



**KAOLİN KULLANIMININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARÇLARIN DAYANIM VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İnş. Müh. Furkan ARSLAN
Yüksek Lisans Tezi

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Yapı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ

HAZİRAN 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAOLİN KULLANIMININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN
DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Furkan ARSLAN

172115104

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.05.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2019

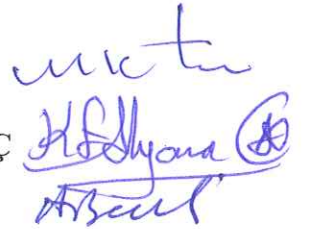
Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Danışman: Doç.Dr.Mehmet KARATAŞ

Doç.Dr.Kürşat Esat ALYAMAÇ

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet BENLİ



HAZİRAN-2019

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında bilgi ve birikimini aktaran ve bu dönemde bana daima güler yüzlülüğüyle destek olan, gösterdiği büyük sabır ve tavsiyeleriyle çalışmanın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan tez danışmanım saygıdeğer hocam, Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen yapı laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde katkılarından dolayı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Sayın Muhammed Ulucan'a, Bingöl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Sayın Ahmet Benli'ye, Arş. Gör. Sayın Bilal Balun ve Arş. Gör. Sayın Murat Dener'e, İnşaat Mühendisi Sayın Mehmet Hakan Kara'ya ve Sayın Serhat Güngören'e, kullanılan kaolinin temini konusunda herhangi bir bedel talep etmeyen Şişecam Kimyasallar Grubu'na, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Furkan ARSLAN

Elazığ-2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	6
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme	7
2.1.1. Çimento	7
2.1.2. Agregalar	8
2.1.3. Mineral Katkılar	9
2.1.4. Silis Dumanı	9
2.1.5. Uçucu Kül.....	10
2.1.6. Kimyasal Katkı.....	11
3. PUZOLANLAR (MİNERAL KATKI MADDELERİ).....	12
3.1. Doğal puzolanlar.....	12
3.2. Yapay Puzolanlar.....	13
3.3. Puzolanik Reaksiyon	13
3.4. Kaolin	14
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
4.1. Kullanılan Malzemeler	17
4.1.1. Çimento	17
4.1.2. Agregalar	18
4.1.3. Kaolin ve Kalsine kaolin	19
4.1.4. Kimyasal Katkı	20
4.1.5. Karışım Suyu	21
4.2. KYH Üretimi ve Yapılan Deneyler	21
4.2.1. Taze Harç Deneyleri.....	23
4.2.2. Mini Çökme Yayılma Deneyi	23
4.2.3. Viskozimetre Deneyi	24
4.2.4. Taze Betonun Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü	25
4.2.5. Sertleşmiş Harç Deneyleri	26
4.2.6. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi.....	26
4.2.7. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri	28
4.2.8. Kapiler Su Emme Deneyi.....	30
4.2.9. Yüksek Sıcaklık Uygulaması.....	31
4.2.10. Mikroyapı İncelemeleri	34
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	36
5.1. Taze Harç Deney Sonuçları.....	36
5.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları	36
5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları	38

5.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri Sonuçları.....	40
5.2.1. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı	40
5.2.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları	43
5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite	47
5.2.4. Mikroyapı İncelemeleri (SEM-XRD-EDX)	52
6. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ	69



ÖZET

Bu çalışmanın amacı mineral katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen harcın (KYH) dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Beton üretiminde yüksek dayanım, dayanıklılık ve optimum işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için hem taze hem de sertleşmiş harç özellikleri incelenmiştir. Mineral katkı maddelerinin (Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin vb.) çimento yerine ikame edilmesi harçların taze ve sertleşmiş özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Ayrıca yapılacak çalışmalarla çimento yerine ikame edilen mineral katkı malzemelerine yöresel anlamda yenilerini eklemek hem yöre hem de ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, KYH üretiminde normal agregası olarak 0-2 mm ve 2-4 mm dere agregası kullanılmıştır. Mineral malzeme olarak CEM I 42.5 N sınıfı portland çimentosu yerine %5, %10, %15 ve %20 oranında kaolin (K) ve %5, %10, %15 ve %20 oranında 600 °C'de 5 saat kalsine edilerek elde edilen kalsine kaolin (MK) kullanılmıştır. Serilerde, 630 kg/m³ toplam bağlayıcı malzeme ve 8 kg/m³ süper akışkanlaştırıcı (HTECH36) miktarı sabit tutulmuştur. Tüm harçlar 0.43 su/bağlayıcı oranında üretilmiştir. Biri kontrol numunesi olmak üzere toplamda 9 farklı harç numuneleri tasarlanmıştır. Tüm harçlarda kendiliğinden yerleşebilme özellikleri için taze haldeki KYH'lerin mini çökme yayılma, işlenebilirlik ve kıvam özellikleri için viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. KYH'lerin sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenebilmesi için de 5x5x5 cm küp numunelerine yoğunluk, porozite, toplam su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. 4x4x16 cm prizma numunelerine eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre mineral katkı kullanılan harçların taze haldeki özellikleri kendiliğinden yerleşebilirlik kriterlerine uymaktadır. Mineral katkı oranının artmasıyla harçların mekanik özellikleri azalmış ancak yüksek sıcaklığa karşı direnç artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Harç, Kaolin, Kalsine Kaolin, Yüksek Sıcaklık

SUMMARY

THE EFFECT OF KAOLIN USE ON THE STRENGTH AND DURABILITY PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTARS

The aim of this study is to investigate the effect of mineral additive use on the strength, durability and viscosity properties of self-compacting mortar (SCM). Both fresh and hardened mortar properties were investigated to determine the high strength, durability and optimum workability properties in concrete production. The substitution of mineral additives (silica fume, fly ash, blast furnace slag, kalsine kaolin etc.) for cement affects significantly the fresh and hardened properties of mortars. To add new ones also to the regional mineral additives that are replaced with cement will contribute both local and national economy.

In this study, river aggregate was used as normal aggregate in size of 0-2 mm and 2-4 mm in self-compacting mortar (SCM). %5, %10, %15 and %20 kaolin (K) and %5, %10, %15 and %20 calcined kaolin (MK) which were obtained by calcining at 600 °C for 5 hours were used as mineral material instead of CEM I 42.5 N type portland cement. In the series, the total amount of binder material of 630 kg/m³ and 8 kg/m³ superplasticizer (HTECH36) were kept constant. All mortars were produced at ratio of 0.43 water/binder. 9 different mortar samples including one control sample were designed. In all fresh SCMs, mini-slump flow for self compactibility and viscosity tests for workability and consistence were carried out. In order to determine the hardened properties of SCMs, density, porosity, total water absorption and capillary water absorption tests were performed on 5x5x5 cm cube samples. Flexural strength, compressive strength and high temperature tests were performed on 4x4x16 cm prismatic samples. According to test results, the fresh properties of the mortars with the mineral additive have complied with the criteria of self-compactibility. The flexural and compressive strength properties of the mortars have been decreased with the increase of the mineral additive ratio, but the resistance to high temperature have been increased.

Keywords: Self-Compacting Mortar, Kaolin, Calcined Kaolin, High Temperature

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Normal betonla KYB'nin karşılaştırılması [5].....	8
Şekil 3.1. Kaolin [46].	14
Şekil 3.2. Kaolinitin şematik yapısı [46].....	15
Şekil 4.1. 0-2 mm ve 2-4 mm dere agregası.....	18
Şekil 4.2. Agreganın granülometrisi	19
Şekil 4.3. Kaolin ve kalsine kaolin.....	19
Şekil 4.4. Mini çökme yayılma konisi ve yayılma çapının ölçümü	23
Şekil 4.5. Mini çökme yayılma deneyi düzeneği	24
Şekil 4.6. Brookfield DV-E model viskozimetre	25
Şekil 4.7. a) XPS'den yapılmış küp kalıpları, b) Prizmatik kalıplar, c) Kür uygulaması ...	26
Şekil 4.8. Üç noktalı eğilme deneyi	27
Şekil 4.9. Basınç dayanım deneyi	27
Şekil 4.10. Basınç kırılması.....	28
Şekil 4.11. Arşimed terazisi	29
Şekil 4.12. Etüvde kurutulmuş numuneler	29
Şekil 4.13. Yan yüzeyleri izole edilen küp numuneleri	31
Şekil 4.14. Numunelerin su emmesi.....	31
Şekil 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklıktan önceki durumu	32
Şekil 4.16. Numunelerin yüksek sıcaklıktan sonraki durumu.....	32
Şekil 4.17. Sıcaklığa maruz bırakılan numunede rötre çatlakları.....	33
Şekil 4.18. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin eğilme ve basınç deneyi.....	33
Şekil 4.19. SEM (Scanning electron microscope).....	34
Şekil 4.20. XRD (X-ray diffractometer) test cihazı	35
Şekil 5.1. Bağlı çökme yayılma grafiği	37
Şekil 5.2. Kaolin içeren harçların viskozite değerleri	39
Şekil 5.3. Kalsine kaolin içeren harçların viskozite değerleri.....	39
Şekil 5.4. KYH'lerin eğilmede çekme dayanımları	41
Şekil 5.5. KYH'lerin basınç dayanımları	42
Şekil 5.6. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımları.....	44

Şekil 5.7. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları	45
Şekil 5.8. Kapiler su emme katsayıları.....	48
Şekil 5.9. 5x5x5 cm küp numunelerinin toplam su emme oranları.....	51
Şekil 5.10. 5x5x5 cm küp numunelerinin porozite oranları	52
Şekil 5.11. SEM görüntüleri 3000X a)Kontrol numunesi, b)K20, c)MK20	53
Şekil 5.12. XRD analizleri a)Kontrol numunesi, b) Toz kaolin, c) Toz kalsine kaolin, d)Kalsine kaolin numunesi	54
Şekil 5.13. SEM/EDX analizleri a) Kontrol numunesi, b)K20, c) MK20	56



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Dünya’da kaolin rezervleri [49].	16
Tablo 4.1.	CEM I 42.5 N portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	17
Tablo 4.2.	CEM I 42.5 N portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	18
Tablo 4.3.	Kaolinin fiziksel özellikleri	20
Tablo 4.4.	Kaolinin kimyasal özellikleri.. ..	20
Tablo 4.5.	Kimyasal katkıya ait özellikler.....	20
Tablo 4.6.	Karışım oranları.....	22
Tablo 5.1.	Mini çökme yayılma deney sonuçları	37
Tablo 5.2.	Harçların farklı açısız hız değerleri için viskozite değerleri	38
Tablo 5.3.	Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri	40
Tablo 5.4.	Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımları.....	44
Tablo 5.5.	Yüksek sıcaklık altında eğilme ve basınç dayanım kayıpları (%)	46
Tablo 5.6.	KYH numunelerinin etüv kurusu, su içindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları	49
Tablo 5.7.	5x5x5 cm küp numunelerinin yoğunlukları	50
Tablo 5.8.	5x5x5 cm küp numunelerinin toplam su emme ve porozite değerleri	50

SEMBOLLER LİSTESİ

I_m	: Bağlı çökme yayılma değeri
K	: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm/s}^{1/2}$)
Q	: Emilen su miktarı (cm^3)
A	: Su ile temas eden alan (cm^3)
T	: Geçen zaman (s)
A	: Su ile temas eden alan (cm^2)
W_1	: Etüv kurusu ağırlık
W_2	: Su içindeki ağırlık
W_3	: Doygun kuru yüzey ağırlık

KISALTMALAR LİSTESİ

KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYH	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
PÇ	: Portland Çimentosu
UK	: Uçucu Kül
SD	: Silis Dumanı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations
C ₃ A	: Trikalsiyum alüminat (3CaOAl ₂ O ₃)
CH	: Kalsiyum Hidroksit (Ca(OH) ₂)
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat Jel (xCaOSiO ₂ .yH ₂ O)
CaCO ₃	: Kalsiyum Karbonat
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
CaO	: Kalsiyum Oksit

1. GİRİŞ

Geleneksel beton, belirli oranlarda çimento, agrega ve su ile karıştırılıp elde edilen ve en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Üretim kolaylığı, işlenebilirlik, durabilite, yüksek basınç mukavemeti ve düşük çekme dayanımının çelik donatılarla iyileştirilebilme özelliklerinden dolayı betona yapı malzemesi anlamında dün, bugün ve yarının teknolojisi diyebiliriz. Ancak, günümüz şartlarında geleneksel betonun yapı malzemesi olarak istenilen özelliklerin tümünü karşılayamaması ve mevcut özelliklerinin daha fazla geliştirilmesi için kimyasal ve mineral katkılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda geleneksel betonun yerine özel betonlar tasarlanıp üretilmeye başlanmıştır.

Taze haldeyken işlenebilirlik ve kıvam, priz alıp mukavemet kazanınca ise dayanım ve durabilite betondan istenen en önemli özelliklerdir. Ayrıca çok fazla miktarda kullanıldığı için betonun en ekonomik şekilde tasarlanması gerekir. Performansı yüksek ve ekonomik bir beton ancak belirli kurallar ve standartlar çerçevesinde kaliteli malzemeler ve nitelikli işçilerle elde edilebilir [1]. Betondan istenilen özellik; kısa süreli değil, servis ömrü boyunca fiziksel, kimyasal ya da mekanik etkilere karşı durabil olmasıdır. Betonun bu etkilere karşı durabil olması için öncelikle betonun homojen yapıda olması, düşük su/bağlayıcı oranına sahip olması ve boşluk miktarının az olması gerekir.

Betondan istenilen dayanım ve dayanıklılık (durabilite), betonun tasarım aşamasından servis ömrünü tamamlayana kadar azami hassasiyet gösterilmesiyle mümkündür. Özellikle beton taze haldeyken kür koşullarına ve vibratör uygulamasına dikkat edilmesi gerekir. Ancak yeni yönetmeliklerle gelen birleşim yerlerindeki ve güçlendirme projelerindeki donatı sıklığı vibratör kullanılmasının neredeyse imkansız hale getirmesi, vibratörün kullanılabildiği kısımlarda da işçinin standartlara uygun hareket etmemesi ve gürültü kirliliğinden dolayı bu sorunların teşkil etmeyeceği bir beton türüne ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel betonun taze haldeki yüksek işlenebilirliği su/bağlayıcı oranın yüksek olmasıyla elde edilirdi ancak bu da dayanımı düşüreceğinden, bizi farklı alternatiflere yöneltmiştir. Teknolojiyle eşdeğer gelişme gösteren beton teknolojisinin, yüksek oranda su azaltma yeteneğine sahip akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyici gibi kimyasal katkıları sayesinde yüksek dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirliği mümkün kılmasıyla yüksek

performanslı beton olarak kabul edilen kendiliğinden yerleşen veya sıkışan beton terimi ortaya çıkmıştır.

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), vibrasyon yapılmadan kalıbına yerleştirilen ve sıkıştırılan betonlar olarak tanımlanmaktadır. KYB'ler konuldukları kabın içerisine yüksek akışkanlıklarından dolayı herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan kendi ağırlıklarıyla boşluksuz bir şekilde yerleşir, donatının etrafını sıkıca sarar ve beton porozitesini düşürüp kalıbı doldurur [2].

Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre yüksek akışkan özelliği hiperakışkanlaştırıcılarla (kimyasal) ve çimento hamurunun ayrışmaya karşı daha dirençli olması, silis dumanı, kaolin, metakaolin, uçucu kül, kuvarz gibi puzolanlarla (mineral katkıları) sağlanmaktadır.

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan ancak nemli ortamda kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) kimyasal tepkimeye girdiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Çimentonun yerine belirli oranlarda puzolan kullanılarak yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Son yıllarda puzolan olarak sıkça kullanılmaya kullanılan malzemelerden biri de kaolindir. Ancak, yapı malzemesi anlamında literatürde yeteri kadar kaolin ile ilgili çalışma yer almamaktadır. Daha çok literatürde kaolinin 500-800 °C arasında kalsine edilmesiyle oluşan metakaolin yer almaktadır. Bir kil türü olan kaolin sahip olduğu kristal yapısı nedeniyle kaolenit grubu içerisinde yer alır. Metakaolin, saflaştırılmış kaolinin kalsine edilmesiyle oluşan beyaz renkli, amorf yapıda yapay bir puzolandır. Metakaolin ilk olarak 1960'lı yıllarda çimento harcında mineral katkı (puzolan) olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllardan sonra harç içerisinde puzolanik ve yüksek durabilite özelliklerinden dolayı beton teknolojisinde yerini almış ve kullanımı yaygınlaşmıştır [3]. Literatürde metakaolinin betonun mekanik özelliklerine olumlu katkıda bulunduğu, sünme ve rötre çatlaklarını azalttığı, yüksek puzolanik özellik gösterdiği görülmüştür. Son yıllarda puzolanik özelliğinin yüksek olmasından dolayı metakaolin, yapı malzemesinde daha çok KYB'lerin harç fazlarında çalışılmıştır.

Shafiq vd. [4], yüksek derecede reaktif metakaolin oluşturmak için kalsinasyon sıcaklığı ve süresinin Malezya kaolini üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 600-800 °C arası sıcaklıklarda 1-5 saat boyunca kalsinasyon işlemi uygulanmıştır. Kaolini yüksek reaktif metakaoline dönüştürmek için en uygun kalsinasyon sıcaklığı ve süresini 800 °C'de

3 saat olarak belirtmişlerdir. Kalsine kaolin çimento yerine bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığında optimum kalsine kaolin oranını %15 olarak belirlemişlerdir.

2009 yılında, Péra ve arkadaşları [5], puzolanik aktivite ile dehidroksilasyon derecesi arasındaki ilişkiyi 650-850 °C arasında 0.5, 0.75, 1, 5 ve 15 saat süre ile ham kaolini kalsine ederek araştırmışlardır. % 95'in üzerinde dehidroksilasyon derecesi ile en yüksek puzolanik aktivitenin elde edildiğini ve uzun kalsinasyon sürelerinin (5-15 saat) puzolanik aktiviteyi azalttığını bildirmişlerdir.

Balczár vd. [6], geopolimer harç üretimi için bağlayıcı bir malzeme üretmek amacıyla Çek kaolini üzerinde mekanokimyasal (öğütme süresi, malzemenin öğütülen malzemeye kütlece oranı ve devir hızı) ve termal aktivasyon (kalsinasyon) metodlarını uygulayarak 2 farklı aktifleştirici kaolin yöntemini karşılaştırmışlardır. Mekanokimyasal aktivasyon metodunda en yüksek basınç dayanımının; 1:11 kütle oranı, 500 rpm devir hızı ve 75 dakika öğütme süresi ile 44.5 MPa, termal aktivasyon metodunda en yüksek basınç dayanımının; 700 °C'de 1 saat kalsinasyon ile 43 MPa olduğunu belirtmişlerdir.

Xu vd. [7], kağıt sanayisinden kaolin yan ürünlerinin kalsinasyonu ile puzolanik aktivitelerini ve kalsinasyon işlemleri sonucunda elde edilen metakaolinin çimento ile %0-25 oranında yer değiştirilmesiyle harçların 3, 7 ve 28 gün sonunda eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Yüksek reaktivite metakaolin dönüşümü için optimum kalsinasyon koşulunun 750 °C'de 2 saatlik kalsinasyon süresi olduğunu, eğilme ve basınç dayanımları için optimum metakaolin oranının %15 olduğunu bildirmişlerdir.

Kenai vd. [8], yüksek puzolanik aktiviteye sahip metakaolin elde etmek için Cezayir kaolinin kalsinasyon sıcaklığını ve süresini araştırmışlar ve sonuç olarak maksimum puzolanik aktiviteyi, kaolini 850 °C'de 3 saat kalsine ederek elde etmişlerdir. Kalsinasyon sonucu oluşan metakaolin harç içerisinde %10 oranında çimento yerine kullanıldığında hem hidratasyon ısısının hem de basınç dayanımının arttığını ve daha iyi asidik direnç gözlemlendiğinden, dayanıklılığın da arttığını belirtmişlerdir.

