



**FARKLI NANO MALZEMELERLE MODİFİYE EDİLMİŞ F VE C SINIFI
UÇUCU KÜLLÜ ÇİMENTO ESASLI TAMİR HARCİ TASARIMI**

Murat BİNGÖL

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2025

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.

Murat BİNGÖL

05/03/2025

FARKLI NANO MALZEMELERLE MODİFİYE EDİLMİŞ F VE C SINIFI UÇUCU KÜLLÜ ÇİMENTO ESASLI TAMİR HARCİ TASARIMI

(Doktora Tezi)

Murat BİNGÖL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2025

ÖZET

Mekanik ve çevresel yüklere maruz kalan altyapı elamanlarının onarılması işinde yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin (YPLDÇK) kullanımı yaygınlaşmıştır. YPLDÇK kullanımında mikro-mekanik tabanlı tasarım kriterlerini sağlamak gerekmektedir. Onarım malzemesi üretiminde çimentonun ekonomik maliyetinin yüksekliği ve üretimi esnasında ortaya çıkan CO₂ gazı salınımı sebebiyle çimentoya atık olarak termik santrallerde ortaya çıkan uçucu kül ikame edilmiştir. Bu çimento esaslı tamir harcı kompozitine yüksek oranda uçucu kül ikamesinin, basınç dayanımı, dayanıklılık ve durabilite özellikleri üzerindeki olumsuz yönde etkisini nano malzemeler modifiye ederek ekonomik ve daha yüksek özelliklere sahip kompozit üretimi amaçlanmıştır. Çalışmada, farklı oranlarda nano-SiO₂ ve nano-Fe₂O₃ kullanarak optimum uygunluk saptanmıştır. Optimum nano malzeme oranı belirlenen kompozit malzemeye maliyeti azaltmak amacıyla C ve F sınıfı uçucu kül ikame edilmiştir. Çimento yerine F sınıfı uçucu kül %0, %50 ve %60 oranında ikame edilir iken, C sınıfı uçucu kül ise %0, %30 ve %35 oranında ikame edilmiştir. Bu farklı uçucu kül ve nano malzemelerle üretilen kompozitin işlenebilirliği sağlamak ve erken dayanım elde etmek için belirli oranda kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Farklı karışım oranlarıyla üretilen kompozit malzemelerin taze ve sertleşmiş halinin teknik özellikleri analiz edilmiştir. Taze kompozit üzerinde mini yayılma ile işlenebilirlik özelliği saptanmıştır. Sertleşmiş kompozit üzerinde farklı yaşlarda basınç, eğilmede çekme, kayma dayanımı ve elastisite modülü olan mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kompozitin durabilite özelliklerinde serbest ve kuruma rötresi belirlenmiştir. Ayrıca tasarlanan kompozitin iç yapısını analiz etmek için hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve SEM özellikleri saptanmıştır. Sonuç olarak, nano malzemelerin YPLDÇK karışımlarına ikamesiyle harç numunelerinin mekanik ve mikro-yapısını iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca nano malzemeler; mikro düzeyde dolgu etkisi oluşturup, gözenekleri doldurarak geçirimsizliği azalttığı için çimento hamurunun mikro yapısını geliştirmiştir.

Bilim Kodu : 91136
Anahtar Kelimeler : Çimento harcı, uçucu kül, nano malzeme, basınç dayanımı
Sayfa Adedi : 124
Danışman : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

DESIGN OF F AND C CLASS FLY ASH CEMENT BASED REPAIR MORTAR
MODIFIED WITH DIFFERENT NANOMATERIALS

(Ph. D. Thesis)

Murat BİNGÖL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2025

ABSTRACT

The use of high-performance fiber-reinforced cement-based composites (FCSC) has become widespread in the repair of infrastructure elements exposed to mechanical and environmental loads. It is necessary to provide micro-mechanical based design criteria in the use of FCSC. Due to the high economic cost of cement in the production of repair materials and the CO₂ gas emissions during its production, fly ash generated in thermal power plants has been substituted as waste for cement. The aim of this cement-based repair mortar composite is to produce an economical and higher-quality composite by modifying the negative effects of high-rate fly ash substitution on compressive strength, durability and durability properties with nanomaterials. In the study, optimum saturation was determined by using different ratios of nanoSiO₂ and nanoFe₂O₃. In order to reduce the cost, C and F class fly ash were substituted for the composite material for which the optimum nanomaterial ratio was determined. While F class fly ash was substituted at 0%, 50% and 60% instead of cement, C class fly ash was substituted at 0%, 30% and 35%. In order to provide workability and early strength of the composite produced with these different fly ash and nano materials, a certain amount of chemical additives were used. Technical properties of fresh and hardened forms of composite materials produced with different mixing ratios were analyzed. Workability feature was determined by mini spreading on fresh composite. Mechanical properties such as pressure, flexural tensile, shear, strength and elasticity modulus were determined on hardened composite at different ages. Free and drying shrinkage were determined in durability properties of composite. In addition, rapid chloride ion permeability and scanning electron microscopy (SEM) properties were determined to analyze the internal structure of the designed composite. As a result, it was observed that the mechanical and microstructure of mortar samples were improved by substituting nano materials into FCSC mixtures. In addition, nano materials created a filling effect at micro level, reduced impermeability by filling the pores and improved the microstructure of cement paste.

Science Code : 91136

Key Words : Cement mortar, fly ash, nano material, compressive strength

Page Number : 124

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam deneysel ağırlıklı olduğu için her aşamada beni destekleyen ve yönlendiren sürekli farklı ve yeni şeyler öğrenmemi sağlayan, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e teşekkür ederim. Doktora tez jürime katılan Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU, Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan Doç. Dr. Kenan TOKLU'ya teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, doktora çalışmalarım sırasında bana hep destek olan ve beni hiç yalnız bırakmayan aileme, bu süreçte zaman zaman ihmal ettiğim eşime ve kızım Zeynep Ada'ya teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Karışımlarda Kullanılan Mineral Katkı	5
2.1.1. Uçucu kül	5
2.2. Lifli Betonlar	12
2.2.1. Lifli betonların özellikleri	13
2.3. Nano Malzemeler	14
2.3.1. Çalışmada kullanılan nano malzemeler	19
2.4. Literatürde Yapılmış Olan Çalışmalar	21
3. MATERYAL VE METOT	39
3.1. Materyal	39
3.1.1. Çimento ve Silis kumu (Agrega)	39
3.1.2. Uçucu küller	39
3.1.3. Karışım suyu	40
3.1.4. Nano malzemeler	41
3.1.5. Polivinil alkol (PVA) lif.....	42

	Sayfa
3.1.6. Kimyasal katkı maddesi	42
3.2. Metot	43
3.2.1. UK _F ikameli nano malzemelerin doygunluk derecesi ön deneyle tayini ..	44
3.2.2. UK _C ikameli nano malzemelerin doygunluk derecesi ön deneyle tayini ..	48
3.2.3. Sertleşmiş harç deneyleri	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1. Basınç Dayanımları	63
4.1.1. Kontrol (UK _{F0}) karışımların basınç dayanımları	63
4.1.2. UK _{F50} karışımların basınç dayanımı	65
4.1.3. UK _{F60} karışımların basınç dayanımı	66
4.1.4. UK _{C0} karışımların basınç dayanımı	68
4.1.5. UK _{C30} karışımların basınç dayanımları	69
4.1.6. UK _{C35} karışımların basınç dayanımları	71
4.2. Eğilme Dayanımları	73
4.2.1. UK _{F0} karışımların eğilme dayanımları	73
4.2.2. UK _{F50} karışımların eğilme dayanımları	75
4.2.3. UK _{F60} karışımların eğilme dayanımları	76
4.2.4. UK _{C0} karışımların eğilme dayanımları	77
4.2.5. UK _{C30} karışımların eğilme dayanımları	79
4.2.6. UK _{C35} karışımların eğilme dayanımları	80
4.3. Elastisite Modülü	82
4.4. Eğik Kesme Dayanımı	84
4.4.1. UK _{F0} karışımların eğik kesme dayanımları	84
4.4.2. UK _{F50} karışımların eğik kesme dayanımları	85
4.4.3. UK _{F60} karışımların eğik kesme dayanımları	86
4.4.4. UK _{C0} karışımların eğik kesme dayanımları	88

	Sayfa
4.4.5. UK _{C30} karışımların eğik kesme dayanımları	89
4.4.6. UK _{C35} karışımların eğik kesme dayanımları	90
4.5. Kuruma Rötresi	91
4.5.1. UK _{F0} karışımların kuruma rötresi.....	91
4.5.2. UK _{F50} karışımların kuruma rötresi	93
4.5.3. UK _{F60} karışımların kuruma rötresi	94
4.5.4. UK _{C0} karışımların kuruma rötresi	96
4.5.5. UK _{C30} karışımların kuruma rötresi	97
4.5.6. UK _{C35} karışımların kuruma rötresi	99
4.6. Hızlı Klor İyon Geçirimsiliği	101
4.7. Mikro Yapı İncelemesi.....	103
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
5.1. Sonuçlar.....	107
5.2. Öneriler	109
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ülkemizde kurulu gücü 100 MW üzerindeki kömür ile çalışan termik santraller.....	7
Çizelge 2.2. UK'lerin ASTM C618-17a standardına göre sınıflandırılması	8
Çizelge 2.3. UK'lerin TS EN 197-1 standardına göre sınıflandırılması.....	8
Çizelge 2.4. UK içeren betonun özellikleri.....	12
Çizelge 3.1. Çimento ve mikro silis kumunun teknik özellikleri	39
Çizelge 3.2. F ve C (UK)'ün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	40
Çizelge 3.3. Ankara şebeke suyunun özellikleri	41
Çizelge 3.4. Nano malzemelerin teknik özellikleri.....	41
Çizelge 3.5. Polivinil Alkol (PVA) Lifin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	42
Çizelge 3.6. Kimyasal katkı maddelerinin teknik özellikleri	43
Çizelge 3.7. UK _{F50} 'lü nSi'li karışımlardaki malzeme oranları	44
Çizelge 3.8. UK _F 'lü nFe'li karışımlardaki malzeme oranları	46
Çizelge 3.9. UK _C 'lü nSi'li karışımlardaki malzeme oranları	48
Çizelge 3.10. UK _C 'lü nFe'li karışımlardaki malzeme oranları.....	50
Çizelge 3.11. Karışımların mini yayılma deney sonuçları.....	53
Çizelge 3.12. UK _F ve nano malzemeli karışımların oranları	54
Çizelge 3.13. UK _C ve nano malzemeli karışımların oranları.....	55
Çizelge 4.1. UK _F 'lü n ₀ , nSi ve nFe'lü tasarımların EM'leri	83
Çizelge 4.2. CU _K 'lü n ₀ , nSi ve nFe'lü tasarımların EM'leri.....	83
Çizelge 4.3. UK _{F0} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri	92
Çizelge 4.4. UK _{F50} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri.....	93
Çizelge 4.5. UK _{F60} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri.....	95
Çizelge 4.6. UK _{C0} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri.....	96
Çizelge 4.7. UK _{C30} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri	98

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.8. UK _{C35} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri	99
Çizelge 4.9. Betonun klor geçirgenliği deneyinde geçen yüke göre klor geçirgenliği sınıflandırılması	102



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Karbon fullerene, greyfurt meyvesi ve Dünya arasındaki yaklaşık oranlarının görüntüsü	15
Şekil 2.2. Nanoteknoloji’deki yaklaşımlar	15
Şekil 2.3. Betonda kullanılan malzemelerin tane boyutu ve özgül yüzey alanları	16
Şekil 2.4. Nano tozların yüzey alanı basitleştirilmiş model.....	16
Şekil 2.5. Atomik kütle mikroskobu ile elde edilen çimento erken yaş hidratasyonu....	18
Şekil 2.6. A) Çimento hidratasyonu B) Nano katkılı çimento hidratasyonu C) C-S-H oluşumu	19
Şekil 3.1. UK _F nano silis oranı belirleme ön deney sonuçları	45
Şekil 3.2. UK _F nano demiroksit oranı belirleme ön deney sonuçları.....	47
Şekil 3.3. UK _C nano silis oranı belirleme ön deney sonuçları	49
Şekil 3.4. UK _C nano demiroksit oranı belirleme ön deney sonuçları	51
Şekil 3.5. Üç noktalı eğilmede çekme testi deney düzeneği.....	57
Şekil 4.1. UK _{F0} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı - yaş ilişkisi.....	64
Şekil 4.2. UK _{F50} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi.....	65
Şekil 4.3. UK _{F60} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi.....	67
Şekil 4.4. UK _{C0} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi.....	68
Şekil 4.5. UK _{C30} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi	70
Şekil 4.6. UK _{C35} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi	71
Şekil 4.7. UK _{F0} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi	74
Şekil 4.8. UK _{F50} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi	75
Şekil 4.9. UK _{F60} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi	77
Şekil 4.10. UK _{C0} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi	78
Şekil 4.11. UK _{C30} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi.....	80
Şekil 4.12. UK _{C35} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi.....	81
Şekil 4.13. UK _{F0} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanım–yaş ilişkisi	85

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. UK _{F50} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi.....	86
Şekil 4.15. UK _{F60} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi	87
Şekil 4.16. UK _{C0} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı – yaş ilişkisi.....	88
Şekil 4.17. UK _{C30} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi.....	89
Şekil 4.18. UK _{C35} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi.....	90
Şekil 4.19. UK _{F0} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi.....	93
Şekil 4.20. UK _{F50} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi	94
Şekil 4.21. UK _{F60} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi	96
Şekil 4.22. UK _{C0} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi	97
Şekil 4.23. UK _{C30} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi	99
Şekil 4.24. UK _{C35} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi	100
Şekil 4.25. UK _F ’lü nSi, nFe ve n ₀ numunelerin hızlı klor iyon geçirimsliliği	102
Şekil 4.26. UK _C ’lü nSi, nFe ve n ₀ numunelerin hızlı klor iyon geçirimsliliği	103

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. UK'lerin SEM görüntüsü	9
Resim 2.2. UK taneciklerinin morfolojik yapısı	10
Resim 3.1. Mini yayılma test cihazı ve numune	52
Resim 3.2. Mini yayılma testi numune ölçümleri	53
Resim 3.3. 20 lt kapasiteli Hobart marka mikser	56
Resim 3.4. Basınç ve eğilme deneyi aleti	57
Resim 3.5. Elastisite modülü numunesi ve deney düzeneği	58
Resim 3.6. Taş kesme makinası ve 45 derece eğik kesilmiş numuneler	59
Resim 3.7. Eski 45 derece eğik kesilmiş numunelerle birlikte dökülen numuneler	59
Resim 3.8. Kuruma rötresi deney aleti ve rötire değeri ölçülen numune	60
Resim 3.9. Ø100×200 mm silindir numune ve elmas bıçaklı testere ile kesilmiş Ø100×50 mm silindir disk numune	61
Resim 3.10. Hızlı klor iyon geçirimsizliği, elektro-mekanik test cihazı ve ekipmanları ..	61
Resim 3.11. SEM analizinde kullanılmak üzere aseton içerisine atılmış olan numuneler ..	62
Resim 4.1. UK _F 'lü ve UK _C 'lü tasarımlara ait EM deney düzeneği	84
Resim 4.2. UK _F oranı %0 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli	85
Resim 4.3. UK _F oranı %50 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli ...	86
Resim 4.4. UK _F oranı %60 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli ...	87
Resim 4.5. UK _C oranı %0 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli	88
Resim 4.6. UK _C oranı %30 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli ...	89
Resim 4.7. UK _C oranı %35 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli ...	90
Resim 4.8. 90 günlük UK _{C0} nFe ₅₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü	104
Resim 4.9. 90 günlük UK _{C0} n ₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü	104
Resim 4.10. 28 günlük UK _{F60} nSi ₁₀₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü	105
Resim 4.11. 28 günlük UK _{F60} n ₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü	105

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

ϵ	Birim Boy Değişimi
σ	Gerilme
μm	Mikrometre
CO_2	Karbondiyoksit
C	Coulomb

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bağlayıcı=(Çimento+UK+Nano malzeme+XELAH50)
Ca(OH)_2	Kalsiyum Hidroksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CEM I 52.5 R	Portland Çimentosu
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
Ç	Çimento
EM	Elastisite Modülü
Fluid PREMIA 519	Süper Akışkanlaştırıcı
GPa	Giga Paskal
HKIG	Hızlı Klor İyon Geçirimsiliği
KOH	Potasyum Hidroksit
LiOH	Lityum Hidroksit
MPa	Mega Paskal
nSiO ₂	Nano Silika
NaOH	Sodyum Hidroksit
NH ₄ OH	Amonyum Hidroksit
n	Nano
nFe ₂ O ₃	Nano Demir Oksit

Kısaltmalar	Açıklamalar
PÇ	Portland Çimento
PVA	Poly(vinyl alcohol) Lif
S	Karışım Suyu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopi
SiO₂	Silisyum Dioksit
TS	Türk Standardı
TWh	Terawatt-saat
UK	Uçucu Kül
UK_F	F Sınıfı Uçucu Kül
UK_{F50}	%50 F Sınıfı Uçucu Kül içeren karışımın kontrol harcı
UK_c	C Sınıfı Uçucu Kül
UK_{c30}	%30 C Sınıfı Uçucu Kül içeren karışımın kontrol harcı
YPLDÇK	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit
XELAH50	Priz Hızlandırıcı

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik, çevresel sorunları ve iklim değişikliğini en aza indirmeye yönelik ham maddeleri azaltırken atık malzemeleri daha fazla kullanmaktadır. İnşaat için sürdürülebilir malzemelerin kullanılması, çevreye verilen zararı büyük ölçüde azaltacağı için önemlidir. Doğal kaynakların korunması, minimum enerji kullanırken ve zaman içinde ekolojik dengeyi korurken olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için tasarlanmış malzemeleridir. Bu amaca ulaşmak için, bu çalışmada termik santral atık maddesi olan uçucu külün ikame malzemesi olarak kullanılması, aynı zamanda çimento kullanımının azaltılması hedeflenmiştir. Son yıllarda sürdürülebilir yapı malzemesine yönelik bilimsel çalışmalar, dünyada olduğu gibi Türkiye'de de artış görülmektedir [1-5].

Genellikle temel mantık hammadde kaynaklarının korunması yanında, karbon emisyonlarını ve katı atık oluşumunu azaltacak şekilde, ekolojik ayak izini azaltmanın yanı sıra Portland çimentosu üretimi esnasında insan sağlığı açısından önemli problemlere sebep olacak zararlı parçacıklar ve gazlar atmosfere salınmaktadır [6-8]. İnşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Betonun ekonomik kullanım hizmet ömrü 50-75 yıl arasında değerlendirilmektedir. Buna karşın araştırmalar ve yapılan gözlemler neticesinde çevre koşulları, karışım tasarımıındaki olumsuzluklar, kürlenme, aşırı yükler ve beton elemanların kalitesizliği gibi bazı nedenlerden dolayı birçok yapı 20-30 yıl sonrasında yapı özelliğini kaybetmeye başladığı gözlemlenmiştir. Betonarme yapılarda düşük dayanıklılığın göstergesi olan çatlakların meydana gelişi, beton yapıların hizmet ömrünün beklenenin daha altında olmasının ana nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir [9-11].

Son 100 yıllarda çoğunlukla bina ve altyapı tesisleri beton veya betonarme malzemelerle inşa edilmektedir. Bu yapılar kullanım ömrünü azaltan önemli etken, mekanik yüklerin ve çevresel etkenlerin birleşik etkisiyle tahribata uğrayan malzeme ve altyapı nedeniyle, beton yapıların, bakım ve onarımı tekrar eden bir ihtiyaç halini almıştır. Genellikle altyapı yapılarının yıkılıp yeniden inşa edilmesi birçok nedenle zor veya imkansızdır. Bunun yerine tamir veya onarım daha stratejik olabilmektedir. Zamana bağlı olarak, bozulan ve hasar gören altyapı elemanlarının yenileriyle değiştirilmesi ekonomikte olamayabilir. Bu yapıların ekonomik şartları ve yüksek maliyet nedeniyle, hasarlı yapıların yenilenmesinin yerine, onarılması/güçlendirilmesi daha fazla önemli olduğunu birçok araştırmacı vurgulamaktadır [7,12].

