

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK FİBER İÇEREN YÜKSEK DAYANIMLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
METAKAOLİN VE ÖĞÜTÜLMÜŞ POMZANIN ETKİSİ

SERHAT ÇELİK TEN

HAZİRAN 2014

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK FİBER İÇEREN YÜKSEK DAYANIMLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
METAKAOLİN VE ÖĞÜTÜLMÜŞ POMZANIN ETKİSİ

SERHAT ÇELİKTEN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR

HAZİRAN 2014

Serhat ÇELİKTEN tarafından **Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR** danışmanlığında hazırlanan “**Çelik Fiber İçeren Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri Üzerine Metakaolin ve Öğütülmüş Pomzanin Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Okan KARAHAN, Erciyes Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Serhat ÇELIKTEN

ÖZET

ÇELİK FİBER İÇEREN YÜKSEK DAYANIMLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE METAKAOLİN VE ÖĞÜTÜLMÜŞ POMZANIN ETKİSİ

ÇELİKTEN, Serhat

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Haziran 2014, 105 sayfa

Bu çalışmada çelik fiber içeren yüksek dayanımlı beton özellikleri üzerine metakaolin, öğütülmüş pomza ve metakaolin ile birlikte kullanılan öğütülmüş pomzanın etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, kontrol betonlarından hariç 6 farklı seride bu mineral katkıları kullanılarak 30 farklı karışımda beton üretilmiştir. Birinci seride, çimento yerine ağırlıkça metakaolin, ikinci seride çimento yerine ağırlıkça öğütülmüş pomza ve üçüncü seride çimento yerine ağırlıkça metakaolin ile birlikte öğütülmüş pomza yer değiştirilerek 7 farklı kombinasyonda kullanılmıştır. Diğer seriler ise ilk üç serideki karışımlara çelik fiber eklenerek üretilmiştir. Ayrıca tüm karışımlarda bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 , su-bağlayıcı oranı 0.20 ve çökme değerleri $8 \pm 2 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Karışımlarda, su miktarını azaltmak ve sabit bir çökme değerini belirlemek için yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip süper akışkanlaştırıcı farklı oranlarda kullanılmıştır. Taze beton özelliklerinden çökme ve taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerinden ise sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Kontrol betonları ile diğer serilerdeki betonlardan elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı serilerdeki betonlar da birbirleri ile karşılaştırılmış ve en uygun mineral katkı oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Karşılaştırmalarda metakaolin içeren betonların performansının diğerlerine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, tüm serilerde yüksek dayanımlı beton elde edilebileceği gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Metakaolin, Öğütülmüş pomza, Çelik fiber, Yüksek dayanımlı beton.

SUMMARY

EFFECT OF METAKAOLIN AND GROUND PUMICE ON THE PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE CONTAINING STEEL FIBER

ÇELİKTEN, Serhat
Nigde University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Associate Professor Dr. Mustafa SARIDEMİR

June 2014, 105 pages

In this study has been experimentally investigated the effects of metakaolin, ground pumice and metakaolin together with ground pumice on the properties of high performance concrete containing steel fiber. In the study, except for control concretes by using these mineral additions in six different series, 30 different mixtures were produced. In the first series, metakaolin was used to replace by weight of Portland cement, in the second series, ground pumice was used to replace by weight of Portland cement, and also in the third series, ground pumice was used in the seven different combinations to replace by weight of Portland cement together with metakaolin to replace by weight of Portland cement. The other series were produced by adding steel fiber to previous series. Also, in the all mixtures, a constant total binder content of 500 kg/m³, the water-binder ratios of 0.20 and slump values of 8±2 cm were designed. The superplasticizer, which has high ratio of water reducing effect, was used in different proportions to reduce the water proportion and determine the value of constant slump value in the mixtures. The slump and unit weight of fresh concrete properties were tested. The hardened unit weight, ultrasound pulse velocity, compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength values of hardened concrete properties were also experimentally determined. The results of control concretes were compared with the results of other series. The results of concrete in the different series were also compared with the results of each other, and tried to determine optimum ratios of mineral additives. As a result, it is seen that high strength concrete can be obtained in all series.

Keywords: Metakaolin, Ground pumice, Steel fiber, High strength concrete.

ÖN SÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi çalışmasında, metakaolin, öğütölmüş pomza ve metakaolin ile birlikte öğütölmüş pomzanın yüksek dayanımlı çelik fibersiz ve çelik fiberli içeren beton özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, taze beton özelliklerinden çökme ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerinden ise sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, metakaolin, öğütölmüş pomza ve metakaolin ile birlikte öğütölmüş pomza içeren tüm karışımlarda düşük su-bağlayıcı oranı ile yüksek dayanımlı beton üretilebileceği gözlenmiştir.

Yüksek Lisans Tezi çalışmamın yürütölmesi esnasında, çalışmalarıma yön veren, değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, sayın Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm öğrenimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
BÖLÜM II. GENEL BİLGİLER VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	3
2.1 Kaolin	3
2.2 Metakaolin	6
2.2.1 Metakaolinin kimyasal bileşimi	7
2.2.2 Metakaolinin yapısı	7
2.2.3 Metakaolinin aktivitesi	8
2.2.4 Metakaolinin çimento ve beton üretiminde kullanımı	9
2.2.5 Metakaolinin taze beton özelliklerine etkisi	10
2.2.6 Metakaolinin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	12
2.2.6.1 Metakaolinin beton basınç dayanımına etkisi	14
2.2.6.2 Metakaolinin beton eğilme dayanımına etkisi	16
2.2.6.3 Metakaolinin beton yarmada çekme dayanımına etkisi	17
2.2.6.4 Metakaolinin beton elastisite modülüne etkisi	18
2.2.6.5 Metakaolinin beton dayanıklılığına etkisi	19
2.2.6.6 Metakaolinin beton geçirimsizliğine etkisi	21
2.3. Metakaolin ile Yapılmış Çalışmalar	23
2.4 Pomza	32
2.4.1 Pomzanın yapısı	32
2.4.2 Pomzanın aktivitesi	35
2.4.3 Pomzanın çimento ve beton üretiminde kullanımı	37
2.4.4 Pomzanın taze beton özelliklerine etkisi	38

2.4.5 Pomzanın sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	39
2.4.5.1 Pomzanın beton basınç dayanımına etkisi	39
2.4.5.2 Pomzanın beton eğilme dayanımına etkisi.....	40
2.4.5.3 Pomzanın beton yarmada çekme dayanımına etkisi	41
2.4.5.4 Pomzanın beton elastisite modülüne etkisi	42
2.4.5.5 Pomzanın beton dayanıklılığına etkisi	42
2.4.5.6 Pomzanın beton geçirimsizliğine etkisi.....	43
2.5 Pomza ile Yapılmış Çalışmalar.....	44
BÖLÜM III. DENEYSEL ÇALIŞMA	48
3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	48
3.1.1 Çimento.....	48
3.1.2 Öğütülmüş pomza	50
3.1.3 Metakaolin	50
3.1.4 Fiber	50
3.1.5 Agregası.....	51
3.1.6 Süper akışkanlaştırıcı	53
3.1.7 Karışım suyu	54
3.2 Beton Karışım Oranları.....	54
3.3 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları	56
3.4 Taze Beton Deneyleri	58
3.4.1 Çökme (Slump) deneyi	58
3.4.2 Taze betonun birim ağırlığı	58
3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri	59
3.5.1 Sertleşmiş birim ağırlık	59
3.5.2 Ultrases geçiş hızı	60
3.5.3 Basınç dayanımı	61
3.5.4 Yarmada çekme dayanımı	62
3.5.5 Eğilme dayanımı	63
BÖLÜM IV. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	65
4.1 Taze Beton Deneyleri	65
4.1.1 Çökme (Slump) deneyi	65
4.1.2 Taze betonun birim ağırlığı	66

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleleri	68
4.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık	68
4.2.2 Ultrases geçiş hızı	69
4.2.3 Basınç dayanımı	72
4.2.4 Yarmada çekme dayanımı	77
4.2.5 Eğilme dayanımı	80
4.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiler	82
4.3.1 Küp basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki	82
4.3.2 10 cm küp ile 15 cm küp basınç dayanımı arasındaki ilişki	84
4.3.3 Küp basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	86
4.3.4 Küp basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki	87
4.3.5 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	89
BÖLÜM V. SONUÇLAR	91
KAYNAKLAR	94
ÖZ GEÇMİŞ	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kaolinin fiziksel özellikleri	4
Çizelge 2.2. Dünyadaki kaolin rezervleri	5
Çizelge 2.3. Türkiye'deki kaolin rezervleri	6
Çizelge 2.4. Metakaolin mineralinin fiziksel özellikleri	8
Çizelge 2.5. Metakaolin katkılı betonların slump değerleri ve priz alma zamanları ...	10
Çizelge 2.6. Metakaolin katkılı harçların su ihtiyacı ve priz alma zamanları	11
Çizelge 2.7. Numunelerin seçilen kesitlerinin gözenek hacimleri	13
Çizelge 2.8. Metakaolin katkılı betonların basınç dayanımları ve yoğunlukları	15
Çizelge 2.9. Metakaolin ve Silis Dumanı içeren betonların basınç dayanımı	16
Çizelge 2.10. Metakaolin içeren betonların çekme dayanımı	17
Çizelge 2.11. Metakaolin katkısının elastisite modülü üzerindeki etkisi	19
Çizelge 2.12. Kontrol betonunun ve katkılı betonların klor geçirgenliği	22
Çizelge 2.13. Metakaolin içeren betonların geçirimsizlik özellikleri ve boşluk yapısı	23
Çizelge 2.14. Metakaolin içeren betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü	24
Çizelge 2.15. Metakaolin içeren betonların eğilme dayanımı	24
Çizelge 2.16. Metakaolin katkılı harçlardaki küçük gözeneklerin yüzdesi	25
Çizelge 2.17. Metakaolin katkılı harçlardaki gözenek hacmi	25
Çizelge 2.18. Ortalama 28 günlük direnç ve hızlı klor geçirgenliği sonuçları	27
Çizelge 2.19. Metakaolin ve öğütülmüş pomza içeren fiber katkılı betonların basınç dayanımları	31
Çizelge 2.20. Metakaolin katkısının beton basınç dayanımına etkisi	32
Çizelge 2.21. Pomzanın kimyasal bileşenleri	33
Çizelge 2.22. Asidik ve bazik pomzanın kimyasal bileşenleri	34
Çizelge 2.23. Dünyadaki pomza rezervleri	34
Çizelge 2.24. Bölgelere göre rezerv dağılımı	35
Çizelge 2.25. Türkiye'deki pomza rezervi	35
Çizelge 3.1. Karışımlarda kullanılan çimento ve katkıların kimyasal özellikleri.....	48
Çizelge 3.2. Beton karışımlarında kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri.....	49
Çizelge 3.3. Beton karışımlarında kullanılan çelik fiberin özellikleri	51
Çizelge 3.4. Kullanılan agregaların dane çapı, özgül ağırlığı ve karışım oranı.....	52

Çizelge 3.5. Beton karışımlarında kullanılan agreganın elek analizi	53
Çizelge 3.6. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri	53
Çizelge 3.7. Bir metreküp beton karışımı için malzeme miktarları	55
Çizelge 4.1. Beton karışımlarının çökme ve taze birim ağırlık değerleri	66
Çizelge 4.2. Beton karışımlarının sertleşmiş birim ağırlık değerleri	69
Çizelge 4.3. Betonların ultrases geçiş hızı değerleri	72
Çizelge 4.4. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesinin değerlendirilmesi	72
Çizelge 4.5. Beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri	73
Çizelge 4.6. Betonların yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerleri	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Çimento ve öğütölmüş pomzanın elek analizi eğrileri	49
Şekil 3.2. Karışımlarda kullanılan agreganın elek analizi	52
Şekil 4.1. Fibersiz Betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri.....	67
Şekil 4.2. Fiberli betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri.....	67
Şekil 4.3. Betonların birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması	68
Şekil 4.4. Fibersiz betonların ultrases geçiş hızı değerleri	70
Şekil 4.5. Fiberli betonların ultrases geçiş hızı değerleri	71
Şekil 4.6. Betonların ultrases geçiş hızı değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.7. Fibersiz betonların küp basınç dayanımı değerleri.....	74
Şekil 4.8. Fiberli betonların küp basınç dayanımı değerleri	75
Şekil 4.9. Betonların 10 cm küp basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması	75
Şekil 4.10. Betonların 15 cm küp basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması	76
Şekil 4.11. Betonların yarmada çekme dayanımı değerleri.....	78
Şekil 4.12. Betonların yarmada çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.13. Betonların eğilme dayanımı değerleri.....	80
Şekil 4.14. Betonların eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.15. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi	82
Şekil 4.16. Fiberli betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	83
Şekil 4.17. Tüm betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi	83
Şekil 4.18. Fibersiz betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.....	84
Şekil 4.19. Fiberli betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.....	85
Şekil 4.20. Tüm betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.....	85
Şekil 4.21. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi..	86
Şekil 4.22. Fiberli betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi ...	86
Şekil 4.23. Tüm betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	87
Şekil 4.24. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	87
Şekil 4.25. Fiberli betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	88
Şekil 4.26. Tüm betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	88
Şekil 4.27. Fibersiz betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi..	89
Şekil 4.28. Fiberli betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi ...	90
Şekil 4.29. Tüm betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	90

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Kaolin	4
Fotoğraf 2.2. Metakaolin mineralinin büyütülmüş mikro-fotoğrafi	7
Fotoğraf 3.1. Çimento, silis dumanı ve öğütülmüş pomzanın görünümü.....	49
Fotoğraf 3.2. Beton karışımlarında kullanılan çelik fiberin görünümü	51
Fotoğraf 3.3. Taze betonun kalıplara yerleştirilmiş görünümü	56
Fotoğraf 3.4. Sertleşmiş beton numunelerinin görünümü	57
Fotoğraf 3.5. Sertleşmiş birim ağırlık deneyinin yapılışı	60
Fotoğraf 3.6. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı	61
Fotoğraf 3.7. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı	62
Fotoğraf 3.8. Yarmada çekme dayanımı deneyinin yapılışı	63
Fotoğraf 3.9. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışı	64

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Δ	Taze betonun birim ağırlığı
μs	Mikro saniye
\emptyset	Donatı çapı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
μm	Mikrometre
Ω	Ohm
π	Pi sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan standartları
A	Küp numunenin uzunluğu
b	Numune eni
cm	Santimetre
CH	Kalsiyum hidroksit
C_3A	Trikalsiyum alüminat
d	Numune yüksekliği
dk	Dakika
DK-I	Doğal kum-I
DK-II	Doğal kum-II
E_c	Statik elastisite modülü
E_d	Dinamik elastisite modülü
f_c	Basınç dayanımı
f_{fs}	Eğilme dayanımı
f_{sts}	Yarmada çekme dayanımı
g	Gram
gmol	Grammol
GPa	Gigapascal

k	Katsayı
kg	Kilogram
km	Kilometre
kN	Kilonewton
KT-I	Kırmataş I
KT-II	Kırmataş II
L	Numune uzunluğu
lt	Litre
m	Metre
mg	Miligram
mm	Milimetre
MK	Metakaolin
MPa	Megapascal
N	Kırılmaya neden olan yük
nm	Nanometre
ÖP	Öğütülmüş pomza
P	Taze beton ağırlığı
R ²	Düzeltilmiş korelasyon katsayısı
sn	Saniye
S	Dalganın gönderildiği yüzey ile alındığı yüzey arasındaki mesafe
SD	Silis dumanı
TS	Türk standartları
t	Süre ve ton
UK	Uçucu kül
U _{pv}	Ultrases geçiş hızı
vd.	Ve diğerleri
V _h	Taze betonun hacmi

BÖLÜM I

GİRİŞ

Beton, dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Betonun ana bileşenleri çimento, su, kum ve iri agregadır. Beton üretiminde, ana bileşenlere betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla değişik mineral ve kimyasal katkıları ilave edilmektedir. Beton bileşenlerinin özellikleri ve kullanım miktarları betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle, betonun yapısı çok karmaşıktır ve bileşenlerinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. Günümüzde çok geniş kullanım alanı olan betonun, kullanıldığı yerlere göre fiziksel ve mekanik özelliklerinin farklı olması istenmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri de, daha çok betonda kullanılan mineral ve kimyasal katkıları etkilemektedir. Bu katkıları belirli oranlarda kullanıldığı takdirde bu özellikler üzerinde olumlu etkileri olmaktadır.

Puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme çok eski zamanlardan beri inşaat alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Betonun temel bileşimlerinden olmayan bu malzemeler, gelişen beton teknolojisinde betonun çeşitli fiziksel, mekaniksel ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek ve üretimde ekonomi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve granüle yüksek fırın cürufu gibi atıkların yok edilmesiyle ilgili çevresel düzenlemelerdeki yeni eğilimler, bu atıkları beton üretiminde portland çimentosu yerine kısmen yapı malzemesi olarak kullanılmasına olan ilgiyi son yıllarda artırmıştır (Han vd., 2003). Ayrıca metakaolin ve zeolit gibi doğal puzolanik özelliğe sahip katkıları da beton üretiminde son yıllarda çimento yerine yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu katkıları özellikle yüksek dayanım ve yüksek dayanıklılık gerektiren yapılarda çimento ile belirli oranlarda yer değiştirilerek kullanılmaktadır. Bu katkıların beton içindeki davranışı fizikokimyasal bir olaydır. Bu davranışın fiziksel kısmı çimento matrisindeki, çimento ile agrega ara yüzeyindeki boşluk boyutunun küçülmesinden kaynaklanmaktadır. Kimyasal kısım ise zayıf kalsiyum-hidroksit kristallerini kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeline dönüştüren puzolanik reaksiyondan oluşmaktadır (Özcan, 2005; Özkul vd., 2004). Bu olaylar sonucunda beton dayanımı ve dayanıklılığı gelişerek istenilen özelliklerde beton elde edilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı beton karışımında çimento yerine belirli oranlarda mineral katkı malzemesi olarak metakaolin (MK) ve öğütülmüş pomza (ÖP) kullanılarak yüksek dayanımlı çelik fibersiz ve çelik fiberli beton üretmektir. Bu amaçla çalışmada kontrol betonları hariç 6 farklı seride 30 farklı karışımda beton üretilmiştir. Bu serilerde, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÖP ve %2.5, %5, %10 ve %15 oranlarında MK ile birlikte % 2.5, %5, %10 ve %15 oranlarında ÖP yer değiştirilerek farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Ayrıca bu karışımlarla aynı karışım oranlarına sahip çelik fiber içeren betonlar da üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda, taze beton özelliklerinden çökme ve taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerinden ise sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı (U_{pv}), basınç dayanımı (f_c), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve yarmada çekme dayanımı (f_{sts}) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar kontrol betonu ve diğer serilere göre karşılaştırılmıştır. Öncelikle, kontrol betonu ile diğer serilerdeki betonlardan elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı serilerdeki betonlar da birbirleri ile karşılaştırılmış ve en uygun mineral katkı oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece, beton karışımlarında MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP farklı oranlarda çimento yerine kullanılarak hem yüksek dayanımlı beton üretilebileceği hem de daha az çimento kullanılarak ekonomiklik sağlanabileceği deneysel sonuçlarla ortaya konmuştur.

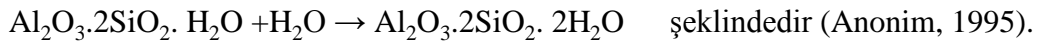
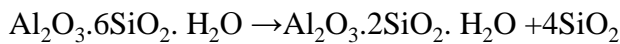
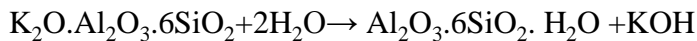
BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

2.1.Kaolin

Kaolin ismi, Çince “kao-ling” kelimesinden türemiş olup, anlamı Çin’de Kingto-Çen yakınında beyaz kaolinin bulunduğu yüksek tepedir. Çinliler porselen yapmak için bu tepeden kil üretmişlerdir (Hoşgün, 1996). Killer, feldspatça zengin magmatik ve volkanik kayaçların, kimyasal ve mekanik değişimleri sonucu oluşan, sulu alüminyum, magnezyum, demir, kalsiyum, potasyum gibi elementlerin silikatlarıdır. Kaolin kili; granit, gayns, feldspat, parfir, syenit, pegmatit gibi primer eruptif (magmadan çıkıp donan) kayaçların doğasal ve buna yardımcı fiziksel ve kimyasal etkenler ile aşınıp, bozunup, dağılıp, ufalanıp sürüklenmesi sonucu oluşmuştur. Kayaçların değişikliğe uğramalarında rüzgar, su, buz, ısı değişimleri, yer kabuğu hareketleri, karbondioksit, humik asit, kükürt asitleri, flor ve hidrojen gibi asitli gazlar etkili olmaktadır. Bozunan kayaçlar oldukları yerde kalabilir veya su, rüzgar gibi doğa olayları ile çok uzaklara da taşınabilir (Yapa, 1993).

Kaolinin ana minerali olan ortoklas (alkali feldspat), %64.5 SiO₂, %18.5 Al₂O₃ ve %17 K₂O içerir. Feldspatlar, yeraltı ve yerüstü suların ve asit bünyeli termal eriyiklerin etkisiyle içerdikleri potasyumun tamamını ve silisyumun bir kısmını kaybedip, bunların yerine bir miktar su alarak, bileşimi %46.5 SiO₂, %39.5 Al₂O₃ ve %14 H₂O olan kaolin mineraline dönüşürler. Bu olaya “kaolinleşme” denir (Yapa, 1993). Feldspat içeren granitik veya volkanik kayaçların kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünmüş tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al₂O₃ içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur. Bu oluşum sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar:



Kaolin, saf kaolinit veya ilgili kil mineralinden oluşmuş bir kil olup doğal olarak beyaz veya beyaza yakın renge sahip bir maddedir. Kimyasal formülü $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ olan kaolinin molekül ağırlığı 258.1 g/gmol, özgül ağırlığı 2.6 olup, sertliği 2 ile 2.5 arasında değişmektedir. Genelde beyazımsı renkte bulunan kaolin, gevşektir ve görünüm itibariyle toprağa benzemektedir (Grim, 1962). Kayaç şeklindeki bir kaolin Fotoğraf 2.1’de görülmektedir.



Fotoğraf 2.1. Kaolin (Rashad, 2013)

Kaolin sanayide geniş kullanım alanları olan bir malzemedir. Kaolin için her gün yeni bir kullanım alanı bulunmaktadır. Beyaz oluşu, ısı ve elektrik iletme açısından çok ciddi iletkenlik özelliğine sahip olması, yumuşak oluşu ve çok iyi kaplama niteliğine sahip olması nedeniyle eşsiz bir endüstriyel mineraldir (Tozan, 1995). Kaolinin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kaolinin fiziksel özellikleri (Prasad vd., 1991)

Özellik	Tanım
Renk	Genellikle beyaz, renksiz, yeşilimsi veya sarı
Parlaklık	Toprağımsı
Geçirgenlik	Kristaller saydamdır
Bölünme	Tek yönde mükemmel
Sertlik	1.5-2 arası
Özgül Ağırlık	2.6 (ortalama)

Türkiye'de üretilen kaolinlerin %60'ı çimento sektöründe, %30'u seramik, %10'u cam, kağıt ve diğer sektörlerde tüketilmektedir. Bu da Türkiye'de üretilen kaolinlerin ham olarak tüketildiğini göstermektedir. Avrupa ve Amerika'da kağıt ve kaolin endüstrisi çok gelişmiş olup, ham olarak üretilen kaolinlerin %75'i kağıt ve ince seramik üretim tesislerinde kullanılmaktadır (Anonim, 1995). Kaolinin çeşitli yapı ve spesifikasyonlarda olmasının en büyük nedeni, kaolini oluşturan ana kayaçların farklı olması ve bu kayaçların farklı taşınma ve yıkanma özelliklerine sahip olmasıdır (Malayoğlu ve Akar, 1995).

Amerika Birleşik Devletleri Georgia bölgesi kaolin yatağı, İngiltere'nin Cornwall bölgesi kaolin yatağı, Brezilya Riozari bölgesi kaolin yatağı ve Avustralya Weipa bölgesi kaolin yatağı bilinen büyük kaolin yataklarıdır. Dünyadaki büyük kaolin rezervlerinin bulunduğu bölgeler ve bu bölgelerdeki kaolin rezerv miktarları Çizelge 2.2'de verilmiştir (Tuncer, 1997).

Çizelge 2.2. Dünyadaki kaolin rezervleri (Tuncer, 1997)

Kaolin Rezervlerine Sahip Bölgeler	Miktar (Milyon Ton)
Amerika Birleşik Devletleri	3900
Güney Amerika	500
Amerika Toplam	4000
İngiltere	2500
Rusya	2000
Avrupa Toplam	6000
Afrika	800
Asya	1500
Avusturya	500
Diğerleri	500
Dünya Toplamı	14000

Türkiye'deki kaolin yatakları genellikle andezit, dasit, tuf ve granit varlığına bağlı olarak oluşmuşlardır. Kaolin yatakları yönünden Türkiye dört bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler ve bölgelerdeki kaolin olması muhtemel ümitli saha miktarları Çizelge 2.3'de verilmiştir. Türkiye'de kaolin yataklarını tespit etmek için yapılan araştırmalar sonucunda, 102 kaolin yatağı bulunmuştur. İşletilen yatakların büyük çoğunluğu Çanakkale, Balıkesir, Bursa, İstanbul, Bilecik, Kütahya, Eskişehir ve Uşak illerinin sınırları içerisinde bulunmaktadır (Çiflikli, 1998).

Çizelge 2.3. Türkiye’deki kaolin rezervleri (Çiflikli, 1998)

Bölge	Ümitli Saha (km ²)
Marmara	11000
Doğu Karadeniz	3000
İç batı Anadolu Eşiği	4000
Orta Anadolu	5000

2.2 Metakaolin

MK, 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 puzolandır (Vu, 2002). Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen MK, beyaz renkli, amorf yapılı bir alümina silikattır. Kil mineralleri genellikle 100 ile 200 °C arasında bünyelerindeki suyu kaybetmeye başlarlar. Kaolin kilinin MK mineraline dönüştüğü sıcaklık ise 500 ile 900 °C aralığındadır. Kaolin bu sıcaklık aralığında bağlı suyunun %14’ünü kaybeder ve MK mineraline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, kaolinin alumina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Bu işlemler sonucunda düzensiz, son derece puzolanik amorf bir yapıya sahip olan MK minerali oluşur. MK üretiminde ana unsur, gereğinden daha yüksek sıcaklığa maruz bırakmadan kaolin kilinin kalsine edilmesidir. Minerallerin bu termal aktivitesine kalsinasyon denir (Sun vd., 2005).

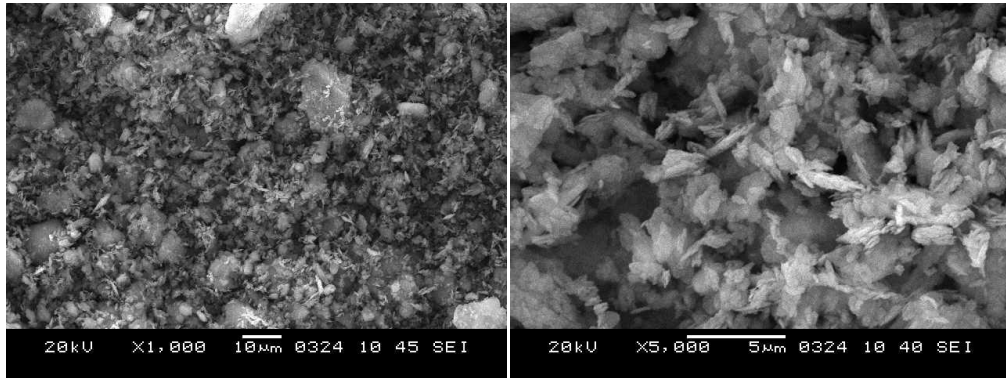
Kaolin kilinden yüksek puzolanik aktiviteye sahip MK üretmek için, kaolin kilinin ne kadar ve hangi sıcaklıkta ısıtılacağı araştırmacılarca birbirlerinden farklı rapor edilmiştir. MK elde edebilmek için kaolin kilinin ısıtılacağı sıcaklık 600 ile 850 °C arasındadır. Termal aktifliğine bağlı olarak kaolin kili bu sıcaklık aralığında 2, 4 veya 6 saat boyunca ısıtılabilir. Birçok araştırmacı, en iyi kalsinasyon koşullarının kaolin kilinin 700 °C sıcaklığında ısıtılması ile elde edilebileceğini rapor etmişlerdir (Rashad, 2013). Singh ve Garg (2006) yaptıkları çalışmada, kaolin kil numunelerini küçük boyutlarda kırmışlar ve 2 saat boyunca 600, 700 ve 800°C sıcaklıklarda ısıtmışlardır. Elde edilen ürünü toz formunda öğüterek 500 ile 550 m²/kg arasında blaine inceliğine sahip MK elde edilebileceğini göstermişlerdir.

2.2.1 Metakaolinin kimyasal bileşimi

Kimyasal olarak MK mineralinin temel bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 'tür. Bununla birlikte yapısında az miktarlarda Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O ve K_2O bileşenleri de bulunabilir. MK mineralinin mineral katkı olarak çimento ve beton içerisinde kullanılması ile çimento ve betona sağlayacağı faydalar daha çok SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine bağlıdır. Ticari amaçla kullanılan MK $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (metakaolinit) ve amorf veya az kristalli formdaki SiO_2 gibi aktif bileşikler içermektedir. Ancak, kaolin ve kaolinit killerinin suyunu tamamen kaybetmiş halleri tartışma konusu olmuştur. Daha önceleri, MK mineralinin amorf alüminyum ve silika oksitlerinin karışımından meydana geldiği belirtilmiştir. Daha sonraları ise MK mineralinin, kaolinitin bazı bünyesel özelliklerini açığa vurduğu kanıtlanmıştır. Bu günlerde ise araştırmacıların çoğunluğu, MK mineralinin amorf ve az kristalli formdaki metakaolinitten oluştuğu fikrine katılmaktadır (Seyhan, 1971).

2.2.2 Metakaolinin yapısı

MK tanelerinin oldukça küçük, çubuksu, şekilli ve köşeli formda olduğu belirtilmektedir. MK mineralinin tanecik yapısını incelemek amacıyla çekilmiş 1000 ve 5000 ölçekli taramalı elektron mikroskobu Fotoğraf 2.2'de gösterilmektedir. MK mineralinin çok ince tane boyutuna sahip olması ve çubuksu tanecik yapısı nedeniyle betondaki boşluklu yapıyı ve harç kıvamını azaltıcı etkisi bulunmaktadır (Tevrizci, 2010). MK mineralinin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.2 Metakaolin mineralinin büyütülmüş mikro-fotoğrafı (Tevrizci, 2010)

Çizelge 2.4. Metakaolin mineralinin fiziksel özellikleri (Siddique ve Klaus, 2009)

Özellik	Tanım
Özgül Ağırlık	2.6 (Ortalama)
Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	0.3-0.4
Fiziksel Form	Toz
Renk	Kirli Beyaz
Parlaklık	79-82

2.2.3 Metakaolinin aktivitesi

Puzolanik aktivite, çimentolu üretimlerde CH ve puzolanlardaki alümino silikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi olarak tanımlanır. Puzolanların aktivitesi hidrasyonun karmaşık özelliği ve puzolanların heterojen yapılarından dolayı tam olarak bilinmemektedir. Bununla beraber, puzolanik aktiviteyi etkileyen önemli faktörler şunlardır:

- Puzolanların aktivitesi, “SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃” içeriği ve malzemede reaktif bileşen miktarı arttıkça artar.
- Kimyasal reaktiflik içinde, puzolanik materyal amorf fazda olmalıdır.
- Puzolanik tanecikler yeterli incelikte olmalıdır (Erdoğan, 2003).

Bugüne kadar, puzolanik reaksiyonun ve beton üretiminde MK kullanılması ile betonun ana bileşenlerinde meydana gelen değişikliklerin incelendiği birçok çalışma yapılmıştır. Çimento hamuru ve beton üretiminde MK kullanılması, betonun hidrasyonu sırasında oluşan CH miktarını hızlı ve etkili bir şekilde azaltarak puzolanik ürünlerin oluşmasına neden olur. Bu olay, çimento hidrasyonu sırasında ve su varlığı ile gelişir. Puzolanik reaksiyonlar sonucunda, kristalli kalsiyum alüminat hidratları ve alümino silikat hidratları (C₂ASH₈, C₃AS₃H_{2x}, C₄AH₁₃, C₃AH₆) formundaki ürünler oluşur. Puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşan son bileşim, MK/CH oranı ve reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu puzolanik ürünler betonda oluşan gözeneklerin azalmasına neden olur. Toplam boşluk oranı ve ortalama boşluk boyutu azalmış olan beton daha yoğun bir yapıya sahip olur. Böylece betonun dayanımı ve dayanıklılığında artış gözlenir (Vu, 2002).

Betonun özellikleri ve hidrasyon reaksiyonu, MK malzemesinin reaktivitesine dolayısıyla MK üretiminde kullanılan kaolinin saflığına ve kalsinasyon şartlarına bağlıdır. Bir mineralin puzolanik reaktivite derecesi, deneysel olarak Chapelle deneyi ile belirlenebilir ve bir gram puzolanın CH tüketim oranı olarak ifade edilir (Akçay vd., 2013). Yapılan bir çalışmada, bir gram puzolanın CH tüketim oranı, MK için 1050 mg, SD için 427 mg ve UK için 875 mg olarak belirlenmiştir (Asbridge vd., 1994). MK mineralinin puzolanik reaksiyona girme derecesi çimento yerine ağırlıkça %10 ve %20 yer değiştirme oranlarına göre, %5 yer değiştirme oranında daha yüksektir. Puzolanik reaksiyon derecesinin düşük yer değiştirme oranında daha yüksek olması, betondaki yüksek CH konsantrasyonundan kaynaklanır (Siddique ve Klaus, 2009).