Bir çalışmada [9], aynı kütledeki Kamerun kaolini numuneleri 700 °C'de 30 dakika ile kalsinasyon oranı (1, 2.5, 5, 10, 15 and 20 °C/dak) değiştirilerek iyileştirilmiştir. Sonuç olarak, kaolinin kalsinasyon oranı arttıkça priz süresi artmış (226 dak (1 °C/dak)–773 dak (20°C/dak)), basınç dayanımı azalmıştır (49.4 MPa (1 °C/dak)–20.8 MPa (20°C/dak)).

Alujas ve arkadaşları [10], düşük dereceli kaolinitik kilin (Küba) puzolanik reaktivitesinde termal aktivasyon (kalsinasyon) sıcaklığının (500-1000 °C) etkisini araştırmışlar ve aktivasyon sıcaklığının artmasıyla puzolanik reaktivitenin arttığını ancak

900 °C üzerinde tekrar kristallenmenin oluşması, 800-900 °C arasında da spesifik yüzey alanının azalması puzolanik reaktivitenin artmasına engel olmuştur. En yüksek puzolanik reaktiviteye 800 °C’de kalsine edildiğinde ulaşılmıştır.

Kalsine killerde yapılan çalışmaların çoğu, spesifik kil mineralleri (özellikle kaolinit, montmorillonit ve illit), kalsinasyon sıcaklıkları ve puzolanik reaktivite arasındaki ilişkiye odaklanır. Bu çalışmalar, kaolinitin en yüksek puzolanik aktiviteye ve daha düşük bir aktivasyon sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir; oysa illit, karma tabaka illit/smektit ve sepiyolitler, yüksek kalsinasyon sıcaklıklarında bile, sadece orta ile düşük puzolanik reaktivite sergilemektedir [11-13].

Vizcayno vd. [14], metakaolin içerikli beton ve harçların mekanik özellikleri üzerine Kolombiya kaolinin kalsinasyon sıcaklıklarının etkisini araştırmışlar ve Kolombiya kaolinin yüksek reaktif metakaolin elde etmek için elverişli bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlar en uygun kalsinasyon sıcaklığının 700-800 °C arasında olduğunu ve özellikle kaolin 800 °C’de ısıtıldığında 28 gün sonra puzolanik aktivitesi %115 artan bir metakaolin oluşacağını göstermiştir.

Elimbi vd. [15], 450-850 °C arasında kalsine edilen kaolinit killlerinden üretilen geopolimer çimento pastalarının bazı mekanik özelliklerini (lineer rötre, priz süresi ve basınç dayanımı) araştırmışlardır. Sonuç olarak, 500-700 °C arasında kalsinasyon sıcaklığının artmasıyla priz süresinin azaldığını, 700 °C’nin üzerinde arttığını, lineer rötrenin 700 °C’de 21 ve 28 gün arasında en düşük değeri aldığını, 700 °C’nin üzerinde artmaya başladığını ve kaolinit killlerinin 500-700 °C arasında kalsinasyon sıcaklığının artmasıyla sertleşmiş geopolimer çimento pastalarının basınç dayanımının arttığını ama 700 °C üzerinde azaldığını belirtmişlerdir.

KYB’nin geleneksel betondan, hacimce %30 oranında daha az iri agrega içermesi KYB’nin harç karakteristiklerini daha etkin kılmaktadır ki aynı zamanda harçta deney yapmak daha kolaydır [16]. Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özellikleri harç fazı ayrıştırılmadan da incelenebilmektedir [17]. Ancak, beton içerisindeki agrega taneleri reolojik özellikleri önemli ölçüde etkilemekte ve büyük değişimlere sebep olmaktadır. Bunların sonucunda harçlar KYB’nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) incelenmesiyle değerlendirilmektedir. KYH’lerin özelliklerinin değerlendirilmesinin KYB tasarımının bütünleşik bir parçası olduğu belirtilmektedir [18].

Bu sebeple, bu tez çalışmasında kaolin ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış kaolin (kalsine kaolin) kullanımının kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kaolin ham olarak Bilecik yöresinden Şişecam Kimyasallar Grubu aracılığıyla temin edilmiştir. Ham kaolin laboratuvar ortamında 600 °C’de 5 saat kalsine edilmiştir. Öncelikle kaolin ve kalsine kaolin 105 °C’de kurutulduktan sonra yeterli inceliğe (<0.125 mm) ulaşana kadar bilye tipi değirmende öğütülmüştür. Harç karışımlarının bir aşamasında %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında çimento yerine kaolin ikame edilmiş ve sırasıyla KN (kontrol numune), K5, K10, K15 ve K20 olarak adlandırılmıştır. Harçların diğer aşamasında ise %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında çimento yerine kalsine kaolin ikame edilmiş ve sırasıyla MK5, MK10, MK15 ve MK20 olarak adlandırılmıştır. Su/bağlayıcı oranını belirlemek için harçlara mini-çökme yayılma deneyleri yapılmış ve harçların akışkanlığı EFNARC (European Federation of National Trade Associations) standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. Tüm harç karışımlarının yayılma çapı 240-260 mm arasında tutulmuş ve su/bağlayıcı oranı 0.43 olarak belirlenmiştir [19]. Her seriden üçer numune olmak üzere 40x40x160 mm boyutunda prizmatik ve 5x5x5 cm boyutunda küp harç numuneleri hazırlanmıştır. Prizmatik numunelerin 3, 28 ve 90 gün boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıkta havuzlarda kür edildikten sonra 3 noktalı eğilme ve basınç dayanımları, bunlara ek olarak 28 günlük kür sonunda 300 °C, 600 °C, 900 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki dayanımları hesaplanmıştır. Harçların mini-çökme yayılma ve viskozite ölçümleri yapılarak taze harç özellikleri belirlenmiştir. Her seriden 5x5x5 cm boyutunda 3’er küp numunesi hazırlanmıştır. Küp kalıpları, XPS (Ekstrüde Polistiren) yalıtım malzemesinden yapılmış olup, sertleşmiş harçların 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda su emme, kapiler su emme, porozite, yoğunluk değerleri ölçülerek dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

Kendiliğinden Yerleşen Beton (SCC), kendi ağırlığıyla donatının yoğun olduğu ve vibratörün ulaşmasının zor olduğu kesitlere yerleşen, herhangi bir uygulama olmadan sıkışan, dayanım kazanıncaya kadar terleme ve ayrışma sorunları yaratmadan stabilitesini koruyan akışkanlığı yüksek özel bir beton türüdür [20].

Gelenksel betonda karşılaşılan en büyük kalıcılık problemlerden biri de sıkıştırma işlemindeki hatalardır. Bu hatalar genelde işçi kaynaklı olsa da yeterli işlenebilirliğe sahip olmayan betonun homojen sıkıştırılması da mümkün değildir. Betonun kalıcılık problemlerinin aşılması ve sıkıştırılması işleminde işçilik hatlarının en aza indirilmesi amacıyla Japonya’da 1986 yılında araştırmacı Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Okamura’nın çalışmalarını Ozawa, Ouchi ve Maekawa’nın çalışmaları izlemiştir.

KYB’nin geliştirilmesinde birincil amaç, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde daha yüksek performansı bulabilmektir [21]. Kendiliğinden yerleşen betonda yüksek derecede akışkan özellik istenir. Bu durum geleneksel betonda su/çimento oranının yüksek tutulmasıyla sağlanır ancak bu da betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkileyecektir. Teknolojinin gelişmesiyle üretilen yeni nesil hiperakışkanlaştırıcı katkıları sayesinde düşük su/çimento oranında işlenebilirliği yüksek beton karışımı tasarlamak mümkün olmuştur. Ayrıca betonun yüksek akışkanlığa sahip olması viskoziteyi düşürmekte, bu da betonda ayrışma, terleme problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırarak betonun kararlılığını korumak adına viskozite düzenleyici ve/veya mineral katkıları kullanılmaktadır.

KYB’nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri, karışımda yer alan malzemelerin miktarına ve tipine göre önemli değişiklikler gösterir. Bu hassasiyet, KYB üretiminin, dökümünün ve bakımının daha dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Karışımda yer alacak her malzeme farklı bir özellik göstereceğinden, KYB üretiminde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu özelliklerin bilinmesi ile ancak optimum karışım oranları belirlenebilir [22].

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme

KYB’de kullanılacak malzemelerin belirlenmesi, geleneksel betona göre daha fazla tecrübe ve bilgi birikimi gerektirir. Çünkü, KYB’den prizini alıncaya kadar beklenen performans, geleneksel betona göre daha farklılık göstermektedir. Örneğin, akışkan yapıda olan bir KYB, sertleşinceye kadar terlemeye ve ayrılmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Su/bağlayıcı oranını arttırmak, şekil değiştirmeyi arttırabilir ancak kohezyonu azaltarak betondaki akışı olumsuz yönde etkilemesi ile agrega ayrışmasına (segregasyon) neden olabilir [23].

KYB tasarımı amaca uygun malzeme seçilmeli ve uygun deney metodlarıyla deneme karışımları yapılmalıdır. Kendiliğinden yerleşme yeteneği üç değişken ile belirlenir;

- Doldurma yeteneği (beton döküldüğü kalıbı boşluksuz bir şekilde doldurmalıdır)
- Ayrılmaya karşı direnç
- Geçiş yeteneği (Özellikle yoğun donatılı elemanlarda önemlidir) [24].

Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betondan en önemli farkı yüksek akışkanlığa sahip olmasıdır. Akışkanlığın artırılması akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları ile sağlanmaktadır. Akışkanlaştırıcı miktarının fazla olması taze betonun viskozitesini ve kohezyonunu düşürür. Dolayısıyla taze betonun karışım suyundaki ve agrega gradasyonundaki değişkenliklere hassasiyeti artmaktadır [25].

2.1.1. Çimento

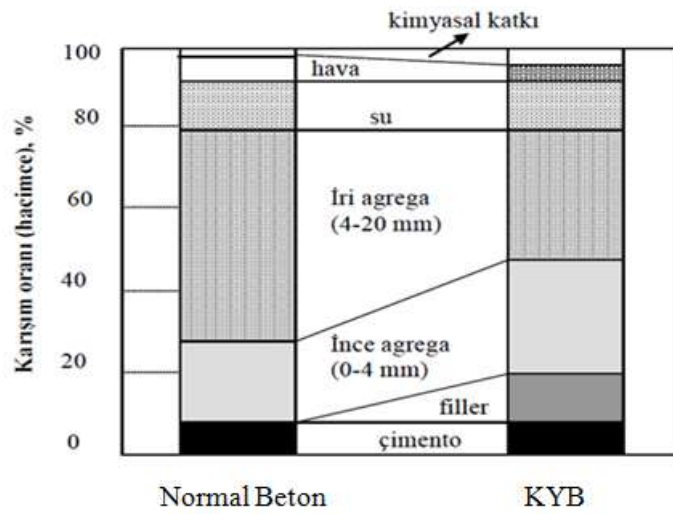
Çimento tipi seçiminde, C_3A (kalsiyum alüminat) oranı %10’dan fazla çimentoların kullanılmaması öngörülmektedir. Çünkü C_3A miktarının artmasıyla, hızlı etrenjit oluşumu ve hidratasyon ısısının etkisiyle suyun buharlaşmasına, bundan dolayı da işlenebilirlikte düşüş olmasına neden olur. Suyun buharlaşması sonucu KYB’nin yerleşebilme, doldurabilme ve sıkışabilme yeteneklerinde sorunlar oluşur. KYB’ da çimento içeriğinin $350-450 \text{ kg/m}^3$ arasında olması önerilmektedir. 500 kg/m^3 ’ün üzerindeki çimento dozajı betonda rötreye sebep olabilmektedir. 350 kg/m^3 ’ün altında kullanımı ise, ilave filler veya viskozite arttırıcı kimyasallarla birlikte kullanılması halinde uygundur aksi takdirde betonda segregasyon görülebilir [26].

2.1.2. Agregalar

EFNARC [27], tarafından en büyük agrega çapı 20 mm'den fazla olmaması öngörülemekteyse de kesin olarak belirtilmiş bir agrega boyutu bulunmamaktadır. Ancak KYB'nin dar donatı aralıklarından geçebilme ve akışkanlık yeteneklerini gösterebilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda KYB'de en büyük agreganın 16 mm'den büyük seçilmemesi gerektiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra normal betona göre kum oranı arttırılmakta ve iri agrega oranı azaltılmaktadır (Şekil 2.1). Buna ilaveten 0.125 mm elek altında kalan agregalar ince malzeme miktarı içerisinde katılmaktadır [28,29].

KYB'de işlenebilirlik açısından agrega boyutu ve cinsi önemlidir. KYB üretiminde kullanılacak agrega, kimyasal özellik bakımından geleneksel betonda kullanılabilecek karakteristikte olmalıdır. Örneğin, kırma kireçtaşı betonda iri agrega olarak kullanılabilir. Ayrıca iri agrega olarak dere çakılının kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı artırır. Doğal kumun işlenebilirliği kırma kumun işlenebilirliğinden daha uygundur. [30,31].

KYB'da agrega olarak kübik veya küre şekilli agregalar kullanılmalıdır. Çünkü uzun silindirik ve yassı disk biçimindeki agregalar KYB'nin işlenebilirlik ve kıvamını olumsuz etkileyeceğinden bu tip agregaların fazla kullanılmaması gerekir [32].



Şekil 2.1. Normal betonla KYB'nin karşılaştırılması [17].

2.1.3. Mineral Katkılar

İri agrega/ince agrega oranındaki azalma yüzey alanı artacağından daha fazla miktarda çimento kullanımı gerektirir. Bu da hidrasyon ısını ve beton üretiminde giderleri artırır. Bu sebepten KYB’de işlenebilirlik ve viskoziteyi arttırmak, bunun yanında üretim sırasındaki hidrasyon ısı artışını sınırlandırmak için genel olarak çimento yerine yüksek miktarlarda silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolin gibi mineral katkıları kullanılmaktadır.

Genel olarak kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerikli mineral katkıları kullanılmakta ve betonun reolojik özelliklerini geliştirmektedir. Tane çapı 0.125 mm’den küçük tanecikler toz malzeme olarak adlandırılabilir [24].

Toz malzeme kullanımı, karışımdaki boşlukları doldurur ve betonun daha kompakt olmasını sağlar. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar. Toz malzeme miktarının 400 ila 650 kg/m^3 arasında olması önerilmektedir. Bu miktar, iyi bir agrega gradasyonu için, taneciklerin daha iyi sıkışma sağlanması için tavsiye edilmektedir [33].

2.1.4. Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 μm ’den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO_2) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür [34].

Silis dumanı ilk olarak 1950’lerin başında Norveç Teknoloji Enstitüsü’nde beton katkısı olarak kullanılmasına rağmen, 1970’lere kadar yaygınlaşmamıştır. Bunun en önemli sebepleri, silis dumanının az miktarda elde edilmesi ve kimyasal katkılarla birlikte kullanıldığında etkisini göstermesidir [35]. Silis dumanı portland çimentosunun taneciklerine göre yaklaşık yüz kat daha küçük çaplıdır. Ferrosilikon ve silikonlu metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarsın kömürle redüklenmesi sonucu metal üretiminin bir yan ürünü olup, yapısında %85 ile 98 arasında SiO_2 içerir [36].

Silis dumanı ince yapısından dolayı kullanıldığında yüzey alanını artırır ve dolayısıyla kimyasal katkı emilimini de arttıracığından katkının etkisini azaltır [37]. Bu nedenle silis dumanı, diğer puzolanlar gibi yüksek oranda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en

yüksek oran, çimento ağırlığının %15'i, optimum oran ise %10'u kadardır. Bu değerin geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı ve yükselen hidratasyon ısısı sebebiyle pratikte problemler yaşanabilir [38]. Özellikle düşük çimento dozajına sahip betonlarda (300-350 kg/m³) silis dumanı ve kimyasal katkıların ortak kullanımı ile KYB tasarımı yapılabilir. Silis dumanı genel olarak düşük çimento dozajlarında etkili bir viskozite arttırıcıdır [39].

2.1.5. Uçucu Kül

Uçucu kül (UK), termik enerji santrallerinde öğütülmüş kömürün yakılması sırasında elde edilen inorganik bir malzemedir. Son yıllarda çimento ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılan, yüksek bağlayıcı özellik gösteren bir malzemedir. Ideal miktarda ve incelikte kullanılması halinde betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine olumlu yönde katkı sağladığı bilinmektedir [40].

Uçucu kül, düşük eşik kayma gerilmesine sahip olduğundan dolayı kendiliğinden yerleşen betonun viskozitesini arttırmada etkili bir fillerdir. Uçucu külün partikül büyüklükleri 1-200 µm arasında olup, yoğunluğu, 2.2- 2.7 g/cm³ aralığındadır [41]. Uçucu küller yüksek oranlarda SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içermesinin yanında silisli ve alüminli amorf yapıya sahiptir. Ayrıca kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır [30].

ASTM C 618 [42] standardı uçucu külleri kimyasal bileşenlerine göre F ve C sınıfı olmak üzere iki gruba ayırmaktadır.

1) F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ şartını sağlayan uçucu küller,

2) C sınıfı uçucu küller ise genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ şartını sağlayan uçucu küllerdir.

CaO miktarı %10 oranının altında olan uçucu küller düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, %10'un üzerinde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılmaktadır. [43]. Hidratasyon hızını ve ısını düşüren uçucu küller, sıcaklık artışından kaynaklanan su kaybını ve çatlakları azaltır ancak priz süresini geciktirdiğinden erken yaş dayanımını düşürmektedir [44]. Yüksek inceliğe sahip uçucu külün çimento ile ikamesi, hamur fazının zeta potansiyelini arttırarak itki oluşturmakta ve uçucu kül taze beton için akışkanlaştırıcı vazifesi görmektedir [45].

2.1.6. Kimyasal Katkı

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları, betonun karılma işleminden önce veya karılması sırasında, TS EN 934 [46] standardına göre çimento kütlesinin %5 oranından daha az kullanılması gereken malzemelerdir.

KYB üretiminde kimyasal katkı olarak melamin sülfonat formaldehit polikondanseleri, naftalin formaldehit sülfonat, vinil kopolimerler ve polikarboksilik asit bazlı katkıları kullanılabilir. Fakat KYB’da polikarboksilik asit bazlı katkıların kullanıldığı betonlar, diğer katkıların kullanıldığı betonlara göre daha az su ihtiyacı duyduğundan polikarboksilik asit bazlı katkıları tercih edilmektedir [29]. Polikarboksilik esaslı katkı, çimento taneciklerinin beton içerisinde dağıtılmasını sağlayan etkili bir topaklanma önleyicidir. Bu katkı hidratasyona girer ve hidratasyona katılan çimento miktarını da artırır. Bu katkının topaklanmayı önlemesi ve su moleküllerinin serbest bırakılmasını sağlaması; tanecikler arasında içsel sürtünmeyi azaltarak işlenebilirliği artırır [47].

Beton üretiminde akışkanlaştırıcı katkı kullanımı, aynı su/çimento oranında işlenebilirliği artırır ve gereken karışım suyu miktarını azaltarak beton dayanımını artırır. Ayrıca çimento miktarını azaltarak da kütle betonlarında hidratasyon ısını düşürür. Bunların yanında, akışkanlaştırıcı katkı kullanılan betonlar düşük eşik kayma gerilmesine sahip olmakta ve plastik viskoziteyi azaltmaktadırlar. Plastik viskoziteyi azaltıcı etkileri yüksek su/çimento oranlarında daha belirgindir. Yüksek su/çimento oranında çok küçük miktarda katkı ilavesi dahi viskoziteyi hızla düşürerek ayrışmaya sebep olabilir. Düşük su/çimento oranlarında katkı ilavesinin akışkanlığı artırıcı etkisi daha yavaştır.

3. PUZOLANLAR (MİNERAL KATKI MADDELERİ)

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneliyken ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan, silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır [48].

