KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAKAOLİN İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ MEKANİK ÖZELİKLERE ETKİSİ

Çağla ŞENEL

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAKAOLİN İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ MEKANİK ÖZELİKLERE ETKİSİ

Çağla ŞENEL

Doç.Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Yrd.Doç.Dr. Adnan ÖNER
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Yrd.Doç.Dr. Ünal Anıl DOĞAN
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.05.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bana bu yolu açmış ve çok güzel bir örnek, büyük bir şans olan, bu süreç içerisinde ilgisini, yardımlarını ve zamanını esirgemeyen, kıymetli hocam Doç. Dr. Burcu Akçay Aldanmaz'a her şey için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme;

Sevgili anneciğim Ayşe Şenel'e ve sevgili babacığım Mustafa Şenel'e,

Canım kardeşim Mert Şenel'e,

Daima her şey için çok teşekkür eder, sonsuz şükranlarımı sunarım.

TÜBİTAK 110R008 nolu projeden destek alınmıştır.

Mart – 2017 Çağla ŞENEL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. KAOLİN 2
2. METAKAOLİN 6
2.1. Genel Bilgiler 6
2.2. Üretimi 11
3. METAKAOLİNİN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ 14
3.1. Erken Yaş Etkileri 18
3.1.1. Reolojik özelikler 18
3.1.2. Çökme 18
3.1.3. Priz zamanı 19
3.1.4. Hidratasyon ısısı 19
3.2. Rötre 20
3.3. Mekanik Özelikler 22
3.3.1. Basınç dayanımı 22
3.3.2. Ultrases geçiş hızı 24
3.3.3. Eğilme dayanımı 25
3.3.4. Çekme dayanımı 25
3.3.5. Yarma-Çekme dayanımı 26
3.3.6. Elastisite modülü 26
3.3.7. Kırılma davranışı 26
3.4. Durabilite 27
3.4.1. Klor geçirimliliği 27
3.4.2. Sülfat dayanıklılığı 28
3.4.3. Alkali-silika reaksiyonu 28
3.5. Kimyasal Dayanım 30
3.6. Donma-Çözülme Etkisi 31
3.7. Su Emme 31
3.8. Porozite 32
3.9. Yangın Dayanımı 33
3.10. Mikro Yapısal Özelikler 35
4. FARKLI KÜR KOŞULLARININ METAKAOLİN İÇEREN BETONLARDA ETKİLERİ 37
5. DENEYSEL ÇALIŞMA 47
5.1. Malzemeler 47
5.2. Numunelerin Hazırlanması 49
5.3. Deneysel Metot 50

5.3.1. Taze beton özelikleri 50
5.3.2. Sertleşmiş beton özelikleri 50
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER 52
6.1. Taze Beton Özelikleri 52
6.2. Sertleşmiş Beton Özelikleri 53
6.2.1. Basınç dayanımı 53
6.2.2. Eğilme dayanımı 54
6.2.3. Yarma-çekme dayanımı 56
6.3. Regresyon Analizi 57
7. SONUÇLAR 59
KAYNAKLAR 60
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 67
ÖZGEÇMİŞ 68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kaolin 2
Şekil 1.2. Bir kaolin yatağında yapılan işletmeden bir görüntü 2
Şekil 1.3. Kaolinitin şematik yapısı 3
Şekil 1.4. Kaolin plakaları ve yığınları 4
Şekil 2.1. Metakaolin 6
Şekil 2.2. Puzolanlar soldan sağa; uçucu kül (C sınıfı), metakaolin, silis dumanı, Uçucu kül (F sınıfı), Cüruf, Kalsine şist 6
Şekil 2.3. Tappan Zee köprüsü – New York 7
Şekil 2.4. Broad Modern Sanatlar Müzesi - Los Angeles 8
Şekil 2.5. Kaolinin DTA termogramı (Ball kili ve kaolinin DTA ve TGA analizleri,1998) 9
Şekil 2.6. Metakaolinin taramalı elektron mikroskobu mikrogörüntüsü 11
Şekil 2.7. Kürlemenin 7 ve 28 gününde basınç dayanımındaki artışın yüzdesi 12
Şekil 3.1. Puzolanik reaksiyon oluşumu (Kalsiyum silika hidrat formasyonu) 14
Şekil 3.2. Çimento hamurlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (a) %0 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 7 günlük (b) %15 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 7 günlük (c) %0 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 28 günlük (d) %15 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 28 günlük 15
Şekil 3.3. Kürleme süresine göre kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi (a) harç (b) hamur 16
Şekil 3.4. Kalsiyum hidroksit içeriğinin farklı su/bağlayıcı oranında betonlarda termogravimetrik analiz ile hesaplanmış değerleri 17
Şekil 3.5. Çökmenin metakaolin oranıyla ilişkisi 18
Şekil 3.6. (a) 24 saatten itibaren kurumuş betonların toplam rötresi (b) Metakaolinin kuruma rötresine etkisi 20
Şekil 3.7. Metakaolin kullanımının priz başlangıcından itibaren otojen rötreye etkileri (a) erken yaş, (b) uzun dönemli 21
Şekil 3.8. Metakaolin kullanımının priz başlangıcından itibaren 200-günlük toplam rötreye etkileri 22
Şekil 3.9. Farklı metakaolin içeriğine karşılık gelen göreceli dayanımlar(a) 1 günlük (b) 90 günlük 23
Şekil 3.10. Eğilme dayanımı ile metakaolin miktarının ilişkisi 25
Şekil 3.11. Kontrol betonunun 2 yıl sonra gerisaçılmış taramalı elektron ikroskobu görüntüsü 29
Şekil 3.12. %8 oranında metakaolin içeren betonun 2 yıl sonra gerisaçılmış taramalı elektron mikroskobu görüntüsü 29
Şekil 3.13. Farklı metakaolin oranlarındaki harçların çeşitli kimyasal şartlardaki kütle değişim yüzdeleri 30
Şekil 3.14. Farklı Metakaolin oranlarındaki harçların çeşitli kimyasal şartlardaki kütle değişim yüzdeleri 31

Şekil 3.15. Yükseltilmiş sıcaklıklar uygulanan kontrol ve %15 oranında metakaolin içeren harçların taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları (a) 25°C'de hidrate olmuş kontrol harcı, (b) 25°C'de hidrate olmuş %15 oranında metakaolin içeren harç, (c) 250°C'ye yükseltilmiş kontrol harcı, (d) 250°C'ye yükseltilmiş %15 oranında metakaolin içeren harç, (e) 800°C'ye yükseltilmiş kontrol harcı, (f) 800°C'ye yükseltilmiş %15 oranında metakaolin içeren harç 34
Şekil 3.16. Metakaolinin 28 günde arayüz geçiş bölgesinin mikromorfolojisine etkileri (a) Metakaolin içermeyen (b) Metakaolin içeren 36
Şekil 4.1. Termal analizler sonucu hesaplanan reaksiyon ürünlerinin miktarları (20°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde) 38
Şekil 4.2. Termal analizler sonucu hesaplanan reaksiyon ürünlerinin miktarları (60°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde) 39
Şekil 4.3. Portland Çimentosu / Metakaolin 50/50'nin farklı ölçeklerdeki taramalı elektron mikroskobu içyapı resimleri..... 44
Şekil 4.4. 60°C'de 18 saat kürlenmiş %20 oranında metakaolin içeren beton..... 45
Şekil 5.1. A-Ref-H serisine ait silindir numunelerin basınç deneyi görüntüsü 50
Şekil 5.2. A-Ref-N serisine ait silindir numunelerin basınç deneyi sonrası görüntüsü. 51
Şekil 5.3. Eğilme deneyi düzeneğine ait bir görüntü..... 51
Şekil 6.1. Betonların taze haldeki özelikleri..... 52
Şekil 6.2. 28 ve 56 günde uygulanan basınç deneyi sonuçları 54
Şekil 6.3. 28 ve 56 günde uygulanan eğilme deneyi sonuçları 55
Şekil 6.4. 28 ve 56 günde uygulanan yarma-çekme deneyi sonuçları..... 56

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Genel olarak bir kaolinitin fiziksel özellikleri. 4
Tablo 1.2. Dünyadaki kaolin rezervleri..... 5
Tablo 2.1. Tipik ve yüksek reaktif bir metakaolinin kimyasal kompozisyonu (tipik metakaolin, yüksek reaktif metakaolin). 9
Tablo 2.2. Çeşitli puzolanların puzolanik aktifliği 10
Tablo 2.3. Metakaolinin fiziksel özelikleri 10
Tablo 2.4. Metakaolinin gereklilikleri 10
Tablo 5.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özelikleri..... 47
Tablo 5.2. Kullanılan metakaolin tozunun fiziksel ve kimyasal özelikleri..... 48
Tablo 5.3. Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları..... 48
Tablo 5.4. 1 m³ karışımın gerçek kompozisyonu ve bazı taze hal özellikleri..... 49
Tablo 6.1. 28 ve 56 günde uygulanan basınç deneyi sonuçları (MPa). 53
Tablo 6.2. Basınç dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim. 54
Tablo 6.3. 28 ve 56 günde uygulanan eğilme deneyi sonuçları (MPa). 55
Tablo 6.4. Eğilme dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim..... 55
Tablo 6.5. 28 ve 56 günde uygulanan yarma-çekme deneyi sonuçları (MPa)..... 56
Tablo 6.6. Yarma-çekme dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim. 57
Tablo 6.7. Metakaolin miktarı ve kür koşullarının farklı yaşlardaki mekanik özelikler ile ilişkisinin regresyon analiz sonuçları. 57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
°	: Derece
°C	: Santigrat derece
µm	: Mikrometre
A	: Al_2O_3, Alüminyum oksit
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
$Al_2Si_2O_7$	: Metakaolin
C	: CaO, Kalsiyum oksit
C_2ASH_8	: Stratlinjit
C_2S	: $(CaO)_2SiO_2$, trikalsiyum silikat
C_3A	: $(CaO)_2Al_2O_3$, trikalsiyum alüminat
C_3ASH_6	: Hidrogarnet
C_3S	: $(CaO)_3SiO_2$, trikalsiyum silikat
$C_3S_2H_8$	: Kalsiyum silika hidrat
$C_4A\bar{C}_{0,5}H_{11,5}$	: Hemikarbonat alümina hidrat
C_4AF	: $(CaO)_2Al_2O_3Fe_2O_3$,, tetrakalsiyum alümino ferrit
$C_4A\check{S}H_{12}$	: Monosülfat
$C_6A\check{S}H_{32}$	: Etrenjit
Ca	: Kalsiyum
$Ca(OH)_2$	: Kalsiyum hidroksit
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
CEM I	: Katkısız Portland Çimentosu
CH	: $Ca(OH)_2$, Kalsiyum hidroksit
Cm	: Santimetre
cm^2	: Santimetrekare
cm^3	: Santimetreküp
CO_2	: Karbondioksit
CSH	: $C_3S_2H_8$, Kalsiyum silika hidrat
$C\check{S}H_2$	: $CaSO_4.H_2O$, Jips
d_{5o}	: Ayırma sınır tane iriliği
F	: Fe_2O_3, Demir oksit
Fe_2O_3	: Demir oksit
G	: Gram
h	: Yükseklik
H	: H_2O, Su
H_2O	: Su
J	: Joule
K_2O	: Potasyum oksit
Kg	: Kilogram
LOI	: Loss On Ignition (Kızdırma kaybı)
m	: Metre
m^2	: Metrekare

m^3	: Metreküp
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum oksit
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
Na_2O	: Sodyum oksit
Na_2SO_4	: Sodyum sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
Ø	: Çap
O	: Oksijen
P_2O_5	: Difosfor pentaoksit
Š	: SO_4, Sülfat
S	: SiO_2, Silisyum dioksit
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum dioksit
SO_3	: Kükürt trioksit
TiO_2	: Titanyum oksit

Kısaltmalar

A-REF	: Referans- Metakaolin İçermeyen
ASR	: Alkali-Silis Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
B	: %8 Oranında Metakaolin İçeren
C	: %16 Oranında Metakaolin İçeren
CEM I	: Katkısız Portland Çimentosu
D	: %24 Oranında Metakaolin İiçeren
DTA	: Differential Thermal Analysis (Diferansiyel Termal Analiz)
EN	: European Norms (Avrupa Standartları)
H	: Sıcak Nem Kürü Uygulanmış
MK	: Metakaolin
MTA	: Maden Tetkik Arama
N	: Standart Su Kürü Uygulanmış
OPC	: Ordinary Portland Cement (Katkısız Portland Çimentosu)
PC	: Portland Çimentosu
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages (Uluslarası Laboratuvarlar Birliği ve İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapımları Uzmanları)
TGA	: Thermal Gravimetric Analysis (Termal Gravimetrik Analiz)

METAKAOLİN İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ MEKANİK ÖZELİKLERE ETKİSİ

ÖZET

Metakaolin içeren betonlar normal dayanımlı betonlara göre daha yoğun ve homojen yapıdadırlar. Metakaolin ile kalsiyum hidroksit arasındaki puzolanik reaksiyonlar, kalsiyumalüminahidratlı kalsiyum silika hidrat jelleri ve alümina silikahidrat kristal ürünleri oluşturmaktadır. Ancak bu ürünlerin miktarı ve özelikleri kısmen de olsa kür sıcaklıklarına bağlıdır. Bu çalışmada yüksek sıcaklıkta kür koşullarının kendiliğinden yerleşen betonların mekanik performansına etkilerini göstermek için deneyler yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan betonlar üretilmiş, metakaolin ağırlıkça %0, %8, %16 ve %24 olacak şekilde çimento ile yer değiştirmiştir. Bu karışımlarda standart kür koşullarına ilave olarak tipik yüksek sıcaklık kürlerinden olan ve özellikle prefabrik beton elemanlarda kullanılan 1-günlük 70°C sıcaklığında su kürü de uygulanmıştır. Basınç, eğilme ve yarma çekme deneyleri betonlar üretildikten 28 ve 56 gün sonra yapılmıştır. Sonuçlar kür sıcaklığının beton özeliklerine etkisinin metakaolin miktarına bağlı olarak değiştirdiğini göstermiştir. Düşük miktarda metakaolin içeren betonda yüksek sıcaklık kür durumunda mekanik dayanım artmaktadır, ancak bu etki metakaolin miktarı arttıkça azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kür Koşulları, Mekanik Özelikler, Metakaolin.

EFFECT OF CURING CONDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SELF COMPACTING METAKAOLIN BLEND CONCRETE

ABSTRACT

Metakaolin induced concretes are very dense and more homogenous than normal strength concrete. The pozzolanic reaction between metakaolin and calcium hydroxide forms calcium silica hydrate gels with calcium aluminate hydrate and alumina- silica hydrate crystalline products. However, the amount and properties of these products depend partly on curing temperature. In this research we performed experiments to show the effects of high curing condition on the mechanical performance of self compacting concrete. We produced concrete using 0,35 water/binder ratio, in which cement has been replaced by metakaolin at different weight fractions of 0%, 8%, 16%, 24%. In addition to a normal curing condition we also applied one-day 70°C curing condition, which is among the typical high curing regimes, especially for prefabricated concrete members. The compressive, flexural and splitting tensile tests were done at 28 and 56 days after production. The results show that the effect of curing temperature on the properties of concrete varies with amount of metakaolin. In the concrete with low amount of metakaolin the mechanical strength enhanced at high curing condition, while this effect is diminished with increasing amount of metakaolin.

Keywords: Curing Conditions, Mechanical Properties, Metakaolin.

GİRİŞ

Beton sanayinde önemli gelişmelerden biri endüstriyel atıkların veya yan ürünlerin çimento ile kısmen yer değiştirerek bir katkı maddesi olarak kullanılmasıdır. İstenilen beton özeliklerini iyileştirmek amacıyla yüksek dayanımlı betonlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı yaygın olarak kullanılmaktadır. Metakaolin ise bunlara oranla yeni bir mineral katkı maddesi olup, bir endüstriyel yan ürün olmamakla birlikte, tam olarak doğal bir malzeme de değildir. Değişken kompozisyonlardaki diğer puzolanların aksine, metakaolin istenilen partikül boyutunda, mineralojik kompozisyonda ve beyazlıkta üretilebilinir [1,2].

Metakaolin, yüksek ve ultra yüksek performanslı betonların kullanıldığı donatılı köprü betonları, ısıya dayanıklı yüksek katlı yapılar, patlamalara dayanıklı askeri yapılar ve nükleer atık depoları gibi yapılarda kullanılan betonlarda oldukça kullanılan bir malzemedir [1].

Bugünlerde prekast endüstrisi büyümektedir ve dünya çapında beton üretiminin %20'sini oluşturmaktadır [3]. Birçok nedenden dolayı, prefabrike betonların üretim sürecini kısaltmak için yüksek sıcaklıklarda kür uygulanmaktadır [4].

Bu çalışmada metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda kür sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın esas amacı metakaolin miktarı ile kür koşullarının yüksek dayanımlı betonların mekanik özeliklerine olan etkilerini belirlemektir.

1. KAOLİN

Kaolin ince, beyaz bir kil mineralidir ve geleneksel olarak porselen yapımında ve kağıt kaplamada kullanılmaktadır (Şekil 1.1) [5]. Kaolin terimi Çin'de bulunan Kaoling kasabasından gelmektedir. Dilimize çevirmeye çalışacak olursak "yüksek tepe" gibi bir anlama karşılık gelir, Jauchau Fu yakınlarındaki tepenin ismidir. Bu tepe Avrupa'ya seramik yapımı için yüzyıllar önce gönderilen kaolin mahsullerinin bulunduğu yerdir [6].



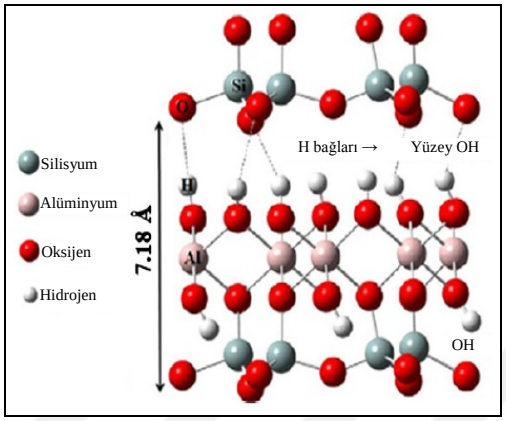
Şekil 1.1. Kaolin [5]

Kaolinlerin çıkarımı yapılan bir kaynağa ait görüntü Şekil 1.2'de verilmiştir [6].



Şekil 1.2. Bir kaolin yatağında yapılan işletmeden bir görüntü [6]

Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), alüminyumhidrasilikat bileşimli bir kil mineralidir. Ana kayaç içerisindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al_2O_3içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç, kaoliniti oluşturmaktadır [7].



Şekil 1.3. Kaolinitin şematik yapısı [5]

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 1.3'te görülmektedir [5].

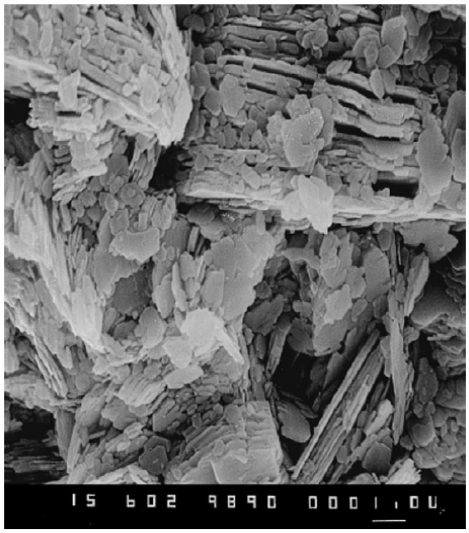
Kaolin içindeki Al_2O_3 haricindeki diğer bileşenlerin yüksek olması demek, Al_2O_3 oranının idealden (% 39,50'den) az olması demektir. Bu da kalitesinin daha düşük olduğu anlamına gelebilir [8].

Genel olarak bir kaolinitin fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir [9, 10].

Tablo 1.1. Genel olarak bir kaolinitin fiziksel özellikleri [9, 10]

Özellikler	Açıklama
Yoğunluk (g/cm³)	2,62
Kırılma İndisi	1,57
Sertlik (Mohs skalası)	1,5-2,0
Eritme Sıcaklığı (°C)	1850
Aşınma No (Einlehner)	4-10
Beyazlık (457nm de kuru) (%)	75-93
Kristal Sistem	Triklinik
Renk	Genellikle beyaz, renksiz, yeşilimsi veya sarı
Parlaklık	Toprağımsı
Saydamlık	Yarısaydam kristaller
Yarılma	Tek yönlü, tabansal

Kaolinit kristalleri büyük partiküller ve uzun yığınlar halinde levhalar boyunca hekzagonalımsı bir yapı göstermektedir (Şekil 1.4) [5].



Şekil 1.4. Kaolin plakaları ve yığınları [5]

Kaolinin partikül boyutu 0,2 ile 15 µm ve özgül alanı da 10.000 ile 29.000 m²/kg arasında değişmektedir. 2µm ticari kontrol değeridir [11].

