

**METAKAOLİN KATKILI TAŞIYICI HAFİF BETONUN
YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Ezgi GÜLTEKİN

**Yüksek Lisans Tezi
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Bahar DEMİREL
EYLÜL-2014**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAKAOLİN KATKILI TAŞIYICI HAFİF BETONUN YÜKSEK SICAKLIK
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi GÜLTEKİN

(111125108)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Ağustos 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Eylül 2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bahar DEMİREL(F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Oğuzhan KELEŞTEMUR (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Sibel SAĞLIYAN (F.Ü)

EYLÜL-2014

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezimle ilgili çalışmalarımın başından sonuna kadar takipçisi olup, bana her konuda yardımcı olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Bahar DEMİREL'e, kıymetli bölüm başkanım Doç. Dr. Fahri ÖZKAN'a, deneysel çalışmalarına değeri ölçülemez katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Erdinç ARICI'ya, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Doç. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR'a, kullanılan kimyasal katkı maddesinin teminini sağlayan DENGİ KİMYA'ya, çimento ihtiyacımızı karşılayan Elazığ Altınova Çimento Sanayi Ticaret A.Ş.'ye, bir şekilde emeği geçmiş tüm arkadaşlarıma, hayatımın tüm güzelliklerini borçlu olduğum; maddi, manevi her konuda sorgusuz destekçim olan anneme, varlığını her yerde yanımda hissettiğim aziz babama, biricik abime ve değerli ablama en derin saygı ve sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Ezgi GÜLTEKİN – Elazığ 2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON	3
2.1. Çimentonun Çevresel Etkileri	5
3. TAŞIYICI HAFİF BETON	7
4. MİNERAL KATKI MADDELERİ.....	10
4.1. Metakaolin.....	11
4.2. Metakaolinin Kimyasal Özellikleri	14
4.3. Metakaolinin Durabilite Özellikleri.....	15
5. BETONDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ.....	19
6. YÜKSEK SICAKLIK ve METAKAOLİNİN BETON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
7.1. Malzemeler	21
7.2. Numunelerin Hazırlanması	22
7.3. Deneyler ve Ölçümler	23
7.3.1. Ultrasonik Ses Hızı	23
7.3.2. Porozite	24
7.3.4. Kılcal Su Emme (Sorptivite)	24
7.3.5. Yüksek Sıcaklık Deneyi	25
7.3.6 Basınç Dayanımı Deneyi	26
7.3.7 Yarmada Çekme Deneyi.....	27
7.3.8. Mikroyapı İncelemeleri	28
8. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	29
8.1. Ultrases Deneyi Sonuçları.....	29
8.2. Porozite Deney Sonuçları.....	30
8.3. Kılcal Su Emme (Sorptivite) Deney Sonuçları.....	31
8.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	32
8.5. Yarmada Çekme Deney Sonuçları.....	34
8.6. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları	35
8.7. Mikroyapı İncelemeleri.....	38
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....	46

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa no

Şekil 4.1 Kil Minerali.....	12
Şekil 4.2 Metakaolin	13
Şekil 7.1 Prothern HLF 150 Laboratuvar Tipi Fırın.....	30
Şekil 7.2 Basınç Dayanım Presi	26
Şekil 7.3 Scanning Electron Microscope	28
Şekil 8.1 Serilerin Ultrases Değerleri.....	29
Şekil 8.2 Serilerin Porozite Değerleri	30
Şekil 8.3 Serilerin k Değeri	31
Şekil 8.4 Serilerin Kür Yaşına Göre Basınç Dayanımları.....	32
Şekil 8.5 Serilerin 28 Günlük Basınç Dayanımları Şekil.....	33
Şekil 8.6 Yarmada Çekme Deney Sonuçları	34
Şekil 8.7 Serilerin Sıcaklık- Basınç Dayanım İlişkisi	35
Şekil 8.8 Serilerin Sıcaklık- Basınç Dayanımı İlişkisi- 2.....	36
Şekil 8.9 20°C’de Serilere Ait SEM Görüntüleri a) M0, b)M5, c)M15, d)M20.....	38
Şekil 8.10 MK katkısının Mikroyapıda Meydana Getirdiği Değişim a) M0 (20°C), b) M15 (20°C)	40
Şekil 8.11 a)20 °C ve b) 800 °C ye maruz kalmış M0 kontrol serisinin SEM görüntüleri.	48
Şekil 8.12 800 °C Sıcaklığa Maruz Kalmış Seriler a) M5, b) M15, c) M20.....	43

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa no

Tablo 2.1 Çimentonun Ana Bileşenleri	5
Tablo 4.1 Çeşitli Literatür Çalışmalarında Kullanılan Metakaolinin Kimyasal Özellikleri	14
Tablo 7.1 Çimento ve Metakaolinin Fiziksel Özellikleri	21
Tablo 7.2 Karışım Miktarları, (kg)	22
Tablo 8.1 Serilerin Basınç Dayanım Kayıpları.....	37

SEMBOLLER LİSTESİ

MK	: Metakaolin
d_{max}	: Maksimum agrega çapı
W/C	: Su/çimento oranı
d	: Suyun yoğunluğu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METAKAOLİN KATKILI TAŞIYICI HAFİF BETONUN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ezgi GÜLTEKİN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Bölümü

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış farklı miktarlarda metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Laboratuvar çalışmalarına başlamadan önce konu ile ilgili yerli ve yabancı literatür taraması yapılarak gerekli dökümanlar sağlanmıştır. Ana matrisi taşıyıcı hafif beton olan farklı metakaolin yüzdelere sahip (% 5, 10, 15 ve 20) 4 seri ve bir kontrol serisi olmak üzere (%0 metakaolin) toplamda 5 farklı seri hazırlanmıştır. 3, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda dayanımdaki değişim incelenmiş, 28 günlük serilerin ise fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık sonrası dayanım kayıpları kaydedilmiştir.

Hazırlanan her seriden belirli sayıda numune, farklı sıcaklıklara (400, 600, 800 ° C) maruz bırakılarak bu işlem sonunda serilerdeki dayanım kayıpları kaydedilmiştir. Sıcaklık sonrası numunelerin içyapısında meydana gelen bozulmalar SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ile görüntülenmiştir. Çalışma sonunda, %15 'e kadar metakaolin katkısının betonun dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Yapılan diğer fiziksel deneylerin (ultrases, porozite, sorptivite gibi) bu sonucu desteklediği görülmüştür. Sıcaklık artışına bağlı olarak tüm serilerde dayanım kaybı gözlenirken, tüm sıcaklık derecelerinde en yüksek dayanımı %15 katkıli seri göstermiştir. Bununla birlikte özellikle 600 ° C sıcaklıkta metakaolin yüzdesi arttıkça serilerin yüksek sıcaklıktan etkilenme oranları azalmıştır. Mikroskop incelemeleri sonucunda yüksek sıcaklık sonrası numunelerin iç yapılarındaki bozulmalar tespit edilerek dayanım değerleri desteklenmiştir.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCED WITH METAKAOLIN UNDER ELEVATED TEMPERATURE

Ezgi GÜLTEKİN

Fırat University

Graduate School of Natural Applied Sciences

Department of Construction Education

In this thesis, the mechanical properties of the lightweight concrete produced with various amounts of metakaolin were investigated.

Before starting the laboratory study, domestic and foreign literature related with the thesis subject was examined. Five different series of lightweight concrete-mixtures were prepared by replacing the cement with metakaolin at proportions of 0, 5,10,15 and 20 % by weight. Then, physical and mechanical changes of the series were determined at the end of the 3,7,28-day curing periods. 3, 7, 28 days curing period of change in strength was examined at the end of the 28-day series in the physical, mechanical and high temperature strength after the losses were recorded.

Taking three specimens one specimen from each set prepared, these specimens have been exposed to various temperatures. (400, 600, 800 ° C After this operation, the losses in mechanical strength of the specimens have been determined. Scanning electron microscope (SEM) has been used to determine the changes from high-heat exposure on each specimen's internal structure. End of the study , 15% up to metakaolin additives have been found to increase the resistance of the concrete. The other physical tests (ultrasound, porosity, such as sorptivit) has been shown to support this conclusion .

Depending on temperature increase strength loss was observed in all series, the highest temperature resistance of all doped series showed 15 %. However, especially at a temperature of 600 ° C higher the percentage of metakaolin series has declined affected by elevated temperatures. Microscopic examination as a result of the deterioration in the internal structure of the sample after high-temperature strength values are determined and are supported.

Keywords: Metakaolin, Elevated Temperature, Structural Lightweight Concrete

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddesinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Beton, sağlamlığı ve çevre koşullarına dayanıklılığı, yangına karşı direnci, kolay şekil alabilmesi ve kolay temin edilmesi ile ekonomik olma özelliklerinden dolayı dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, betonun dayanıklılığını arttırmak amacıyla bilimsel ve teknik çalışmalar yapılmaktadır. Enerji harcanmaksızın elde edilebilen mineral katkıları kullanmak, portland çimentolu betonda üretim enerjisini azaltarak maliyeti düşürmektedir. Bu da inşaat sektöründe mineral katkı kullanımını yaygın hale getirmektedir.

Üretim enerjisinde tasarruf sağlayan, uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu, metakaolin, pomza tozu ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların belirli oranda çimento ile yer değiştirilerek kullanılması her geçen gün daha çok araştırılan bir konu olmaktadır. Çünkü bu mineral katkıların kullanımı; ince taneli olmaları ve puzolanik reaksiyona girmeleri dolayısıyla betonun mekanik özelliklerini geliştirmekle birlikte, daha yeşil ve temiz bir doğa elde etmeyi mümkün kılan büyük bir adımdır .

Metakaolin, yüksek performanslı çimento bazlı malzemelerin üretiminde son yıllarda kullanılmaya başlanan bir mineral katkıdır. Metakaolin, saf kaolin kilinin 500-800 °C arasında pişirilmesiyle elde edilir. Saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması yani kalsine edilmesi ve sonrasında yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır. Beyaz renkli ve amorf yapıya sahiptir. Metakaolinin, betonun birçok özelliğini (basınç ve eğilme dayanımı, geçirgenlik, kimyasal etkiler, rötre, perdahlama vb.) olumlu yönde etkilediği araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir.

Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanır. 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır.

Yapının durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden birisi de yüksek sıcaklıktır. Bu etki, yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir. Betonarme yapı elemanları

yüksek sıcaklığa maruz kaldığında fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişiklikler görülür. Bu değişiklikler, betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde azalma, çatlak oluşumu, parçalanma ve dağılma, çelikte ise akma dayanımı, düktilite ve çekme dayanımında meydana gelen azalmalardır.

Bu tez çalışmasında; yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Hafif agrega ve farklı dozlarda metakaolin kullanılarak hazırlanan taşıyıcı hafif beton numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. 4 farklı metakaolin oranı ile farklı taşıyıcı hafif beton serileri hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi tüm serilerin yarmada çekme ve basınç dayanımları, porozite, ultrases, sorptivite değerleri tespit edilip birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası ise serilerin basınç dayanım kayıpları kaydedilerek sonuçlar elektron mikroskop görüntüleri ile desteklenmiştir.

.

2. BETON

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı maddesini belirli bir oranlarda bir araya getirerek elde edilmiş bir karışımı, istenilen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirerek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen önemli bir kompozit yapı malzemesidir.

Çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin bir araya getirilmesiyle oluşan betonda, çimento ve suyun birleşmesiyle oluşan çimento hamuru bağlayıcılık görevi yapmaktadır. Çimento hamuru başlangıçta plastik bir yapıya sahiptir ve bu iki malzemenin birleştiği andan itibaren aralarında hidratasyon (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar) başlamaktadır. Hidratasyonun devam etmesiyle başlangıçta plastik yapıya sahip olan çimento hamuru giderek plastikliğini kaybetmekte, zamanla katılaşarak sert bir malzeme durumunu almaktadır [1].

Çimentonun, suyun, agreganın ve gerektiğinde katkı maddelerinin birlikte karılması sonucunda elde edilen beton karışımı, şekil verilebilir, plastik bir karışımdır. Ancak çimento ve suyun birleştiği anda başlayan hidratasyon devam ettikçe beton, giderek daha katı bir durum almakta ve bir süre sonra şekil verilemez olmaktadır [2].

Taze betondan beklenen özellikler şunlardır: iyi bir beton taze haldeyken; kolay taşınabilmeli, yerleştirilebilmeli ve sıkıştırılabilmeli ve bu işlemler sırasında agrega taneleri ayrıışmamalıdır. Sertleşmiş halde ise betonun mekanik mukavemeti oldukça yüksek olmalıdır. Bunlarla birlikte hava etkisine, kimyasal etkilere ve aşınma etkisine karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca ekonomik olmalı; malzeme üretim, döküm, kalıplama, bakım masrafları az olmalıdır.

Betonun işlenebilme özelliği, homojenliğini koruması, boşluksuz yerleşme ve kıvam kavramlarını içermektedir. İşlenebilirlik ise, ayrıışmadan yerleştirilip sıkıştırılarak istenilen görünüşe sahip olabilmesidir.

Betonun işlenebilme özelliği ile kıvamın karıştırılmaması gerekir. Kıvam betonun akıcılığı (plastikliği) ile veya kendi ağırlığı altında hareket etme kabiliyeti ile ilgili bir özelliktir. Bu özelliğe en önemli etkiyi su yapmaktadır. Bazı katkıları betona plastikleştirici özellik kazandırır. Akışkanlaştırıcı; çimento hamuru, harç veya betonun veya harcın deformasyona karşı direncini ve kalıplanabilme şartlarını belirleyen özelliğidir.

Sertleşmiş beton ise 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük gibi herhangi bir yaş için hedeflenmiş olan minimum beton dayanımından daha az bir dayanım göstermemelidir.

Betonun zaman içerisinde çevreden maruz kalabileceği etkenler karşısındaki dayanıklılığına durabilite denir. Bu servis süresince çevrede oluşan yıpratıcı etkenler karşısında yeterince dayanıklı olmalıdır. Donma-çözölmeye, ıslanma-kurumaya, ısınma-soğumaya, aşınmaya, asitlere, sülfatlara ve alkali-agrega reaksiyonu gibi kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklılık gösterecek kalitede olmalıdır.

Basınç dayanım, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, tekrarlı yüklere altında yorulma dayanımı, birimle-birim deformasyon ilişkisi, elastiklik modülü, poisson oranı, ısısal genleşme katsayısı, yoğunluk, betonun zaman bağılı olarak göstereceği büzölme (rötre) ve sabit yükler altında sünme, betonda aranılan özelliklerdir [2].

