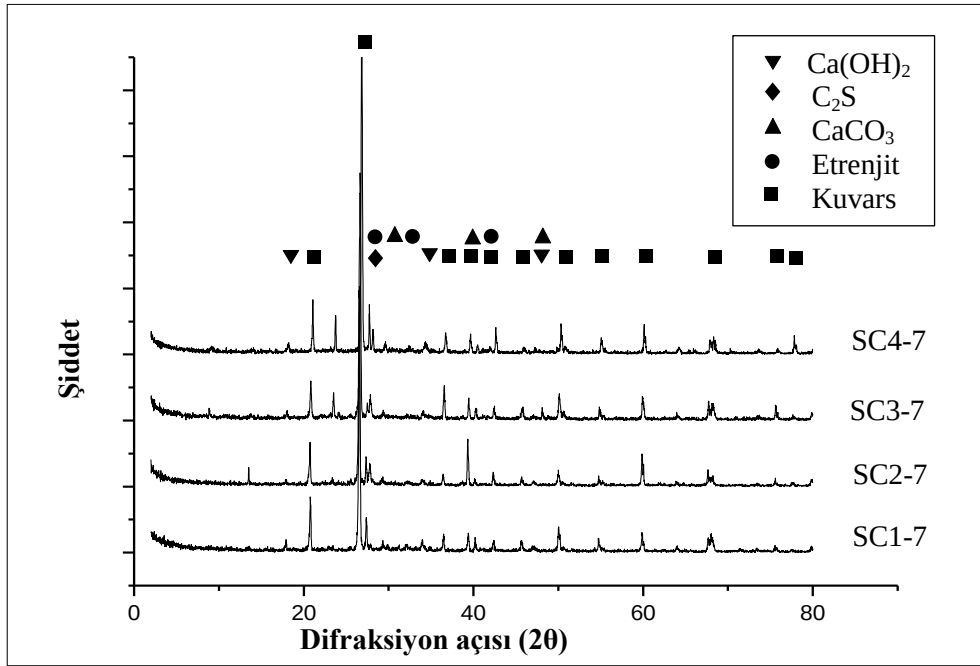
Kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri tüm numunelerde gözlenmiştir. Numunelerde karbonatlaşma gerçekleşerek kalsit pikleri görülmüştür. SB1-28 numunesinde en zayıf $Ca(OH)_2$ piki, SB2-28 numunesinde ise en kuvvetli $Ca(OH)_2$ piki belirlenmiştir.

Artan SB katkı oranına karşı 7 günlük ve 28 günlük harçlardaki hidratasyon ilişkisi Şekil 6.16'da verilmiştir. %0,8 katkı içeren SB1-7 ve SB1-28 numunelerindeki C_2S pikleri, reaksiyona girmemiş belit (C_2S)'in varlığını göstermektedir. Katkı artışıyla C_2S pik şiddetleri giderek azalmış, dolayısıyla hidratasyon derecesi artmıştır. %1,5 katkı oranında tekrar C_2S piklerinin gözlenmesi, yüksek oranda katkı kullanımı hidratasyonu yavaşlattığı gözlenmiştir. C_2S 'in zamanla hidratasyonunun devam ederek 28 günlük numunelerde pik şiddetlerinin 7 günlük numunelere göre azaldığı gözlenmiştir. XRD analizlerine göre hidratasyonun derecesi en fazla olan numune C_2S pik şiddetinin en az olduğu SB3-7 ve SB3-28 harçlarıdır.



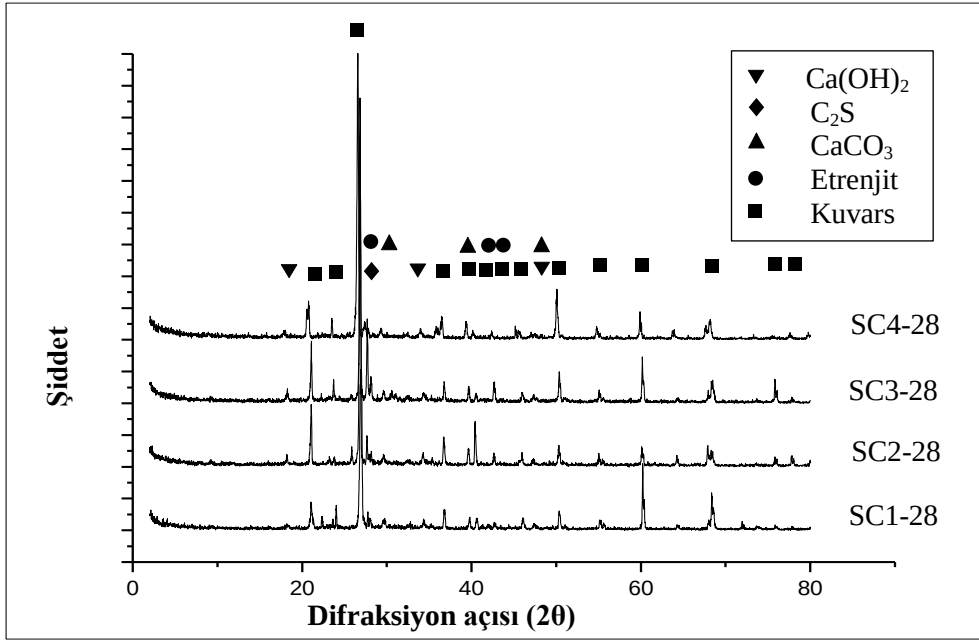
Şekil 6.16. Artan SB katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi

Şekil 6.17 farklı oranlarda SC süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile elde edilen 7 günlük çimento harçlarının XRD paternlerini göstermektedir. Kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri tüm numunelerde gözlenmiştir. $Ca(OH)_2$ piki tüm numunelerde yaklaşık olarak aynı şiddette olduğu belirlenmiştir.



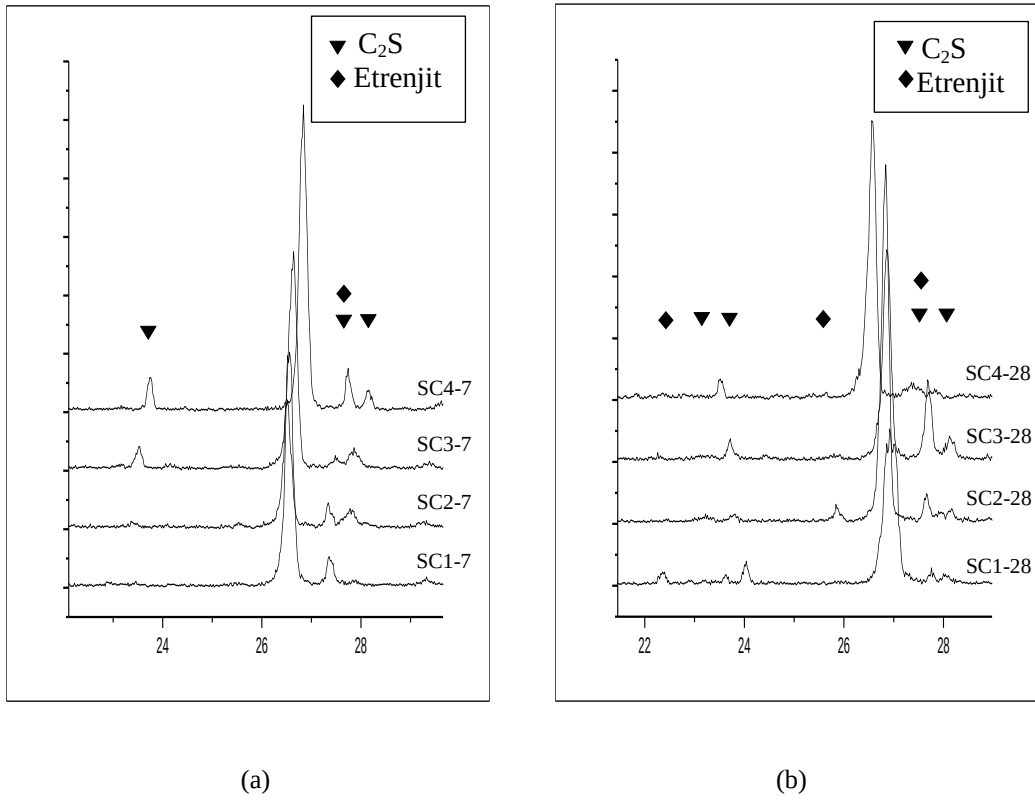
Şekil 6.17. 7 günlük SC çimento harcının XRD patern

Farklı oranlarda SC süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile elde edilen 28 günlük çimento harçlarının XRD paternleri Şekil 6.18’de verilmiştir. Kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri tüm numunelerde gözlenmiştir. SC1-28 numunesinde zayıf $Ca(OH)_2$, SC2-28 numunesinde güçlü $Ca(OH)_2$ piki görülmektedir.



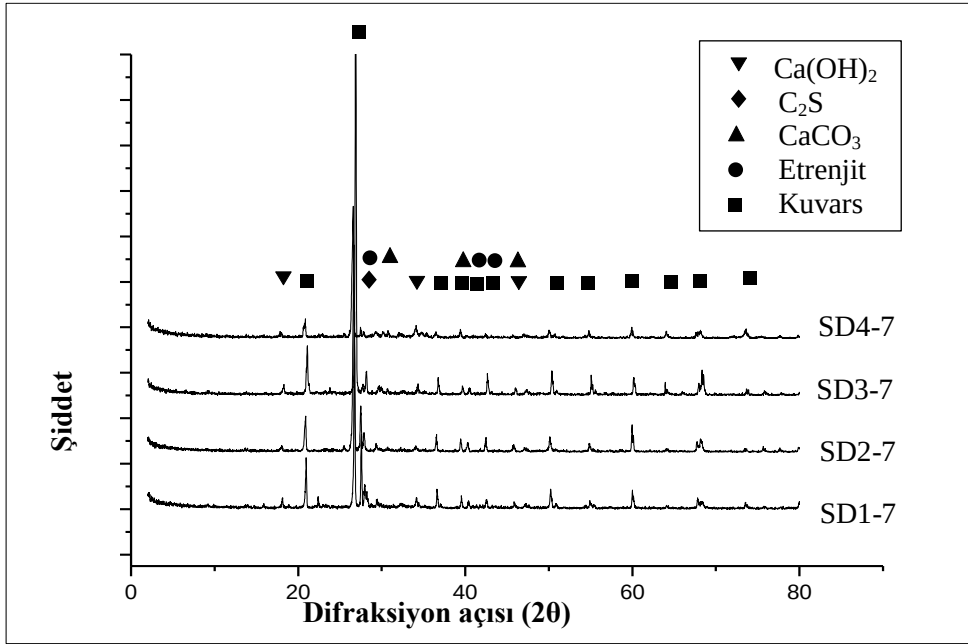
Şekil 6.18. 28 günlük SC çimento harcının XRD paterni

Artan SC katkı oranına karşı 7 günlük ve 28 günlük harçlardaki hidrasyon ilişkisi Şekil 6.19’da verilmiştir. 7 günlük numuneler 28 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında C_2S ’in zamanla hidrasyonunun devam ederek pik şiddetlerinin azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanım testleri XRD analizi sonuçlarını desteklemektedir. %1,2 katkı içeren SC3-28 numunesinde etrenjit pikinde zamanla artış görülmüş ve diğer numunelere göre en yüksek etrenjit gözlenen harç olmuştur. En az C_2S içeren %1 katkılı SC2-7 ve SC2-28 harçlarıdır. SC2-7 ve SC2-28 numunelerindeki C_2S ’in gözlenmeyişi C_2S ’in reaksiyon sonucu hidrasyon ürünlerine dönüşmesidir.