Kaolin dünyanın en çok kullanılan endüstriyel malzemelerinden bir tanesidir; dünyada toplam üretim miktarı 25 milyon tonu aşmaktadır [12]. Tablo 1.2'de dünyadaki kaolin rezervlerinin hangi ülkelerde ne miktarlarda olduğu gösterilmiştir [13].

Tablo 1.2. Dünyadaki kaolin rezervleri [13]

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

Literatürde kullanılan metakaolinlerle ilgili araştırmalar genellikle, Georgia kaoliniti, Güney Afrika kaolini, Fas kili, Slovakya, Sırbistan, Yunanistan, İspanya, Cezayir, Libya kili, Kolombiya kaolini, İran kaolini, Tayland kaolini [5], Portekiz [14], Çek [15], ve Çin kili [16] menşeili kil ve kaolinlerden oluşmaktadır.

Türkiye'de arama yapan en büyük kuruluş olan M.T.A. Genel Müdürlüğünün, yapmış olduğu çalışmalara göre Türkiye kaolin rezervi 100 milyon tonun üzerindedir. İşletilebilir rezerv miktarının 36 milyon ton civarında olduğu görülmektedir [13].Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde kaolin rezervi bulunmaktadır [17].

Kaolin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çimento, seramik, porselen ve tuğla yapımında kullanıldığı gibi, boya, lastik ve plastik yapımında dolgu maddesi olarak da kullanılmaktadır. Kaplama, yangın dayanımlı malzemeler, kimya, ilaç ve petrol endüstrisinde de kullanılan bir hammaddedir. Kaolinit aynı zamanda kağıt, eczacılık, diş macunları, kozmetik ve gıda katkılarında kullanım alanına sahiptir [5].

2. METAKAOLİN

2.1. Genel Bilgiler

Kaolin kilinin 550°C-950°C değerlerinde ısıtılmasıyla metakaolin oluşmaktadır [18]. Metakaolin yüksek inceliğe sahip reaktif bir alümina silikattır [19]. Şekil 2.1'de metakaolinin görüntüsü [20], Şekil 2.2'de metakaolinin diğer puzolanlarla görünüş farkını açıklayan görüntüsü verilmiştir [21].



Şekil 2.1. Metakaolin [20]



Şekil 2.2. Puzolanlar soldan sağa; uçucu kül (C sınıfı), metakaolin, silis dumanı, Uçucu kül (F sınıfı), Cüruf, Kalsine şist [21]

Metakaolin beton katkı malzemesi olarak ilk defa 1962'de Brezilya'daki Jupia Barajının yapımında yaklaşık 250.000 ton kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılmaya başlanması ise 1990'ların ortalarında gerçekleştirmiştir [5].

Metakaolin, nükleer atık depolama yapıları, darbelere dayanıklı askeri yapılar, yangına dayanıklı yüksek yapılar ve donatılı beton köprüler gibi yapıların inşaatında kullanılan yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların oldukça etkileyici içeriklerinden bir tanesidir [1].



Şekil 2.3. Tappan Zee köprüsü – New York [22]

Metakaolin beton özeliklerine sağladığı katkılardan dolayı yüksek dayanım gerektiren mühendislik yapılarında kullanıldığı gibi, beyaz renkte olmasının getirdiği avantajdan dolayı, beyaz portland çimentosu ile özel bir şekilde dizaynedilerek beyaz renkli betonların elde edilmesinden dolayı mimarı yapıların üretilmesinde de oldukça tercih edilmektedir. Şekil 2.3'te mühendislik yapıları ve Şekil 2.4'te mimari yapıların üretiminde metakaolin içeren beton kullanılmış yapılar örnek verilmiştir [22].

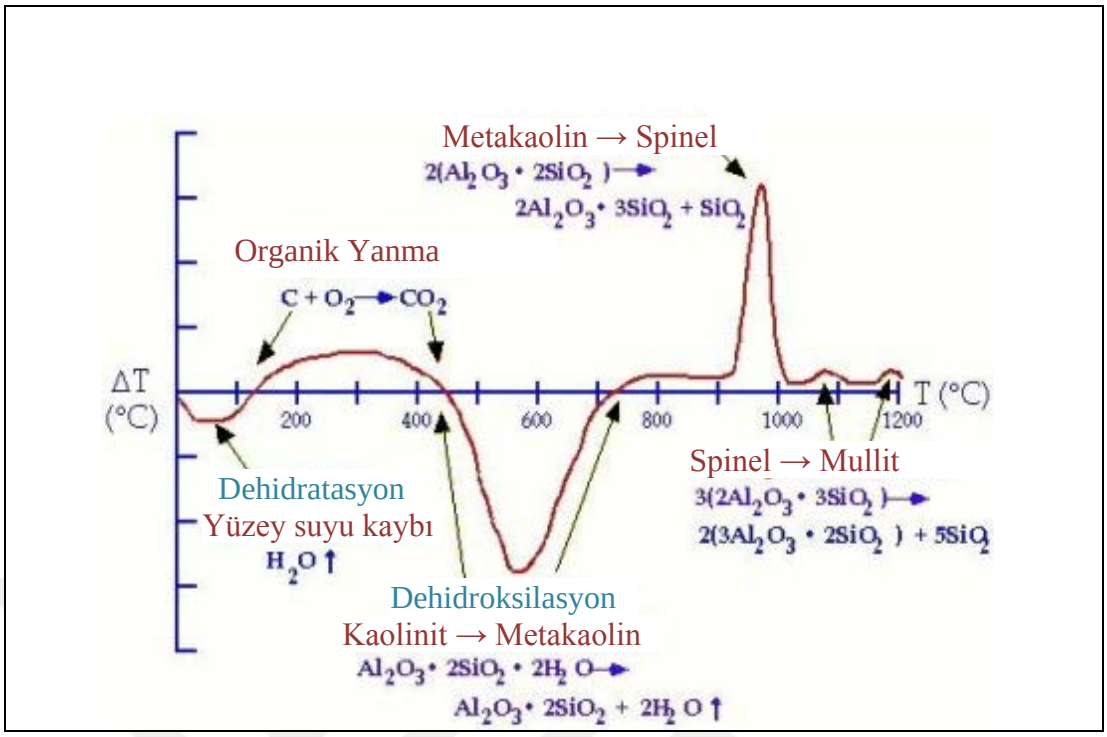


Şekil 2.4. Broad Modern Sanatlar Müzesi - Los Angeles [22]

1 kg Portland çimentosu 1450°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda hazırlanmasını gerektirir ve yaklaşık 1 kg CO_2 oluşumuna neden olur. Metakaolin elde etmek için gereken sıcaklık daha düşük olup (650-750°C), oluşan ürünlerde CO_2 yoktur. Metakaolin için çevre dostu bir malzeme olduğu söylenebilir. Yani metakaolin beton ürünlerin mühendislik özeliklerini geliştiren, aynı zamanda CO_2 ayak izini azaltan bir malzemedir [23].

Normal şartlar altında kaolin oldukça stabildir. Ancak sıcaklık 650-900°C'lere kadar yükseltilirse, kaolin bağlı hidroksil iyonlarının ayrılmasıyla %14 kadar kütle kaybeder. Bu ısıl işlem, yani kalsinasyon, kaolinin yapısını değiştirerek alümina ve silika tabakalarının bozulmasına ve uzun dönemli sıralamalarını kaybetmelerine neden olur (Şekil 2.5). Oluşan ürün olan metakaolin oldukça amorf yapıda bir puzolandır, uzun dönemli hidrolik özelikleri ile beton katkı maddesi olmaya uygun yapıdadır (Denklem (3.1)) [24].

$$Al_2O_3.2H_2O.2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3.2SiO_2+2H_2O+\text{Enerji} \rightarrow \text{Metakaolinit} \quad (3.1)$$



Şekil 2.5. Kaolinin DTA termogramı (Ball kili ve kaolinin DTA ve TGA analizleri,1998) [25]

Tipik bir metakaolin %50-55 oranında SiO_2 ve %40-45 oranında Al_2O_3 içerir (Tablo 2.1). Diğer oksitler düşük miktarlarda Fe_2O_3, TiO_2, CaO ve MgO'dur. Metakaolin partikülleri genel olarak 1,5 ile 5,0 mikron yarıçapındadır, yani çimento tanelerinden küçüktür fakat silis dumanı partiküllerinden büyüktür. Üretim prosesinin kontrol edilebilirliği sayesinde metakaolin görünüş ve performansta birbiriyle tutarlı ürünler verebilirler [5].

Tablo 2.1. Tipik ve yüksek reaktif bir metakaolinin kimyasal kompozisyonu (tipik metakaolin [5], yüksek reaktif metakaolin: [26])

	Ağırlıkça %	
Bileşen	Tipik	Yüksek Reaktif
SiO_2	51,52	52,1
Al_2O_3	40,18	45,3
Fe_2O_3	1,23	0,6
CaO	2	0,05
MgO	0,12	
K_2O	0,53	0,16
SO_3	0	
TiO_2	2,27	1,64
Na_2O	0,08	0,21
P_2O_5		0,1
LOI	2,01	0,51

Yüksek reaktif metakaolin, yüksek saflıktaki kaolin kilinin, yapıda tekrar kristallenme olmayacak şekilde kaolinin suyunun ayrıştırılması için termal işlem uygulanması sonucu oluşan %100 reaktif bir puzolandır. Metakaolinin reaktifliği kaolinin saflığı ve termal proses koşullarına bağlıdır [26].

Reaktivite seviyesini ölçmek için uygulanan Chapelle testinde metakaolinin oldukça etkili bir puzolan olduğu belirlenmiştir (Tablo 2.2) [27].

Tablo 2.2. Çeşitli puzolanların puzolanik aktifliği [27]

Puzolan	Silis dumanı	Uçucu kül	Metakaolin
Reaktivite $MgCa(OH)_2$/g puzolan	427	857	1050

Metakaolin beyaz renklidir, bu onu renk düzenlenmesi ve mimari uygulamalarda kısmen belirleyici olmasını sağlar (Tablo 2.3) [5].

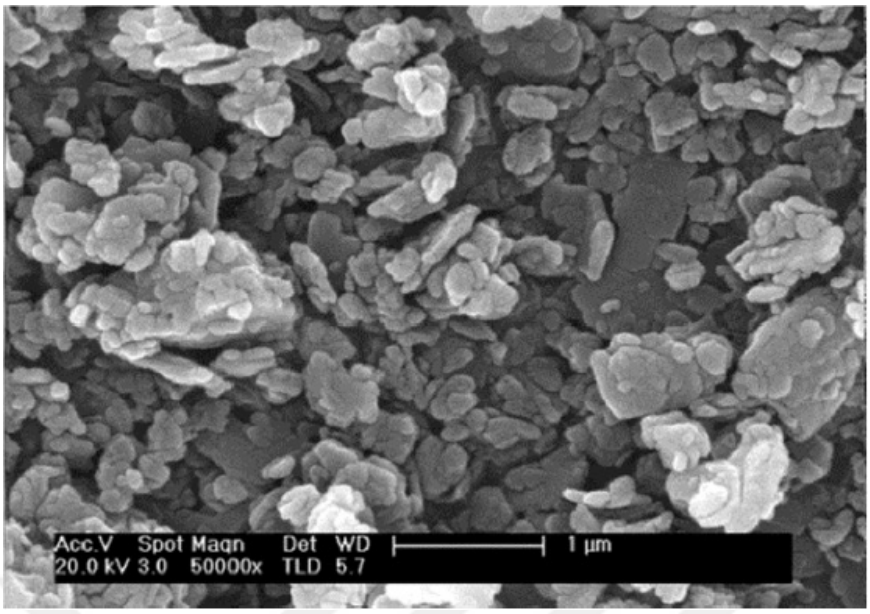
Tablo 2.3. Metakaolinin fiziksel özelikleri [5]

Özelik	Değer
Özgül ağırlık	2,6
Hacimsel kütle (g/cm^3)	0,3-0,4
Fiziksel form	Pudra
Renk	Renksiz-Beyaz
GE Parlaklığı	79-82

Metakaolin ASTM C 618'deki bu gereklilikleri mutlaka sağlamalıdır (Tablo 2.4) [28].

Tablo 2.4. Metakaolinin gereklilikleri [28]

Modifiye edilmiş özelik gereklilikleri	Limit
Silisyum dioksit (SiO_2) + Alüminyum oksit (Al_2O_3) + Demir oksit (Fe_2O_3)	En az %85
Kızdırma kaybı	En çok %1,0
İncelik: 45µm'lik elekte ıslak elenmiş kalan	En çok %1,0
7 günde dayanım aktifliği endeksi (kontrol %)	85
Harç çubuklarında 28 günlük kuruma rötresini arttırma	En çok %0,03



Şekil 2.6. Metakaolinin taramalı elektron mikroskobu mikrogörüntüsü [29]

Bir yüksek reaktif metakaolinin, lazer difraksiyon partikül boyutu analizine göre 7,4µm ortalama partikül yarıçapında ve taramalı elektron mikroskobunda kubbe görünümü 17° ve 31° arasında değişen değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 2.6) [29].

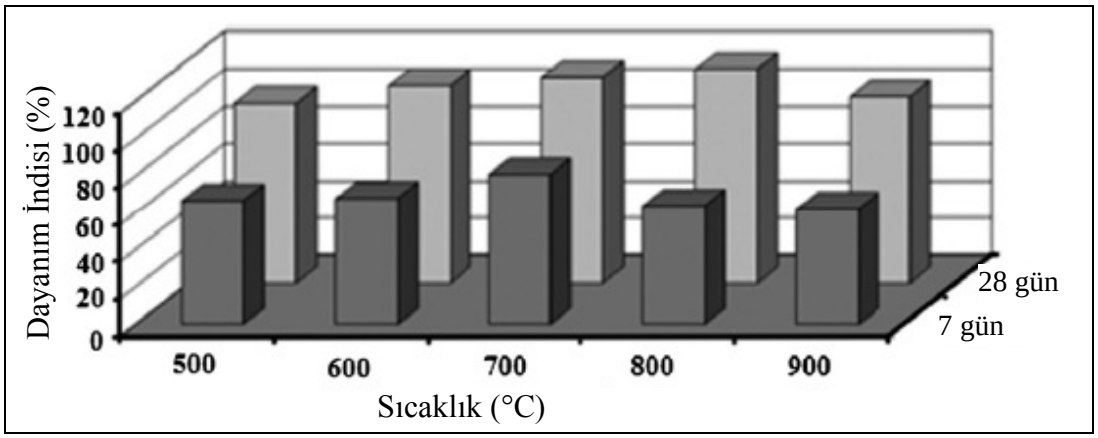
2.2. Üretimi

Kaolin kilinin ısıtılmasıyla elde edilen metakaolin oldukça amorf yapıdadır ve uzun dönemli hidrolik özelikleri ile beton katkımaddesi olarak kullanılmaya elverişlidir [24].

Metakaolin üretiminde genellikle döner fırın, ani kalsinasyon ve daldırmalı kalsinasyon yöntemleri uygulanır [30].

Kalsinasyon sıcaklığı üretilen metakaolinlerin reaktifliğinde merkezi bir rol oynamaktadır. Literatürde kaolin, birçok farklı sıcaklıklarda kalsine edilerek, metakaolin elde edilmiştir [5].

Şekil 2.7'de farklı sıcaklıklarda üretilen metakaolinlerin basınç dayanımının artış yüzdelerindeki değişim gösterilmektedir. Buna göre 700-800°C aralığındaki sıcaklıklarda üretilen metakaolinler göreceli olarak daha yüksek basınç dayanım değerleri göstermektedirler [5].



Şekil 2.7. Kürlemenin 7 ve 28 gününde basınç dayanımındaki artışın yüzdesi [5]

Üretilen metakaolinlerde yüksek puzolanik endeksi sağlamak için optimum sıcaklık değeri çalışmalarda farklı sonuçlar vermektedir. Isıtma periyodu için de henüz tam anlamıyla açıklama yapılabilmiş değildir [5].

Metakaolin üretimi için, kaolinin ısıtılacağı optimum sıcaklık 1-12 saat aralığında 600-850°Carasındadır. Bu farklılıklar metakaolinin kimyasal kompozisyonu ile ilgilidir [5].

600°C'de ısıtılan kaolin için 2, 4 ya da 6 saatlik ısıtma periyodu uygun görülmektedir. Sıcaklık 650°C olduğunda araştırmacıların çoğu 3 saatlik periyodu önermektedirler. Daha sonra 1 saat uygun görülmektedir. 700°C için optimum ısıtma periyodu 12 saattir, daha sonra 2 ve 6 saat önerilmektedir. 750°C'de kaolin kalsinasyonunda, çalışmaların çoğu en uygun ısıtma periyodunun 24 saat olduğunu belirtmektedir. Daha sonra 2 saat ve 6 saati önermektedirler. Sonra ise 1, 3, 15 ya da 10 saat uygun görülmektedir. 800°C'de 2 saat, sonrasında 1 saat ve 6 saat önerilmektedir. 850°C'de optimum 2 saat önerilir. 3 saat de sonrasında önerilmektedir. Kaolin 900°C sıcaklıkla kalsine edildiğinde 6 saatlik bir ısıtma periyodu uygulanabilir [5].

Birçok çalışma esas alınarak, kalsinasyon sıcaklıkları ve ısıtma periyotları için en iyi değerler şu şekilde sıralanabilir: 700°C için 12 saat, 750°C için 24 saat, 800°C için 2 saat, 650°C için 3 saat, 800°C için 2 saat veya 850°C için 2 saat, 700°C için 2 saat, 750°C için 2 veya 6 saat, 800°C için 1 saat, 650°C için 1 saat, 850°C için 3 saat [5].

Farklı yörelerin kaolinleri ile metakaolin elde edilmesine yönelik çalışmalar da literatürde mevcuttur. Örneğin, Badogiannis vd. zayıf Yunan kaolinlerini kullanarak metakaolin üretmiş ve üretilen metakaolin piyasada bulunan metakaolin ile beton basınç dayanımını arttıracak şekilde benzer özelikler göstermiştir. Üretilen metakaolinin k değeri olan etkinlik faktörü dayanıma bağlı olarak zamanla artmıştır ve piyasada bulunan metakaolin değerlerine çok yakın bulunmuştur [31].

Kağıt atığından da metakaolin üretilmektedir. Bu maddeden metakaolin üretimi için en iyi kalsinasyon sıcaklığı 600°Cve 800°C aralığında ve 2 ile 5 saat periyotları arasındadır. Ancak çalışmaların çoğunluğu 700°C'de 2 saat periyodunda optimum kalsinasyon koşulları oluştuğunu rapor etmişlerdir [5].

3. METAKAOLİNİN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ

Metakaolin çimentonun hidratasyonunu büyük ölçüde etkilemektedir. Portland çimentosu yalnız başına hidrate olduğunda ağırlıkça %20 ile %30 oranında kalsiyum hidroksit açığa çıkmaktadır. Basit hidratasyon tepkimelerinin çimento kimyası gösterimi Denklem (4.1)-Denklem (4.6)'deki gibidir [32, 33]:

$$2C_3S + 11H \rightarrow C_3S_2H_8 + 3CH \quad (4.1)$$

$$2C_2S + 9H \rightarrow C_3S_2H_8 + CH \quad (4.2)$$

$$C_3A + 3C\check{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\check{S}H_{32} \quad (4.3)$$

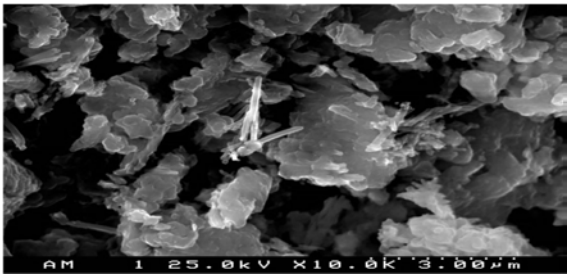
$$2C_3A + C_6A\check{S}H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4A\check{S}H_{12} \quad (4.4)$$

$$C_4A\check{S}H_{12} + 2C\check{S}H_2 + 16H \rightarrow C_6A\check{S}H_{32} \quad (4.5)$$

$$Al_2Si_2O_7 + CH + H \rightarrow C_3S_2H_8, C_4AH_{13}, C_3ASH_6, C_2ASH_8 \quad (4.6)$$

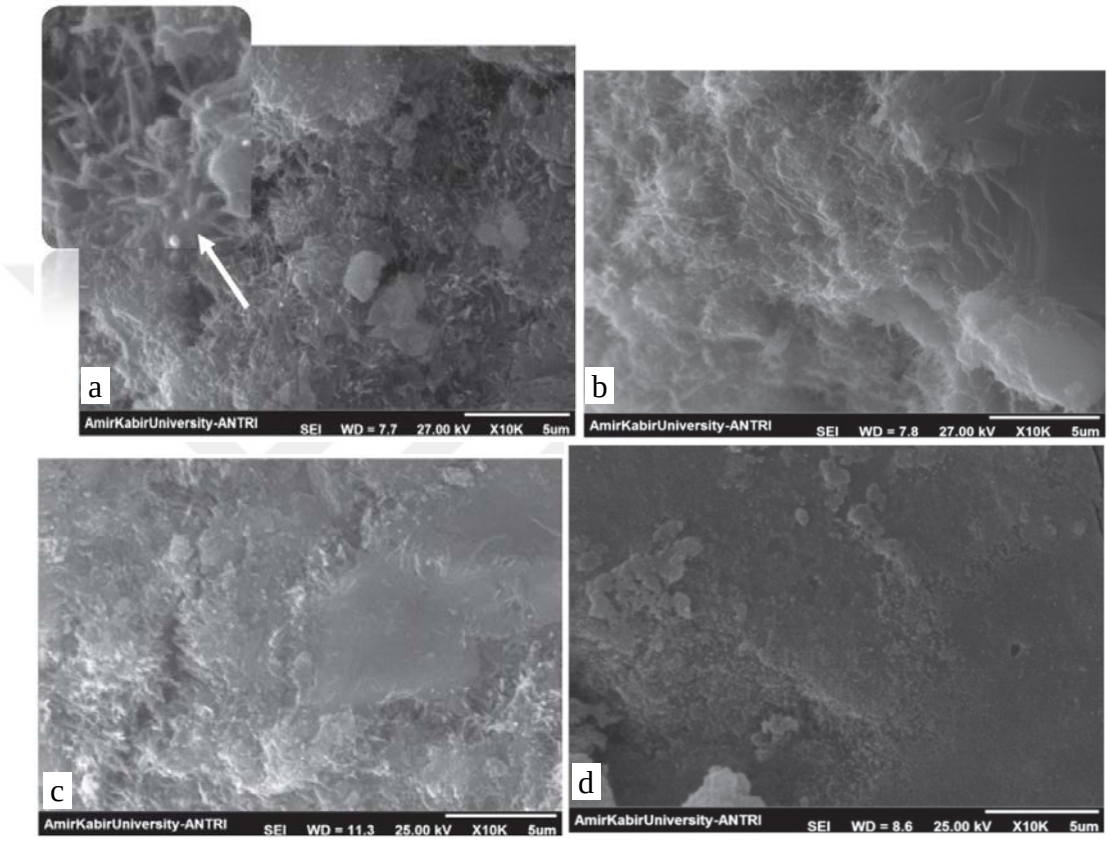
($C_3S_2H_8$: Kalsiyum silika hidrat, CH: Kalsiyum hidroksit, $C\check{S}H_2$: Jips, $C_6A\check{S}H_{32}$: Etrenjit, $C_4A\check{S}H_{12}$: Monosülfat, C_3ASH_6: Hidrogarnet, C_2ASH_8: Stratlinjit) [32, 33].