2.2.4 Metakaolinin çimento ve beton üretiminde kullanılması

Son yıllarda, MK beton üretiminde son derece aktif ve etkin bir puzolan olarak çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. MK katkısının 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 (Barness ve Bensted, 2001). MK katkısının portland çimentosunun bir kısmının yerine kullanılması sonucu elde edilen betonlar ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı inşaatında kullanılmıştır. MK, Jupia Barajı inşaatında betonun dayanıklılığını artırmak amacıyla kullanılmıştır. Bu tarihten sonra MK mineralinin çimento ve beton içerisinde kullanımında belirgin bir artış olmuştur. Bugün gelinen noktada ise, MK katkısının portland çimentosu ve normal beton içerisinde kullanımına ek olarak, yüksek performanslı beton ve harç içerisinde de kullanımı mevcuttur. MK ile ilgili yapılan araştırmaların önemli bir kısmı MK mineralinin beton üretiminde kullanılması ve uygun olan optimum MK miktarının belirlenmesine yöneliktir. MK katkısının portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanılması ve betona değişik oranlarda eklenen MK katkısının beton özelliklerine etkisi günümüzde de araştırılmaya devam etmektedir (Pera, 2001). MK, çeşitli alanlarda çimento ve beton üretiminde kullanılmaktadır. Bu alanlardan bazıları: yüksek performanslı, yüksek dayanımlı ve hafif beton üretimi; mimari, endüstriyel ve yapısal amaçlar için kullanılan prekast beton üretimi; fiber çimento ve ferro çimento üretimi; cam fiberli betonarme betonu üretimi; harç üretimi, alçı işleri, tamir işleri ve havuz imalatında sıva yapımı olarak sıralanabilir (Siddique ve Klaus, 2009).

2.2.5 Metakaolinin taze beton özelliklerine etkisi

MK üretimi için kullanılan kaolin kiline uygulanan sıcaklık miktarı ve kaolin kilini ısıtma süresi, MK katkılı çimento harçların kıvamlarının farklılaşmasına yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak MK katkılı betonların su ihtiyacı değişkenlik göstermektedir. MK katkısı, çimentonun hidrasyon sıcaklığını da önemli bir şekilde etkilemektedir. Beton ve harç karışımları üzerinde son yıllarda yapılan çalışmalar, MK katkılı karışımların yüksek puzolanik aktiviteleri nedeniyle mineral katkı içermeyen harçlara göre daha yüksek hidrasyon ısısına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar, MK katkısının betonun priz başlangıcını ve bitişini geciktirdiğini ortaya koymuştur.

Yapılan bir çalışmada, karışım suyu sabit tutularak hazırlanan betonlarda, MK içeriği ile betonda çökme değerinin azaldığı belirtilmiştir. Ancak MK katkısı çimento yerine ağırlıkça %5 gibi düşük oranlarda kullanıldığında, betonun işlenebilirliğini çok fazla etkilemediği gözlenmiştir. Karışımlardaki MK içeriği, %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılmasına rağmen önemli ölçüde kıvam kaybına yol açmıştır. Ancak, akışkanlaştırıcı katkı %1.2 oranında kullanıldığında kıvam kaybı yaşanmamıştır. Bu durum, uygun oranda akışkanlaştırıcı içeriği ile MK katkısının kıvam sorunu yaşanmadan çimento yerine yüksek oranlarda kullanılabileceğini göstermiştir (Qian ve Li, 2001). Yapılan bir deneysel çalışmada, kontrol numunesine göre, MK katkılı karışımların işlenebilirliğinin daha az olduğu, priz başlangıç ve bitiş süresinin ise geciktiği gözlenmiştir. Kontrol karışımı ve çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında MK içeren karışımların slump değerleri, priz başlangıç ve bitiş zamanları Çizelge 2.5'deki gibi elde edilmiştir (Brooks ve Johari, 2001). MK katkısının çimento yerine ağırlıkça %10 oranında kullanıldığı karışımlarda priz başlangıç ve bitiş zamanlarının diğer karışımlara göre daha geç olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 2.5. Metakaolin katkılı betonların slump değerleri ve priz alma zamanları (Brooks ve Johari, 2001)

Beton Karışımları	Slump (mm)	Priz Başlangıcı (saat)	Priz Sonu (saat)
Kontrol	100	5.00	7.70
%5 MK	30	6.42	8.82
%10 MK	20	6.98	9.42
%15 MK	5	6.45	9.31

Yapılan diğer bir çalışmada, MK katkısız harçlara göre, MK katkılı harçların priz başlama ve bitiş sürelerinin daha geç olduğu gözlenmiştir. Harçlardaki MK içeriğinin artışı ile birlikte, imento hamurunun su ihtiyaında önemli bir artış gözlenmiştir. Su-bağlayıcı oranı, numunelerde aynı kıvamı elde edebilmek için, numunelerdeki MK içeriğine bağlı olarak artırılmıştır. Çalışmada iki farkı kaynaktan elde edilmiş iki tür MK kullanılmış, biri MK diğerisi ise MKC olarak adlandırılmıştır. MK içermeyen kontrol karışımı ve imento yerine ağrılıka %10 ve %20 MK ve %20 MKC içeren harçların priz başlangıç ve bitiş zamanları ve karışımların su-bağlayıcı oranları izelge 2.6'da gösterilmiştir. Ayrıca, MK katkılı harçların su ihtiyaının mineral katkı içermeyen harçlara göre daha fazla olmasının nedeninin MK katkısının inceliği olduğu belirtilmiştir (Batis vd., 2005).

Çizelge 2.6. Metakaolin katkılı harçların su ihtiyaı ve priz alma zamanları (Batis vd., 2005)

Numune	Su İhtiyacı	Priz Başlangıcı (dakika)	Priz Sonu (dakika)
Kontrol	%27.5	105	140
%10 MK	%32.5	155	180
%20 MK	%41.0	205	230
%20 MKC	%37.5	140	170

Yapılan bir çalışmada, MK katkısının imento harçlarının priz alma süresine olan etkisini tespit edebilmek için su-bağlayıcı oranı sabit tutularak karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada farkı kaynaklardan elde edilmiş ve farkly yüzey alanlarına sahip iki tür MK kullanılmıştır. Hazırlanan bu karışımlarda, deneylerde kullanılan her iki MK türünün de harçların priz alma süresini önemli ölçüde geciktirdiği tespit edilmiştir. Daha büyük yüzey alanına sahip olan MK katkılı harçlar, daha kk yüzey alanına sahip MK katkılı harçlara göre daha erken priz almıştır. Bu durum, kullanılan MK katkısının yüzey alanının artışı ile birlikte, harçların daha erken priz aldığını göstermektedir. Hazırlanan karışımlarda, MK içermeyen kontrol numunesi ile aynı kıvamı elde edebilmek için, kontrol numunesine göre, daha büyük yüzey alanına sahip olan MK içeren harçlarda üç kat su kullanılmıştır. Kontrol numunesi ile aynı kıvamı elde edebilmek için, kontrol numunesine göre, daha kk yüzey alanına sahip olan MK katkılı harçlarda ise iki kat su kullanılmıştır. Bu durum, MK toplam yüzey alanının artışı ile birlikte işlenebilirliğin azaldığını göstermiştir (Justice ve Kurtis, 2007).

2.2.6 Metakaolinin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

MK katkısının ileri yaşlardaki pasta, harç ve betonun, dayanım ve dayanıklılık gibi ana özellikleri üzerinde etkileri vardır. Literatürde yapılmış olan çalışmaların sonucunda, betondaki MK içeriği ile birlikte betonun f_c , f_{ts} ve yoğunluk değerlerinin arttığı; kimyasal ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığının da geliştiği sonucuna varılmıştır. Bu olumlu etkilerin temelini oluşturan mekanizmalar ise; puzolanik reaksiyonları esas alan kimyasal dayanım ve çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurma özelliğini esas alan fiziksel dayanımdır (Vu, 2002).

Yapılan bir literatür taraması çalışmasında MK katkısının oldukça etkili bir puzolan olduğu sonucuna varılmıştır. MK katkısının çimento ve beton üretiminde kullanılmasının sertleşmiş beton özelliklerine olan yararlı etkileri literatürdeki çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlar göstermektedir. Bu sonuçlara göre; MK, beton ve çimento harcının ileri yaşlardaki dayanım özelliklerini geliştirmede oldukça etkin bir malzemedir. Beton üretiminde çimento yerine kısmen belirli oranlarda MK kullanımı, suyun kılcal yolla betona difüzyonunu azaltır. MK, betonun gözenek yapısını değiştirir ve geçirgenliğini azaltır. Bu sayede suyun beton içerisindeki hareketi ve beton matrisinin bozulmasına neden olabilecek zararlı iyonların difüzyonunu kısıtlar. Ayrıca, MK içeriği betonun sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını geliştirmede oldukça etkilidir. Çimento yerine ağırlıkça %10 ve %15 MK kullanılan betonlar sülfat saldırısına karşı mükemmel dayanıklılığa sahiptir. Ayrıca, MK katkılı betonlar, MK katkısız betonlara göre zararlı kimyasallara karşı daha dayanıklıdır. Beton üretiminde çimento yerine ağırlıkça %10 ve %15 aralığında yüksek reaktiflikte MK kullanımının, alkali-silika reaksiyonlarının neden olduğu zararlı genleşmeleri kontrol altına almak için yeterli olabileceği gözlenmiştir (Siddique ve Klaus 2009).

Agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki geçiş ara yüzeyi, çimento hamurundan daha boşluklu bir yapıya ve çimento hamurunun su-bağlayıcı oranından daha yüksek su-bağlayıcı oranına sahiptir. Bu nedenle geçiş ara yüzey, betonun zayıf noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Beton üretiminde, çimento yerine çimentoya göre daha ince tanecik boyutuna sahip olan MK katkısının kullanımı, geçiş ara yüzeyinin daha boşluksuz ve yoğun bir hale gelmesini sağlar (Khatib, 2008).

Agrega ile çimento hamuru arasındaki geçiş ara yüzeyinde bulunan mikro yapıdaki geçişlerin karakteristik yapıları ve dayanım özellikleri mikro sertlik olarak ifade edilmektedir. Yapılan bir çalışmada, portland çimentosu yerine belirli oranlarda kullanılan MK, çimento hamuru matrisinin ve geçiş ara yüzeyinin mikro sertliğini artırmıştır. Bu çalışmada, MK katkısı içermeyen kontrol numunesine göre, MK içeren numunelerin mikro sertliğinin; 0.5 su-bağlayıcı oranı ile hazırlanan karışımlarda %13, 0.6 su-bağlayıcı oranı ile hazırlanan karışımlarda ise %54 daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, MK katkısının kullanılması çimento hamuruna daha homojen bir yapı kazandırdığı gözlenmiştir (Asbridge vd., 2002).

Literatürde 20nm ve daha küçük boşlukların betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, 20nm den daha büyük boşlukların betonun dayanım gelişimi üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu, 160nm den daha büyük boşlukların ise betonun dayanımını azalttığı ve betonun geçirimsizliğini artırdığı deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Yapılan bir çalışmada, beton üretiminde, çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda iki farkı kaynaktan elde edilmiş iki tür MK kullanılmış ve biri MK diğeri ise MKC olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada, MK içermeyen kontrol numunesi ile birlikte farklı oranlarda MK ve MKC içeren betonlardaki 20nm den küçük, 20 ile 160nm arasında ve 160nm den daha büyük boşlukların hacmi belirlenmiş ve Çizelge 2.7’de gösterilmiştir. MK katkılı betonlarda, kontrol betonuna göre, 20nm ile 160nm arasındaki boşlukların ve 160nm den daha büyük boşlukların hacminin daha az olduğu Çizelge 2.7’de görülmektedir. MK katkılı betonlarda, MK katkısız betonlara göre, 20 ile 160nm arasındaki boşlukların ve 160nm den daha büyük boyutlu boşlukların hacminin daha az olması MK katkılı betonların daha yüksek dayanımlara ve dayanıklılığa ulaşmasını sağlamıştır. (Badogiannis ve Tsivilis, 2009).

Çizelge 2.7. Numunelerin seçilen kesitlerinin gözenek hacimleri
(Badogiannis ve Tsivilis, 2009)

Numune	Boşluk Hacmi (mm ³ /g)		
	<20nm	>20nm	>160nm
Kontrol	7.0	44.8	7.0
%10 MKC	8.5	42.9	6.5
%20 MKC	9.1	43.2	4.1
%10 MK	3.7	27.5	2.6
%20 MK	8.2	37.8	3.9

Çimento hamurundaki MK içeriği, sadece toplam poroziteyi değil aynı zamanda boşluk boyutu dağılımını da etkiler. Çimento hamuru içerisinde bulunan MK miktarındaki artış daha küçük boşluklara yol açmaktadır. Dolayısıyla, MK miktarındaki artış ile mikro boşlukların (0.006-0.02 μm) miktarı artar ve daha büyük boşlukların (yarıçap>0.02 μm) oranı azalır. Boşluk dağılımının düzenlenmesi ileri yaşlarda da meydana gelir. Bu düzenleme derecesi MK oranına bağlı olarak değişir (Frias ve Cabrera, 2000).

2.2.6.1 Metakaolinin beton basınç dayanımına etkisi

Beton ve harcın dayanım özellikleri, malzemenin boşluk karakteri ile hidrasyon ürünlerinin türü, şekli, büyüklüğü ve dağılımıyla doğrudan etkileşim halindedir. MK katkılı betonlarda f_c üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, uygun oranlarda MK kullanımı ile betonların f_c değerlerinde önemli artışlar kaydedilmiştir. Yapılan bir çalışmada, MK içermeyen kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 MK içeren betonların f_c değerlerinin daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. MK katkılı betonların f_c değerlerinin aynı seviyede SD içeren betonlardan biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, MK katkılı betonlarda f_c değerlerinin artışının 365 güne kadar devam ettiği gözlenmiştir (Caldarone vd., 1994).

MK katkılı betonların MK katkısız betonlara göre daha yüksek f_c değerlerine ulaşması üç temel nedene bağlıdır. Bunlar; MK katkısının; boşluk doldurucu etkisi, betonun hidrasyon hızını artırması ve puzolanik aktivitesidir. Yapılan bir çalışmada, farklı karışım oranlarında hazırlanmış betonlardan elde edilen f_c ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, MK içermeyen kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 MK içeren betonların f_c değerlerinin 7. günden itibaren daha yüksek olduğu Çizelge 2.8'de gösterilmiştir. MK katkısının puzolanik etkisi, özellikle %15 MK katkılı betonlarda, 1. günden itibaren 90. güne kadar her yaşta belirgindir. Bu çalışmada, MK katkılı betonların yoğunlukları, MK katkısız kontrol numunesine göre daha düşük çıkmıştır. MK katkılı betonların yoğunluklarının daha düşük olmasının nedeni olarak MK katkısının yoğunluğunun çimentodan daha düşük olması gösterilebilir. Ayrıca bu çalışmada, optimum MK yer değiştirme oranının % 20 olduğu belirtilmiştir (Wild vd., 1996).

Çizelge 2.8. Metakaolin katkılı betonların basınç dayanımları ve yoğunlukları (Wild vd., 1996)

MK Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)				
		1 gün	7 gün	14 gün	28 gün	90 gün
%0	2490	19.07	50.23	57.10	62.60	72.43
%5	2440	21.50	53.80	58.97	63.50	71.63
%10	2460	22.43	62.30	69.23	71.00	80.07
%15	2470	20.23	64.80	74.67	76.00	83.70
%20	2480	19.33	66.47	75.73	82.47	85.13
%25	2470	15.73	62.50	69.77	73.93	82.23
%30	2480	14.53	60.53	72.33	76.73	81.80

Yapılan bir çalışmada, MK ve SD katkılı yüksek performanslı betonlar üretilmiştir. Çalışmada, 2 grup numune serisi ile 12 farklı karışım elde edilmiştir. Birinci grup karışımında, su-bağlayıcı oranı 0.3, ikinci grup karışımında ise su-bağlayıcı oranı 0.5 olarak tasarlanmıştır. Her bir grupta; çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %20 MK, çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 SD ve hiç mineral katkı içermeyen kontrol numuneleri üretilmiştir. Deneysel sonuçlar bu çalışmada kullanılan MK katkısının beton dayanımını geliştirme açısından SD katkısından daha üstün olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, %10 SD içeren betonlara göre, %10 MK içeren betonların f_c değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Betonlarda MK ve SD içeriğinin kullanılmasının betonun f_c değerlerini özellikle ileri yaşlarda artırıcı yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. MK içeren betonlarda her yaşta özellikle de 3 günlük numunelerde kontrol numunelerine göre daha yüksek dayanım artışı olduğu belirtilmiştir. Buna rağmen SD kullanılan numunelerde 3. günde önemli bir dayanım artışı gözlenmemiştir. Bununla birlikte, kontrol betonlarına göre, 28. günden itibaren tüm SD katkılı betonların f_c değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. MK ve SD içeren betonların f_c deney sonuçları Çizelge 2.9.'da gösterilmiştir. Su-bağlayıcı oranının daha yüksek olduğu ikinci serideki numunelere göre, su-bağlayıcı oranının daha düşük olduğu birinci serideki numunelerde beklendiği üzere daha yüksek f_c değerlerine ulaşılmıştır. Deney sonuçlarında kullanılan her bir değer üç küp numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, yüksek dayanımlı beton üretmek için çimento yerine %10 MK kullanılmasının uygun olduğu gözlenmiştir. (Poon vd., 2006).

Çizelge 2.9. Metakaolin ve silis dumanı içeren betonların basınç dayanımı (Poon vd., 2006)

Seriler	Su-çimento Oranı	Karışım (%)	Basınç Dayanımı (MPa)			
			3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
1	0.3	Kontrol	68.50	81.10	96.50	102.50
		5 MK	73.00	88.20	103.60	112.90
		10 MK	85.90	99.80	116.80	120.30
		20 MK	70.80	87.60	99.60	113.80
		5 SD	67.00	79.30	106.50	110.20
		10 SD	63.20	76.90	107.90	115.60
2	0.5	Kontrol	28.60	41.20	52.10	60.40
		5 MK	32.60	45.90	57.10	66.50
		10 MK	40.40	55.20	66.20	71.60
		20 MK	30.00	43.20	58.40	69.10
		5 SD	27.40	47.00	54.30	67.50
		10 SD	25.80	47.40	58.40	69.10

2.2.6.2 Metakaolinin beton eğilme dayanımına etkisi

MK katkısının betonların f_{fs} değerleri üzerine olumlu etkisinin olduğu yapılan çalışmalarda gözlenmiştir. MK katkısı, çimento hamuru içerisindeki boşlukları doldurması ve CH ile reaksiyona girerek ekstra kalsiyum silika hidrat jeli üretmesi sonucu f_{fs} değerleri üzerinde olumlu etki yapmaktadır. Deneysel bir çalışmada, ultra yüksek performanslı betonlar üzerine MK ve SD katkılarının etkisi araştırılmıştır. Çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda SD ve MK katkıları kullanılarak beton üretilmiştir. Ayrıca karışımlarda çelik fiber ve kırılmış quartz kumu kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler farklı sıcaklıklarda küre tabi tutulmuş ve numuneler üzerinde f_{fs} deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek f_{fs} sonuçlarını MK, quartz kumu ve fiberin birlikte kullanıldığı 150 °C küre tabi tutulan karışımda gözlenmiştir. Bu karışımda f_{fs} 40 MPa olarak tespit edilmiştir. MK katkılı betonların f_{fs} değerleri, SD katkılı betonlar ile yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. Betonda fiberlerin varlığının betonun f_{fs} değerlerini geliştirdiği rapor edilmiştir. Sonuç olarak ultra yüksek performanslı beton üretiminde MK katkısının kullanılabilceği belirtilmiştir (Tafraoui vd., 2009). Yapılan diğer bir çalışmada, yüksek reaktiflikteki MK ve SD katkılarının fiber içeren yüksek performanslı betonların eğilme tokluğu üzerine etkisi araştırılmıştır. MK veya SD içeren

yüksek performanslı betonların eğilme tokluğunun puzolan içermeyen kontrol betonuna göre %15 daha fazla olduğu gözlenmiştir. Puzolan içermeyen betonların eğilme tokluğunun, %1 çelik fiber ilavesi ile puzolan içeren betonların eğilme altındaki kırılma tokluğu ile aynı olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda, çelik fiber içeren betonların kırılma davranışı incelendiğinde, en yüksek enerji yutma performansına sahip olan betonların MK içeren betonlar olduğu gözlenmiştir. SD içeren betonlar ise MK içeren betonlara göre daha gevrek davranış ve zayıf enerji yutma performansı göstermiştir (Dubey ve Banthia, 1998).

Başka bir çalışmada, çeşitli hızlandırılmış kür yöntemlerinin değişik oranlarda MK içeren çimento harçlarının f_{fs} değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK içeren 5 farklı harç karışımı tasarlanmıştır. Harç karışımlarının agrega-bağlayıcı oranı ağırlıkça 3:1, bağlayıcı madde-su oranı ise 0.5 olarak belirlenmiştir. Çimento yerine MK kullanılan harçlarda en yüksek f_{fs} değerleri %15 MK katkılı harçlarda elde edilmiştir. Ayrıca, hızlandırılmış kür uygulamaları ile en yüksek f_{fs} değerlerine %10MK içeren harçlarda ulaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, MK katkısının üretilen harçların f_{fs} değerlerine erken yaşlarda da katkısının olduğu görülmüştür (Yazıcı vd., 2010).

2.2.6.3 Metakaolinin beton yarmada çekme dayanımına etkisi

Beton veya harçlarda MK içeriğinin beton ve harçların f_{sts} değerlerini artırdığı, daha yoğun bir beton elde edilmesine olanak tanıdığı değişik araştırmacılarca rapor edilmiştir. Yapılan bir çalışmada, artan MK içeriği ile birlikte, betonun f_{sts} değerlerinin sistematik bir şekilde arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada, MK katkısız kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 MK katkılı betonların f_{sts} değerleri Çizelge 2.10.'da gösterilmiştir (Qian ve Li, 2001).

Çizelge 2.10. Metakaolin içeren betonların çekme dayanımı (Qian ve Li, 2001)

	Çekme Dayanımı (MPa)
Karışımlar	28 gün
Kontrol	3.35
MK5	3.58
MK10	3.88
MK15	4.29

Yapılan diğler bir çalışmada, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %8, %16 ve %24 oranlarında MK içeren betonlar üretilmiştir. MK kullanımı ile betonun rijitliğı artmıştır. Benzer etkinin diğler mekanik özellikler üzerinde de mevcut olduğı görülmüştür. MK içermeyen betonların kırılma davranışları incelendiğinde, su-bağlayıcı oranı arttıkça bu betonların enerji yutma kapasitesinin belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. MK katkılı betonların yük-deplasman eğrisinin tepe yükünün, MK katkısız betonlara göre daha yüksek olduğı belirtilmiştir. Su-bağlayıcı oranı 0.42 olan betonlarda MK ilavesiyle f_{fs} değerlerinde önemli artışlar tespit edilmiştir. Bu çalışmada, özellikle bağlayıcı miktarlarının az olduğı karışımlarda MK ilavesiyle f_c değerlerinde olduğı gibi f_{fs} ve f_{sts} değerlerinde de artış olduğı gözlenmiştir (Akçay vd., 2013).

2.2.6.4 Metakaolinin beton elastisite modülüne etkisi

MK katkısının çimentoya göre daha fazla özgül yüzeye sahip olmasından ve daha ince taneli olmasından dolayı çimento hamurunda bulunan boşluk büyüklüğünü ve miktarını azaltarak daha yoğun bir beton elde edilmesine olanak sağlayarak betonun elastik özelliklerini geliştirir. Yapılan bir çalışmada, MK katkılı betonların performansı araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %7.5, %12.5, %15 ve %20 oranlarında MK içeren karışımlar üretilmiştir. MK katkılı betonların E_d değerleri deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. MK katkılı betonların E_d değerlerinin kontrol numunesine göre daha yüksek olduğı gözlenmiştir. Düşük su-bağlayıcı oranı ile üretilen betonlarda en yüksek E_d gelişimi için çimento yerine %15 MK kullanılabileceğı önerilmiştir. Su-bağlayıcı oranı daha yüksek olan karışımlarda ise en uygun yer değıştirme oranının %15'ten daha düşük seviyede olduğı rapor edilmiştir. MK katkılı betonların E_d değerleri, f_c değerleri ile paralellik göstermiştir. Karışımlarda en yüksek E_d değerlerine çimento yerine ağırlıkça %12.5 ve %15 arasındaki oranlarda MK içeren karışımlarda ulaşılmıştır. Çalışmada, MK miktarı arttıkça betondaki uzunluk değışiminin azaldığı gözlenmiştir. Hazırlanan karışımlarda, MK miktarı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığı gözlenmiştir (Khatib, 2008).

Yapılan diğler bir çalışmada, MK katkılı harçlarda çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda kullanılan MK katkısının yüzey alanının, harçların performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol numunesi ile birlikte,

çimento yerine ağırlıkça %8 oranında benzer mineralojik özelliğe sahip olup yüzey alanları farklı olan iki tür MK içeren harç numuneleri üretilmiştir. Su-bağlayıcı oranı ise 0.40, 0.50 ve 0.60 olarak belirlenmiştir. MK katkılı harçların E_d değerlerinin özellikle düşük su-bağlayıcı oranı ile üretilen karışımlarda kontrol numunesine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, MK katkılı harçların E_d değerlerinin kontrol numunesine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, 28 günlük numuneler üzerinde yapılan deneyler, MK inceliğinin harçların E_d değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. MK katkısının E_d değerleri üzerine etkisi ile ilgili yayınlanan bazı verilerin bir özeti bu araştırmada elde edilen verilerle birlikte Çizelge 2.11’de verilmiştir. Bu verilerde su-bağlayıcı oranının E_d değerleri üzerine olan olumsuz etkisi oldukça belirgindir. Çizelge 2.11’de MK235 daha büyük tanecik boyutuna sahip MK, MK349 ise daha küçük tanecik boyutuna ve daha büyük yüzey alanına sahip MK olarak ifade edilmiştir (Justice ve Kurtis, 2007).

Çizelge 2.11.Metakaolin katkısının elastisite modülü üzerindeki etkisi
(Justice ve Kurtis, 2007)

Yazar/Kaynak	Su-Bağlayıcı Oranı	MK Oranı (%)	Elastisite Modülü (GPa)
Qian ve Li (2001)	0.38	10	33.2
Calderone vd. (1994)	0.4	10	38.9
MK235	0.4	8	34.6
MK349	0.4	8	34.4
Khatib ve Hibbert (2005)	0.5	10	38.0
MK235	0.5	8	30.7
MK349	0.5	8	30.8
MK235	0.6	8	27.7
MK349	0.6	8	28.3

2.2.6.5 Metakaolinin beton dayanıklılığına etkisi

Bağlayıcı maddenin betonun dayanıklılığına etkisi büyüktür, çünkü betondaki bozulmaya yol açan faktörler genelde bağlayıcı tarafından yönetilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalardan MK katkısının beton dayanıklılığı üzerine etkilerinin kompozisyon, puzolanik aktiflik ve eklenme oranı gibi faktörlere dayandığı sonucu çıkarılabilir. Özellikle çimentonun MK ile yer değiştirilmesi, harç ve beton dayanıklılığını artırdığı yapılmış çalışmalarda belirtilmiştir. Bu özellik temelde CH içeriğindeki azalma ve harç ile betondaki çimento hamurunun mikro yapısının geliştirilmesine bağlıdır. CH, olumsuz çevre koşullarına maruz kalan çimento hamuru

ve betonların dayanıklılığını etkileyen önemli bileşiklerden biridir. CH ayrıca, etrenjit oluşumuna katılabilen jipsi ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oluşturmak üzere sülfat bileşikleriyle de reaksiyona girebilir. Bu durum, harç ve betonda genişlemeye yol açabilir. MK katkısının çimento hamuru ve betondaki varlığı, CH içeriğini ciddi miktarlarda azaltır. Sonuç olarak, olumsuz çevre koşullarına maruz kalan çimento hamuru ve betonun dayanıklılığı artar. Portland çimentosu içerisindeki C_3A içeriğinin, harç ve betonun kimyasal genişmesi üzerine belirgin etkileri olduğu çok önceden kanıtlanmıştır. C_3A hidratasyonu sırasında büyük ısı açığa çıkar ve asıl önemlisi kalsiyum sülfat ile birleşerek büyük hacimli etrenjit (candlot tuzu) oluşturur. Bu iki olay betonu olumsuz etkiler. Kütle betonu (baraj vs.) ve agresif sularla temastaki betonlarda (kuyu, rıhtım, iskele, köprü ayağı gibi) genişme ve çatlaklara neden olur. Bu tür yerlerde kullanılacak betonların çimentolarında C_3A oranının düşük olması istenir. Karışımlarda çimento yerine %10 oranına kadar MK kullanılmasıyla C_3A içeriği kontrol altına alınarak harçlardaki genişme azaltılır. Sonuç olarak, genişme riski uygun oranlarda MK kullanılmasıyla azaltılabilir ve daha yüksek dayanıklılığa ulaşılabilir (Vu, 2002).

Yapılan bir çalışmada, sülfat saldırısına uğrayan betonların dayanıklılığı üzerine çimento yerine ağırlıkça belirli oranlara kullanılan MK katkısının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında MK içeren karışımlar kullanılmıştır. Karışımlarda su-bağlayıcı oranı 0.5 ve 0.6 olarak belirlenmiştir. Sülfat etkisini belirlemek için prizmatik ve küp numuneler kullanılmıştır. Beton numuneleri 18 ay boyunca %5 sodyum sülfat içeren solüsyona maruz bırakılmıştır. Sülfat saldırısının MK katkılı beton numuneleri üzerindeki etkileri; prizma numunelerdeki genişmenin ölçümü, küp numunelerdeki sülfat saldırısının neden olduğu f_c değerlerindeki azalma miktarlarının gözlenmesi ve tüm beton numunelerdeki çatlakların görsel denetimi ile belirlenmiştir. Prizmatik numuneler üzerinde yapılan deneylerde, betonlardaki sülfat genişlemesinin MK içeriği ile birlikte azaldığı gözlenmiştir. Sülfat etkisini belirlemek için yaptıkları f_c deneylerinde ise MK içeriği arttıkça küp f_c değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. 0.5 su-bağlayıcı oranına sahip MK katkılı betonların sülfat dayanıklılığının, 0.6 su-bağlayıcı oranında üretilen MK katkılı betonlara göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %10 ve %15 oranlarında MK içeren betonların sülfat saldırısına karşı çok iyi dayanıklılık gösterdiğini belirtmiştir. Su-bağlayıcı oranı 0.5 olan karışımlarda kontrol numunesinde %0.4 olan sülfat genişmesi

oranı MK içeriğinin artışıyla birlikte %0.08'e kadar düşmüştür. Su-bağlayıcı oranı 0.6 olan karışımlarda ise kontrol numunesinde %0.45 olan sülfat genleşmesi oranı MK içeriğinin artışıyla % 0.1'e kadar düşmüştür (Al-Akhras, 2006).

Yapılan diğer bir çalışmada, betonun kimyasal direnci üzerine SD, MK ve düşük kalsiyum içerikli UK katkısının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada su-bağlayıcı oranı 0.36 ve 0.40 olarak belirlenmiştir. Olumsuz çevre koşullarını oluşturmak için sülfürik asit, hidroklorik asit, nitrik asit, asetik asit, fosforik asit, sodyum ve magnezyum sülfat karışımları kullanılmıştır. Betonların kimyasal direncini tespit edebilmek için numunelerin f_c değerleri belirlenmiştir. SD ve UK katkılı betonlara göre, MK katkılı betonlarda daha yüksek f_c değerlerine ulaşılmıştır. Deneysel çalışmada SD, MK ve UK katkılarının kullanılmasıyla numunelerin kimyasal dirençlerinin arttığını belirtilmiştir (Roy vd., 2001).

2.2.6.6 Metakaolinin beton geçirimsizliğine etkisi

MK, harç ve betonun boşluk dağılımı ile boşluk yapısını kuvvetli bir şekilde etkileyerek zararlı maddelerin nakil ve difüzyon hızlarında belirgin bir düşüş meydana gelmesini sağlar. Betonda MK kullanımı ile birlikte büyük gözeneklerin oranı azalır, gözenekler daha süreksiz hale gelir ve böylece betonun geçirimsizliği azalır. Betonda, agrega ile matris arasındaki geçiş ara yüzeyi, nakil özellikleri ile betonun dayanıklılığının belirlenmesinde önemli rol oynar. Harç ve beton içerisine puzolanik mineral katkıların eklenmesi CH içeriğini düşürür. Bu da boşluk dağılımının daha düzenli olmasını sağlar ve çimento hamuru-agrega geçiş ara yüzeyindeki sarılma yoğunluğunu artırır. Böylece çimento hamuru ve agrega arasındaki bağın gücünün artmasıyla mikro çatlak oluşumuna karşı dayanım yükselir. Böylece MK katkılı betonlar MK katkısız betonlara göre daha geçirimsiz bir yapıya sahip olur.