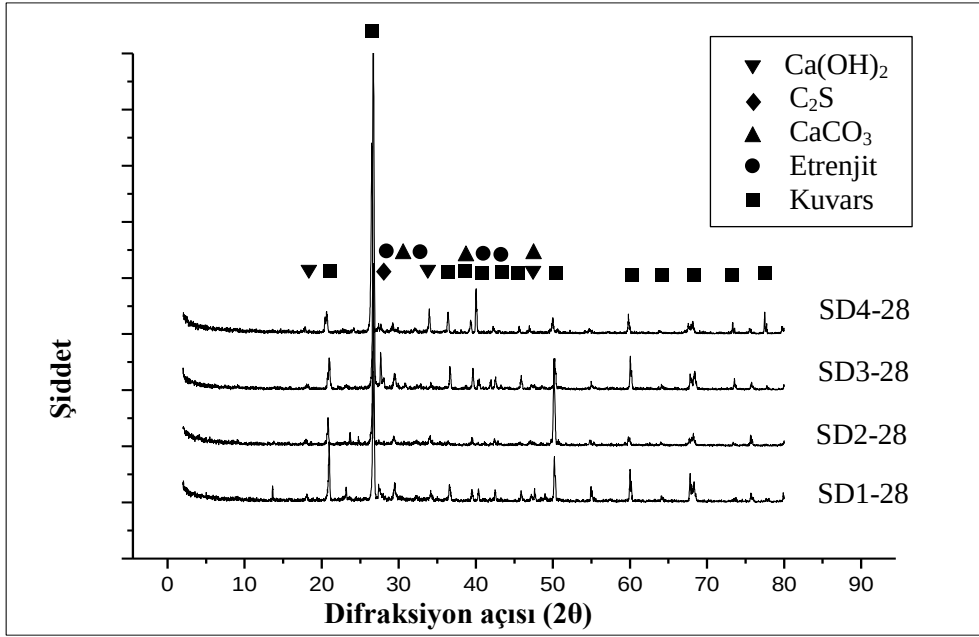
Şekil 6.19. Artan SC katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi

Şekil 6.20’de farklı oranlardaki SD katkısı ile elde edilen 7 günlük çimento harçlarının XRD paternleri verilmektedir. Tüm numunelerde Kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri gözlenmiştir. SC3-7 numunesinde güçlü $Ca(OH)_2$ piki görülürken, SC2-7 numunesinde daha zayıf $Ca(OH)_2$ piki belirlenmiştir.



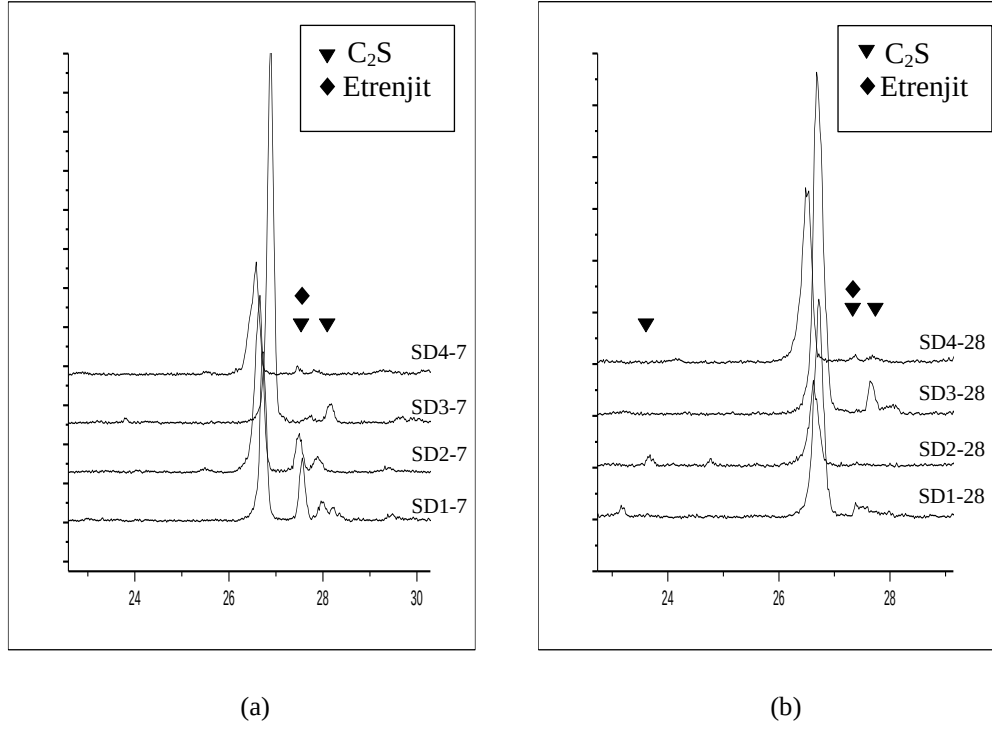
Şekil 6.20. 7 günlük SD çimento harcının XRD paterni

Şekil 6.21 farklı oranlardaki SD katkısı ile elde edilen 28 günlük çimento harçlarının XRD paternlerini göstermektedir. Tüm numunelerde kuvars, portlandit, etrenjit, hidrate olmamış klinker mineralleri (C_3S ve C_2S) ve kalsit pikleri gözlenmiştir. SD4-28 numunesinde güçlü $Ca(OH)_2$ piki görülürken, diğer numunelerde yaklaşık olarak aynı şiddette $Ca(OH)_2$ pikleri belirlenmiştir.



Şekil 6.21. 28 günlük SD çimento harcının XRD paterni

Şekil 6.22’de artan SA katkı oranına karşı 7 günlük ve 28 günlük harçlardaki hidratasyon ilişkisi görülmektedir. C_2S ’in zamanla hidratasyonunun devam ederek 28 günlük numunelerde pik şiddetlerinin azaldığı gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük numuneler içinde en yüksek oranda katkı kullanılan SD4-7 ve SD4-28 harçlarında en az C_2S piki gözlenmiştir. %1,2 katkı içeren SD3-28 numunesinde etrenjit pikinde zamanla artış görülürken SD1-28, SD2-28 ve SD4-28 numunelerinde etrenjit azalmıştır.



Şekil 6.22. Artan SD katkı oranına karşı 7 günlük (a) ve 28 günlük (b) harç XRD paternlerindeki hidratasyon ilişkisi

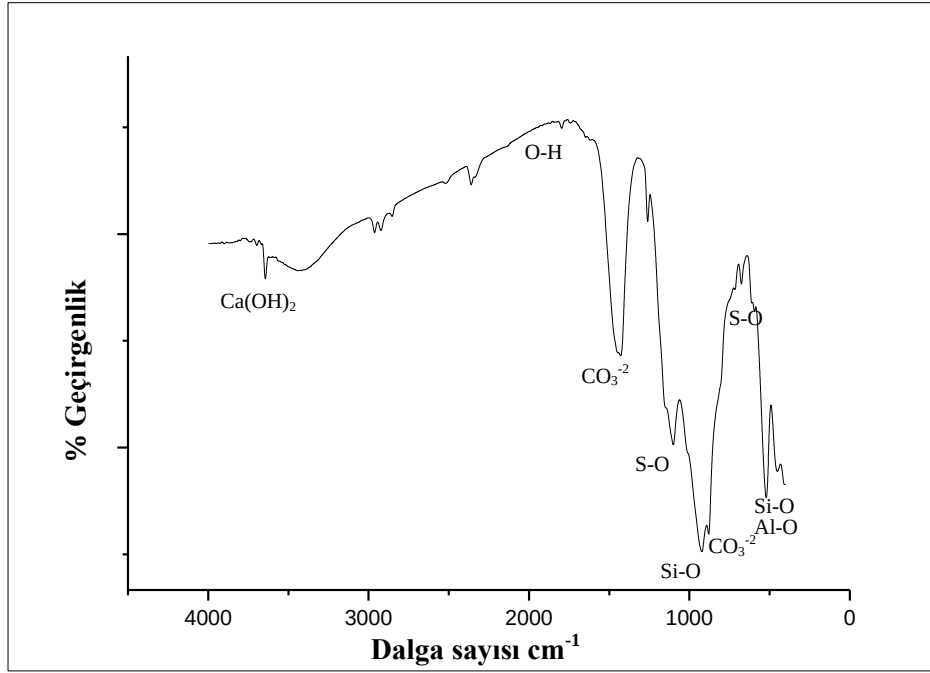
6.4. FTIR Analizleri Sonuçları

FTIR analizleri numunedeki moleköl gruplarını tanımlamak için kullanılmıştır. Bu amaçla çimento ve çimento harçları ile ilgili FTIR çalışmalarında infrared spektrumu başlıca 3 geniş band bölgesinde değerlendirilmiştir. Bunlar su bölgesi ($>1600 \text{ cm}^{-1}$), sülfat bölgesi ($1100-1150 \text{ cm}^{-1}$) ve materyal bölgesidir ($<1000 \text{ cm}^{-1}$) (Mollah ve ark., 2000).

Çizelge 6.4. Çimento harcındaki karakteristik bantlar

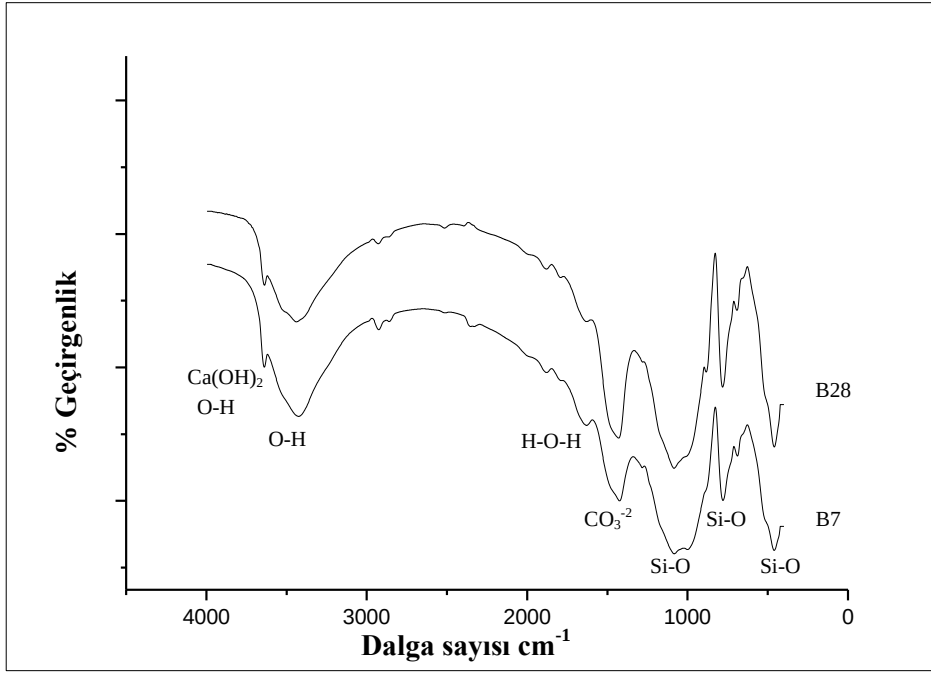
Bağ	Dalga sayısı cm^{-1}	Referans
Ca(OH)_2	3635-3643	(Puertas ve ark., 2005)
H_2O	3421-3442	(Puertas ve Fernandez-Jimenez, 2003)
CO_2	2360	(Turhan, 2008)
H_2O	1615-1635	(Puertas ve Fernandez-Jimenez, 2003)
CaCO_3	1420-1438	(Ylmen ve Jaglid, 2013) ; (Mollah ve ark., 2000)
SiO_4	1252-1291	(Ylmen ve Jaglid, 2013)
SiO_4	1081-1086	(Ylmen ve Jaglid, 2013) ; (Mollah ve ark., 2000)
CaCO_3	876-880	(Ylmen ve Jaglid, 2013)
Kuvars	776-795	(Dorum ve ark., 2010)
$\text{AlO}_4, \text{SiO}_4$	687-693	(Palomo ve ark., 1999)
$\text{AlO}_4, \text{SiO}_4$	646-651	(Palomo ve ark., 1999)
SO_4	1127	(Mollah ve ark., 1995) ; (Ylmen ve ark., 2009)
SiO_4	457-462	(Puertas ve ark., 2005)

Portland çimentosu (PÇ) FTIR spektrumunda; Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 452 ve 521 cm^{-1} dalga boyunda sırasıyla düzlem içi açılı bükülme ve düzlem dışı açılı bükülme titreşim pikleri vermektedir (Dorum ve ark., 2010). Si-O bağı 923 cm^{-1} 'de asimetric gerilme titreşim piki şeklindedir. PÇ'de alçıyı gösteren kükürt-oksijen bağı (S-O) 593 ve 675 cm^{-1} 'de açılı bükülme titreşimleri, 1101 cm^{-1} 'de gerilme titreşimi olarak görülmektedir (Mollah ve ark., 2000). CO_3^{-2} ise 1429 cm^{-1} 'de asimetric gerilme titreşimleri, 881 cm^{-1} 'de düzlem dışı açılı bükülme titreşim pikleri vermektedir (Bhat, 2013). 1616 ve 1644 cm^{-1} 'deki pik çimento içinde bulunan alçıdaki sudan ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 3642 cm^{-1} 'deki pik ise alçının klinker ile öğütülmesi sonucu alçının hemihidrat formuna dönüşmesinden ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) kaynaklanmaktadır (Ylmen ve ark., 2009).