Çimento, kalker ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta pişirildikten sonra öğütölmesinden elde edilen bağlayıcı bir malzemedir. Çimento su ile karıştırılıp bir hamur haline getirildikten bir süre sonra katılaşarak taşlaşmaya başlamasına priz süresi denir. Normal şartlar altında katılaşma 1 ile 10 saat arasında gerçekleşir. Aşırı olmamak koşulu ile artan sıcaklık altında katılaşma hızlanır. Katılaşma ile birlikte “sertleşme” olarak tanımlanan, betonun dayanım kazanma olayı başlar. Dayanım zamanla artar ve çimento hamurunun tam dayanıma ulaşması uzun bir süre alır [4].

Çimentonun sertleşmesi görünüşte fiziksel bir olay olsa da betonda meydana gelen kimyasal reaksiyona hidrasyon denir. Çimentoyu oluşturan bileşik maddelerin her birinin su ile kimyasal olarak reaksiyona girmesine hidrasyon olayı, bu olay sonucu açığa çıkan ısı toplamına da “hidrasyon ısısı” adı verilir.

Beton dökümlerinde ısı yükseldikçe iç sıcaklık artar. Baraj vs. gibi kütle betonu dökümlerinde, dökümden sonra ilerleyen zaman içinde soğuma ile birlikte betonda hacim küçölmesi olur. Ayrıca yüksek ısı ile hava kabarcıkları çıkar. Termik rötre ismi verilen bu olaylar çatlamalara neden olur. Hidrasyon ısısı çimentonun kimyasal yapısı kadar inceliğine, su/çimento oranına da bağılıdır. C₃A, C₃S oranı yüksek portland çimentolarında hidrasyon ısısı da yüksektir.

Portland çimentosu; belli oranlardaki kalkertaşı (CaO) ve kilin (SiO₂ ve Al₂O₃) karıştırılıp pişirilmesinden elde edilen klinkerin alçı taşı ile öğütölmesi sonucu elde edilir. %3-5 oranında alçıtaşı çimentonun sertleşmesini geciktirmek amacıyla ilave edilir [5].

Portland çimentosunun yapısını oluşturan 4 ana bileşen klinkerinkiyle aynıdır ve Tablo 2.1. 'de belirtildiği gibidir.

Tablo 2. 1 Çimentonun Ana Bileşenleri

Ana Bileşenler		Çimento Kimyasındaki Sembolü
Dikalsiyum silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$)	Belit	C_2S
Trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$)	Alit	C_3S
Trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$)	Celit	C_3A
Tetrakalsiyum alüminoferrit ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$)	Felit	C_4AF

Çimentolarda az miktarda MgO ile K_2O ve NaO_2 gibi bazı alkali oksitler bulunabilir. Bu maddeler çok az bir miktarda bulunmasına rağmen bazı hallerde çimentonun kullanılmasını imkânsız hale getirebilirler. Çimentoda ayrıca öğütülmeden önce katılmış olan jipsten dolayı az miktarda SO_3 mevcuttur. Aynı zamanda kil ve kalker karışımında da az miktarda SO_3 bulunabilir. Çimentoda SO_3 miktarı küçük bir değerde olmakla beraber bunun varlığı bazı hallerde çimentonun kullanılmasında önemli zararlar meydana getirebilir [6].

2.1. Çimentonun Çevresel Etkileri

Çimento beton üretiminde kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Cembureau verilerine göre 2006 yılı dünya toplam çimento üretimi 2,5 milyar ton olmuştur ve bu değer 2030 yılında 2,8 milyar tona ulaşılacağı tahmin edilmektedir.

Çimento üretiminin önemli çevresel etkileri bulunmaktadır. Bir ton Portland çimentosu üretimi sonucunda yaklaşık bir ton CO_2 gazı açığa çıkar, bunun yanında zararlı bazı diğer gazlar da atmosfere salıverilmektedir. Çimento üretimine bağlı olarak dünya çapında yıllık yaklaşık 1,4 milyar ton CO_2 üretilmektedir ve bu miktar dünyadaki yıllık CO_2 üretiminin yaklaşık % 7'sini oluşturmaktadır. Bu sera gazı emisyonunun yaklaşık yarısı çimento üretimi sırasında kalkerin pişirilmesi sonucu açığa çıkarken diğer yarısı da üretim enerjisi için fosil yakıtların yakılması sonucu oluşur. Çimento endüstrisi de çimento üretiminin çevreye verdiği zararı azaltmak için çalışmalar yapmaktadır. Ayrıca, betonun ana bileşenlerinden olan çimentonun maliyetinin beton maliyetinde önemli bir yer tuttuğu da bilinmektedir.

Çevreye verilen zararların azaltılması ve çimento maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla daha verimli üretim teknolojileri araştırılmakta ve uygulanmaktadır.

Daha evre dostu ve düşük enerji gerektiren çimentoların gelişmesi, üretim süreçlerinde tasarrufların yapılması, malzemelerin daha verimli kullanımı, yapıların ve kentsel altyapının servis mrlерinin uzatılması, geri kazanım ve çeşitli atık malzemelerin kullanımıyla birlikte imento ve betonun çevreye verdiği zararların azalacağı beklenmektedir. Çimentonun bir kısmının çeşitli mineral malzemelerle yer değiştirilerek katkılı çimentolar üretilmesiyle hem daha ekonomik, hem de daha çevreyle uyumlu beton üretimi gündemdedir.

Günümüzde Portland imentosu pazarda en büyük paya sahip olmasına rağmen katkılı imento üretim ve kullanımının ileri yıllarda daha da artarak devam edeceği tahmin edilmektedir.

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılmakta olan puzolanik malzemelerden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ülkemizde çok miktarda bulunmaktadır. Bunların yanında tras, silis dumanı, metakaolin gibi çeşitli mineral malzemelerin kullanılması da söz konusudur.

3. TAŞIYICI HAFİF BETON

İnşaat mühendisliğinde yaygın kullanım alanı bulan normal beton; çimento, su, agrega ve ihtiyaç duyulduğunda mineral ve kimyasal katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Geleneksel agregalarla üretilen normal betonların taşıyıcı özelliklerinin yüksek olmasına karşılık birim kütlelerinin fazlalığı sebebiyle; yapılar deprem kuvvetlerinden daha fazla etkilenmekte, yüksek yapıların inşasında problem olmakta, düşey taşıyıcı elemanların boyutlarını büyültmekte ve mimari tasarım sorunları ortaya çıkmaktadır. Özellikle temel boyutları ve maliyetini artırmakta hatta pratik hayatta geçilmesi gerekli normale göre büyük açıklıklardaki eğilme etkisindeki elemanlar kendi öz kütlesini bile taşıyamaz hale gelmektedir. Yapıların normal betonlar yerine hafif betonlar ile inşa edilmesi, yapıların zati yükünü azaltmakta ve deprem sırasında yapıların daha az salınıma maruz kalmasını sağlamaktadır. Bu yapılarda deprem sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetleri de azalacağından sarsıntıların bina üzerindeki yıkıcı etkileri zayıflamaktadır [7].

Diğer yandan betonda birim ağırlığın azaltılmasıyla ısı iletkenlik ve ısıl genleşme katsayıları küçülür, yangına dayanıklılık artar. Hafif beton; hazır döşeme, çatı plağı ve duvar paneli gibi prefabrike yapı elemanlarının üretiminde ve yapı zati ağırlığını azalttığından, çok katlı ve büyük açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır.

Hafif beton üretmek için betonun birim ağırlığının azaltılması üç yolla yapılır.

- Normal agregaların yerine boşluklu doğal veya yapay hafif agregaların kullanılmasıyla üretilen hafif agregalı betonlar,
- Fiziksel ve kimyasal yollarla beton içerisinde hava boşlukları üretilerek üretilen gaz ve köpük betonlar,
- Beton içerisindeki ince agreganın çıkarılması suretiyle üretilen boşluklu kumsuz betonlar.

Son yıllarda, süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı ile hafif ve yüksek dayanımlı betonların avantajlarını birleştirmek için yüksek dayanımlı hafif agregalı beton üretimi üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Yüksek dayanımlar, yapay agrega kullanımı ile veya doğal hafif agrega yanı sıra normal agrega kullanılmasıyla elde edilmektedir [8]. Hem yüksek dayanımlı hem de hafif betonlar sunduğu teknik, ekonomik ve çevresel avantajlardan dolayı çok yönlü bir malzemedir.

Etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), $0,8 \text{ gr/cm}^3$ veya daha büyük olup, 2 gr/cm^3 değerini geçmeyen beton türüdür. Hafif betonda kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı hafif agrega olabilir. Taşıyıcı hafif betonlarda kuru birim ağırlığın en fazla $1,9 \text{ gr/cm}^3$, 28 günlük basınç dayanımının da en az 16 N/mm^2 civarında olması istenir. Taşıyıcı hafif beton düşük birim ağırlığı nedeni ile yapı tasarımında daha küçük eleman kesitlerini ve daha uzun açıklıkları mümkün kılar, taşınması kolaydır, kalıp işlerinde de ekonomi sağlar [3].

Taşıyıcı hafif betonların mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

Dinamik etkiler altındaki davranışı: dalga yayılma hızı geleneksel betonunkinden yaklaşık %25 daha düşüktür. Titreşimleri daha az iletir. Şok etkilerini daha iyi absorbe eder. Titreşim sönüm katsayısı daha iyidir [9].

Çekme dayanımı geleneksel betonunki kadardır. Bununla beraber geleneksel betonunkinde olduğu gibi, bu dayanım da önemli derecede değişim göstermekte ve kuru atmosferde çok küçük değerler almaktadır [10].

Hafif betonları üretmek için en sık başvurulan yöntem hafif agregalarla beton üretmektir. Hafif agregalar, doğal kaynaklardan veya suni yollardan elde edilebilirler. Doğal kaynaklardan elde edilen hafif agregalar başlıca volkanik kökenli olup, suni agregalar ise bazı ısıtma işlemlerinin sonucunda elde edilmektedir [11]. TS 1114 [12]. 'te hafif agregalar, tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 veya gevşek yığın yoğunluğu 1200 kg/m^3 'ü aşmayan mineral kökenli agregalar olarak tanımlanmaktadır. Agregalar betonun hacimsel olarak %60~75'ni, ağırlık olarak %70~85'ni oluşturmalarından dolayı agregaların beton içerisinde rolünün çok büyüktür ve betonda kullanılacak agregaların yapısı, granülometrisi, sertliği betonu doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle agregaların betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Hafif agregalar, hücreli gözenekli yapısından dolayı düşük tane yoğunluğuna sahiptirler. Agregaların hücreli boşluklu yapısı, genellikle ısıtma sırasında 18 piroklastik kütlelerden genişlemeye sebep olan gaz salınımı ile oluşur. Dayanımı ve dayanıklılığı yüksek hafif agregalar; 5-300 μm boyut aralığı boyut aralığına sahip homojen olarak dağılmış boşluklar içerirler, nispeten çatlaksız ve yüksek mukavemetli camı faza sahiptirler [13]. Hafif yapı malzemesi ile yapılarda hafif beton kullanımı, ısı ve ses yalıtımının yanı sıra birim ağırlıklarının normal betona nazaran daha az olmasından dolayı birçok avantajlar sağlamaktadır. Ancak, hafif

yapı elemanı üretmek için gerekli olan genleştirilmiş kil ve genleştirilmiş şist gibi bazı yapay hafif agregaların kullanımı ülkemizde henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır. Bu nedenle ülkemizde bol miktarda bulunan doğal hafif agregaların değerlendirilmesi gündeme gelmiş ve pomza, perlit, volkanik tuf ve volkanik cüruf gibi malzemeler yaygın kullanım alanı bulmuştur. Su emme bakımından yeterli tedbirler alındığında, bu hafif agregalarla yalıtım betonlarının üretilmesi ve bunların taşıyıcı hafif beton olarak kullanılabilmesi mümkün olabilmektedir [14].

4. MİNERAL KATKI MADDELERİ

Günümüzde beton üretiminde çeşitli mineral katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu mineral katkı malzemeleri ile hem daha ekonomik, hem de çevreyle uyumlu beton üretilmektedir. Çevreye verilen zararların azaltılması ve çimento maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla daha verimli üretim teknolojileri araştırılmakta ve uygulanmaktadır.

İnce taneli mineral katkılar, betonun işlenebilmesini dayanımını, dayanıklılığını ve ekonomikliğini arttırmak amacı ile kullanılmaktadır. Beton yapımında genellikle kullanılan mineral katkılar uçucu kül, silis dumanı, tras granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi puzolanik özellikli maddelerdir. Puzolanik malzemelerin dışında taşınu gibi puzolanik özellik taşımayan ince taneli malzemeler de beton katkı maddesi olarak kullanılabilir.

Daha çevre dostu ve düşük enerji gerektiren çimentoların gelişmesi, üretim süreçlerinde tasarrufların yapılması, malzemelerin daha verimli kullanımı, yapıların ve kentsel altyapının servis ömürlerinin uzatılması, geri kazanım ve çeşitli atık malzemelerin kullanımıyla birlikte çimento ve betonun çevreye verdiği zararların azalacağı beklenmektedir.

Çimentonun bir kısmının çeşitli mineral malzemelerle yer değiştirilerek katkı çimentolar üretilmesiyle hem daha ekonomik hem de çevreyle daha uyumlu beton üretimi gündemdedir. Çimento ve beton endüstrisinde kullanılmakta olan puzolanik malzemelerden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ülkemizde çok miktarda bulunmaktadır. Bunların yanında tras, silis dumanı, metakaolin gibi çeşitli mineral malzemelerin de kullanılması söz konusudur.

Özellikle puzolanik özellik gösteren mineral katkılar tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar. Ancak çimento ile birlikte kullanıldıklarında çimentoyla benzer görev yaparlar ve dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Bu mineral katkı maddeleri, çimentonun kimyasal reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği olan C-S-H jeli oluşumunu sağlarlar. Mineral katkı malzemeleri, işlenebilirlik, mukavemet, durabilite gibi birçok taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirebilmektedir.

Üstün mekanik özelliklere ve yüksek durabiliteye sahip yüksek performanslı beton elde edebilmek için puzolanik malzemelerin kullanılması etkili yöntemlerden bir tanesidir.

Çimentonun bir bölümünün bu malzemelerle yer değiştirilmesi taze ve sertleşmiş haldeki beton özelliklerini iyileştirirken çimento miktarında azalma sağlayabildiği için beton maliyetini de düşürebilir. Kullanılan puzolanik malzemenin kimyasal yapısı, tane boyut dağılımı, inceliği ve puzolanik aktivitesi beton özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir.

Puzolanlar; kendi başına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir.

Puzolanik aktivite kavramı ise bir puzolanın bağlayabileceği en fazla Ca(OH)_2 miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir. Bahsedilen her iki değişken de puzolanın özelliklerine ve içerisinde buluna aktif fazların kalite ve miktarına bağlıdır. Genel olarak puzolanların heterojen yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir. Bununla beraber, bu hususta ancak genel eğilimler açıklanabilir. Bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir [5].