Metakaolin, kalsiyum hidroksit ile puzolanik tepkimeye girerek, kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum alümina silika hidratlarını üretirler (Şekil 3.1) [34].



Şekil 3.1. Puzolanik reaksiyon oluşumu (Kalsiyum silika hidrat formasyonu) [34]

Ramezanianpour ve Jovein yaptığı çalışmada %15 metakaolin kullanımının iğneye benzer kristaller olan etrenjit formunu azalttığını ve life benzer kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum alümina silika hidrat oluşturduğunu göstermektedir (Şekil 3.2.a ve Şekil 3.2.b). 28 günde %15 metakaolin kullanılan çimento hamurunda kalsiyum hidroksite rastlanmamaktadır (Şekil 3.2.c ve Şekil 3.2.d) [35].



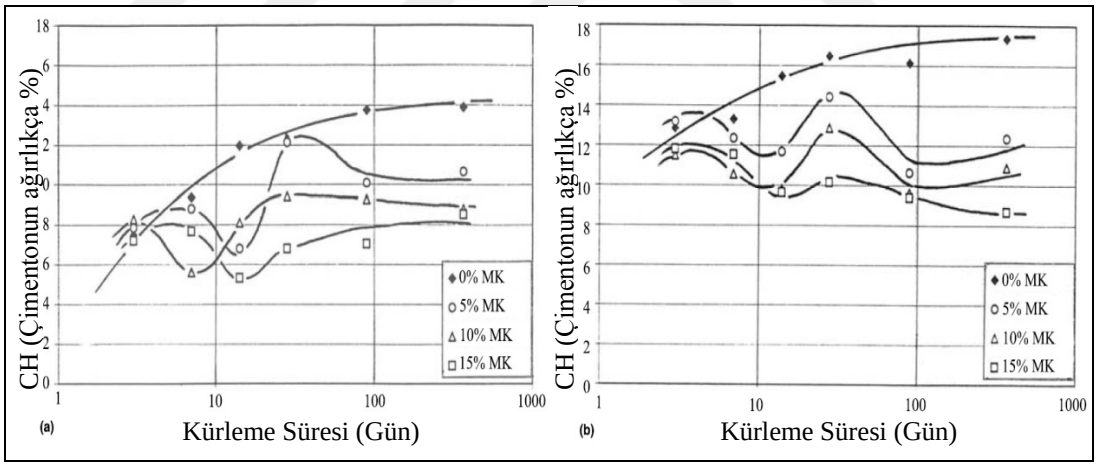
Şekil 3.2. Çimento hamurlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (10.000 kat büyütülmüştür.) (a) %0 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 7 günlük (b) %15 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 7 günlük (c) %0 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 28 günlük (d) %15 oranında metakaolin içeren çimento hamuru 28 günlük [35]

Metakaolin beton karışıma eklendiği zaman, hidratasyon süresince meydana gelen ana kimyasal reaksiyonlar metakaolin ile kalsiyum hidroksit arasında gerçekleşmektedir. Kristalli kalsiyum alümina hidratları ve alümino silika hidratları (C_2ASH_8, C_4AH_{13}, C_3AH_6) formundaki ürünler oluşur. Son bileşim metakaolin/kalsiyum hidroksit oranı ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Metakaolin, kalsiyum hidroksit miktarını azaltmakta ve hamurun yapısını geliştirmektedir, agrega ile çimento matrisi arasındaki geçiş arayüzü alanını iyileştirmektedir [20].

Kalsiyum hidroksit miktarındaki bu azalma, metakaolinin yapısı ve içeriğine bağlı olduğu kadar kür süresine de bağlıdır [36]. Frias ve Cabrera da kalsiyum hidroksitin, metakaolin oranı ve kür süresine bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Kalsiyum hidroksit miktarı kürlemenin 3. gününe kadar artmış, daha sonrasında azalmıştır. Bu azalma 100 güne kadar devam etmiştir [37]. Oriol ve Pera yapmış olduğu çalışmada %15 oranında metakaolin içeren çimento hamurlarını mikrodalga ile kürlemiş, kızılötesi spektroskopi yöntemiyle karışımda kireç bulunmadığını göstermişlerdir [38].

Kostuch vd. yaptığı çalışmada kalsiyum hidroksit miktarı kür süresince ve metakaolin kullanım oranıyla birlikte belirgin ölçüde azalmaktadır. Çalışmanın sonuçları göstermiştir ki %20 oranında metakaolinin çimento ile yer değiştirmesi 28. günde betondaki tüm kalsiyum hidroksit mevcudiyetini yok etmektedir [16].

Şekil 3.3'te eğrilerin 14. günde pik yaptığının görülmesi maksimum puzolanik aktivitenin o süreçte geçtiği düşüncesi ile örtüşmektedir [36].

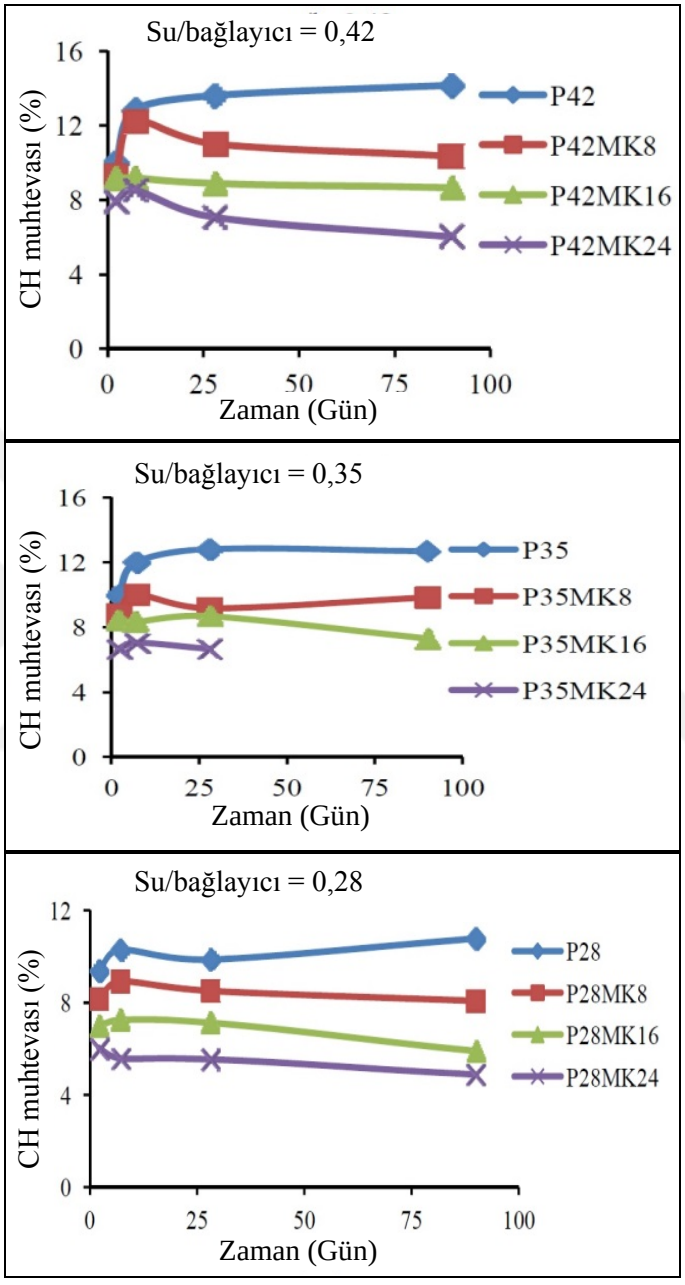


Şekil 3.3. Kürleme süresine göre kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi (a)harç (b)hamur [36]

Sfikas vd. 28 ve 360 günlük basınç dayanımı değerlerinin benzer sonuçlar verdiğini, bu durumunda puzolanik reaksiyonların 28 günde tamamlanmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [39].

Akçay ve Taşdemir yaptığı çalışmada farklı su/bağlayıcı oranlarında farklı metakaolin oranları kullanmış ve kalsiyum hidroksit içeriğini hesaplamışlardır (Şekil 3.4). 7 ve 28 günler arasında referans numunelerle kıyaslandığında kalsiyum

hidroksit içeriğinde azalmalar olmaktadır. Metakaolin miktarı arttıkça ve zamanla kalsiyum hidroksit içeriği azalmaktadır, bu etki yüksek su/bağlayıcı oranlarında daha az öne çıkmaktadır [1].



Şekil 3.4. Kalsiyum hidroksit içeriğinin farklı su/bağlayıcı oranındabetonlarda termogravimetrik analiz ile hesaplanmış değerleri [1]

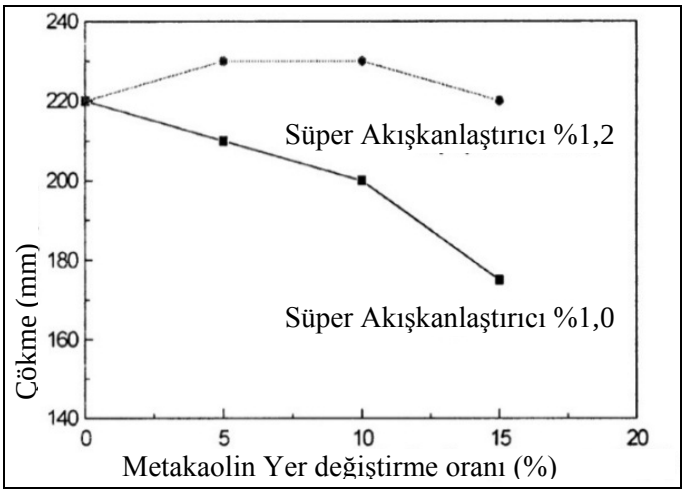
3.1. Erken Yaş Etkileri

3.1.1. Reolojik özelikler

Reoloji, işlenebilirlik ve benzer reolojik davranışlar gösterebilmek için, fazla süperakışkanlaştırıcı kullanılması gereksiniminin sonucu olarak, yüksek metakaolin/çimento oranından etkilenmektedir. Bu etkinin yüksek özgül yüzey ve metakaolin partiküllerinin levhaya benzer şekle (çimento ile kıyaslanınca) sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer reolojik özelikleri sağlayabilmek için kendiliğinden yerleşen betonlarda, metakaolin diğer mineral katkılara nazaran daha çok süperakışkanlaştırıcı kullanılmasını gerektirmektedir [40].

3.1.2. Çökme

Qian ve Li yaptığı çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,38 olan yüksek performanslı betonlarda çökme ile metakaolin oranı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. İki farklı oranda süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre metakaolin miktarı arttıkça çökme azalmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı miktarı artınca çökme daha yüksek değerlerde olmaktadır (Şekil 3.5) [41].



Şekil 3.5. Çökmenin metakaolin oranıyla ilişkisi [41]

Madandoust ve Mousavimetakaolin içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda süperakışkanlaştırıcı ilavesiyle yayılmanın 660 mm ile 715 mm aralığında üretilebileceğini belirtmişlerdir. Metakaolin kullanımı arttıkça yayılma miktarı azalmaktadır [42].

Brooks vd. %15 oranında metakaolin kullanımının çökmede %30'a varan azalmaya neden olduğunubulmuşlardır [2]. Brooks ve Joharide yaptığı çalışmada metakaolin kullanımı arttıkça çökmenin azaldığını göstermişlerdir [43].

3.1.3. Priz zamanı

Brooks vd. %15 oranında metakaolin kullanımının priz zamanını %20'ye kadar geciktirdiğini göstermişlerdir [2].

Brooks ve Johari yaptığı çalışmada süperakışkanlaştırıcı miktarını sabit tutarak, %0, %5, %10 ve %15 oranında metakaolin kullanmışlardır. Priz başlangıç zamanı %10 oranında metakaolin kullanımına kadar artmış, %15 oranında metakaolin kullanımında azalma gözlemlenmiştir. Priz bitme zamanında da aynı davranış söz konusudur [43].

Batis vd. yaptığı çalışmaya göre, %20 oranında metakaolin içeren karışım için priz başlangıç zamanı 205 dakika ölçülmüştür, buna karşılık kontrol numunesinde priz başlangıç zamanı 105 dakikadır. Bu durum metakaolin içeren hamurların daha fazla su ihtiyacında bulunmasıyla açıklanabilir [44].

3.1.4. Hidratasyon ısısı

Frias ve Cabrera yaptığı çalışmada metakaolin kullanımı arttıkça hidratasyon ısısının arttığını hesaplamışlardır [37].

Lagier ve Kurtis metakaolinin çimentonun hidratasyonunda katalizör etkisi oluşturarak hidratasyon ısısını arttırdığını göstermişlerdir [45].

Metakaolin kullanımı hidratasyon sırasında oluşan ısıyı arttırır. Bu durum hem metakaolinin çimento hidratasyonunu hızlandırıcı etkisi ile hem de metakaolinin kalsiyum hidroksit ile olan yüksek reaktivitesi ile açıklanmaktadır [46].

3.1.5. Viskozite

Sfikas vd. yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özeliklerini araştırmıştır. %6,9, %10,6, %14 ve %20 oranlarında metakaolin kullanmıştır. Bu betonları kendiliğinden yerleşebilir hale getirmek için polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı oranları metakaolin

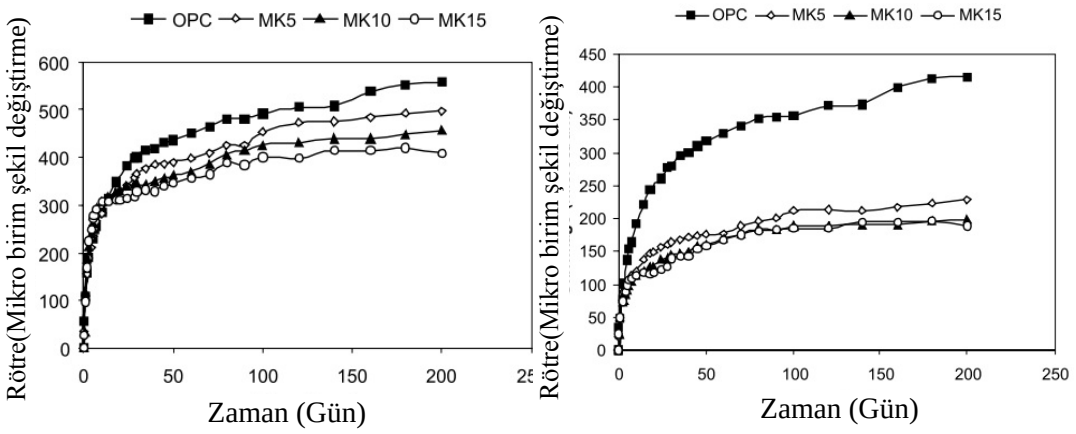
oranlarıyla lineer bir şekilde olmamıştır. Fakat tüm betonları, V-hunisi değerleri 9 saniyeden daha az olacak şekildeelde edebilmiştir. V-hunisi akış hızı ile açıklanan viskozite, metakaolin karışıma eklendikçe artmıştır [39]. V-hunisi akış hızı metakaolin miktarı arttıkça genellikle artmaktadır. Bu artış, su/çimento oranı arttıkça her zaman artmaktadır [40].

3.2. Rötre

Wild vd. metakaolinin %15 oranına kadar kullanılmasının kimyasal rötreyi arttırdığını bulmuşlardır. Ancak metakaolin oranı %15'i geçince kimyasal rötrede azalma olduğunu gözlemlemişlerdir [47].

Caldarone vd. yaptığı çalışmada %10 oranında metakaolin kullanımının 156 gün sonrası kurumaya maruz bırakıldığında rötreyi %33 oranında azalttığını göstermişlerdir [48].

Brooks ve Johari yaptığı çalışmada metakaolin kullanım oranının etkisi olmayacak bir şekilde kuruma rötresini %50'ye kadar azalttığını göstermişlerdir (Şekil 3.6.a ve Şekil 3.6.b) [43].

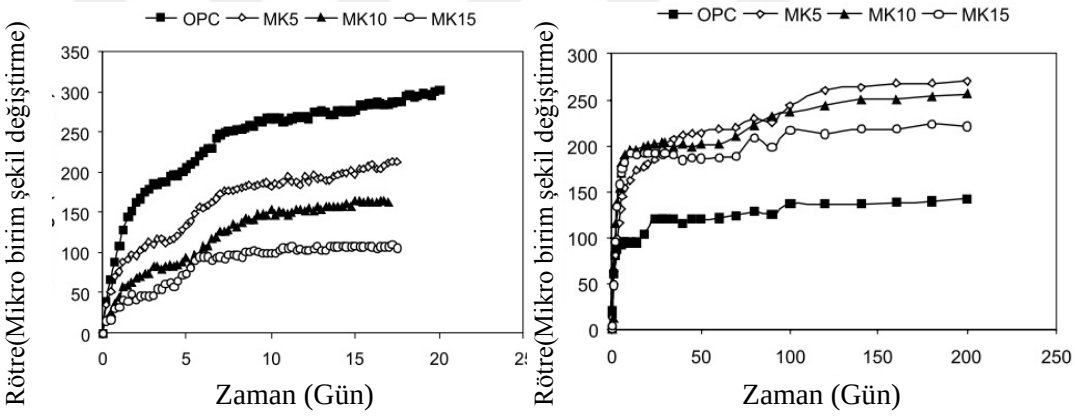


Şekil 3.6. (a) 24 saatten itibaren kurumuş betonların toplam rötresi (b) Metakaolinin kuruma rötresine etkisi [43]

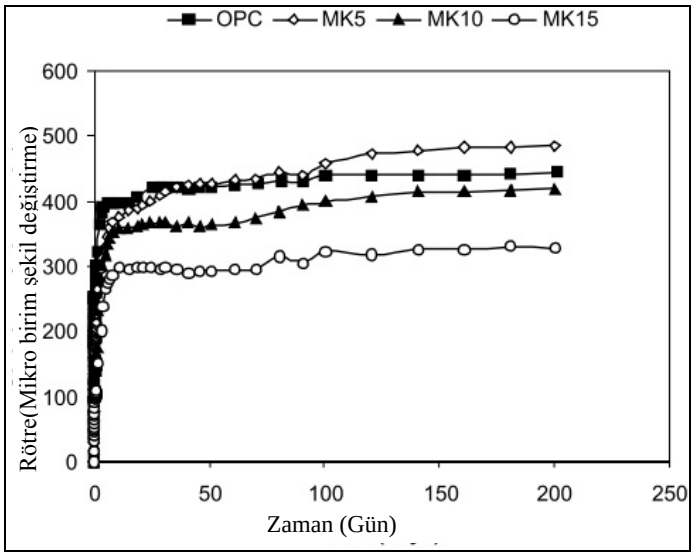
Wild vd. yaptığı çalışmada %5 ve %10 oranında metakaolin kullanımının otojen rötreyi arttırdığını göstermişlerdir, %10 oranında metakaolin kullanımında otojen rötre maksimum değeri almaktadır [47]. Kinuthia vd. yaptığı çalışmada %5 ve %10 oranında metakaolin kullanımının otojen rötreyi arttırdığı, %15 ve %20 oranındaki

yüksek kullanım oranlarında otojen rötrede kontrol numunesine göre belirgin bir azalma olduğunu göstermişlerdir [49].