Yapılan bir çalışmada, MK katkılı betonların klor geçirgenliği belirlenmiş ve SD katkılı betonlarla kıyaslanmıştır. Hızlı klor geçirgenliği deney sonuçları Çizelge 2.12'de gösterilmiştir. Çizelge 2.12'de gösterilen coulomb değerleri betonlardan geçen şarjı göstermekte olup, şarj değeri düştükçe betonun klor geçirgenliği daha düşüktür. Hem MK hem de SD içeren betonlarda toplam geçen şarjın, kontrol numunesine göre daha

düşük olduğu belirlenmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %20 MK kullanılan betonlarda klor geçirgenliği açısından en iyi performans elde edilmiştir (Poon vd., 2006).

Çizelge 2.12. Kontrol betonunun ve katkılı betonların klor geçirgenliği (Poon vd., 2006)

Seri	Su-bağlayıcı oranı	Karışım (%)	Toplam Geçen Şarj (Coulomb)			
			3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
1	0.3	Kontrol	2461	2151	1035	931
		5 MK	1327	1244	862	646
		10 MK	417	347	199	135
		20 MK	406	395	240	124
		5 SD	1060	945	665	426
		10 SD	567	445	360	336
2	0.5	Kontrol	5312	4054	2971	2789
		5 MK	4215	3765	2079	1065
		10 MK	1580	1247	918	752
		20 MK	751	740	640	580
		5 SD	3156	2047	1641	1235
		10 SD	3140	1877	1523	1053

Yapılan diğer bir çalışmada, betonun dayanıklılığı üzerine MK katkısının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında MK içeren karışımlar kullanılmıştır. MK içeren betonların dayanıklılığını belirlemek için numuneler üzerinde klor geçirgenliği ve gaz geçirgenliği deneyleri yapılmış, toplam boşluk ve ortalama boşluk boyutu değerleri belirlenmiştir. MK içeren karışımların klor geçirgenliği, gaz geçirgenliği, kılcal geçirimsizliği, toplam boşluk ve ortalama boşluk boyutu değerleri Çizelge 2.13’de gösterilmiştir. Çizelge 2.13’de gösterilen her bir değer, üç küp numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol çalışmalarına göre MK içeren karışımların klor geçirgenliğinin, gaz geçirgenliğinin ve kılcal geçirimsizliğinin daha az, toplam boşluk oranının daha düşük ve ortalama boşluk boyutunun ise daha küçük olduğu gözlenmiştir. Çizelge 2.13’de gösterilen coulomb değerleri betonlardan geçen şarjı göstermekte olup, şarj değeri düştükçe betonun klor geçirgenliği daha düşüktür. Çalışmada iki tür MK kullanılmış, biri MK diğeri ise MKC olarak adlandırılmıştır. MKC olarak adlandırılan MK katkısının, MK olarak adlandırılan katkıya göre klor geçirgenliğinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak da farklı kaynaklardan alınan bu katkıların kimyasal yapılarının farklı olması gösterilebilir (Badogiannis ve Tsivilis, 2009).

Çizelge 2.13. Metakaolin içeren betonların geçirimsizlik özellikleri ve boşluk yapısı (Badogiannis ve Tsivilis, 2009)

Numune	Klor Geçirgenliği (Coulomb)	Gaz Geçirgenliği $m^2 \times 10^{-16}$	Kılcal Geçirimsizliği $mm \times dk^{0.5}$	Porozite (%)	Ortalama Boşluk Boyutu (nm)
Kontrol	2460	2.94	0.114	11.1	96
% 10-MKC	730	1.68	0.097	11.0	70
% 20-MKC	240	1.45	0.089	11.2	55
% 10-MK	690	1.35	0.080	7.20	74
% 20-MK	760	1.60	0.067	10.3	62

2.3 Metakalon ile Yapılmış Çalışmalar

Literatürde MK malzemesi üzerine yapılan araştırmalar genelde iki ana alana odaklanmıştır. Birincisi kaolin kilinin yapısı ve kaolin kilinin MK mineraline dönüşümü üzerine, ikincisi ise MK mineralinin puzolanik aktivitesi ve çimento, harç ve beton özelliklerine etkisi üzerinedir. Qian ve Li (2001), deneysel çalışmalarında MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında MK içeren karışımlar kullanmışlardır. Elde ettikleri yüksek performanslı betonların E_c , f_{fs} , f_c ve f_{sts} değerleri üzerine çalışmışlardır. MK içeren betonların f_{sts} ve maksimum deplasman değerleri artan MK içeriği ile birlikte artmıştır. Beton üretiminde MK kullanımının, f_c değerlerini özellikle erken yaşlarda artırdığını ve ileri yaşlarda da f_c değerlerini artırıcı etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Çizelge 2.14’de gösterilen sonuçlara göre MK miktarının betonların E_c değerleri üzerinde etkisinin az olduğu, sadece küçük artışlar gösterdiği; f_c değerleri üzerinde ise belirgin bir artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca betonun f_{fs} ve f_c değerleri üzerine en etkili MK yer değiştirme oranının % 15 olduğu gözlenmiştir. MK katkısının betonların f_{fs} değerleri üzerine etkisi Çizelge 2.15’de gösterilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, çimento yerine ağırlıkça % 5 MK kullanıldığında betonun f_{fs} değerleri çok az miktarda artmıştır. MK yer değiştirme oranının %10 ve %15 olduğu durumda ise f_{fs} değerlerinde kontrol betonuna göre sırasıyla %32 ve %38 oranlarında artış sağlanmıştır. Betonun f_{sts} / f_c oranı ve f_{fs} / f_c oranı, MK içeriği ile birlikte azalmıştır. Bu durum, artan MK içeriği ile birlikte betondaki gevrekliğin arttığını göstermektedir.

Çizelge 2.14. Metakaolin içeren betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü (Qian ve Li, 2001)

Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)			Statik Elastisite Modülü (GPa)		
	3 gün	28 gün	60 gün	3 gün	28 gün	60 gün
Kontrol	27.9	37.8	58.0	24.1	30.0	30.4
MK5	36.3	45.7	62.4	25.6	31.5	33.1
MK10	39.1	63.8	66.5	26.0	33.2	34.4
MK15	42.2	69.7	77.8	26.2	26.2	26.2

Çizelge 2.15. Metakaolin içeren betonların eğilme dayanımı (Qian ve Li, 2001)

Karışımlar	Eğilme Dayanımı (MPa)	
	28 gün	80 gün
Kontrol	4.65	5.70
MK5	4.74	5.81
MK10	6.16	6.46
MK15	6.40	7.06

Gleize vd. (2007), çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK içeren, su-bağlayıcı oranı 0.3 ve 0.5 olan çimento hamurlarının otojen rötresi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, MK içeriğinin otojen rötreyi ileri yaşlarda belirgin bir şekilde azalttığı belirtilmiştir. MK içeriğinin özellikle düşük su-bağlayıcı oranına sahip çimento hamuruna göre, yüksek su-bağlayıcı oranına sahip çimento hamurunda otojen rötreyi azaltmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. MK katkısız kontrol numunesine göre, çimento yerine ağırlıkça %20 MK katkılı çimento hamurunun otojen rötresinde su-bağlayıcı oranı 0.5 olan betonlarda %56, 0.3 olan betonlarda ise %35 azalma görülmüştür. Ayrıca, çimento yerine ağırlıkça %15 oranına kadar MK kullanılmasının, kontrol numunesine göre kuruma rötresini de azalttığı belirtilmiştir.

Khatib ve Clay (2004) çalışmalarında, harçların kılcal yolla su emme özellikleri üzerine MK katkısının etkisini araştırmışlardır. Çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK içeren karışımlar üretmişler ve MK içermeyen kontrol harcı ile kıyaslamışlardır. Kılcal yolla su emilimi gözenek hacmine ek olarak gözeneklerin büyüklüğüne ve süreksizliğine de bağlıdır. Çizelge 2.16'da gösterildiği üzere, yarıçapı 0.02µm den daha küçük olan gözeneklerin toplam gözenek miktarına oranı harçlardaki MK içeriği arttıkça artmıştır. Bu çalışmada, kontrol harcına göre, MK katkılı

harçlardaki küçük gözeneklerin toplam gözenek miktarına oranı 14. günden itibaren daha belirgin artış göstermiştir. Deneysel çalışmalarında, harçlardaki MK içeriği arttıkça büyük gözeneklerin azalması ile gözeneklerin daha süreksiz hale geldiğini ve betonun kılcal yolla su geçirimsizliğinin sistemli bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. MK katkılı harçların toplam gözenek hacminin kontrol harcına göre daha fazla olduğu deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş ve Çizelge 2.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.16. Metakaolin katkılı harçlardaki küçük gözeneklerin yüzdesi

Yaş (gün)	Küçük Gözenekler (%)			
	Kontrol	5 MK	10 MK	15 MK
3	22.2	28.3	31.0	39.9
7	26.5	32.1	41.0	50.4
14	30.3	43.0	53.9	55.7
28	33.7	43.5	48.7	54.9
90	37.3	44.7	49.9	57.6

Çizelge 2.17. Metakaolin katkılı harçlardaki gözenek hacmi (mm³/g)

Yaş (gün)	Gözenek Hacmi (mm ³ /g)			
	Kontrol	%5 MK	%10 MK	%15 MK
3	262.0	257.6	284.1	277.6
7	229.6	261.7	268.8	251.6
14	209.9	203.4	221.0	212.1
28	189.1	205.3	237.1	222.7
90	181.4	180.8	219.6	198.9

Siddique ve Kadri (2011) çalışmalarında, betonun yüzey özellikleri üzerine MK ve dökümhane kumunun etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 450 kg/m³ çimento içeren ve su-çimento oranı 0.45 olan bir kontrol betonu tasarlanmıştır. Buna ek olarak, karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 MK, ince agrega yerine ise %0 ve %20 dökümhane kumu kullanmışlardır. MK içeren 35, 56 ve 84 günlük beton numuneleri üzerinde zamana bağlı olarak yüzeysel su emme, kılcal geçirimsizlik ve f_c deneyleri gerçekleştirmişlerdir. MK içeriği ile birlikte yüzeysel su emme miktarının azaldığını ve böylece MK katkılı betonların daha iyi yüzey dayanıklılığına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Betonun su emme miktarıyla f_c değerleri arasında ters bir ilişki olduğunu ve MK içeriği ile birlikte f_c değerlerinin de arttığını deneysel çalışmalarında

tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada, MK katkısız kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 MK katkılı betonların kılcal geçirimsizliğinin daha az olduğu belirtilmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %15 oranında MK katkılı betonların kılcal geçirimsizliğinde ise artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle çimento yerine ağırlıkça %15 ve daha fazla oranlarda MK kullanımının betonun iç dayanıklılığı için yararlı olmadığını belirtmişlerdir.

Kim vd. (2007) deneysel çalışmalarında, MK ve SD katkılarının yüksek dayanımlı betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK ve SD içeren karışımlar kullanmışlardır. Ayrıca tüm karışımlarda sabit miktarda UK kullanmışlardır. Sadece %20 SD ve %20 MK içeren karışımlarda kimyasal katkı kullanmışlardır. Bu numuneler üzerinde 1, 3, 7, 28, 56 ve 91 günlük f_c , f_{st} ve f_{fs} deneyleri yapmışlardır. Karışımlarda MK ve SD miktarı arttıkça zamana bağlı olarak değişiklikler gözlemlenmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında MK ve SD içeren numunelerin f_c , f_{st} ve f_{fs} değerlerinin artış gösterdiğini, %20'den itibaren ise azaldığını belirtmişlerdir. Betonun tuz saldırısına karşı direncini belirlemek için 28, 56 ve 91 günlük numuneler üzerinde hızlandırılmış klor geçirgenliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Klor geçirgenliğinin MK ve SD içeriği arttıkça azaldığını gözlemlenmiştir. MK katkısına göre SD katkısında bu azalmanın daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Betonun karbonatlaşma derinliği 7, 14, 28, 56 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. MK ve SD içeriği ile birlikte zamana bağlı olarak karbonatlaşma derinliği de artmıştır.

Boddy vd. (2001) çalışmalarında, yüksek reaktiflikte MK içeren betonların klor geçirgenliği direnci üzerinde çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarında MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %8 ve %12 oranlarında yüksek reaktiflikte MK içeren karışımlar kullanmışlardır. Karışımlarda su-bağlayıcı oranını 0.3 ve 0.4 olarak belirlemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; yüksek reaktiflikte MK katkılı ve düşük su-bağlayıcı oranına sahip karışımların daha düşük klor geçirgenliğine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. 0.3 ve 0.4 su-bağlayıcı oranlarına sahip, farklı oranlarda MK içeren 6 beton karışımının 28 günlük direnç ve hızlı klor geçirgenliği testi sonuçları Çizelge 2.18'de gösterilmiştir. Çizelge 2.18.'de gösterilen direnç değerleri arttıkça ve coulomb değerleri azaldıkça betonun klor geçirgenliği

azalmaktadır. Betonların direnç ve klor geçirgenliği yüksek reaktiflikte MK içeriği ile birlikte büyük ölçüde gelişmiştir. Geçirgenlik testleri ile belirlenen difüzyon katsayıları yüksek reaktiflikte MK kullanımı ile azalmış ve bu durum MK katkısının beton üretiminde kullanımının uygun olduğunu göstermiştir.

Çizelge 2.18. Ortalama 28 günlük direnç ve hızlı klor geçirgenliği sonuçları (Boddy vd., 2001)

Karışım	Su-Bağlayıcı Oranı	MK Oranı (%)	Direnç (Ω cm)	Klor Geçirgenliği (Coulomb)
1	0.4	0	9960	2770
2	0.4	8	34910	560
3	0.4	12	72260	310
4	0.3	0	11370	2350
5	0.3	8	51960	400
6	0.3	12	99360	230

Lee vd. (2005) deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında MK içeren harçlar üzerinde magnezyum sülfat çözeltisinin etkisini araştırmışlardır. Harç numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisine karşı dirençleri; görsel denetim, f_c değerlerindeki azalma ve genleşme ölçümleri ile belirlenmiştir. MK içeriği ile birlikte harç numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisine karşı performansı olumsuz yönde etkilenmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda, MK katkılı harçların sodyum sülfat ataklarına karşı daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Ancak bu çalışmada, MK katkısının magnezyum sülfat ataklarına maruz kalan harçların dayanıklılığı üzerinde olumlu yönde etkisinin olmadığı ortaya konmuştur.

Khatib (2009) çalışmasında, düşük sıcaklıktaki kürün MK katkılı betonların performansı üzerine etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışmada MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında MK içeren karışımlar hazırlanmıştır. Bu çalışmada tüm numuneler için su-bağlayıcı oranı 0.5 olarak belirlenmiştir. Düşük sıcaklıktaki kürün; MK katkılı betonların taze haldeki f_c değerlerini olumsuz etkilemesine rağmen ileri yaştaki f_c değerlerinde artışa neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ileri yaşlardaki optimum çimento ile MK yer değiştirme oranının %5 ve %10 arasında olduğunu belirtmiştir. İlk kür gününde, özellikle yüksek oranda MK içeren karışımların dayanımının daha düşük olduğu

belirtilmiştir. Buna rağmen, karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %20 ve daha az oranlarda MK içeriğinin, 7. günden itibaren beton dayanımını artırıcı yönde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kontrol betonuna göre, MK içeren betonlar düşük sıcaklıktaki küre daha hassas davranış göstermişlerdir. MK katkılı betonların düşük sıcaklıkta kür edilmesi, hidrasyon ısısını düşürdüğü için MK katkılı betonların f_c değerlerini önemli derecede azalttığı belirtilmiştir. Düşük sıcaklıktaki kürün; çimento yerine ağırlıkça %10 ve daha az oranlarda MK içeren betonların rötresinde artışa neden olduğunu, daha yüksek oranlarda MK içeren betonlarda ise rötredeki artış oranının azaldığı deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.

Khatib ve Hibbert (2005) çalışmada, betonların dayanımı üzerine MK ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada tüm numuneler için su-bağlayıcı oranı 0.5 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda MK ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak 3 farklı grupta numune üretmişlerdir. Birinci grupta, mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine %40, %60 ve %80 oranlarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. İkinci grupta mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %30, %50 ve %70 oranlarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %10 oranında MK içeren karışımlar üretmişlerdir. Üçüncü grupta ise mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine %20, %40 ve %60 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %20 oranında MK kullanmışlardır. Hazırladıkları numuneler üzerinde E_d , f_{fs} ve f_c deneyleri gerçekleştirmişlerdir. MK katkılı numunelerde kontrol numunesine göre özellikle erken yaşlarda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. MK oranı %20'ye çıkarıldığında ise f_c değerlerindeki artış oranı azalmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeriği, ilk 28 günde betonların dayanımını düşürmüştür. Ancak, 28. günden sonra en fazla %60 oranına kadar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunelerin f_{fs} , f_c ve E_d değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu katkılı betonların erken yaşlardaki f_c değerlerinin düşüşü granüle yüksek fırın cürufu ile birlikte belirli oranlarda MK içeriği ile birlikte telafi edilmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %10 ve %20 MK kullanılan betonların E_d değerlerinin kontrol betonuna göre yüksek olduğu belirtilmiştir. MK oranı %20'ye çıkarıldığında ise E_d değerindeki artış oranı azalmıştır. Hem MK hem de granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların f_{fs} değerlerinin kontrol betonuna göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Özellikle f_{ts} değerleri için %20 MK ve %60 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeriğinin etkili olduğunu deneysel çalışmada gözlemişlerdir.

Khatib vd. (2009) çalışmada, MK ve UK içeren harçların dayanımlarını ve boyutsal değişimlerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında mineral katkı içermeyen kontrol numunesi ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında MK; %20, %40 ve %60 oranlarında UK içeren karışımlar hazırlamışlardır. Çalışmada, UK katkılı harçlarda MK içeriği ile birlikte harçların kuruma rötresinin azaldığı belirtilmiştir. Suda kür edilmiş harçlarda ise yüksek oranlardaki MK içeriği daha fazla genleşmeye yol açmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 MK içeren harçların f_c değerleri kontrol numunesine göre daha yüksek çıkmıştır. Buna rağmen, harçlarda bağlayıcı olarak çimento, UK ve MK katkısından oluşan üçlü bir karışım hazırlandığında, UK katkısının puzolanik aktifliğinin olumsuz etkilendiği rapor edilmiştir.

Brooks ve Johari (2001) çalışmalarında, MK katkılı beton karışımlarının sünme ve otojen rötire performansları üzerine çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarında, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında MK içeren karışımlar kullanmışlardır. Deneysel çalışmada; ilk günlerde MK içeriğinin artmasıyla otojen rötrenin azaldığını, ancak ileri yaşlarda artış eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir. Çimento yerine ağırlıkça %5 MK kullanılması ile ilk günlerde betonun toplam rötresinde (otojen rötresi ile kuruma rötresi toplamı) artış tespit etmişlerdir. Buna karşın %10 ve %15 yer değişimi seviyelerinde, MK içeriği ile birlikte toplam rötrenin azaldığını gözlemişlerdir. Ayrıca, MK içeriğinin artmasıyla betondaki sünmenin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir.

Batis vd. (2005), MK katkısının çimento harçlarının korozyon direnci üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada; termal olarak işlenmiş düşük oranda kaolinit içerikli zayıf bir Yunan kaolin kilinden üretilmiş MK ve yüksek saflıkta ticari bir MK olmak üzere iki farklı tip MK kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, MK içermeyen kontrol numunesi ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Yunan kaolin kilinden üretilmiş MK katkılı ve %20 oranında yüksek saflıkta ticari MK katkılı karışımlar kullanmışlardır. Harç numuneleri, ağırlıkça % 3.5 NaCl içeren bir çözeltiye daldırılmak suretiyle koroziyon ortamına maruz bırakılmıştır. MK, çimento yerine ağırlıkça

en fazla %10 oranına kadar kullanıldığında çimento harçlarının korozyon davranışlarını geliştirdiği, %10'dan daha yüksek oranlarda ise olumlu etkisinin olmadığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada, çimento yerine ağırlıkça %10 oranında MK içeriği, harçların dayanım gelişimi açısından da optimum değer olarak belirlenmiştir.

Beton, maliyet oranına göre en iyi dayanım ve dayanıklılık performansına sahip yapı malzemelerinden biri olduğu için oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Çeşitli deney sonuçları betonun dayanımı arttıkça daha kırılğan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum düşük çekme dayanımı ve çimento pastasının geçiş ara yüzeyindeki bağlanma zayıflığından kaynaklanabilmektedir. Bununla birlikte, çeşitli fiberler kullanılarak betonun zayıf olan çekme dayanımı yükseltilebilmektedir. Fiberler genellikle rötre çatlaklarını azaltmak, betona tokluk kazandırmak ve betonun darbe dayanımını artırmak için kullanılmaktadır. Fiberli betonlar çeşitli avantajları nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir ve çeşitli durumlardaki yapıların tamiri için uygun bir malzemedir. Buna rağmen, fiberli betonlarda fiberler ile çimento hamuru arasında zayıf bir bölge vardır. Bu zayıf bölge boşluklu bir yapıya sahip olup, özellikle hibrit fiberli betonlarda daha boşluklu bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı, fiberli betonlarda MK, SD ve UK gibi puzolanik malzemelerin kullanımı fiber ile çimento hamuru arasındaki boşluğu azaltmaktadır.

Rashiddadash vd. (2014) yaptıkları çalışmada, ÖP ve MK içeren hibrit fiberli betonlarda f_c ve f_{fs} deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda kullanılan MK ve ÖP katkısının fiberli betonların 7, 28, 90 ve 180 günlük f_c değerleri üzerine etkisi Çizelge 2.19'da verilmiştir. Fiber katkılı betonların mekanik özellikleri incelendiğinde, en yüksek oranda MK içeren karışımlarda en iyi performans elde edilmiştir. İlk günler hariç, MK katkılı fiberli betonlar puzolan içermeyen kontrol betonuna göre daha yüksek f_c değerlerine sahiptir. İlk günlerde %15 MK katkılı karışım hariç MK katkılı karışımların f_c değerleri kontrol betonuna göre daha düşük çıkmıştır. Buna rağmen, ÖP içeriği fiberli betonların mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Erken ve ileri yaşlarda, karışımlardaki ÖP katkısı oranı arttıkça f_c değerleri düşmüştür. Beton karışımlarına puzolan eklenmesinin yük-deplasman eğrisi üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığı, yük-deplasman eğrisinin karışımlardaki fiber yoğunluğu ile değiştiği rapor edilmiştir. MK ve ÖP içeriğinin artışıyla fiberli betonların işlenebilirliği azalmış, fiberlerin betonda homojen dağılmasını olumsuz etkilemiştir.

Velosa vd. (2009), MK katkısının kimyasal ve mineralojik yapısının çimento harcının karakteristik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda bir fabrikada üretilen, kaynaklarının ve üretim tekniklerinin farklı olmasından dolayı farklı kimyasal ve mineralojik özelliklere sahip 3 farklı MK kullanmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; mineralojik olarak daha düzenli kaolinit yapısına sahip olan ve kimyasal olarak Al_2O_3 oranı daha yüksek, Na_2O ve K_2O oranı daha düşük olan MK katkısının daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Çizelge 2.19. Metakaolin ve öğütülmüş içeren fiber katkıli betonların basınç dayanımları (Rashiddadash vd., 2014)

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)			
	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
Kontrol	18.0	29.0	41.0	44.0
%10 ÖP	17.0	29.5	34.5	37.6
%15 ÖP	16.7	26.5	32.5	37.0
%10 MK	18.7	32.5	38.0	44.5
%15 MK	19.0	36.0	44.5	46.5
%7.5MK+%7.5 ÖP	16.0	27.5	34.0	39.4

Potgieter-Vermaak ve Potgieter (2006), deneysel çalışmada MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında MK içeren harç numuneleri üretmişlerdir. Çalışmada, MK katkısının harçların dayanım gelişimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Birinci grupta 550 °C sıcaklıkta aktive edilmiş MK, ikinci grupta 650 °C sıcaklıkta aktive edilmiş MK, üçüncü grupta ise 60 dakika farklı sıcaklıklarda aktive edilmiş MK kullanmışlardır. Hazırladıkları harç karışımları üzerinde 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük f_c deneyleri gerçekleştirmişlerdir. En yüksek f_c değerlerini üçüncü grup numuneler üzerinde, en düşük f_c değerlerini ise birinci grup numuneler üzerinde gözlemişlerdir. Üç grupta da en yüksek f_c değerlerini %30 MK içeren harçlarda gözlemişlerdir.

Parande vd. (2008) yaptıkları çalışmada, MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine kısmi olarak ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK içeren harç ve beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numunelerde su çimento oranını 0.40 ve bağlayıcı-kum oranını 1:3 olarak belirlemişlerdir. Çimento yerine kullanılan MK içeriği ile birlikte betonun f_c değerlerinin arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca diğer karışımlar ile

karşılaştırdıklarında, %15 MK içeren numunelerde en iyi sonuçları gözlemişlerdir. Buna ek olarak, çimento yerine %15 oranından daha fazla MK kullanılması durumunda f_c değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. MK katkısız kontrol betonu ile MK katkılı betonların 3, 7, 28 ve 90 günlük f_c değerleri Çizelge 2.20'de gösterilmiştir. Ayrıca, beton üretiminde MK katkısının çimento yerine ağırlıkça %15 oranına kadar kullanılması ile betonarme içerisindeki karbon çeliğin korozyon etkisinden daha az etkilendiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.20. Metakaolin katkısının beton basınç dayanımına etkisi (Parande vd., 2008)

Karışım	Basınç dayanımı (MPa)			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
Kontrol	31.0	41.6	54.0	65.0
%5 MK	34.1	48.1	59.1	68.0
%10 MK	35.2	53.7	63.4	72.0
%15 MK	28.0	59.0	70.0	80.0
%20 MK	26.1	43.2	57.0	67.0

Shekarchi vd. (2010), deneysel çalışmalarında MK içermeyen kontrol betonu ile birlikte, çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 MK içeren betonların dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarda su geçirimsizliği, gaz geçirimsizliği, su emme, elektriksel direnç, klor geçirgenliği ve alkali silika reaksiyonu potansiyeli ve bunların birbiri ile etkileşimini araştırmışlardır. MK miktarı arttıkça su geçirimsizliği, gaz geçirimsizliği, su emme miktarlarının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca MK miktarı arttıkça elektriksel direnç ve f_c değerlerinin arttığını gözlemişlerdir. Alkali silika reaksiyonu deneylerinde MK miktarı arttıkça alkali silika reaksiyonunun azaldığını belirtmişlerdir. Özellikle %15 MK kullandıkları numunelerde alkali silika reaksiyonu ilerlemesinin büyük oranda azaldığını belirtmişlerdir.

2.4 Pomza

2.4.1 Pomzanın yapısı

Pomza, boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal bir etkene karşı dayanıklı, gözenekli camsı volkanik bir kayadır. Pomza, oluşumu sırasında bünyesindeki gazların ani olarak yapısını terk etmesi ve ani soğuması

nedeniyle, sayısız gözenek içerir. Gözenekli ağırlığı 500 kg/m^3 olan bu doğal malzeme yapısındaki boşluklar sayesinde yüksek ısı ve ses izolasyonu özelliklerine sahiptir. Gözenekler arası genelde bağlantısız ve boşluklu olduğundan hafif, suda uzun süre yüzebilen, geçirimsizliği düşük ve izolasyonu oldukça yüksektir. Pomza bu özelliği sayesinde kış aylarında soğuğa, yaz aylarında ise sıcağa karşı yüksek izolasyon sağlar. Sertliği Mohs skalasına göre 5 ile 6 arasındadır. Kimyasal yapısında %75 oranına varan silis içeriği bulunabilmektedir. Pomzanın genel olarak kimyasal bileşimi Çizelge 2.21’de verilmektedir. Pomzanın içerdiği SiO_2 oranı, pomzaya abrasif özellik kazandırmaktadır. Bu yüzden pomza, çeliği rahatlıkla aşındırabilecek bir kimyasal yapı sergilemektedir. Pomzanın kimyasal yapısında bulunan Al_2O_3 bileşimi ise ateş ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırır (Gündüz vd., 1998; Öz, 2007; Dolgun, 2010).

Çizelge 2.21. Pomzanın kimyasal bileşenleri (Öz, 2007)

Bileşim	Yüzde Oranı (%)
SiO_2	60-75
Al_2O_3	13-17
Fe_2O_3	1-3
CaO	1-2
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	7-8
TiO_2	-
SO_3	-

Pomza, oluşum şekline göre asidik ve bazik pomza olarak iki ana gruba ayrılmakla beraber en yaygını asidik pomzadır. Hem asidik pomza hem de bazik pomza oluşum esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi sonucu oldukça gözenekli bir yapı kazanmıştır. Asidik pomza; beyaz ve kirli beyaz renkli, Mohs skalasına göre sertliği 5 ile 6 arasında olup, yoğunluğu $0.5 \text{ ile } 1 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. Bazik pomza ise kahverengi veya siyah olup daha ağırdır. Sertliği 5 ile 6, yoğunluğu ise $1 \text{ ile } 2 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. Asidik magma, bazik magmaya nazaran daha viskozdur ve yüksek silis içerir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katı halde bulunur. Bu nedenle volkanik aktivite durduğunda magma akışı da durarak asidik kayaç ve kütleler oluşur. Volkandan basınçla püsküren asidik malzeme ve erimiş gazlar ani basınç azalması sonucu genişler ve uçucu bileşenlerin kaçmasına neden olur. Atmosferle temas eden erimiş küresel parçalar hızla soğuyarak pomzayı oluşturur. Çizelge 2.22’de asidik ve bazik pomzanın kimyasal bileşimi verilmiştir (Yazıcıoğlu vd.,

2003; Dolgun, 2010). Asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olup, inşaat sektöründe özellikle bims blok üretiminde yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer taraftan, bazik karakterli pomzalarda da alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranlarda bulunması nedeniyle, diğer endüstri alanlarında kullanım alanı bulabilmektedir (Şengün, 2004).

Çizelge 2.22. Asidik ve bazik pomzanın kimyasal bileşenleri (Öz, 2007)

Bileşim	Asidik Pomza (%)	Bazik Pomza (%)
SiO ₂	70.0	45
Al ₂ O ₃	14.0	21
Fe ₂ O ₃	2.5	7
CaO	0.9	11
MgO	0.6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9.0	8
A.K.	3.0	1

Çizelge 2.23. Dünyadaki pomza rezervleri (Yazıcıoğlu vd., 2003)

Kıtalar ve Ülkeler	Miktar (Milyon Ton)
Kuzey Amerika Toplam	12.000
Orta Amerika Toplam	80
Güney Amerika Toplam	80
Türkiye	2.836
İtalya	2.000
Avrupa Toplam	5.336
Avustralya	500
Dünya Toplamı	17.996

Pomzanın dünya üzerindeki rezerv miktarı Çizelge 2.23’de verilmiştir. Dünyada en fazla asidik pomza cinsi bulunmaktadır. Araştırmalara göre Türkiye 3 milyar metre küp pomza rezervi ile oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Bu da dünya pomza rezervlerinin 1/7’sine karşılık gelmektedir. Çizelge 2.24’de görüleceği üzere pomza rezervleri, Doğu Anadolu Bölgesinde oldukça yoğunlaşmıştır. İç Anadolu ve Akdeniz Bölgesinde de rastlanmaktadır. İşletme sayısı bakımından ise İç Anadolu Bölgesi önde gelmektedir (Yazıcıoğlu vd., 2003; Dolgun, 2010). Çizelge 2.25’de ülkemizdeki pomza rezervinin illerimizdeki dağılımları gösterilmiştir.

Pomza rezervleri bakımından dünyada önemli bir yeri olan Türkiye, yaklaşık 10 farklı renk ve doku kalitesine sahip pomza çeşitleri ile oldukça yüksek bir pazar şansına

sahiptir. Dünyanın en önde gelen ham pomza üreticisi ülkeler İtalya, Yunanistan, Türkiye, Almanya, ABD, Meksika, Fransa ve İzlanda'dır. Pomza, dünya da halen elliden fazla endüstriyel alanda farklı amaçlarda kullanım imkânı bulmaktadır. (Erkoyun, 2005).

Çizelge 2.24. Bölgelere göre rezerv dağılımı (Dolğun, 2010)

Bölgeler	Rezerv Miktarı (m ³)	Rezerv (%)
Doğu Anadolu	1.368.012.000	% 56
İç Anadolu	1.057.893.334	% 43
Diğer	30.983.250	% 1

Çizelge 2.25. Türkiye'deki pomza rezervi (Dolğun, 2010)

Yeri	Rezerv Miktarı (m ³)
Isparta-Gölcük	30.983.250
Ankara-Güdül-Tek köy	8.070.000
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834
Nevşehir-Derin kuyu	48.660.500
Kayseri-Gömeç	13.250.000
Kayseri-Develi	58.500.000
Kayseri-Talas-Tomarza	525.000.000
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000
Van-Mollakasım	5.950.000
Ağrı-Patnos	27.812.000
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000
Kars-Iğdır-Kavak tepe	40.156.250
Kars-Diğor	11.718.750
Kars-Sarıkamış	1.875.000

2.4.2 Pomzanın aktivitesi

Pomza, yüksek oranlı ve amorf yapıdaki silis içeriği sebebiyle puzolanik özellik gösteren bir maddedir. Pomzanın bünyesinde bulunan silisin, çimentonun özelliklerini bozucu etkiye sahip ve çimento elde edilmesi esnasında sertleşen bir alkali olan CH ile reaksiyona girmesi sonucunda, kalsiyum silikat yada bir başka deyişle çimento özellikli malzeme oluşmaktadır (Hossain vd., 2003).

