



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**MİKRO VE MAKRO SENTETİK FİBER
DONATILI KANGAL TERMİK SANTRALİ
UÇUCU KÜL İKAMELİ BETONLARIN BAZI
MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Adem AYDOĞDU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Adem AYDOĞDU tarafından hazırlanan “Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı Kangal Termik Santrali Uçucu Kül İkameli Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 09/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Sadık Alper YILDIZEL

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Üye

Doç. Dr. Günnur YAVUZ

İmza

.....
.....
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

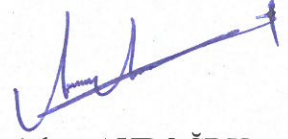
Bu tez çalışması, Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 191004023 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Adem AYDOĞDU

Tarih: 09/09/2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRO VE MAKRO SENTETİK FİBER DONATILI KANGAL TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜL İKAMELİ BETONLARIN BAZI MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Adem AYDOĞDU

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2019, 110 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Doç. Dr. Günnur YAVUZ
Dr. Öğr. Üyesi Sadık Alper YILDIZEL

Ülkemizde kullanılan betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilebilmesi adına birçok çalışma, yöntem ve malzeme geliştirilmiştir. Betonlara lifli bir yapı kazandırmak için son yıllarda ilerleyen teknolojiler sayesinde farklı türlerde sentetik fiber donatılar üretilmiştir. Termik santral baca atığı olan uçucu küllerin ise, çevresel zararları göz önünde bulundurulduğunda beton içerisinde değerlendirilmesi ilgi çekici bir konu olmuştur.

Çalışma kapsamında ön dizaynları yapılan beton karışımlarında sabit oranlarda olmak üzere mikro ve makro sentetik fiber donatılar kullanılmış; çimento yerine ise uçucu kül %10, %20 ve %30 oranlarında ikame ettirilmiştir. Ön deneylerle kullanım dozajları belirlenen mikro ve makro sentetik fiber donatılar, beton karışımları içerisinde sabit dozajlarda tekil ve hibrit olarak değerlendirilmiştir. Tüm beton dizaynlarında su/bağlayıcı oranı ve akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Toplamda 13 farklı beton kombinasyonu üretilmiş ve taze betonlar üzerinde birim hacim ağırlık tayini ve slump tayini deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton numunelerine ise, su emme tayini, standart basınç dayanım tayini, kiriş eğilme dayanım tayini, donma ve normal suda çözülme dayanım tayini, donma ve tuzlu suda çözülme dayanım tayini, yangın dayanım tayini deneyleri uygulanmıştır.

Yapılan deneysel çalışma sonunda, sentetik fiber donatı kullanılan ve uçucu kül ikame ettirilen betonların mekanik ve durabilite özelliklerinde ciddi seviyelerde iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir. Mikro ve makro sentetik fiber donatıların kullanımı ile betonların mekanik özelliklerinde, uçucu kül ikamesi ile birlikte betonların durabilite özelliklerinde iyileşmeler ortaya çıkmıştır. Sentetik fiber donatılı betonlarda, çimento yerine %30 oranına kadar uçucu kül ikame ettirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Beton Dayanımı, Makro Sentetik Fiber Donatı, Mikro Sentetik Fiber Donatı, Uçucu Kül.

ABSTRACT

MS THESIS

EXAMINATION OF SOME MECHANICAL AND PHYSICAL FEATURES OF MICRO AND MACRO SYNTHETIC FIBER REINFORCED KANGAL THERMAL POWER PLANT'S FLY ASH SUBSTITUTED CONCRETES

Adem AYDOĞDU

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2019, 110 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Assoc. Prof. Dr. Günnur YAVUZ
Asst. Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL**

Many studies, methods and materials have been developed in order to improve the mechanical and durability qualifications of the concretes used in our country. By means of recent developing technology, different types of synthetic fiber reinforcements have been produced to provide a fibrous structure to the concrete.

Considering the environmental damages of the fly ash, which are the stack effluent of the thermal power plant, its utilizing withinside the concrete has been an interesting issue. As part of the study, in pre-designed concrete mixes, micro and macro synthetic fiber reinforcements were used on steady pace and instead of cement fly ash was substituted at the rates of %10, %20 and %30. Micro and macro synthetic fiber reinforcements of which dosages determined in preliminary tests were utilized as monolithic and hybrid on steady dosages within the concrete mixes. In all concrete designs, the water / binder rate and the plasticizer / binder rate were kept steady. 13 different concrete combinations have been produced in total; and slump and weight per unit of volume determination experiments were made on fresh concrete. On hardened concrete samples, water absorption, standard pressure endurance, beam bending endurance, freezing and thawing in mean water endurance, freezing and thawing in salt water endurance and fire endurance determination experiments were made.

In the end of this experimental study, it is observed that significant improvements occurred on mechanical and durability qualifications of the concretes substituted with fly ash and reinforced with synthetic fiber. Improvements occurred on concrete's mechanical qualifications with the use of micro and macro synthetic fiber reinforcements; and improvements occurred on concrete's durability qualifications with the substitution of fly ash. It has been concluded that within the synthetic fiber reinforced concretes fly ash up to %30 can be substituted instead of cement.

Keywords: Concrete, Concrete Strength, Macro Synthetic Fiber Reinforcement, Micro Synthetic Fiber Reinforcement, Fly Ash.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca benden desteğini, bilgisini ve yardımlarını esirgemeyen, tez çalışma aşamamda ise her türlü motivasyonu sağlayan ve bana güç veren değerli yüksek lisans danışman hocam Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e derin saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkür ederim.

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin temininde yardımcı olan değerli arkadaşım İnşaat Mühendisi Emre AKIN'a, ayrıca Özbelsan A.Ş. Beton Santrali Kalite Kontrol Sorumlusu Salim ÇAŞUT'a, Votorantim Sivas Çimento Fabrikası Teknik Sorumlusu Mustafa KALINBACAK'a, Arslanlar Müh. Mim. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. Yönetim Kurulu Başkanı İnşaat Mühendisi Hasan ARSLAN'a, Kangal Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş. İşletme Başmühendisi Yunus Emre KÖKSAL'a, Kordsa Teknik Tekstil A.Ş. Ar-Ge Proje Lideri Burak ERDAL'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen kardeşim Yahya AYDOĞDU'ya sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında yapmış olduğum deneyler için bilgilerini ve emeklerini esirgemeyen Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü personellerinden Ar-Ge Başmühendisi Serdar TAN'a, Sanat Yapıları Başmühendisi Ali Osman AĞAOĞLU'na, Arazi Mühendisi Selçuk GÖZENELİ'ye, Yol ve Yapı Malzeme Mühendisi Hakan ERŞEN'e, 161. Şube Şefi Burhan VURAL'a, Laboratuvar Teknisyeni Tarık ARSLAN'a, Laboratuvar Teknisyeni Mükerrerem ÇİRCİ'ye, Laboratuvar Teknisyeni Ahmet DELİBAŞ'a ve Laboratuvar Teknisyeni Sebahattin YÜCEL'e ayrıca Tüdemsaş İş Güvenliği Uzmanı Mahmut CANTEMUR'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca, bana sabır gösteren ve manevi desteğini sunan sevgili eşim Buket AYDOĞDU'ya, yeterli zamanı ayıramadığım kızım Zehra AYDOĞDU'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her noktasında bana sevgileri ile güç veren, benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime saygılarımı ve sevgilerimi ayrıca sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Adem AYDOĞDU
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL	34
3.1. Beton Karışımlarında Kullanılan Agregalar ve Özellikleri	34
3.1.1. Tane büyüklüğü dağılımı tayini	36
3.1.2. Yassılık endeksi tayini	37
3.1.3. Parçalanma direnci tayini.....	38
3.1.4. Magnezyum sülfat dayanım tayini.....	39
3.1.5. İnce tanelerin tayini	39
3.1.6. Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini.....	40
3.1.7. Agrega granülometrisi tayini	42
3.2. Beton Numunelerinde Kullanılan Çimento Türü ve Özellikleri.....	43
3.3. Beton Karışım Suyu ve Özellikleri.....	44
3.4. Yüksek Performanslı Süper Akışkanlaştırıcı ve Özellikleri	45
3.5. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü ve Özellikleri	46
3.6. Mikro Sentetik Fiber Donatı ve Özellikleri	48
3.7. Makro Sentetik Fiber Donatı ve Özellikleri	49
4. YÖNTEM	51
4.1. Beton Karışım Dizaynları	51
4.2. Fiber Donatı Kullanım Dozajları	53
4.3. Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı, Uçucu Kül İkameli Betonların Üretilmesi.....	53
4.4. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Birim Hacim Ağırlık Tayini Deneyleri	57
4.5. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Slump Tayini Deneyleri.....	58
4.6. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Su Emme Tayini Deneyleri....	58
4.7. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Standart Basınç Dayanım Tayini Deneyleri.....	59
4.8. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Kiriş Eğilme Dayanım Tayini Deneyleri.....	60
4.9. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Normal Suda Çözülme Dayanım Tayini Deneyleri	61

4.10. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Tuzlu Suda Çözülme Dayanım Tayini Deneyleri	62
4.11. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Yangın Dayanım Tayini Deneyleri.....	62
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	64
5.1. Beton Karışım Dizaynlarına ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları.....	64
5.2. Fiber Donatı Kullanım Dozajlarına ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları	65
5.3. Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı, Uçucu Kül İkameli Betonların Üretilmesine ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları	65
5.4. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Birim Hacim Ağırlık Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	66
5.5. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Slump Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	67
5.6. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Su Emme Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	70
5.7. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Standart Basınç Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	73
5.8. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Kiriş Eğilme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	81
5.9. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Normal Suda Çözülme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	84
5.10. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Tuzlu Suda Çözülme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	89
5.11. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Yangın Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar	93
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
6.1. Sonuçlar	97
6.2. Öneriler	101
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$C^{*/}$	Dayanım sınıfı $^{*/}$ olan beton
$D_i/2$	Çubuklu elek anma açıklığı
d_i/D_i	Fraksiyon çap aralığı
D_{max}	En büyük agrega tane çapı
$FI^{(*)}$	Yassılık endeksi
$LA^{(*)}$	Los Angeles katsayısı
$m^{(*)}$	Kütle
$M^{(*)}$	Kütle
M'	Kütle
MB	Metilen mavisi değeri
$MS^{(*)}$	Magnezyum sülfat değeri
$p_{(a)}$	Görünür tane yoğunluğu
$p_{(rd)}$	Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu
$p_{(ssd)}$	Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu
R_i	Fraksiyon kütlesi
s_e	Su emme ağırlığı
$V^{(*)}$	Hacim
W	Su içeriği yüzdesi
$WA^{(*)}$	Su emme oranı
$^{\circ}C$	Santigrat derece
%	Yüzde değer
‰	Binde değer

Kısaltmalar

cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
dk	Dakika
dm ³	Desimetreküp
GPa	Gigapascal
gr	Gram
K ₀	Uçucu kül ikamesiz beton
K ₁₀	%10 oranında çimento yerine uçucu kül ikame edilen beton
K ₂₀	%20 oranında çimento yerine uçucu kül ikame edilen beton
K ₃₀	%30 oranında çimento yerine uçucu kül ikame edilen beton
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
l	Litre
m ³	Metreküp
Ma ₀	Makro sentetik fiber donatı kullanılmayan beton
Ma ₁	7,0 kg/m ³ dozajında makro sentetik fiber donatı kullanılan beton
mg	Miligram
Mi ₀	Mikro sentetik fiber donatı kullanılmayan beton
Mi ₁	1,4 kg/m ³ dozajında mikro sentetik fiber donatı kullanılan beton
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mm ²	Milimetrekare
MPa	Megapascal
N	Newton
RB	Referans beton
s	Saniye

1. GİRİŞ

Beton; inşaat sektöründe en çok tercih edilen ve yapay taş özelliğinde olan bir malzemedir. İnsanoğlunun ayak bastığı yer küreyi oluşturan doğal malzemeler ile suyun birleşiminden oluşur. İçeriğinde agrega, çimento ve su bulunan beton, bu özelliği sayesinde ekonomiktir. Betonda kullanılan agregalar doğal taş, doğal kum karışımından oluşturulabildiği gibi, doğada bulunan büyük kayaların kırılması ile açığa çıkan kırma taş ve kırma kum karışımından da oluşturulabilir. Çimentonun ise su ile hidratasyonu sonucu bağlayıcı madde ortaya çıkar. Bağlayıcı madde sayesinde küçük taneli agregalar, büyük yapay taş niteliğindeki betonu oluştururlar.

Beton karışımı ilk oluşturulduğunda akışkan durumda olur. Kalıplar yardımıyla bu akışkan taşa şekil kazandırılır. Beton işlenebilir olma özelliğini, ilk durumdaki akışkan fazının daha sonra kaybolarak katı faza geçmesine borçludur. Bu geçiş süreci betonun prizini alması diye adlandırılır. Beton priz alma süresini kalıp içerisinde geçirir. Bu süre sonunda çimento bağlayıcı sayesinde agregalar birbirleriyle bütünleşir ve döküldükleri kalıbın şeklini alırlar. Ortaya çıkan sertleşmiş yapay taş mekanik ve fiziksel özellik olarak yapıların ihtiyacını karşılayabilecek niteliktedir. Bu yapay taşın taşıyıcılık, dayanıklılık özelliği yüksektir. Üzerindeki yükleri yüksek basınç dayanımları sayesinde taşırlar. Karşılaşacakları zararlı doğal etmenlere karşı uzun yıllar dayanabilirler.

Bir betonun mekanik ve fiziksel özellikleri kendisini oluşturan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda bu malzemelerin ne oranlarda karıştırılacağı, ne tür farklı malzemelerle bu özelliklerin artırılacağı konusu betonun yıllardır geliştirilmesine katkı sağlamış ve sağlamaya da devam etmektedir. Betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin daha üst noktalara taşınması yüksek mühendislik çalışmaları ile gerçekleştirilebilir.

Betonu oluşturan agregaların dayanımı, hafifliği, dayanıklılığı ve granülometrisi, çimentonun sınıfı, suyun içeriği gibi özellikler betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Beton dizaynı ise betonu oluşturan malzemelerin özellikleri çerçevesinde ne oranlarda karıştırılacağını, betona nasıl bir kür uygulanacağını, betonun nasıl korunacağını belirler. Beton dizaynı ile betonun; işlenebilir, geçirimsiz, boşluksuz, yüksek dayanımlı, yüksek durabiliteli olması hedeflenir. Dizayna yön verecek etmenlerin çokluğu bir betonun farklı çeşitlilikte üretilebilmesine, bu doğrultuda mühendislik çalışmalarının dallanmasına imkan tanımaktadır.

Beton dizaynı yapılırken mevcut agregaların tane yapısı, büyüklüğü, yoğunluğu, dayanımı, dayanıklılığı, su emme oranı, granülometrisi gibi parametrelerin belirlenmesi istenilen beton dayanımı için önemlidir. Hedef dayanımın tayini için diğer bir faktörde seçilecek çimentonun türü ve kalitesidir. Betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimento farklı kalite ve türlerde üretilmektedir. Çimentonun mümkün mertebe ince öğütülmüş ve iyi bir fabrikasyon süreci geçirmiş olması bağlayıcılık özelliğinin ve kalitesinin ortaya çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Kalite bakımından çimentonun sınıfını belirleyen diğer etmen kimyasal birleşimidir.

Beton içerisinde bulunan çimento ve su karışımının kimyasal reaksiyonu neticesinde bağlayıcı madde oluşur. Her bir çimento elementinin hidratasyonu için belirli miktarda su elementi gereklidir. Hidratasyon için gerekli olan su miktarı beton dizaynı ile belirlenir. Su miktarı belirlenirken dikkat edilen diğer unsur betonun işlenebilirlik düzeyidir. Betonun işlenebilirliğinin sağlanabilmesi, hidratasyon için gerekli su miktarının aşılması ile mümkün olabilmektedir. Hidratasyon için gerekli su miktarının aşılması betonda boşluk oranının artışı olarak geri dönmektedir. Betonun içerisinde bulunan fazla su buharlaşarak boşluklar oluşturur. Betonun işlenebilirliğinin artırılması için su yerine farklı türlerde katkılar geliştirilmiştir. Çimentonun hidratasyonu için gerekli su oranının belirlenmesi beton dizaynının önemli bir parçasıdır ve bu parametre betonun tüm mekanik ve fiziksel özelliğini etkilemektedir.

Akışkan fazdaki beton, çimentonun hidratasyonu ile katı faza geçer. Betonun mekanik ve fiziksel yönden taşıyıcı olabilmesi için belirli bir süreye ihtiyacı vardır. Bu süre sonunda açığa çıkan yapay taşa sertleşmiş beton denmektedir. Sertleşmiş beton yüksek basınç ve kesme mukavemetine sahiptir. Sertleşmiş betonun basınç dayanım parametresi o betonun sınıflandırılmasında tek etkidir. Çünkü betonun çekme dayanımı basınç dayanımı karşısında ihmal edilecek kadar düşüktür. Betonun çekme mukavemetinin düşük olması en büyük dezavantajıdır. Bu dezavantaj donatı denilen çekme mukavemeti yüksek malzemelerle bertaraf edilir. Donatılı beton kullanımı neticesinde betonarme denilen yapı sistemleri geliştirilmiştir. Betonarme yapılarda basınç gerilmelerinin büyük bir kısmı betona, çekme gerilmeleri ise donatılara taşıttırılır ve bu amaç doğrultusunda statik hesaplar şekillendirilir. Günümüzde donatı olarak en çok yapı çeliği kullanılır ve yapı çeliği çekme gerilmelerinin düşük olduğu kubbe, tonoz, saha betonları, beton yollar gibi yapılarda yüksek maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olur. Bu tür yapılarda yapı çeliğinin donatı olarak kullanıldığı betonlar yerine farklı donatılı ve katkılı betonların geliştirilerek kullanılması hedeflenmektedir.

Betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilebilmesi için birçok farklı katkı maddesi üretilmekte ve geliştirilmektedir. Süper akışkanlaştırıcı katkıları, hava sürükleyici katkıları, priz hızlandırıcı katkıları ve priz geciktirici katkıları bunlardan birkaçıdır.

Çekme gerilmelerinin kısmen düşük olduğu donatısız betonlarda öne çıkan sorunlar rötrelere çatlakları, düşük çekme gerilmeleri altında oluşan deformasyon çatlakları, ısıl genleşme ve büzülmeyle ilgili olan çatlaklardır. Bu sorunlar yapı çeliği donatısı kullanılarak önlenmektedir fakat söz konusu çözüm ekonomik değildir. Özellikle saha kaplamaları, beton yollar, liman ve su yapıları, kubbe ve tonozlar, bitişik kirişli tabliyeler gibi dış etkilere çokça maruz kalan betonlarda görülen olumsuzlukları değişik katkı ve yapay donatılarla önleme düşüncesi hem ekonomik yönden hem de bazı atıkların betonda kullanılması ile çevreye verdiği zararları önlemesi yönünden önemlidir. Betona sağladığı mekanik ve fiziksel iyileştirmeler düşünüldüğünde yapay sentetik donatıları yapı çeliği donatısı ile eşdeğer tutmak ve yapı çeliği yerine kullanmak günümüz teknoloji sınırlarında pek mümkün görülmemektedir. Fakat yapı çeliğinin beton üzerindeki mekanik ve fiziksel iyileştirmesine fazlaca ihtiyaç duyulmadığı yapılarda, betonun dezavantajlarını minimize edebilecek katkı ve atık kombinasyonlarının denenmesi her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur. Geçmişte kullanılan kerpiç yapı elemanlarını yakından incelediğimizde, bu elemanların karışımında saman ve ot parçalarının bulunduğu şahit oluruz. Günümüzde ise bu düşünce ışığında betonda kullanılacak küçük boyutlarda yapay donatıların üretildiği ve geliştirildiği görülmektedir.

Betonun daha ekonomik bir yapıya kavuşması için karışımdaki en maliyetli malzeme olan çimentonun yerine kısmi olarak mikro granüler atık malzemelerin kullanılması düşüncesi literatürde birçok çalışmaya konu olmuştur. Mikro granüler malzemeler içerisinde termik santrali uçucu külleri geniş bir yer tutmaktadır. Uçucu küllerin atık malzeme olarak fazlaca depolanması ve çevreye olan etkilerinin azaltılması etkenleri göz önüne alındığında betonda kullanılabilirliğinin araştırılması geçmişte olduğu gibi günümüzde de devam etmektedir.

Çalışma kapsamında; mikro ve makro sentetik donatılar ile çimento yerine farklı oranlarda ikame ettirilecek Kangal Termik Santrali Uçucu Küllü'nün birlikte katkı olarak kullanılması sonucu üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinde olan değişimler bazı deneysel yöntemlerle incelenmiş ve yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmış ve öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde geçmişten günümüze kadar betonlarda birçok farklı katkı kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında betonda katkı olarak kullanılacak olan mikro ve makro sentetik fiber donatılar ile termik santrali uçucu külü malzemelerinin içerik olarak işlendiği ya da bu tez konusu ile alakalı olduğu düşünülen bazı önemli çalışmaları özetlemek gerekirse;

Banthia ve Yan (2000), yapmış oldukları çalışmada çimento bağlayıcılı elemanlarda rötre çatlakları ile plastik çatlakların oluşumunun engellenmesinde lifli katkıların rolünün olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılan lifin boyutunun ve yapısının çatlak kontrolünde etkisinin olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında boyları 19 mm, 25 mm, 25 mm ve 50 mm olan ve sırası ile çapları 0,15 mm, 0,15 mm, 0,38 mm ve 0,63 mm olan poliolefin lifi beton katkısı olarak kullanmışlardır. Hazırladıkları lifli beton numunesini daha önce oluşturdukları sertleşmiş olan bir beton tabakası üzerine dökmüşlerdir. Alt tabakayı oluşturan betonun dizaynı ile üst tabakayı oluşturan beton dizaynını farklı şekilde oluşturmuşlardır ve alt tabaka betonunu hazırlarken yüzeyine agregalar yerleştirmişlerdir. Üst tabaka betonunu ise %0,1, %0,3, %0,5 ve %0,7 oranında yukarıda belirtilen Tip-A, Tip-B, Tip-C ve Tip-D liflerini ayrı ayrı içerecek şekilde hazırlamışlar ve zamana bağlı oluşan çatlakların boyut ve sayılarını ölçmüşlerdir. %0,7 hacimce lif içeren numunelerde çatlak genişliklerinin Tip-D için 0,4 mm'nin altına düştüğünü, Tip-A için ise çatlakların tamamen ortadan kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. Çimento bağlayıcılı elemanlarda çatlak kontrolü için birim hacme düşen lif alanının büyük önem taşıdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kavas ve Sabah (2001), yapmış oldukları çalışmada betonun mekanik özelliklerinin ve elastiklik özelliğinin geliştirilerek daha sünek bir yapıya kavuşturulması maksadı ile farklı oranlarda sepiyolit katkı içeren çimento numunelerine deneyler uygulamışlardır. Hazırladıkları çimento numunelerinde kullandıkları sepiyolit katkı oranlarını %3, %5, %10, %15, %20 ve %30 olarak belirlemişlerdir. Oluşturdukları karışımlara basınç, eğilme, donma-çözülme gibi deneyler uygulamış, katkısız çimento numunesini referans alarak ortaya çıkan değişimleri irdelemişlerdir. Optimum sepiyolit katkı oranının %10 olduğunu ve bu oranda sepiyolit katkı içeren çimento numunelerinin basınç ve eğilme dayanımlarında maksimum düzeye ulaştığını tespit etmişlerdir.

Yörük (2001), yaptığı çalışmada uçucu küllerin beton üzerindeki mekanik ve dayanıklılık etkilerini incelemiştir. En büyük agrega tane boyutunu 16 mm olarak seçmiş ve bazı numunelerini sadece portland çimentosu kullanarak, bazı numunelerini portland çimentosu ve uçucu kül kullanarak ve bazı numunelerini ise traslı çimento kullanarak üretmiştir. Uçucu kül kullandığı numunelerde uçucu kül oranını çimentonun ağırlıkça %10 ve %20'si olacak şekilde belirlemiştir. Hazırlamış olduğu numuneleri sodyum sülfat çözeltisi, doygun kireç çözeltisi ve ıslak bez altında belirli süre bekletmiş, daha sonra numunelere basınç, eğilme, su emme deneyleri uygulamıştır. Yaptığı çalışma neticesinde uçucu küllerin betonun iç yapısındaki boşlukları doldurduğunu ve su emme kapasitesini azalttığını gözlemlemiştir. Uçucu kül içeren numunelerin dış ortamdaki zararlı kimyasallardan daha az etkilendiği sonucuna basınç deneyleri sonucunda karar vermiştir. Uçucu kül içeren betonların dayanım kaybının diğer betonlara göre daha az olduğunu belirtmiştir. Ayrıca su emme oranı düşük ve yüksek dayanımlı betonların zararlı dış etkiler karşısında daha az ağırlık kaybı yaşadıklarını gözlemlemiştir. Betonda uçucu kül kullanımının sağladığı fayda etkisinin, betondaki çimento dozajının ve uçucu kül kullanım yüzdesinin artışına bağlı olarak arttığını tespit etmiştir.

Tuygun (2002), yapmış olduğu çalışmada uçucu küllerin betonda katkı olarak kullanıldığında betonun erken dayanımlarında düşüşe neden olduğunu, ileri yaş dayanımlarında ise mukavemet artışı sağladığını aynı zamanda çimento dozajındaki azalmadan dolayı betonun maliyetini düşürdüğünü söylemektedir. 350 kg/m^3 sabit dozajlı çimento kullanarak hazırlamış olduğu beton numunelerinde %10, %30 ve %50 oranlarında çimento yerine Çayırhan Termik Santrali'ne ait uçucu kül ikame ettirerek betonlar hazırlamış ve bu betonlara basınç dayanımı, ultrases hızı, birim hacim ağırlık deneyleri uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül etkinlik katsayıları hesaplayarak uçucu külün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkinliğini ortaya koymuştur. Uçucu kül ikame oranlarına göre farklı değerlerde etkinlik katsayılarının hesaplandığını vurgulamıştır. Uçucu küllerin betonda kullanılması sonucu betonun erken yaş dayanımlarının azaldığını fakat 28 günlük dayanım sonrasında alınan basınç mukavemetinin ise referans beton numunesi dayanımlarına kıyasla arttığını belirtmiştir. Aynı zamanda uçucu küllerin betonun doğal yapısındaki boşlukları doldurduğunu ve neticesinde daha boşluksuz bir betonun ortaya çıktığını yapmış olduğu deneyler sonucunda tespit etmiştir.

Esen (2003), yapmış olduğu çalışmada betonun esnekliğine ve rötire çatlaklarına karşı poliakrilonitril liflerin etkisini incelemiştir. Hazırlanmış olduğu beton numunelerinde Bursa Yalova poliakrilonitril liflerini kullanarak betonun çekme dayanımı, eğilme dayanımı değişimlerini irdelemiştir. Numunelerinde boyları 6 mm ve 24 mm olan lifleri ayrı ayrı %1, %2, %3 ve %4 oranlarında kullanmıştır. Deney sonuçlarına göre betonun rötire çatlaklarının büyük ölçüde lif katkısı ile önlendiği sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca betonda kullanılan lif katkı oranı artışına bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımlarının referans numunelerin eğilme dayanımlarına göre bariz bir şekilde arttığını, bu artışın 6 mm lifin %4 oranında kullanılması ile %263 ve 24 mm lifin %4 oranında kullanılması ile %386 olduğunu tespit etmiştir. Eksenel çekme gerilmesi deneylerine sonucunda poliakrilonitril liflerin numune çekme mukavemeti üzerindeki etkisinin, eğilme dayanımındaki sağladığı artışa kıyasla az olduğunu belirtmiştir. 6 mm lif kullanılan numunelerin eğilme mukavemetinde %1, 24 mm lif kullanılan numunelerin eğilme mukavemetinde ise referans numuneye göre %21 artışın olduğunu saptamıştır. Uzun liflerin betonda kullanılması ile ciddi bir eğilme dayanım artışı sağlanacağından yapı betonlarında bu tür liflerin kullanılabilceğini söylemiştir.

Yaprak ve ark. (2004), yaptıkları çalışmada Çayırhan Termik Santrali Uçucu Külü ve çelik lif içerikli betonlarda cam lif katkısını farklı oranlarda kullanarak betonun mekanik özelliklerinde ortaya çıkacak değişimleri incelemiştir. Hazırlanmış oldukları numunelerde uçucu kül oranını $52,5 \text{ kg/m}^3$, çelik lif oranını 30 kg/m^3 olarak belirlemişler ve bu oranları tüm numunelerinde değiştirmeden uygulamışlardır. Numunelerde kullandıkları cam lif oranlarını ise $0,5 \text{ kg/m}^3$, $0,75 \text{ kg/m}^3$, $1,00 \text{ kg/m}^3$ ve $1,25 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlemişlerdir. Hazırladıkları numuneleri doygün kireç çözeltisinde bekleterek 3, 7 ve 28 gün sonunda basınç ve yarmada çekme deneylerine tabi tutmuşlardır. Tüm beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı kullanarak su/çimento oranını 0,45 seçip sabit tutmuşlardır. İşlenebilirlik deney sonuçlarına göre cam lif katkısının betonun işlenebilirliğine olumsuz etki yaptığını gözlemlemişlerdir. Uçucu kül katkısının betonun basınç dayanımına olumsuz yönde etki yaptığı sonucuna basınç deneyleri ile ulaşmışlardır. Basınç deneylerine göre cam lif katkısının ise uçucu kül katkılı betonlar referans alındığında 7 ve 28 günlük dayanımlarda artış sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Cam lif katkıların, aynı zamanda betonların yarmada çekme dayanımları göz önüne alındığında çelik liflerle birlikte dayanım artışları sağladıklarını gözlemlemişlerdir.

Kardeşler (2005), yaptığı çalışmada betonda kullanılan suyun içerisindeki zararlı maddelerin betona verdiği zararlardan bahsetmiştir. Beton suyunun içerisindeki zararlı maddelerden olan magnezyum sülfatın betona verdiği zararlı önlemek yada azaltmak maksadı ile betonda mineral katkı olarak uçucu kül kullanımının etkisini araştırmıştır. Hazırlanmış olduğu numunelerde çimento dozajını 250 kg/m^3 , 300 kg/m^3 , 360 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 olarak belirlemiş ve numuneleri farklı yoğunluklarında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletmiştir. Beton karışımlarında su/çimento oranını 0,75 olarak sabit tutmuş, uçucu külü ise çimento ağırlığının %10, %25 ve %37,5'i kadar karışımlara katmıştır. Magnezyum sülfat çözeltisi için ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında litre su başına magnezyum sülfat tuzu kullanmıştır. Hazırlanmış olduğu numuneleri magnezyum sülfat çözeltisinde belirli süreler beklettikten sonra basınç, su emme, şişme, eğilme, ultra ses hızı gibi deneyler uygulamış, uçucu külün beton üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu külün betonun dayanımına katkı sağladığını ve bu katkının ise ileri yaş dayanımlarında daha belirgin şekilde ortaya çıktığını tespit etmiştir. Uçucu küllün betonlarda magnezyum sülfat etkisini azalttığı ve betonunun dayanıklılığına olumlu yönde katkı sağladığı sonuçlarını ortaya koymuştur. Betonda kullanılan uçucu külün kullanım yüzdesine bağlı olarak sülfat etkisinin ters orantılı şekilde etkilendiği sonucuna ulaşmıştır.

Karahan (2006), yapmış olduğu çalışmada farklı tür liflerle uçucu külü betonda katkı olarak kullanmış ve betonun mekanik ve durabilite özelliklerinde meydana gelen değişimleri irdelenmiştir. Lif türü olarak numunelerinde polipropilen ve çelik lif kullanmıştır. Aynı zamanda Sugözü Termik Santrali Uçucu Külü'nü karışımlarında mineral katkı olarak tercih etmiştir. Polipropilen lif uzunluklarını 19 mm olarak, çelik lif uzunluklarını ise 35 mm uzunluğunda seçmiş, bu lifleri ve uçucu külü farklı oranlarda kullanarak numuneler hazırlamıştır. Hazırlanmış olduğu numuneler üzerinde birçok dayanım, dayanıklılık ve fiziksel deneyler uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre betonun bazı mekanik ve durabilite özelliklerine baktığında, polipropilen lifin etkisinin çelik life oranla düşük kaldığı sonucuna ulaşmıştır. %0,05 ve daha yüksek polipropilen lif oranlarında betonun mekanik ve durabilite özelliklerinde anlamlı bir değişiklik gözlemlenmediğinden, çelik lif oranının ise arttıkça betonun eğilme dayanımı ve durabilite özelliklerinde olumlu iyileştirmelerin olduğundan bahsetmiştir. Uçucu küllerin liflerle birlikte betonda %30 oranlarında kullanılabilir olduğunu ve bu durumun betonda ekonomiklik sağlayacağını vurgulamıştır.

Özdemir (2006), yaptığı çalışmada bazı mineral katkıları ile portland çimentosunu kullanarak harçlar hazırlamış ve hazırlanan numunelere mekanik ve fiziksel deneyler uygulamıştır. Mineral katkıları ile çimentoyu farklı kombinasyonlarda karıştırmıştır. Mineral katkı olarak numunelerde uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Hazırlanan numunelerde mineral katkıları tekli ve çoklu olarak farklı oranlarda ikame ettirmiş ve harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde gelişen değişimleri incelemiştir. İşlenebilirlik deney sonuçlarına baktığında uçucu küllerin olumlu, silis dumanının ise harçların işlenebilirliğine olumsuz etki yaptığını gözlemlemiştir. Yüksek fırın cürufunun ise harçlarda belirli bir kullanım oranına kadar işlenebilirlik artışı sağladığını fakat %25 karışım oranından daha yüksek oranlarda işlenebilirliğe olumsuz etki yaptığını söylemiştir. Basınç deneylerine göre ikili mineral katkı karışımlarında gözlemlediği mukavemet artışının, üçlü ve dörtlü karışımlarda gözlemlediği mukavemet artışından genel olarak daha fazla olduğunu vurgulamıştır. Aynı zamanda uçucu küllerin betonun erken yaş dayanımından ziyade ileri yaş dayanımlarına daha fazla katkı sağladığı sonucunu da ortaya koymuştur. Aşınma deneyleri sonunda uçucu küllerin numunelerde %25 ikame oranına kadar aşınma dayanımını arttırdığını, bu orandan daha fazla oranlarda uçucu kül kullanımının harçlarda aşınma direncine olumsuz etki yaptığını belirtmiştir.

Roesler ve ark. (2006), yapmış oldukları çalışmada yapay elyaf liflerin levha tipi betonarme kesitlerinde katkı olarak kullanılması ile beton levhalarda ortaya çıkan mekanik ve fiziksel kapasite değişimlerini incelemiştir. Hazırlamış oldukları beton numunelerinde %0,32 ve %0,48 oranlarında sentetik makro fiber donatı kullanmışlar, su/bağlayıcı oranını 0,50 seviyelerinde sabit tutmuşlar ve beton levha kalınlıklarını da 132 mm civarında belirlemiştir. Beton levhaları kenar uzunlukları 220 cm olacak şekilde kare formunda seçmişlerdir. Makro fiber katkılı ve katkısız numuneleri merkezi ve kenar yük yükleme düzeneği altında eğilme deneyine tabi tutmuşlar ve kırılma yüklerini kaydetmişler, beton levhaların yaptığı deplasmanları incelemiştir. Ayrıca beton levhaların ilk çatlama yükleri ile göçme yüklerini bularak makro fiber donatıların kesit taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini gözlemlemiştir. Deneyler neticesinde fiber donatı katkılı beton levhaların kırılma yüklerinde ve yükler altında yaptığı deplasman değerlerinde artışların olduğunu saptamışlardır. %0,32 ve %0,48 oranlarında fiber donatı kullanılan levhaların ilk çatlama dayanımlarında referans numuneye göre sırası ile %25 ve %32, göçme dayanımlarında %20 ve %34 oranlarında artış kaydetmişlerdir.

Türk ve ark. (2006), yapmış oldukları çalışmada kendiliğinden sıkışan betonda mineral katkı kullanmışlar ve hazırlamış oldukları numunelere bazı taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri uygulamışlardır. Mineral katkı olarak F tipi uçucu kül tercih etmişlerdir ve uçucu külü numunelerde çimento yerine %25, %30, %35 ve %40 oranlarında ikame ettirmişlerdir. Karışımda kullandıkları su miktarını işlenebilirlik ön deneyleri ile tespit etmişlerdir. Su oranını, numunelerde ikame ettirilen uçucu kül miktarına bağlı olarak işlenebilirlik açısından optimum oranda tutmuşlardır. Deney numunelerinde kullanmış oldukları F tipi uçucu külünü Tunçbilek Termik Santrali'nden temin etmişlerdir. Numunelere taze beton deneyleri olarak yayılma, V hunisi sertleşmiş beton deneyleri olarak basınç ve çekme mukavemeti deneyleri uygulamışlardır. Yapmış oldukları deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanım değerlerinin %25 F tipi uçucu kül ikameli kendiliğinden sıkışan beton numunesinde alındığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda daha yüksek oranlarda uçucu kül ikameli betonlarda basınç dayanım değerlerinde büyük farklılıkların olmadığını göz önüne alarak uçucu külün %25'ten daha yüksek oranlarda da kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Betonların doluluk oranlarına baktıklarında en iyi sonucu %30 oranlarında uçucu kül ikameli betonların verdiğini saptamışlardır.