Brooks ve Johari yaptığı çalışmada %0, %5, %10 ve %15 oranında metakaolin kullanmışlar ve erken yaşta otojen rötrenin metakaolin miktarı arttıkça azaldığını bulmuşlardır (Şekil 3.7.a). Deneylerin sonucunda erken yaşta %15 metakaolin kullanımının kontrol numunesine kıyasla otojen rötreyi %65'e kadar azalttığını hesaplamışlardır. 24 saatten sonra ölçülen uzun dönemli otojen rötre ise, 200 günlük otojen rötre %5 oranında metakaoliniçeren numunelerde %91, %10 oranındametakaolin içeren numunelerde %80 ve %15 oranında metakaolin içeren numunelerde %56 oranında artmıştır (Şekil 3.7.b). Metakaolin kullanılmasının toplam rötreyi azalttığı Şekil 3.8'de görülmektedir [43].



Şekil 3.7. Metakaolin kullanımının priz başlangıcından itibaren otojen rötreye etkileri (a) erken yaş, (b) uzun dönemli [43]



Şekil 3.8. Metakaolin kullanımının priz başlangıcından itibaren 200-günlük toplam rötreye etkileri (Şekil 3.7.a eksi Şekil 3.7.b) [43]

Gleize vd. de su/bağlayıcı oranı 0,3 ve 0,5 olan numunelerleyaptığı çalışmada,uzun dönemli otojen rötrenin metakaolin miktarı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir [50].

Akçay ve Taşdemir yaptığı çalışmada, 0,42 su/bağlayıcı oranındaki hamurlarda erken yaşlarda metakaolin miktarı arttıkça otojen rötrenin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra 0,35 ve 0,28 su/bağlayıcı oranında, oluşan kalsiyum hidroksitin metakaolinle tepkimeye girmesi otojen rötreyi domine etmektedir [1].

İleri yaşlarda lineer otojen rötre ölçüldüğünde ise, su/bağlayıcı oranı 0,42 olan numunelerde metakaolin kullanımı arttıkça otojen rötre artmaktadır, su/bağlayıcı oranı düşük olan numunelerde metakaolin miktarı arttıkça otojen rötre azalmaktadır [1].

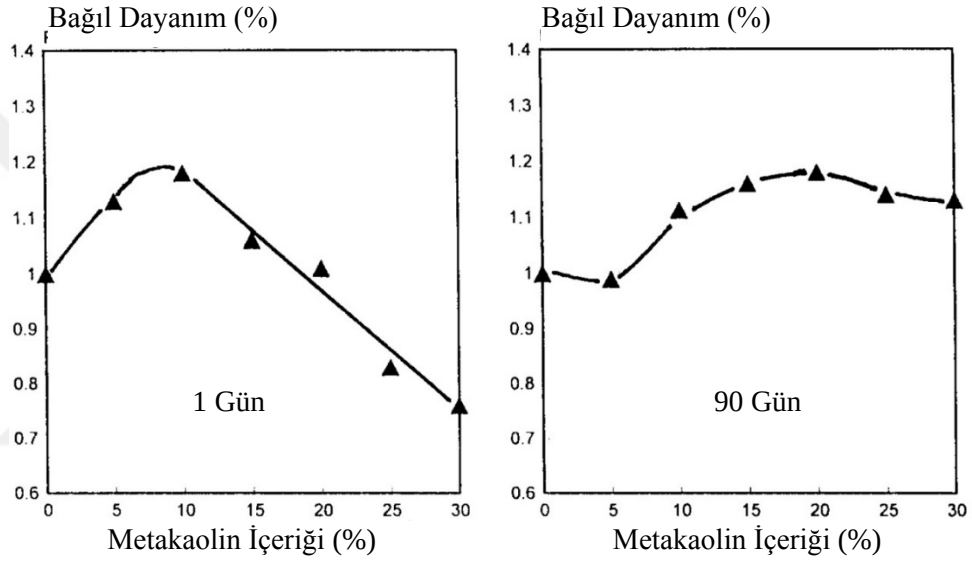
3.3. Mekanik Özelikler

3.3.1. Basınç dayanımı

Wild, Khatib ve Jones su/bağlayıcı oranı 0,45 olan %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında metakaolin içeren süper akışkanlaştırıcı katkılı betonlar yapmış ve dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Örneğin %5 oranında metakaolin kullanımın ilk günlerde çok az bir dayanım artışı gösterdiği, daha sonra bu dayanımın düştüğü ve referans betonla aynı dayanıma geldiği görülmüştür. Optimum yüzde olarak %20

metakaolin kullanılmasını tavsiye etmektedirler. %25 ve %30 oranlarında metakaolin içeren numunelerin %20 metakaolin içeren numuneler kadar verimli olmadığını tespit etmişlerdir [51].

Şekil 3.9.a'ya göre 1 günlük göreceli dayanım %10 oranında metakaolin kullanımına kadar artmakta, daha sonrasında azalmaktadır. Şekil 3.9.b'ye göre 90 günlük dayanımlar %10 oranında metakaolin kullanımında artmakta, metakaolin kullanım oranı arttıkça aynı seviyelerde olmakta, en yüksek değer %20 oranında metakaolin kullanımında olmaktadır [51].



(a) (b)

Şekil 3.9. Farklı metakaolin içeriğine karşılık gelen göreceli dayanımlar (a) 1 günlük (b) 90 günlük [51]

Metakaolinin betonunun dayanımına katkısı yer değiştirme oranına bakılmaksızın 14 günden fazla sürmemektedir. Bu da metakaolin-kalsiyum hidroksit reaksiyonlarının 14. gün süresinde gelişmesiyle açıklanmaktadır [51].

Qian ve Li yaptığı çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,38 olan yüksek performanslı betonlarda %0, %5, %10 ve %15 oranlarında metakaolin kullanmışlardır. Elde ettikleri basınç dayanımları değerlerine göre metakaolin kullanım miktarı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Kontrol numunesine göre erken yaşlarda göreceli basınç dayanımı daha fazla iken, ileri yaşlarda (60 gün) göreceli basınç dayanımı azalmaktadır. %15 oranında metakaolin içeren betonlarda basınç dayanımı kontrol numunesine göre 3 günlük yaşta %51 oranında artmıştır.%10 ve %15 oranında

metakaolin içeren numunelerinde basınç dayanımındaki artışlar 3 günde, 28 güne göre daha fazla görülmektedir. Yani metakaolin erken yaş dayanımını oldukça etkilemektedir [41].

Courard vd. yaptığı çalışmada metakaolin içeren harçların 28 günlük dayanımlarının %79'unu 3 günde kazandıklarını belirtmişlerdir [52].

Ramezanianpour ve Jovein yaptığı çalışmada metakaoliniçeren farklı su/bağlayıcı oranlarında basınç dayanımı ölçümlerini yapmışlardır. Su/bağlayıcı miktarı azaldıkça dayanım artmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerleri %0 oranında metakaoliniçeren numunelerde 59MPa, %10 metakaoliniçeren numunelerde 67MPa, %12,5 oranında metakaoliniçeren numunelerde 64MPa ve %15 oranında metakaolin içeren numunelerde 64,6MPa bulmuşlardır. 180 güne gelindiğinde %0 oranında metakaolin içeren numune 78,5MPa'de kalırken en iyi dayanım değeri 82,5MPa ile %10 oranında metakaolin içerenbetonda görülmüştür. Bu çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,40 için %12,5 oranında metakaolin içeren numuneler ve su/bağlayıcı oranı 0,35 için %10 oranında metakaolin içeren numuneler en iyi sonuçları vermiştir [35].

Madandoust ve Mousavi metakaolin kullanımınınkendiliğinden yerleşen betonlarda basınç dayanımını erken ve ileri yaşlarda arttırdığını, bu artışın 14 gün itibariyle belirginleştiğini belirtmişlerdir [42].

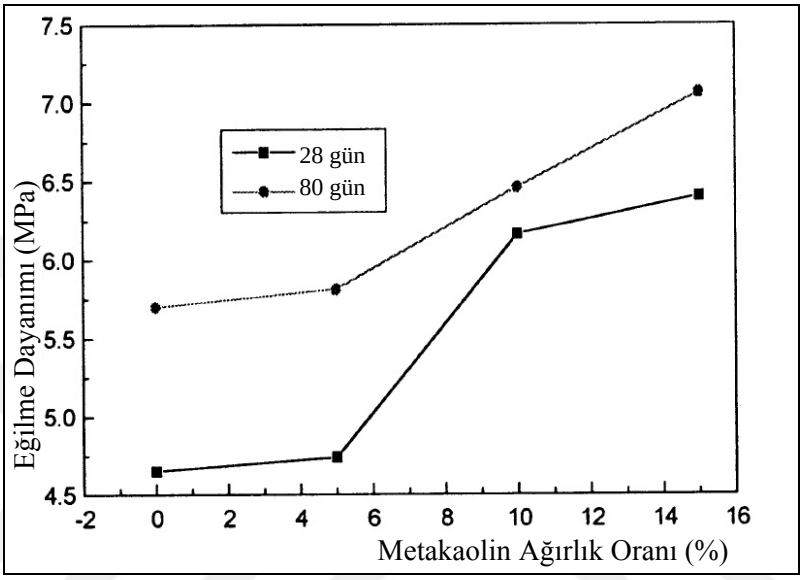
Morsy vd. metakaolin kullanarak hazırladığı harçlarla yapmış olduğu çalışmada metakaolin kullanımının basınç dayanımını artırdığını, %15 oranında metakaolin kullanımında en iyi değerlerin elde edildiğini belirtmişlerdir [53].

3.3.2. Ultrases geçiş hızı

Madandoust ve Mousavi yaptığı çalışmada metakaolin kullanımının ultrases geçiş hızını önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir. Basınç dayanımıyla benzer şekilde bu deneylerin sonuçları özelikle %10 ile %15 oranında metakaolin kullanımında en yüksek sonuçları vermiştir [42].

3.3.3. Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı metakaolin kullanım miktarı arttıkça özelikle erken yaşlarda artmaktadır. Eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı metakaolin miktarı arttıkça düşmektedir. Bu da betonun kırılganlığının metakaolin miktarının artmasından etkilendiğinin belirtisidir (Şekil 3.10) [41].



Şekil 3.10. Eğilme dayanımı ile metakaolin miktarının ilişkisi [41]

Morsy vd. metakaolin kullanarak hazırladığı harçlarla yapmış olduğu çalışmada metakaolin kullanımının eğilme dayanımını arttırdığını, %15 oranında metakaolin kullanımında en iyi değerlerinelde edildiğini belirtmişlerdir [53].

Akçay vd. yaptığı çalışmada 0,42, 0,35 ve 0,28 su/bağlayıcı oranlarında %0, %8, %16 ve %24 oranlarında metakaolin kullanmış, elde ettiği eğilme deneyi sonuçlarında yalnızca su/bağlayıcı oranı 0,42 olan numuneler eğilme dayanımı artışı göstermiştir. Bu da özelikle çimento miktarlarının az olduğu karışımlarda metakaolin ilavesiyle basınç dayanımında olduğu gibi, eğilme dayanımında da artış görülebileceğini göstermiştir [54].

3.3.4. Çekme dayanımı

Çekme dayanımı metakaolin kullanım miktarı arttıkça özelikle erken yaşlarda artmaktadır. Çekme dayanımının maksimum alacağı değer metakaolin miktarı

arttıkça artmaktadır. Çekme dayanımının basınç dayanımına oranı metakaolin miktarı arttıkça düşmektedir. Bu da betonun kırılganlığının metakaolin miktarının artmasından etkilendiğinin belirtisidir [41].

Madandoust ve Mousavi yaptığı çalışmada metakaolin kullanımı ile çekme dayanımındaki artışın çok az olduğunu belirtmişlerdir [42].

3.3.5. Yarma-Çekme dayanımı

Madandoust ve Mousavi yaptığı çalışmada metakaolin kullanımı ile basınç dayanımı artışıyla benzer oranda yarma-çekme dayanımının arttığını göstermişlerdir [42]. Metakaolin oranı arttıkça yarma-çekme dayanımında artış gözlemlenmektedir [39].

Akçay vd. yaptığı çalışmada yarma-çekme dayanımının metakaolin artışıyla azaldığını ve çok az etkilendiğini bulmuşlardır. Uygun karışım oranları kullanılarak metakaolin ilavesiyle basınç dayanımında olduğu gibi yarma-çekme dayanımında da artışlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir [54].

3.3.6. Elastisite modülü

Caldarone vd. yaptığı çalışmada metakaolin kullanılmasıyla elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir [48].

Bir başka çalışmada, basınç elastisite modülünün metakaolin miktarının artışıyla çok küçük bir artış gösterdiği bildirilmiştir [41].

Khatib ve Hibbert yaptığı çalışmada %0, %10 ve %20 oranlarında metakaolin kullanmış ve 28 ve 90 günlük değerlerini hesaplamışlardır. Dinamik elastisite modülünün 28 ile 90 gün arasında keskin bir artış gözlemlemişlerdir. Ancak bu çalışmada 90 günden sonrası çalışılmadığı için daha ileriki yaşlarda nasıl değişkenlik göstereceği bilinmemektedir [55].

3.3.7. Kırılma davranışı

Akçay vd. yaptığı çalışmada su/ bağlayıcı oranı 0,42, 0,35 ve 0,28 olan ve %0, %8, %16 ve %24 oranlarında metakaolin içeren betonlarda yaptığı kırılma deneylerinde su/bağlayıcı oranı arttıkça eğrinin tepe yükü belirgin şekilde düşerken, bu etkinin

metakaolin kullanımı ile azaldığı belirlenmiştir. Böylece kırılma davranışına olan birincil etki düşük miktarlarda metakaolin içeren betonlarda su/bağlayıcı oranı iken, metakaolin miktarı arttıkça betonun davranışına metakaolin ürünlerinin egemen olduğu görülmüştür. Diğer taraftan metakaolin kullanımı ile tepe yükünden sonraki eğrinin inen kısmında çalışan toklaşma mekanizmalarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Kırılma deneyinden elde ettikleri yük-deformasyon eğrileri altında kalan alan ile hesaplanan kırılma enerjileri kıyaslandığında %8 oranında metakaolin kullanıldığında bile referans betonlarına göre azalmalar görülmektedir. Ancak %16 ve %24 oranında metakaolin kullanımı arasında önemli bir farklılık olmadığını belirlemişlerdir [54].

3.4. Durabilite

3.4.1. Klor geçirimliliği

Asbridge vd. yaptığı çalışmada arayüz geçiş alanı yöntemiyle geçirimlilik ile ilgili bulgular sağlamıştır. Sabit halde klorid iyonlarının geçirimliliği ile sabit olmayan halde klorid geçirimliliğini araştırmıştır. Sabit halde, metakaolin miktarının artması agreganın hacimsel oranının değişmesiyle değişmez. Bu nedenle metakaolinin arayüz geçiş alanındaki boşluk yapılarını iyileştirdiğini söylemektedirler. %10 oranında metakaolin kullanılmasının sabit olmayan halde klorid geçirimliliğini düşürdüğünü belirtmişlerdir [56]. Benzer şekilde diğer araştırmacılar da metakaolin kullanımının klorid iyon geçirimliliğini azalttığını belirtmişlerdir [57].

Metakaolin kullanımın betonların klor geçirimliliği dayanımını ve coulomb değerlerini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Migrasyon testlerinden elde edilen difüzyon katsayıları da metakaolin kullanımının faydalarını göstermiştir. Hacimsel yayınım değerlerinin de kloride maruz bırakma arttıkça metakaolin kullanımından olumlu etkilendiği görülmüştür. Zamana bağlı azalma da difüzyon katsayılarında metakaolin arttıkça açıkça görülmektedir. Bunlar da donatılı betonların klorlu ortamlarda zamana bağlı korozyonununa faydalı etkiler sağladığını göstermektedir [58]. Gruber vd. yaptığı çalışmada metakaolin kullanmış ve %8 ve %12 oranında metakaolin kullanımının klorid iyonlarının geçirimliliği direncini önemli ölçüde arttırdığını bulmuştur [26].

%10 oranında metakaolin kullanılan bir başka çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,4 iken klorid iyonlarının geçirimliliği %68 azalmış, su/bağlayıcı oranı 0,6 iken bu geçirimlilik %80 azalmıştır. [59].

Batis vd. kumla %20 veya çimentoyla %10 oranına kadar yer değiştiren metakaolin kullanımının korozyon dayanımını arttırdığını, daha yüksek oranlarda metakaolin kullanılırsa, korozyon direncinin düşeceğini rapor etmişlerdir [44].

Badogiannis ve Tsivilis de %20 oranında metakaolin kullanımının klorid geçirimliliğini %90 azalttığını rapor etmişlerdir [60].

Ramezanianpour ve Jovein yaptıkları tuz havuzu ve hızlı klorid penetrasyon testlerine dayanarak, metakaolinin klor geçirimliliğine dayanımı önemli ölçüde arttırdığını hesaplamışlardır [35].

Bir çalışmaya göre en yüksek basınç dayanımını ve klorid direncini %20 oranında metakaolin kullanılan harçlar göstermiştir. Daha yüksek oranlarda metakaolin kullanımı korozyon dayanımını düşürmektedir [61].

3.4.2. Sülfat dayanıklılığı

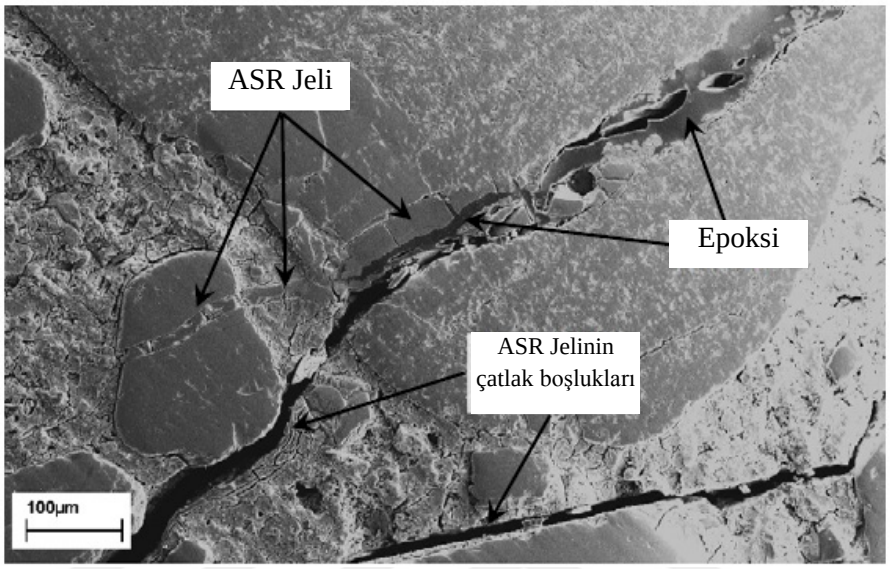
Khatib ve Wild yaptığı çalışmada %5 oranında Na_2SO_4 içeren su küründe 520 güne kadar periyotlarda ve %25 oranına kadar farklı oranlarda metakaolin içeren karışımlarda dayanım gelişimini göstermişlerdir. Tüm deney sonuçları metakaolin ilavesiyle genişlemenin azaldığını göstermiştir. %20 ve %25 oranındametakaolin içeren karışımlarda bu azalma daha az olmaktadır. Kalsiyum hidroksit muhtevasındaki azalmanın metakaolin kullanımının sülfat dayanımını arttırmada en etkili faktör olduğu düşünülmektedir [62].

3.4.3. Alkali-silika reaksiyonu

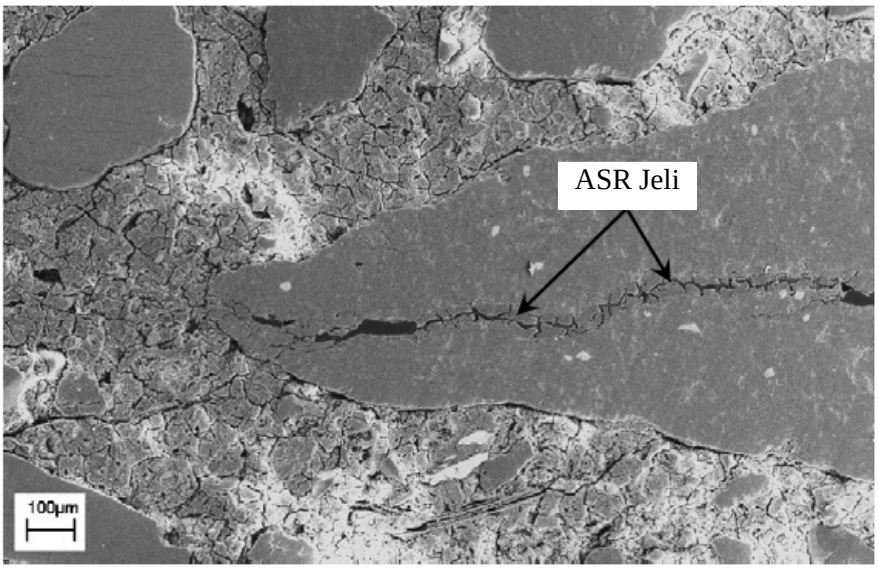
Aquino vd. yaptığı çalışmada metakaolin kullanımının alkali-silika reaksiyonu ilerlemesini %50 oranına kadar azalttığını hesaplamışlardır [63].