Altyapı elamanlarının tamir veya güçlendirilmesi birçok ülkede tercih edilen bir yöntemdir. Otoyol kaplamaları, havaalanı pistleri, köprü tabliyeleri, deniz yapıları ve diğer beton yapıların tahrip olması çok önemli sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca yapıların onarılması/güçlendirilmesi için milyonlarca liraya gereksinim duyulmaktadır. Son dönemlerde mevcut yapıların onarımı/güçlendirilmesi için harcanan paranın, yeni yapılara harcanan paradan daha fazla olduğu tahmin edilmektedir. Onarım maliyetinin önemli kısmı beton yapıların tamirinde kullanılmaktadır. Beton tamir malzemesi sektörü hızla gelişmesine rağmen, ihtiyaçları yeterince karşılayamadığı bilinmektedir. Beton onarımında kullanılan malzemelerin hemen hemen yarısının uygulama esnasında gereken başarıyı sağlamadığı tahmin edilmektedir [6,8,13].

Günümüzde kullanılan onarım malzemeleri, genellikle erken yaş ve uzun süreli dayanıklılık performansları istenilen yeterlilikte değildir. Bu özelliklerinin yeterli olmaması önemli problemler olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle yaşa bağlı tamir harçlarındaki performans değişimi, yapıyı uzun dönemde mekanik ve çevresel yüklere karşı koruma sağlayabilecek olması yaşamsal önem taşımaktadır. [14,15]. Yapının onarımı için kullanılacak malzeme dizaynında onarımları etkileyecek parametrelere tek tek bakmanın yerine, bu parametrelerinin tamamını dikkate alan bütünsel bir yaklaşımı benimsemek gerekmektedir [16]. Bütünsel yaklaşımda, onarım malzemelerinin dizayn ve uygulama bakımından performansına etki edecek bütün hususları birlikte düşünülmelidir [2].

Beton yapılar için optimum onarım ve güçlendirme malzemesi, onarılmış yapıyla boyutsal olarak uyumlu olmalıdır. Onarım tamamlandığında eski beton ve yeni onarılmış malzeme arasında önemli ölçüde rötre ya da genleşme görülmemeli ve eski betonla uyumlu elastisite modülü, mukavemet ve geçirgenlik özelliklerine sahip olmalı. Tüm bu özelliklerinin haricinde onarım işlerinde kullanılacak malzemeler sünek özellikte olması, onarılan yapıların hizmet süresi yönünden önemli yararlar sağlayacağı bilinmektedir. Ne yazık ki bütün bu emeklere karşın bu tip tamir malzemelerinin üretimi mevcutta pek de başarılı olamamıştır. Betonun gevrek özelliğini geliştirmek üzere yapılan araştırmalar sonucunda eksenel çekme kuvveti yüklemesi altında sünek davranış gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin (YPLDÇK) meydana gelmesine neden olduğu bildirilmiştir [17].

Konvansiyonel betonda eksenel çekme kuvveti yükleri altında oluşan ilk çatlağın ardından gevrek bir hal alarak aniden kırılmaktadır. Bununla birlikte konvansiyonel lif takviyeli betonlarda; matristeki çatlamanın ardından yük taşıma kapasitesindeki düşüş eğrisi olarak bilinen şekil değiştirme yumuşaması (strain-softening) takip etmektedir. Diğer taraftan, YPLDÇK'de ilk çatlaktan itibaren lifler ekstra yük taşıyabilmektedir. Yüklemin artmasıyla birlikte çatlak genişlikleri $100\text{ }\mu\text{m}$ 'den daha dar olan çoklu mikro çatlaklar oluşturduğundan betonun şekil değiştirme kapasitesi ciddi oranda artmaktadır. Bu nedenle gerilme-şekil değiştirme eğrisi, metallerdekine benzer sünek davranış göstererek, çatlak sonrası sertleşme meydana gelmektedir. Sünek davranış (elastik olmayan şekil değiştirme) sergileyebilmesi için gerekli malzeme ve geometrik parametreler Li ve Leung [18] tarafından tahmin edilmiştir. Ayrıca bu parametreler Li [17] ve Kanda [19] tarafından geliştirilmiştir.

Parametrelerin doğru tespit edilmesiyle beraber %1,5-5 oranında değişen lif kullanımıyla farklı dayanımlara sahip sünek kompozit malzemeler meydana gelmektedir. Maksimum eksenel çekme gerilmesindeki deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu lifli kompozitlerdeki lifler sünekliği, matrisin tokluğuna ve liflerin matris üzerindeki gerilme etkisinin bir biçimde aktarmasıyla ilişkilidir [20].

Belirli oranda lif takviyesi, matris tokluğunun yüksekliği, sünekliliğin düşük olmasına neden olmaktadır. Uygulamaya göre, mukavemet ve süneklilik gereksinimini karşılayan optimum gerilme-şekil değiştirme ilişkisi farklılık gösterebilmektedir. YPLDÇK'ler hacimce %2 lif kullanımı ile eksenel çekme kuvveti yüklemesi altında; %3 ile %5 arasında çekme birim şekil değiştirme deformasyonu gösterebilir. Bu değer normal beton ve lif takviyeli betonun yaklaşık 300 ila 500 katıdır. YPLDÇK'de meydana gelen ilk çatlağın akabinde beton gevrek bir malzeme gibi değil, sünek bir metal gibi davranarak şekil değiştirme sertleşmesi sergiler. Ayrıca hasara karşı oldukça toleranslıdır ve kuvvetli eğilme ve çekme yükleri altında sünekliliğini korur. Yüke maruz kalan lifli betonlarda oluşan çatlak genişliği $500\text{-}750\text{ }\mu\text{m}$ aralığında iken, yük altındaki YPLDÇK numunelerinde bu çatlak genişliği $100\text{ }\mu\text{m}$ daha düşüktür. YPLDÇK, farklı beton türlerine göre daha düşük çatlak genişliğine sahip olduğundan çevre şartlarına daha dayanıklı ve mekanik yüklemelerde bile çok daha düşük geçirgenliğe sahiptir [3,21]. Normal dayanıma sahip YPLDÇK ile onarılmış yapıların avantajları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır [22]. YPLDÇK betonarme ara yüzeyindeki çatlak durdurma mekanizmalarının mekanik yararları üzerine kapsamlı çalışmalar yürütmüşlerdir [23].

Bu tez çalışmasının amacı, mikro silis kumu, çimento ve PVA lifleriyle üretilen harca farklı oranlarda nano-SiO₂ ve nano-Fe₂O₃ ilave edilerek optimum nano malzeme miktarı belirlenmiştir. Optimum nano ilaveli kompozite yüksek oranda F ve C sınıfı uçucu kül ikameli ilave edilerek modifiye edilmiş tamir harcının teknik özelliklerine bağlı olarak optimum karışım harcı oranını belirlenmesidir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Karışımlarda Kullanılan Mineral Katkı

İnsan nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesine paralel inşaat sektöründe hızlı ve büyük artış görülmektedir. İnsan nüfusu hem inşaat sektörünü, hemde enerji sektörünü hızlı büyümeye zorlamıştır, çünkü mevcut durumlar yetersiz kalmıştır. Bu sektörler çevresel sorunları beraber getirmişlerdir, hammadde kaynakları hızla tüketilirken küresel ısınma ve çevre kirliliğine önemli derecede tetiklemişlerdir. İnşaat sektöründe en çok kullanılan malzeme beton olduğu bilinmektedir. Betonun ana malzemesi ise agrega ve çimentodur. Bu iki ana madde doğal ham madde kaynaklarını hızlı ve yoğun kullanırken çevre kirliliğine neden olmaktadır. Çimento ham madde (kil ve kalker) gereksinimi yanında yüksek oranda enerjiye (elektrik) ihtiyaç duymaktadır. Çimento ham maddelerinin çimento ana malzemesiolan klinkere dönüştürmek için karbon salınımı oluşturur. Bu karbon salınımı, dünyadaki CO₂ gazı salınımının %8'ine sebep olmaktadır. Yakıt olarak kullanılan düşük kalorili linyit kömürü kullanan termik elektrik santralleride büyük oranda atmosfere uçucu kül bırakmaktadır. Bu atmosfer kirleticileri bugün günümüzde büyük sorun olarak karşılaşılmaktadır. [24-26]. Bu sorunlardan dolayı çimento kullanımı azaltılarak, uçucu külün inşaat sökterinde kullanılmasını arttırmak sürdürülebilirlik için oldukça önemlidir.

2.1.1. Uçucu kül

Termik santrallerde taşkömürü veya linyit kömürünün yanmasıyla, bacadaki gazlar ile hareket eden, siklonlar ve elektro-filtrelerle tutularak atmosfere çıkması engellenen, uçan ve mikron boyutunda olan bu küllere, UK denilmektedir. UK'lerin üretildiği termik santrallerin çevresinde depolama ve uzaklaştırma işlemi ekonomi ve çevre kirliliği problemlerine neden olmaktadır. Küresel ısınma ve hava kirliliğine sebep olan çimento üretimini azaltmak ve termik santrallerde kömürün yakılmasıyla elde edilen UK'lerin çevresel olumsuzluğunu gidermek için, inşaat sektöründe çimento yerine kısmi oranlarda UK kullanılmasıyla ekonomi, enerji ve çevre alanında gereken fayda sağlanmış olacaktır [26-29].

UK'ler, puzolanik malzemelerin genel özelliği olan, bağlayıcılık özellikleri kendi başlarına hiç olmayan ya da çok az olan, çok ince öğütülerek, normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda portlanditle (sönmüş kireç) kimyasal tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği elde

eden silisli ya da silisli ve alüminli mineral bir katkı malzemesidir [5]. UK terimi 1930'larda endüstrisinde elektrik enerjisi alanındaki gelişmeyle ortaya çıkmıştır ve portland çimentosu üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. UK'ün betonda kullanımına dair ilk araştırma sonuçları 1937'de California Üniversitesinde R. E. Davis [30], tarafından yayımlandı. Bu çalışma, UK'ün beton içerisinde kullanımının temelini oluşturdu ve böylece UK içeren betonların ilk standartları ve deney yöntemleri belirlenmiştir [31].

Dünyada UK'lerin büyük oranlarda ikame edilmesi ise inşaat sektöründe baraj inşaatı yapımında betonun hidrasyon ısısını düşürmek için kullanılmasıyla başlamıştır. A.B.D.'de 1940'larda ilk olarak Hoover sonrasında Hungry Horse barajlarında kullanılmıştır. Ülkemizde ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından baraj inşaatlarında kütle beton imalatlarında hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla 1960 yılında Gökçekaya ve Porsuk barajlarının yapımında UK kullanılmıştır. DSİ'nin baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından deneme amaçlı köprü ve yol inşaatlarında da kullanılmıştır [32].

Ülkemizde enerjide dışa bağımlılık azaltılarak yerli kaynakların daha etkin kullanılması teşvik edilmektedir. Yerli kaynaklarda Ülkemizin kömür rezervleri ve hidrolik potansiyeliyle öne çıkacağı öngörülmektedir. Böylelikle alternatif kaynaklara nazaran bu kaynakların seçilmesi, yıllardan beri süregelen araştırma ve uygulama tecrübesinin varlığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kömür diğer fosil yakıtlarla kıyaslandığında rezerv alanının büyüklüğü, ülke coğrafyasına yayılmış olması, teminin rahat sağlanması ve enerji üretim maliyetinin düşük olmasından dolayı daha avantajlı olmaktadır [33].

Ülkemizde 2023 yılındaki elektrik enerjisi üretimi 331,1 TWh'tır. Elektrik üretimindeki kömürün toplam miktarı 119,8 TWh (%36,18), bunun 72,7 TWh'ı (%21,95) ithal kömür, 41,7 TWh'ı (%12,59) linyit, 5,3 TWh'ı (%1,6) ise taşkömürü ve asfaltit kaynaklarından elde edilmektedir [34].

Ülkemizde, enerji üretiminde özel sektörün devreye girmesi nedeniyle kömür ile çalışan termik santraller gün geçtikçe artmaktadır. Kurulu gücü 100 MW üzerindeki termik santrallerin 2024 yılı itibarıyla aktif olanlar Çizelge 2.1.'de verilmiştir [35].

Çizelge 2.1. Ülkemizde kurulu gücü 100 MW üzerindeki kömür ile çalışan termik santraller

No	Santralin İsmi	Yakıt Türü	Kurulu Güç (MW)	Şehir
1	Zonguldak Eren (ZETES)	İthal Kömür	2790	Zonguldak
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Afşin-Elbistan A	Linyit	1335	Kahramanmaraş
4	Adana Hunutlu	İthal Kömür	1320	Adana
5	Cenal Karabiga	İthal Kömür	1320	Çanakkale
6	İSKEN Sugözü	İthal Kömür	1308	Adana
7	İskenderun Atlas	İthal Kömür	1260	İskenderun/Hatay
8	İÇDAŞ Bekirli	İthal Kömür	1200	Çanakkale
9	Soma B	Linyit	990	Manisa
10	Kemerköy	Linyit	675	Muğla
11	Yatağan	Linyit	666	Muğla
12	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
13	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
14	Soma Kolin	Linyit	510	Manisa
15	Kangal	Linyit	457	Sivas
16	Tufanbeyli	Linyit	450	Adana
17	Yeniköy	Linyit	420	Muğla
18	İÇDAŞ Biga	İthal Kömür	405	Çanakkale
19	Silopi	Asfaltit	405	Şırnak
20	İzdemir Enerji Aliğa	İthal Kömür	370	İzmir
21	Tunçbilek	Linyit	365	Kütahya
22	Çan-2	Linyit	330	Çanakkale
23	18 Mart Çan	Linyit	320	Çanakkale
24	Çatalağzı	Taş Kömürü	315	Zonguldak
25	Aksa Bolu Göynük	Linyit	270	Bolu
26	İskenderun Demir Çelik	Taş Kömürü	239	İskenderun/Hatay
27	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
28	Çolakoğlu 2	İthal Kömür	190	Kocaeli
29	Erdemir	Taş Kömürü	185	Zonguldak
30	Yunus Emre	Linyit	145	Eskişehir
31	Aksa Akrilik Kimya	İthal Kömür	120	Yalova
32	Kardemir	Taş Kömürü	108	Karabük

UK'lerin sınıflandırılması

UK'ler, kimyasal bileşen oranlarına göre Çizelge 2.2.'de çeşitli sınıflara ayrılmaktadır.

Çizelge 2.2. UK'lerin ASTM C618-17a standardına göre sınıflandırılması [36]

Sınıf	Tanım
F	Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ bitümlü kömürden elde edilir, sadece puzolanik özelliğe sahiptir. $\text{CaO} \leq \%10$ olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar.
C	Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ linyit ve yarı bitümlü kömürden elde edilir, hem puzolanik hem de bağlayıcı özellik gösterir. $\text{CaO} \geq \%10$ olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar.

Çizelge 2.3. UK'lerin TS EN 197-1 standardına göre sınıflandırılması [37]

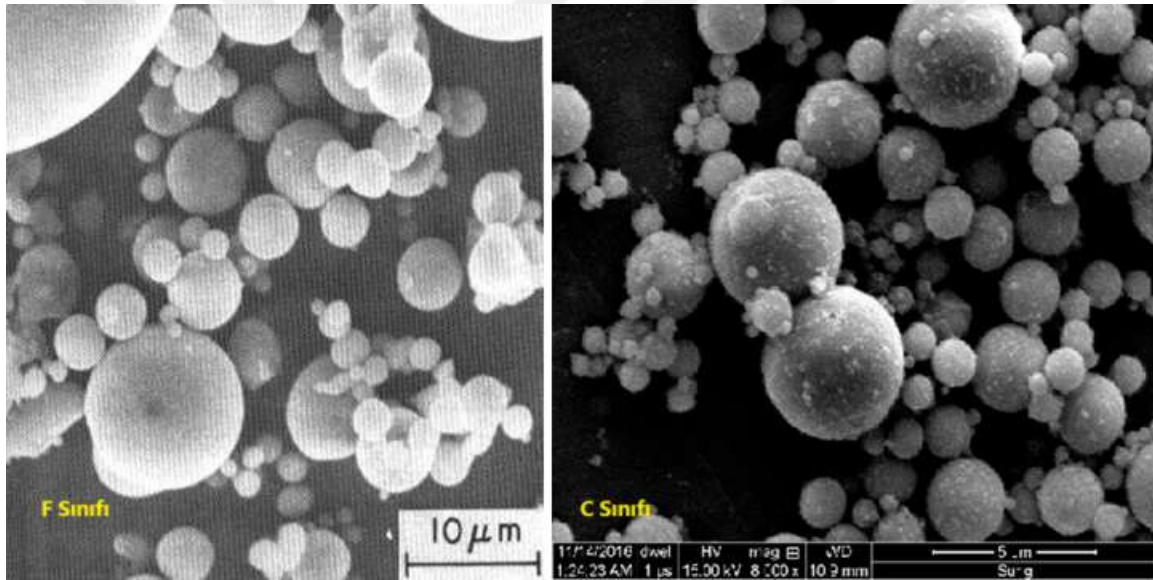
Sınıf	Tanım
V (Silissi)	Reaktif (SiO_2) ve (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren, reaktif (CaO) oranının $\%10$ 'dan az, reaktif (SiO_2) miktarı $\%25$ 'den fazla olan UK'ler.
W (Kalkersi)	Reaktif (CaO), (SiO_2) ve (Al_2O_3)'den oluşan; geri kalanı (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren, reaktif (CaO) oranı $\%10$ 'dan fazla, reaktif (SiO_2) miktarı $\%25$ 'ten fazla olan UK'ler.

UK'lerin fiziksel özellikleri

UK'ler koyu gri renkte ortalama yüzey alanları $2800\text{-}3800 \text{ cm}^2/\text{g}$, yoğunluğu $2,2\text{-}2,7 \text{ g/cm}^3$, inceliği $0,5\text{-}200 \text{ }\mu\text{m}$ olan toz halinde bir malzemedir. Kömürün özelliklerine ve yanma şekline göre rengi koyu veya açık olabilir. Kömür içerisindeki yanmamış karbon oranı fazla ise rengi koyu (gri), yanmamış karbon oranı az ise rengi açık (gri) olmaktadır [38]. UK'lerin tane yapıları yuvarlak olup, incelik değeri çimento inceliğine yakındır. Bu sebeple kullanabilmek için ayrıca bir öğütmeye ihtiyaç duyulmamaktadır [39]. UK'lerin fiziksel özellikleri TS EN 450-1 [40] standardına göre; priz başlangıç süresi, genleşme, incelik, aktivite indeksi, tanecik yoğunluğu ve su ihtiyacı olarak belirlenmiştir. Bu özellikler, UK meydana gelirken yakılan kömürün; kimyasal bileşenleri, öğütülme inceliği, derecesi ve yanma miktarına, santrallerdeki yanma ve toplama biçimine göre çeşitlilik gösterebilir. UK'lerin yukarıdaki sayılan özellikleri, kullanıldığı çimento sistemlerinin taze hal ve sertleşmiş haldeki özelliklerini direkt olarak etkilemektedir [40].