Yıldırım ve Ekinci (2006), yapmış oldukları çalışmada üç farklı lif türü ve bu lifleri tekli veya çoklu olarak numunelerinde kullanarak betonun donma-çözülme etkisi altındaki dayanıklılık sonuçlarını irdelemişlerdir. Lif türü olarak çelik, cam ve polipropilen lifleri tercih etmişlerdir. Çelik lif katkısını %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında olmak üzere farklı oranlarda, cam lif katkısını %0,1 oranında ve polipropilen lif katkısını %0,1 oranında olmak üzere sabit oranlarda numunelerinde kullanmışlardır. Hazırladıkları beton numunelerinin birim ağırlıklarını, su emme oranlarını ve basınç mukavemetlerini ölçmüşler, numuneleri 30 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakmışlardır. Deney sonuçlarını incelediklerinde tüm lifli betonların donma-çözülme etkisi altında kontrol betonuna göre daha fazla ağırlık kaybına maruz kaldıklarını tespit etmişlerdir. Bu ağırlık kayıplarının yüzeysel olduğunu ve betonlardaki lif içerikli kısımlara ilerlemediğini vurgulamışlardır. Cam liflerin donma-çözülmeye karşı betonda olumsuz sonuçlar verdiği, çelik liflerin ise betonun donma-çözülme direncine olumlu yada olumsuz bir katkısının olmadığını söylemişlerdir. Soğuk ve sıcak hava döngüsüne maruz kalabilecek betonlarda kullanılabilecek lif katkısının, deney sonuçlarını irdelediklerinde polipropilen lifler olabileceğini belirtmişlerdir.

Tangüner (2007), yaptığı çalışmada farklı mukavemet dayanım özelliklerine sahip üretmiş olduğu betonlarda uçucu kül mineral katkısını kullanarak elastisite modülünde meydana gelen değişiklikleri araştırmıştır. Araştırmasında 15 farklı beton karışımı üretmiş ve karışımlarında farklı su/çimento oranları ile farklı bağlayıcı oranları kullanmıştır. Karışımların öncelikle birim ağırlık, işlenebilirlik gibi taze beton özelliklerini, bir süre kürde bekletildikten sonra sertleşen numunelerin ise basınç dayanım değerlerini ve elastisite modülünü incelemiştir. Deney sonuçlarını irdelediğinde beton numunelerinin vermiş olduğu birim hacim ağırlık değerleriyle ölçülen basınç dayanım değerleri arasında doğru orantılı bir bağıntının olduğunu tespit etmiş ve bunu ampirik bir formülle açıklamıştır. Aynı zamanda birim hacim ağırlık değerlerinin elastisite modülü değerleriyle olan bağıntısını da yine ampirik bir formülle ortaya koymuştur. Beton basınç dayanım değerleri ile elastisite modülü değerlerini beton karışımlarındaki su/bağlayıcı oranları ile ilişkilendirdiğinde ortaya ters bir orantının çıktığı vurgulamış ve bu bağıntıları da ayrıca formülize etmiştir. Beton numunelerinde kullanılan uçucu küllerin ise farklı çimento dozajlarında dahi beton basınç dayanım değerlerine ve elastisite modüllerine etkisinin anlamlı olmadığını belirtmiştir.

Agar (2009), yapmış olduğu çalışmada farklı türdeki çimentolarla ve farklı türdeki mineral katkılarla oluşturmuş olduğu harçlara bazı deneyler uygulayarak betonun dayanıklılık özelliğini incelemiştir. Üretmiş olduğu numunelerde farklı iki tür çimento ile mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu, tras ve uçucu kül kullanmıştır. Numunelerini %10 oranında sodyum sülfat tuzu içeren çözeltinin içerisinde bekletmiş ve meydana gelen değişimleri karbonatlaşma, kılcal su emme, ağırlık değişimi, basınç mukavemeti gibi deneylerle incelemiştir. Deney sonuçlarına baktığında mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu kullandığı numunelerin mekanik özelliklerinde gözle görülür artışların olduğunu tespit etmiştir. Su/çimento değeri ile numune geçirimliliği arasında doğru bir orantı olduğunu, bundan dolayı su/çimento oranı düşük numunelerin geçirimliliğinin azaldığını ve numunelerin magnezyum sülfata daha dayanıklı olduğunu söylemiştir. Uçucu küllerin betonun mekanik özelliklerine olan etkisinin yüksek fırın cürufu ve trasın etkisinden daha az olduğunu belirtmiştir. Uçucu kül içerikli harçların dayanım değerlerinin, diğer mineral katkı içerikli harçların dayanım değerlerine göre düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Betonda durabilitenin su/çimento oranına yüksek derecede bağlı olduğunu tekrardan ortaya koymuştur.

Can ve ark. (2009), yapmış oldukları çalışmada farklı tür lifleri betonlarda katkı olarak kullanmış ve bu lif katkıların betonun aşınma direncine karşı ne tür avantaj ve dezavantajlar sağladığını araştırmışlardır. Rijit yol üst yapısında kullanabileceğini düşündükleri betonları dayanım ve dayanıklılık özellikleri bakımından bazı deneyler uygulayarak irdelemişlerdir. Beton numunelerinde çelik ve polipropilen lifleri katkı olarak kullanmışlardır. Ayrıca lifli betonları değerlendirebilmek için aynı karışım özelliklerine sahip lif katkısız referans numuneler üretmişlerdir. Çelik lif katkısını 60 uzunluk/çap değerinde seçmişler ve polipropilen lif katkısını 900 gr/m³ oranında hazır beton tesisinden temin ettikleri C30/37 sınıfı beton numunelerinde kullanmışlardır. Üretmiş oldukları beton bloklardan 7 ve 28 gün sonunda karot numuneler almışlar ve bu karot numunelerine schmidt çekici, basınç, aşınma gibi deneyler uygulamışlardır. Numunelerin yüzey sertliklerine schmidt çekici ile baktıklarında ve aynı zamanda basınç dayanım sonuçlarını incelediklerinde en sert yüzeye ve en yüksek basınç dayanımına sahip numunenin çelik lif katkılı numune olduğunu, çelik lif katkılı numuneyi sırası ile polipropilen lif katkılı numunenin ve lif katkısız numunenin takip ettiğini görmüşlerdir. Aşınma dayanım değerlerini irdelediklerinde ise polipropilen lif katkılı ve lif katkısız beton karot numunelerinde anlamlı bir farkın olmadığını, çelik lif katkılı beton karot numunesinin ise en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Gürbüz (2009), yaptığı çalışmada farklı çimento dozajları kullanarak üretmiş olduğu beton numunelerinde farklı oranlarda C tipi uçucu kül ikame ettirmiş ve bu numunelere bazı taze beton deneylerinin yanında basınç, ultrases hızı, elastisite modülü tayini gibi sertleşmiş beton deneyleri uygulamıştır. Referans beton numunelerinde %10 ve %17 oranlarında iki farklı çimento eksiltmesi yaparak, %10 çimento eksiltmesi yaptığı numunelere %10, %15 ve %20 oranlarında, %17 çimento eksiltmesi yaptığı numunelere %17, %25,5 ve %34 oranlarında C tipi uçucu kül ilavesi yapmıştır. Deney sonuçları neticesinde elde ettiği verileri Bloomey formülünde kullanarak C sınıfı uçucu küllerin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini hesaplamaya çalışmıştır. Deney sonuçlarına göre numunelerin erken yaş mukavemet dayanımlarını değerlendirdiğinde, C tipi uçucu kül katkılı betonların referans betonlar ile yaklaşık aynı basınç dayanım değerlerini verdiğini ve bunun nedeninin C tipi uçucu küllerin içeriğindeki kireç olduğunu söylemiştir. Beton numunelerinde C tipi uçucu kül etkinliğinin ise çimento dozajı ile doğru orantılı olarak arttığını saptamıştır.

Karateke (2009), yapmış olduğu çalışmada Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilen F tipi uçucu küllerin betonda mineral katkı olarak değerlendirilmesi durumunda ortaya çıkardıkları mekanik ve fiziksel etkileri incelemiştir. Beton karışım dizaynlarında 260 kg/m^3 , 320 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 olmak üzere farklı oranlarda çimento kullanmıştır. Aynı zamanda hazırlamış olduğu karışımlarda işlenebilirlik özelliklerini sabit tutabilmek için 15,5 cm civarında çökme değerlerini yakalamaya çalışmıştır. Beton karışımlarındaki çökme miktarlarını sabit tutabilmek için öncelikle ön deneylerle karışımlarda kullanacağı su miktarını belirlemiştir. Kontrol betonu ile F tipi uçucu kül ikameli numuneleri kür havuzunda bekleterek basınç ve ultrases hızı deneylerine tabi tutmuştur. Deney sonuçlarına göre ortaya çıkan değerleri kullanarak her bir numune türü için F tipi uçucu küllerin etkinliğini Feret ve Bolomey formülleri yardımı ile hesaplamıştır. Deneyler neticesinde F tipi uçucu kül ikameli betonlar ile kontrol betonlarının 28 günlük dayanımları arasında anlamlı bir fark tespit edememiştir. 90 günlük numune deney sonuçlarına baktığında ise genel olarak F tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonlarından daha yüksek dayanımlar verdiğini belirtmiştir. Ultrases hızı deneylerine göre F tipi uçucu küllerin betonda doluluk oranını artırdığını söylemiştir. Ayrıca numunelerin elastisite modüllerini incelediğinde, F tipi uçucu kül katkılı betonlar ile kontrol betonlarının arasında gözle görülür bir farkın olmadığını ortaya koymuştur.

Richardson ve Landless (2009), yapmış oldukları çalışmada makro sentetik fiber donatılar ile çelik liflerin, betonlar ve beton kirişler üzerinde sergilemiş oldukları bağlanma mukavemetleri ve tokluk özelliklerini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Bağlanma mukavemet testi için hazırladıkları beton numunelerinde eşit sayıda makro sentetik fiber lif ve çelik lif ihtiva ettirmeye çalışmışlardır. Bunu sağlayabilmek için numunelerde ayrı ayrı olmak üzere 40 kg/m^3 dozajında çelik lif katkısı, $0,784 \text{ kg/m}^3$ dozajında makro sentetik fiber lif katkısı kullanmışlardır. Çünkü lif adedi/ağırlık oranlarını incelediklerinde aynı ağırlıktaki makro sentetik fiber katkının çelik lif katkısına göre 51 kat daha fazla lif içerdiğini söylemişlerdir. Deney sonuçlarına göre makro sentetik fiber donatıların ortalama bağ gücünün $0,470 \text{ N/mm}^2$, çelik lif ortalama bağ gücünün ise $4,120 \text{ N/mm}^2$ olduğunu bulmuşlardır. $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde ürettikleri kirişlerin eğilme deneyleri neticesinde makro sentetik fiber donatılı kirişlerin ortalama ilk çatlak dayanımının $8,5 \text{ kN}$, çelik lif katkılı kirişlerin ortalama ilk çatlak dayanımının ise $10,68 \text{ kN}$ olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Temiz ve ark. (2009), yapmış oldukları çalışmada ülkemizde yaygın olarak yol üst yapısı kaplamasında kullanılan bitümlü bağlayıcılar için dışa bağımlı olduğumuzu, bitümlü yol üst tabakasının bakım ve onarım ihtiyacının fazla maliyetli olduğunu, esnek yol üst yapısı dışında rijit yol üst yapısı olarak ülkemiz yollarında beton kaplamalarının da kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu düşünce ile yola çıkarak uçucu külleri beton numunelerinde mineral katkı olarak kullanmışlar ve hazırladıkları numunelere dayanım ve dayanıklılık testleri yaparak uçucu küllü betonların yol üst yapısında kullanılması durumunda sağlanabilecek avantajları araştırmışlardır. Beton numunelerinde Soma ve Afşin-Elbistan Termik Santrallerinden temin ettikleri uçucu küllerden yararlanmışlardır. Uçucu küllü beton numunelerin çevresel ve kimyasal etkiler altında ne tür davranışlar sergilediğini belirlemek için magnezyum sülfat, tuz, hidroklorik asit çözeltileri hazırlamışlar ve beton numunelerini bu çözeltiler içerisinde 15 ay bekletmişlerdir. Deney neticelerine göre uçucu küllü betonların erken yaş dayanımlarının kontrol beton numunelerine göre biraz düşük çıkmasına karşın ileri yaş dayanımlarında ise kontrol beton numunelerine göre artışların olduğunu gözlemlemişler, uçucu küllü betonların erken yaş dayanımlarının düşük bulunması nedeniyle yollarda temel tabakasında kullanılmasının daha doğru bir yaklaşım olacağını söylemişlerdir. %30 oranında uçucu kül ikameli betonların rötre çatlağı vermemesi, geçirimsiz olması, aşınma direncinin yeterli olması gibi sonuçları değerlendirdiklerinde bu betonların ülkemiz yollarında kullanılabilir olabileceğini yorumlamışlardır.

Türker ve ark. (2009), yapmış oldukları çalışmada Türkiye genelindeki mevcut termik santrallerden atık olarak ortaya çıkan uçucu külleri mineralojik, morfolojik, kimyasal ve fiziksel olarak derinlemesine incelemişler ve bu inceleme neticesinde sınıflandırmışlardır. Toplamda 11 adet termik santral uçucu külünün fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlar, element yapılarını irdelemişler, bu külleri kimyasal deneylere tabi tutmuşlar, belli standartlara göre sınıflandırmışlar ve aynı zamanda bu küllerin betonda ve çimentolu harçlarda mineral katkı olarak kullanılmasını deneyler yaparak değerlendirmişlerdir. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü'nün homojen bir yapıda olduğunu, içeriğinde serbest kirecin ortalama %7,65 ve reaktif kirecin ortalama %23,01 seviyelerinde bulunduğunu tespit etmişler aynı zamanda silisyum, alüminyum ve demir miktarı toplamının ortalama %53,37 seviyesinde olduğunu görmüşlerdir. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü'nün TS EN 197-1'e göre "W", ASTM C 618'e göre "C" sınıfında kalkersi ve yüksek kireçli uçucu kül olduğunu belirtmişlerdir.

Bölükbaş ve ark. (2010), yapmış oldukları çalışmada cam elyaf katkısını beton numunelerde kullanmışlardır ve betonun bu katkı sayesinde iyileşen özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlamış oldukları beton karışımlarında su/bağlayıcı oranını sabit tutmuşlardır. Farklı çimento dozajları ile hazırladıkları numunelere basınç, eğilme, ultrases hızı gibi betonun mekanik özellikleri hakkında bilgi veren deneyleri uygulamışlardır. 300 kg/m³ ve 350 kg/m³ çimento dozajı ile ürettikleri numunelerde ayrı ayrı 5 kg/m³, 10 kg/m³, 15 kg/m³ ve 20 kg/m³ oranlarında cam elyaf katkısı kullanmışlar ayrıca numunelere, kullandıkları çimento dozajına bağlı olarak süper akışkanlaştırıcı katkı ilave etmişlerdir. Deney sonuçlarını incelediklerinde genel olarak 300 kg/m³ çimento dozajlı karışımların basınç mukavemetlerinin, 350 kg/m³ çimento dozajlı karışımların basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğunu görmüşler ve bunun nedenini de 300 kg/m³ çimento dozajlı numunelerde kullanılan iri agrega oranının fazlalığına bağlamışlardır. Kontrol betonu basınç dayanımına göre, %5 ve %10 cam elyaf katkı oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Numunelerde %15 oranında kullanılan cam elyafların, beton basınç dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığını hatta olumsuz etkisinin olduğunu vurgulamışlar, %20 oranında kullanılan cam elyafların ise beton basınç dayanımlarında ciddi düşümlere sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir.

Boğazkesen (2011), yapmış olduğu çalışmada değişik oranlarda polivinil alkol lif katkısını, 500 kg/m³ sabit çimento dozajı ve farklı su/bağlayıcı oranına sahip harçlarda kullanmış ve bu harçların basınç, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemiştir. Hazırlamış olduğu karışımlarda su/bağlayıcı oranını 0,2 ve 0,35 olarak seçmiş, kullandığı kısa ve uzun lifli polivinil alkol içerikli katkı yüzdesini %0,5, %1, %1,5 ve %2 olarak belirlemiştir. Harçların işlenebilirliğini incelediğinde özellikle kısa lifli polivinil alkol katkıların olumsuz sonuçlar verdiğini görmüştür. Basınç dayanım testleri neticesine baktığında genel olarak polivinil alkol liflerin betonlarda gözle görülür bir dayanım artışı sağladığı sonucuna ulaşmıştır. Düşük su/bağlayıcı oranına sahip numunelere ait eğilme dayanım sonuçlarını incelediğinde betonlarda polivinil alkol lif kullanımının olumsuz etkiler ortaya çıkardığını yorumlamıştır. Yüksek su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde polivinil alkol lif kullanımının ise genel olarak betonun eğilme mukavemetini artırdığını söylemiştir. Polivinil alkol liflerin betonlarda darbe dayanımını artırdığını belirterek ve bu artışın uzun lifli polivinil alkol katkılarla daha fazla sağlandığı neticesini ortaya koymuştur.

Hasan ve ark. (2011), yapmış oldukları çalışmada makro sentetik fiber elyaf donatıları beton numuneleri üzerinde denemişlerdir. Beton karışımlarında %0,33, %0,42 ve %0,51 oranlarında makro sentetik fiber donatı, 376 kg/m^3 dozajında çimento kullanarak $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$, $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}$ ve $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ boyutlarında numuneler hazırlamışlardır. Bu numuneleri basınç, çekme ve kesme deneylerine tabi tutarak makro sentetik fiber donatıların etkinliklerini araştırmışlardır. Deneyler neticesinde makro sentetik fiber donatıların betonun kırılma yapısını azalttığını ve daha sünek bir yapıya kavuşmasını sağladığını gözlememişlerdir. Basınç dayanım değerlerine baktıklarında kullanılan makro sentetik lif oranı arttıkça betonda %4, %6 ve %7'ye yakın oranlarda basınç dayanım artışı sağlandığını bulmuşlardır. Aynı zamanda numunelere uyguladıkları çekme dayanım testi sonuçlarına göre lif oranındaki artış yüzdesine bağlı olarak %10, %15,5 ve %14,5 civarlarında betonların çekme mukavemetlerinde iyileşmelerin olduğunu belirtmişlerdir. Üretmiş oldukları makro sentetik lif katkılı ve katkısız beton kiriş numunelerine kurmuş oldukları farklı bir deney düzeneği ile kesme kuvveti uygulayarak, kirişlerin kesme kuvvetleri altındaki göçme yüklerine bakmışlardır. Kesme deneyi neticesinde beton numunelerinde kullanılan sentetik lif oranı arttıkça betonlardaki kesme dayanımlarının dikkate değer bir biçimde arttığını tespit etmişlerdir. %0,33 sentetik fiber katkı için %15, %0,42 sentetik fiber katkı için %45 ve %0,51 sentetik fiber katkı için %65 civarlarında beton kesme dayanımlarının kontrol betonlarına kıyasla arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kaya (2011), yapmış olduğu çalışmada betonlarda dış etkiler sebebi ile oluşan çatlakların ve büzülme çatlaklarının bazı reaksiyonlarla önlenebileceğinden ve kendi kendine kapanabileceğinden bahsederek, hazırlamış olduğu numunelerde yüksek su emme kapasitesine sahip polimer lifler kullanmıştır. Betonlarda zamanla oluşan çatlakların kapanmasının çimentonun ve puzolanik malzemelerin su ile kimyasal tepkimesinin uzun süre devam edebilmesi ile mümkün olabileceğini söylemektedir. Bu düşünce ile birlikte betonlarında katkı olarak aynı zamanda uçucu kül ve silis dumanını da katkı olarak kullanmıştır. Hazırlamış olduğu numuneler üzerinde yaptığı bazı mekanik deneylerin yanında mikroskobik incelemelerde de bulunmuştur. Betonda oluşan çatlakların ne tür malzemelerle dolduğunu araştırmıştır. Yaptığı deneyler ve gözlemler neticesinde ortamdaki suyu uzun süre bünyesinde barındıran polimer liflerin betonlardaki çatlakların kendi kendini kapatmasında etkili olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bu iyileşmenin betonun durabilitesine de önemli katkılar sağladığını vurgulamıştır.

Yaşar (2011), yapmış olduğu çalışmada naylon liflerin betonun bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve yaptığı deneyler sonucunda elde ettiği veriler ışığında bu liflerin optimum kullanım ve maliyet değerlerini irdelemiştir. Hazırlamış olduğu numunelerde her farklı su/çimento oranına karşılık farklı dozajlarda çimento kullanmıştır. Bazı numunelere farklı oranlarda yalnızca naylon lifler katmış ve aynı zamanda çelik lif ve naylon lif katkıları bazı numunelerde de birlikte değerlendirmiştir. Tüm karışımlarına işlenebilirliği belirli bir düzeyde tutmak amacıyla da süperakışkanlaştırıcı katkı ilave etmiştir. Hazırlamış olduğu numuneler üzerinde basınç, yarmada çekme, elastisite modülü tayini gibi mekanik deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarını incelediğinde naylon liflerin betonun sünekliği üzerinde etkili olduğunu fakat mekanik özellikler üzerinde ise pek bir etkisinin olmadığını gözlemlemiştir. Naylon liflerin betonda çelik liflerle beraber kullanılması neticesinde betonun mekanik özelliklerinde, sünekliğinde ve tokluğunda daha kayda değer iyileşmelerin olduğunu vurgulamıştır. Elde ettiği deney verilerini kullanarak Arzu Edilirlik Metodu ile naylon liflerin betondaki optimum kullanılabilirlik seviyesini belirlemiştir. “Arzu Edilirlik Metodu” ile ortaya çıkardığı düşük maliyet ve yüksek performans için optimum naylon lif kullanımının 0,32 su/çimento oranı ihtiva eden betonlarda $0,78 \text{ kg/m}^3$ olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Akyüncü (2012), yaptığı çalışmada Çatalağzı Termik Santraline ait F tipi uçucu küller ile Çayırhan Termik Santraline ait C tipi uçucu külleri betonda çimento yerine ikame ettirerek, bu ikame sonucu ortaya çıkan betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Hazırlamış olduğu numuneler üzerinde basınç, ultrases hızı, eğilme, su emme, magnezyum sülfata dayanım, donma-çözülme deneyleri gibi birçok deney yapmış, F ve C tipi uçucu küllerin betonda kullanılmasının etkinliğini hesaplamıştır. Numunelerde çimento dozaj oranlarını 260 kg/m^3 , 320 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 olarak belirlemiş ve akışkanlaştırıcı katkıları kullanmıştır. Yaptığı deneylere göre C tipi uçucu kül ikamesinin F tipi uçucu kül ikamesine kıyasla eşit işlenebilirlik derecelerinde daha az su gerektirdiğini görmüştür. C tipi uçucu küllerin F tipi uçucu küllere göre betonun erken yaş basınç dayanımlarında daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiş olsa da bu durumun betonun ileri yaş basınç dayanımları için tersine döndüğünü vurgulamıştır. Uçucu kül katkılı betonların sülfat dayanımının referans betonlara göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşmıştır. Donma-çözülme etkisi altında F tipi uçucu küllerin betona daha fazla performans kattığını söylemiştir.

Çakır (2013), yaptığı çalışmada betonların bazı yapay lif katkıları sayesinde daha sünek bir yapıya kavuştuğunu ve kırılma yükleri altında daha fazla enerji sönmülebildiklerini vurgulayarak, su/bağlayıcı oranı farklı olan beton karışımlarında değişik türlerde lif katkıları kullanmış ve betonun mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimleri incelemiştir. Numunelerinde naylon esaslı lifleri, makro sentetik lifleri ve çelik lifleri değişik oranlarda kullanmayı denemiştir. Liflerin betonlarda meydana getirdiği mekanik özellik değişimlerini basınç, elastisite modülü, yarmada çekme, eğilme dayanımı gibi deneyler ile araştırmıştır. Kancalı uçlu çelik lifleri numunelerinde yüksek ve düşük mukavemetli olmak üzere 2 türde kullanmış ve kullanım oranlarını 20 kg/m^3 ve 30 kg/m^3 olarak, naylon esaslı lifleri ve makro sentetik lifleri ise 3 kg/m^3 olarak seçmiştir. Aynı zamanda karışımlarında su/çimento oranı 0,60 için 300 kg/m^3 çimento dozajı, su/çimento oranı 0,38 için 475 kg/m^3 çimento dozajı kullandığını belirtmiştir. Çelik lifli numunelerde ayrıca silis dumanı katkısı kullanmıştır. Yarmada çekme deneyi ve kiriş eğilme deneyi sonuçlarını incelediğinde çelik liflerin kullanım oranına ve mukavemetine bağlı olarak beton dayanımını artırdığını belirlemiştir. Beton kirişlerin kırılma enerjilerine baktığında naylon esaslı lifler ile makro sentetik liflerin anlamlı bir fark oluşturmadığını görmüştür. Naylon esaslı liflere ve makro sentetik liflere kıyasla çelik liflerin, kullanım oranlarına ve mukavemetlerine bağlı olarak, beton kirişlerin kırılma enerjisi üzerinde 4 kata kadar daha fazla olumlu etki yaptığı sonucuna ulaşmıştır.

Güngör (2013), yaptığı çalışmada beton dayanımlarındaki artışa bağlı olarak betonun kırılma enerjisinin artmış olduğunu belirtmiş ve bazı lif katkılarıyla bu kırılma enerjisinin daha sünek bir yapıya dönüştürülebileceğinden bahsetmiştir. Bu düşünce ile yola çıkarak betonlarda polipropilen lifleri ve çelik lifleri tekil veya karma olarak kullanmayı denemiş, bu tür lif katkıları betonların mekanik özelliklerinde meydana getireceği değişimleri bazı deneylerle araştırmıştır. Deney sonuçlarını incelediğinde polipropilen, çelik ve karma lif katkılı betonlar ile kontrol betonları arasında basınç mukavemet ve elastisite modülü değerleri için anlamlı bir fark bulamamıştır. Yüksek lif oranı kullandığı betonlarda ise bu değerlerin düşüş gösterdiğini vurgulamıştır. Polipropilen liflerin betonun eğilme davranışı üzerindeki etkisinin, çelik liflere ve karma liflere oranla daha düşük olduğunu saptamıştır. Çelik liflerin ve karma liflerin betonda daha iyi tokluk sağladığı ve betonların enerji sönmüleme kapasitesinde ciddi artışlara neden olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Sarı (2013), yapmış olduğu çalışmada iki farklı makro sentetik fiber lifi, bazalt lifi ve çelik lifleri ayrı ayrı hazırlamış oldukları beton karışımlarında kullanarak betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Beton karışımlarına hacimce %0,445 bazalt lif, %0,445 kopolimer lif, %0,445 poliolefin lif, %0,445 ve %0,255 çelik lif katkıları katmıştır. Hacimce yüzdeleri belirlediği bu liflerin 1 m³ beton karışımı içerisinde 4 kg kopolimer lif, 4 kg poliolefin lif, 12,5 kg bazalt lif, 35 kg ve 20 kg çelik lif olması gerektiğini hesaplamıştır. Aynı zamanda karışımlardaki su/çimento oranını 0,64 olarak sabit tutmaya çalışmıştır. Hazırladığı taze betonlar üzerinde birim hacim ağırlık ve çökme deneyleri, sertleşmiş betonlar üzerinde ise basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri uygulamıştır. Deney sonuçlarını incelediğinde poliolefin lifli numuneler ile 35 kg/m³ dozajında çelik lif kullanılan numunelerin elastisite modüllerinin en yüksek değerleri verdiğini ve bu değerlerin sırası ile 32 GPa ve 31 GPa olduğunu belirtmiştir. Kopolimer liflerin betonların elastisite modülünde azda olsa azalmaya sebebiyet verdiğini, kontrol betonları ile bazalt lif içerikli betonların elastisite modüllerinde ise bir farklılığın olmadığını söylemiştir. Kiriş eğilme deneylerine baktığında en yüksek eğilme dayanımını yine 35 kg/m³ dozajında çelik lif kullanılan numunenin verdiğini ve bunu sırası ile poliolefin lifli betonun, bazalt lifli betonun, kopolimer lifli betonun ve 20 kg/m³ çelik lif içerikli betonun takip ettiğini vurgulamıştır.

Bakır (2014), yapmış olduğu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül ile silis dumanını hem tekil olarak hem de karma olarak betonlarında çimento yerine ikame ettirmiş ve farklı kür koşullarının, ürettiği mineral katkılı betonların eğilme ve basınç dayanım özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sertleşmiş beton numunelerine suda, havada, ıslak bez ile ve parafin kaplama ile kür metotlarını uyguladıktan sonra numuneleri standart basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı testlerine tabi tutmuş ve sonuçları yorumlamıştır. Deneyler sonunda elde ettiği veriler ışığında, beton basınç ve eğilme dayanımları üzerinde en etkili kür yöntemlerinin su ve ıslak bez ile yapılan kürler olduğunu belirlemiştir. Havada kür yapılan uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarında belirli bir süreden sonra olgunlaşma görememiş ve bunun nedenini de uçucu kül içerikli betonların basınç dayanımındaki artışın uzun bir süreye yayılmasına ve bu süre zarfında da neme ihtiyaç duymasına bağlamıştır. Betonlardaki işlenebilirlik kriterini dikkate aldığına uçucu külün olumlu, silis dumanının ise olumsuz etkisinden bahsetmiştir. Taze beton numunelerinde işlenebilirliğin sağlanabilmesi için artırılan su/bağlayıcı oranının betonda geçirimsizliğin azalmasına neden olduğunu vurgulamıştır.

Delikurt (2014), yaptığı çalışmada Sugözü Termik Santrali'ne ait uçucu küllerin betonun mekanik davranışı üzerinde sağlamış olduğu etkileri incelemiştir. Uçucu küllerin betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisini birçok taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri ile araştırmıştır. Hazırlamış olduğu karışımlar üzerinde standart basınç dayanım testi, eğilme testi, geçirgenlik testi, yarmada çekme testi gibi birçok deney yapmıştır. Sugözü Termik Santrali Uçucu Külü'nü beton numunelerinde %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine ikame ettirmiştir. Sugözü Termik Santrali'ne ait bu külün F tipi uçucu kül sınıfında olduğunu vurgulamıştır. Numunelerinde %10 oranında ikame ettirdiği uçucu küllerin tüm beton yaşlarında basınç mukavemet artışlarına neden olduğunu belirtmiştir. %20 oranında uçucu kül ikameli betonların ise ileri yaş dayanımlarında kontrol betonu ile aynı basınç mukavemetini verdiğini söylemiştir. Betonlarda yüksek oranlarda uçucu kül ikamesinin betonun basınç dayanımında olumsuz etki yaptığı sonucuna ulaşmıştır. Uçucu küllerin aynı zamanda betonun su ve gaz geçirgenliğini ile boşluk oranını düşürdüğünü, aşınma dayanımını ise artırdığını tespit etmiştir. Sugözü Termik Santrali Uçucu Külü'nün betonda sağladığı dayanım ve dayanıklılık etkilerini dikkate alarak çimento yerine %10 ve %20 oranlarında kullanımının yararlı olabileceğini önermiştir.

Kandemir (2014), yapmış olduğu çalışmada iki farklı tür öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, granüle olmayan öğütülmüş fırın cürufu ve C sınıfı uçucu kül mineral katkılarının betonun durabilitesi üzerindeki etkilerini klor geçirimsizliği, kılcal su emme, üç noktalı eğilme, sülfata dayanım deneyleri ve bazı taze beton deneyleri ile araştırmıştır. Hazırlamış olduğu numunelerde su/bağlayıcı oranını ve beton işlenebilirlik düzeylerini sabit tutmuş, bunu sağlayabilmek içinde karışımlarında farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanmıştır. Beton karışım dizaynlarını ise C30/37 beton sınıfını sağlayacak şekilde oluşturmuştur. Yüksek fırın cürufu mineral katkılarını 1 m³ beton için 50 kg, 90 kg, 100 kg ve 120 kg olarak, uçucu külü ise 70 kg ve 90 kg olarak karışımlarına eklemiştir. Deney sonuçlarına baktığında kullandığı mineral katkıların betonun geçirimsizlik özelliklerinde iyileşmeler sağladığını vurgulamıştır. Ürettiği betonların sülfata dayanıklılık etkisini incelediğinde uçucu küllerin yüksek fırın cürufuna göre daha olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Sülfat etkisi altında yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin uçucu kül ikameli numunelere göre daha fazla ağırlık kaybına uğradığı sonucuna ulaşmıştır. Ultrases hızı deneyleri neticesinde ise verilerin anlamlı bir yorum yapmaya uygun olmadığını belirtmiştir.

Kandil (2014), yaptığı çalışmada uçucu kül ve silis dumanı gibi çok ince yapıda olan mineral katkı malzemelerinin betonun bünyesindeki boşlukları doldurmada etkili olduğunu ve daha boşluksuz ve daha geçirimsiz betonların bu mineral katkıların kullanımı ile mümkün olabileceğini söylemektedir. Boşluksuz bir betonunda bünyesine daha az zararlı malzeme absorbe edeceğini ve sonucunda zararlı çevresel etkilerden daha az etkileneceğini vurgulamıştır. Çevresel etkilerin betonun dayanıklılığını düşürdüğünü ve neticesinde betondaki dayanım kriterinin de olumsuz etkilendiğini belirtmiştir. Bu düşünce ile uçucu kül ve silis dumanı gibi mikro granüler malzemelerin betonda kullanılması durumunda betonun durabilitesinde sağladığı etkileri işlenebilme, klorür geçirimsizliği, basınçlı su geçirimsizliği, basınç dayanımı tayini deneyleri ile incelemiştir. Üretmiş olduğu numunelerde 290 kg/m³ ve 340 kg/m³ dozajlarında bağlayıcı ve her bir bağlayıcı oranı için %10, %20 ve %30 ikameli uçucu kül, %5, %10 ve %15 ikameli silis dumanı kullanmıştır. Her bir numunenin işlenebilirliğinin eşit olmasını, karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanarak sağlamıştır ve numunelerde su/bağlayıcı oranını 0,5 olarak belirlemiştir. Beton numunelerinin klorür geçirimsizlik değerlerine baktığında silis dumanının uçucu küllere göre daha etkin olduğunu görmüştür. Kür süresi ile beton numunelerinin geçirimsizlik değerleri arasında ters orantı olduğundan söz etmiştir. Uçucu kül ikamesinin, betonlarda basınç dayanım azalmalarına, silis dumanı ikamesinin ise basınç dayanım artışlarına azda olsa yol açtığını tespit etmiştir. Silis dumanının, uçucu küllere göre betonun durabilitesinde düşük ikame oranlarında dahi daha etkin olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Mutyılmaz (2014), yapmış olduğu çalışmada beton yol kaplaması olarak polipropilen ve çelik liflerle güçlendirilmiş ve uçucu kül ikameli kendinden yerleşen betonların kullanılmasını incelemiştir. C30/37 beton sınıfında tasarladığı numuneler üzerinde yaptığı yayılma, V hunisi ve L kutusu deneyleri ile kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirliğini ve yerleşebilirliğini ölçmüş aynı zamanda basınç, yüzey sertliği, ultrases hızı geçiş, eğilme, levha yükleme ve yarmada çekme deneyleri ile mekanik özelliklerini irdelemiştir. Uçucu kül ikamesini çelik liflerle desteklemesi sonucunda ürettiği numunelerin basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarında ciddi iyileşmelerin olduğunu görmüştür. En iyi eğilme dayanımını 40 kg/m³ çelik lif içerikli ve 100 kg/m³ uçucu kül ikameli betonun verdiğini öne sürmüştür. Polipropilen liflerin ise kendiliğinden yerleşen betonlarda rötre direncini artırdığını fakat 1,5 kg/m³ kullanım dozajından sonra işlenebilirlik açısından olumsuz etki gösterdiğini özellikle belirtmiştir.