Puzolanlar yüksek oranda silis ve alüminlerden oluşmaktadır. İnceliği yüksek puzolanlar, su ve sönmüş kireç (Ca(OH)_2) ile birleştiğinde kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyon portland çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi, bağlayıcılık özelliği olan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jellerini oluşturur [49].

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcı özellik gösterebilmesi için içerdiği silika ve alümina miktarının fazla, çimento ve beton içerisinde kullanılan puzolanların " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " miktarı %70 oranından fazla olmalıdır. Ayrıca amorf yapıda ve ham durumda inceliği yüksek olmalı ya da en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma gelene kadar öğütülmüş olmalıdır [50]. Puzolanik maddelerin beton içerisinde kullanıldığı optimum miktar, yaygın olarak çimentonun %10-%50'si kadardır [51]. Bir puzolanın bağlayabileceği en fazla sönmüş kireç miktarı ve bağlanma işleminin hızı puzolanik aktivite olarak ifade edilmektedir. Puzolanik aktivite genel olarak, puzolanın karakteristiğine ve yapısında yer alan aktif fazların kalitesine ve oranına bağlıdır.

Beton üretiminde kullanılan puzolanları elde edildikleri kaynaklara göre üç sınıfa ayırabiliriz. Bunlar: doğal malzemeler (volkanik tüfler, traslar vd.), beton üretimiyle doğrudan ilgisi olmayan endüstriyel atıklar (uçucu küller, silis dumanı, yüksek fırın cürüfu vd.), ısıtıl işlem uygulanmış malzemelerdir (pişirilmiş kil vb.) [49].

3.1. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar uzun bir süreden beri çimento ve beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler puzolanik aktivite göstermelerine karşın, bunların kimyasal ve mineral bileşimleri, oluşum kaynakları ve şartlarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bu mineral katkılar baskın olarak silis ve ek olarak da alüminyum ve ferrik oksit bileşenlerinden oluşmaktadırlar [52].

Yüksek oranda silis ve alümin içeren kil ve şeyl mineralleri kristal yapıdadırlar. Doğal yapıları itibariyle puzolanik özelliğe sahiptirler, aynı zamanda bir-iki saat kadar 700-900 °C civarında sıcaklığa maruz bırakılırsa, bu malzemelerin düzenli kristal yapısı bozulur ve yarı amorf veya düzensiz alümino silisli bir yapı elde edilir. Bunun sonucunda bu mineraller, puzolanik özellik gösteren malzeme durumuna gelirler [53].

3.2. Yapay Puzolanlar

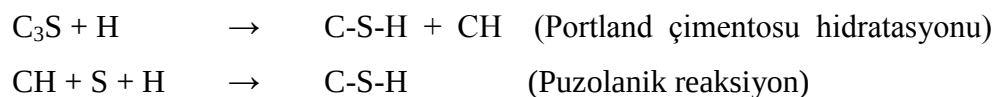
Çimento ve betona katılan doğal mineral katkıların doğada hızla tükenmesi ve beton teknolojisinin hızlı gelişimiyle puzolanik aktifliği yüksek yapay mineral katkıları geliştirilmektedir [52].

Birçok farklı ülkede kullanılan yapay mineral katkıların ilkleri yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür. Daha sonra bunlara ek olarak silis dumanı ve metakaolin gibi etkili mineral katkıları çimento ve beton endüstrisine kullanılmaya başlanmıştır. Uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel atıkların çimentoya karıştırılmasındaki başarı, betonun daha ekonomik elde edilmesi ve betonun davranışındaki bazı iyileştirmelerden kaynaklanmaktadır [54].

Günümüzde silis dumanı ve metakaolin gibi reaktifliği yüksek çeşitli mineral katkıları çimento bazlı kompozit malzemeler içerisinde kullanılmaktadır. Bu katkıların çimento ve beton performansını nasıl etkilediğini araştıran çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu mineral katkıları normal ve yüksek performanslı betonlar içerisinde yalnız kullanıldıkları gibi; ikili, üçlü sistemlerde uçucu kül ve cüruf ile beraber de kullanılmaktadır [52].

3.3. Puzolanik Reaksiyon

Yüksek inceliğe sahip puzolanlar sulu ortamda kalsiyum hidroksitle bir araya geldiğinde normal sıcaklıklarda bazı kimyasal tepkimeler oluşmaya başlar. Kireç puzolan reaksiyonunun sonucunda oluşan ana ürün kalsiyum-silikat-hidrat, diğer ürünler ise kalsiyum-alimine-hidrata olmuş gehlenit, kalsiyum karboalimünat, kalsiyum alimüna monosülfat ve etrenjittir [53]. Puzolanlar %60-%85 arasında SiO₂ içerdiklerinden ana puzolanik reaksiyon, portland çimentosunun temel kalsiyum silikat reaksiyonuna benzer kalsiyum silikat hidrate oluşumunu kapsar.



Puzolanik reaksiyonun yavaş olmasından dolayı; dayanım kazanma hızı ve hidrasyon ısı düşük ama portland çimentosundaki C_3S hidrasyonu hızlıdır. Bu yüzden bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidrasyon hızı yüksektir. Aynı zamanda, puzolanik reaksiyon kireç tüketen, portland çimentosu hidrasyonu ise kireç üreten reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, sıcaklık, alkaliler ve sülfatlar gibi kimyasalların bulunduğu ortamda hız kazanabilir [55]. Puzolanik reaksiyonun portland çimentosu hidrasyonundan daha yavaş gelişmesi mukavemet kazanma hızlarını etkilediğinden erken yaş dayanımı daha düşük olur ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki dayanımlar referans betonunun dayanımını yakalayıp geçebilir [56].

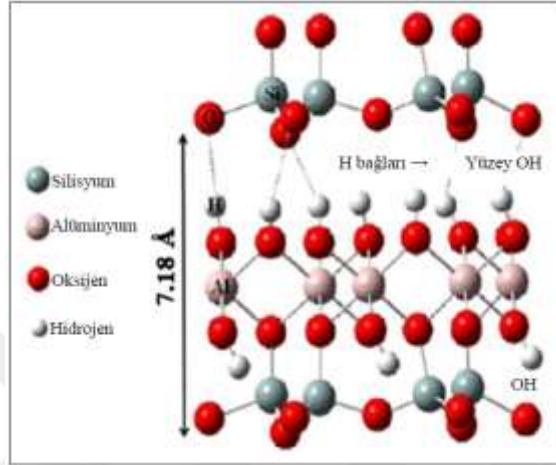
3.4. Kaolin

Kaolin; feldspat ve kil minerallerin doğal olarak ayrıştırılması sonucunda meydana gelen, yumuşak ve beyaz, kilsli bir malzemedir (Şekil 3.1). Tabiatta sıklıkla karşılaşılan bu madde genellikle kağıt ve tekstil imalatlarında ve porselen üretiminde kullanılır [57].



Şekil 3.1. Kaolin [58].

Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), alüminyumhidrasilikat bileşimli bir kil mineralidir. Ana kayaç içerisindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al_2O_3 içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç, kaoliniti oluşturmaktadır [57].



Şekil 3.2. Kaolinitin şematik yapısı [58].

Yapısal olarak kaolinit ideal olarak %46.50 SiO_2 , %39.50 Al_2O_3 ve %14.00 H_2O kompozisyonunda oktahedral alümina levhaları ve tetrahedral silika levhaları içermektedir. Kaolinitin atom dizilimi Şekil 3.2’de görülmektedir [58]. Kaolinin yapısındaki aliminyum oksit dışındaki diğer bileşenlerin fazla oranda olması, aliminyum oksit oranının idealden (% 39.50) az olduğu anlamına gelir. Bu da kalitesinin daha düşük olduğu anlamına gelebilir [59].

Kaolin dünyanın en çok kullanılan endüstriyel malzemelerinden bir tanesidir; dünyada toplam üretim miktarı 25 milyon tonu aşmaktadır [60]. Tablo 3.1’de dünyadaki kaolin rezervlerinin hangi ülkelerde ne miktarlarda olduğu gösterilmiştir. Türkiye’de inceleme yapan en büyük kuruluş olan M.T.A. Genel Müdürlüğü’nün yapmış olduğu araştırmalara göre Türkiye’de 100 milyon tonun üzerinde kaolin rezervi bulunmaktadır ama işletilebilir rezerv miktarının 36 milyon ton civarında olduğu belirtilmektedir [61].

Tablo 3.1. Dünya’da kaolin rezervleri [61].

Ülke-Bölge	(Milyon ton)
ABD	3.900
Güney Amerika	500
Amerika	4.000
İngiltere	2.500
Rusya	2.000
Avrupa	6.000
Afrika	800
Asya	1.500
Avustralya	500
Diğer	500
Toplam	14.000

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, kendiliğinden yerleşen harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, tasarlanan seriler ve harçların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri sunulmuştur.

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Limak Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'nin Ergani Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42.5 N tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1. CEM I 42.5 N portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Bileşen	% Oranı
SiO ₂	18.26
Al ₂ O ₃	4.79
Fe ₂ O ₃	2.80
CaO	64.59
MgO	1.88
SO ₃	2.48
Na ₂ O	0.58
K ₂ O	0.62
Cl	0.0131
Serbest CaO	0.76
Kızdırma Kaybı	3.31

Tablo 4.2. CEM I 42.5 N portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri

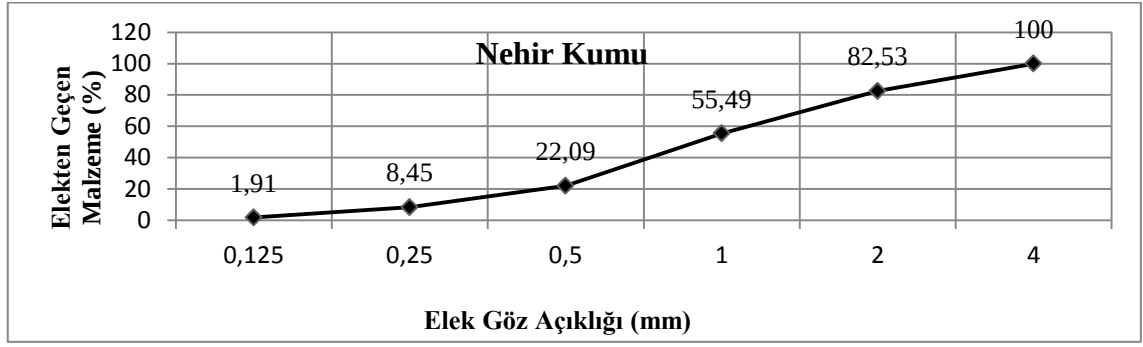
Özgül Ağırlık (g/cm³)	3.1	
Özgül Yüzey (cm²/g)	3070	
45 mikron Elekte Kalan (%)	9.5	
32 mikron Elekte Kalan (%)	15.5	
Priz Başlangıcı (dakika)	143	
Priz sonu (dakika)	203	
Hacim Genleşmesi (Le Chatelier, mm)	1	
Basınç Dayanımı (MPa)	1. gün	15.9
	2. gün	24.9
	7. gün	36.1
	28. gün	47.1

4.1.2. Agregalar

Deneylerde, 0-2 mm ve 2-4 mm dere agregası kullanılmıştır (Şekil 4.1). Dere agregaları Elazığ Murat Nehri'nden alınmıştır. Agreganın doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.63 gr/cm^3 , su emmesi %1.96'dır. Elek analizi sonucunda dere agregasının granülometrisi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 0-2 mm ve 2-4 mm dere agregası



Şekil 4.2. Agreganın granülometrisi

4.1.3. Kaolin ve Kalsine kaolin

Deneylerde Bilecik yöresine ait Şişecam Kimyasallar Grubu'ndan alınan 2.60 g/cm^3 yoğunluğa sahip kaolin ve bu kaolinin $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kalsine edilmesiyle elde edilen kalsine kaolin kullanılmıştır (Şekil 4.3). Kaolin ve kalsine kaolin %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. Kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3 ve 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Kaolin ve kalsine kaolin

Tablo 4.3. Kaolinin fiziksel özellikleri

Döküm Konsantrasyonu (%)	75.2
Litre Ağırlığı (gr/lt)	1873
Ph	9.98
Optimum Elektrolit (%)	0.51
Kuru Küçülme (%)	1.2
Toplu Küçülme (%)	2
Yağ Emme Konsantrasyonu (%)	15
Su Emme (%)	21.55
Kuru Muavemet (kg/cm ²)	12.26
Pişmiş Mukavemet (kg/cm ²)	43.61

Tablo 4.4. Kaolinin kimyasal özellikleri

SiO ₂	73.40 ± 0.40
Al ₂ O ₃	18.50 ± 0.30
Fe ₂ O ₃	0.40
CaO + MgO	0.50
Na ₂ O + K ₂ O	0.20
Cr ₂ O ₃	0.03
SO ₃	0.40

4.1.4. Kimyasal Katkı

Bu çalışmada, tüm tasarlanan harçlar için 1.06 g/cm³ yoğunluğa sahip sika htech 36 süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Tüm harç fazları için SA miktarı 8 kg/m³ alınmıştır. KYB'dan istenilen performans alınması için çimento ağırlığının %1.0-2.0'si oranında (100 kg çimento için 1000-2000 g) süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir [62].

Tablo 4.5. Kimyasal katkıya ait özellikler

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.06 g/cm ³
pH	3-7
Donma Noktası	-4 °C
Suda Çözünebilir Klorür (%)	En fazla %0.1 (TS EN 934-2)
Alkali Miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri olarak)	En fazla %0.3 (TS EN 934-2)

4.1.5. Karışım Suyu

Tüm KYH üretimlerinde Elazığ ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. KYH Üretimi ve Yapılan Deneyler

Tüm karışımlar, taze ve sertleşmiş harç deneyleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kaolinin kalsine edilmesi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yapı Laboratuvarında, mikroyapı incelemeleri (SEM,XRD,EDX) Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada referans numunesi de dahil olmak üzere 9 seri harç karışımı hazırlanmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak CEM 42.5 N portland çimentosu ile birlikte çimentonun yerine ayrı ayrı %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kaolin ve kalsine kaolin kullanılmıştır. Karışım hesapları mutlak hacim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. KYH'ın işlenebilirliği EFNARC'ın belirlediği değerlere göre hazırlanmıştır. Tüm harç karışımlarında, su/bağlayıcı oranı bu değerleri sağlamak için 0.43 oranında tutulmuştur. Toplam bağlayıcı miktarı 630 kg/m³, SA miktarı 8 kg/ m³ olarak sabit tutulmuştur ve KYH'lar için gereken ince agrega miktarı bu sabit değerlere göre değişkenlik göstermiştir. Maksimum tane çapı 4 mm olarak belirlenmiş olup, agreganın %80'i 0-2 mm, %20'si 2-4 mm arasında olan dere agregasından oluşmaktadır. Karışım hesabı yapılırken 1 m³ harçtaki toplam agrega miktarı Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{A}{\rho_a} = 1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{SA}{\rho_{sa}} + H + S + \frac{C^* \% n}{\rho_p} \right) \quad (4.1)$$

A : 1 m³ betonda bulunacak dere agregası (kg)

ρ_a : Agreganın özgül ağırlığı (g/cm³)

C : Karışıma girecek çimento miktarı (kg)

ρ_c : Çimentonun özgül ağırlığı (g/cm³)

SA : Kimyasal katkı miktarı (kg)

ρ_{sa} : Kimyasal katkı özgül ağırlığı (g/cm³)

S : 1 m³ betondaki suyun miktarı (kg)

H : Betondaki havanın hacmi (cm³)

% n : Çimento yerine kullanılacak puzolan yüzdesi (g)

Denklem 4.1'e göre hesaplanan KYH karışım oranları Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Karışım oranları

Karışım Kodu	MUHTEVA (kg/m ³)								
	PÇ	K/MK	Agrega	Su	Hi-Tech 36	Su/Bağ	Net Su	Su/Toz Hacimce %	Su/Toz Ağırlıkça %
KONTROL	630	0	1336.9	270.9	8	0.43	245	1.15	0.37
K5	598.5	31.5	1331.8	270.9	8	0.43	245	1.19	0.39
K10	567	63	1326.6	270.9	8	0.43	245	1.24	0.40
K15	535.5	94.5	1321.5	270.9	8	0.43	245	1.29	0.42
K20	504	126	1316.3	270.9	8	0.43	245	1.34	0.44
MK5	598.5	31.5	1331.1	270.9	8	0.43	245	1.19	0.39
MK10	567	63	1325.4	270.9	8	0.43	246	1.24	0.40
MK15	535.5	94.5	1319.6	270.9	8	0.43	246	1.29	0.42
MK20	504	126	1313.8	270.9	8	0.43	246	1.34	0.44

Karışım oranları belirlendikten sonra KYH'lara taze ve sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır. Bu amaçla basınç, eğilmede çekme dayanımı, yüksek sıcaklık altında basınç ve eğilmede çekme dayanımı, toplam su emme değerlerini belirlemek için 9 seriden 3'er numune alınmış olup, deneyler için toplamda 162 tane 4x4x16 cm prizmatik ve 27 tane 5x5x5 cm boyutlarında kübik numuneler hazırlanmıştır.

4.2.1. Taze Harç Deneyleri

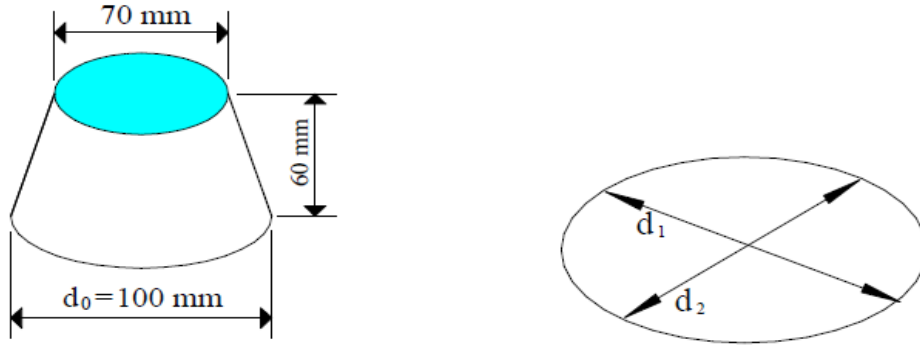
Harçların işlenebilirlik özellikleri mini-çökme yayılma ile EFNARC'ın belirlediği sınırlara göre belirlenmiş ve KYH serileri için viskozimetre ölçümleri yapılmıştır.

4.2.2. Mini Çökme Yayılma Deneyi

Deney, harçların doldurma ve akıcılık kabiliyetlerini ölçmektedir. Deney, EFNARC [27] tarafından belirtilen uygulama ve sınırlandırmalara göre yapılmıştır. Bu deney metodunda, karışımı hazırlanan harç kesik koni (çap: 70-100 mm, yükseklik: 60 mm), içerisine şişlenmeden ve sarsmadan doldurulur (Şekil 4.5), daha sonra kesik koni yukarı doğru kaldırılır ve yine sarsmadan kendi ağırlığıyla yayılması beklenir (Şekil 4.4). Yayıldıktan sonra yayılma çapları birbirine dik 2 farklı noktadan ölçülüp aritmetik ortalaması alınır. Bu çapların 240-260 mm aralığında olması gerekmektedir [27]. Elde edilen sonuçlarla bağıl çökme-yayılma değeri denklem 4.2 ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Mini çökme yayılma konisi ve yayılma çapının ölçümü



Şekil 4.5. Mini çökme yayılma deneyi düzeneği

$$\Gamma_m = (d / d_0)^2 - 1 \quad (4.2)$$

d : Test sonucu elde edilen ortalama çap

d_0 : Koninin alt çapı (100 mm)

4.2.3. Viskozimetre Deneyi

Bu deneyde harç karıştırma işleminden sonra beher içine koyulur. Mil (spindle) çapı numuneye göre belirlenir (0.4 mm). Mil dönmeye başladığında mil ucuna karşı harcın oluşturduğu burulma momenti (tork) ölçülür. Uzun hızı arttıkça okunan değerler doğrultusunda viskozite değişimleri elde edilir.