UK'lerin kimyasal özellikleri

UK'lerin kimyasal özelliği, üretildiği kömürün yapısına, yakılmasına, jeolojik kökenine, yakılan kömürün toplanmasına ve desülfürizasyon gibi özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. UK'de ana bileşen olarak SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO , az miktarda SO_3 , MgO ve alkali oksitler bulunmaktadır. Çok az miktarda yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, molibden ve manganda bulunabilmektedir [32,41]. UK içerisinde diğer oksitlerden $\text{MgO} \leq \% 5,0$, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) $< \% 5,0$ ve SO_3 değeri genelde $\% 0,2$ - $2,5$ arasındadır. Standartlardan özellikle TS EN 450 [38], SO_3 değerini $\% 3$ ile sınırlamaktadır [40,42].



Resim 2.1. UK'lerin SEM görüntüsü [43-45]

UK'lerin mineralojik özellikleri

UK'lerin mineralojik birleşimi, kömürde bulunan kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonat minerallerinin oranına, kömürün jeolojik menşesine, hazırlanma ve yanma süreçlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. UK mineralojik yapısı, camsı ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır. Kömürün yakılma biçimine göre, kimyasal yapısında başlıca olarak yer alan Si, Al, Ca, Fe ve S elementleri; SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO ve SO_3 gibi ana bileşenleri meydana getirirler. Bu bileşenlerin yanı sıra UK'ün yapısında MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 gibi oksitler bulunabilir. Düşük kireçli UK'lerde camsı faz ve kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) minerallerini içermekte iken yüksek kireçli UK'lerde bu

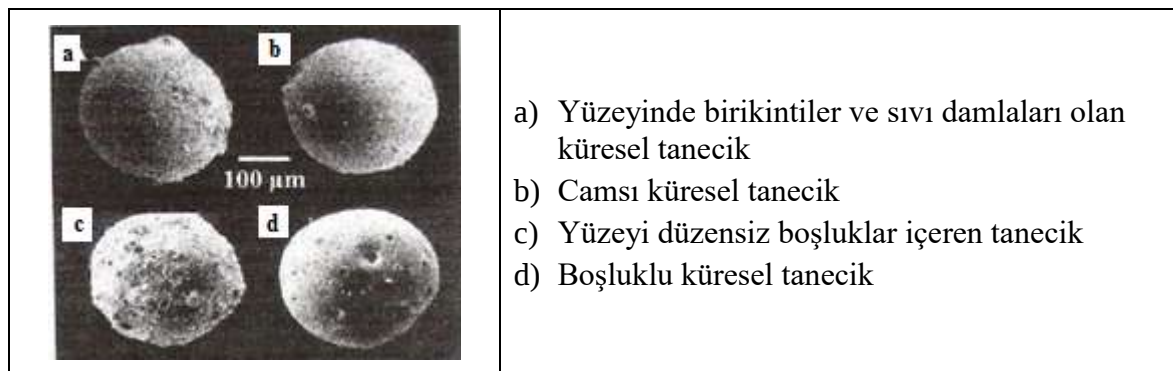
minerallere ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO_4), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat vb. kalsiyum silikatlar bulunabilmektedir [26,46-49].

UK sahip olduğu minerolojik yapısı ve puzolanik özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan endüstriyel bir atıktır. UK'ün reaktivitesinde, külün minerolojik bileşimi olan, camsı fazın durumu önemli rol oynamaktadır. Düşük kireç içeren UK'lerde, SiO_2 açısından zengin olan camsı faz, UK'nın reaktif bileşenidir. H_2O (su) ve Ca(OH)_2 (portlandit) tepkimeye girerek, UK'e puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireç içeren UK'lerde ise, camsı fazın yanında ayrıca aktif kristalize fazlar (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi) bulunmaktadır. Bu kristalize ve camsı fazlar, UK'ün puzolanik özelliğın yanında, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özellikte olmasını sağlamaktadır [30,50].

UK'lerin morfolojik özellikleri

UK morfolojisi (şekli) ve tanecik büyüklüğü, külün oluşumunda kullanılan kömürün kökenine, yapısına ve üretim sürecindeki; yanma şartlarına, meydana gelen toz parçacıklarının toplanma biçimine bağlı olarak farklılık gösterebilir [50].

UK'ün yüksek veya düşük kireçli olmasından kaynaklı, bünyesinde boyutları (0,5–150) μm arasında değişen hem camsı küresel ve hem de düzensiz şekilli tanecikler yer almaktadır [51].



Resim 2.2. UK taneciklerinin morfolojik yapısı [30]

UK'ün tanecik boyutunun $<40 \mu\text{m}$ olması (10-20) μm ve küresel yapıda olması puzolanik etkinliğini arttırmaktadır. Yüzey alanları büyük ve pürüzsüz olan ince küresel tanecikler,

daha büyük yüzey alanlarına sahiptir. Böylelikle kireç silikat reaksiyonlarına daha çabuk girmektedirler. Yüksek oranda kireç içeren külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı faz önemli rol oynamakta, düşük kireçli küllerde de ise taneciğin şekli, büyüklük yayılımı ve camsı fazın fazla olması önem taşımaktadır [30].

Düşük kireçli küller genelde şekil olarak homojen mikroyapıya sahiptirler. Camsı faz karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler, senosfer ve plerosferlerden oluşurlar. Yüksek kireçli küller ise küresel ve köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin birarada bulunduğu, homojen olmayan bir mikroyapıya sahiptirler [51].

UK'lerin kullanım alanları

Dünyada 1970'li yıllarda başlayan petrol krizi ve günümüze kadar artarak devam eden enerji ihtiyacı sebebiyle, alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik araştırmalar önem kazanmaktadır. İnşaat sektöründe de fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinden dolayı UK'lerin kullanılabileceği ve termik santrallerde kömürün yakılmasıyla atık olarak elde edilen atık UK'ün meydana getirdiği çevre kirliliği önlenerek, ekolojik dengenin korunması da sağlanmış olacaktır. UK çimento sistemlerinde, betonda, ince, iri ve hafif agrega olarak, baraj ve yol yapımında ve zemin enjeksiyonu benzeri geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır [43].

UK içeren betondan (harçlardan) beklenen özellikler

UK taneciklerinin yapısının ince ve küresel olmasından dolayı, UK agregaların arasına yerleşerek kuma kanallarının daralmasına neden olarak betonda kuma ve segregasyonu azaltmaktadır [52]. Betonda çimento yerine UK ikame edilerek kullanılması, betonun aynı slump değerindeki su ihtiyacını UK'süz betonlara göre azaltmaktadır. Su ihtiyacının azalması UK'ün küresel yapısından kaynaklanmaktadır. İnceliğin artması karışımın su ihtiyacını arttırırken, UK'ün küresel yapısından kaynaklı içsel sürtünme azalacağından su ihtiyacı azalacaktır. Böylelikle betonun işlenebilirliği de olumlu yönde gelişmektedir [53] Puzolanik malzeme kullanılan betonların priz süreleri uzundur. Dolayısıyla betonda UK kullanımı ile priz süreleri uzar. UK'de C_3A miktarının az olması, betondaki C_3A oranını düşüreceğinden priz süresinin artmasına neden olur [54].

Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan $(CaOH)_2$ ile UK arasında, çimentonun hidratasyonundan daha yavaş olan, kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. UK içeren betonların hidratasyonu uzun süreye yayıldığı için, hidratasyon hızı düşük olur, beton içerisinde daha az iç gerilme ve rötre meydana gelir (Çizelge 2.4). Baraj inşaatlarında özellikle, silindirle sıkıştırılmış beton gövde gibi daha çok kütle betonu imalatlarında yüksek ısıların oluşumunu önlemek için kullanılır [52]. UK kullanılan beton karışımlarında, azalan donma-çözülme direncini arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanılmalıdır. UK'lü betonlarında %1'lik hava sürükleyici katkı kullanılması bile, UK'süz betona kıyasla daha üstün performans göstermektedir [55]. Betonun zayıf olan su geçirimsizlik (permeabilite) özelliğini iyileştirmek için farklı mineral katkı maddelerinin değişken oranlarda katılarak iyileştirmesi için araştırmalar sürmektedir. UK'lü betonlarda geçirgenlik az olduğu için; betonun ileriki yaş dayanımı ve kimyasal etkilere karşı dayanımını olumlu yönde etkilemektedir [45].

Çizelge 2.4. UK içeren betonun özellikleri [26]

Taze Beton Özellikleri	Etkisi
Su İhtiyacı	Azaltır
Segregasyon	Azaltır
İşlenebilirlik	Artırır
Priz Süresi	Artırır
Terleme	Azaltır
Hidratasyon Isısını	Azaltır
Sertleşmiş Beton Özellikleri	Etkisi
Erken Yaş Dayanımı	Azaltır
Permeabilite	Azaltır
Alkali Agrega Reaksiyonu	Azaltır
Sülfat Direnci	Artırır

2.2. Lifli Betonlar

Betonun yüksek olan basınç dayanımına karşın, düşük olan süneklik, çekme ve eğilme dayanımı gibi karakteristiklerini iyileştirmek ve geliştirmek için araştırmalar yapılmıştır.

1970'li yıllarda bilimsel araştırmalar sonucunda, İngiltere ve İskandinavya ülkelerinde lifli beton teknolojisi ortaya çıkmıştır. Lifler, kendi çekme dayanımlarına erişinceye kadar betonda basınç ve çekme gerilmelerinden dolayı oluşan kılcal çatlak oluşumunu en aza indirmektedir [56,57]. Lifli beton; agrega, çimento ve gelişigüzel yönlendirilmiş liflerin su ile karıştırılmasıyla oluşan beton türüne denilmektedir [58].

Betonda lif kullanımının sebebi; betonun eğilme dayanımının arttırmak, darbeye karşı direncin artırılması ve enerji yutabilme kapasitesi olan tok bir malzeme elde etmektir. Beton karışımında genel olarak çelik, polipropilen, karbon ve cam lif çeşitleri kullanılmaktadır [59].

2.2.1. Lifli betonların özellikleri

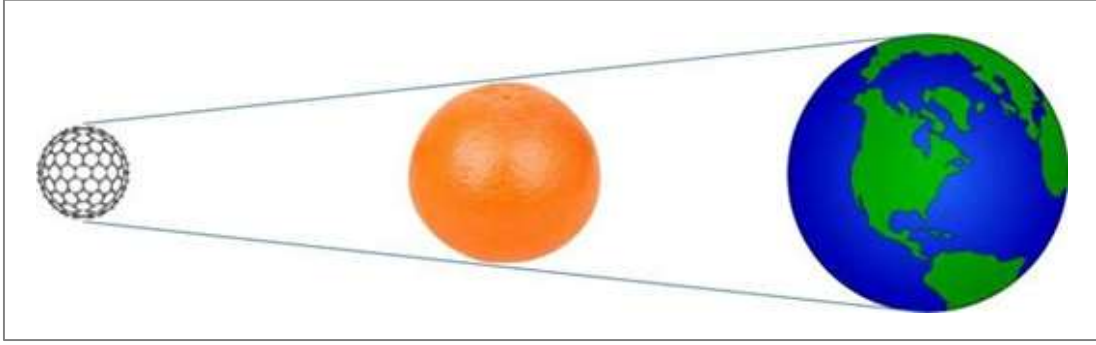
Betonun basınç kuvvetine karşı dayanımı iyi olmasına rağmen, çekme kuvvetine karşı dayanımı zayıftır. Sertleşmiş betondaki iç gerilmelerden ötürü, mikro çatlaklar meydana gelmekte, çatlakların birbirine bağlanarak gelişmesiyle beraber, bu çatlaklar makro çatlaklara dönüşmektedir. Betona lif ilave edilerek, betonun mikro yapısında oluşan gerilmeler lifler vasıtasıyla aktararak çatlakların ilerleyerek gelişimi engellenmektedir. Böylelikle betonda çekme dayanımı, süneklik ve tokluk özelliklerindeki iyileşmesinin yanı sıra, betonun mekanik özellikleri olan yarıma, basınç ve eğilmede iyileşme görülmüştür [60-62].

Betonun karakteristik özelliklerine olumlu etkilerine karşın, yüksek hacimde UK içeren YPLDÇK'nin özellikle ilk basınç dayanımı yüksek olan, hızlı onarım malzemesi olarak kullanılmasının önünde iki engel bulunmaktadır. İlk olarak YPLDÇK'nin süneklik ve çoklu mikro-çatlak özelliklerinin sağlanabilmesi için YPLDÇK matris kırılma tokluğunu ve lif-matris ara yüzey kimyasal bağının en düşük seviyelere indirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı tasarım yaparken, mineral katkı olan UK yüksek hacimlerde kullanılmaya başlanılmıştır. Fakat bu durum karışımın erken yaş dayanımına negatif yönde etkilemektedir. Erken yaş yüksek dayanımı sağlayabilmek için YPLDÇK üretiminde düşük su/bağlayıcı malzeme oranı, reaktivitesi yüksek bağlayıcı malzemeler ve kimyasal katkıları kullanarak YPLDÇK matrisinin tokluğunu ve lif matris ara yüzey kimyasal bağı önemli ölçüde artırılmasıyla, YPLDÇK'nin süneklik özelliğinde ciddi azalma oluşmaktadır [62-64].

İleriki yaşlarda matris-lif yüzeyinde oluşan kimyasal bağlardan dolayı lifler çekme yüklemesi altında matrinden sıyrılarak kopmalar meydana gelir. Bundan dolayı ileriki yaşlarda, ilk dayanımı yüksek YPLDÇK karışımları sünekliliği sürdürememişlerdir. YPLDÇK'nin onarım malzemesi olarak kullanılmasının diğer dezavantajı ise çimento matrisinde meydana gelen, nem kaybı ve reaksiyonlar sebebiyle büyük rötre/büzülme kapasitesine sahip olmasıdır. YPLDÇK üretiminde düşük değerli matris tokluğunu sağlayabilmek için liflerin kırılma sürecinde etkili olmalarını sınırlandıran ve daha fazla kullanımında daha yüksek oranda sürekli arayüz bölgesine neden olan kaba agrega ve karışımdaki toplam agrega miktarı kullanımı azaltılarak, yüksek miktarda bağlayıcı malzeme kullanılmaktadır. İlk yaşlarda yüksek dayanımı sağlamak için YPLDÇK üretilirken kullanılan çimento bağlayıcı malzeme miktarı arttırılarak, kullanılacak bağlayıcı malzemelerin reaktifliği yüksek olmalı, priz hızlandırıcı ve/veya su/bağlayıcı malzeme oranı azaltılarak kullanılması gerekmektedir. Bundan dolayı YPLDÇK'nin mevcutta yüksek olan rötre/büzülme kapasitesine negatif yönde etkileyebilir [64-66]. Bu yüzden, YPLDÇK'nin halihazırdaki boyutsal, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini de sağlayarak, erken yaş yüksek dayanımın elde edilmesi gerekmektedir. Araştırmalar sonucunda, taneciklerinin çekirdeklenme etkisiyle lif-matris arayüz sürtünmesinde oluşan bağı destekleyerek, kompozit malzemelerin basınç ve eğilme özelliklerinin gelişmesini sağlayan, günümüzün en önemli araştırma konularından biri olan nano malzemelerin YPLDÇK üretiminde kullanılması fikri ortaya çıkmıştır [67,68].

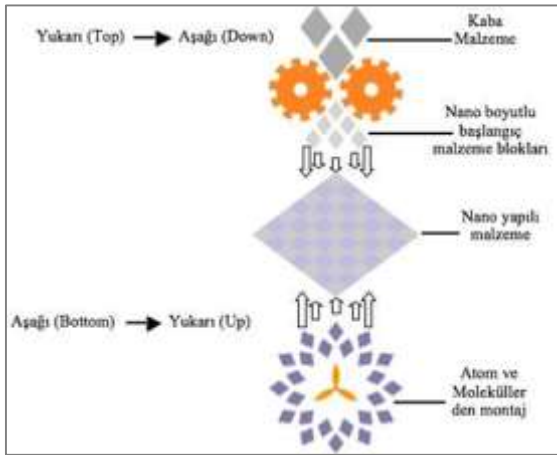
2.3. Nano Malzemeler

Nano sözcüğü yunanca olup cüce manasına gelmektedir [69]. Nano ölçek, boyutları 1-100 nm ($1\text{nm}=10^{-9}$ m, veya $1\text{m}=10^9$ nm) arasında olan ölçülere denilmektedir. Nano malzememin boyutları ile ilgili anlaşılır bir örnek verirse, insan saç teli yaklaşık olarak 80 000 nm büyüklüğündedir. Şekil 2.1'de ise bir karbon fullerenle (karbon grafit ve elmas haricindeki allotroplara verilen isim) greyfurt meyvesinin oranı, yaklaşık greyfurt meyvesi ile Dünyamız arasındaki oran ile aynıdır [70].



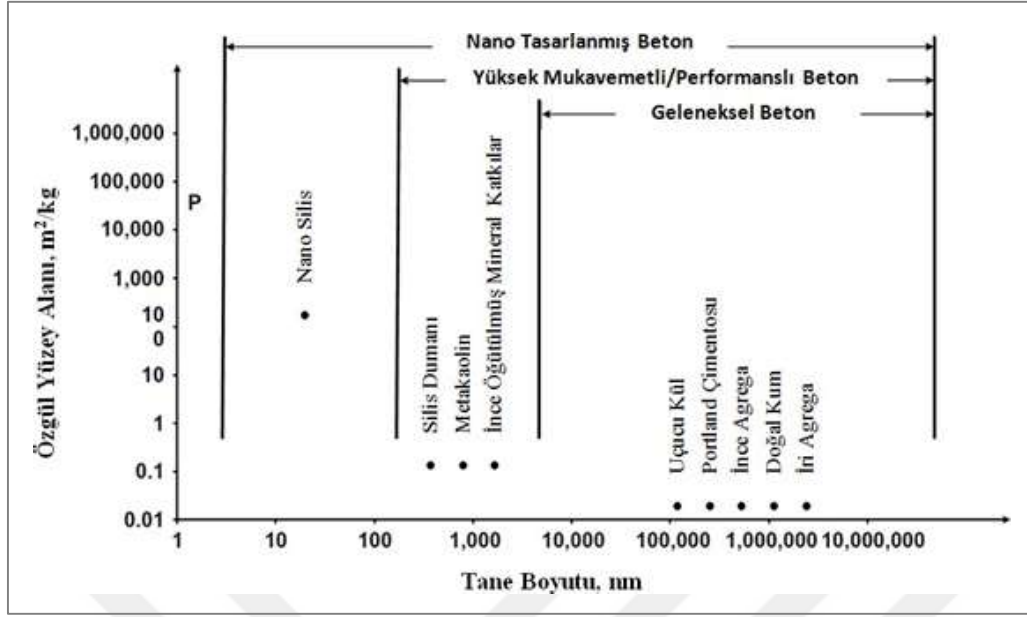
Şekil 2.1. Karbon fullerene, greyfurt meyvesi ve Dünya arasındaki yaklaşık oranlarının görüntüsü [70]

Nano ölçekteki malzemelerin ana fonksiyonlarını ve verimini geliştirmek için daha iyi anlaşılması ve kontrol edilmesini sağlayarak, tasarlanması ve kullanılmasına Nanoteknoloji denilmektedir. Yaygın kullanım alanı olan nanoteknoloji fizik, kimya, biyolojinin yanısıra inşaat, tıp, elektronik, bilgisayar alanında da kullanılmaktadır. Nanoteknolojide, nano malzeme üretiminde top-down (üstten aşağı) ve bottom-up (alttan yukarı) olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır. “Top-down” yaklaşımında boyut itibarıyla büyük yapılar orijinal özelliklerini kaybetmeden nano boyuta indirgenir. “Bottom-up” yaklaşımında ise atomik boyuttaki yapının, belirli prosesten geçilerek nano boyuta dönüştürülmesidir (Şekil 2.2) [71,72].