1. Diğer özellikler aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir.
2. Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına, bu mukabil uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve minerolojik kompozisyonuna bağlıdır.
3. Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
4. Belirli sınırlar dahilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması Ca(OH)_2 bağlanmasını artırır.
5. Puzolan kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır.

4.1. Metakaolin

Yaptığımız tez çalışmasında puzolanik katkı olarak metakaolin kullanılmıştır. Kaolinit bir kil mineralidir. Kaolinitin kalsine edilmesiyle metakaolin elde edilir. Şekil 6.1’ de Kaolinit mineraline ait çeşitli resimler görülmektedir.

Metakaolinin partikül ebatı çimento partiküllerinden çok daha küçüktür, fakat silis dumanı kadar da ince değildir.



Şekil 4.1 Kil Minerali

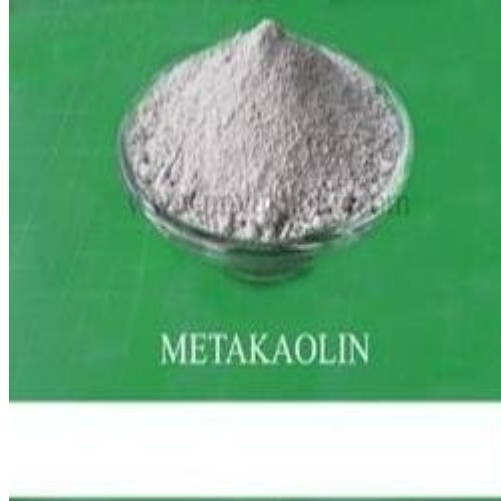
Kaolinit, katmanlı bir silikat mineralidir. SiO_2 ve Al_2O_3 tabakaları arası 7,13 Angstrom'dur. Kaolinit ısıtıldığında, katmanlar arasındaki su buharlaşır ve kaolinit, çimentoyla reaksiyon için aktive edilmiş olur.

Kaolin; feldspat ve kil minerallerin doğal olarak ayrıştırılması sonucunda meydana gelen, yumuşak ve beyaz, kilsli bir malzemedir. Tabiatta sıklıkla karşılaşılan bu madde genellikle kâğıt ve tekstil imalatlarında ve seramik üretiminde kullanılır. Seramik sanayinin hızlı gelişmesinden dolayı kaolin jeolojisi konusunda yapılan çalışmalar, Türkiye kaolinlerinin büyük ölçüde volkanik kayalara bağlı olduğunu göstermiştir [20]. Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) olup alüminyum hidro silikat bileşimli bir kil mineralidir. Kaolin terimi altında çeşitli jenetik modellerle oluşmuş kaolin türleri ve kaolinitik killeri yer almaktadır [15].

Metakaolin, yüksek performanslı çimento bazlı malzemelerin üretiminde son yıllarda kullanılmaya başlanan bir mineral katkıdır. Saf kaolin kilinin 500-800 °C arasında pişirilmesiyle elde edilir. Metakaolinin, betonun birçok özelliğini (basınç ve eğilme dayanımı, geçirgenlik, kimyasal etkiler, rötre, perdahlama vb.) olumlu yönde etkilediği araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir [6].

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması ve sonrasında yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır [16].

Şekil 4.2’ de kilin kalsine edilmesi ile elde edilen metakaoline ait bir resim görülmektedir.



Şekil 4.2 Metakaolin

Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı 1960’lı yıllara dayanır. 1990’lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır [17]. Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen metakaolin, beyaz renkli, amorf yapılı bir alümina silikattır. 100–200 °C civarında kil mineralleri absorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–800 °C aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun %14’ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür [6]. Kaolinit mineralinin 500 – 600°C arasında değişimi ile (faz değişikliği) metakaolin oluşmaktadır. Bazı araştırmacılara göre bu sıcaklık 600 °C’nin üstündedir. Ve 600 °C ile 850 °C arasında kalsine edilen kaolin, “metakaloin” denilen amorf bir safhaya dönüşür. Aktive edilmiş ve yarı-kararlı hale gelen Metakaolin, artık çimento ve kireç ile reaksiyona girebilir. 900°C üzerinde ise kimyasal içeriği tartışmalı spinel fazı ve mülit oluşmaktadır. Mülit, puzolanik özelliğe sahip değildir. Literatüre göre ise 1100°C ve 1200°C arasında kristobalit kristalleşmeye başlamaktadır [18]. Metakaolin kalsiyum hidroksiti çok hızlı bir şekilde tüketir. Bu yüzden 1980’lerde metakaolinin çimento matrislerinde kullanılarak cam elyaf ve lifle takviye edilmiş bileşikler oluşturmaya yönelik birçok araştırma yapılmıştır. [19]. 1990’larda ise metakaolinin betonda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu esnada yapılan araştırmalar sonucunda betonun birçok özelliğin iyileştiği gözlemlenmiştir.

4.2. Metakaolinin Kimyasal Özellikleri

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra bir miktarda demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. Puzolanik malzemelerin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için yeterli miktarda silis, alümin ve demiroksit içermesi ve aynı zamanda amorf yapıya sahip olması gerekmektedir [2].

Kil mineralinden elde edilen metakaolinlerin kimyasal yapıları incelendiğinde, puzolanik özellik gösterebilmesi için yeteri kadar silis ve alümin içerdiği görülmektedir. Ancak toplam alkali miktarı biraz yüksektir.

Yapılmış olan 4 farklı çalışmada kullanılan metakaolinlere ait kimyasal özellikleri Tablo 4.1’de verilmektedir [20].

Tablo 4. 1 Çeşitli Literatür Çalışmalarında Kullanılan Metakaolinin Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	Çalışma I	Çalışma II	Çalışma III	Çalışma IV
SiO ₂	58.10	52.10	51.52	62.92-70.96
Al ₂ O ₃	35.14	41.00	40.18	18.25-20.84
Fe ₂ O ₃	1.21	4.32	1.23	1.437-3,694
CaO	1.15	0.07	2.00	0.174-1.490
MgO	0.20	0.19	0.18	0.817-1.149
SO ₃	0.03	-	-	0.568-1.878
Na ₂ O	1.07	0.26	0.08	0.39-1.57
K ₂ O	1.05	0.63	0.53	2.218-4.461

Metakaolinin kireç ve çimentoyla tepkimeye girmesinde aşağıdaki kalite kriterleri önem kazanır:

Metakaolinin bağlayabileceği kireç miktarı :

Bu genelde, Fransız standartlarında (NFP 18-513, Annexe A) açıklandığı üzere modifiye edilmiş Chapelle testiyle yapılır.

Sönmüş kirecin reaksiyona alınma hızı :

Tepkinirlik (tepkime verme), tepkimeye eğilimli yüzeye ve kimyasal bileşime bağlıdır. Saf metakaolin yaklaşık %44 Alüminyum içerir. Yüzey genellikle “BET” metoduyla ölçülür.

Harç ve betonun mekanik özellikleri:

Harcın veya betonun tatbiki açısından mekanik değerler önemlidir. Metakaolin, daha erken dayanıklılığa ve daha yoğun çimentolu matrise yol açar.

Renk:

Metakaolinin rengi, sonuçta ortaya çıkacak ürünün rengini de belirler. Kullanılan puzolan ne kadar açık renk olursa, sonuçta üretilen beton ya da harç da o kadar açık renkli olur.

Çimento ve metakaolinin arasındaki sinerji, başka bir deyişle iki malzemenin birlikte yarattığı etki, ilk günlerde boşluk çapının 10' da 1'e düşmesine neden olur. Bu bahsedilen düşüşün olması, çimentonun metakaolinle % 20'ye kadar yer değiştirmesi ile ve çoğu portlanditin oluşumunda kullanılmış yaklaşık % 27 kadar suyun bulunması şartı ile geçerlidir. İşte bu portlandit ilave CSH ve CSAH oluşturmak için reaksiyona girecektir. % 20 metakaolin serbest kireci bağlayacak, fakat aşırı su varsa kurumadan sonra çok sayıda büyük hava boşlukları oluşacaktır. Bu safhaların geçilmesiyle, boşluklar, ilave bağlayıcı maddeyle doldurulacaktır. Boşluk çapındaki azalma dolayısıyla, su alımı azalmış olacaktır. Toplam boşluk hacmi su/bağlayıcı oranına bağlıdır. Yüksek porozite durumunda metakaolinin getirdiği avantaj azalacaktır. Metakaolinin ortaya çıkardığı genel boşluk büyüklüğündeki düşüş, daha fazla dayanıklılık, daha yüksek yoğunluk ve daha fazla asit dayanımına yol açacaktır.

4.3. Metakaolinin Durabilite Özellikleri

Durabilite, betonun, arzu edilen mühendislik özelliklerini sergilemeye devam ederken, hava şartlarına, kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı göstermiş olduğu direnme yeteneğidir.

Daha yoğun bağlayıcı matris ve azaltılmış kimyasal ve fiziksel bozulma sebebiyle, çimentolu sistemlerin “durabilitesi” büyük ölçüde artmıştır. Bir mühendis, uygulamaya bağlı olarak değişmesi beklenen çevre şartlarının maruz bırakacağı su, tuzlu su ve benzeri parametreleri hesaba katarak, farklı durabilite derecelerinde ve özelliklerde beton dizayn etmek zorundadır. Metakaolin ile betonun durabilitesi geliştirilebilir. Böylelikle betonun kullanım ömrü artırılır. Çünkü TS EN 206 da tanımlanmış olan maruz kalacağı dış etkilere karşı dayanıklılığı artmış olur [21].

Çimentonun parçacık yapısının işin içine girmesiyle yüzeylerin boşlukluluk durumundaki artış sebebiyle, suda çözünen portlandit yüzeye doğru hareket eder ve orada birikme eğilimi gösterir. Bu birikme, CSH bağlayıcısı ve yüzey arasındaki temas bölgesini azaltır. Portlandit çözünmeye meyilli olduğu için, harç tarafından su Emilimi, bağlayıcı ve alt tabaka arasındaki yapışmayı azaltacaktır. Portlandit'i CSH bağlayıcısına dönüştürmek, temas kuşağını ve harcın uygulandığı yüzeydeki yapışmayı arttıracaktır. Bu durum özellikle optimum su kullanıldığı durumlar için doğrudur [22].

Metakaolin içeren daha yüksek emişli yüzey, çimentonun reaksiyona girmesini sağlayacak bir şekilde, daha fazla miktarda su emecek ve depolayacaktır. Çok kuru karışımlarda, vibrasyondan geçirilmiş prekast taşlar gibi, bu su tümüyle reaksiyona girmiş çimento payını arttıracaktır ve bu da daha yüksek mekanik mukavemete yol açacaktır. İyi işlenebilirlik elde edebilmek için, bir miktar akışkanlaştırıcı ve su azaltıcı eklenmesi gerekli olabilir. İyi su tutuculuk sebebiyle, betonun terleme (kusma) eğilimi azaltılmış ya da engellenmiş olur.

Metakaolin partikülleri küçük plakalardır ve karışıma dayanıklılık verirler. Fakat kesme kuvvetleri altında, metakaolin plakalarının paralel sıralanmasıyla, karışım akışkan hale gelecektir. Standart proseslerin yanı sıra, ayrıca sprey harçlara içsel bir dayanıklılık verecektir ki yüksek kohezyon ile anında yerine oturma elde edilebilir.

Beton teknolojisinde ASR indirgenimi zorlu bir mücadele halini almış durumdadır. Günümüzde gerek yüksek alkali içeren çimentonun gerekse alkali reaktif agregaların kullanılması ile betonda birçok hasara rastlanmaktadır. Uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve metakaolin gibi puzolanik katkıların kullanılması alkali silikat reaksiyonunu farklı boyutlara indirger. Bu muhtemelen bir yandan daha düşük difüzyon katsayısı, diğer yandan da boşluk çözeltisindeki hidroksil konsantrasyonunun azalmasından dolayıdır.

Metakaolin kullanımı çimento esaslı ürünlerin sülfat direncini de artırır. Betona yapılacak %15'e kadar bir metakaolin katkısı, betonun, sodyum sülfat çözeltisi içinde sülfat direncini arttıracaktır. Sülfat içeren sular içinde yapılan denemeler aynı etkiyi göstermiştir. Bu muhtemelen boşluk çözeltisi içindeki kalsiyum hidroksit'de ki azalım ve genleşen etrenjit oluşumundaki azalım sebebiyledir.

Çiçeklenme, çimento hidratasyonu esnasında kalsiyum hidroksit açığa çıkması ve onun fazlalık suyun buharlaşması hasebiyle yüzeye doğru hareket etmesi ile meydana gelir.

Portlanditi bağlayıcıya dönüştürmek için yeterli metakaolin kullanılması ile (yaklaşık %20 çimento yer değişimi) çiçeklenme kısmen indirgenebilir. Bunun sebebi portlanditin metakaolinle yavaş tepkimeye girmesidir.

Betonarmedeki donatı, hidratasyona uğramış çimentonun yüksek akışkanlığı ile korunmaktadırlar. Klorür, beton yıkımının ilk adımında çeliğe saldırır. Klorür iyon difüzyonu, harç ve betondaki mevcut suya bağlıdır. Mevcut su miktarı, boşluk hacmine ve betonun bulunduğu çevreye bağlıdır. Metakaolinin boşluk çapını azaltmasından dolayı betona zararlı madde içeren sıvı ya da su girişi azalmış olur. Böylece klor difüzyonu da azalmış olur. Metakaolin ile boşluk çapındaki düşüş gerçeği göz önünde tutulursa, difüzyonuna ket vurulmuş olunur ve klorür difüzyonu azaltılmış olur. O yüzden metakaolin kullanılması, deniz suyuna maruz kalacak yerlerde inşa edilecek beton yapılar için büyük önem arz eder.

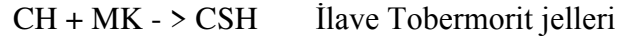
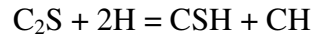
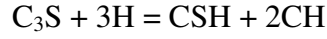
Boşluklardaki suyun kristalize olmasıyla harç ve betondaki yıkım, çimento matrisine dahil olmuş su miktarına bağlıdır. Metakaolin kullanılmasıyla elde edilen daha küçük boşluk ile su alımı indirgenebilir. Metakaolin kullanılan betonlar, eğer düşük w/b oranları kullanılmışsa, arttırılmış bir donma-çözülme dayanımı sergilerler. Suda çözünmüş asitler, hidratasyona uğramış ve uğramamış çimento bileşenlerini yok ederek betona saldırır. Kolay çözünür kalsiyum hidroksitin daha kararlı CSH veya CSAH fazlarına dönüşmesi sebebiyle, özellikle düşük w/b oranına sahip betonlarda metakaolin kullanıldığında asitlerin betona saldırma olasılığı daha düşük olur.