Şekil 6.23. Portland çimentosu FTIR spektrumu

7 ve 28 günlük katkısız çimento harcının FTIR spektrumu Şekil 6.24’da verilmiştir. Katkısız çimento harcı FTIR spektrumunda; portlandit (Ca(OH)_2) kaynaklı O-H gerilme titreşimi karakteristik absorpsiyon bandı 3638 cm^{-1} dalga boyunda gözlenir (Puertas ve ark., 2005). 3424 cm^{-1} ’de su gerilme bandı (O-H), 1629 cm^{-1} ’de H-O-H açılı bükülme titreşimleri görülmektedir (Puertas ve Fernandez-Jimenez, 2003). 1424 ve 876 cm^{-1} , dalga boyunda görülen pikler karbonat (CO_3^{2-}) fazlarıdır. $1250\text{-}1291 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında gözlenen pikler Si-O titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. (Ylmen ve Jaglid, 2013). $\sim 1082 \text{ cm}^{-1}$ ’de Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşimleri gözlenmiştir (Mollah ve ark., 2000). 779 cm^{-1} ’deki pik kuvars bandıdır (Dorum ve ark., 2010). $693\text{-}646 \text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen pikler ise dörtyüzlü AlO_4 ve SiO_4 (halkalı) gruplarından kaynaklanmaktadır (Palomo ve ark., 1999). 459 cm^{-1} Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşim bandını göstermektedir (Puertas ve ark., 2005). 2360 cm^{-1} ’deki pik ise spektrum ortamında bulunan havanın karbondioksitinden kaynaklanmaktadır (Turhan, 2008).



Şekil 6.24. Katkısız harcın FTIR spektrumu

Portland çimentosunun FTIR spektrumundaki düzlem dışı ve düzlem içi Si-O açılı bükülme titreşimleri şiddetlerindeki değişimler polimerizasyon artışını göstermektedir. Si-O gerilme titreşim bantının daha yüksek banta geçişi çimento hidrasyonunda yüksek derece polimerizasyon sonucu C-S-H oluşumunun parmak izi kanıtıdır (Mollah ve ark., 1995). Portland çimentosu ve katkısız çimento harcının FTIR analizleri karşılaştırıldığında; Portland çimentosundaki 923 cm^{-1} 'de görülen Si-O asimetrik gerilme titreşim piki, katkısız çimento harcında $\sim 1082 \text{ cm}^{-1}$ 'de, 521 cm^{-1} 'deki düzlem dışı açılı bükülme Si-O bandı ise katkısız çimento harcında $\sim 458 \text{ cm}^{-1}$ 'de görülmektedir (Şekil 6.24-Şekil 6.25). Bu değişim SiO_4^{-4} biriminin polimerizasyonunu göstermektedir. Polimerizasyon sonucu Si-O asimetrik gerilme titreşimi bandı, meydana gelen kayma ile SO_4^{-2} bandına gizlenebilir (Mollah ve ark., 1995). FTIR spektrumlarında Si-O bandında meydana gelen kayma ile C-S-H jeli tüm numunelerde 990-1090 cm^{-1} aralığında gözlenmiştir. Si-O bandındaki değişimler tüm çimento harçlarında aynı şekilde gerçekleşmiş olup harçtaki süper akışkanlaştırıcı katkı içeriğinden

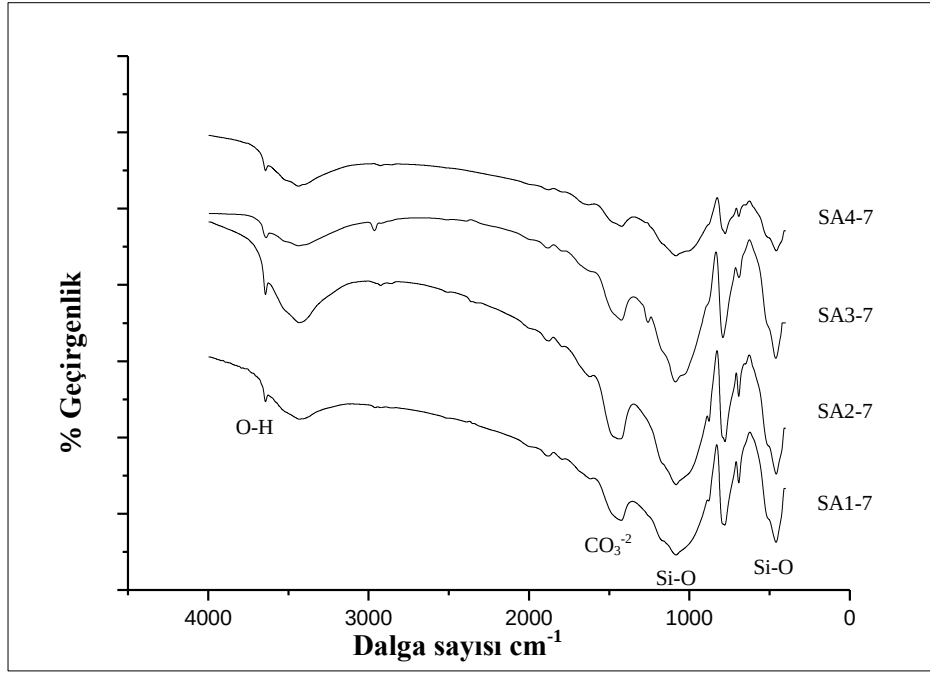
etkilenmemiştir. Yapılan FTIR analizleri tüm çimento harçlarında kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunu doğrulamaktadır.

Hidratasyon sırasında atmosferik CO₂ ile hidratasyon ürünü Ca(OH)₂ ve C-S-H'nin reaksiyonu sonucu karbonatlaşma meydana gelir (Ylmen ve Jaglid, 2013). Portland çimentosu spektrumuna göre katkısız çimento harcındaki ~1424 ve 883 cm⁻¹'de görülen karbonat bantları karbonatlaşmadan dolayı oluşmuştur.

Hidratasyon süreci genellikle hidratasyon reaksiyonu ana ürünü olan portlandit (Ca(OH)₂) oluşumunun ölçülmesi ile değerlendirilir (Puertas ve ark., 2005). Fakat deneylerde kullanılan uçucu kül katkılı çimento içeriğindeki uçucu külün pozolanik reaksiyonu sonucu portlandit miktarında değişim gözlenebilir.

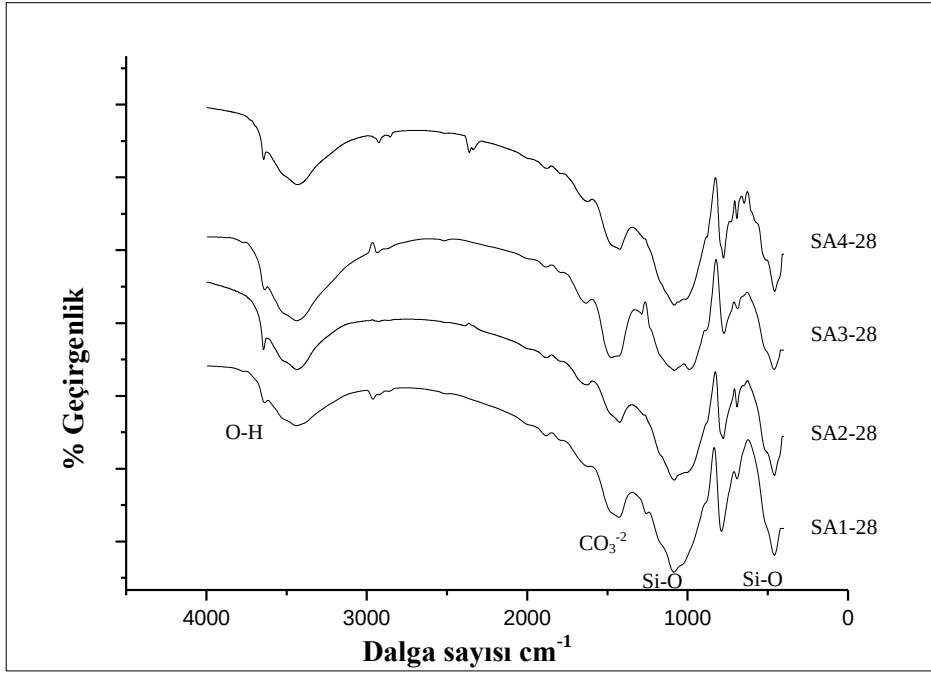
Şekil 6.24'te görülen katkısız harcın 7 ve 28 günlük FTIR spektrumu karşılaştırıldığında B28 numunesinde portlandit pik şiddetinin azaldığı görülmektedir. Kür süresindeki artış ile birlikte devam eden hidratasyon süreciyle portlanditin artması beklenirken pozolanik reaksiyon sonucu portlandit kaynaklı O-H gerilme titreşimini gösteren pikin şiddeti azalmıştır. B28 numunesinde ~1429 cm⁻¹'deki karbonat pik şiddeti artmıştır. Karbonat pik şiddetinin artması ile daha fazla karbonatlaşma meydana gelmiştir. Bu durum basınç dayanımı artışını desteklemiştir.

SA katkılı 7 günlük çimento harçlarının FTIR spektrumları Şekil 6.25'te verilmiştir. Tüm numunelerde Si-O asimetrik gerilme titreşimi (C-S-H jeli) ~1082 cm⁻¹ dalga boyunda gözlenmiştir. ~459cm⁻¹'de Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşim bandı, ~1424 ve 877 cm⁻¹'de görülen CO₃⁻² karbonatlaşmadan meydana gelen karbonat piki görülmektedir. SA2-7'de karbonat pikleri daha belirgin olarak gözlenmektedir. ~3642 cm⁻¹'deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenmiştir. En şiddetli O-H gerilme titreşimi SA2-7 numunesinde görülmüştür. Katkı oranı artışı ile SA3-7 ve SA4-7 numunelerinde O-H gerilme titreşimi pik şiddeti azalmıştır. Katkı oranının artışı Si-O bandını azaltmıştır. SA3-7 numunesinde Si-O asimetrik gerilme titreşimi bandı yanında küçük pik olarak C₂S gözlenmiştir. 7 günlük % 1 SA katkılı harcın en yüksek basınç dayanımına sahip olması FTIR analizini desteklemektedir.



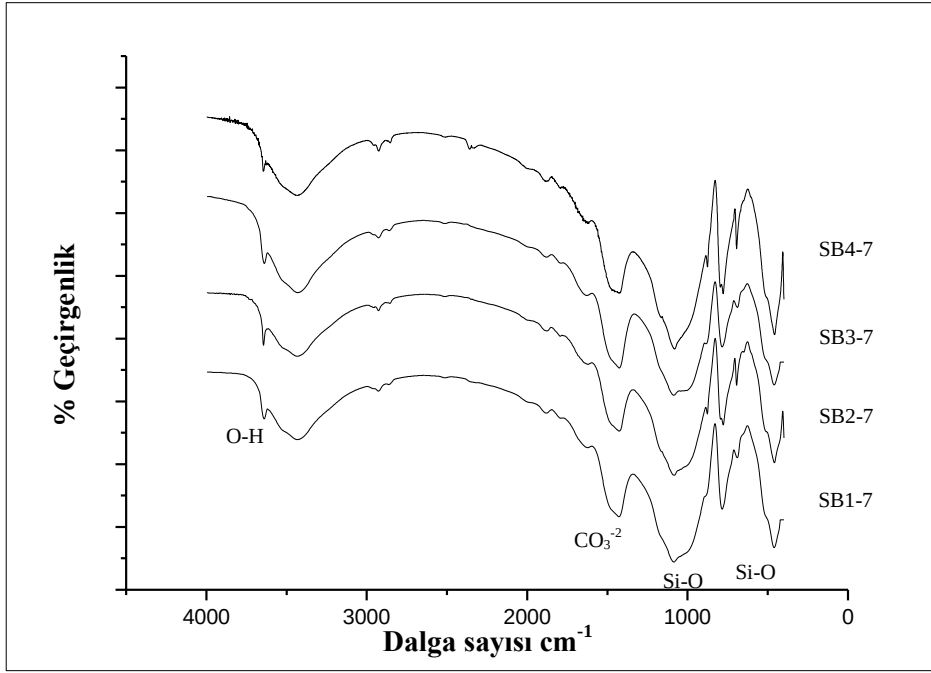
Şekil 6.25. SA katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları

Şekil 6.26’da SA katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları görülmektedir. Si-O asimetrik gerilme titreşimi (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1083 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 459 \text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenmiştir. XRD analizlerinde de gözlenen, karbonatlaşmadan meydana gelen ~ 1427 ve 878 cm^{-1} ’de görülen CO_3^{2-} karbonat pikini göstermektedir. En şiddetli portlandit O-H gerilme titreşimi SA2-28 numunesinde görülmüştür. Katkı oranı artışı ile SA3-28 ve SA4-28 numunelerinde portlandit O-H gerilme titreşimi şiddeti azalmıştır. 28 günlük %1 SA katkılı harcın en yüksek basınç dayanımına sahip olması FTIR analizini desteklemektedir.