Moser vd. yaptığı çalışmada metakaolinin alkali-silika reaksiyonunu azalttığını yani olumlu etki yaptığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca metakaolin inceliklerini de kıyaslamışlardır. Daha ince partikül boyutuna sahip metakaolin alkali-silika

reaksiyonunun azaltımında diğer metakaoline göre daha etkili olmuştur. Yüzey alanı geniş olan metakaolin daha az etkili bulunmuştur. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'ye bakılırsa %8 oranında metakaolin içeren betonun, kontrol betonuna göre çatlak aralığının daha kısa olduğu görülmektedir [64].



Şekil 3.11. Kontrol betonunun 2 yıl sonra gerisaçılmış taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [64]



Şekil 3.12. %8 oranında metakaolin içeren betonun 2 yıl sonra gerisaçılmış taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [64]

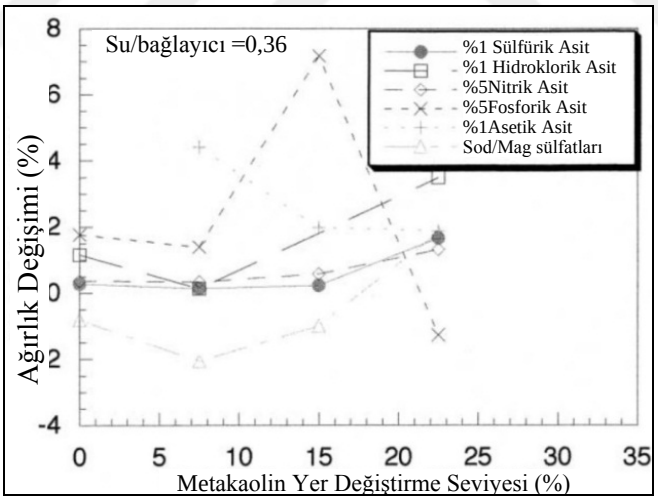
Ramlochan vd. farklı metakaolin oranları kullanarak yaptığı çalışmada %20 oranında metakaolin kullanımına kadar alkali konsantrasyonunu düşürmektedir. Alkali-silika reaksiyonu önlemek için %10 ile %15 aralığında metakaolin kullanımının daha etkili

olduğunu belirlemişlerdir. Ramlochan vd. iki yıllık alkali-silika reaksiyonu ilerleme sonuçlarında %10 ile %15 aralığında metakaolin kullanımının beton prizmaların boyutunu sadece %0,04 azaltacak kadar etkilediğini belirlemişlerdir [65].

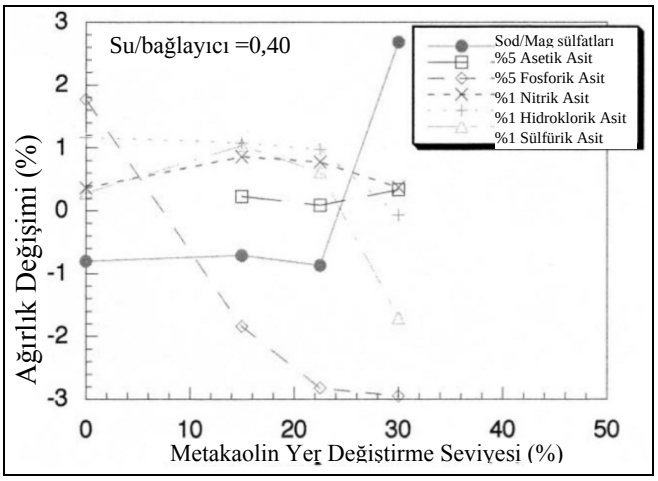
Gruber vd. metakaolin kullanarak yaptığı çalışmada %10 ve %20 oranlarında metakaolin kullanımının alkali-silika reaksiyonunun zarar veren etkilerine karşı riski azalttığını göstermişlerdir [26].

3.5. Kimyasal Dayanım

Roy vd. yaptığı çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,36 ve 0,40 olmak üzere iki farklı tip beton üretmiş ve bunlara metakaolin, silis dumanı ve düşük kalsiyum içeren uçucu külün etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre katkı kullanılmayan betona göre katkı kullanılan betonlar kimyasal dayanımı arttırmışlardır. Kimyasal dayanım sırası ile silis dumanı, metakaolin ve uçucu kül şeklinde olmaktadır. Beklenilenin aksinesu/bağlayıcı oranı 0,36 dan 0,40 değerine arttıkça kimyasal dayanımın da arttığını hesaplamışlardır (Şekil 3.13 ve Şekil 3.14) [66].



Şekil 3.13. Farklı metakaolin oranlarındaki harçların çeşitli kimyasal şartlardaki kütle değişim yüzdeleri [66]



Şekil 3.14. Farklı Metakaolin oranlarındaki harçların çeşitli kimyasal şartlardaki kütle değişim yüzdeleri [66]

3.6. Donma-Çözülme Etkisi

Vejmelkova vd. yaptığı çalışmada metakaolin kullanımının İsveç Standardına göre mükemmel sonuç gösterdiğini belirlemişlerdir. 56 donma-çözünme çevrimine kadar hiçbir kütle kaybı belirlenmemiştir. Kütle kaybı 56 donma-çözünme çevriminde yaklaşık 0,001 kg/m²'e kadar belirlenmiştir [67].

3.7. Su Emme

Madandoust ve Mousavi yaptığı çalışmada metakaolin kullanımı ile su emmenin azaldığını göstermişlerdir. Bu durum su/bağlayıcı oranı azaldıkça daha belirgin olmaktadır. Metakaolin kullanılan betonlar, 30 dakikada %3'ten az olacak şekilde düşük emmeyi gösteren 'iyi' kalitede beton olmaktadırlar [42].

Khatib ve Clay su/bağlayıcı oranı 0,45 olan betonlarda ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında metakaolin kullanarak absorbsiyon özeliklerini araştırmışlardır. Metakaolinin çimento ile kısmen yer değiştirmesi, su batmasını, betonun kılcal etkisi tarafından, düşürmektedir. Su absorbsiyonunuda düşüş her metakaolin içeren beton için kürleme zamanıyla birlikte olmaktadır, bu düşüş kürlemenin 14. Gününe kadar belirgin olarak gözlemlenir. 14 ile 28 gün arasında su absorbsiyonunda çok az bir artış görülmüştür, 28 günden sonra ise çok az bir değişiklik olmaktadır. Sığ batırılma tarafından oluşan absorbsiyonun toplam boşluk hacmi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Toplam boşluk hacmindeki artış su absorbsiyonunda artışa neden

olmaktadır. %15 oranında metakaolin kullanımının su emmeyi %30'a kadar düşürdüğünü hesaplamışlardır [68].

Courard vd. çalışmasında %15 oranında metakaolin (ağırlıkça %9,7) kullanmış ve su emmenin %20 azaldığını belirtmiştir [53]. Ramezanianpour ve Jovein su/bağlayıcı oranı ve test yaşına bakılmaksızın %10 oranında metakaolin kullanımının diğer oranlara en iyi sonucu verdiğini belirtmişlerdir. [52].

Kostusch vd. yaptığı çalışmada %20 oranında metakaolin içeren harçların su emme oranını azalttığını bildirmişlerdir [16].

3.8. Porozite

Boşluk hacmi ve boşluk yapısını ölçen yöntemlerden birisi de civa geçirimlilik analizidir. Khatib veWild, bu yöntemi kullanarak farklı metakaolin oranlarında hamurlar oluşturmuş ve metakaolin oranı arttıkça ve kür süresi uzadıkça hamurdaki büyük boşlukların (çap>0,02mm) miktarının azaldığını tespit etmişlerdir. Toplam içsel boşluk hacmi, kür süresi artmasıyla, genellikle azalmasına rağmen, metakaolin miktarı arttıkça arttığı görülmüştür [69].

Artmakta olan boşluk hacimlerinin kümülatif toplamlarını içeren bir önceki çapın değerini veren eşik çapı ölçülen bu analizde, kürleme zamanının ilk günlerinde yani erken yaşta eşik çapı oldukça hızlı bir şekilde düşmektedir. 28 güne gelindiğinde ise artık sabit bir değere yaklaşmıştır. Metakaolin miktarı arttıkça eşik çapın azaldığı belirlenmiştir. Bu durum metakaolin eklenmesiyle ince boşluk yapısının oluştuğunudoğrulamaktadır [69].

Frias ve Cabrera da bu yöntemi kullanarak çalışmalar yapmıştır. Onlar da hamurlar oluşturmuş ve farklı metakaolin miktarlarında çalışmışlardır. İlk gün, tüm hamurlarda benzer davranış gözlemlemişlerdir. Kapiler porozite ölçümünde %10 oranında metakaolin kullanılmasının çok az bir artış sağladığı ve %15 ile %25 aralığındaki metakaolin oranının da değerleri önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Tüm numunelerde toplam porozite miktarı 28-56 günler arasında düşmektedir, metakaolin kullanımı ise toplam poroziteyi arttırmaktadır. %15 ile %20

oranında metakaolin kullanımı ile ortalama boşluk çapı ve jel porozitesinin düşmesi ile porozitede önemli artış elde edilmektedir [37].

Çimento hamurunda metakaolin kullanılması boşluk yapısında artmaya neden olmaktadır. Toplam içeride bulunan boşluk hacmi metakaolin içeren çimento hamurlarında 14 ile 28 gün arasında artmaktadır [69].

Akçay ve Taşdemir yaptığı çalışmada cıva geçirimlilik analizi ile boşluk yapılarını analiz etmişlerdir. 28 günlük numuneler 2 günlük numunelere göre toplam porozitenin azaldığını, metakaolin kullanılmasının bu durumu daha da arttırmaktadır. Puzolanik reaksiyonların bir sonucu olarak, kapiler boşluklar azalırken, ince jel boşlukları artar. Özelikle su/bağlayıcı oranı 0,28 olan numunelerde, neredeyse tüm büyük boşlukları elimine eder [1].

3.9. Yangın Dayanımı

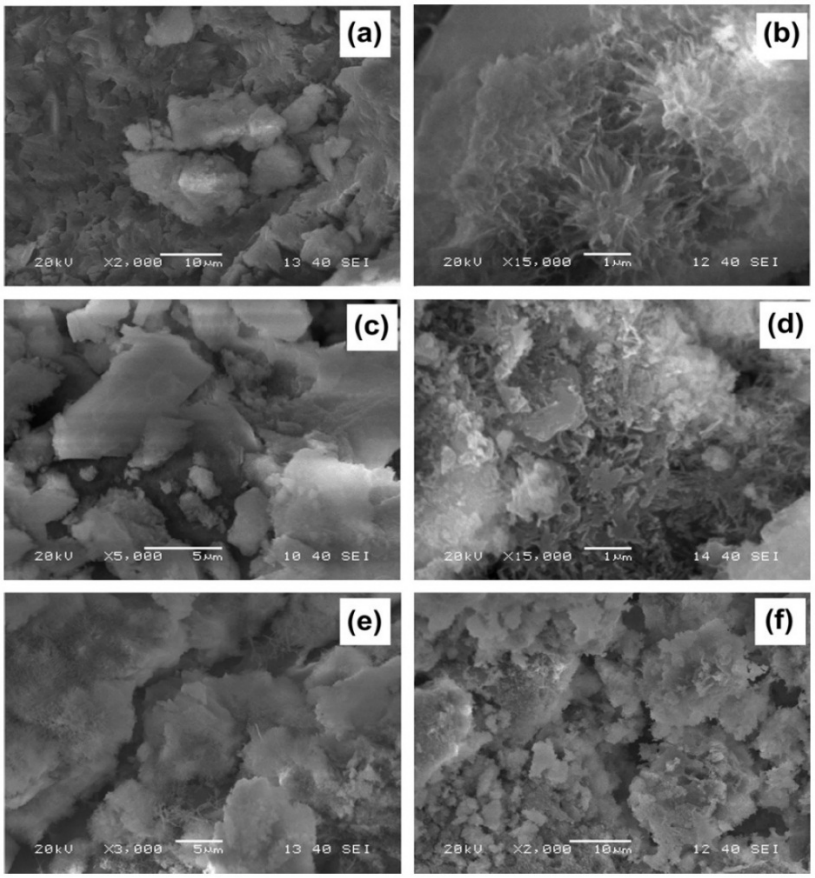
Poon vd. yaptığı çalışmada normal ve yüksek dayanımlı betonlar üretmiş ve %0, %5, %10 ve %20 oranlarında metakaolin kullanmıştır. Sıcaklık davranışını gözlemlemek için elde ettikleri numuneleri 800°C'ye kadar ısıtmışlardır. 200°C'ye kadar metakaolin içeren betonlarda basınç dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. Kontrol numunesi ve silis dumanı ve uçucu kül içeren betonlarda bu artış 400°C'ye kadar gözlemlenebilmektedir. 400-800°C aralığında metakaolin içeren betonlar silis dumanı ve uçucu kül içeren betonlara nazaran daha çok kitle kaybı ve basınç dayanımında azalma göstermektedirler [70].

Yoğun mikro yapı ve düşük porozite metakaolin içeren betonlarda yangın dayanımının düşük performans göstermesinde ana etkendir. Metakaolin içeren betonlarda patlayarak dökülme 450 ile 500°C arasında olmaktadır. Yüzey çatlaması frekansı metakaolin miktarı arttıkça artmaktadır. %5 oranında metakaolin kullanımı en iyi sonucu vermekte ve bu betonlarda yüzey çatlaması oluşmamaktadır [70].

Morsy vd. yaptığı çalışmada farklı oranlarda metakaolin içeren betonların yükseltilmiş sıcaklık davranışlarını incelemişlerdir [53].

Taramalı elektron mikroskobu görüntülerine göre, Şekil 3.15.a'da kalsiyum silika hidratın kontrol numunesinde ve Şekil 3.15.b'de kalsiyum silika hidratın %15

oranında metakaolin içeren betonda yapısı gözlemlenmektedir. %15 oranında metakaolin içeren betonda kalsiyum silika hidrat daha amorf yapıdadır ve daha yoğun mikro yapı görülmektedir. Sıcaklık 250°C'ye yükseltilince de %15 oranında metakaolin içeren harcın mikro yapısının stabil olduğu ve benzer yoğunluk gösterdiği görülmektedir (Şekil 3.15.d). Sıcaklık 800°C'ye yükseltildiğinde metakaolin içermeyen kontrol numunesinde hidratasyon ürünlerinin ayrışması ve oluşan geniş mikro çatlaklar görülmektedir(Şekil 3.15.e). Şekil 3.15.f'de görüldüğü gibi az da olsa dar mikro çatlakların oluşumundan dolayı kristal özeliklerini kaybeden amorf yapıda görünen kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum hidroksit içeren hidrate olmuş fazlar görülmektedir. %15 oranında metakaolin içeren harçlar en iyi değerleri vermişlerdir [53].



Şekil 3.15. Yükseltilmiş sıcaklıklar uygulanan kontrol ve %15 oranında metakaolin içeren harçların taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları (a) 25°C'de hidrate olmuş kontrol harcı, (b) 25°C'de hidrate olmuş %15 oranında metakaolin içeren harç, (c) 250°C'ye yükseltilmiş kontrol harcı, (d) 250°C'ye yükseltilmiş %15 oranında metakaolin içeren harç, (e) 800°C'ye yükseltilmiş kontrol harcı, (f) 800°C'ye yükseltilmiş %15 oranında metakaolin içeren harç [53]

250°C sıcaklığa kadar basınç ve eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir, sıcaklık 800°C'ye kadar arttırıldığında basınç ve eğilme dayanımları devamlı azalmıştır. Bu mikro ve makro çatlakların oluşması ile açıklanmaktadır [53].

%15 oranında metakaolin içeren harçlar yangın dayanımlı bağlayıcı malzeme olarak uygulanabilir [53].

3.10. Mikro Yapısal Özelikler

Asbridge vd. yaptığı çalışmada metakaolinin sertleşmiş çimento matrisinin mikroyapısını güçlendirdiğini ve yoğunlaştırdığını, böylelikle hipotezlerle uygun olarak mikrodayanımı arttırdığını göstermişlerdir [71].

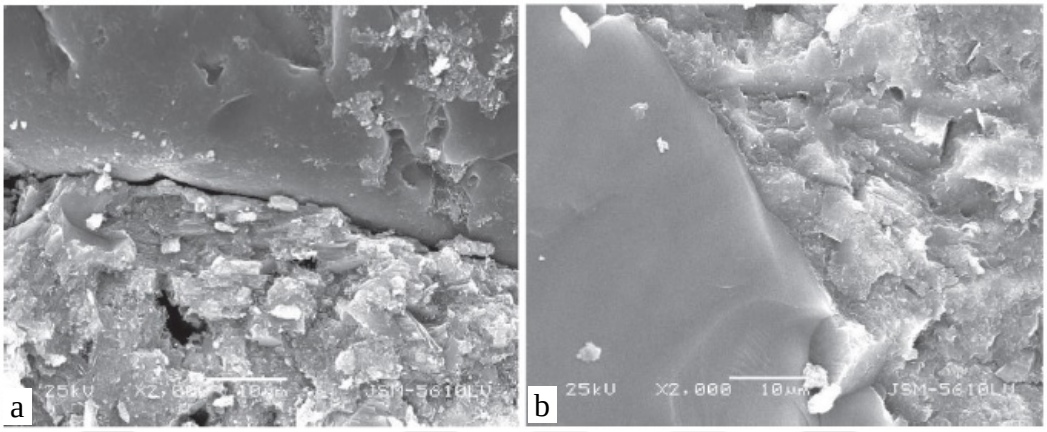
Metakaolin numuneler için, arayüz geçiş bölgesinin ortalama mikroyapısı ve dolu bölgesi arasındaki fark su/bağlayıcı oranı 0,40 olduğunda kontrol numunesine göre daha az belirgindir. Daha yüksek su/bağlayıcı oranlarında yani 0,50 ve 0,60 oranlarında, arayüz geçiş bölgesinin ortalama mikroyapısı ve dolu bölgesi arasındaki fark belirgin değildir. Bu durum metakaolinin arayüz geçiş bölgesi mikro dayanımında çok büyük etkisini olduğunu göstermektedir. Bu hidrate çimento hamurundaki mikro yapının daha homojen olduğunu da aynı zamanda ifade etmektedir. Kontrol numunesiyle kıyaslandığında su/bağlayıcı oranı 0,50 ve 0,60 olan karışımlarda da metakaolin kullanılması mikro dayanımı arttırmaktadır [71].

Ramezanianpour ve Jovein metakaolin içeren hamurların içermeyen hamurlara göre mikroyapılarının daha üniform ve yoğun olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.2) [35].

Betonda arayüz geçiş bölgesinin geleneksel resimleri her agrega için yaklaşık 30-50µm arasındaki bölgeyi kapsar. Kristal zenginleştirme ve $Ca(OH)_2$ yönelimi zayıf arayüz için ana nedendir, ve boşluk yapısı ve sıkışma oranına direkt olmasa da etki eder. Farklı kür koşulları da arayüz geçiş bölgesini önemli ölçüde etkiler [72].

Metakaolin ilave edilmesi mikro yapıyı geliştirir ve arayüz geçiş bölgesini güçlendirir. Puzolanik reaksiyona bağlı olarak kalsiyum silika hidrat jelinin artması ve $Ca(OH)_2$ miktarının düşmesi buna neden olmaktadır. Buna ek olarak ince partiküller matris ve agrega arasındaki boşluklarda köprü oluşturmaktadır, arayüz

geçiş bölgesi yoğunlaşmaktadır ve matris ile agreganın birleşimi iyileştikçe, mikro çatlaklar azalmaktadır (Şekil 3.16.a ve Şekil 3.16.b) [72].



Şekil 3.16. Metakaolinin 28 günde arayüz geçiş bölgesinin mikro morfolojisine etkileri (a) Metakaolin içermeyen (b) Metakaolin içeren [72]

Metakaolinin kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesiyle kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum silika alümina hidrat oluşmaktadır. %10 oranında metakaolin kullanılması iğne yapısındaki etrenjitlerin azalmasına ve lifli kalsiyum silika hidratlar ve kalsiyum alümina silika hidratların oluşumuna neden olur [72].

4. FARKLI KÜR KOŞULLARININ METAKAOLİN İÇEREN BETONLARDA ETKİLERİ

Bazı inşaat projeleri, özellikle şehir alanlarında, kısa zamanda bitirilmeyi gerektirmektedir. Beton elemanın oranı da tüm kalıpların işlem süresini etkilediğinden bu süreçte önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple, atmosferik basınçta ön ısıtma veya buhar kürü yapılması önemli basınç dayanımı kazanılmasına, böylelikle kalıpların kullanım süresinin azalmasını sağlar. Bazı araştırmacılar düşük basınçta yapılan buhar kürünün harçların dayanımını arttırdığını rapor etmişlerdir. 60°C sıcaklıkta buhar kürünün betonun dayanımı için uygun olduğu ve daha fazla ön kürlemenin, puzolanik aktifliği arttırabileceğinden dürabilite ve dayanımı arttırdığı belirtilmiştir [73].