Portland çimentolu beton genellikle güçlü asitlere karşı iyi bir dayanıma sahip değildir. Metakaolin, beton yapısını daha etkili korur çünkü kürlleme safhasında küçük gözenek büyüklüğüne ulaşılır. Portland çimentosu üretiminde, her 1 ton çimentoya karşılık 1 ton CO₂ üretilir. Portland çimentosuna metakaolin eklenmesi, saf çimento bağlayıcılarıyla ilişkili olarak açığa çıkan nihai CO₂ miktarında azalma sağlayacaktır. Son yıllarda ortaya çıkan çevresel endişelerden dolayı, daha çevre dostu çimentolar, öğütülmüş cüruf, uçucu kül veya diğer minerallerin eklenmesiyle üretilebilmektedir. Bu yeni çimentolar CEM I'dan daha yavaş reaksiyona girerler. Metakaolin de CO₂ çıktısını azaltan ve prizi hızlandıran mineral katkılardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Metakaolinin ince partikül büyüklüğü nedeniyle, aynı hacimli çimentoya göre yüzey alanı artacak böylelikle daha fazla ve hızlı bir reaksiyon meydana gelecektir. Pozolanik tepkime ayrıca daha fazla CSH oluşturacak ve daha erken bir dayanıklılık gelişimi meydana gelecektir. Bu, özellikle kompozit çimentolarda meydana gelen bir olaydır.

Portland çimentosu, yaklaşık %80 oranında kalsiyum silikat içerir: alit (C_3S) ve belit (C_2S) su ile tepkimeye girince aşağıdaki reaksiyonlar oluşur. Son yapı yaklaşık %75 kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve %25 sönmüş kireç (CH) içerir.

Sönmüş kireç (CH), ayrıca kalsiyum hidroksit ya da Portlandit olarak adlandırılır. Sönmüş kireç, pozolan ile tepkimeye girerek daha fazla CSH oluşturur.



5. BETONDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir [2]. Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir[23]. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir [24].

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır [25].

Bir yapı malzemesi olarak betondan öncelikli olarak beklenen, zamanla ve değişen koşullarla birlikte, mekanik özelliklerini ve buna bağlı olarak dayanımını kaybetmemesidir.

Yapının durabilite (dayanıklılık) problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden birisi yüksek sıcaklıktır. Bu etki, yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir [26]. Betonarme yapı elemanları yüksek sıcaklığa maruz kaldığında fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişiklikler görülür. Bu değişiklikler, betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde azalma, çatlak oluşumu, parçalanma ve dağılma, çelikte ise akma dayanımı, düktilite ve çekme dayanımında meydana gelen azalmalardır.

Sıcaklık artışıyla birlikte öncelikle betonun kılcal boşluklarında bulunan serbest su kaybolur. Daha sonra bunu jel boşluklarında bulunan absorbe olmuş su ve hidrasyon ürünlerinin içindeki kimyasal bağ suyu izler. Bunun yanında agregada çeşitli fiziksel ve kimyasal dönüşümler yaşanır. Ayrıca çimento hamurunu ve agregayı birbirine bağlayan ara yüzey de bir takım değişimler görülür. Tüm bu olaylar sonucunda betonun dayanımında ve durabilitesinde azalmalar meydana gelir [27].

6. YÜKSEK SICAKLIK ve METAKAOLİNİN BETON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürdeki bütün çalışmalarda betona metakaolin takviyesinin, betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki değişimleri farklı boyutlarda incelenmiştir.

Morsy vd [28], bir çalışmada belli oranlarda metakaolin katkısı kullandığı beton numunelerini yüksek sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra basınç ve eğilme deneylerine tabi tutup gözlenen değişiklikleri kaydetmişlerdir. Sonuçta metakaolin için optimum değer %15 civarında olduğunu vurgulamışlardır.

Literatürde yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkilerini araştıran M.A. Taşdemir vd[19], kaolinit kilinin 200°C’de ısıtıldığında fiziksel bağlı suyunu kaybedip, 500-600°C ısıtmada ise kimyasal bağlı suyunu kaybederek MK’e, 1000°C ısıtmada ise mullit ve kristobalite dönüştüğünden bahsetmektedirler.

Caldarone vd. [29], su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.40 olan %5 ve %10 MK içeren betonların benzer miktarlarda silis dumanı içeren karışımlardan ortalama %10 daha fazla basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Bir yıl sonunda en yüksek dayanımı %5 MK içeren seriler vermiştir. Daha sonra %10 MK, %10 silis dumanı ve %5 silis dumanı içeren örnekler izlemiştir.

Qian ve Li [30], %0, 5, 10, 15 MK içeren betonlarda MK miktarı arttıkça çekme ve eğilme dayanımlarının arttığını belirlemiştir. %15 MK yer değiştirmesinde çekme dayanımı kontrol betonuna göre %28 artmıştır. Diğer taraftan Courard vd. [31], %5–20 aralığında çimento ile MK yer değiştirerek ürettikleri harçların 3. günde eğilme dayanımlarının kontrol örneklerinden daha düşük değerler verdiğini, 7. günde benzer değerler, 14, ve 28. günde daha yüksek değerler verdiğini belirtmiştir. Güneyisi vd. [32] MK miktarı artıkça su/bağlayıcı oranları 0.35 ve 0.55 olan betonların yarma çekme dayanımlarının arttığını bulmuştur.

Yapılan literatür çalışması sonucunda metakaolin katkılı betonların yüksek sıcaklık altındaki davranışlarının incelenmesine yönelik çeşitli çalışmalar olmasına karşın, hafif agrega kullanımına yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapmış olduğumuz bu tez çalışması ile MK ilaveli, taşıyıcı hafif betonların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki davranışları incelenerek literatürdeki bu eksikliğe katkı sağlamak amaçlanmıştır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışma, 800 °C' ye ulaşan yüksek sıcaklıklarda, metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonların dayanım performanslarını değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Bir adet kontrol ve 4 adet metakaolin (MK) katkılı taşıyıcı hafif beton serisi hazırlanmıştır. MK sırasıyla %5, %10, %15, %20 oranlarında ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek karışımlara ilave edilmiştir. Yüksek sıcaklığa bağlı değişimleri gözlemleyebilmek için 20 , 400 , 600 ve 800 °C sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Her seri için yarmada çekme dayanımları, porozite, ultrases, sorptivity değerleri belirlenerek birbirleri ile kıyaslanmıştır. Her seri için yüksek sıcaklık sonrası kalan dayanımlar belirlenmiştir. Sıcaklık sonrası mikroyapı değişimleri elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

7.1. Malzemeler

Ana bağlayıcı olarak Elazığ çimento fabrikasından temin edilen ve TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 N portland çimento kullanılmıştır.

Mineral katkı olarak Denge Kimya Ltd Şti'den temin edilen Metakaolin, belli oranlarda çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çimento ve metakaolinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 7.1' de verilmiştir.

Tablo 7. 1 Çimento ve Metakaolinin Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	CEM I 42,5 N	Metakaolin
S(SiO ₂)	21.12	52-54
A(Al ₂ O ₃)	5.62	41-44
F(Fe ₂ O ₃)	3.24	<1,5
CaO	62.94	<0,5
MgO	2.73	<0,4
SO ₃	2.30	-
Na ₂ O	-	<0,1
K ₂ O	-	<2
TiO ₂	-	<1
Fiziksel Özellikler		
Yoğunluk(g/cm ³)	3,15	2,6
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3379 (Blaine)	22000

Çalışmada ince agrega olarak, Elazığ ili pomza yataklarından temin edilen bazik karakterli pomza agregası, iri agrega olarak ise yine aynı yöreden temin edilen doğal dere agregası kullanılmıştır. Çalışmada $d_{max} = 8$ mm olarak belirlenmiştir.

7.2. Numunelerin Hazırlanması

Metakaolinin betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için 5 seri beton numunesi hazırlandı. Numuneler hazırlanırken dozaj 400 kg/m^3 olarak sabit alınmıştır. Kontrol karışımı metakaolinsiz olmak üzere, sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek metakaolin eklendi. Her seri için karışıma giren malzemeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Su+ çimento+ ince agrega (pomza) + iri agrega (dere agregası) (M0)
2. Su+ çimento+ ince agrega + iri agrega+ metakaolin (%5) (M5)
3. Su+ çimento+ ince agrega+ iri agrega+ metakaolin (%10) (M10)
4. Su+ çimento+ ince agrega+ iri agrega+ metakaolin (%15) (M15)
5. Su+ çimento+ ince agrega+ iri agrega+ metakaolin (%20) (M20)

Her serinin 1 m^3 'ü için kullanılan yaklaşık karışım miktarları Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7. 2 Karışım Miktarları, (kg)

Seriler	Su	Çimento	Metakaolin	İnce Agrega (0-4mm)	İri Agrega (4-8mm)
M0	190	400	-	493	285
M5	190	380	20	493	285
M10	190	360	40	493	285
M15	190	340	60	493	285
M20	190	320	80	493	285

Ölçüsü belirlenmiş olan su miktarının bir kısmı ile ince agrega, karışıma dahil edilmeden önce ıslatılarak, karışım esnasında ince agreganın hızlıca karışım suyunu emmesi engellenmiş oldu.

Döküm için boyutu 100 mm olan küp kalıplar kullanıldı. Dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler su sıcaklığı 23 ± 1 °C olan kür tankına yerleştirilerek deney zamanına kadar bekletildi. 3, 7, 28 günlük kür süreleri sonunda numuneler tanktan çıkarıldı.

7.3. Deneyler ve Ölçümler

7.3.1. Ultrasonik Ses Hızı

Ultrasonik test cihazının kullanılması ile herhangi bir beton bloğunun bir yüzüne ultrasonik puls (nabız atışı gibi ritmik sesüstü vuruşlar) uygulanarak, betonun içerisinde basınç dalgaları yaratılmaktadır. Betonun içerisinde ilerleyen ses üstü dalgalar, beton bloğunun bir başka yüzeyinden geri alınmaktadır (kaydedilmektedir). Ultrasonik test cihazı, sesüstü dalga'nın, betona gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki bir mesafeyi ne kadar zaman süresinde geçtiğini ölçmektedir.

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen sesüstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan sesüstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir.

Beton bloğun bir yüzeyinden içeriye gönderilen sesüstü dalga'nın, bloktaki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı formül (7.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$V = (S/t) 10^6 \quad (7.1)$$

Burada ,

V = Sesüstü dalga hızı, (metre/saniye)

S = Beton bloğun sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalga'nın alındığı yüzey arasındaki mesafe, (metre)

t = Sesüstü dalga'nın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman, (mikrosaniye)

28 günlük kür süresini tamamlayan numuneler, sabit ağırlığa gelene kadar etüvde kurutulduktan sonra ultrases hızlarının tayin edilmesi için deneye tabi tutulmuştur.

Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde yüzeydeki pürüzleri doldurmak amacı ile numunelerin yan yüzlerine vazelin sürülmüş, ses dalgası gönderen ve alan iki aparat numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş ve ses geçiş süreleri okunmuştur. Bu şekilde deney için hazırlanan tüm numunelerin 4 yan yüzeyinden karşılıklı olarak 2 okuma gerçekleştirilerek ortalama değer kaydedilmiştir.

7.3.2. Porozite

Beton tarafından, içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekilmesi işlemine “su emme” denilmektedir. Sertleşmiş betonun su emme işleminde, önce büyük boyutlu kapiler boşluklar ve daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar suyla dolu duruma gelmektedirler. O nedenle, betondaki su emme ilk zamanlarda büyük bir hızla, zaman ilerledikçe ise, giderek daha düşük bir hızla yer almaktadır [2].

28 günlük kür süresi sonunda tüm serilerin gerekli ağırlık ölçümleri yapılmış, sonuçlar (7.2) nolu formülde ilgili yerlere yazılarak her serinin porozite değerleri tespit edilmiştir.

$$P = \frac{W_{dyk} - W_{kuru}}{W_{dyk} - W_{sualtı}} \times 100 \quad (7.2)$$

Burada,

W_{dyk} = Numunenin doymuş yüzey kuru ağırlığı, (kg)

W_{kuru} = Numunenin etüv kurusu ağırlığı, (kg)

$W_{sualtı}$ = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg) [33-35].

7.3.4. Kılcal Su Emme (Sorptivite)

Kılcal boşluklara sahip bir yapı malzemesi olan betonun emdiği su miktarı, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir. Bu sebeple betonun emdiği su miktarını tayin etmek oldukça önemli bir husus olup, bu miktar, kılcal su emme deneyi ile bulunabilmektedir.

Deney için hazırlanan beton numunelerin yan yüzeyleri, su girişini engellemek için parafin ile kaplandı. Daha sonra alt yüzeyleri 5 mm suya temas edecek şekilde yerleştirildi. Daha sonra, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440. dakikalarda numunelerin ağırlıkları kaydedilerek absorbe edilen su miktarı bulundu. Elde edilen sonuçlar (7.3) nolu formülde yerine konularak sorptivite katsayısı tespit edildi.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (7.3)$$

Burada,

Q = emilen su miktarı, (cm^3)

A = suya maruz kalan yüzey alanı, (cm^2)

t = zaman, saniye

k = sorptivite katsayısı, ($\text{cm}/\sqrt{\text{sn}}$)

7.3.5. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Bu deney ile MK katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık sonrası dayanım kaybının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak seriler, şekil 7.1’ de görülen Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan, ısınma hızı $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk.}$ olan $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ kapasiteli Prothern HLF 150 markalı laboratuvar tipi fırında yapılmıştır.



Şekil 7.1. Prothern HLF 150 Laboratuvar Tipi Fırın

Bu fırında sırasıyla 400, 600 ve 800 °C' lik sıcaklıklar uygulanmıştır. Her numune, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce 1 gün süreyle 100 ±5 °C etüv sıcaklığında bekletilerek sabit ağırlığa gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra tüm seriler 400- 600- 800 °C' de 1 saat bekletilmiş, fırın içerisinde oda sıcaklığına geldikten sonra çıkarılarak, basınç deneyine tabi tutulmuştur.

7.3.6 Basınç Dayanımı Deneyi

Seriler basınç deneyine tabi tutulmadan önce, 28 günlük etüv kurusu yoğunluklarının belirlenmesi için etüvde kurutuldu.

Bu aşamadan sonra, küp numunelerin basınç deneyleri Şekil 7.2'de görülen Autotest 3000 hidrolik yük kontrollü Beton Basınç Dayanım Presinde, TS EN 12390-3'e göre, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirildi [36].



Şekil 7.1 Basınç Dayanım Presi

7.3.7 Yarmada Çekme Deneyi

Dolaylı çekme yükleri ile betonun çekme dayanımının elde edilmesini belirleyen deney yöntemi bütün ülke standartlarında yer almaktadır. Bu konudaki Türk standardı, TS 3129 dur [37].