KYH'ların viskozite değerleri DV-E Brookfield model cihaz (Şekil 4.6) kullanılarak belirlenmiştir. Harçların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Her bir dönme hızına karşılık gelen değerler kaydedilmiş, 100 devir/dk dönme hızından sonra geriye doğru ölçümler yapılmaya devam edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.6. Brookfield DV-E model viskozimetre

4.2.4. Taze Betonun Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü

KYH'lar sarsma ve sıkıştırma işlemi olmadan 4x4x16 cm boyutunda prizmatik ve 5x5x5 cm boyutundaki küp kalıplarına (Şekil 4.7) kalıplar yağlandıktan sonra kendi ağırlıklarıyla yerleştirilmiştir. Harçlar priz alıncaya kadar kalıpların üstü cam ile koruma altına alınmıştır. Priz süresi (hava sıcaklığına göre 1-2 gün) geçtikten sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 20 ± 2 °C sıcaklığında şehir şebeke suyunda deney gününe kadar kür edilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.7. a) XPS'den yapılmış küp kalıpları, b) Prizmatik kalıplar, c) Kür uygulaması

4.2.5. Sertleşmiş Harç Deneyleri

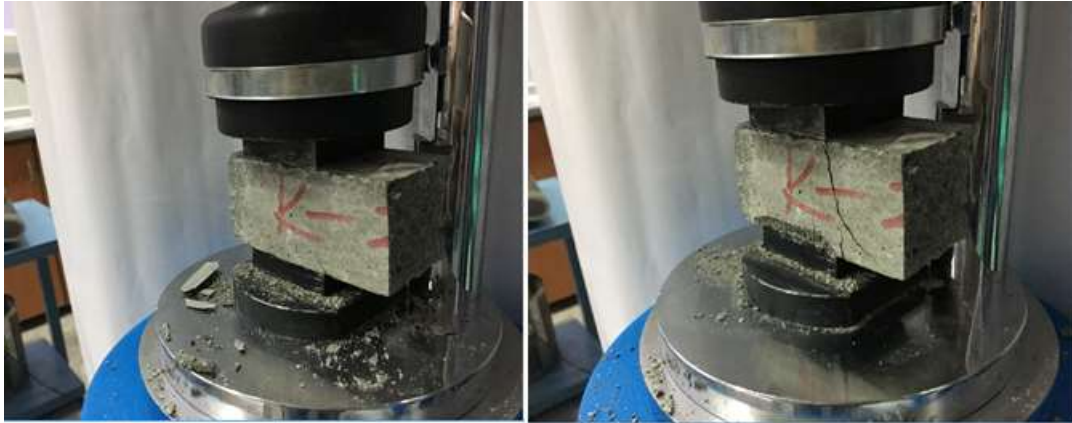
4.2.6. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi

9 serinin herbirinden 3 numune alınarak toplamda 81 tane $40 \times 40 \times 160$ mm prizmatik KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür sürelerin sonunda numunelerin yüzeyinin kuruması (DKY) beklendikten sonra TS EN 196-1'e [63] göre üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri yapılmış, eğilmede çekme ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Her seriden 3'er adet numune 0.2 kN/s yükleme hızı ile önce üç noktalı eğilme deneyine (Şekil 4.8) tabi tutulmuştur.



Şekil 4.8. Üç noktalı eğilme deneyi

Üç noktalı eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numunelere yükleme hızı 2.4 kN/s olan basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (Şekil 4.9, Şekil 4.10). Basınç deneyinde hidrolik yük kontrollü dijital göstergeli pres kullanılmıştır. Her iki deneyde de numune dayanım değerlerinin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.9. Basınç dayanım deneyi



Şekil 4.10. Basınç kırılması

4.2.7. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri

Her seriden 3 toplamda 27 tane 5x5x5 cm'lik küp numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin etüv kurusu yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, porozite ve toplam su emme değeri belirlenmiştir. Numunelerin 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra doymun halde Arşimet terazisinde (Şekil 4.11) havada ve su içerisinde asılı ağırlıkları ölçülmüştür [64]. Daha sonra 105°C±5 sıcaklıktaki etüvde değışmez ağırlığa kadar kurutulan numunelerin (Şekil 4.12) etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüş; 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 denklemler ile tüm serilerin etüv kurusu yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam su emme ve porozite değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.11. Arşimed terazisi



Şekil 4.12. Etüvde kurutulmuş numuneler

$$\text{Etüv Kuru Yoğunluk} = \frac{W1}{W3-W2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.3)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.4)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.5)$$

$$\text{Toplam Su Emme (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4.6)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (4.7)$$

W1 : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr)

W2 : Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

W3 : Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)

4.2.8. Kapiler Su Emme Deneyi

Kür işlemi sonunda 5x5x5 cm küp numuneler, sabit ağırlığa gelinceye kadar 105 °C±5' de etüvde bekletilip etüv kurusu ağırlığı hesaplanmıştır. Yan yüzeyleri bantla izole edilen küp numunelerin ağırlığı ölçüldükten sonra tabanından itibaren 5 mm batacak şekilde suya yerleştirilip 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde, numunelerin üzerindeki serbest su alınarak 0,01 gr hassasiyetle ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.13, Şekil 4.14). Kapiler su emme deneyi, TS 4045 [65] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kapiler su emme katsayıları denklem 4.8 ile hesaplanmıştır.

$$K \times \sqrt{t} = \frac{Q}{A} \quad (4.8)$$

K: Kılcal su emme katsayısı (cm/s^{1/2})

Q: Emilen su miktarı (cm³)

t: Geçen zaman (s)

A: Su ile temas eden alan (cm²)



Şekil 4.13. Yan yüzeyleri izole edilen küp numuneleri



Şekil 4.14. Numunelerin su emmesi

4.2.9. Yüksek Sıcaklık Uygulaması

28 günlük kür süreleri sonunda her seriden 3'er adet toplamda 27 tane 40×40×160 mm prizmatik numune, etüvde 105±5°C'de 24 saat bekletildikten sonra ısınma hızı 6°C /dakika olan 1200°C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırında 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17). Bu numuneler, hedef

sıcaklıklarda 1 saat bekletilmiştir. Numuneler oda sıcaklığında soğuduktan sonra tüm numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımları hesaplanmıştır (Şekil 4.18). Yüksek sıcaklık deneyi TS EN 1363-1 [66] ve TS EN 1363-2'ye [67] uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklıktan önceki durumu



Şekil 4.16. Numunelerin yüksek sıcaklıktan sonraki durumu



Şekil 4.17. Sıcaklığa maruz bırakılan numunede rötre çatlakları



Şekil 4.18. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin eğilme ve basınç deneyi

4.2.10. Mikroyapı İncelemeleri

Hazırlanan serilere ait numunelerden kontrol, K20 ve MK20 numunelerinin mikro yapı incelemeleri, Şekil 4.19’de görülen JEOL JSM-6510 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscope) ile Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde gerçekleştirildi.



Şekil 4.19. SEM (Scanning electron microscope)

SEM ve EDX (Energy-Dispersive X-ray) analizi yapılmadan önce kontrol, K20 ve MK20 5x5x5 cm boyutunda küp numuneler pres makinasında kırıldıktan sonra numunelerden alınan parçalar SEM cihazının inceleyebileceği boyuta kadar öğütüldü. Kaolin ve kalsine kaolinin toz hali ile, kontrol ve kalsine kaolin numunelerinin pres makinasından sonra kırılan parçalarının öğütülmüş hallerinin Şekil 4.20’de görülen Ultima IV model cihazda XRD (X-Ray Diffractometer) analizi yapılmıştır.



Şekil 4.20. XRD (X-ray diffractometer) test cihazı

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde hazırlanan 9 farklı karışımın taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri incelenmiş ve elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

5.1. Taze Harç Deney Sonuçları

5.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları

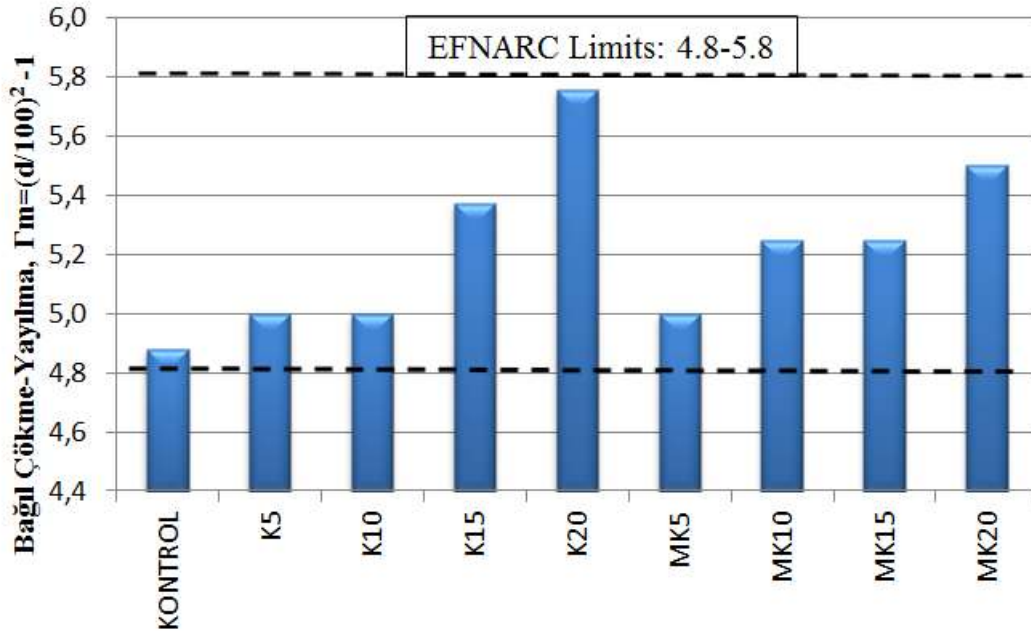
Kendiliğinden yerleşen beton, hem tasarım hem de uygulama açısından azami önem gösteren bir beton çeşididir. Geleneksel betonda karşılaşılan yerleşebilme, yoğun donatıların arasından geçebilme gibi sorunların KYB'lar ile ortadan kaldırılması amaçlanır. Bunun için iri agrega miktarı sınırlandırıp, daha akışkan bir beton elde edilir. Ancak, akıcılığı yüksek beton elde ederken s/ç oranının artması beton dayanımını düşüreceğinden yeni nesil hiperakışkanlaştırıcı kimyasallar kullanılmaktadır. Bunları elde etmek için sadece akışkan kullanımını ayarlamak yetmeyecektir, çünkü betonun akıcılığı, viskozitesi ve eşik kayma gerilmesi de bu bağlamda önemlidir. Betonun hem bu özelliklerini optimum seviyede tutmak, hem de ekonomik açıdan çimento miktarını azaltmak için kimyasal katkının yanında mineral malzemenin de kullanılması gerekir. Bu yüzden sadece agregaların değil aynı zamanda mineral katkı malzemelerinin de fiziksel ve kimyasal analizleri, su emme yüzdeleri, yoğunlukları, boşluk oranları, yapısında bulunan bileşikler betonun akıcılığına etki edeceğinden önemlidir.

Hazırlanan taze harç karışımları üzerinde yapılan mini çökme yayılma deney sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir. Tüm KYH karışımlarında hedeflenen yayılma çapı 250 ± 10 [27] mm toplam bağlayıcı miktarı ve akışkan miktarı sabit tutulup su/bağlayıcı oranı değiştirilerek sağlanmak istenmiştir ancak tüm karışım harçları için hedeflenen yayılma çapı aynı su/bağlayıcı (0.43) oranında sağlanmıştır. Tablo 5.1'deki çökme yayılma değerleri kullanılarak hesaplanan bağıl çökme yayılma değerleri Şekil 5.1'deki grafikte verilmiştir.

Tablo 5.1. Mini çökme yayılma deney sonuçları

Karışım Kodu	Çökme-Yayılma (mm)	Bağlı Çök-Yay
KONTROL	242.5	4.9
K5	245	5.0
K10	245	5.0
K15	252.5	5.4
K20	260	5.8
MK5	242.5	5.0
MK10	245	5.3
MK15	250	5.3
MK20	250	5.5
EFNARC	240-260	4.8-5.8

Şekil 5.1’de verilen bağlı çökme-yayılma grafiği incelendiğinde, bütün serilerin EFNARC [27] tarafından verilen referans değerler arasında kaldığı görülmektedir.



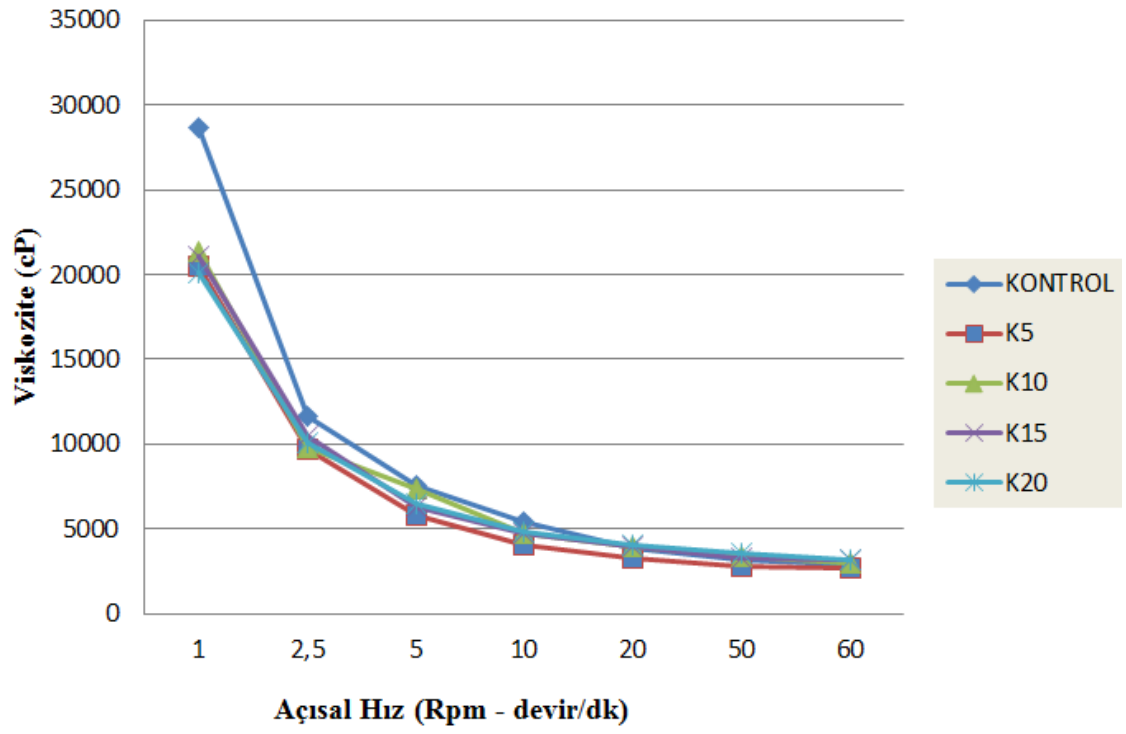
Şekil 5.1. Bağlı çökme yayılma grafiği

5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları

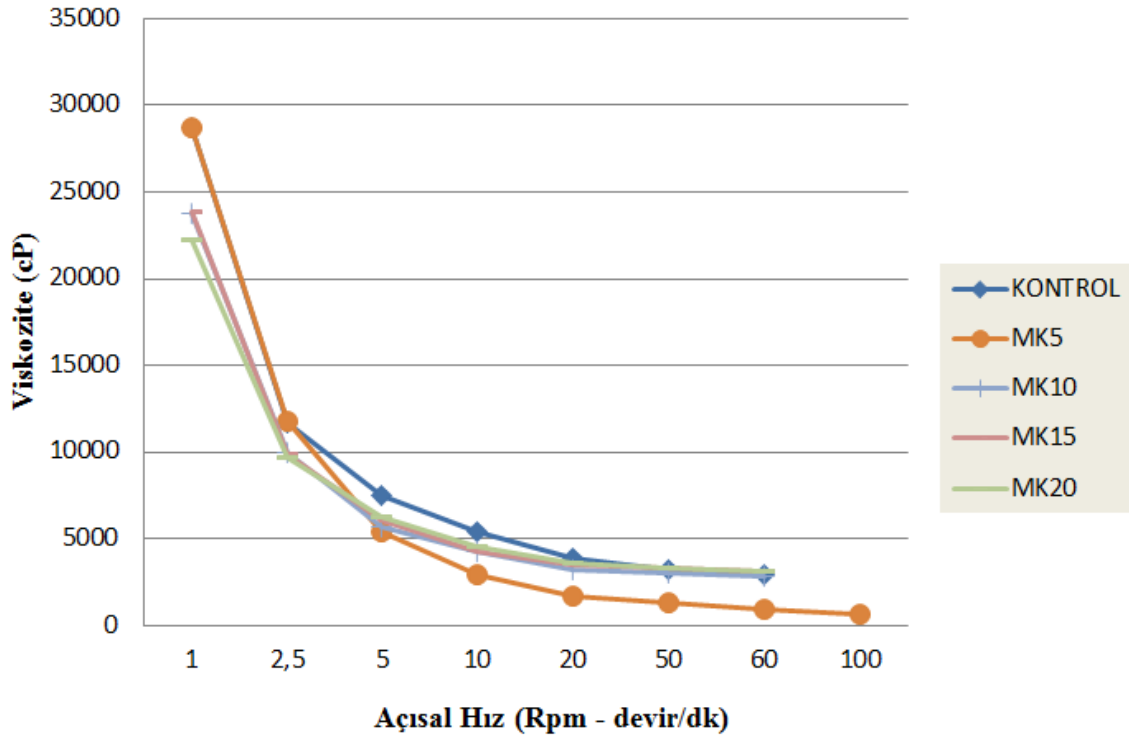
KYB'nin yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayrışmaya (segregasyon) karşı dirence sahip olması gerekir. Bu parametreler betonun düşük eşik kayma gerilmesine, uygun viskoziteye ve uygun kohezyona sahip olmasına bağlıdır. Bu nedenle KYH'ların işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini belirlemek amacıyla viskozite değerleri ölçülmüş, bulunan değerler Tablo 5.2, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Harçların farklı açısal hız değerleri için viskozite değerleri

KARIŞIM ADI	1	2,5	5	10	20	50	60	100
KONTROL	28700	11680	7520	5400	3860	3166	2880	
K5	20500	9680	5800	4060	3290	2834	2647	
K10	21400	9760	7360	4740	3970	3394	3007	
K15	21100	10440	6320	4700	3975	3304	3147	
K20	20100	10040	6440	4860	4055	3542	3147	
MK5	28700	11800	5360	2880	1720	1248	899	615
MK10	23800	9920	5700	4240	3215	2968	2804	
MK15	23900	9880	6100	4200	3485	3252	3060	
MK20	22200	9680	6260	4500	3555	3272	3077	



Şekil 5.2. Kaolin içeren harçların viskozite değerleri



Şekil 5.3. Kalsine kaolin içeren harçların viskozite değerleri

Bütün harçlarda dönel ucun (spindle) açısal hızının artmasıyla viskozite azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde kullanılan serilerin viskozite eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu, ayrıca kaolin ve kalsine kaolin içeriği arttıkça viskozite değerlerinin arttığı Tablo 5.2’de görülmektedir.