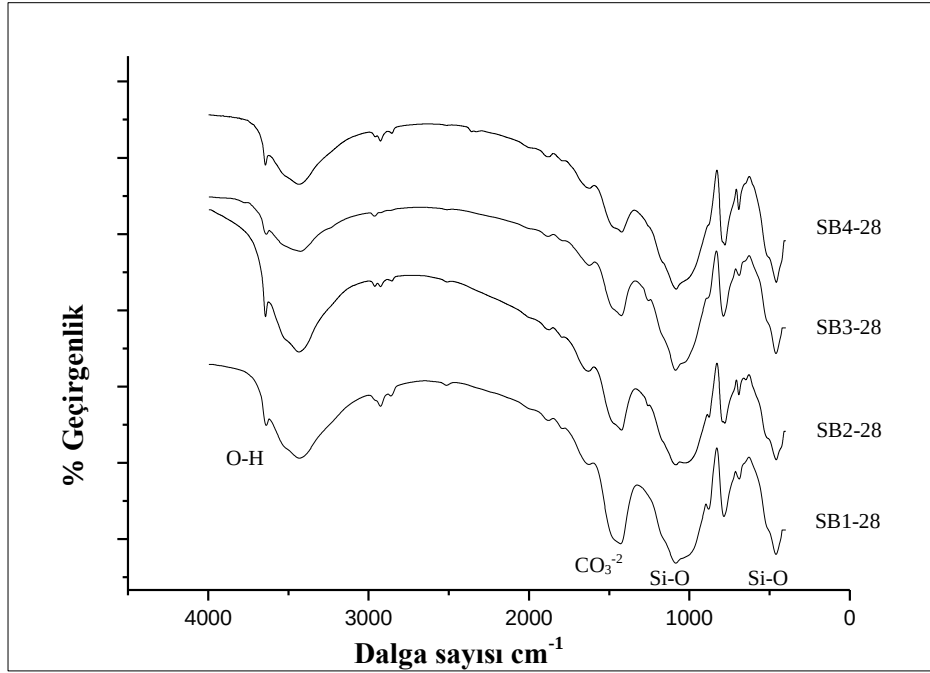
Şekil 6.26. SA katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları

SB katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları Şekil 6.27’de görülmektedir. Si-O asimetrik gerilme titreşimi (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1083 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 459 \text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenmiştir. SB2-7’de ~ 1425 ve 876 cm^{-1} ’de görülen CO_3^{2-} karbonat pikleri belirgin olarak gözlenmektedir. $\sim 3638 \text{ cm}^{-1}$ ’deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenirken karbonat piklerinde değişim olmamıştır. En şiddetli O-H gerilme titreşimi SB2-7 numunesinde görülmüştür. Katkı oranı artışı ile SB3-7 ve SB4-7 numunelerinde portlandit O-H pik şiddeti azalmıştır.



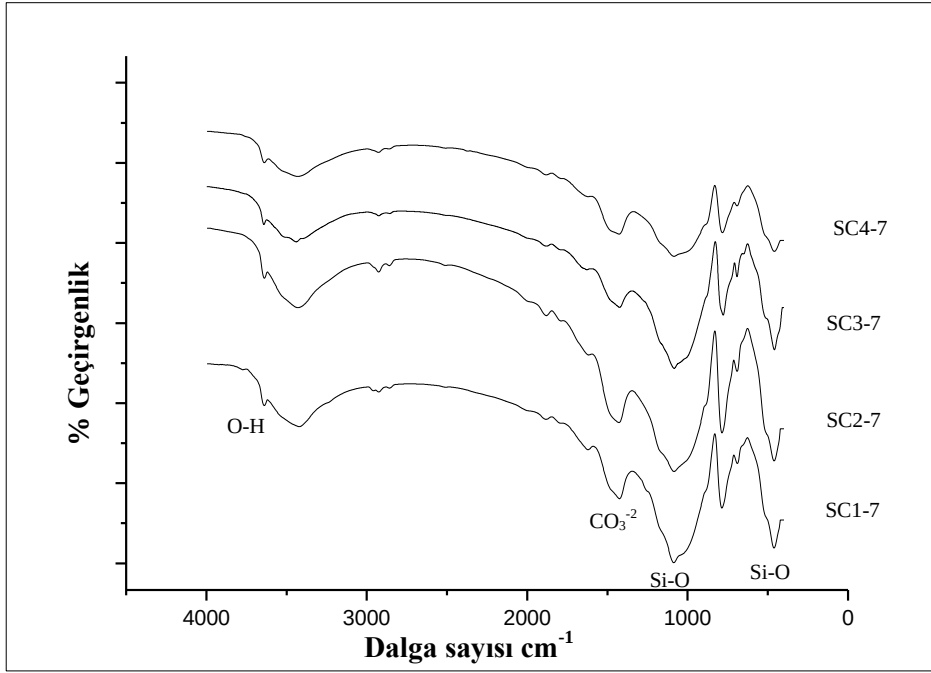
Şekil 6.27. SB katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları

Şekil 6.28’de SB katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları verilmiştir. Si-O asimetrik gerilme titreşimleri (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1084 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 459 \text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenmiştir. SB1-28’de ~ 1426 ve 880 cm^{-1} dalga boyunda görülen karbonat pikleri daha belirgin olarak gözlenmektedir. $\sim 3639 \text{ cm}^{-1}$ ’deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenmiştir. Katkı oranı artışı ile SB3-28 ve SB4-28 numunelerinde O-H pik şiddeti azalmıştır. En şiddetli O-H gerilme titreşimi SB2-28 numunesinde görülmüştür. SB3-28 harcında Si-O asimetrik gerilme titreşimi bandı yanında düşük şiddette C_2S görülmüştür. Katkı miktarı arttıkça karbonat bandı şiddeti azalmıştır.



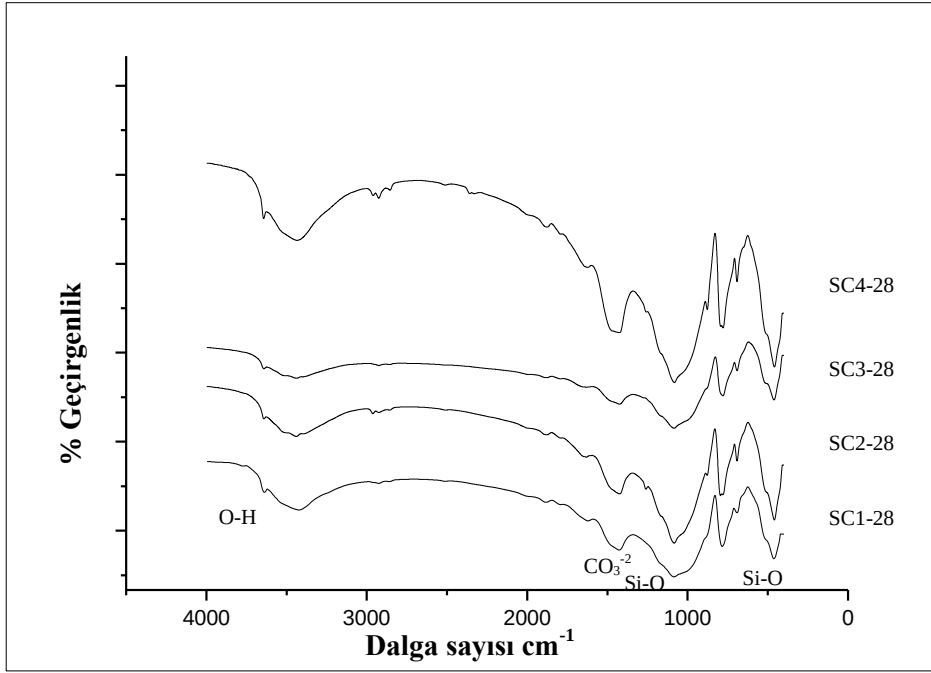
Şekil 6.28. SB katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları

SC katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları Şekil 6.29’da görülmektedir. Si-O asimetrik gerilme titreşimi (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1084 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 460 \text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenmiştir. Si-O asimetrik gerilme titreşimi katkı miktarı artışından etkilenerek SC4-7 numunesinde en düşük şiddette gözlenmiştir. ~ 1426 ve 880 cm^{-1} dalga boyunda CO_3^{2-} karbonat pikleri görülmektedir. $\sim 3640 \text{ cm}^{-1}$ ’deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim görülmemiştir. SC1-7 ve SC2-7’de karbonat pikleri daha belirgin olarak gözlenmekte dolayısıyla katkı oranı artışı karbonatlaşmayı azaltmıştır.



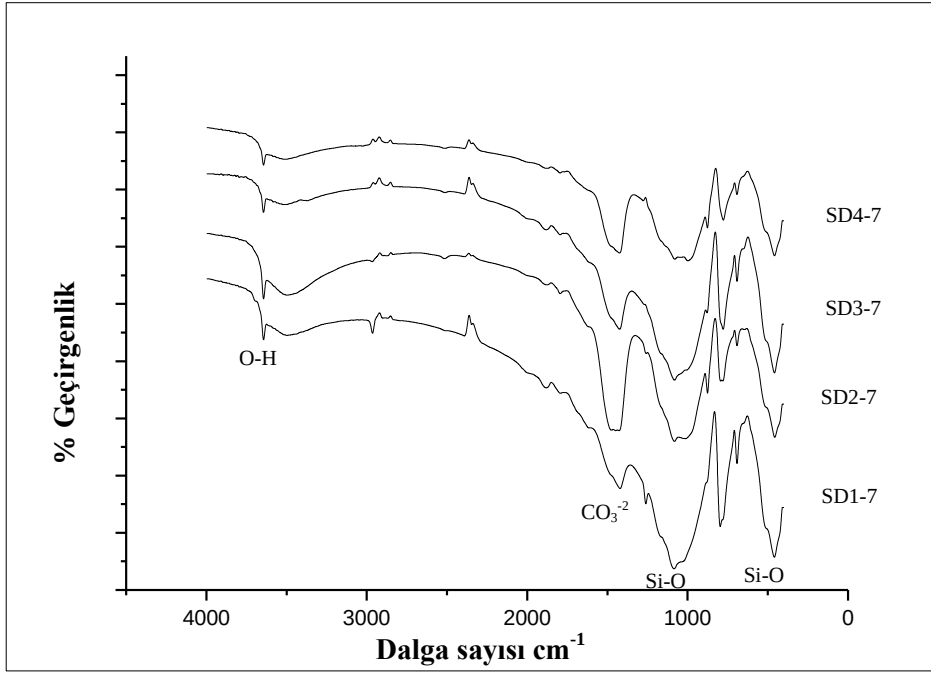
Şekil 6.29. SC katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları

Şekil 6.30 SC katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumlarını göstermektedir. Si-O asimetrik gerilme titreşimleri (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1084 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 460 \text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenmiştir. ~ 1426 ve 878 cm^{-1} 'de karbonat pikleri görülmektedir. SC2-28 ve SC4-28'de karbonat pikleri belirgin olarak gözlenmektedir. $\sim 3639 \text{ cm}^{-1}$ 'deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenmiştir. Basınç dayanımının en yüksek olduğu SC2-28 numunesinde en zayıf O-H gerilme titreşimi görülmüştür. Bu numunede portlanditin pozolanik reaksiyonu basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir. O-H gerilme titreşiminin en şiddetli olduğu harç, katkı oranının en yüksek olduğu SC4-28 numunesidir.



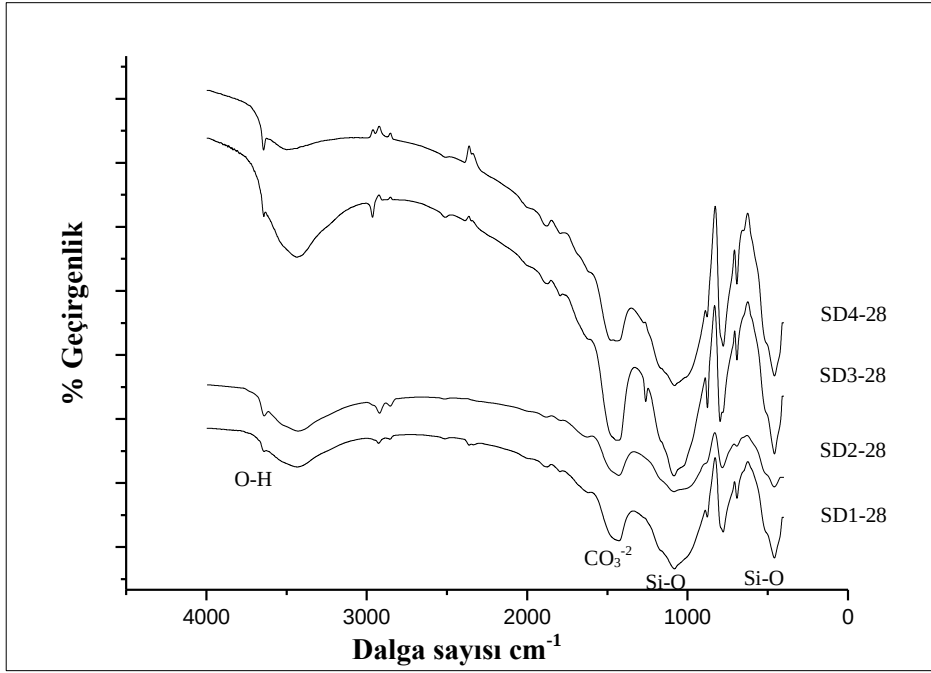
Şekil 6.30. SC katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları

SD katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları Şekil 6.31’de verilmiştir. Si-O asimetrik gerilme titreşimleri (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1081 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 460 \text{ cm}^{-1}$ ’de gözlenmiştir. $\sim 3643 \text{ cm}^{-1}$ ’deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenmiştir. En şiddetli O-H gerilme titreşimi SD2-7 numunesinde görülmüştür. Katkı oranı artışı ile SD3-7 ve SD4-7 numunelerinde O-H pik şiddeti azalmıştır. ~ 1424 ve 876 cm^{-1} ’de görülen CO_3^{2-} karbonatlaşmadan meydana gelen karbonat pikini göstermektedir. SD2-7 numunesinde şiddetli karbonat pikleri gözlenmiştir. SD1-7 numunesinde Si-O asimetrik gerilme titreşimi bandı yanında 1260 cm^{-1} ’de C_2S piki gözlenmiştir.