Bu deney yönteminde genellikle silindir şekilli numuneler kullanılmaktadır. Deneylerin uygulanmasında, numune, deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontrplak çıtalar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Silindir şekilli beton numuneye bu şekilde basınç yükünün uygulanması durumunda, beton, yük ekseninde kısılmaya ve yük eksenine dik olan yatay ekseninde ise uzamaya maruz kalmaktadır. Betondaki çekme gerilmeleri (7.4) nolu formül kullanılarak bulunmaktadır.

$$\text{Çekme Gerilmesi} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (7.4)$$

Yukarıdaki formülde;

P = Kırılmaya neden olan basınç yükü,

L = Silindir numunenin boyu,

D = Silindir numunenin çapıdır [2].

Yapılan deneysel çalışmada her seriden 3'er tane silindir numune hazırlanmış ve 28 günlük kür süreleri tamamlandıktan sonra yukarıda bahsedilen yöntem ile yarmada çekme dayanımları tespit edilmiştir.

7.3.8. Mikroyapı İncelemeleri

Hazırlanan serilere ait numunelerin mikro yapı incelemeleri, Şekil 7.3’de görülen JEOL JSM-7001F model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscope) ile Fırat Üniversitesi Elektron Mikroskopi Laboratuvarı (FÜEM Lab) ‘nda gerçekleştirildi.

Mikroyapı incelemeleri genel olarak şu şekilde yapıldı; önce oda sıcaklığındaki katkısız beton numunesine bakılıp, sırası isle %5, 10, 15, 20 metakaolin katkılı numunelerin maruz bırakılan her sıcaklık için SEM yüzey görüntüleri alındı. Bu amaçla, numunelerin iç yüzeylerinden SEM cihazının inceleyebileceği boyutta parçalar kesildi. Daha sonra, elde edilen SEM görüntüleri karşılaştırılarak yorumlanmaya çalışıldı.

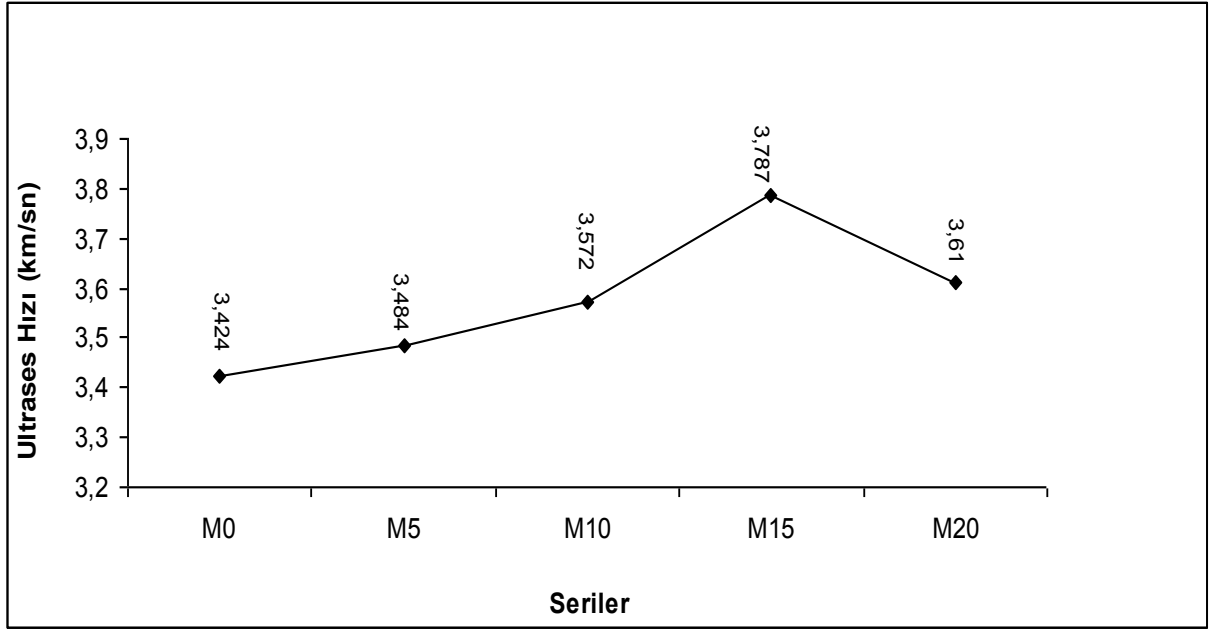


Şekil 7.2 Scanning Electron Microscope

8. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

8.1. Ultrases Deneyi Sonuçları

Ultrases sonuçları Şekil 8.1’de toplu olarak verilmiştir.

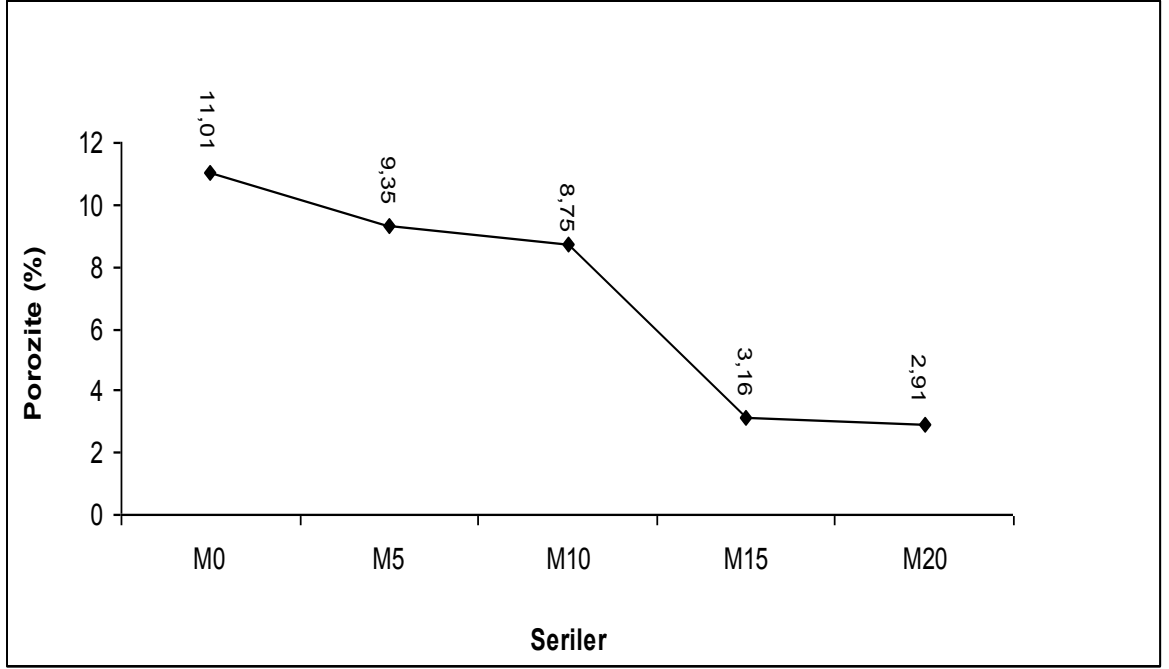


Şekil 8. 1 Serilerin Ultrases Değerleri

Şekil 8.1’de görüldüğü gibi %15 metakaolin yüzdesine kadar ultrases hızı artarken bu değerden sonra düşüş eğilimi göstermiştir. Bu durum muhtemelen kaolinin ince yapısının beton içerisindeki boşlukları doldurarak daha boşluksuz bir beton oluşturmasından kaynaklanmıştır. Metakaolinin ince yapısının boşlukları doldurduğuna dair bilgi literatürde de bulunmaktadır. Khatip [38] yaptığı çalışma sonucu, MK partiküllerinin fiziksel dolgu gibi işlev görüp, çimento harcının sertleşmiş yapısı içindeki ara boşlukları doldurması marifetiyle sıkılaşıma sağladığından bahsetmektedir. Ayrıca metakaolin, puzolanik tepkimeye katılarak hidrasyon ürünü olan ilave CSH’ lar üretip, çimento tanelerinin arasında bağlayıcı merkezler gibi hareket eden temas noktaları oluşturmuştur.

8.2. Porozite Deney Sonuçları

Serilerin porozite deney sonuçları Şekil 8.2’de toplu olarak gösterilmiştir.

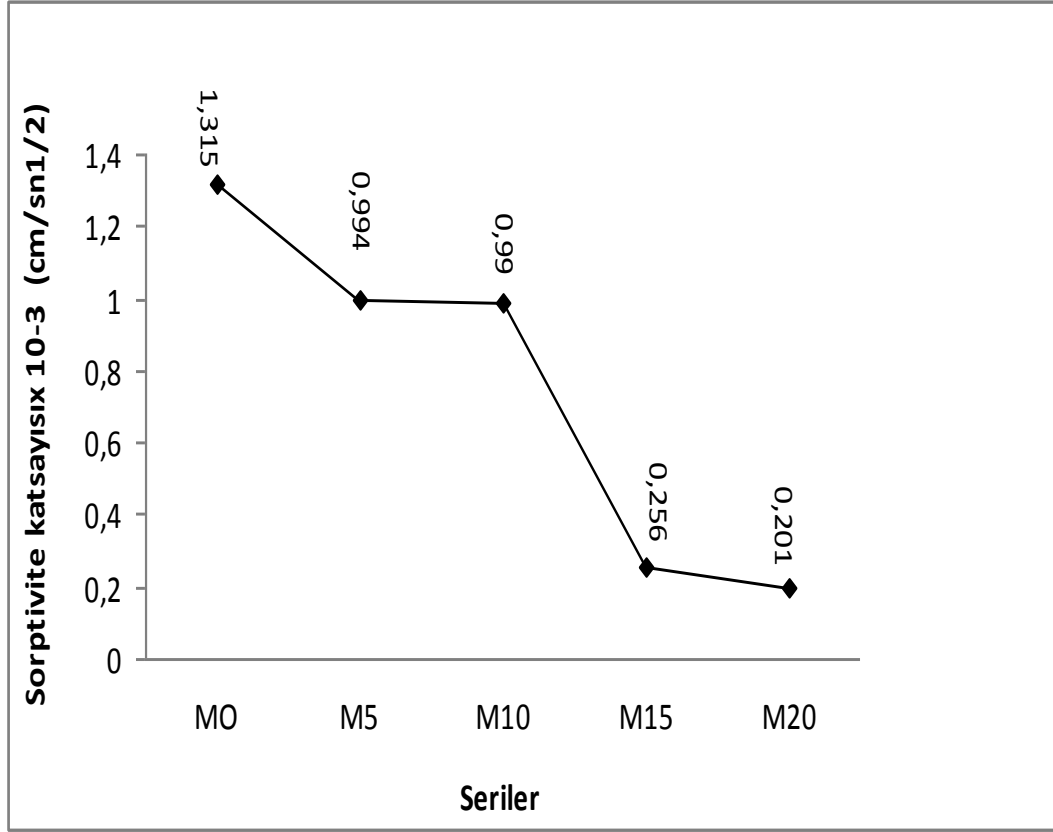


Şekil 8. 2 Serilerin Porozite Değerleri

Grafikte görüldüğü üzere, metakaolin kullanımına bağlı olarak, kullanılan miktar arttıkça, porozite değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak ise; MK’nın gerek puzolanik aktiviteye girme ve hidrasyon ürünlerini arttırıcı yönde çalışıyor olması, gerekse, ince yapısından dolayı boşluk yapısını azaltması sebep gösterilebilir [38]. Ayrıca, bazı kaynaklarda betonda metakaolin kullanımının su ihtiyacını arttırıp, beton harcı karışım esnasında yeteri kadar suyu bünyesine aldığı için, prizini almış betonun su emme oranını azalttığı söylenmektedir [22].

8.3. Kılcal Su Emme (Sorptivite) Deney Sonuçları

Serilere ait kılcal su emme sonuçları, Şekil 8.3’de toplu olarak gösterilmiştir.



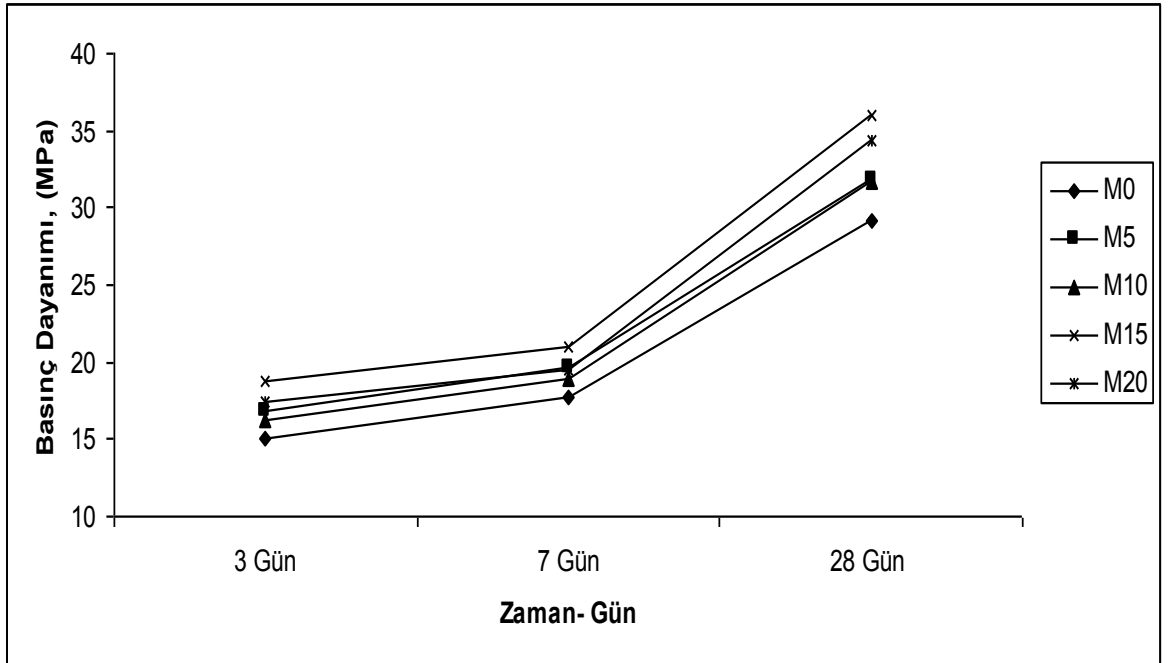
Şekil 8. 3 Serilerin k Değeri

Sonuçlardan görüldüğü gibi MK yüzdesi arttıkça sorptivite katsayısı düşüş eğilimindedir. Bu durum MK’ in küçük partikül yapısından dolayı beton içerisindeki boşlukları doldurmasından kaynaklanmaktadır. Beton içerisindeki MK yüzdesi 10’dan 15’e, %5 gibi küçük bir miktar artarken, k değerinde keskin bir düşüş görülmektedir. Bu durum, %15 değerinin optimum bir yüzde olduğunu destekler niteliktedir.