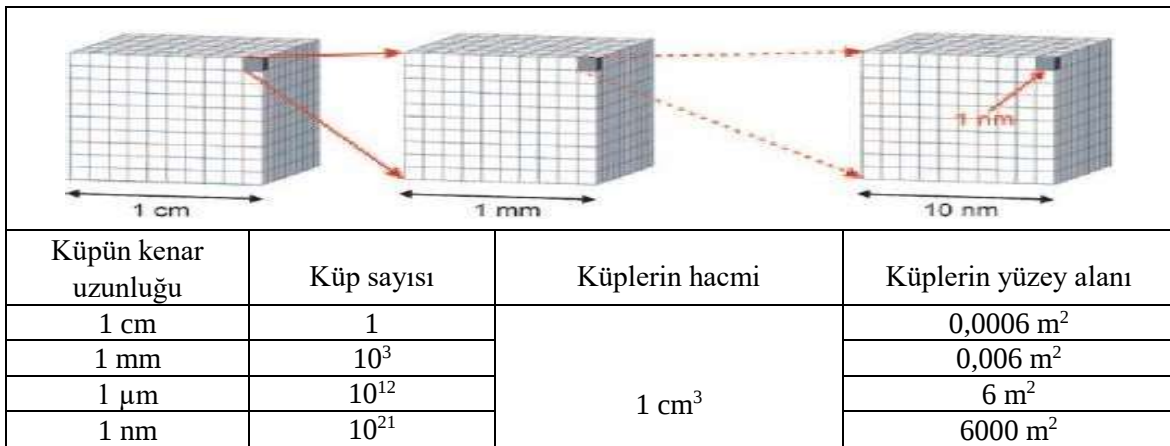
Şekil 2.2. Nanoteknoloji'deki yaklaşımlar [67,68]

Nano malzemeler, boyutları çok küçük olmasına rağmen yüzey alanları çok büyük olduğundan, çimentolu sistemlerde mineral katkı maddeleri ve diğer bileşenlerin dolduramadığı boşlukları doldurarak; geçirimsizlik, dayanım ve durabilite gibi özellikleri geliştirilmiş betonlar elde edilebilir. Şekil 2.3.'te betonda kullanılan malzemelerin tane boyut ve özgül yüzey alanları görülmektedir [73].



Şekil 2.3. Betonda kullanılan malzemelerin tane boyutu ve özgül yüzey alanları [73]

Yüzey alanı yüksek olan nano parçacıkların, fizikokimyasal özellikleri değişebilmektedir. Yüzey alanının büyümesi erime noktasını düşürmekte, tane boyutlarının küçülmesi ise kimyasal aktiviteyi arttırmaktadır. Şekil 2.4.'te 1 cm^3 hacmindeki kütle yüzey alanı ile kütle yüzey alanının nano boyutlara indirgenmesi sonucunda yüzey alanında oluşan büyük farklılık görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere kütle birim olarak cm^3 iken $0,0006 \text{ m}^2$ 'lik yüzey alanına, birim olarak nm^3 iken 6000 m^2 'lik yüzey alanına sahip olmaktadır. Nano parçacıkların bu özelliği sayesinde, yüksek dayanımlı, boşluğu az, kompakt ve geçirimsiz yapıları kompozit malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır [74-76].

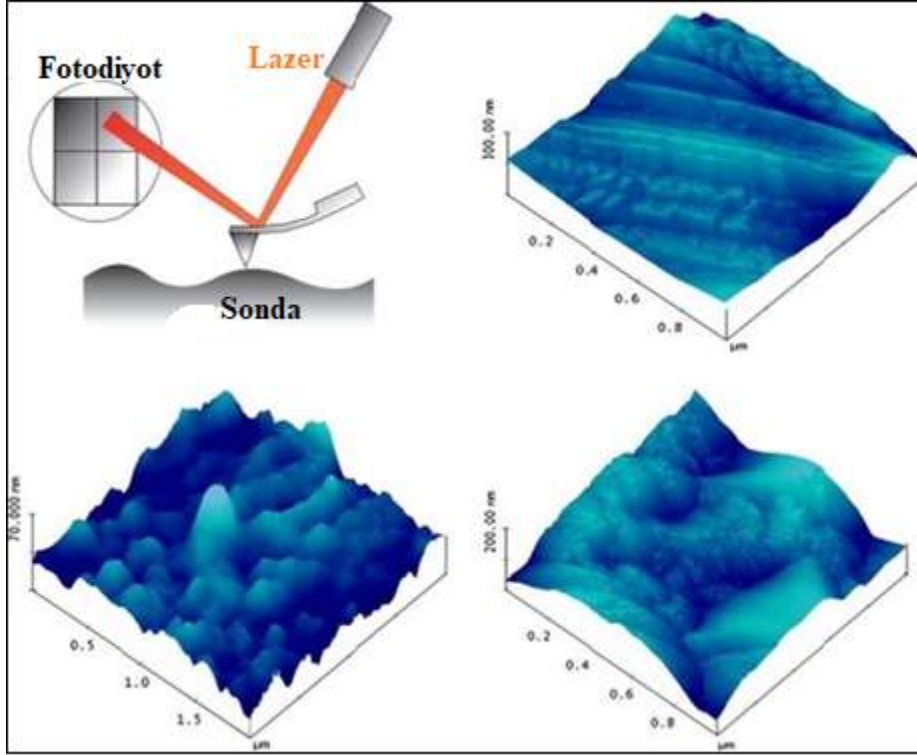


Şekil 2.4. Nano tozların yüzey alanı basitleştirilmiş model [75]

Doğası gereği beton, gevrek ve her zaman çatlak oluşumuna müsait bir malzemedir. Çatlaklar nano düzeyde başlayarak mikro çatlaklara sonrasında da makro çatlaklara dönüşmektedir. Son zamanlarda makro çatlakların meydana gelmesine sebep olan mikro çatlakların oluşumunu engellemek için, betonda çeşitli özelliklerde mikro lifler kullanılmasına rağmen nano çatlakların oluşumu engellenememiştir. Nano taneciklerin gelişimi ile birlikte matris içinde zayıf olan kusurlar giderilerek, nano çatlakların mikro çatlaklara dönüşümü engellenmiştir [77]. Sıvı, gaz ve iyonlar beton içine girerek fiziksel veya kimyasal tepkimelere yol açarak, betonun yapısını ve hizmet ömrünü etkilemesi sebebiyle geçirimsizlik, betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli unsurlardan biridir [78-80].

Nano parçacıklar çok yüksek özgül yüzey alanı ve küçük tane boyutu sebebiyle, büyük reaktiflik özelliğe sahiptirler. Bundan dolayı betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri olan, basınç ve eğilme dayanımı, aşınma ve donma çözülme direncini geliştirmektedir [81-82].

Nano boyuta indirgenen çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri hakkında, kısa bir zamanda çok fazla alan tarayarak, bilgi elde etmemizi sağlayan deney yöntemleri; atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ve buna yakın Peak Force QNM ile nano indentasyon (nano sertlik) sayılabilir. AKM'nin diğer bir çeşidi olan yanal kuvvet (lateral force) mikroskobu oluşan topoğrafik farklılıkları bulmada kullanılan deney metodur. Hamur halindeki malzemenin boşluk oranı ile nano boyuttaki yüzey topoğrafyası değişiklik göstermektedir. Deneyler sonucunda oluşan yüzey topoğrafyası yardımıyla su/çimento oranı, kür zamanı gibi parametrelerin hamur içerisindeki agrega arayüzü gibi nano ölçekli kısımlardaki etkisini gözleme fırsatı ortaya çıkmıştır. Şekil 2.5.'te [83] AKM kullanılarak yapılan deney sonucunda meydana gelen yüzey topoğrafyası görülmektedir [83-87].

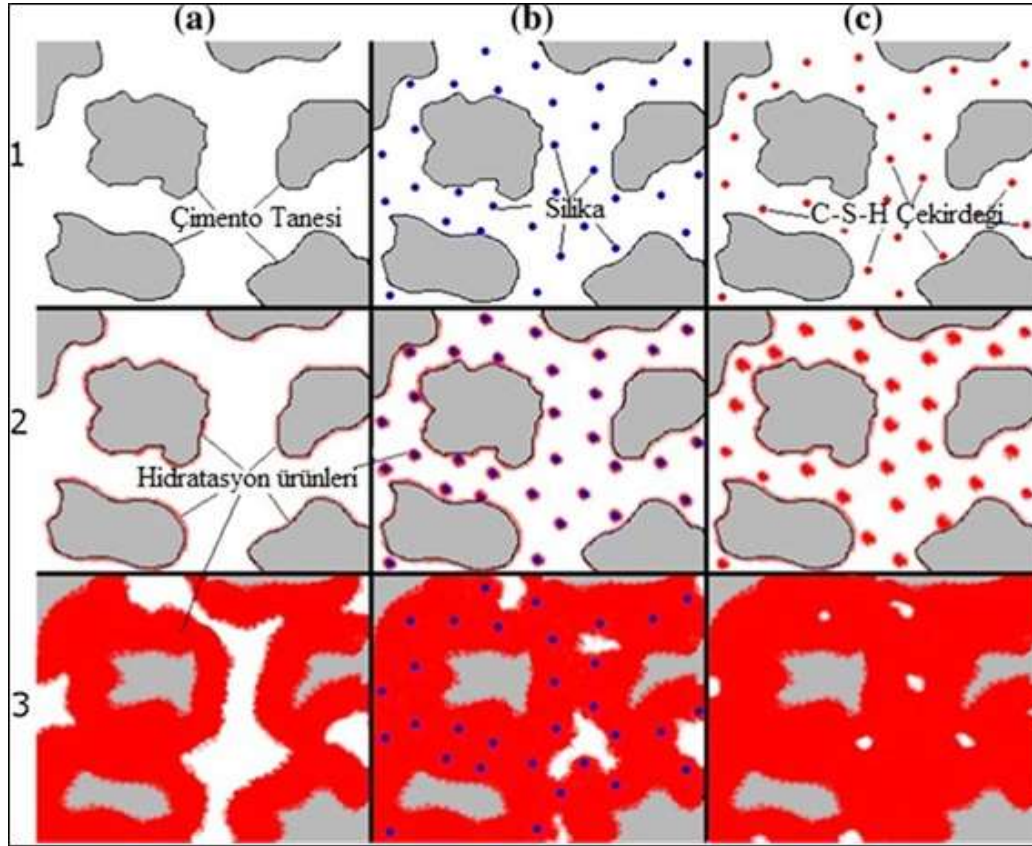


Şekil 2.5. Atomik kütle mikroskobu ile elde edilen çimento erken yaş hidratasyonu [87]

Nano parçacıkların karakteristik özellikleri yalnızca tanecik boyutu değil ayrıca parçacıkların topaklaşmadan dağılması gerekmektedir [88]. Karışım içerisindeki su miktarı sabit tutularak, karışıma yüzey alanı çok yüksek olan nano parçacıkların eklenmesi halinde, su miktarı azalır böylelikle topaklanma başlar. Nanoparçacıkların iyi dağılması sonucunda, topaklanma oluşmadığında çimento hidratasyonunu hızlandırmasıyla, mikro gözeneklerin azalacağı ve silikat zincirlerinin uzunluğunu artmasıyla, C-S-H jelinin yapısındaki olumlu değişiklikler sayesinde betonun karakteristik özelliklerinde iyileşmeler meydana gelecektir [89,90].

Nano boyuttaki parçacıkların, yüzey alanı çok büyük olduğundan karışım içerisindeki malzemelerle daha fazla temas alanı oluşacağından reaktivitesi yüksektir. Çimento hidratasyonunun temel ürünü olan C-S-H jelinin büyümesi için gerekli ilave alanlar sağlanmış olacaktır. Bu sayede çimentonun erken hidratasyonu hızlandırılabilir [80,91,92]. Nanoparçacıklar hamur içerisindeki, nano ölçekteki boşlukları doldurmasının yanında, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile pozolanik reaksiyona girerek ekstra C-S-H jeli ortaya çıkar. Böylelikle C-S-H jeli üretimi esnasında tepkimeye giren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ azalması ile de betonun dayanım özellikleri daha da gelişecektir [93]. Çimento hidratasyonunda, hidratasyon kinetiklerini hızlandırmada rol alan, Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_3 nano tanecikleri çekirdekler oluşturarak, SiO_2 ise

puzolanik reaksiyon yardımıyla hidrasyon kinetiklerinin hızlanmasını sağlarlar [58,59,83]. Şekil 2.6.'da [58] normal ve nano katkılı malzemelerin çimento hidrasyonu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.6. A) Çimento hidrasyonu B) Nano katkılı çimento hidrasyonu C) C-S-H oluşumu [58]

2.3.1. Çalışmada kullanılan nano malzemeler

Nano silika

Nano silika, organik çözücüler bünyesinde şekli olmayan kolloid parçacıklar halinde bulunmaktadır. Tedarik edildiğinde sıvı halde ve pH değeri 8-10 arasında olmalıdır. Bu pH değeri eriyiğe NaOH, KOH, LiOH veya NH₄OH gibi alkalilerin dahil edilmesiyle elde edilebilir. Nano silika parçacıkları negatif yüklü olup, nötr hale getirmek için pozitif yüklü Na⁺, K⁺, Li⁺ ve NH₄⁺ gibi iyonları gereklidir. Parçacıkları pozitif yüklü olan nano silikalar da vardır. Nano silika parçacıklarının ölçüleri 5-100 nm arasındadır. Parçacıkların, boyutlarının dağılımı ve konsantrasyonu görünüşünü etkilemektedir. Parçacıklar en küçük boyutta ise renksiz, fakat boyutu büyük ve konsantrasyonu yüksekse rengi süt

görünümündedir. Nano silikanın yüzey alanının çok büyük olmasından dolayı puzolanik aktivitesi de fazladır. Bundan dolayı, nano silika içeren betonun ilk yaş dayanım değerleri yüksek çıkmaktadır [62,95].

Araştırmalar sonucunda, nano silisin C-S-H jel miktarını arttırdığı için hidratasyonu arttırdığını, hidratasyon sonucunda kompakt ve iyi sıkışmış yapıdan dolayı, ara yüz bölgesi ve gözenek yapısını iyileştirdiği, betonun işlenebilirlik özelliğini kısmen negatif yönde etkilese de, dayanım özelliğini geliştirdiği görülmektedir [67,96-100].

Nano demir oksit

Demir oksit nanopartikülleri/nanotozları, oldukça büyük bir yüzey alanına ve yüzey-hacim oranına sahip nano ölçekli demir oksit kristalleridir (α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ ve Fe₃O₄). Oksijen ve Demir (III) reaksiyona girmesiyle doğada 16 farklı demir oksit türü meydana gelmektedir. Bilinen demir oksitler hematit (α -Fe₂O₃), maghemit (γ -Fe₂O₃) ve manyetit (Fe₃O₄)'tir. Kolay bulunmaları ve uygun maliyetlerinden dolayı demir oksitlerin birden fazla alanda kullanımı yaygındır [101].

Demir nanoparçacıklarının sentezi için kuru işlemler, mikrobiyolojik teknikler ve ıslak kimya gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Genel olarak sentez yöntemleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Demir oksit nanoparçacık sentezinin fiziksel yönteminde, büyük kristalleri daha küçük kristallere parçalamak için yukarıdan aşağıya teknik benimsenir. Ancak parçacık boyutu ve homojenliği üzerindeki kontrol kayboluyor ve bazı parçacıklar nano ölçeklere sığmayan boyutlara ulaşıyor. Fiziksel tekniklerin bazıları lazer ablasyon, ultraviyole ışınlama, litografi, ultrasonik alanlar ve aerosol teknolojileridir. Kimyasal sentez yöntemleri, nano ölçekte parçacıkların daha yüksek homojenliği ile en iyi ve en verimli yöntem olarak kabul edilir. Bu yöntemler, parçacıkların şeklinin ve bileşiminin çok hassas bir şekilde kontrol edilebildiği basit ve izlenebilir yöntemlerdir. Bunlar arasında sıvı faz yöntemleri, iki fazlı yöntemler (mikroemülsiyon), sol-jel yöntemi, gaz/aerosol fazı yöntemi, poliol yöntemi, hidrotermal reaksiyon yöntemleri ve sonoliz uygun ürün veren yöntemlerdir. Kısaca demir oksit nanopartikülleri, Fe²⁺ ve Fe³⁺'nın bir baz eklenerek birlikte çöktürülmesi reaksiyonuyla hazırlanır. Sentez sürecinde kullanılan demir çitanın türü, iyonik güç, pH ve Fe²⁺/Fe³⁺ oranı, ortaya çıkan nanopartiküllerin bileşimini, şeklini ve boyutunu belirler [102,103].

2.4. Literatürde Yapılmış Olan Çalışmalar

Li ve diğ. (2004) Bu çalışma ile Polivinil alkol (PVA) lifi ile Tasarlanmış Çimento Esaslı Bağlayıcı Kompozit malzemelerin (ECC) dayanıklılığını araştırmıştır. ECC'ler, %5'e kadar çekme gerilme kapasitesine sahip sünek gerilme dayanımlı çimentolu esaslı kompozitlerdir. Betonun durabilitesinin değerlendirilmesi için mikromekanik tabanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Mikromekanik tabanlı model, elastik fazın ötesindeki mikro bozulma mekanizmaları bilgisi ışığında kompozit özelliklerle ara-yüz elemanları, lif, beton matrisi ile ilgili bir model olduğu belirtilmiştir. Çevresel yüklemekten kaynaklanan kompozit özellik değişikliklerinin, lif ve lif matris arayüz özelliklerinin değişmesi sonucunda bozulduğu belirtilmiştir. Bu kavram, hızlandırılmış teste tabi tutulan numunelerle fiber ve fibermatrix arayüz özelliklerindeki değişiklikleri deneysel olarak belirleyerek ve bu değişiklikleri aynı hızlandırılmış test koşullarına maruz bırakılan kompozitlerin sünekliğindeki değişikliklerle ilişkilendirerek araştırmıştır. Araştırmada kullanılan hızlandırılmış test, uzun süreli sıcak ve nemli ortamı simüle eden bir sıcak suya daldırma testidir. 26. haftaya ulaşıldığında, lifin mukavemeti azalırken, fiber-matris ara-yüzünün kimyasal bağının arttığı görülmüştür. Bundan dolayı kompozit sünekliği azalmıştır. Mikromekanik model, bu 2 test seviyesinden gelen verileri yorumlamak ve ilişkilendirmek için rasyonel bir araç sağlar. Bozulmalara rağmen, PVA ile üretilmiş beton, 70 yıl veya daha fazla yıla eşdeğer sıcak ve nemli ortam koşullarına maruz kaldıktan sonra, normal beton veya normal lif donatılı betonun gerilme sünekliğini 200 kattan fazla koruduğu bulunmuştur [104].

Sahmaran ve diğ. (2007) Bu çalışmada, ASTM C 618'in incelik koşullarına sahip olmayan yüksek hacimli uçucu kül (YHUK) içeren lifli kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze ve mekanik özellikleri incelemiştir. Polikarboksilik tabanlı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak karışımın viskozitesi ayarlanmıştır. UK içeren karışımlarda %50 oranında çimento ile UK değiştirilmiştir. Toplam lif içeriği 60 kg/m^3 'te sabit tutulmuş iki farklı tipte çelik lif bir arada kullanılmıştır. Betonun taze haldeki özelliklerini değerlendirmek için yayılma, V-hunisi ve hava içeriği deneyleri yapılmıştır. Betonun özelliklerini belirlemek amacıyla; basınç, yarmada çekme ve ultrasonik darbe hızı deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, YHUK'ün kullanılması nedeniyle betonun dayanımında bir miktar azalma olmasına rağmen, YHUK kullanılarak lifli KYB üretilabilir sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, YHUK'ün dahil edilmesinin KYB karışımının su ihtiyacını azalttığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, yüksek hacimlerde ve standart dışı bir UK kullanılması KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini arttırmıştır. Öte yandan, UK kullanımı yüksek hacimlerde kullanıldığı için KYB karışımlarında önemli dayanım kayıplarına neden olmuştur. UK'ün düşük pozolanik aktivitesine bağlı basınç dayanımı azalması, daha küçük boyutlu SF2 tipi çelik liflerin kullanılmasıyla kısmen dengelenmiştir. Bu nedenle, fiber geometrisinin KYB karışımlarının özelliklerini sadece sertleştirilmiş durumda değil, aynı zamanda taze durumda da etkilediği sonucuna varılabilir. Yarmada çekme dayanımına gelince, kancalı uçları olan daha uzun elyaflar, yani SF1 elyafları, betonun gerilme dayanımını karakterize etmede daha etkilidir [105].