Betona çimento ile yer değiştirilerek belirli oranlarda, doğal puzolan özelliğine sahip öğütülmüş pomzanın ilave edilmesinin, dayanımı düşürdüğü tespit edilmiştir. Kür yaşı arttıkça, pomzanın puzolanik aktivite göstermesi ile düşüşteki farkın büyük ölçüde kapandığı ifade edilmektedir. TS EN 25 (1975)'e göre puzolanik aktivite, belirli bir incelik değerinde öğütülen doğal puzolanın, CH ve su ile oluşturduğu f_c cinsinden belirlenen hidrolik özelliği olarak ifade edilmektedir. Bir puzolanın bağlayabileceği en fazla CH miktarı ve bu işlemin hızı puzolanik aktivite olarak ifade edilmektedir. Bu değişkenler puzolanın içerisindeki aktif fazların kalite ve miktarına ve puzolanın sahip olduğu özelliklere bağlıdır (Binici vd., 2007). Diğer mineral katkılarda olduğu gibi pomzaların puzolanik aktiviteleri TS EN 25 (1975)'e göre belirlenir. Yapılan bir çalışmada puzolanik aktivitesi belirlenecek olan pomza örnekleri 105 °C de etüvde kurutulmuştur. Örneğin bütünü temsil etmesi ve homojenliğin sağlanması amacıyla pomzalardan konileme yani dörde bölme yoluyla 3 kg örnek alınmış ve çeneli kırıcıdan geçirilerek, bilyeli değirmende öğütülmüştür. Öğütülen numune göz açıklığı 90µm olan elekten elenmiştir. Elek üzerinde kalan artığın miktarının %8'den az olması sağlanmıştır. Öğütülen pomzanın özgül ağırlığı piknometre yardımıyla belirlenmiştir. Puzolanik aktivite deneyi için gerekli pomza miktarı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Pomza miktarı} = [\text{Puzolanın özgül ağırlığı} / \text{CH}] * 300 \quad (2.1)$$

CH'in özgül ağırlığı 2.17 g/cm³'tür. Elde edilen tartım sonucuna göre pomza miktarı alınarak buna 150 gram CH ve 1350 gram standart kum eklenmiş ve karışım homojen olması için iyice karıştırılmıştır. ÖP ve CH toplamının yarısı kadar su eklenerek mikserde karıştırılmış ve sarsma cihazındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Sarsma makinesinden alınan kalıplar sağlam bir naylon torba içine yerleştirilerek 24 saat hava almayacak şekilde bekletilmiş ve 55 °C'lik bir etüve konarak yapıldığı günden itibaren 7 gün sonraki dayanımına bakılarak puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir (Efe, 2011).

Pomza, her geçen gün yeni bir kullanım alanı bulunan bir hammaddedir. Pümisit adı verilen ve bazen de volkan külü, volkan tozu olarak adlandırılan ince taneli olanları çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pümisitenin çimentoda katkı malzemesi olarak bu alanda kullanım imkanı veren özelliği, onun yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmasıdır (Gündüz vd., 1998).

2.4.3 Pomzanın çimento ve beton üretiminde kullanımı

Pomzanın hem dünyada hem de ülkemizde en çok kullanıldığı alan inşaat sektörüdür. Bunun yanında pomzanın gözenekli olması, pomza kullanılan inşaatlardaki ısı ve ses izolasyonunu ideal hale getirebilmektedir. Ayrıca, yangına dayanıklılık açısından da normal betona kıyasla % 20'ye varan oranda daha emniyetli olduğu kabul edilmektedir. Bunun yanında pomza ile üretilen hafif briket ve hazır duvarın nakliyesi de daha kolay olmaktadır. Pomza agregası içeren betonunun normal betona kıyasla önemli bir üstünlüğü, daha elastik olması nedeniyle depreme karşı dayanıklı olmasıdır. Ayrıca, normal agregası ile üretilen betonlara göre yapılan birçok araştırmada pomzanın donma olayından da az etkilendiği gözlenmiştir (Gündüz, 1998; Şengün, 2004).

Çeşitli bağlayıcı malzemelerin sınırlı miktarda olmak şartıyla çimento dolgu malzemesi olarak veya çeşitli yapı malzemelerinin elde edilmesinde kullanılabileceği bilinmektedir. Kullanılan dolgu malzemesinin puzolan karakterde olması, sunduğu teknik avantajların yanı sıra daha yüksek oranlarda kullanılabilmesi nedeniyle önemli avantajlar sunmaktadır. Gerek yapı malzemelerinde göz önünde bulundurulmuş kalite ve ihtiyaç standartlarının yeniden belirlenmesi, gerekse yalıtım ve sağlamlık gibi özelliklerin ön planda tutulduğu özel amaçlara uygun ürünlerin geliştirilmesi ve ürün yelpazesinin gitgide genişlemesi alternatif ve ekonomik malzemelere yönelik ilgi ve arayışı artırmaktadır. Bundan dolayı pomza gibi doğal malzemelerin beton üretiminde kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Pomza, son yıllarda özellikle briket üretiminde ham madde olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca pomza, hafif beton üretiminde de agregası yerine kullanılmaktadır. Normal betona göre hafifliği, nakliye kolaylığı, ısı yalıtımı sağlaması gibi nedenler ile tercih edilmektedir. Konutlarda enerji tasarrufu sağlaması sebebi ile özellikle ülkemiz gibi, ısınmak için doğalgaz yakıt kullanan, dışarıya bağımlı ülkeler için büyük önem kazanmaktadır. Pomzanın, kırılmadan büyük deformasyon yapabilme yetenekleri sayesinde, beton dayanımının artırılmasıyla özellikle deprem bölgelerinde önemli yararlar sağlayacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalar pomzanın hafif beton agregası olarak kullanımının mümkün olduğunu, ancak beton özellikleri ve yürürlükteki standartlara uygunluk bakımından belirli ölçü standartlarında olması gerektiğini göstermektedir. Pomza kullanılarak elde edilen hafif betonun standartlara uygunluğu, çeşitli dayanım deneyleri ile belirlenmektedir. Elde edilen değerler ışığında kullanılan pomzanın tane boyutu ve

oranı belirlenmiş olmaktadır. Ayrıca pomza, zemin stabilizasyonunda da kullanılmaktadır (Yıldırım, 2007).

Pomza, yüksek oranda ve amorf yapıdaki silis içeriği nedeniyle puzolanik özellik gösteren bir maddedir. Sunduğu ekonomik avantajların yanı sıra, bir dolgu malzemesi olarak puzolan karakterde olması, pomzanın çimento dolgu malzemesi olarak kullanımına uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Pomzanın yüksek orandaki sodyum ve potasyum içeriği ise söz konusu kullanım bakımından en önemli sınırlayıcı unsurlardan birisidir. Pomza ilave oranındaki artışın çimentonun donma ve priz süresine olumsuz etki yaptığı da bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda, pomzanın niteliğine bağlı olarak %15 ile %25 arasında çimento dolgu malzemesi olarak kullanılması ASTM standartlarına göre uygun görülmüştür. Daha yüksek pomza ilave oranlarında ise numunelerin dayanımında sorunlar ortaya çıktığı görülmüştür (Yıldırım, 2007).

Çimento dolgu malzemesi ve hafif beton üretilmesinde yüksek silis içeriği ve yoğunluk avantajları ile öne çıkan pomzanın diğer bir önemli özelliği de sahip olduğu yüksek yalıttır. Pomza, gerek gözenekli yapısı gerekse içerdiği gözeneklerin birbirinden bağımsız olması nedeniyle normal betona göre yaklaşık 6 kat fazla ısı yalıtımı, normal sıvaya göre ise 3-4 kat fazla ses yalıtımı sağlamaktadır. Pomza, ısı yalıtımı için genellikle serbest tabaka olarak veya ısı yalıtımı özelliğine sahip yapı tuğlası üretilmesinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Günümüzde pomzanın kullanım alanı çok geniştir. Son yıllarda pomzanın en çok kullanıldığı alan inşaat sektörü olmuştur. Genel olarak pomzanın kullanım alanlarını beş ayrı grupta değerlendirebiliriz. Bunlar; inşaat sektörü, tekstil sektörü, tarım sektörü, kimya sektörü, diğer endüstriyel ve teknolojik sektörleridir (Dolgun, 2010; Yıldırım, 2007).

2.4.4 Pomzanın taze beton özelliklerine etkisi

Yapılmış olan deneysel çalışmalarda, çimento yerine kullanılan öğütülmüş pomza miktarı arttıkça taze betonunun birim ağırlık ve çökme değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Özellikle öğütülmüş pomzanın su emme kapasitesinin çok yüksek olduğu ve beton karışımlarında yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip kimyasal katkı maddeleri ile birlikte kullanılması önerilmektedir (Sarıdemir, 2013).

2.4.5 Pomzanın sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

2.4.5.1 Pomzanın beton basınç dayanımına etkisi

Pomza puzolanik bir malzeme olup, puzolanik aktivitesi yüksektir. Puzolanik malzemeler silis, alüminyumlu veya bunların birleşiminden oluşan, birleştirici özellikleri bulunmamakla birlikte, çok ince taneli olduklarından, uygun sıcaklıkta su ile karıştırıldıklarında CH ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğe sahip daha kararlı bileşikler oluşturmaktadır (Ersoy vd., 2005). Son yıllarda çimento üretiminde kullanılan yakıtların fiyatlarındaki yükselmeler çimento maliyetini oldukça olumsuz yönde etkilemiş olup, üretici firmaların puzolanlara yönelmelerine neden olmuştur. Çimento içerisine %50 oranına varan miktarlarda katılabilen puzolanik maddeler sadece kırma ve öğütme işlemine ihtiyaç duymalarından dolayı daha ekonomik olmaktadır. Puzolan katkılı çimento içeren betonun erken ve standart dayanımları oldukça yüksek olup yukarıda belirtilen TSE kriterlerine uygunluk göstermektedir. Çimento hidratasyonu sırasında puzolanik malzemelerin reaksiyonu ile CH serbest kalmaktadır. Puzolanik malzemeler içinde bulunan amorf silikat ile CH birleşerek çimento gibi bağlayıcı özelliğe sahip malzemeler oluşturmaktadır. Yani puzolanlar CH içeriğini bağlamakta etkilidirler (Akman, 1994; Ersoy vd., 2005). Bundan dolayı pomza, CH ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğe sahip daha kararlı bileşikler oluşturmaktadır.

ÖP katkısı ile üretilmiş olan betonların f_c değerlerinin çimento miktarındaki azalmadan dolayı, ilk günlerde kontrol betonuna göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak kür yaşı ilerledikçe, bu düşmenin azalarak, çok küçük değerlere ulaştığı dikkati çekmektedir. Beton üretiminde çimento yerine uygun oranlarda ÖP kullanılırsa, özellikle 90 gün küre tabi tutulmuş numunede f_c değerleri kontrol betonuna ulaşmakta hatta geçebilmektedir. Bu durum öğütülmüş pomzanın, puzolanik aktivitesini ileriki kür yaşlarında göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı ÖP içeren betonların daha uzun kür edilmesi gerekir. Yazıcıoğlu ve Demirel (2006) yaptıkları deneysel çalışmada çimento ile yer değiştirerek belirli oranlarda doğal puzolanik özelliğe sahip öğütülmüş Elazığ yöresi pomzasını kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarda pomza içeriğinin artmasıyla dayanım değerlerinin azaldığını gözlemişlerdir. Bu azalma özellikle 3 ve 7 günlük kür yaşlarında biraz daha belirgin iken, 28 günlük kür yaşında ise, kontrol betonuna yaklaşan değerler aldığını ifade etmişlerdir. Bu farkın, pomzanın

kür yaşı ilerledikçe puzolanik aktivite göstermesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Ekici ve Demirel (2007) yaptıkları deneysel çalışmada çimento ile birlikte, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÖP kullanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada ÖP miktarının artmasıyla 3, 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarındaki f_c değerlerinin düşürdüğünü gözlemişlerdir. Türkel ve Kadiroğlu (2007) hafif agrega ile üretilen betonlarda f_c değerlerinin normal betonlara göre daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Kadiroğlu (2005) yaptığı deneysel çalışmalarda agrega yerine pomza agregası ve çimento yerine katkı maddesi olarak UK ve SD kullanarak kendiliğinden yerleşen beton üretmiştir. Bu betonların f_c sonuçlarının tatmin edici ve kontrol betonundan daha düşük olduğunu deneysel çalışmasında belirtmiştir. Dinçer ve Çağatay (2004) agrega yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası kullanarak taşıyıcı hafif beton üretmişlerdir. Deneysel çalışmada pomza miktarı arttıkça f_c değerlerinin azaldığını gözlemişlerdir. Hossain (2004) deneysel çalışmasında, çimento yerine % 15 oranına kadar öğütülmüş volkanik pomzanın kullanılabilceğini belirtmiştir. Çalışmada bu orana kadar üretilen numuneler ile kontrol betonu arasında fazla bir dayanım farkı gözlenmemiştir. Ayrıca, agrega ile yer değiştirilerek kullanılan pomza agregası oranı arttıkça f_c değerlerinin azaldığını belirtmiştir. Yıldız ve Uğur (2009) yaptıkları deneysel çalışmada yüksek dayanımlı betonun E_c değeri üzerine zeolit ve ÖP miktarının etkisini araştırmışlardır. Çalışmada çimento yerine zeolit ve ÖP kullanarak ve 0.3 su-bağlayıcı oranında yüksek dayanımlı beton üretilebileceğini göstermişlerdir.

2.4.5.2 Pomzanın beton eğilme dayanımına etkisi

Genellikle yapılmış olan çalışmalarda pomza, hafif beton üretimi için, beton karışımlarında agrega olarak kullanılmıştır. Beton karışımlarında çimento yerine pomza kullanılarak yapılmış olan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bundan dolayı literatürde çimento yerine pomza kullanılarak üretilmiş betonların f_{fs} performansı ile ilgili bilgi çok azdır. Ancak beton agregası olarak, normal agrega yerine kullanılan pomza agregası ile üretilmiş betonların f_{fs} deneysel sonuçları bulunmaktadır.

Türkel ve Kadiroğlu (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, pomza agregası ile üretilen hafif beton üretilmiştir. Çalışmada, agrega olarak birinci serideki beton numunelerinde %57 oranında 0-4 mm, %23 oranında 4-8 mm ve %20 oranında 8-16

mm pomza agregaları kullanmışlardır. İkinci seride ise %49 oranında 0-3 mm kireçtaşı kırma kumu, %8 oranında 0-4 mm pomza, %23 oranında 4-8 mm pomza kullanmışlardır. Her bir serideki numunelerin f_{fs} değerleri normal betonların f_{fs} değerleri ile karşılaştırmışlardır. İlk seride üretilen numunelerin f_{fs} değerlerinin, ikinci seriden daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca her iki serinin ise normal beton karışımlarından daha düşük f_{fs} değerlerine sahip olduğunu gözlemişlerdir. Pomza agregası içeren hafif betonların f_{fs} değerlerinin, normal betonların f_{fs} değerlerinden daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Yapılan çalışmalarda, normal agrega yerine pomza agregası kullanıldığı durumlarda, agrega yerine kullanılan pomza agregası miktarı arttıkça f_{fs} değerlerinin azaldığı belirtilmektedir.

2.4.5.3 Pomzanın beton yarmada çekme dayanımına etkisi

Çimento ile yer değiştirilerek kullanılan ÖP mineral katkısının f_{sts} değerlerine etkisini değerlendiren çalışma sayısı sınırlıdır. Ancak pomzanın agrega olarak kullanıldığı durumlarda betonun f_{sts} değerlerine etkisini değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır. Türkel ve Kadiroğlu (2007) çalışmasında, normal agrega yerine pomza agregası kullanılan hafif betonların f_{sts} değerlerinin, normal betonların f_{sts} değerlerinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Kadiroğlu (2005) normal agrega yerine pomza agregası kullanarak yaptığı kendiliğinden yerleşen beton numunelerinde f_{sts} değerlerinin azaldığını gözlemiştir. Yazıcıoğlu ve Bozkurt (2005) deneysel çalışmada normal agrega yerine pomza agregası, mineral katkı olarak da SD kullanmışlardır. Elde edilen deney sonuçlarında SD içeren beton numunesinin kontrol numunesinden daha fazla f_{sts} değerine sahip olduğunu ve kür süresi arttıkça f_{sts} değerinin arttığını gözlemişlerdir. Yapılan çalışmada, normal agrega yerine pomza agregası kullanıldığı durumlarda, agrega yerine kullanılan pomza agregası miktarı arttıkça f_{sts} değerinin azaldığı belirtilmiştir. Dinçer ve Çağatay (2004) deneysel çalışmada, normal agrega yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası kullanarak taşıyıcı hafif beton üretmişlerdir. Deneysel çalışmada pomza agregası miktarı arttıkça f_{sts} değerlerinin azaldığını gözlemişlerdir. Hossain (2004) deneysel çalışmasında normal agrega ile yer değiştirilerek kullanılan pomza agregasının oranı arttıkça f_{sts} değerlerinin azaldığını belirtmiştir.

2.4.5.4 Pomzanın beton elastisite modülüne etkisi

Beton üretiminde pomza genellikle agregası olarak kullanılmaktadır. Çimento yerine öğütülmüş pomza kullanılarak E_c ve E_d değerlerinin belirlendiği deneysel çalışma sınırlı sayıda. Ancak agregası yerine kullanılan pomza agregası ile yapılan deneysel çalışmalarda betonun E_c değerleri incelenmiştir. Türkel ve Kadiroğlu (2007) pomza agregası ile yaptıkları deneylerden elde edilen E_c değerlerinin, normal agregalı betonların E_c değerlerinden daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Kadiroğlu (2005) yaptığı deneysel çalışmada agregası yerine pomza agregası ve çimento katkı maddesi olarak UK ve SD kullanmıştır. Yapılan çalışmada, normal agregası yerine pomza agregası kullanıldığı durumlarda, agregası yerine kullanılan pomza agregası miktarı arttıkça E_c değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Dinçer ve Çağatay (2004), normal agregası yerine % 0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası kullanarak taşıyıcı hafif beton üretmişlerdir. Deneysel çalışmada pomza miktarı arttıkça E_c değerlerinin azaldığını gözlemişlerdir. Hossain (2004) deneysel çalışmada agregası ile yer değiştirilerek kullanılan pomza oranı arttıkça E_c değerlerinin azaldığını belirtmiştir. Yıldız ve Uğur (2009) yaptıkları deneysel çalışmada yüksek dayanımlı betonun E_c üzerine zeolit ve öğütülmüş pomzanın etkisini araştırmışlardır. Çalışmada çimento yerine farklı oranlarda zeolit ile birlikte öğütülmüş pomza kullandıkları numunelerin E_c değerlerini deneysel olarak ve bazı ülke standartlarında verilen formüllerle belirlemişlerdir.

2.4.5.5 Pomzanın beton dayanıklılığına etkisi

Çevresel etkilere dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik betonun boşluk yapısı ve oranıdır (Uyan vd., 2003). Daha önce yapılan birçok çalışmada, yüksek fırın cürufu ve pomzanın betonda aşınmaya etkisi ve beton dayanıklılığına olumlu katkısı araştırılmıştır (Binici, 2007; Yüksel vd., 2007). Pomza, ülkemizde ve pek çok Avrupa ülkesinde yaygın olarak hafif yapı elemanı üretiminde kullanılmaktadır. Hafif tuğlalar, bloklar, asmolenler, paneller ve diğer kullanım şekilleri inşaatta kullanılan harç ve inşaat demirinden tasarruf sağladığı gibi inşaatlarda önemli oranda ısı ve ses izolasyonu sağlamaktadır. Ayrıca yangına dayanıklılık açısından da normal betona kıyasla %20'ye varan oranda daha emniyetli olduğu kabul edilmektedir (Soğancı, 2011). Yapılan bir çalışmada, pomza ve zeolit minerallerinin yüksek dayanımlı beton üretiminde puzolan olarak değerlendirilmesiyle elde edilen yüksek

dayanımlı betonların bir takım çevresel etkilere karşı dayanım ve dayanıklılığı araştırılmıştır. $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakılan betonlarda, katkı içermeyen kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça %5 pomza ile birlikte %10 zeolit içeren ve sadece %15 pomza içeren betonların f_c değerlerinde az da olsa artış gözlenmiştir. $NaCl$ çözeltisine maruz bırakılan betonlarda, %15 pomza içeren betonun f_c değerlerinde sürekli bir artış gözlenmiştir. H_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılan betonlarda ise, 56. kür gününde yapılan deneyler sonucunda, %15 pomza içeren betonun dayanım kazanmaya devam ettiği, bunun dışındaki tüm beton türlerinin f_c değerlerinin düştüğü ve özellikle ilerleyen yaşlarda yüzeysel kabarmalar gözlemlendiği görülmüştür (Yıldız, 2009).

2.4.5.6 Pomzanın beton geçirimsizliğine etkisi

Sertleşmiş betonun su emme kabiliyeti yani geçirimsizliği betonun hizmet süresi boyunca karşılaşılabileceği yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylara dayanıklılığını ve dayanımını etkilemektedir (Erdoğan, 2003). Suyun ve diğer akışkanların beton içerisinde ilerlemesi betonun sahip olduğu boşluklar yoluyla olur ve zararlı maddeler bu şekilde betonun içerisine taşınır (Akman, 1989). Bu sebepten dolayı bazı depo, baraj vb. yapıların yapımında kullanılan betonlar başta olmak üzere, içerisinde su veya başka bir sıvı bulunduran bütün betonların mümkün olabildiği kadar geçirimsiz olmaları gerekmektedir (Erdoğan, 2003). Yapılan bir çalışmada, üretilen hafif betonların su emme ve karbon geçirgenliği özelliklerinin, pomza agregası içermeyen kontrol betonuna göre, yüksek pomza agregası-çimento oranlarıyla üretilen betonlarda daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu araştırmalar sonucu herhangi bir katkı malzemesi kullanmadan ince ve kalın taneli pomza taşı agregası kullanarak daha geçirimsiz yapısal hafif beton üretimi sağlanabileceği görülmüştür (Gündüz ve Uğur, 2005). Yapılan diğer bir araştırmada, pomza ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların dayanıklılığının, pomza ve yüksek fırın cürufu içermeyen kontrol numunesinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, mineral katkı içermeyen kontrol numunesine göre, %40 pomza ile birlikte %40 yüksek fırın cürufu katkılı betonların f_c değerleri yüksek bulunurken geçirgenlik değeri az bulunmuştur. Araştırmada, çimento yerine ağırlıkça eşit oranlarda pomza ve yüksek fırın cürufunun kullanılması ile daha az geçirimsiz beton üretilabileceği ortaya konmuştur (Aksoğan vd., 2005).

2.5 Pomza ile Yapılmış Çalışmalar

Aydın ve Baradan (2007) yaptıkları deneysel çalışmada, çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık direnci üzerine pomza agregası ve UK içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada çimento yerine ağırlıkça %0, %20, %40 ve %60 oranında UK ve kum yerine pomza agregası kullanmışlardır. Çalışmada, en yüksek f_c ve f_{fs} değerlerini 300°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde gözlemişlerdir. Pomza agregası ile üretilen ve UK içermeyen harçların 600°C sıcaklığa kadar sıcaklığın etkisine karşı yüksek dayanıklılık gösterdiği belirtilmiştir. Bu harçların f_c değerlerinin 600°C sıcaklıkta sadece %4 değer kaybettiğini gözlemişlerdir.

Binici vd. (2009) öğütülmüş bazalt pomzası ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların aşınma direncini, geçirgenliğini, f_c değerlerini ve klor geçirgenliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada ince agrega yerine öğütülmüş bazalt pomzası ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak beton numuneler üretmişlerdir. Karışımlarda %0, %20, %30 ve %40 oranlarında öğütülmüş bazalt pomzası ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu birlikte kullanmışlardır. Ayrıca %40, %60 ve %80 öğütülmüş bazaltik pomza ve %40, %60 ve %80 öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanarak numuneler üretmişlerdir. Aşınma direnci deneylerinde en düşük kütle kaybı değişikliği %40 öğütülmüş bazalt pomzası ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunelerde gözlemişlerdir. Geçirgenlik deneylerinde, kontrol betonlarına göre, öğütülmüş bazalt pomzası ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunelerde geçirgenliğin daha az olduğu gözlenmiştir. En yüksek f_c ve en düşük klor geçirgenliği değerlerini %40 öğütülmüş bazalt pomzası ile birlikte %40 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı numunelerde gözlemişlerdir.

Demirel ve Keleştemur (2010) deneysel çalışmada SD ve ÖP ile üretilen betonların mekanik özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada 9 farklı karışım hazırlamışlardır. Birinci grupta mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 ÖP katkılı beton üretmişlerdir. İkinci grupta ise mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 ÖP ile birlikte %10 oranında SD içeren beton üretmişlerdir. Üretmiş oldukları numuneleri 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakmışlardır. Numuneler üzerinde U_{pv} , f_c ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır.

Tüm numunelerde sıcaklık arttıkça ağırlık kaybının arttığını gözlemişlerdir. Kontrol numunesi hariç tüm numunelerde 400 °C sıcaklığa kadar f_c değerlerinin arttığı daha yüksek sıcaklık değerlerinde ise azaldığını gözlemişlerdir. Sıcaklık arttıkça U_{pv} değerlerinin ise azaldığını gözlemişlerdir.

Hossain (2008) deneysel çalışmasında deniz suyuna maruz kalan çimento esaslı pomza içeren betonların karışım oranları ve kür koşullarının etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmada iki farklı çimento tipinde çimento yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ÖP kullanılmıştır. f_c ve klor geçirgenliği için üretilmiş numuneler normal su ve deniz suyunda küre tabi tutulmuştur. Normal su kürüne göre deniz suyunda kür edilen numunelerin zamana bağlı olarak f_c değerlerindeki azalmanın arttığını gözlenmiştir. Ayrıca ÖP miktarı arttıkça klor geçirgenliğinin arttığı gözlenmiştir. Normal su ile kür edilen numunelere göre deniz suyunda kür edilen numunelerde, klor geçirgenliğinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Hossain (2004) volkanik pomza esaslı çimento ve hafif beton özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada çimento yerine ağırlıkça %0 ile %25 arasında öğütülmüş pomza ve iri agrega yerine hacimce %0 ile %100 arasında pomza agregası kullanarak beton karışımları hazırlamıştır. Bu beton karışımlar üzerinde işlenebilirlik, f_c , E_c , kuruma rötresi, yüzeysel su emme ve su geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada çimento yerine %15 oranına kadar öğütülmüş volkanik pomzanın kullanılabilceği belirtilmiştir. Ayrıca agrega ile yer değiştirilerek kullanılan pomza oranı arttıkça f_c , E_c ve f_{sts} değerlerinin azaldığı belirtilmiştir.

Keleştemur ve Demirel (2010) deneysel çalışmada, ÖP ve SD ile üretilen betonlara gömülmüş donatıların korozyon etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada 9 farklı karışım hazırlamıştır. Birinci grupta mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÖP kullanılmıştır. İkinci grupta ise mineral katkı içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÖP ile birlikte %10 oranında SD kullanılmıştır. Korozyon deneyleri için 10x10x20 cm boyutlarında beton numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler içerisine Ø12 donatısı gömülmüştür. Sadece çimento yerine pomza içeren numunelerde korozyon potansiyelinin pomza miktarı arttıkça zamanla arttığı

gözlenmiştir. Sadece ÖP kullanılan numunelere göre, ÖP ile birlikte SD kullanılan numunelerde korozyon potansiyelinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Green vd. (2011) yaptıkları deneysel çalışmada, doğal olarak oluşmuş hafif volkanik pomza agregasını, yapısal hafif beton geliştirmek için kullanmışlardır. Hafif beton karışımlarında f_c değeri 40 MPa değerinin üstünde ve birim ağırlık 1850 kg/m^3 değerinin altında olacak şekilde tasarlanmıştır. İki farklı grupta tasarlanan karışımlarda; düşük dayanımlı hafif pomza agregalı beton karışımlarda sadece iri agrega yerine pomza agregası, yüksek dayanımlı hafif pomza agregalı beton karışımlarda ise kum ile birlikte ince pomza ve iri agrega yerine pomza kullanılmıştır. Düşük ve yüksek dayanımlı hafif pomza agregalı beton karışımlarında su-bağlayıcı oranı düştükçe, f_c değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca vakum uygulayarak yüksek dayanımlı hafif pomza agregalı beton karışımlarında kum ile birlikte ince pomza, iri agrega yerine pomza ve SD kullanılmıştır. Su-bağlayıcı oranı % 10 seviyelerine inen bu karışımlarda diğerlerinden daha yüksek f_c değerinin elde edilebileceği gözlenmiştir.

Gündüz ve Uğur (2005) herhangi bir katkı kullanmadan yapısal beton özellikleri üzerine farklı incelik ve irilikte pomza agregasının çimento miktarına oranının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda çimento içeriği artıkça ve ince pomza içeriği azaldıkça f_c , f_{fs} ve E_c değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Çalışmada herhangi bir kimyasal ve mineral katkı kullanmadan, ince ve iri pomza agregası kullanarak yapısal hafif beton üretilbileceği belirtilmiştir.

Hossain (2006) yaptığı deneysel çalışmada, ÖP içermeyen kontrol betonu ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarda ince ÖP içeren betonların yüksek sıcaklığa maruz kalmasının f_c değerleri ve dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemiştir. Tüm karışımlarda su-bağlayıcı oranını 0.45 belirlemiş ve 6 farklı oranda çimento yerine ÖP kullanılmıştır. İnce ÖP içeren betonların kontrol betonlarına göre, $400 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar (f_c , klorür direnci ve bozulmaya karşı direncinin yüksek olduğunu) iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. ÖP içeren betonların f_c değerlerinin $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $200 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında yükseldiği, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $400 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında ise %20 ile %30 arasında bir azalma gözlenmiştir. Sıcaklık arttıkça azalma oranının arttığı belirtilmiştir.

Kılıç vd. (2009) yaptıkları deneysel çalışmada, hafif betonun birim ağırlık ve dayanımı üzerine cüruf ve pomza agregalarının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda farklı boyutlarda normal agrega yerine cüruf ve pomza kullanılırken, çimento yerine de sabit oranda SD kullanılmıştır. Çalışmada cüruf ve pomza agregası içeren betonların sertleşmiş birim ağırlık, f_c ve f_{fs} değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmada agrega tipinin sertleşmiş birim ağırlık, f_c ve f_{fs} değerleri üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada bu agrega tipleri ile hafif beton üretilebileceğini ve dayanım değerlerinin yeterli olduğu belirtilmiştir.

Sarıdemir (2013) çalışmasında, farklı seviyelerde SD, ÖP, SD ile birlikte ÖP içeren yüksek dayanımlı betonların f_c değerlerini ve sekant elastisite modülünü araştırmıştır. Deneysel çalışmada, 0.25 su-bağlayıcı oranıyla ve 450 kg/m^3 bağlayıcı miktarıyla 3 farklı seride beton üretilmiştir. SD ve SD ile birlikte ÖP katkısının düşük su-bağlayıcı oranına sahip yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılabileceği açık bir şekilde gözlemlenmiştir. En yüksek f_c değerlerine ve sekant elastisite modülü değerlerine çimento yerine ağırlıkça %15 SD ve % 15 SD ile birlikte %5 ÖP içeren karışımlarda ulaşılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, yüksek dayanımlı betonların f_c değerleri ile sekant modülü arasındaki ilişki araştırılmış; farklı seviyelerde SD, ÖP ve SD ile birlikte ÖP içeren betonların elastisite modülü için iki yeni formül önerilmiştir. En iyi özelliklere sahip yüksek dayanımlı beton üretmek için özellikle çimento yerine ağırlıkça %15 SD kullanılması önerilmiştir. Beton karışımlarına, SD ve SD ile birlikte ÖP eklenmesi, f_c ve elastisite modülü değerlerini artırmıştır.

Binici vd. (2010) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomzayı ayrı ayrı veya birlikte kullandıkları betonların mekanik aşınma ve geçirgenlik özelliklerini araştırmışlardır. Betonda yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza varlığının aşınmazlık ve su geçirimsizliğine olumlu etkiler yaptığını rapor etmişlerdir. Beton aşınması ve geçirgenliğinin katkı tipi ve miktarına bağlı olduğu da belirtilmiştir. Belirli oranlarda söz konusu katkıları ince agrega olarak kullanıldığında daha geçirimsiz beton üretileceğinden zararlı kimyasal ve fiziksel yıkımların önüne geçilebileceği veya etki düzeyinin azaltılabileceği rapor edilmiştir. Aşınma ve geçirgenliğin önemli olduğu yapıların beton üretiminde granüle bazaltik pomza ve yüksek fırın cürufu ince agrega olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler ve bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki başlıklar altında detaylı bir şekilde verilmiştir. Deneysel çalışma Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvarı ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak kontrol betonlarına ek olarak, 6 farklı seride 30 farklı karışımda çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlar üretilmiştir. Bu serilerde, çimento yerine ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında MK, % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında ÖP ve % 2.5, 5, 10 ve 15 oranlarında MK ile birlikte % 2.5, 5, 10 ve 15 oranlarında ÖP farklı kombinasyonlarda yer değiştirilerek kullanılmıştır.

3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

3.1.1 Çimento

Deneysel çalışmada kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2012) standardına uygun, erken dayanımı yüksek CEM I 42.5 R tipi portland çimentosudur. Çimento Niğde Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Karışımlarda kullanılan portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri ile ilgili bilgiler Çizelge 3.1 ve 3.2’de verilmiştir. Çimentonun elek analizi değerlerine ait eğri Şekil 3.1’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan çimentonun tamamı 73 µm elekten geçmiştir. Çimento yerine kullanılan diğer bağlayıcılarla birlikte çimentonun görünümü Fotoğraf 3.1’de verilmiştir.