8.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

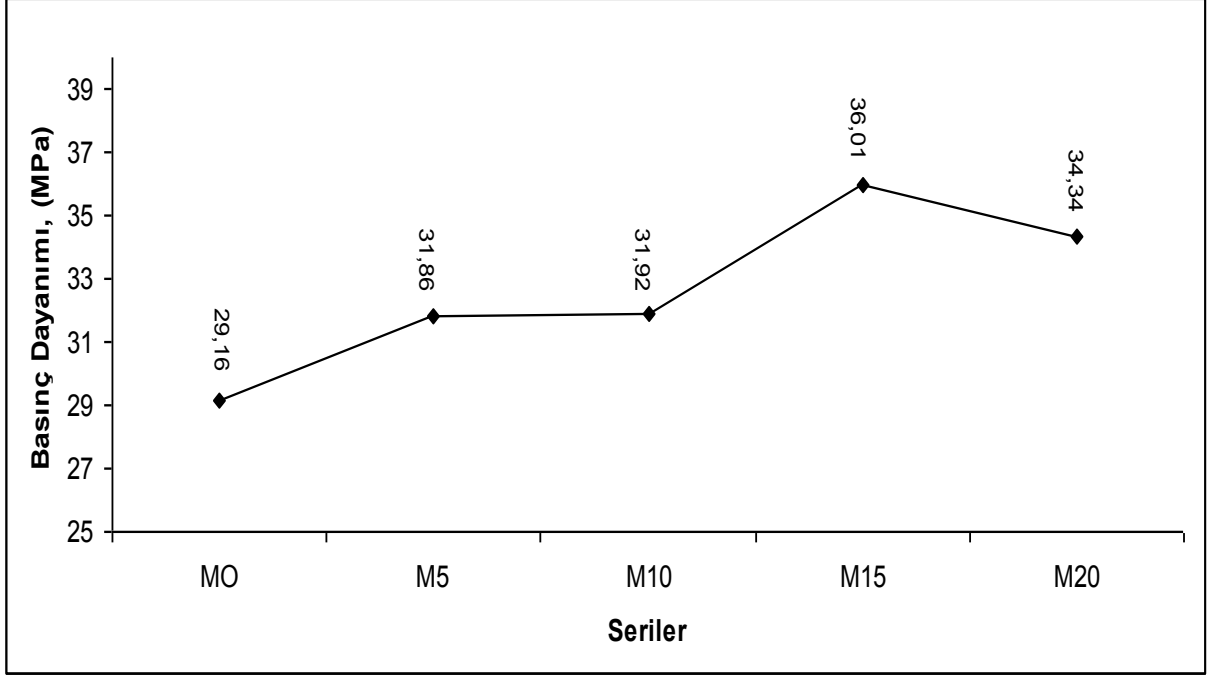
Tüm serilere ait, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 8.4' te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm serilerin basınç dayanımı, (MK olsun ya da olmasın) kür yaşı arttıkça artmıştır. Taşıyıcı hafif beton olarak hazırladığımız bu seriler, normal betonun sergilediği performansı sergilemiştir.

İlk kür yaşlarında MK katkısının basınç dayanımına etkisi çok belirgin değilken, 28. günde MK yüzdesinin artmasıyla dayanımın arttığı grafikte net olarak görülmektedir.



Şekil 8. 4 20 °C Serilerin Kür Yaşına Göre Basınç Dayanımları

Kür yaşı sabit kalmak üzere, artan MK yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi ise, Şekil 8.5’ te gösterilmektedir.

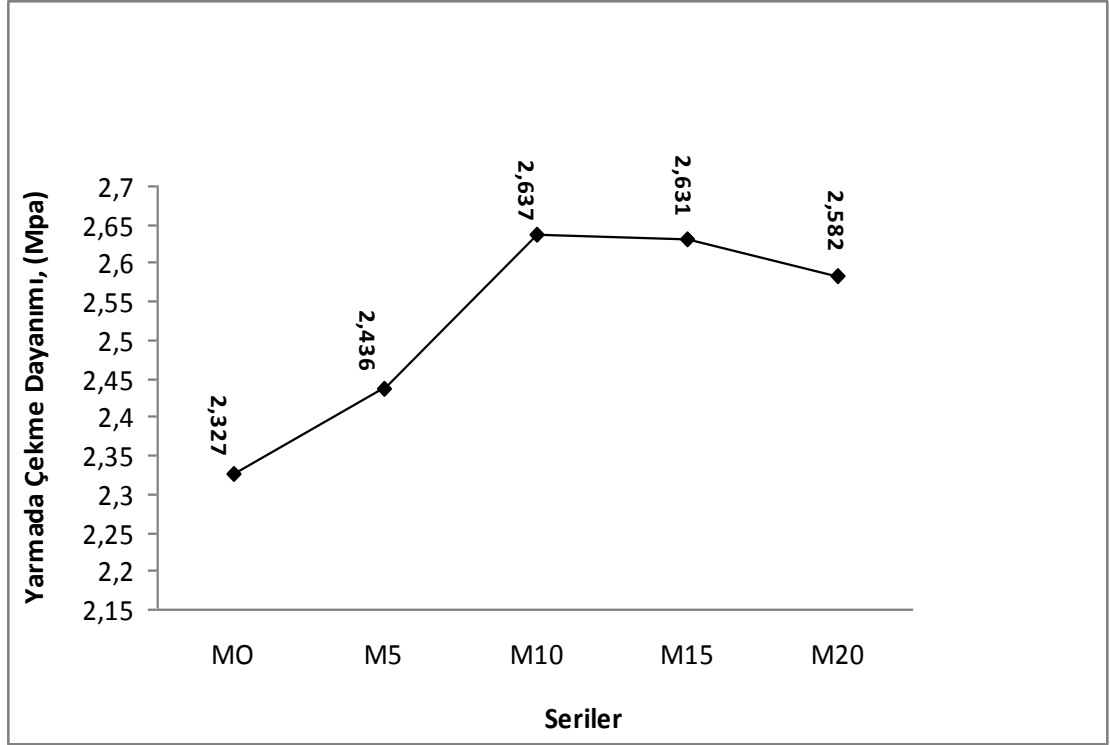


Şekil 8. 5 20 °C Serilerin 28 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 8.5’ te görüldüğü gibi, numunelerdeki MK yüzdesi arttıkça, basınç dayanımlarının belli bir MK yüzdesine kadar arttığı, daha sonra düşüş eğilimi gösterdiği açıkça görülmektedir. Dayanımların M15’e kadar düzenli artışı daha sonra ise düşme eğilimi göstermesi literatür ile uyumlu bir durumdur. Morsy vd. [28], bunun nedenini “daha yüksek oranlarda metakaolin kullanıldığında, bu metakaolin portland çimentosu taneleri etrafında yığılır yani toplanır ve hidrasyon sürecine engel olur.” şekilde açıklamıştır.

8.5. Yarmada Çekme Deney Sonuçları

Hazırlanan 10x20 cm. boyutundaki silindir numuneler üzerinde 28. günün sonunda yapılan deneylerin sonucu toplu olarak Şekil 8.6’da gösterilmektedir.

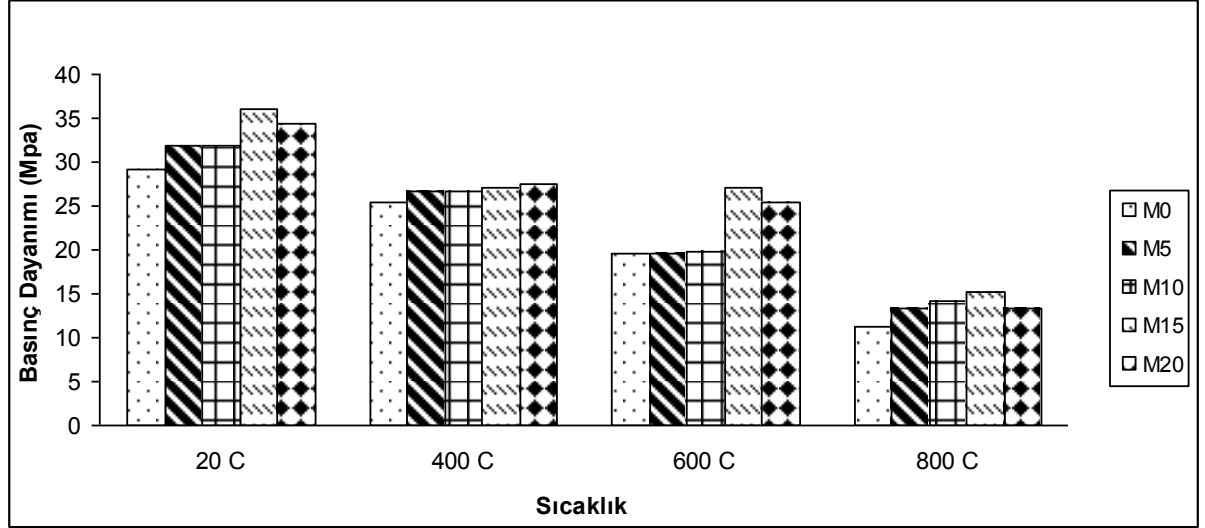


Şekil 8. 6 Yarmada Çekme Deney Sonuçları

Şekil 8.6’da görüldüğü gibi, numunelerdeki MK yüzdesi arttıkça, yarmada çekme dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Yarmada çekme dayanımında da optimum değer %15 olduğu grafikte açıkça görülmektedir. Yine Morsy vd., ağırlıkça %15 MK katkısının basınç dayanımı ile birlikte eğilmede çekme dayanımını da arttırdığını özellikle vurgulamıştır [28]. Sonuç olarak bulduğumuz çekme dayanımı değişimi literatürü destekler niteliktedir.

8.6. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları

Tüm serilerin yüksek sıcaklık- basınç dayanımı ilişkisi toplu olarak Şekil 8.7’de verilmektedir.



Şekil 8. 7. Serilerin Sıcaklık- Basınç Dayanım İlişkisi

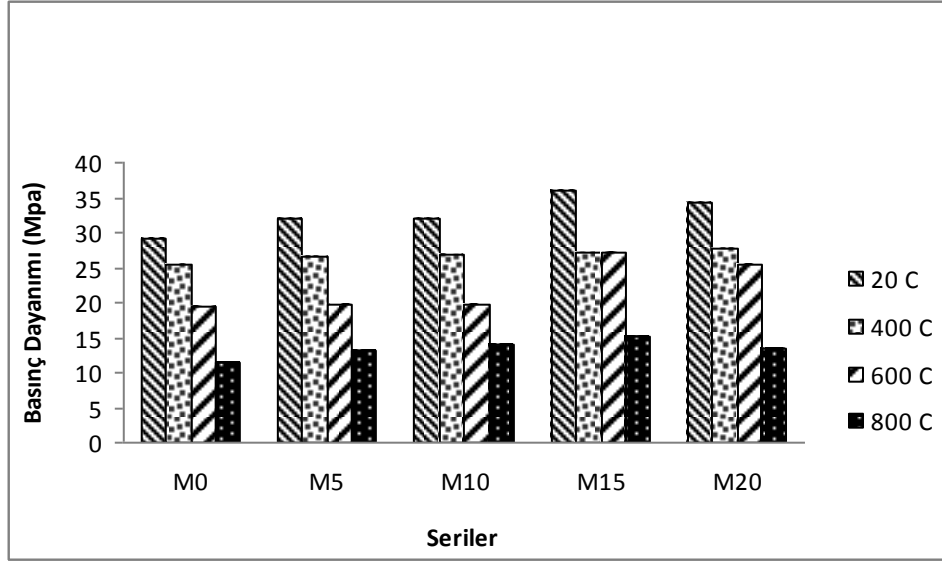
Şekil 8.7’de görüldüğü gibi, tüm seriler sıcaklık artışı ile birlikte az ya da çok dayanım kaybına uğramıştır.

Esasında sıcaklığa maruz bırakılan betonlar üzerine yapılmış olan birçok çalışmada genellikle maksimum 400 °C sıcaklığa kadar beton içeriği ne olursa olsun dayanımda bir miktar artış gözlemlenmiştir. Dayanımın pik yaptığı bu değer her çalışmada farklılık arz etmiştir. Şöyle ki, bir çalışmada basınç dayanımının yükseldiği sıcaklık değeri 250 °C iken [28], bir diğer çalışmada ise bu değer 200 °C olduğu görülmektedir [39]. Yine Demirel ve Keleştemur’un yapmış olduğu bir çalışmada hazırlanan 9 farklı seri betondan bazılarının 400 °C ye kadar dayanımda artış sergilediği daha sonra keskin bir düşüş gösterdiği görülmektedir [40]. Bu durum literatürde özellikle 350 °C sıcaklıktan önce Ca(OH)_2 bozunmasının gerçekleşmediği, bu nedenle de dayanım kaybı olmadığı şeklinde açıklanmaktadır [40-42].

Yaptığımız bu tez çalışmasında ise literatürden farklı olarak bir dayanım artışı gözlenmemiştir. 0-400 °C arasında bir sıcaklık değeri daha için inceleme yapılması ile basınç dayanımının hangi sıcaklık değerine kadar artarak pik yaptığının edilebileceğini tahmin etmekteyiz.

Yine Şekil 8.7 incelendiğinde görülecektir ki; hangi sıcaklık derecesinde olursa olsun, en yüksek dayanımı M15 serisi sergilemiştir.

Şekil 8.8’de ise, sıcaklık- basınç dayanımı parametrelerine bağlı kalmak sureti ile serilerin basınç dayanımı değişikliği bir de bu boyuttan görselleştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 8. 8 Serilerin Sıcaklık- Basınç Dayanımı İlişkisi- 2

Şekil 8.8’ de görüldüğü gibi içerik ne olursa olsun sıcaklık artışına bağlı olarak her seri dayanım kaybı yaşamıştır.

Sıcaklık artışına bağlı olarak dayanım kaybı yaşanmasına rağmen 600 °C sıcaklıkta MK yüzdesi arttıkça serilerin yüksek sıcaklıktan etkilenme oranları azalmıştır. Bu durum Tablo 8.1’de daha açık bir şekilde görülebilir.