Prekast endüstrisi dünya çapında beton üretiminin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır [3]. Prekast betonlar, sade beton ürünler (beton duvar üniteleri, yol bordürleri, zemin blokları, vb.) ve donatılı/öngerilmeli beton elemanları (boşluklu döşemeler, kirişler, yeraltı kemer taşları, vb.) gibi bir fabrika ürünüdür [4].

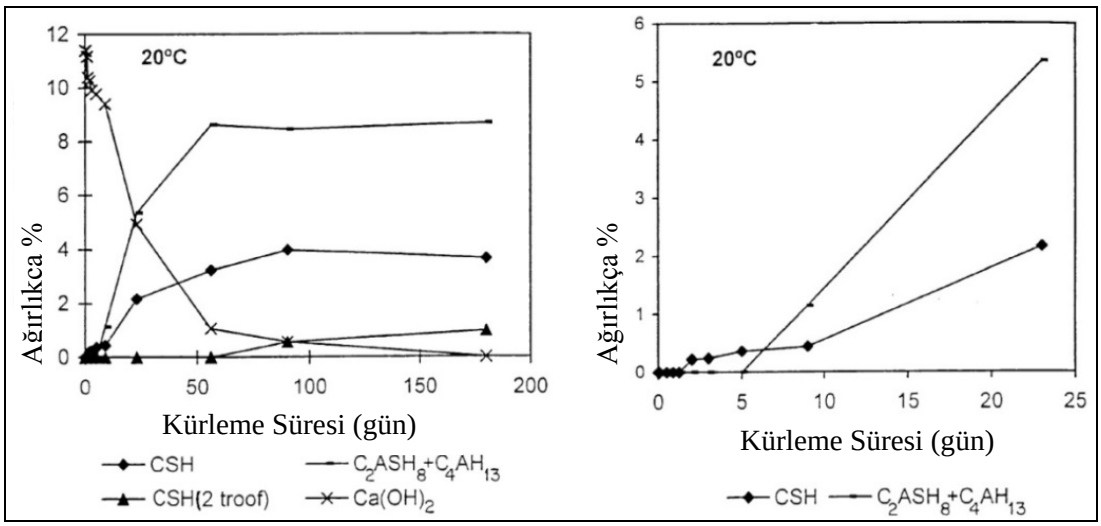
Prekast ürünlerin sunduğu birçok avantaj vardır. Yapım süresini azaltır, ürünlerin çeşitliliğini arttırır, fiyatları optimize eder, vb. Fakat prekast endüstrisi için en büyük sorun üretim süresinin uzunluğundan olumsuz etkilenen karlılıktır. Üretim süresini azaltmak için, yapısal kiriş ve döşemelerde beton erken ve geç yaşlarda yeterli mekanik özelikler göstermelidir [4].

Örneğin 1 günlük gibi erken yaşlarda yüksek dayanım için öngerilmeli betonlar gerilir, çünkü daha sonra öngerilme uygulanmış birimler genleşirler. Bu mekanik özelikleri karşılayabilmek için iki adet çözüm önerilir [4].

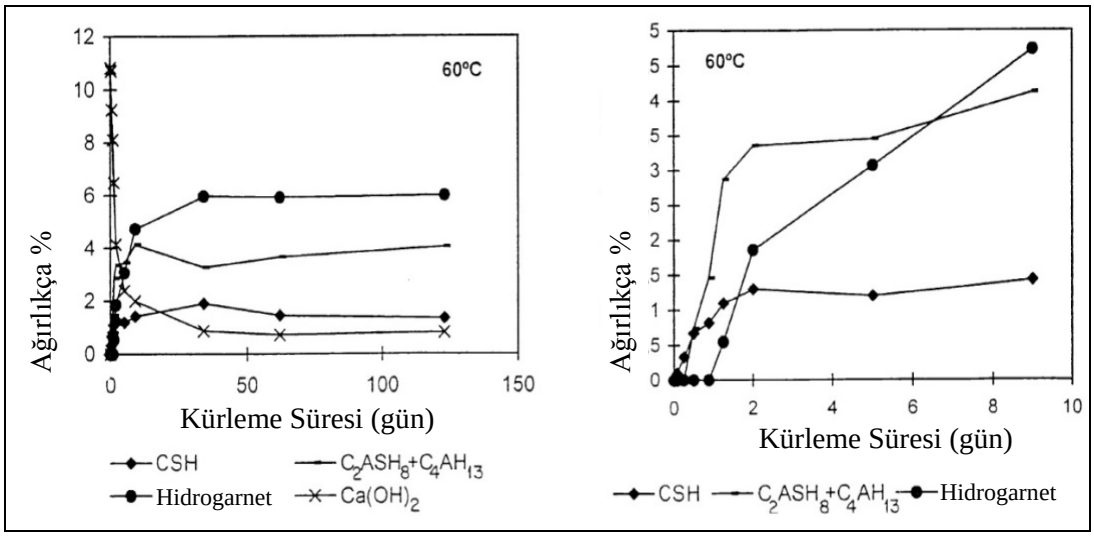
Bunlardan ilki, EN 197-1'e uygun CEM I-52,5R [74] çimento kullanılmasıdır, çünkü bunlar yüksek klinker içeriği (ağırlıkça en az %95, CEMI notasyonu) ve yüksek incelik (R notasyonu) ile erken yaşta yüksek reaktivite sağlar [75].

İkincisi prekast ürünlerin oluşumuna ivme kazandırmak için yüksek bir sıcaklık (buhar kürü) uygulanır. Yaygın olarak yüksek kür sıcaklıklarının erken yaşlarda mekanik özelikleri geliştirdiği ancak ileri yaşlarda bunun tersine etki yarattığı rapor edilmiştir [76, 77]. Sıcaklığın artmasıyla hidratasyonun ilk etapları hız kazanmaktadır. İleri yaşlarda hidratasyon reaksiyonları öncelikle topokimyasal yapıda olur ve böyle olunca da daha çok reaktif materyallerin yüzeyinde yer alır. Yüksek kür sıcaklık şartları topokimyasal reaksiyonların oluşumunu hızlandırmaktadır. Dolayısıyla hidratasyon ürünlerinin düzenli olmayan dağılımı tüm malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkiler [78].

Rojas ve Cabrera yaptığı çalışmada metakaolin – kireç – su karışımlarda 20°C ve 60°C de kür uygulamışlardır. Reaksiyonun ilk aşamalarında kalsiyum silika hidrat her iki sıcaklık için ana faz olmuştur (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) . Sonrasında C_2ASH_8 (stratlinjit) ve C_4AH_{13} ortaya çıkar, ve son olarak C_3ASH_6 (hidrogarnet) 60°C'de kürlenen numunelerde baskın faz olmuştur. 20°C'de hidrogarnet formasyonuna rastlanmamıştır. 60°C yarı kararlı fazların (C_2ASH_8 ve C_4AH_{13}) dönüşümü 123 güne kadar bulunmamıştır. C_2ASH_8, C_4AH_{13} ve C_3ASH_6 miktarı kür zamanı ile artmıştır. 20°C'de C_4AH_{13} varlığının kalsiyum hidroksitin bulunmayışının açıkça kanıtı olduğu belirtilmiştir [79].



Şekil 4.1. Termal analizler sonucu hesaplanan reaksiyon ürünlerinin miktarları (20°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde) [79]



Şekil 4.2. Termal analizler sonucu hesaplanan reaksiyon ürünlerinin miktarları (60°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde) [79]

Bir diğer çalışmada, Jander matematik modeliyle, 60°C'de kürlemenin 5 güne kadar, 20°C'ye göre hidratasyonun 68 kat daha fazla olduğunu, öte yandan 60°C'de metakaolin ile kalsiyum hidroksitin reaksiyonun bir sonucu olarak hidrogarnetin oluşmadığını bildirmişlerdir [80].

Silva ve Glasser ise bazı aktivatörlerin (Sülfatlar, NaOH) metakaolin/kireç sistemlerde 20°C'de kürlemede önemli yapısal değişikliklere neden olduğunu belirtmişlerdir [81].

Rojas ve Rojas yaptığı çalışmada %0, %10, %20 ve %25 oranlarında metakaolin içeren metakaolin/kireç ve metakaolin/çimento hamur matrisleri oluşturarak 20°C ve 60°C'de kürleyerek bileşenlerdeki farklılıkları analiz etmişlerdir. Metakaolin miktarı arttıkça kalsiyum hidroksit miktarının azaldığı saptanmıştır, bu azalma 60°C'de 20°C'ye göre daha fazla olmaktadır. 60°C kür sıcaklığında hidratasyonun 123. gününe kadar, hidrogarnet oluşumu belli olmamıştır. 60°C'de kürlenen metakaolin/çimento hamurları X-ışını kırınımı analizlerinde hidrat fazlar, kristallikle uygun olarak önemli değişimler göstermiştir. Stratlinjit bir kristal fazı olarak gözlemlenmemektedir, ancak bu durum çok düşük kristal içeren bileşimlerde oluşmaktadır. %20 ve %25 oranlarında metakaolin içeren karışımlarda hidrogarnet mevcudiyetinden bir iz görülmediğini belirtmişlerdir [82].

Cassagnabere vd. yaptığı çalışmada C_2S/C_3S oranı farklı iki tip çimento ve %0, %12.5 ve %25 oranlarında metakaolin kullanarak 55°C'de 17,8 saat kürleyerek bazı özelikleri araştırmışlardır. C_2S/C_3S oranı düşük olan betonlarda referans numuneye göre 1 günlük göreceli dayanımlar metakaolin oranı arttıkça artmıştır, 28 günde ise belirgin olmayan artışlar söz konusudur. C_2S/C_3S oranı yüksek olan karışımlarda ise 1 günlük göreceli dayanımlar metakaolin artışıyla birlikte artmaktadır, 28 günde ise bu artış belirgin olmamaktadır. Bu iki tip çimento kullanılarak yapılan karışımların göreceli dayanımları kıyaslanacak olursa C_2S/C_3S oranı yüksek olan karışımlarda daha iyi sonuçlar gözlemlenmektedir. Yine bu çalışmada gözlemlenen 1 günlük X-ışını kırınımı analizlerine göre, C_2S/C_3S oranı yüksek olan çimentolu karışımlarda daha az C_3A ve portlantide rastlanması ve diferansiyel termal analizlerde daha fazla kalsiyum silika hidrat bulunması ve daha az kalsiyum hidroksit içermesi ile açıklanabilir [83].

Esas olarak hidratların kristal formlarının metakaolin/kalsiyum hidroksit oranı ve kür sıcaklığına bağlı olduğu görülmektedir. Böyle hidratasyon ürünlerinin varlıkları göstermektedir ki 1 günlük kadar erken termal işlem metakaolinin ısıl aktif edilmesine bağlı olarak puzolanik reaksiyona sebep olmaktadır [83].

Cassagnabere vd. %0 ve %25 oranında metakaolin kullanmış ve bunları 55°C'de 17,8 saat kürleme işlemine tabii tutmuştur. Metakaolin içeren numuneler ile içermeyen numuneler arasındaki farklılıkları göz önünde bulundurarak bir günlük kadar erken yaşta metakaolin kullanımının puzolanik reaksiyonun termoaktifliği ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Metakaolin kullanımıyla portlantid %73 kadar azalırken, kalsiyum silika hidrat %44 artmaktadır. Metakaolin içeriğindeki Si^{4+} ve alüminyum oksitten gelen Al^{3+}kalsiyum alümina silika hidrat fazlarının oluşumunu arttırmaktadır. Molar C/S oranındaki düşme (%53'e kadar) ve SiO_2 ve Al_2O_3 oksitlerinde zenginleştirme metakaolin içeren malzemelerde hidratasyon ürünlerini geliştirdiği gözlemlenmiştir [83].

Cachim vd. yaptığı çalışmada metakaolin kullandığı hidrolik kireç betonlarda 3 farklı kür koşulu uygulamışlardır. 20°C sabit olmak üzere bağıl nemi %100, %95 ve %65 olarak belirlemişlerdir. Karışımlarında %0, %20 ve %30 oranlarında metakaolin kullanmışlardır. Yapmış oldukları deneylere dayanarak, kür koşullarının zaman

içerisinde reaksiyonların gelişmesine bağlı olarak mekanik dayanımı değiştirdiğini belirtmişlerdir. En iyi sonuçları %100 nem koşulu olan su içerisinde kürlenen numuneler vermişlerdir [14].

Grilo vd. yaptığı çalışmada hidrolik kireç-metakaolin harçları doğal deniz alanına yakın bir alanda, yüksek nem koşulları olarak adlandırdığı 20°C'de bağıl nem %95±5 koşulunda ve standart nem koşulları olarak adlandırdığı 20°C'de bağıl nem %65±5 koşulunda olmak üzere üç farklı kür koşulunda incelemiştir. %0, %10 ve %20 oranında metakaolin içeren numuneler hazırlayarak mekanik ve mineralojik özeliklerini araştırmışlardır. En yüksek basınç dayanımı %20 oranında metakaolin içeren numunelerde görülmüş ve 180. günde basınç dayanımları her kür koşulu için birbirine yakın değerlerde bulunmuştur. Örneğin %20 oranında metakaolin ilavesiyle standart kür koşulunda basınç dayanımı 28 günde 7 katına çıkmış, daha sonra azalarak 180 günde 4,5 katında bir değer almıştır. Su küründe de %20 oranında metakaolin kullanımında 28 günde basınç dayanımı 7 katına çıkmış daha sonra 90 günde bir miktar artış gözlemlenmiş, sonra yine azalarak 180 günde basınç dayanımı 2 katı olacak şekilde artış görülmüştür. Deniz etkisinde kürlenen numunelerde %20 oranında metakaolin ilavesiyle 28 günde basınç dayanımı 6,5 katında bir değer almış, daha sonra azalarak 1,5 katında bir basınç dayanımı performansı göstermiştir. En yüksek değerlerin görüldüğü %20 oranında metakaolin içeren su küründe tutulan numunelerde metakaolin içermeyen numunelere göre 28 günde 6 kat yüksek basınç dayanımı görülmüş, bu dayanım 90 günde bir miktar artmış daha sonra 180 günde ise önemli ölçüde yaklaşık %33 kadar azalmıştır [84].

Eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında da en iyi performansı su küründe bekletilen numuneler göstermektedir. Metakaolin oranı arttıkça eğilme dayanımı genel olarak artmaktadır. Eğilme dayanımı için en düşük performansı %10 oranında metakaolin içeren standart kürde bekletilen numuneler sergilemiştir. Metakaolin oranı %20 olduğunda 180. günde eğilme dayanımı artmaktadır. Deniz etkisinde kürlenen numunelerde metakaolin kullanımının eğilme dayanımı 28 günde arttırdığı görülse de 180 güne gelindiğinde azalttığı görülmektedir. Metakaolin kullanım oranlarının arasındaki farkın eğilme dayanımına etkisinin çok belirsizdir [84].

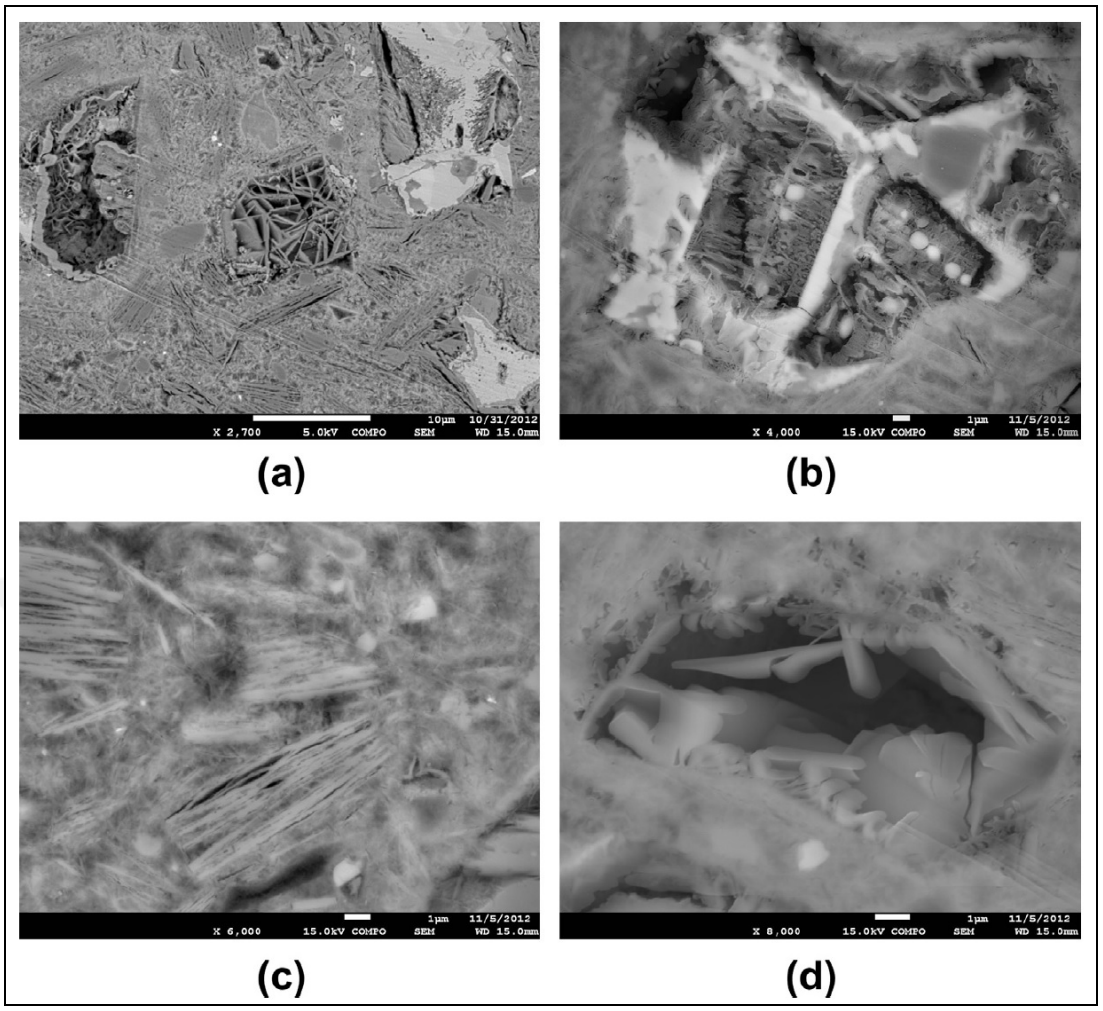
Metakaolin içeren harçlarda zamana bağlı olarak mekanik sonuçların azalması, puzolanik kalsiyum-alüminyum hidrate edilmiş bileşimlerin çok erken yaşlarda oluşmasıyla ilişkilendirilir. Metakaolinindoğal hidrolik kireç harçlarına ilave edilmesi dayanım karakteristiklerini arttırmaktadır, bu durum en fazla yüksek nemli kür koşullarında görülmektedir. Bu gelişimler belki sıradan duvarlarda kullanılan sıva ve astarlar için önemli değildir ama yüksek dayanım gereklilikleri için yeterlidir. Metakaolin içeren ve içermeyen harçların dayanımları kürleme zamanıyla farklılıklar sergilemektedir. Kontrol numunesine göre metakaolin içeren harçlar bazen yaşa göre azalmalar göstermektedir, bu da oluşan puzolanik bileşenlerin değişken olmasıyla ilgilidir. Metakaolin içeren ve içermeyen harçlarda ana sertleşme tepkimesi karbonatlaşmadır. Ancak metakaolin içeren harçlarda erken yaşlarda (28 günlük) hidrolik bileşenler oluştuğundan, mekanik dayanım artmakta ve su etkisine karşı direnci geliştirmektedir. Deniz suyu küründe bırakılan harçların mekanik sonuçlarında göre, bu harçlar deniz çevresi yakınlarındaki yığma yapılarda kullanmaya uygun ve yeterlidir [84].

Bohac vd. yaptığı çalışmada 0,60 su/bağlayıcı oranında %0 ve %50 oranında metakaolin kullanarak yüksek fırın cürufu da içeren veya içermeyen karışımlarda erken hidratasyonu araştırmışlardır. 25°C'de %95 bağıl nem koşullarında kürlemişlerdir. Başlangıç hidratasyonu çimento-yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren karışımlarda en çok metakaolin ve çimentodan etkilenmektedir. Metakaolinin yüksek puzolanlığı, Aft hızı, ilave kalsiyum silika hidrat; kalsiyum alümina silika hidrat ve kalsiyum alümina hidrat hidratasyonu 48 saat içerisinde olmaktadır. Metakaolin üçüncü kalorimetrik pik tarafından karakterize edilen ekzotermik reaksiyonları hızlandırır. Hemikarbonat alümina hidrat $C_4A\bar{C}_{0,5}H_{11,5}$ oluşumu X-ışını toz difraksiyonu tarafından bulunur ve kalorimetrik eğride üçüncü ekzotermik pik ile ilişkilendirilir. Diferansiyel termal analiz ve X-ışını kırınımı analizi sonuçlarına dayanarak, kalsiyum hidroksit içeriği daha çok kullanılan çimento miktarına, ama aynı zamanda metakaolin ve yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonlarında çimento/yüksek fırın cürufu ve çimento/metakaolin karışımları kıyaslanarak çıkarılabilir. Hidrokalsit ve sjögrenit çimento/yüksek fırın cürufu karışımların ana kristal hidratasyon ürünleri, hemikarbonat alüminahidrat ve

stratlinjit, reaktif $CaCO_3$ ile çimento/metakaolin karışımların ana kristal hidratasyon ürünleridir [85].