5.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri Sonuçları

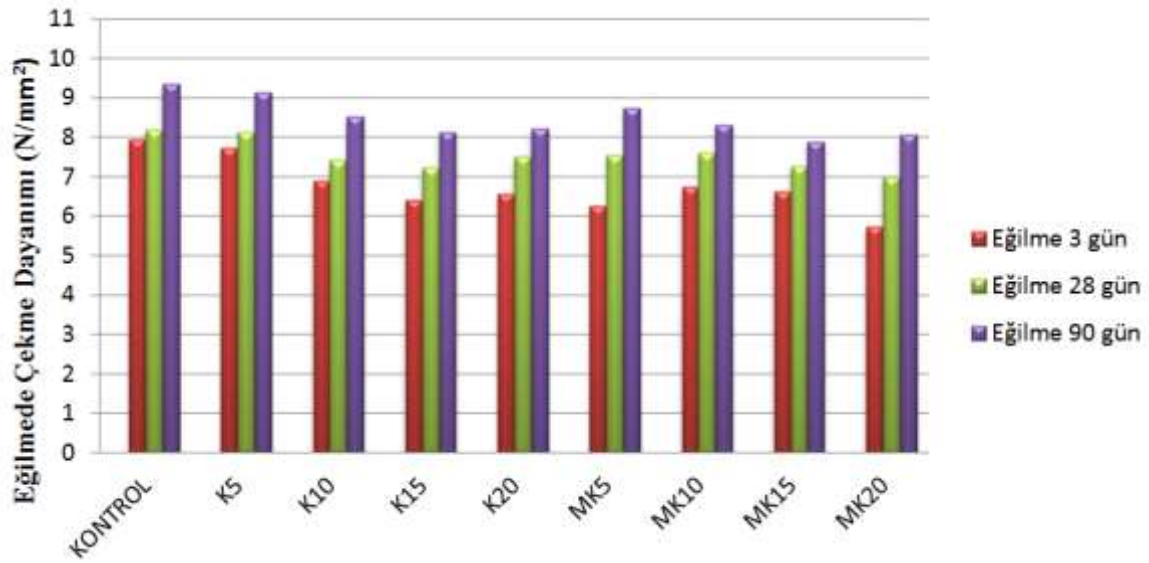
5.2.1. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

4x4x16 cm prizmatik KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda eğilmede çekme ve basınç dayanımları Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri

Karışım Adı	Eğilme			Basınç		
	3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
KONTROL	7.936	8.185	9.339	34.238	59.378	68.432
K5	7.728	8.135	9.146	35.126	54.145	65.717
K10	6.891	7.406	8.515	37.215	53.566	59.638
K15	6.389	7.220	8.118	35.399	52.723	52.789
K20	6.557	7.503	8.207	27.234	48.455	53.355
MK5	6.261	7.534	8.740	35.837	57.578	61.426
MK10	6.725	7.612	8.312	33.265	53.194	58.088
MK15	6.606	7.248	7.872	32.026	53.297	52.759
MK20	5.712	6.990	8.061	27.920	55.474	54.782

Şekil 5.4’de kaolin ve kalsine kaolin ikmaeli KYH numunelerinin eğilme dayanımlarının ikame oranıyla ve kür süreleriyle değişimini göstermektedir.



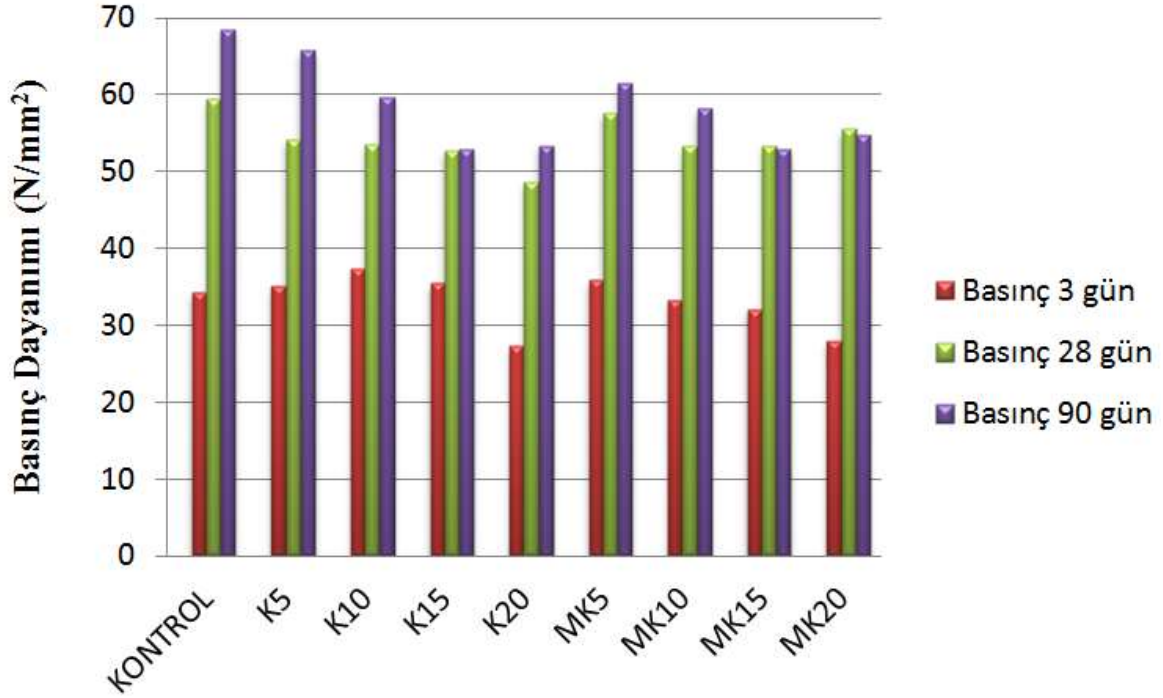
Şekil 5.4. KYH'lerin eğilmede çekme dayanımları

Şekil 5.4'de kaolin ikameli harçlara genel olarak bakıldığında, kaolin oranı arttıkça 3, 28 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımı %15 kaolin ikameli K15'e kadar azalmakta olup, tüm kaolin içerikli harçların eğilmede çekme dayanımları kontrol harcınıninkinden düşük olduğu görülmektedir. 3 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 7.728 MPa değeriyle K5 harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımı ise 6.389 MPa değeriyle K15 harcına aittir. 28 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 8.135 MPa değeriyle K5 harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımı ise 7.220 MPa değeriyle K15 harcına aittir. 90 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 9.146 MPa değeriyle K5 harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımı ise 8.118 MPa değeriyle K15 harcına aittir. Kaolin ikameli 3, 28 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanım kayıpları sırasıyla % 2.62-19.5, % 0.6-11.8 ve % 2-13 aralığındadır.

Şekil 5.4'de kalsine kaolin ikameli harçlara genel olarak bakıldığında 3, 28 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımları kaolinde olduğu gibi kontrol harcınıninkinden düşüktür. Ancak en yüksek eğilmede çekme dayanımı 3 ve 28 günlük numunelerde MK10 harcına aitken 90 günlük numunelerde MK5 harcına aittir. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise 3 ve 28 günlük numunelerde MK20 harcına, 90 günlük numunelerde ise MK15 harcına aittir. Dayanım kayıpları ise 3, 28 ve 90 günlük numunelerde sırasıyla % 15.26-28, %7-14.6 ve % 6.4-15.7 aralığındadır. Kaolin ve kalsine

kaolin katkısının 3, 28 ve 90 günlük numunelerin eğilme dayanımlarına arttırıcı bir etkisi olmadığı ve ikame oranı arttıkça eğilme dayanımını düşürdüğü görülmüştür.

Şekil 5.5’de kaolin ve kalsine kaolin ikameli KYH numunelerinin basınç dayanımlarının ikame oranıyla ve kür süreleriyle değişimini göstermektedir.



Şekil 5.5. KYH’lerin basınç dayanımları

Şekil 5.5’e bakıldığında kaolin ikameli 3 günlük numunelerin kaolin miktarı arttıkça basınç dayanımlarının %15 ikameli K15 harcına kadar arttığı görülmektedir ancak K20 harcında basınç dayanımı yüksek oranda azalmaktadır. K20 harcı hariç tüm kaolin ikameli 3 günlük numunelerin basınç dayanımının kontrol harcınıkinden yüksek olduğu görülmüş ve en yüksek dayanım 37.215 MPa değeriyle K10 harcına aittir. 28 ve 90 günlük numunelerde ise kaolin miktarının artmasıyla basınç dayanımlarında düşüş olup, tüm harçların basınç dayanımı kontrol harcınıkinden düşüktür. 28 gün sonunda en büyük dayanım 54.145 MPa değeriyle K5, en düşük dayanım 48.455 değeriyle K20 harcına aittir. 90 günün sonunda en büyük basınç dayanımı 65.717 MPa değeriyle K5, en düşük dayanım 52.789 MPa değeriyle K15 harcına aittir. 3 günlük numunelerde basınç dayanımı en fazla %3.4 artarken, en büyük basınç dayanım kaybı % 20.5 civarındadır. 28 ve 90 günlük numunelerde ise basınç dayanım kayıpları sırasıyla % 8.8-18.4 ve % 4-22.8 aralığındadır.

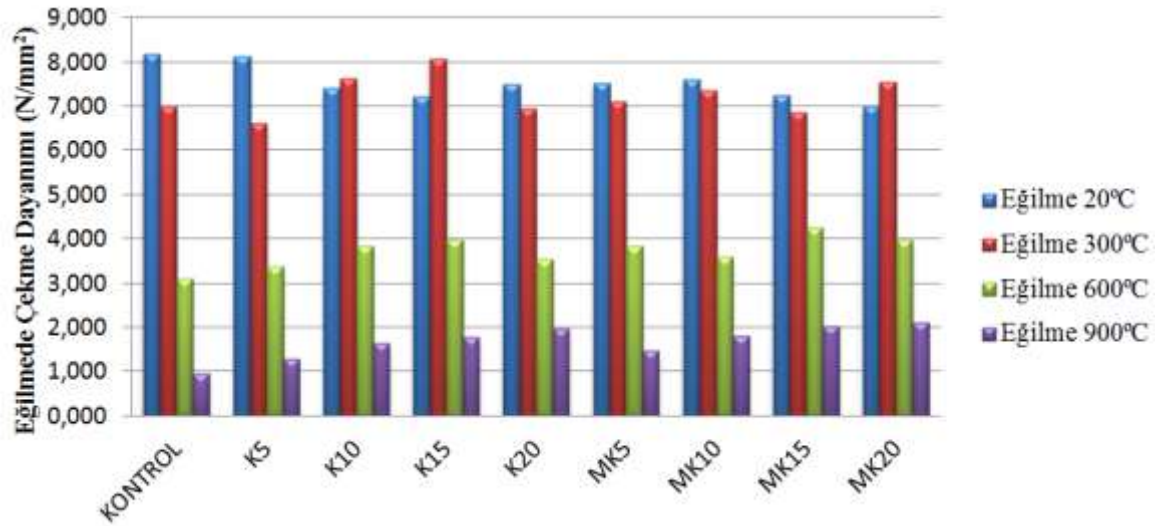
Şekil 5.5’de kalsine kaolin ikameli harçlar incelendiğinde MK5 harcı hariç tüm numunelerde basınç dayanımı kontrol harcının altında kaldığı görülmektedir. 3 günlük numunelerde basınç dayanımı MK15’e kadar kontrol harcının dayanımına yakinken MK20 harcında büyük düşüş görülmektedir. 28 ve 90 günlük numunelerde MK15 harcına kadar basınç dayanımı azalmakta MK15 harcından sonra az da olsa bir dayanım artışı görülmektedir. 3 günlük numunelerde en büyük dayanım 35.837 MPa değeriyle MK5 harcına aitken, en düşük dayanım 27.920 MPa değeriyle MK20 harcına aittir. 28 ve 90 günlük numunelerde en büyük basınç dayanım sırasıyla 57.578 ve 61.426 MPa değerleriyle MK5 harcına, en düşük basınç dayanımı sırasıyla 53.297 ve 52.759 MPa değeriyle MK15 harcına aittir. 3 günlük numunelerde MK5 harcında % 4.5 basınç dayanım artışı olurken en büyük dayanım kaybı % 18.5 civarındadır. 28 ve 90 günlük numunelerde basınç dayanım kaybı sırasıyla %3-10.4 ve % 10-23 arasındadır. Kaolin ve kalsine kaolinin basınç dayanımları incelendiğinde kaolinin erken yaş dayanımını arttırıcı bir etkisi olurken kalsine kaolinde bu durum görülmemiştir.

5.2.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları

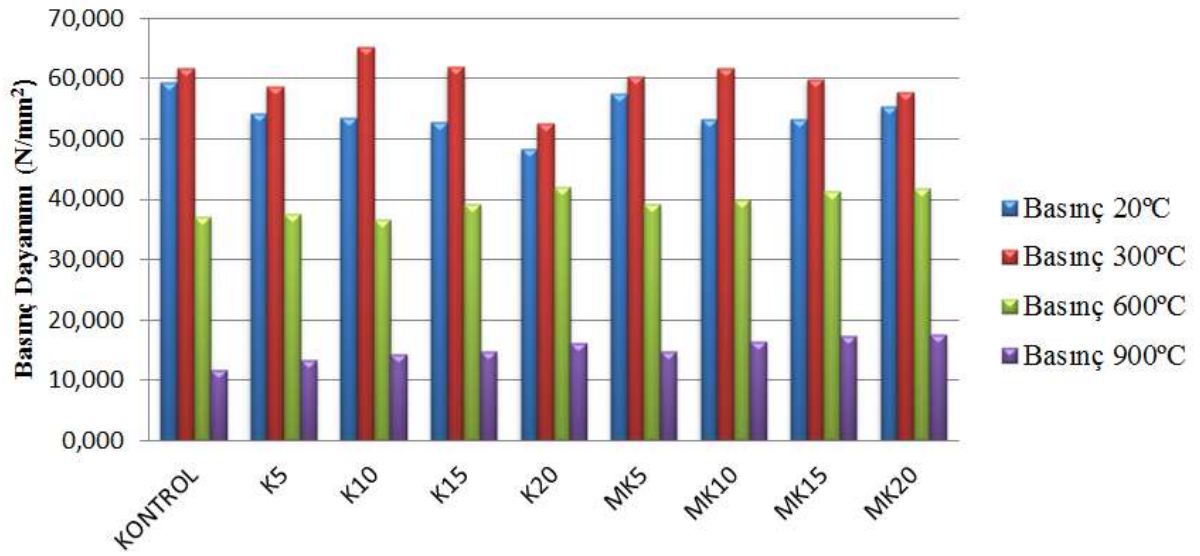
27 adet 4x4x16 cm prizmatik KYH numuneleri 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri Tablo 5.4’de, harçların eğilme ve basınç ilişkisinin sıcaklıklara göre değişimi Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımları

Karışım Adı	Eğilme	Eğilme	Eğilme	Eğilme	Basınç	Basınç	Basınç	Basınç
	20°C	300°C	600°C	900°C	20°C	300°C	600°C	900°C
KONTROL	8.185	6.997	3.096	0.940	59.378	61.717	37.186	11.801
K5	8.135	6.619	3.366	1.293	54.145	58.756	37.528	13.401
K10	7.406	7.624	3.824	1.646	53.566	65.355	36.721	14.405
K15	7.220	8.081	3.976	1.773	52.723	61.912	39.302	14.887
K20	7.503	6.957	3.522	1.970	48.455	52.458	42.078	16.257
MK5	7.534	7.107	3.824	1.461	57.578	60.437	39.165	14.789
MK10	7.612	7.366	3.579	1.805	53.194	61.662	39.882	16.449
MK15	7.248	6.853	4.249	2.017	53.297	59.932	41.259	17.396
MK20	6.990	7.540	3.973	2.102	55.474	57.783	41.791	17.557



Şekil 5.6. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımları



Şekil 5.7. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

Tüm KYH numunelerinde sıcaklığın artmasıyla eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının düştüğü Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de açıkça görülmektedir. Ancak Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 genel olarak incelendiğinde sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerde hem kaolin hem de kalsine kaolin miktarı arttıkça eğilme ve basınç dayanımları kontrol numunesine göre artmıştır. Kaolin ikameli numunelerin 300 °C ve 600 °C’de en yüksek eğilme dayanımı K15 harcı olurken, en düşük eğilme dayanımı K20 harcına aittir. Ancak 900 °C’de de en yüksek eğilme dayanımı K20 harcına, en düşük eğilme dayanımı ise K5 harcına aittir. Kaolin ikameli numunelerin 300 °C, 600 °C ve 900 °C’de en yüksek basınç dayanımı sırasıyla K10, K15 ve K20 harçlarına aittir. Dolayısıyla kaolin ikameli harçların basınç dayanımının kontrol numunesine göre sıcaklığa karşı daha dirençli olduğu görülmektedir.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de kalsine kaolin ikameli harçlar incelendiğinde 300 °C’de MK15 harcına kadar eğilme dayanımı artmış, MK15 harcında bir düşüş olduktan sonra MK20 harcında en yüksek eğilme dayanımına ulaşılmıştır ve MK15 harcı hariç tüm harçların eğilme dayanımının kontrol harcından yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.6’da 600 °C ve 900 °C’de kalsine kaolin ikameli harçların eğilme dayanımlarının kontrol harcından yüksek olduğu görülmektedir ve 600 °C’de en yüksek eğilme dayanımı MK15 harcına aitken, en düşük eğilme dayanımı MK10 harcına, 900 °C’de ise en büyük dayanım MK20 harcına, en düşük dayanım MK5 harcına aittir. Şekil 5.7’ye bakıldığında kalsine kaolin

ikameli harçların 300 °C, 600 °C ve 900 °C’de en yüksek basınç dayanımı sırasıyla MK10, MK20 ve MK20 harçlarıyken, en düşük basınç dayanımı MK20, MK5 ve MK5 harçlarına aittir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 genel olarak incelendiğinde kaolin ve kalsine kaolinin eğilme ve basınç dayanımlarının göre yüksek sıcaklık altında kontrol harcına daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 5.5. Yüksek sıcaklık altında eğilme ve basınç dayanım kayıpları (%)

Karışım Adı	Eğilme	Eğilme	Eğilme	Basınç	Basınç	Basınç
	300°C	600°C	900°C	300°C	600°C	900°C
KONTROL	14.5	62.2	88.5	-3.9	37.4	80.1
K5	18.6	58.6	84.1	-8.5	30.7	75.3
K10	-2.9	48.4	77.8	-22.0	31.4	73.1
K15	-11.9	44.9	75.4	-17.4	25.5	71.8
K20	7.3	53.1	73.7	-8.3	13.2	66.4
MK5	5.7	49.2	80.6	-5.0	32.0	74.3
MK10	3.2	53.0	76.3	-15.9	25.0	69.1
MK15	5.4	41.4	72.2	-12.4	22.6	67.4
MK20	-7.9	43.2	69.9	-4.2	24.7	68.4
(-) Dayanımın arttığını göstermektedir.						