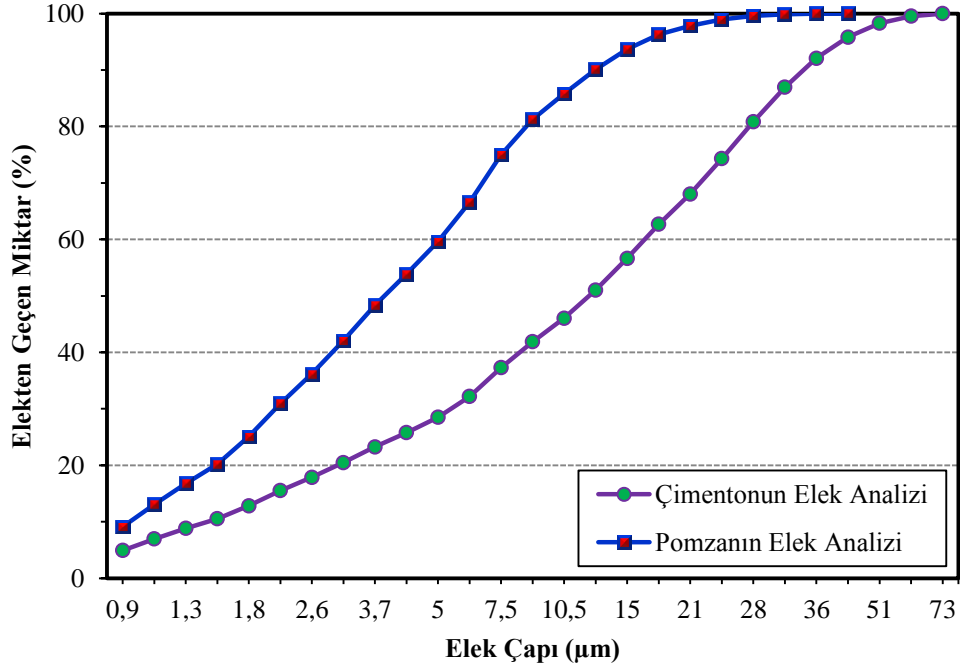
Çizelge 3.1. Karışımlarda kullanılan çimento ve katkıların kimyasal özellikleri

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K.K.
Çimento	22.35	4.5	2.4	63.20	2.5	2.8	0.6	0.7	0.95
Öğütülmüş Pomza	67.9	14.2	2.15	2.5	0.84	0.7	3.44	5.91	2.36
Metakaolin	54.0	45.1	0.42	0.02	0.03	0.01	0.20	0.22	-

K.K.: Kızdırma kaybıdır.

Çizelge 3.2. Beton karışımlarında kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Sonuçlar	
Özgül Ağırlık	3.04	
Priz Süresi	İlk (dakika)	125
	Son (dakika)	220
İncelik	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3320



Şekil 3.1. Çimento ve öğütülmüş pomzanın elek analizi eğrileri



Fotoğraf 3.1. Çimento, metakaolin ve öğütülmüş pomzanın görünümü

3.1.2 Ögütülmüş pomza

Ögütülmüş pomza (ÖP), Nevşehir Mikromin Maden San. ve Tic. A.Ş.'den sağlanmış olup, kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Pomzanın özgül ağırlığı 2.46 olup, elek analizi sonuçlarına göre granülometri eğrisi Şekil 3.1'deki gibi elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan ÖP malzemesinin puzolanik aktivitesi 7 günlük numunelerde %63 olurken, 28 günlük numunelerde %81 değerine ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan ÖP malzemesinin puzolanik aktivitesinin TS EN 197-1 (2012) ve ASTM C 311 (2013) standartlarına uygun olduğunu göstermiştir. Karışımlarda kullanılan ÖP malzemesinin inceliklerini gösteren granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi ÖP çimentodan daha incedir. ÖP malzemesinin tamamı 43 µm elekten geçmiştir. Diğer bağlayıcılarla birlikte çimento yerine kullanılan ÖP malzemesinin görünümü Fotoğraf 3.1'de verilmiştir.

3.1.3 Metakaolin

Deneysel çalışmada kullanılan MK katkısı BASF Türk Kimya Sanayi Limited Şirketinden temin edilmiştir. Beton karışımlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılan MK malzemesinin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çalışmada çimento yerine kullanılan MK malzemesinin özgül ağırlığı 2.5 olarak belirlenmiştir. MK malzemesinin görünümü Fotoğraf 3.1'de verilmiştir. Yüksek saflıkta kaolin kilinin termal aktivasyon sonucu elde edilen MK katkısı yüksek reaktif özelliğe sahiptir. ASTM C 618'e göre N sınıfı puzolan ve ayrıca dayanım aktivite indeksinin ASTM C-1240'a göre uygun olduğu belirtilmiştir.

3.1.4 Fiber

Deneysel çalışmada kullanılan çelik fiber BASF Türk Kimya Sanayi Limited Şirketinden temin edilmiştir. Beton karışımında kullanılan fiber düşük karbon içerikli çelik fiberdir. Bu fiberin uçları beton ile çelik fiber arasında maksimum bağlanma sağlamak amacıyla mekanik olarak deforme edilmiştir. Bu çelik fiberler çatlakların genişlemesini ve yayılmasını, oluşum mekanizmasını kısıtlayarak beton içindeki kuvvetleri yeniden dağıtmaktadır. Bu liflerin en belirgin özelliği kırılma aşamasında güçlendirilmiş betona kopmadan sünek bir davranış kazandırmasıdır. Karışımlarda

kullanılan çelik fiberin fiziksel özellikleri ve şekilleri sırasıyla Çizelge 3.3' ve Fotoğraf 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Beton karışımlarında kullanılan çelik fiberin özellikleri

Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik Oranı (%)	Çekme Dayanımı MPa	Kg'daki Çelik Fiber Sayısı (Tane)
35	0.75	44	1100	8738



Fotoğraf 3.2. Beton karışımlarında kullanılan çelik fiberin görünümü

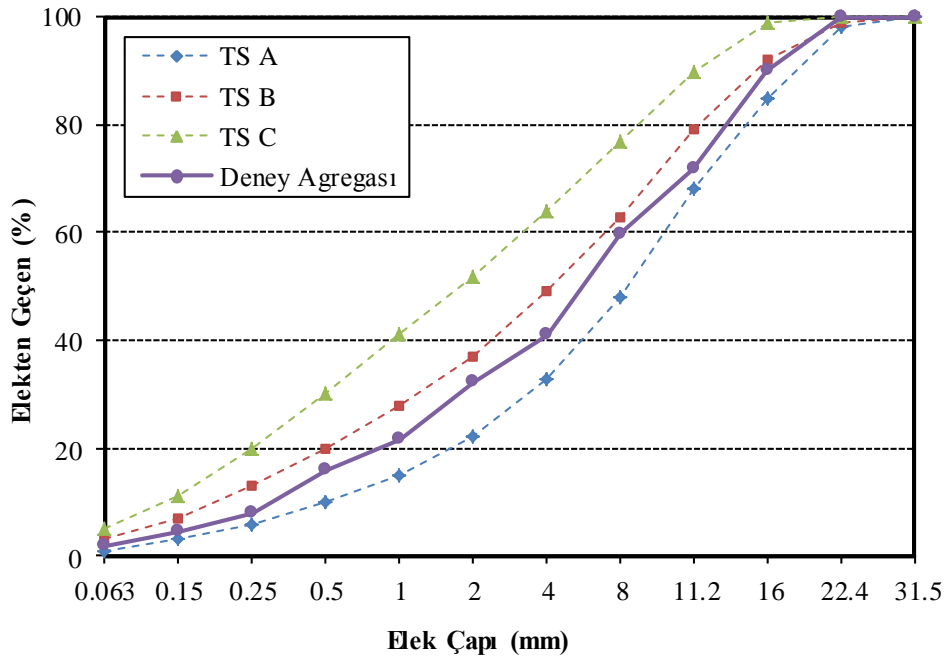
3.1.5 Agregas

Tüm beton karışımlarında iki farklı grupta doğal ince dere agregası ve iki farklı grupta kırmataş agregası olmak üzere dört farklı agregas kullanılmıştır. Deneysel çalışmada ince agregas olarak kullanılan 0-1 mm dane boyutlarında doğal kum-I (DK-I) ve 0-5 mm dane boyutlarında doğal kum-II (DK-II) Niğde Çömlekçi bölgesinden temin edilmiştir. Çalışmada iri agregas olarak kullanılan 5-12 mm dane boyutlarında kırmataş-I (KT-I) ve 12-22 mm dane boyutlarında kırmataş-II (KT-II) agregaları Niğde Dünderli bölgesinden temin edilmiştir. Karışımlarında kullanılan en büyük agregas dane çapı 22 mm'dir. Karışımlarda kullanılan agregaların dane çapları, özgül ağırlıkları ve karışım oranları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan agregaların özgül ağırlığı TS EN 1097-6 (2007) standardına göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan agregaların dane çapı, özgül ağırlığı ve karışım oranı

Agrega Kodu	Dane Çapı (mm)	Malzeme	Özgül Ağırlık	Su Emme (%)	Karışım Oranı (%)
Doğal Kum-I	0-1	Doğal dere	2.53	0.65	10
Doğal Kum-II	0-5	Doğal dere	2.48	0.80	30
Kırmataş-I	5-12	Kalker	2.71	0.40	25
Kırmataş-II	12-22	Kalker	2.73	0.35	35

Deneysel çalışmada, beton karışımlarında kullanılan dört farklı agrega grubunun karıştırılmasıyla oluşturulan agregaların eleklerden geçen yüzde miktarları ve elek çapları Çizelge 3.5’de verilmiştir. Ayrıca TS 802 (2009) standardında verilen elek analizi sınır değerleri ile karışımlarda kullanılan elek analizi değerlerinin eğrileri Şekil 3.2’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, agrega harmanı oluşturulurken beton karışımlarında kullanılacak agregaların elek analizi değerlerinin, TS 802 (2009) standardında verilen beton karışımlarında kullanılacak agrega sınır değerleri arasında kalmasına özen gösterilmiştir. Özellikle daha uygun bir granülometri ile daha yoğun bir beton elde edilmesi için kullanılacak agregaların elek analizi değerlerinin A ve B eğrileri arasında kalması sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Karışımlarda kullanılan agreganın elek analizi (en büyük dane çapı 22 mm).

Çizelge 3.5. Beton karışımlarında kullanılan agregaların elek analizi

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen Yüzde Miktarlar				
	İnce Agregaya		İri Agregaya		Toplam Kullanılan Agregaya
	0-1 mm (%10)	0-5 mm (%30)	5-12 mm (%25)	12-22 mm (%35)	0-22 mm
31.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
22.4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16.0	100.00	100.00	100.00	71.80	90.13
11.2	100.00	100.00	98.92	20.35	71.85
8.0	100.00	100.00	78.36	0.74	59.85
5.6	99.80	99.60	42.20	0.00	50.41
4.0	99.70	93.90	12.04	0.00	41.15
2.0	99.50	73.10	2.02	0.00	32.39
1.0	99.20	38.62	0.50	0.00	21.63
0.5	95.20	21.75	0.06	0.00	16.06
0.25	51.90	9.50	0.00	0.00	8.04
0.15	18.30	8.73	0.00	0.00	4.5
0.63	9.20	3.62	0.00	0.00	2

3.1.6 Süper akışkanlaştırıcı

Deneysel çalışmada, taze beton karışımlarında kıvam ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN 934-2+A1 (2013) ve ASTM C 494-99a (2002) standartlarına uygun süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu süper akışkanlaştırıcı; polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve ileriki yaşlarda yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan betonlar için geliştirilmiş, yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkı malzemesidir. Bu akışkanlaştırıcı; kendiliğinden yerleşen ve sıkışan beton üretiminde, sık donatılı betonarme elemanlara kolay yerleşebilen beton üretiminde, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton üretiminde, hazır beton üretiminde, prekast ve prefabrik beton üretiminde kullanılabilir. Özel olarak +20 °C ve % 50 bağıl nem koşullarında üretilen süper akışkanlaştırıcı ile ilgili teknik özellikler Çizelge 3.6'da verilmiştir. Karışımlarda kullanılan süper akışkanlaştırıcının tipi polikarboksilik eter esaslı sıvı olup yoğunluğu 1.082–1.142 kg/lt arasında değişebilmektedir. Beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı katkı oranı çökme değerlerini 8 ± 2 sağlayacak şekilde kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Amber
Yoğunluk	1.082 – 1.142 kg/lt
Klor İçeriği (%)	< 0.1
Alkali İçeriği (%)	< 3

3.1.7 Karışım suyu

Beton üretiminde kullanılan su üç farklı görev üstlenmektedir. Suyun birinci görevi çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyon) başlamasını sağlamaktır. İkinci görevi, beton üretiminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze betonun istenilen kıvam ve işlenebilmesini sağlamaktır. Üçüncü görevi ise, üretilmiş ve yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyinin ıslak tutularak, beton içerisindeki suyun buharlaşmasını önleyerek, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli suyun bulunmasını sağlamaktır. Deneysel çalışmada kullanılan karışım ve bakım suyu Niğde Belediyesine ait şehir şebekesinden sağlanan içme suyudur. Çeşitli kaynaklarda beton üretiminde kullanılan su genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir. Bundan dolayı beton karışımlarında şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Beton Karışım Oranları

Yapılan deneysel çalışmada, karışımlarda 1 m³ beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Beton üretiminde kullanılan malzemelerin karışım miktarları TS 802 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Tüm beton karışımına giren malzemeler ağırlıkça kullanılmıştır. Karışım hesaplarında, su-bağlayıcı oranı 0.20 olarak alınmıştır. Su-bağlayıcı oranını 0.20’ye indirmek için yüksek oranda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Ayrıca, bağlayıcı miktarı da 500 kg/m³ olarak seçilmiştir. Karışım hesapları için hapsolmuş hava miktarı TS 802 (2009) standardından alınarak, gerekli olan agrega miktarının hacmi hesaplanmıştır. En son olarak ise, hacim olarak bulunan tüm karışımlar özgül ağırlıklarına bölünmüştür. Böylece beton karışımlarında kullanılacak malzemelerin ağırlıkları belirlenmiştir. Karışım hesaplarında su-bağlayıcı oranının 0.20 olarak düşük alınmasının amacı, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton elde edebilmek içindir. Bilindiği gibi su-bağlayıcı oranı düştükçe, daha yüksek dayanımlı ve yüksek dayanıklı beton elde edilebilmektedir. Beton karışımlarındaki düşük su-bağlayıcı oranına sahip bağlayıcı hamuru içerisinde, daha az sayıda kapiler boşluk oluşur. Kapiler boşluk oranının az oluşması, geçirimsizliği, bağlayıcı hamurun dayanım ve dayanıklılığını artırır. Buna bağlı olarak da betonun dayanımı ve dayanıklılığı artar.

Yapılan deneysel çalışmada; çimento, MK, ÖP, su, süper akışkanlaştırıcı, 0-1 mm dane boyutlarında doğal kum-I (DK-I), 0-5 mm dane boyutlarında doğal kum-II (DK-II), 5-12 mm dane boyutlarında kırmataş-I (KT-I) ve 5-22 mm dane boyutlarında kırmataş-II (KT-II) karışım miktarları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Bu malzemeler ile çelik fibersiz ve çelik fiberli karışımlar hazırlanarak kontrol betonlarına ek olarak 6 farklı seri oluşturulmuştur.

Çizelge 3.7. Bir metreküp beton karışımı için malzeme miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	C kg/m ³	MK kg/m ³	ÖP kg/m ³	Su kg/m ³	DK-I (0-1mm)	DK-II (0-5mm)	KT-I (5-12mm)	KT-II (12-22 mm)	Çelik Fiber kg/m ³	SA kg/m ³
K	500	0	0	100	253.33	533.94	486.22	685.73	0	15.00
5MK	475	25	0	100	252.67	532.54	484.94	683.93	0	15.83
10MK	450	50	0	100	252.01	531.14	483.66	682.13	0	16.67
15MK	425	75	0	100	251.34	529.74	482.39	680.33	0	17.50
20MK	400	100	0	100	250.68	528.34	481.11	678.53	0	18.33
5ÖP	475	0.00	25	100	252.36	531.89	484.35	683.10	0	15.00
10ÖP	450	0.00	50	100	251.39	529.84	482.49	680.47	0	18.33
15ÖP	425	0.00	75	100	250.42	527.80	480.62	677.84	0	20.00
20ÖP	400	0.00	100	100	249.45	525.75	478.76	675.21	0	21.67
2.5MK+2.5ÖP	475	12.5	12.5	100	252.52	532.22	484.65	683.51	0	15.00
5MK+5ÖP	450	25	25	100	251.70	530.49	483.08	681.30	0	15.83
5 MK+10 ÖP	425	25	50	100	250.73	528.44	481.21	678.67	0	20.00
5 MK+15 ÖP	400	25	75	100	249.75	526.40	479.35	676.04	0	21.67
10MK+5 ÖP	425	50	25	100	251.03	529.09	481.80	679.50	0	18.33
10MK+10ÖP	400	50	50	100	250.06	527.04	479.93	676.87	0	20.83
15MK+5ÖP	400	75	25	100	250.37	527.69	480.52	677.70	0	19.17
K	500	0	0	100	253.33	533.94	486.22	685.73	50	15.00
5MK	475	25	0	100	252.67	532.54	484.94	683.93	50	15.83
10MK	450	50	0	100	252.01	531.14	483.66	682.13	50	16.67
15MK	425	75	0	100	251.34	529.74	482.39	680.33	50	17.50
20MK	400	100	0	100	250.68	528.34	481.11	678.53	50	18.33
5ÖP	475	0.00	25	100	252.36	531.89	484.35	683.10	50	15.00
10ÖP	450	0.00	50	100	251.39	529.84	482.49	680.47	50	18.33
15ÖP	425	0.00	75	100	250.42	527.80	480.62	677.84	50	20.00
20ÖP	400	0.00	100	100	249.45	525.75	478.76	675.21	50	21.67
2.5MK+2.5ÖP	475	12.5	12.5	100	252.52	532.22	484.65	683.51	50	15.00
5MK+5ÖP	450	25	25	100	251.70	530.49	483.08	681.30	50	15.83
5 MK+10 ÖP	425	25	50	100	250.73	528.44	481.21	678.67	50	20.00
5 MK+15 ÖP	400	25	75	100	249.75	526.40	479.35	676.04	50	21.67
10MK+5 ÖP	425	50	25	100	251.03	529.09	481.80	679.50	50	18.33
10MK+10ÖP	400	50	50	100	250.06	527.04	479.93	676.87	50	20.83
15MK+5ÖP	400	75	25	100	250.37	527.69	480.52	677.70	50	19.17

K: Kontrol betonu, C: Çimento, MK: Metakaolin, ÖP: Öğütülmüş pomza, KT: Kırmataş, DK: Doğal kum, SA: Süper akışkanlaştırıcı.

Kontrol betonundan hariç, birinci ve ikinci seride çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK ve ÖP kullanılarak 8 farklı karışımda betonlar üretilmiştir.

Üçüncü seride ise çimento yerine ağırlıkça % 2.5, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında MK ile birlikte ÖP farklı kombinasyonlarda kullanılarak 7 farklı karışımda (%2.5 MK + %2.5 ÖP; %5 MK + %5 ÖP, %10 ÖP, %15 ÖP; %10 MK + %5 ÖP, %10 ÖP; %15 MK + %5 ÖP) betonlar üretilmiştir. Dördüncü, beşinci ve altıncı serilerde ise ilk üç serideki karışımlara çelik fiber eklenerek 16 farklı karışımda betonlar üretilmiştir. Ayrıca, bu karışımlarda süper akışkanlaştırıcı bağlayıcı malzeme oranına göre %2.5, %3, %3.5 ve %4 oranlarında kullanılmıştır. Yukarıdaki karışım oranlarına göre toplamda 32 farklı karışım elde edilmiş ve bu karışımlar ile ilgili bilgiler Çizelge 3.7’de verilmiştir.

3.3 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları

Beton üretimi 30 dm³ kapasiteli eğilebilen ve yatayda döner tekneli karıştırıcıda yapılmıştır. Karışımlarda su ve bağlayıcı miktarlarını sabit tutarak, eşit işlenebilirliği sağlayabilmek için tüm karışımların deneme betonları üretilmiş ve eklenecek süper akışkanlaştırıcı miktarları belirlenmiştir. Daha sonra, her bir karışım için 30 dm³ beton dökülmüş ve malzemeler ilk önce kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışımlara konulacak suyun yarısı eklenerek 2 dakika daha karışım yapılmıştır.



Fotoğraf 3.3. Taze betonun kalıplara yerleştirilmiş görünümü

Suyun yarısından sonra süper akışkanlaştırıcının tamamı ve ardından suyun geri kalan kısmı ilave edilerek, gerekli kıvam ve işlenebilirliğe gelene kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Daha sonra, üretilmiş betonlar yağlanmış beton kalıplara yerleştirilmiştir. Üretilen betonların, f_c değerleri için 10x10x10 cm ve 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler, f_{st} değerleri için 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler ve f_s değerleri için 10x10x40 cm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır. Üretilen betonların kalıplara iyi yerleşebilmesi için yerleştirme işlemi 3 aşamada yapılmış ve her aşamada numunelere titreşim masası ile sıkıştırma uygulanmıştır. Daha sonra numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılarak kür havuzunda, kırılma gününe kadar standart küre tabi tutulmuştur. Kalıplara yerleştirilmiş ve kalıplardan çıkartılmış beton örnekleri Fotoğraf 3.3 ve 3.4’de sırasıyla verilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Sertleşmiş beton numunelerin görünümü

3.4 Taze Beton Deneyleri

3.4.1 Çökme (Slump) Deneyi

Deneysel çalışmada, çökme deneyi üretilen taze beton numunelerde TS EN 12350-2 (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Çökme deneyleri için üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan bir kesik huni yani Abrams hunisi kullanılmıştır. Çökme deneyinde taze beton huniye doldurulmadan önce huninin içi ıslak bezle ıslatılmıştır. Daha sonra huni su emmeyen bir yüzeye oturtularak üç eşit yükseklikte tabakalar halinde taze betonla doldurulmuştur. Huni içerisindeki betonun her tabakası, çapı 16 mm ve uzunluğu 60 cm olan özel deney çubuğu ile 25 kez şişlenmiştir. Daha sonra huni tamamen doldurularak üstü mala ile tesviye edilmiş ve huninin etrafına dökülen betonlar temizlenmiştir. Huni bekletilmeden kulplarından tutularak yavaşça ve sarsılmadan yukarı kaldırılarak çıkartılmıştır. Huni betonun yanına ters çevrilerek konmuş ve huninin üzerine şişleme çubuğu betonun üzerinden geçecek şekilde konmuştur. Taze betonun kendi ağırlığı ile çöktüğü gözlenmiştir. Numunelerde devrilme olmaksızın, huni çıkartıldıktan sonra betonun çöktüğü miktar, karışımın çökme değeri olarak belirlenmiştir. Böylece, deneysel çalışmalarda üretilen her bir beton karışımının çökme değeri belirlenmiş ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarı ile bu değerler 6 cm ile 10 cm arasında kalması sağlanmıştır. Bu deneysel çalışmadaki karışımlarda çökme değerinin bu değerler arasında kalması süper akışkanlaştırıcı katkı oranı ile ayarlanmıştır.

3.4.2 Taze betonun birim ağırlığı

Birim ağırlık, malzemenin içersin de bulunan boşluklar da dahil ağırlığının, malzemenin hacmine bölünmesiyle belirlenir. Taze betonun birim ağırlığı ise belirli bir kabın içine sıkıştırılarak yerleştirilmiş betonun birim hacmine karşılık gelen ağırlığıdır. Taze betonun birim ağırlığı belirlenirken TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C138 (1994) standartları göz önünde bulundurulur. Betonun birim hacim ağırlığı, genellikle, kg/m^3 veya t/m^3 birimleri ile ifade edilmektedir. Üretilen betonların taze birim ağırlıkları Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta = \frac{P}{V_h} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de, Δ ; taze betonun birim ağırlığını (kg/m^3), P; taze betonun ağırlığını (kg) ve V_h ; taze betonun hacmini (m^3) ifade etmektedir.

Üretilmiş olan betonların taze birim ağırlıklarının belirlenmesi için $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki küp plastik numune kalıpları kullanılmış ve karışımlar kalıplara 3 aşamada sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin her aşamasında titreşim masası ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Taze beton doldurulan kalıpların açıkta kalan üst yüzeyleri mala ile düzeltilip, kalıbın dışına taşan beton temizlenmiştir. Bu işlemlerden sonra numunelerin tartma işlemi yapılmıştır. Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesinde, kullanılan boş küp plastik numune kalıplarının ağırlıkları daha önceden belirlenmiştir. Taze beton doldurulmuş kabın ağırlığı tartıldıktan sonra, tartılan ağırlıktan boş kalıbın ağırlığı çıkartılarak betonun net ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra betonun net ağırlığı, $15 \times 15 \times 15$ cm küp numunenin hacmine bölünerek taze betonun birim hacim ağırlığı belirlenmiştir.

3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneylerinden sertleşmiş birim ağırlık ve U_{pv} deneyleri $10 \times 10 \times 10$ cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde, f_{sts} deneyleri, $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde ve f_{fs} deneyleri $10 \times 10 \times 40$ prizma numuneler üzerinde yapılmıştır. f_c deneyleri ise $10 \times 10 \times 10$ cm ve $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır.

3.5.1 Sertleşmiş birim ağırlık

Üretilmiş olan betonların sertleşmiş birim ağırlık değerleri, f_c için üretilen $10 \times 10 \times 10$ cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Bu numunelerin kür havuzundan çıkartıldıktan sonra suya doymun kuru yüzey durumundaki ağırlıkları tartılarak sertleşmiş birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. İlk önce, her bir numunenin ağırlıkları ayrı ayrı tartılmıştır. Daha sonra her bir karışıma karşılık gelen 3 numunenin ortalama ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ağırlık değerlerinin numune hacmine bölünmesiyle, her bir karışımın sertleşmiş birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Sertleşmiş birim ağırlık deneyinin belirlenmesi Fotoğraf 3.5’de verilmiştir.



Fotoğraf 3.5. Sertleşmiş birim ağırlık deneyinin yapılışı

3.5.2 Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı (U_{pv}) deney yöntemi ile betonunun dayanım değerleri tam olarak belirlenmemektedir. Ancak herhangi bir beton içerisinde geçen sesüstü dalganın geçiş süresi, beton içerisinde bulunan boşluk ve yoğunluk ile yakından ilişkilidir. Daha boşluksuz ve yoğun üretilmiş betondan sesüstü dalganın geçiş süresi daha kısadır. Sesüstü dalganın geçiş süresinin daha kısa olması betonun daha kaliteli olduğu, dayanım ve dayanıklılığının daha yüksek olduğu hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışmada, ultrases geçiş süresi ölçümleri, dijital ultrases geçiş hızı ölçme aleti ile belirlenmiştir. Ultrases geçiş süresi belirlenirken numunenin ölçüm yapılacak yüzeyleri temizlenmiştir. Diğer taraftan okumaların daha sağlıklı olabilmesi için test cihazının başlıkları ultrases jeli ile jellenmiş ve bu cihazın alıcı ve verici problemleri her bir numunenin karşılıklı yüzeylerine tutularak bir numunede en az iki okuma yapılmıştır. Daha sonra 3 numuneden okunan değerlerin ortalaması alınarak ultrases geçiş süreleri belirlenmiştir. U_{pv} ölçümleri ASTM C 597 (1994) standardına göre yapılmıştır. U_{pv} deneyinin yapılışı Fotoğraf 3.6'da verilmiştir.

Ultrases geçiş süresinin belirlenmesinde, f_c için üretilen 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi, su küründen çıkartılmış suya doymuş yüzey kuru durumdaki numuneler üzerinde, f_c deneylerinden önce belirlenmiştir. Belirlenen ses dalgaları sesin bir uçtan diğer bir uca geçmesi için

geçen zamanın milyonda biri olarak alınır. Yani mikrosaniye (μs) cinsinden ifade edilir. U_{pv} sesüstü dalgaların numune boyutundan geçiş süresine bağlı olarak Denklem 3.2 ile hesaplanır. Ultrases geçiş cihazı ile ölçülen sürenin az olması beton içerisindeki boşlukların az olduğunu ve betonun yoğun ve kaliteli olduğunu göstermektedir.

$$U_{pv} = \frac{S}{t} \times 10 \quad (3.2)$$

Burada, U_{pv} ; ultrases geçiş hızını (km/sn), S; betonun dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafeyi (cm) ve t; ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zamanı (μs) ifade etmektedir.



Fotoğraf 3.6. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı

3.5.3 Basınç dayanımı

Deneysel çalışmada f_c değerleri belirlenirken TS EN 12390-3 (2010) standardında belirtilen kurallar dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada beton numunelerin f_c değerleri 10x10x10 cm ve 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Basınç deneyi yapılacak numunelerin, deney günü kür havuzundan birkaç saat önce çıkartılarak, suya doymun kuru yüzey durumuna gelmeleri sağlanmıştır. Daha sonra her bir numunenin sertleşmiş birim ağırlık değerleri ve ultrases geçiş süreleri ölçüldükten sonra, Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan 3000 kN yük kapasitesine sahip pres kullanılarak istenilen günlerdeki f_c değerleri belirlenmiştir. f_c deneyinin yapılışının görünümü Fotoğraf 3.7'de verilmiştir.



Fotoğraf 3.7. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı

3.5.4 Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı (f_{sts}) deneyleri 15x15x15 cm boyutlu küp numuneler üzerinde TS EN 12390-6 (2010) standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır. Deney yapılacak numunelerin, deney günü kür havuzundan çıkartılarak, suya doymun kuru yüzey durumuna gelmeleri sağlanmıştır. Beton numunelerin f_{sts} deneyi, küp numunelerin alt ve üst yüzeylerine çitalar yerleştirilerek, bu deney için özel yapılmış aparata yerleştirildikten sonra 3000 kN yük kapasitesine sahip pres ile deneye tabi tutularak belirlenmiştir. Bu şekilde kırılma yükleri uygulanan küp numuneler ortadan yarılarak iki ayrı parçaya ayrılmaktadır. Küp numunelerde, numune uzunluğu boyunca dar bir alana yerleştirilen çitalar ile basınç yükü uygulanarak f_{sts} değerleri belirlenmiş olur. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvvetleri sonucunda oluşan çekme gerilmeleri numunenin kırılmasına neden olur. Küp numunelere ait f_{sts} değerleri kırılma yüküne bağlı olarak Denklem 3.3 kullanılarak belirlenmiştir.

$$f_{sts} = \frac{2N}{\pi a^2} \quad (3.3)$$

Burada, f_{sts} ; yarmada çekme dayanımını (MPa), N; kırılmaya neden olan yükü (N) ve a; küp numunenin uzunluğunu (mm) ifade etmektedir. Yarmada çekme deneyinin yapılışını Fotoğraf 3.8 göstermektedir.



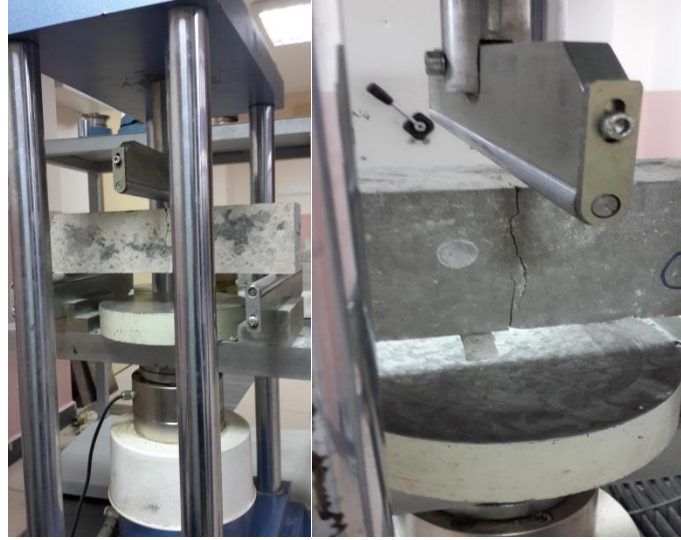
Fotoğraf 3.8. Yarmada çekme dayanımı deneyinin yapılışı

3.5.5 Eğilme dayanımı

Deneysel çalışmada f_{fs} değerini belirlemek için 10x10x40 cm boyutlarında prizma numuneler kullanılmıştır. Çalışmada f_{fs} deneyi, TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Beton numuneler üzerinde f_{fs} deneyleri tek noktadan yükleme deneyine göre belirlenmiştir. Her bir gruba ait f_{fs} deneylerinde kırılmaya tabi tutulan 3 numunenin ortalama yük değerleri dikkate alınmıştır. f_{fs} deneyinin yapılışının görünümü Fotoğraf 3.9’da verilmiştir. Numunelere ait f_{fs} değerleri kırılma yüküne bağlı olarak Denklem 3.4 kullanılarak belirlenmiştir.

$$f_{fs} = \frac{3NL}{2bd^2} \quad (3.4)$$

Bu formülde, f_{fs} ; eğilme dayanımını (MPa), N; kırılmaya neden olan yükü (N), L; numunenin uzunluğunu (mm), b; numunenin enini (mm) ve d; numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.



Fotoğraf 3.9. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışı

Deneysel yöntem ile f_{fs} değerinin belirlenmesi işlemlerinde, eğilme yükü uygulanan kiriş numunelerde basınç ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Deney uygulanan kiriş numunelerin tarafsız ekseninin üst bölgesinde basınç gerilmeleri, alt bölgesinde ise çekme gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Tarafsız eksenden alt kenara doğru yaklaştıkça çekme gerilmelerinin değerleri daha da büyümektedir. f_{fs} değerlerinin belirlenmesi için, eğilme yükü uygulanan kirişlerde kırılma, betonun tarafsız eksen altındaki çekme gerilmelerinden dolayı meydana gelmektedir. Çekme gerilmelerinden dolayı meydana gelen kırılmanın nedeni olarak, betonun oldukça düşük çekme dayanımına sahip olması gösterilebilir. Deneylerde bu şekilde elde edilen f_{fs} değerleri betonun dolaylı çekme dayanımı değerlerini vermektedir.