Yerinde X-ışını kırınımı analizlerinde metakaolin içermeyen ve %50 oranında metakaolin içeren karışımların kıyaslanmasında, kalsiyum hidroksit ilk 24 saat içerisinde başlıca kristal yapı olduğu görülmüştür. %50 oranında metakaolin içeren karışımda da aynı zamanda kalsiyum hidroksit oluşmakta fakat bu miktar daha az olmaktadır. Şaşırtıcı olarak metakaolin içeren karışımlarda hemikarbonat alüminahidrat ve $CaCO_3$ (kalsit) görülmektedir. Bu oluşumlarında daha sonra kalsiyum silika hidrat ile birlikte stratlinjit (C_2ASH_8) oluşturması mümkün olduğu belirtilmiştir [85].

Yazarlar, 1 günlük değerler için Şekil 4.3.a'da sertleşmiş hamurda hidratlar ve klinkerin anhidrate partikülleri ve metakaolin görüldüğünü göstermiştir. Anhidrate klinker, gömülmüş doku içinde bulunan C_3A, C_4AF ile yuvarlaksı M (periklaz, MgO) içeren C_3S ve C_2S'in ayrık küçük bölgelerinden oluşmaktadır. Hidratasyonun farklı evrelerindeki klinker mineralleri Şekil 4.3.b'de gösterilmiştir. Anhidrate veya kısmen hidrate metakaolin partikülleri, orijinal kaolinit görünüşünde olduğu kabul edilen tabakaya benzer çeşitli biçimsiz ve kıvrılmış filosilikattan oluşmaktadır (Şekil 4.3.c). Metakaolinin yüksek sıcaklıktaki reaksiyonu 28 günde uzun zincirli yüksek alüminyumlu kalsiyum silika hidrat oluşturmaktadır, bu zincirler Si^{4+} ve Al^{3+} tarafından oluşturulmaktadır. Harici ürün kalsiyum silika hidrat, ince lifli ve folyomsu morfolojiye sahiptir. Bazı hidratların zayıf kristal veya çeşitli kimyasal kompozisyonların amorf fazlarıyla doldurduğu boşluklar Şekil 4.3.d'de görülmektedir [85].

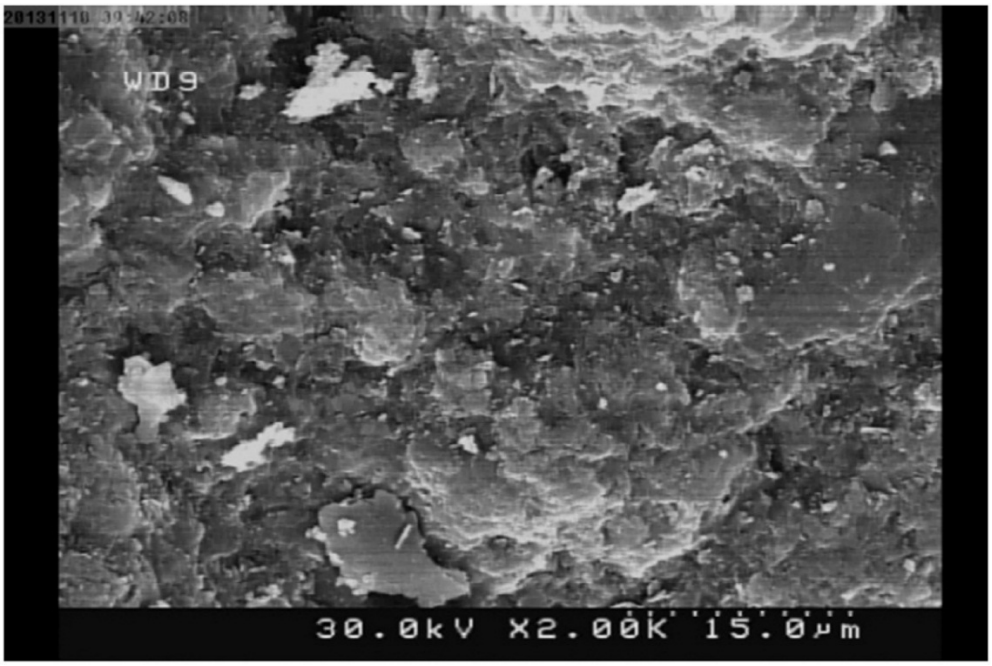


Şekil 4.3. Portland Çimentosu / Metakaolin 50/50'nin farklı ölçeklerdeki taramalı elektron mikroskobu içyapı resimleri [85]

Ramezanianpour vd. yaptığı çalışmada metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda 60°C ve 70°C buhar kürünü 16, 18 ve 20 saat uygulamıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,38 olan numunelerde %0 ve %20 oranında metakaolin kullanmışlardır. Her kür sıcaklığı için metakaolin oranı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. İlk günde ve 7 günde hem 60°C'de hem 70°C'de kürleme süresi arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. 28. günde 70°C'de kürlenen metakaolin içeren karışımlarda yine kür süresi arttıkça basınç dayanımı artmaktadır, ancak 60°C'de kürlenen metakaolin içeren karışımlar hem 70°C'ye göre daha yüksek değerler almakta, bu değerlerin de en yükseği 18 saat kürlenen karışımda olmaktadır. Basınç dayanımı 90 günlük sonuçlarına bakıldığında her kür süresi için 60°C'de daha yüksek değerler görülmektedir [73].

Ramezanianpour vd. 16 saatlik buhar kürü süresinin basınç dayanımının 24MPa altında değerler verdiğini göstermiştir. Minimum 18 saat buhar kürü uygun görülmektedir. Böylelikle proje gerekliliklerine göre başlangıç ve nihai basınç dayanımlarını karşılayabilmektedir. 70°C buhar küründe de proje koşulları sağlanır ve hedeflenen 50MPa'ya ulaşılmaktadır. Ancak zaman, maddi ve doğal kaynakların önemi düşünüldüğünde, 70°C sıcaklığın kullanılmasına gerek yoktur [73].

Yazarlar bu çalışmada tras, pomza ve kireçtaşı da kullanılmış, en homojen mikro yapıyı metakaolin içeren karışımların gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 4.4.) [73].



Şekil 4.4. 60°C'de 18 saat kürlenmiş %20 oranında metakaolin içeren beton [73]

Buhar kürü sıcaklığını 60°C'den 70°C'ye çıkarmakla, permeabilite yükselmektedir. Metakaolin içeren karışımlar kullanılan diğer kireç taşı, pomza, trasa göre daha az permeabiliteye sahiptir [73].

Pavlik vd. yaptığı çalışmada dört farklı kür koşulunun kireç, kireç-metakaolin ve kireç-zeolit harçlarda etkilerini araştırmıştır. Bu etkileri araştırmak için %65±5 bağıl nem içeren ortamda, hava girişi olmayanyalıtılmış şartlarda %100 bağıl nem içeren ortamda, %10 oranında CO_2 içeren karbonasyon odasında ve karışık şartlar olarak adlandırılan önce %100 bağıl nem içeren ortamda, sonra %65±5 bağıl nem içeren ortamda kürleme yapmışlardır [15].

Bu kireç harçlarında %50 oranında metakaolin kullanılmasının en belirgin etkisi basınç dayanımı, rötre ve donma dayanımında olmuştur. Ancak bu malzemenin pozitif puzolanik potansiyeli kür koşullarından kritik bir şekilde etkilenmektedir. Kireç-metakaolin harçlarda puzolanik reaksiyonların ana ürünleri kalsiyum silika hidrat ya da kalsiyum alümina silika hidrat jeli, kalsiyumhemikarboalüminat, kalsiyum monokarboalüminat ve stratlinjittir [15].

Kireç-metakaolin harçlar nemli ortamlarda sertleştiklerinde mutlaka donma dayanımı gösterirler. %65±5 bağıl nem içeren ortamda kürlenen numunelerde son dayanım diğerlerine göre düşük çıkmış, çünkü puzolanik reaksiyonların devamının kısıtlandığı bulunmuştur [15].

Bunun yanısıra Prekast ve Öngerilmeli Beton Enstitüsü buhar kürü sıcaklığını ertelenmiş etrenjit oluşumu riskinden dolayı 65°C'de sınırlamışlardır [86].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Malzemeler

Tüm karışımlarda Nuh Çimento A.Ş. Hereke tesislerinde üretilmiş olan CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Hazırlanan standart RILEM Cembureau harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 48,1MPa ve 60,5MPa olarak bulunmuştur. Kullanılan çimentonun özelikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özelikleri (Veriler üretici firmanın analiz sonuçlarına dayanmaktadır.)

Özgül Ağırlık	3140 kg/m^3			Priz süresi (Vicat Test)		Priz başlangıç	183 dakika		
Blaine Özgül Yüzey	3490 cm^2/g					Priz son	217 dakika		
Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	1 mm								
Minerolojik Bileşim (%)									
C_3S	C_2S			C_3A		C_4AF			
62,82	10,15			6,08		10,47			
Kimyasal Bileşim (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Çözünmeyen kalıntı	Kızdırma kaybı	Serbest kireç	Toplam alkali
20,07	4,49	3,44	64,66	1,23	2,76	0,58	2,61	1,21	0,53

Tüm karışımlarda kullanılan metakaolinin özelikleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları kullanılan bu metakaolin ASTM C349'a göre N sınıfı mineral katkı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2. Kullanılan metakaolin tozunun fiziksel ve kimyasal özelikleri

Kimyasal özelikler	
Kimyasal bileşim, %	
SiO_2	53,0
Al_2O_3	43,8
Fe_2O_3	0,43
TiO_2	1,70
CaO	0,02
MgO	0,03
K_2O	0,19
Na_2O	0,23
Fiziksel özelikler	
Özgül ağırlık, g/cm^3	2,50
Tane boyutu dağılımı	d_{50} ~ 1,3 μm 2 μm elekten geçen %66 yüzey alanı=13m^2/g
Renk	beyaz

Kireçtaşı kökenli kırma taşlar ile kuvars kumu karışımlarda kullanılmıştır. Yıkanmış kırma taş No 1, kırma kum ve doğal kumun özgül ağırlıkları doygun yüzey kuru halde sırası ile 2720, 2610 ve 2400 kg/m³ iken su emme değerleri sırası ile % 1,1, 1,2 ve 2,1 olarak belirlenmiştir (ASTM C127, ASTM C128) [87,88]. Kullanılan agreganın elek analizi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları

Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen %		
	Kırma taş I	Kırma Kum	Doğal kum
16	100	100	100
8	57	100	100
4	2	85	95
2	1	46	71
1	1	21	49
0,50	1	8	32
0,25	0	3	17
0,120	0	1	9

Süperakışkanlaştırıcı olarak ticari olarak bulunan polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı (Glenium 51, BASF) kullanılmıştır.

5.2. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada biri referans olmak üzere 4 tip karışım hazırlanmıştır. Su /bağlayıcı oranı 0,35 sabit olmak üzere, metakaolin çimentoyla ağırlıkça %8, %16 ve %24 oranında yer değiştirmiştir. Yayılmayı belirli aralıklarda tutmak amacıyla her karışım için farklı miktarlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Üretilen karışımların dizaynı ve kodlandırılması Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. 1 m³ karışımın gerçek kompozisyonu ve bazı taze hal özellikleri

	A-REF	B-%8	C-%16	D-%24
Çimento (kg)	547	508	460	412
Su (kg)	190	192	190	188
Metakaolin (kg)	0	44	88	130
Doğal kum (kg)	316	319	316	313
Kırma kum (kg)	598	604	599	592
Kırma taş (kg)	799	806	799	791
Süperakışkanlaştırıcı (kg)	4,83	6,31	8,07	9,67
Akış yarıçapı (cm)	56	63	50	50
Birim ağırlık (kg/m³)	2321	2452	2440	2448

Karışım hazırlanırken önce çimento ve metakaolin kuru halde karıştırılmış, agregalar daha sonra karışıma eklenmiştir. Su ve süperakışkanlaştırıcının yarısı karışıma eklenmiş, bir süre karıştırıldıktan sonra kalan su ve süperakışkanlaştırıcı karışıma yavaş yavaş eklenmiş ve homojenlik sağlanmıştır. Karışımlar 70x70x280 mm'lik çelik kirişlere ve Ø100, h 200 mm olan silindirlere yerleştirilmiştir.

Tüm numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve sonra iki farklı kür rejimi uygulanmıştır.

1. Standart su kürü: Kirece doygun su havuzunda deney gününe kadar 20°C sıcaklıkta
2. Sıcak nem kürü: 1 gün su içinde 70°C sıcaklıkta kürleme, sonrasında deney gününe kadar kirece doygun su havuzunda 20°C sıcaklıkta

Her beton serisi için, standart su kürü koşullarında kürlenen numuneler N harfi ile, sıcak nem kürü koşullarında kürlenen numuneler H harfi ile sembol edilmiştir.

5.3. Deneysel Metot

5.3.1. Taze beton özelikleri

Çökme, geleneksel çökme akış deneyi ile ASTM C143'e uygun olarak ölçülmüştür [89].

5.3.2. Sertleşmiş beton özelikleri

Farklı kür koşullarında bekletilmiş olan silindir ve küp örneklerde 28 ve 56. günde Kocaeli Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda mekanik deneyler yapılmıştır.

3 adet silindir numune üzerinde basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Üç noktalı eğilme deneyi için her kür koşuluna karşılık gelen 3 adet kiriş numune kullanılmıştır. Kirişler, yükleme orta noktasına gelecek ve mesnetler arası 21 cm olacak şekilde mesnetlere yerleştirilmişlerdir (Şekil 5.3). Eğilme deneyinde kullanılan kirişlerin ayrılan iki parçasından biri yarma-çekme deneyinde kullanılmıştır.



Şekil 5.1. A-Ref-H serisine ait silindir numunelerin basınç deneyi görüntüsü



Şekil 5.2. A-Ref-N serisine ait silindir numunelerin basınç deneyi sonrası görüntüsü

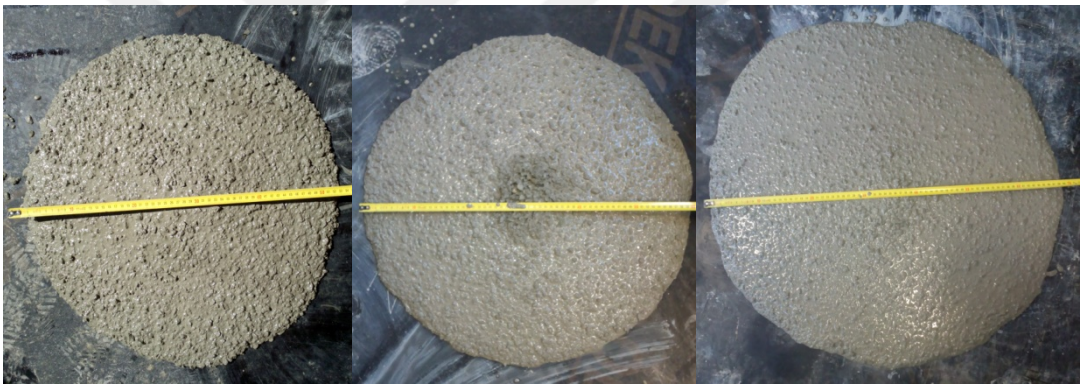


Şekil 5.3. Eğilme deneyi düzeneğine ait bir görüntü

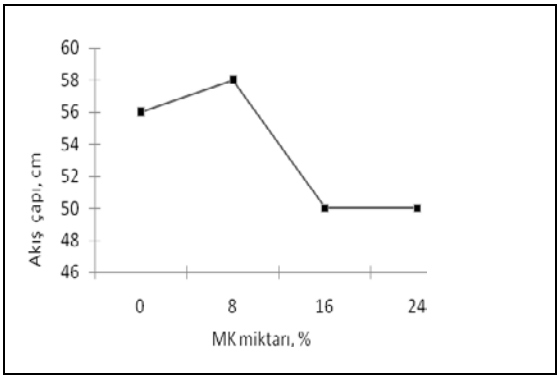
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

6.1. Taze Beton Özelikleri

Betonun akış ve işlenebilirlik özeliklerini karakterize edebilmek için geleneksel çökme akış deneyi uygulanmıştır (Şekil 6.1). Tüm karışımlarda birbirine yakın değerler bulunmuştur. Akış yarıçapı sonuçları Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü üzere, metakaolin kullanılması, yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmasına rağmen akış yarıçapını azaltmaktadır ve kullanılan yüksek oranda süper akışkanlaştırıcı nedeniyle betonların hava muhtevasını arttırmaktadır.



Şekil 6.1. Betonların çökme akış deneyi sonuçları (Soldan sağa A-Ref, B-%8 ve D-%24)



Şekil 6.2. Betonların taze haldeki özelikleri

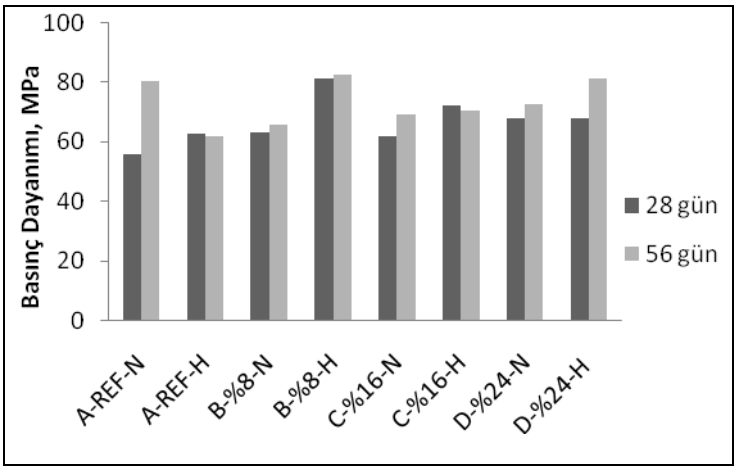
6.2. Sertleşmiş Beton Özelikleri

6.2.1. Basınç dayanımı

Basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.1 ve Şekil 6.3'de verilmiştir. Basınç dayanımı deney sonuçları göstermiştir ki, metakaolin miktarının artması 28 günde ve 56 günde basınç dayanımını arttırmaktadır. Referans betonun basınç dayanımı 55,9MPa bulunmuştur. %8 oranında metakaolin içeren betonun basınç dayanımı, referans betonun dayanımına göre %13 artmaktadır. Benzer şekilde %24 oranında metakaolin içeren betonlarda basınç dayanımı %21'e kadar artmaktadır. %16 oranında metakaolin içeren betonlarda bu etki çok belirsizdir. Bunun nedeni benzer taze haldavranışlarını sağlayabilmek için kullanılan yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı katkının beton içerisindeki hava miktarını arttırdığı, bu durumunda betonun basınç dayanımını olumsuz etkilediğinden kaynaklanmaktadır (Tablo 6.7).

Tablo 6.1. 28 ve 56 günde uygulanan basınç deneyi sonuçları (MPa)

Numune tipi	28 gün	56 gün
A-REF-N	55,94	80,57
A-REF-H	62,85	62,05
B-%8-N	63,31	65,77
B-%8-H	81,37	82,63
C-%16-N	62,09	69,35
C-%16-H	72,29	70,58
D-%24-N	67,83	72,91
D-%24-H	68,16	81,19



Şekil 6.3. 28 ve 56 günde uygulanan basınç deneyi sonuçları

Sıcak su kürünün basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. Bu etki metakaolin içermeyen betonlarda kısmen daha belirgin olmaktadır, metakaolin miktarı arttıkça bu etki azalmaktadır (Şekil 6.3 ve Tablo 6.2).

Tablo 6.2. Basınç dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim

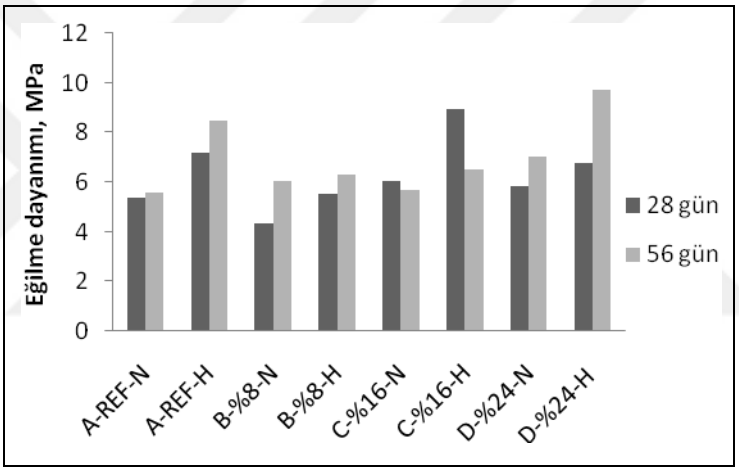
Metakaolin oranı	Basınç Dayanımı	
	28 günlük	56 günlük
%0	%12,4	-%23,0
%8	%28,5	%25,6
%16	%16,4	%1,8
%24	%0,5	%11,4

6.2.2. Eğilme dayanımı

Metakaolinin puzolanik etkileri eğilme deneyi sonuçlarından kolaylıkla görülmektedir (Tablo 6.3 ve Şekil 6.4). Eğilme dayanımı metakaolin miktarı artışıyla 28 günde bir miktar kadar artmaktadır, 56 günde ise dayanım artışı oldukça belirgindir.