Tablo 5.5 incelendiğinde 300 °C’de; K10 ve K15 harçlarının eğilme dayanımı, K5, K10, K15 ve K20 harçlarının basınç dayanımlarının arttığı, MK20 harcının eğilme, MK5, MK10, MK15 ve MK20 harçlarının basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Khoury

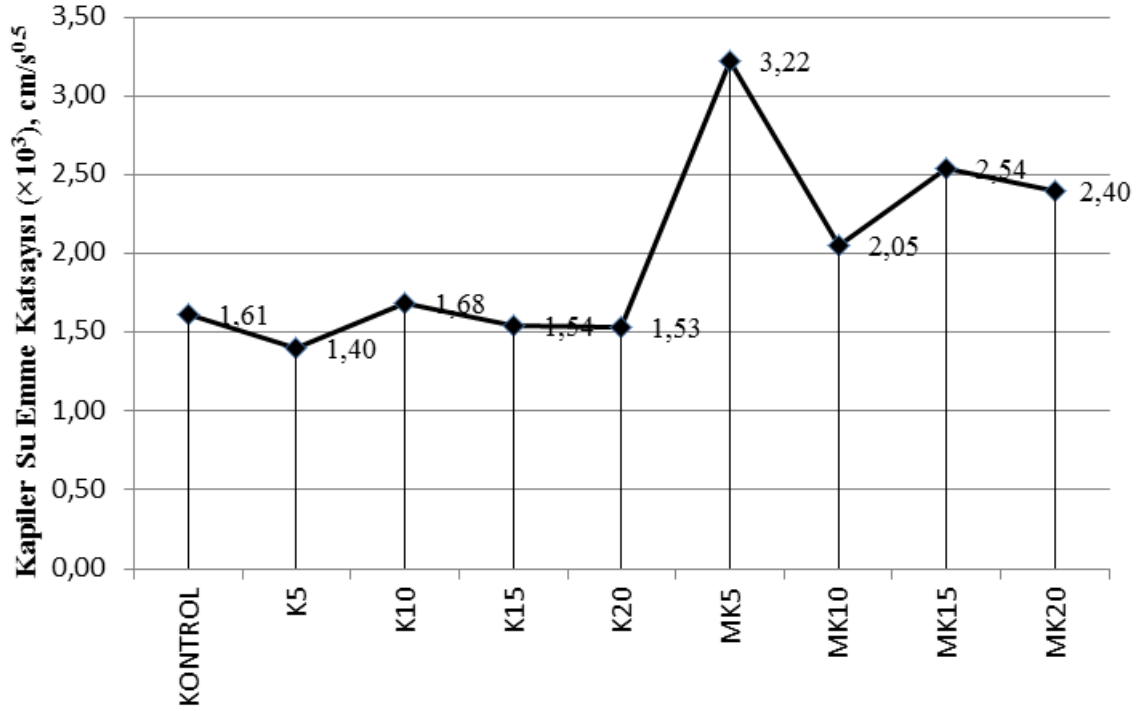
[68] elastik gerilme analizi sonucu betonun 100 °C civarında bozulacağını ama 300 °C'ye kadar dayanımının artabileceğini belirtmiştir. Bu artış, 300 °C sıcaklıkta betonun sıcak kür etkisi görmesi ve hidrate yapısının bozulmamasından kaynaklanmaktadır [68]. Literatürde genellikle betonun 450°C'den daha yüksek sıcaklıklarda dayanımının büyük bir kısmını kaybedeceği belirtilmektedir. Bu dayanım kaybının sebebi 300~500 °C arasında harç-agrega bağlarının zayıflayıp ara yüzey çatlaklarının oluşması, 300°C'den sonra kristal suyunun kaybedilmesinin ve 400-500 °C arasında $(Ca(OH)_2)$ 'nin CaO 'e dönüşerek hacimce %30 büzülmesi düşünülmektedir. Başka bir çalışmada, 300 °C'de dayanımların artmasının sebebi 200 °C civarında çimento hamurunun büzülmesinden kaynaklandığı belirtilmektedir [69]. Çünkü çimento hamurunun jel yapısını oluşturan C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) katı ögeleri adsorpsiyon suyu ile birbirlerine bağlanırlar. Jel adsorbe suyu ve C-S-H jelinin hidrat suları düşük sıcaklıklarda buharlaşmazlar. Ama boşluklarda bulunan serbest su 100 °C civarında buharlaşabilir. Bu buharlaşma aynı zamanda çimento hamurunun büzülmesine neden olabilir ki bu da betonun dayanımını arttırdığı gibi suyun buharlaşması da rötire çatlaklarına neden olabilir. Ayrıca beton içinde beliren buhar basıncı, beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına yol açabilir.

Tablo 5.5'de kaolin ikameli harçların eğilme dayanım kaybı 600 °C'de % 53.1-58.6, basınç dayanım kaybı % 13.2-30.7, 900 °C'de eğilme dayanım kaybı % 73.7-84.1, basınç dayanım kaybı % 66.4-80.1 arasında olduğu görülmektedir. Tablo 5.5'e kalsine kaolin ikameli harçlar için bakıldığında; 600 °C ve 900 °C'de eğilme dayanım kayıpları sırasıyla % 41.4-53 ve % 69.9-80.6 arasında, basınç dayanım kayıpları sırasıyla % 22.6-32 ve % 68.4-74.3 arasında olduğu görülmektedir.

Çimento hamurunda CSH yanında bulunan diğer bileşen kalsiyum hidroksittir $(Ca(OH)_2)$. C-S-H'nin kimyasal suyu ve jel suyu 300 °C'den itibaren kaybolmaya başlar ve 530 °C civarında $Ca(OH)_2$ CaO 'e dönüşür [70]. Bu sıcaklıklardan sonra beton büyük dayanım kayıplarına uğrar.

5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite

Kapiler su emme deneyinden elde edilen tüm serilere ait kılcal su emme katsayıları Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Kapiler su emme katsayıları

Şekil 5.8'e bakıldığında kaolin ikameli harçlarda en düşük kapiler su emme katsayısı K5 serisine, en yüksek kapiler su emme katsayısı K10 serisine aittir. K10 serisi hariç tüm kaolin ikameli harç serilerinin kapiler su emme katsayıları kontrol harcınıninkinden daha düşüktür. K15 ve K20 serilerinin kapiler su emme katsayıları neredeyse eşittir. Şekil 5.8'de kaolin ikameli harçlara genel olarak bakıldığında kapiler su emme katsayılarında büyük bir fark görülmemektedir. En geçirimsiz harç serisi K5 iken, en geçirimli harç serisi K10 serisidir.

Şekil 5.8 incelendiğinde kalsine kaolin ikameli harçlarda en yüksek kapiler su emme katsayısı MK5 harcına aitken, en düşük kapiler su emme katsayısı MK10 harcına aittir. Tüm kalsine kaolin ikameli harç serilerinin kapiler su emme katsayıları kontrol harcınıninkinden yüksektir. En geçirimsiz seri MK10 iken, en geçirimli seri MK5'dir ve kapiler su emme katsayısı % 5 ikameli MK5 serisi ile % 10 ikameli MK10 serisi arasında keskin bir düşüş olmuştur. Ayrıca kaolin ve kalsine kaolin karşılaştırıldığında tüm kalsine kaolin içerikli numunelerin kapiler su emme katsayıları kaolin içerikli numunelerinkinden yüksektir.

KYH numunelerinin etüv kuru ağırlıkları, su içindeki ağırlıkları ve doymun kuru yüzey ağırlıkları Tablo 5.6.'da verilmiştir.

Tablo 5.6. KYH numunelerinin etüv kuru su, su içindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları

KARIŞIM ADI	Etüv Kuru su Ağırlık (W_1)	Su İçindeki Ağırlık (W_2)	DKY Ağırlık (W_3)
KONTROL	256.47	149.02	266.69
K5	260.78	150.36	269.73
K10	252.52	147.81	263.27
K15	262.61	150.42	271.32
K20	260.14	150.26	270.31
MK5	249.05	151.50	268.26
MK10	255.52	151.52	269.49
MK15	245.21	146.50	261.03
MK20	260.41	156.83	275.50

Tablo 5.6.'daki değerler ile denklem (4.4), (4.5) (4.6) ve (4.7) kullanılarak KYH numunelerinin yoğunlukları, toplam su emme kapasitesi (%) ve porozite (%) değerleri bulunmuş ve bu değerler Tablo 5.7. ve Tablo 5.8.'de verilmiştir.

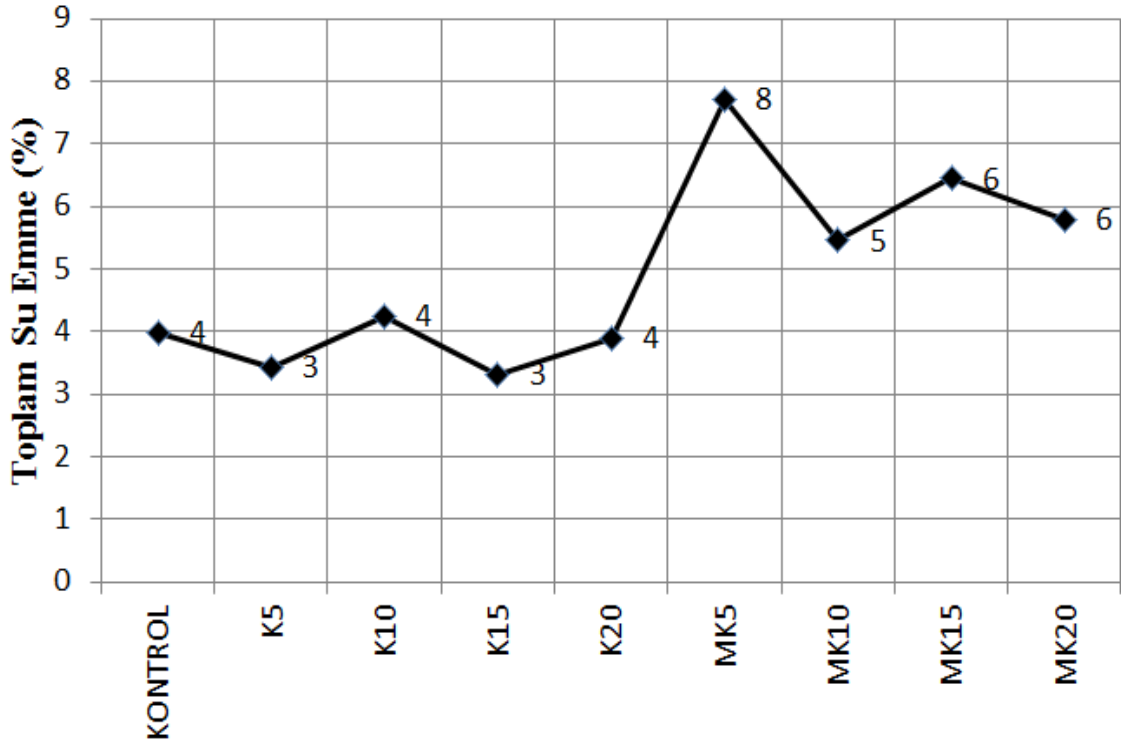
Tablo 5.7. 5x5x5 cm küp numunelerinin yoğunlukları

KARIŞIM ADI	DKY Yoğunluk (g/cm ³)	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)
KONTROL	2.27	2.39
K5	2.26	2.36
K10	2.28	2.41
K15	2.24	2.34
K20	2.25	2.37
MK5	2.30	2.55
MK10	2.28	2.46
MK15	2.28	2.48
MK20	2.32	2.51

Tablo 5.8. 5x5x5 cm küp numunelerinin toplam su emme ve porozite değerleri

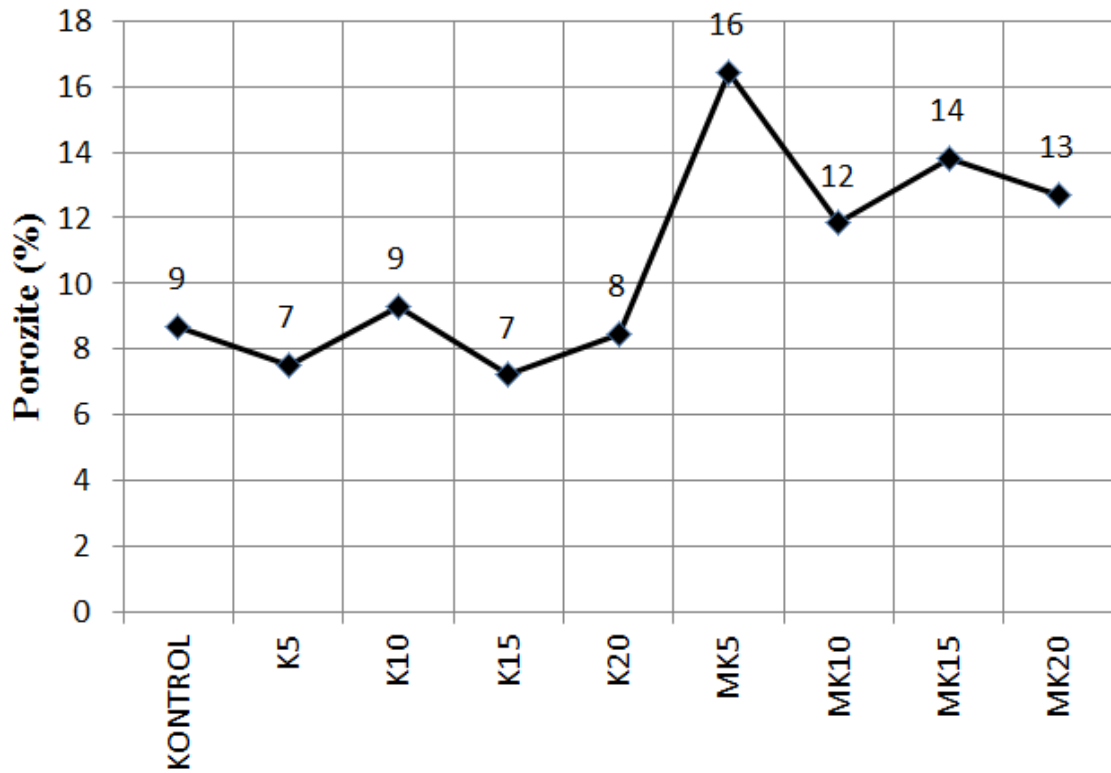
KARIŞIM ADI	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite (%)
KONTROL	3.99	8.69
K5	3.43	7.50
K10	4.26	9.31
K15	3.32	7.21
K20	3.91	8.47
MK5	7.71	16.45
MK10	5.46	11.84
MK15	6.45	13.81
MK20	5.79	12.72

Sertleşmiş KYH numunelerinin toplam su emme ve porozite grafikleri sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.9. 5x5x5 cm küp numunelerinin toplam su emme oranları

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 incelendiğinde kaolin ikameli harçların toplam su emme ve porozite değerleri kontrol harcıninkine yakındır ancak kalsine kaolin içerikli harçların toplam su emme ve porozite oranları kontrol harcının toplam su emme ve porozite oranından büyüktür. Serilerden en yüksek toplam su emme ve porozite oranı MK5 serisine aitken en düşük toplam su emme ve porozite oranı MK10 serisine aittir. Artan poroziteyle harçlarda yerleşme boşlukları oluşabilir bu da harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir.

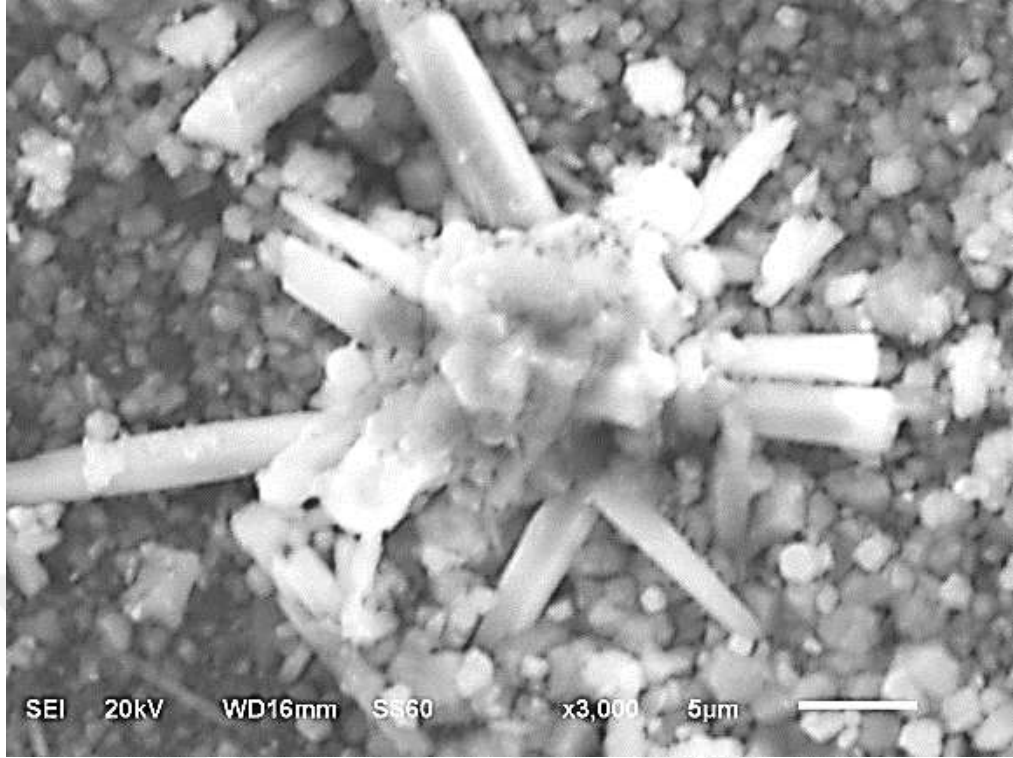


Şekil 5.10. 5x5x5 cm küp numunelerinin porozite oranları

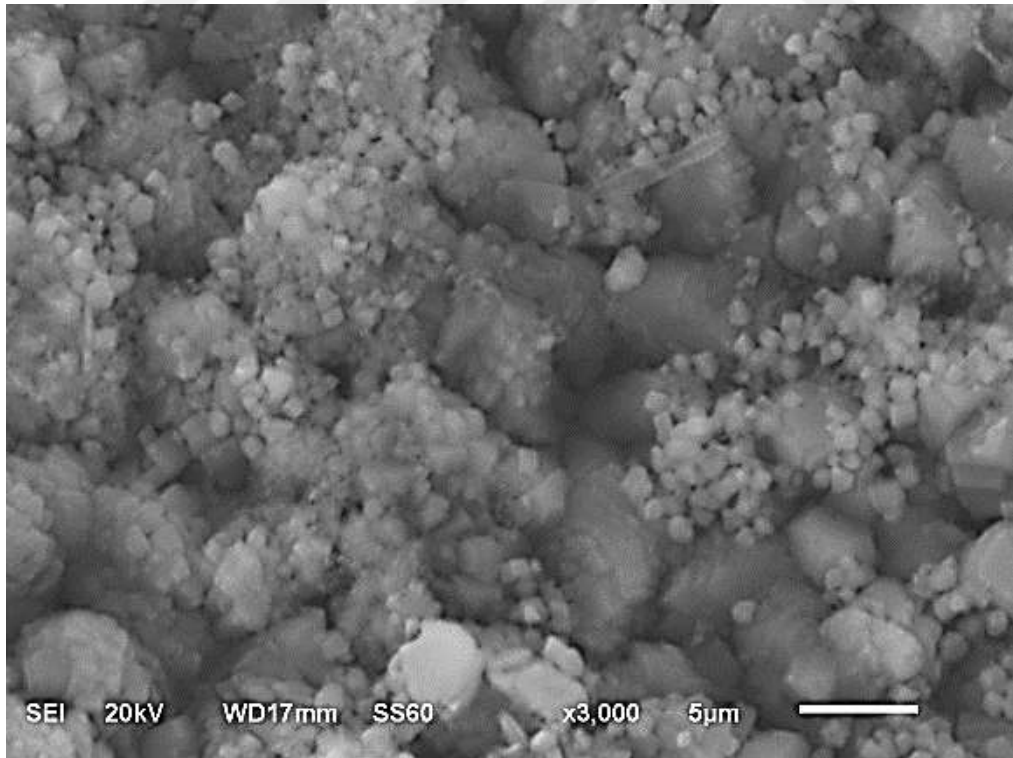
Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 incelendiğinde kaolin ikamesi numunelerin geçirimsizliğine fazla etki etmezken, kalsine kaolin ikamesi numuneleri daha geçirimsiz hale getirmiştir.

5.2.4. Mikroyapı İncelemeleri (SEM-XRD-EDX)

Bingöl Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda kontrol, K20 ve MK20 serilerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile fotoğrafları çekilmiş, XRD ve EDX analizleri incelenmiştir. Şekil 5.11'de kontrol, K20 ve MK20 serilerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.12'de numunelerin XRD analizleri, Şekil 5.13'de de kontrol, K20 ve MK20 serilerinin SEM/EDX analizleri verilmiştir.