BÖLÜM IV

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Taze Beton DeneYleri

4.1.1 Çökme (Slump) Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen her bir beton karışımının çökme değeri belirlenmiştir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarı ile çökme değerlerinin 8 cm ile 10 cm arasında kalması sağlanmıştır. Fiberli ve fibersiz tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı oranı çökme değerlerini belirli bir seviyede tutacak şekilde %3 ile %4.33 arasında belirlenmiştir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı oranları ve tüm karışımlara ait çökme değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı ile birlikte çimento yerine ağırlıkça kullanılan MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP oranı arttıkça çökme değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bundan dolayı MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren karışımlarda çökme değerlerini 8 ± 2 tutmak için süper akışkanlaştırıcı oranı artırılmıştır. Özellikle karışımlarda çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanıldığında, ÖP oranı arttıkça çökme değerleri daha da azalmıştır. Bundan dolayı %5, %10, %15 ve %20 ÖP içeren karışımlarda süper akışkanlaştırıcı oranı kademeli olarak %3'den %4.33 oranına kadar artırılmıştır. Düşük su-bağlayıcı oranı nedeniyle karışımlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP miktarının artmasıyla birlikte işlenebilirliğin azaldığı gözlenmiştir ve bu nedenle farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

MK ve ÖP malzemelerinin özgül ağırlığı çimentonun özgül ağırlığından daha azdır. Bu nedenle, karışımlarda kullanılan bağlayıcı malzemenin toplam hacmi artmıştır. Yani, karışımlarda çimento yerine kullanılan MK ve ÖP malzemelerinin içeriği ile birlikte karışımların toplam hacmi artmıştır. Bu hacim artışı betondaki bağlayıcı hamurun hacmini artırmaktadır. Böylece, süper akışkanlaştırıcı ve bağlayıcı hamurun artmasıyla birlikte daha akıcı ve işlenebilmesi daha kolay olan bir beton elde edilmiştir. Ayrıca, süper akışkanlaştırıcı katkının yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip olması nedeniyle üretilen beton karışımlarında, su-bağlayıcı oranı 0.20 belirlenerek süper akışkanlaştırıcı katkısının ne kadar etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca beton karışımlarında kullanılan süper akışkanlaştırıcının polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı etkisi

nedeniyle (bu katkı genellikle kendiliğinden yerleşen ve sıkışan beton üretiminde kullanılmaktadır) işlenebilirlik üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

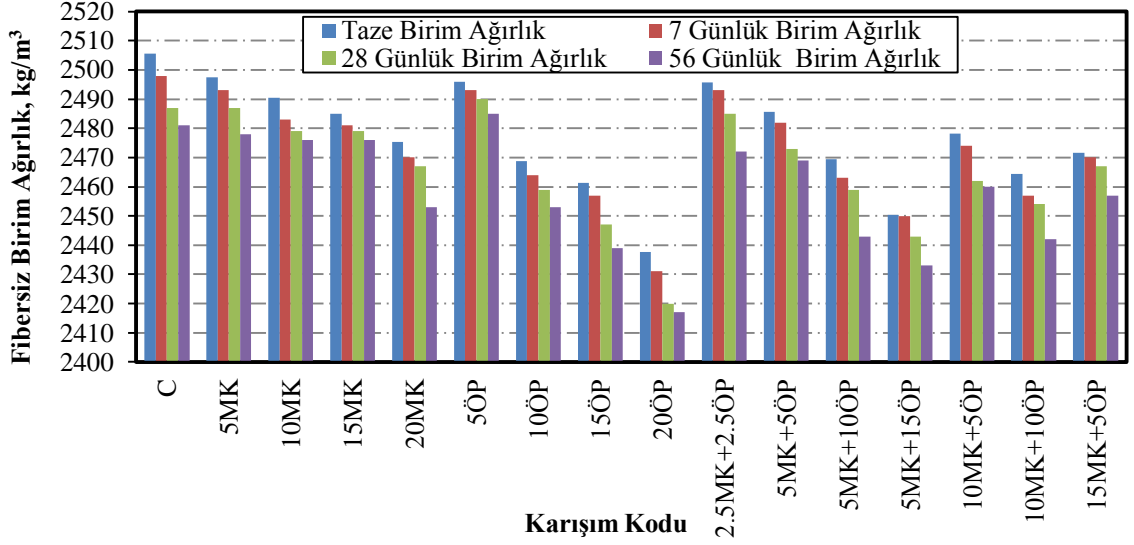
Çizelge 4.1. Beton karışımlarının çökme ve taze birim ağırlık değerleri

Karışım Kodu	Fibersiz Betonlar		Fiberli Betonlar		Süper Akışkanlaştırıcı (%)
	Çökme (cm)	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	
K	6.00	2505.48	7.00	2514.67	3.00
5MK	7.00	2497.48	7.00	2503.41	3.20
10MK	7.00	2490.37	8.00	2496.30	3.33
15MK	9.00	2485.04	9.00	2493.93	3.50
20MK	10.00	2475.26	10.00	2491.26	3.67
5ÖP	6.00	2496.00	6.00	2505.19	3.00
10ÖP	7.00	2468.74	7.00	2481.48	3.67
15ÖP	8.00	2461.33	7.00	2473.78	4.00
20ÖP	8.00	2437.63	8.00	2468.44	4.33
2.5MK+2.5ÖP	6.00	2495.70	6.00	2508.74	3.00
5MK+5ÖP	8.00	2485.63	7.00	2495.41	3.20
5MK+10ÖP	7.00	2469.33	8.00	2492.44	4.00
5MK+15ÖP	8.00	2450.37	8.00	2487.41	4.33
10MK+5ÖP	9.00	2478.22	9.00	2488.59	3.67
10MK+10ÖP	10.00	2464.30	10.00	2484.74	4.17
15MK+5ÖP	9.00	2471.70	8.00	2486.22	3.83

4.1.2 Taze betonun birim ağırlığı

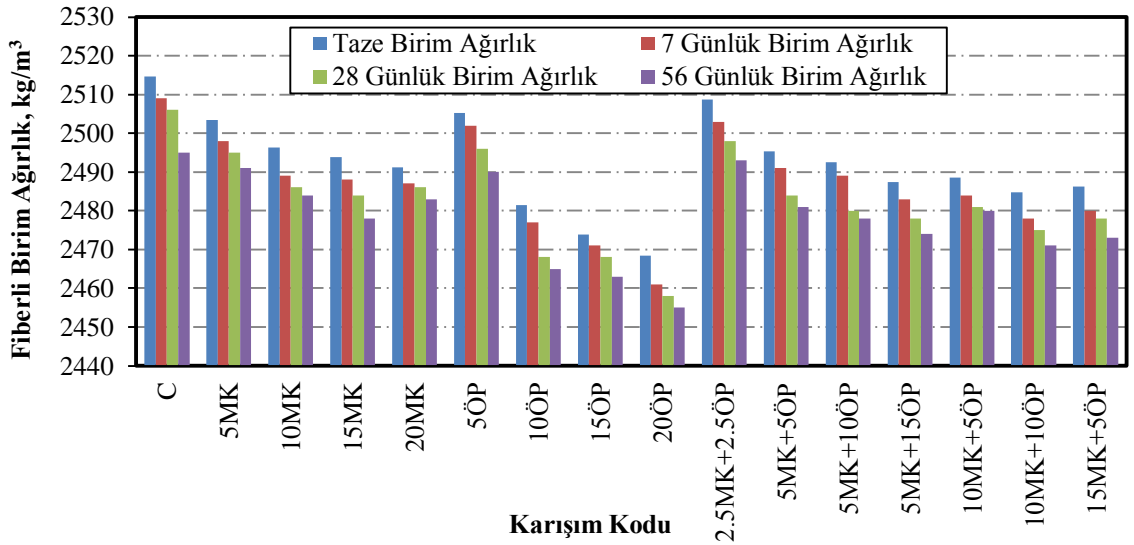
Beton karışımlarında çelik fiber ile birlikte çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak üretilen numunelerin TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C 138 (1994) standartlarına göre taze birim ağırlıkları ölçülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli tüm numunelerden elde edilen birim ağırlık değerleri Çizelge 4.1 ile Şekil 4.1 ve 4.2’de sırasıyla verilmiştir. Çelik fibersiz ve çelik fiberli taze beton karışımlarının ölçülen birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 2437 kg/m³ ile 2505 kg/m³ ve 2468 ile 2515 kg/m³ arasında değişmiştir. Çelik fibersiz ve çelik fiberli tüm karışımlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeriğinin artmasıyla birlikte taze birim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da MK ve ÖP katkılarının çimentoya göre daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip olması gösterilebilir. Ancak, çelik fibersiz betonlara göre çelik fiberli betonların taze birim ağırlık değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, çelik fiberin özgül ağırlığının diğer karışım malzemelerine göre daha yüksek olmasıdır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli karışımlarda en yüksek taze birim ağırlık değeri kontrol

betonunda gözlenirken, en düşük taze birim ağırlık değeri ise %20 ÖP içeren karışımlarda gözlenmiştir.

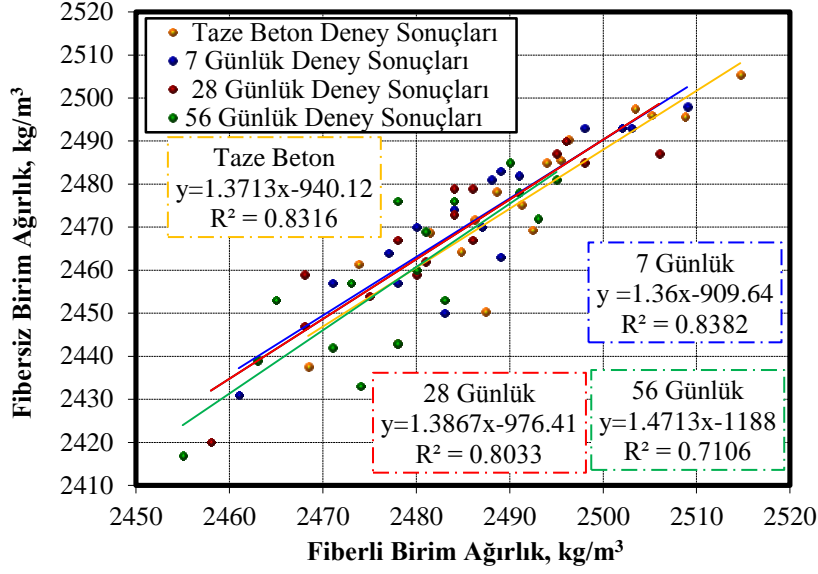


Şekil 4.1. Fibersiz betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri.

Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların taze birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Karşılaştırmadan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli taze birim ağırlık değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen R^2 değerleri ve korelasyon çizgileri açıkça göstermektedir.



Şekil 4.2. Fiberli betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri.



Şekil 4.3. Betonların birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması.

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak f_c deneyleri için üretilen 10x10x10 cm küp betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş beton birim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.2 ile Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekiller incelendiğinde betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılması durumunda 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş beton birim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmiştir. Buna ek olarak kür süresinin artmasıyla birlikte de sertleşmiş birim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kür süresinin artmasıyla birlikte sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin azalmasının nedeni, karışım içerisinde bulunan CH içeriğinin su kuru nedeniyle çözülerek numunelerden dışarıya çıkmasıdır.

Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en düşük sertleşmiş birim ağırlık değerleri %20 ÖP içeren numunelerde gözlenirken, en büyük sertleşmiş birim ağırlık değerleri kontrol numunelerinde gözlenmiştir. ÖP içeren numunelerin sertleşmiş birim ağırlıklarının diğer numunelere göre daha düşük olmasının nedeni olarak, ÖP ile üretilen betonların diğer betonlara göre daha boşluklu bir yapıya sahip olması ve ÖP katkısının özgül ağırlığının çimentodan daha düşük olması gösterilebilir. Ancak, çelik fibersiz

karışımlara göre çelik fiberli betonlardan elde edilen sertleşmiş birim ağırlık değerleri çelik fiberin özgül ağırlığının yüksek olması nedeniyle daha yüksektir.

Çizelge 4.2. Betonların sertleşmiş birim ağırlık değerleri

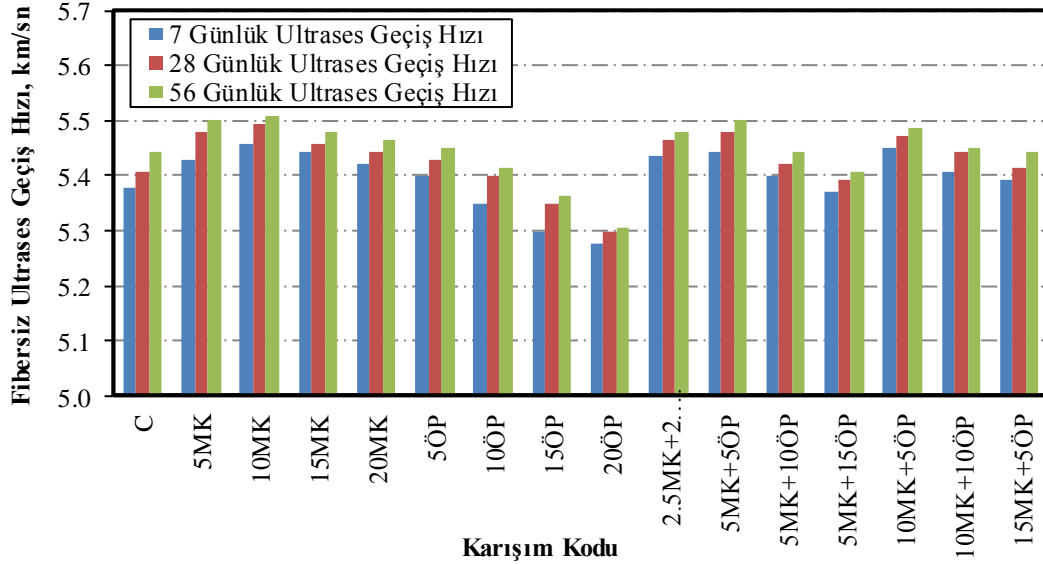
Karışım Kodu	Fibersiz Betonlar			Fiberli Betonlar		
	7 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	28 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	56 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	7 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	28 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	56 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)
K	2498	2487	2481	2509	2506	2495
5MK	2493	2487	2478	2498	2495	2491
10MK	2483	2479	2476	2489	2486	2484
15MK	2481	2479	2476	2488	2484	2478
20MK	2470	2467	2453	2487	2486	2483
5ÖP	2493	2490	2485	2502	2496	2490
10ÖP	2464	2459	2453	2477	2468	2465
15ÖP	2457	2447	2439	2471	2468	2463
20ÖP	2431	2420	2417	2461	2458	2455
2.5MK+2.5ÖP	2493	2485	2472	2503	2498	2493
5MK+5ÖP	2482	2473	2469	2491	2484	2481
5MK+10ÖP	2463	2459	2443	2489	2480	2478
5MK+15ÖP	2450	2443	2433	2483	2478	2474
10MK+5ÖP	2474	2462	2460	2484	2481	2480
10MK+10ÖP	2457	2454	2442	2478	2475	2471
15MK+5ÖP	2470	2467	2457	2480	2478	2473

Çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük betonların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Karşılaştırmadan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük betonların birim ağırlık değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen R² değerleri ve korelasyon çizgileri doğrulamaktadır.

4.2.2 Ultrases geçiş hızı

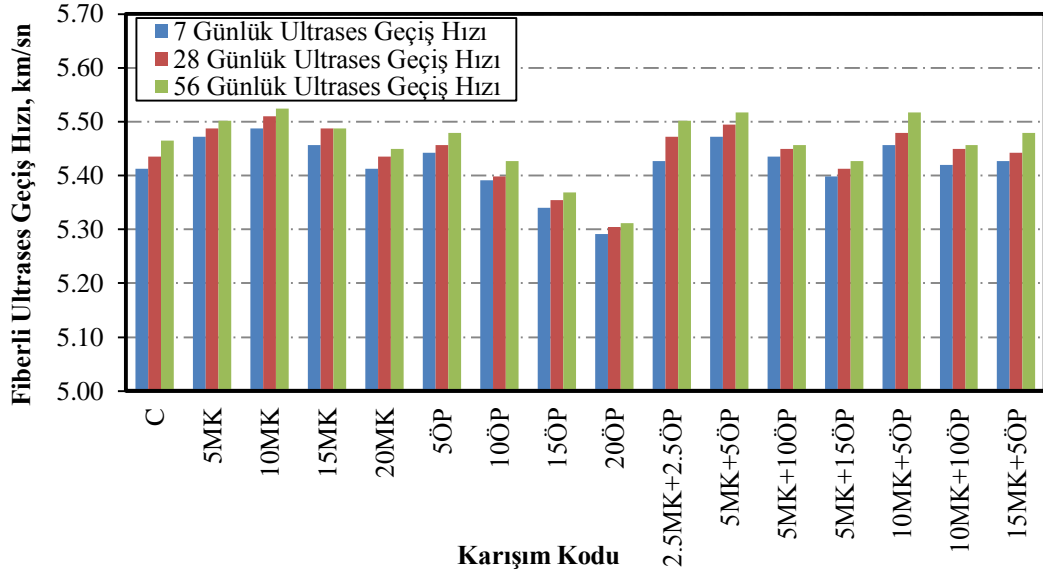
Çelik fibersiz ve çelik fiberli beton karışımlarıyla çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak üretilen 10x10x10 cm küp betonların 7, 28 ve 56 günlük f_c değerleri bulunmadan önce, ultrases geçiş hızı (U_{pv}) ölçme cihazı ile numuneler üzerinde ultrases geçiş süreleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucu Denklem 3.2'deki formül ile hesaplanan U_{pv} değerleri Çizelge 4.3 ile Şekil 4.4 ve 4.5'de verilmiştir. MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli karışımların U_{pv} değerleri, kür sürelerinin artmasıyla birlikte Çizelge 4.3 ile Şekil 4.4

ve 4.5’de görüldüğü gibi artmıştır. Bu çizelge ve şekiller incelendiğinde, çelik fiberli ve çelik fibersiz betonlarda, kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan serilerde, %20 MK içeren numuneler hariç, 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerleri artmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda, çimento yerine ağırlıkça %10 MK kullanıldığında U_{pv} değerlerinin en yüksek seviyede olduğu gözlenmiştir.



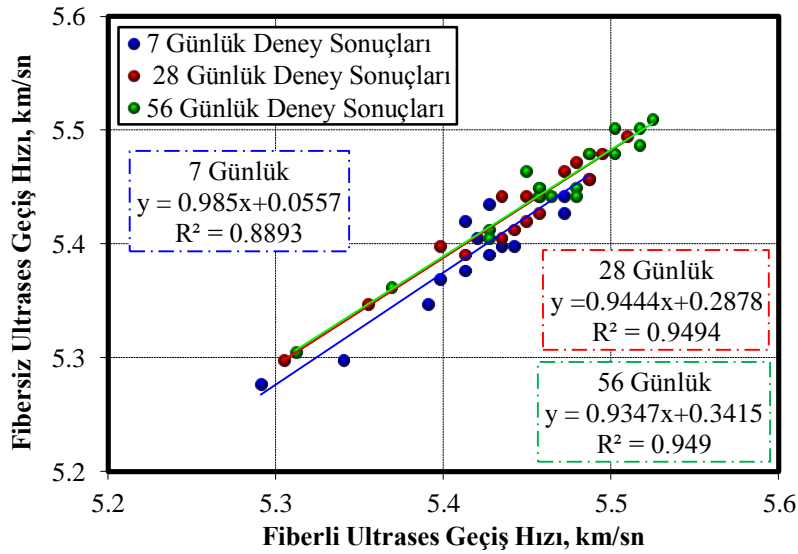
Şekil 4.4. Fibersiz betonların ultrases geçiş hızı değerleri.

Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda; çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanılan serilerde 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerleri, kontrol betonlarına göre, % 5 ÖP içeren numuneler hariç, ÖP içeriği arttıkça kademeli olarak azalmıştır. Çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda, %5 MK ile birlikte %15 ÖP içeren numuneler hariç, kontrol betonuna göre, 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerleri artmıştır. MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda, en yüksek U_{pv} değeri % 5 MK ile birlikte % 5 ÖP ve % 10 MK ile birlikte % 5 ÖP içeren betonlarda gözlenirken, %15 MK ile birlikte %5 ÖP ve %10 MK ile birlikte %10 ÖP içeren betonlarda kontrol betonuna göre fazla bir değişiklik görülmemiştir. Ayrıca, çelik fibersiz karışımlara göre, çelik fiberli betonlarda biraz daha yüksek U_{pv} değerleri elde edilmiştir. Çelik fiber ilavesi 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerlerini ortalama olarak sırasıyla yaklaşık %0.45, %0.25 ve %0.30 oranlarında artırmıştır. Bu sonuçlara göre, çelik fiber içeriğinin U_{pv} değerlerini ilk günlerde ve ileriki yaşlarda çok fazla değiştirmedeği söylenebilir.



Şekil 4.5. Fiberli betonların ultrases geçiş hızı değerleri.

MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük betonların U_{pv} değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmiştir. Karşılaştırmadan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük betonların U_{pv} değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen R^2 değerleri ve korelasyon çizgileri doğrulamaktadır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların U_{pv} değerleri arasındaki farkın, 28 ve 56 günlük betonlara göre, 7 günlük betonlarda daha fazla olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.6. Betonların ultrases geçiş hızı değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.3. Betonların ultrases geçiş hızı değerleri

Karışım Kodu	Fibersiz Betonlar			Fiberli Betonlar		
	7 Günlük U_{pv} (km/sn)	28 Günlük U_{pv} (km/sn)	56 Günlük U_{pv} (km/sn)	7 Günlük U_{pv} (km/sn)	28 Günlük U_{pv} (km/sn)	56 Günlük U_{pv} (km/sn)
K	5.38	5.41	5.44	5.41	5.43	5.46
5MK	5.43	5.48	5.50	5.47	5.49	5.50
10MK	5.46	5.49	5.51	5.49	5.51	5.52
15MK	5.44	5.46	5.48	5.46	5.49	5.49
20MK	5.42	5.44	5.46	5.41	5.43	5.45
5ÖP	5.40	5.43	5.45	5.44	5.46	5.48
10ÖP	5.35	5.40	5.41	5.39	5.40	5.43
15ÖP	5.30	5.35	5.36	5.34	5.35	5.37
20ÖP	5.28	5.30	5.31	5.29	5.31	5.31
2.5MK+2.5ÖP	5.43	5.46	5.48	5.43	5.47	5.50
5MK+5ÖP	5.44	5.48	5.50	5.47	5.49	5.52
5MK+10ÖP	5.40	5.42	5.44	5.43	5.45	5.46
5MK+15ÖP	5.37	5.39	5.41	5.40	5.41	5.43
10MK+5ÖP	5.45	5.47	5.49	5.46	5.48	5.52
10MK+10ÖP	5.41	5.44	5.45	5.42	5.45	5.46
15MK+5ÖP	5.39	5.41	5.44	5.43	5.44	5.48

U_{pv} değerlerinin pratik olarak değerlendirilmesinin verildiği Çizelge 4.4 ile 56 günlük beton numunelere ait U_{pv} değerlerinin verildiği Çizelge 4.3 karşılaştırıldığı takdirde numunelerin hepsinin “Mükemmel” sınıfına girdiği görülmüştür.

Çizelge 4.4. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesinin değerlendirilmesi (Erdoğan, 2003)

U_{pv} (km/sn)	Beton Kalitesi
> 4.5	Mükemmel
4.5-3.5	İyi
3.5-3.0	Şüpheli
3.0-2.0	Zayıf
< 2	Çok Zayıf

4.2.3 Basınç dayanımı

Çelik fibersiz ve çelik fiberli beton betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak üretilen 10x10x10 cm küp betonların 7, 28 ve 56 günlük f_c değerleri Çizelge 4.5 ile Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Ayrıca, çelik fibersiz ve çelik fiberli bu betonlardan üretilen 15x15x15 cm küp betonların 56 günlük f_c değerleri de Çizelge 4.5 ile Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. MK, ÖP ve MK ile birlikte

ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli karışımların kür sürelerinin artmasıyla birlikte f_c değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

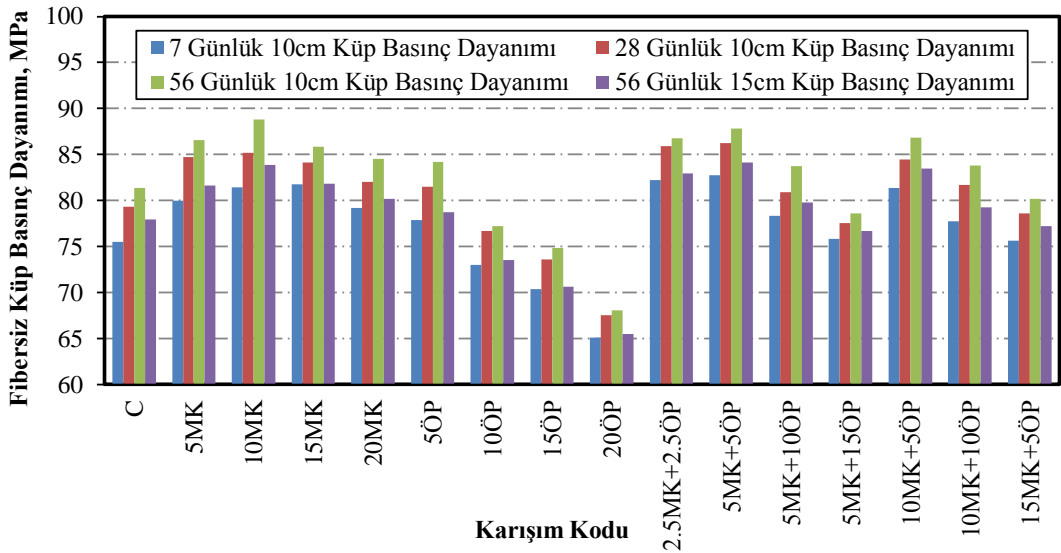
Çimento yerine ağırlıkça sadece MK kullanılan çelik fibersiz betonlarda, kontrol betonlarına göre, daha yüksek f_c değerleri elde edilmiştir. Ancak, çelik fiberli betonlarda sadece %20 MK içeren numunelerin f_c değerleri, kontrol betonlarına göre, daha düşük çıkmıştır. Sadece MK içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en yüksek f_c değeri % 10 MK içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz betonlarda %10 MK içeriği, f_c değerlerini kontrol betonlarına göre 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde yaklaşık olarak sırasıyla %8, %7 ve %9 oranlarında artırırken, çelik fiberli betonlarda %8, %10 ve %6 oranlarında artırmıştır. Elde edilen küp f_c sonuçları, çimento yerine MK kullanılması durumunda yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar üretilebileceğini göstermiştir. Özellikle MK içeren betonlarda, MK malzemelerinin çimento taneleri ve agrega ile çimento hamuru arasındaki boşlukları doldurması ve CH ile girdikleri reaksiyon sonucunda f_c değerlerinin artmasında önemli rol oynamamıştır.

Çizelge 4.5. Beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri

Karışım Kodu	Fibersiz Betonlar				Fiberli Betonlar			
	7 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	28 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	56 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	56 Günlük 15cm Küp f_c (MPa)	7 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	28 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	56 Günlük 10cm Küp f_c (MPa)	56 Günlük 15 cm Küp f_c (MPa)
K	75.50	79.35	81.35	77.93	85.93	88.39	91.72	86.41
5MK	79.98	84.73	86.56	81.62	90.76	94.82	96.16	92.23
10MK	81.44	85.19	88.78	83.86	92.72	97.39	97.52	93.42
15MK	81.73	84.15	85.82	81.83	87.93	92.26	93.77	88.28
20MK	79.18	82.02	84.53	80.20	83.95	86.75	89.98	84.78
5ÖP	77.89	81.51	84.19	78.73	84.95	88.96	92.08	87.40
10ÖP	73.00	76.71	77.20	73.50	76.85	81.44	82.45	76.97
15ÖP	70.38	73.61	74.83	70.61	73.18	75.42	76.64	74.59
20ÖP	65.13	67.51	68.04	65.49	70.18	70.83	72.03	70.56
2.5MK+2.5ÖP	82.24	85.89	86.74	82.94	85.73	90.29	93.60	87.57
5MK+5ÖP	82.77	86.25	87.84	84.11	88.44	92.65	94.97	89.03
5MK+10ÖP	78.35	80.93	83.71	79.78	85.50	87.28	89.70	86.14
5MK+15ÖP	75.82	77.53	78.57	76.72	82.01	84.50	86.94	82.64
10MK+5ÖP	81.37	84.44	86.84	83.47	86.90	89.48	93.16	87.28
10MK+10ÖP	77.77	81.67	83.77	79.25	84.37	87.75	89.56	85.02
15MK+5ÖP	75.62	78.57	80.20	77.21	84.27	86.08	89.40	84.84

Çimento yerine ağırlıkça sadece ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda, kontrol betonuna göre, Çizelge 4.5 ile Şekil 4.7 ve 4.8'de görüldüğü gibi ÖP içeriği

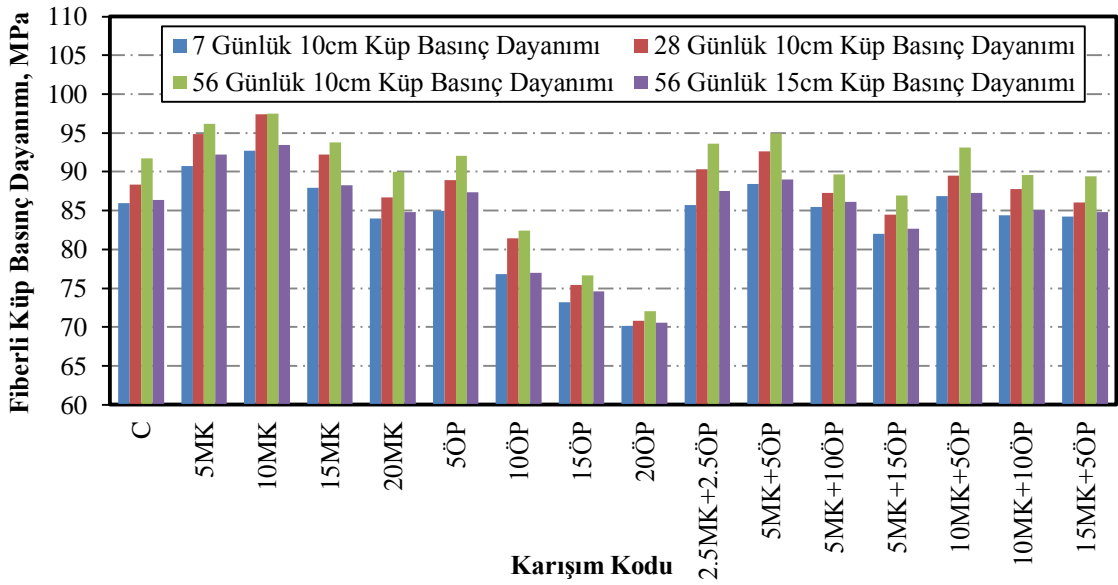
artıkça f_c değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Ancak, çimento yerine ağırlıkça sadece %5 ÖP kullanılan betonlarda, f_c değerleri, kontrol betonlarına göre, genellikle artarken 7 günlük çelik fiberli numunede azalma gözlenmiştir. Yani, çimento yerine ağırlıkça %5 ÖP kullanılması f_c değerlerini kontrol betonuna göre fazla etkilememiştir. Çelik fibersiz betonlarda %5 ÖP içeriği, f_c değerlerini kontrol betonlarına göre 28 ve 56 günlük kür sürelerinde yaklaşık olarak sırasıyla %3 ve %3 oranlarında artırırken, çelik fiberli betonlarda %1 ve %0.5 oranlarında artırmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça %5 ÖP oranından daha fazla ÖP içeriği kullanılması, f_c değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Çelik fibersiz betonlarda %20 ÖP içeriği, f_c değerlerini kontrol betonlarına göre 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde yaklaşık olarak sırasıyla %14, %15 ve %16 oranlarında azaltırken, çelik fiberli betonlarda %18, %20 ve %21 oranlarında azaltmıştır.



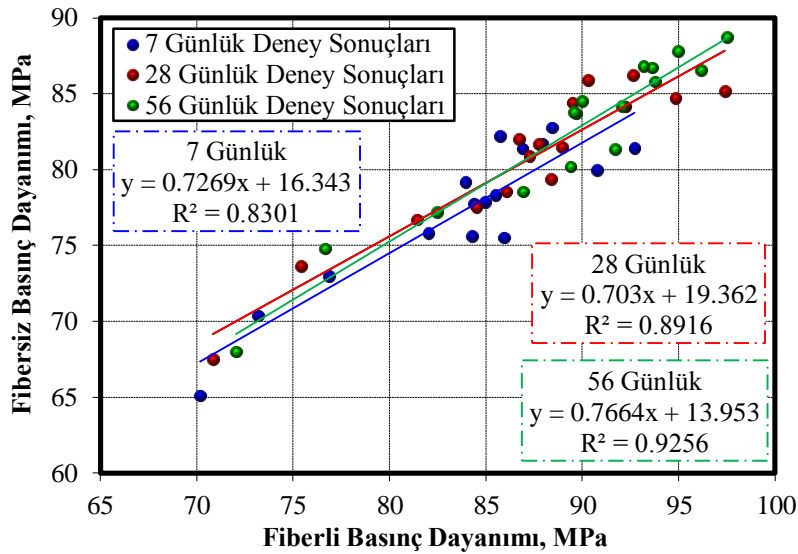
Şekil 4.7. Fibersiz betonların küp basınç dayanımı değerleri.