Şekil 6.31. SD katkılı harçların 7 günlük FTIR spektrumları

Şekil 6.32 SD katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumlarını göstermektedir. Si-O asimetrik gerilme titreşimi (C-S-H jeli) tüm numunelerde $\sim 1081 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda, Si-O düzlem dışı açılı bükülme bandı $\sim 458 \text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenmiştir. $\sim 3640 \text{ cm}^{-1}$ 'deki portlandit O-H gerilme titreşimleri pik şiddetlerinde katkı oranı artışıyla beraber değişim gözlenmiştir. En şiddetli O-H gerilme titreşimi SD4-28 numunesinde görülmüştür. ~ 1424 ve 876 cm^{-1} 'de karbonat pikleri görülmektedir. SD3-28 numunesinde $\sim 1260 \text{ cm}^{-1}$ 'de C_2S ve şiddetli karbonat piki gözlenmiştir. Bu numunede portlanditin puzolanik reaksiyonu basınç dayanımının arttırdığı söylenebilir.



Şekil 6.32. SD katkılı harçların 28 günlük FTIR spektrumları

6.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

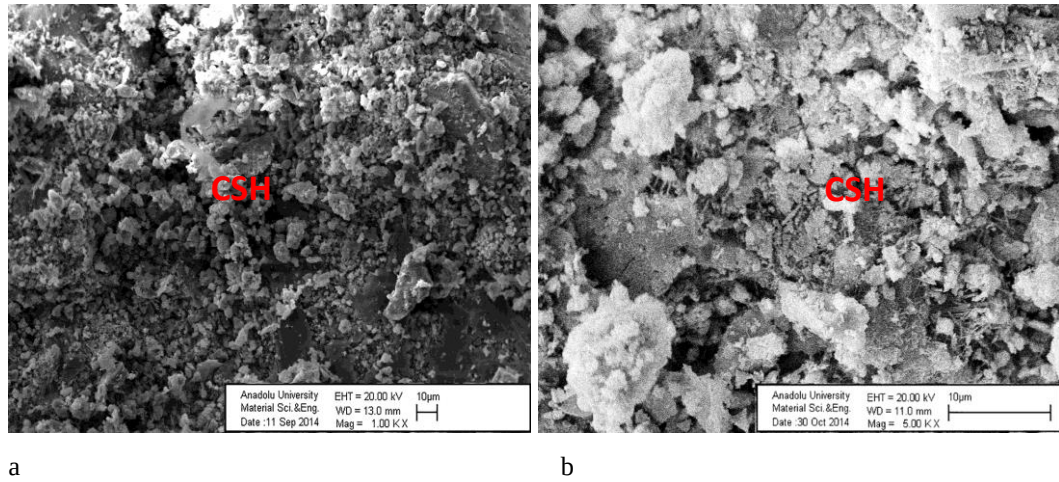
Katkısız olarak hazırlanan ve farklı türlerde farklı oranlarda kimyasal katkıları kullanılarak hazırlanan çimento harçlarının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikroyapıları incelenmiş ve aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Sertleşmiş çimento harcının mikroyapısındaki bileşenler, SEM ile gerçekleştirilen büyütme oranları arttıkça daha net bir biçimde gözlenmektedir. Çimento harcındaki katı hacmin büyük bölümünü zayıf kristal yapıya sahip, bileşim ve şekil açısından çeşitlilik gösteren en temel hidratasyon ürünü olan C-S-H jelleri oluşturmaktadır. C-S-H jel yapısının en önemli özelliği gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır. Hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan diğer önemli ürün ise kalsiyum hidroksittir (CH). Çimento harcının yapısında AFt ve AFm fazları (etrenjit ve monosülfat) gibi hidratasyon ürünü bileşikler de az miktarda bulunmaktadır. CH, AFt ve AFm kristal yapıya sahip bileşiklerdir.

Çimento hamurunun özelliklerini kontrol eden en önemli oluşumlardan biri gözeneklerdir. Özellikle hidrasyon reaksiyonlarının büyük oranda veya tamamen gerçekleştiği durumlarda gözenekler, yapısal hacmin %20-30'u arasında yer kaplamaktadır (Erzengin, 2010).

Mikroyapısal bileşenleri analiz ederken, dikkate alınması gereken diğer önemli bileşen hidrate olmadan kalan çimento tanecikleridir. Zira bu tanecikler, miktar olarak toplam hacmin %5 ile %20 aralığındaki önemli bir hacmi kaplamaktadır (Erzengin, 2010).

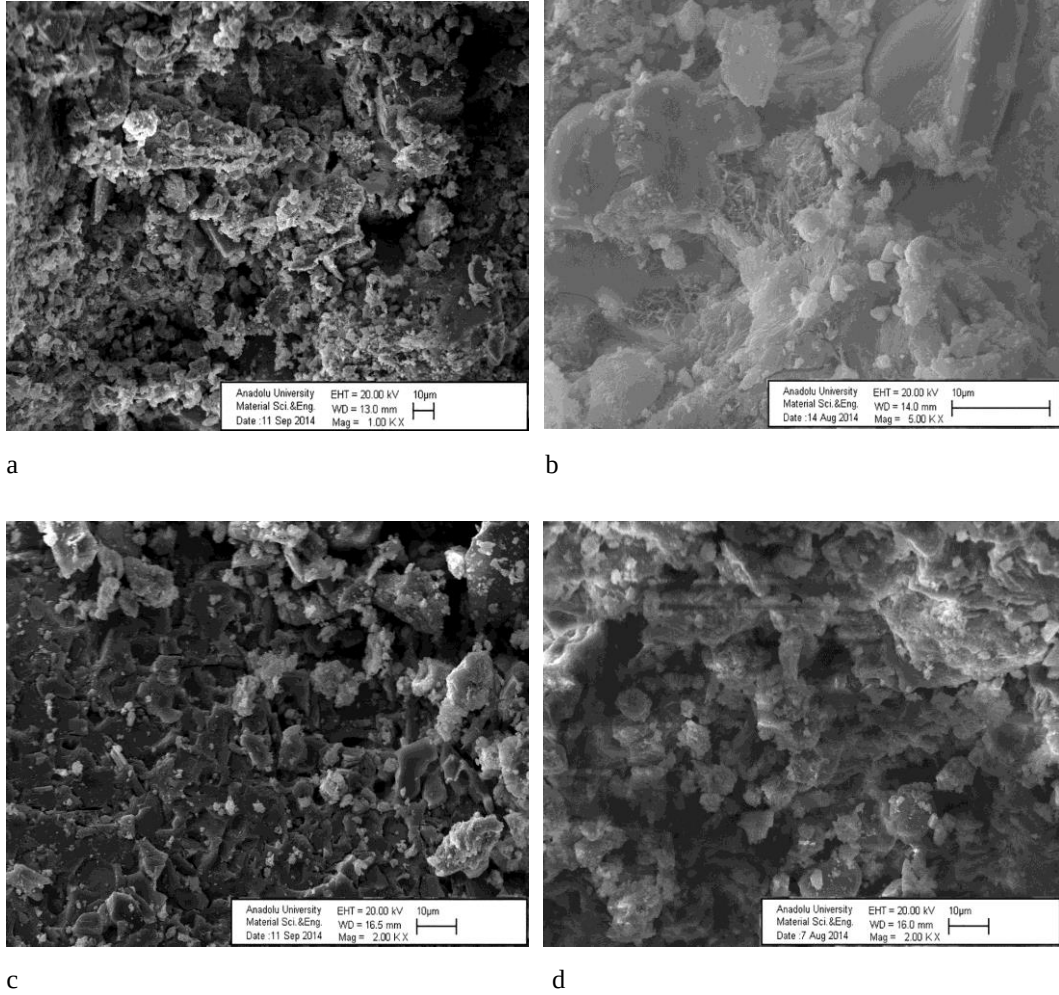
Katkısız çimento harcının SEM görüntüleri Şekil 6.33'te verilmiştir. B7 harcında hidrate olmamış çimento taneleri görülmektedir. Bu durum hidrasyonun tam olarak gerçekleşmediğini göstermektedir. C-S-H jeli yapısı ise çok fazla tanecikli ve topaklanmış formdadır. B7 harcındaki tanecikli C-S-H formu kabarık bir yapı oluştururken B28 harcında daha az tanecikli yapı yoğun C-S-H jeli oluşturmuştur. Daha yoğun jel yapısı basınç dayanımını arttırmıştır. Her iki harçta çubuk şeklinde etrenjit (AFt) oluşumları gözlenmiştir.



Şekil 6.33. Katkısız 7 ve 28 günlük harçların SEM görüntüleri a) B7, b) B28

Şekil 6.34'te farklı oranlarda SA katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri verilmiştir. SA1-7 harcında tanecikli ve topaklanmış yapıda C-S-H jeli oluşmuştur. SA1-7 ve SA4-7 harçlarındaki tanecikli C-S-H formu kabarık bir yapı oluştururken SA2-7 ve SA3-7 harçlarında daha yoğun C-S-H jeli az gözenekli bir

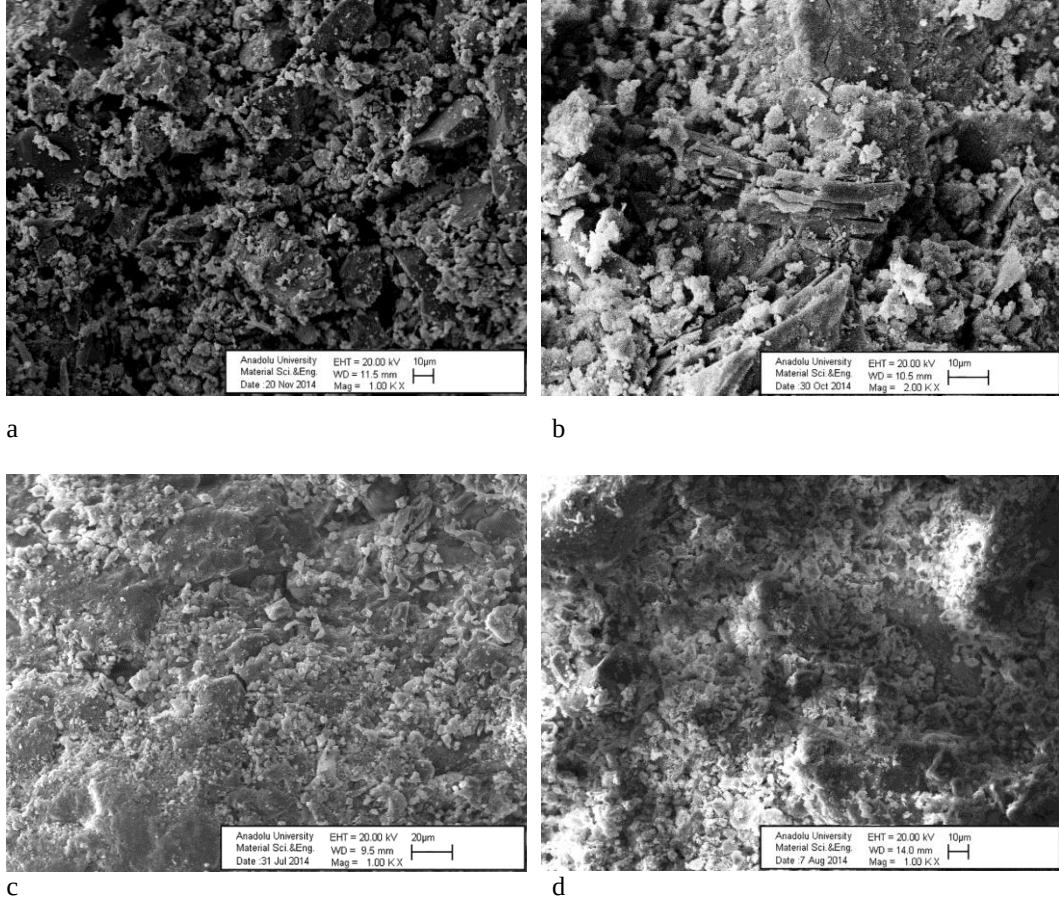
yapı oluşturmuştur. SA3-7 numunesinde görülen C-S-H yapısı ince folyo biçimli C-S-H yapısıdır (Ramachandran, 1996b) ; (Fernandez ve ark., 2013). Yoğun jel daha kompakt bir yapı oluşturmakla birlikte basınç dayanımını arttırmıştır.