Lin ve diğ. (2008) Bu çalışmada, nano-SiO₂ katkı maddesini Atık uçucu kül (AUK) harcının özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, AUK harcına fiziksel özelliklerini ve mikro yapılarını araştırmak için farklı miktarlarda nano-SiO₂ eklenmiştir. Karışımda AUK ikame oranı %0, %10, %20 ve %30 ve s/b=0,7 belirlenmiştir. Ayrıca ağırlıkça karışıma %0, %1, %2 ve %3 nano-SiO₂ ilave edildi. SEM analizi ve basınç dayanımı testleri, 3, 7 ve 28. günde kür edilmiş harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, AUK'nin hidratasyon ürünü olarak ortaya çıkan kristalleri daha incelttiği görülmüştür. Nano-SiO₂ ilave edildiğinde ise kristallerde artış meydana gelmiştir. Bu nedenle, nano-SiO₂, AUK harcının hidratasyonu üzerindeki etkilerini arttırabilir. Ayrıca, AUK'ün düşük pozolanik reaksiyon etkisi nedeniyle, AUK harcının erken basınç dayanımlarını azaltmıştır. Bununla birlikte, harca nano-SiO₂ ilave edilmesinin, atık/uçucu külün harcın erken dayanımının gelişimi üzerindeki etkisini arttırabileceği anlamına gelen hidratasyon kristallerinin üretilmesine yardımcı olabilir.

Deneysel verilere dayanan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

1. AUK'ün çimento hidratasyon kristallerini daha ince yapabilirsiniz. Ayrıca, nano-SiO₂ ilave edildikten sonra, kristaller artmış ve alüminat, hidrat çekirdeklenmesinin ilerlemesi ve C-S-H jelinde kristal büyümesi boyunca AUK'den çözündürülmüştür. AUK harcına nano-SiO₂ ilave edilmesi, hidratasyon reaksiyonunu hızlandırabilir ve özelliklerini geliştirebilir.
2. AUK hamurun ilk ve son priz süresini uzatabilir, AUK'ün artmasıyla son priz süresi artar. Bununla birlikte, nano-SiO₂ ilave edilmesi, AUK ilave edilen hamur için başlangıç ve

bitiş sürelerini geliştirebilir. Ayrıca, nano-SiO₂ ilave edilen numuneler için başlangıç zamanı ve bitiş zamanı, tip I Portland çimentosu ile yapılan harç numunelerinin zamanına yakındı. MIP ve TEM'den elde edilen sonuçlar, AUK harcına nano-SiO₂ ilave edilmesinin hidrasyon reaksiyonunu hızlandırabileceğini ve özelliklerini geliştirebileceğini göstermektedir.

3. AUK harç numunelerin basınç dayanımlarını azaltır. Bununla birlikte, nano-SiO₂, AUK harcı numuneleri için basınç dayanımını arttırabilir. Harca nano-SiO₂ ilave edilmesi, AUK'un harcın erken dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabilir [106].

Nazari ve diğ. (2010a) Bu çalışmada, farklı miktarlarda SiO₂ nanopartiküllerine sahip kendiliğinden yerleşen betonun eğilme dayanımı, termal özellikleri ve mikroyapısını incelemiştir. Kendiliğinden yerleşen betona ortalama partikül büyüklüğü 15 nm olan SiO₂ nanopartikülleri kısmen eklenerek, numuneler üzerinde farklı deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, SiO₂ nanopartiküllerinin kendiliğinden yerleşen beton(KYB)un eğilme dayanımını geliştirebildiğini ve süper akışkanlaştırıcıların numunelerin eğilme dayanımı üzerindeki negatif etkisini iyileştirebileceğini göstermektedir. SiO₂ nanopartiküllerinin ağırlıkça %4 oranına kadar çimento yerine ikame edilmesiyle erken yaş hidrasyonunda portlandit oluşumunu arttırarak C-S-H jellerinin oluşumunu hızlandırmıştır. SiO₂ nanopartiküllerinin muhtevasının ağırlıkça %4'ten fazla olması, nanopartiküllerin beton matrisindeki uygun olmayan dağılımı nedeniyle eğilme dayanımı azalmasına neden olur. Termo gravimetrik analiz, Isı ölçüm ve X-ışını kırınım testleri sonuçlarında ağırlıkça %4'e kadar SiO₂ nano partiküllerinin numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. SiO₂ nanopartikülleri betonun gözenek yapısını iyileştirebilir.

Deneysel verilere dayanan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

1. Portland Çimentosu(PC) içeriği arttıkça eğilme dayanımı azalır. PC'nin özellikle erken yaşlarda çimento hidrasyonunu geciktirdiği öne sürülmüştür. Bununla birlikte PC'li ve PC'siz örneklerin eğilme dayanımı arasında belirgin bir fark yoktur.
2. SiO₂ nanopartiküllerin içeriği ağırlıkça %4'e kadar arttıkça, KYB örneklerinin eğilme mukavemeti artar.
3. Ağırlıkça %4'e kadar SiO₂ nanopartikülleri hidratlı çimento ürünlerinin oluşumundaki hızlanma ile ilgili olan ısı ölçüm testinde tepe görünümünü hızlandırabilir.

4. Termogravimetrik analiz, SiO_2 nanopartiküllerinin, ağırlıkça %4'e kadar çimento hamuruna kısmen ilave edildiğinde örneklerin ağırlık kaybını arttırabildiğini göstermektedir. Hidratlı ürünlerin daha hızlı oluşumu, XRD sonuçları ile teyit edilen SiO_2 nanopartiküllerinin varlığında daha fazla ağırlık kaybının nedeni olabilir.
5. SiO_2 nanopartikülleri tüm mezo ve makro gözenekler doldurarak KYB'nin boşluk yapısı iyileştirir [107].

Mondal ve diğ. (2010) silis dumanı gibi mineral katkıların kullanımının betonun mukavemetini ve dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir. Bu araştırma betona silis dumanı ve nanosilikanın eklenmesinin etkilerini karşılaştırılmakta ve beton nano yapısındaki değişikliklerin daha iyi anlaşılması amaçlanmaktadır. Çimento hamurunun yerel mekanik özelliklerini %0 ve %15 oranında silika dumanı ile değiştirerek taramalı sonda mikroskopu yöntemini kullanarak ölçmüşlerdir. Numunedeki silis dumanının, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin hacim fraksiyonunda azalmayı sağladığını kanıtlamışlardır. Ayrıca, çimentoya %15 silis dumanı ikame edilmesi ile yüksek sertlikteki kalsiyum silika hidrat jelinin (C-S-H) hacmini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Nanosilika ile çimento hamurunun beraber kullanıldığı bir çalışma ile nanosilikanın betonun mukavemetini büyük oranda arttırdığı görülmektedir. Araştırmada nanosilikanın çimento hamurunun nano yapısı ve betonun mukavemeti üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Çalışmada yüksek sertlikteki C-S-H jelinin hacminin nanosilika ilavesiyle önemli ölçüde arttığını gözlemlenmiştir. Aynı oranlarda silis dumanı ve nanosilika karışıma eklenmiştir. Nanosilika içeren numuneler, silis dumanlı numunelerin neredeyse iki katı yüksek sertlikte C-S-H jeline sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmadaki diğer deney sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

1. Nano iz deneylerinden, çimento parçacıklarının 100 GPa civarında, hidratasyon ürünlerinden çok daha yüksek bir elastik modüle sahip oldukları bulunmuştur.
2. C-S-H fazının elastik modülünün 10-30 GPa olduğu ve sertlik değerlerinin 0,25-1 GPa olduğu görülmektedir. Bu değerlerin, diğer araştırmacılar tarafından bulunan elastik modül ve sertlik sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.
3. Çimentoya %15 oranında silis dumanı ikame edilmesi ile karışımın elastik modülünün değişmediği görülmüştür.
4. Bu araştırmaya paralel olarak yapılan başka bir çalışmada, nanosilika ile çimento hamurlarının MAS (magic angle spinning) – NMR (Nükleer manyetik rezonans

spektroskopisi) spektrumları, nanosilikanın C-S-H jelinin ortalama zincir uzunluğunu arttırdığını kanıtlamıştır. Bu nedenle, nanosilikanın yüksek sertlikteki C-S-H jel miktarını veya gücünü arttırması beklenmektedir. Nano iz çalışmaları, iki C-S-H fazının elastik modüllerinin hiçbirinin nanosilika ilavesiyle değişmediğini kanıtlamıştır. Bununla birlikte, nanosilika yüksek sertlikteki C-S-H jel miktarını önemli ölçüde arttırmıştır. %18 nanosilika içeren örneklerde, yüksek sertlikte C-S-H'nin hacim oranı %50'ye kadar yükselmiştir. Bu, Gaitero ve ark. betona nanosilika eklemenin dayanıklılığı üzerindeki olumlu etkiyi açıklamaktadır [108].

Ali Nazari ve diğ. (2010b) yaptıkları çalışmada çimentonun yerine ortalama çapı 15 nm olan ağırlıkça %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 gibi farklı oranlarda nano-Fe₂O₃ partikülleri ikame edilmesiyle betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliğini incelemişlerdir.

Sonuçlar, maksimum %2,0 oranına kadar nano-Fe₂O₃ partikülleri kullanılan betonun, nano-Fe₂O₃ partikülleri olmayan betona kıyasla önemli ölçüde daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. 7., 28. ve 90. gün basınç dayanımı değerlerine bakıldığında %1,0 nano-Fe₂O₃ partikülleri ikamesiyle en yüksek basınç dayanımının elde edildiği görülmektedir. Çimentonun nano-Fe₂O₃ partikülleri ile kısmen değiştirilmesinin betonun basınç dayanımını arttırdığı, ancak işlenebilirliğini azalttığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle süper akışkanlaştırıcı kullanımı önemlidir [109].

Ali Nazari ve diğ. (2010c) yaptıkları çalışmada çimentonun yerine ortalama çapı 15 nm olan ağırlıkça %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 gibi farklı oranlarda nano-Fe₂O₃ partikülleri ikame edilmesiyle betonun priz süresi, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı incelenmiştir. Sonuçlar, maksimum %2,0 oranına kadar nano-Fe₂O₃ partikülleri kullanılan betonun, nano-Fe₂O₃ partikülleri olmayan betona kıyasla daha yüksek yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. 7., 28. ve 90. gün çekme ve eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında %1,0 nano-Fe₂O₃ partikülleri ikamesiyle en yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, yarmada çekme ve eğilme dayanımı iğne tipi nanopartikülleri gibi daha uygun nano malzeme kullanılarak geliştirilebilir [110].

Metaxa ve diğ. (2011) tarafından çimento esaslı malzemelerin düşük gerilme dayanımını, sertliğini ve tokluğunu geliştirmeyi amaçlayan çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışma,

nano ve mikro ölçekte güçlendirilmiş çimento matrisin tüm bu özelliklerin büyük ölçüde iyileştirilebileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Güçlendirme olarak karbon nanofiberler (CNF) ve polivinil alkol (PVA) mikrofiberler kullanılmıştır. Nanokompozitlerin mekanik özellikleri kırılma mekaniği üç noktalı eğilme testi ile incelenmiştir. Nanokompozit numunelerin mikro yapısı ve morfolojisi, ultra yüksek çözünürlüklü bir tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Karbon nanofiberlerin, PVA mikrofiberlerin her ikisinde de çimento matrisinde w/c (su/çimento) 0,5 oranı uygulanmıştır. Üç noktalı eğilme testleri, ağırlıkça %0,048 gibi düşük bir konsantrasyonda CNF'lerin araştırmada kullanılan test koşulları altında, eğilme dayanımını ve Young modülünü sırasıyla %40 ve %75'e çıkarmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Matrisin mekanik özelliklerindeki bu iyileştirmeler, CNF'ler ve çimento hidrasyon ürünleri arasındaki iyi bağlanma ve ayrıca CNF'lerin gözenekleri birleştirerek nano ölçekte çatlamayı kontrol ettiği görülmektedir. PVA mikrofiberlerin dahil edilmesi, çimento hamurunun son derece sünek bir davranış göstermesine neden olmuştur. SEM görüntüleri PVA mikrofiberlerin çimento matrisi ile çok iyi bir bağa sahip olduğunu göstermiştir. Tüm CNF ve PVA mikrofiberlerin dahil edilmesi, tek başına güçlendirilmiş kompozitlere veya ham çimento hamuruna kıyasla daha güçlü ve sert bir kompozit yapı elde edilmiştir. Sonuçlar, nanofiberlerin ve mikrofiberlerin eklenmesinin, çimentolu matrisin eğilme dayanımını %50'ye kadar, Young modülünün %84'e kadar ve tokluğunu 33 katına (%3,351) kadar iyileştirdiği bulunmuştur [111].

N. Abdoli Yazdi ve diğ. (2011) çalışmalarında, çimento harcına, çimento ağırlığının %1, 3 ve 5'i oranında Fe_2O_3 nanopartikülleri ikamesiyle basınç ve çekme dayanımı üzerine araştırmalar yapmıştır. Sonuçlar %1 ve %3 Fe_2O_3 nanopartikülleri içeren numunelerin mekanik özelliklerinin, nano malzeme içermeyen çimento numunelerinden yüksek olduğu, fakat %5 Fe_2O_3 nanopartikülleri içeren numunenin ise, nano malzeme içermeyen çimento numunelerinden düşük olduğu görülmektedir. Nanopartiküller içeren ve içermeyen çimento harcının mikro yapısı hakkındaki SEM çalışması sonucunda, Fe_2O_3 nanopartiküllerinin gözenekleri tamamen doldurduğunu ve $Ca(OH)_2$ 'nin büyük kristallerini azalttığını ve hidrasyon ürünlerinin daha yoğun ve kompakt olduğunu göstermiştir.

Çekme ve basınç dayanımının deneysel sonuçlara göre, ağırlıkça %3'e kadar çimentoya Fe_2O_3 nanopartikülleri eklenmesinin, çimentonun mikro yapısını güçlendirmek için bir dolgu maddesi olarak işlev görmesi ve ayrıca $Ca(OH)_2$ 'nin kristal miktarını ve boyutunu azaltması beklenir. Fe_2O_3 nanopartikülleri dolgu malzemesi olarak CSH jel yapısında

bulunan boşluklarını doldurarak hidratlaşmış ürünün yapısı sıkıştırılır ve daha yoğun bir yapı meydana getirir. Nanopartikül miktarının %5'e kadar artması ile nanopartikül mesafesinde azalma olur ve sınırlı alan nedeniyle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristali uygun boyuta ulaşamaz. Bu faktör, topaklanmış nanopartikülleri birlikte, %5 Fe_2O_3 nanopartiküllü numunenin mekanik özelliklerinin çimento harcı örneğinden daha düşük olmasına neden olur [112].

Li ve diğ. (2011) Dünya genelinde beton yapılarda dayanıklılık eksikliği hızlı ve dayanıklı onarımlar gerektirir. Bu ihtiyaca cevap vermek için, son zamanlarda minimum operasyon kesintisinin istendiği beton onarım uygulamaları için polivinil alkol (PVA) lif ile güçlendirilmiş yüksek erken dayanımlı tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (HES-ECC) geliştirilmiştir. HES-ECC'nin farklı yaşlardaki basınç, çekme, eğilme dayanımı ve büzülme özelliklerinin ayrıntılı karakterizasyonu bu makalede araştırılmıştır. Bu çalışma, HES-ECC için minimum çalışma kesintisi ve uzun süreli dayanıklılık ile beton yapıların hızlı ve dayanıklı bir şekilde onarımı için tasarlanmış mekanik ve büzülme özelliklerinin ayrıntılı bir veri tabanını sağlamıştır.

HES-ECC ve Tip III portland çimentosuyla yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkmıştır:

1. Erken yaşta yüksek basınç, eğilme ve çekme dayanımı;
2. Geç yaş yüksek basınç, eğilme ve çekme dayanımı;
3. Kontrollü mikro çatlak genişliğine sahip büyük gerilme sünekliği;
4. Nispeten düşük bir Young modülü;
5. Büzülmeye bağlı makro-kırılmaya karşı önemli bir direnç.

4 saatte $23,59 \pm 1,40$ MPa ve 28 günde $55,59 \pm 2,17$ MPa gibi erken yaşta yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Eğilme dayanımı, 4 saatte $9,81 \pm 0,24$ MPa ve 28 günde $15,08 \pm 0,34$ MPa bu benzer basınç dayanımına sahip betonun eğilme dayanımının iki katına ulaşmıştır. Çekme dayanımı 4 saatte $3,46 \pm 0,08$ MPa ve 28 günde $5,68 \pm 0,14$ MPa HES-ECC'deki hızlı mukavemet gelişimi, tamir edilen beton yapının onarım inşaatından 4 ila 6 saat sonra hizmete geri dönmesini sağlar. Tek eksenli gerilme altında, HES-ECC, gerilme kapasitesi %2,5'dan büyük çekme gerilme davranışı gösterir. HES-ECC'nin benzersiz çatlama davranışı ve gerilme sünekliği, HES-ECC onarımlarının uzun süreli dayanıklılığını

sağlamak için çok önemlidir. 4 saat içerisinde 21 Mpa basınç dayanımı, %2,5'in üzerinde çekme gerilme kapasitesi ve çok iyi süneklik özelliği göstermiştir [65].

Ali Khoshakhlagh ve diğ. (2012) çalışmalarında, farklı miktarlarda Fe_2O_3 nanopartikülleri içeren yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) su emme katsayısı ile birlikte basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı araştırılmıştır. Numunelerin mukavemeti ve su geçirgenliği, çimento hamuruna ağırlıkça %4,0'e kadar Fe_2O_3 nanopartikülleri ilave edilerek geliştirilmiştir. Yabancı bir çekirdekleşme bölgesi olarak Fe_2O_3 nanopartikülleri özellikle hidrasyonun erken yaşlarında $Ca(OH)_2$ artan kristal miktarının bir sonucu olarak C-S-H jel oluşumunu hızlandırabilir ve böylece numunelerin mukavemetini artırabilir. Fe_2O_3 nanopartikülleri nano-dolgu maddesi olarak hareket edebilir ve su geçirgenliğini azaltarak numunelerin gözenek yapısını daha dolgun hale getirebilir. Belirli bir kürlenme yaşında basınç dayanımı vasıtasıyla numunelerin eğilme ve yarmada çekme dayanımını tahmin etmek için birkaç ampirik ilişki sunulmuştur. Isı iletim testlerinde hızlandırılmış tepe görünümü, termogravimetrik analizde daha fazla kilo kaybı ve X ışını kırınım sonuçlarında hidratlı ürünlerle ilgili piklerin daha hızlı ortaya çıkması, ağırlıkça %4,0'e kadar Fe_2O_3 nanopartikülleri numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Çalışmadaki diğer deney sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

1. Fe_2O_3 nanopartikülleri içeriği ağırlıkça %4,0'e kadar arttıkça, KYB numunelerinin basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımını artar. Bu dayanım artışlarının nedeni; Fe_2O_3 nanopartiküllerinin artmasıyla daha fazla hidratlı ürün oluşumundan kaynaklanmaktadır.
2. Fe_2O_3 nanopartikülleri nano dolgu olarak hareket eder. 7 ve 28 günlük kürlerde betonun su geçirgenliğine karşı direnci artırır. 2 günlük kürlenme sırasında, numuneler hidratlaşmış ürünlerin hızlı oluşumu için daha fazla suya ihtiyaç duyduklarından, nanopartiküllerin içeriği ağırlıkça %4,0'e kadar arttırılarak su emme katsayısı artar.
3. Ağırlıkça %4,0'e kadar Fe_2O_3 nanopartikülleri, hidratlı çimento ürünlerinin oluşumundaki hızlanma ile ilgili olan ısı iletim testlerinde tepe görünümünü hızlandırabilir.
4. Termogravimetrik analiz, Fe_2O_3 nanopartikülleri kısmen çimento hamuruna ağırlıkça %4,0'e kadar ilave edildiğinde örneklerin ağırlık kaybını arttırabildiğini göstermektedir.