Çelik fibersiz betonlarda MK ile birlikte ÖP içeriği, kontrol betonuna göre, %5MK ile birlikte %15ÖP ve %15MK ile birlikte %5ÖP içeren karışımlar hariç 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerlerini artırmıştır. Çelik fiberli betonlarda ise %15 ve %15'den daha az MK ile birlikte ÖP içeriği, kontrol betonuna göre, 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerlerini artırırken, MK ile birlikte ÖP içeriğinin toplam oranının %20 olması durumunda ise 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerleri azalmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en yüksek küp f_c değerleri %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz betonlarda %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeriği, f_c değerlerini kontrol betonlarına göre 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde yaklaşık olarak sırasıyla %10, %9

ve %8 oranlarında artırırken, çelik fiberli betonlarda %3, %5 ve %4 oranlarında artırmıştır. MK ile birlikte ÖP içeren çelik fiberli betonların f_c değerleri çelik fibersiz betonlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ancak, kür sürelerine göre çelik fibersiz betonlardaki f_c artışı çelik fiberli betonlardaki f_c artışından daha fazla olmuştur. Çelik fiber ilavesi 10x10x10 cm küp betonların 7, 28 ve 56 günlük f_c değerlerini, çelik fibersiz betonlara göre, sırasıyla yaklaşık olarak %9, %8 ve %8.5 oranlarında artırmıştır. Bu sonuçlara göre, çelik fiber içeriğinin betonların f_c değerlerini erken ve ileriki yaşlarda önemli ölçüde artırmıştır.

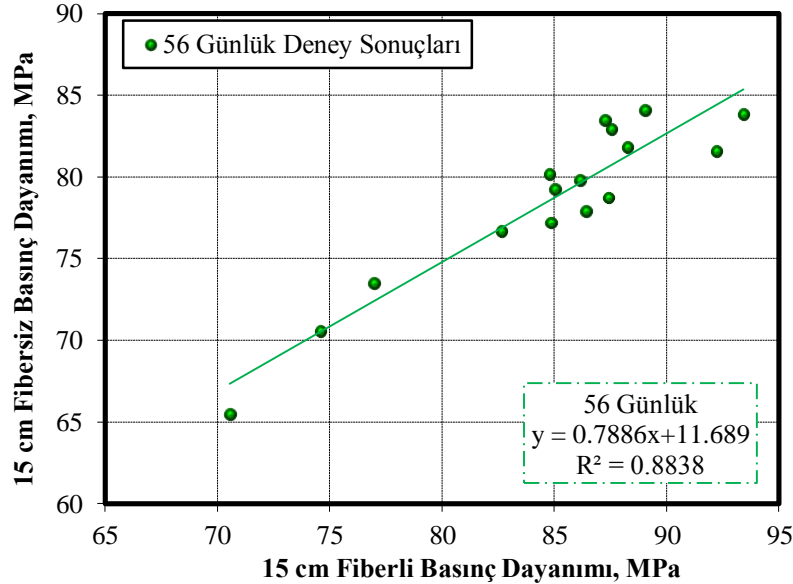


Şekil 4.8. Fiberli betonların küp basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.9. Betonların 10 cm küp basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

Çelik fibersiz ve çelik fiberli beton betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak üretilen 10x10x10 cm küp betonların 56 günlük f_c değerleri ile 15x15x15 cm küp betonların 56 günlük f_c değerleri Çizelge 4.5 ile Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekillerden de görüldüğü gibi, 10x10x10 cm küp numunelerin 56 günlük f_c değerleri, 15x15x15 cm küp betonların 56 günlük f_c değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni, boyut etkisidir. Boyut etkisi, küçük boyutlu numunelerin büyük boyutlu numunelere göre daha hızlı dayanım kazanması, küçük boyutlu numunelerin büyük boyutlu numunelere göre deney presinin başlıkları ile daha az temas etmesi ve numune boyutlarının artmasıyla numunede bulunabilecek mikro çatlaklar ile diğer hatalı kısımların daha fazla olması sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.10. Betonların 15 cm küp basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük 10x10x10 cm küp betonların f_c değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.9’da verilmiştir. Karşılaştırmalardan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli 7, 28 ve 56 günlük 10x10x10 cm küp betonların f_c değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen R^2 değerleri ve korelasyon çizgileri doğrulamaktadır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli 10x10x10 cm küp betonların f_c değerleri arasındaki farkın, 28 ve 56 günlük betonlara göre, 7 günlük betonlarda daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, çelik fibersiz betonlar ile çelik fiberli betonların f_c değerleri MK, ÖP ve

MK ile birlikte ÖP içeriğine bağlı olarak paralellik göstermektedir. Ayrıca, çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılarak üretilen 15x15x15 cm küp betonların 56 günlük f_c değerleri Şekil 4.10'da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada da çelik fibersiz betonlar ile çelik fiberli betonlardan elde edilen f_c değerleri arasında bir uyum gözlenmiştir.

4.2.4 Yarmada çekme dayanımı

Çelik fibersiz ve çelik fiberli beton betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan 15x15x15 cm küp betonların 56 günlük f_{sts} değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu betonlardan elde edilen f_{sts} değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

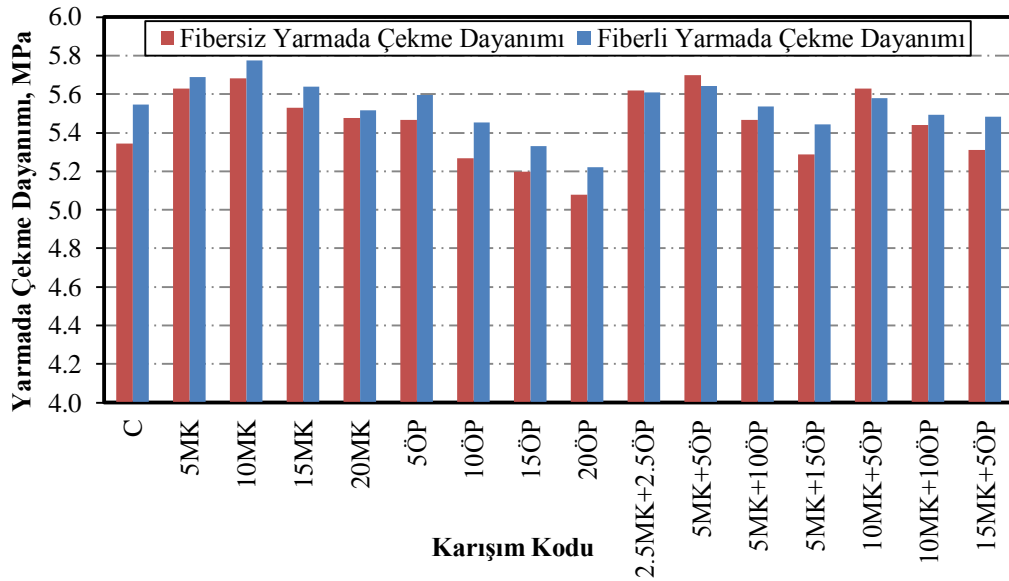
Çizelge 4.6. Betonların yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerleri

Karışım Kodu	Fibersiz Betonlar		Fiberli Betonlar	
	56 Günlük f_{sts} (MPa)	56 Günlük f_{fs} (MPa)	56 Günlük f_{sts} (MPa)	56 Günlük f_{fs} (MPa)
K	5.34	9.47	5.55	9.74
5MK	5.63	10.30	5.69	10.55
10MK	5.68	10.53	5.77	10.84
15MK	5.53	10.14	5.64	10.12
20MK	5.47	9.84	5.51	9.60
5ÖP	5.47	9.87	5.60	10.09
10ÖP	5.27	8.97	5.45	9.10
15ÖP	5.20	8.56	5.33	8.63
20ÖP	5.08	7.88	5.22	8.12
2.5MK+2.5ÖP	5.62	9.95	5.61	10.18
5MK+5ÖP	5.70	10.31	5.64	10.34
5MK+10ÖP	5.47	9.62	5.54	9.67
5MK+15ÖP	5.29	8.91	5.44	9.33
10MK+5ÖP	5.63	9.92	5.58	10.05
10MK+10ÖP	5.44	9.39	5.49	9.46
15MK+5ÖP	5.31	8.99	5.48	9.56

Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan çelik fibersiz betonlarda, kontrol betonuna göre, 56 günlük f_{sts} değerleri artmıştır. Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan çelik fiberli betonlarda ise, kontrol betonuna göre, %20 MK içeren numuneler hariç, 56 günlük f_{sts} değerleri artmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli bu betonlarda en yüksek f_{sts} değerleri %10 MK içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda %10 MK içeriği, f_{sts} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak

sırasıyla %6 ve %4 oranlarında artırmıştır. Çelik fibersiz betonlarda %20 MK içeriği, f_{sts} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak %2 oranında artırırken, çelik fiberli betonlarda %1 oranında azaltmıştır.

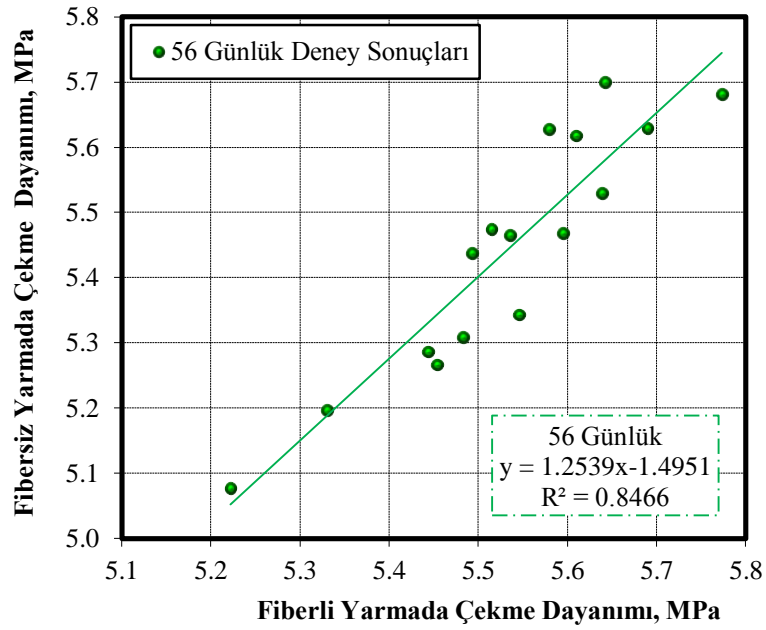
Çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda, kontrol betonuna göre, %5 ÖP kullanılan betonlar hariç, 56 günlük f_{sts} değerleri ÖP miktarı arttıkça kademeli olarak azalmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli bu betonlarda en yüksek f_{sts} değerleri %5 ÖP içeren numunelerde görülmüştür. En yüksek f_{sts} değerinin gözlemlendiği %5 ÖP içeriği, çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda f_{sts} değerlerini, kontrol betonlarına göre, yaklaşık olarak sırasıyla %2 ve %1 oranlarında artırmıştır. En düşük f_{sts} değerinin gözlemlendiği %20 ÖP içeriği ise, çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda f_{sts} değerlerini, kontrol betonlarına göre, yaklaşık olarak sırasıyla %5 ve %6 oranlarında azaltmıştır.



Şekil 4.11. Betonların yarmada çekme dayanımı değerleri.

Çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz 56 günlük betonlarda, kontrol betonuna göre, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.11'de görüldüğü gibi çimento yerine ağırlıkça %5 MK ile birlikte %15 ÖP ve %15 MK ile birlikte %5ÖP içeren betonlar hariç, daha yüksek f_{sts} değerleri görülmüştür. Çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fiberli 56 günlük betonlarda ise, kontrol betonuna göre, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.11'de görüldüğü gibi çimento yerine ağırlıkça %2.5 MK ile

birlikte %2.5 ÖP %5 MK ile birlikte %5 ÖP ve %10 MK ile birlikte %5ÖP içeren betonlar hariç, daha düşük f_{sts} değerleri görülmüştür. MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en yüksek f_{sts} değerleri %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeren betonlarda görülürken, en düşük f_{sts} değeri %5 MK ile birlikte %15 ÖP içeren betonda görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeren betonların f_{sts} değerlerinin, kontrol betonlarına göre, yaklaşık olarak sırasıyla %7 ve %2 oranlarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Çelik fiber ilavesi f_{sts} değerlerini ortalama olarak yaklaşık %2 oranında artırmıştır.

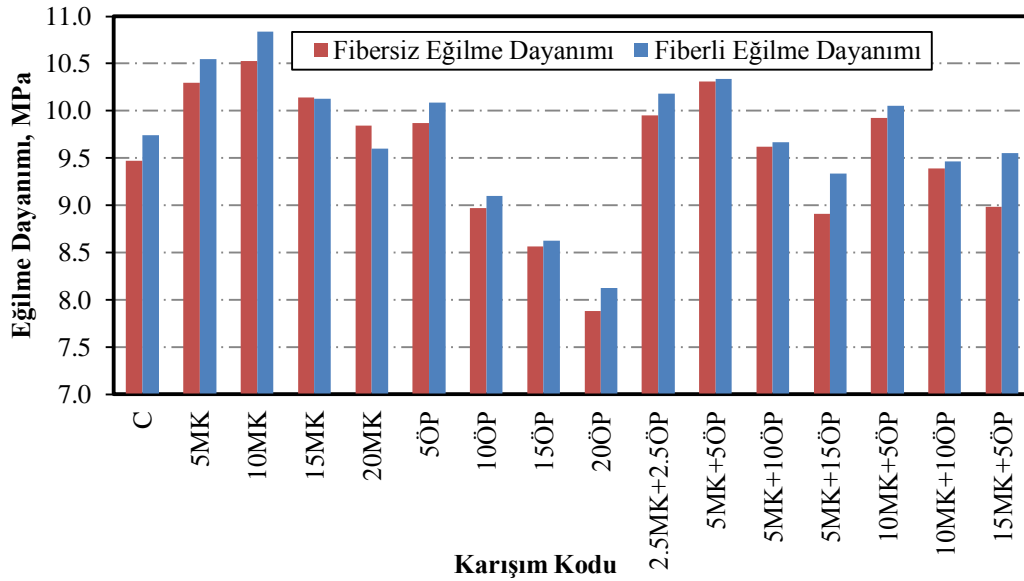


Şekil 4.12. Betonların yarmada çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

Çelik fibersiz ve çelik fiberli MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren betonların f_{sts} değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.12’de verilmiştir. Karşılaştırmadan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_{sts} değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi çelik fiber içeren numunelerin f_{sts} değerlerinin çelik fibersiz numunelere göre daha yüksek olmasından dolayı korelasyon çizgisi x eksenine doğru kaymıştır. Bu durum da, çelik fiber içeriğinin betonun f_{sts} değerlerini artırıcı etkisinin olduğunu göstermektedir.

4.2.5 Eğilme dayanımı

Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan 10x10x40 cm prizma betonların 56 günlük f_{fs} değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu betonlardan elde edilen f_{fs} değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.13'te verilmiştir.

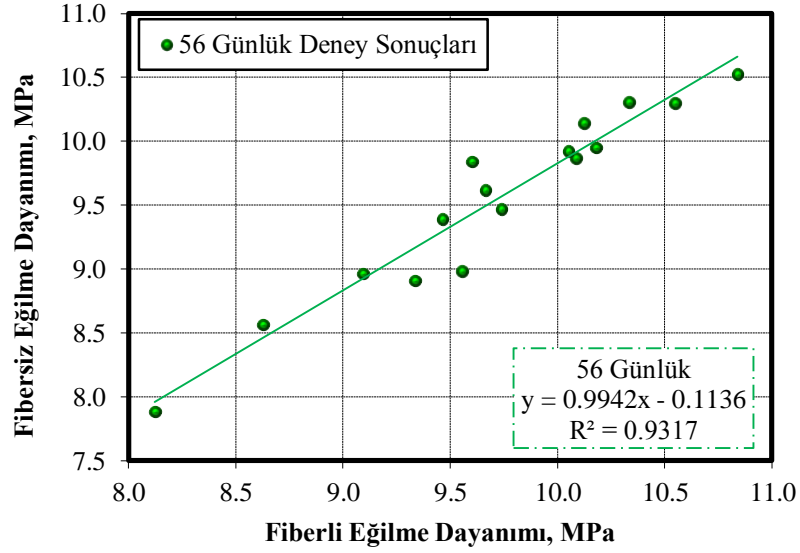


Şekil 4.13. Betonların eğilme dayanımı değerleri.

Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan çelik fibersiz 56 günlük betonlarda, kontrol betonuna göre, f_{fs} değerleri artmıştır. Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan çelik fiberli betonlarda ise, kontrol betonuna göre, %20 MK içeren numuneler hariç, f_{fs} değerleri artmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli bu betonlarda en yüksek f_{fs} değerleri %10 MK içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda %10 MK içeriği, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak %11 oranında artırmıştır. Çelik fibersiz betonlarda %20 MK içeriği, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak %4 artırırken, çelik fiberli betonlarda %1 oranında azaltmıştır.

Çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli 56 günlük betonlarda, kontrol betonuna göre, %5 ÖP kullanılan betonlar hariç, f_{fs} değerleri ÖP miktarı arttıkça kademeli olarak azalmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli bu betonlarda en yüksek f_{fs} değerleri %5 ÖP içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik

fiberli betonlarda %5 ÖP içeriği, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak %4 oranında artırmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda %20 ÖP içeriği, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak %17 oranında azaltmıştır.



Şekil 4.14. Betonların eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli 56 günlük betonlarda, kontrol betonuna göre, çimento yerine ağırlıkça toplamda %15 ve %15'den daha az MK ile birlikte ÖP kullanılması durumunda f_{fs} değerleri artarken, bu toplam oranın % 20 olması durumunda ise f_{fs} değerleri azalmıştır. MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en yüksek f_{fs} değerleri %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeren numunelerde görülürken, en düşük f_{fs} değerleri %5 MK ile birlikte %15 ÖP içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeriği, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak sırasıyla %9 ve %6 oranlarında artırmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda %5 MK ile birlikte %15 ÖP içeriği ise, f_{fs} değerlerini kontrol betonlarına göre yaklaşık olarak sırasıyla %6 ve %4 oranlarında azaltmıştır. Tüm çelik fibersiz ve çelik fiberli 56 günlük betonlarda en yüksek f_{fs} değerleri % 10MK içeren numunelerde görülmüştür. Çelik fibersiz betonlara göre, çelik fiber ilavesi f_{fs} değerlerini ortalama olarak yaklaşık %2 oranında artırmıştır. Bu sonuçlara göre, çelik fiber içeriğinin f_{fs} değerlerini çok fazla değiştirmedeği söylenebilir.

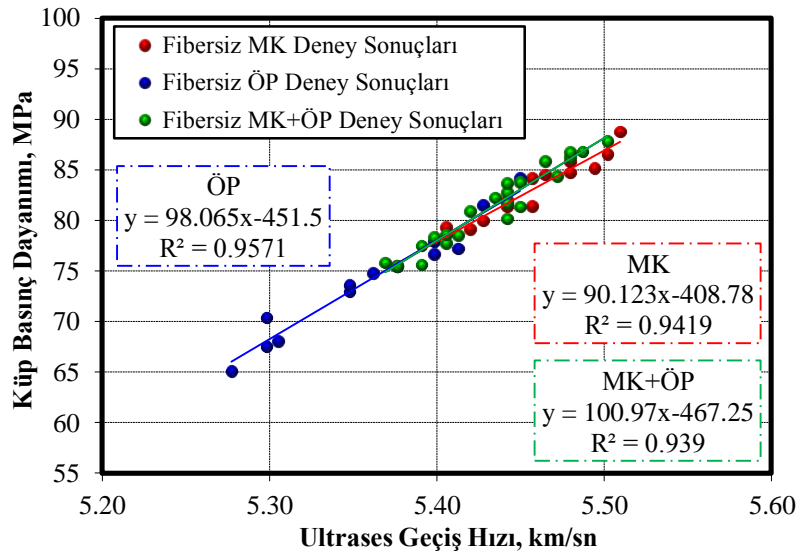
MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_{fs} değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.14’de verilmiştir. Karşılaştırmadan da görüldüğü gibi, çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_{fs} değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen R^2 değerleri ve korelasyon çizgisi doğrulamaktadır. Şekil 4.14’de görüldüğü gibi çelik fiber içeren numunelerin f_{fs} değerlerinin çelik fibersiz numunelere göre daha yüksek olmasından dolayı korelasyon çizgisi x eksenine doğru kaymıştır.

4.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Deneysel çalışmadan elde edilen MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların U_{pv} , f_c , f_{fs} ve f_{sts} değerleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

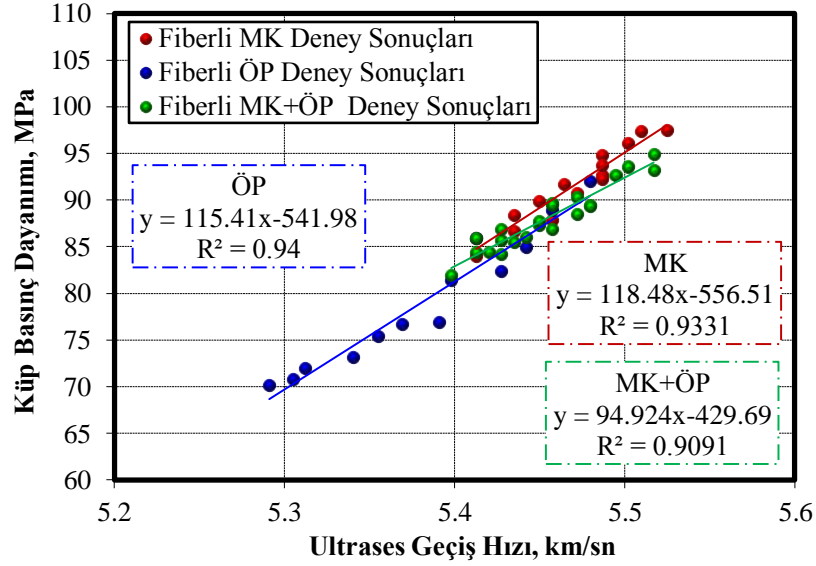
4.3.1 Küp basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmadan elde edilen MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 7, 28 ve 56 günlük 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile bu numuneler üzerinde ölçülen değerlerden elde edilen U_{pv} değerleri sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16’da görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi çimento yerine MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_c ile U_{pv} değerleri arasında yüksek bir ilişki gözlenmiştir.

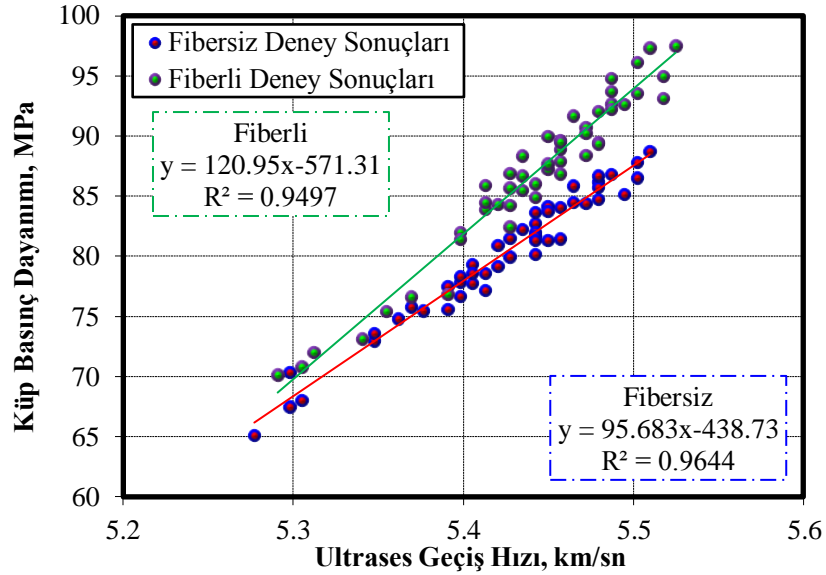


Şekil 4.15. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi.

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi çelik fibersiz ve çelik fiberli tüm betonların birlikte ilişkilendirilmesiyle küp f_c ile U_{pv} değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu yüksek korelasyonu bu şekiller üzerinde verilen denklemler, R^2 değerleri ve eğilim çizgileri açıkça doğrulamaktadır.



Şekil 4.16. Fiberli betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi.



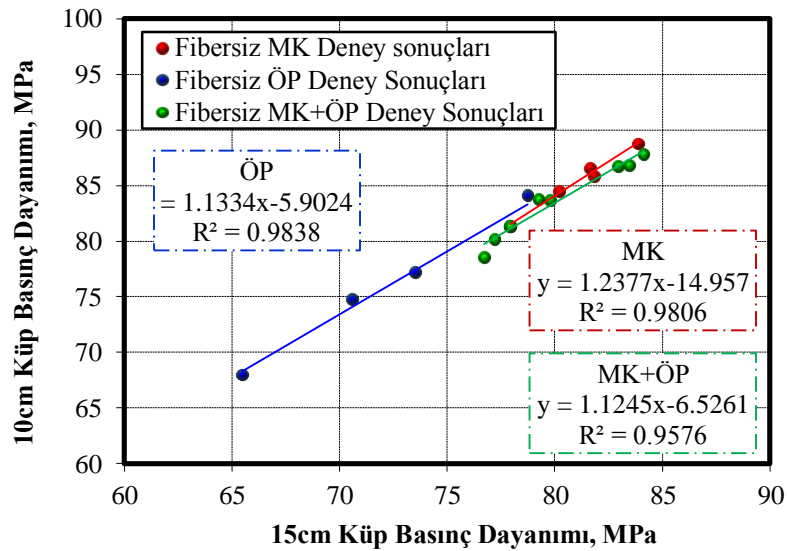
Şekil 4.17. Tüm betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi.

Şekil 4.17 üzerindeki karşılaştırma, çelik fibersiz betonlardan elde edilen f_c ve U_{pv} değerlerine göre, çelik fiberli betonlardan elde edilen f_c ve U_{pv} değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. f_c ile U_{pv} değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılan R^2

değerlerinin 1'e yakın olması f_c ile U_{pv} değerleri arasında çok iyi bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Elde edilen U_{pv} değeri yüksek ise f_c değerinin de yüksek olduğunu, U_{pv} değeri düşük ise f_c değerinin de düşük olduğunu, 7, 28 ve 56 günlük küp f_c ile U_{pv} değerleri arasındaki ilişkiler açıkça göstermektedir. Bu karşılaştırmaların sonucu olarak tüm serilerden elde edilen f_c değerleri ile U_{pv} değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu söyleyebiliriz.

4.3.2 10 cm küp ile 15 cm küp basınç dayanımı arasındaki ilişki

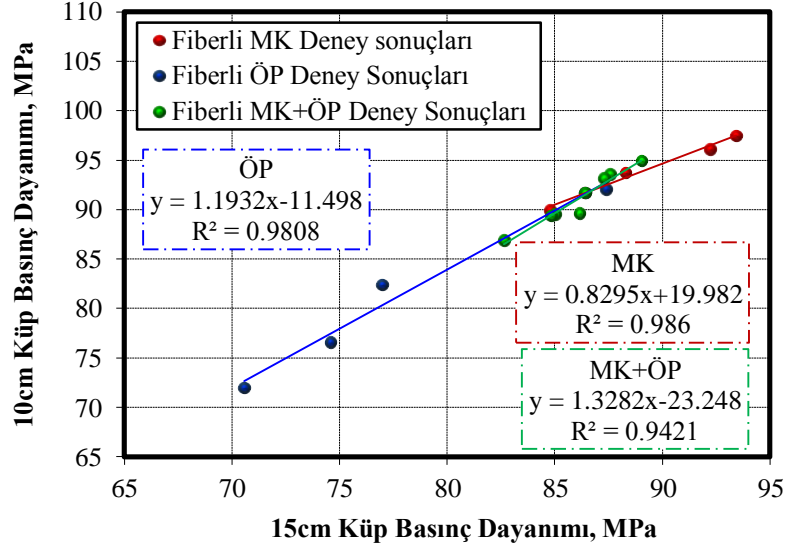
Deneysel çalışmada MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli serilerin 56 günlük 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 56 günlük 15x15x15 cm küp f_c değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.18 ve 4.19'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.20'de görüldüğü gibi çelik fibersiz ve çelik fiberli tüm betonların birlikte ilişkilendirilmesiyle de, 56 günlük 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 56 günlük 15x15x15 cm küp f_c değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu şekiller üzerindeki karşılaştırmalar her iki farklı boyuttaki f_c değeri arasında yüksek bir ilişkinin olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



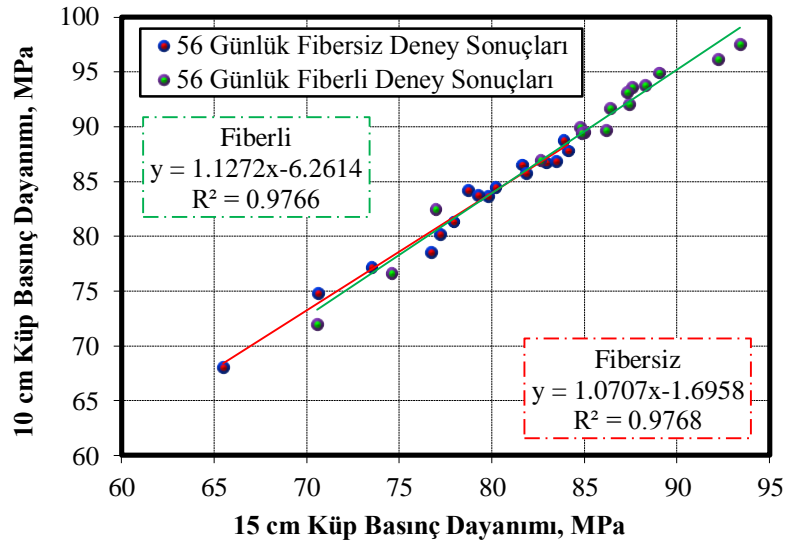
Şekil 4.18. Fibersiz betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.

Şekil 4.18 ve 4.19 incelendiğinde numune boyutu arttıkça f_c değerlerinin azaldığı, numune boyutu azaldıkça ise f_c değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu artış ve azalış, her iki boyutta da çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda kullanılan MK, ÖP ve MK ile

birlikte ÖP içeriğine bağlı olarak benzerlik göstermektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde ise, 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 15x15x15 cm küp f_c değerlerinin çakıştığı ancak, çelik fibersiz f_c sonuçlarına göre, çelik fiberli f_c sonuçlarının daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



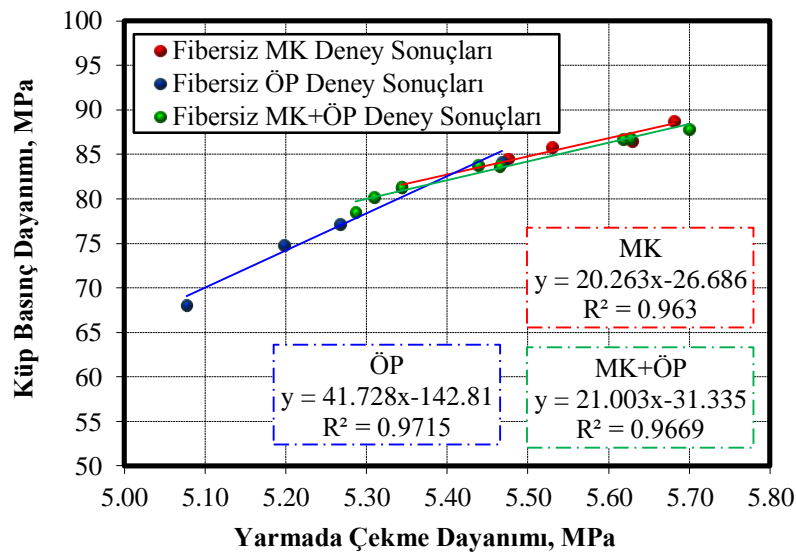
Şekil 4.19. Fiberli betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.



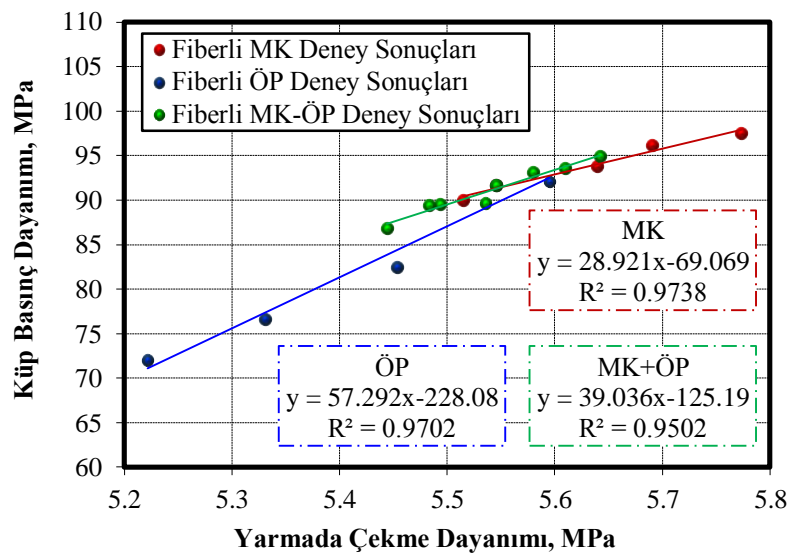
Şekil 4.20. Tüm betonların 10 cm ile 15 cm basınç dayanımı ilişkisi.