Öz (2014), yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlarda karma lif katkılarının ve mineral katkı olarak uçucu küllerin beraber kullanılması neticesinde betonlarda oluşacak etkileri bazı taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri ile araştırmıştır. Uçucu küllerini mineral katkı olarak kendinden yerleşen beton karışımlarına %10, %20 ve %30 oranlarında çimento yerine ikame ettirmiştir. Ayrıca bu karışımlarda çelik lifleri, pirinç kaplı çelik lifleri ve polipropilen lifleri farklı oranlarda kullanmıştır. Çelik esaslı lifleri numunelerinde %2 oranında ve polipropilen lifleri %0, %0,05 ve %0,1 oranlarında kullanmayı tercih etmiştir. Ürettiği karışımlara yayılma ve yayılma hızı tayini gibi deneyler uygulamış ve bu karışımların kendiliğinden yerleşen beton özelliği verip vermediğini irdelemiştir. Numunelerine, sertleşmiş beton deneyleri olarak basınç, eğilme ve yarmada çekme aynı zamanda betonların dayanıklılığını belirlemek için donma-çözülme, yüksek sıcaklık dayanımı ve geçirimsizlik testleri uygulamıştır. Yayılma deney sonuçlarına baktığında polipropilen ve çelik lif içerikli numunelerin katkı kullanım oranına bağlı olarak daha az yayılım gösterdiğini, pirinç kaplı çelik lif ve uçucu kül içerikli numunelerin ise katkı kullanım oranına bağlı olarak daha fazla yayılım gösterdiğini tespit etmiştir. Basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanım sonuçlarını incelediğinde çelik lif oranının ve uçucu kül ikamesinin artışına bağlı olarak kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinde iyileşmelerin olduğunu vurgulamıştır. Yüksek sıcaklık etkisi altında polipropilen lif katkılı numunelerin dayanımlarının önemli ölçüde azaldığını belirtmiş fakat polipropilen liflerin kullanım miktarı ile orantılı olarak donma-çözülme etkisi altında betonlarda dayanıklılık artışı sağladığını söylemiştir.

Rai ve Joshi (2014), yapmış oldukları çalışmada katkısız betonların büzülme ve genişleme etkileri altında çatladığını ve bu çatlakların yük etkisi altında daha kırılğan bir yapıya zemin oluşturduğunu söylemişlerdir. Lif katkıların bu çatlaklar arasında yük aktarımı sağladığını ve betonlarda sünekliği artırdığını belirtmişlerdir. Fiber lif katkılı betonlar üzerinde daha önceden yapılan çalışmaları irdelemişler ve bu çalışmalara ait çelik liflerin, cam liflerin, polimer liflerin ve doğal liflerin betona sağladığı basınç, eğilme, aşınma ve geçirgenlik dayanım etki sonuçlarını tek bir başlık altında toplamışlardır. Lif katkılı betonların basınç dayanımlarının, eğilme dayanımlarının ve dayanıklılıklarının normal betonlara göre daha yüksek bulunduğunu görmüşlerdir. Fiber lif katkıların betonlar üzerinde dayanım artışından ziyade daha çok süneklik ve eğilme artışı sağladığını yorumlamışlardır.

Yılmaz (2014), yaptığı çalışmada yakıt atığı şeklinde çevrede depolanan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu mineral katkılarının betonlarda kullanımı ile sağlanacak çevresel yararları değerlendirilerek, bu katkıların betonlar üzerinde oluşturduğu mekanik özellik değişimlerini ve maliyet faydalarını araştırmıştır. Betonların ekonomik avantajları sebebi ile inşaat sektöründe kullanılan en önemli yapı malzemesi olduğunu vurgulamış ve ayrıca betondaki en maliyetli birim olan çimentonun yerine kısmi olarak mineral katkılarına ilave edilmesinin ülkemiz ekonomisine çok büyük bir katkı sağlayacağını söylemiştir. Bu düşünce ile Çatalağzı, Çayırhan ve Tunçbilek Termik Santrallerine ait uçucu külleri beton numunelerinde 60 kg/m^3 oranında, Oyak ve Karçimsa Fabrikalarına ait yüksek fırın cüruflarını ise beton numunelerinde 70 kg/m^3 oranında kullanmıştır. Ayrıca hazırladığı her beton karışımına %1,3 oranında süperakışkanlaştırıcı katkı ilave etmiştir. Beton karışımlarında su/çimento oranını 0,55 olarak bu değeri sabit tutmuştur. Betonlarda priz başlama ve priz sona erme sürelerini dikkate aldığı uçucu küllerin ve yüksek fırın cüruflarının bu süreleri geciktirdiğini tespit etmiştir. Deneyler neticesinde uçucu küllerin ve yüksek fırın cüruflarının erken yaş beton mukavemetlerini düşürdüğünü ve bu düşüş miktarının en çok uçucu kül ikame edilen betonlarda görüldüğünü belirtmiştir. Betonların ileri yaş dayanımlarını incelediğinde yüksek fırın cürufu ikamesinin beton mukavemetini artırdığı, uçucu küllerin ise yüksek ikame oranı nedeniyle ileri yaş beton mukavemetini de düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır.

Akça ve ark. (2015), yapmış oldukları çalışmada C25/30 sınıfındaki beton numunelerinde geri kazanılmış agregaları % 25, %30 ve %55 oranlarında iri agregalar yerine ikame ettirerek, polipropilen esaslı makro sentetik lifleri %0, %1 ve %1,5 oranlarında katkı olarak kullanarak yeni beton numuneleri üretmişler ve bu numunelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Betonların işlenebilirliği üzerinde geri kazanılmış agregaların ve polipropilen esaslı liflerin olumsuz etki oluşturduklarını fakat bu etkinin akışkanlaştırıcı katkıları ile bertaraf edilebileceğini söylemişlerdir. Beton basınç dayanım sonuçlarını incelediklerinde makro sentetik polipropilen esaslı liflerin betonların mukavemetlerinde anlamlı bir artış yada azalışa neden olmadığını, geri kazanılmış agregaların ise betonlarda mukavemet düşüşlerine sebebiyet verdiğini ortaya koymuşlardır. Deneylerde kullanmış oldukları betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini değerlendirdiklerinde polipropilen esaslı makro sentetik liflerin en uygun kullanım oranının %1 olduğuna karar vermişlerdir.

Babafemi (2015), yaptığı çalışmada makro sentetik fiberlerin betonun doluluk oranı ve sünekliği üzerinde önemli katkılarının olduğunu söylemiş ve tek eksenli çekme gerilmeleri ile eğilme gerilmeleri altında makro sentetik fiber katkılı betonların ve fiberlerin zamana bağlı dayanımlarını çok çeşitli deneylerle araştırmıştır. Öncelikle makro fiberlerin çoklu kullanım ile çekme dayanımlarını, sürekli çekme yükleri altında gösterdiği davranışları ve beton içerisindeki sıyrılma davranışını incelemiş, daha sonra tekil olarak makro fiber lifin çekme dayanımını, sürekli çekme yükü altında gösterdiği davranışı ve betonda göstermiş olduğu aderansı irdelemiştir. Son olarak makro fiberlerin beton numunelerinde kullanılması ile ortaya çıkan yapısal davranışı sürekli kiriş yükleme testleri ve bilgisayar programı aracılığı ile modelleme yaparak ortaya çıkarmaya çalışmıştır. Gerilme dayanım yükünün, %60 ve %70 seviyelerinde makro fiberlerin katkı olarak kullanıldığı ve aradaki bağın sadece makro fiberlerle sağlandığı iki beton elemana çekme yükü olarak sürekli yüklenmesi sonucu, elemanlar arası mesafenin zamana bağlı olarak arttığını ve makro sentetik liflerin koparak değil betondan sıyrılarak göçme oluşturduğunu tespit etmiştir. Gerilme dayanım yükünün %30 ve %50 seviyelerinde olan yükleri sürekli olarak kiriş eğilme deneyi ile makro sentetik lifli beton kiriş numunelerine uygulaması neticesinde çatlak açıklığının zamanla arttığı sonucuna ulaşmıştır. Belirli seviyelerde sürekli olarak uygulanan eksenel çekme ve eğilme yüklerinin makro sentetik lif katkılı betonlarda sürdürülebilir olmadığını ortaya koymuştur.

Pektaş (2015), yapmış olduğu çalışmada silindirle sıkıştırılabilen betonlarda mineral katkı olarak uçucu küllerin ve yüksek fırın cürufunun kullanılması ile ortaya çıkabilecek fiziksel ve mekanik sonuçları bazı taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri yardımıyla irdelemiş, bu betonların ayrıca donma-çözülme, tuz ve aşınma etkileri altındaki davranışını incelemiştir. Mineral katkılı silindirle sıkıştırılabilen betonların işlenebilirlik seviyelerini incelediğinde uçucu küllerin yüksek fırın cüruflarına göre betonlarda daha iyi işlenebilir bir kıvam ortaya çıkardığını gözlemlemiştir. Uçucu küllerin silindirle sıkıştırılabilen betonlarda mukavemet artışlarına, yüksek fırın cürufunun ise mukavemet kayıplarına sebebiyet verdiğini tespit etmiştir. Silindir yarma deneyi, eğilme deneyi sonuçlarına ve durabilite kriterine göre optimum yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanım oranının %20 olabileceğine kanaat getirmiştir. Donma-çözülme ve buz çözücü tuz etkileri karşısında yüksek fırın cürufu katkılı silindirle sıkıştırılabilen betonların daha iyi performans sergiledikleri sonucunu ortaya koymuştur.

Bozkurt ve Karakurt (2016), yapmış oldukları çalışmada çelik lifleri 15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3 dozajlarında yol beton kaplaması olarak tasarladıkları beton karışımlarında kullanmışlar ve bu karışımlar üzerinde bazı taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri uygulamışlardır. Karışımlarında 2 farklı su/çimento oranı seçerek değerlerini 0,45 ve 0,53 olarak belirlemişler aynı zamanda çimento dozajını da 390 kg/m^3 olarak sabit tutmuşlardır. Numune üretimlerinde 3 tür agrega kullanıp en büyük tane çapını 22,4 mm olacak şekilde ayarlamışlardır. Üretmiş oldukları numuneleri 28 gün boyunca küre tabii tutmuşlar ve bu numunelere basınç ve eğilme deneyleri yaparak çelik lifli betonların mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında yorumlar yapmışlardır. Çelik liflerin, düşük su/çimento oranında daha etkili olmak üzere betonun işlenebilirliğini azalttığını görmüşlerdir. Betonlarda 30 kg/m^3 dozajında çelik lif kullanımının basınç mukavemetini %108, eğilme mukavemetini %130 oranında artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca su/çimento oranı 0,45 olan numunelerin eğilme dayanımlarındaki artış oranlarına baktıklarında çelik liflerin daha etkili olduklarını tespit etmişlerdir. Çelik lifler sayesinde betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmelerin olduğunu ve çelik lif katkılı betonların yol üst yapısı olarak kullanılabileceğini fakat bu liflerin korozyona karşı korunması gerektiğini vurgulamışlardır.

Çivici ve Güngör (2016), yaptıkları çalışmada çelik lifleri ve polipropilen lifleri tekil ve hibrit olarak beton kiriş numunelerinde kullanmışlar ve bu liflerin betonun tokluğu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tekil lif katkılı beton numunelerinde çelik lif kullanım oranını 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 , polipropilen lif kullanım oranını 600 gr/m^3 olacak şekilde belirlemişlerdir. 1 m^3 hibrit lifli beton üretimi için kullanmış oldukları çelik lif miktarını 20 kg ve polipropilen lif miktarını ise 500 gr olarak seçmişlerdir. Üretmiş oldukları numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanım tayini deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarını incelediklerinde, tekil ve hibrit lif katkılı beton numunelerin eğilme mukavemetlerinin katkısız betonlara göre %5 ile %23 arasında değişen oranlarda artmış olduğunu tespit etmişlerdir. Lif kullanım oranına ve türüne göre beton basınç mukavemetlerinin değişkenlik gösterdiğini, aynı zamanda mukavemet değerlerinde oluşan artış ya da azalış miktarının küçük değerlerde olduğunu belirterek, tekil ve hibrit lif katkıların beton basınç mukavemeti üzerinde olumlu bir etki oluşturmadığını yorumlamışlardır. Lif katkıların betonda kullanılması ile betonların sünekliklerinde ve enerji sönmüleme kapasitelerinde ciddi bir iyileşmenin olduğunu, bu iyileşme oranının en çok hibrit lif katkılı betonlarda görüldüğünü vurgulamışlardır.

Gödek ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada beton boşluklarında ve çatlama davranışlarında iyileşme kaydedilebileceği düşüncesi ile farklı su/çimento oranına sahip üretmiş oldukları numunelerinde metakaolin ve polivinil alkol lif katkılarını beraber kullanmışlardır. Taze beton karışımlarında işlenebilirliği sabit tutmayı hedeflemişler ve bunu numunelerinde süperakışkanlaştırıcı kullanarak sağlamışlardır. Metakaolin ve polivinil alkol lif katkıların beton mukavemetleri ve mekanik özellikleri üzerinde göstereceği etkilerin, kür koşullarından ne derece etkilenip etkilenmediği konusunu da irdelemişleridir. Üretmiş oldukları karışımlarda su/bağlayıcı oranını 0,53 aldıklarında kullanacakları çimento ve metakaolin miktarını ayrı ayrı 372 kg/m³ dozajında, 0,63 aldıklarında 351 kg/m³ dozajında, 0,78 aldıklarında ise 319 kg/m³ dozajında belirlemişlerdir. Tüm beton numunelerine 26 kg/m³ oranında polivinil alkol lif katmışlardır. Hazırlamış oldukları numunelere hava ve su kürü uygulamışlar ayrıca numuneler üzerinde eğilme deneyi, eğilme deneyi sonrası ise çatlayan numunelerden alınan parçalara basınç deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına baktıklarında su/bağlayıcı oranının artması ile betonların eğilme dayanımı üzerindeki lif etkisinin azaldığını görmüşlerdir. Suda kür edilen lif katkılı numunelerin eğilme mukavemetlerinde gördükleri artışın havada kür edilen numunelere göre daha fazla olduğunu vurgulamışlardır. Betonların boşluk hacminin iyileştirilmesi maksadıyla, %6 oranında numunelerine kattıkları 3 mm çaplı plastik parçaların beton çoklu çatlak davranışı üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Özbay (2016), yaptığı çalışmada su/bağlayıcı oranını 0,35 olarak belirlediği ve 500 kg/m³ bağlayıcı dozajı kullandığı beton karışımlarına %1 oranlarında polipropilen, polivinil alkol ve çelik lifleri ayrı ayrı eklemiş, bu numuneler üzerinde basınç, eğilme ve donma-çözülme deneyleri yapmıştır. 1 m³ beton karışımındaki 500 kg bağlayıcı için 300 kg çimento ve 200 kg uçucu kül tercih etmiştir. Deney sonuçlarını irdelediğinde numunelerde kullandığı lif türüne bağlı olarak beton basınç ve eğilme mukavemetlerinde değişimler gözlemlemiştir. Çelik ve polivinil alkol liflerin betonların basınç ve eğilme mukavemetlerini artırdığını fakat polipropilen liflerin bu mukavemetleri azalttığını vurgulamıştır. Polipropilen lifli betonlarda gözlemlediği mukavemet kayıplarının nedenini, bu liflerin betonlarda işlenebilirliği düşürmesi neticesinde yeterli sıkışmanın sağlanamaması sonucuna bağlamıştır. Lif katkısız betonların donma-çözülme etkisi altında ciddi hasarlar gördüğünü, lifli betonların ise maksimum %5 oranında ağırlık kaybına uğradığını tespit etmiştir.

Özen (2016), yapmış olduğu çalışmada çimento esaslı harçlarda farklı su/çimento oranının, değişik türdeki fiber liflerin ve polimer değişkesinin kullanılması neticesinde ortaya çıkacak mekanik ve fiziksel özellik değişimlerini bazı taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri ile incelemiştir. Harç karışımlarında uzunlukları 12 mm ve 3 mm olan iki tür normal cam elyaf lif, boyu 6 mm olan pürüzlü cam elyaf lif, poliamid elyaf lif ve polipropilen elyaf lif katkısı kullanmıştır. Karışımlarına 12 mm uzunluğunda cam elyaf lifin yanında polipropilen elyaf lifi, poliamid elyaf lifi ve 3 mm cam elyaf lifi ayrı ayrı katarak ikili lif kombinasyonu içeren harçlar üretmiştir. Aynı zamanda farklı iki grup harç karışımına sadece 12 mm uzunluğunda cam elyaf ve 6 mm uzunluğunda pürüzlü cam elyaf lifi tekil olarak katmıştır. Harç karışımlarında ayrıca farklı oranlarda akrilik-stiren kopolimer, sabit oranlarda polikarboksilat eter esaslı süper plastikleştirici ve rötre engelleyici kullanmayı tercih etmiştir. Harçların işlenebilirliğini ölçmek için taze beton karışımlarına çökme deneyleri uygulamıştır. Kalıptan çıkardığı harçlara polimer katkıların etkilerini ileri sürerek sadece 2 gün su kürü uygulamış ve numuneleri 60 gün dışarda bekletmiştir. Harç eğilme mukavemetlerine en yüksek katkıyı 6 mm uzunluğundaki pürüzlü cam elyaf liflerin yaptığını görmüş ve nedenini de bu lif türünün harçlarda daha iyi aderans sağlıyor olabileceğine bağlamıştır. Harç içeriğindeki polimer katkı miktarının %20'ye yükselmesi neticesinde, harçların mekanik mukavemetlerinde azalmalar gözlemlenmiş ve harçlarda kullanılacak polimer katkı miktarının bir optimum seviyesi olduğu görüşünü ortaya koymuştur.

Ros ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada $4,5 \text{ kg/m}^3$ dozajında uzunlukları 40 mm ile 54 mm arasında değişen 4 farklı polipropilen lifi ayrıca 39 kg/m^3 dozajında uzunluğu 40 mm olan çelik lifi kullanarak 290 kg/m^3 çimento dozajlı beton numuneleri üretmişler ve bu numunelere 28 gün boyunca kür uygulamışlardır. Beton kırış numunelerini 0,5 mm eğilme çatlak genişliği oluşacak şekilde ön yüklemeye tabi tutmuşlardır ve sonrasında $45 \text{ }^\circ\text{C}$ deniz suyunda, laboratuvar ortamında ve $45 \text{ }^\circ\text{C}$ hava akımında 90 gün boyunca numuneleri sürekli yükler altında bırakmışlardır. Basınç ve eğilme deney sonuçlarına baktıklarında farklı lif şekillerine ve özelliklerine bağlı olarak fiber lifli beton basınç mukavemetlerinin 37,1 MPa ve 42,1 MPa arasında, eğilme mukavemetlerinin 3,26 MPa ve 3,80 MPa arasında ve birbirlerine yakın değerlerde olduğunu görmüşlerdir. Fiber lif takviyeli betonların sünme davranışı üzerinde çevresel faktörlerin ve lif türlerinin etkili olabileceğini ayrıca çatlama fiber donatılı betonların kalıntı kapasitelerinin olduğunu tespit etmişlerdir.

Erol (2017), yaptığı çalışmada F sınıfı uçucu külü, mikro boyutta silis kumu, polivinil alkol lifleri hazırlamış olduğu tasarlanmış çimento bağlayıcılı karışımlarında kullanmıştır. Hazırlamış olduğu karışımlarda su/bağlayıcı oranını 0,27 olarak ayrıca numunelere farklı oranlarda su azaltıcı katkı ve bağlayıcı miktarının %2'si oranında nano mineral katkı eklemiştir. 1 m³ karışım içerisinde tüm numunelerinde sabit olmak üzere 26 kg polivinil alkol lif kullanmayı seçmiştir. Uçucu kül/çimento oranı yönünden numunelerini 3 gruba ayırmış ve ilk grupta bu oranı 0,8 almış, ikinci grupta 1,2 ve üçüncü grupta 2,2 seviyesinde tercih etmiştir. Hidratasyon deneylerinin yanında geçirimsizlik, standart basınç ve eğilme gibi mekanik deneyler uyguladığı numunelerini nem ve sıcaklık oranını sabit tutmaya çalıştığı poşetler içerisinde deney zamanına kadar küre tabi tutmuştur. Deney sonuçlarına baktığında nano minerallerin numune geçirimsizliği üzerinde olumlu etkisinin olduğunu görmüş ve uçucu kül/çimento oranı 2,2 olan numunelerde bu etkinin en fazla olduğunu belirtmiştir. Numunelerin erken yaş basınç mukavemetlerini incelediğinde, farklı uçucu kül/çimento oranına sahip numunelerin nano mineral katkı kullanımı ile artan dayanımlarının değişik miktarlarda olduğundan söz etmiştir. Karışımların, ileri yaş basınç dayanımlarında nano iyileştirme sayesinde %8 ile %10 oranlarında, eğilme dayanımlarında %4 ile %5 oranlarında ve eğilme sehim kapasitesinde %43 civarlarında artış gözlemlendiğini belirtmiştir. Tasarlanmış çimento bağlayıcılı karışımlar için nano silika mineral katkı kullanımı durumunda optimum uçucu kül/çimento oranının 0,8 olduğu ve kalsiyum karbonat mineral katkı kullanımı durumunda ise bu oranın optimum değerinin 1,2 olduğu sonuçlarını ortaya koymuştur.

Fantcho (2017), yapmış olduğu çalışmada farklı oranlardaki uçucu küllerin yol üst yapısı betonlarında mineral katkı olarak kullanılması durumunda ortaya çıkaracağı mekanik ve fiziksel etkileri bazı dayanım ve dayanıklılık deneyleri yaparak irdelemiştir. Hazırlamış olduğu beton karışımlarında su/bağlayıcı oranını 0,5 olarak sabit tutmuştur ve bu numunelerde çimento yerine %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine uçucu kül ikame ettirmiştir. Standart basınç dayanımı ve yarmada çekme deney sonuçlarına baktığında, sadece %20 uçucu kül ikameli betonun 116 gün sonraki basınç ve eğilme mukavemetinin kontrol betonu basınç ve eğilme mukavemetine göre artış gösterdiğini vurgulamıştır. Ayrıca %20 ikameli uçucu kül kullanımı ile betonların durabilitesinde iyileşmelerin ortaya çıktığını tespit etmiş ve yol üst yapısı betonlarında optimum uçucu kül kullanım oranının %20 olabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Fauzan ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışmada atık durumdaki araç lastiklerinin içerisinde bulunan çelik lifleri çıkararak yaklaşık olarak 25,4 mm uzunluğunda kesmişler ve uçucu kül mineral katkılı betonlarda farklı oranlarda kullanmışlardır. Atık lastiklerden çıkan çelik lif katkılarıyla hazırlamış oldukları numuneleri standart basınç, yarmada çekme, kiriş eğilme deneylerine tabi tutmuşlar ve bu betonların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Beton karışımlarına atık lastiklerden çıkardıkları çelik lifleri %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında katmışlardır ve uçucu külleri %15 oranında çimento ile ikame ettirmişlerdir. Deney sonuçlarını incelediklerinde çelik lif katkı kullanım oranına bağlı olarak beton numunelerinin basınç mukavemetlerinde maksimum %6,27, eğilme mukavemetlerinde maksimum %13,36 ve yarmada çekme mukavemetlerinde maksimum %21,93 seviyelerinde artışların olduğunu gözlemlemişlerdir. Standart basınç deneylerine göre kontrol betonun basınç dayanımını 31,90 MPa, %0,5 çelik lif katkılı betonun basınç dayanımını 32,90 MPa ve %1 çelik lif katkılı betonun basınç dayanımını 33,90 MPa bulmuşlardır. Aynı zamanda kontrol betonunun eğilme dayanımının 5,24 MPa, %0,5 çelik lif katkılı betonun eğilme dayanımının 5,72 MPa ve %1 çelik lif katkılı betonun eğilme dayanımının 5,94 MPa olduğu sonucuna ulaşarak atık lastik çelik liflerin kullanım oranındaki artışa bağlı olarak betonlarda eğilme dayanımının artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Atık lastiklerden çıkarılan çelik liflerin daha yüksek oranlarda uçucu kül içerikli betonlarda kullanılması durumunda, betonların mekanik dayanım özellikleri üzerinde daha olumlu sonuçların alınabileceğini de düşünmüşlerdir.

Gülnaz (2017), yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlar için uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tras ve taban külü gibi mineral katkılar kullanmış ve bu betonların yayılma deneyleri ile kendiliğinden yerleşen beton özelliği verip vermediğini tespit etmeye çalışmıştır. Ayrıca, mineral katkılı betonlar için değişen mekanik ve fiziksel özellikleri ultrases geçiş hızı tayini, standart basınç dayanımı tayini ve su emme tayini gibi sertleşmiş beton deneyleri uygulayarak irdelemiştir. Hazırlamış olduğu bazı karışımlarda farklı türlerde ve toplam bağlayıcı ağırlığının %2'si olmak üzere sabit oranda akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar ve %20 sabit oranda çimento yerine ikameli mineral katkılar tercih etmiştir. Deney sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu katkısı hariç diğer mineral katkılarının betonların 28 günlük basınç mukavemetlerine olumsuz etki yaptığını görmüştür. Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullandığı numunelerin tümünde mukavemet artışlarının olduğunu saptamıştır.

Joseph ve John (2017), yaptıkları çalışmada betonların gevrek yapısı itibari ile yükler altında kolayca çatladığını ve bu çatlaklarında betonarmede kullanılan yapı çeliğinin korozyona uğramasına sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. Uçucu kül ve bazı bakterilerin beton karışımlarına katılması neticesinde yük etkisi altında oluşan beton çatlaklarının zamanla iyileşebileceğinden bahsetmişlerdir. Bu düşünceden yola çıkarak Kerala’da bulunan Bacillus Subtilis bakterisi ile uçucu külleri birlikte ve ayrı ayrı olmak üzere betonlarda kullanmışlar, ortaya çıkan etkiyi aynı zamanda bakteri içerikli betonlarda en iyi mukavemet düzeylerini veren uçucu kül oranını tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda beton karışımlarında, 10^5 hücre/ml oranında Bacillus Subtilis bakterisi içeren bir solüsyon tercih etmişler ve mineral katkı olan uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında çimento yerine ikame ettirmişlerdir. Hazırlamış oldukları beton numunelerine işlenebilirlik, basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri uygulamışlardır. 56 günlük numunelerin basınç dayanım deneyleri neticesinde en yüksek mukavemeti %10 uçucu kül ikameli bakteri içerikli betonun verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Uçucu kül ikamesinin betonlarda yarmada çekme ve eğilme dayanımını azalttığını, Bacillus Subtilis bakterisinin ise bu dayanımları artırdığını ve en yüksek yarmada çekme ve eğilme dayanımını katkısız bakteri içerikli beton numunesinin verdiğini görmüşlerdir. Tüm deneyleri değerlendirdiklerinde bakteri içerikli betonlarda en iyi mukavemet düzeylerini veren uçucu kül ikame oranının %10 olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır.

Joshi ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışmada cam elyaf ve polipropilen elyafları ayrı ayrı ve farklı oranlarda olmak üzere %0, %10, %20 ve %30 uçucu kül ikameli betonlarda aynı zamanda bu lifleri hibrit olarak uçucu külsüz betonlarda kullanmışlardır. Hibrit lifli beton numunelerinde %0,6 oranında cam elyaf ve %0,6 oranında polipropilen elyaf katkı kullanmayı tercih etmişlerdir. Hazırlamış oldukları beton numunelerini basınç, yarmada çekme ve eğilme mukavemet deneylerine tabi tutmuşlardır. Basınç deney sonuçlarını incelediklerinde en yüksek mukavemet artışlarını %0,12 cam elyaf katkılı ve %30 uçucu kül ikameli betonlarda %23,28 olarak, %0,3 polipropilen elyaf katkılı ve %30 uçucu kül ikameli betonlarda %18,41 olarak, hibrit lifli betonlarda %24,54 olarak bulmuşlardır. Yine aynı beton numunelerinde sırası ile yarmada çekme dayanımlarında %24,81, %12,14 ve %24,47 seviyelerinde ve eğilme dayanımlarında %41,33, %14,19 ve %29,89 seviyelerinde olmak üzere en yüksek mukavemet artışlarının gözlemlendiği sonucuna ulaşmışlardır.

Karabulut (2017), yaptığı çalışmada hazırlamış olduğu yüksek mukavemetli betonlarda farklı donatı oranları kullanarak, poliamid ve bazalt lif içerikli kiriş numuneleri üretmiştir. Kullandığı lif katkı oranlarını %0,5, %1 ve %1,5 olarak tercih etmiş, çekme donatısı oranlarını 0,013 ve 0,024 seviyesinde belirlemiştir. Ayrıca beton karışımlarına çimento ile beraber mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu ve silis dumanı, kimyasal katkı olarak süperakışkanlaştırıcı eklemiştir. Beton kiriş numunelerinde kullandığı poliamid liflerin uzunluğunun 60 mm ve bazalt liflerin uzunluğunun ise 24 mm olduğunu belirtmiştir. Deneyler sırasında kiriş uç mesnet bölgelerine kesme kırılmalarını önlemek için etriye donatısı yerleştirmiş fakat kiriş orta bölgesinde daha iyi sonuçlar alabilmek için bu etriyeleri kullanmayı tercih etmemiştir. Üretmiş olduğu kiriş betonlarını standart basınç dayanım testine ve kirişleri ise eğilme testine tabi tutmuştur. 28 günlük basınç deney sonuçlarını incelediğinde en düşük mukavemeti 0,013 donatı oranlı ve %1,5 poliamid fiber katkılı kiriş beton numunesinin 85,2 MPa olarak, en yüksek mukavemeti ise 0,013 donatı oranlı ve %1 bazalt lif katkılı kiriş beton numunesinin 115,3 MPa olarak verdiğini gözlemlemiştir. Kiriş eğilme deneyleri neticesinde lif katkı kullanım oranındaki artışa bağlı olarak kiriş sünekliğinde belirgin değişimler gözleyememiştir. 0,013 donatı oranına sahip kirişlerin yük taşıma kapasitelerini değerlendirdiğinde, poliamid lif katkıların bazalt liflere oranla daha fazla katkı sağladığını vurgulamıştır. Bazalt ve poliamid lifli kiriş numunelerinin eğilme etkisi altında oluşturdukları çatlak sayısı ve genişliklerine baktığında lif katkıların olumlu sonuçlar ortaya çıkardığını yorumlamıştır.

Khiavi (2017), yapmış olduğu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu çimento yerine ikame ettirerek oluşturduğu 0,27 ile 0,35 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde %2 oranında ayrı ayrı olmak üzere naylon lif ve polivinil alkol lif kullanmıştır. Lif katkılı olarak üretmiş olduğu çimento bağlayıcılı numunelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini basınç, eğilme ve donma-çözülme gibi deneylerle incelemiştir. Basınç deney sonuçlarını incelediğinde lif katkıların kompozit mukavemetlerinde belirgin olmasa da artışlara yol açtığını gözlemlemiştir. Naylon lifler ile polivinil alkol liflerin, kompozitlerin donma-çözülme etkisi altındaki dayanıklılığını yüksek derecede artırdığını vurgulamıştır. Polivinil alkol lif içerikli kompozitlerin genel anlamda naylon lifli kompozitlere göre daha iyi performans verdiği, naylon liflerinde düşük maliyetli olması ve kompozitlere kattığı dayanım ve dayanıklılık avantajları nedeniyle tekil katkı olarak kullanılabileceği sonucunu ortaya koymuştur.

Korkut ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışmada kendiliğinden yerleşebilen betonlarda uzunlukları 30 mm ve 60 mm olan çelik lifleri ayrıca uzunlukları 12 mm ve 54 mm olan sentetik lifleri %0,25, %0,50 ve %0,75 hacim oranlarında katkı olarak kullanmışlardır. Beton karışımlarının tümünde sabit olmak üzere 100 kg/m^3 uçucu kül ve 30 kg/m^3 silis dumanı kullanmışlar ve su/bağlayıcı miktarını 0,4 olarak sabit tutmuşlardır. Numunelerinde süper akışkanlaştırıcı miktarını ise %1,6 olarak belirlemişlerdir. Lif katkılı numuneler üzerinde yayılma deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri yapmışlardır. Taze beton deneyleri neticesinde lif katkıların kendiliğinden yerleşen betonların yayılma ve yerleşme değerlerinde ciddi ölçüde düşümlere sebebiyet verdiğini görmüşlerdir. Taze beton özelliklerini incelediklerinde sentetik liflerin su emme oranının çelik liflere nazaran daha fazla olması nedeni ile sentetik lif katkılı numunelerin kendiliğinden yerleşen beton özelliğini büyük ölçüde kaybettiğini belirtmişlerdir. Beton basınç deneyleri neticesinde çelik liflerin sentetik liflere göre daha fazla mukavemet artışı sağladığını, en fazla mukavemet artışının ise 60 mm uzunluğunda ve kullanım oranı %0,75 olan çelik lif katkılı numunelerde görüldüğünü vurgulamışlardır. Yarmada çekme ve eğilme deneyleri sonunda lif katkılı numune mukavemetlerinde %63,8'e varan ciddi artışların olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Tulga (2017), yaptığı çalışmada 4 farklı sınıfta ve ayrıca kendiliğinden yerleşen betonlarda Çanakkale Biga Bekirli Termik Santrali'nden temin ettiği uçucu külleri %20 oranında çimento yerine ikame ettirmiştir. Tüm beton karışımlarında kullandığı bağlayıcı miktarının %1'i oranında beton sınıf ve türüne bağlı olarak orta akışkanlaştırıcı, süper akışkanlaştırıcı ve polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanmıştır. Karışım dizaynlarını C20/25, C25/30, C30/37 ve C35/45 beton sınıflarına göre belirlemiştir. Hazırlamış olduğu numuneler üzerinde standart basınç mukavemeti ve yarmada çekme mukavemeti deneyleri ayrıca durabilite gözlemi için donma-çözülme deneyi uygulamıştır. Uçucu küllerin, kendiliğinden yerleşen betonların yayılma özelliği üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Basınç deneyleri sonucuna göre C20/25 beton sınıfı için 28 günlük basınç mukavemeti haricinde diğer 3, 7 ve 56 günlük dayanımlarda artışların görüldüğünü tespit etmiştir. C25/30 beton sınıfı için en yüksek mukavemet değerinin 56 günlük numunede yakalandığını belirtmiştir. Diğer beton sınıfları için uçucu kül kullanımının ileri yaş mukavemetlerini artırdığını vurgulamıştır. Tüm beton numunelerinin yarmada çekme mukavemetlerine ve donma-çözülme direncine uçucu küllerin olumlu katkıları sağladığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Türk ve Kına (2017), yaptıkları çalışmada inşaat sektöründe gelişen teknolojiler sayesinde lifli beton üretiminin ve kullanımının öneminden bahsetmişlerdir. Lif katkıların betonlarda esneklik ve daha yüksek enerji yutma kapasitesi sağlamak amacıyla kullanıldıklarını vurgulamışlardır. Deprem gibi binalar üzerinde ileri düzey deplasman oluşturan olaylar karşısında bina performansının lif katkılarla iyileştirilebileceğini belirtmişler ve bu konuda yapılan çalışmalarını yorumlamışlardır. Lif katkılı kompozitler kullanılarak üretilen binaların daha fazla dayanıklılık sergileyebileceğini, bu binaları oluşturan taşıyıcı eleman kesitlerinin küçültülebileceğini ve kullanılan donatı miktarında da azaltmaya gidilebileceğini söylemişlerdir. Lif türlerinin, tekil ve hibrit lif kullanım tipinin, makro ve mikro lif katkıların kullanımının çimento esaslı kompozitler üzerinde ortaya çıkardığı etkileri daha önce yapılan araştırmalar ışığında incelemişlerdir. Karma lif katkılı çimento esaslı kompozitlerin yüksek süneklik ve çekme dayanımına sahip olduğunu, çatlak oluşumu bakımından pozitif özelliklerini göz önünde bulundurarak bu tip elemanların inşaat sektöründe daha yaygın olarak kullanılmasının öneminden söz etmişlerdir. Tekil lif katkıların çimento esaslı kompozitlerde sadece sınırlı özelliklere etki edebileceğini fakat karma liflerin farklı kombinasyonlarla kompozitlerin birçok özelliğini iyileştirebileceğini düşünmüşlerdir.

Yoo ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışmada yüksek oranda uçucu kül ikameli betonlarla üretmiş oldukları kolonların taşıma kapasitelerini deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Üretmiş oldukları kolonlarda ayrı ayrı olmak üzere 100 mm, 150 mm ve 250 mm aralıklı etriyeler ve 2,25 oranında sabit olmak üzere boyuna donatı kullanmışlardır. Uçucu kül ikame oranlarını %0 ve %55 olarak seçmişlerdir. Uçucu kül ikamesiz karışımlarda su/bağlayıcı oranını 0,50 ve süperakışkanlaştırıcı oranını çimento ağırlığının %0,05'i olarak, uçucu kül ikameli karışımlarda ise su/bağlayıcı oranını 0,35 ve süperakışkanlaştırıcı oranını yine çimento ağırlığının %1,5'i olarak belirlemişlerdir. Kolon üretimleri için hazırladıkları betonlara ayrıca standart basınç dayanım testi uygulamışlardır. Uçucu kül ikameli beton numunelerin basınç mukavemetini 30,0 MPa, birim hacim ağırlıklarını 2,102 kg/m³, uçucu külsüz beton numunelerin basınç mukavemetini 30,6 MPa, birim hacim ağırlıklarını ise 2,304 kg/m³ olarak bulmuşlardır. Bu değerler ışığında uçucu kül ikameli betonların elastisite modülünün katkısız betona göre düşük çıktığını hesaplamışlardır. Kolon taşıma gücü deneyleri sonunda 100 mm ve 150 mm etriye aralıklı ve uçucu kül ikameli betonarme kolonların kırılma yükü noktasında eksenel yer değiştirme kapasitelerinin arttığını görmüşlerdir.