Tablo 8. 1 Serilerin Basınç Dayanım Kayıpları

	T (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kalan Dayanım (%)	Dayanım Kaybı
M0	20 °C	29,16	100	-
	400 °C	25,36	86,96	13,04
	600 °C	19,55	67,04	32,96
	800 °C	11,29	32,92	67,08
M5	20 °C	31,86	100	-
	400 °C	26,66	83,67	16,33
	600 °C	19,60	61,51	38,48
	800 °C	13,28	41,68	58,32
M10	20 °C	31,92	100	-
	400 °C	26,74	82,59	17,41
	600 °C	19,72	62,16	37,84
	800 °C	14,12	44,23	55,76
M15	20 °C	36,01	100	-
	400 °C	27,18	75,47	25,53
	600 °C	27,1	75,25	24,74
	800 °C	15,23	42,29	57,70
M20	20 °C	34,34	100	-
	400 °C	27,59	80,34	19,65
	600 °C	25,47	74,17	25,82
	800 °C	13,33	38,81	61,18

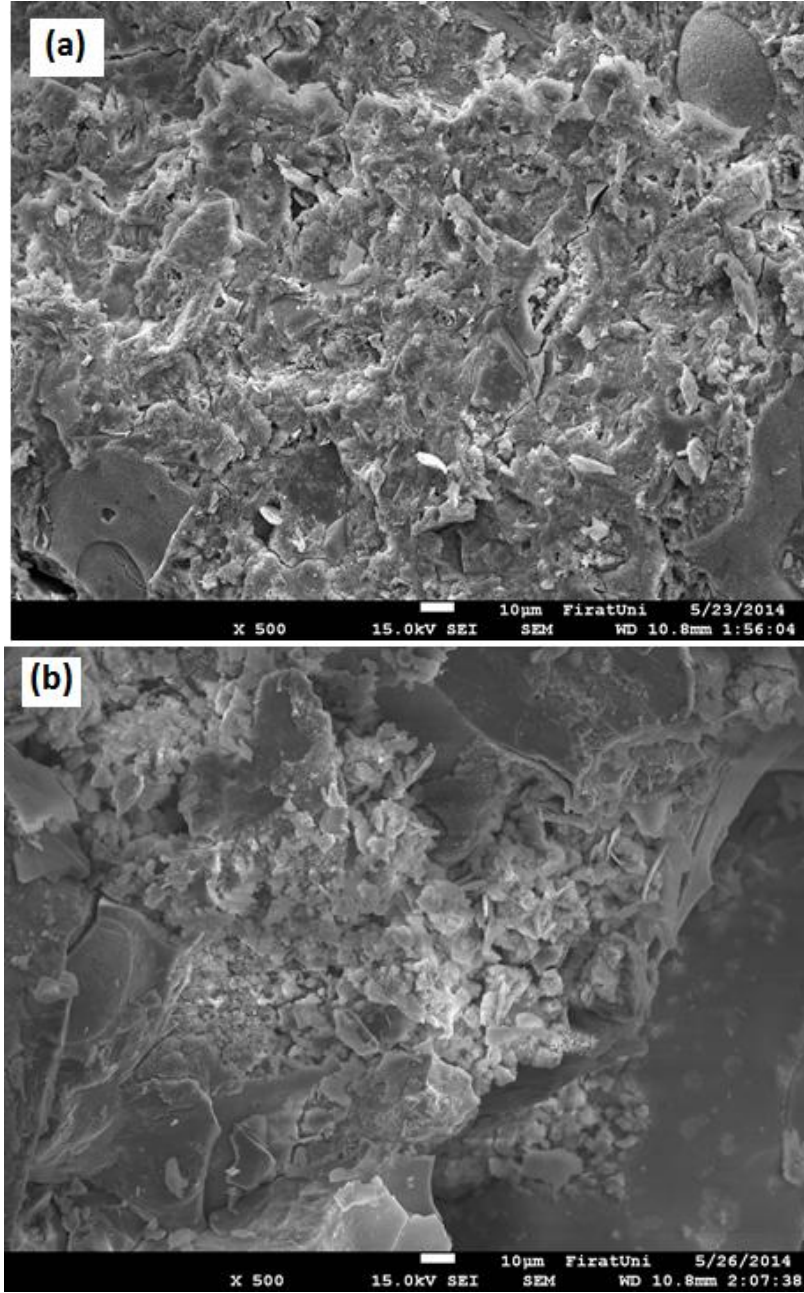
Örneğin 600 °C’de M5 serisinin dayanım kaybı %38,48; M10 serisinin dayanım kaybı %37,84 iken M15 serisinin dayanım kaybı %24,27 seviyelerine düşmüştür.

Morsy ve diğerlerine göre [28], 200 °C'nin üzerindeki sıcaklık artışlarında gözlemlenen basınç dayanımındaki düşüş, 500 °C’de Ca(OH)_2 ‘in dehidratasyonu sonucu CaO ve H_2O ’e ayrışmasından, 600 °C’ nin üzerindeki dayanım kayıpları ise ana olarak CaCO_3 ’ın bozunması ve bunu takiben CaCO_3 ’ten açığa çıkan CO_2 ’ten kaynaklanmaktadır. Bu açıklamadan hareketle, özellikle 600°C’de sıcaklıkta MK miktarı artarken serilerin yüksek sıcaklıktan etkilenme oranlarındaki azalmayı şu şekilde açıklayabiliriz. Artan MK, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girer ve ortamda Ca(OH)_2 ’ların azalmasına neden olur. Başka bir deyişle dehidrate olarak dayanım düşmesine neden olacak Ca(OH)_2 azalır

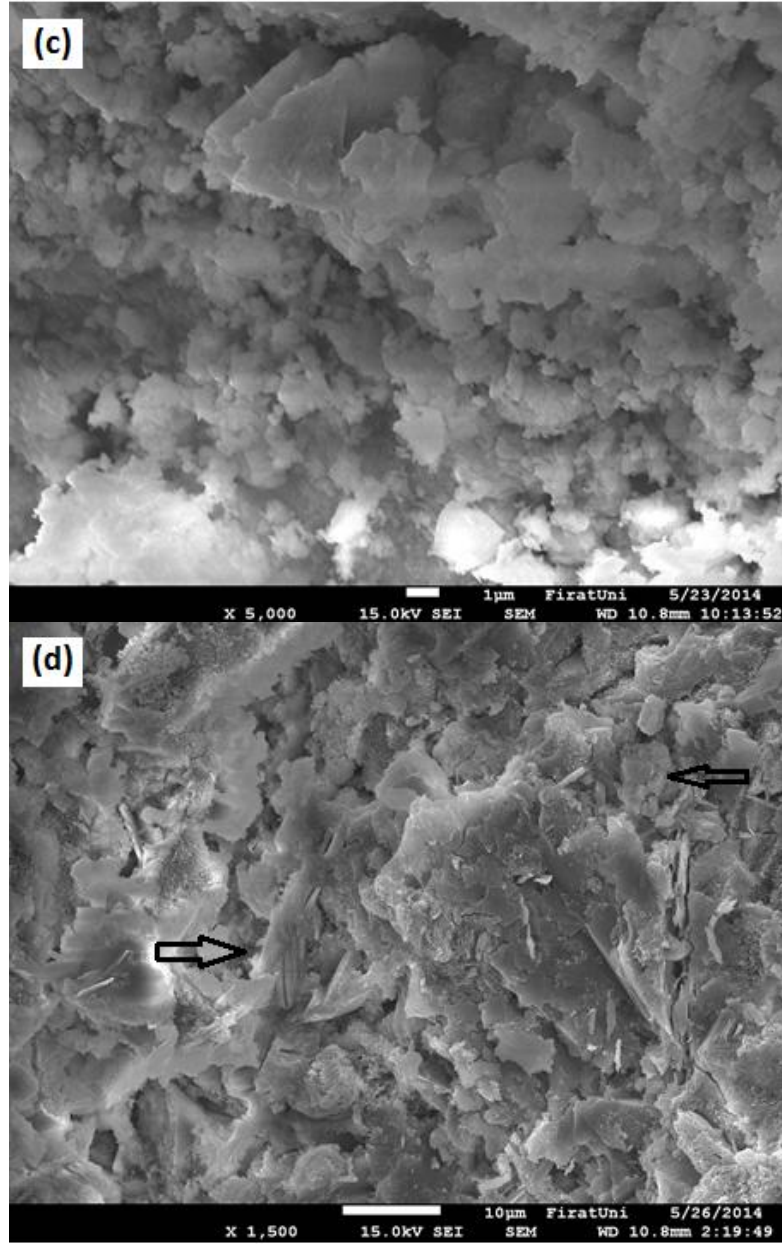
8.7. Mikroyapı İncelemeleri

Fırat Üniversitesi'nde bulunan SEM laboratuvarında gerçekleştirilen fotoğraf çekimleri sonucunda hazırlanmış olan tüm serilerin sıcaklık öncesi ve sonrası iç yapıları hakkında bilgi edinilmiştir.

Şekil 8.9'da sıcaklığa maruz bırakılmamış serilere ait SEM görüntüleri verilmektedir.

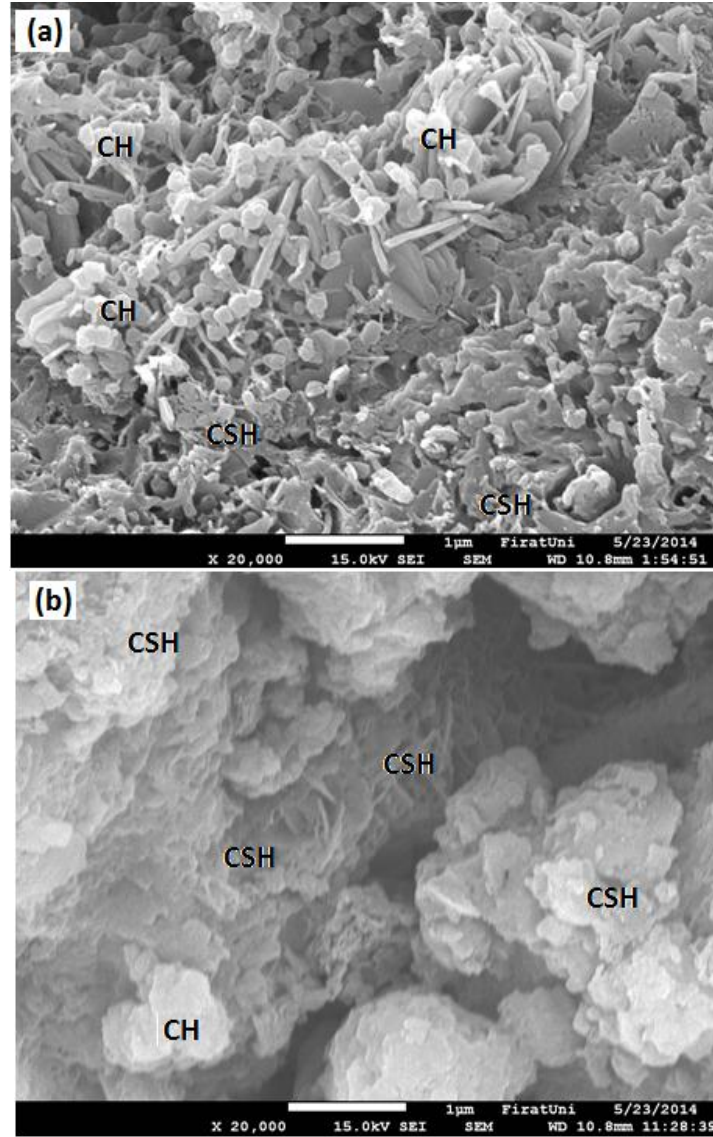


Şekil 8. 9 20°C'de Serilere Ait SEM Görüntüleri a) M0, b)M5, c)M15, d)M20



Şekil 8.9 Devamı

Şekil 8.9'daki 4 resim incelendiğinde; MK yüzdesi arttıkça tabakalı şekilde bir görünüm ortaya çıkmaktadır. Bu durum literatür ile uyumludur. Çünkü; Kong vd., yapmış oldukları çalışmada numune içerisindeki metakaolin parçacıklarının tabaka benzeri bir yapı formunda plaklar şeklinde görünüm sergilediğini vurgulamışlardır [42]. Şekil 8.9(d)'de bu tabakalar ok ile belirtilmiştir.

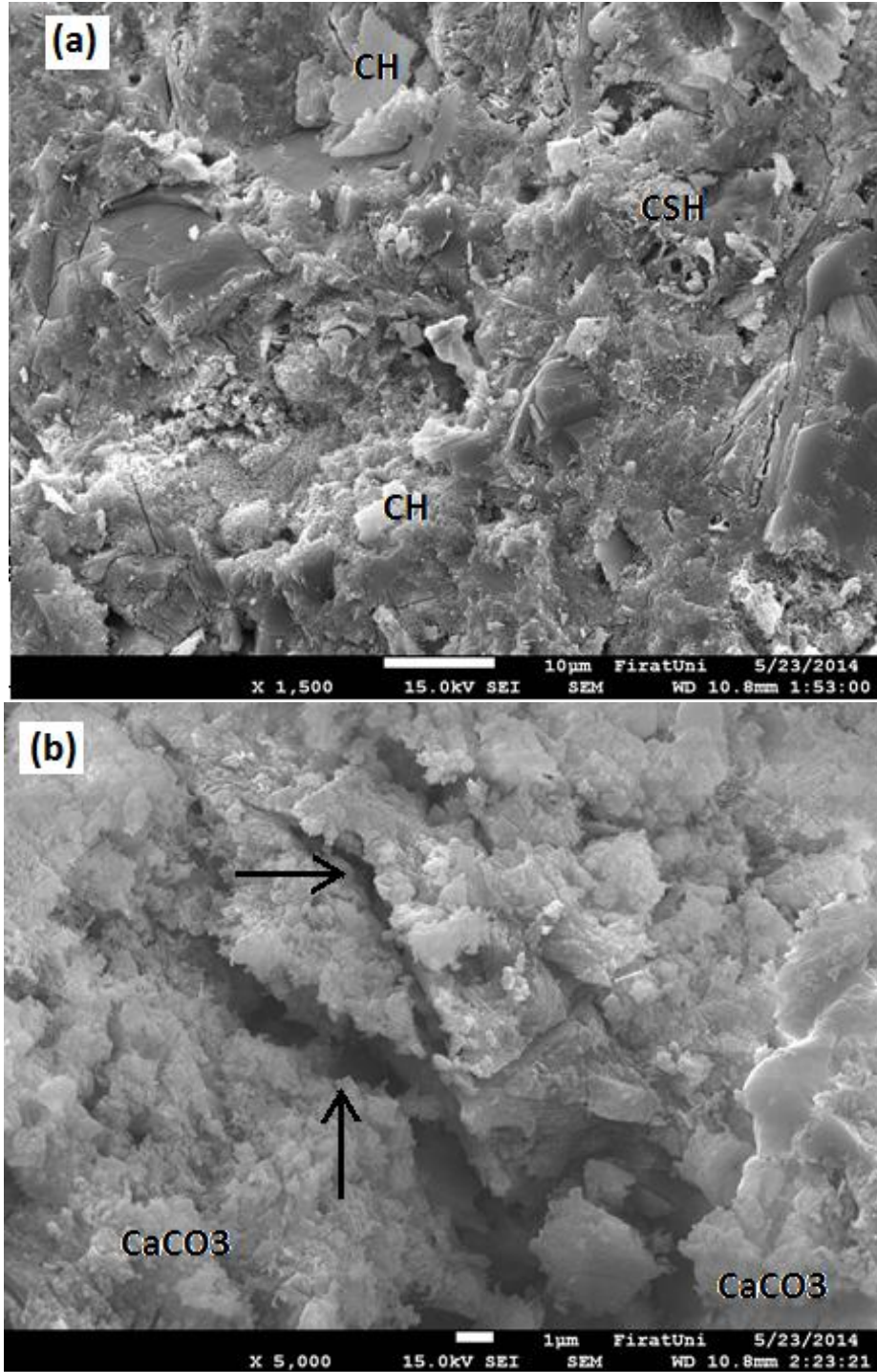


Şekil 8. 10 MK katkısının Mikroyapıda Meydana Getirdiği Değişim a) M0 (20°C), b) M15 (20°C)

Şekil 8.10'da ise başka bir açıdan verilen mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 8.10 (a)'da 20°C'de M0 kodlu kontrol numunesinin SEM fotoğrafı görülmektedir. Mikrokristal ve neredeyse amorf yapıları C-S-H jelleri oldukça belirgindir. Buna ilaveten kristal formda $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 'lar da bol miktarda oluşmaya başlamıştır.