4.3.3 Küp basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmadan elde edilen MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 56 günlük 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 15x15x15 cm küp f_{sts} değerleri Şekil 4.21. ve 4.22’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Her bir seri için, bu şekillerde görüldüğü gibi çimento yerine MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_c değerleri ile f_{sts} değerleri arasında yüksek bir ilişki vardır. Ayrıca Şekil 4.23’de görüldüğü gibi çelik fibersiz ve çelik fiberli tüm betonların birlikte ilişkilendirilmesiyle de, f_c değerleri ile f_{sts} değerleri arasında da yüksek bir korelasyon gözlenmiştir.

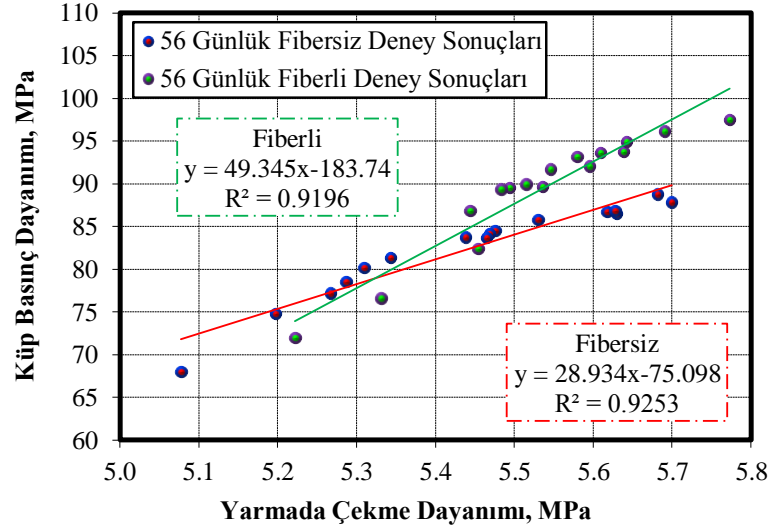


Şekil 4.21. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.



Şekil 4.22. Fiberli betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

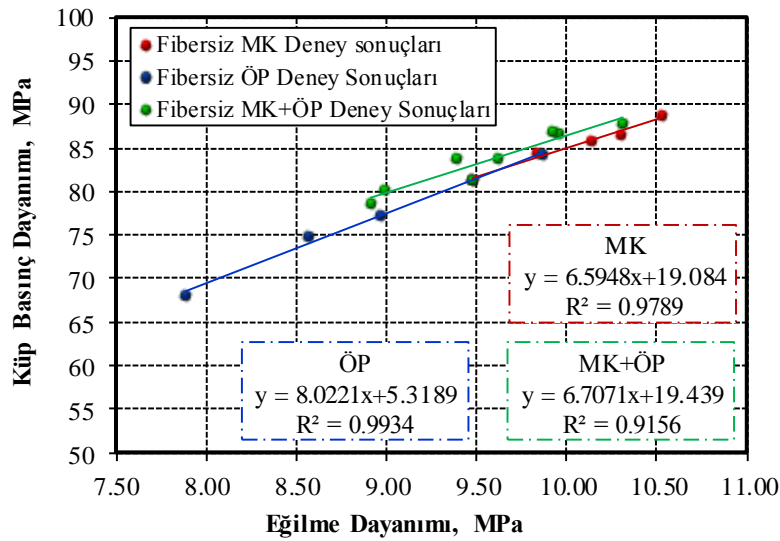
Deneylerden elde edilen f_c ile f_{sts} değerleri arasındaki yüksek ilişkileri şekiller üzerinde verilen eğilim çizgileri ve R^2 değerleri açıkça doğrulamaktadır. Çelik fibersiz betonlardan elde edilen f_c ile f_{sts} değerlerine göre, çelik fiberli betonlardan elde edilen f_c ile f_{sts} değerlerinin daha yüksek olduğunu Şekil 4.23 üzerindeki noktalar açıkça göstermektedir.



Şekil 4.23. Tüm betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

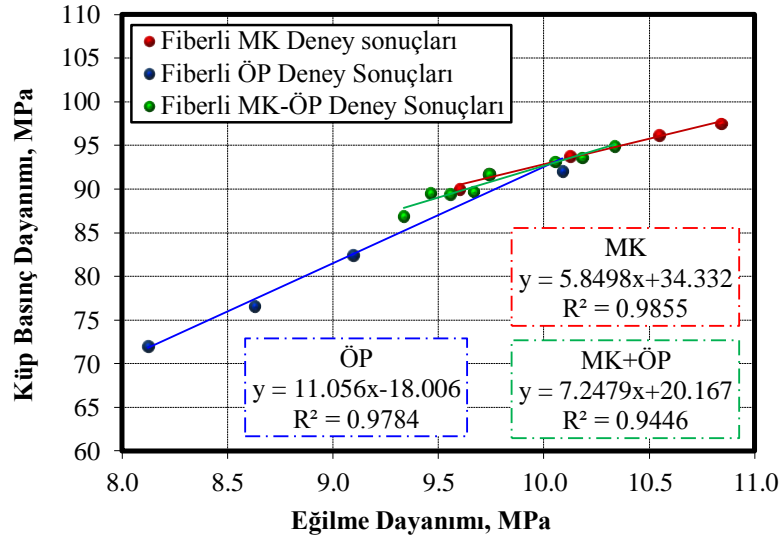
4.3.4 Küp basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmadan elde edilen MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 56 günlük 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 10x10x40 cm prizma f_{fs} değerleri Şekil 4.24 ve 4.25'de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir.

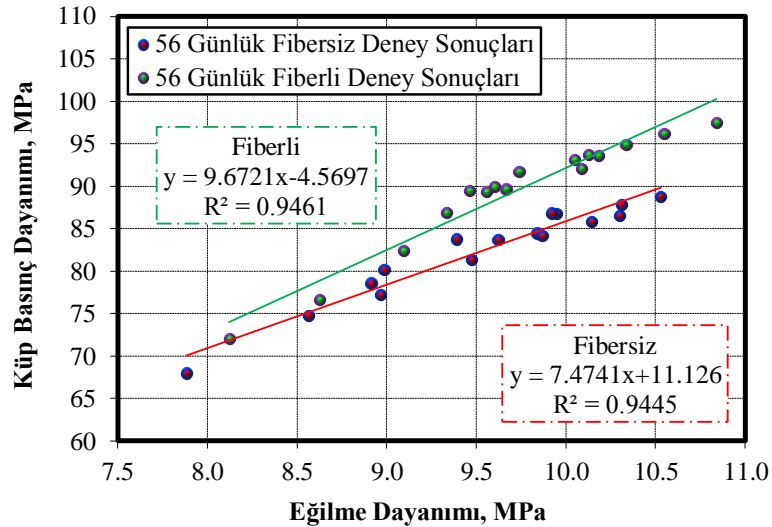


Şekil 4.24. Fibersiz betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.

Her bir seri için, Şekil 4.24 ve 4.25’de görüldüğü gibi çimento yerine MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli beton numunelerin f_c ile f_{fs} değerleri arasında yüksek bir ilişki vardır. Özellikle MK ile birlikte ÖP içeren serilere göre sadece MK ve ÖP içeren serilerin f_c değerleri ile f_{fs} değerleri arasındaki ilişkisinin daha da yüksek olduğu görülmüştür. Benzer şekilde tüm betonların küp f_c değerleri ile f_{fs} değerleri arasında da Şekil 4.26.’da görüldüğü gibi yüksek bir ilişki gözlenmiştir. Deneylerden elde edilen f_c değerleri ile f_{fs} değerleri arasındaki bu yüksek ilişkileri şekiller üzerinde verilen eğilim çizgileri ve R^2 değerleri açıkça göstermektedir. Çelik fibersiz betonlardan elde edilen f_c ile f_{sts} değerlerine göre, çelik fiberli betonlardan elde edilen f_c ile f_{sts} değerlerinin daha yüksek olduğunu Şekil 4.26 göstermektedir.



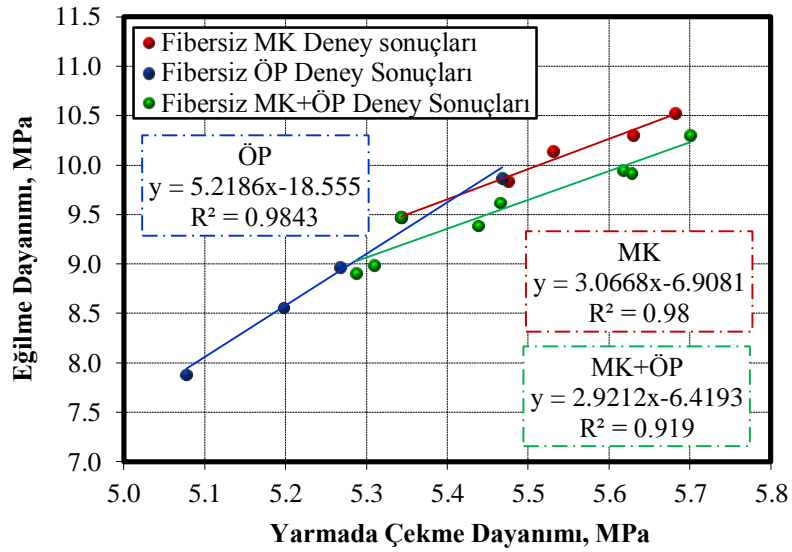
Şekil 4.25. Fiberli betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.



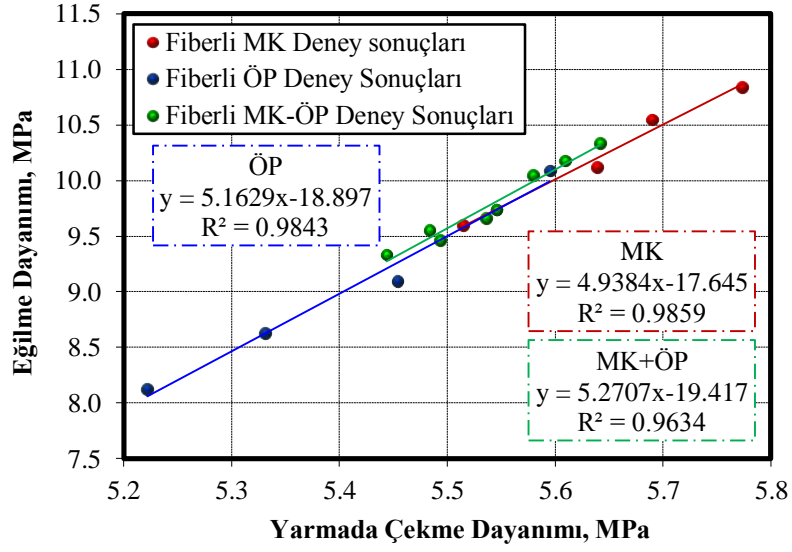
Şekil 4.26. Tüm betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi.

4.3.5 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

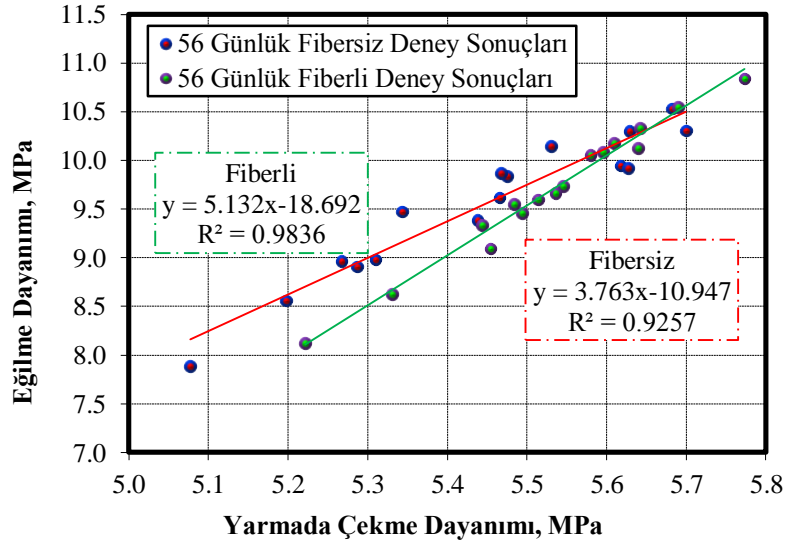
Deneysel çalışmada MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 56 günlük f_{fs} değerleri ile f_{sts} değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.27 ve 4.28'de görüldüğü gibidir. Benzer şekilde tüm betonların f_{fs} değerleri ile f_{sts} değerleri arasında da Şekil 4.29.'da görüldüğü gibi yüksek bir ilişki gözlenmiştir. Bu şekiller her iki dayanım değeri arasında yüksek bir ilişkinin olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu şekiller incelendiğinde, her bir serinin ve tüm betonların f_{fs} değerleri ile f_{sts} değerleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Özellikle MK ve ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_{fs} değerleri ile f_{sts} değerleri arasında, MK ile birlikte ÖP içeren seriye göre daha yüksek bir ilişkinin olduğu Şekil 4.27 ve 4.28'de görülmektedir. MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren çelik fiber içeren betonların f_{fs} değerleri ile f_{sts} değerleri arasındaki ilişki, çelik fibersiz betonlara göre, birbirlerine daha yakındır.



Şekil 4.27. Fibersiz betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.



Şekil 4.28. Fiberli betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.



Şekil 4.29. Tüm betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

0

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çimento yerine ağırlıkça MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeriğinin çelik fibersiz ve çelik fiberli yüksek dayanımlı betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlık, U_{pv} , f_c , f_{sts} ve f_{fs} değerleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, çelik fibersiz ve çelik fiberli kontrol betonlarına ek olarak çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ÖP ve %2.5, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK ile birlikte ÖP farklı kombinasyonlarda kullanılarak altı farklı seride çelik fibersiz ve çelik fiberli beton numuneler üretilmiştir. Karışımlarda çimento esaslı malzeme miktarı 500 kg/m^3 , çelik fiberli karışımlarda çelik fiber miktarı 50 kg/m^3 ve su-bağlayıcı oranı 0.20 olarak seçilmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Çelik fibersiz ve çelik fiberli taze betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeriğinin artmasıyla birlikte, kontrol betonuna göre, taze birim ağırlık değerleri kademeli olarak azalmıştır. Bu içeriklerde, çelik fibersiz betonlara göre çelik fiberli betonların taze birim ağırlık değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.
- Çelik fibersiz ve çelik fiberli sertleşmiş betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeriğinin artmasıyla birlikte, betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Kür süresinin artmasıyla birlikte de sertleşmiş birim ağırlık değerleri azalmıştır. Bunun nedeni de CH içeriğinin zamanla su kürü nedeniyle çözünmesidir. Ayrıca, bu içeriklerde çelik fibersiz betonlara göre, çelik fiberli betonların sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Deneysel çalışmada çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerleri, %20 MK içeren çelik fiberli betonlar hariç, kontrol betonlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Özellikle bu seride çimento yerine ağırlıkça %10 oranında MK kullanılması U_{pv} değerini en yüksek değerlere çıkarmıştır. Deneysel çalışmada çimento yerine ağırlıkça

ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerleri, %5 ÖP içeren betonlar hariç, kontrol betonlarına göre daha düşük çıkmıştır. Çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılması, %5 MK ile birlikte %15 ÖP, %10 MK ile birlikte %10 ÖP ve %15 MK ile birlikte %5 ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlar hariç, 7, 28 ve 56 günlük U_{pv} değerlerini artırmıştır. Çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda en yüksek U_{pv} değerleri %5 MK ile birlikte %5 ÖP içeren betonlarda görülmüştür. En düşük U_{pv} değeri ise %5 MK ile birlikte %15 ÖP içeren çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda görülmüştür. Ayrıca, kür süresinin artmasıyla birlikte ve çelik fiber içeriği U_{pv} değerlerini bir miktar artırmıştır.

- Deneysel çalışmada çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK kullanılması, 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerlerini, kontrol betonlarına göre, artırmıştır. Özellikle bu serilerde çimento yerine %10 MK kullanıldığında f_c değerlerinin en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanılması ise, 7, 28 ve 56 günlük f_c değerlerini, kontrol betonlarına göre, sadece %5 ÖP içeren betonlar hariç azaltmıştır. Çelik fibersiz betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılması, kontrol betonlarına göre, %5MK ile birlikte %15ÖP ve %15MK ile birlikte %5ÖP içeren karışımlar hariç, 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerlerini artırmıştır. Çelik fiberli betonlarda ise %15 ve %15'den daha az MK ile birlikte ÖP kullanılması, kontrol betonlarına göre, 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerlerini artırırken, toplam %20 oranında MK ile birlikte ÖP kullanılması 7, 28 ve 56 günlük küp f_c değerleri azalmıştır. Özellikle bu serilerdeki çimento yerine %5 MK ile birlikte %5 ÖP kullanılan betonlarda, f_c değerlerindeki artış en yüksek seviyededir. Ayrıca, betonlarda çelik fiber kullanılması, betonların f_c değerlerini artırmıştır. Çelik fibersiz ve çelik fiberli MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren 10x10x10 cm küp numunelerin f_c değerleri, 15x15x15 cm küp betonların f_c değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir.
- Deneysel çalışmada çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK kullanılması, f_{st} ve f_s değerlerini, çelik fiberli %20 MK içeren beton hariç, kontrol betonlarına göre, artırmıştır. Bu serilerde çimento yerine

%10 MK kullanıldığında f_{sts} ve f_{fs} değerlerinin en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlarda çimento yerine ağırlıkça ÖP kullanılması ise, f_{sts} ve f_{fs} değerlerini, kontrol betonlarına göre, sadece %5 ÖP içeren betonlar hariç azaltmıştır. Çelik fibersiz betonlarda çimento yerine ağırlıkça MK ile birlikte ÖP kullanılması, kontrol betonlarına göre, %5MK ile birlikte %15ÖP ve %15MK ile birlikte %5ÖP içeren karışımlar hariç, 56 günlük f_{sts} ve f_{fs} değerlerini artırmıştır. Çelik fiberli betonlarda %2.5MK ile birlikte %2.5ÖP, %5MK ile birlikte %5ÖP ve %10MK ile birlikte %5ÖP kullanılması, kontrol betonlarına göre, f_{sts} ve f_{fs} değerlerini artırmıştır. Çelik fiberli betonlarda %5MK ile birlikte %10ÖP, %5MK ile birlikte %15ÖP, %10MK ile birlikte %10ÖP ve %15MK ile birlikte %5ÖP kullanılması, kontrol betonlarına göre, f_{sts} ve f_{fs} değerlerini azaltmıştır. Bu serilerdeki çimento yerine %5 MK ile birlikte %5 ÖP kullanılan betonlarda, f_{sts} ve f_{fs} değerlerindeki artış en yüksek seviyededir. Ayrıca, betonlarda çelik fiber kullanılması, betonların f_{sts} ve f_{fs} değerlerini artırmıştır.

- Deneysel çalışmadan elde edilen çelik fibersiz ve çelik fiberli betonların f_c değerleri ile U_{pv} , f_{sts} ve f_{fs} değerleri arasındaki ilişkilerin yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca bu betonların 10x10x10 cm küp f_c değerleri ile 15x15x15 cm küp f_c değerleri arasında ve f_{sts} ile f_{fs} değerleri arasında da çok yüksek ilişki gözlenmiştir. Bu yüksek ilişkileri, şekiller üzerinde verilen eğilim çizgileri ve R^2 değerleri doğrulamaktadır. Yani, çimento yerine ağırlıkça MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanılan çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlardan elde edilen tüm serilerin deneysel sonuçları birbirleri ile paralellik göstermektedir.

Sonuç olarak deneysel çalışmada, düşük su-bağlayıcı oranı ile çimento yerine MK, ÖP ve MK ile birlikte ÖP kullanarak yüksek dayanımlı çelik fibersiz ve çelik fiberli betonlar üretilebileceği gözlenmiştir. Beton karışımlarında, MK içeren serilerde çimento yerine ağırlıkça %10 MK, ÖP içeren serilerde çimento yerine ağırlıkça %5 ÖP ve MK ile birlikte ÖP içeren serilerde ise çimento yerine ağırlıkça %5 MK ile birlikte %5 ÖP kullanılması en uygun oranlar olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akçay, B., Peker, Ö., Şengül, C. ve Taşdemir, M.A., “Metakaolin içeren betonun kırılma davranışı”, *Hazir Beton Kongresi Beton 2013*, İstanbul, 424-435, 2013.

Akman, M. S., “Betonun dayanıklılık özelliği ve önemi”, *I. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 53-66, 1989.

Akman, M. S., “Traslı çimento nedir? Ne değildir?”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara, 5-7, 1994.

Aksoğan O., Binici H. ve Görür, E.B., “Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkılı betonların deniz yapılarında kullanılmasının beton durabilitesi açısından avantajları”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 20(2), 59-65, 2005.

Al-Akhras, N.M., “Durability of metakaolin concrete to sulfate attack”, *Cement and Concrete Research* 36, 1727–1734, 2006.

Anonim, “Madencilik özel ihtisas komisyonu endüstriyel alt maddeler alt komisyonu seramik-refrakter-cam hammaddeleri çalışma grubu raporu Cilt 1”, *T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı DPT:2418 – ÖİK: 477*, Ankara, 1995.

Asbridge, A.H., Page, C.L. and Page, M.M., “Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars”, *Cement and Concrete Research* 32, 1365–1369, 2002.

Asbridge, A.H., Walters, G.V. and Jones, T.R., “Ternary blended concretes OPC/GGBFS/metakaolin”, *Concrete Across Borders*, 941-947, 1994.

ASTM C 138, Standard test method for unit weight, yield and air content of concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.

ASTM C 311 / C 311 M-13, Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete, *Annual Book of ASTM Standarts*, 2013.

ASTM C 494-99a, Standard specification for chemical admixtures for concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2002.

ASTM C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.

Aydın, S. and Baradan, B., “Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars”, *Cement and Concrete Research* 37(6), 988-995, 2007.

Badogiannis, E. and Tsivilis, S., “Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Composites* 31, 128–133, 2009.

Barnes, P. and Bensted, J., *Structure and Performance of Cements*, **Spon Press**, New York, 2001.

Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S. and Badogiannis, E., “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars”, *Cement and Concrete Composites* 27(1), 125-130, 2005.

Binici, H., “Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties”, *Construction and Building Materials* 21, 1191-1197, 2007.

Binici, H., Aksogan, O., Gorur, E. B., Kaplan H. and Bodur M. N., “Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice”, *Construction and Building Materials* 23(2), 804-811, 2009.

Binici, H., Görür, E. B. ve Durgun, M.Y., “Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkılı betonların mekanik aşınması ve su geçirimsizliği”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 6(1), 2010.

Binici, H., Temiz, H., İ. H. Çağatay., “Erzurum tımar ve dazlak pomzalarının katkı çimento ve hafif agregalı beton üretiminde kullanımı”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 22(2), 2007.

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

Brooks, J.J. and Johari, M.M.A., “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”, *Cement&Concrete Composites* 23(6), 495–502, 2001.

Caldarone, M.A., Gruber, K. A. and Burg, R. G., “High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture”, *Concrete Int November*, 37-40, 1994.

Çiflikli, M., Fesleğen yayla Niğde kaolin yatağının minerolojik–petroğrafik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 1998.

Demirel, B. and Keleştemur, O., “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, 2010.

Dinçer, R. ve Çağatay, İ. H., “Pomza ile yapılan hafif betonların mekanik özellikleri”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 19(2), 247-260, 2004.

Dolgun, O., Kendiliğinden yerleşen betonlarda öğütülmüş pomza kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s.20-24, 2010.

Dubey, A. and Banthia, N., “Influence of high-reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high-performance steel fiber-reinforced concrete”, *ACI Materials Journal* 95(3), 284-292, 1998.

Efe, T., Edremit travertenleri ve Van Gölü kuzeyinde yüzeylenen pomzaların çimento sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, s. 41-42, 2011.

Ekici, B. B. ve Demirel, B., “Öğütülmüş pomzanın beton basınç dayanımına etkisinin yapay sinir ağı ile belirlenmesi”, *E Journal of New World Sciences Academy*, 9-11, 2007.

- Erdoğan, T.Y., Beton, **ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.**, Ankara, 2003.
- Erkoyun, H., “Pomzanın Türkiye’deki yeri ve önemi”, **Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi**, Isparta, s.1-7, 2005.
- Ersoy, A., Atıcı, U. ve Yünsel, T. Y., “Pomzanın çimento sanayinde katkı maddesi olarak kullanımı”, **Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi**, Isparta, Türkiye, 105-111, 2005.
- Frias, M. and Cabrera, J., “Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes”, **Cement and Concrete Research** 30, 561-569, 2000.
- Gleize, P.J.P., Cyr, M. and Escadeillas, G., “Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes”, **Cement and Concrete Composites** 29, 80–87, 2007.
- Green, S. M. F. Brooke, N. J. McSaveney, L. G. and Ingham, J. M. “Mixture design development and performance verification of structural lightweight pumice aggregate concrete”, **Journal of Materials in Civil Engineering** 23(8), 1211–1219, 2011.
- Grim,R.E., Applied clay minerology, **Mc-Graw Hill Book Co**, London, 1962
- Gündüz, L. and Uğur, İ., “The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures”, **Cement and Concrete Research** 35(9), 1859-1864, 2005.
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ. ve Çankıran, O., Pomza Teknolojisi, 1, **Süleyman Demirel Üniversitesi Yayını**, Isparta, 1998.
- Han, S. H., Kim, J. K. and Park, Y. D., “Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function”, **Cement and Concrete Research** 33(7), 965-971, 2003.
- Hossain, K. M. A., “Blended cement using volcanic ash and pumice”, **Cement and Concrete Research** 33(10), 1601-1605, 2003.

Hossain, K. M. A., “Macro and microstructural investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(4), 527-536, 2006.

Hossain, K.M.A., “Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete”, *Cement and Concrete Research* 34(2), 283-291, 2004.

Hossain, K.M.A., “Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: effects of mix composition and curing conditions”, *Cement and Concrete Composites* 30(2), 97-105, 2008.

Hoşgün, H.L., Kaolendeki alüminyumun hidroklorik asit ve sodyum hidroksit çözeltilerinde çözünme kinetiğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s. 3-4, 1996.

Justice, J. M. and Kurtis, K. E., “Influence of metakaolin surface area on properties of cement-based materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9), 762–771, 2007.

Kadiroğlu, İ., “Kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma”, *Batı Çim Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş.*, İzmir, 7-11, 2005.

Keleştemur, O. and Demirel, B., “Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in concrete produced with finely ground pumice and silica fume”, *Construction and Building Materials* 24(10), 1898-1905, 2010.

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

Khatib, J. M. and Hibbert, J. J., “Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin”, *Construction and Building Materials* 19, 460–472, 2005.

Khatib, J. M., “Low temperature curing of metakaolin concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(8), 362-367, 2009.

Khatib, J. M., “Metakaolin concrete at a low water to binder ratio”, *Construction and Building Materials* 22, 1691–1700, 2008.

Khatib, J. M., Kayalı, O. and Siddique, R., “Dimensional change and strength of mortars containing fly ash and metakaolin”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(9), 523-528, 2009.

Kılıç, A. Atış, C. D., Teymen, A., Karahan, O. and Arı K., “The effects of scoria and pumice aggregates on the strengths and unit weights of lightweight concrete”, *Scientific Research and Essay* 4(10), 961-965, 2009.

Kim, H. S., Lee, S. H. and Moon, H. Y., “Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin”, *Construction and Building Materials* 21, 1229–1237, 2007.

Lee, S. T., Moon, H. Y., Hooton, R. D. and Kim, J. P., “Effect of solution concentrations and replacement levels of metakaolin on the resistance of mortars exposed to magnesium sulfate solutions”, *Cement and Concrete Research* 35, 1314-1323, 2005.

Malayoğlu, U. ve Akar, A., “Killerin sınıflandırılmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi”, *1. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 125-142, 1995.

Öz, E., Nevşehir dolaylarında yüzeyleyen asidik pomzanın hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 8-9, 2007.

Özcan, F., Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s.5-6, 2005.

Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M. ve Uyan, M., Her yönüyle beton, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 2004.

Parande, A. K., Babu, B. R., Karthik, M. A., Deepak Kumaar, K. K. and Palaniswamy, N., “Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar”, *Construction and Building Materials* 22, 127-134, 2008.

Pera, J., “Metakaolin and calcined clays”, *Cement and Concrete Composites* 23, 441-520, 2001.

Poon, C. S., Kou, S. C. and Lam, L., “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, *Construction and Building Materials* 20, 858-865, 2006.

Potgieter-Vermaak, S.S. and Potgieter, J.H. “Metakaolin as an extender in South African cement”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18 (4), 619–623, 2006.

Prasad, M.S., Reid, K.J., Murray H.H., “Kaolin: processing, properties and applications”, *Applied Clay Science* 6(2), 87–119, 1991.

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

Rashad, A.M., “Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition –a comprehensive overview”, *Construction and Building Materials* 41, 303-318, 2013.

Rashiddadash, P., Ramezaniapour, A.A. and Mahdikhani, M., “Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice”, *Construction and Building Materials* 51, 313–320, 2014.

Roy, D. M., Ajunan, P. and Silsbee, M. R., “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete”, *Cement and Concrete Research* 31, 1809–1813, 2001.

Sarıdemir, M., “Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete”, *Construction and Building Materials* 49, 484–489, 2013.

Seyhan,İ., “Volkanik kaolin oluşumu ve andezit problemleri”, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 76, 124-134, 1971.

Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A. and Mobasher B., “Transport properties in metakaolin blended concrete”, *Construction and Building Materials* 24, 2217–2223, 2010.

Siddique, R. and Kadri, E-H., “Effect of metakaolin and foundry sand on the near surface characteristics of cofncrete”, *Construction and Building Materials* 25, 3257–3266, 2011.

Siddique, R. and Klaus, J., “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review”, *Applied Clay Science* 43, 392-400, 2009.

Singh, M., Garg M., “Reactive pozzolana from Indian clays-their use in cement mortars”, *Cement and Concrete Research* 36(10), 1903–1907, 2006.

Soğancı A.S., Nevşehir bölgesinde bulunan pomzaların taşıma gücü ve oturma yönünden geoteknik özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s.36-37, 2011.

Sun, S.H., Ma, J.T., Pang, X.M., Sun, Y.T. and Wang, S.L., “Sulfur reduction additive prepared from acid-modified kaolin”, *Bulletin of the Catalysis Society of India* 4, 72-78, 2005.

Şengün, N., Pomzanın hafif harç yapımında endüstriyel hammadde olarak kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, s.9-14, 2004.

Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S. and Vidal T., “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Construction and Building Materials* 23, 669–674, 2009.

Tevrizci, M. M., Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s.8-9, 2010.

Tozan, G., Kaolendeki alüminyumun hidroklorik asit çözeltilerinde çözünme kinetiğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1995

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 1097-6/A, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler -bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2007.

TS EN 12350-2, Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 2: çökme (slump) deneyi, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12350-6, Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 6: yoğunluk, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12390-5, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12390-6, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2012.

TS EN 934-2+A1, Kimyasal katkıları-Beton, harç ve şerbet için-Bölüm 2: beton kimyasal katkıları-tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2013.

Tuncer, G., “Türkiye seramik hammaddelerine genel bir bakış”, **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, İzmir, 16-17, 1997.

Türkel, S. ve Kadiroğlu, B., “Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi** 13(3), 353-359, 2007.

Uyan, M., Pekmezci, B. Y. ve Yıldırım H., “Akışkanlaştırıcı katkı, kür ve koşullarının betonun geçirimsizlik özellikleri üzerine etkileri”, **SİKA Teknik Bülten** 1, 10-14, 2003.

Velosa, A.L., Rocha, F. and Veiga, R., “Influence of chemical and mineralogical composition of Metakaolin on mortar characteristics”, *Acta Geodyn. Geomater* 6(153), 121–126, 2009.

Vu, D.D., Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete, *Delft University Press*, Netherlands, 2002.

Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A., “Relative strength, pozzolanic activity and cementhy dration in süper plasticised metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research* 26 (10), 1537–1544, 1996.

Yapa, N., Alunitli kaolenlerin değerdendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1993.

Yazıcı, Ş., Anuk, D., ve Arel, H.Ş., “Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 25(2), 13-24, 2010.

Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., “Pomza taşı ile elde edilen taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması”, *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, 153-157, Isparta, 2005.

Yazıcıoğlu, S. ve Demirel, B., “Puzolanik katkı maddesi olarak kullanılan Elazığ yöresi pomzasının ilerleyen kür yaşlarında betonun basınç dayanımına etkisi”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 18 (3), 367-374, 2006.

Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E. ve Gönen, T., “Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi”, *Fırat Üniversitesi DAUM Dergisi* 1, 118-123, 2003.

Yıldırım, A. N., Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s.7-10, 2007.

Yıldız, K. and Uğur, L. O., “The effect of mineral admixture type on the modulus of elasticity of high strength concrete”, *Scientific Research and Essay* 4(8), 791-798, 2009.

Yıldız, K., Pomza ve zeolit katkılı yüksek dayanımlı betonların asit ve tuz etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2009.

Yüksel, İ., Bilir, T. and Özkan, Ö., “Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate”, *Building and Environment* 42, 2651-2659, 2007.

ÖZ GEÇMİŞ

Serhat ÇELİK TEN 10.08.1988 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Niğde’de tamamladı. 2006 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu. 2011-2012 yılları arasında Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi’nde mühendis olarak çalıştı. 2012 yılında Nevşehir Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’nda Mühendis olarak başladığı görevine halen devam etmektedir. 2012 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndaki Yüksek Lisans eğitimine başladı.