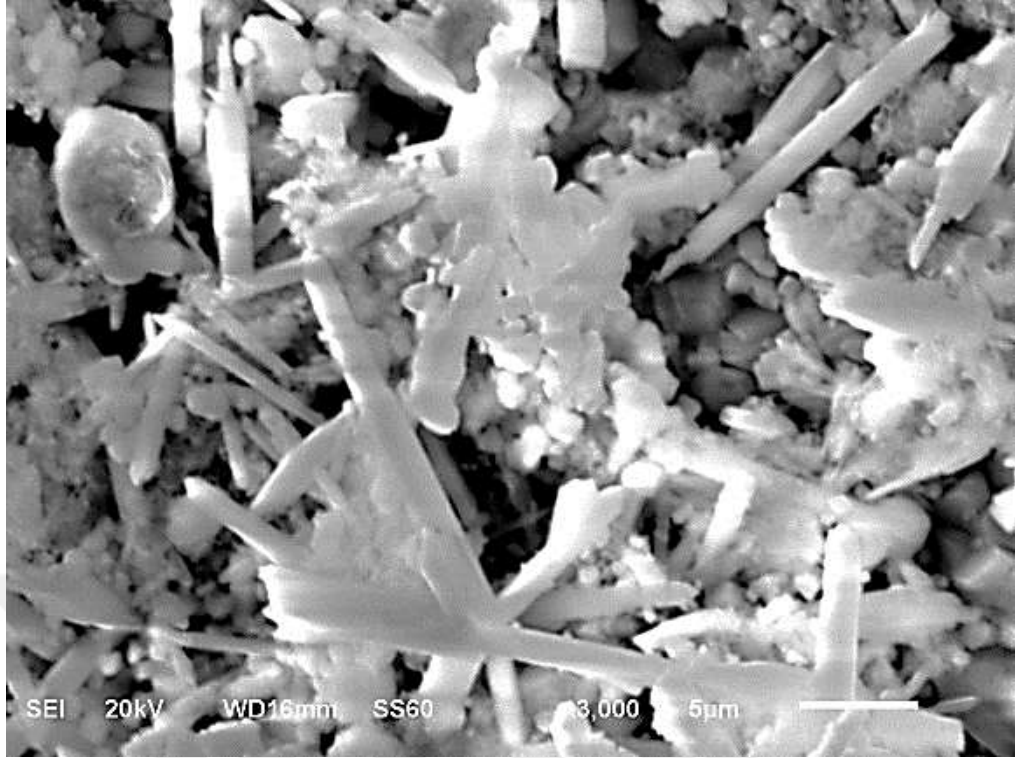


(a)



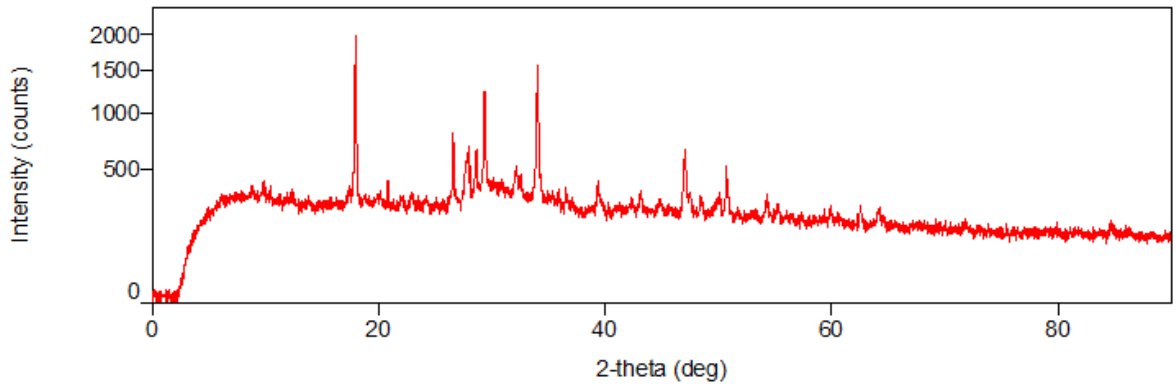
(b)

Şekil 5.11. SEM görüntüleri 3000X a)Kontrol numunesi, b)K20, c)MK20



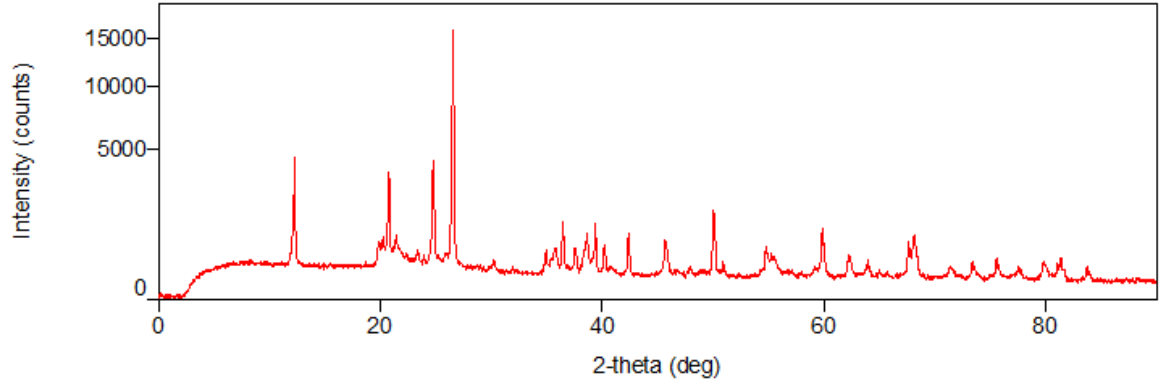
(c)

Şekil 5.11. 'in devamı

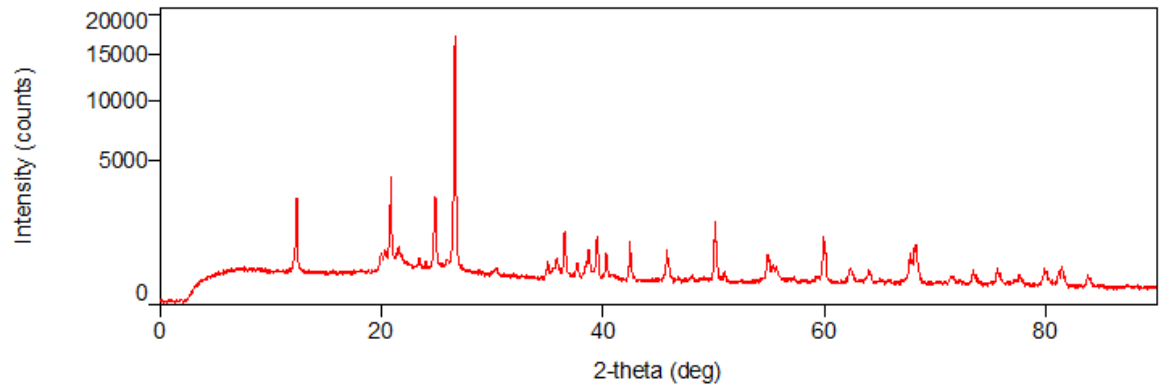


(a)

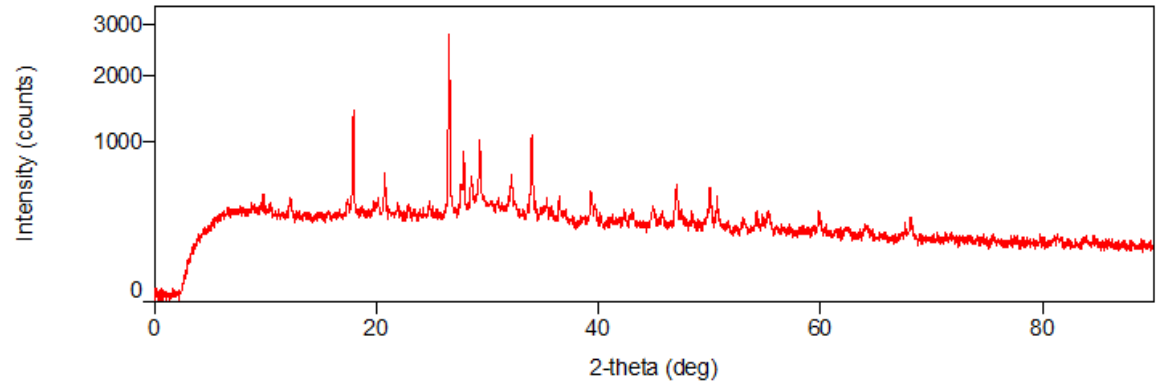
Şekil 512. XRD analizleri a) Kontrol numunesi, b) Toz kaolin, c) Toz kalsine kaolin, d) Kalsine kaolin numunesi



(b)

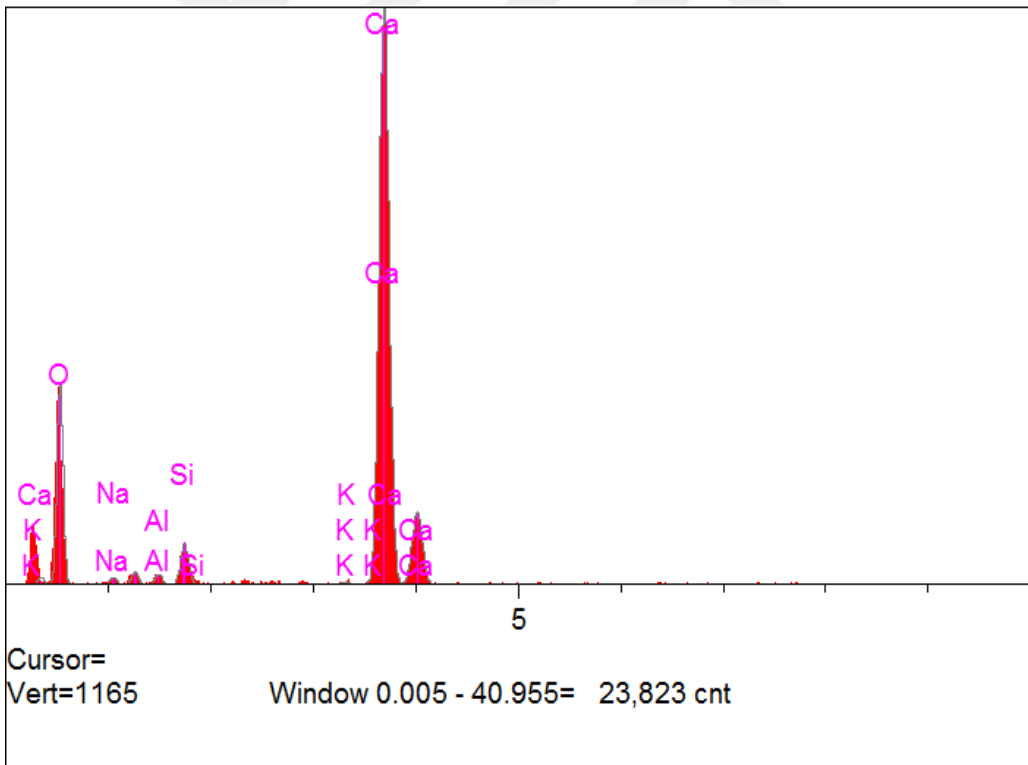


(c)



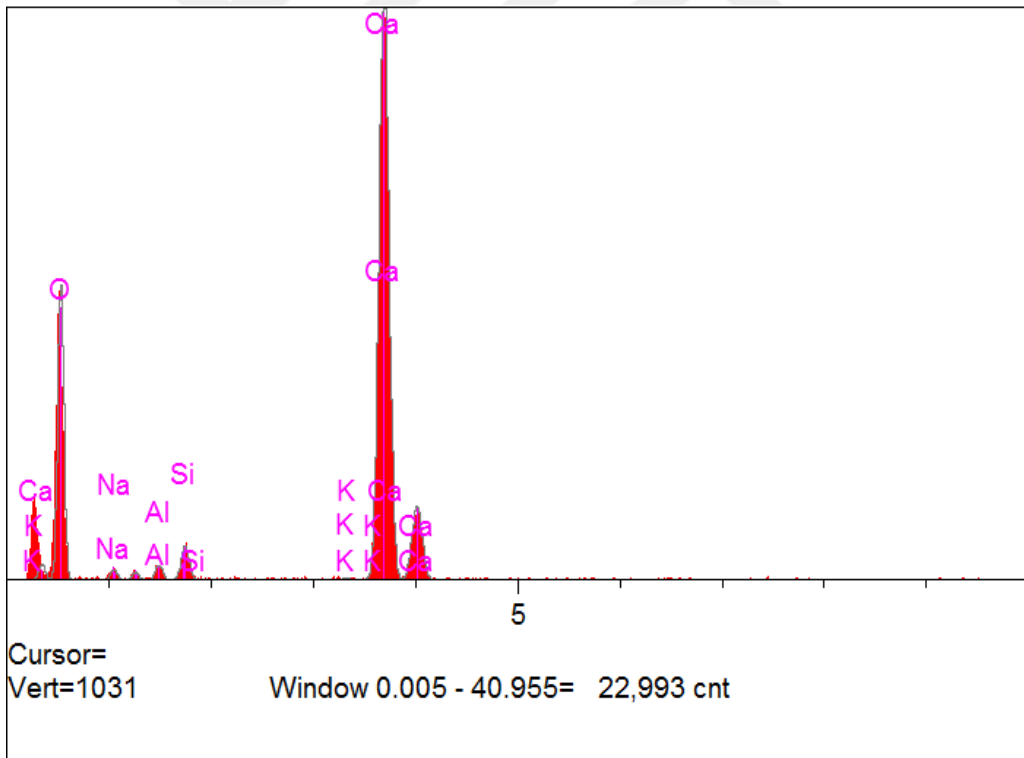
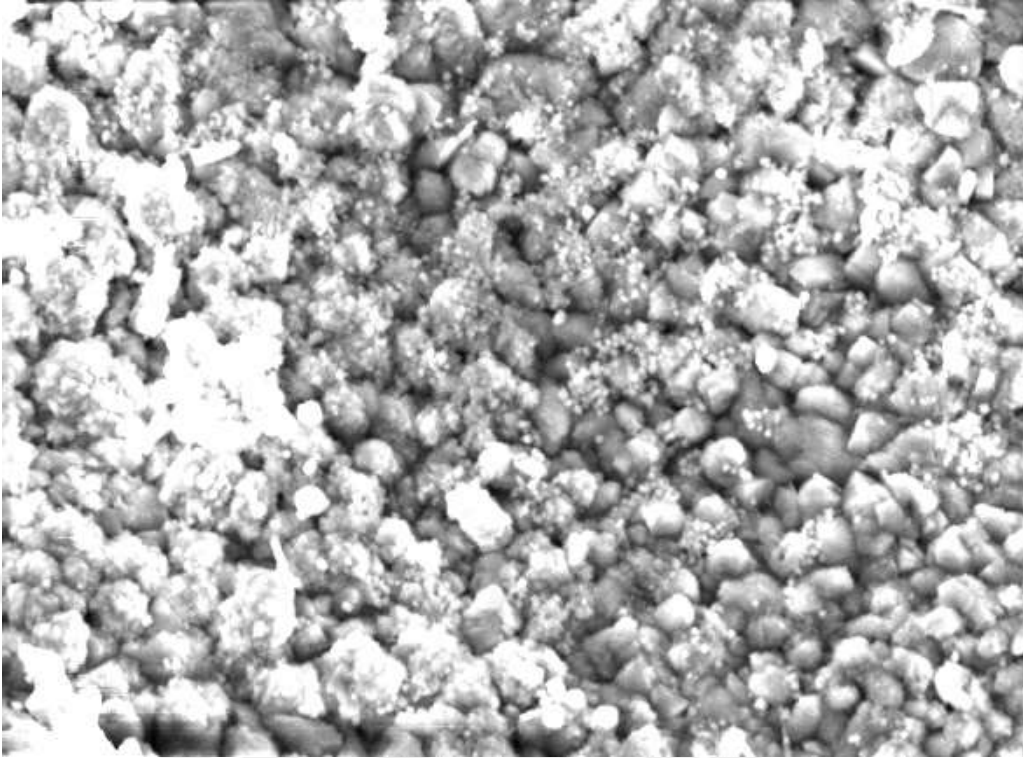
(d)

Şekil 5.12. 'nin devamı



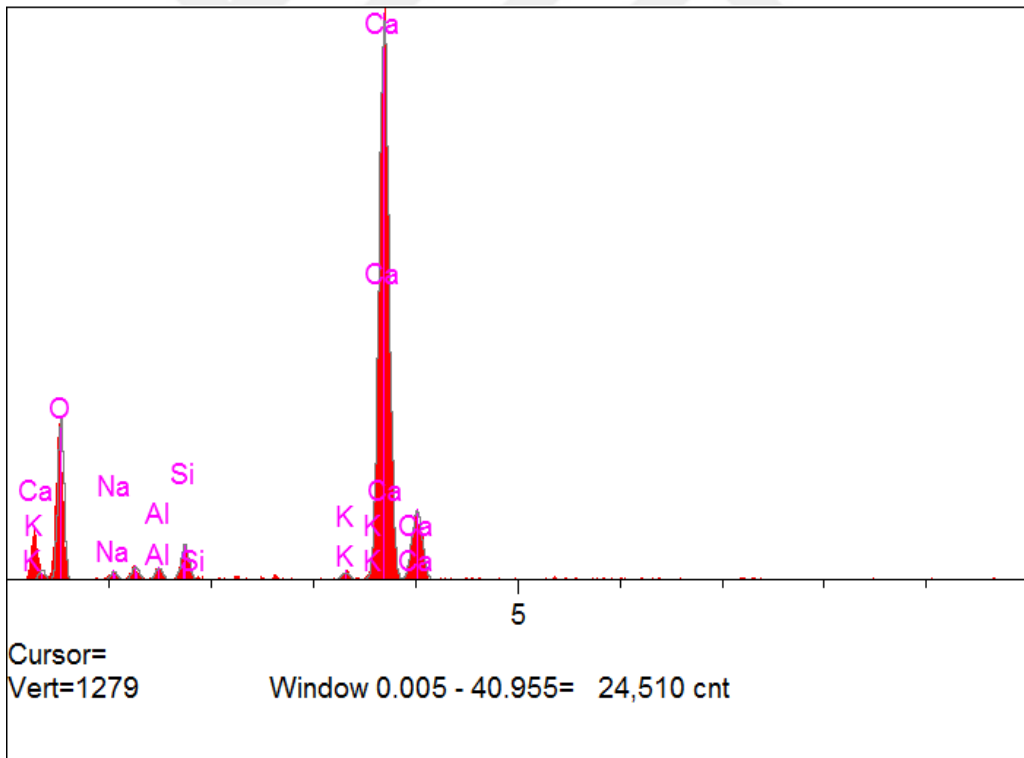
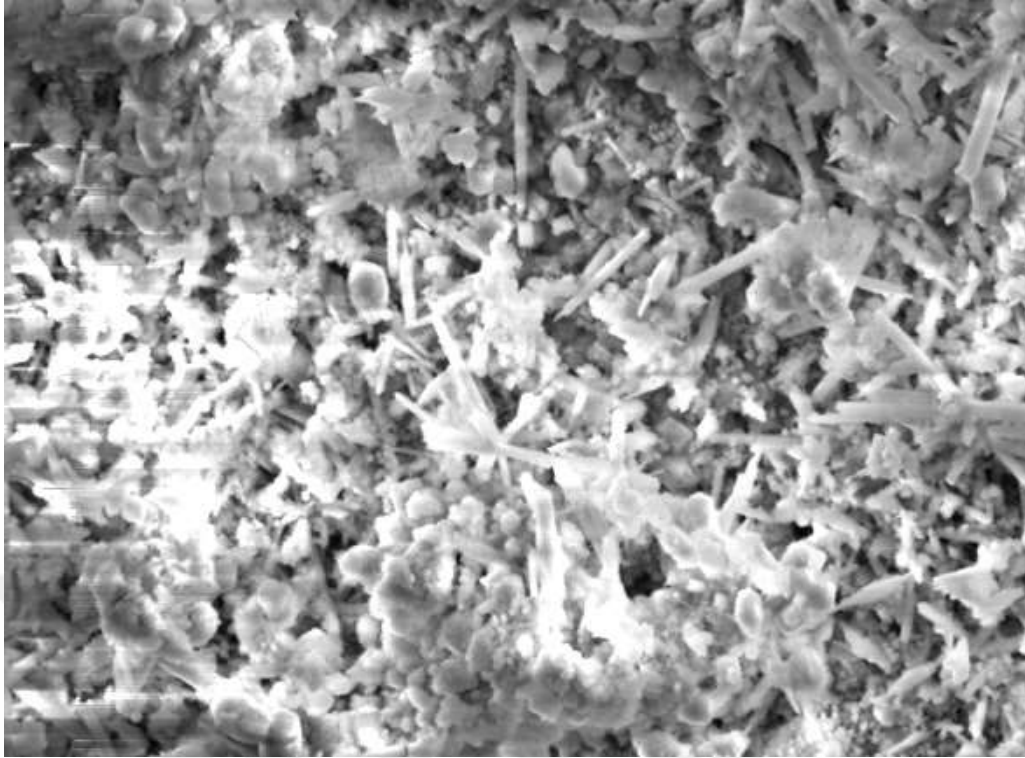
(a)