XRD sonuçları ile karşılaştırılan Fe_2O_3 nanopartikülleri hidratlı ürünlerin daha hızlı oluşumu, daha fazla kilo kaybının nedeni olabilir.

5. Fe_2O_3 nanopartikülleri içeren kendiliğinden yerleşen betonun boşluk yapısı iyileştirilir ve tüm mezo ve makro gözenekler doldurulur [113].

Farzad Soleymani (2012) Doymuş kireç suyunda kür edilen nano- SiO_2 karıştırılarak çimentolu esaslı kompozitin basınç dayanımı incelenmiştir. Çimentonun hamurunda ağırlıkça çimentoya %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranında SiO_2 nanopartikülleri ikame edilmiştir. Çimento hamurunun mukavemetini belirlemek için örnekler 7, 28 ve 90 gün boyunca iki farklı ortamda (su ve doymuş kireç suyu) kür edilmiştir. Sonuçlar, SiO_2 nanopartiküllerinin betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Doymuş kireçli su içinde 28 gün ve daha sonra 90 güne kadar suda kür edilen, sadece suda veya 90 gün boyunca doymuş kireçli suda kür edilmiş olan daha kuvvetli çimentolu esaslı kompozit malzeme elde edilmiştir. Numuneler kür edilmiş kireç suyunun 28 gün sonra oluşan fazla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri, 90 güne kadar oluşan C-S-H jellerinin etkisini azaltır ve bu nedenle numunelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Öte yandan, numunelerin 28 gün sonra su içinde kür edilmesi daha fazla C-S-H jeli üretir ve daha yüksek mukavemetli çimentolu esaslı kompozit malzeme meydana gelir [114].

Sonuçlar, nano- SiO_2 partikülleri ikame edilen betonun, nano- SiO_2 partikülleri olmayan betona kıyasla önemli ölçüde daha yüksek mukavemete (basınç, yarmada çekme ve basınç dayanımını) sahip olduğunu göstermektedir. Çimentoların, numuneler 28 gün boyunca doymuş kireçte kür edildiğinde, %2,0'lık maksimum limite kadar olan nano- SiO_2 partikülleri ile ortalama 15 nm'lik partikül büyüklükleri ile değiştirilebileceği bulunmuştur. Optimum nano- SiO_2 partikül içeriği, 7, 28 ve 90. günde kür edilmiş deneyler sonucunda %1,0 ikame ile elde edilmiştir. Nanopartiküllerle karıştırılmış betonun optimize edilmiş mukavemeti, ağırlıkça %2,0 çimentonun SiO_2 nanopartikülleriyle kısmi olarak değiştirilmesi ile elde edilmiştir. 28 gün boyunca doymuş kireçli su içinde ve sonra da su içinde 90 güne kadar kür edildi [114].

Kurapatı Sırınvas (2014) Çalışmada nanoteknolojinin çimento esaslı malzemelerde uygulanmasına yönelik mekanik özelliklerin kaplanması ya da arttırılması ile ilgili inceleme yapmıştır. Nano partiküllerin dahil edilmesinin, çimento esaslı malzemelerin tokluğunu, kayma, çekme ve eğilme dayanımını arttıracağı gözlenmiştir. Çimento beton endüstrilerinde

yaygın olarak kullanılan nanopartiküllerin bazıları Titanyumdioksit (TiO_2), Nanosilika (SiO_2), Alümina (Al_2O_3), Zirkonyum (ZrO_2), Karbonnanotüp (CNT) nanokil vb. Günümüzde, çimento ve betonla ilgili en aktif araştırma alanları şunlardır: çimento parçacıklarının hidrasyonunun anlaşılması ve alümina ve silika partikülleri gibi nano boyutlu bileşenlerin kullanımı. Ayrıca nano çimentonun mukavemetini tayin etmek için uygulanan basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımını gibi genel deneysel yöntemler ve nano çimentonun porozite, asit direnci ve kendi kendini iyileştirme özellikleri üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma, nano çimento teknolojisi alanında çalışmak isteyenler için çok faydalı olacaktır. Çimentolu malzemelerle çeşitli oksitli nanopartiküllerinin rolü ve mekanizması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yazarların çoğu, nano partiküllerin dahil edilmesinin beton içinde daha homojen ve kompakt bir mikroyapı sağlayacağı sonucuna varmıştır. Nano partiküller içeren betonun basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi birkaç araştırmacı tarafından gözden geçirilmiştir [115].

Araştırmacılara göre, inşaat endüstrisinin nano teknolojiden yararlanabileceği alanların listesi aşağıdadır.

1. Çelik kabloların asma köprüler ve kablo askılı köprülerdeki çok daha güçlü karbon nanotüplerle değiştirilmesi,
2. Yoğun çimento esaslı kompozit malzemeler üretmek için nano-silika kullanımı,
3. Karlı alanlarda beton yollara dirençli karbon nanofiberlerin dahil edilmesi,
4. Fotokatalitik beton üretmek için nano-titanyumun dahil edilmesi,
5. Yapıları çevredeki agresif elementlerden korumak için sızdırmazlık maddelerinde nano kalsit partiküllerinin kullanılması,
6. Nano killerin betonda esnekliği ve akış kabiliyetini arttırmak için kullanılması,
7. Sivil yapılarda nano titanyum kullanımı artarsa kentlerde hava kirliliği azalabilir.

Her ne kadar çeşitli çalışmalar rapor edilmiş olsada, malzemelerin Model-Yapı-İşlevi üzerinde çimento veya betonda kullanılması amaçlandığı için açık bir mekanizma yoktur. Nano partiküllerin diğer çimentolu malzemelerle birleştirildiğinde yüksek yüzey/hacim oranı, stabilitesi ve yapısal aydınlatılması açısından değerlendirilmesine dayanan daha ileri çalışmaların ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir [115].

D. Nivethitha, ve diğ. (2014) çimento harcı; çimento ve belirli miktarda su ile bir dizi ince agrega karıştırılarak üretilen bir yapı kompozitidir. Harç, tuğlaların üzerine sıva veya kagir, yığma yapı duvar biçimleri gibi bir dizi uygulama için kullanılabilir. Çimento harcı düşük mukavemete ve dayanıklılığa sahiptir, bu nedenle kimya endüstrileri, açık deniz yapıları, enerji santralleri vb. agresif ortamlar için verimli bir şekilde kullanılmaz. Çimento, harç üretiminin başlıca bileşenidir. Küresel ısınmanın başlıca sorunu çimento üretimi boyunca CO₂ emisyonudur. Yukarıdaki eksikliklerin üstesinden gelmek için nanopartiküller eklenir. Nanopartikülleri çimento esaslı yapı malzemesi ile birleştirilirse, yeni malzeme bazı olağanüstü özelliklere sahip olabilir. Nano ölçekli partiküller çimento harcı veya betona entegre edildiğinde, farklı özelliklere sahip ürünler oluşturulacaktır. Nanopartiküller, yüksek aktiviteleri nedeniyle çimento hidrasyonunu hızlandırabilir ve ayrıca mikro yapıyı sıkıştırarak bir nano dolgu maddesi görevi görür ve sonuç olarak dayanımı ve dayanıklılığı artırır. Betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını arttırabilen nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-Al₂O₃, nano-CuO, nano-TiO₂, vb. tasarlanmış nano malzemeleri (ENM) tanıtarak, beton ve harcın mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını arttırabilen nano yapıları atık malzemeler.

Harçta bir katkı maddesi olarak nanopartiküller üzerinde yapılan bir dizi araştırmada, elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir,

1. Nano silika ve nano silika dumanının eklenmesi mekanik özellikleri artırır ve priz başlangıç ve bitiş süresini azaltır.
2. Çimento ağırlığının %1,0 ve %3,0 miktarında ikame edilen nano-Fe₂O₃, harcın basınç, eğilme ve darbe dayanımını artırır.
3. Nano kil, yüksek performanslı harcın mekanik ve dayanıklılığını artırabilir.
4. Öğütülmüş atık cam tozu, pirinç kabuğu külü gibi nano yapıları atık maddeler de harcın mekanik, termal ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir.
5. Karışık NS, NA ve NF basınç dayanımını ve dayanıklılığını artırabilir.
6. Nanopartiküller ayrıca harcın boşluklarını ve geçirgenliğini azaltabilen bir dolgu malzemesi olarak da işlev görebilir.
7. Nanopartiküller ayrıca hidrasyon sürecini iyileştirir ve harcın sertleşme süresini azaltır. Nanopartikül eklenmesi kısa ve uzun vadede dayanımı artırır.
8. Çimento fırın tozu, cam tozu ve bakır cürufu gibi nano yapıları atık maddeler basınç dayanımını artırır, gözenekliliği ve büzülme azaltır [116].

Gholam Reza Khayati ve diğ. (2015) nanoteknolojinin gelişimi malzemelere ileri özellikler sağlar. Çimento hamurunun performansını artırmak için oksit nanopartikülleri hamura dahil etmek hızlı büyüyen bir araştırma alanıdır. Bu makalenin amacı, oksit nanopartiküllerin (SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 gibi) sertleştirilmiş beton özelliklerinin üzerine etkilerini (basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı, su geçirgenliği, aşınmaya karşı direnç ve betonun gözenek yapısı) gözden geçirmektir. Taze beton özellikleri (yani işlenebilirlik ve priz süresi). Tüm bu parametrelerin grafiksel gösterimleri, oksit nanopartiküllerin beton işleme üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için sunulmuştur. Oksit nanopartiküllerin taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması ve sınıflandırılması araştırılmıştır. Bu çalışmada, oksit nanopartiküllerin beton işleme üzerindeki etkisi konusunda hala yapılması gereken çok iş vardır.

Ayrıca bu çalışmada şunlar gözlemlenmiştir.

1. SiO_2 nanopartikülleri, betonun basınç dayanımı ve aşınma direncinde en etkili olanıdır.
2. SiO_2 , Al_2O_3 ve bazı durumlarda Fe_2O_3 nanopartikülleri, betonun yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımı üzerinde en etkili nanopartiküllerdir.
3. Suda kür edilen örneklerin dayanımını karşılaştırarak, belirli bir yüzdeye kadar oksit nanopartiküllerin varlığının dayanımı artıracağı ve sonra azaldığı sonucuna varılabilir. Bu, karışımda bulunan oksit nanopartiküllerin miktarının, hidrasyon işlemi sırasında açığa çıkan kireç ile birleştirilmesi için gereken miktardan daha yüksek olduğu gerçeğiyle ilişkili olabilir. Ayrıca, zayıf bölgelere neden olan oksit nanopartiküllerin dağılımında oluşan kusurlarla da ilişkilendirilebilir.
4. Su emilimi Fe_2O_3 ve Cr_2O_3 nanopartikülleri tarafından diğerlerinden daha etkilidir.
5. ZnO_2 ve Cr_2O_3 nanopartiküllerin geçirimsizlik üzerindeki etkileri diğer oksit nanopartiküllerden daha yüksektir.
6. Cr_2O_3 nanopartiküllerinin çökme üzerindeki etkisi diğer oksit nanopartiküllerden daha fazladır.
7. SiO_2 nanopartiküller priz süresini Al_2O_3 nanopartiküllerden daha fazla azaltır. Dolayısıyla, SiO_2 nanopartiküllerinin kullanımının Al_2O_3 'ten daha iyi olduğu görülmektedir.

8. Beton üretiminde nanopartiküllerin kullanılması betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde artırabilir.

Bu etkiler kireçtaşı varlığında daha ciddidir. Günümüzde, araştırma çalışmalarının çoğu SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 gibi değerli oksit nanopartiküllerin ayrı ayrı uygulanması üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer nanopartiküllerin uygulanması veya iki veya daha fazla tipteki karışımın çalışmalarının daha fazla yapılması gerekmektedir [117].

Venkat ve diğ. (2015) Nanoteknolojinin bu yüzyılda etkili teknolojilerden biri olduğu bilinmektedir, inşaat mühendisliği alanında, nanoteknolojinin önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle inşaat sektörünün daha fazla malzeme ve enerji kaynağına ihtiyacı vardır. İnşaatla kullanılan tüm malzemelerin hacim açısından yaklaşık %70'ini beton oluşturur ve önemli bir etkiye sahiptir. Nanoteknolojinin ortaya çıkışı, geleneksel malzemelerden daha güçlü ve dayanıklı malzeme üretilmesine yardımcı olmaktadır. Nanolaştırılmış malzemelerin betonda kullanılmasının temel amacı, erken yaşlarda basınç ve eğilme dayanımlarını arttırmaktır. Yüksek yüzey alanı sayesinde betonun boşluk yapısının iyileştireceği düşünülmektedir. Nano malzemeler, çimentolu esaslı malzemelere kıyasla daha az su emdiklerinden beton içerisindeki boşluk azalır ve betondaki çimento miktarını geleneksel betona göre azalır. Bu, mukavemet özelliklerinden ödün vermeden elde edilebilir, böylece yeşil beton adı verilen çevre dostu beton üretmek mümkündür. Bu makale nanoteknolojinin inşaat mühendisliğinde nasıl kullanıldığını ve çeşitli nano malzemeler üzerindeki etkilerini gözden geçirmeye çalışmaktadır.

Nanoteknolojinin gelişimi İnşaat mühendisliği alanında da önemli bir etkiye sahiptir. İnşaat mühendisliği çoğunlukla beton, çelik, cam ve ahşap yapı malzemeleri ile ilgili olduğundan varlığı çok önemlidir. Nanoteknoloji, mükemmel mühendislik özelliklerine sahip en etkili malzemelerin oluşturulmasına yardımcı olmuştur. Nanoteknolojinin kendi kendini temizleme ve kendi kendini onaran betonların üretilmesine sağlaması sebebiyle yapıların bakım maliyeti önemli ölçüde azalmıştır. Nanoteknoloji ayrıca yangına dayanıklılık ve korozyon önleyici özellikler sağlayarak malzemelerin dayanıklılığını artırmaya yardımcı olmuştur. Nanoteknolojiden yapılan malzemeler aynı zamanda yapıların hizmet süresini uzatmaktadır. Nanoteknoloji uygulamasıyla inşaat sektöründe bir paradigma başlamıştır ve bu teknoloji inşaat sektörünü tamamen değiştirecektir. Nanoteknoloji, teknoloji ve iş kollarında büyük bir pazar potansiyeli ve ekonomik etkiye sahip olduğu için teknoloji ve iş

dünyasında doğru kullanılırsa, teknoloji ve iş dünyasında üzerinde büyük bir etki yaratacaktır [118].

Rahmat Madandoust ve diğ. (2015) nanoteknoloji; son yirmi yılda hem modern bilim hem de faydalı uygulamalara sahip kendini geliştiren en aktif araştırma alanlarından biridir. Nanopartiküller, İnşaat Mühendisliği alanında geleceğin muhtemel malzemelerdir. Bu çalışmada, nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ ve nano-CuO içeren kendiliğinden yerleşen harcın (KYH) dayanıklılık özellikleri, ham çimento harcıyla deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, portland çimentosuna kısmen ağırlıkça %25 uçucu kül ve üç farklı nanopartikül ağırlıkça %5'e kadar ikame edilmiştir. Su/bağlayıcı oranı ve çimentolu malzeme muhtevası sabit kabul edilmiştir. KYH'lerin taze özellikleri yayılma zamanı ve çapı ve V-hunisi deneyleri yapıldı, 3., 7., 28. ve 90. gün sonuçlarına bakılarak mekanik özellikler; basınç ve eğilme dayanımı, su emme, elektriksel direnç ve hızlı klorür geçirgenliği testi ile değerlendirilmiştir. Harçların mikro yapısı da taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile değerlendirilmiştir. İşlenebilirliğin hafifçe arttığı ve ayrıca nanopartiküllerin KYH örneklerinin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirebileceği gözlenmiştir. SEM mikrografları, nanopartiküller içeren harçların KYH numunelerinin mukavemetinde ve dayanıklılığında artışa yol açan daha dolgun gözenek yapısını göstermektedir.

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir:

1. Nanopartiküllerin eklenmesi harçları daha vizkos hale getirerek, farklı nanopartiküllerin ilavesiyle numunelerin reolojik özellikleri biraz değişmiştir.
2. Numunelerin basınç dayanımı, ağırlıkça %4'e kadar NS, ağırlıkça %2 NF ve ağırlıkça %3 NC kullanılarak artırılır ve daha sonra azaltılır.
3. Örneklerin su emilimi, nanopartikül içeriği artırılarak azaltılır.
4. Elektriksel direnç sonuçları nanopartiküllerin eklenmesiyle önemli bir artış göstermiştir.
5. Klorür geçirgenlik değerleri NS, NF ve NC ilavesiyle sırasıyla %60, %44 ve %44 azalmıştır.
6. SEM mikrograflarına göre, KYH karışımlarının mekanik, dayanıklılık ve mikroyapısal özelliklerini geliştirebilen nanopartiküllerin eklenmesiyle daha küçük gözenekler elde edilmiştir [119].

M. Jemimah Carmichae ve diğ. (2017) nanoteknoloji; uygun özelliklerin elde edilmesi için nano boyutlu malzemelerin benzersiz özelliklerinden yararlanma isteği nedeniyle birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Nanopartiküllerin tane büyüklüğü 10^{-9} m (1-100 nm). Nano malzemeler, nanopartiküllerin eklendiği kompozitlerin tüm özelliklerini değiştirebilir. Nanopartiküller, betona eklendiğinde uygun özelliklere sahip daha güçlü, daha dayanıklı benzersiz özellikler sergiler. Beton üretimi sırasında nano malzemelerin eklenmesi betonun mukavemetinde ve ömründe önemli iyileşmelere yol açabilir. Çimento ve betonla ilgili aktif araştırma alanlarından biri, nanopartiküller içeren betonun mukavemeti ve dayanıklılığıdır. Nano çimento içeren betonun dayanımı ve geçirgenliği üzerine deneysel bir araştırma yapılmaya çalışılmıştır. Plazma kemer, kimyasal buhar biriktirme, elektro biriktirme, sol-jel sentezi, yüksek yoğunluklu bilyalı öğütme vb. literatürde nano düzeyli malzemeleri sentezlemek için bildirilen yöntemlerden bazılarıdır. Nano çimento, yüksek enerjili bilyalı öğütme değirmeni kullanılarak piyasada bulunan 53 dereceli portland çimentosunun öğütülmesi ile yapılmıştır. Üretilen nano çimentonun partikül boyutunu belirlemek için bir taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Farklı beton çeşitleri, M20, M30, M40 ve M50 dökülmüştür. Her beton sınıfı için çimento yerine %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında nano partiküller ikame edildi. Betonun basınç dayanımı ve geçirgenliğini bulmak için beton üzerinde testler yapılmıştır. Nano-çimento ilavesiyle geçirimsizliğin azaldığı bulunmuştur. Nano malzemeler içeren betonun basınç dayanımının normal çimento içeren betondan daha fazla olduğu bulunmuştur.