Günaydın ve Güçlüer (2018), yaptıkları çalışmada uzunlukları 24 mm olan bazalt lifleri 371 kg/m^3 çimento dozajlı beton numunelerinde kullanmışlar ve bu liflerin betonlar üzerinde gösterdiği etkileri incelemişlerdir. Hazırlamış oldukları numunelerde çimento miktarının hacimce %1'i oranında bazalt lif katkısı tercih etmişlerdir. 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda beton numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı, standart basınç mukavemeti ve yarmada çekme dayanımı deneyleri uygulamışlardır. Ultrases geçiş hızı deneyi sonunda elde ettikleri veriler yardımıyla basınç dayanım hesaplamaları yapmışlardır. Bu hesaplamalar neticesinde 7 günlük dayanım kolerasyonunun sadece 0,50 olduğunu görmüşlerdir ve bunun sebebinin bazalt lifli betonda erken yaşta istenilen seviyede hidrasyonun gerçekleşmemesine bağlamışlardır. Basınç mukavemeti ve yarmada çekme dayanım deneyleri neticesinde bazalt liflerin 7 günlük beton numunelerinde sırası ile yaklaşık olarak %4,5 ve %5 değerlerinde artışlara neden olduğunu saptamışlardır. Bu değer artışlarının 28 günlük beton numuneleri için yine sırası ile yaklaşık olarak %2,1 ve %16,5 olduğunu tespit etmişlerdir. Bazalt lif katkılı betonların eğilme etkisi altında olan yapı elemanlarında kullanılabileceği ve bu betonların ayrıca dayanıklılık açısından da değerlendirilmesi gerektiği önerisinde bulunmuşlardır.

Prabhu ve Rooby (2018), yapmış oldukları çalışmada su/bağlayıcı oranını 0,49 olarak sabit aldıkları 331 kg/m^3 çimento dozajlı beton karışımlarında uçucu külleri çimento yerine %40 oranında ikame ettirmişler ve ayrıca bu betonlarda hacimce %2 oranında çelik lifler kullanmışlardır. Uçucu kül ikameli ve ikamesiz aynı zamanda çelik lif katkılı ve katkısız üretmiş oldukları betonları kullanarak donatılı kiriş numuneler hazırlamışlardır. Beton numuneler üzerinde basınç dayanım testi ve kiriş numuneler üzerinde eğilme dayanım testi uygulamışlar ve ayrıca kirişlerin süneklikleri hakkında çıkarımlarda bulunmuşlardır. 28 günlük beton basınç mukavemetlerini incelediklerinde en yüksek dayanımları çelik lif takviyeli betonların verdiğini görmüşlerdir. Çelik lif katkısının 28 günlük betonun basınç mukavemetini yaklaşık olarak %38, 56 günlük betonun basınç mukavemetini ise yaklaşık olarak %33 artırdığını tespit etmişlerdir. 56 günlük uçucu kül ikameli ve çelik lif içerikli kiriş numunesinin eğilme dayanımının 28 günlük mineral katkısız ve lifsiz kiriş numunesinin eğilme dayanımına göre %64,7 oranında artmış olduğunu görmüşler, en yüksek süneklik değerini uçucu kül ikameli ve çelik lif takviyeli kirişin verdiğini vurgulamışlardır. Uçucu kül ikameli betonlarda çelik lif kullanımı ile ciddi dayanım ve süneklik artışları yaşandığı sonucuna ulaşmışlardır.

3. MATERYAL

Ülkemizde ve dünyada geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan betonun geliştirilmesi ve boşluk yapısının azaltılması düşüncesi yıllardır tartışılmaktadır. Bu düşünce çerçevesinde betonun mikro boşluklarını doldurmak için mikro yapıda farklı malzemeler betonda kullanılmıştır. Ayrıca, betonun çekme dayanımını iyileştirmek ve daha sünek bir yapı malzemesi oluşturmak için değişik malzemelerden üretilen lifler betonlarda denenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında mikro yapılu uçucu küller ile makro ve mikro liflerin ayrı ayrı ve birlikte kullanılması neticesinde betonun bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi amaç edinilmiştir. Uçucu kül katkılı betonlarda kullanılacak olan liflerin betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde ne tür değişimler ortaya çıkaracağı merak konusudur. Ayrıca, uçucu kül ve lif katkılı betonların dayanıklılık özellikleri çalışma kapsamında irdelenmiştir.

Bu bölümde, deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan materyaller hakkında bilgiler sunulmuş ayrıca agregalar üzerinde yapılan deneyler ve sonuçları aktarılmıştır.

3.1. Beton Karışımlarında Kullanılan Agregalar ve Özellikleri

Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen beton numunelerinde kullanılan agrega olarak Sivas İli, Ulaş İlçesi civarında bulunan Tecer Dağı mevkiinde üretilen kırmataş ve kırma kum tercih edilmiştir. Agregalar Sivas Özbelsan A.Ş. Hazır Beton Tesisleri'nden temin edilmiştir.

Sivas Tecer Dağı mevkiinde bulunan ve tümüyle karbonat kökenli kayalardan oluşan formasyona Tecer Kireçtaşı Formasyonu adı verilmiştir. Tecer Kireçtaşı Formasyonu'nun gri-siyahımsı renkli, orta-kalın tabakalı, eklemli ve erime boşluklu olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda bu formasyonun geniş bir yayılım gösterdiğine, mikritik dokulu olduğuna, ayrıca bünyesinde kısım kısım alg ve fosil kavkıları barındırdığına değinilmiştir. Paleontolojik incelemeler neticesinde Tecer Kireçtaşı Formasyonu'nun jeolojik yaşının Üst Maastrichtiyen-Paleosen olduğu söylenmiştir (İnan ve İnan, 1987).

Sivas Özbelsan A.Ş. Hazır Beton Tesisleri'nden temin edilen kırmataş ve kırma kum agregaların kireçtaşı olduğu ve Tecer Formasyonu ile aynı özellikleri taşıdığı söylenebilir.

Beton karışımlarında kullanılmak üzere temin edilen agregaların boyut sınıfları Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Agregata fraksiyon sınıfları kırıcı çene açıklıklarına göre isimlendirilmiş olup granülometri eğrisi için süreksizlik söz konusu değildir.

Çizelge 3.1. Agregaların boyut sınıfları

Temin Edilen Yer	Agrega Cinsi	Kırma Kum	Kırma Taş	Kırma Taş
Özbelsan Hazır Beton Tesisleri	Kireçtaşı	0 – 5 mm	7 – 13 mm	13 – 22 mm

Temin edilen agregaların Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Laboratuvarlarına taşınmadan önceki görüntüsü Şekil 3.1.'de ve çuvallara alınıp istiflendikten sonraki görüntüsü Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Agregaların laboratuvarlara alınmadan önceki görüntüsü



Şekil 3.2. Agregaların laboratuvarda istiflenmiş görüntüsü

Beton karışımları için temin edilen agregalara elek analizi deneyi, yassılık deneyi, parçalanma (Los Angeles) deneyi, magnezyum sülfat dayanım deneyi, metilen mavisi deneyi ve tane yoğunluğu tespiti ile su emme deneyleri yapılmıştır. Deney neticelerine göre agregaların beton agregası olarak kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır.

3.1.1. Tane büyüklüğü dağılımı tayini

Elek analizi için TS EN 933-2 (1996) standartlarında belirtilen kare gözlü elekler kullanılmıştır. Eleme işlemi TS EN 933-1'de (2012) belirtilen şartlar dahilinde ve süresinde el ile kuru eleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

13-22 mm tane çapı fraksiyonu için yapılan elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. 13-22 mm tane çapı fraksiyonu için elek analizi sonuçları

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üstü Fraksiyon Kütlesi (R_i) (gr)	Kümülatif Ağırlık (gr) ($M_i = \sum R_i$)	Elek Üstünde Kalan Kısımın Yüzdesi (%) ($(R_i/M_i) \times 100$)	Elek Üstü (Kalan) Kümülatif Yüzde (%) ($(R_i/M_i) \times 100$)	Elek Altı (Geçen) Kümülatif Yüzde (%) ($100 - (R_i/M_i) \times 100$)
22,4	720	720	7,5	7,5	93
16,0	5398	6118	56,4	63,9	36
11,2	3153	9271	32,9	96,8	3
8,0	304	9575	3,2	100	0

7-13 mm tane çapı fraksiyonu için yapılan elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. 7-13 mm tane çapı fraksiyonu için elek analizi sonuçları

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üstü Fraksiyon Kütlesi (R_i) (gr)	Kümülatif Ağırlık (gr) ($M_i = \sum R_i$)	Elek Üstünde Kalan Kısımın Yüzdesi (%) ($(R_i/M_i) \times 100$)	Elek Üstü (Kalan) Kümülatif Yüzde (%) ($(R_i/M_i) \times 100$)	Elek Altı (Geçen) Kümülatif Yüzde (%) ($100 - (R_i/M_i) \times 100$)
11,2	169	169	1,7	1,7	98
8,0	3272	3441	33,2	34,9	65
4,0	5819	9260	59,0	93,9	6
2,0	489	9749	5,0	98,9	1
1,0	111	9860	1,1	100	0

0-5 mm tane çapı fraksiyonunun eleme işlemi TS EN 933-1'de (2012) belirtilen şartlar dahilinde ve süresinde mekanik eleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. 0-5 mm tane çapı fraksiyonu için yapılan elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. 0-5 mm tane çapı fraksiyonu için elek analizi sonuçları

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üstü Fraksiyon Kütlesi (R_i) (gr)	Kümülatif Ağırlık (gr) ($M_i=\sum R_i$)	Elek Üstünde Kalan Kısımın Yüzdesi (%) ($(R_i/M_i)\times 100$)	Elek Üstü (Kalan) Kümülatif Yüzde (%) ($(R_i/M_i)\times 100$)	Elek Altı (Geçen) Kümülatif Yüzde (%) $100-(R_i/M_i)\times 100$
4,0	38,6	38,6	3,9	3,9	96
2,0	299,45	338,05	29,9	33,8	66
1,0	246,36	584,41	24,6	58,4	42
0,5	140,85	725,26	14,1	72,5	27
0,25	85,03	810,29	8,5	81,0	19
0,150	51,34	861,63	5,1	86,1	14
0,063	30,56	892,19	3,1	89,2	11
Tava	107,81	1000	10,8	100	0

3.1.2. Yassılık endeksi tayini

13-22 mm tane çapı ve 7-13 mm tane çapı fraksiyonlarına sahip agregalara yassılık endeksi tayini deneyi TS EN 933-3'te (2012) belirtilen şartlar dahilinde el ile kuru eleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

13-22 mm tane çapı fraksiyonu için yapılan yassılık endeksi (FI) tayini deney sonuçları Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. 13-22 mm tane çapı fraksiyonu için yassılık endeksi tayini sonuçları

Tane Büyüklüğü Fraksiyonu (d_i/D_i) (mm)	(d_i/D_i) Tane Büyüklüğü Fraksiyonu Kütlesi (R_i) (gr)	Çubuklu Eleklerin Anma Açıklığı ($D_i/2$) (mm)	Çubuklu Elekten Geçen Malzeme Kütlesi (m_i) (gr)	Yassılık Endeksi ($FI_i=m_i/R_i\times 100$) (%)
20/25	1810	12,5	109	6
16/20	3231	10	131	4
12,5/16	1150	8	58	5
10/12,5	6	6,3	0	0
$M_1=\sum R_i$ (gr)		$M_2=\sum m_i$ (gr)		Toplam Yassılık Endeksi ($FI=(M_2/M_1)\times 100$) (%)
6197		298		5

7-13 mm tane çapı fraksiyonu için yapılan yassılık endeksi tayini deney sonuçları ise Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. 7-13 mm tane çapı fraksiyonu için yassılık endeksi tayini sonuçları

Tane Büyüklüğü Fraksiyonu (d_i/D_i) (mm)	(d_i/D_i) Tane Büyüklüğü Fraksiyonu Kütlesi (R_i) (gr)	Çubuklu Elekların Anma Açıklığı ($D_i/2$) (mm)	Çubuklu Elekten Geçen Malzeme Kütlesi (m_i) (gr)	Yassılık Endeksi ($FI_i=m_i/R_i \times 100$) (%)
12,5/16	27	8	2	7
10/12,5	572	6,3	49	9
8/10	933	5	98	11
6,3/8	1104	4	101	9
5/6,3	741	3,15	67	9
4/5	169	2,5	12	7
$M_1=\sum R_i$ (gr)		$M_2=\sum m_i$ (gr)		Toplam Yassılık Endeksi ($FI=(M_2/M_1) \times 100$) (%)
3546		329		9

Farklı iki agrega fraksiyonu için bulunan değerler, Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen $FI \leq \%20$ (FI_{20}) beton agregası yassılık endeksi limitine uymaktadır.

3.1.3. Parçalanma direnci tayini

Beton agregası için yapılan parçalanma direnci tayini deneyi TS EN 1097-2'de (2010) belirtilen şartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.7.'de agrega parçalanma direnci tayini deney sonuçları verilmiştir ve bu değerler kullanılarak Los Angeles katsayısı (LA) hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7. Los Angeles deneyi sonuçları

Deney Numunesinin İlk Kütlesi (M_1) (gr)	1,6 mm Kare Göz Açıklıklı Elek Üzeri Kalan (m_i) (gr)	Los Angeles Katsayısı (%) $LA=(M_1-m_i)/50$
5000	3819	24

Elde edilen LA değeri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen $LA \leq \%35$ (LA_{35}) parçalanma direnci limitine uymaktadır.

3.1.4. Magnezyum sülfat dayanım tayini

Magnezyum sülfat dayanım tayini deneyi, 10 mm ile 14 mm kare göz açıklıklı elekler arasında kalan agregalar üzerinde TS EN 1367-2 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Deney sonunda elde edilen veriler ve agregalara ait magnezyum sülfat değerleri (MS) Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Magnezyum sülfat dayanım deneyi sonuçları

Numune No	Deney Numunesinin İlk Kütlesi (M_1) (gr)	Deney Sonrası 10 mm Kare Göz Açıklıklı Elek Üzeri Kalan Agregata Kütlesi (M_2) (gr)	Magnezyum Sülfat Değeri (%) ($MS=(M_1-M_2)/M_1 \times 100$)
40 - 1. Sepet	428,90	405,12	5,54
40 - 2. Sepet	424,68	398,54	6,16
Nihai Ortalama Magnezyum Sülfat Değeri (%)			6

Elde edilen ortalama MS kütlece kayıp değeri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen $MS \leq \%18$ (MS_{18}) kütlece kayıp limitine uymaktadır.

3.1.5. İnce tanelerin tayini

Deneyin amacı 0-2 mm tane çap aralığındaki agreganın içerisindeki kil miktarını metilen mavisi değeri cinsinden belirlemektir. Metilen mavisi deneyi olarak ta anılan bu deney TS EN 933-9 (2014) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Deney numunesinin su içeriği için yapılan deney sonuçları Çizelge 3.9.'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Deney numunesi su içeriği tayini sonuçları

Deney Numunesi Ağırlığı (M_1) (gr)	Kurutulmuş Deney Numunesi Ağırlığı (M') (gr)	Deney Numunesinin Su İçeriği (%) ($W=100 \times (M_1 - M') / M'$)
205,12	203,94	0,58

Bulunan su içeriği verisi kullanılarak Çizelge 3.10.'da sonuçları verilen, en az 200 gram kuru numune içerecek kurutulmamış deney numunesi kütlesi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.10. Minimum kurutulmamış deney numune kütlesi

Minimum Kurutulmuş Deney Numunesi Ağırlığı (gr)	Deney Numunesi Su İçeriği (W) (%)	Metilen Mavisi Deneyi İçin Minimum Deney Numunesi Ağırlığı (200x(1+W/100)) (gr)
200	0,58	201,16

İnce tanelerin tayini deneyi sonunda elde edilen veriler ışığında 0-2 mm tane çapı aralığına sahip agreganın metilen mavisi değeri (MB) hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Metilen mavisi deneyi sonuçları

Deney Numunesi Ağırlığı (M ₀) (gr)	Deney Numunesinin Kuru Ağırlığı (M ₁ =M ₀ /(1+W/100)) (gr)	İlave Edilen Boya Çözeltisinin Toplam Hacmi (V ₁) (ml)	Metilen Mavisi Değeri (gr) (MB=(V ₁ /M ₁)x10)
202,13	200,96	15	0,75

Elde edilen veriler ile hesaplanan MB değeri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen kireçtaşı kökenli kayalarda veya dere malzemelerinde MB≤1,5 limitine uymaktadır.

3.1.6. Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini

13-22 mm ve 7-13 mm tane çapı fraksiyonlarının yoğunlukları ve su emme oranları, TS EN 1097-6 (2013) standardına uygun biçimde tel sepet yöntemi kullanılarak bulunmuştur. 13-22 mm tane çapı fraksiyonuna ait yoğunluk ve su emme deneyleri neticesinde elde edilen veriler ve hesaplamalar Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. 13-22 mm tane çapı fraksiyonuna ait yoğunluk ve su emme deneyi sonuçları

Agrega Tane Çapı Fraksiyonu (mm)	13-22
Doygun ve Havada Yüzeysel Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M ₁) (gr)	5000
Doygun Agreganın Su İçerisindeki Kütlesi (M ₂) (gr)	3152,3
Etüvde Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M ₃) (gr)	4974,7
Görünür Tane Yoğunluğu (p _a =M ₃ /(M ₃ -M ₂)) (mg/m ³)	2,73
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu (p _{rd} =M ₃ /(M ₁ -M ₂)) (mg/m ³)	2,69
Doygun ve Yüzeysel Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu (p _{ssd} =M ₁ /(M ₁ -M ₂)) (mg/m ³)	2,71
Su Emme Oranı (WA ₂₄ =(M ₁ -M ₃)/M ₃ x100) (%)	0,51
Kontrol (p _{ssd} =1+p _{rd} -(p _{rd} /p _a)) (mg/m ³)	2,71

7-13 mm tane çapı aralığına sahip agrega fraksiyonuna ait yoğunluk ve su emme deneyi neticesinde elde edilen veriler ve hesaplamalar ise Çizelge 3.13.'te aktarılmıştır.

Çizelge 3.13. 7-13 mm tane çapı fraksiyonuna ait yoğunluk ve su emme deneyi sonuçları

Agrega Tane Çapı Fraksiyonu (mm)	7-13
Doygun ve Havada Yüzeysel Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M_1) (gr)	5000
Doygun Agreganın Su İçerisindeki Kütlesi (M_2) (gr)	3149,9
Etüvde Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M_3) (gr)	4968,1
Görünür Tane Yoğunluğu ($p_a=M_3/(M_3-M_2)$) (mg/m^3)	2,73
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu ($p_{rd}=M_3/(M_1-M_2)$) (mg/m^3)	2,69
Doygun ve Yüzeysel Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu ($p_{ssd}=M_1/(M_1-M_2)$) (mg/m^3)	2,70
Su Emme Oranı ($WA_{24}=(M_1-M_3)/M_3 \times 100$) (%)	0,64
Kontrol ($p_{ssd}=1+p_{rd}-(p_{rd}/p_a)$) (mg/m^3)	2,70

0-5 mm tane çapı fraksiyonuna ait agregalar için yoğunluk ve su emme tayini deneyi, TS EN 1097-6 (2013) standardına uygun olarak ve piknometre yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 0-5 mm tane çapı aralığına sahip agrega fraksiyonuna ait piknometre ile yoğunluk ve su emme deneyi sonunda elde edilen veriler ve hesaplama sonuçları Çizelge 3.14.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.14. 0-5 mm tane çapı fraksiyonuna ait yoğunluk ve su emme deneyi sonuçları

Agrega Tane Çapı Fraksiyonu (mm)	0-5
Doygun ve Havada Yüzeysel Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M_1) (gr)	500
Doygun Agreganın Numunesi ve Su İçeren Piknometrenin Kütlesi (M_2) (gr)	1614,68
Sadece Su İle Doldurulmuş Piknometrenin Kütlesi (M_3) (gr)	1300,04
Etüvde Kurutulmuş Agreganın Kütlesi (M_4) (gr)	496,16
Görünür Tane Yoğunluğu ($p_a=M_4/(M_4-(M_2-M_3))$) (mg/m^3)	2,73
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu ($p_{rd}=M_4/(M_1-(M_2-M_3))$) (mg/m^3)	2,68
Doygun ve Yüzeysel Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu ($p_{ssd}=M_1/(M_1-(M_2-M_3))$) (mg/m^3)	2,70
Su Emme Oranı ($WA_{24}=(M_1-M_4)/M_4 \times 100$) (%)	0,77
Kontrol ($p_{ssd}=1+p_{rd}-(p_{rd}/p_a)$) (mg/m^3)	2,70

Tüm agrega fraksiyonları için elde edilen WA_{24} su emme yüzdeleri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen $WA_{24} \leq 3,0$ limitine uymaktadır.

Tüm agrega fraksiyonları için bulunan p_{ssd} yoğunluk değerleri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen $p_{ssd} (gr/cm^3) \geq 2,55$ şartını sağlamaktadır.

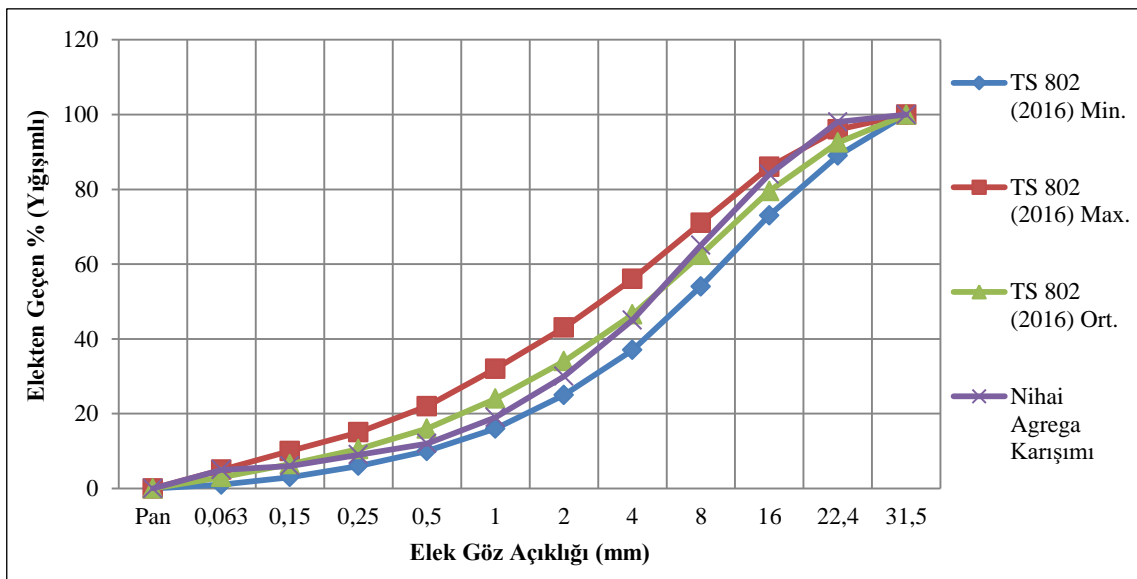
3.1.7. Agrega granülometrisi tayini

Tez çalışması kapsamında, 3 farklı agrega fraksiyonunun C30/37 sınıfı beton karışımındaki kullanım yüzdeleri ve bu yüzdeler ışığında oluşturulan granülometri eğrisi verileri Çizelge 3.15.'te verilmiştir.

Çizelge 3.15. Agrega fraksiyonlarına ait kullanım yüzdeleri ve granülometri eğrisi verileri

Elek Çapı (mm)	13-22 mm Agrega Fraksiyonu	7-13 mm Agrega Fraksiyonu	0-5 mm Agrega Fraksiyonu	Nihai Agrega Karışımı
	Kullanım Oranı % 25	Kullanım Oranı % 30	Kullanım Oranı % 45	
Elekten Geçen Agrega Oranı (%)				
31,5	100	100	100	100
22,4	93	100	100	98
16,0	36	100	100	84
11,2	3	98	100	75
8,0	0	65	100	65
4,0	0	6	96	45
2,0	0	1	66	30
1,0	0	0	42	19
0,5	0	0	27	12
0,25	0	0	19	9
0,150	0	0	14	6
0,063	0	0	11	5

Nihai agrega karışımının elekten geçen yüzde değerleri kullanılarak çizilen granülometri eğrisi ve TS 802 (2016) standardında $D_{max}=22,4$ mm için önerilen granülometri eğrileri Şekil 3.3.'te aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Agrega granülometrisi ve TS 802 (2016) standardında $D_{max}=22,4$ mm için granülometrilere

Elde edilen granülometri verilerine göre nihai olarak 0,063 mm elekten geçen agrega oranının %5 olduğu ve bu oranın Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen 0,063 mm Elekten Geçen Çok İnce Malzeme Muhtevası \leq %5 şartına uyduğu görülmektedir.

3.2. Beton Numunelerinde Kullanılan Çimento Türü ve Özellikleri

Çimentolar beton üretimlerinde kullanılan, su ile hidrasyonu sonucu bağlayıcı özellik gösteren ve ana maddesi klinker olan ince öğütülmüş yapıdaki malzemelerdir. TS EN 197-1'de (2012) genel çimentoların bileşimleri, bu çimentoların özellikleri ve uygunluk kriterleri standart olarak belirlenmiştir.

TS EN 197-1'de (2012) standartları belirtilen CEM çimentosu, agregalarla birlikte belirli oranda su ilave edilerek oluşturulan karışımlarda belirli bir işlenebilirlik süresi sunar. Bu karışım ilerleyen aşamalarda sertleşir, kademeli olarak dayanım kazanır ve bu dayanımını sabit hacim altında korur. Çimentonun hidrasyonu, içeriğindeki kalsiyum silikatların sayesinde gerçekleşir. CEM-I 42,5 R çimentosunun ana birleşimi %95-100 oranında portland çimentosu klinkeridir. İçeriğinde yüksek fırın cürufu, silis dumanı, doğal puzolan, uçucu kül, pişmiş şist ve kalker ihtiva etmez. %0-5 oranında minör bileşenler bulundurabilir. 42,5 dayanım sınıfında ve yüksek erken dayanımlı bir çimentodur (TS EN 197-1, 2012).

Deneysel çalışmalar için beton karışım dizaynlarında kullanılan çimento türü, CEM-I 42,5 R olarak seçilmiştir. Bunun nedeni TS EN 197-1 (2012) standardında belirtildiği üzere içerisinde mineral katkıların bulunmamasıdır. Çalışma kapsamında Kangal Termik Santrali'nden temin edilen uçucu küller beton karışımlarında çimento yerine belirli oranlarda ikame ettirilmiştir. Uçucu külün beton numunelerinde ortaya çıkaracağı mekanik ve fiziksel etkileri daha net bir şekilde ortaya koymak adına mineral katkısız çimento yani CEM-I 42,5 R tercih sebebi olmuştur. Bu çimento türü, içerisinde doğal mineral katkı bulundurmadığından ayrıca yüksek hidrasyon ısısına sahiptir ve soğuk havalarda uygulanacak beton imalatlarına imkan sağlayabileceği düşünülmektedir. Çizelge 3.16.'da CEM-I 42,5 R sınıfına ait çimentonun bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.16. CEM-I 42,5 R çimentonun bazı özellikleri (TS EN 197-1, 2012)

Çimento Sınıfı	Klinker Oranı (%)	Minör İlave Bileşen	2 Günlük Erken Dayanım	28 Günlük Standart Dayanım	28 Günlük Standart Dayanım	Priz Başlama Süresi	Genleşme
CEM-I 42,5 R	95 – 100	0 – 5	≥ 20 MPa	$\geq 42,5$ MPa	$\leq 62,5$ MPa	≥ 60 Dakika	≤ 10 mm

Beton karışımlarında kullanılan CEM-I 42,5 R çimentosu Sivas Votorantim Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Deneysel çalışmalar için temin edilen çimento Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan CEM-I 42,5 R çimentosu

3.3. Beton Karışım Suyu ve Özellikleri

Beton karışımı için kullanılan su çimentonun hidrasyonu ve betonun işlenebilirliği düşünüldüğünde önemli bir parametredir. Beton karışımlarında kullanılan suyun kimyasal içeriği çimentonun hidrasyonuna engel teşkil etmeyecek şekilde olmalıdır. Bilindiği üzere organik malzemeler çimentonun hidrasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle karışım suyu içerisinde şeker, yağ ve diğer organik maddelerin bulunmaması ayrıca sülfat ve klorür gibi zararlı etmenlerinde belirli bir seviyede olması gerekir.

İçilebilen sular olarak tabir edilen sular beton karma suyu olarak uygun kabul edilirler ve bu suları kimyasal deneye tabi tutmaya gerek duyulmamaktadır. Bu nedenle içme suyu şebekelerinden temin edilen sularında beton karma suyu olarak kullanılması uygun görülmektedir. (TS EN 1008, 2003)

Deneysel çalışmalarda kullanılan beton karışım suyu içme suyu şebekelerinden temin edilmiştir ve bu nedenle herhangi bir deneye tabi tutulmamıştır.

Betonda karışım suyu olarak kullanılan suyun bir kısmı çimentonun hidratasyonu için, hidratasyon fazlası su miktarı ise beton karışımında işlenebilirliğin sağlanabilmesi için gereklidir.

Beton karışımlarında hidratasyon için gerekli olan suyun fazlası, daha sonra betonun bünyesinden buharlaşarak uzaklaşmakta ve betonun bünyesinde boşluk oluşmasına sebebiyet vermektedir. Daha boşluksuz bir betonun üretilebilmesi hedeflendiğinde, akışkanlaştırıcı katkıları sayesinde hidratasyon için gerekli olan su miktarından daha fazlasının beton karışımlarında kullanılması mümkün mertebe azaltılabilir.

3.4. Yüksek Performanslı Süper Akışkanlaştırıcı ve Özellikleri

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları betonun işlenebilirliği için büyük önem taşımaktadır. Beton karışımları için kullanılan hidratasyon fazlası suyun azaltılmasında rol oynarlar. Beton dizayn aşamasında istenilen slump değerlerinin, TS 802'de (2016) verilen beton karışım su miktarından daha az değerler ile yakalanmasını sağlarlar. Bu nedenle karışım içerisindeki su/bağlayıcı oranı düşer ve daha boşluksuz bir betonun üretilmesinin önü açılır. Boşluksuz beton ise daha yüksek dayanım ve durabilite anlamı taşımaktadır.

Deneysel çalışmalar sırasında beton karışımlarında yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı olarak tanımlanan Sika ViscoCrete-PC 15 ürünü tercih edilmiştir. Geçmiş literatür çalışmalarında verilen bilgiler ışığında, çimento yerine ikame ettirilecek mikro yapıya sahip uçucu küllerin ve mikro sentetik fiber donatıların betonların slump değerlerini yüksek oranda düşürdüğü bilinmektedir. Bu nedenle beton dizaynlarında yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı tercih sebebi olmuştur. Sika ViscoCrete-PC 15 ürününün katalogunda yer alan fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.17.'de verilmiştir.

Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları betonlarda erken yüksek dayanım ve yüksek oranda işlenebilirlik sağlama, yüksek oranda su azaltma etkisi ile öne çıkmaktadırlar.

Çizelge 3.17. Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkının fiziksel ve kimyasal özellikleri
(Sika ViscoCrete-PC 15 / Ürün Bilgi Föyü, 2013)

Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	Sika ViscoCrete-PC 15
Görünüm ve Renk	Açık Kahverengi Sıvı
Kimyasal Yapı	Modifiye Polikarboksilat Esaslı Polimer
Yoğunluk	1,07 – 1,11 kg/l
pH Değeri	3 – 7
Suda Çözünebilir Klorür Yüzdesi	Maksimum %0,1
Alkali Miktarı (%Na ₂ O Eşdeğeri Olarak)	Maksimum %3
Prize Etkisi	Geciktirici değildir
Aşırı Dozlama	Terleme meydana gelebilir

Ayrıca, ürün kataloğundaki kullanım dozaj miktarlarının, plastik ve akıcı kıvamdaki betonlar için toplam bağlayıcı miktarının %0,4'ü ile %1'i oranında, kendiliğinden yerleşen betonlarda ise toplam bağlayıcı miktarının %1'i ile %2'si oranında olması tavsiye edilmiştir. Betondan beklenen işlenebilirlik düzeyine göre kullanım oranının tam tayini için uygunluk deneylerinin yapılması gerekmektedir.

Kimyasal katkının temin edilme sürecinde üretim tarihine özellikle dikkat edilmiş, son kullanım tarihi yaklaşmış bir ürün deneysel çalışmalar sırasında kullanılmamıştır. Nitekim bu tür katkıların uygun ortamlarda saklanamaması veya uzun süre bekletilmiş olması kimyasal özelliklerinin bozulmasına, neticesinde betondan beklenen fiziksel ve dayanım parametrelerinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olabilmektedir.

3.5. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü ve Özellikleri

Uçucu küller, kömürün yakıt olarak kullanıldığı termik elektrik santrallerinin atık malzemelerinden bir tanesidir. Kömürün yakılması ile açığa çıkan baca gazlarının içerisinde mikro taneli küller bulunur. Bu küllerin atmosfere salınımları halinde büyük çevre kirlilikleri yaşanacağı için, baca gazlarına filtreleme işlemleri uygulanır. Filtreleme işlemleri sonunda ortaya çıkan mikro granüler yapıdaki küller uçucu küller olarak adlandırılır. Uçucu küller elde edildikleri termik santraller çevresinde depolanırlar ve ileri zamanlarda bu depolama geniş alanlar işgal etmeye başlar. Ayrıca çevre kirliliğine de neden olurlar. Bu küllerin farklı alanlarda kullanılma düşüncesi, hem çevre hem de kullanıcı yönünden avantajlar ortaya çıkarmaktadır. Uçucu küllerin betonda kullanılması ile ortaya çıkacak avantajlar ve dezavantajlar, kullanılan uçucu külün özelliklerine bağlıdır. Uçucu külün özelliklerini ise kullanılan kömür ve bu kömürün yakılma metodu belirler (Türker ve Ark., 2009).

Betonda doluluk oranının artırılması için, betonun doğal yapısında bulunan boşlukların mikro granüler yapıdaki malzemelerle doldurulması düşüncesi ile uçucu küllerin betonda kullanılabilirliği birçok kez araştırma konusu olmuştur. Ayrıca, bazı çimento türlerinde uçucu küller farklı oranlarda minör ilave bileşen olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller, içeriğindeki kireç sayesinde azda olsa betonda bağlayıcılık özelliği göstermekte ayrıca çimentonun hidrasyon ısısını düşürmektedir.

Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan ve çimento yerine belirli oranlarda ikame ettirilen Kangal Termik Santrali Uçucu Külü Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü

Kangal Termik Santrali'ne ait uçucu küller, TS-EN 197-1'e göre kalkersi ve ASTM C 618'e göre yüksek kireçli uçucu kül özelliği taşımaktadırlar aynı zamanda ortalama özgül ağırlıkları $2,36 \text{ gr/cm}^3$ 'tür (Türker ve Ark., 2009).