Şekil 6.34. SA katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri a) SA1-7, b) SA2-7, c) SA3-7, d) SA4-7

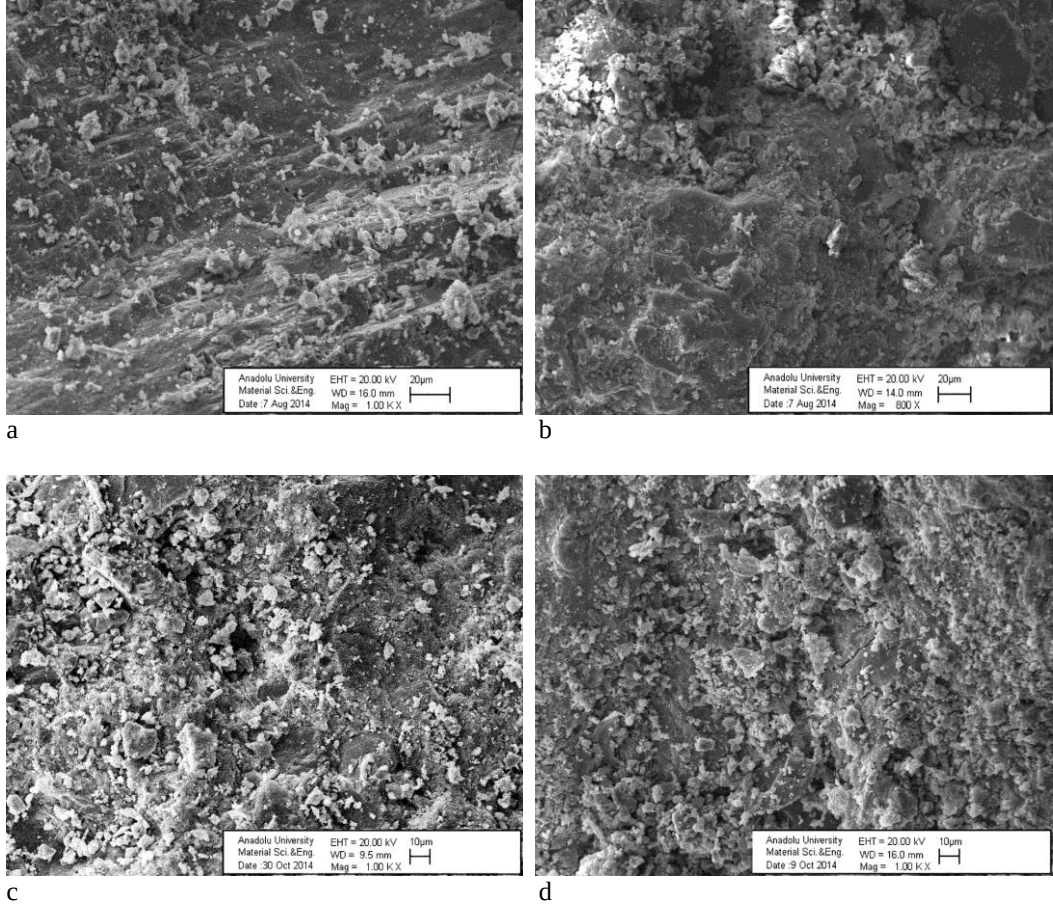
SA katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri Şekil 6.35’de görülmektedir. SA1-28 harcında C-S-H jeli yapısı çok fazla tanecikli ve topaklanmış formda ve tam bir C-S-H jeli oluşmamıştır. Topaklanmış C-S-H formu gözenekli bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Katkı oranının artması ile basınç dayanımı en yüksek olan SA2-28 numunesinde daha az gözenekli, yoğun C-S-H jeli oluşmuştur. SA3-28 numunesinde ise hidrate olmayan çimento

partikülleri gözlenmekte iken SA4-28 numunesinde topaklı C-S-H yapısı gözlenmiştir.



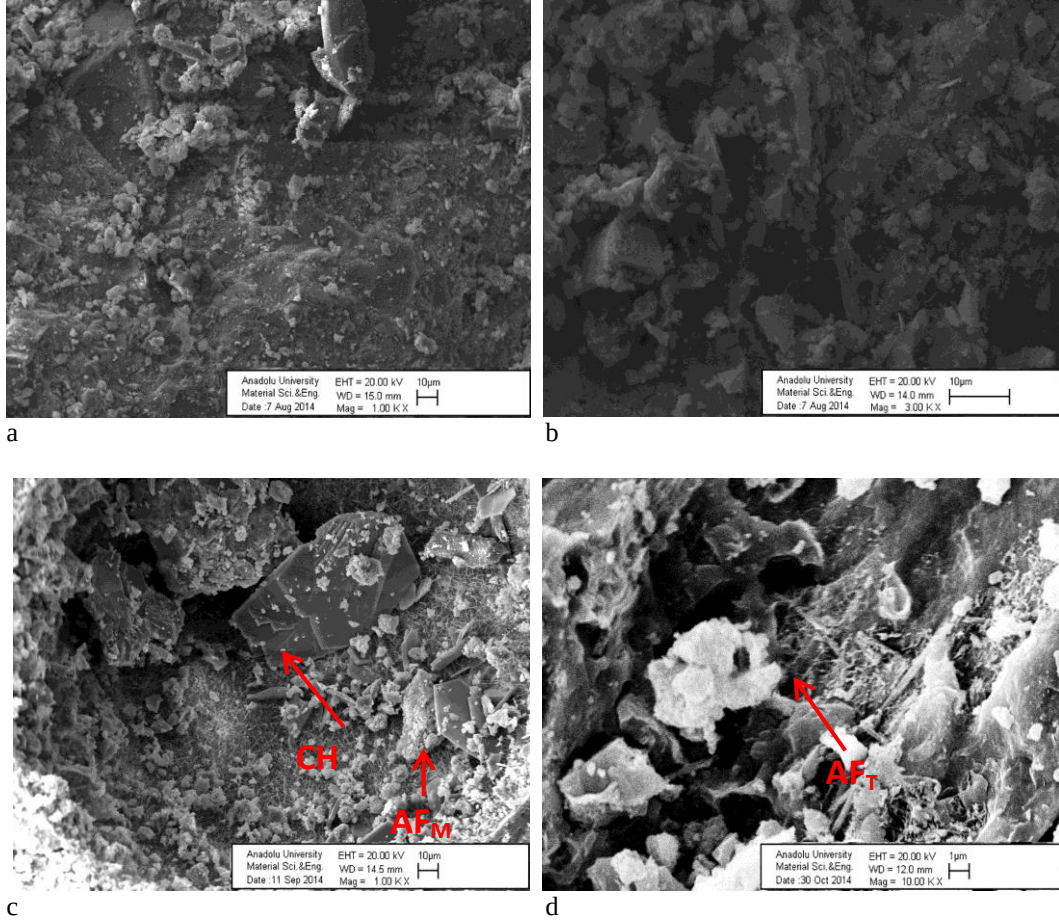
Şekil 6.35. SA katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri a) SA1-28, b) SA2-28, c)SA3-28, d) SA4-28

Şekil 6.36 SB katkılı 7 günlük harçların SEM görüntülerini göstermektedir. SB1-7 ve SB2-7 harçlarında gözenek oranı az kopakt bir yapı gözlenmiştir. Fakat SB1-7 harcında tam hidrasyonun oluşmadığı bir C-S-H yapısının olduğu belirlenmiştir. Katkı oranı artışı ile SB3-7 ve SB4-7 harçlarında oluşan tanecikli, topaklanmış C-S-H ve tam homojen olmayan bir yapı oluşmuştur. Buna bağlı olarak SB3-7 ve SB4-7 harçlarının basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir.



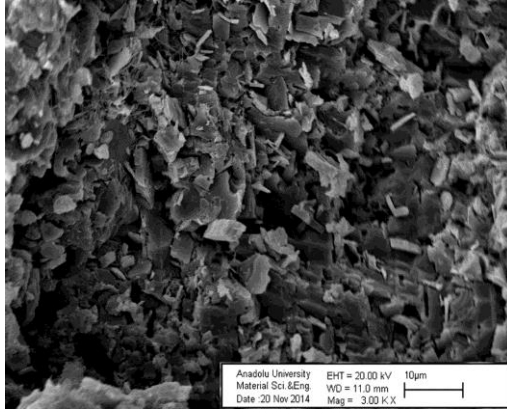
Şekil 6.36. SB katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri a) SB1-7, b) SB2-7, c) SB3-7, d) SB4-7

Şekil 6.37’de SB katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri verilmiştir. SB1-28 ve SB2-28 kopakt ve gözeneksiz bir beton yapısı oluşmuştur. Basınç dayanımının en yüksek olduğu SB2-28 numunesinde tam bir C-S-H jeli elde edilmiştir. Katkı oranı artışı ile SB3-28 ve SB4-28 harçlarında gözenekli bir yapı gözlenmiştir. SB3-28 numunesinde büyük gözenekli yapı görülmüştür. Gözeneklerin içinde düz plaka şeklinde portlandit (CH), ince çubuk şeklinde etrenjit (AFt) ve allıgen düzlem biçiminde monosülfat (AFm) yapıları gözlenmiştir (Ramachandran ve Beaudoin, 2000). Beton bünyesindeki gözeneklerin içinde oluşan etrenjit yapıları daha ileriki yaşlarda büyüyerek bünyede çatlak oluşumuna neden olup ve beton mukavemetini etkileyebilir.

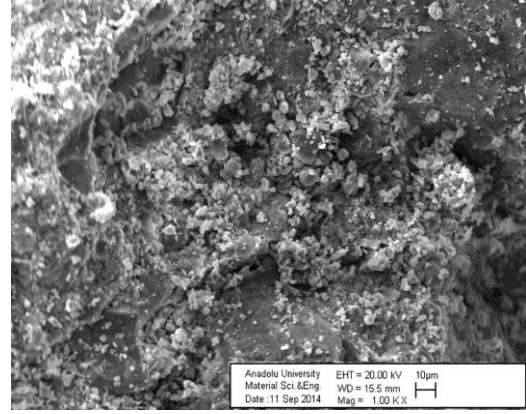


Şekil 6.37. SB katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri a) SB1-28, b) SB2-28, c)SB3-28, d) SB4-28

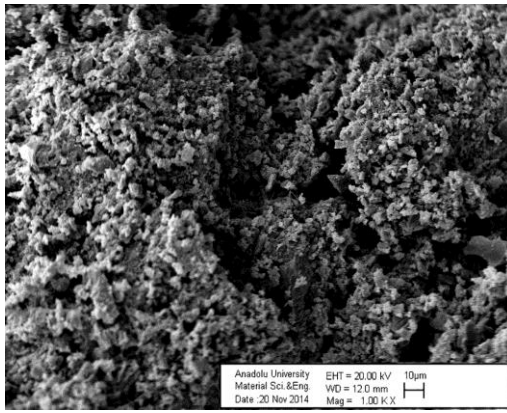
Şekil 6.38 SC katkılı 7 günlük harçların SEM görüntülerini göstermektedir. SC1-7 harcında tanecikli yapıda C-S-H jeli oluşmuştur. SC2-7 harcında kompakt ve yoğun bir yapı gözlenmiştir. Katkı oranı artışıyla gözenekli C-S-H yapısı gözlenmiştir. SC3-7 harcındaki tanecikli C-S-H formu oldukça kabarık ve geniş boşluklu bir yapı oluşmuştur.