Çimento hamuruna nano çimento eklenmesinin betonun mukavemeti ve geçirgenliği üzerindeki etkisini bulmak için çalışma yapılmıştır. Çimentonun nano çimento ile değiştirilmesinin mukavemeti arttırdığı ve geçirgenlik değerlerini azalttığı bulunmuştur. Mukavemet artışı, tüm beton çeşitleri için neredeyse doğrusaldır. Yüzde değişimi ile mukavemet arasındaki korelasyon katsayısı 1,0'a çok yakındır, bu da çok güçlü bir pozitif korelasyon gösterir. Yüzde değiştirme ve geçirgenlik değerleri arasındaki korelasyon katsayısı da -1'e çok yakındır, bu da yüzde değiştirme ve geçirgenlik değerleri arasında çok güçlü bir negatif korelasyon gösterir [120].

Manish A Kewalramani ve diğ. (2019) sürdürülebilir inşaatın gelişmesi ve son on yılın yeşil bina hareketi, dünya genelinde yapı malzemeleri ve inşaat uygulamalarının kapsamlı bir şekilde araştırılmasını teşvik etmiştir. Üstün yangına dayanıklılık, mukavemet ve uzun hizmet ömrü ile beton, dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Çeşitli inşaat işleri

için gerekli olan beton miktarı göz önüne alındığında hem beton üretimi hem de karışım tasarımı açısından betonun sürdürülebilirliğinin artırılması oldukça önemlidir. Son zamanlarda nanoteknoloji, enerji tasarrufu ve yenilenemeyen kaynaklara daha az bağımlı olmanın yanı sıra atık, toksisite ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi çevresel iyileştirmeler açısından umut verici bir alandır. Nanoteknoloji, nano malzemeleri kullanarak mevcut beton ürünlerinin geliştirilmesine izin verir; bu nano malzemeler çimento esaslı malzeme matrisinde nanopartiküllerinin, nanokimyasal katkı maddeleri ve nanolifler formunda olabilir. Nanomalzemelerin kullanımı, daha düşük çimento hacmine sahip beton üretimi ile sonuçlanır. Nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nano killer ve yüksek oranda dağılmış karbon nanotüpler gibi çeşitli nanopartiküllerin eklenmesinin etkisi betonda bu atık malzemelerin bir bileşeni olarak 'Yeşil Beton'a yönelik bir girişim ile mevcut çalışmada ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır [121].

Joshaghani Alireza ve diğ. (2020) çalışmanın amacı kendiliğinden yerleşen betona (KYB) farklı nanopartiküllerin etkilerini değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. Nano-TiO₂, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃'ün KYB'nin taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini farklı deneyler gerçekleştirerek etkisi araştırılmıştır. TiO₂, Al₂O₃ ve ortalama çapı 18, 15 ve 14 nm olan Fe₂O₃ nanopartikülleri çimentoya iki farklı ikame oranı ile ağırlıkça %3,0 ve %5,0 oranında eklenmiştir. KYB'nin taze özelliklerini değerlendirmek için, yayılma deneyi, V hunisi, L kutusu ve sütun segregasyon testleri yapılmıştır. Mekanik özellikler için basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri açısından hızlı klorür iyon geçirimsizliği testi, elektriksel direnç, hızlı klorür penetrasyonu ve su penetrasyon derinliği testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç, karışımların işlenebilirlik özelliklerinin %3 eklemeye biraz arttığını göstermektedir. Bu değerin %5'e çıkarılması nanopartiküllerin işlenebilirliğini düşürmüştür. Yüksek oranlarda nanopartiküllerin karışımlara eklenmesi KYB'nin su ihtiyacını artırarak işlenebilirliğin azalmasına neden olmuştur.

Yüksek yüzey alanları nedeniyle, nanopartiküller gözenekliliği azaltarak, su nüfuz derinliğinin azalmasına yol açar. En düşük su penetrasyon derinliği nano-Fe₂O₃ parçacıkları içeren karışımlarda gözlenmiştir. Nano-TiO₂ parçacıklarının karışıma dahil edilmesi su penetrasyon derinliğini azaltsada, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃ parçacıklarıyla karşılaştırıldığında sıkıştırma üzerinde daha düşük bir etkiye sahiptir. Karışıma nanopartiküllerin eklenmesinin, yalnızca KYB'nin mekanik özelliklerinin artırılmasına katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda KYB'nin dayanıklılık özelliklerinde de önemli

gelişmelere yol açtığını göstermektedir. Bu nedenle, TiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi nanopartiküllerin kullanımı, KYB'nin performansını artırma konusunda oldukça umut verici görülmektedir [122].





3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada mikro silis kumu, çimento (CEM-I 52,5 R), su, lif (PVA), nano malzemeler ($n\text{SiO}_2$ ve $n\text{Fe}_2\text{O}_3$), F ve C sınıfı uçucu kül ve kimyasal katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı) belirli oranlarda kullanılarak üretilen kompozit tamir harcıdır.

3.1.1. Çimento ve Silis kumu (Agrega)

Araştırmada ÇİMSA üretimi çimento ve Pomza Export Madencilik ve Ticaret A.Ş.'den alınan 0-400 μm boyutunda silis kumu kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan çimento ve kumun üretici firmalardan temin edilen teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento ve mikro silis kumunun teknik özellikleri [123,124]

Kimyasal Bileşim			Fiziksel ve Mekanik Özellikleri		
Oksitler (%)	CEM I 52.5 R	Mikro silis kumu		CEM I 52.5 R	Mikro silis kumu
SiO_2	21,6	99,31	Yoğunluk (kg/m^3)	3,06	2,65
Al_2O_3	4,05	0,29	Hacim Genleşmesi(mm)	1,0	-
Fe_2O_3	0,26	0,05	Blaine İnceliği(cm^2/g)	4600	-
CaO	65,7	0,05	Priz başlangacı (dak)	100	-
MgO	1,30	-	Priz sonu (dak)	130	-
SO_3	3,50		0,045 mm elekte kalan(%)	1,0	-
Na_2O	0,30	-	0,0090 mm elekte kalan(%)	1,3	-
K_2O	0,35	0,02	2 günlük basınç dayanımı (MPa)	37	-
Serbest Kireç	2,20	-	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	50	-
Kızdırma Kaybı	3,50	0,09	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	80	-

3.1.2. Uçucu küller

Araştırmada F ve C sınıfı küllerin yüksek ve düşük kireçli olanları tercih edilerek seçilmiştir. Tunçbilek Termik Santralinden temin edilen reaktif kireç miktarı %10'un altında ve reaktif

silis miktarı %25'in üzerinde (%39,26) olan TS EN 197-1 [37] V sınıfı (silissi uçucu kül) UK şartlarını tamamen sağlamaktadır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ ve $\text{CaO} \leq 10$ olduğundan, ASTM C 618 [36] standardına göre F sınıfı (düşük kireçli) UK şartlarını sağlamaktadır. C sınıfı ve yüksek kireçli UK olarak Soma Termik Santralinden temin edilen reaktif kireç miktarı %10'un üzerinde ve reaktif silis miktarı %25'in üzerinde (%28,9) olan TS EN 197-1 [37] W sınıfı (kalkersi uçucu kül) UK şartlarını tamamen sağlamaktadır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ ve $\text{CaO} \geq 10$ olduğundan, ASTM C 618 [36] standardına göre C sınıfı (yüksek kireçli) UK şartlarını sağlamaktadır. F ve C sınıfı UK'ün her 2 termik santralden temin edilen kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. F ve C (UK)'ün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	UK sınıfı		Fiziksel Özellikler	UK sınıfı	
	C	F		C	F
SiO_2	39	58,09	Kızdırma Kaybı	1,31	0,61
Al_2O_3	19,24	19,66	Yoğunluk (kg/dm^3)	2,44	1,96
Fe_2O_3	4,38	9,77	Hacim Genleşmesi (mm)	3,0	1,0
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	62,62	87,52	Blaine İnceliği (cm^2/g)	2817	2680
CaO	28,45	2,51	Aktivite İndeksi 28 Günlük(%)	78	75,9
MgO	1,61	3,88			
SO_3	3,61	0,24	Aktivite İndeksi 90 Günlük (%)	89	88,9
Na_2O	0,34	1,07			
K_2O	1,21	1,68			
Cl^-	0,017	0,092			
Serbest CaO	0,7	0,13			
Reaktif SiO_2	28,9	39,26			
Reaktif CaO	24,16	-			
Toplam Alkali ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 * \text{K}_2\text{O}$)	1,136	2,18			

3.1.3. Karışım suyu

Karışımlarda kullanılan Ankara şebeke suyunun ASKİ'den alınan özellikleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ankara şebeke suyunun özellikleri

Parametreler	Birim	Analiz Sonucu	EPA Sınır Değerleri	TS266 Sınır Değerleri
Bulanıklık	NTU	0,2	5	5
Koku	-	Yok	Yok	Yok
Bakiye Klor	mg/L	0,6	0,8-1	-
İletkenlik $\gamma=25^{\circ}\text{C}$	mS/m	22,0	-	250
Amonyum	mg/L	<0,06	<1	0,5
Nitrit	mg/L	<0,006	1	0,5
Sülfat	mg/L	29,6	250	250
Demir	$\mu\text{g} / \text{L}$	3	200	200
Alüminyum	$\mu\text{g} / \text{L}$	9	200	200

3.1.4. Nano malzemeler

Araştırmada iki çeşit nano malzeme kullanılmıştır. Bunlardan birisi nSiO_2 (nSi) iken ikincisi ise nFe_2O_3 (nFe)’belirli oranda kullanılmıştır. Her 2 nano malzemenin teknik özellikleri tedarikçi firma olan Nanografi’den temin edilmiştir.

Çizelge 3.4. Nano malzemelerin teknik özellikleri

Fiziksel Özellikler			
Özellikler	nSiO ₂ (nSi)	nFe ₂ O ₃ (nFe)	
Safılık (%)	99,5	99,6	
Ortalama Tanecik Boyutu (nm)	15-35	28	
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	150-550	>55	
Yapısı	Gözenekli	Küresel	
Renk	Beyaz	Kırmızı kahverengi	
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	2,2	5,4	
Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	<0,1	-	
Kimyasal Özellikler			
Ti (ppm)	0,012	Co(ppm)	0,004
Ca (ppm)	0,007	Ca (ppm)	0,007
Fe (ppm)	0,002	K(ppm)	0,03
Na (ppm)	0,003	Mn (ppm)	0,016
		Ni (ppm)	0,002
		Zn (ppm)	0,001

3.1.5. Polivinil alkol (PVA) lif

Çalışmada tamir harcının durabilitesini ve dayanımını artırmak için belirli boyutta PVA lifleri kullanılması tercih edilmiştir. Karışımda lif boyu ve lif oranı seçimi çok önemli olduğu için önceki çalışmalardan [1] faydalanılmıştır. Araştırmada kullanılan PVA liflerin teknik özellikleri tedarikçi firma olan Ekvator Kimya'dan temin edilmiş ve Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Polivinil Alkol (PVA) Lifin fiziksel ve kimyasal özellikleri [125]

Özellikler	Değerleri
Erime Sıcaklığı (°C)	160
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	150
Asit Etkisi	Sabit
Direnç (g/denier)	6,5-7,0
Young's Modülü (TS/E): (MPa)	3 000-3 500
Uzama(%)	20/25
Özgül Yoğunluk(g/cm ³)	0,91
Lif Uzunluğu (mm)	6
Renk	Saydam/Şeffaf
Yapısı	Yuvarlak
Tipi	Çok filamentli
Alkali Etkisi	Sabit
Nem Tutuculuğu	21°C'de %70 bağıl nem=< %0,10
Organik Çözücü	Yüksek sıcaklıkta klorür tarafından çözünür
Çimentoya Uyum	Çok yüksek

3.1.6. Kimyasal katkı maddesi

Harçlarda işlenebilirliği sağlamak, kısa sürede priz alıp dayanım kazanabilmesi için kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Genellikle harç karışımların ince (tane boyutu küçük) malzeme oranı arttıkça karışımın su gereksinimi artar, dolayısıyla su bağlayıcı oranı belirli sınırlar içinde olması için polikarboksilat esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (yüksek oranda su azaltıcı) kimyasal katkı maddesi ile optimum işlenebilirlik sağlanmıştır. Harcın kısa sürede prizini alması (sertleşmesi) için priz hızlandırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkı malzemelerin teknik özellikleri kimyasal katkı maddesi ambalajı üzerinden alınmış ve Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kimyasal katkı maddelerinin teknik özellikleri [126,127]

Özellikler	Süper Akışkanlaştırıcı	Priz Hızlandırıcı
Renk	Kahverengi	Kahverengi
Yoğunluk (g/cm ³) 20 °C	1,073	1,345
pH	4,10	5,85
Suda Çözünebilir Klor (%)	0,02	0,02
Katı Madde Miktarı (%)	35,56	41,72
Etkin Bileşen	Uygundur	Uygundur
Alkali Miktarı	<%5	<%5

3.2. Metot

Bu araştırma iki aşamalı bir çalışmadır. Birinci aşamada çimento, su, mikro silis kumu, PVA lifi, süper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı kimyasal bileşenlerin oranları veya miktarları sabit tutularak, değişken olarak F ve C sınıfı uçucu küllerin oranlarını mini yayılma çapına göre belirlemektir. UK oranı belirlendikten sonra değişken olarak kullanılan nano malzemeler toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %0,0, %0,05, %0,1, %0,15 ve %0,2 ilave edilerek doygunluk derecelerinin belirlenmiştir. Nano malzemeler için toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %2’de nano malzemenin su içinde dağılımında sıkıntı yaşanmıştır. Nano malzeme ile çalışmalarda en büyük sorun nano malzemelerin su içinde homojen süspansiyon oluşturmamasıdır. Ayrıca yapılan birçok çalışmada, karışım içerisindeki iyi bir süspansiyon dağılımı sağlanamaması basınç dayanımını olumsuz etkileyerek azalmaya neden olduğu saptanmıştır [128,129].

İkinci aşamada ise her bir UK sınıfı ve nano malzeme için saptanan doygunluk dereceleri esas karışımlarda nano malzemelerin her biri için sabit tutulmuştur. Ön deney dışındaki esas karışımlarda kullanılan UK_F oranı; %0, %50, %60 ve UK_C oranı %0, %30, %35’tir. Tüm karışımlarda nano malzeme ilave olarak kullanırken uçucu kül, çimento yerine ikame edilmiştir. Bu yüzdelerin eşit olarak kullanılmamasının sebebi yapılan deneme yayılma deneyleri sonucunda F ve C sınıfı uçucu küllerden aynı yayılma değerleri sırasıyla UK_F’de %50 oranında UK_C’de ise %30 oranında elde edilmiştir. Burada UK_F düşük kireçli küller genelde şekil olarak homojen mikroyapıya sahiptirler. Camsı faz karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler, senosfer ve plerosferlerden oluşurlar. UK_C yüksek kireçli küller ise küresel ve köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin birarada bulunduğu, homojen olmayan bir

mikroyapıya sahiptirler. Taneciklerin şekilleri düzensiz ve köşeli olması yanında ve tane büyüklüğü betonlarda karışım suyu ihtiyacını arttırdığı, aynı zamanda reolojik özelliklerine etki ettiği birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır [51,130,131].

Harç karışımında toplam bağlayıcı miktarı agrega olarak kullanılan 0-400 μm boyutundaki mikro silis kumunun 2,5 katı olarak belirlenmiştir. Yüksek oranda UK kullanılan harç numunelerinde erken ve ileriki yaş dayanımını iyileştirmek amacıyla, karışıma toplam bağlayıcı miktarının; %1,5'u kadar süper akışkanlaştırıcı(yüksek oranda su azaltıcı) ve %2'si kadar priz hızlandırıcı(sertleşmeyi hızlandırıcı) katkı malzemesi eklenmiştir. Su miktarını belirlemek için mini yayılma tablasında 24 cm'yi baz alınarak yapılan deneyler sonucunda S/Ç oranın 0,54 bulunmuştur. 6 mm boyutundaki PVA (polivinil alkol) liften m^3 'te 15 kg olarak kullanılmıştır.

3.2.1. UK_F ikameli nano malzemelerin doygunluk derecesi ön deneyle tayini

Çalışmada her karışım için 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımını belirlemek için 50 mm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Her bir karışımın tasarımının her yaşı için 3 adet numune hazırlanmıştır. UK_{F50} ikameli nSi'li karışımların doygunluk derecesi tayini; 1 m^3 'lük nano silikalı tasarıma ilişkin değerler Çizelge 3.7.'de görüldüğü gibi karışımda kullanılan malzemelerin birbirine oranı şeklinde verilmiştir.

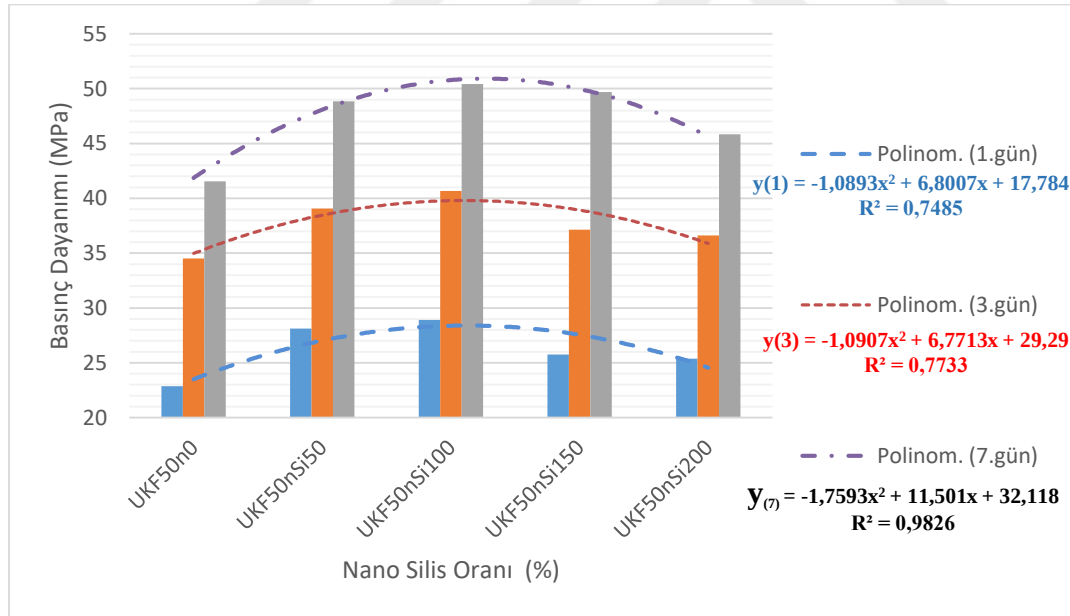
Çizelge 3.7. UK_{F50}'lü nSi'li karışımlardaki malzeme oranları

Malzemeler	UK _{F50} n ₀	UK _{F50} nSi ₅₀	UK _{F50} nSi ₁₀₀	UK _{F50} nSi ₁₅₀	UK _{F50} nSi ₂₀₀
nSi/B	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200
B/Kum	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Su/B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Su/Ç	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55
UK _F /Ç	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PH/B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PVA/B	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124
SA/B	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Kısaltmalar	Açıklamalar				
UK _{F50} n ₀	Kontrol betonu (%50 UK _F +%50 Çimento+XELAH50+%0 Nano malzeme)				
UK _{F50} nSi ₅₀	Yüksek performans amaçlı nano silikat katkılı kademeli arttırımlı karışım.				
UK _F	F sınıfı uçucu kül				
0,050	UK'nin toplam bağlayıcı içerisindeki oranı 0,050 arttırımlı olarak.				