Tez çalışması kapsamında kullanılan Kangal Termik Santrali'ne ait uçucu küllerin kimyasal bileşen özellikleri Çizelge 3.18.'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Kangal Termik Santrali Uçucu Külleri'nin kimyasal bileşen özellikleri (Türker ve Ark., 2009)

Bileşen Özellikleri	Bileşen Yüzdesi	Bileşen Özellikleri	Bileşen Yüzdesi
Reaktif - CaO	23,0	K ₂ O (Potasyum Oksit)	1,0
Reaktif - SiO ₂	27,7	SO ₃ (Kükürt Tri Oksit)	7,0
Serbest - CaO	7,7	MgO (Magnezyum Oksit)	1,7
Cl (Klor)	0,007	CaO (Kalsiyum Oksit)	31,9
KK (Kızdırma Kaybı)	3,6	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	53,4
Na ₂ O (Sodyum Oksit)	0,7	-	-

3.6. Mikro Sentetik Fiber Donatı ve Özellikleri

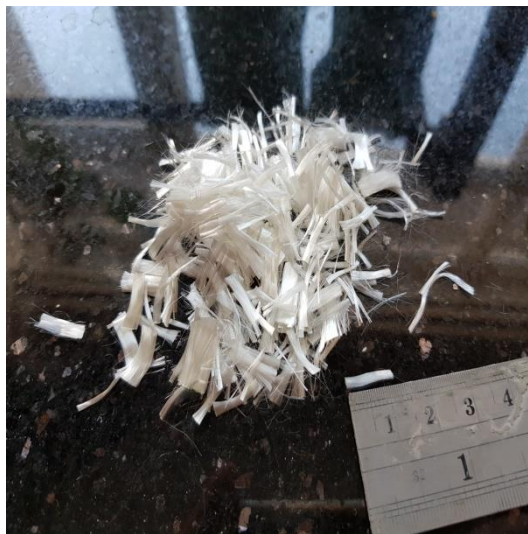
Kerpiç yapılarda kullanılan ve malzemenin çekme dayanımını ve aderansını iyileştirici etki gösteren saman türü ürünlerin günümüz teknolojisi ışığında geliştirilmiş başka bir hali de sentetik fiber donatılardır. Bu donatılar, beton ve harçlarda kullanılmak için geliştirilen ve çekme dayanımları iyileştirilmiş tekstil, plastik, cam gibi malzemelerden üretilmektedirler.

Bilindiği üzere beton, döküm ve priz alma aşamasından sonra rötire denilen büzülme çatlaklarına, daha sonra plastik ve elastik deformasyonlar karşısında yapısal çatlaklara maruz kalmaktadır. Bu çatlaklar dayanım ve dayanıklılık açısından betonda olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca betonun maruz kaldığı çekme dayanımları kendi bünyesinde mikro çatlaklar oluşturmaktadır.

Tüm bu etkiler karşısında betonun içsel gerilmelerini almak ve bu gerilmeler altında oluşacak çatlakları önlemek amacı ile birçok farklı türde, şekilde ve boyutta sentetik fiber donatılar üretilmekte ve geliştirilmektedir.

Mikro sentetik fiber donatılar çok ince liflerden oluşurlar. Çapları saç telinden dahi daha küçüktür. Uzunlukları ise üretilen lifin malzemesine ve üretici firmaya göre farklılıklar gösterebilmektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan mikro sentetik fiber donatılar, Kordsa Firması'nın ürettiği olduğu ve Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatı olarak adlandırılan üründür. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatı Şekil 3.6.'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatı

Tez çalışması kapsamında kullanılan mikro fiber donatılara ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.19.'da verilmiştir.

Çizelge 3.19. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatıların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (KordSAKraTos, 2018)

Fiber Sınıfı	Ham Madde	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Uzunluk (mm)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Alkali Direnci	Korozyon Direnci	Erime Sıcaklığı (°C)	Fiber Adedi / kg
EN 14889-2 Sınıf-I	Poliamid 6.6	1,14	12	900	Çok İyi	Çok İyi	260	111 Milyon

3.7. Makro Sentetik Fiber Donatı ve Özellikleri

Makro sentetik fiber donatılar, mikro sentetik fiber donatılara göre daha kalın ve daha uzun malzemelerdir. Mikro fiberlerin yüzeyleri daha düzgün yapıda olmasına karşın makro fiberlerin yüzeyleri daha pürüzlü bir yapıda olabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü sağlanan makro fiberlerin betona daha yüksek aderansla bağlanması beklenir. Mikro fiberlerin birim ağırlık başına düşen lif sayısı makro fiberlerinkine oranla oldukça yüksektir. Buda mikro fiberlerin beton içerisinde birim zamanda daha homojen bir yapıda dağılmasını sağlar. Fakat makro fiberlerin adet başına düşen dayanımları mikro fiberlere oranla daha yüksektir. Tüm bu özellikler ışığında makro fiberlerin beton içerisinde homojen bir dağılım sergilemesi için daha yüksek karıştırma süreleri gerektirdiği söylenebilir. Birim ağırlık başına düşen lif sayıları mikro fiberlere göre az olduğundan, optimum kullanım dozajlarının mikro fiber kullanım dozajlarına göre yüksek olması sonucunu doğurur.

Makro fiber donatılar farklı şekil ve ebatlarda aynı zamanda farklı malzeme türleriyle üretilmektedirler. Boyutları şekil vermeye elverişlidir. Makro fiberler rötre çatlaklarını, beton ve harçlarda yük altında oluşabilecek çatlakları önlemek, beton karışımının eğilme ve sünme davranışını iyileştirmek amacı ile üretilen yapı malzemeleridir. Basınç altında bulunan yapı malzemelerinin, içsel çekme kuvvetleri etkisi ile oluşabilecek çatlaklarını önlemeyi, çatlak oluşumundan sonra ise malzemenin dağılmasını engelleyerek basınç mukavemetlerini de iyileştirmeyi amaçlarlar. Makro fiberlerin beton ve harçlarda kullanımı ile ortaya çıkacak avantaj ve dezavantajlar, makro fiberin türü, şekli, kullanım oranı ve tekniğine bağlı olarak değişir.

Bu tez çalışması kapsamında beton numunelerinde kullanılan makro fiberler Kordsa Firması'nın üretmiş olduğu Kratos Makro Sentetik Fiber Donatılar'dır. Kratos Makro Sentetik Fiber Donatılar'da hammadde olarak poliamid 6.6 polimeri kullanılırken, daha sonra emboss şekil verilebildiği için polipropilen polimer malzeme kullanıldığı ve üretime bu malzeme ile devam edildiği üretici firma tarafından bildirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan makro sentetik fiber donatıların görüntüsü Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kratos Makro Sentetik Fiber Donatı

Beton karışımlarında çimento yerine ikame ettirilen uçucu küller ve mikro fiberlerle birlikte hibrit, ayrıca tekil olarak kullanılan makro fiberlere ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.20.'de gösterilmiştir.

Malzeme yapısı dikkate alındığında mikro fiberlere oranla daha serttir ve kesit olarak yassı bir malzeme olduğu söylenebilir. Makro fiber donatıların üzerinde küçük oyuntular dikkat çekmiştir. Bu oyuntular sayesinde fiberin beton içerisinde daha güçlü bir tutunma sergileyebileceğini düşünmek mümkündür.

Çizelge 3.20. Kratos Makro Sentetik Fiber Donatıların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri
(KordSAKraTos, 2018)

Fiber Sınıfı	Ham Madde	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Erime Sıcaklığı (°C)	Alkali Direnci	Fiber Adedi / kg
EN 14889-2 Sınıf-II	Polipropilen	0,91	40	0,70	550	160	Çok İyi	67 Bin

4. YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde yapılan deneysel çalışmalar ve bu deneylerin uygulama esasları hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. Beton Karışım Dizaynları

Çalışma kapsamında Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) verilen kriterlere uygun C30/37 sınıfındaki betonda, hiçbir parametrenin değiştirilmemesi hedeflenerek karışımlarda sabit oranda mikro sentetik fiber donatı ve makro sentetik fiber donatı kullanılmış, çimento yerine de farklı oranlarda uçucu kül ikame ettirilmiştir.

Beton dizaynlarında kullanılan şartnamelerde maksimum su çimento oranı, minimum çimento dozajı, betonun hava içeriği, taze betonun slump değeri, en büyük tane çapı, hedeflenen beton mukavemet sınıfı ve katkıları hakkında limitler öngörülür (TS 802, 2016).

Seçilen beton sınıfı, çevre etkilerine maruz betonlar için Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) en düşük beton sınıfı olarak kullanımına izin verilen minimum 320 kg/m^3 çimento dozajlı C30/37 olmuştur.

Yapılan beton dizaynı neticesinde, 320 kg/m^3 çimento dozajlı 1 m^3 karışıma giren malzeme ağırlıkları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 320 kg/m^3 çimento dozajlı 1 m^3 beton karışımına giren malzeme ağırlıkları

Malzeme Türü	Malzeme Yoğunluğu (gr/cm^3)	1 m^3 Beton Karışımına Giren Malzeme Ağırlığı (kg)
Karışım Suyu (Şebeke Suyu)	1,00	152
Çimento (CEM-I 42,5 R)	3,10	320
0-5 mm Tane Çap Aralığı Agregası	2,70	890
7-13 mm Tane Çap Aralığı Agregası	2,70	593
13-22 mm Tane Çap Aralığı Agregası	2,71	496
Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	1,09	2,24
Toplam Agregası Ağırlığı (kg)		1979
Su/Çimento Oranı		0,48
Akışkanlaştırıcı/Çimento Oranı (%)		0,7
Slump Değeri (cm)		12
Teorik Birim Ağırlık (kg/dm^3)		2,45
Ölçülen Birim Ağırlık (kg/dm^3)		2,47

Beton karışımındaki çimento dozajları 340 kg/m^3 , 360 kg/m^3 ve 380 kg/m^3 olacak şekilde değiştirilerek ayrıca 3 farklı dizayn daha oluşturulmuştur.

Her bir beton karışımı için TS EN 12350-2 (2010) standardına uygun olarak slump deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca, her taze beton karışımının birim hacim ağırlık tayini TS EN 12350-6 (2010) standardına uygun olarak belirli hacme ve ağırlığa sahip metal kova yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Beton karışımlarından TS EN 12390-1 (2013) standardına uygun 15x15x15 cm boyutlarında 6'şar adet küp numune alınmıştır. Numune alım işlemleri TS EN 12390-2 (2010) standardında belirtilen kurallara uygun biçimde yürütülmüştür.

Beton küp numuneler TS EN 12390-2 (2010) standardına uygun kür havuzunda deney gününe kadar saklanmışlardır.

Deney numunelerine 7 günlük ve 28 günlük kür sonunda TS EN 12390-3 (2010) standardında belirtilen şartlara uygun olarak, kalibrasyonu yapılmış hidrolik basınç presi yardımı ile 0,6 MPa/s yükleme hızı değeri kullanılarak standart basınç mukavemeti deneyi uygulanmıştır.

7 günlük ve 28 günlük kür sonunda standart basınç mukavemeti testine tabi tutulan 320 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 320 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin standart basınç mukavemeti deneyi sonuçları

Numune Kırılma Yaşı	Numune Numarası	Tartılan Numune Ağırlıkları (gr)	Numune Yoğunlukları (gr/cm ³)	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Ortalama Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)
7 Günlük	1	8336	2,47	1031,5	45,84	45,93
	2	8256	2,45	1079,3	47,97	
	3	8237	2,44	989,4	43,97	
28 Günlük	4	8315	2,46	1287,1	57,20	55,49
	5	8295	2,46	1237,6	55,00	
	6	8230	2,44	1220,9	54,26	

Deney sonuçlarına bakıldığında numunelerin 28 günlük ortalama basınç mukavemeti değerinin 55,49 MPa ve 7 günlük ortalama basınç mukavemeti değerinin ise 45,93 MPa çıktığı görülmüştür.

Numunelerin 7 günlük dayanım ortalamaları, 28 günlük dayanım ortalamalarının yaklaşık %83'ü düzeyindedir.

Standart basınç deneyi sonuçları incelendiğinde çimento dozajları farklı tüm beton dizaynlarının C30/37 beton sınıfını yüksek mukavemet düzeylerinde sağladığı görülmüş fakat çevresel etkiler altında bulunan C30/37 sınıfı betonlarda Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (2013) kullanılması öngörülen minimum çimento dozajının 320 kg/m^3 olduğu göz önünde bulundurularak, karışımın çimento dozajında herhangi bir azaltmaya gidilmemiştir.

Deney sonuçları ile birlikte, TS 802 (2016) standardı ve Karayolu Teknik Şartnamesi (2013) limitleri göz önünde bulundurularak, tez çalışmasının sonraki aşamalarında 320 kg/m^3 çimento dozajına sahip beton karışımının C30/37 sınıfındaki referans beton karışımı olarak kabul edilip kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ise bu beton "Referans Beton" (RB) olarak anılmıştır.

4.2. Fiber Donatı Kullanım Dozajları

Beton karışım dizaynı tamamlandıktan sonra sentetik fiber donatıların kullanım dozajlarının belirlenmesi için bazı deneyler yapılmıştır.

Mikro ve makro sentetik fiber donatılar RB karışımı içerisine farklı dozajlarda katılmış ve bu karışımlardan alınan beton numuneler TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak standart basınç mukavemeti testine tabi tutulmuştur.

Yapılan ön deneyler neticesinde mikro sentetik fiber donatı optimum kullanım dozajı $1,4 \text{ kg/m}^3$ ve makro sentetik fiber donatı optimum kullanım dozajı $7,0 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlenmiştir.

4.3. Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı, Uçucu Kül İkameli Betonların Üretilmesi

Çalışma kapsamında %10, %20 ve %30 olmak üzere 3 farklı uçucu kül ikame oranı aynı zamanda $1,4 \text{ kg/m}^3$ dozajında mikro fiber ve $7,0 \text{ kg/m}^3$ dozajında makro fiber sabit kullanım oranları belirlenerek bu parametreler ışığında toplamda 13 farklı beton karışımı elde edilmiştir.

RB içerisinde uçucu kül ikame oranlarına bağlı olarak çimento oranlarında azaltmaya gidilmiş ve toplam bağlayıcı miktarının 320 kg/m^3 olması sağlanmıştır. Mikro fiber donatı içeren beton karışımlarında mikro fiber oranı $1,4 \text{ kg/m}^3$ ve makro fiber donatı içeren beton karışımlarında makro fiber oranı $7,0 \text{ kg/m}^3$ olarak sabit tutulmuştur.

Çalışma konusu farklı içerikli 1 m^3 beton karışımı içerisinde giren malzeme miktarları Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Beton tanım kısmında uçucu kül ikame yüzde oranı "K" harfinin alt indisi olarak gösterilmiştir. Beton karışımı içerisinde mikro fiber kullanılmamış ise "Mi" nin alt indisi "0" olarak, $1,4 \text{ kg/m}^3$ oranında mikro fiber kullanılmış ise "1" olarak tanımlanmıştır.

Aynı zamanda "Ma" nın alt indisinin "0" değerini alması makro fiberin beton karışımı içerisinde kullanılmadığını, alt indisin "1" değerini alması ise $7,0 \text{ kg/m}^3$ dozajında makro fiberin beton karışımı içerisinde kullanıldığını göstermektedir.

Çizelge 4.3. Çalışma konusu beton karışımlarında 1 m^3 beton içerisinde giren malzeme miktarları

Beton Karışım Tanımı	Su (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	0-5 mm Agregası (kg)	7-13 mm Agregası (kg)	13-22 mm Agregası (kg)	Kimyasal Katkı (kg)	Mikro Fiber Donatı (kg)	Makro Fiber Donatı (kg)
"RB" K ₀ Mi ₀ Ma ₀	152	320	0	890	593	496	2,24	0	0
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	152	320	0	889	592	496	2,24	1,4	0
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	152	320	0	881	587	491	2,24	0	7,0
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	152	320	0	879	586	490	2,24	1,4	7,0
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	152	288	32	885	590	493	2,24	1,4	0
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	152	256	64	881	587	491	2,24	1,4	0
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	152	224	96	877	585	489	2,24	1,4	0
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	152	288	32	877	585	489	2,24	0	7,0
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	152	256	64	873	582	487	2,24	0	7,0
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	152	224	96	869	579	485	2,24	0	7,0
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	152	288	32	875	584	488	2,24	1,4	7,0
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	152	256	64	872	581	486	2,24	1,4	7,0
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	152	224	96	868	578	484	2,24	1,4	7,0

Her bir beton karışımı için tartılan agrega, bağlayıcı, su ve kimyasal katkı öncelikle karıştırıcıya konularak 3 dakika boyunca karıştırılmışlardır. Bu süre sonunda karışım türüne göre mikro veya makro fiber donatılar Şekil 4.1.'de görülen karıştırıcıya eklenerek, 4 dakika boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 4.1. Mikro ve makro fiber donatıların beton karışımlarına eklenmesi

Beton karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra TS EN 12390-2 (2010) standartlarına uygun olarak Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi numune alımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. Beton karışımlarından numune alınması

Beton karışımlarından alınan numuneler için kullanılan kalıplar TS EN 12390-1 (2013) standartlarında belirtilen, çalışma kapsamındaki beton deneylerine uygun numunelerin hazırlanması için üretilmiş 10x10x10 cm küp, 15x15x15 cm küp ve 10x10x40 cm prizmatik şekilli kalıplardır.

Şekil 4.3.'te 5 farklı beton karışımından alınan deney numunelerinin genel bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.3. Beton karışımlarından alınan deney numunelerinin genel bir görüntüsü

24 saat kalıp süresi uygulanan numuneler TS EN 12390-2 (2010) standardına uygun olan kür havuzuna konulmuşlardır. Numunelerin kür havuzundaki genel görüntüsü Şekil 4.4.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Beton numunelerinin kür havuzundaki görüntüsü

Toplamda 13 farklı beton karışımdan alınan numune adetleri, özellikleri ve uygulanan deneyler Çizelge 4.4.'te tablo haline getirilmiştir.

Çizelge 4.4. Beton karışımlarından alınan numune adetleri, özellikleri ve uygulanan deneyler

Numunelere Uygulanacak Deneysel Tanımları	Basınç Dayanım Tayini	Eğilme Dayanım Tayini	Donma - Çözülme Deneyi (Şahit)	Donma - (Normal Su) Çözülme Deneyi	Donma - (Tuzlu Su) Çözülme Deneyi	Su Emme ve Yangın Dayanım Tayini
Numune Boyutları (cm)	15x15x15 (Küp)	10x10x40 (Prizma)	10x10x10 (Küp)	10x10x10 (Küp)	10x10x10 (Küp)	10x10x10 (Küp)
Beton Karışım Tanımları ve Numune Adetleri						
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	6	3	3	3	3	3
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	6	3	3	3	3	3
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	6	3	3	3	3	3
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	6	3	3	3	3	3
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	6	3	3	3	3	3
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	6	3	3	3	3	3
Toplam	78	39	39	39	39	39
Toplam Numune Adedi = 273						

4.4. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Birim Hacim Ağırlık Tayini Deneyleri

Mikro ve makro sentetik fiber donatılı, uçucu kül ikameli betonlar ile katkısız taze beton karışımları üzerinde hacmi ile ağırlığı bilinen ve Şekil 4.5.'te gösterilen metal kova kullanılarak, TS EN 12350-6 (2010) standardına uygun yoğunluk tayini deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.5. Taze betonlar üzerinde yoğunluk tayini deneyi yapılırken kullanılan metal kova

4.5. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Slump Tayini Deneyleri

Katkısız, fiber donatılı ve uçucu kül ikameli olarak kombinasyonları üretilen toplamda 13 farklı beton karışımı üzerinde taze beton işlenebilirliğinin belirlenmesi için TS EN 12350-2 (2010) standardındaki prosedürler uygulanarak slump deneyleri yapılmıştır.

Slump tayini deneyi uygulama esnasında alınan bir görüntü Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Slump deneyi esnasında alınan bir görüntü

4.6. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Su Emme Tayini Deneyleri

Her bir beton karışımına ait 14 günlük kür süresi uygulanan ve 100x100x100 mm boyutlarında olan toplamda 39 adet küp numune üzerinde su emme tayini deneyleri yapılmıştır. Su emme tayini deneylerinde kullanılan bu numuneler daha sonra yangın dayanım tayini deneylerinde kullanılmıştır.

Su emme tayini deneyleri TS EN 12390-7 (2010) standardında belirtilen şartlara uygun şekilde ilerletilmiştir ve deney aşamasında Şekil 4.7.'de görülen etüv kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Su emme tayini için numunelerin sabit kütleye gelinceye kadar kurutulduğu etüv

4.7. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Standart Basınç Dayanım Tayini Deneyleri

Her bir beton dizaynına ait 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numunelerine 7 günlük kür ve 28 günlük kür sonunda TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun olarak basınç mukavemet tayini deneyleri uygulanmıştır. 13 farklı beton dizaynı için alınan toplamda 78 adet küp numunenin 39 adedi 7 günlük kür süresine ve 39 adedi 28 günlük kür süresine tabi tutulmuştur. Küp numunelere uygulanan basınç mukavemet testi TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun kalibrasyonu yapılmış hidrolik basınç presi ile gerçekleştirilmiş, basınç presinde numune yükleme hızı ise 0,6 MPa/s olarak ayarlanmıştır. Standart basınç mukavemeti testlerinde kullanılan 2000 kN maksimum kapasiteli hidrolik basınç presi Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Standart basınç mukavemet tayini deneylerinde kullanılan hidrolik basınç presi

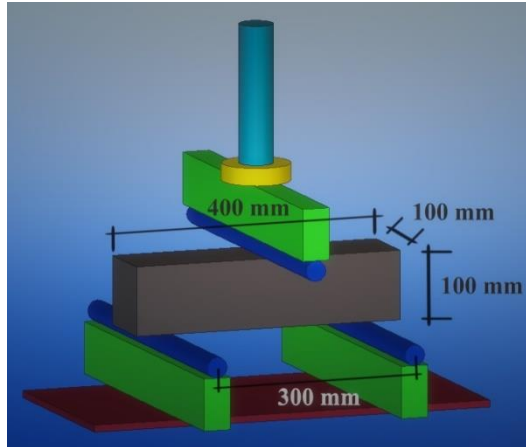
4.8. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Kiriş Eğilme Dayanım Tayini Deneyleri

Beton karışım dizaynlarından alınan 100x100x400 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda eğilme dayanım tayini deneyleri yapılmıştır. Her bir beton karışımından 3 adet kiriş numunesi alınmış ve bu numunelere orta noktalarından silindirik kesitli yükleme aparatı ile yük uygulanmıştır. Eğilme dayanım tayini deneylerinde Şekil 4.9.'da görülen maksimum kapasitesi 200 kN olan hidrolik pres kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Eğilme dayanım tayini deneylerinde kullanılan hidrolik pres

Eğilme deneyleri TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı değeri ise hidrolik prese 0,06 MPa/s olarak girilmiştir. Eğilme dayanım tayini deney düzeneği Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Eğilme dayanım tayini deney düzeneği

4.9. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Normal Suda Çözülme Dayanım Tayini Deneyleri

Hazırlanan beton karışımları üzerinde donma ve çözülme dayanım tayini deneyleri yapılmıştır. Her bir beton dizaynı için, 100x100x100 mm boyutlarında şahit sonuçlar elde edebilmek adına 3 adet numune alınmıştır. Bu numuneler 14 gün boyunca kür havuzunda bekletilmişler ve standart basınç dayanım testine tabi tutulmuşlardır.

Farklı 13 beton dizaynı için ayrıca 100x100x100 mm boyutlarında alınan toplamda 39 adet numune 14 günlük kür süresi sonunda donma ve normal suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Deney çevrimleri ASTM C 666 (2015) standardı B prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin donma çevrimi esnasından alınan bir görüntü Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Numunelerin donma çevrimi esnasındaki görüntüsü

Numunelere -18 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca donma ve 4 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca normal suda çözülme prosedürü uygulanmış olup bu işlem 1 çevrim olarak kabul edilmiştir. Nihai olarak 39 adet numune, toplamda 50 donma ve normal suda çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra standart basınç dayanım testine tabi tutulmuştur.

4.10. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Tuzlu Suda Çözülme Dayanım Tayini Deneyle

Farklı 13 beton dizaynı ve her dizayn için alınan 3 adet 100x100x100 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde 14 günlük kür süresi sonunda donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri ASTM C 666 (2015) standardı B prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir.

Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü'nün yol tuzlama çalışmalarında kullandığı kaya tuzu temin edilerek doygun tuzlu su çözeltisi hazırlanmıştır. Numuneler -18 °C sıcaklıktaki dondurucuda 4 saat boyunca, daha sonra 4 °C sıcaklıktaki doygun tuzlu su çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilmişlerdir ve bu işlem 1 çevrim olarak kabul edilmiştir. Toplamda 39 adet numune üzerinde 50 çevrim donma ve tuzlu suda çözülme prosedürü uygulanmıştır. Deney sonunda numuneler standart basınç dayanım testine tabi tutulmuşlardır.

Tüm donma ve çözülme çevrimlerinin uygulandığı deney odasından, çözülme işlemi esnasında alınan genel bir görüntü Şekil 4.12.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Donma ve çözülme çevrimlerinin gerçekleştirildiği deney odası

4.11. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Yangın Dayanım Tayini Deneyle

Bölüm 4.6.'da verilen, 14 günlük kür süresi sonunda üzerinde su emme tayini deneyle yapılan 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelere ayrıca yangın dayanım tayini deneyle uygulanmıştır.

Beton numunelerinin yakılma işlemi Sivas Tüdemsaş Fabrikası'nda bulunan ve Şekil 4.13.'te görülen tav fırınlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13. Yangın dayanım tayini deneylerinde kullanılan tav fırınları

Herhangi bir alevli ve ortama yayılmış yangın senaryosu düşünüldüğünde ilk 5 dakika içerisinde yangın ortamı yaklaşık 600 °C sıcaklıkları bulmaktadır. Bu sıcaklık değerleri yangının 30 dakika devam etmesi halinde yaklaşık olarak 850 °C civarındadır. (TS EN 13501-2, 2016)

İlk olarak 600 °C sıcaklıkla yakılmaya başlanılan beton numuneler, 30 dakika boyunca artan sıcaklık etkisi altında maksimum 850 °C sıcaklığa maruz kalmışlardır.

Yangın simülasyonu uygulanarak yakılan beton numuneler, havada soğuduktan sonra standart basınç dayanım testine tabi tutulmuşlardır.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar, yorumlar ve tartışmalar bu bölümde verilmiştir.

5.1. Beton Karışım Dizaynlarına ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları

Bölüm 4.1.'de aktarılan, beton karışım dizaynlarına ait taze beton özellikleri incelendiğinde, çimento dozajına bağlı olarak betonların işlenebilirliğinde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir.

380 kg/m³ çimento dozajına sahip deneme beton karışımında slump değeri diğer deneme betonlarına kıyasla kısmen azalmıştır. Genel itibari ile çimento dozajındaki artmaya bağlı olarak deneme betonlarının işlenebilirliğinde herhangi bir olumsuzluk meydana gelmemiştir. Bunun nedeni, deneme betonu karışım dizaynlarında kullanılan süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı miktarının, çimento miktarı ile birlikte artış göstermiş olmasına bağlanabilir.

Deneme betonu karışım dizaynlarında, taze betonlarda ölçülen birim hacim ağırlıklar ile teorik birim hacim ağırlıklar arasında güçlü bir benzerliğin olduğu görülmüştür. Bu güçlü benzerlik, malzeme özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deneylerin, beton dizaynlarında hesaplanan malzeme hacimlerinin ve ağırlıklarının, aynı zamanda beton hava içeriği kabulünün doğruluğunu göstermektedir.

Sertleşmiş beton numunelerinin ağırlıkları ile basınç dayanımları arasında herhangi bir bağıntı kurulamamıştır. Numune ağırlıklarındaki artış ve azalıştan bağımsız olarak beton kırım yüklerinin farklı değerler aldığı yorumlanmıştır.

Deneme betonu dizaynlarında, beton basınç dayanımının maksimum olduğu noktada optimum bir çimento dozajının olduğu tespit edilmiştir. Optimum çimento dozajı azaldıkça ya da arttıkça beton basınç dayanımlarında azalmaların olduğu görülmektedir. Bu durum, agrega granülometrisine bağlı olarak ortaya çıkan boşlukların ne miktarda çimento hamuru ile daha iyi doldurulabileceği düşüncesine ışık tutmaktadır.

Agregaların fiziksel ve gradasyon özelliklerine bağlı olarak deneme betonu karışım dizaynlarında en yüksek basınç dayanımı için kullanılabilir optimum çimento dozajının 340 kg/m³ olduğunu söylemek mümkündür.

5.2. Fiber Donatı Kullanım Dozajlarına ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları

Bölüm 4.2.'de aktarılan, fiber donatı kullanım oranlarının belirlenmesi için hazırlanan beton karışımlarının taze beton özellikleri incelendiğinde mikro ve makro fiber donatıların kullanım dozajlarındaki artışa bağlı olarak beton işlenebilirliğinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Fiber donatı içeriğinin dozajına bağlı olarak slump değerlerinde anlamlı düşüşler yaşanmıştır. Mikro fiber donatı kullanılan beton karışımlarının işlenebilirliğinin, makro fiber donatı kullanılan beton karışımlarına nazaran daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Makro fiber donatı içerikli betonlar, mikro fiber içerikli betonlara kıyasla daha akışkan kıvamlı görünmektedir fakat slump ölçümleri sırasında makro fiberlerin daha iyi taneler arası tutunma kuvveti sağladıkları için slump değerlerini daha fazla düşürdükleri yorumlanabilir. Genel olarak makro fiberlerin mikro fiberlere oranla beton işlenebilirliğini daha olumsuz yönde etkilediğini söylemek mümkündür.

Taze betonlarda ölçülen birim hacim ağırlıklar ile teorik birim hacim ağırlıklar arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır. Mikro ve makro fiber donatı kullanılan ön deneme betonlarında, fiberlerin taze betonda sıkıştırılabilme problemine neden olmadığı sonucuna varılmıştır. Fiber donatılar taze beton hacminde herhangi bir olumsuzluk oluşturmamıştır.

Mikro ve makro fiber donatı içeren ön deneme betonlarından alınan sertleşmiş beton numunesi ağırlıkları incelendiğinde, numune ağırlıkları ile basınç dayanımları arasında herhangi bir ilişkisi saptanmamıştır.

Farklı dozajlarda mikro yada makro fiber donatı içeren ön deney numunelerinin standart basınç dayanım sonuçlarına göre, her iki fiber donatı türü için dayanımları maksimum yapan optimum bir dozajdan söz edilebilir. Basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, mikro fiber donatı optimum kullanım dozajının $1,4 \text{ kg/m}^3$ ve makro fiber donatı optimum kullanım dozajının $7,0 \text{ kg/m}^3$ olduğu sonucu çıkarılmıştır.

5.3. Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı, Uçucu Kül İkameli Betonların Üretilmesine ait Deneysel Çalışma Sonuçları ve Yorumları

Bölüm 4.3.'te aktarılan mikro ve makro sentetik fiber donatılı, uçucu kül ikameli betonların üretim safhalarının tümünde denk prosedürler ve şartlar uygulanmıştır.

5.4. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Birim Hacim Ağırlık Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

Mikro ve makro sentetik fiber donatı katkılı ve uçucu kül ikameli olarak hazırlanan taze beton karışımlarına ait birim hacim ağırlık tayini deney sonuçları Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Taze beton karışımları üzerinde yapılan birim hacim ağırlık tayini deney sonuçları

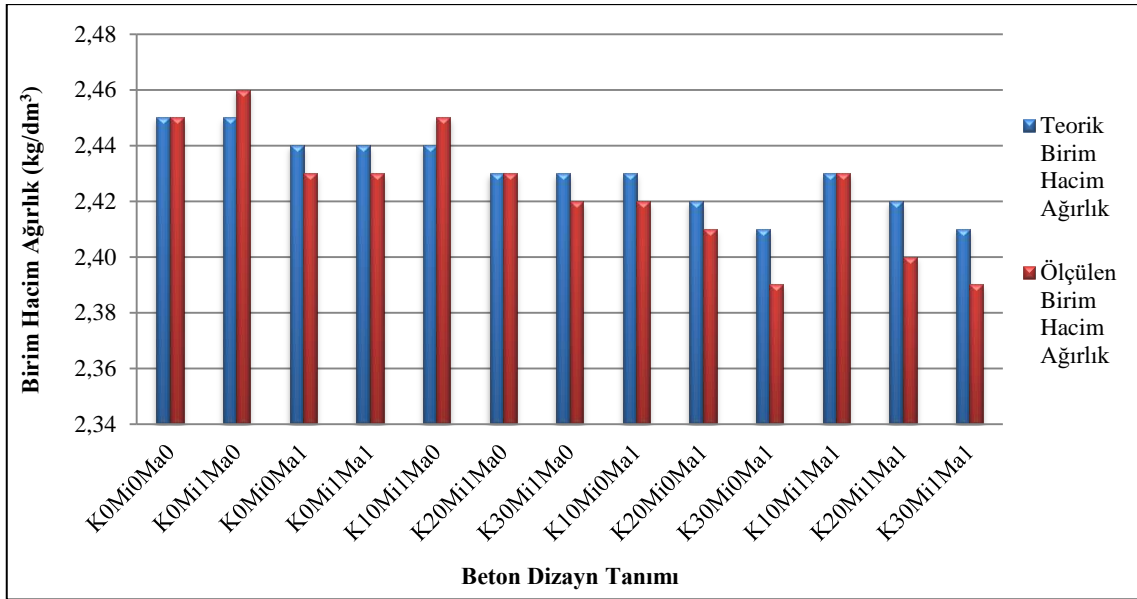
Beton Karışım Tanımı	Teorik Birim Hacim Ağırlık (kg/dm ³)	Ölçülen Birim Hacim Ağırlık (kg/dm ³)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	2,45	2,45
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	2,45	2,46
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	2,44	2,43
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	2,44	2,43
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	2,44	2,45
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	2,43	2,43
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	2,43	2,42
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	2,43	2,42
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	2,42	2,41
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	2,41	2,39
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	2,43	2,43
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	2,42	2,40
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	2,41	2,39

Beton karışımları içerisinde giren malzeme yoğunluklarına bağlı olarak teorik ve ölçülen taze beton birim hacim ağırlıklarında küçük farklılıklar ortaya çıkmıştır. Teorik ve ölçülen birim hacim ağırlıklar arasındaki farkların ise karışımın metal kova içerisinde sıkıştırıldıktan sonraki hava içeriği ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Dizaynlara ait taze beton birim hacim ağırlıkları Şekil 5.1.'de grafik üzerinde verilmiştir.

Beton karışımlarında birim hacim ağırlığı etkileyen unsurlar arasında kullanılan malzeme yoğunlukları, agrega gradasyonuna bağlı olarak taze betonun sıkışma özelliği ve betonun hava içeriği örnek gösterilebilir.

Betonlarda yoğunluk ve doluluk önemli etmenlerdir. Betonlarda yoğunluğu belirleyen en önemli unsur, beton içerisinde kullanılan malzemelerin kendi yoğunlukları ve kullanım yüzdeleridir. Beton içerisinde giren malzemelerin hassas tartılması ve taze betonun optimum düzeyde sıkıştırılması, teorik birim hacim ağırlıklar ve ölçülen birim hacim ağırlıklar arasındaki farkı minimuma indirecektir.



Şekil 5.1. Taze betonların teorik ve ölçülen birim hacim ağırlıklar grafiği

Mikro fiber ve makro fiber donatıların yoğunlukları agrega yoğunluklarına göre daha düşüktür. Ayrıca, betonlarda kullanılan uçucu kül yoğunluğu da agrega yoğunluklarına göre daha az değerdedir. Bu sebeplerden dolayı mikro fiber, makro fiber ve uçucu küllerin betonlarda kullanılması neticesinde, taze beton birim hacim ağırlıklarında azalmaların ortaya çıkması beklenen bir durumdur.

RB içerisinde kullanılan mikro fiber donatıların kullanım dozajı $1,4 \text{ kg/m}^3$ olarak küçük bir değerdedir. Bu sebeple mikro fiber donatıların, taze beton birim hacim ağırlıklarında herhangi bir düşüşe neden olmadığı söylenebilir.

Makro fiber donatıların kullanım dozajının 7 kg/m^3 ve çimento yerine uçucu kül ikame oranlarının ise %10, %20 ve %30 olması sebebi ile, makro fiber donatıların ve uçucu küllerin beton karışımları içerisinde kayda değer bir yer tuttıkları görülmektedir. Bu sebeple makro fiber donatıların ve uçucu küllerin beton karışımlarında kullanılması, taze betonlarda birim hacim ağırlıkların azalmasına neden olmuştur. Uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak taze betonların sıkıştırılabilme özelliği azalmıştır.