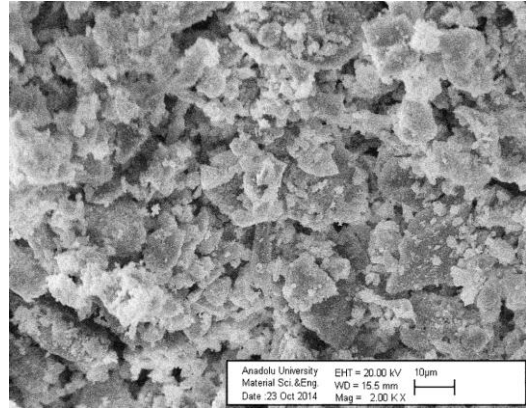
a



b



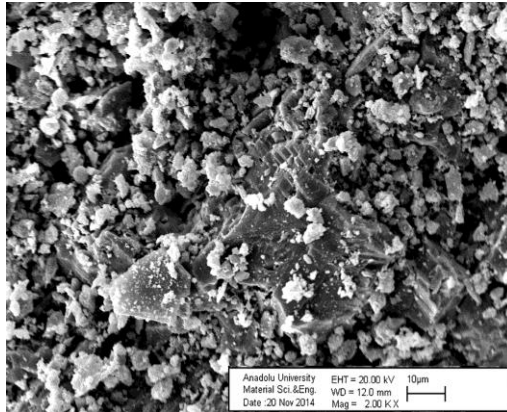
c



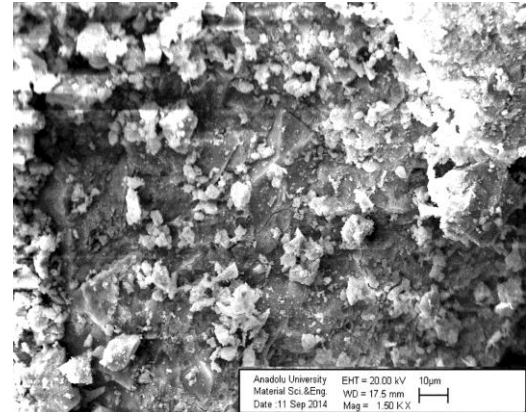
d

Şekil 6.38. SC katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri a) SC1-7, b) SC2-7, c)SC3-7, d) SC4-7

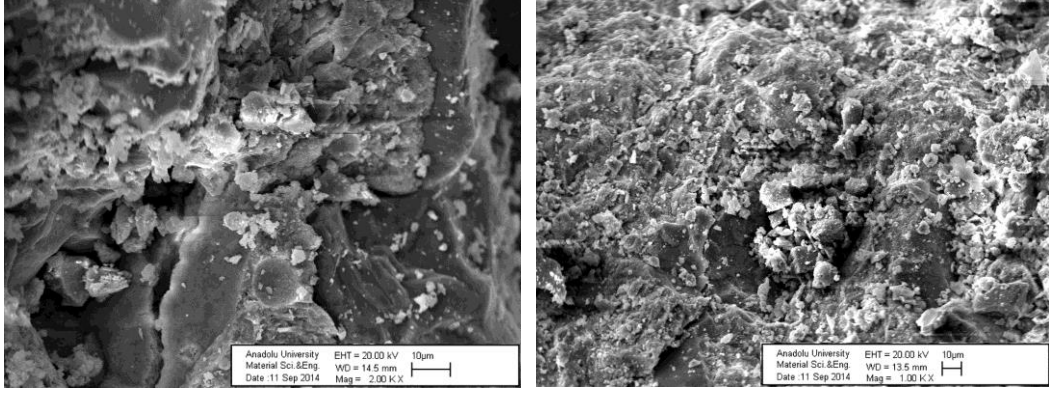
SC katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri Şekil 6.39’da görülmektedir. SC1-28 harcında tanecikli C-S-H jeli gözenekli ve kabarık bir yapı oluşmuştur (Qian ve ark., 2014). Katkı oranı artışıyla topaklanmış C-S-H yapısını azalarak daha yoğun jel yapısı gözlenmiştir.



a



b

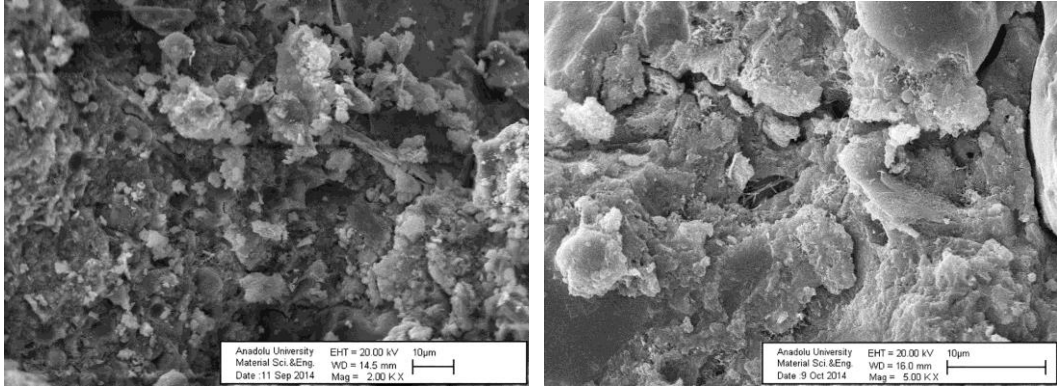


c

d

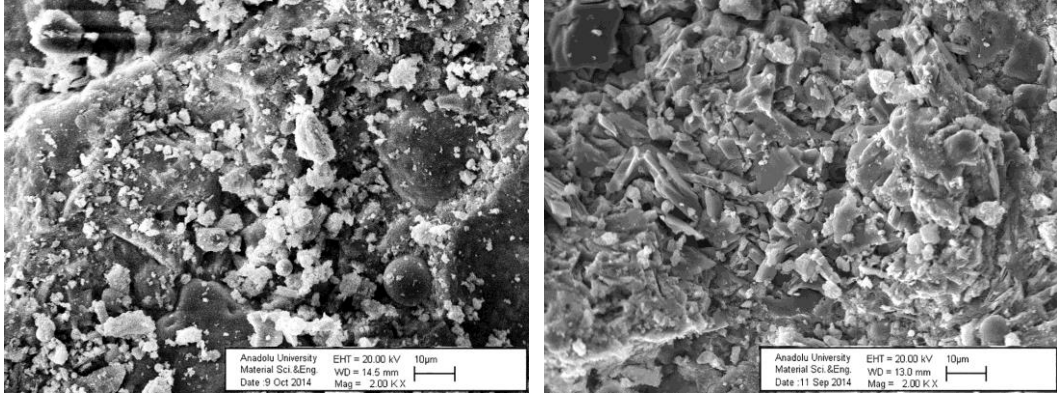
Şekil 6.39. SC katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri SC1-28, b) SC2-28, c)SC3-28, d) SC4-28

Şekil 6.40 SD katkılı 7 günlük harçların SEM görüntülerini göstermektedir. SD katkılı numunelerin hepsinde gözenekli olmayan kompakt yapı gözlenmiştir. SD1-7 harcında petek formunda, SD4-7 harcında ise pul şeklinde tanecikli C-S-H yapısı gözlenmiştir (Fernandez ve ark., 2013) ; (Qian ve ark., 2014). Çimento içeriğinde bulunan uçucu kül taneciklerinin gözenekleri tıkaması ile yoğun bir yapı elde edilmiştir (Tkaczewska, 2014).



a

b

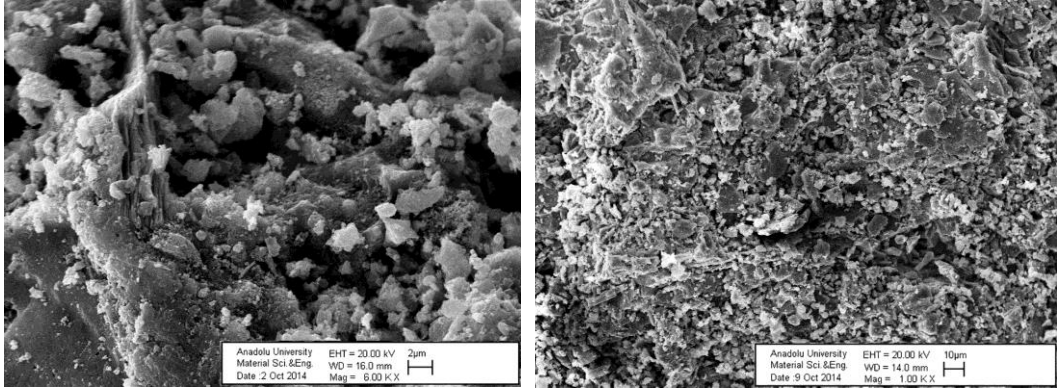


c

d

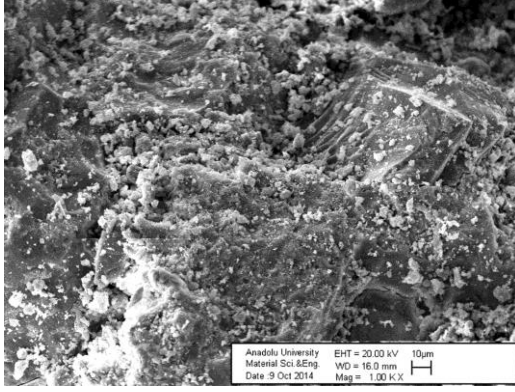
Şekil 6.40. SD katkılı 7 günlük harçların SEM görüntüleri SD1-7, b) SD2-7, c)SD3-7, d) SD4-7

Şekil 6.41’de SD katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri verilmiştir. SD1-28 numunesinde boşluklu ve gevşek bir yapı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça daha kompakt yapı oluşmuştur. Katkı oranı en yüksek SD4-28 harcında uçucu kül ile gözeneklerin doldurulduğu, oldukça yoğun ve geçirimsiz bir yapı elde edilmiştir.

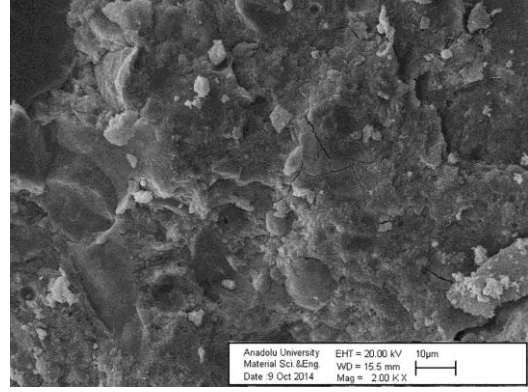


a

b



c



d

Şekil 6.41. SD katkılı 28 günlük harçların SEM görüntüleri a) SD1-28, b) SD2-28, c)SD3-28, d) SD4-28

7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Farklı katkı üreticilerinden elde edilen süper akışkanlaştırıcı katkıları taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkilemiştir. Genel olarak, katkı kullanımı kontrol betonu ile karşılaştırıldığında harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımını arttırmıştır. Katkı kullanılan numuneler katkısız kontrol betonuna göre daha işlenebilir olduğu gözlenmiştir. Çimento harcına eklenen katkı oranı arttıkça işlenebilirlik artmıştır. SA katkısı işlenebilirliği arttırmada en etkili katkıdır.
- İşlenebilirlik deneylerinde %1 ve %1,2 (g/g çimento) SA katkılı harçlar EFNARC standardının belirlediği sınırı geçmiştir ve kendiliğinden yerleşen beton harcı elde edilmiştir.
- %1,5 (g/g çimento) katkılı SA4 harcı yayılma testi sonunda en yüksek yayılma oranı vermesine rağmen, çimento harcında katkı dozajı artışıyla su kusması gözlenerek bu suyun beton bünyesini ile ayrılması sonucu homojenliğini kaybettiği belirlenmiştir.
- Kullanılan tüm süper akışkanlaştırıcılar belirli bir değere kadar katkı oranı artışıyla basınç dayanımını arttırmış fakat SA, SB ve SC katkılı harçlarda %1, SD katkılı harçlarda %1,2 oranından daha fazla katkı kullanımı basınç dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir.
- 7 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında SA2-7 harcı ile en yüksek değer elde edilirken, SB2-28 harcı ile en yüksek 28 günlük dayanım elde edilmiştir. Bu verilerin ışığında 7 günlük basınç mukavemetini arttırmada en etkili katkının %63'lük oranla SA katkısı, 28 günlük basınç mukavemetini arttırmada en etkili katkının %50 oranıyla SB katkısı olduğu bulunmuştur.
- SA, SB ve SC katkıları ile hazırlanan 7 ve 28 günlük harç numunelerinin en uygun katkı miktarı %1 (g/g çimento), SD harcı için %1,2 (g/g çimento) olarak belirlenmiştir.
- XRD analizlerinde katkısız 7 günlük numunelere kıyasla 28 günlük numunelerde hidratasyon ürünü olan portlanditin (Ca(OH)_2) azaldığı

görülmüştür. Portlandit şiddetinin azalması çimento bünyesindeki uçucu kül ile kalsiyum hidroksitin puzolanik reaksiyona girmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Puzolanik özelliğe sahip uçucu kül, hidrasyon ürünü olan kalsiyum hidroksiti zamanla bağlayarak yeni C-S-H jeline dönüştür ve bünyedeki boşlukları tıkar. Dolayısıyla zamana bağlı olarak dayanım ve dayanıklılık artmaktadır.