Şekil 8.10 (b)'de ise MK15 serisine ait bir fotoğraf bulunmaktadır. MK'in göstermiş olduğu pozolanik etkiden dolayı CH lar azalmış, ilave amorf C-S-H jelleri oluşmuştur. MK'in filler etkisinden dolayı da daha yoğun ve sıkı bir iç yapının varlığı görülmektedir [28].

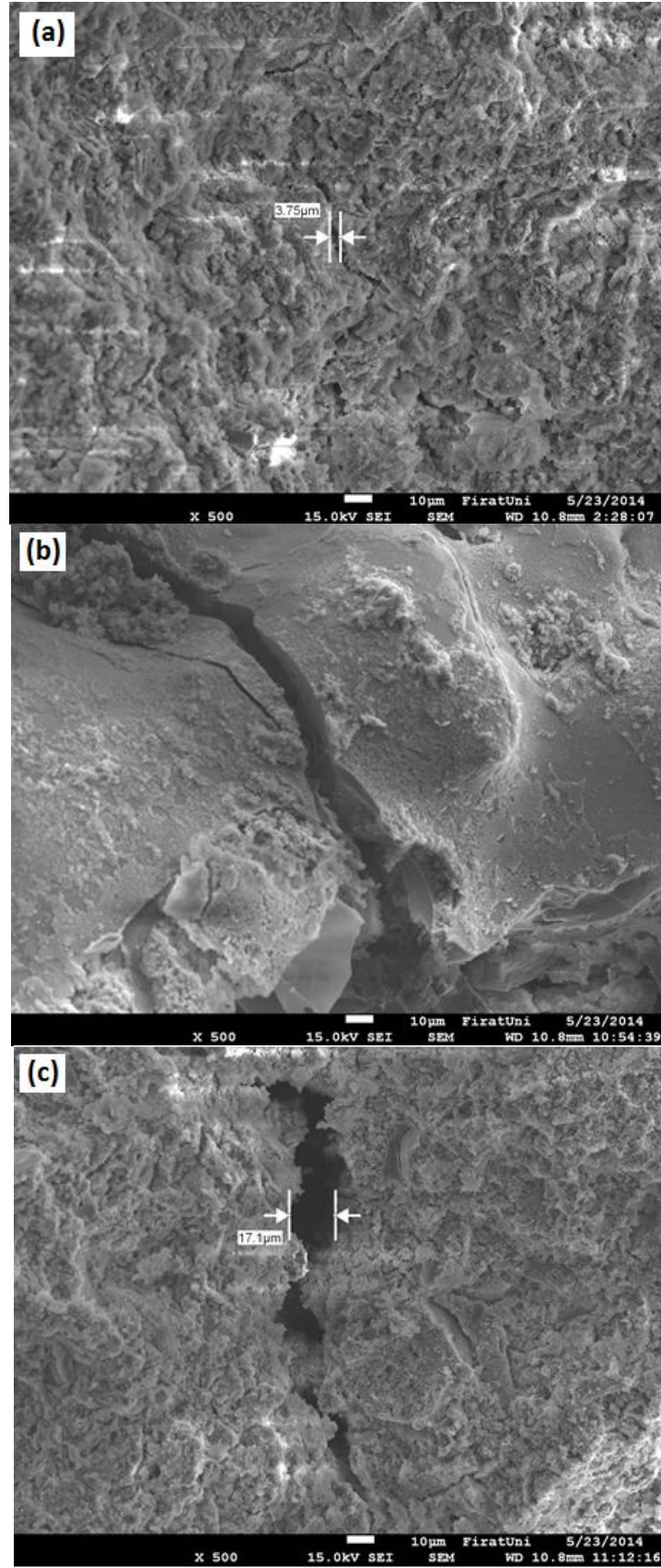
Şekil 8.11’de Metakaolin katkısız M0 serisinin 20 ve 800°C sıcaklıklar sonrası mikroskop görüntüleri birbiriyle kıyaslanmıştır.



Şekil. 8.11 a)20 oC ve b) 800 o C’ye maruz kalmış M0 kontrol serisinin SEM görüntüleri

Metakaolin bulunmayan M0 kontrol serisi 800 °C sıcaklığa maruz kalınca, Şekil 8.11 b)'de ok ile gösterilen geniş çatlakların oluşumu ile hidratasyon ürünleri bozunmuştur. Ayrıca CH'lar CaCO_3 'a dönüşmüş, bazı CaCO_3 'lar ise bozunarak CO_2 'ye dönüşmüştür.

Şekil 8.12'de ise 800 °C sıcaklığa maruz kalmış farklı MK yüzdelere sahip serilere ait mikroskop görüntüleri toplu olarak verilmiştir. MK yüzdesi arttıkça numune içyapısının daha sıkı bir görünüm aldığı belirgindir [28]. Aynı zamanda bu sıcaklık değerinde CH ve CSH deformasyonu sonucu içyapıda bozunmalar oluşmuş ve serilerde çatlaklar meydana gelmiştir. Çatlak boyutlarının büyüdüğü dikkati çekmektedir. Bu durum daha önceki bölümlerde gerçekleştirilmiş olan porozite, sorptivite ve ultrases deney sonuçlarını destekler niteliktedir. Çünkü hem sıcaklık artışı hem de MK yüzdesinin artması ile içyapıda başluklar artmış ve porozite, sorptivite ve ultrases değerlerinde artış meydana gelmiştir [40].



Şekil 8. 11 800 °C Sıcaklığa Maruz Kalmış Seriler a) M5, b) M15, c) M20

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış farklı dozlarda MK katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri incelenmiştir.

Yapılan literatür çalışması sonucunda MK katkılı betonların yüksek sıcaklık altındaki davranışlarının incelenmesine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmuş ancak metakaolinin hafif agrega ile birlikte kullanılmasına yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapmış olduğumuz bu tez çalışması ile MK ilaveli, taşıyıcı hafif betonların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki davranışları incelenerek literatürdeki bu eksikliğe katkı sağlamak amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- ✓ Farklı oranlarda MK kullanılması ile oluşturulan beton serilerinde %15 metakaolin yüzdesine kadar ultrases hızı artarken bu değerden sonra düşüş eğilimi göstermiştir.
- ✓ MK kullanımına bağlı olarak, kullanılan miktar arttıkça, porozite değerlerinin düştüğü gözlenmiştir.
- ✓ MK yüzdesi arttıkça sorptivite katsayısı düşüş eğilimindedir.
- ✓ Basınç dayanımlarının %15 MK yüzdesine kadar arttığı, daha sonra düşüş eğilimi gösterdiği açıkça görülmektedir.
- ✓ Numunelerdeki MK yüzdesi arttıkça, yarmada çekme dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Yarmada çekme dayanımında da optimum değer %15 olduğu açıkça gözlemlenmiştir.
- ✓ Çalışma sonunda görülmüştür ki hangi sıcaklık derecesinde olursa olsun, en yüksek dayanımı M15 serisi sergilemiştir.
- ✓ SEM görüntüleri incelendiğinde MK yüzdesi arttıkça beton iç yapısında tabakalı bir görünümün ortaya çıktığı görülmüştür.
- ✓ SEM görüntüleri, MK'nın göstermiş olduğu puzolanik etkiden dolayı CH 'ların azaldığını ilave amorf C-S-H jellerinin oluşmuş olduğunu göstermektedir.
- ✓ MK yüzdesi arttıkça numune iç yapısının daha sıkı bir görünüm aldığı SEM görüntülerinde belirgindir.

MK katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklıkta mekanik davranışlarını incelerken 0- 400 °C arasında bir sıcaklık değeri daha için inceleme yapılması ile basınç dayanımının hangi sıcaklık değerine kadar artarak pik yaptığıının edilebileceğini tahmin etmekteyiz.

KAYNAKLAR

- [1] **Çorbacıoğlu, C.U.**, 2008 Beton Karışımının Geçirirliiğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Erdoğan, Y, Turhan.**, 2007 Beton, ODTÜ Yayıncılık, 2. Baskı, Ankara.
- [3] **Yaprak H., Şimşek O., Aruntaş H.Y.** 2004 Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton Özelliklerine Etkisi, Beton 2004 Kongresi, 10-12 İstanbul 707-715.
- [4] **Kocataşkın, F.**, 1991 Betonun Dünyü Bugünü Yarını 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Müh. Odası)
- [5] **P.C. Hewlett.**, 1998 Lea's Chemistry of Cement and Concrete, John Wiley and Sons Inc., Fourth Edition, New York,
- [6] **Souza, PSL., Molin., Denise C.C.**, 2005 Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. Cement and Concrete Research; 35 (10), 1993-1998.
- [7] **Topçu, İ.B.**, 2006. Beton Teknolojisi. Uğur Ofset, Eskişehir
- [8] **Yeğınobalı, A.**, 2002. Structural lightweight Concretes Produced with Natural Lightweight Aggregates in Turkey, International Congress of the Precast Concrete Industry, BIBM, İstanbul, Turkey, 1-4 May.
- [9] **Uzbaş, B.**, 2008. Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [10] **Hüsem, M. ve Durmuş, A.**, 1993. Karadeniz Bölgesi Hafif Agregalarıyla Üretilen Taşıyıcı Betonlar. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 1. Teknik Kongre, Ekim, Gazi Magusa-Kuzey Kıbrıs, Bildiriler Kitabı 1, 580-588.
- [11] **Chandra, S., & Berntsson L.**, 2002. Lightweight Aggregate Concrete, Noyes Publications, New York, USA.
- [12] **TS 1114 EN 13055-1**, 2004. Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin, TSE, Ankara.
- [13] **ACI Committee 213R-03**, 2003. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- [14] **Davraz, M., Gündüz, L.**, 1997. Isparta Yöresi Pomza Taşının Hafif Yapı Elemanı Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Analiz. I. Isparta Pomza Sempozyumu. 61-70, Isparta.

- [15] **Seyah, İ.**, 1971 Volkanik Kaolin Oluşumu ve Andezit Problemleri. Türkiye Jeoloji Kurumu 25. Kongresi, Ankara.
- [16] **Hamalı, Y.**, 2007 Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
- [17] **Vu, DD.**, 2002 Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete. Delft University Press, Netherlands,
- [18] **Barness, Barness P.**, 2001 Structure and Performance of Cements. Chapter 15, Metakaolin as a Pozzolanic Addition to Concrete. USA.
- [19] **Onike, Martin.**, 1986 GD. Time Temperature Transformation Curves for and the Thermal Decomposition Reactions of Kaolinite. Material Science forum 7: 73-82.
- [20] **Akçaözoğlu, K., Çiftlikli, M., Özcan, F., Özer, E.**, 2010 Niğde Yöresi Fesleğen Yayla Kaolin Kilinden Metakaolin Üretilebilirliğinin Araştırılması. International Science and Technology Conference. Famagusta, Turkish Republic of Northern Cyprus.
- [21] **TS EN 206-1** 2002 Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 68.
- [22] **URL-1** www.metakaolin.info
- [23] **Neville A.M.**, 2000 “Properties of Concrete”, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.
- [24] **Aydın S., Baradan B.**, 2003 “Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Gelistirilmesi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, 451-460, İstanbul.
- [25] **Akman M.S.**, 2000 “Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri” TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- [26] **Perkins P.H.**, 1986 “Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures”, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- [27] **Guise S.E., Short N.R. ve Purkiss J.A.**, 1996 “Colour Analysis for Assessment of Fire Damaged Concrete”, Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, Proceeding of The International Conference Held at The University of Dundee, Scotland/UK.
- [28] **Morsy, M., Salloum, A., Abbas, H., Alsayed, S.**, 2012 Behavior of Blended Cement Mortars Containing Nano- metakaolin at elevated Temperatures. Construction and Building Materials.

- [29] **Caldarone, M.A., Gruber, K.A., Burg, R.G.** 1994 High reactivity metakaolin (HRM): a new generation mineral admixture for high performance concrete, *Concrete International*, 16(11), 37-40,.
- [30] **Qian, X., Li, Z.**, 2001 The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 31, 1607-1611,
- [31] **Courard, L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R.**, (2003) Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1473-1479,
- [32] **Güneyisi, E., Gesoglu, M., Mermerdas, K.**, 2008 “Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin”, *Materials and Structures*, 41(5), 937-949,
- [33] **Gönen, T., Yazıcıoğlu, S.**, 2007 The influence of mineral admixtures on the short and long- term performance of concrete, *Build. Env.* 42 3080- 3085.
- [34] **Gönen, T., Yazıcıoğlu, S.**, 2007 The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete, *Const. Build. Mater.* 21 1040- 1045.
- [35] **Papadikis, V.G., Fardis, M.N., Veyenas, C.G.**, 1992 Hydration and carbonation of puzzolanic cements, *ACI Mater. J.* 89 (2) 119-130.
- [36] **TS EN 12390-3**, 2003 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12s.
- [37] **TS 3129, 1978**, Betonda Yarma Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, TSE Ankara.
- [38] **Khatip, J.M., Clay, M.R.**, 2004 Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (1) 19-29.
- [39] **Nadeem A., Memon S.A., Yiu Lo T.**, 2013 Qualitative and quantitative analysis and identification of flaws in the microstructure of fly ash and metakaolin blended high performance concrete after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, (38), 731-741
- [40] **Demirel B., Keleştemur O.**, 2010 Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, *Fire Safety Journal*, (45) 6–8, 385-391
- [41] **Aydın S., Baradan B.**, 2007 Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars *Cement and Concrete Research*, (37) 6, 988-995

[42] **Kong Y., Daniel L., Sanjayan G.J., Crentsill S.K.**, 2007 Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, (37) 12, 1583-1589

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Diyarbakır'da tamamladıktan sonra 2007 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. 4 yıllık lisans eğitiminden sonra 2011 yılında aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı.