



**ÇİMENTO HARÇLARINDA OPTİMUM UÇUCU KÜL VE PVA LİF
ORANININ BELİRLENMESİ**

Muhammed Talha ÜNAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Muhammed Talha ÜNAL tarafından hazırlanan “ÇİMENTO HARÇLARINDA OPTİMUM UÇUCU KÜL VE PVA LİF ORANININ BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 09/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Talha ÜNAL

09/09/2020

ÇİMENTO HARÇLARINDA OPTİMUM UÇUCU KÜL VE PVA LİF ORANININ BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed Talha ÜNAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Lifin çimento harcı veya betonda kullanılması karışımın eğilme dayanımını artırırken, aşınma, kavitasyon ve dayanıklılık gibi özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Bu özelliklere, lifin tipinin, boyutunun, narinlik oranının (boy/çap), geometrisinin ve lif miktarının olumlu veya olumsuz etkisi vardır. Uçucu kül (UK), çimento ağırlığının %0, 10, 15 ve 20 oranları ile ikame edilmiştir. Uçucu kül ikameli karışımlara hacimce %1, %2 ve %3 PVA lif ilave edilerek, karışımlardan serbest rötire, eğilme dayanımı ve basınç dayanım numuneleri üretilmiştir. UK ikame oranları arttıkça yayılma çapı da artmıştır. UK karışımlarında PVA oranı arttıkça akışkanlık çapı azalmıştır. UK ikameli karışımlarda en düşük basınç dayanımı UK20'den elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı UK00 (kontrol) karışım numunesinde sağlanmıştır. PVA lifli karışımlarda, UK10 kodlu karışıma %1 PVA lif eklendiğinde, basınç dayanımı yaklaşık % 7 artarken, UK15 karışımında %12 artmıştır. UK ikameli karışımlara PVA lifi eklendiğinde eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. En yüksek değerlere %3 PVA lif katkılı, uçucu külün çimentoyla %10 ikame edildiği karışım sahip olmuştur. Harçlarda lif oranı ile boy değişimi arasında ters bir ilişki söz konusudur. Yani lif miktarı arttıkça rötire azalmaktadır.

Bilim Kodu : 91127
Anahtar Kelimeler : PVA lif, Uçucu kül, Çimento harcı, Basınç dayanımı
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

DETERMINATION OF OPTIMUM FLY ASH AND PVA FIBER RATIO IN CEMENT MORTARS

(M.Sc. Thesis)

Muhammed Talha ÜNAL

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

While the use of fiber in cement mortar or concrete increases the flexural strength of the mixture, it significantly improves its properties such as abrasion, cavitation and durability. These properties have a positive or negative effect by the fiber type, size, slenderness ratio (height / diameter), geometry and fiber amount. Fly ash (FA) was substituted with 0, 10, 15 and 20% ratios of cement weight. Free shrinkage, flexural strength and compressive strength samples were produced with these fiber mixtures by adding 1%, 2% and 3% PVA fiber by volume to the fly ash substituted mixtures. As the FA substitution rates increased, the flowability diameter increased. As the PVA ratio increases in FA mixtures, the flowability diameter has decreased. While the lowest compressive strength is obtained from UK20 in FA substituted mixtures, the highest compressive strength is provided in the UK00 (control) mixture sample. In PVA fiber mixtures, when 1% PVA fiber was added to the UK10 coded mixture, the compressive strength increased by about 7%, while the UK15 mixture increased by 12%. When PVA fiber is added to FA substituted mixtures, it is seen that its flexural strength increases. The highest values had a mixture of 10% fly ash substituted with cement and added 3% PVA fiber. In mortars, there is an inverse relationship between fiber ratio and shrinkage. In other words, as the amount of fiber increases, the shrinkage decreases.

Science Code : 91127

Key Words : Cement mortar, Fly ash, PVA fiber, Compressive strength

Page Number : 73

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan çok değerli hocam Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e, deneysel çalışmalarına yaptıkları ürün desteklerinden dolayı Sika firmasına ve özellikle bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım çok değerli Sayın Hazım ÜLGEN'e, deneysel çalışmalarımda göstermiş oldukları yardım ve destekleri dolayısıyla Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarı teknisyeni Osman AYDIN'a, bu çalışmanın ortaya çıkması için her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan babam Bünyamin ÜNAL'a ve çok sevgili AİLEM'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Çimento.....	5
2.2. Uçucu Kül	5
2.2.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	8
2.2.2. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik yapısı.....	8
2.2.3. Mineral katkılar ve uçucu kül takviyeli betonların özellikleri	9
2.3. Silis Kumu	11
2.4. Kimyasal Katkılar	11
2.5. Su	12
2.6. Beton ve Harçlarda Kullanılan Lifler	12
2.7. Lif Özelliklerinin Karışıma Olan Etkisi.....	14
2.8. Değişik Türlerdeki Liflerin Betona Etkisi	15
2.9. Rötire ve Rötire Çeşitleri	18
3. MATERYAL VE METOD	23
3.1. Materyal.....	23

	Sayfa
3.1.1. Çimento ve karışım suyu	23
3.1.2. PVA lif	23
3.1.3. Kimyasal katkı maddesi	24
3.1.4. Uçucu kül	25
3.1.5. Silis kumu.....	25
3.2. Metot.....	26
3.2.1. Karışım kodlarının belirlenmesi.....	26
3.2.2. Numune boyutları ve şekilleri	27
3.2.3. Üretimde izlenen sıra.....	27
3.3. Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	28
3.3.1. Yayılma deneyi	28
3.3.2. Basınç dayanım deneyi.....	29
3.3.3. Eğilme dayanım deneyi	29
3.3.4. Serbest rötre deneyi	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Yayılma Özelliği.....	33
4.2. Basınç Dayanım Özelliği	35
4.3. Eğilme Dayanım Özelliği	43
4.4. Serbest Rötre Özelliği.....	49
4.5. Bulguların İstatistiksel Değerlendirmesi	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Organik ve inorganik mineral katkıları.....	10
Çizelge 2.2. Kimyasal katkı tipleri	12
Çizelge 2.3. Farklı çeşitteki liflerin fiziksel özellikleri.....	13
Çizelge 2.4. Polimerik lifler ve mekanik özellikleri	14
Çizelge 2.5. Farklı liflerin özellikleri.....	16
Çizelge 3.1. Çimento, uçucu kül ve silis kumuna ait teknik özellikler.....	24
Çizelge 3.2. Kimyasal katkının teknik özellikleri.....	25
Çizelge 3.3. Araştırmada kullanılan malzemelerin karışım miktarları	27
Çizelge 4.1. Yayılma tablası deney sonuçları	33
Çizelge 4.2. Çimento harçlarının aynı PVA oranlı değişen uçucu kül ikameli basınç dayanım aritmetik ortalaması ve standart sapma değerleri.....	35
Çizelge 4.3. Çimento harçlarının aynı uçucu kül ikameli değişen PVA oranlı basınç dayanım aritmetik ortalaması ve standart sapma değerleri.....	36
Çizelge 4.4. Çimento harçlı karışımların eğilme dayanımları ve standart sapma değerleri.....	43
Çizelge 4.5. Faktörler ve seviyeler	58
Çizelge 4.6. L16 ortogonal dizisine göre tasarım	59
Çizelge 4.7. L16 ortogonal dizisinde ifade edilen deney sonuçları	60
Çizelge 4.8. Deney sonuçlarına bağlı S/N değerleri	60
Çizelge 4.9. Faktör ve seviyelere ait ortalama S/N değerleri	61
Çizelge 4.10. Karışımların toplam S/N değerleri.....	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü	6
Şekil 2.2. Beton ve hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızının beton yüzey rutubetinin buharlaşma hızına etkisi	19
Şekil 3.1. 4 nokta yükleme testi düzeneği.....	31
Şekil 4.1. Karışımların yayılma değer grafiği.....	34
Şekil 4.2. Çimento harç karışımlarının grafiği.....	36
Şekil 4.3. Lifsiz harç karışımlarının %10 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması.....	38
Şekil 4.4. Lifsiz harç karışımlarının %15 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması.....	39
Şekil 4.5. Lifsiz harç karışımlarının %20 uçucu kül ikameli oranı için değişen PVA lif katkılı 7 ve 28 günlük karışımlarla olan basınç dayanım karşılaştırması.....	40
Şekil 4.6. Lifsiz harç karışımları ve %1 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması.....	41
Şekil 4.7. Lifsiz harç karışımları ve %2 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması.....	41
Şekil 4.8. Lifsiz harç karışımları ve %3 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması.....	42
Şekil 4.9. Çimento harç karışımlarının eğilme dayanım grafiği	45
Şekil 4.10. Lifsiz harç karışımlarının %10 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	45
Şekil 4.11. Lifsiz harç karışımlarının %15 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	46
Şekil 4.12. Lifsiz harç karışımlarının %20 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	46
Şekil 4.13. Lifsiz harç karışımlarının %1 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	47
Şekil 4.14. Lifsiz harç karışımlarının %2 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	47
Şekil 4.15. Lifsiz harç karışımlarının %3 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması	48

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Karışımların serbest rötre grafiği.....	51
Şekil 4.17. UK00 (Kontrol) karışımının serbest rötre grafiği.....	52
Şekil 4.18. UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	52
Şekil 4.19. UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	53
Şekil 4.20. UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	53
Şekil 4.21. PVA1+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	54
Şekil 4.22. PVA1+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	54
Şekil 4.23. PVA1+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	55
Şekil 4.24. PVA2+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	55
Şekil 4.25. PVA2+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	56
Şekil 4.26. PVA2+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	56
Şekil 4.27. PVA3+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	57
Şekil 4.28. PVA3+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	57
Şekil 4.29. PVA3+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği.....	58

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Karışımda kullanılan PVA lifi	24
Resim 3.2. Karışımda kullanılan uçucu külün fiziksel görüntüsü	25
Resim 3.3. Karışımda kullanılan silis kumunun fiziksel görünümü	26
Resim 3.4. Çimento harç numunelerinin karıştırıldığı Hobart marka mikser.....	28
Resim 3.5. Eğilme dayanım testleri için kullanılan test cihazı	31
Resim 3.6. Serbest rötre deneylerinin yapıldığı test cihazı.....	32
Resim 4.1. Bazı karışımların yayılma resimleri.....	34
Resim 4.2. Numunelerin basınç dayanım testi.....	43
Resim 4.3. Numunelerin eğilme dayanımı testi.....	44
Resim 4.4. Eğilme dayanım testi uygulanan PVA3+UK10 kodlu numunenin iç yüzeyi	49
Resim 4.5. Serbest rötre deneyi yapılacak numunelerin kür içinde bekletilmesi	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C_2S, C_3S	Kalsiyum sülfatlar
C_3A, C_4AF	Kalsiyum alüminatlar
Al_2O_3	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
$CaSO_4$	Kalsiyum sülfat
dm	Desimetre
Fe_2O_3	Demir (III) oksit
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
l/d	Narinlik oranı
m	Metre
mm	Milimetre
PVA0	Polivinil alkol içermeyen numune
PVA1	%1 Polivinil alkol katkılı numune
PVA2	%2 Polivinil alkol katkılı numune
PVA3	%3 Polivinil alkol katkılı numune
SiO_2	Silisyum dioksit
UK00(Kontrol)	Uçucu Kül ve polivinil alkol içermeyen numune
UK10	%10 uçucu kül ikameli numune
UK15	%15 uçucu kül ikameli numune
UK20	%20 uçucu kül ikameli numune
Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	Amerikan malzeme ve test derneği
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat

Kısaltmalar**Açıklamalar****PVA**

Polivinil alkol

TS

Türk Standardı

UK

Uçucu kül

1. GİRİŞ

Beton son yüz yıl içinde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonun çok kullanmasının sebebi; istenilen boyutta, istenilen kalitede, en ekonomik ve kolay teminin edilebilen bir malzeme olmasından dolayıdır. Betonun bazı zayıf özelliklerinin iyileştirmek, bazı özelliklerinizde artırmak amacıyla çeşitli katkı maddesi kullanılmaya başlanmıştır. 1970 yıllarda itibaren beton kimyasındaki gelişmelere paralel olarak beton teknolojisindeki gelişmeler de hızlı bir şekilde artmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak betonun özellikleri iyileştirilmiş ve buna bağlı olarak kullanım yerleri artmıştır. Betonun fiziksel, kimyasal ve teknik özelliklerinin gelişmesi yanında estetiklik, permeabilite, elastik özellik ve enerji yutma gibi özellikleri de iyileştirilmiştir. Bu gelişmeler ışığında betonun performansının iyileştirilmesi, döküm ve yerleştirme hızının yükseltilmesi, üretiminin endüstrileşmesi ve daha ekonomik bir hale gelmesi de hedeflenmiştir.

Beton kullanım yerlerinde değişik dış ve iç etkilere maruz kalırlar. Hem maruz kaldığı dış etkiler olarak (mekanik, fiziksel ve kimyasal), hem de betonun iç yapısında süreyle meydana gelmesi muhtemel değişikliklerden dolayı durabilitesinin belli şartlara bağlı olarak yüksek olması istenir. Betonun istenilen durabilite özellikleri bazı kimyasal katkı maddesi veya uygun cins ve boyuttaki liflerle sağlanır. Lifli beton konusunda son yıllarda araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, betonun yüksek basınç dayanımının yanında, aşınma, enerji yutma ve durabilite gibi özelliklerinin yanı sıra eğilme ve çekme dayanım özellikleri ile birlikte sünekliliğini de artırmak için farklı oranlarda kimyasal ve puzolanik katkı maddeleri kullanılmıştır. Betonda kullanılan lif boyu ve lif türlerinin birbirine göre avantajları ve dezavantajları olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda lif türünün kullanım alanlarının farklı olmasıyla birlikte, lifle donatılanmış beton ve harç numunelerinin ekseriyetle eğilme ve darbe dayanımına karşı direnç, tokluk özelliği ve enerjiyi yutmadaki kapasitesi ile süneklilik gibi mekanik özelliklerine de ciddi anlamda katkı sağladığı görülmüştür.

Betonda kullanılan kimyasal ve puzolanik katkı maddeleri, betonun mukavemet ve dayanıklılığını artırdığı bilinmektedir. Son yıllarda kimyasal ve puzolanik katkı maddesindeki gelişmelere paralel kullanılması yanı sıra farklı cinslerde ve boyutlarda lif kullanılması betonun mekanik ve fiziksel özelliklerin oldukça geliştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, basınç dayanımına ek olarak çekme ve eğilme dayanımının yüksek olduğu

betonlar üretmek ve farklı boyutlu liflerden faydalanmak istemişlerdir. Avrupadaki sıkı çalışmaların sonucu olarak lifli beton teknolojisinin ortaya çıkması ve gelişmesi sağlanmıştır. Beton ve harç karışımlarına eklenen mineral ve kimyasal katkılarla birlikte basınç dayanımı 200 MPa'dan fazla olan numuneler üretilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı; Çimento ağırlığınca % olarak azaltılarak uçucu kül ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. İkameli karışımlara belirli oranlarda hacimce PVA lifi ilave edilerek karışımların işlenebilme, basınç, eğilme ve serbest rötre özellikleri incelenerek optimum karışımlar oranının belirlenmesi amaçlanmıştır (Karışımında kullanılan çimento ağırlıkça azaltılarak yerine UK ikame edilmiştir. Bu ikameli karışımlarda fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla belirli oranlarda).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Agrega, çimento, su ve gerektiğinde kimyasal-puzolanik maddelerinin belirli oranlarda karıştırılarak önce plastik-akıcı kıvamda olan daha sonra yerleştirildiği kalıbın şeklini alarak sertleşen kompozit yapı malzemesine beton denir [1]. Çimento harcı veya betonların bazı teknik özelliklerini iyileştirmek ve performanslarını artırmak için lif ilave edilmektedir. Liflerin cinsi, çapı, boyu ve boy-çap oranı, beton veya çimento harcında beklenen özellikleri üzerinde etkilidir. Birçok çalışmada lifli betonların mekanik özellikleri yanında, durabilite özelliklerinin de iyileştirilmesi ve mikro yapısının araştırılması gerekliliği vurgulanmıştır [2-3]. Birçok çalışmada, lifli ve lifsiz betonların davranışlarındaki asıl farkın, lifli karışımlarda lifin cinsine ve özelliklerine bağlı olarak yük altında meydana gelen çatlaklardan sonra yük taşıma özelliğinin devam etmesidir. Liflerin karışımın eğilme dayanımına ek olarak, aşınma, oyulma(kavitasyon) direncinde ve performansında artış meydana getirdiği vurgulanmaktadır. Ayrıca lifli karımların aderansı iyi ise, moment kapasitesini, sünekliğini, donatının aderansını arttırdığını, çatlak kontrolü sağladığını, patlama ve kabarıp dökülmeleri önleyebileceği bir çok araştırmacı tarafından belirtilmektedir [4-7].

Beton ve çimento harçlarında durabilite özelliklerini iyileştirmek için sentetik, karbon, polipropilen, polyester ve cam lifler kullanılmaktadır. Eğilme ve aşınma dayanımı istenen yerlerde ise en sık kullanılan lifler çelik ve sentetik lifler olmakla birlikte, çelik liflerin betonda kullanımı hacimce %1 ila %2 arasındadır [8,9]. Sentetik, polietilen ve polyester liflerin kullanımı ise çelik liflerle karşılaştırıldığında nispeten daha az oranlardadır [10]. Liflerin yük altındaki beton içindeki davranışı kırılma mekaniği çerçevesinde incelendiğinde, gerilme – şekil değiştirme özelliğine duyarlı tokluk, sünme ve elastisite vs. gibi özelliklerin performansı da etkilenir. Harç özellikleri kapsamında lif ihtiva etmesi halinde ise, birincil mikro çatlağı oluşturan enerji transferi ile çatlağın yanındaki sağlam çimento matris bölgelerine aktarılır. Liflerin oluşturduğu en büyük etki, çatşağın ilk oluşum anından sonlanma anına kadar gerilmeleri tutmayı ve bu gerilmeleri sağlam alanlara transfer etmeleridir [11-14].

Liflerin taze karışıma kazandırdığı bazı özellikler rötre, büzülme, plastik çatlaklar, segregasyon, geçirimsizlik ve kıvamı azaltması olarak ifade edilebilir [12,15]. Lifler

sertleşmiş karışımın tokluğunu ve sünekliğini, darbe dayanıklılığını, yüzey aşınma direncini, yorulma direncini, kimyasallara karşı direncini, parçalanma direncini ve donma – çözünme çevrimi dirençlerini artırır [16,17].

Yaprak ve ark. (2004) yaptıkları bir çalışmada polipropilen liflerin çimento esaslı kompozitlere olan etkisi incelenmiştir. Lifli karışımların 7 ve 28 gün sonundaki basınç ve yarmada çekme dayanımı, lifsiz yüksek dayanıma sahip karışımlara oranla %0,4- 0,5 civarında düşük olduğu ve buna karşılık çekme dayanımlarını, sırasıyla %12-14 oranında arttırdığını belirlemişlerdir. Öte yandan çelik liflerin polipropilen liflere benzer şekilde basınç dayanımını %1 civarında arttırdığı ifade edilirken, çekme dayanımlarını %35 oranında arttırdığı belirtilmiştir [18-20].

Genellikle lifli beton üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik maddeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu endüstriyel atık olan puzolanların, çevresel ve ekonomik sebeplerden dolayı, çimento, çimento harcı ve betonların üretiminde katkı maddesi olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Katkı malzemeleri içerisinde, uçucu kül yaygın ve ekonomik olması sebebiyle çimento ve betona en uygun puzolanlardan bir tanesidir. Beton ve çimento harcı üretiminde UK kullanım miktarının artırılmasının, numunelerin uzun vadede birçok avantaja sahip olmasından kaynaklandığı bahsedilmiştir [22, 23].

UK' nin betonda kullanımı, kimyasal katkı maddesinin yaygınlaşması ile beraber son zamanlarda artmıştır. UK' nin betonda kimyasallarla beraber kullanımındaki başarı, çimento harcı ve beton karışımlarına da paralel olarak yansımaktadır. Günümüzde ekonomik beton karışımları elde etmek için UK vazgeçilmez bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül (UK) bazı kimyasal özellikleri nedeniyle beton üretiminde özellikle tercih edilmektedir. Portland çimentosunun üretiminde UK kullanılması enerji kullanımının, hava kirliliğinin ve doğal kaynakların azalmasına neden olmasının yanında maliyeti de azaltmaktadır [23,24].

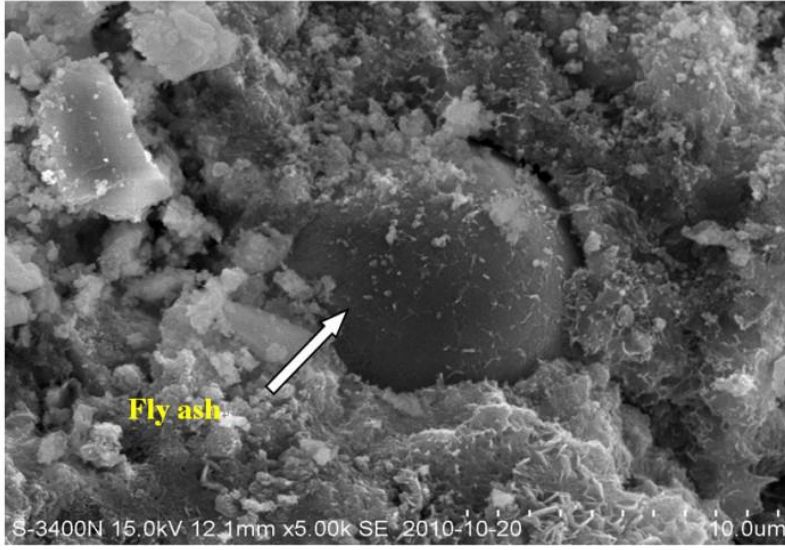
Bu çalışmada, 400 mikronluk silis kumu, kimyasal katkı maddesi ile su/çimento oranı 0,38 sabit olarak kullanılmıştır. Uçucu kül, CEM I 42,5R çimento ağırlığının % si bakımından 0,10, 15 ve 20 oranlarında kullanılmıştır. Uçucu kül ikameli karışımlara hacimce %1, %2 ve %3 PVA lif ilave edilerek numunelerin serbest rötresi, eğilme ve basınç dayanımlarını veren optimum malzeme karışım oranlarını belirlemek amaçlanmıştır.

2.1. Çimento

Çimentonun ham maddesi olan kil ve kalkerin belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra 1350-1500 °C sıcaklıklardaki döner fırınlarda pişirilmesi ile elde edilen ürüne “Çimento Klinkeri” denir. Bu klinkere %3-6 arasında alçıtaşı ve ihtiyaca göre bazı oksitler (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve az miktarda diğer maddeler) ilave edilerek çimento öğütme değirmenlerinde öğütülerek toz haline getirilen ve su ile karıştırıldığında, hidratasyon reaksiyonları ile sertleşebilen öğütülmüş inorganik malzemedir. Klinkerin bileşiminin en az %90’ını oluşturan karma oksitlerdir. Bu oksitler trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalsiyum alümine ferrit ($4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$), trikalsiyum silikat ($3\text{CaO} - \text{SiO}_2$), dikalsiyum silikat ($2\text{CaO} - \text{SiO}_2$), kalsiyum sülfat (CaSO_4). Karma oksit yapıdaki tamamlayıcı parçalardan C_3S ’in bağlayıcılık etkisi reaksiyonun başlamasıyla birlikte etkisini göstermektedir. C_2S ’in reaksiyonunun nispeten yavaş olması sebebiyle bu bileşenin bağlayıcı etkisi karışımın geç aşamalarında kendisini hissettirir. C_3A ’nın reaksiyonu su etkisiyle çok hızlı gerçekleşir ve bundan dolayı çimentolu karışımın hızlı bir şekilde sertleşmesine sebep olur. Klinkerin alçıtaşı ile öğütülmesi sonucu bu etki ortadan kaldırılabilir. C_4AF incelendiğinde ise düşük bir bağlayıcı özellik görülebilir.

2.2. Uçucu Kül

Sanayide termik santraller yoluyla elde edilen uçucu küller, linyit kömürünün yanmasıyla baca gazları yoluyla atmosfere çıkarken elektrostatik yöntemle elektrofiltreler yardımıyla yakalanan parçacıklardır. Genellikle uçucu küller, küre formunda olup çapları 1-200 mikron (μm) aralığındadır (Şekil 3.4). Termik santrallerden atık madde olarak elde edilen uçucu küllerin piyasada değerlendirilmesiyle alakalı temel olarak 3 metot izlenebilir. Bunlar (i) çimento klinkeri yerine belli oranlarda kullanılmasıyla üretici ve kullanıcı adına oluşturduğu avantajlar, (ii) olumlu çevresel etkiler (çevre kirliliğinin engellenmesi) ve aynı zamanda çimentodan kaynaklı CO_2 salınımının azaltılması (iii) Ekonomik anlamdaki faydaları. Uçucu külün çimento üreticisi tarafından kullanılmasıyla basit olarak şu yararları sağlayacağı söylenebilir:



Şekil 2.1. Uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü [25]

Genel olarak, uçucu kül, yapı malzemesi üretiminde, çimento üretiminde (hammadde, klinkere ilave veya çimentoya ilave), beton (normal, hafif, enjeksiyon ve gaz beton) üretiminde, çeşitli tuğla üretiminde ve yol stabilize malzemesi gibi amaçlarda kullanılmaktadır. Uçucu külün betona eklenmesi ile inşaat yerinde çok önemli bir yere sahip olduğu söylenebilir. Uçucu kül ikameli betonun su geçirgenliği incelendiğinde, mevcut kül yüzdesi ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Kür şartları sağlanmış uçucu kül ikameli betonun permeabilitesinde azalma meydana gelmesinin temel sebebi; yeterli akıcılığın daha az su ile sağlanmasına ek olarak boşluklarda oluşan C-S-H jelinin daha az boşluk oranında etkili olduğu ileri sürülmektedir.

Uçucu kül ve diğer benzeri mineral katkıları harç ve beton karışımlarında üç farklı şekilde kullanılabilir. Bunlar;

- ✓ Çimentonun belli oranda uçucu kül ile ikamesi,
- ✓ İnce agrega ile benzer özelliklere sahip olmasından kaynaklı ince agrega yerine ikamesi,
- ✓ Gerek ince agreganın yerine kullanılması gerekse çimento kullanımının azaltılması ve uçucu kül takviyesinin yapılmasıdır.

Uçucu külle üretilen betonların rötre eğiliminin, silis dumanı ile üretilen betonlara göre daha az olduğu yapılan araştırmalarla belirlenmiştir. Genel olarak uçucu küller işlenebilmeyi

arttırır, su salma ve çözölmeyi önler, betonun geçirimliliğini ve hidrasyon ısısını azaltırlar. Ancak dayanımın azalmasına ve rötrenin artmasına yol açarlar.

Uçucu küllerin 1000 °C'ye kadar ısıtılması ve hemen soğutulması puzolanik aktiviteyi artırırken, yavaş yavaş soğutulması durumunda ise puzolanik aktivite azalmaktadır [1,22,23].

Uçucu küllerdeki mevcut kimyasal bileşenlerin, üretildikleri kömürün jeolojik özellikleriyle, termik santraldaki oluşum sıcaklığıyla, üretilen enerji miktarıyla, kül toplama ve arıtma sisteminin özellikleriyle vb. doğrudan ilişkili olmasıyla yapılan her türlü sınıflandırma çabası etkisiz kalmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere, kapsamlı sınıflandırmaların yapılmasının mümkün olmasına rağmen, bazı uçucu küller farklı grup sınıfların özelliklerini taşıyor veya bazıları neredeyse kendileri bir sınıf oluşturacak kadar ayrı özelliklere sahip olabiliyorlar. Uçucu küller, genel olarak kimyasal kompozisyonuna göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır [1,22].

- a) Kireç (CaO) ve Sülfat (SO₃) Miktarına Göre Sınıflandırma: Bu sınıflandırma tipine göre, (i) ana yapısı silikoalüminatlardan oluşan ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu küller silikoalüminöz grubu uçucu küllerdir. (ii) çoğunluğu linyit kömüründen elde edilen ve diğer sınıflara oranla yüksek oranda SO₃ ve CaO ihtiva eden küller sülfokalsik grubu uçucu küllerdir. (iii) benzer şekilde linyit kömürlerinden elde edilen kireç ve silika miktarı nispeten yüksek uçucu küller ise silikokalsik grubu uçucu kül sınıfındadır.
- b) Kireç (CaO) Miktarına Göre Sınıflandırma: Son yıllarda epeyce yüksek oranda kabul görmüş diğer bir sınıflandırma ise uçucu külün ihtiva ettiği analitik CaO miktarına dayanmaktadır. Bu kabule göre, CaO miktarı %10 sınırının altında kalan uçucu küller (i) düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, %10 sınırının üstünde kalanlar ise (ii) yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak belirtilir.
- c) ASTM C 618 Sınıflandırması: ASTM C 618'de belirtilen sınıflandırmaya göre uçucu küller 2 kategoriye ayrılmaktadır. (i) F sınıfı olarak tanımlanan uçucu küllerin elde edilmesi bitümlü kömürlerden olup minerallerin toplamı $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$ şartını sağlamakta olan uçucu kül sınıfıdır. (ii) C sınıfı uçucu küller çoğunlukla linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilir ve minerallerin $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$ şartını sağlaması gereklidir. Silikoalüminöz olarak ifade edilen küller F sınıfına dahilken, silikokalsik türü uçucu küller F ve C sınıfında da yer alabilir [84].

d) Avrupa Çimento Standardı (ENV 197-1) Sınıflaması: ENV 197-1'deki [83] ifadeye göre çimentolarda kullanılabilecek uçucu küller şu şekilde sıralanabilir. (i) Silis ihtiva eden uçucu küller (V) ve (ii) Kalkerli uçucu küller (W). V sınıfı küller yapısı itibariyle reaktif silika ile alüminadan oluşan, reaktif CaO oranı %5 seviyesinin altında, reaktif SiO₂ oranı ise %25'ten fazla olan uçucu küllerdir. W sınıfı uçucu küller ise esasen reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminadan meydana gelen, reaktif kalsiyum oksit oranı %5'ten fazla olan uçucu küllerdir.

2.2.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu küllerin bu bölümde fiziksel özelliklerinden olan incelik ve yoğunluk parametreleri üzerinde durulacaktır. Türkiye'deki bazı termik santralardan elde edilen uçucu küllerin fiziksel özellikleri Tablo-3.7'de verilmiştir.

- a) İncelik; uçucu küller için tane dağılım özelliği, bacada tutulma mekanizmalarına bağlıdır. Uçucu küllerin inceliğinin, beton ve çimentonun özelliklerine olumlu etkide bulunduğu söylenebilir. Elektrostatik yöntemler kullanılarak tutulan uçucu küller 4000-7000 cm²/g arası inceliğe sahiptir. Siklon ve mekanik yöntemler kullanılarak tutulan uçucu küllerin incelik değerleri ise yoğunlukla 1500-2000 cm²/g arasındadır. Uçucu küller için tane dağılımı ölçülürken, kömürün elde edildiği kaynak, kömürün öğütülme yöntemi ve termik santralin çalışma yöntemlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.
- b) Yoğunluk; uçucu küllerin yoğunluk parametreleri incelendiğinde incelik ve mineralojik yapılar önemli bir yer tutar. Uçucu küllerin yoğunlukları genellikle 1,9-2,4 kg/dm³ arasındadır.

2.2.2. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik yapısı

Uçucu küllerin kimyasal yapılarında Si, Al, Ca, Fe ve S bulunur. Bu elementleri yanma biçimine bağlı olarak, SiO₂, Al₂O₃ demir oksitler (Fe₂O₃, FeO ve Fe₃O₄), kireç (CaO) ve sülfat (SO₃) oluşturur. Bu elementlerin dışında, daha az miktarda MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ ve benzeri oksitler bulunabilir.

Genel olarak karbon içeriği yaklaşık %3 civarındadır. Düşük kireç oranına sahip uçucu küllerin temel bileşenleri silis ve alüminalardan meydana gelen amorf veya camsı fazdır.

Bilindiği gibi uçucu küller, havadaki nemi veya karşılaşabileceği suyu bünyesine alarak kalsiyum hidroksitle birlikte reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenleri oluştururlar. Bu demektir ki düşük kireçli uçucu küllerin puzolanik özellikleri vardır. Yüksek kireç oranına sahip uçucu küller puzolanik aktivite gösterirken, ihtiva ettikleri trikalsiyum alüminat, anhidrit, serbest kireç, amorf alümina ve amorf silika vb. sebebiyle de tek başlarına belli oranda bağlayıcı özelliğe sahip olabilmektedirler. Düşük oranda kireç bulunduran uçucu küllerdeki camsı faz oranı fazla orandaki kireçli uçucu küllere oranla nispeten daha yüksektir.

Uçucu kül üretiminde santral tipinin, işletim biçiminin, yakılan kömürün cinsinin, yanma biçiminin etkileri olmakla birlikte en genel anlamda elektrik enerjisi üretilen termik santrallerde taşkömürünün %10-15 oranında, linyit kömürünün ise %20-50 oranında kül olarak ortaya çıktığı bilinmektedir. Yanması sonucu oluşan külün %75-85'i baca gazları yoluyla kazandan çıkar ve ortaya çıkan bu atıklar "uçucu kül" olarak nitelendirilirler. Santrallerde, baca gazlarından uçucu küllerin tutulmasını sağlamak amacıyla genellikle yüksek verime sahip elektrofiltrelerin kullanılması tercih edilmektedir [21].

2.2.3. Mineral katkılar ve uçucu kül takviyeli betonların özellikleri

Mineral puzolanlar, ASTM C 125 standardına göre silisli alümin veya silis ihtiva eden toz şeklinde, tek başına bağlayıcılık etkisi olmayan veya nispeten az olan, yeterli sıcaklık koşullarında ve nem muhtevası yüksek bir ortamda kireç ile etkileşime girerek bağlayıcılık özelliğine sahip olan ürünler meydana getiren bileşenler olarak da ifade edilirler [26]. İçeriğinde Fe_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 ve buna benzer mineral grubunu ihtiva eden puzolanlar, harç ve betonlara ilave edilerek bu karışımların mekanik ve dayanıklılık hâline ciddi oranda katkıda bulunabilirler. Puzolan olarak ifade edilen mineral katkılarının kullanım oranı ve şekli, karışımda kullanılan maddelerin fiziki ve kimyevi hâli gibi etkenler harç ve beton karışımı üzerinde ciddi etkiye sahiptir [27].

Mineral katkılar, temelde organik ve inorganik olmak üzere 2 ana sınıfa ayrılırlar. Bu temel ayrım Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [28].

Çizelge 2.1. Organik ve inorganik mineral katkıları

Organik Mineral Katkılar	İnorganik Mineral Katkılar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diotame Toprağı	Silis Dumanı
Pomza Taşı	Yüksek Fırın Cürufu
Volkanik Tüfler	Demir İçermeyen Cüruf
Traslar	Pirinç Kabuğu Külü
Opalin Silika	

Uçucu küller beton ve çimento karışımli kompozitlerde mineral bir katkı olarak tercih edilen suni bir puzolandır ve genellikle tek başlarına bağlayıcılık özelliği sağlamadıkları, sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girer ve suda sertleşirler. Uçucu küller elektrik üretimini sağlayan termik santrallerden elde edilir. Çoğunlukla endüstride tercih edilmeyen düşük kaloriye sahip kömürlerin çok ince biçimde öğütülerek termik santral fırınlarında yakılmasından sonra yukarıya yükselen uçucu kül taneleri, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon olarak adlandırılan toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik sistemlerle tutularak depolanırlar. Küllerin parçacıkları dairesel olup çapları 1-300 µm düzeyindedir [29].

2019’da yapılan bir çalışmada çimentonun %5, %10, %15, %20 oranındaki miktarlarında ikame edilen C sınıfı uçucu külün betonun işlenebilirliğini, uzun dönem basınç ve eğilme dayanımlarına ek olarak kompasitesini de arttırdığı gözlemlenmiştir [30]. Uçucu kül ikameli betonların yüksek sıcaklık etkisinde kütle ve dayanım kaybı azalır. Khan (2013) yaptığı çalışmada, çimentonun ağırlığınca %40, %50 ve %60 oranlarında değiştirdiği uçucu kül içeren beton numunelerini yüksek sıcaklıklarda basınç dayanım testine tabi tutmuştur. Numunelerin 28 günlük kür sonucu numuneler 100-900°C arası sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda, 300°C sıcaklığa kadar, uçucu kül ikameli beton numunelerinin basınç dayanımında artış olduğu rapor edilmiştir. Çekme ve eğilme dayanımlarında bu sıcaklığa kadar benzer şekilde artmıştır [31]. Uçucu küllerin betonda işlenebilirliği arttırdığı belirlenmiştir [32]. 28 günlük dayanımları kontrol (uçucu kül ikamesiz) betonlara göre düşse de, 60 gün ve sonrası dayanımlarda betonun dayanımlarında artış görülmüştür [32,33]. Uçucu külün betona olan katkısı kadar çevre dostu olması ve karbon salınımını azalttığı rapor edilmiştir [33,34].

2.3. Silis Kumu

Silis veya kuvars kumu, kuvars yönünden zengin metamorfik ve magmatik kayaç yapılarının ayrışmasıyla birlikte meydana gelen 2 mm veya daha düşük boyutlu (SiO_2) tanecikleri olarak nitelendirilir. Bu kumlar genelde beyazımsı renge sahip olup, içerdikleri minerallerle birlikte renk farklı renklere sahip olabilirler. Silis minerali kaynaklı oluşan kuvars kumunun özelliği düşük oranda demir oksitler, feldspat, kil ve karbonatlar içermesidir. Doğada arı halde bulundukları gibi karışmış yapıda da bulunabilir. Tanelerinin çok sert olması sebebiyle agregasız üretilen betonlarda ince agrega işlevi görmektedir.

2.4. Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar, beton veya harç karışımlarının bazı özelliklerini iyileştirmek ya da bu karışımların değişik uygulama alanlarına uyarlanması amacıyla, beton muhtevastaki çimento ölçüsü temel alınarak belirli oranlarda eklenen organik veya inorganik tipte katkı maddelerdir.

TS EN 206 [35] standardında kimyasal katkılar; çimento kütlesine oranla daha az miktarlarda ilave edilen malzeme olarak tanımlanmaktadır. Ancak inert veya puzolanik mineral katkıları (silis dumanı gibi) içermemektedir. Kimyasal katkıların ekonomik ve durabilite anlamındaki katkıları herkes tarafından bilinmektedir. Buna ek olarak işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik, donma-çözülme dayanımı vs. konularda da avantajlar sağlarlar.

Kimyasal katkılar, beton ve harç karışımlarının istenen fiziksel ve kimyasal durumlarını kontrol ve optimizesini sağlama amaçlı kullanılır. ASTM C 494'te [36] ifade edilene göre kimyasal katkı çeşitleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kimyasal katkı tipleri

Katkı Çeşidi	Özelliği
A	Su azaltıcı akışkanlaştırıcılar
B	Priz geciktirici katkılar
C	Priz hızlandırıcı katkılar
D	Su azaltıcı ve priz geciktirici katkılar
E	Su azaltıcı ve priz hızlandırıcı katkılar
F	Su azaltıcı süperakışkanlaştırıcılar
G	Su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı priz geciktirici katkılar
S	Özel performanslı katkılar

2.5. Su

Beton karışımı için kullanılan karma suyunun, çimentoyla reaksiyon oluşturarak hidrasyonu aktive etme ve betonun işlenebilirliğini sağlama gibi görevleri vardır. Beton ve harç karışımlarının sertleşmesini ve dayanımını etkileyecek şekilde, donatıda paslanmaya sebep olmayacak doğal veya yapay maddeler ihtiva etmeyen su, beton ve harç yapımında akışkanlığı sağlamak ve reaksiyonu başlatmak üzere kullanılır [37].

Donatıların taze beton ve çimentolu harç karışımlarında serbest biçimde yerleşebilmesi amacıyla işlenebilirliğinin uygun olması istenir. Mümkün mertebe minimum oranda su kullanılmasına ek olarak beton ve harç karışımlarında işlenebilirlik özelliklerini geliştirme amaçlı katkı maddelerinin kullanılması tavsiye edilir [27].

2.6. Beton ve Harçlarda Kullanılan Lifler

Lifler organik veya inorganik malzeme özelliklerinin en gelişmiş özelliği olmakla birlikte, dayanım ve elastisite modülü anlamında genellikle o malzemenin nispeten büyük çap ve hacimdeki formuna oranla çok fazladır. Farklı özellikleri ve ihtiyaç alanları açısından çok fazla çeşitte lif türü vardır [38].

Lifler yapısı itibarıyla şu şekilde gruplandırılabilir [39];

Organik lifler;

- Hayvansal Lifler
- Bitkisel Lifler

➤ Mineral Lifler

İnorganik lifler;

➤ Polimer Lifler

➤ Metalik Lifler

➤ Seramik Lifler

Çizelge 2.3. Farklı çeşitteki liflerin fiziksel özellikleri [39,40]

Lif Tipi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 MPa)	Maksimum Uzama (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Yüksek Performanslı Polietilen	2700	120	5	0,97
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8
PVA	880-1600	25-40	6-10	1,30

Kimyanın gelişmesiyle birlikte polimer liflerin kullanım alanları artmış ve özellikleri geliştirilmiştir. Çok yüksek dayanım ve mekanik özelliklere sahip olan bu liflerin betona aynı zamanda geri dönüşümlü olması, üretim kolaylığı ve düşük yoğunluğa sahip olması gibi birçok avantajı beraberinde getirmiştir.

Polimerik lifler organik ve inorganik olarak 2 sınıfta toplanabilir. Organik polimerik liflerden bazıları pamuk, hint keneviri, sisal vs. bitkisel şekilli ya da yün, deri gibi hayvani kökene sahip liflerdir. Yapay polimerik liflerin en temel olanları ise polietilen, aramid, polipropilen, naylon ve PVA olarak sınıflandırılabilir [41].

Üretimi yaygın birtakım polimer lifin mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Polimerik lifler ve mekanik özellikleri [42]

Lif Tipleri	Etkili Çap (10 ³ mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)
Akrilik	13-104	1,17	207-1000	14,6-196	7,5-50
Aramid 1	12	1,44	3620	62	4,4
Aramid 2	10	1,44	3620	117	2,5
Naylon	-	1,16	965	5,17	20
Polyester	-	1,34-1,39	896-1100	17,5	-
Polietilen	25-1020	0,96	200-300	5	3
Polipropilen	-	0,90-0,91	310-760	3,5-4,9	15

2.7. Lif Özelliklerinin Karışıma Olan Etkisi

Geleneksel betonlarda karışıma eklenen her bileşenin etkisi olduğu gibi, modifiye lifli betonlarda da lifin şekli, boy/çap oranı, karışımdaki miktarı ve üretim teknikleri betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir [43].

Lif uzunlukları, betonda mikro ve makro çatlakların oluşmasında farklı özelliklere sahipken enerji emme, maksimum yükleme ve darbe dayanımı gibi mekanik etkilerde ise çeşitli rol oynarlar. Bununla birlikte, işlenebilirlik ve dayanım parametreleri de liflerin uzunluklarına bağlı olarak değişebilmektedir. Uzun lifler betonda işlenebilirliği azaltırken nihai dayanım değerlerini artırır. Buna karşı mikro çatlak oluşmasını önlemede kısa liflerin etkisi daha fazladır [44].

Narinlik oranı tanımı, lifler için en mühim ifadelerden biridir. Bu oran lif uzunluğunun daire kesitli lifler için çapa (l/d), diğer şekilde boyuta sahip olanlar içinse eşdeğer çapa (l/d_e) bölünmesi ile bulunur. Narinlik artarsa mekanik performansta artar fakat döküm ve karışımda görülen problemler sebebiyle, bu değer 100'ü aşmaması önerilmektedir [45]. Beton karışımının mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisi ise karışımdaki lif yüzdesidir. Betonda dayanımı etkileyen en önemli parametrelerden biri de kuşkusuz betondaki boşluk miktarıdır. Fazla oranlarda eklenen lif miktarları sonucunda matrisin her tarafına eşit olarak dağılmayan lif hacmi, betonda zayıf alanlar oluşturur ve basınç dayanımını düşürür. Bununla birlikte, betonun basınç dayanımının liflerle birlikte çok artmadığı zaten bilinmektedir. Betonun zayıf yanı olan çekme ve eğilme dayanımlarının artırılmasında ise lifler çok önemli bir rol oynar. Liflerin köprü görevinde birbirini

desteklemesi ve homojen dağılımın sağlanmaması için iri agrega ile birlikte kullanılmaması tavsiye edilir [46].

Gencel tarafından yapılan çalışmada, farklı narinliklere sahip ZP 30/0,5 ve 80/0,5 lif donatılı betonların mekanik özellikleri referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. Bu iki çeşitteki lif türü için 0, 15, 30, 45, 60 kg/m³ oranlarında betona eklenmiştir. Bu çalışmada hem lif narinliğinin hem de lif kullanım oranının lifli betonda basınç ve eğilme dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir [47].

Tabak tarafından yapılan deneysel çalışmada ise lif narinlik oranının ve hacminin betonun mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Deneyde l/d oranı 45, 65 ve 80 olacak şekilde 3 farklı çelik lifi %0, 1 ve 1,5 oranlarında kullanılarak 10 çeşit beton numunesi üretilmiştir. Bu beton numunelerine tek eksenli basınç, eğilme deneyleri, yarmada çekme, ultra ses hızı ölçümleri, darbe deneyleri yapılmıştır. Betonda çelik lif kullanımıyla birlikte eğilme dayanımı %3 ila %81 arasında artmıştır [48].

Yiğiter tarafından yapılan çalışmada yüksek performanslı betonlardaki enerji yutma kapasiteleri ve şekil değiştirme özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada farklı büyüklükteki agrega tane boyutları, birbirinden farklı lif geometrileri ve değişik dozajda lif kullanımının şekil değiştirme üzerine etkileri incelenmiştir. Liflerin 7. günde eğilme dayanımlarında etkin artış görülürken, 28. günde dayanımlarda etkinin daha az olduğu belirtilmiştir. Eğilme dayanımı özelinde en yüksek artışı maksimum lif dozajına sahip olan 120 kg/m³ ilavesi sağlamıştır. Lif dozajı arttıkça yarma dayanımı da artmıştır [49].

2.8. Değişik Türlerdeki Liflerin Betona Etkisi

Betonlar kompozit bir yapıda üretilmektedir. Bu da beton karışımındaki her bir bileşenin bir zayıf yönünün olduğunu gösterir. Kullanılacak her ürün için üreticinin farklı dizaynlar yapması gerektiği kaçınılmazdır. Geçmişten günümüze çimento ve diğer bütün bileşenler farklı şekilde tasarlanmış ve kullanıma açılmıştır. Betonun maruz kalması muhtemel farklı alanlar ve mekanlar (patlamaya karşı yapılar, baraj yapıları, kimyasal etkilere maruz kalabilen yapılar vs.) için farklı karışımlar ve lifler kullanılmaktadır.

Çizelge 2.5. Farklı liflerin özellikleri

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Gerilme Direnci (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Polivinil Alkol (P)	18	0,2	1000	29	1,3
Kancalı Çelik (S)	30	0,75	1100	200	7,8
Nylo-Mono (N)	19	0,05	966	25	1,14

Polipropilenle güçlendirilmiş betonlarla alakalı yapılmış ilk çalışma Goldfein'e dayanır. Bu çalışmaya göre %0,5 oranında kullanılan polipropilen lifler betonun direnç kapasitesini ve ani kararlılığını arttırarak patlamaya karşı dayanıklı yapılarda kullanılabileceği önerisini ilk defa 1960'ların başında yapmıştır [50]. Ramakrishnan [51-53] ve Gopalratnam ve ark. [54] yaptığı çalışmada, kiriş şekil ve boyutlarına sahip polipropilen beton numuneleri incelemiştir. Buna göre polipropilen lif katkılı betonların basınç dayanımı sadece çok az bir derecede artmış olup, daha sonraki dönemlerde çatlakların enerji yutma kapasitesi daha da artış göstermiştir.

Karahan, uçucu kül ikameli ve ikamesiz betonlarda polipropilen ve çelik lifin karışımlarda oluşturduğu etkiyi araştırmıştır. 19 mm uzunluğa sahip polipropilen lif karışımında hacimce %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında, 35 mm uzunluğa sahip ve 0,55 mm çaplı çelik lif ise karışımında hacimce %0,25, %0,50, %1,00 ve %1,50 oranlarında %0, %15 ve %30 uçucu kül ikameli beton karışımlarına eklenmiştir. Numuneler üstünde işlenebilirlik, eğilme dayanımı, elastisite modülü, basınç dayanımına ek olarak tokluk ve yarmada çekme dayanımı deneyleri de yapılmıştır. Polipropilen lif özelinde yapılan bu araştırmada, bu liflerin %0.05 oranından fazla kullanılmasıyla birlikte numunelerin dayanım ve dayanıklılık standartlarına ciddi bir etkinin olmadığı belirtilmiştir. Çelik lif içinse, hacimsel karışım oranının artmasıyla betonda yarmada çekme dayanımını, tokluk değerlerini, eğilme dayanımını, rötre ve aşınma gibi özelliklerinin ciddi anlamda iyileştirdiği belirlenmiştir [55].

Alkan yaptığı çalışmada, polipropilen lif katkısız bir karışım serisi ile birlikte 12mm, 25mm, 38mm, 51mm boyutlara sahip polipropilen lif katkılı 4 seri dahil olacak şekilde toplamda 5 seri betonun özelliklerini araştırmıştır. Lif yüzdesi hacimsel oranda %0,5 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanım testleri için 150 mm çapa ve 60 mm yüksekliğe sahip, elastisite modülü özellikleri ve basınç dayanım testleri için 100 mm çapa ve 200mm

yüksekliğe sahip silindir numuneler üretmiştir. Yapılan deneysel çalışmasında basınç dayanımları, yarma çekme dayanımları, net eğilme dayanımları, kırılma enerji ve süneklikleri karşılaştırılmıştır [56].

Yapılan araştırmalarda, polipropilen liflerin betonda hacimce en fazla %0,1 gibi düşük oranlarda kullanılması önerilip, başlıca rötire çatlaklarını engellenmesi gayesi güdülmektedir [57,58].

PVA lifi 50 yıl önce Japonya'daki ilk organik lif olarak üretildi ve daha sonra farklı uygulamalarda kullanıldı. 1980'li yıllardan sonra özellikle çimento esaslı kompozitlerin güçlendirilmesinde kullanılmıştır. PVA liflerin beton veya çimentolu kompozitlerde kullanılmasıyla mekanik özellikleri ciddi anlamda geliştirmiştir. PVA lifli karışımlar başta yüksek elastisite modülüne ve çekme dayanımına sahip olmasının yanında Portland çimentosu ile iyi bir kimyasal uyumluluğa sahiptir. Bu da yüksek lif-matris özelliği anlamına gelir [59]. Kesme kuvvetleri tek eksenli sıkıştırma yükleri altında üretildiğinden, PVA lifleri çok sayıda küçük takviye görevi görür ve kesme anında eksenî bir arada tutar [60].

Victor C. Li, PVA lif takviyeli kompozitler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucu, PVA lifin betonun performansı ve malzeme dizaynı anlamında kullanılabilecek en uygun polimerik lif olduğunu ifade etmiştir. Yine bu çalışmada Wang ve Li, PVA-ECC kompozit harcına uygulanan eğilme dayanımını incelemiştir. Buna göre, numunenin deplasmanı arttıkça eğilme dayanımında arttığı gözlemlenmiştir [61].

6 ve 12 mm uzunluklarına sahip 2 tip PVA lifin betonun mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, karışıma eklenen %0,25 oranındaki PVA lifin betonun 28 günlük basınç dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. 6 ve 12 mm'lik PVA lif katkılı numunelerin bu 28 gün içindeki basınç dayanım artışı sırasıyla %11,6 ve %7,5 olarak belirtilmiştir. Bu da nispeten kısa boylu liflerin basınç dayanımını uzun lif katkılı betonlara göre daha da arttırdığı anlatılmıştır. Fakat, %0,25'ten fazla olan oranlarda basınç dayanımı düşmüştür. Aynı şekilde, yarmada çekme dayanımı ve kopma modülünde bu trende bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Kopma modülündeki artış oranı %20 iken, yarmada çekme dayanım artışı %20 olarak ifade edilmiştir [59].

Çelik ve cam lif takviyeli çimento kompozitlerin darbe dayanımı literatürde geniş bir biçimde incelenmesine rağmen [62-68]. PVA lif katkılı çimento kompozitlerinin darbe dayanımıyla alakalı birkaç araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu geopolimer formdaki yüksek oranda PVA lif katkılı kompozitlerin darbe esnasında gevrek davranış yerine sünek davranış sergilediği görülmüştür [69].

PVA, polipropilen ve çelik lifli karışımların incelendiği bir çalışmada, liflerin sonraki aşamada karışıma eklenmesi, ilk aşamada diğer bileşenlerle karıştırılmasına oranla daha homojen bir yapı göstermesi sonucu daha yüksek mekanik özellikler göstermiş ve daha düşük rötre deformasyonuna sahip olmuştur [70].

Victor C. Li ve ark. yaptığı çalışmada, PVA katkılı “Engineered Cementitious Composites” (PVA-ECC) kompozitlerinin gerinim sertleşmesi göstererek çekme dayanım testi sırasındaki şekil değiştirmesinin %4’e kadar ulaşabileceğini belirtmişlerdir [71].

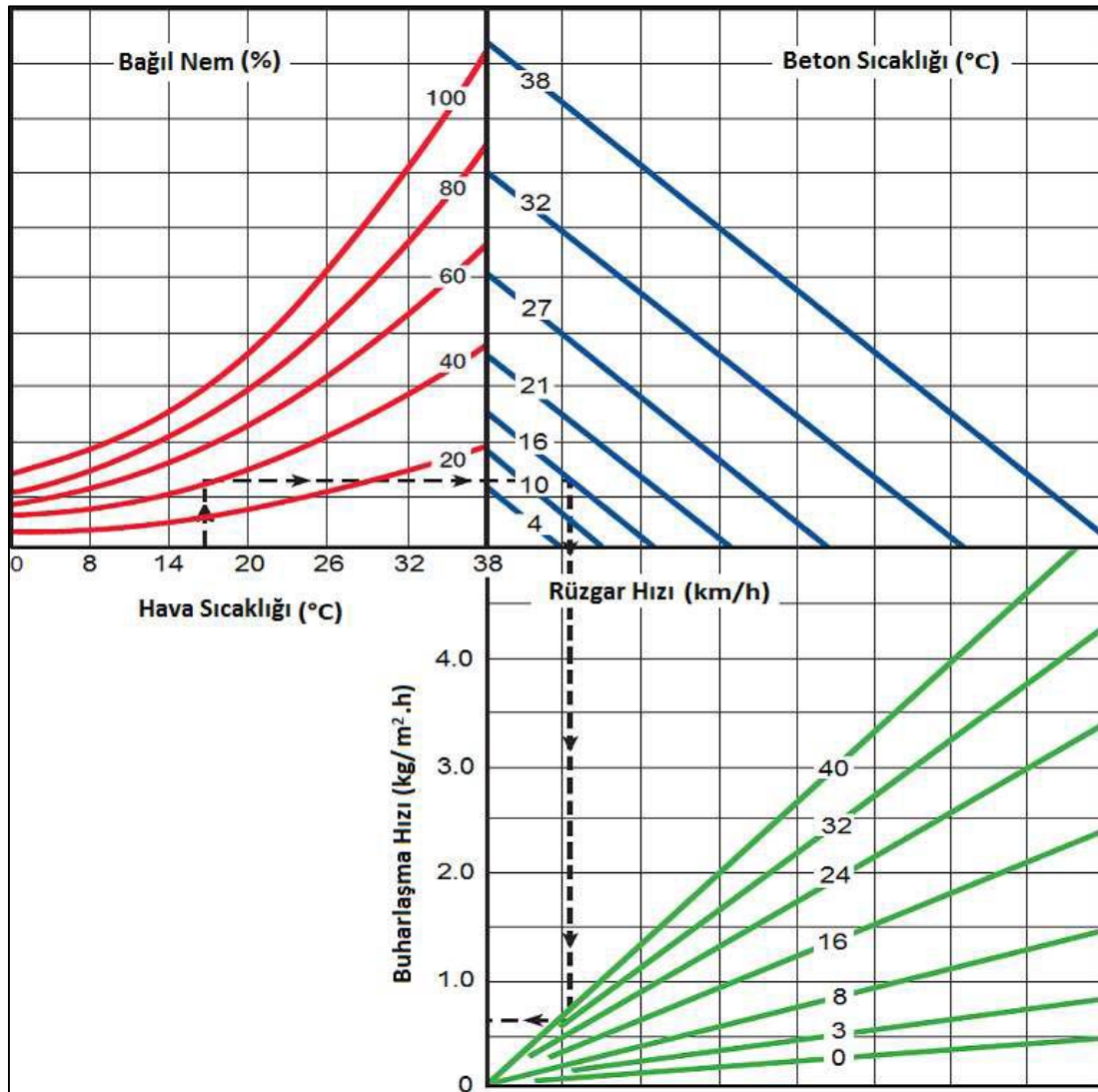
PVA lif katkılı betonlarda yapılan çalışmalar sonucunda, lif katkılı ve lifsiz numuneler karşılaştırılmıştır. Buna göre, lifli numunelerin eğilmede çekme dayanımı lifsizlere oranla etkili derecede üstünlük sağladığı rapor edilmiştir. Ayrıca, lifli numunelerin enerji yutma kapasitelerinde daha iyi performans sağlaması sebebiyle sünek bir davranışa sahip oldukları belirtilmiştir [58]. Yürütülen diğer bir çalışmada, beton numunelerine PVA lif eklenmesi sonucu eğilmede çekme dayanımı ve donma çözülme etkisine karşı dirençlerinin arttığı ifade edilmiştir [72].

2.9. Rötire ve Rötire Çeşitleri

Beton muhtevastaki suyun fiziksel ve/veya kimyasal sebeplerle azalması sonucu betonun boyutça ve hacimce küçülmesine “rötire” denilmektedir. Beton hem taze hemde sertleşmiş durum meydana gelen bir olaydır ve çimento hamurunda görülen bir özelliktir [73]. Aşağıda rötire çeşitleri olan plastik, otojen, karbonatlaşma, kuruma ve negatif rötrenin tanımlamaları ve özellikleri detaylı bir şekilde ifade edilmiştir.

Plastik rötire, taze beton yüzeyinde dökümden birkaç saat sonraki süreye kadar plastik fazda oluşan rötire türüdür. Eğer taze halde betonda çok hızlı buharlaşma olursa bu plastik rötreye sebep olur. Betondaki mevcut suyun buharlaşma hızının, betonun terleme hızını aşmasıyla

birlikte beton yüzeyi kurur ve daralır. Su/çimento oranı düşük betonlarda beton yüzeyindeki su miktarı az olduğundan plastik rötre oluşumu olasıdır. Plastik rötre yüzeysel sebeplerden ve oturmayla şiddeti artmış bir şekilde gözlenebilir. Bunu önlemek için yapılabilecek en uygun çözüm dış etkileri önlemektir. Rüzgarı engelleyecek biçimde perdeler oluşturmak, su jetleri vasıtasıyla nemli bir hava oluşturmak gibi önlemler alınabilir. Yalnızca beton karışımını ayarlamak ve dış etkenleri göz ardı etmek plastik rötreyi önlemekte yeterli olmayabilir fakat karışım için gerekli önlemlerin alınması yardımcı etkenlerdir. Çimentodaki incelik fazla olmamalı ve dozajının sınırlı tutulması gereklidir [74-76]. Buharlaşma hızı beton ve hava sıcaklığına bağlı olduğu gibi, bağıl nem oranı ve rüzgar hızı da etkin rol oynayan diğer özelliklerdir. Bu 4 ana etkenin, beton muhtevsındaki suyun buharlaşma hızına olan etkileri Şekil 2.2’de gösterilmektedir [74].



Şekil 2.2. Beton ve hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızının beton yüzey rutubetinin buharlaşma hızına etkisi [75-76]

Betonun kuruması ile beton hacminde meydana gelen büzölmeye kuruma büzölmesi denilmektedir. Beton ilk yaşlarda suyunu daha hızlı kaybeder, buharlaşma hızını etkileyen faktörler devam ettikçe toplam su kaybı zamanla arttığından büzölme miktarında da artış görölmektedir. Beton sertleştikten sonra çimento hamurunun su miktarının altındaki nem oranına sahip ortamlarda hidrate kalsiyum silikat (C-S-H) jelinin absorbe ettiği suyu kaybeder ve kuruma rötresine neden olur [77]. Öncelikle betonun içindeki kılcal boşluklarda bulunan su buharlaşır ve jeldeki su bu mevcut boşluklara akmaya başlar, bundan sonra bu suyun kısmi buharlaşmasıyla taneler birbirine yaklaşır ve çimento hamuru büzölür. Herhangi bir dış yükleme olmaksızın bu büzölme meydana gelir. Dış yükleme jel suyu akımını hızlandırır ve büzölme miktarının fazla olmasına neden olur [78]. Kuruma rötresi, üretimden hemen sonraki süreçte başlayarak 5-6 ay boyunca devam eder. İlk başta yüksek hızda gerçekleşir, malzemenin yaşı arttıkça yavaşlar. Yapı üzerinde röt-re-kontrol derzlerinin açılması büzölme gerilmelerini azalttığından kuruma rötresini önlemenin en iyi metodu olarak bilinmektedir. Bu derzler röt-re çatlaklarının kontrollü bir şekilde oluşmasını sağlar. Çatlakların sadece tıkayıcılarla kaplı derzlerde oluşacağından zararlı kimyasalların yapı içerisine girmesi engellenecektir. Beton yüzeyinin yeniden ıslanması veya %100 nemlilikte tutulması gibi yöntemler kuruma rötresini azaltmakta, ancak tamamen engellenmesi mümkün olmamaktadır [79].

Devamlı olarak su içerisinde bırakılan çimento hamurlarının ve betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında küçük bir miktar artma meydana gelmektedir. Çimento hamurunda veya betondaki hacim artışına "şişme" veya "negatif büzölme" denilmektedir. Hacim artışına, çimento jelleri tarafından emilen su neden olmaktadır. Beton veya harç karışımının su ile kürü esnasında su moleküllerinin hidrasyon sonucu oluşan jelin boşluklarına nüfuz ederek, jelin kohezyonuna zıt bir kuvvet uygular ve şişmesine yani hacimce artmasına yol açan bir basınç oluşturur. Çimento hamurundaki negatif röt-re etkili birim deformasyon artışı oldukça düşük seviyelerdedir. Döküldükten sonra 24 saat devamlı olarak su içerisinde 100 ve 1000 gün tutulan çimento hamurunun göstereceği şişme, doğrusal genleşme olarak ifade edilecek olursa, sırasıyla, 1300×10^{-6} m ve 2000×10^{-6} m kadardır. Betondaki şişme, çimento hamurunun şişmesinden daha da az olmaktadır. Kullanılan çimento miktarı 300 kg/m^3 olan ve altı ay veya bir yıl süreyle su içerisinde tutulmuş olan betonlarda şişme 100×10^{-6} m ile 150×10^{-6} m kadardır [73].

Prizin başlaması sonucu çimento tipi bağlayıcı rol üstlenen yapılarda oluşan makroskobik seviyelerdeki hacim azalmasına otojen rötire denilmektedir. Otojen rötire çeşidi, başka bir maddenin matristeki kaybına ya da matrise girmesine bağlı olmamakla birlikte, sıcaklık etkisi veya mekanik bir zorlama da etkili değildir. Su ile çimentonun teması sonucu hidratasyon reaksiyonu aktive olur. Ancak hidratasyon reaksiyonu sonucunda oluşan çimento-su karışımı hacim olarak hidratasyona başlamamış çimento-su karışım miktarından nispeten daha az olabilir. Bu sebeple, betonda az bir hacimsel değişiklik meydana gelir. Hacim azalış yüzdesi ifadesine ek olarak tek boyuttaki boy kısalması tanımı da otojen rötire için kullanılabilir. Henüz prizin başlamadığı beton ve çimento harçlarında hacim artışı veya azalışı çatlaklara sebep olmaz. Bu sebeple otojen rötrenin ilk başlangıcı prizin başlamasıyla meydana gelir yorumu yapılabilir [80,81].

Karbonatlaşma rötresi, çimento hamurunun atmosferdeki CO_2 ile tepkimeye girmesi ve bu matrisin büzülmesini ifade eder. Karbonatlaşma rötresinin gerçekleştiği zaman aralığında ağırlığa bağlı bir kayıp oluşmazken artış bile gözlenebilmektedir. Eğer boşluklar su ile dolu olur ve CO_2 matristen içeri giremezse karbonatlaşma etkisi yüksek seviyelerdeki nem oranlarında düşük oranda olur. Karbonatlaşma esnasında meydana gelen tepkimelerin ana sebebi bağıl nemdir. Bağıl nemin %50 seviyesinde olması durumunda karbonatlaşma en yüksek orana ulaşır. Karbonatlaşma reaksiyonu sonucu betonun mukavemetinde artış gözlenebilirken karbonatlaşma sonucunda ortaya çıkan $CaCO_3$ tuzunun hacmindeki artış sebebiyle betonun boşlukları azalır. Bu şekilde betondaki boşlukların azalmasına bağlı olarak geçirgenlikte. Fakat alkalitenin $CaCO_3$ etkisinden kaynaklı azaldığı gözlemlenebilir [82]. Karbonatlaşmanın görüldüğü yerler genelde hava ile teması bulunan yüzeylere çok yakın bölgelerdir.

3. MATERİYAL VE METOD

Araştırmada kullanılan materyaller ve özellikleri ifade edilmiş olup, çimento esaslı numunelerde yapılmış deneyler ve bu deneylerin yöntemleri hakkında açıklamalar yapılmıştır.

3.1. Materyal

Bu çalışmada 400 mikronluk silis kumu, hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, uçucu kül, PVA lif ile CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Karışımda kullanılan malzemelerin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Uçucu kül ve PVA lif farklı oranlarda kullanarak çimento harcı hazırlanmıştır. Bu karışımlarının kıvamı, serbest rötresi, eğilme ve basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. Her bir karışımdan, her farklı yaş ve özellikler için 3’er adet 25x25x285 mm boyunda harç çubukları, 25x57,5x315 mm’lik kiriş ve 40 mm boyutunda küp numuneler üretilmiştir.

3.1.1. Çimento ve karışım suyu

Araştırmada CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun yoğunluğu 3,12 kg/dm³ dür. Beton karışımında şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.2. PVA lif

Bu araştırmada kullanılan, PVA lifinin uzunluğu 6 mm ve yoğunluğu 0,91(kg/dm³) ve elastisite modülü 3000-3500 MPa dir. Karışımdaki lif miktarı karışım hacminin %1, 2 ve 3 oranında kullanılmıştır.



Resim 3.1. Karışımda kullanılan PVA lifi

Çizelge 3.1. Çimento, uçucu kül ve silis kumuna ait teknik özellikler

Kimyasal Bileşimi(%)	PÇ 42,5	UK	Silis Kumuna 400
SiO ₂	20,7	46,74	99,31
Al ₂ O ₃	6,0	14,11	0,29
Fe ₂ O ₃	2,4	9,74	0,05
CaO	63,6	13,82	0,05
MgO	2,6	3,91	-
SO ₃	2,1	3,94	-
Na ₂ O	0,1	2,71	-
K ₂ O	0,9	1,91	0,02
K. Kayıpları	1,4	0,86	0,09
Yoğunluk (kg/dm ³)	3,12	2,45	2,65

3.1.3. Kimyasal katkı maddesi

Kimyasal katkı (KK) maddesi polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkı maddesi, üretici firmanın önerisi doğrultusunda bağlayıcı (çimento, cüruf, uçucu kül, mikro silika vb) miktarına ve beton tasarımına göre değişmekle beraber, genel kullanım oranının dozajın kütleye %1 ila 2 arasında olabileceği tavsiye edilmektedir. Kimyasal katkı maddesinin teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kimyasal katkının teknik özellikleri

Tip	Polikarboksilat
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk (kg/dm ³)	1.06 ± 0.02
pH	5,00 ±2
Alkali İçeriği (%)	≤ 10 (TS EN 480–12)
Optimum dozaj (%)	1,2

3.1.4. Uçucu kül

Karışımında kullanılan uçucu kül Çayırhan Termik Santrali'ne ait ve teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Reaktif kireç miktarı %10'un altında kalan Çayırhan uçucu külü, TS EN 197-1'de [83] belirtilen sınıflandırmaya göre V sınıfı silissi uçucu küllerdir. Aynı şekilde, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değerinin %70'i aşması sebebiyle ASTM C618'de belirtilen [84] F sınıfına (düşük kireçli) girmekte ve analitik CaO miktarının %10'dan az olması sonucu kireçsi kül sınıfında da değerlendirilmektedir. Bu sebeple, Çayırhan uçucu külünün 2 uçucu kül sınıflandırılmasına dahil olduğu düşünülmektedir [85].



Resim 3.2. Karışımında kullanılan uçucu külün fiziksel görüntüsü

3.1.5. Silis kumu

Çalışmada 400 mikron boyutundaki Pomza Export markalı silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu bu firmanın Salihli Kaletepe'deki kum ocağından çıkarılmıştır.



Resim 3.3. Karışımda kullanılan silis kumunun fiziksel görünümü

3.2. Metot

Bu çalışmada, matrisin su/çimento oranı kontrol betonu ve sadece hiperakışkanlaştırıcı içeren (uçucu kül ikamesiz) betonlar için 0,38, %10 uçucu kül ikameli beton karışımlarının su/çimento oranı 0,42, %15 ikameli beton karışımlarının su/çimento oranı 0,45 ve %20 ikameli beton karışımlarının su/çimento oranı ise 0,47 olarak belirlenmiştir. PVA lif ve uçucu kül ikame oranlarının kombinasyonları olan 12 karışıma ek olarak PVA lif ilavesiz ve uçucu kül ikamesi yapılmayan %2 hiperakışkanlaştırıcı eklenen kontrol betonuyla birlikte toplamda 13 numune incelenmiştir.

3.2.1. Karışım kodlarının belirlenmesi

Yapılan bu araştırmada, PVA lif oranı ve uçucu kül ikame oranları değiştirilerek toplamda 13 çimento esaslı harç karışımı üretildi. Karışım kodları belirlenirken %10 uçucu kül ikamesinde UK10, %15 uçucu kül ikamesinde UK15, %20 uçucu kül ikamesinde UK20; %1 PVA lif katkısında PVA1, %2 PVA lif katkısında PVA2, %3 PVA lif katkısında PVA3 tanımlamaları kullanıldı. Buna ek olarak, Uçucu kül ikamesiz ve PVA lif katkısız %2 kimyasal katkılı karışım UK00 (KONTROL) betonu olarak ifade edilmiştir. Üretilen betonların kodları ve karışım dizaynları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Araştırmada kullanılan malzemelerin karışım miktarları

Karışım Kodları	Karışım Dizaynları					
	Çimento (kg/m ³)	Silisli Kum (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Hiper akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	PVA Lif (kg/m ³)
UK00(Kontrol)	928	596	0	354	19	0
UK10+ PVA0	836	596	93	354	19	0
UK15+ PVA0	787	596	142	354	19	0
UK20+ PVA0	743	596	186	354	19	0
PVA1+UK10	836	596	93	354	19	11,7
PVA1+UK15	787	596	142	354	19	11,7
PVA1+UK20	743	596	186	354	19	11,7
PVA2+UK10	836	596	93	354	19	23
PVA2+UK15	787	596	142	354	19	23
PVA2+UK20	743	596	186	354	19	23
PVA3+UK10	836	596	93	354	19	35
PVA3+UK15	787	596	142	354	19	35
PVA3+UK20	743	596	186	354	19	35

3.2.2. Numune boyutları ve şekilleri

Bu araştırma kapsamında üretilen çimento esaslı harçlarda daha net sonuçlar elde etmek için her bir karışım üretiminden; basınç dayanım testleri için 9 adet küp numune (40x40 mm), 4 noktalı eğilme dayanım deneyleri için 9 adet diktörgen prizma (25x57,5x315 mm) ve rötre deneyleri için 3 adet dikdörtgen prizma (25x25x285 mm) oluşturulmuştur.

3.2.3. Üretimde izlenen sıra

- Çimento, uçucu kül ve silisli kum (kuvartz kumu) mikserde kuru olarak karıştırıldı.
- Karışım suyu ve hiperakışkanlaştırıcı katkı birbirine karıştırılarak miksere yavaşça eklendi.
- Liflerin tamamı toplamda 6 dk süreyi geçmeyecek şekilde azar azar karışıma eklendi.
- Harcın kıvamına bağlı olarak yayılma tablası deneyi yapıldı
- Karışım vibrasyon yardımıyla ve sürekli elle karışım sağlanarak kalıplara yerleştirildi.



Resim 3.4. Çimento harç numunelerinin karıştırıldığı Hobart marka mikser

3.3. Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

3.3.1. Yayılma deneyi

Yayılma tablası deneyi taze harç karışımlarının kıvamlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu deney de, yayılma tablasının üzerine kesik koni şekilli kalıbın içine her seferinde üçte bir oranında harcın eklenmesi ve çubukla 25 kez vurularak 3 seferde kalıbın aynı şekilde doldurulması sağlanır. Daha sonra, mala veya herhangi bir düzeltme aleti ile kalıbın üst kısmı temizlenir. Kalıbın yavaş bir şekilde kaldırılmasından sonra aletin sarsma kolunun 15 saniyede 15 tur attırılması sağlanır. Bundan sonra yayılmanın ölçülmesi birbirine dik 2 doğrultuda gerçekleşir ve daha sonra bu 2 ölçümün ortalaması alınır.

Taze çimento harçlarında, kalıba yerleştirilmeden önce işlenebilirliğin ölçülmesi amacıyla yapılan bu deney TS EN 1015-3'e göre uygulanır [86].

3.3.2. Basınç dayanım deneyi

Küp basınç dayanım testi için TS EN 12390-3 'e [87] uygun şekilde, 7 ve 28 günlük 40x40x40 mm³ boyutlara sahip küp şekilli numunelere basınç dayanım test makinesi basınç uygulanması yoluyla gerçekleştirildi. Araştırmada numunelerin basınç dayanımının ölçülmesi için hidrolik pres kullanılmıştır. Basınç dayanım testinde yükleme hızı makina tarafından otomatik olarak seçilmiştir.

Betonun basınç dayanımı Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_c = F/Ac \quad (3.1)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm^2),

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, (N),

Ac: Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm^2 dir.

3.3.3. Eğilme dayanım deneyi

Dört noktalı eğilme dayanım deneyi, 7 ve 28 günlük numuneler için TS EN 12390-5'a [88] göre uygulandı. Her kompozit karışımdan 3 numune için deney gerçekleştirildi. Eğilme deneyinde kullanılan cihaz maksimum 10.000 kN kapasiteye sahip eğilme dayanım test cihazıdır. Yükleme hızı sabit olmayıp elle ayarlanmıştır. Numune boyutları 25x57,5x315 mm'dir. Mesnet açıklığı 315 mm ve yükleme mesnetlerden 105 mm içerde olacak şekilde iki noktadan yapıldı.

Numunelerin eğilme dayanımları 3.2 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{net} = (3Pl)/2bh^2 \quad (3.2)$$

Burada:

F_{net} = Net Eğilme Dayanımı (N/mm²)

P= Kırılma Yüğü (N)

L=Mesnetler arası uzaklık (mm)

b= Numune kesitinin genişliği

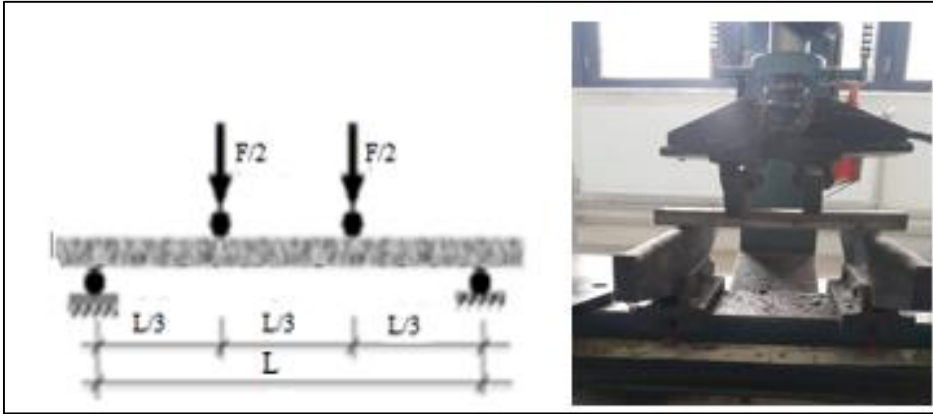
h= Numune kesitinin yüksekliği

Şekil 3.1’de numunelere 4 nokta yükleme testi yapılmıştır.

Lif takviyeli harç numunelere 3 noktalı yerine 4 noktalı eğilme dayanım testi uygulanması önerilmiştir [89,90]. Bunun sebebi olarak nümerik modelleme, olasılıksal ve istatistiksel analizin uygulandığı numunelerin mekanik ve kırılma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, 3 noktalı eğilme dayanımının lifli beton gibi homojen yapıda olmayan materyallerin en zayıf kesitinin yerini saptayamayacağı belirtilmiştir. Bu elde edilen sonuçlarda her zaman için çekme dayanımı oluşan ve lif içeriğinin rastgele dağılımına karşılık gelmeyen çentik üstündeki profil kısmından etkilenilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, 3 noktalı eğilme testi için kullanılan kirişin tam orta noktasında ve çekme bölgesinde 25 mm derinliğinde (150x150x550 mm boyutlarındaki kiriş için) çentik açılmış ve modelleme buna göre yapılmıştır. 3 noktalı eğilme dayanımında kullanılan kiriş modellemesinde çentik açılması sebebinin ana varsayımı, ilk çatlağın örnek boyunca ortalama malzeme özelliklerine bakılmaksızın temsili olmayan bir kesitte ortaya çıkmasına neden olabileceğiydi. Diğer tarafta, çentiksiz numunenin kullanılması durumunda, ilk çatlak en zayıf kesitte yani en az miktarda lifle en düşük çekme dayanımına sahip kesitte oluşur.

Yukarıda belirtilen dezavantajların yanı sıra 4 noktalı eğilme testinde, temsili sonuçlar elde etmek için temel varsayım olan en zayıf (temsili) kesitin yerini güvenli bir şekilde saptayabilir. Buna ek olarak ilk çatlağın oluşum yeri, 3 noktalı eğilme dayanım testine oranla 4 noktalı test mekanizmasında 40-200 kat daha geniş bir alanda araştırılır. Bu da, çatlağın muhtemel ilk oluşum yerini belirlemede yardımcı olur.

Yukarıdaki varsayımlara dayanarak, 4 noktalı eğilme testinin lif takviyeli harç karışımlarının malzeme parametrelerinin tanımlanması için uygun olduğunu iddia etmek mümkündür [91].



Şekil 3.1. 4 nokta yükleme testi düzeneği



Resim 3.5. Eğilme dayanım testleri için kullanılan test cihazı

3.3.4. Serbest rötre deneyi

Devamlı olarak su içerisinde bırakılan çimento hamurlarının ve betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında küçük bir miktar artma meydana gelmektedir. Çimento hamurunun veya betonun gösterdiği hacim artışına “şişme” veya “negatif büzülme” denilmektedir. Numunelerin boyutu 25x25x285 mm boyutlarında 3 adet olarak üretilmiştir. Serbest rötre deneyi TS EN 12617-4’e [92] göre yapılmıştır



Resim 3.6. Serbest rötre deneylerinin yapıldığı test cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çimento esaslı harç karışımlarının taze haldeki çökmelerinin incelendiği durum için üretilen numunelere yayılma tablası deneyi yapıldı. Sertleşmiş çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları için basınç dayanım testi, eğilme dayanımları için 4 noktalı eğilme deneyi ve su kürü altındaki şekil değiştirmesini incelemek için serbest rötre (negatif rötre) deneyleri uygulanmıştır.

4.1. Yayılma Özelliği

Taze harç karışımları üzerinde yapılan yayılma tablası deneyi sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu deneyde kalıp görevi gören huni şeklinin taban çapı 10 cm olduğu için yayılma değerleri bu çap oranında değer alacaktır.

Çizelge 4.1. Yayılma tablası deney sonuçları

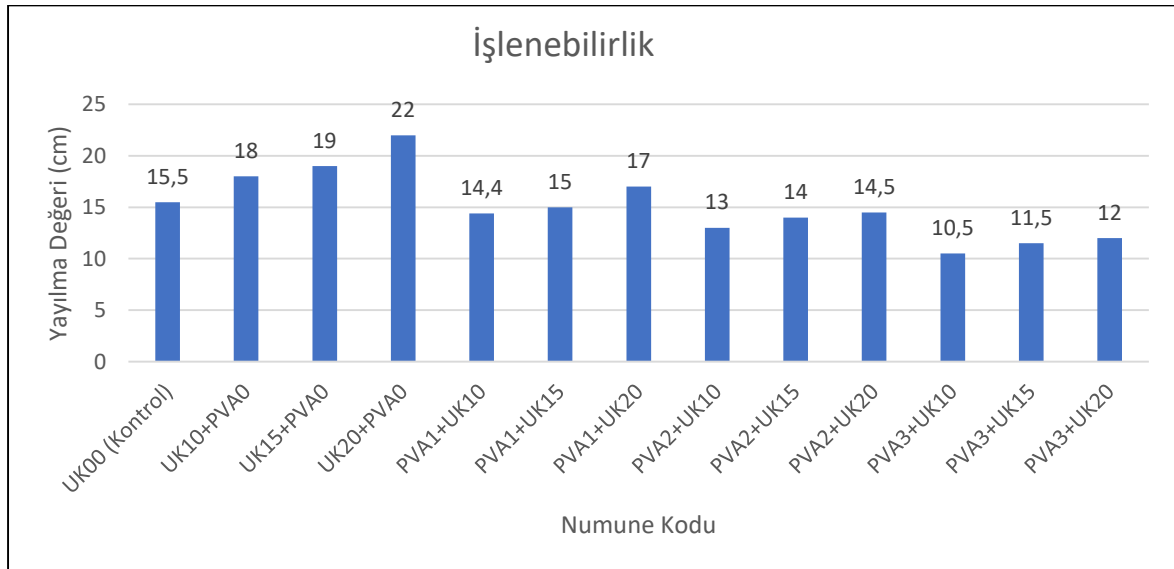
Karışım Kodu	Yayılma değeri (cm)
UK00(Kontrol)	15,5
UK10+PVA0	18
UK1,5+PVA0	19
UK20+PVA0	22
PVA1+UK10	14,4
PVA1+UK15	15
PVA1+UK20	17
PVA2+UK10	13
PVA2+UK15	14
PVA2+UK20	14,5
PVA3+UK10	10,5
PVA3+UK15	11,5
PVA3+UK20	12

Yapılan bu araştırmada, üretilen çimento esaslı kompozitler üzerinde farklı oranlara sahip UK ve PVA lif muhtevasına göre işlenebilirlik değerlerinin bulunması için mini yayılma tablası deneyi yapılmıştır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Bazı karışımların yayılma resimleri

Çalışmada kullanılan karışımların işlenebilirlik özelliği olan yayılma deneyi sonuçları Şekil 4.1’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Karışımların yayılma değer grafiği

Şekil 4.1 incelenip analiz edildiğinde, karışımlarda UK ikame oranı arttıkça yayılma çapı da artmaktadır. Bu yayılma çapları UK00 (kontrol) harcına göre; UK10+PVA0 %16, UK15+PVA0 %22 ve UK20+PVA0 de ise %41 oranında artmıştır. Karışımlarda UK ikame oranı ile yayılma çapı arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenebilir. PVA lif oranı arttıkça yayılma çapı azalmıştır. Yani lif oranı ile işlenebilirlik arasında ters ilişki vardır. Bütün

PVA+UK karışımlarda UK oranı artıkça yayılma artmıştır. Fakat bu lifli karışımların yayılma çapı değerlerinin, kontrol karışımının değerinden daha düşük olduğu Şekil 4.1’de görülmektedir.

Çalışmada en yüksek yayılma UK20(%20 uçucu kül ikameli) numunelerinde 22 cm olarak ölçülmüştür ve kontrol karışımına göre %41 daha fazladır. En düşük yayılma çapı ise PVA3+UK10 kodlu karışımda olup 10,5 cm ölçülmüştür ve kontrol karışımına göre %32 oranında azalma meydana gelmiştir.

Kısaca şunu söylemek mümkündür: PVA lif, harcın yayılmasını azaltır. PVA liflerin hidrofilik (suyu seven) özelliği sebebiyle karışımdaki suyu bünyesine çekerek uçucu kül ikamesinin oluşturduğu işlenebilirlik avantajını nötrlediği görülmüştür. Liflerin işlenebilirliği olumsuz etkilediği ise literatüre paralellik göstermektedir.

4.2. Basınç Dayanım Özelliği

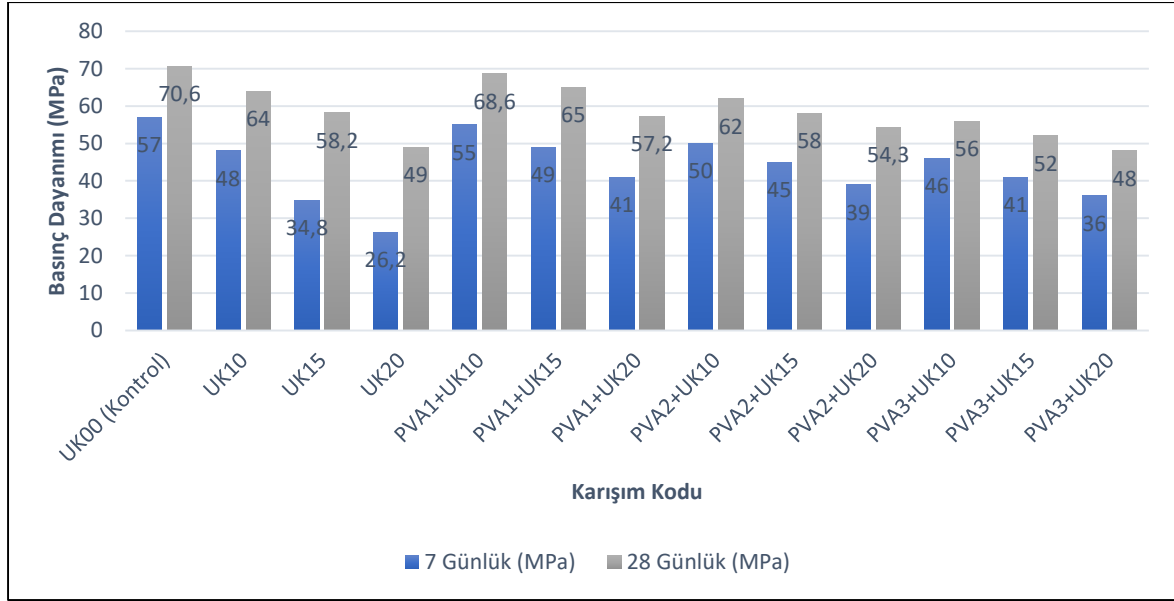
Küp numuneler üzerinde gerçekleşen deneyler sonucunda elde edilen değerler ve bu değerler arasındaki standart sapması Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çimento harçlarının aynı PVA oranlı değişen uçucu kül ikameli basınç dayanım aritmetik ortalaması ve standart sapma değerleri

Karışım Kodu		Basınç Dayanımı (MPa)			
		7 Günlük	Standart Sapma (MPa)	28 Günlük	Standart Sapma (MPa)
UK00 (Kontrol)		57,00	1,33	70,60	1,04
UK10+PVA0		48,00	2,34	64,00	2,51
UK15+PVA0		34,80	0,22	58,20	2,82
UK20+PVA0		26,20	1,39	49,00	1,35
UK00 (Kontrol)		57,00	1,33	70,60	1,04
PVA1	UK10	55,00	1,21	68,60	0,07
	UK15	49,00	2,38	65,00	1,26
	UK20	41,00	1,73	57,20	1,04
UK00 (Kontrol)		57,00	1,33	70,60	1,04
PVA2	UK10	50,00	1,37	62,00	2,73
	UK15	45,00	2,74	58,00	0,71
	UK20	39,00	0,40	54,30	0,74
UK00 (Kontrol)		57,00	1,33	70,60	1,04
PVA3	UK10	46,00	0,19	56,00	0,54
	UK15	41,00	0,59	52,00	2,45
	UK20	36,00	0,80	48,00	0,04

Çizelge 4.3. Çimento harçlarının aynı uçucu kül ikameli değişen PVA oranlı basınç dayanım aritmetik ortalaması ve standart sapma değerleri

Karışım Kodu		Basınç Dayanımı (MPa)			
		7 Günlük	Standart Sapma (MPa)	28 Günlük	Standart Sapma (MPa)
UK00 (Kontrol)		57	1,33	70,6	1,04
UK10+PVA0		48	2,34	64,0	2,51
UK15+PVA0		34,8	0,22	58,2	2,82
UK20+PVA0		26,2	1,39	49,0	1,35
UK00 (Kontrol)		57	1,33	70,6	1,04
UK10	PVA1	55	1,21	68,6	0,07
	PVA2	50	1,37	62,0	2,73
	PVA3	46	0,19	56,0	0,54
UK00 (Kontrol)		57	1,33	70,6	1,04
UK15	PVA1	49	2,38	65,0	1,26
	PVA2	45	2,74	58,0	0,71
	PVA3	41	0,59	52,0	2,45
UK00 (Kontrol)		57	1,33	70,6	1,04
UK20	PVA1	41	1,73	57,2	1,04
	PVA2	39	0,40	54,3	0,74
	PVA3	36	0,80	48,0	0,04



Şekil 4.2. Çimento harç karışımlarının grafiği

Genel olarak PVA lifli karışımlar incelenip analiz edildiğinde, PVA lif oranı arttıkça hem 7 gün hem de 28 günlük basınç dayanım değerleri azalmaktadır. Basınç dayanımı ile yayılma çapı arasında kesin bir ilişki olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı PVA lif oranı arttıkça yayılmanın azaldığı Şekil 4.1’de görülmektedir. Bunun nedeni, karışımın kalıba yerleştirme ve sıkıştırma zorluğundan kaynaklandığı bilinmektedir. 28 günlük basınç dayanımları analiz edilirse; UK10 kodlu karışıma %1 PVA lifi ilave edildiğinde basınç dayanımı yaklaşık %7

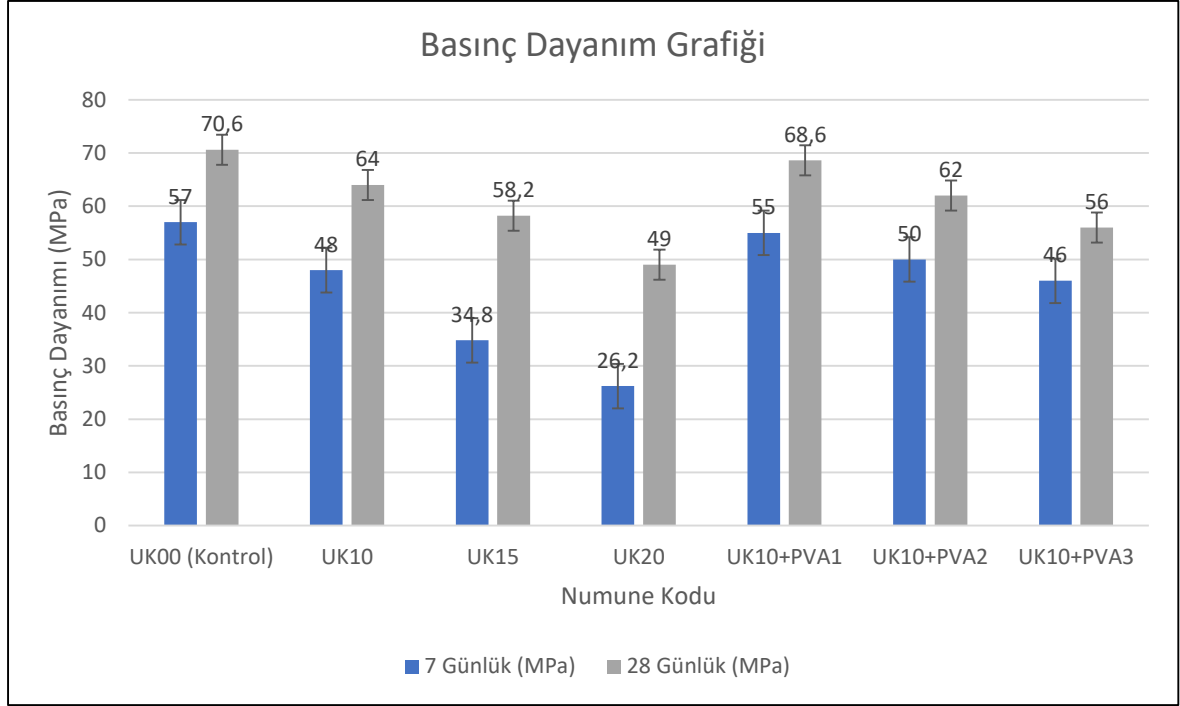
artmıştır. Aynı karışıma %2 ve %3 lif ilave edildiğinde ise basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %3 ve %13'lük bir azalma meydana gelmiştir.

UK ikame oranı %15 olan karışıma (UK15), %1 PVA lif ilave edildiğinde basınç dayanımı yaklaşık %12 artmıştır. Aynı karışıma %2 lif ilave edildiğinde ise basınç dayanımında yaklaşık %0,34, %3 lif ilave edildiğinde ise %11 azalma meydana gelmiştir.

%20 uçucu kül ikameli (UK20) karışıma %1 ve %2 lif eklendiğinde basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %17 ve %11'lik artış meydana gelir iken, %3 lifli karışımda ise basınç dayanımı %2 azalmıştır.

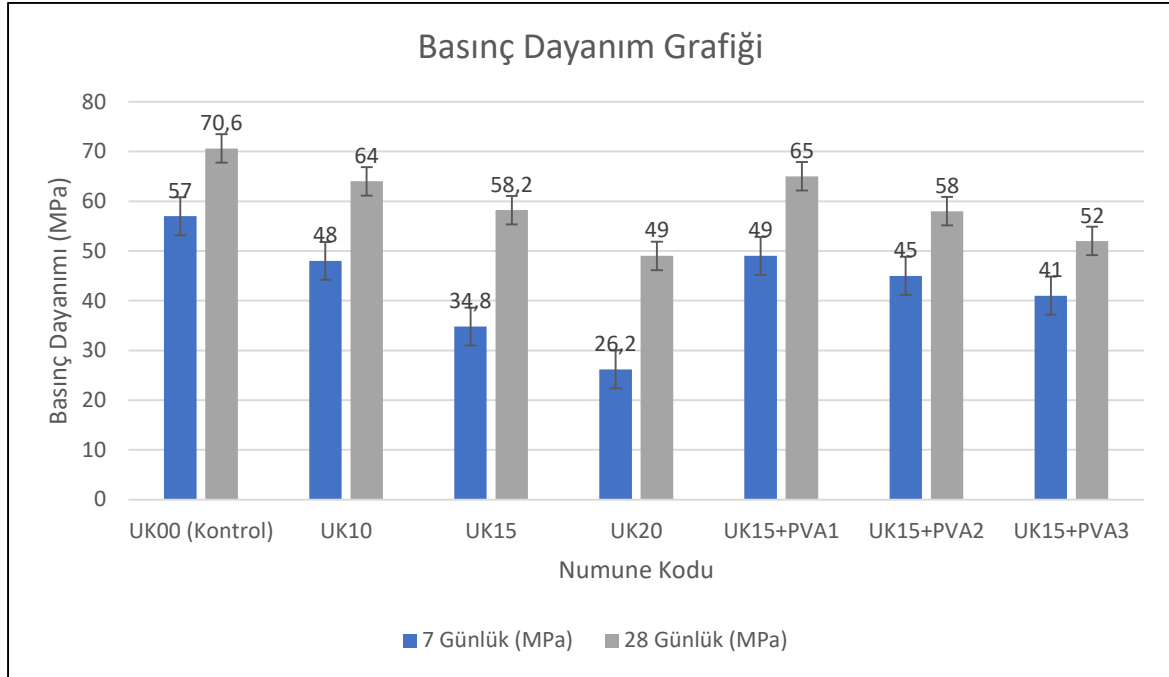
Çizelge 4.2 incelendiğinde, 7 ve 28 günlük numunelerde aynı uçucu kül oranına sahip numunelerin farklı PVA oranlarındaki karışımlarının analizi yapıldığında:

Her uçucu kül ikameli karışıma, %1 oranında lif ilave edildiğinde basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Fakat lif oranı artıkça ilk lif oranı ile elde edilen karışımların basınç dayanımı azalmaktadır. Bunun nedeninin işlenebilirlikten kaynakladığı (yayılma çapı ile ilişkilendirilebilir) söylenebilir. Yani PVA lif oranı artıkça harcın basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Buna göre, lifli harç karışımlarında en yüksek basınç dayanımı %10 uçucu kül ikameli %1 PVA lif katkılı numunelerde 68,6 MPa olarak bulunmuştur.



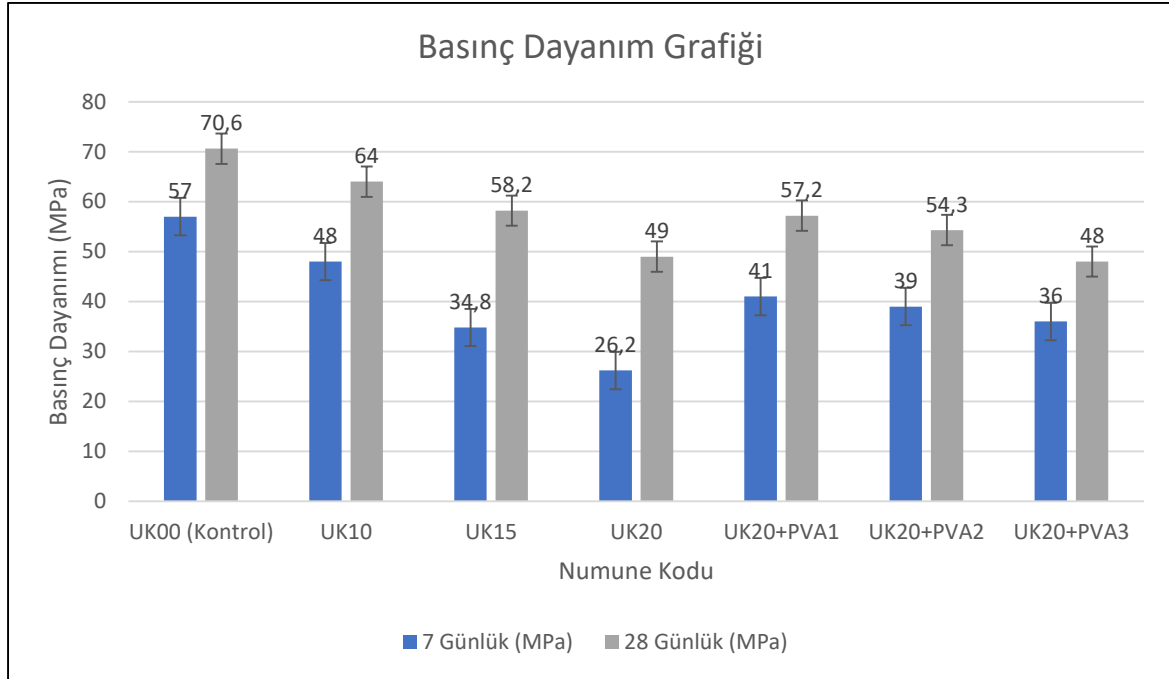
Şekil 4.3. Lifsiz harç karışımlarının %10 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması

Şekil 4.3'te %10 uçucu kül içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Buna göre, %1 PVA lif içeren numune hariç diğer numunelerde lifsiz karışım numunesi daha yüksek basınç dayanım değerini elde etmiştir. Bu karışım düzeyinden çıkarılabilecek genel sonuç ise PVA lif miktarının artması %10 uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanımını düşürmüştür.



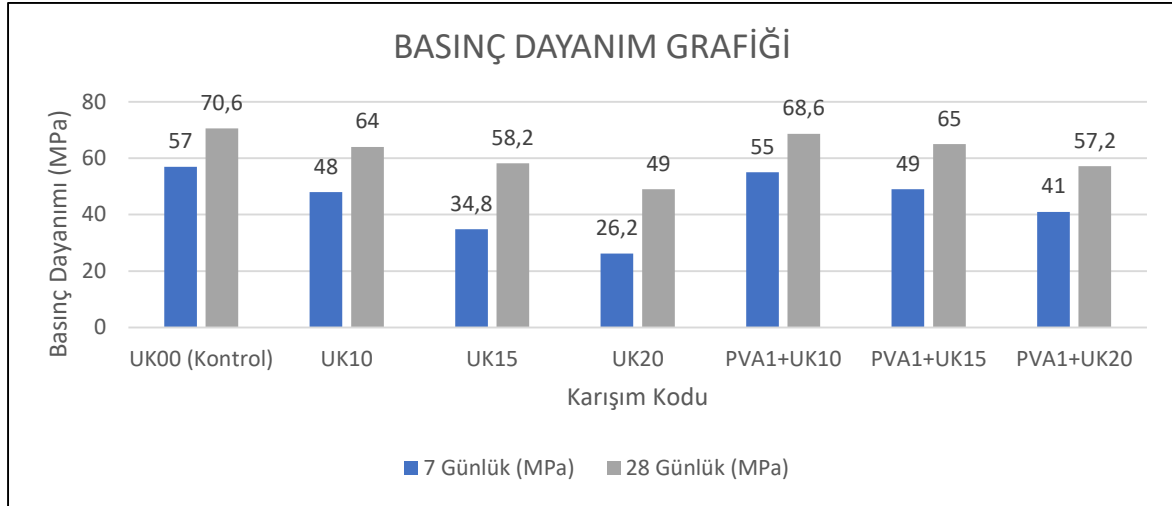
Şekil 4.4. Lifsiz harç karışımlarının %15 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması

Şekil 4.4'te %15 uçucu kül içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. %10 UK ikameli numunelere benzer olarak, %1 PVA lif içeren numune hariç diğer numunelerde lifsiz karışım numunesi daha yüksek basınç dayanım değerini elde etmiştir. Bu karışım düzeyinden çıkarılabilecek genel sonuç ise PVA lif miktarının artması %15 uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanımını düşürmüştür.



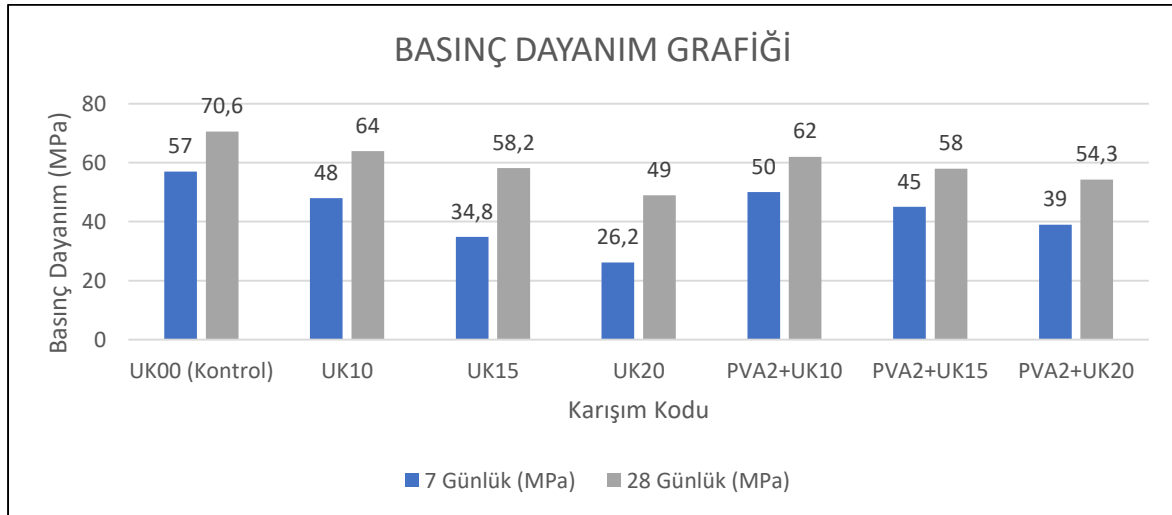
Şekil 4.5. Lifsiz harç karışımlarının %20 uçucu kül ikameli oranı için değişen PVA lif katkılı 7 ve 28 günlük karışımlarla olan basınç dayanım karşılaştırması

Şekil 4.5'te %20 uçucu kül içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Lifsiz %20 uçucu kül ikameli numune, diğer lifli %20 UK ikameli numunelere göre daha düşük basınç dayanım değerine ulaşmıştır. Bunun sebebi olarak, %15 sınır değerinden sonra betonun erken dayanımının ciddi oranda düşmesi olarak belirtilebilir. Bununla birlikte lifli %20 UK ikameli numunelerde, PVA lifin hidrofilik özelliği su/çimento oranını düşürerek daha yüksek bir basınç dayanımı sağlamış fakat %3 PVA katkısı ile yerleşme ve boşluk artarak nerdeyse lifsiz UK20 numunesi ile aynı dayanıma sahip olmuştur. Bu karışım düzeyinden çıkarılabilecek genel sonuç ise %20 UK ikamesi betonda erken dayanım sorunlarına sebep olmuş ve sınır değerlere kadar bu erken dayanım sorunu PVA lif ile çözülebilmektedir.



Şekil 4.6. Lifsiz harç karışımları ve %1 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması

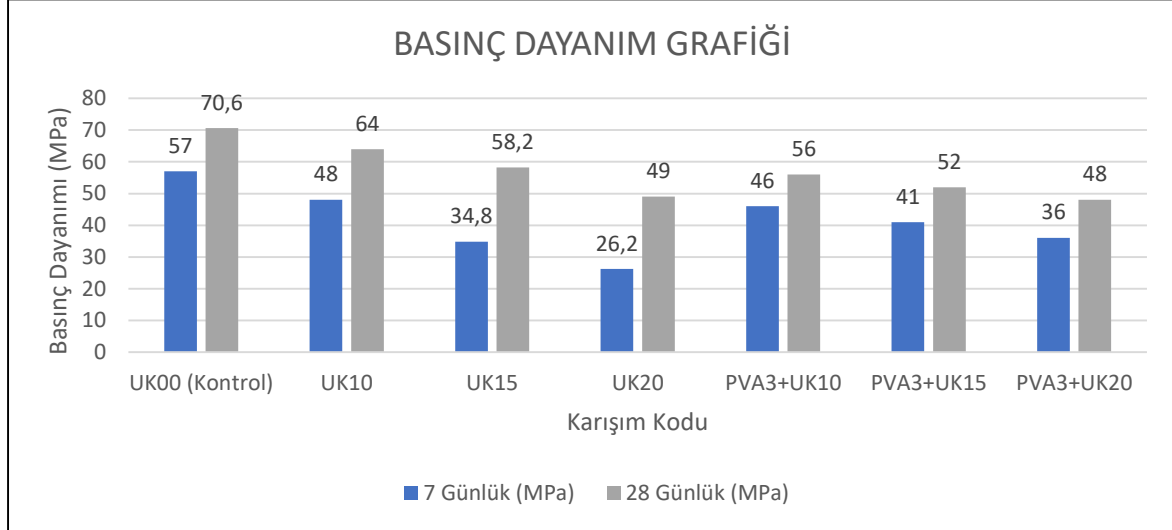
Şekil 4.6'da %1 PVA içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında, %1 PVA içeren UK10, UK15 ve UK20 kodlu karışımlar daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebebinin %1 PVA miktarının bu karşılaştırmada mevcut su/çimento oranını azaltarak fazla suyun oluşturduğu boşluktan kaynaklı basınç dayanımını artırması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Lifsiz harç karışımları ve %2 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması

Şekil 4.7'de %2 PVA içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında, %2 PVA içeren UK10, UK15 ve UK20 kodlu karışımlar

yaklaşık aynı basınç dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebebinin %2 PVA miktarının basınç dayanımını etkilemeyecek sınır oran olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Lifsiz harç karışımları ve %3 PVA lif katkılı oranı için değişen uçucu kül ikamelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanım karşılaştırması

Şekil 4.8’de %3 PVA içeren numuneler detaylı olarak incelenmek istenmiştir. Lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında, %3 PVA içeren UK10, UK15 ve UK20 kodlu karışımlar daha düşük basınç dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebebinin, %2 sınır PVA oranından sonra yerleştirme sorununa bağlı olarak bölgesel topaklanmalar ve içsel boşlukların artması olduğu düşünülmektedir.



Resim 4.2. Numunelerin basınç dayanım testi

4.3. Eğilme Dayanım Özelliği

25x57,5x315 mm boyutlarında olan numuneler üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanım testi sonuçları ve bu değerler arasındaki standart sapma değerleri aşağıda Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çimento harçlı karışımların eğilme dayanımları ve standart sapma değerleri

Karışım Kodları		Eğilme Dayanımı (MPa)			
		7 Günlük	Standart Sapma	28 Günlük	Standart Sapma
UK00 (Kontrol)		6	2,13	8,4	1,47
UK10+PVA0		5,9	2,92	7,7	2,6
UK15+ PVA0		4,65	2,85	7,2	1,12
UK20+ PVA0		3,5	0,45	5,8	0,74
UK10	PVA0	5,9	2,92	7,7	2,6
	PVA1	7,26	0,18	9,19	0,56
	PVA2	7,4	2,62	10	1,58
	PVA3	8,26	2,03	12,33	1,83
UK15	PVA0	4,65	2,85	7,2	1,12
	PVA1	6,82	1,55	9,02	2,65
	PVA2	7,3	2,23	9,5	1,75
	PVA3	8,05	2,15	11,07	1,73
UK20	PVA0	3,5	0,45	5,8	0,74
	PVA1	5,65	0,88	7,62	2,38
	PVA2	6,87	0,42	9,1	2,08
	PVA3	7,1	2,82	9,5	0,84

Çalışmada, eğilme dayanımı özelliğini belirlemede bütün karışımlar 7 ve 28 gün sonunda eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur (Resim 4.3).

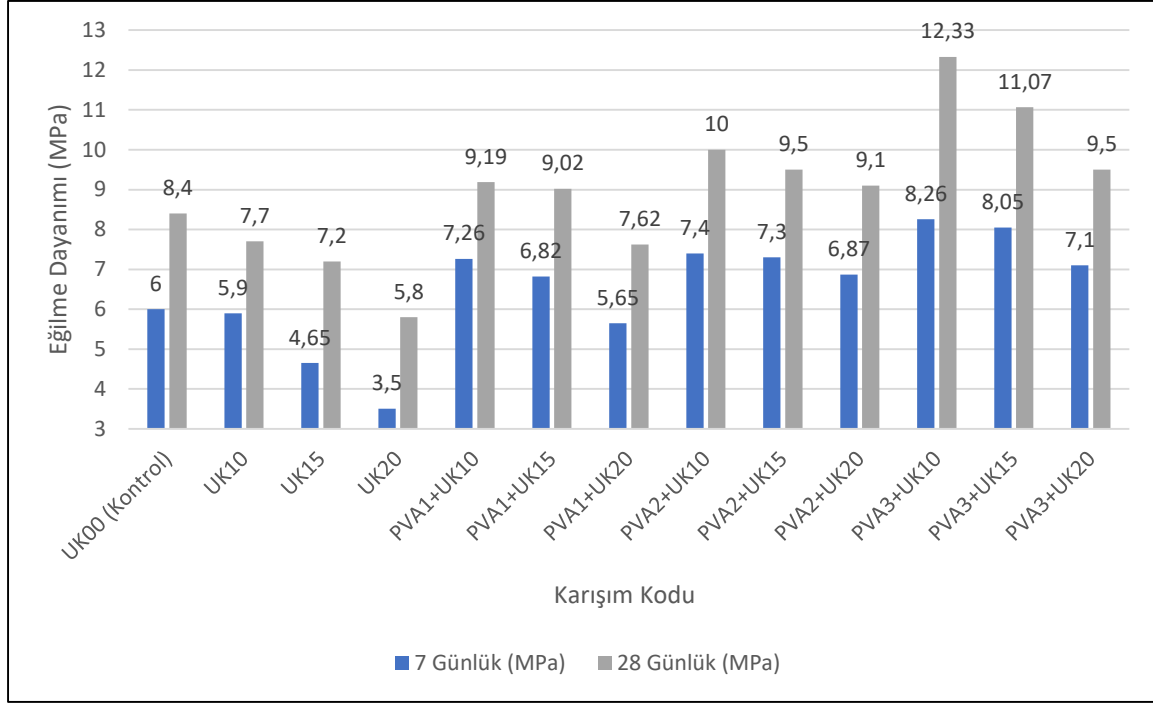
Genel olarak, lifsiz karışımlarla elde edilen numunelerin eğilme dayanımı testi sonucunda gevrek kırılma neticesinde iki parçaya ayrılma gözlenmiştir. Lifli karışımlarda ise PVA lif oranı arttıkça beklenildiği gibi eğilme dayanımı artmıştır. Lifli karışımlarda kırılma meydana geldikten sonra numune ikiye bölünerek ayrılmamaktadır (Resim 4.3).

Eğilme dayanımı deney sonuçlarına ait aritmetik ortalamalar ve standart sapma değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

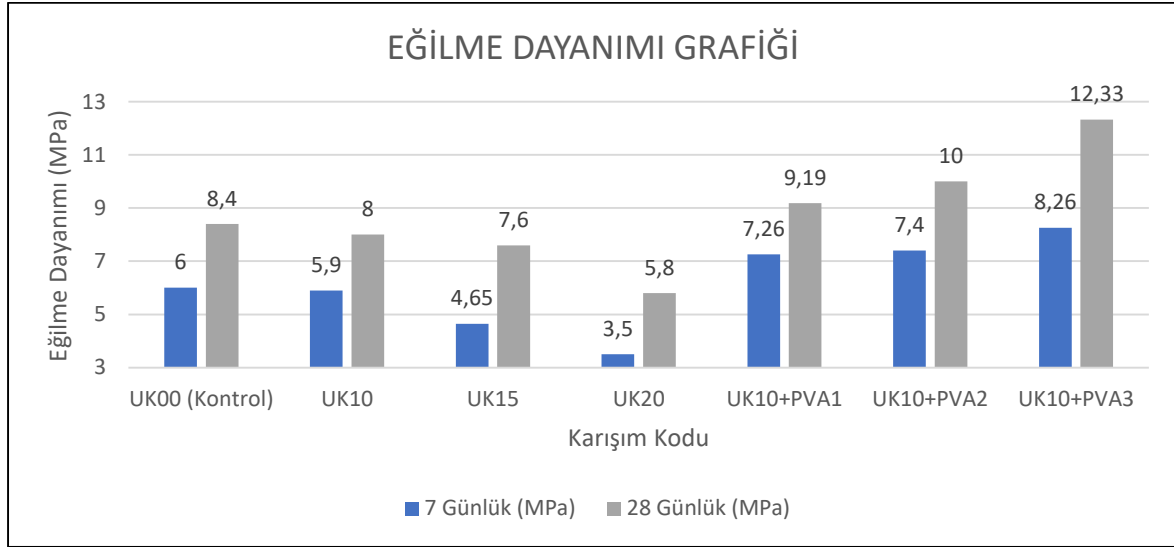


Resim 4.3. Numunelerin eğilme dayanımı testi

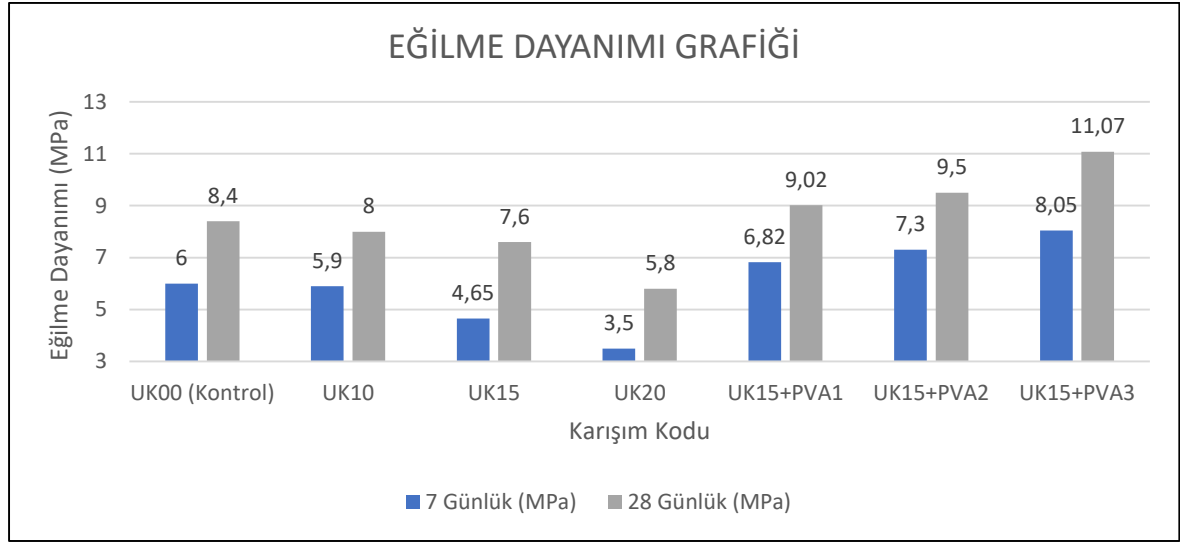
Şekil 4.9-4.15'te, yukarıda belirtilen sebeplere bağlı olarak 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri lifli ve lifsiz numuneler özelinde karşılaştırılmıştır.



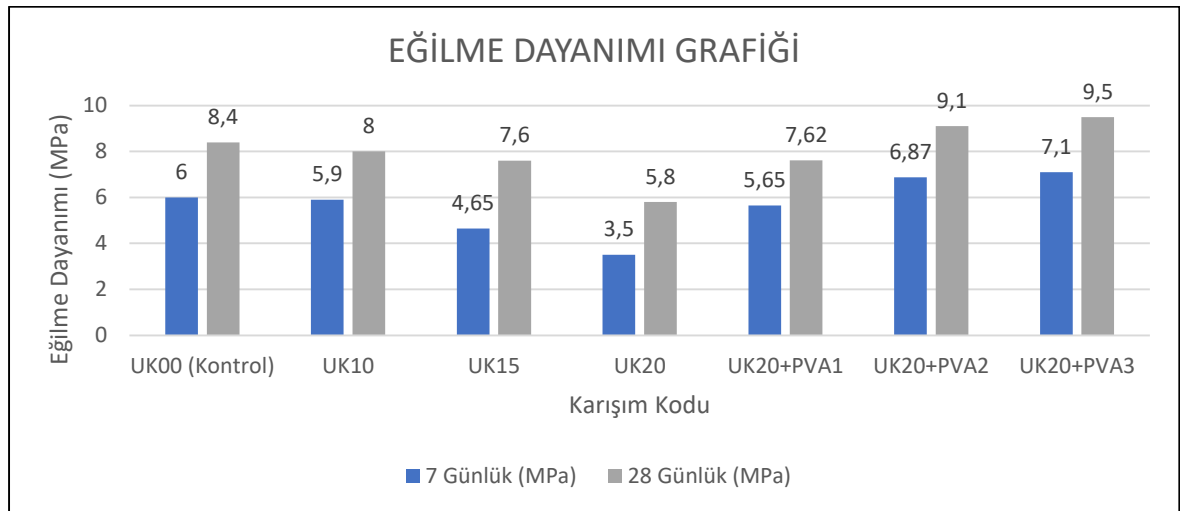
Şekil 4.9. Çimento harç karışımlarının eğilme dayanım grafiği



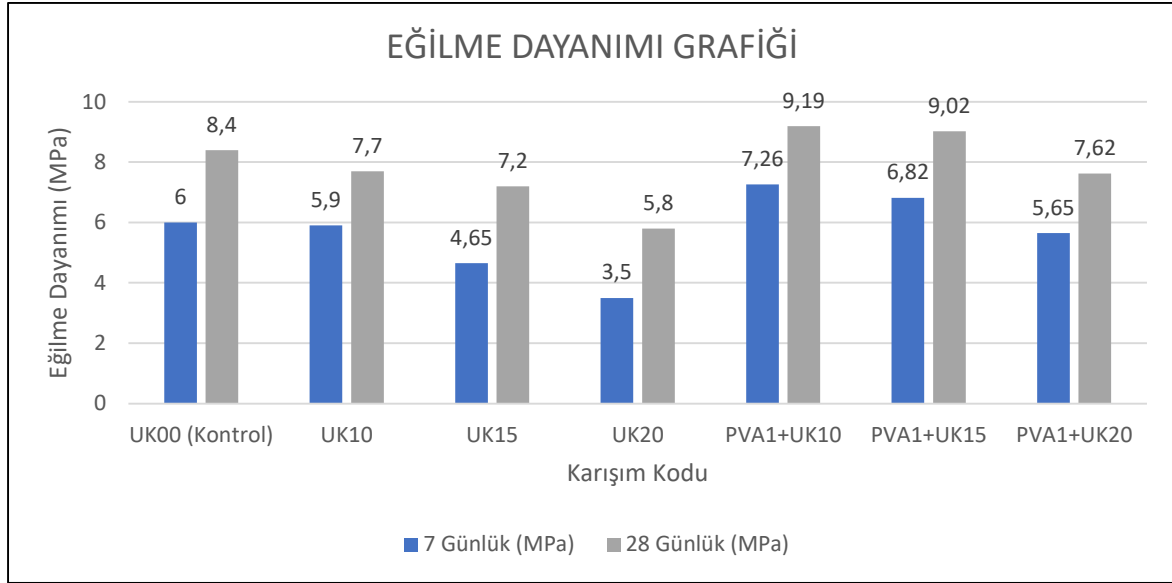
Şekil 4.10. Lifsiz harç karışımlarının %10 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması



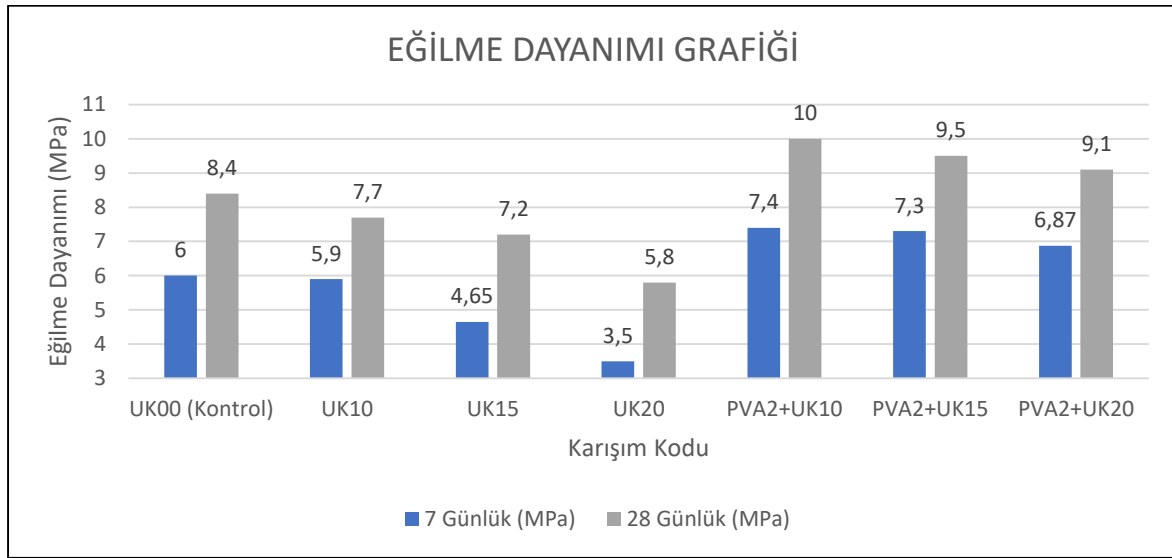
Şekil 4.11. Lifsiz harç karışımlarının %15 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması



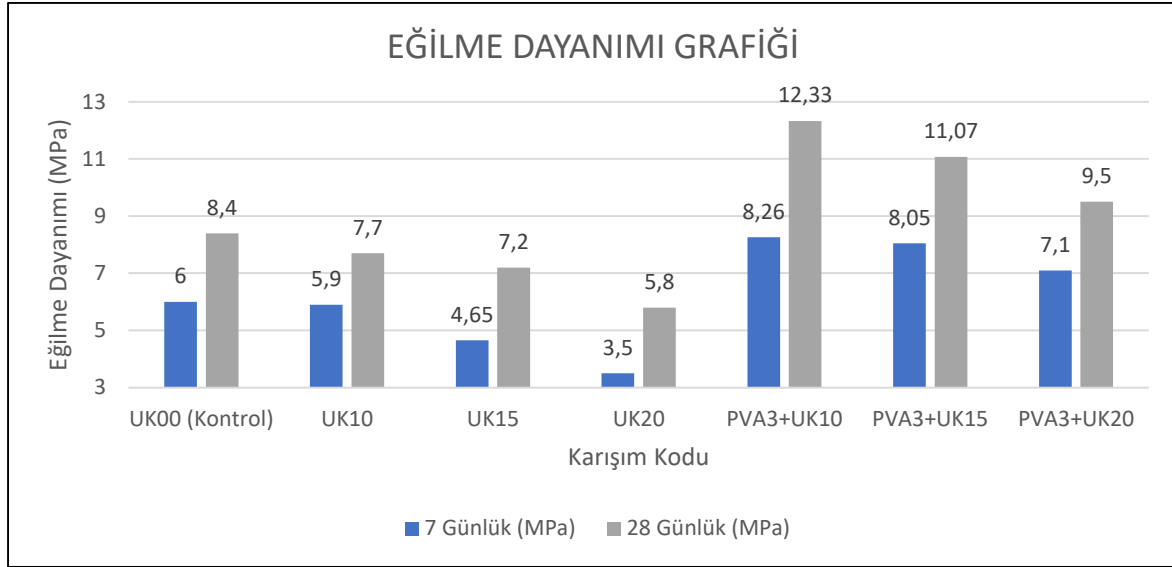
Şekil 4.12. Lifsiz harç karışımlarının %20 uçucu kül ikameli değişen PVA lif katkılı karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması



Şekil 4.13. Lifsiz harç karışımlarının %1 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması



Şekil 4.14. Lifsiz harç karışımlarının %2 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması



Şekil 4.15. Lifsiz harç karışımlarının %3 PVA lif katkılı değişen uçucu kül ikameli karışımlarla olan 7 ve 28 günlük eğilme dayanım karşılaştırması

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.4.-4.15. incelenip analiz edilirse: 7 ve 28 günlük UK ikameli numunelerin kendi aralarında kıyaslanması sonucunda UK00 (kontrol) en yüksek eğilme dayanım değerini verirken, en düşük eğilme dayanımı ise UK20 numunelerden elde edilmiştir. Yani UK ikame oranı arttıkça eğilme dayanımı düşmüştür. Uçucu kül, karışımın hidrasyon hızını yavaşlatması nedeniyle eğilme dayanımını düşürmüştür.

UK ikameli numuneler kendi aralarında inceleğinde, UK00'ın (kontrol) en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımı da azalmaktadır. 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı ile UK ikame oranı arasında ters ilişki olduğu görülmektedir.

UK ikameli karışımlara PVA lif ilave edildiğinde eğilme dayanımının arttığı görülmektedir (Çizelge 4.4).

UK10 karışımına %1, %2 ve %3 oranlarında PVA lifi ilave edildiğinde eğilme dayanımı 7 günlük eğilme dayanım değer artışları sırasıyla %23, 25 ve 40 iken, 28 günlük değerlerde ise %19, 30 ve 60 oranında belirlenmiştir.

Lifli ve genel eğilme dayanımları incelendiğinde en yüksek değerlere %3 PVA lif katkılı %10 uçucu kül ikameli karışım sahip olmuştur. Lifli karışımlar incelendiğinde ise en yüksek dayanıma %3 PVA lifli grup ulaşmıştır.

Şekil 3'te görüldüğü üzere, 7 ve 28 günlük %10, %15 ve %20 uçucu kül ikameli karışım numuneleri incelendiğinde, PVA lif oranının artmasıyla harcın eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Standart sapma bakımından değerlerin tutarlı olduğu görülmüştür.



Resim 4.4. Eğilme dayanım testi uygulanan PVA3+UK10 kodlu numunenin iç yüzeyi

4.4. Serbest Rötire Özelliği

Çalışmadaki numunelerin durabilite özellikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için 25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuklarının 14 günlük boy değişimi incelenmiştir.

Numunelerin boy değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.16 incelenip analiz edildiğinde en yüksek boy değişimi UK00 (kontrol) harç çubuklarında ölçülmüştür. En düşük boy değişimi ise PVA3+UK20 karışımından üretilen harç çubuğunda ölçülmüştür.



Resim 4.5. Serbest rötre deneyi yapılacak numunelerin kür içinde bekletilmesi

Lifsiz karışımlardan üretilen harç çubuklarında UK ikame oranı arttıkça boy değişimi azalmıştır. UK ikame oranı ile boy değişimi arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Karışımda çimento yerine çimentodan daha iri taneye sahip olan uçucu küllerin ikamesi ile harç çubuklarının boy değişiminin azaldığı söylenebilir.

PVA lifli karışimli harç çubukları kendi aralarında karşılaştırılıp incelenir ise, lif miktarı arttıkça harç çubuğunun boyunda meydana gelen değişimin azaldığı görülmüştür. Kısacası, lif oranı ile boy değişimi arasında ters bir orantı söz konusudur.

Bütün karışımlardaki boy değişiminin literatüre paralel olduğu görülmüştür.

Numunelerin her yaştaki boy değişimi ilk okumadan sonra Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır:

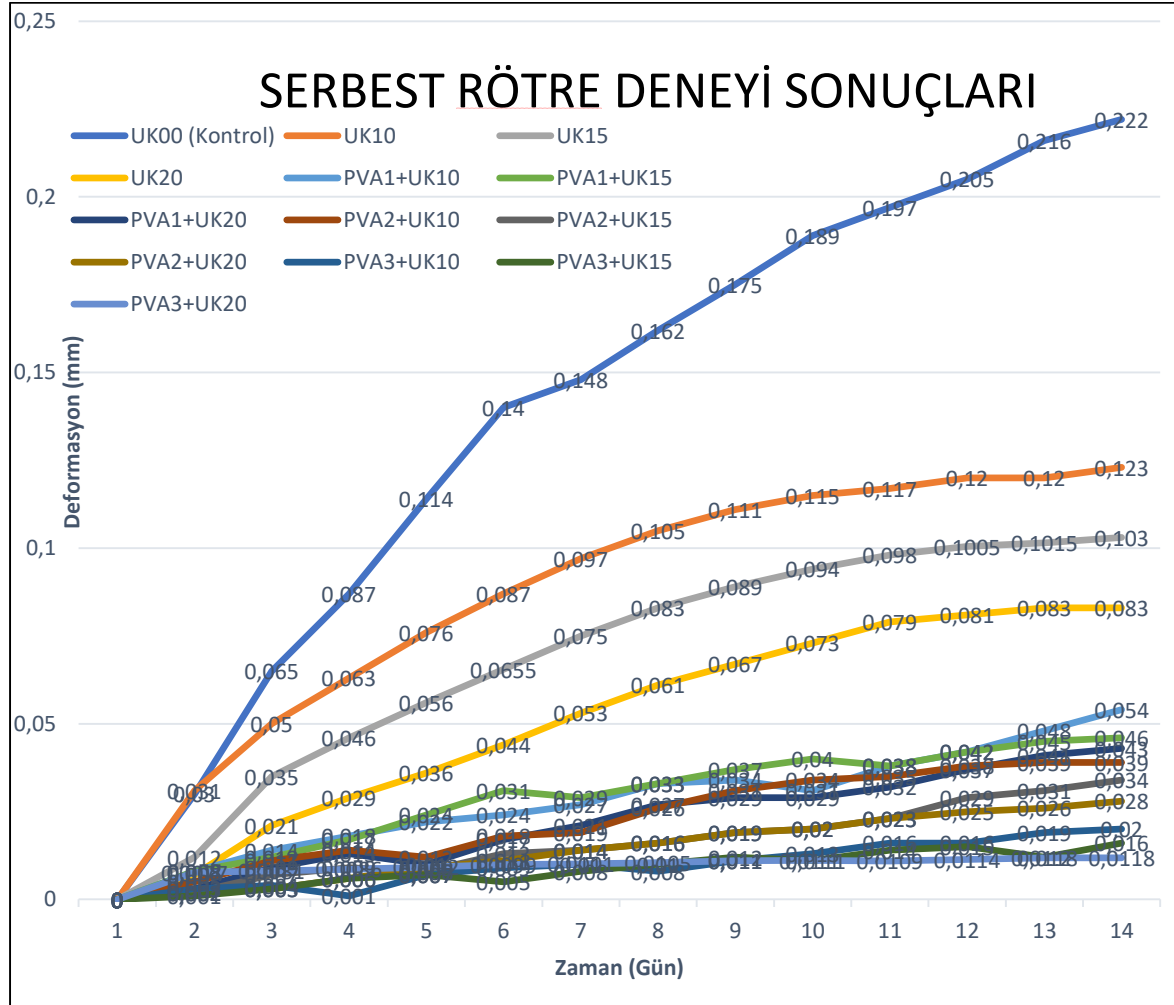
$$\Delta L_x = (CRD - \text{initial CRD}) / G \quad (4.1)$$

Burada:

ΔLx = numunenin her yaştaki boy değişimi, mm

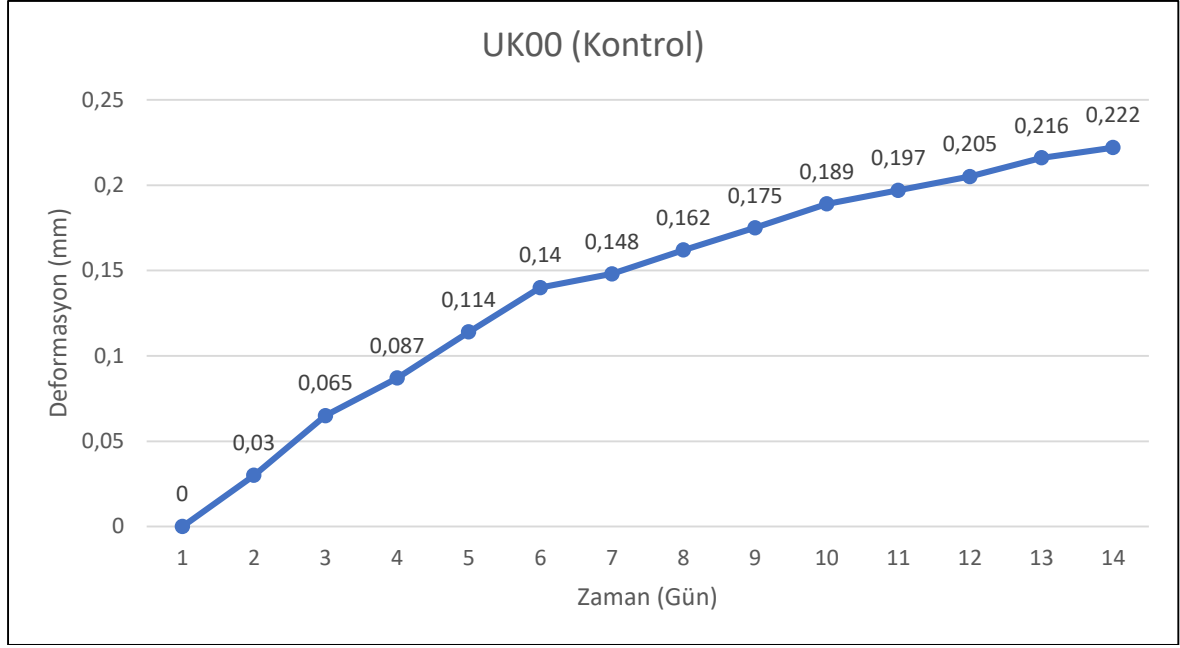
CRD = her yaştaki numune ile referans çubuğunun komparatör okumalarının farkı

G = ölçü boyu

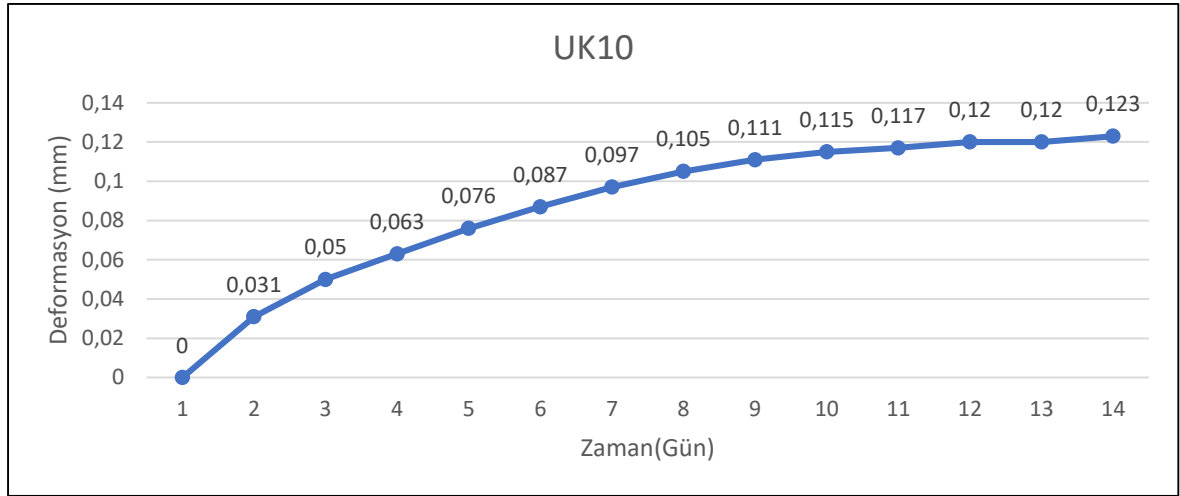


Şekil 4.16. Karışımların serbest rötre grafiği

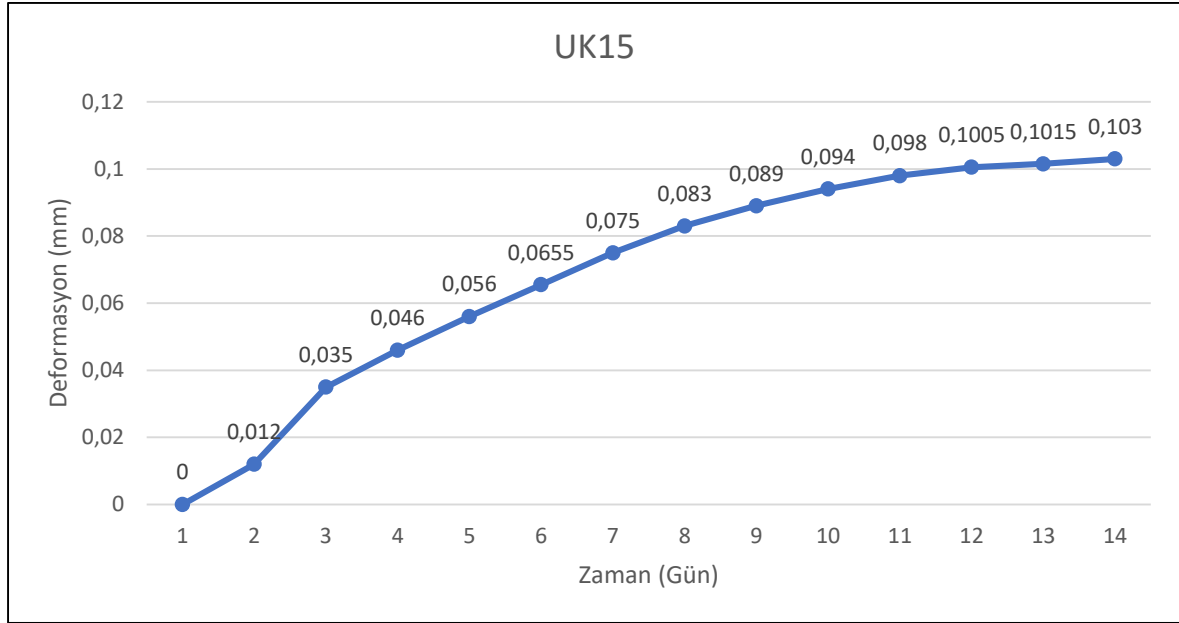
Şekil 4.17-4.29'da bütün numuneler için yukarıda belirtilen sebeplere bağlı olarak gelişen 14 günlük deformasyon değerleri belirtilmiştir.



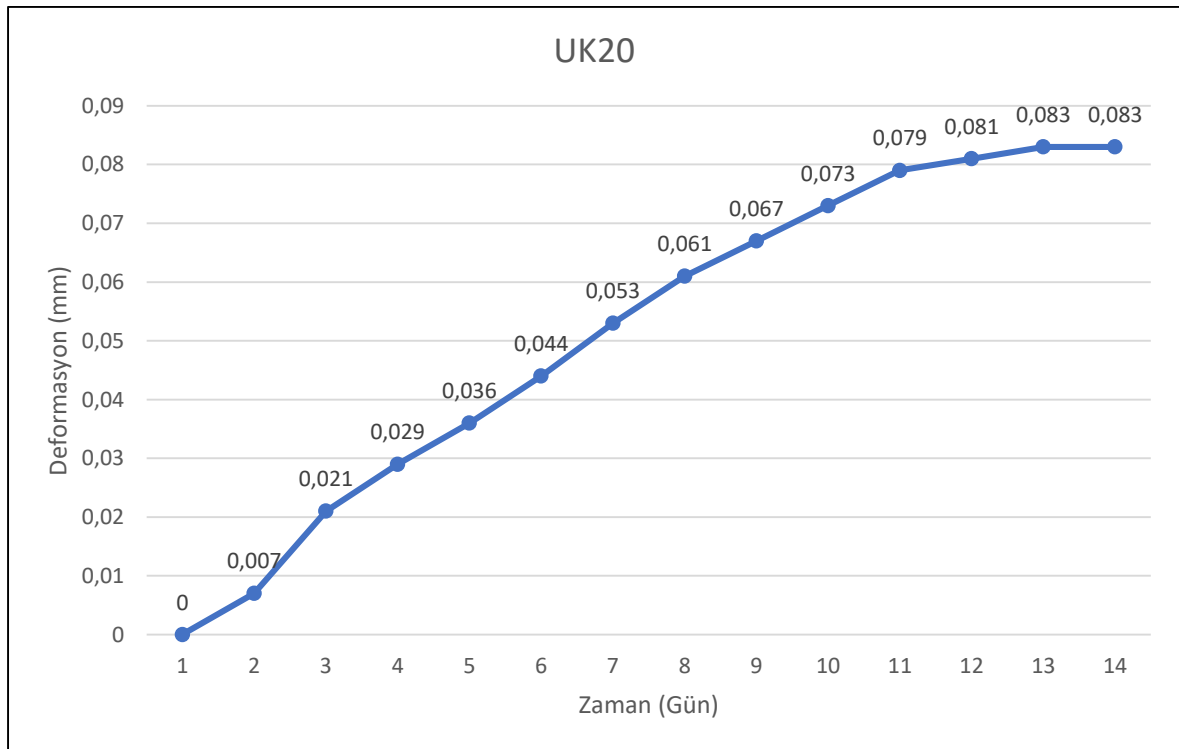
Şekil 4.17. UK00 (Kontrol) karışımının serbest rötre grafiği



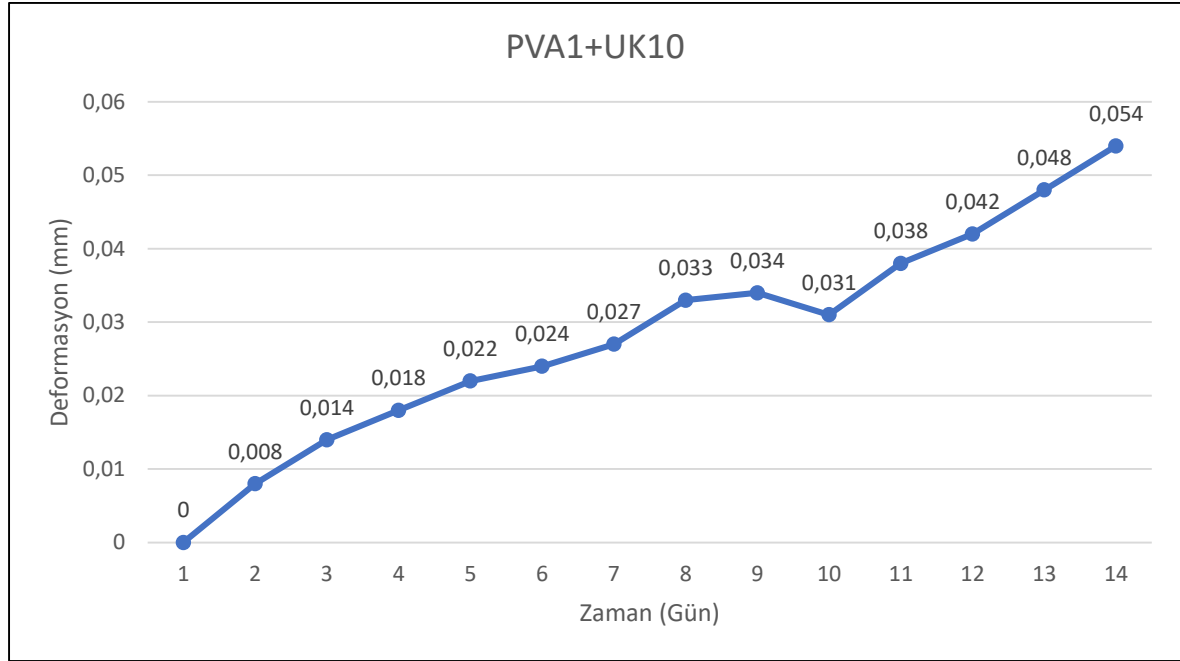
Şekil 4.18. UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



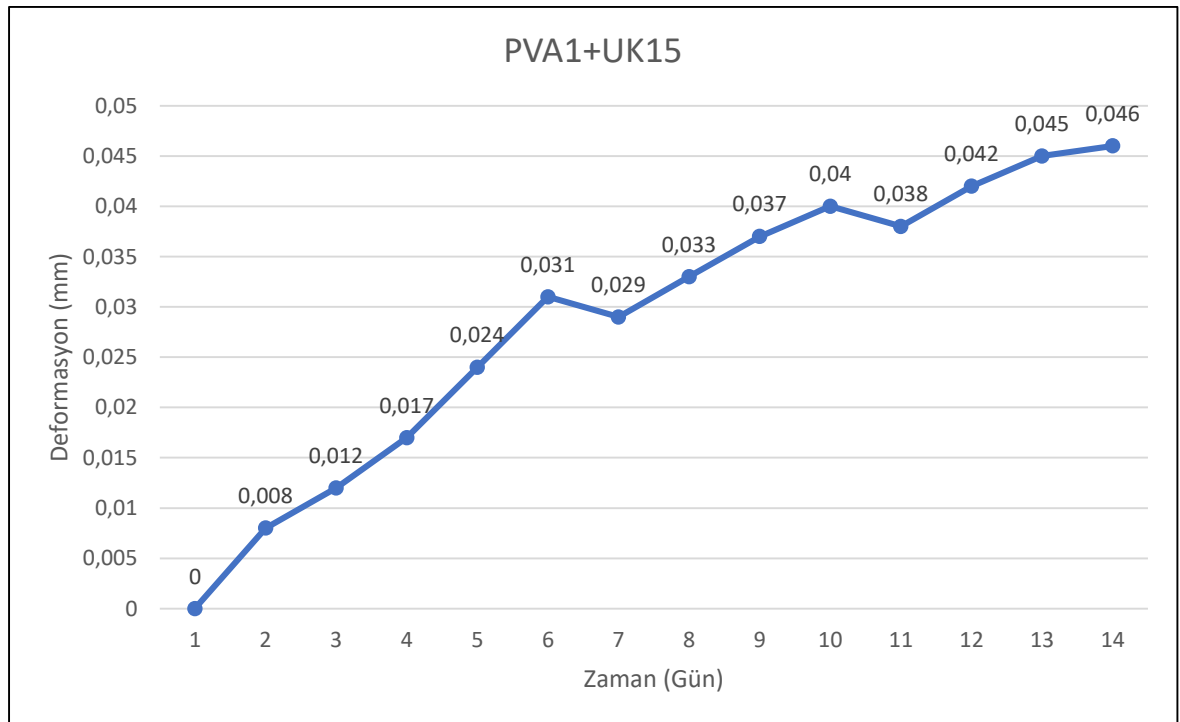
Şekil 4.19. UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



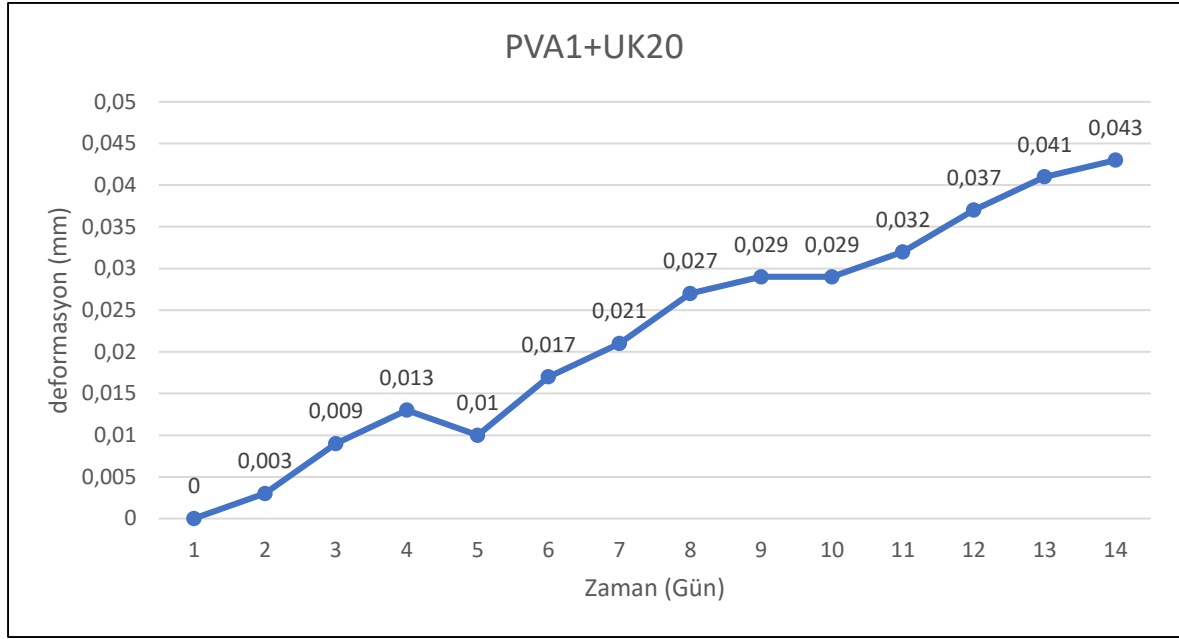
Şekil 4.20. UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



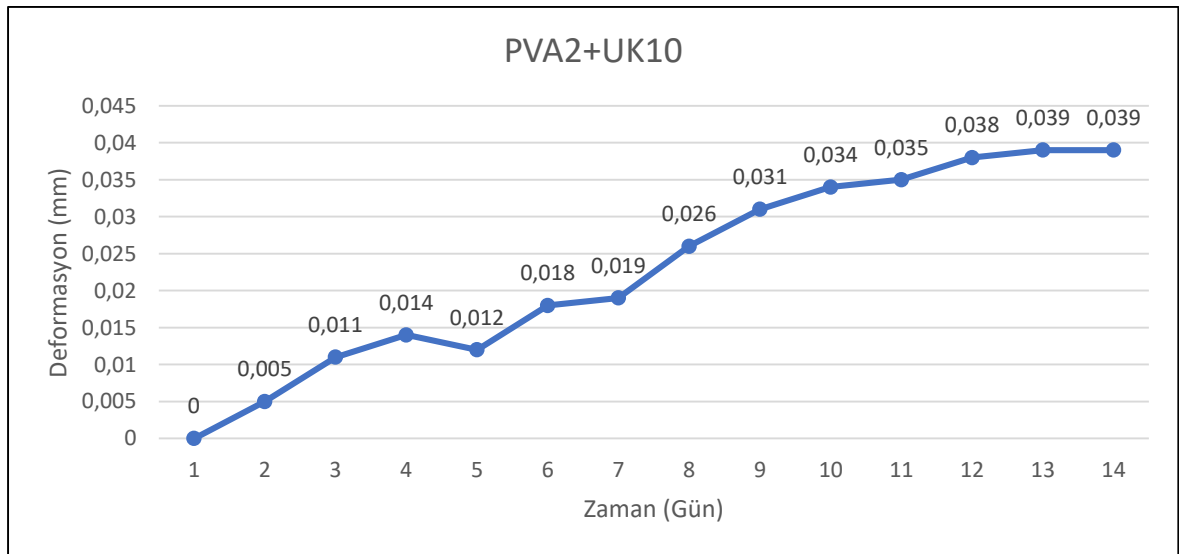
Şekil 4.21. PVA1+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



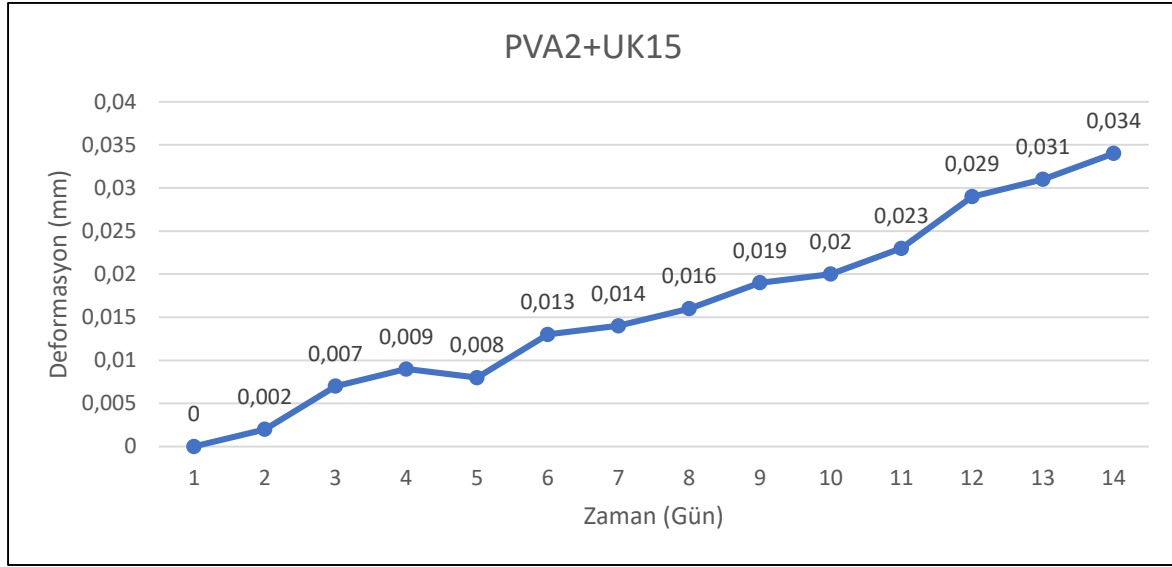
Şekil 4.22. PVA1+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



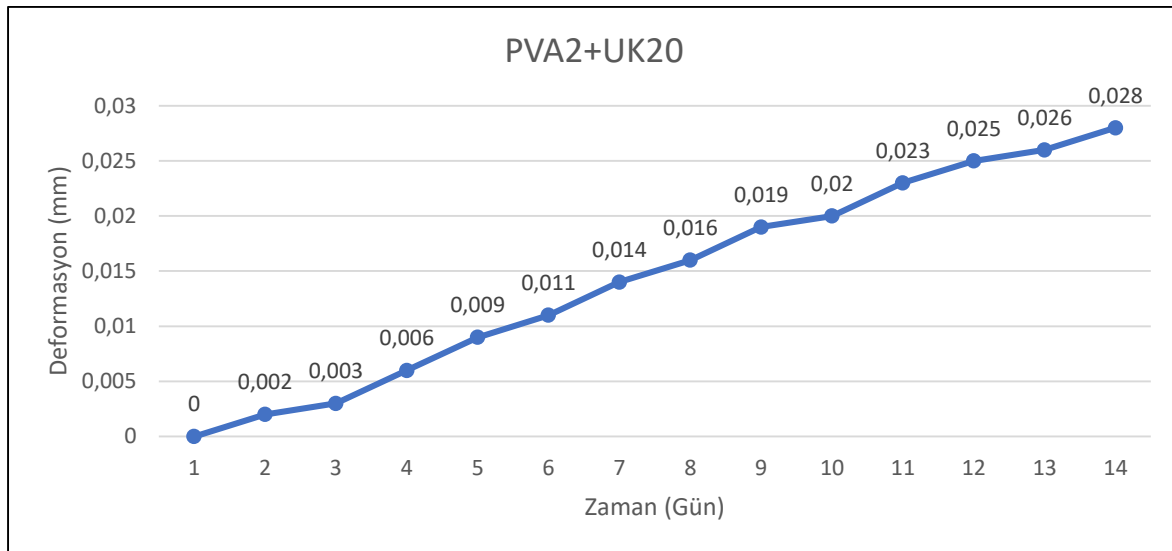
Şekil 4.23. PVA1+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



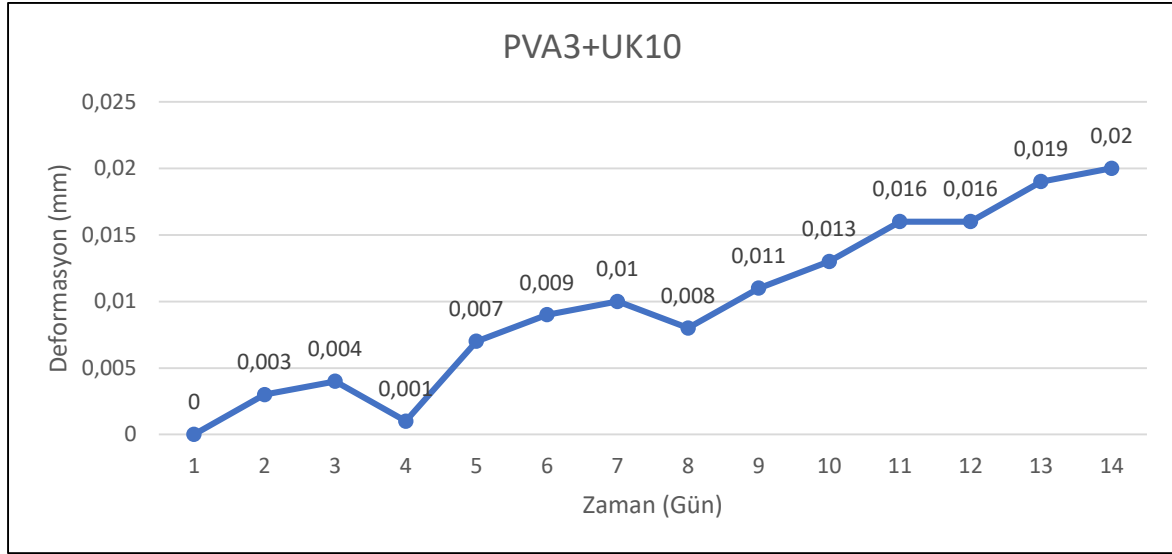
Şekil 4.24. PVA2+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



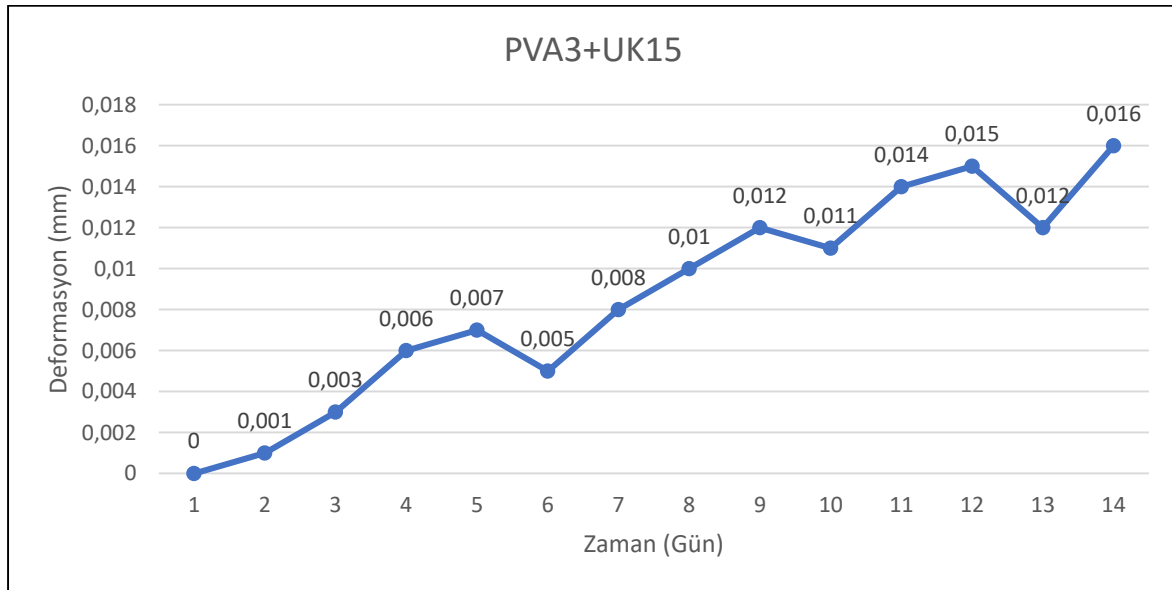
Şekil 4.25. PVA2+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



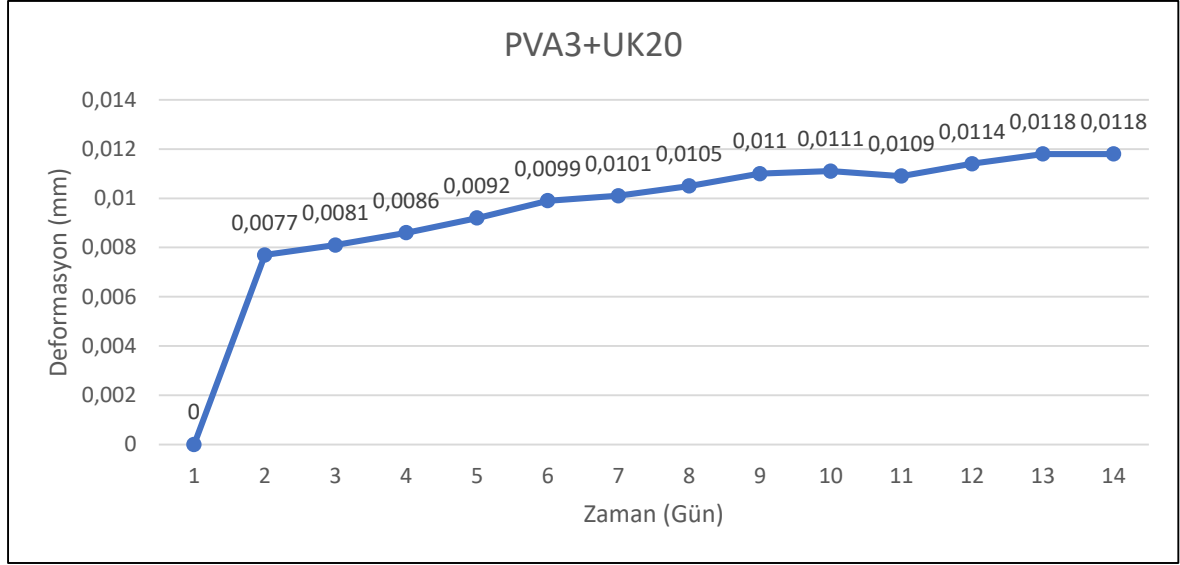
Şekil 4.26. PVA2+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



Şekil 4.27. PVA3+UK10 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



Şekil 4.28. PVA3+UK15 kodlu karışımın serbest rötre grafiği



Şekil 4.29. PVA3+UK20 kodlu karışımın serbest rötre grafiği

4.5. Bulguların İstatistiksel Değerlendirmesi

Araştırmadaki faktör sayısı ve seviyeleri arttıkça optimum koşulun saptanması oldukça zorlaşabilir. Bu araştırmada yapılan deneyler sonucunda, farklı karışımların farklı test gruplarında değişik sonuçlara sahip olduğu görülmüştür. Bundan dolayı, optimum koşulun saptanabilmesi için Dr. Genichi Taguchi tarafından bir dizi fonksiyon geliştirilmiştir.

Problemin çözümünde 2 faktör (uçucu kül ve PVA lif oranı) ve her faktör için 4 seviye (UK: %0,10,15,20 / PVA: %0,1,2,3) olduğundan dolayı Taguchi Metoduna göre L16 ortogonal dizisi kullanılmıştır (Çizelge 4.5). Fakat bu çalışmada UK00 (kontrol) harcı için başka faktör ve seviye olmadığı için deney dizisi 16'dan 13'e düşmüştür. Deney dizilerinin uygulanış sırası aşağıda Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Faktörler ve seviyeler

Faktör	Seviye			
	0	1	2	3
UK oranı (%)	0(A1)	10(A2)	15(A3)	20(A4)
Lif oranı (%)	0(B1)	1(B2)	2(B3)	3(B4)

Araştırmalar aşağıdaki Çizelge 4.6'da Taguchi Metodu'nda belirtilen L16 ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır.