- XRD analizlerinde basınç dayanımının düşük olmasının C_2S pik şiddetleri ile ilişkili olduğu gözlenmiştir. Düşük şiddetteki C_2S pikleri basınç dayanımı yüksek olan harçlara görülmüştür.
- Portland çimentosunun FTIR spektrumundaki düzlem dışı ve düzlem içi Si-O açılı bükülme titreşimleri şiddetindeki değişimler polimerizasyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Si-O gerilme titreşim bantının daha yüksek banta geçişi çimento hidrasyonunda yüksek derece polimerizasyon sonucu C-S-H oluşumunun parmak izi kanıtıdır. Si-O bandındaki değişimler tüm çimento harçlarında aynı şekilde gerçekleşmiş olup harçtaki süper akışkanlaştırıcı katkı içeriğinden etkilenmemiştir.
- Polimerizasyon sonucu C-S-H jelini gösteren Si-O bandı, tüm numunelerde meydana gelen kayma ile SO_4^{2-} bandına gizlenmiştir. Si-O bandı SO_4^{2-} ile birlikte görülmesi C-S-H bandının görülmesine engel olmuştur.
- FTIR spektrumlarında basınç dayanımının yüksek olduğu harçlarda hidrasyon ürünü portlanditi ($Ca(OH)_2$) gösteren O-H gerilme titreşimi şiddetinin yüksek olduğu görülmüştür. Bazı numunelerde yüksek basınç dayanımı gözlenmesine rağmen gösteren O-H gerilme titreşiminin şiddetinin azalması çimento içeriğindeki uçucu külün portlandit ile puzolanik reaksiyonu sonucu olduğu söylenebilir.
- SEM görüntülerinde gözlenen tanecikli ve topaklanmış yapıdaki C-S-H jeli kabarık ve gözenekli yapı oluştururken yoğun şekilde gözlenen C-S-H jeli az gözenekli bir yapı oluşturmuştur. Yoğun jel yapısı daha kompakt ve geçirimsiz olmakla birlikte betonun basınç dayanımının artışında etkili olduğu belirlenmiştir.

- Gözenekli harç yapısındaki porların içinde etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Etrenjit gözenekli yapıda daha fazla oluşma eğilimindedir. Beton bünyesindeki porların içinde oluşan etrenjit yapıları daha ileriki yaşlarda büyüyerek bünyede çatlak oluşumuna neden olup ve beton mukavemetini etkileyebilir.
- Sonuç olarak çimento harcında uygun oranda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla, çimento hamurunun akış davranışını incelemek üzere yapılacak reolojik bir çalışma süper akışkanlaştırıcı-çimento uyumu araştırmasına katkı yapacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI 116R-90 (1990), American Concrete Institute, *Cement and concrete terminology*, Detroit, A.B.D.
- Alonso, M. M., Palacios M. ve Puertas, F. (2013), ‘Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes’, *Cement & Concrete Composites*, **35**, 151–162.
- Anagnostopoulos, C. A. (2014), ‘Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grouts’, *Construction and Building Materials*, **50**, 162–168.
- Andersen, P. J. ve Roy, D. M. (1988), ‘The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption on, and dispersion of cement’, *Cement and Concrete Research*, **18**, 980-986.
- Anonim (2014), SEM-Taramalı Elektron Mikroskopu,
http://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5874/tr
- Arslan, T. (2010), *X-Işınları ve kullanım alanları*, Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fizik Eğitim Anabilim Dalı, Ankara.
- ASTM C125-93 (1993), American Society for Testing Materials, *Standard definitions and terms relating to concrete and concrete aggregates*, Pennsylvania, A.B.D.
- ASTM C305-14 (2014), *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency* American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, A.B.D.
- Azizi, S. (2007), *Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bhat, P. A. (2013), ‘Study of structures and properties of silica-based clusters and its application to modeling of nanostructures of cement paste by dft methods’, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **43**, 1-11.
- Chandra, S. ve Bjornström, J. (2002), ‘Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars—Part I’, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1605– 1611.

- Collepari, M. (2005a), *Admixtures Enhancing Concrete Performance*, 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, U.K.
- Collepari, M. (2005b), *Chemical admixtures today*, Proceedings of Second International Symposium on Concrete Technology for Sustainable February - Development with Emphasis on Infrastructure, Hyderabad, India, 527-541.
- Değirmenci, A. (2006), *Silis dumanı katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Doğan, Ü. A. (2000), *Yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların harç ve beton özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B. ve Uçar, A. (2010), 'Uçucu kül katkılı çimento hidratasyonuna elektrokinetik özelliklerin etkisi', *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **25**, 449-457.
- EFNARC, (2002), 'Specification and guidelines for self-compacting concrete', United Kingdom.
- Erdoğan, T. Y. (2007), 'Yapı Malzemesi Olarak Beton', *Beton*, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Erdoğan, Ş. ve Kurbetçi, Ş. (2003), 'Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri', *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **426**, 115-120.
- Erzengin, S. G. (2010), *Kimyasal katkıların çimento bazlı malzemelerin dayanımına, reolojisine ve mikro yapısına etkileri*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Felekoğlu, B. ve Baradan, B. (2006), 'Akışkanlaştırıcı katkıların harçta su kesme performansı-mukavemet ilişkisine etkileri', *İMO Teknik Dergi*, **254**, 3869-3872.
- Felekoğlu, B. ve Sarıkahya, H. (2008), 'Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-

- compacting concrete', *Construction and Building Materials*, **22**, 1972–1980.
- Fernandez, J. M., Duran, A., Navarro-Blasco, I., Lanas, J., Sirera, R. ve Alvarez, J. I. (2013), 'Influence of nanosilica and polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars', *Cement and Concrete Research*, **43**, 12-24.
- Fiat, D., Lazar, M., Baci, V. ve Hubca, G. (2012), 'Superplasticizer polymeric additives used in concrete', *Materiale Plastice*, **49**, 62-67.
- Gołaszewski, J. (2012), 'Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance', *Construction and Building Materials*, **35**, 586–596.
- Gülcan, M. (2012), 'Anorganik kimyada spektroskopik yöntemler', Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Kılınç, K. (2010), *Betonarme yapı sistemlerinden alınan mikrokaret numunelerinin mekanik, fiziksel ve mikroyapı özelliklerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. ve Panarese, W. C. (1988), 'Admixtures for Concrete', *Design and Control Concrete Admixtures*, Portland Cement Association, Illinois, A.B.D., 105-119.
- Liu, X., Wang, Z., Zhua, J., Zhengb, Y., Cuia, S., Lana, M. ve Lia, H. (2014), 'Synthesis, characterization and performance of a polycarboxylate superplasticizer with amide structure', *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **448**, 119–129.
- Ma, B., Ma, M., Shen, X., Li, X. ve Wu, X. (2014), 'Compatibility between a polycarboxylate superplasticizer and the belite-rich sulfoaluminate cement: setting time and the hydration properties', *Construction and Building Materials*, **51**, 47–54.
- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Arıöz, Ö. ve Ramyar, K. (2013), 'Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials*, **47**, 1020–1025.

- Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M. (2001), 'Introduction to Concrete', *Concrete Microstructure, Properties and Materials*, Mc Graw Hill Education Series, A.B.D., 18.
- Mollah, M. Y. A., Palta, P., Hess, T. R., Vempati, R. K. ve Cocke, D. L. (1995), 'Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences', *Cement and Concrete Research*, **25**, 671-682.
- Mollah, Y.A., Yu, W., Schennach, R. ve Cocke, D. L. (2000), 'A fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate', *Cement and Concrete Research*, **30**, 267-273.
- Nasrazadani, S., Mielke, D., Springfield, T. ve Ramasamy, N. (2010), *Practical applications of FTIR to characterize paving materials*, University of North Texas, Technical Report 0-5608-1.
- Newman, J. ve Choo, B. S. (2003), *Advanced Concrete Technology*, Elsevier Science, UK, 3/3, 4/1-17.
- Özdemir, M. (2006), *Kayaç mukavemetinin beton dayanımına etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T. ve Grutzeck, M. W. (1999), 'Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin', *Cement and Concrete Research*, **29**, 997-1004.
- Prados, M. T., Pessqueira, M. L., Fontboa, B. G. ve Paz, S. S. (2013), 'Effect of polycarboxylate superplasticizers on large amounts of fly ash Cements', *Construction and Building Materials*, **48**, 628-635.
- Puertas, F. ve Fernandez-Jimenez, A. (2003), 'Mineralogical and microstructural characterization of alkali-activated fly ash/slag pastes', *Cement & Concrete Composites*, **25**, 287-292.
- Puertas, F., Santos, H., Palacios, P. ve Martinez-Ramirez, S. (2005), 'Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes', *Advances in Cement Research*, **17**, 77-89.

- Qian, Y., Chengjin, S., Shu, S., Rui, C. ve Hongjian, S. (2014), 'The sulfate corrosion resistance behavior of slag cement mortar', *Construction and Building Materials*, **71**, 202-209.
- Ramachandran, V. S. (1996a), 'Chemical Admixtures-Recent Developments', *Concrete Admixtures Handbook*, William Andrew Inc, Ottawa, Kanada, 137-184.
- Ramachandran, V. S. (1996b), 'Concrete Science', *Concrete Admixtures Handbook*, William Andrew Inc, Ottawa, Kanada, 1-66.
- Ramachandran, V. S. (1996c), 'Superplasticizer', *Concrete Admixtures Handbook*, William Andrew Inc, Ottawa, Kanada, 410-517.
- Ramachandran, V. S. ve Beaudoin, J. J. (2000), 'Concrete Science', *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, Noyes Publications, Canada, 1-62.
- Ramyar, K. (2007), 'Portland çimentosu-süper akışkanlaştırıcı katkı uyumunu etkileyen faktörler', *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyum ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 197-212.
- Ran, Q., Somasundaran, P., Miao, C., Liu, J., Wu, S. ve Shen, J. (2009), 'Effect of the length of the side chains of comb-like copolymer dispersants on dispersion and rheological properties of concentrated cement suspensions', *Journal of Colloid and Interface Science*, **336**, 624–633.
- Reese, J., Lenz, P., Zilch, K. ve Plank, J. (2013), 'Influence of type of superplasticizer and cement composition on the adhesive bonding between aged and fresh concrete', *Construction and Building Materials*, **48**, 717–724.
- Sağlık, A. (2014), *Beton ve kimyasal katkı teknolojisinde yeni gelişmeler ve standartlar*, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/12574.pdf>.
- Şahin, R., Taşdemir, M. A., Rüstem, G. ve Çelik, C. (2007), 'Taze beton özelliklerinin optimizasyonu', *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **38 (2)**, 127-135.
- Şahmaran, M., Christianto, H. A. ve Yaman, İ. Ö. (2006), 'The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars', *Cement & Concrete Composites*, **28**, 432–440.

- Thiruppathi, K. (2009), ‘Effect of fly ash and water in hydrated srpc-a fibr study’, *Applied Physics Research*, **1(2)**, 59-67.
- Tkaczewska E. (2014) ‘Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement’, *Construction and Building Materials*, **70**, 388–393.
- Topçu, İ. B., Demir, A. ve Boğa, R. A. (2004), ‘Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi’, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **434**, 38-40.
- TS EN 196-1 (2009), *Bölüm 1:Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2 (2013), *Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-3 (2000), *Bölüm 3 : Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turhan, O. (2008), *Bazı organik reaksiyonların ve metal ligant etkileşmelerinin Ft-İr ile eşzamanlı incelenmesi*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Türkel, S. ve Felekoğlu, B. (2004), ‘Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri’, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **6**, 77-89.
- Uğur, L. O. (2002), *Alkali-silika reaksiyonu*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uysal, M. ve Yılmaz, K. (2012), ‘Aşırı dozda akışkanlaştırıcı katkı kullanımının beton özelliklerine etkisi’, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **15**, 19-35.
- Wang, Y. (1995), *Microstructural study of hardened cement paste by backscatter scanning electron microscopy and image analysis*, Doktora tezi, Purdue University, Indiana, A.B.D.
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S. ve Matsuhisa, M. (2000), ‘Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer’, *Cement and Concrete Research*, **30**, 197–207.

- Yeğınobalı, A. ve Ertün, T. (2009), *Çimentoda standartlar ve mineral katkıları*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, Ankara.
- Yeniay, S. (2008), *Sulfonated styrene-co-maleic acid and its derivatives as superlasticizers in concrete*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğı Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ylmén, R., Jäglid, U., Steenari, B. M. ve Panas, I. (2009), ‘Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques’, *Cement and Concrete Research*, **39**, 433–439.
- Ylmen, R. ve Jaglid, U. (2013), ‘Carbonation of Portland cement studied by diffuse reflection fourier transform infrared spectroscopy’, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **7**, 119–125.
- Yılmaz, A. D. (2003) ‘Yeni kuşak hiper akışkankanlaştırıcı beton katkıları’ *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **426**, 125-126.