Tablo 6.3. 28 ve 56 günde uygulanan eğilme deneyi sonuçları (MPa)

Numune tipi	28 gün	56 gün
A-REF-N	5,40	5,60
A-REF-H	7,20	8,49
B-%8-N	4,36	6,05
B-%8-H	5,54	6,29
C-%16-N	6,04	5,70
C-%16-H	8,93	6,50
D-%24-N	5,84	7,05
D-%24-H	6,77	9,70



Şekil 6.4. 28 ve 56 günde uygulanan eğilme deneyi sonuçları

Eğilme deneyi sonuçlarına göre sıcak nem kürünün eğilme dayanımına olumlu etkileri görülmektedir. Özelikle referans ve %24 oranında metakaolin içeren numunelerde bu artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 6.4 ve Tablo 6.4).

Tablo 6.4. Eğilme dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim

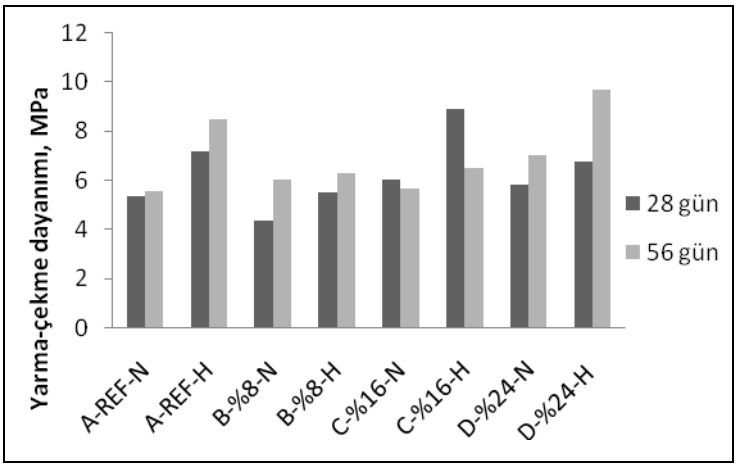
Metakaolin oranı	Eğilme Dayanımı	
	28 günlük	56 günlük
%0	%33,3	%51,6
%8	%27,1	%4,0
%16	%47,8	%14,0
%24	%15,9	%37,6

6.2.3. Yarma-Çekme dayanımı

Metakaolinin puzolanik etkisi yarma-çekme deneyi sonuçları üzerinde belirgin bir şekilde görülmektedir (Tablo 6.5 ve Şekil 6.5). Yarma-çekme dayanımı metakaolin miktarı artışıyla 28 günde bir dereceye kadar artmaktadır, 56 günde ise dayanım artışı oldukça belirgindir.

Tablo 6.5. 28 ve 56 günde uygulanan yarma-çekme deneyi sonuçları (MPa)

Numune tipi	28 gün	56 gün
A-REF-N	11,10	11,58
A-REF-H	12,70	12,93
B-%8-N	11,86	11,21
B-%8-H	13,07	10,94
C-%16-N	10,07	9,29
C-%16-H	10,87	9,13
D-%24-N	10,80	8,03
D-%24-H	10,82	8,99



Şekil 6.5. 28 ve 56 günde uygulanan yarma-çekme deneyi sonuçları

Yarma-çekme deneyi sonuçlarına göre sıcak nem kürünün eğilme dayanımına olumlu etkileri görülmektedir. %8 oranında metakaolin içeren numunelerde bu fark pek belirgin değilken, referans ve %24 oranında metakaolin içeren numunelerde bu artış oldukça belirgindir (Şekil 6.5 ve Tablo 6.6).

Tablo 6.6. Yarma-çekme dayanımında sıcak nem kürü uygulanması ile oluşan bağıl değişim

Metakaolin oranı	Yarma-çekme Dayanımı	
	28 günlük	56 günlük
%0	%14,1	%11,7
%8	%10,2	-%1,7
%16	%7,9	-%2,4
%24	%0,2	%12,0

6.3. Regresyon Analizi

Betonun mekanik özelikleri metakaolin miktarı ve kür koşullarından etkilenmektedir. Doğrusal ilişkilendirmeler kurabilmek adına tüm parametreler ve mekanik özelikler 28 gün ve 56 gün olarak ayrı ayrı düşünülmüştür. Regresyon değerinin %95 seviyesinde güvenilirliğini ölçebilmek için, F testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7. Metakaolin miktarı ve kür koşullarının farklı yaşlardaki mekanik özelikler ile ilişkisinin regresyon analiz sonuçları

		R	F değeri	P(F)
mk miktarı ile 28 gün basınç dayanımı	normal kür	0,823	9,305	0,0927
mk miktarı ile 28 gün basınç dayanımı	sıcak kür	0,0128	0,025	0,887
mk miktarı ile 56 gün basınç dayanımı	normal kür	0,156	0,371	0,604
mk miktarı ile 56 gün basınç dayanımı	sıcak kür	0,366	1,158	0,394
mk miktarı ile 28 gün eğilme dayanımı	normal kür	0,267	0,729	0,483
mk miktarı ile 28 gün eğilme dayanımı	sıcak kür	0,037	0,077	0,807
mk miktarı ile 56 gün eğilme dayanımı	normal kür	0,608	3,106	0,22
mk miktarı ile 56 gün eğilme dayanımı	sıcak kür	0,09	0,202	0,697
mk miktarı ile 28 gün yarma-çekme dayanımı	normal kür	0,219	0,563	0,5313
mk miktarı ile 28 gün yarma-çekme dayanımı	sıcak kür	0,726	5,308	0,148
mk miktarı ile 56 gün yarma-çekme dayanımı	normal kür	0,947	35,729	0,068
mk miktarı ile 56 gün yarma-çekme dayanımı	sıcak kür	0,906	19,219	0,048
kür koşulu ile 28 gün basınç dayanımı		0,381	3,696	0,103
kür koşulu ile 56 gün basınç dayanımı		0,019	0	0,746
kür koşulu ile 28 gün eğilme dayanımı		0,432	4,572	0,0763
kür koşulu ile 56 gün eğilme dayanımı		0,366	3,469	0,111
kür koşulu ile 28 gün yarma-çekme dayanımı		0,219	1,681	0,242
kür koşulu ile 56 gün yarma-çekme dayanımı		0,023	0	0,718

Sonuçlar sadece şu analizlerde anlamlı ilişkiler olduğunu göstermiştir:

1. Standart kür koşulunda metakaolin miktarı – 28 günlük basınç dayanımı
2. Standart kür koşulunda metakaolin miktarı – 56 günlük yarma-çekme dayanımı
3. Sıcak nem kürü koşulunda metakaolin miktarı – 56 günlük yarma-çekme dayanımı

Sonuçların çeşitlilik göstermesine rağmen, metakaolin kullanımının standart kür koşulunda dikkate değer artış sağladığı sonucuna varılabilir. Standart kür koşullarında metakaolin içeren betonların hidrat fazlarının CSH, C_2ASH_8 ve C_4ASH_{13} olduğu bilinmektedir. Diğer yandan 55°C kür koşulunda ileri yaşlarda C_2ASH_8 ve C_4ASH_{13} fazları yerine hidrogarnet oluştuğu bilinmektedir [87]. Metakaolin kullanılmasının süperakışkanlaştırıcı ihtiyacını arttırmasına ve bunun sonucu olarak boşluk yapılanmasının oluşmasını önlemek öncelikle çok önemlidir. Bu nedenle bu tip betonlar büyük bir titizlikle üretilmelidir.

7. SONUÇLAR

Uygulanan deneyler, yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmasına rağmen, metakaolin kullanılması akış yarıçapını azalttığını göstermiştir.

Mekanik deneylerin sonuçları göstermektedir ki, metakaolin miktarı arttıkça 28 günlük ve 56 günlük basınç dayanımları artmaktadır. Benzer sonuçlar eğilme ve yarma-çekme dayanımları için de söz konusudur. Sıcak nem kürü gibi kolay ve kısa sürede uygulanabilir bir kürleme ile betonların dayanımları belirgin olarak artmaktadır. Metakaolin içermeyen betonlarda sıcak nem kürünün etkisi daha belirgin olmaktadır. Metakaolin miktarı arttıkça bu etki azalmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Akçay B. and Taşdemir M. A., Investigation of microstructure properties and early age behaviour of cementitious materials containing metakaolin, *10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*, Vienna, 21-23 September 2015.

[2] Brooks J. J., Johari M. A., Mazloom M., Effect of admixtures on the setting times of high strength concrete., *Cement and Concrete Composites*, 2000, **22**(4), 293-301.

[3] www.fib-international.org, (Ziyaret tarihi: 05 Ocak 2017).

[4] Cassagnabere F., Mouret M., Escadeillas G., Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties, *Cement and Concrete Research*, 2009, **39**, 1164-1173.

[5] Rashad M. A., Metakaolin as a cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview, *Construction and Building Materials*, 2013, **41**, 303-318.

[6] Başpınar E., Karaçayır – Eğlence (Uşak) Kaolen Yataklarının Jeolojik Jeokimyasal özellikleri ve oluşum koşullarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2006, 185520.

[7] Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Alt Maddeler Alt Komisyonu, Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu Cilt I, *T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı,* 2418-ÖİK: 477, 1995.

[8] TS 5396, Kaolin-Seramik sanayiinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

[9] Murray H. H., Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: a general overview, *Applied Clay Science*, 2000, **42**, 102-110.

[10] Prasad M. S., Reid K. J., Murray H. H., Kaolin: Processing, properties and applications., *Applied Clay Science*, 1991, **6**(2), 87-119.

[11] Murray H. H., Overview: clay mineral applications, *Applied Clay Science*, 1991, **5**(5-6), 379-395.

[12] Nkombou C., Njoya A., Njoya D., Grosbois C., Njopwouo D., Yvon J., Kaolin from Mayouom (Western Cameroon): industrial suitability evaluation, *Applied Clay Science*, 2009, **43**, 118-124.

[13] Devlet Planlama Teşkilatı Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu 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, 2001.

[14] Cachim P., Velosa A. L., Rocha F., Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing condition, *Construction and Building Materials*, 2010, **24**, 71-78.

[15] Pavlik V., Uzakova M., Effect of curing conditions on the properties of lime, lime-metakaolin and lime-zeolite mortars, *Construction and Building Materials*, 2016, **102**, 14-25.

[16] Kostuch J. A., Walters G. V., Jones T. R., High performance concrete incorporating metakaolin- a review, *Concrete 2000*, 1993, **2**, 1799-1811.

[17] http://www.mta.gov.tr/v2.0/images/turkiye_maden/maden_yataklari/b_h/kil_kaolen.jpg, (Ziyaret tarihi: 19 Mayıs 2016).

[18] Liu Q., Spears D. A., Liu Q., MAS NMR study of surface-modified calcined kaolin, *Applied Clay Science*, 2001, **19**, 89-94.

[19] Vu D. D., *Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete*, Delft University Press, Netherlands, 2002.

[20] http://goldenmicrochemicals.com/other_minerals.html, (Ziyaret tarihi: 23 Kasım 2016).

[21] Kosmatka S. H., Wilson M. L., *Design and Control of Concrete Mixtures*, 16th edition, Portland Cement Association, USA, 2016.

[22] http://www.advancedcementtechnologies.com/projects, (Ziyaret tarihi: 23 Kasım 2016).

[23] Perlot C., Rougeau P., Dehaudt S., Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete: Application for precast industry., *Cement and Concrete Composites*, 2013, **44**, 50-57.

[24] Bensted J., Barnes, P., *Structure and Performance of Cements*, 2nd edition, Spon Press, New York, 2002.

[25] Pera J., Metakaolin and calcined clays, *Cement and Concrete Composites*, 2001, **23**(6),441-520.

[26] Gruber K. A, Ramlochan T., Boddy A., Hooton R. D., Thomas M. D. A., Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete Composites,* 2001, **23**, 479-484.

[27] Sabir B. B., Wild S., Bai J., Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 2001, **23**, 441-454.

[28] ASTM C618, Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2012.

[29] Jiang G., Rong Z., Sun W., Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio, *Construction and Building Materials*, 2015, **93**, 564-572.

[30] Nicolas R. S., Cyr M., Escadeillas G., Characteristics and applications of flash metakaolins, *Applied Clay Science*, 2013, **83-84**, 253-262.

[31] Badogiannis E., Papadakis V. G., Chaniotakis E., Tsivilis S., Exploitation of poor Greek kaolins: Strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value, *Cement and Concrete Research*, 2004, **34**, 1035-1041.

[32] Poon C. S., Kou S. C., Lam L., Pore size distribution of high performance metakaolin concrete, *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2002, **17**(1), 42-46.

[33] Mindess S., Young F. J., Darwin D., *Concrete*, 2nd edition, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2003.

[34] Velosa A. L., Rocha F., Veiga R., Influence of chemical and mineralogocial composition of metakaolin on mortar characteristics, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2009, **6**(1), 121-126.

[35] Ramezanianpour A. A., Jovein H. B., Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Construction and Building Materials*, 2012, **30**, 470-479.

[36] Wild S., Khatib J. M., Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, 1997, **27**(1), 137-146.

[37] Frias M., Cabrera J., Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 2000, **30**, 561-569.

[38] Oriol M., Pera J., Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment, *Cement and Concrete Research*, 1995, **25**(2), 265-270.

[39] Sfikas I. P., Badogiannis E. G., Trezos K. G., Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin, *Construction and Building Materials*, 2014, **64**, 121-129.

[40] Ahari R. S., Erdem T. K., Ramyar K., Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 2015, **75**, 89-98.

[41] Qian X., Li Z., The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**, 1607-1611.

[42] Madandoust R., Mousavi S. Y., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, *Construction and Building Materials*, 2012, **35**, 752-760.

[43] Brooks J. J., Johari M. A., Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2001, **23**, 495-502.

[44] Batis G., Pantazopoulou P., Tsivilis S., Badogiannis E., The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 2005, **27**, 125-130.

[45] Lagier F., Kurtis K. E., Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 2007, **37**, 1411-1417.

[46] Justice J. M., Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials, Thesis of Master of Science, Georgia Institute of Technology, 2005.

[47] Wild S., Khatib J. M., Roose L. J., Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of portland cement-metakaolin pastes, *Advances in Cement Research*, 1998, **10**(3), 109-119.

[48] Caldarone M. A., Gruber K. A., Burg R. G., High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture, *Concrete International*, 1994, **16**(11), 37-40.

[49] Kinuthia J. M., Wild S., Sabir B. B., Bai J., Self-compensating autogenous shrinkage of portland cement-metakaolin pastes, *Advances in Cement Research*, 2000, **12**(1), 35-43.

[50] Gleize P. J. P., Cyr M., Escadeillas G., Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 2007, **29**, 80-87.

[51] Wild S., Khatib J. M., Jones A., Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticisied metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 1996, **26**(10), 1537-1544.

[52] Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem, X., Degeimbre, R., Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**(9), 1473-1479.

[53] Morsy M. S., Al-Salloum Y. A., Abbas H., Alsayed S. H., Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 2012, **35**, 900-905.

[54] Akçay B., Peker Ö., Şengül C., Taşdemir M. A., Metakaolin içeren betonun kırılma davranışı, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 21-23 Şubat 2013.

[55] Khatib J. M., Hibbert J. J, Selected engineering properties of concrete incorporating metakaolin and slag, *Construction and Building Materials*, 2005, **19**(6), 460-472.

[56] Asbridge A. H., Chadbourn G. A., Page C. L., Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**, 1567-1572.

[57] Ambroise J., Maximilien S., Pera J., Properties of metakaolin blended cements, *Advanced Cement Based Materials*, 1994, **1**, 161-168.

[58] Boddy A., Hooton R. D., Gruber K. A, Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**, 759-765.

[59] Coleman N. J., Metakaolin as a cement extender, Ph. D. Thesis, University of Aston, 1996.

[60] Badogiannis E., Tsivilis S., Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2009, **31**, 128-133.

[61] Amin N., Alam S., Gul S., Effect of thermally activated clay on corrosion and chloride resistivity of cement mortar, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **111**, 155-160.

[62] Khatib J. M., Wild S., Sulphate resistance of metakaolin mortar, *Cement and Concrete Research*, 1998, **28**(1), 83-92.

[63] Aquino W., Lange D. A., Olek J., The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products, *Cement and Concrete Composites*, 2001, **23**, 485-493.

[64] Moser R. D., Jayapalan A. R., Garas V. Y., Kurtis K. E., Assesment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete, *Cement and Concrete Research*, 2010, **40**, 1664-1672.

[65] Ramlochan T., Thomas M., Gruber K. A., The effect of metakaolin on alkali-silika reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 2000, **30**, 399-344.

[66] Roy D. M., Arjunan P., Silsbee M. R., Effect of silica fume, metakaolin, and low calcium fly ash on chemical resistance of concrete, *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**, 1809-1813.

[67] Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B., Cerny R., Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 2011, **25**, 1325-1331.

[68] Khatib J. M., Clay R. M., Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 2004, **34**(1), 19-29.

[69] Khatib J. M., Wild S., Pore size distribution of metakaolin paste, *Cement and Concrete Research*, 1996, **26**, 1545-1553.

[70] Poon C. S., Azhar S., Anson M., Wong Y. L., Performance of metakaolin conrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 2003, **25**, 83-89.

[71] Asbridge A. H., Page C. L., Page M. M., Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 2002, **33**, 1365-1369.

[72] Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C., Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 2013, **44**, 1-6.

[73] Ramezanianpour M. A., Esmaeili K. H., Ghahari, S. A., Ramezanianpour, A. A., Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 2014, **73**, 187-194.

[74] EN 197-1, Cement- Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, *European Norms*, Brussels, 2001.

[75] Lea F. M., Hewlett P. C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition, Butterworth-Heinemann, UK, 1998.

[76] S. Pihlajavaara, Effect of temperature on strength of concrete, *American Concrete Institute Special Publication*, 1972, **34**, 347-434.

[77] Klieger P., Effect of mixing and curing temperature on concrete, *Journal American Concrete Institute*, **54**(6), 1954, 1063-1081.

[78] Verbeck G. J., Helmuth R. H., Structures and physical properties of cement pastes, *5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, 1968, **3**, 1-32.

[79] Rojas F. M., Cabrera J., The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems, *Cement and Concrete Research*, 2002, **32**, 133-138.

[80] Rojas F. M., Cabrera J., Mechanism of hydration of the MK-lime-water system at 60 °C, *Cement and Concrete Research*, 2001, **31**(2), 177-182.

[81] Silva P. S. D., Glasser F. P., Pozzolanic activation of metakaolin, *Advances in Cement Research*, 1992, **4**(16), 167-178.

[82] Rojas M. F., Rojas M. I. S. D., The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK/blended cement matrices at 60°C, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**, 643-649.

[83] Cassagnabere F., Escadeillas G., Mouret M., Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, **23**, 775-784.

[84] Grilo J., Silva A. S., Faria P., Gameiro A., Veiga R., Velosa A., Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions, *Construction and Building Materials*, 2014, **51**, 287-294.

[85] Bohac M., Palou M., Novotny R., Masilko J., Vsiansky D., Stanek T., Investigation on early hydration of ternary Portland cement-blast-furnace slag-metakaolin blends, *Construction and Building Materials*, 2014, **64**, 333-341.

[86] Hwang S., Khatib R., Lee H., Lee S., Khayat K., Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete applications, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, 2012, **57**(3),48-62.

[87] ASTM C127, Standart Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2015.

[88] ASTM C128, Standart Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2015.

[89] ASTM C143, Standart Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2015.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Senel C.**, Ozturk O., Akcay B., Effect of Curing Condition on the Mechanical Properties of Self Compacting Metakaolin Blend Concrete, *12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, 21-23 September 2016.

[2] Akçay B., Taşdemir M. A., **Şenel Ç.**, Arslan G. E., Karma Çelik Lif Donatılı Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Lif Dağılımının İncelenmesi, *Uluslararası Katılımlı 3. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu,* Ankara, 2-3 Nisan 2009.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden, 2009 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini 2017 yılında tamamladı. Delft Teknoloji Üniversitesi "Concrete Microscopy Course 2014" eğitimini başarıyla tamamladı. Sektörde çeşitli iş deneyimlerine sahip olup, 2012 yılında kurmuş olduğu İzotekt Mühendislik ve İnşaat Tic. Ltd. Şti'nde mesleki çalışmalarına devam etmektedir.