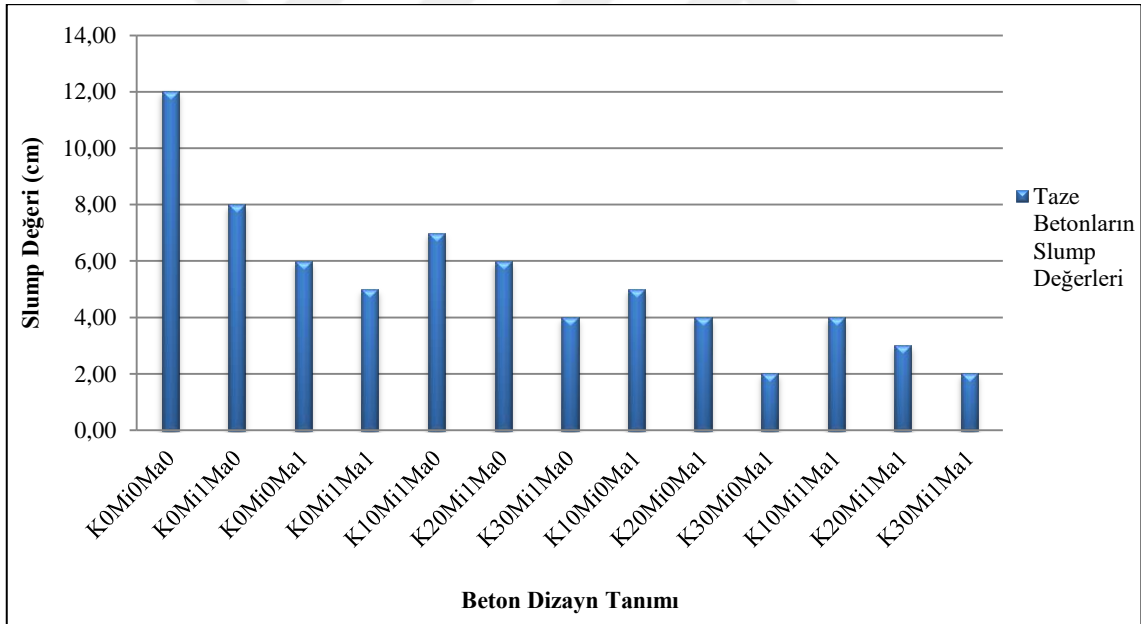
5.5. Taze Beton Karışımları Üzerinde Yapılan Slump Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

RB, mikro ve makro sentetik fiber donatılı, uçucu kül ikameli olarak 13 farklı kombinasyonda üretilen beton karışımları üzerinde slump tayini deneyleri yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Taze beton karışımları üzerinde yapılan slump tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Slump Değeri (cm)
$K_0Mi_0Ma_0$	12
$K_0Mi_1Ma_0$	8
$K_0Mi_0Ma_1$	6
$K_0Mi_1Ma_1$	5
$K_{10}Mi_1Ma_0$	7
$K_{20}Mi_1Ma_0$	6
$K_{30}Mi_1Ma_0$	4
$K_{10}Mi_0Ma_1$	5
$K_{20}Mi_0Ma_1$	4
$K_{30}Mi_0Ma_1$	2
$K_{10}Mi_1Ma_1$	4
$K_{20}Mi_1Ma_1$	3
$K_{30}Mi_1Ma_1$	2

Taze betonlar üzerinde işlenebilirlik etkisini sınıflandırmak için yapılan slump tayini deney sonuçları Şekil 5.2.'de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Taze betonlar üzerinde yapılan slump tayini deney sonuçları grafiği

Beton karışımı içerisinde kullanılan fiber katkıların ve uçucu küllerin taze beton işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiş oldukları görülmüştür.

Mikro fiberlerin boylarının kısa ve çaplarının çok küçük değerlerde olması neticesinde agregalar arası tutunmayı artırmış olsalar da işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkileri makro fiberlere oranla sınırlı kalmıştır.

Mikro fiber liflerin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkilerinin, bünyelerine aldıkları su ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Mikro sentetik fiber lif kullanılan betonlarda akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilerek istenilen düzeyde işlenebilirlik kolaylıkla sağlanabilir.

Makro fiber donatıların uzunlukları mikro fiberlere göre oldukça uzundur ve çapları da daha fazladır. Ayrıca, makro fiberler; üzerlerindeki desenler sayesinde beton karışımı içerisinde daha iyi bir tutunma kabiliyeti göstermiş ve taze beton işlenebilirliğini mikro fiberlere göre daha fazla olumsuz yönde etkilemişlerdir. Makro fiber lifli taze beton karışımlarının görünüm itibari ile yüksek işlenebilirlik verebileceği düşünülmüş olsa da, slump değerleri düşük seviyelerde çıkmıştır.

Akışkanlaştırıcı miktarı iyi düzeyde ayarlandığında, makro lifli betonlarda da hedeflenen işlenebilirlik düzeylerinin yakalanabileceği düşünülmektedir.

Mikro ve makro fiberlerin hibrit olarak betonlarda kullanılması neticesinde taze beton işlenebilirliğinin tekil lif kullanımına oranla daha da fazla düştüğü görülmüştür. Hibrit lifli betonlarda, lif yoğunluğuna bağlı olarak taneler arası tutunma kuvveti üst düzeylere çıkmıştır.

Beton karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda ikame ettirilen Kangal Termik Santrali'ne ait uçucu küller ikame oranları arttıkça betonun işlenebilirliğini düşürmüşlerdir. Uçucu küllerin mikro yapıda olması taze betonun hareket kabiliyetini sınırlandırmıştır.

Taze beton karışımları üzerinde yapılan gözlemde, uçucu küllerin beton karıştırma işlemi sonunda hızlı bir şekilde bünyelerine su aldıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle %20 ve daha fazla oranda Kangal Termik Santrali'ne ait uçucu kül ikame ettirilen betonların, kalıba dökülmesinden hemen sonra hızlı bir şekilde yerleştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Uçucu kül ikameli taze betonlardan numune alınırken ayrıca beton şerbetinin mala yüzeyine yapıştığı tespit edilmiş ve numune üst yüzey düzgünlüklerinin sağlanması zorlaşmıştır.

Makro sentetik fiber ve hibrit lifli betonlar için uçucu kül ikame oranının %30 düzeyine çıkması ile birlikte numune alma işleminin zorlaştığı görülmüştür. Bu betonların pratikte kullanılmasının işlenebilirlik açısından problemler çıkarabileceği düşünülmektedir. Bu tip betonlarda akışkanlaştırıcı miktarı ile birlikte agrega gradasyonunun da taze beton işlenebilirliğine katkı sağlayacak biçimde seçilmesi gerektiği tavsiye edilmektedir.

5.6. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Su Emme Tayini Deney

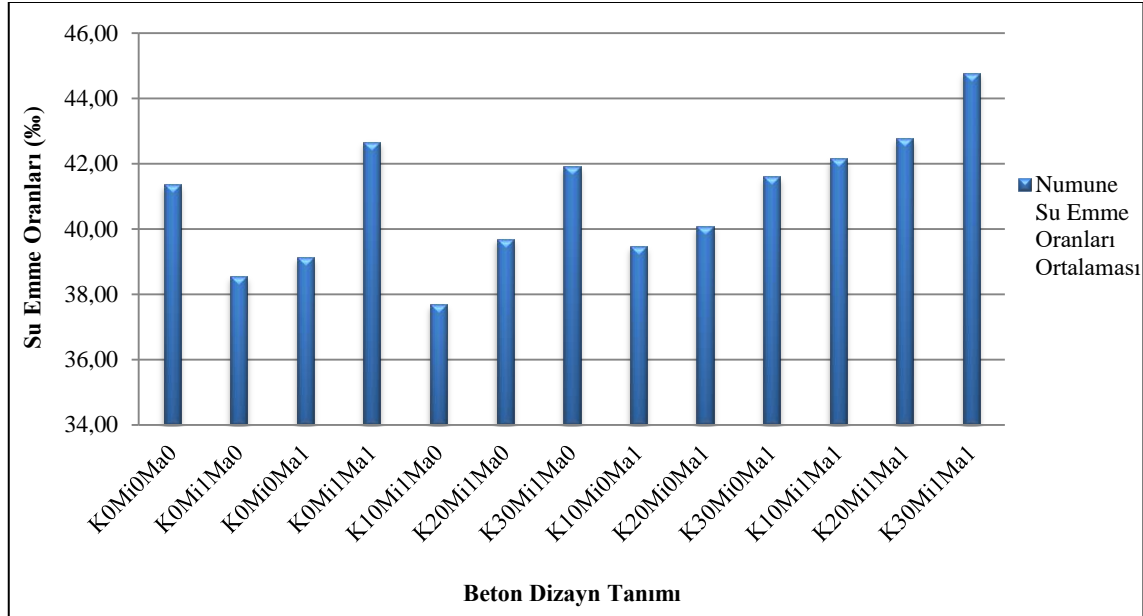
Sonuçları ve Tartışmalar

Boyutları 100x100x100 mm olan 13 farklı beton dizaynına ait toplamda 39 adet küp numune üzerinde yapılan su emme tayini deney sonuçları Çizelge 5.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan su emme tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Suya Doymun Numune Ağırlıkları (gr) (m_s)	Etüv Kurusu Numune Ağırlıkları (gr) (m_o)	Numune Su Emme Ağırlıkları (gr) ($s_e=(m_s-m_o)$)	Numune Su Emme Oranları (%) ($s_e/m_o \times 1000$)	Numune Su Emme Oranları Ortalaması (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	2448,53	2351,33	97,20	41,34	41,37
	2447,81	2349,64	98,17	41,78	
	2438,29	2342,26	96,03	41,00	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	2446,09	2357,54	88,55	37,56	38,55
	2434,24	2344,85	89,39	38,12	
	2453,96	2359,67	94,29	39,96	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	2439,31	2348,36	90,95	38,73	39,12
	2446,42	2352,16	94,26	40,07	
	2425,73	2335,68	90,05	38,55	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	2438,67	2337,02	101,65	43,50	42,66
	2442,92	2344,62	98,30	41,93	
	2432,06	2332,79	99,27	42,55	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	2434,84	2342,80	92,04	39,29	37,68
	2428,54	2339,54	89,00	38,04	
	2443,99	2359,72	84,27	35,71	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	2433,54	2340,07	93,47	39,94	39,69
	2445,77	2352,70	93,07	39,56	
	2426,96	2334,58	92,38	39,57	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	2429,23	2332,68	96,55	41,39	41,92
	2438,27	2338,01	100,26	42,88	
	2421,52	2325,03	96,49	41,50	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	2419,46	2325,47	93,99	40,42	39,46
	2435,34	2339,76	95,58	40,85	
	2425,48	2338,68	86,80	37,11	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	2422,35	2326,95	95,40	41,00	40,08
	2414,19	2320,87	93,32	40,21	
	2430,79	2339,47	91,32	39,03	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	2396,80	2298,76	98,04	42,65	41,61
	2416,18	2320,31	95,87	41,32	
	2407,68	2313,19	94,49	40,85	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	2433,24	2336,08	97,16	41,59	42,15
	2418,93	2321,03	97,90	42,18	
	2429,33	2329,91	99,42	42,67	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	2416,67	2315,52	101,15	43,68	42,77
	2423,53	2323,34	100,19	43,12	
	2402,20	2306,49	95,71	41,50	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	2405,83	2300,51	105,32	45,78	44,78
	2418,57	2315,15	103,42	44,67	
	2400,34	2299,42	100,92	43,89	

Beton karışımlarına ait su emme oranları ortalaması Şekil 5.3.'te grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan su emme tayini deney sonuçları grafiği

Sertleşmiş betonlarda su emme oranları, ait olduğu numunenin boşluk oranları ile ilgili fikir vermektedir. Sertleşmiş bir beton numunesine ait su emme oranı, ilgili numunenin boşluk oranı ile doğru orantılıdır.

Tüm beton dizaynlarına ait su emme oranlarının, RB dizaynına ait su emme oranına göre yüzdelik durumu Çizelge 5.4.'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Beton dizaynlarına ait su emme oranlarının RB su emme oranına göre yüzdelik durumu

Beton Dizayn Tanımı	Su Emme Oranları Ortalaması (%)	RB Dizaynına Göre Yüzdelik Durumu (%)	RB Dizaynına Göre Değişim Yüzdesi (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	41,37	100,00	0,00
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	38,55	93,18	-6,82
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	39,12	94,56	-5,44
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	42,66	103,12	3,12
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	37,68	91,08	-8,92
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	39,69	95,94	-4,06
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	41,92	101,33	1,33
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	39,46	95,38	-4,62
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	40,08	96,88	-3,12
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	41,61	100,58	0,58
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	42,15	101,89	1,89
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	42,77	103,38	3,38
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	44,78	108,24	8,24

Su emme tayini deney sonuçları incelendiğinde, betonlarda tekil olarak mikro yada makro sentetik fiber donatıların kullanılması RB karışımındaki boşluk oranını azaltmıştır. Fakat hibrit fiber donatılı betonların boşluk miktarı RB karışımına kıyasla artmıştır ve bunun nedeni betonda kullanılan toplam lif dozajının optimum düzeylerin üzerine çıkmış olmasına bağlanabilir.

Mikro sentetik fiber donatılı betonlar için numune su emme oranları incelendiğinde, $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına ait numunelerin boşluk oranı %10 uçucu kül ikamesi ile azalmıştır. $K_{20}Mi_1Ma_0$ ve $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynlarına ait numunelerin boşluk oranları ise $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına ait numunelere kıyasla artmıştır. $K_{10}Mi_1Ma_0$, $K_{20}Mi_1Ma_0$ ve $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynları için uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak betonların boşluk yapısında da artışların yaşandığı gözlemlenmiştir.

Tekil olarak makro fiber donatı kullanılan dizaynlar için uçucu kül ikamesi, beton numunelerindeki su emme oranlarında artışlar meydana getirmiştir. Uçucu kül ikamesindeki artışla orantılı olarak tekil makro fiber donatı kullanılan numunelerin boşluk oranlarının da arttığı söylenebilir.

RB'ye kıyasla $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynındaki numunelerin su emme oranlarında yaşanan artışlarda, %10 uçucu kül ikamesi ile birlikte azalmalar meydana gelmiştir. $K_{20}Mi_1Ma_1$ ve $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynlarına ait numune su emme oranlarında ise $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynına kıyasla artışlar gözlemlenmiştir. Hibrit lifli beton dizaynları için, %10 oranında uçucu kül ikamesi numune boşluk yapısını olumlu yönde etkilemiş, %20 ve %30 uçucu kül ikame oranları ile birlikte olumsuz bir etki yaşanmıştır. $K_{10}Mi_1Ma_1$, $K_{20}Mi_1Ma_1$ ve $K_{30}Mi_1Ma_1$ beton dizaynları için uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak, numune su emme oranlarında artışların yaşandığı görülmektedir.

Genel olarak su emme tayini deney sonuçlarına göre uçucu kül ikame ettirilen betonlar için, uçucu küllerin ikame oranları arttıkça numune su emme oranlarında artışlar yaşanmıştır. RB'ye kıyasla sadece $K_0Mi_1Ma_0$, $K_0Mi_0Ma_1$, $K_{10}Mi_1Ma_0$, $K_{20}Mi_1Ma_0$, $K_{10}Mi_0Ma_1$ ve $K_{20}Mi_0Ma_1$ dizaynlarına ait numune boşluk oranlarında iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Tüm dizaynlar için numune su emme oranlarına bakıldığında en düşük ortalama değer %37,68 ile $K_{10}Mi_1Ma_0$ dizaynına ait numunelerde, en yüksek ortalama değer ise %44,78 ile $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynına ait numunelerde yakalandığı görülmektedir. RB karışımına göre diğer dizaynların su emme oranlarında ortaya çıkan en fazla azalma %8,92 ve en fazla artış %8,24 seviyelerindedir.

5.7. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Standart Basınç Dayanım Tayini Deneysel Sonuçları ve Tartışmalar

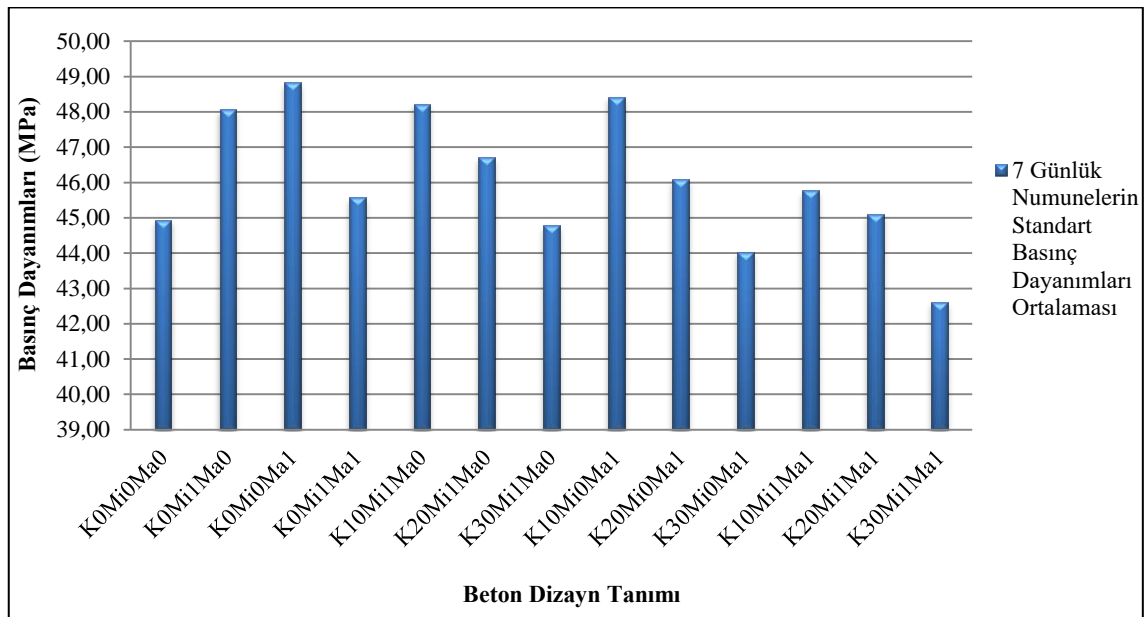
Boyutları 150x150x150 mm olan 7 günlük kür uygulanan küp numuneler üzerinde yapılan basınç dayanım tayini deney sonuçları Çizelge 5.5.'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. 7 günlük kür süresi uygulanmış sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Ağırlıkları (gr)	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	8258	996,5	44,29	44,93
	8264	1033,4	45,93	
	8286	1002,9	44,57	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	8251	1100,7	48,92	48,07
	8275	1087,3	48,32	
	8245	1056,7	46,96	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	8256	1107,0	49,20	48,83
	8244	1083,1	48,14	
	8180	1105,9	49,15	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	8230	995,6	44,25	45,58
	8209	1045,5	46,47	
	8254	1035,5	46,02	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	8198	1078,5	47,93	48,22
	8214	1118,0	49,69	
	8231	1058,4	47,04	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	8206	1048,8	46,61	46,71
	8196	1054,4	46,86	
	8211	1049,7	46,65	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	8160	948,2	42,14	44,79
	8228	1034,3	45,97	
	8212	1040,8	46,26	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	8213	1067,7	47,45	48,42
	8236	1127,4	50,11	
	8188	1073,3	47,70	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	8171	1030,7	45,81	46,08
	8195	1019,2	45,30	
	8192	1060,4	47,13	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	8121	994,6	44,20	44,03
	8117	986,3	43,84	
	8164	991,1	44,05	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	8228	1035,5	46,02	45,76
	8179	1021,5	45,40	
	8175	1031,8	45,86	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	8123	1006,4	44,73	45,11
	8151	977,1	43,43	
	8104	1061,5	47,18	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	8066	950,6	42,25	42,61
	8091	958,8	42,61	
	8125	966,9	42,97	

Her bir dizayna ait basınç dayanım ortalamaları bulunarak, betonlarda kullanılan mikro ve makro fiberler ile çimento yerine ikame ettirilen uçucu külün, erken numune dayanımlarında göstermiş oldukları performanslar ortaya konulmuştur.

7 günlük kür süresi uygulanan numunelere ait basınç mukavemetleri Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.4. 7 günlük kür süresi uygulanmış sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları grafiği

Tüm beton dizaynlarına ait 7 günlük erken basınç dayanımlarının, RB dizaynına ait basınç dayanımına göre yüzdeler durumu Çizelge 5.6.'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Beton dizaynlarına ait 7 günlük basınç dayanımlarının RB basınç dayanımına göre yüzdeler durumu

Beton Dizayn Tanımı	Basınç Dayanımları Ortalaması (MPa)	RB Dizaynına Göre Yüzdeler Durumu (%)	RB Dizaynına Göre Değişim Yüzdeleri (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	44,93	100,00	0,00
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	48,07	106,99	6,99
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	48,83	108,68	8,68
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	45,58	101,45	1,45
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	48,22	107,32	7,32
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	46,71	103,96	3,96
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	44,79	99,69	-0,31
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	48,42	107,77	7,77
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	46,08	102,56	2,56
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	44,03	98,00	-2,00
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	45,76	101,85	1,85
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	45,11	100,40	0,40
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	42,61	94,84	-5,16

Numunelerin 7 günlük erken basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, mikro donatıların kullanıldığı betonda %6,99 oranında, makro sentetik fiber donatıların kullanıldığı betonda %8,68 oranında ve hibrit donatıların kullanıldığı betonda RB'ye kıyasla %1,45 oranında dayanım artışları gözlenmiştir.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına göre, $K_{10}Mi_1Ma_0$ dizaynında kısmi bir dayanım artışı görülmüştür. $K_{20}Mi_1Ma_0$ ve $K_{30}Mi_1Ma_0$ betonlarının dayanımlarında $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına kıyasla azalmalar yaşanmıştır.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynına göre $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında kısmi bir dayanım azalması görülmüştür. $K_{20}Mi_0Ma_1$ ve $K_{30}Mi_0Ma_1$ betonlarında ise $K_0Mi_0Ma_1$ betonuna kıyasla kayda değer mukavemet azalmaları meydana gelmiştir.

Hibrit fiber donatılı betonlar incelendiğinde, $K_0Mi_1Ma_1$ beton dayanımlarında %20 ve %30 uçucu kül ikame oranları ile birlikte dayanım azalmaları ortaya çıkmıştır. Hatta $K_{30}Mi_1Ma_1$ mukavemeti RB'ye göre ciddi oranda azalmıştır.

RB haricindeki diğer beton dizaynlarına ait numunelerin 7 günlük erken basınç dayanımları için, betonlarda %10 uçucu kül ikamesi haricindeki diğer ikame oranlarının kullanılması dayanım azalmalarının yaşanmasına sebebiyet vermiştir.

RB dizaynına göre, $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında %0,31 olarak, $K_{30}Mi_0Ma_1$ dizaynında %2,00 olarak ve $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında %5,16 olarak basınç dayanım azalmaları görülmüştür. Diğer dizaynlara ait 7 günlük basınç mukavemetlerinin ise RB'ye göre daha iyi bir performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Tüm dizaynların 7 günlük basınç dayanım ortalamaları incelendiğinde, en düşük dayanım ortalamasını 42,61 MPa olarak $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynının, en yüksek dayanım ortalamasını ise 48,83 MPa olarak $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynının verdiği görülmektedir. En fazla dayanım artışının görüldüğü $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynı, RB'ye göre %8,68 oranında daha iyi bir mukavemet ortaya koymuştur.

Her bir dizayndan 150x150x150 mm boyutlarında 3'er adet küp numune ayrıca alınmış ve 28 günlük küre tabi tutulmuştur. Bu numuneler üzerinde yapılan standart basınç dayanım deneyi sonuçları ise Çizelge 5.7.'de verilmiştir.

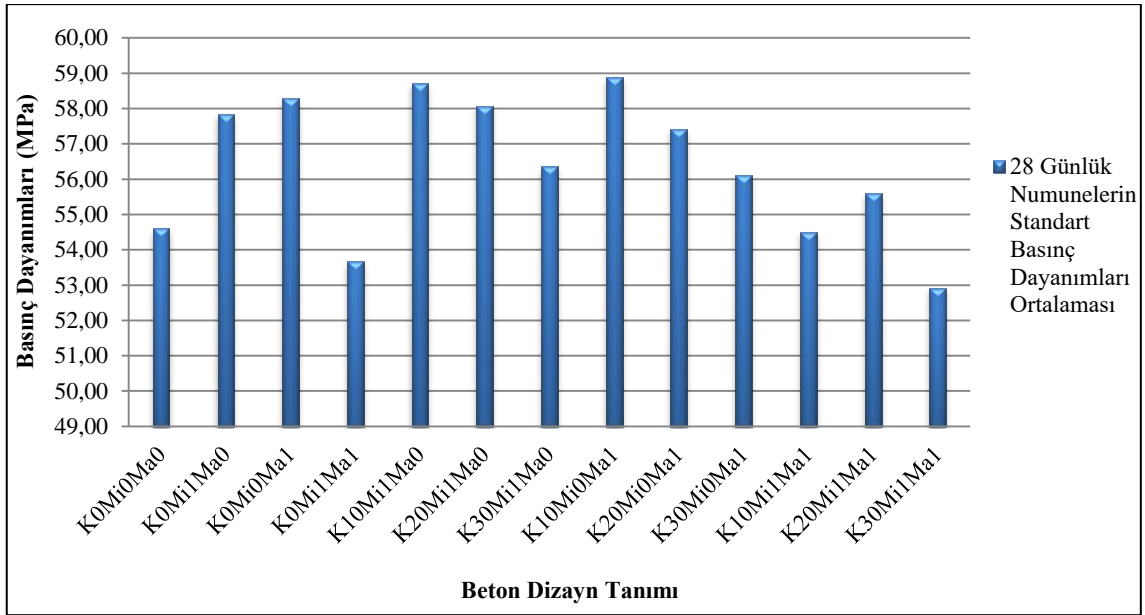
Numunelere ait 7 günlük erken dayanımlar ile 28 günlük geç dayanımlar arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Bu kıyaslamalar ışığında, tüm beton dizaynları için sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanım gelişmeleri hakkında yorumlar üretilmiştir.

Çizelge 5.7. 28 günlük kür süresi uygulanmış sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Ağırlıkları (gr)	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	8279	1273,6	56,60	54,60
	8253	1176,2	52,28	
	8227	1235,8	54,92	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	8263	1286,0	57,16	57,83
	8221	1342,0	59,64	
	8226	1275,7	56,70	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	8209	1299,8	57,77	58,27
	8238	1322,2	58,76	
	8257	1311,5	58,29	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	8195	1230,2	54,68	53,66
	8247	1198,0	53,24	
	8216	1193,9	53,06	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	8228	1343,0	59,69	58,70
	8214	1303,5	57,93	
	8203	1316,0	58,49	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	8194	1292,5	57,44	58,07
	8229	1306,9	58,08	
	8199	1320,5	58,69	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	8219	1261,3	56,06	56,36
	8152	1316,0	58,49	
	8201	1226,8	54,52	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	8169	1300,1	57,78	58,87
	8237	1312,2	58,32	
	8215	1361,4	60,51	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	8209	1314,1	58,40	57,41
	8191	1291,2	57,39	
	8172	1270,2	56,45	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	8189	1295,5	57,58	56,12
	8185	1251,2	55,61	
	8120	1241,2	55,16	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	8218	1245,7	55,36	54,50
	8195	1212,3	53,88	
	8205	1220,7	54,25	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	8197	1232,1	54,76	55,60
	8178	1274,6	56,65	
	8184	1246,3	55,39	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	8124	1174,0	52,18	52,92
	8076	1232,9	54,80	
	8102	1165,1	51,78	

28 günlük kür süresi uygulanmış numuneler üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları grafiği Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.

Numunelerin nihai basınç dayanımlarını daha iyi bir biçimde yorumlayabilmek için oluşturulan grafik üzerinde, en yüksek ve en düşük basınç dayanımları açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, uçucu küllerin 28 günlük numune mukavemetleri üzerindeki etkisi yine grafik üzerinde yorumlanabilmektedir.



Şekil 5.5. 28 günlük kür süresi uygulanmış sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları grafiği

Tüm beton dizaynlarına ait 28 günlük erken basınç dayanımlarının, RB dizaynına ait basınç dayanımına oranla yüzdeler durumu ise Çizelge 5.8.'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Beton dizaynlarına ait 28 günlük basınç dayanımlarının RB basınç dayanımına göre yüzdeler durumu

Beton Dizayn Tanımı	Basınç Dayanımları Ortalaması (MPa)	RB Dizaynına Göre Yüzdeler Durumu (%)	RB Dizaynına Göre Değişim Yüzdeleri (%)
K0Mi0Ma0	54,60	100,00	0,00
K0Mi1Ma0	57,83	105,92	5,92
K0Mi0Ma1	58,27	106,72	6,72
K0Mi1Ma1	53,66	98,28	-1,72
K10Mi1Ma0	58,70	107,51	7,51
K20Mi1Ma0	58,07	106,36	6,36
K30Mi1Ma0	56,36	103,22	3,22
K10Mi0Ma1	58,87	107,82	7,82
K20Mi0Ma1	57,41	105,15	5,15
K30Mi0Ma1	56,12	102,78	2,78
K10Mi1Ma1	54,50	99,82	-0,18
K20Mi1Ma1	55,60	101,83	1,83
K30Mi1Ma1	52,92	96,92	-3,08

Numunelerin 28 günlük dayanım ortalamalarına bakıldığında, RB dizaynına göre K0Mi1Ma0 dizaynı %5,92 ve K0Mi0Ma1 dizaynı %6,72 dayanım artışı, K0Mi1Ma1 dizaynı ise %1,72 dayanım azalması göstermiştir.

RB içerisinde mikro ve makro fiber donatıların tekil olarak kullanılması beton numunelerinde dayanım artışları meydana getirmiştir.

RB'ye kıyasla, $K_0Mi_1Ma_0$ ve $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynları dikkate alındığında en fazla dayanım artışı makro fiberlerin kullanıldığı betonlarda görülmüştür. Mikro fiberlerin tekil olarak betonlarda kullanılması da ayrıca RB'ye göre kayda değer dayanım artışları ortaya çıkarmıştır. RB'ye göre hibrit lifli betondaki dayanım azalması ise kısmi olarak nitelendirilebilir.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına göre, $K_{10}Mi_1Ma_0$ ve $K_{20}Mi_1Ma_0$ dizaynlarında kısmi olarak basınç dayanım artışları yaşanmış fakat $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında ise azalma meydana gelmiştir.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynı için %10 uçucu kül ikamesi küçükte olsa bir dayanım artışı sağlamıştır. Uçucu kül ikamesinin %20 ve %30 seviyelerine çıkması ile birlikte $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynında dayanım azalmaları gözlemlenmiştir.

$K_0Mi_1Ma_1$ dizaynına kıyasla, $K_{10}Mi_1Ma_1$ ve $K_{20}Mi_1Ma_1$ dizaynlarında uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak dayanım artışları ortaya çıkmıştır. Fakat bu artışlar yine kısmi düzeyde gerçekleşmiştir. Uçucu kül ikamesinin %30 olması ile beraber $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynında mukavemet kaybı söz konusu olmuştur.

Numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının tümüne bakıldığında, RB dizaynına göre $K_0Mi_1Ma_1$, $K_{10}Mi_1Ma_1$ ve $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynlarında basınç dayanım kayıpları yaşandığı görülmektedir. RB'ye göre en fazla mukavemet artışı ise %7,82 oranla $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında yakalanmıştır.

Uçucu kül ikame ettirilen beton karışımları için, hibrit liflerin kullanıldığı betonlar hariç, uçucu kül ikame oranındaki artışa bağlı olarak dayanım kayıplarının arttığı söylenebilir. Hibrit lifli ve uçucu kül ikameli betonlarda ise %20 uçucu kül ikame seviyesi hariç aynı yorum geçerli olmuştur.

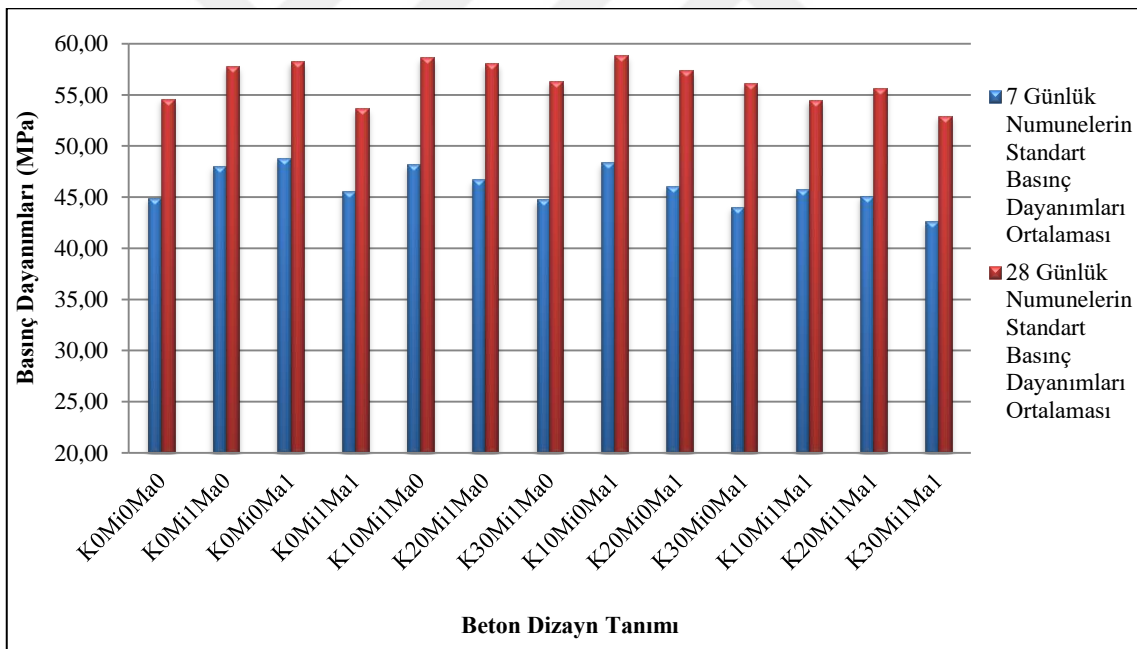
Tüm dizaynların 28 günlük basınç dayanım ortalamaları incelendiğinde, en düşük dayanım ortalaması 52,92 MPa olarak $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında, en yüksek dayanım ortalaması ise 58,87 MPa olarak $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında ortaya çıkmıştır. Uçucu küllerin bazı beton basınç dayanımlarında meydana getirdiği olumsuz etkilerin, mikro ve makro liflerin betonlarda kullanılması ile ortadan kalktığı söylenebilir.

Numunelere ait 7 günlük dayanım ortalamaları ile 28 günlük dayanım ortalamaları arasındaki bağıntı için Çizelge 5.9. oluşturulmuştur. Tabloda numunelerin 7 günlük dayanımlarının 28 günlük dayanımlarına oranı bulunmuştur.

Çizelge 5.9. Numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları arasındaki bağıntılar

Beton Dizayn Tanımı	7 Günlük Basınç Dayanımları Ortalaması (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımları Ortalaması (MPa)	7 Günlük Dayanımların 28 Günlük Dayanımlara Oranı (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	44,93	54,60	82,29
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	48,07	57,83	83,12
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	48,83	58,27	83,80
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	45,58	53,66	84,94
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	48,22	58,70	82,15
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	46,71	58,07	80,44
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	44,79	56,36	79,47
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	48,42	58,87	82,25
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	46,08	57,41	80,26
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	44,03	56,12	78,46
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	45,76	54,50	83,96
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	45,11	55,60	81,13
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	42,61	52,92	80,52

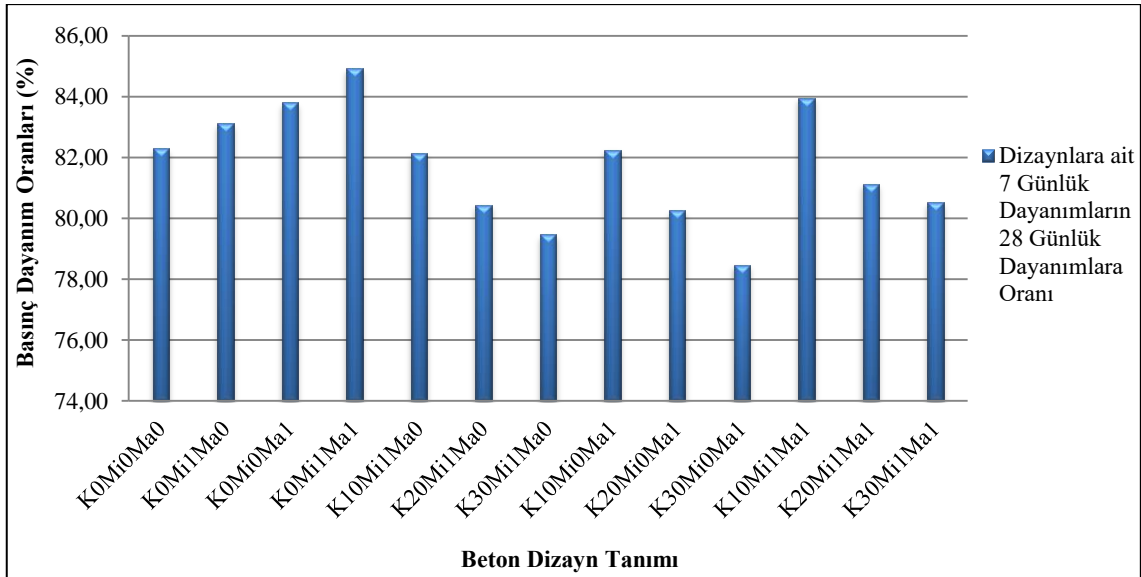
Numuneler üzerinde yapılan 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanım deneyi sonuçları Şekil 5.6.'da tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanım deneyi sonuçları grafiği

Standart basınç dayanım testi uygulanan numunelerin, 7 günlük dayanımlarının 28 günlük dayanımlarına oranını gösteren grafik Şekil 5.7.'de verilmiştir.