Çizelge 4.6. L16 ortogonal dizisine göre tasarım

Deney kodu	UK	PVA
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	1	2
5	1	3
6	2	0
7	2	1
8	2	2
9	2	3
10	3	0
11	3	1
12	3	2
13	3	3

Çizelge 4.6’da her deney, faktör ve seviyesine göre temsili olarak gösterilmiştir. Test sonuçları kalite karakteristiğine göre “en büyük değer en iyidir” mantığına göre formül (3) ile hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve işlenebilirlik için değerlerin büyük olması bu çalışma için olumlu bir durumu ifade ederken, serbest rötre deneyi için bu durum tam tersidir. Yani istenilen serbest rötre deneyi sonuçlarına göre en düşük değer en olumlu sonucu verir. Fakat bu ifadeyi Taguchi Metodu’na uygulayabilmek için değerler “1/R” şeklinde ters orantılı şekilde verilmiştir.

$$S/N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

Burda S/N_L sinyal/gürültü oranı olarak (S / N birimi: dB) olarak tanımlanan performans istatistiği olup, n her deney için yapılan tekrar sayısıdır. y_i ifadesi ise i sayısındaki deneyin performans değerini verir. Çalışmada elde edilen eğilme dayanımları, basınç dayanımları, işlenebilirlik ve serbest rötre değerlerinin faktörlere bağlı sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olan S/N değerleri Çizelge 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. L16 ortogonal dizisinde ifade edilen deney sonuçları

Deney Kodu	FAKTÖRLER		Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)		İşlenebilirlik (cm)	Rötre (1/R) (1/μm)
	UK oranı	PVA oranı	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün	-	14 gün
1	A1	B1	6	8,4	57	70,6	16	4,5
2	A2	B1	5,9	8	48	64	18	8,13
3	A2	B2	7,26	9,19	55	68,6	14,4	18,52
4	A2	B3	7,4	10	50	62	13	25,64
5	A2	B4	8,26	12,33	46	56	10,5	50
6	A3	B1	4,65	7,6	34,8	58,2	19	9,71
7	A3	B2	6,82	9,02	49	65	15	21,74
8	A3	B3	7,3	9,5	45	58	14	29,41
9	A3	B4	8,05	11,07	41	52	11,5	62,5
10	A4	B1	3,5	5,8	26,2	49	22	12,05
11	A4	B2	5,65	7,62	41	57,2	17	23,26
12	A4	B3	6,87	9,1	39	54,3	14,5	35,71
13	A4	B4	7,1	9,5	36	48	12	84,75

Çizelge 4.8. Deney sonuçlarına bağlı S/N değerleri

Deney Kodu	Faktörler		S/N Değeri (Eğilme)	S/N Değeri (Basınç)	S/N Değeri (İşlenebilirlik)	S/N Değeri (Rötre (1/R))
1	A1	B1	21,546	40,711	24,082	17,879
2	A2	B1	21,304	39,459	25,105	23,017
3	A2	B2	22,885	40,424	23,167	30,168
4	A2	B3	23,261	39,576	22,279	32,993
5	A2	B4	24,502	38,789	20,424	38,794
6	A3	B1	19,741	37,277	25,575	24,559
7	A3	B2	22,485	39,623	23,522	31,560
8	A3	B3	23,024	38,791	22,923	34,185
9	A3	B4	24,045	37,929	21,214	40,732
10	A4	B1	17,306	35,047	26,848	26,435
11	A4	B2	20,911	38,228	24,609	32,147
12	A4	B3	22,553	37,788	23,227	35,871
13	A4	B4	22,871	36,961	21,584	43,378

Eğilme dayanımına ait bir test sonucunun S/N değerinin örnek bir hesaplaması aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{6}\left(\frac{1}{5,9^2} + \frac{1}{8^2}\right)\right) = 21,304$$

Tüm sonuçlar aynı formülasyonla S/N değerlerine dönüştürülebilir. Eğilme ve basınç dayanımları hesaplanırken 7 ve 28 günlük numunelerden 3'er tane test edildiği için formüldeki “n” yerine 6 yazılmıştır. Bu değer işlenebilirlik için “1” iken, serbest rötre için

S/N hesapları için “3” olarak alınmıştır. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı, işlenebilirlik ve serbest rötreye ait ortalama S/N değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Faktör ve seviyelere ait ortalama S/N değerleri

Seviye	S/N Değeri (Eğilme)		S/N Değeri (Basınç)		S/N Değeri (İşlenebilirlik)		S/N Değeri (Rötreye (1/R))	
	UK(A)	PVA(B)	UK(A)	PVA(B)	UK(A)	PVA(B)	UK(A)	PVA(B)
1. Seviye	21,546	19,974	40,711	38,123	24,082	25,403	17,879	22,972
2. Seviye	22,988	22,094	39,562	39,425	22,744	23,766	31,243	31,292
3. Seviye	22,324	22,946	38,405	38,718	23,308	22,810	32,759	34,350
4. Seviye	20,910	23,806	37,006	37,893	24,067	21,074	34,457	40,968

Çizelge 4.9’da bulunan S/N değerleri Çizelge 4.8’e göre hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre, her bir test grubu içindeki faktörlere bağlı seviye değişkeni toplanarak ortalaması alınır. Örneğin A1 kodlu değişkenin Çizelge 4.8’de bulunan eğilme değer ortalaması (tek bir deney grubu içinde yer alması sebebiyle) 21,546 olarak hesaplanmıştır. Yine aynı şekilde B1 için eğilme test grubundaki değerleri ortalaması (1,2,6,10 no’lu deney kodları için) 19,974 olarak bulunmuştur. Diğer kodlu numuneler içinde aynı işlem yapılmıştır.

Taguchi Metodu kullanılarak her bir test için en uygun karışım metodu “en büyük değer en iyidir” varsayımı kullanılarak tespit edilmiştir. Buna göre, A2-B4 deneyi yani UK10+PVA3 kodlu karışım, eğilme dayanımı söz konusu olduğunda en optimum karışımdır. Diğer değerler göz önünde tutulduğunda basınç dayanımı için UK00 (kontrol) kodlu karışım, işlenebilirlik anlamında UK20+PVA0 kodlu karışım ve serbest rötreye testi için UK20+PVA3 kodlu karışım en optimum karışım değerlerine sahiptir. Fakat yapılan çalışmanın hedefi bütün testler için bir tek karışımın ifade edilmesini gerektirdiğinden, mevcut değerlere bakılarak faktör ve seviyelerin kombinasyonu içinde en yüksek S/N değerinin esas alınması ve bu değer çalışmanın hedefindeki optimum karışımı ifade ettiği belirtilmiştir. Çizelge 4.10’da bu kombinasyonlar belirtilmiştir.

Çizelge 4.10. Karışımların toplam S/N değerleri

Karışım	$\sum$ S/N Değeri (Eğilme)	$\sum$ S/N Değeri (Basınç)	$\sum$ S/N Değeri (İşlenebilirlik)	$\sum$ S/N Değeri (Rötre (1/R))	En büyük S/N değeri
A1+B1	41,519	78,834	49,141	40,852	210,346
A1+B2	43,639	80,136	47,573	49,171	220,518
A1+B3	44,492	79,429	46,616	52,229	222,765
A1+B4	45,352	78,603	44,880	58,847	227,683
A2+B1	42,962	77,686	48,078	54,215	222,941
A2+B2	45,082	78,987	46,510	62,535	233,113
A2+B3	45,934	78,280	45,553	65,593	235,360
A2+B4	46,794	77,455	43,818	72,211	240,278
A3+B1	42,298	76,528	48,642	55,732	223,200
A3+B2	44,418	77,830	47,074	64,051	233,372
A3+B3	45,270	77,123	46,118	67,109	235,619
A3+B4	46,130	76,297	44,382	73,727	240,537
A4+B1	40,884	75,129	49,401	57,430	222,844
A4+B2	43,004	76,431	47,833	65,749	233,017
A4+B3	43,856	75,724	46,877	68,807	235,264
A4+B4	44,716	74,898	45,141	75,426	240,181

Yukarıda Çizelge 4.10’da gösterildiği üzere, Taguchi Metodu’nun ana ifadesi olan “en büyük değer en iyidir” kapsamında A3+B4 deneyini ifade eden UK15+PVA3 kodlu karışım 240,537 ile en yüksek S/N değerine sahip olarak yapılan 4 deney içindeki en optimum karışım olduğu belirtilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada harç karışımlarına %0, %10, %15 ve %20 oranlarında UK ikame edilerek etkisi araştırılmıştır. Bu UK ikameli karışımlara %1, %2 ve %3 oranında PVA lif ilave edilerek işlenebilirlik, basınç, eğilme ve rötreye özellikleri incelenmiştir. Bu tez çalışması sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

1. Karışımların işlenebilirlik özelliği yayılma çapına göre değerlendirilerek, UK oranının artmasıyla yayılma çapı da artmıştır. UK işlenebilirliğe olumlu katkı sağlamıştır. PVA lifleri harcın yayılmasını yani işlenebilirliği azaltmaktadır.
2. PVA lifin çimentolu harç karışımlarında rötreyi azaltmasının sebebi, içsel gerilmeleri azaltması sonucu olduğu düşünülmüştür.
3. UK ikameli karışımlarda 7 ve 28 günde en yüksek basınç dayanımı UK00 kodlu karışımdan elde edilmiş. En düşük basınç dayanımı UK20'den elde edilmiş ve bu da UK00 (kontrol) karışımdan yaklaşık %31 daha düşük bir değerdir.
4. UK10 karışımına %1 PVA lif ilave edildiğinde basınç dayanımında yaklaşık %7 artış gözlenmiştir. Aynı karışıma %2 ve %3 lif ilave edildiğinde ise basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %3 ve %13'lük bir azalma meydana gelmiştir.
5. UK ikame oranı %15 olan karışıma (UK15), %1 PVA lif ilave edildiğinde basınç dayanımında yaklaşık %12 artış olmuştur. Aynı karışıma %2 lif ilave edildiğinde basınç dayanımında yaklaşık %0.34 ve %3 lif ilavesinde ise %11'lik azalma meydana gelmiştir.
6. Eğilme dayanımı incelendiğinde, UK ikameli karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı UK00 (kontrol) numunelerinden elde edilmiştir. UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımında olduğu gibi azalma görülmüştür.
7. UK ikameli karışımlara PVA lif ilave edildiğinde eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. UK10 karışımına %1, %2 ve %3 PVA lifi ilave edildiğinde eğilme dayanımı 7 günlük numunelerde sırasıyla %23, 25 ve 40 artarken, 28 günlük numunelerde ise sırasıyla %19, 30 ve 60 oranında artış meydana gelmiştir.
8. En yüksek eğilme dayanım değerini %3 PVA lif katkılı %10 uçucu kül ikameli karışım vermiştir. Lifli karışımlarda en yüksek eğilme dayanımını %3 PVA lifli karışımlar vermiştir.

9. Harç çubuklarında boy değişimi incelendiğinde, lifsiz karışımlar için UK ikame oranının artmasıyla boy değişiminin azaldığı görülmüştür. UK ikame oranı ile boy değişimi arasında ters orantı olduğu saptanmıştır.
10. PVA lifli karışumlu harç çubukları incelendiğinde, lif miktarının artmasıyla birlikte harç çubuğunun boyunda meydana gelen değişimin azaldığı görülmüştür.
11. Taguchi Metodu kullanılarak yapılan analizlerde, bu araştırma kapsamındaki en optimum karışım %15 uçucu kül ikameli %3 PVA lif katkılı (UK15+PVA3) olarak belirtilmiştir.

Bu tez çalışma sonucunda, sonraki çalışmalar için aşağıdaki durumlar önerilebilir.

1. Numunelerin, yukarıda belirtilen deneyler için 90 günlük durumları incelenebilir.
2. Agresif ortamlara karşı direnci incelenmek üzere daha fazla çalışma yapılabilir.
3. Donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi durabilite özellikleri incelenebilir.
4. Yapılan tez çalışmasında maliyet kaygısı göz önünde bulundurulmamıştır. Farklı oranlar ve farklı lif çeşitleriyle birlikte çalışmalar yapıp piyasada hizmet verebilir.

KAYNAKLAR

1. Rossi, P. (1994). Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of French research. *Materials Journal*, 91(3), 273-279.
2. Barr, B.I.G., Liu, K., and Dowers, R.C.A. (1982). Toughness Index measure the linergy absorption of fibre reinforced concrete, *International Journal Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(4), 221- 227.
3. Falkner, H., Huang, Z., and Teutsch, M. (1995). Comparative study of plain and steel fiber reinforced concrete ground slabs. *Concrete International*, 17(1), 45-51.
4. Craig, R. J., Parr, J. A., Germain, E., Mosquera, V., and Kamilaris, S. (1986). Fiber reinforced beams in torsion. *Journal Proceedings*, 83(6), 934-942.
5. Şimşek, S. (1997). Lifli beton üzerine bir çalışma. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
6. 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. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 560-570.
7. Folliard, K., Sutfin, D., Turner, R., and Whitney, D.P. (2006). Fiber in continuously reinforced concrete pavements, *Final Report Submitted to the Texas Department of Transportation*, Report No.0-4392-2.
8. 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 Environmental Engineering*, 11(3), 19-23.
9. Richardson, A.E., Coventry, K. and Landless, S. (2010). Synthetic and steel fibers in concrete with regard to equal toughness, *Structural Survey*, 28, 355-369.
10. Roesler, J.R., Altoubat, S.A., Lange, D. A., Rieder, K.A., and Ulreich, G.R. (2006). Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs on ground. *ACI Materials Journal*, 103, 3-10.
11. Uğurlu, A. (1994). Çelik lifle güçlendirilmiş beton, *DSİ Teknik Bülteni*, 80, 17-25.
12. Kozanoğlu, C. (1991). İnşaatlarda yeni gelişen bir teknoloji: Polipropilen elyaflı betonarme uygulaması. *Panel-20*.
13. Kiper, M., (1996). Polipropilen liflerin özellikleri ve kullanım olanakları. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Haber Bülteni*, 64, 21-22.
14. Yehia, S., Douba, A., Abdullahi, O., and Farrag, S. (2016). Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 120-133.

15. Arslan, A. (1993). Çelik lifli betonların özellikleri ve kullanım potansiyeli. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 369, 29-33.
16. Akkaş, A., Alpaslan, L., Arabacı, S., ve Başıyigit, C. (2010). Polipropilen lif katkılı yarı hafif betonların basınç dayanımı özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(1), 9-14.
17. Yaprak, H., Şimşek, O., ve Öneş, A., (2004). Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi, *Politeknik Dergisi*, 7(4), 353-358.
18. Tokyay, M., Ramyar, K., ve Turanlı, L. (1991). Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul-Türkiye, 303-311.
19. Şimşek, O., Erdal, M., ve Sancak, E., (2005). Silis dumanının çelik lifli betonun eğilme dayanımına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 211-216.
20. Çivici, F., ve Eren, İ. (2004). Çelik lifli betonun direkt çekme dayanımının ölçülmesi üzerine deneysel bir çalışma. *Türkiye mühendislik haberleri sayı 434-2004*, 6.
21. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye*, 19, 419-423.
22. Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.
23. Şimşek, O. (2016). *Beton ve beton teknolojisi, (çeşitleri-özellikleri-deneyleri)*. 5. baskı. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
24. Şengül, Ü. (2001). Uçucu kül ve çevresel etkileri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 89-104.
25. Liu, J., Tang, K., Qiu, Q., Pan, D., Lei, Z., and Xing, F. (2014). Experimental investigation on pore structure characterization of concrete exposed to water and chlorides. *Materials*, 7(9), 6646-6659.
26. Astm, C. (2003). 125 Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 4.
27. Kesler, Y. E. (2009). *Kalsit katkılı betonların erken yaş mekanik özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
28. Göktepe, M. (2008). *C3A oranı farklı çimentolarla üretilmiş betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
29. Kocataşkın, F. (1987). *Yeni gelişen beton malzemeleri, İleri Beton Teknolojisi Ders Notları*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi. 119.

30. Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö. ve Güzelküçük, S. (2019). C sınıfı uçucu kül ikameli çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi. *Uluslararası Ege Disiplinlerarası İnovatif Bilimsel Araştırmalar Sempozyumu* 26-27 Mart / İzmir.
31. Khan, M. S., Prasad, J., and Abbas, H. (2013). Effect of high temperature on high volume fly ashconcrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 1369–1378.
32. Okoye, F. N., and Singh, N. B. (2016). Mechanical properties of high volume fly ash concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 1-8.
33. Sun, J., Shen, X., Tan, G., and Tanner, J. E. (2019). Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(2), 565-580.
34. Toklu, K., Baharavar, S., ve Şimşek, O. (2017). Uçucu kül içeren yüksek performanslı güçlendirme harcında nano silikatın etkisi. *Selcuk University Journal of Engineering Science and Technology*, 5(1), 38–46.
35. Türk Standartları Enstitüsü. (2017). *Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*. TS EN 206:2013+A1 (Türk Standardı), Ankara.
36. ASTM, C. (2013). *Standard specification for chemical admixtures for concrete*. Annual book of ASTM standards.
37. Orcay, E.A. (2010). *Hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı iletkenlik katsayıları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
38. Acun S. (2000). *Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
39. Bunsell, A.R. (1988). *Fiber reinforcement for composite materials*, Volume 2. The Netherlands: Composite Materials Series, Elsevier Science.
40. Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., Hoshiro, H., Fischer, G., and Li, V. (2006). Properties of polyvinyl alcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites. In *Proceedings of the International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications* (pp. 145-153).
41. Ekinçioğlu, Ö. (2003). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
42. Shah, S.P., and Balaguru, P.N. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*, Singapore: McGraw-Hill Inc.

43. Kurt, G. (2006). *Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
44. Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., and Xin, H. (2019). The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*.
45. Bayasi, Z., and Soroushian P., (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 88, 129-134.
46. Özyurt, N. (2000). *Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
47. Gencel, O. (2006). *Farklı lif tipi ve miktarının beton özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 71.
48. Tabak, V. (2004). *Çelik lifli betonda lif ve lif boy/çap oranlarının değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 134.
49. Yiğiter, H. (2002). *Yüksek performanslı betonların süneklik özelliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 207.
50. Goldfein, S. (1963). *Plastic fibrous reinforcement for Portland Cement* (No. AERDL-1757). Army Engineer Research and Development Labs Fort Belvoir Va.
51. Ramakrishnan, V. (1993). *Recent advancements in concrete fiber composites*. Singapore: American Concrete Institute.
52. Ramakrishnan, V. (1997). Performance characteristics and application of high-performance polyoefin fiber reinforced concrete. SP-171. In *Proceeding of the 3rd CANMET/ACI International Conference, Advance in Concrete Technology* (pp. 671-692).
53. Ramakrishnan V. (1987). Materials and properties of fiber reinforced concrete. *Proceedings of the International Symposium on Fiber Reinforced Concrete*. Madras, India, American Society of Civil Engineers, pp. 2.3–2.23
54. Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P., Batson, G., Criswell, M., Ramakishnan, V., and Wecharatana, M. (1991). Fracture toughness of fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 88(4), 339-353.
55. Karahan, O. (2006). *Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

56. Alkan, G. (2004). *Polipropilen lifli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.
57. Yıldırım, H., Sertbaş, B., ve Berbergil, V. (2007). Kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen ve çelik lif kullanılmasının işlenebilirliğe etkisi. *7. Ulusal Beton Kongresi*, 28-30.
58. Uğur, A. (2007). *Lif donatılarının yüksek dayanımlı betonlarda yarma dayanımı basınç dayanımı ilişkisine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
59. Noushini, A., Samali, B., and Vessalas, K. (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 374-383.
60. Atahan, H., Tuncel, E., Pekmezci, B. (2013). Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1438–1445.
61. Wang, S., and Li, V. C. (2005). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. In *Proc., Int'l Workshop on HFRCC Structural Applications*, Hawaii.
62. Pan, Y. G., Watson, A. J., and Hobbs, B. (2001). Transfer of impulsive loading on cladding panels to the fixing assemblies. *International journal of impact engineering*, 25(10), 949-964.
63. Habel, K., and Gauvreau, P. (2009). Behavior of reinforced and posttensioned concrete members with a UHPFRC overlay under impact loading. *Journal of structural engineering*, 135(3), 292-300.
64. Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, S. P., and Kaushik, S. K. (2009). Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio. *Construction and Building Materials*, 23(1), 183-189.
65. Nili, M., and Afroughsabet, V. (2010a). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927-933.
66. Nili, M., and Afroughsabet, V. (2010b). Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 37(8), 879-886.
67. Nataraja, M. C., Nagaraj, T. S., and Basavaraja, S. B. (2005). Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2350-2359.

68. Toutanji, H., McNeil, S., and Bayasi, Z. (1998). Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 961-968.
69. Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Xiangming, Z., and Chungkong, C. (2008). Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Construction and Building Materials*, 22(3), 370-383.
70. Kim, B., Boyd, A. J., and Lee, J. Y. (2011). Effect of transport properties of fiber types on steel reinforcement corrosion. *Journal of Composite Materials*, 45(8), 949-959.
71. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, 99(5), 463-472.
72. Wang, S., and Li, V. C. (2005). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. In *Proc., Int'l Workshop on HPFRCC Structural Applications*, Hawaii.
73. Erdoğan, T. (2003). *Beton (I. Baskı)*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim. 45-47.
74. Ulukaya, S. (2008). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda rötre ve rötre çatlaklarının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
75. Neville, A.M. (2000). *Properties of Concrete (Third Edition)*. New York: Longman Scientific and Technical, 137.
76. ACI 305 R, Hot Weather Concreting
77. Muratoğlu, Y. (2009). *Kendiliğinden yerleşen betonda farklı filler malzemelerin rötre üzerindeki etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
78. Baradan, B. (1996). *Yapı malzemesi II*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, 207, 217.
79. Pehlivan, M. (2008). *Betonun rötresi üzerine bir çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
80. Kadioğlu, T., (2006). *Rötre azaltıcı katkı maddeleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
81. Akman, M.S. (2007). *Yüksek performanslı betonlarda otojen rötre*, İstanbul: Sika Teknik Bülten / Makaleler.
82. Verbeck, G. J. (1968). Field and laboratory studies of the sulfate resistance of concrete. In *Performance of concrete resistance of concrete to sulfate and other environmental conditions*, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, 113-124.

83. Türk Standartları Enstitüsü. (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, TS EN 197-1, Ankara.
84. ASTM C618, (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *American Society for Testing and Materials*.
85. TÇMB/AR-GE/Y03.03, (2009). Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Enstitüsü*, Ankara.
86. Türk Standartları Enstitüsü. (2000). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, TS EN 1015-3, Ankara.
87. Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*, TS EN 12390-3, Ankara.
88. Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini*, TS EN 12390-5, Ankara.
89. FC, T. (2007). 1-1. Technické podmínky 1: Vláknobeton-Část 1: Zkoušení vláknobetonu. *Praha, Českomoravský beton, as*, 34.
90. für Stahlbeton, D. A. (2010). *DAfStb-Richtlinie: Stahlfaserbeton*. Beuth. 52.
91. 21st International Conference "Engineering Mechanics", pp. 37–43, Svratka, Czech Republic, 2015.
92. Türk Standartları Enstitüsü. (2013). *Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler deney yöntemleri - Bölüm 4: Büzülme ve genleşmenin tayini*, TS EN 12617-4, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Ünal, Muhammed Talha
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.01.1994 - Adana
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0531 791 37 22
 e-mail : talhaunal001@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	Devam ediyor
Lisans	Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2016
Lise	Hürriyet Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	Detaş Grup A.Ş.	Saha Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, İspanyolca, Japonca

Yayınlar

- Şimşek, O., Toklu, K., ve Ünal M.T. (2020). Çelik liflerin geometrik şeklinin ve oranının beton özelliklerine etkisinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*)
- Ünal, M. T., ve Şimşek O. (2020). Çimento harçlarında optimum uçucu kül ve PVA lif oranının belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*)

Hobiler

Yüzmek, Seyahat etmek, Futbol, Masa tenisi, Sinema, Müzik, Kitap okumak



GAZİ GELECEKTİR...