Şekil 5.13. SEM/EDX analizleri a) Kontrol numunesi, b)K20, c) MK20



(b)

Şekil 5.13.'ün devamı



(c)

Şekil 5.13. 'ün devamı

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada bağlayıcı olarak çimento yerine Bilecik yöresi kaolin ve kaolinin laboratuvar ortamında kalsine edilerek elde edilen kalsine kaolin kullanılarak üretilen KYH numunelerinin işlenebilirlik ve kıvamını tayin etmek için mini çökme yayılma deneyi ve viskozimetre deneyi; mekanik özellikleri belirlemek için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca tüm serilere ait numunelerin porozite ve toplam su emme değerleri hesaplanmıştır. Tüm numuneler üzerinde dayanıklılık deneylerinden kılcal su emme deneyi gerçekleştirilerek kılcal su emme katsayısı hesaplanmış ve yüksek sıcaklık deneyi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin SEM görüntüleri, XRD ve EDX analizleri incelenmiştir. Yapılan bütün bu deney sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Karışımlara uygulanan mini çökme yayılma değerleri EFNARC'ın uygun gördüğü değerler arasında kalmıştır, ayrıca hem kaolin hem de kalsine kaolin ikameli harçlarda kaolin ve kalsine kaolin miktarının artması harcın işlenebilirliğini arttırmıştır.
- KYH'da kaolin ve kalsine kaolin miktarının artması viskozite değerlerini düşürmüştür. Bu durum kohezyonu azaltacak etki olarak görülse de kaolin ve kalsine kaolin katkılı harçların viskozite değerleri kontrol harcı ile birbirlerine yakın çıkmıştır.
- KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde eğilme dayanımları kontrol harcına göre düşük çıkmıştır. Kaolin katkılı numunelerin tüm kür sürelerinde en yüksek eğilme dayanımı %5 ikameli K5 serisine aittir.
- Kalsine kaolin katkılı numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 3 ve 28 günlük kür sürelerinde %10 ikameli MK10 serisine aitken 90 günlük kür süresinde ise %5 ikameli MK5 serisine aittir.
- Kaolin ikameli KYH numunelerinin 3 günlük kür süresi sonunda %5, %10 ve %15 ikameli K5, K10 ve K15 serilerinin basınç dayanımlarının kontrol harcına göre yüksek olduğu görülmüştür. 3 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımı 37.215 MPa değeriyle %10 ikameli K10 serisine aittir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde kaolin katkılı numunelerin basınç dayanımlarının kontrol harcına göre

düşük olduğu ve kaolin miktarı arttıkça basınç dayanımlarında azalma olduğu görülmüştür.

- Kalsine kaolin ikameli KYH numunelerinin 3 günlük kür süresi sonunda sadece %5 ikameli MK5 serisinin basınç dayanımı kontrol harcına göre yüksek çıkmış ve %10, %15 ve %20 ikameli MK10, MK15 ve MK20 serilerinin basınç dayanımları kontrol harcının altında kalmıştır. 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda kalsine kaolin katkılı numunelerin basınç dayanımlarının kontrol harcına göre düşük olduğu görülmüştür ve kalsine kaolin ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarında düşüş görülmüştür.
- 28 gün kür süresi sonunda yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış kaolin ve kalsine kaolin ikameli KYH numunelerinde sıcaklığın artmasıyla birlikte eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. 300 °C sıcaklığa maruz bırakılmış kaolin ikameli numunelerin eğilme dayanımları K5 serisinde kontrol numunesine göre azalmış sonrasında %15 ikameli K15 serisine kadar artış göstermiştir. 300 °C’de en yüksek eğilme dayanımı 8.081 MPa değeriyle K15 serisine aittir. 600 °C’de kaolin katkılı numunelerin eğilme dayanımlar %15 ikameli K15 serisine kadar artış göstermiştir ve tüm numunelerin eğilme dayanımlarının kontrol numunesine göre yüksek olduğu görülmüştür. 900 °C’de kaolin katkılı numunelerin eğilme dayanımları %20 ikameli K20 serisine kadar sürekli artış göstermiştir.
- Kaolin ikameli numunelerin en yüksek eğilme dayanım kayıpları tüm sıcaklıklarda K5 serisine aittir. K5 serisinin 300 °C, 600 °C ve 900 °C’de eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %18.6, %58.6 ve %84.1 oranında olup 600 °C ve 900 °C’de eğilme dayanım kayıpları kontrol numunesinin altında çıkmıştır.
- Kaolin ikameli numunelerin 300 °C’deki basınç dayanımları 20 °C oda sıcaklığındaki numunelerin basınç dayanımlarına göre artış göstermiştir. 300 °C’de K10 ve K15 serilerinin basınç dayanımlarının kontrol harcına göre yüksek olduğu görülmüş, en yüksek basınç dayanımı 65.355 MPa değeriyle %10 ikameli K10 serisine aittir. 600 °C ve 900 °C’de tüm kaolin ikameli numunelerin basınç dayanımlarının kontrol harcına göre yüksek olduğu ve en yüksek basınç dayanımlarının 600 °C ve 900 °C’de sırasıyla 42.078 MPa ve 16.257 MPa değerleriyle K20 serisine ait olduğu görülmüştür.

- Kaolin ikameli numuneleri 300 °C’de basınç dayanım kaybına uğramamıştır. 600 °C ve 900 °C’deki en yüksek basınç dayanım kayıpları sırasıyla %31.4 oranında K10 ve %75.3 oranında K5 serilerine aittir.
- Kalsine kaolin ikameli numunelerin 300 °C’de eğilme dayanımlarının MK15 serisi hariç kontrol numunesine göre yüksek olduğu görülmüştür. 300 °C’de maksimum eğilme dayanımı 7.540 MPa değeriyle MK20 serisine aittir. 600 °C’de kalsine kaolin katkılı tüm numunelerin eğilme dayanımlarının kontrol numunesine göre yüksek olduğu ve en yüksek eğilme dayanımının 4.249 MPa değeriyle MK15 serisine ait olduğu görülmüştür. 900 °C’de kalsine kaolin katkılı numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesinden yüksek çıkmıştır ve kalsine kaolin oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarında artış gözlenmiş olup, maksimum eğilme dayanımı 2.102 MPa değeriyle MK20 serisinde elde edilmiştir.
- Kalsine kaolin ikameli numunelerin en yüksek eğilme dayanım kayıpları 300 °C ve 900 °C’de MK5, 600 °C’de MK10 serisinde gözlemlenmiştir. 300 °C, 600 °C ve 900 °C’de en yüksek eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %5.7, %53 ve %80.6 oranında olup, tüm sıcaklıklardaki eğilme dayanım kayıpları kontrol numunesinin altında çıkmıştır.
- Kalsine kaolin ikameli numunelerin 300 °C’deki basınç dayanımları 20 °C oda sıcaklığındaki numunelerin basınç dayanımlarına göre artış göstermiştir. 300 °C’de kalsine kaolin katkılı numunelerin basınç dayanımlarının kontrol numunesine göre düşük olduğu görülmüştür. Maksimum basınç dayanımı %10 ikameli MK10 serisinde elde edilmiştir. 600 °C ve 900 °C’de tüm kalsine kaolin katkılı numunelerin basınç dayanımlarının kontrol harcından yüksek olduğu ve en yüksek basınç dayanımlarının 600 °C ve 900 °C’de sırasıyla 41.791 MPa ve 17.557 MPa değerleriyle MK20 serisine ait olduğu görülmüştür.
- Kalsine kaolin katkılı numuneler 300 °C’de basınç dayanım kaybına uğramamıştır. 600 °C ve 900 °C’deki en yüksek basınç dayanım kayıpları sırasıyla %32 ve %74.3 oranlarında MK5 serisinde elde edilmiştir.
- KYH numunelerinin, hem kaolin hem de kalsine kaolin miktarı arttıkça yüksek sıcaklıktan daha az etkilendiği ve yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı hale geldiği görülmüştür.
- KYH numuneleri için yapılan kapiler su emme deney sonuçlarına göre kaolin katkılı numunelerinin K10 serisi hariç diğer serilerinde kapiler su emme

katsayısında düşüş olmuş, en yüksek kapiler su emme katsayısı K10 serisinde, en düşük kapiler su emme katsayısı ise K5 serisinde elde edilmiştir. K5, K10 ve K20 serileri geçirimsizliği olumsuz etkilememiştir. Ayrıca kapiler su emme katsayısı 10^{-3} mertebesinde hesaplandığı göz önünde bulundurulduğunda bu düşüş ihmal edilebilir.

- Kalsine kaolin katkılı numunelerin kapiler su emme katsayısı kontrol numunesinden daha fazla olup, en yüksek kapiler su emme katsayısı MK5, en düşük ise MK10 serisinde elde edilmiştir. Kalsine kaolin ikameli serilerin kapiler su emme katsayısının arttırması, serilerin geçirimsizliğini ve dolayısıyla dayanımını olumsuz etkilemiştir.
- Kaolin ikameli harçların porozite ve toplam su emme değerleri kontrol harcının değerleriyle yakınen, kalsine kaolin kullanılan tüm serilerin porozite ve toplam su emme değerleri kontrol harcından yüksektir. Bu yüzden kalsine kaolin kullanımı harçların su emme oranını arttırmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Topçu, İ.B.**, 2006. Beton teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş., 570s.
- [2] **Leemann, A., Münch B., Gasser P., Holzer L.**, 2006. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete, *Cement and Concrete Research* 36, 1425-1433.
- [3] **Barness, P. and Bensted, J.**, 2001. Structure and Performance of Cements. Chapter 15: Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete, T.R. Jones. Florance, KY, USA: Routledge, , p372.
- [4] **Shafiq, N., Nuruddin, M.F., Khan, U.K., Ayub, T.**, 2015. Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete, *Construction and Building Materials* 81, 313-323.
- [5] **Péra, J., Bich, C., Ambroise, J.**, 2009. Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin, *Appl Clay Sci* 44, 194–200.
- [6] **Balczár, I., Korim, T., Kovács., A., Makó, E.**, 2016. Mechanochemical and thermal activation of kaolin for manufacturing geopolymer mortars – Comparative study, *Ceramic International*, 42, 15367-15375.
- [7] **Xu, W., Ouyang, D., Lo, T.Y., Sham, J.F.C.**, 2011. Increasing mortar strength with the use of activated kaolin by-products from paper industry, *Construction and Building Materials*, 25, 1537-1545.
- [8] **Kenai, S., Mansour, M.S., Kadri, E.H., Ghrici, M., Bennaceur, R.**, 2011. Influence of calcined kaolin on mortar properties, *Construction and Building Materials*, 25, 2275-2282.
- [9] **Elimbi, A., Diffo, B.B.K., Cyr, M., Manga, J.D., Kouamo H.T.**, 2015. Effect of the rate of calcination of kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymers, 3, 130-138.
- [10] **Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K.L., Martirena, F.**, 2015. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration, *Applied Clay Science*, 108, 94-101.
- [11] **He, C., Makovicky, E., Øsbæck, B.**, 1995. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite, *Appl. Clay Sci.*, 9 (5), 337-354.
- [12] **He, C., Makovicky, E., Øsbæck, B.**, 2000. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite, *Appl. Clay Sci.*, 17, 141-161.
- [13] **Fernandez, R., Martirena F., Scrivener, K.L.**, 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cem. Concr. Res.*, 41 (1), 113-122.

- [14] **Vizcayno, C., Gutierrez R.M., Torres, J., Castello R.**, 2008. Influence of the calcination temperature of kaolin on the mechanical properties of mortars and concretes containing metakaolin, *Clay Minerals*, 43, 177–183.
- [15] **Elimbi, A., Tchakoute, H.K., Njopwouo, D.**, 2011. Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements, *Construction and Building Materials*, 25, 2805-2812.
- [16] **Jin, J., Domone, P.L.**, 2002. Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*.
- [17] **Felekoğlu, B.**, 2003. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- [18] **Sağlam, A.F. ve Özkul, M.H.**, 2006. Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, *İTÜ Dergisi*, 5, 239-25.
- [19] **EFNARC**, (2002). “Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete”, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org, ISBN 0953973344, 32p.
- [20] **Okamura, H., Ouchi, M.**, 2003. Self-compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 5-15.
- [21] **Ouchi M.**, 1999. Self-compacting concrete–Development, applications and investigations. Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p.
- [22] **Gönen, T.**, 2009. Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [23] **Karataş, M.**, 2007. “Mineral Katkı Dozajının ve Türünün Kendiliğinden Sıkışan Betondaki Donatı Aderansına Etkisi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [24] <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> **EFNARC 2005**, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use. 20 Mart 2013.
- [25] **Felekoğlu B., Yardimci M.Y., Baradan B.**, 2003. A Comparative Study on the Use of Mineral and Chemical Types of Viscosity Enhancers in Self-Compacting Concrete. 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Iceland, (Accepted to be published), 12.
- [26] **Efnarc**, 2002. Specification and guidelines for self-compacting concrete, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, February, ss.1-40.

- [27] **EFNARC**, 2005. The European Guidelines for Self Compacting Concrete Specification, production and use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), pp. 68.
- [28] **Demirtaş, M.**, 2001. "Yüksek Akışkanlığa Sahip Betonlarda (Kendiliğinden Yerleşen Betonlar) Bileşimin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 93 s.
- [29] **Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, Ü.A., Özkul, M.H.**, 2004. "Kendiliğinden yerleşen beton ve katkı-çimento uyumu", Beton 2004 Kongresi, 10–12 Haziran, İstanbul, 213–224 s.
- [30] **The European Federation for Specialist Construction Chemicals**, 2002. "Specification and Guidelines of SCC".
- [31] **Topçu İ.B., Uygunoğlu T.**, 2008. "Kendiliğinden yerleşen betonda pomza hafif agregası kullanımının araştırılması", Beton Prefabrikasyon, Yıl 22, Sayı 85, Ocak, ss. 5-14.
- [32] **Khurana R., Topçu O.**, 2000. Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete. Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, 473-482 p, Istanbul, Turkey.
- [33] **Sari M., Prat E., Labastire J.-F.**, 1999. High strength self-compacting concrete – Original solutions associating organic and inorganic admixtures. Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 813-818.
- [34] **Koca, C.**, 1996. Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Cüruf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381- 94.
- [35] **Collepardi M.**, 2001. A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC). unpublished data, 10.
- [36] **Erdoğan, T.Y.**, 1997. Admixtures for Concrete. METU Press, Ankara.
- [37] **Punkki J., Golaszewski J., Gjorv O.E.**, 1996. Workability Loss of High-Strength Concrete. ACI Materials Journal, September-October, pp. 427-431.
- [38] **Kadri E.-H., Aggoun S., Duval R., Petruk M.P.**, 2000. Influence of C3A on physicochemical and mechanical properties of high performance concretes, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume II, Istanbul, Turkey, 31-39.
- [39] **Türkel S., Felekoğlu B.**, (2003). "Silika Dumanı ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Betonda Kendiliğinden Yerleşebilirlik ve Basınç Dayanımı Üzerine Etkileri", Kocaeli 2003 Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi Yer ve Uzay Bilimleri Araştırma Merkezi, 8s.

- [40] **Yazıcı, H.**, 2004. Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [41] **Erdoğan, T.Y.**, 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu kül ve Yüksek Fırın curufu, Endüstri Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 1-8, 18-19.
- [42] **Erdoğan, T.Y.**, 2010. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- [43] **ASTM C 618**, 2004. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.
- [44] **Sakamoto, J., Matsuoka, Y., Shindoh, T. and Tagtermsirikul, S.**, 1991. An application of super workable concrete to construction of actual structures. Transaction of the Japan Concrete Institute,13.
- [45] **Termkhajornkit P., Nawa T., Ohnuma H.**, 2002. Role of Fly Ash and Naphthlene Sulfonate Superplasticizers on Fluidity of Paste. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 39-46.
- [46] **TS EN 934**, 2002. Kimyasal Katkılar - Beton Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler Özellikler Uygunluk İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [47] **Gürol, G.**, 1999. “Ekonomik beton için beton bileşenleri çimento/su/ince ve kaba agrega/kimyasal ve mineral katkılar”, Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi, 1999/164 Haziran, 66–74 s.
- [48] **ASTM C 125**, Annual Book of ASTM Standarts., Pennsylvania.
- [49] **Erdoğan, T.Y.**, 2013. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- [50] **Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y.**, 2006. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği.
- [51] **Ramachandran, V. S.**, 1995. Concrete Admixtures Handbook, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A.
- [52] **Vu, D.D.**, 2002. Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete, Delft University Press, Netherlands, 152p.
- [53] **Erdoğan, T.Y.**, 2007. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 757s.

- [54] **Özer, E.**, 2009. Niğde Yöresi (Fesleğen Yayla) Kaolin Kilinden Metakaolin Üretilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Niğde; 71s.
- [55] **Mehta, P.K.**, 1989. Pozzolanic and Cementitious By-Products in Concrete- Another Look, Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Editor V.M. Malhotra, Trondheim, Norway.
- [56] **Özturan, T.**, 1993. Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Pozolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara.
- [57] **Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Alt Maddeler Alt Komisyonu**, 1995. Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu Cilt I, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Yayın No: DPT : 2418 – Ö&K: 477.
- [58] **Rashad M. A.**, 2013. Metakaolin as a cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview, Construction and Building Materials, 41, 303-318.
- [59] **TS 5396**, 2010. Kaolin-Seramik sanayiinde kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [60] **Nkombou C., Njoya A., Njoya D., Grosbois C., Njopwouo D., Yvon J.**, 2009. Kaolin from Mayouom (Western Cameroon): industrial suitability evaluation, Applied Clay Science, 43, 118-124.
- [61] **Devlet Planlama Teşkilatı Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu**, 2001. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Toprak Sanayii Hammaddeleri (Seramik Killeri, Kaolin, Feldspat, Pirofillit, Wollastonit, Talk), T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2611-ÖİK: 622, 8.
- [62] <http://tur.sika.com/tr> Sika®ViscoCrete®Hi-Tech 36, Yüksek Performanslı Hiper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Teknik Bilgi Föyü.
- [63] **TS EN 196-1**, 2002. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [64] **TS EN 12390-7**, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [65] **TS 4045**, 1984. Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE, Ankara.
- [66] **TS EN 1363-1**, 2001. Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 1:Genel Kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [67] **TS EN 1363-2**, 2002. Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 2: Alternatif ve İlave İşler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[68] **Koehler, E., P., & Fowler D.,W.**, 2007. Aggregates In Self-Consolidating Concrete, 353s.

[69] **Yüzer, N., Aköz, F., Kızılkant, A.B.**, 2004. Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası XVII.Teknik Kongresi, 15-17 Nisan, İstanbul.

[70] **Khoury, G. A.**, 1996. Performance of Heated Concrete - Mechanical Properties, Contract NUC/56/3604A with Nuclear Installations Inspectorate, Imperial College, London, United Kingdom, August.



ÖZGEÇMİŞ

Furkan ARSLAN, 1993 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğretimini Tevfik Yaramanoğlu İlkokulu'nda, liseyi Elazığ Anadolu Lisesi'nde okudu. 2012 yılında Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ne (İNGİLİZCE) başlayıp, 2017 yılında mezun oldu. Elazığ Şehir Hastanesi projesinde kalite güvence ve kalite kontrol bölümünde çalıştı. Aynı yıl içerisinde Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017-2018 yılı bahar yarıyılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalına geçiş yaptı.