Oluşturulan grafik sayesinde, numunelerin dayanım gelişimleri hakkında daha sağlıklı yorumlar yapmak mümkün olmuştur.



Şekil 5.7. Dizaynlara ait 7 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara oranını gösteren grafik

Mikro ve makro fiberlerin tekil ya da hibrit olarak kullanıldığı dizaynların, $K_0Mi_0Ma_0$ dizaynına göre 7 günlük dayanım gelişmeleri daha yüksek çıkmıştır. Fiber donatıların beton basınç dayanımları üzerindeki olumlu etkileri, numunelerin erken yaş dayanımlarında daha fazla öne çıktığı görülmektedir.

Uçucu küllerin ikame ettirildiği dizaynlarda numunelerin 7 günlük mukavemetlerinin 28 günlük mukavemetlerine oranı, uçucu kül ikame oranı arttıkça azalmıştır. Uçucu kül ikame oranlarının artışına bağlı olarak betonlarda hidrasyon hızı erken yaşlarda düşük çıkmıştır. Uçucu kül ikame ettirilmeyen betonlara ait erken dayanım gelişmelerinin ise daha hızlı seyrettiği görülmektedir. Betonlarda hidrasyon hızı kullanılan bağlayıcının özelliğine göre değişmektedir. Beton dizaynlarında kullanılan CEM I 42,5-R çimentosu, betonlara erken yaşlarda yüksek dayanım kazandıran bir çimentodur. CEM I 42,5-R için, betonun erken yaşlarında hidrasyon hızı yüksektir ve bu hız belirli bir dayanım gelişmesinden sonra düşer. Numunelerin 7 ve 28 günlük dayanım oranlarına bakıldığında, uçucu küllerin dizaynlarda hidrasyon hızındaki ivmelenmeyi azalttığı söylenebilir. Uçucu kül, betonun erken yaşlardaki hidrasyon hızını düşürmüştür fakat 28 günlük süreye kadar bu hızın daha stabil bir şekilde ilerlemesini sağlamıştır.

Beton numuneleri hidrolik basınç presinde kırılırken, RB dizaynına ait numunelerde kırılma esnasında ayrılmalar ve parça kopmaları yaşanmıştır. Mikro fiber donatılı beton numunelerinde, kırılma anında herhangi bir parçalanma ve kopma görülmemiştir. Makro fiber donatılı betonlarda ise kısmi parça kopmaları gözlenmiştir.

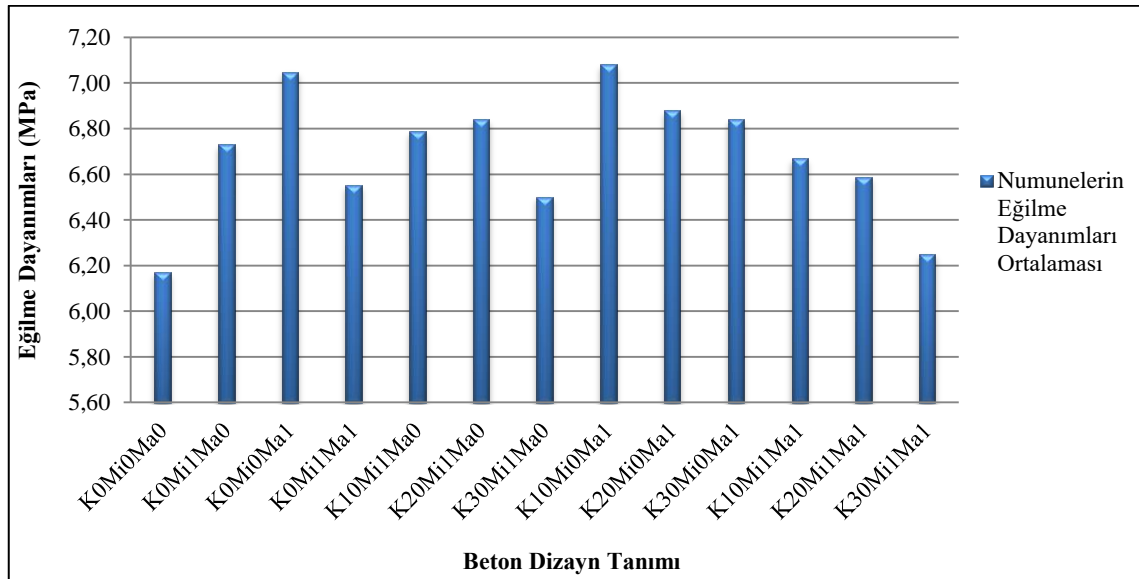
5.8. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Kiriş Eğilme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

Numune boyutları 100x100x400 mm olan kirişler üzerinde orta noktadan yük uygulanarak yapılan eğilme dayanım tayini deney sonuçları Çizelge 5.10.'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Ağırlıkları (gr)	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Eğilme Dayanımları (MPa)	Numune Eğilme Dayanımları Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	9827	13,529	6,09	6,17
	9788	13,652	6,14	
	9777	13,952	6,28	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	9764	14,854	6,68	6,73
	9775	15,342	6,90	
	9794	14,671	6,60	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	9715	15,166	6,82	7,05
	9738	16,097	7,24	
	9776	15,736	7,08	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	9762	15,262	6,87	6,55
	9729	14,380	6,47	
	9707	14,024	6,31	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	9727	14,378	6,47	6,79
	9796	15,942	7,17	
	9735	14,947	6,73	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	9742	14,005	6,30	6,84
	9694	15,514	6,98	
	9685	16,081	7,24	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	9704	15,198	6,84	6,50
	9662	13,849	6,23	
	9679	14,287	6,43	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	9688	15,117	6,80	7,08
	9679	15,274	6,87	
	9762	16,809	7,56	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	9655	15,015	6,76	6,88
	9664	16,150	7,27	
	9693	14,702	6,62	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	9576	14,610	6,57	6,84
	9593	15,563	7,00	
	9663	15,427	6,94	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	9775	15,250	6,86	6,67
	9667	14,270	6,42	
	9708	14,947	6,73	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	9583	14,941	6,72	6,59
	9642	14,810	6,66	
	9691	14,182	6,38	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	9599	13,447	6,05	6,25
	9574	14,259	6,42	
	9532	13,960	6,28	

Her bir dizayn için bulunan numune eğilme dayanımları ortalaması Şekil 5.8.'de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanım tayini deney sonuçları grafiği

Tüm beton dizaynlarının RB dizaynına göre eğilme dayanımları oranı Çizelge 5.11.'de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Beton dizaynlarına ait eğilme dayanımlarının RB eğilme dayanımına göre yüzdelik durumu

Beton Dizayn Tanımı	Eğilme Dayanımları Ortalaması (MPa)	RB Dizaynına Göre Yüzdelik Durumu (%)	RB Dizaynına Göre Değişim Yüzdesi (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	6,17	100,00	0,00
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	6,73	109,08	9,08
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	7,05	114,26	14,26
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	6,55	106,16	6,16
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	6,79	110,05	10,05
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	6,84	110,86	10,86
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	6,50	105,35	5,35
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	7,08	114,75	14,75
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	6,88	111,51	11,51
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	6,84	110,86	10,86
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	6,67	108,10	8,10
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	6,59	106,81	6,81
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	6,25	101,30	1,30

Kiriş numunelerinin eğilme dayanım sonuçlarına göre, RB'nin eğilme dayanımı 6,17 MPa, K₀Mi₁Ma₀ dizaynının 6,73 MPa, K₀Mi₀Ma₁ dizaynının 7,05 MPa ve K₀Mi₁Ma₁ dizaynının ise 6,55 MPa bulunmuştur. RB'ye göre uçucu kül ikamesiz tekil ve hibrit lif kullanılan betonların eğilme dayanımlarında ciddi artışlar görülmüştür.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynında %9,08 oranında ve $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynında ise %14,26 oranında olmak üzere RB dizaynına göre eğilme dayanım artışları gözlenmiştir. $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynında bu artış %6,16 ile sınırlı kalmıştır. Makro sentetik fiber donatı kullanılan tüm dizaynlar, beton eğilme mukavemetleri açısından diğer dizaynlara oranla daha iyi performans sergilemiştir.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına göre $K_{10}Mi_1Ma_0$ ve $K_{20}Mi_1Ma_0$ dizaynlarında eğilme mukavemet artışları söz konusu olmuştur ve bu artış değerlerine bakıldığında %20 uçucu kül ikamesinin %10 uçucu kül ikamesine oranla daha olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında ise $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynına göre eğilme dayanım kayıpları yaşanmıştır.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynı eğilme mukavemeti dikkate alındığında, $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında kısmi bir artış, $K_{20}Mi_0Ma_1$ ve $K_{30}Mi_0Ma_1$ dizaynlarında ise kayda değer azalışlar görülmüştür.

$K_0Mi_1Ma_1$ hibrit lifli betonlarının eğilme dayanımları, %10 uçucu kül ikamesi ile birlikte artarken, bu artış $K_{20}Mi_1Ma_1$ dizaynında sınırlı kalmıştır. Hibrit lifli betonlar için %30 uçucu kül ikamesi ile görülen eğilme dayanım kayıpları dikkat çeker nitelikte olmuştur.

Uçucu kül ikameli betonlar için eğilme dayanımları incelendiğinde, mikro fiber donatılı betonlar hariç, uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak dayanım kayıpları söz konusu olmuştur. Mikro fiber donatılı ve uçucu kül ikameli betonlarda ise %20 uçucu kül ikame seviyesinde kısmen de olsa bir dayanım artışı görülmüştür.

Tüm beton dizaynları içerisinde en yüksek eğilme dayanımını 7,08 MPa olarak $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynı, en düşük eğilme dayanımını ise 6,17 MPa olarak RB dizaynı vermiştir. RB dizaynına göre diğer beton dizaynlarının eğilme mukavemetlerinde artışlar gözlenmiştir. Betonlarda, mikro ve makro liflerin kullanılması ile uçucu küllerin ikame ettirilmesi eğilme dayanımları açısından herhangi bir olumsuzluk ortaya çıkarmamıştır.

RB dizaynına ait kiriş numunelerinin eğilme dayanım deneyi sonunda tamamen kırıldığı ve ani bir kırılma sergilediği görülmüştür. Mikro lifli bazı kiriş numunelerinin eğilme kırılması anında ortadan bölündüğü, bazılarının ise bütünlüğünü kısmen koruduğu gözlenmiştir. Makro lifli ve hibrit lifli numunelerde ise genel olarak kırılma anında kiriş ortasında bir çatlak oluştuğu ve numune bütünlüğünün bozulmadığı dikkat çekmiştir.

5.9. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Normal Suda Çözülme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

Donma-normal suda çözülme çevrimleri, donma-tuzlu suda çözülme çevrimleri ve yangın işlemi uygulanan numunelere referans olmaları için alınan şahit numunelerin standart basınç dayanım tayini deney sonuçları Çizelge 5.12.'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Şahit numunelerin standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

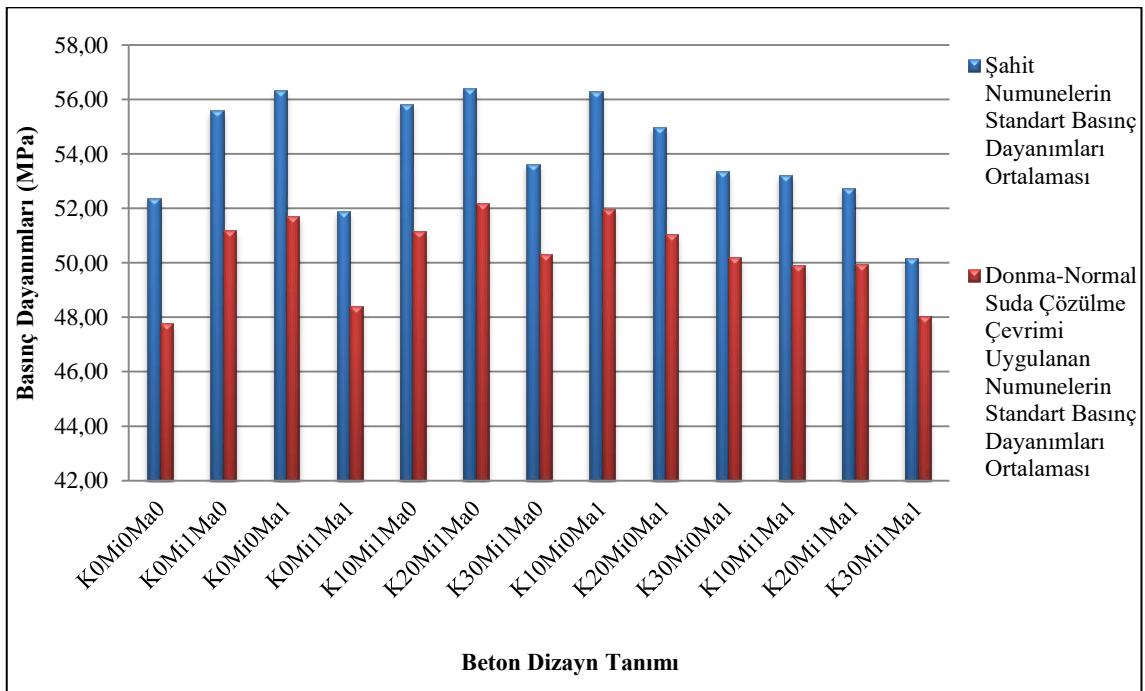
Beton Karışım Tanımı	Numune Ağırlıkları (gr)	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	2446	519,5	51,95	52,38
	2438	524,7	52,47	
	2454	527,2	52,72	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	2451	565,4	56,54	55,61
	2449	558,1	55,81	
	2443	544,8	54,48	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	2433	550,4	55,04	56,35
	2438	572,5	57,25	
	2442	567,6	56,76	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	2430	526,7	52,67	51,90
	2446	517,5	51,75	
	2441	512,8	51,28	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	2443	569,8	56,98	55,81
	2432	556,8	55,68	
	2437	547,7	54,77	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	2434	566,1	56,61	56,42
	2428	569,8	56,98	
	2432	556,6	55,66	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	2422	546,7	54,67	53,64
	2427	519,9	51,99	
	2431	542,5	54,25	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	2424	568,5	56,85	56,30
	2428	552,9	55,29	
	2432	567,7	56,77	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	2418	547,6	54,76	54,97
	2422	563,5	56,35	
	2413	538,0	53,80	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	2408	515,7	51,57	53,37
	2416	553,4	55,34	
	2403	531,9	53,19	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	2430	537,4	53,74	53,23
	2433	536,6	53,66	
	2422	522,8	52,28	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	2416	506,1	50,61	52,75
	2426	536,0	53,60	
	2412	540,4	54,04	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	2403	497,6	49,76	50,16
	2398	514,5	51,45	
	2406	492,8	49,28	

Donma ve normal suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelere 50 çevrim sonunda uygulanan standart basınç dayanım testi sonuçları ise Çizelge 5.13.'te tablo şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. Donma-normal suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerin standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	478,3	47,83	47,79
	463,3	46,33	
	492,1	49,21	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	497,4	49,74	51,21
	515,1	51,51	
	523,8	52,38	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	503,4	50,34	51,71
	528,6	52,86	
	519,3	51,93	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	503,5	50,35	48,39
	477,4	47,74	
	470,8	47,08	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	527,1	52,71	51,16
	496,7	49,67	
	510,9	51,09	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	517,7	51,77	52,18
	540,8	54,08	
	507,0	50,70	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	518,2	51,82	50,31
	503,7	50,37	
	487,4	48,74	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	526,1	52,61	51,98
	501,3	50,13	
	531,9	53,19	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	500,9	50,09	51,06
	522,6	52,26	
	508,4	50,84	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	513,7	51,37	50,21
	498,6	49,86	
	494,1	49,41	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	496,8	49,68	49,91
	505,4	50,54	
	495,2	49,52	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	506,6	50,66	49,95
	480,7	48,07	
	511,2	51,12	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	481,2	48,12	48,04
	482,1	48,21	
	477,8	47,78	

Şahit numunelerin ve donma-normal suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin basınç mukavemetleri Şekil 5.9.'da birlikte verilmiş olup numune basınç dayanımlarında meydana gelen azalmalar grafik üzerinde açıkça görülmektedir.



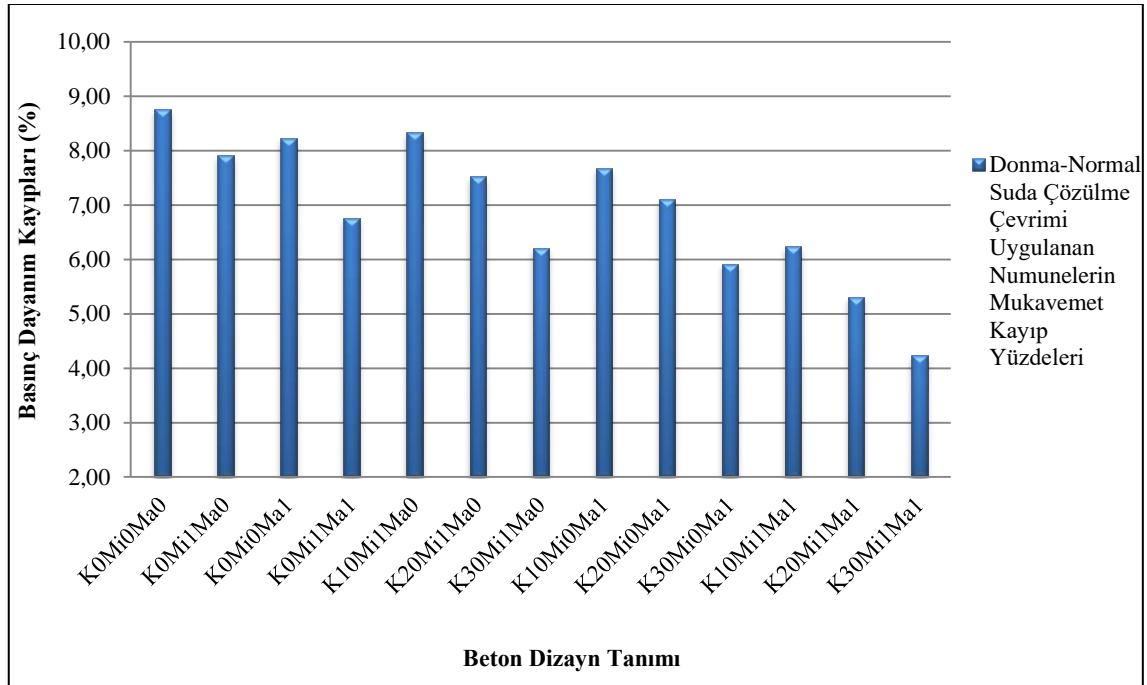
Şekil 5.9. Şahit numunelerin ve donma-normal suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerin basınç mukavemetleri grafiği

Donma ve normal suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerde meydana gelen mukavemet azalmaları Çizelge 5.14.'te hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14. Donma-normal suda çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarının şahit numunelerin basınç dayanımlarına oranı ve dayanım kayıpları

Beton Dizayn Tanımı	Şahit Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Donma-Normal Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Donma-Normal Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanımlarının Şahit Numunelerin Basınç Dayanımlarına Oranı (%)	Donma-Normal Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	52,38	47,79	91,24	8,76
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	55,61	51,21	92,09	7,91
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	56,35	51,71	91,77	8,23
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	51,90	48,39	93,24	6,76
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	55,81	51,16	91,67	8,33
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	56,42	52,18	92,48	7,52
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	53,64	50,31	93,79	6,21
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	56,30	51,98	92,33	7,67
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	54,97	51,06	92,89	7,11
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	53,37	50,21	94,08	5,92
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	53,23	49,91	93,76	6,24
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	52,75	49,95	94,69	5,31
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	50,16	48,04	95,77	4,23

Donma ve normal suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıp yüzdelerinin gösterildiği grafik Şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Donma-normal suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıp yüzdeleri grafiği

Donma ve normal suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıpları incelendiğinde, RB dizaynının, şahit numunesine oranla %8,76 seviyesinde tüm dizaynlar içerisinde en yüksek dayanım kaybına uğradığı görülmüştür. K₀Mi₁Ma₀ dizaynında şahit numunesine oranla %7,91 seviyesinde, K₀Mi₀Ma₁ dizaynında şahit numunesine oranla %8,23 seviyesinde ve K₀Mi₁Ma₁ dizaynında ise şahit numunesine oranla %6,76 seviyesinde dayanım kayıpları yaşanmıştır.

Uçucu kül ikamesiz betonlar incelendiğinde, RB dizaynına göre tekil fiber donatı kullanılan betonların donma ve normal suda çözülme dayanım kayıplarında kısmen azalmalar gözlenmiştir. Dizaynlarda uçucu kül ikamesiz hibrit fiber donatı kullanımı neticesinde ise, betonların donma ve normal suda çözülme dayanım kayıplarının RB dizaynına kıyasla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Uçucu kül ikamesiz betonlar için, donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonunda en az basınç dayanım kaybı yaşanan dizaynın K₀Mi₁Ma₁ olduğu görülmektedir.

%10 uçucu kül ikamesi ile $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynının donma ve normal suda çözülme dayanım kaybında kısmi bir artış yaşanmış olsa da, %20 ve %30 uçucu kül ikamesi ile birlikte azalmalar gözlenmiştir. Tekil olarak mikro fiber donatı kullanılan dizaynlar içerisinde en az dayanım kaybı %6,21 seviyesinde $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında ortaya çıkmıştır.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynına kıyasla, $K_{10}Mi_0Ma_1$, $K_{20}Mi_0Ma_1$ ve $K_{30}Mi_0Ma_1$ dizaynlarının donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıplarında azalmalar meydana gelmiştir. Makro fiber donatı kullanılan betonlar için uçucu kül ikame oranı arttıkça, donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıpları da azalmıştır. Tekil olarak makro fiberlerin kullanıldığı betonlar içerisinde en az dayanım kaybı $K_{30}Mi_0Ma_1$ dizaynında olmak üzere %5,92 seviyesinde bulunmuştur.

Hibrit lifli betonların donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıpları incelendiğinde, en iyi sonucu $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynının verdiği görülmüştür. $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynının donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kaybı %4,23 olarak bulunmuştur. Uçucu kül ikame oranındaki artışa bağlı olarak, hibrit lifli betonların donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıplarında da azalmalar yaşanmıştır.

Uçucu kül ikame ettirilen tüm dizaynlar incelendiğinde, betonların donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıplarında uçucu kül ikame oranlarındaki artışlara bağlı olarak azalmaların meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tüm dizaynlar içerisinde en yüksek dayanım kaybı %8,76 seviyesinde olmak üzere RB dizaynında, en düşük dayanım kaybı ise %4,23 seviyesinde olmak üzere $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında görülmüştür. RB dizaynına göre diğer dizaynların donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıplarında iyileşmeler meydana gelmiştir.

Donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonunda, RB dizaynına ait numunelerde gözle görülür derecede aşınmalar ve kabuk atmalar meydana gelmiştir. Fiber donatılı kullanılan beton numunelerinde ise aşınmalar ve kabuk atmalar daha kısmi düzeyde gerçekleşmiştir.

Donma ve normal suda çözülme çevrimlerine maruz kalan beton numunelerine uygulanan basınç dayanım deneyi esnasında, RB dizaynına ait numunelerde kırılma anında koparak ayrılmalar gözlemlenirken, lifli betonlarda bu durum yaşanmamıştır.

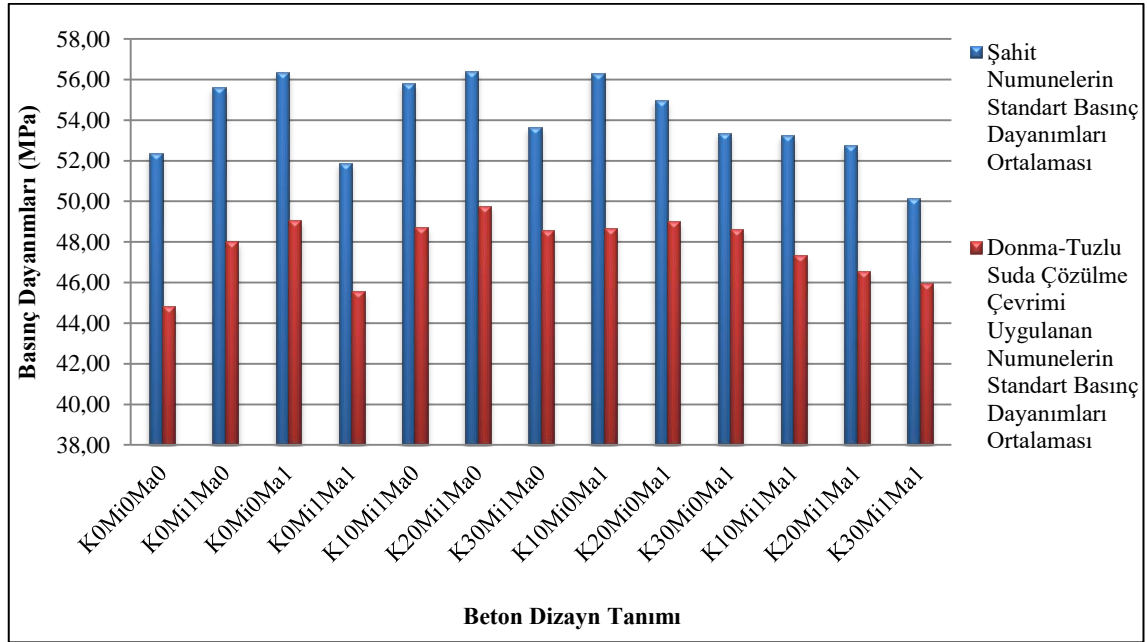
5.10. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Donma ve Tuzlu Suda Çözülme Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelere 50 çevrim sonunda uygulanan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları Çizelge 5.15.'te tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 5.15. Donma-tuzlu suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerin standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	453,8	45,38	44,82
	438,0	43,80	
	452,9	45,29	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	495,0	49,50	48,01
	475,6	47,56	
	469,7	46,97	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	496,9	49,69	49,06
	473,7	47,37	
	501,3	50,13	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	477,6	47,76	45,58
	441,0	44,10	
	448,7	44,87	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	481,7	48,17	48,74
	510,0	51,00	
	470,5	47,05	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	487,7	48,77	49,77
	510,1	51,01	
	495,2	49,52	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	498,3	49,83	48,59
	476,5	47,65	
	482,8	48,28	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	492,3	49,23	48,68
	498,3	49,83	
	469,9	46,99	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	490,9	49,09	49,01
	471,4	47,14	
	508,1	50,81	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	467,3	46,73	48,64
	504,7	50,47	
	487,1	48,71	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	483,2	48,32	47,34
	463,9	46,39	
	473,2	47,32	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	449,8	44,98	46,57
	457,5	45,75	
	489,7	48,97	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	447,4	44,74	45,96
	468,2	46,82	
	463,3	46,33	

Şahit numunelerin ve donma-tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin basınç mukavemetleri Şekil 5.11.'de grafik üzerinde gösterilmiştir.



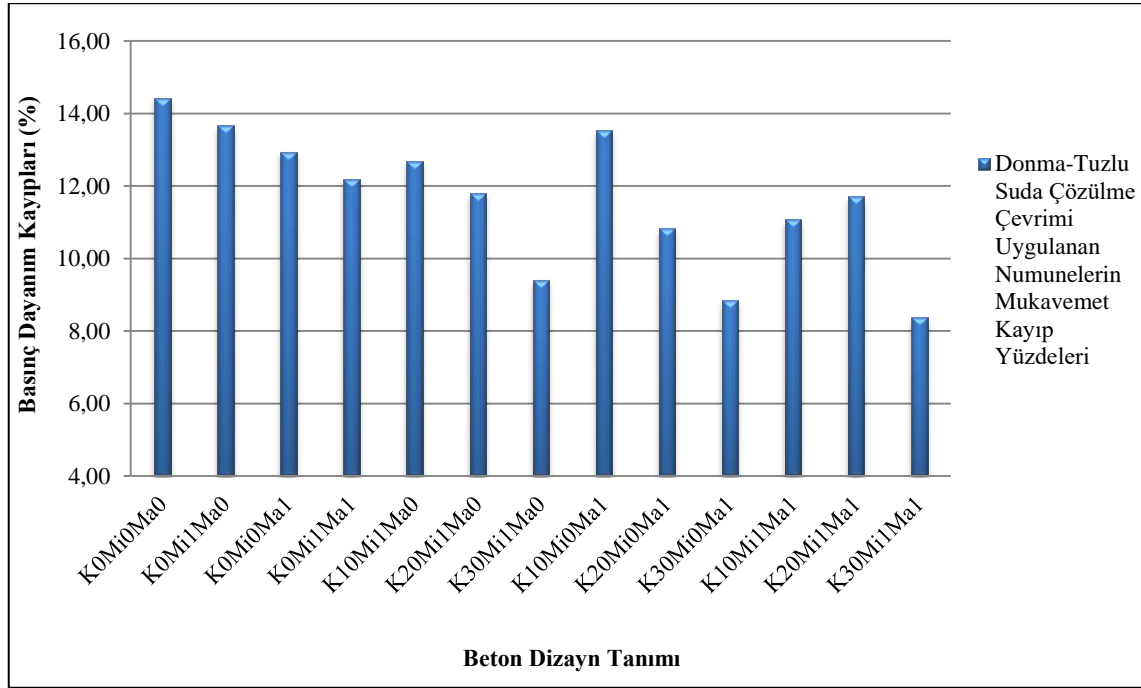
Şekil 5.11. Şahit numunelerin ve donma-tuzlu suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerin basınç mukavemetleri grafiği

Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerde meydana gelen basınç dayanım azalmaları Çizelge 5.16.'da hesaplanmıştır.

Çizelge 5.16. Donma-tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarının şahit numunelerin basınç dayanımlarına oranı ve dayanım kayıpları

Beton Dizayn Tanımı	Şahit Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Donma-Tuzlu Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Donma-Tuzlu Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanımlarının Şahit Numunelerin Basınç Dayanımlarına Oranı (%)	Donma-Tuzlu Suda Çözülme Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	52,38	44,82	85,57	14,43
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	55,61	48,01	86,33	13,67
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	56,35	49,06	87,06	12,94
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	51,90	45,58	87,82	12,18
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	55,81	48,74	87,33	12,67
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	56,42	49,77	88,21	11,79
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	53,64	48,59	90,59	9,41
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	56,30	48,68	86,47	13,53
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	54,97	49,01	89,16	10,84
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	53,37	48,64	91,14	8,86
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	53,23	47,34	88,93	11,07
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	52,75	46,57	88,28	11,72
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	50,16	45,96	91,63	8,37

Şahit numunelere kıyasla, donma ve tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanım kayıp yüzdeleri Şekil 5.12.'de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Donma-tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıp yüzdeleri grafiği

Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri uygulanan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıpları incelendiğinde, K₀Mi₀Ma₀ dizaynının şahit numunesine kıyasla %14,43 dayanım kaybına uğradığı görülmüştür. Tüm dizaynlar için, donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonunda RB dizaynının en yüksek dayanım kaybına uğradığı saptanmıştır. K₀Mi₁Ma₀ dizaynı %13,67 oranında, K₀Mi₀Ma₁ dizaynı ise %12,94 oranında şahit numunelere kıyasla dayanım kayıplarına uğramışlardır. K₀Mi₁Ma₁ dizaynı için ise dayanım kayıp yüzdesi şahit numunesine oranla %12,18 değerinde bulunmuştur.

Uçucu kül ikamesiz betonlar için tekil ve hibrit lif kullanımı, donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonunda meydana gelen numune basınç dayanım kayıplarını olumlu yönde etkilemiştir ve bu etki en çok hibrit lifli betonlarda ön plana çıkmıştır. Uçucu kül ikamesiz dizaynlar içerisinde en az mukavemet kaybına uğrayan dizaynın K₀Mi₁Ma₁ olduğu görülmektedir.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynı için %10, %20 ve %30 uçucu kül ikamesi ile birlikte, ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonucu meydana gelen basınç dayanım kayıplarında azalmalar gözlenmiştir. Tekil olarak mikro fiberlerin kullanıldığı betonlar içerisinde en az dayanım kaybı %9,41 seviyesinde olmak üzere $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında yaşanmıştır.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynına ait numunelerde, donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri ile yaşanan %12,94 seviyesindeki dayanım kaybı, %10 uçucu kül ikamesi ile birlikte kısmen artmıştır. $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında görülen dayanım kaybı %13,53 seviyesinde olmuştur. Tekil olarak makro fiberlerin kullanıldığı betonlar içerisinde %30 uçucu kül ikamesi ile birlikte, donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri ile yaşanan dayanım kayıpları %8,86 seviyesinde olmak üzere en düşük seviyesine ulaşmıştır.

Hibrit lifli betonların donma ve tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz kalması neticesinde yaşadıkları dayanım kayıpları %30 uçucu kül ikamesi ile birlikte minimum seviyeye inmiştir. $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynının dayanım kayıp yüzdesi %8,37 seviyesinde bulunmuştur.

Uçucu kül ikame ettirilen tüm dizaynlar incelendiğinde, hibrit lifli dizaynlar hariç, betonların donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonundaki dayanım kayıplarında uçucu kül ikame oranlarındaki artışlara bağlı olarak azalmaların meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Hibrit lifli betonlar içerisinde, $K_{10}Mi_1Ma_1$ dizaynında görülen dayanım kaybı, $K_{20}Mi_1Ma_1$ dizaynına kıyasla kısmen de olsa azalmıştır.

Tüm dizaynların donma ve tuzlu suda çözülme çevrimlerine maruz bırakılması neticesinde, en yüksek basınç dayanım kaybı RB dizaynında, en düşük basınç dayanım kaybı $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında görülmüştür. RB dizaynına göre diğer dizaynların basınç dayanım kayıplarında ciddi iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Tüm dizaynlar için donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri neticesinde yaşanan dayanım kayıpları, donma ve normal suda çözülme çevrimleri neticesinde yaşanan dayanım kayıplarına kıyasla artmıştır. Bunun artışın nedeni, tuzlu suyun beton numune çeperlerindeki çimento bağını daha fazla zayıflatmasına bağlanabilir.

Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonunda, fiber donatılı beton numunelerinin RB numunelerine kıyasla daha az aşınmaya ve kabuk atmaya maruz kaldığı görülmüştür. Basınç dayanım testi esnasında RB numunelerinde koparak ayrılan parçaların olduğu, diğer dizaynlara ait numunelerde ise bu kopmaların kısmi düzeyde yaşandığı gözlemlenmiştir.

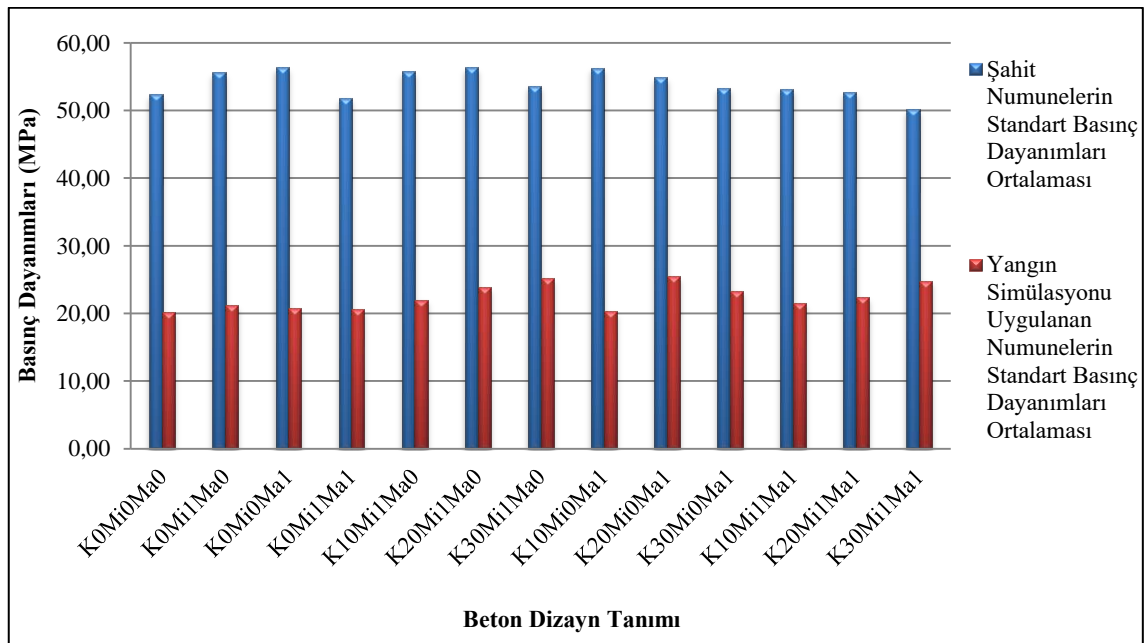
5.11. Sertleşmiş Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Yangın Dayanım Tayini Deney Sonuçları ve Tartışmalar

Yangın simülasyonu için 600 °C ile 850 °C sıcaklık aralığına 30 dakika boyunca maruz bırakılan numunelere uygulanan standart basınç dayanım tayini deney sonuçları Çizelge 5.17.'de tablo olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.17. Yangın simülasyonu uygulanan numunelerin standart basınç dayanım tayini deney sonuçları

Beton Karışım Tanımı	Numune Kırılma Yüğü (kN)	Numune Kırılma Gerilmeleri (MPa)	Numune Kırılma Gerilmeleri Ortalaması (MPa)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	199,3	19,93	20,13
	201,3	20,13	
	203,2	20,32	
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	212,5	21,25	21,17
	215,8	21,58	
	206,9	20,69	
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	210,9	21,09	20,69
	201,2	20,12	
	208,5	20,85	
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	206,6	20,66	20,56
	212,7	21,27	
	197,4	19,74	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	214,0	21,40	22,02
	222,3	22,23	
	224,2	22,42	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	233,1	23,31	23,84
	249,8	24,98	
	232,2	23,22	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	240,8	24,08	25,22
	255,5	25,55	
	260,3	26,03	
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	202,1	20,21	20,32
	213,2	21,32	
	194,3	19,43	
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	248,3	24,83	25,49
	267,2	26,72	
	249,3	24,93	
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	220,7	22,07	23,36
	243,6	24,36	
	236,4	23,64	
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	209,1	20,91	21,57
	223,2	22,32	
	214,8	21,48	
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	228,6	22,86	22,35
	231,7	23,17	
	210,3	21,03	
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	238,1	23,81	24,84
	250,5	25,05	
	256,7	25,67	

Şahit numuneler ile yangın simülasyonuna maruz bırakılan numunelerin standart basınç mukavemetleri Şekil 5.13.'te grafik üzerinde gösterilmiştir.



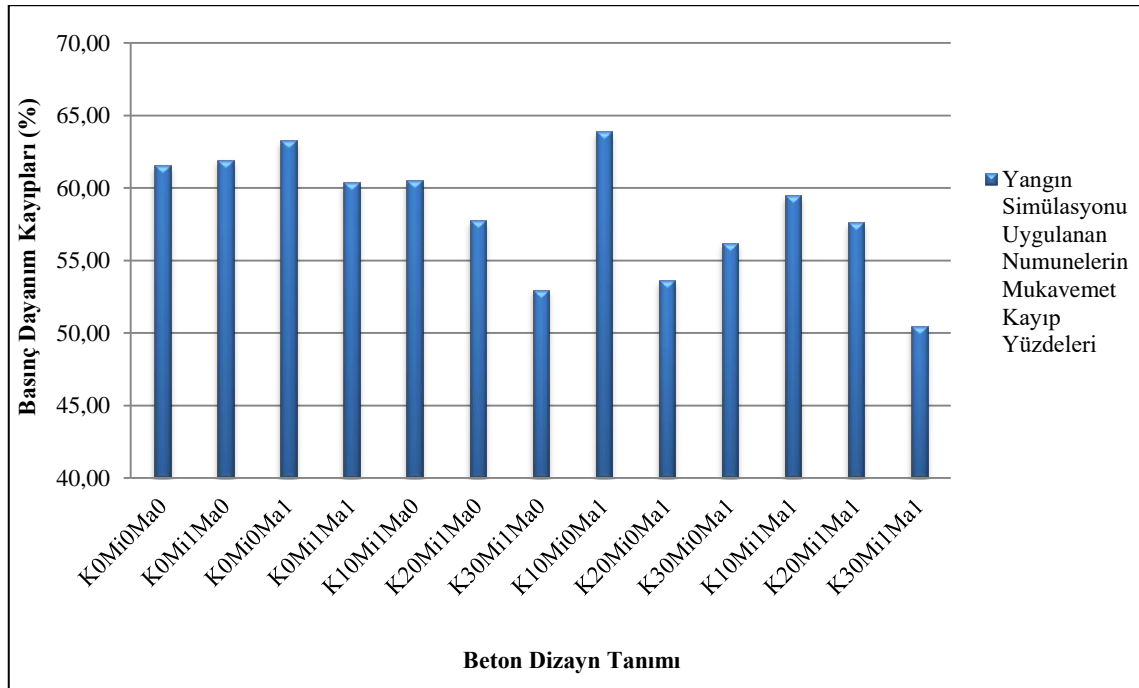
Şekil 5.13. Şahit numunelerin ve yangın simülasyonu uygulanan numunelerin standart basınç mukavemetleri grafiği

Şahit numunelere kıyasla, yangın simülasyonu uygulanan numunelerde meydana gelen basınç dayanım azalmaları yüzdesi Çizelge 5.18.'de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.18. Yangın simülasyonuna maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarının şahit numunelerin basınç dayanımlarına oranı ve dayanım kayıpları

Beton Dizayn Tanımı	Şahit Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Yangın Simülasyonu Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Ortalamaları (MPa)	Yangın Simülasyonu Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanımlarının Şahit Numunelerin Basınç Dayanımlarına Oranı (%)	Yangın Simülasyonu Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları (%)
K ₀ Mi ₀ Ma ₀	52,38	20,13	38,43	61,57
K ₀ Mi ₁ Ma ₀	55,61	21,17	38,07	61,93
K ₀ Mi ₀ Ma ₁	56,35	20,69	36,72	63,28
K ₀ Mi ₁ Ma ₁	51,90	20,56	39,61	60,39
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₀	55,81	22,02	39,46	60,54
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₀	56,42	23,84	42,25	57,75
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₀	53,64	25,22	47,02	52,98
K ₁₀ Mi ₀ Ma ₁	56,30	20,32	36,09	63,91
K ₂₀ Mi ₀ Ma ₁	54,97	25,49	46,37	53,63
K ₃₀ Mi ₀ Ma ₁	53,37	23,36	43,77	56,23
K ₁₀ Mi ₁ Ma ₁	53,23	21,57	40,52	59,48
K ₂₀ Mi ₁ Ma ₁	52,75	22,35	42,37	57,63
K ₃₀ Mi ₁ Ma ₁	50,16	24,84	49,52	50,48

Şahit numuneler baz alındığında, yangın simülasyonu uygulanan numunelerde meydana gelen basınç dayanım kayıp yüzdeleri Şekil 5.14.'te grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 5.14. Yangın simülasyonuna maruz bırakılan numunelerde meydana gelen mukavemet kayıp yüzdeleri grafiği

Yangın simülasyonu uygulanan numunelerin şahit numunelerine oranla basınç dayanım kayıpları incelendiğinde, RB dizaynında %61,57 seviyesinde, $K_0Mi_1Ma_0$ dizaynında %61,93 seviyesinde, $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynında %63,28 seviyesinde ve $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynında %60,39 seviyesinde dayanım kayıpları olduğu saptanmıştır.

Uçucu kül ikamesiz betonların tümü için ciddi derecede basınç dayanım kayıpları söz konusu olmuş ve fiber liflerin betonların yangın dayanımları üzerinde herhangi bir etkisi görülmemiştir. Yine de uçucu kül ikamesiz betonlar içerisinde kısmi düzeyde de olsa numunelere uygulanan yangın simülasyonu sonunda en az dayanım kaybı $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynında yaşanmıştır.

RB dizaynı ile uçucu kül ikamesiz tekil mikro lifli betonların yangın dayanım kayıpları eşit düzeyde bulunmuştur. Uçucu kül ikamesiz tekil makro lifli betonların yangın dayanım kayıplarında ise RB dizaynına göre kısmi bir artışın olduğu görülmüştür.

$K_0Mi_1Ma_0$ dizaynı için yangın simülasyonu sonunda yaşanan dayanım kayıplarında %10, %20 ve %30 oranlarındaki uçucu kül ikameleri ile birlikte ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak iyileşmelerin görüldüğü sonucuna ulaşılmıştır. $K_{10}Mi_1Ma_0$ dizaynında %60,54 değerinde, $K_{20}Mi_1Ma_0$ dizaynında %57,75 değerinde ve $K_{30}Mi_1Ma_0$ dizaynında ise %52,98 değerinde şahit numunelere oranla dayanım kayıpları yaşanmıştır.

$K_0Mi_0Ma_1$ dizaynı için yangın simülasyonu dayanım kayıplarında, %10 uçucu kül ikamesi herhangi bir farklılık ortaya çıkarmamıştır. $K_0Mi_0Ma_1$ dizaynına kıyasla $K_{20}Mi_0Ma_1$ ve $K_{30}Mi_0Ma_1$ dizaynlarının yangın dayanımlarında iyileşmelerin olduğu gözlenmiş, en az dayanım kaybı ise $K_{20}Mi_0Ma_1$ dizaynında %53,63 seviyesinde yaşanmıştır.

Hibrit lifli beton dizaynlarının yangın dayanım kayıplarına bakıldığında, en az dayanım kaybı $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında görülmüştür. $K_0Mi_1Ma_1$ dizaynına kıyasla %10, %20 ve %30 uçucu kül ikame ettirilen hibrit lifli dizaynların yangın dayanım kayıplarında iyileşmelerin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tüm dizaynların yangın simülasyonu sonunda yaşadıkları basınç dayanım kayıplarına bakıldığında, en fazla dayanım kaybı $K_{10}Mi_0Ma_1$ dizaynında, en az dayanım kaybı ise $K_{30}Mi_1Ma_1$ dizaynında ortaya çıkmıştır. Uçucu kül ikame ettirilen dizaynlar için, tekil makro lifli dizaynlar hariç, uçucu kül ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak numunelerin yangın dayanım kayıplarında azalmaların yaşandığı görülmüştür. Betonların yangın dayanım kayıpları üzerinde makro yada mikro liflerin herhangi bir etkisinin olduğu saptanamamıştır.

Beton numunelerine uygulanan yangın simülasyonu neticesinde, 850 °C sıcaklık değerlerine ulaşan yangın etkisine maruz kalmış betonların basınç dayanımlarında %50 ve daha fazla oranda kayıpların yaşanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Beton numunelerine uygulanan yangın simülasyonu sonunda, numune yüzeylerinde derin çatlaklar oluşmuş ve dökülmeler meydana gelmiştir. Beton numuneleri yangın işlemi sonunda açık gri bir renk almıştır. Yangın simülasyonuna maruz kalmış betonlara uygulanan standart basınç dayanım testi esnasında, numunelerde yüksek oranlarda dökülmelerin ve parça kopmalarının yaşandığı gözlenmiştir. Basınç dayanım testi sonunda arta kalan birkaç numune su içerisine konulmuş ve bu numunelerin su içerisinde tepkimeye girdikleri, suya kaynama hareketi yaptırarak yüksek sıcaklığa ulaştıkları ve tamamen dağıldıkları tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmanın bu bölümünde elde edilen tüm deneysel sonuçlar genelleme yapılarak özetlenmiştir. Ayrıca, sonuçlar hakkında değerlendirme yapılarak önerilerde bulunulmuştur.

6.1. Sonuçlar

Beton karışım dizaynlarına ait deneysel çalışma sonuçları değerlendirildiğinde;

Betonların, akışkanlaştırıcı/çimento oranı sabit tutulduğundan, çimento dozajlarındaki farklılıklardan dolayı slump değerlerinde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Numune ağırlıkları ile basınç dayanım değerleri arasında herhangi bir bağıntı kurulamamıştır. Çalışma kapsamında belirlenen agrega gradasyonuna bağlı olarak optimum çimento dozajının 340 kg/m^3 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Fiber donatı kullanım dozajlarının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma sonuçları değerlendirildiğinde;

Mikro ve makro fiber donatı kullanımı neticesinde, kullanım miktarlarındaki artışa bağlı olarak taze beton slump değerlerinde düşüşlerin yaşandığı gözlenmiştir. Farklı miktarlarda mikro ve makro fiber içeren beton numunelerinin ağırlıkları ile basınç dayanımları arasında herhangi bir bağıntı bulunamamıştır. Mikro fiber donatılı beton dizaynları için maksimum basınç dayanımı $1,4 \text{ kg/m}^3$ dozajında lif kullanımı ile, makro fiber donatılı beton dizaynları için maksimum basınç dayanımı $7,0 \text{ kg/m}^3$ dozajında lif kullanımı ile yakalanmıştır.

Mikro ve makro sentetik fiber donatılı, uçucu kül ikameli betonlara ait deneysel çalışma sonuçları değerlendirildiğinde;

Taze beton karışımları üzerinde yapılan birim hacim ağırlık tayini deney sonuçlarına göre, mikro ve makro lif kullanımının betonların sıkıştırılabilme özelliğini fazla etkilemediği fakat uçucu kül ikame oranındaki artışa bağlı olarak betonların sıkıştırılabilme özelliğinde düşüşlerin yaşandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Taze beton karışımları üzerinde yapılan slump tayini deney sonuçlarına göre, uçucu kül ikamesiz betonlara bakıldığında hibrit lifli beton dizaynında 5 cm çökme, makro fiber donatılı beton dizaynında 6 cm çökme ve mikro fiber donatılı beton dizaynında 8 cm çökme değeri elde edilmiştir.

Uçucu kül ikameli beton dizaynlarında ise uçucu kül ikame oranı arttıkça slump değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Tüm dizaynlar içerisinde en yüksek slump değeri fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynında 12 cm olarak, en düşük slump değeri ise hibrit lifli ve %30 oranında uçucu kül ikameli beton dizaynında 2 cm olarak ölçülmüştür. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla diğer tüm dizaynların slump değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan su emme tayini deney sonuçlarına göre, fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla, tekil olarak mikro ya da makro fiber donatı kullanımı betonların su emme değerlerinde düşüşlerin yaşanmasına, hibrit lif kullanımı ise, artışların yaşanmasına neden olmuştur. Uçucu kül ikameli betonlar için, uçucu kül ikame oranındaki artışlara bağlı olarak betonların su emme değerleri de artmıştır. Tüm dizaynlar içerisinde en yüksek su emme değeri %44,78 olarak hibrit lifli ve %30 oranında uçucu kül ikameli beton dizaynında, en düşük su emme değeri ise %37,68 olarak mikro fiber donatılı ve %10 uçucu kül ikameli beton dizaynında görülmüştür. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla, uçucu kül ikamesiz mikro ve makro fiberlerin kullanıldığı beton dizaynlarının, %10 oranında uçucu kül ikameli mikro ve makro fiberlerin kullanıldığı beton dizaynlarının, %20 oranında uçucu kül ikameli mikro ve makro fiberlerin kullanıldığı beton dizaynlarının su emme oranlarında azalmaların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer dizaynlarda ise, fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla su emme oranlarında artışlar yaşanmıştır.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçlarına göre, 28 günlük dayanımlar göz önüne alındığında mikro ve makro fiberler beton basınç dayanımlarında olumlu etkiler ortaya çıkarmıştır. Betonlarda hibrit lif kullanımı ise, basınç dayanımı üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir. Uçucu kül ikameli betonlarda, uçucu kül ikame oranı arttıkça genel olarak beton basınç dayanımlarında azalmaların yaşandığı görülmüştür. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla en fazla basınç dayanım artışları, mikro fiber donatılı betonlarda %10 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %7,51 değerinde, makro fiber donatılı betonlarda %10 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %7,82 değerinde, hibrit lifli betonlarda ise %20 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %1,83 değerinde meydana gelmiştir. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına göre en fazla basınç dayanım azalması hibrit lifli ve %30 oranında uçucu kül ikameli beton dizaynında olmak üzere %3,08 değerinde gözlenmiştir.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan kiriş eğilme dayanım tayini deney sonuçlarına göre, beton dizaynlarında mikro ve makro fiberlerin tekil veya hibrit olarak kullanımı kiriş eğilme dayanımlarını ciddi oranda artırmıştır. En fazla dayanım artışı makro fiberlerin kullanıldığı dizaynlarda yaşanmış, hibrit lifli betonlarda yaşanan dayanım artışı ise daha kısmi düzeyde kalmıştır. Uçucu kül ikame ettirilen betonlarda, uçucu kül ikame oranı arttıkça kiriş eğilme dayanımlarında genel olarak azalmalar gözlenmiştir. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla en fazla kiriş eğilme dayanım artışları, mikro fiber donatılı betonlarda %20 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %10,86 değerinde, makro fiber donatılı betonlarda %10 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %14,75 değerinde, hibrit lifli betonlarda ise %10 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %8,10 değerinde meydana gelmiştir. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına göre diğer beton dizaynlarının hiçbirinde herhangi bir eğilme dayanımı azalması görülmemiştir.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan donma ve normal suda çözülme dayanım tayini deney sonuçlarına göre, dizaynlarda mikro ve makro lif kullanımı basınç dayanım kayıpları üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir. Hibrit lif kullanılan betonlarda ise, donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonunda tekil lif kullanılan betonlara göre yaklaşık %2 seviyelerinde daha az dayanım kayıplarının yaşandığı söylenebilir. Uçucu kül ikame ettirilen beton tasarımlarına bakıldığında, ikame oranlarındaki artışa bağlı olarak betonlarda görülen basınç dayanım kayıp yüzdelerinde azalmalar meydana gelmiştir. Donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonunda fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynında %8,76 değerinde basınç dayanım kaybı görülmüş, mikro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %6,21 seviyesinde, makro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %5,92 seviyesinde, hibrit lifli betonlarda ise en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %4,23 seviyesinde yaşanmıştır. Fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynına kıyasla diğer tüm dizaynlarda donma ve normal suda çözülme çevrimleri sonunda yaşanan basınç dayanım kayıp yüzdelerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Beton dizaynlarında hem hibrit lif kullanımı hem de uçucu kül ikamesi basınç dayanım kayıplarında gözle görülür derecede azalmalar meydana getirmiştir. Uçucu kül ikame oranı %30 seviyesine çıktığında beton dizaynlarında yaşanan basınç dayanım kayıp yüzdeleri de minimum seviyelerini görmüştür.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan donma ve tuzlu suda çözülme dayanım tayini deney sonuçlarına göre, betonlarda kullanılan mikro ve makro lifler basınç dayanım kayıplarında anlamlı bir değişim ortaya çıkarmamıştır. Hibrit lif kullanılan betonlarda ise, donma ve tuzlu suda çözülme uygulanan numunelerin dayanım kayıp yüzdelerinde azalmalar meydana getirmiştir. Uçucu kül ikame ettirilen betonlar için, ikame oranı arttıkça betonlarda yaşanan basınç dayanım kayıp yüzdelerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Donma ve tuzlu suda çözülme çevrimleri sonunda fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynında %14,43 değerinde basınç dayanım kaybı görülmüş, mikro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %9,41 seviyesinde, makro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %8,86 seviyesinde, hibrit lifli betonlarda ise en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %8,37 seviyesinde yaşanmıştır. Donma ve normal suda çözülme dayanım tayini deney sonuçları ile donma ve tuzlu suda çözülme dayanım tayini deney sonuçlarına ait yorumlar birbirleri ile genel anlamda uyumlu bulunmuş fakat, tuzlu suda çözülme neticesinde beton numunelerinde yaşanan dayanım kayıp yüzdelerinin ciddi oranda arttığı görülmüştür. Tuzlu su, beton yüzeylerindeki çimento bağını yüksek oranda zayıflatmıştır.

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan yangın dayanım tayini deney sonuçlarına göre, mikro veya makro fiber donatıların beton dizaynlarında tekil ya da hibrit olarak kullanılması neticesinde betonların yangın dayanımları üzerinde herhangi bir etkisi görülmemiştir. Uçucu kül ikame ettirilen betonlarda ise, numunelere uygulanan yangın simülasyonu sonunda yaşanan dayanım kayıp yüzdelerinde, genel itibari ile ikame oranındaki artışa bağlı olarak azalmaların meydana gelmesi dikkat çekici olmuştur. Yangın simülasyonu tatbiki neticesinde fiber donatısız ve uçucu kül ikamesiz beton dizaynında %61,57 değerinde basınç dayanım kaybı görülmüş, mikro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %52,98 seviyesinde, makro fiber donatılı betonlarda en az kayıp %20 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %53,63 seviyesinde, hibrit lifli betonlarda ise en az kayıp %30 oranında uçucu kül ikamesi ile birlikte %50,48 seviyesinde yaşanmıştır. Numunelere uygulanan yangın simülasyonu sonunda yaşanan dayanım kayıp yüzdelerine bakıldığında, 850 °C sıcaklıkları bulabilen yangın ortamlarında betonların dayanımlarının yarısından fazlasını kaybedebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6.2. Öneriler

Çalışma kapsamında, mikro ve makro sentetik fiber donatı katkılı ve uçucu kül ikameli beton dizaynlarında sabit değerde tutulan su/bağlayıcı oranı artırılarak, üretilen betonların daha iyi bir işlenebilirliğe sahip olması sağlanabilir.

Beton karışımlarında sabit değerde alınan akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı değiştirilerek, mikro ve makro sentetik donatı kullanımı ile uçucu kül ikamesinin betonlar üzerindeki etkileri tekrardan araştırılmalıdır.

Beton dizaynlarında kullanılan mikro ve makro sentetik fiber donatı oranları azaltıp uçucu kül ikame oranları da artırılarak farklı bir çalışma öne sürülebilir. Beton karışımlarında mikro ve makro sentetik fiber donatıların kullanılması ile uçucu kül ikame ettirilmesi neticesinde taze beton slump değerlerinde yaşanan düşüşler, daha yüksek değerlerde akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak önlenabilir. Ayrıca, slump değerleri, daha yüksek su/bağlayıcı oranı kullanılarak iyileştirilebilir.

Uçucu kül ikamesi neticesinde beton numunelerinin su emme oranlarında yaşanan artışlar, farklı gradasyon eğrilerine sahip agregalarla giderilebilir. Beton dizaynlarında farklı granülometri eğrilerine sahip agrega karışımları tercih edilerek, uçucu kül ikamesi ile birlikte numune boşluk yapısında meydana gelecek değişim farklı bir çalışma ile araştırılmalıdır. Ayrıca, farklı oranlarda mikro ve makro sentetik fiber donatıların betonun boşluk yapısında ne tür etkiler göstereceği çalışma konusu olabilir.

Tüm beton dizaynları için yapılan standart basınç dayanım tayini deney sonuçlarına göre, betonlarda mikro ve makro fiber donatılar ile birlikte %30 oranına kadar uçucu kül ikamesinin kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Betonlarda, uçucu kül ikamesi ile birlikte ortaya çıkan bazı mekanik olumsuzlukların mikro ve makro sentetik fiber donatıların kullanılması ile önlenbilir olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç dayanımları incelendiğinde, mikro ve makro fiber lifli betonlarda %20 oranına kadar uçucu kül ikamesi ise genel olarak basınç dayanımlarında olumlu etkiler sergilemiştir.

Çalışma kapsamında yapılan kiriş eğilme dayanım tayini sonuçlarına göre mikro ve makro fiber donatılar ile birlikte %30 oranına kadar uçucu kül ikamesinin, beton eğilme dayanımları üzerinde olumlu etkiler sergilediği görülmüş, bu betonların düşük eğilme değerlerine maruz yapı elemanlarında kullanılabilir olduğu düşünülmüştür. Hibrit lifli dizaynlarda kullanılan mikro ve makro sentetik fiber donatı kullanım dozajları azaltılarak, hibrit lifli beton eğilme dayanımları tekrardan incelenmelidir.

Donma ve çözülme etkisi altında bulunan yapı elemanlarında ise hibrit lifli ve %30 oranına kadar uçucu kül ikameli betonların daha iyi performans sergileyeceği söylenebilir. Yol üst yapısı, köprü döşemeleri, köprü bordürleri gibi dış etkilere maruz betonlarda mikro ve makro lifler ile birlikte %30 oranında uçucu kül ikamesinin kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Yangın riski taşıyan yapılarda, %30 oranında uçucu kül ikame ettirilmiş betonlar tercih edilebilir. Fakat sıcaklık değerleri yüksek yangınlarda betonların basınç dayanımlarının yarısını kaybettiği göz ardı edilmemelidir. Çalışma kapsamında beton numuneler üzerinde yangın simülasyonu yapılmıştır. Daha sonra soğuyan numuneler basınç dayanım testine tabi tutulmuş ve deney sonunda arta kalan birkaç numune su içerisine daldırılmıştır. Su içerisine daldırılan numunelerin su ile tepkimeye girdiği görülmüştür. Beton dizaynlarında kullanılan agrega kireçtaşı kökenlidir ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra suya daldırıldığında sönmemiş kireç tepkimesine benzer bir tepkime göstermiştir. Tünel yapıları gibi yüksek sıcaklık değerlerinde yangın riski taşıyan yapı elemanlarında, kireçtaşı kökenli agregaların kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık değerleri ortaya çıkaran yangın riskine maruz yapılarda kireçtaşı kökenli agregaların kullanıldığı betonların tercih edilmesi, olası bir yangın sonrası söndürme işlemi sırasında, çalışma kapsamında şahit olunan tepkimenin aynısı ile karşılaşılabileceği anlamı taşımaktadır. Bu tür yapılarda yüksek sıcaklıklara dayanıklı agregalardan üretilmiş betonların tercih edilmesi ya da yapı elemanlarının yangına karşı izole edilmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışma tümüyle değerlendirildiğinde, mikro ve makro fiber donatıların betonların mekanik özellikleri üzerinde, uçucu kül ikamesinin ise betonların durabilitesi üzerinde daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Uçucu küllerin çevreye verdiği zararlı etkilerde göz önünde bulundurulduğunda betonlarda çimento yerine ikame ettirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeplerden dolayı mikro ve makro fiber içerikli betonlarda %30 oranına kadar uçucu kül ikame ettirilebileceği ve bunun hem çevresel hem de yapısal bazda birçok avantaj getireceği düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında tercih edilen mikro ve makro sentetik fiber donatı kullanım dozajları değiştirilerek ve uçucu kül ikame oranı %30 seviyesinin üzerine çıkarılarak farklı beton dizaynları yapılabilir. Mikro ve makro sentetik fiber donatı kullanılan aynı zamanda yüksek oranlarda uçucu kül ikame ettirilen bu betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi farklı bir tez çalışma konusu olabilir.

KAYNAKLAR

- Agar, S., 2009, Farklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Durabiliteye Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Akça, K. R., Çakır, Ö. ve İpek, M., 2015, Makro-Sentetik Lif Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özellikleri, *9. Ulusal Beton Kongresi*, Antalya, 323-332.
- Akyüncü, V., 2012, F ve C Tipi Uçucu Küllerin Çimento ile İkame Edilmesiyle Üretilen Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Karşılaştırılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- ASTM C666 / C666M-15, 2015, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *ASTM International*, West Conshohocken.
- Babafemi, A. J., 2015, Tensile Creep of Cracked Macro Synthetic Fibre Reinforced Concrete, Ph. D. Thesis, *Stellenbosch University*, South Africa.
- Bakır, Y., 2014, Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Dayanım Özelliklerine Kür Şartlarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Banthia, N. and Yan, C., 2000, Shrinkage Cracking in Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, V. 97, No. 4, 432-437.
- Boğazkesen, K. K., 2011, PVA Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bozkurt, H. ve Karakurt, C., 2016, Çelik Lif Katkılı Beton Yol Kaplamalarının Özellikleri, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (2), 617-624.
- Bölükbaş, Y., Yıldız, S. ve Keleştemur, O., 2010, Cam Elyaf Lif Katkısının Betonun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara, 99-101.
- Can, Ö., Durmuş, G., Subaşı, S., Yıldız, K. ve Arslan, M., 2009, Lif Katkılı Betonların Aşınma Direnci Üzerindeki Etkileri, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 2125.
- Çakır, C., 2013, Makrosentetik ve Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Çivici, F. ve Güngör, E., 2016, Karma Lifli Betonların Tokluk Açısından Değerlendirilmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7 (3), 365-376.

- Delikurt, B. C., 2014, Sugözü Termik Santrali Uçucu Külünün Betonun Dayanım ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.
- Erol, Ü., 2017, Özellikleri Nano Boyutta Modifiye Edilmiş Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Esen, Y., 2003, Poliakrilonitril Lifi Takviyeli Betonlarda Süneklik ve Rötire Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 1 (3), 108-112.
- Fantcho, A. F., 2017, Effect of Fly Ash in Mechanical Proprieties of Concrete Pavement, M. Sc. Thesis, *İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul.
- Fauzan, F., Ismail, F. A., Sandi, R. and Jauhari, Z. A., 2017, The Influence of Steel Fibers Extracted from Waste Tyre on Properties of Concrete Containing Fly Ash, *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, V. 7, No. 6, 2232-2236.
- Gödek, E., Keskinates, M., Felekoğlu, K. T. ve Felekoğlu, B., 2016, Metakaolin Katkılı Lifli Kompozitlerin Çoklu Çatlak Davranışını Geliştirmeye Yönelik Deneysel Çalışmalar, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 54-63.
- Gülnaz, Y., 2017, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Mineral Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Günaydın, O. ve Güçlüer, K., 2018, Bazalt Lifi Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5 (2), 416-424.
- Güngör, E., 2013, Karma Lifli Betonların Özelliklerinin Deneysel İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Gürbüz, E., 2009, C Tipi Uçucu Küllerin Etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Hasan, M. J., Afroz, M. and Mahmud, H. M. I., 2011, An Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Macro Synthetic Fiber Reinforced Concrete, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, V. 11, No. 3, 18-23.
- İnan, N. ve İnan, S., 1987, Tecer Kireçtaşı Formasyonunun Stratigrafik Tanımlanması, *Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Seri A-Yerbilimleri*, 4 (1), 12-22.

- Joseph, D. R. and John, L., 2017, Strength Assessment of Fly Ash Modified Microbial Concrete, *International Journal of Engineering Science and Computing*, V. 7, No. 4, 10599-10601.
- Joshi, N. D., Patil, P. N. and Kshirsagar, D. Y., 2017, A Study on Strength of Fly Ash Based Concrete by Using Glass Fibres and Polypropylene Fibres, *Journal of Ceramics and Concrete Sciences*, V. 2, No. 2, 1-10.
- Kandemir, H., 2014, Farklı Mineral Bağlayıcı Bileşenlerin Betonun Kalıcılığına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kandil, U., 2014, Uçucu Kül ve Silis Dumanı İçeren Betonların Geçirimlilik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Karabulut, M. Y., 2017, Sentetik Lifin Ultra Yüksek Dayanımlı Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Karahan, O., 2006, Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Karateke, S. K., 2009, F Tipi Uçucu Kül Kullanılmış Betonların Kül Etkinlik Katsayıları, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi-2013, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Kardeşler, A., 2005, Karışım Suyunda Bulunan Magnezyum Sülfat Tuzunun Uçucu Küllü Betonun Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kavas, T. ve Sabah, E., 2001, Sepiyolitinin Lif Takviyeli Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 194-199.
- Kaya, Ö., 2011, Self-Healing of High-Performance Fibre-Reinforced Cementitious Composites, M. Sc. Thesis, *İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul.
- Khiavi, F. E., 2017, Naylon Esaslı Liflerin Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- KordSAKratos, 2018, Kratos Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatıları, İstanbul, <http://www.kordsa.com/kratos/index.html>, [Ziyaret Tarihi: 21.12.2018].

- Korkut, F., Türkmenoğlu, Z. F., Taymuş, R. B. ve Güler, S., 2017, Çelik ve Sentetik Liflerin Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 560-570.
- Mutyılmaz, S., 2014, Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yol Betonu Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Öz, A., 2014, Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Hibrid Lifli Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Özbyay, E., 2016, Lif Türünün Betonların Yük-Deplasman Davranışı ve Donma-Çözülme Direncine Etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31 (1), 273-279.
- Özdemir, E., 2006, PÇ ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Özen, A., 2016, Influence of Water-Cement, Polymer-Cement and Fiber-Cement Ratios on Properties of Fiber Reinforced Mortars, M. Sc. Thesis, *İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul.
- Pektaş, M. R., 2015, Silindirle Sıkıştırılabilen Yol Betonlarının Kalıcılık Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik.
- Prabhu, V. and Rooby, J., 2018, Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam Using Fly Ash, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, V. 9, No. 1, 79-89.
- Rai, A. and Joshi, Y. P., 2014, Applications and Properties of Fibre Reinforced Concrete, *International Journal of Engineering Research and Applications*, V. 4, No. 5, 123-131.
- Richardson, A. E. and Landless, S., 2009, Synthetic Fibres and Steel Fibres in Concrete with Regard to Bond Strength and Toughness, *Built Environment Research Papers*, V. 2, No. 2, 128-140.
- Roesler, J. R., Altoubat, S. A., Lange, D. A., Rieder, K. A. and Ulrich, G. R., 2006, Effect of Synthetic Fibers on Structural Behavior of Concrete Slabs-on-Ground, *ACI Materials Journal*, V. 103, No. 1, 3-10.
- Ros, P. S., Vargas, J. R. M., Bossio, M. E. and Zerbino, R., 2016, Creep and Residual Properties of Cracked Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concretes, *Magazine of Concrete Research*, V. 68, No. 4, 197-207.

- Sarı, M., 2013, Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., 2013, Sika ViscoCrete-PC 15 Ürün Bilgi Föyü, *Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.*, İstanbul.
- Tangüner, R., 2007, Uçucu Küllü Düşük ve Yüksek Mukavemetli Betonların Elastiklik Modülünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Temiz, H., Binici, H. ve Zülkadiroğlu, Ö. F., 2009, Termik Santral Külü Katkılı Betonların Yol Kaplaması Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (1), 53-61.
- TS 802, 2016, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini - Eleme Yöntemi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 933-2, 1996, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Kısım 2: Tane Boyutu Dağılımı Tayini - Deneysel Eleme, Elek Göz Açıklıklarını Anma Büyüklükleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 933-3, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Bölüm 3: Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 933-9+A1, 2014, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini - Metilen Mavisini Deneyi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1008, 2003, Beton - Karma Suyu - Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2010, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Yöntemler, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1367-2, 2010, Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri için Deneyler - Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

- TS EN 12350-2, 2010, Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12350-6, 2010, Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-1, 2013, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-2, 2010, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğunun Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 13501-2, 2016, Yapı Mamulleri ve Yapı Elemanları - Yangın Sınıflandırması - Bölüm 2: Yangına Dayanım Deneylerinden Elde Edilen Veriler Kullanılarak Sınıflandırma (Havalandırma Tesisatları Hariç), *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Tulga, İ., 2017, Endüstriyel Atıkların Çimento Yerine İkame Edilmesi ile Oluşturulan Beton Numunelerinin Mühendislik Özelliklerindeki Değişimin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırklareli.
- Tuygun, C. S., 2002, Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Türk, K. ve Kına, C., 2017, Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (6), 671-678.
- Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (4), 513-520.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *TÇMB / AR-GE / Y03.03, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü*, Ankara.
- Yaprak, H., Şimşek, O. ve Öneş, A., 2004, Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 7 (4), 353-358.

- Yaşar, D., 2011, Naylon Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Yıldırım, S. T. ve Ekinci, C. E., 2006, Çelik, Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donma-Çözülme Etkilerinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (3), 359-366.
- Yılmaz, Y., 2014, Beton Üretiminde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılmasının Etkileri ve Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
- Yoo, S. W., Choi, Y. C. and Choi, W., 2017, Compression Behavior of Confined Columns with High-Volume Fly Ash Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, V. 2017, A. ID. 8208079, 1-11.
- Yörük, Ö., 2001, Katkılı ve Katkısız Çimentoların Betonun Durabilitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Adem AYDOĞDU
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : SİVAS / 1986
Telefon : 0 (530) 777 99 04
Faks : 0 (346) 258 50 94
E-Posta : aaydogdu3@kgm.gov.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Cumhuriyet Anadolu Lisesi, Merkez, SİVAS	2004
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği, Selçuklu, KONYA	2010
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği (Tezli), Selçuklu, KONYA	2019
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010-2012	Çelkon Çelik Konstrüksiyon	İnşaat Mühendisi
2013-....	Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü	Kontrol Şefi

UZMANLIK ALANI

Ulaştırma Yapıları, Çelik Yapılar, Betonarme Yapılar

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Sap2000, Etabs, İdecad, Sta4Cad, Xsteel, Autocad, MS Office

YAYINLAR

Aydoğdu, A., Keskin, Ü. S., Dere, Y. ve Kahramanlı, H., 2013, Fabrication and Construction of Steel Structures in Turkey, Common Errors and Remedies, *Proceedings of the 4th European Conference of Civil Engineering (ECCIE '13)*, Antalya, 65-72.

Aydoğdu, A. ve Keskin, Ü. S., 2019, Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı Kangal Termik Santrali Uçucu Kül İkameli Betonların Eğilme Dayanımlarının İrdelenmesi, *II. International Science and Academic Congress (INSAC '19)*, Konya, V. 2, 203-213. (Tez Çalışmasından Üretilmiştir.)