Çizelge 3.7. (devam) UK_{F50}'lü nSi'li karışımlardaki malzeme oranları

Kısaltmalar	Açıklamalar
n	Nano
nSiO ₂	Nano silikat
50	Kullanılan nano malzeme %'si (50=0,005)
B	Bağlayıcı= (Çimento+UK _F +Nano malzeme+XELAH50)
PH	Priz hızlandırıcı
SA	Süper akışkanlaştırıcı
PVA	Polivinil alkol lif
S	Karışım suyu
Ç	Çimento

Çizelge 3.7.'de görüldüğü üzere nSi'li karışım tasarımında S/B=0,27, S/Ç=0,54, UK_F/Ç=1, B/Kum=2,5, PH/B=0,02 ve SA/B=0,015'tir. Doygunluk derecesi tayininde nSi/bağlayıcı oranı esas alınarak en yüksek basınç dayanımını sağlayan karışım en uygun doygunluk derecesi olarak alınmıştır. Bu nano malzeme ile yapılan doygunluk derecesinde nSi, karışımlarda çimento ağırlığının %0,5 oranında arttırarak %2'ye kadar eklenmiştir.

Şekil 3.1. UK_F nano silis oranı belirleme ön deney sonuçları

Şekil 3.1. incelenip analiz edildiğinde UK_F karışımlarının 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımı sonuçları sütun grafik olarak görülmektedir. Burada kontrol karışımın numune basınç dayanımları ile nSi ilaveli karışımlarda en yüksek basınç dayanımını birbiriyle karşılaştırılmış hangi oranda nSi etkisi doygunluk derecesini sağladığını saptamaktır.

UK_{F50}nSi₀ (kontrol) karışımı harç numunelerinin 1. günde 22,86 MPa, 3. günde 34,52 MPa ve 7. günde ise 41,54 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonrasında en yüksek basınç dayanımı UK_{F50}nSi₁₀₀ karışımında ise 1. günde 28,92 MPa, 3. günde 40,66 MPa ve 7. günde ise 50,43 MPa olarak görülmektedir. Bu karışımındaki bütün karışımların basınç dayanımları nSi oranı ilişkisi regresyon analizi (eğilim çizgisi)sinde 2.dereceden polinom olarak bulunmuştur. Bu ilişkinin kuvvetli bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu ilişkinin 1 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,9826$ ve diğer yaşlara göre daha kuvvetli, iken 3 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,7733$ olarak saptanırken 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise $R^2=0,7485$ olarak saptanmıştır ve ilişki zayıftır.

UK_F ikameli karışımlarının kontrol numune ile en yüksek basınç dayanımını veren UK_{F50}nSi₁₀₀ karışımının basınç dayanımlarında göre meydana gelen artış oranları 1. gün %26,5 MPa, 3. gün %17,79 MPa ve 7. gün %21,40 MPa dir. Elde edilen basınç dayanımı değerlerine göre, nSi'li karışımlarda optimum doygunluk derecesini UK_{F50}nSi₁₀₀ karışım vermiştir.

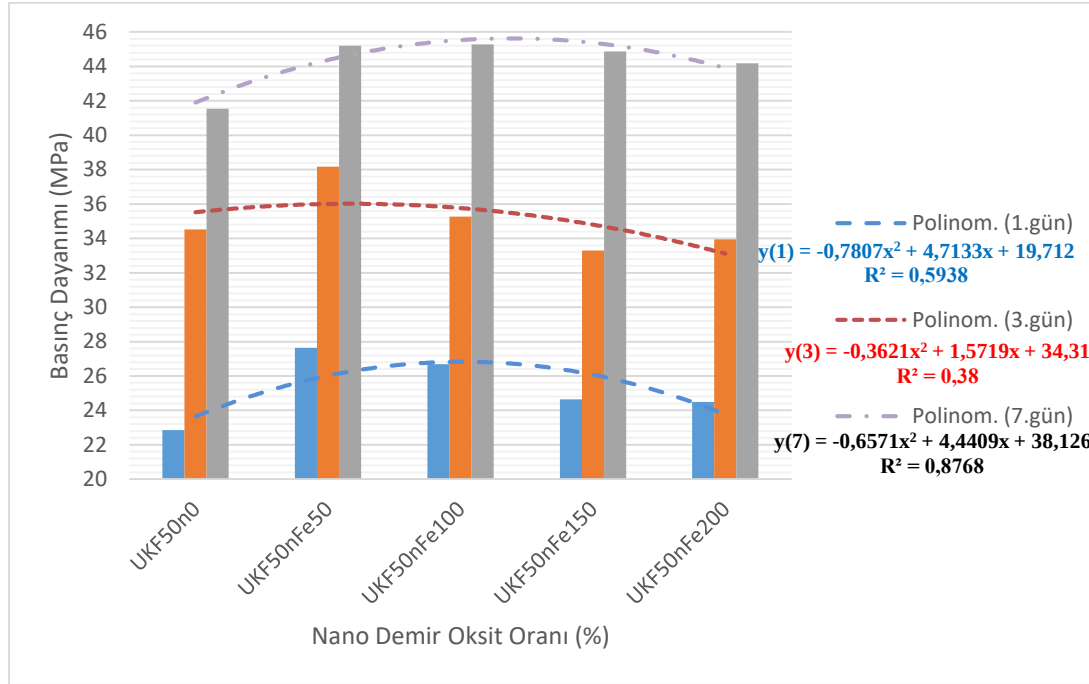
UK_F ikameli karışımlarda nano demir oksit etkisinin ve doygunluk derecesini araştırılması;

UK_{F50} ikameli nFe'li karışımların doygunluk derecesi tasarımında malzemelerinin birbirine oranı Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. UK_F'lü nFe'li karışımlardaki malzeme oranları

Malzemeler	UK _{F50} n ₀	UK _{F50} nFe ₅₀	UK _{F50} nFe ₁₀₀	UK _{F50} nFe ₁₅₀	UK _{F50} nFe ₂₀₀
nFe/B	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200
B/Kum	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Su/B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Su/Ç	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55
UK _F /Ç	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PH/B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PVA/B	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124
SA/B	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Kısaltmalar	Açıklamalar				
UK _{F50} nFe ₅₀	Yüksek performans amaçlı nano demiroksit katkı kademeli arttırımlı karışım.				
nFe ₂ O ₃	Nano demiroksit				
Diğer kısaltmalar	Çizelge 3.7.'de açıklanmıştır.				

Çizelge 3.8.'de görüldüğü üzere, nFe'li karışım tasarımı S/B=0,27, S/Ç=0,54, UK_F/Ç=1, B/Kum=2,5, PH/B=0,02 ve SA/B=0,015'tir. Doygunluk derecesi tayini yapacağımız nFe₂O₃/bağlayıcı oranıdır. NFe karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %0,5 oranında arttırarak en fazla %2'ye kadar eklenmiştir.



Şekil 3.2. UK_F nano demiroksit oranı belirleme ön deney sonuçları

Şekil 3.2. incelendiğinde UK_F yapılan doygunluk derecesi için üretilen küp numunelerin 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımı sonuçları sütun grafik olarak görülmektedir. Burada kontrol karışım numune basınç dayanımları ile nFe ilaveli karışımlarda en yüksek basınç dayanımını birbiriyle karşılaştırılmış hangi oranda nFe etkisi doygunluk derecesini sağladığını saptamaktır. NFe miktarı 0 olan UK_{F50}nFe₀ kontrol karışımli harcta 1. günde 22,86 MPa, 3. günde 34,52 MPa ve 7. günde ise 41,54 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. UK_{F50}nFe₅₀ kodlu karışımda ise 1. günde 27,63 MPa, 3. günde 40,17 MPa ve 7. günde ise 48,2 MPa dayanım ile 5 farklı karışım içinde en yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlere göre, en yüksek basınç dayanımı veren UK_{F50}nFe₅₀ karışımın, UK_{F50}nFe₀ olan kontrol karışımların basınç dayanımlarına göre meydana gelen artış oranları 1. gün %20,86, 3. gün %16,34 ve 7. gün %16,03 dir.

Bu karışımdaki bütün karışımların basınç dayanımları nFe oranı ilişkisi regresyon analizi (eğilim çizgisi)sinde 2.dereceden polinom olarak bulunmuştur. Bu ilişkinin zayıf bir ilişki

olmadığı görülmektedir. Bu ilişkinin 1 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,5938$, iken 3 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,3800$ olarak saptanırken 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise $R^2=0,8768$ olarak saptanmıştır ve ilişki zayıftır. Elde edilen basınç dayanımı değerlerine göre, nFe'li karışımlardan optimum doygunluk derecesini UK_{F50}nFe₅₀ karışımı vermiştir.

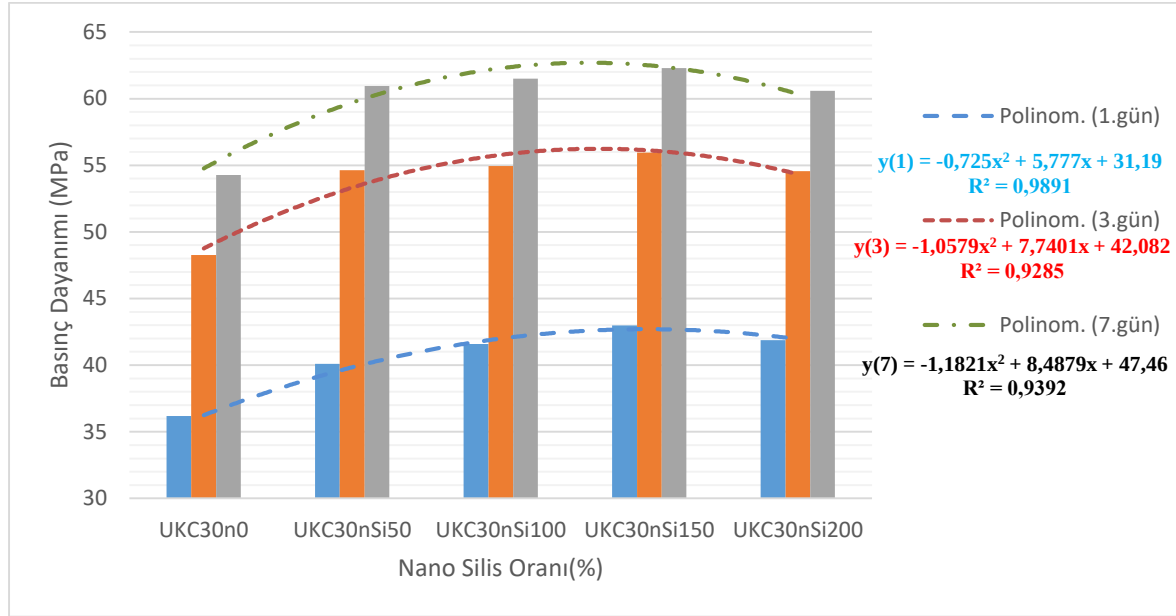
3.2.2. UK_C ikameli nano malzemelerin doygunluk derecesi ön deneyle tayini

Her karışım için 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımını belirlemek için 50 mm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Her bir karışımın tasarımının her yaşı için 3 adet numune hazırlanmıştır. UK_{C30} ikameli nSi'li karışımların doygunluk derecesi tayini; 1 m³'lük nSi tasarıma ilişkin değerler Çizelge 3.9.'da görüldüğü gibi karışımda kullanılan malzemelerin birbirine oranı şeklinde verilmiştir.

Çizelge 3.9. UK_C'lü nSi'li karışımlardaki malzeme oranları

Malzemeler	UK _{C30} n ₀	UK _{C30} nSi ₅₀	UK _{C30} nSi ₁₀₀	UK _{C30} nSi ₁₅₀	UK _{C30} nSi ₂₀₀
nSi/B	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200
B/Kum	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Su/B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Su/Ç	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
UK _C /Ç	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
PH/B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PVA/B	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124
SA/B	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Kısaltmalar	Açıklamalar				
UK _{C30} n ₀	Kontrol betonu (%30 UK _C +%70 Çimento+XELAH50+%0 Nano malzeme)				
UK _{C30} nSi ₅₀	Yüksek performans amaçlı nano silikat katkılı kademeli arttırımlı karışım.				
UK _C	C sınıfı uçucu kül				
0,050	UK'nin toplam bağlayıcı içerisindeki oranı 0,050 arttırımlı olarak.				
n	Nano				
nSiO ₂	Nano silikat				
50	Kullanılan nano malzeme %'si (50=0,005)				
B	Bağlayıcı= (Çimento+UK _C +Nano malzeme+XELAH50)				
PH	Priz hızlandırıcı				
SA	Süper akışkanlaştırıcı				
PVA	Polivinil alkol lif				
S	Karışım suyu				
Ç	Çimento				

Çizelge 3.9.'da görüldüğü üzere nSi'li karışım tasarımında S/B=0,27, S/Ç=0,39, UKc/Ç=0,43, B/Kum=2,5, PH/B=0,02 ve SA/B=0,015'tir. Doygunluk derecesi tayini yapacağımız nSi/bağlayıcı oranıdır. nSi, karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %0,5 oranında arttırarak en fazla %2'ye kadar eklenmiştir.



Şekil 3.3. UK_C nano silis oranı belirleme ön deney sonuçları

Şekil 3.3. incelenip analiz edildiğinde UK_C karışımlarının 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımı sonuçları sütun grafik olarak görülmektedir. Burada kontrol karışım numune basınç dayanımları ile nSi ilaveli karışımlarda en yüksek basınç dayanımını birbiriyle karşılaştırılmış hangi oranda nSi etkisi doygunluk derecesini sağladığını saptamaktır.

UK_{C30}nSi₀ (kontrol) karışımı harç numunelerinin 1. günde 36,18 MPa, 3. günde 48,26 MPa ve 7. günde ise 54,27 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonrasında en yüksek basınç dayanımı UK_{C30} nSi₁₅₀ karışımında ise 1. günde 42,97 MPa, 3. günde 55,95 MPa ve 7. günde ise 62,29 MPa olarak görülmektedir. Bu karışımdaki bütün karışımların basınç dayanımları nSi oranı ilişkisi regresyon analizi (eğilim çizgisi)sinde 2.dereceden polinom olarak bulunmuştur. Bu ilişkinin kuvvetli bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu ilişkinin 1 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,9891$ ve diğer yaşlara göre daha kuvvetli, iken 3 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,9285$ olarak saptanırken 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise $R^2=0,9392$ olarak saptanmıştır.

UK_C ikameli karışımların kontrol numunesi ile en yüksek basınç dayanımını veren UK_{C30}nSi₁₅₀ karışımının basınç dayanımlarında göre meydana gelen artış oranları 1. gün %18,77 MPa, 3. gün %15,93 MPa ve 7. gün %14,78 MPa dir. Elde edilen basınç dayanımı değerlerine göre, nSi'li karışımlarda optimum doygunluk derecesini UK_{C30}nSi₁₀₀ karışım vermiştir.

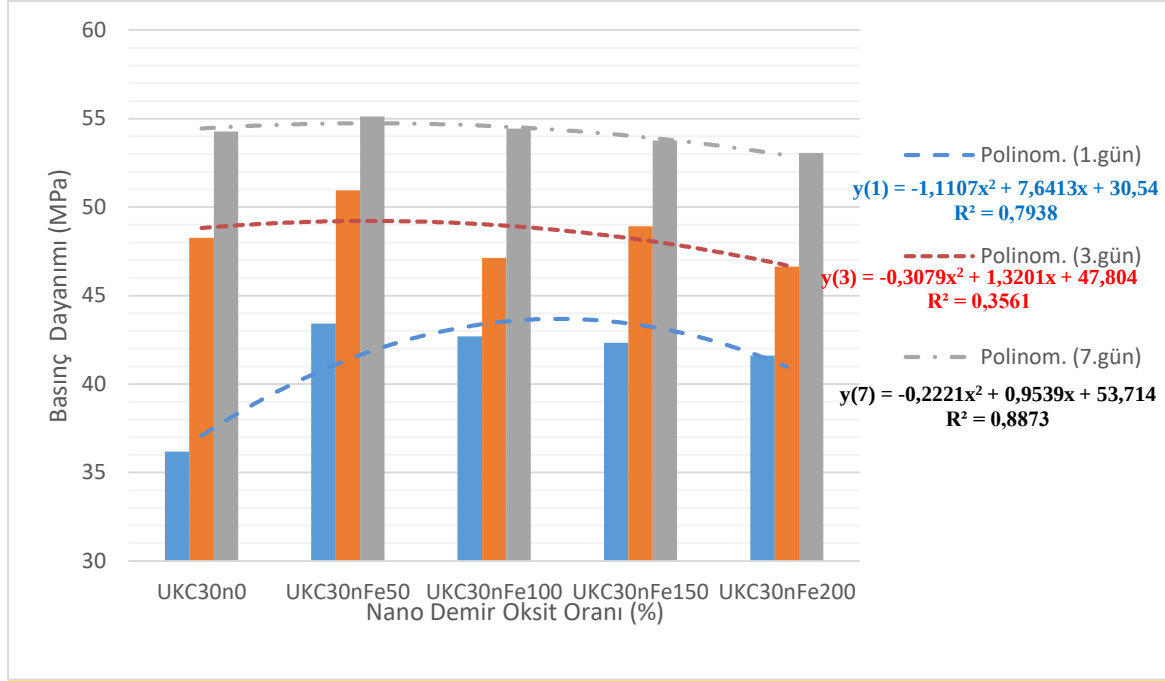
UK_C ikameli karışımlarda nano demir oksit etkisinin ve doygunluk derecesini araştırılması;

UK_{C30} ikameli nFe'li karışımların doygunluk derecesi tasarımında malzemelerinin birbirine oranı Çizelge 3.10.'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. UK_C'lü nFe'li karışımlardaki malzeme oranları

Malzemeler	UK _{C30} n ₀	UK _{C30} nFe ₅₀	UK _{C30} nFe ₁₀₀	UK _{C30} nFe ₁₅₀	UK _{C30} nFe ₂₀₀
nFe/B	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200
B/Kum	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Su/B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Su/Ç	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
UK _C /Ç	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
PH/B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PVA/B	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124
SA/B	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Kısaltmalar	Açıklamalar				
UK _{C50} nFe ₅₀	Yüksek performans amaçlı nano demiroksit katkıli kademeli arttırımlı karışım.				
nFe ₂ O ₃	Nano demiroksit				
Diğer Kısaltmalar	Çizelge 3.9'da açıklanmıştır.				

Çizelge 3.10.'da görüldüğü üzere nFe'li karışım tasarımında S/B=0,27, S/Ç=0,39, UK_C/Ç=0,43, B/Kum=2,5, PH/B=0,02 ve SA/B=0,015'tir. Doygunluk derecesi tayini yapacağımız nFe/bağlayıcı oranıdır. NFe karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %0.5 oranında arttırarak en fazla %2'ye kadar eklenmiştir.



Şekil 3.4. UK_C nano demiroksit oranı belirleme ön deney sonuçları

Şekil 3.4. incelendiğinde, 1, 3 ve 7 günlük basınç dayanımı testi sonuçları değerlendirilmiştir. NFe miktarı 0 olan UK_{C30}nFe₀ kontrol karışımli harcta 1. günde 36,18 MPa, 3. günde 45,26 MPa ve 7. günde ise 54,27 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. UK_{C30}nFe₅₀ karışımında ise 1. günde 43,22 MPa, 3. günde 50,95 MPa ve 7. günde ise 55,13 MPa dayanım ile 5 farklı karışım içinde en yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Bu karışımındaki bütün karışımların basınç dayanımları nFe oranı ilişkisi regresyon analizi (eğilim çizgisi)sinde 2.dereceden polinom olarak bulunmuştur. Bu ilişkinin kuvvetli bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu ilişkinin 1 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,7938$ ve diğer yaşlara göre zayıf ilişki, iken 3 günlük numunelerin basınç dayanımlarında $R^2=0,3561$ olarak saptanırken 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise $R^2=0,8873$ olarak oldukça zayıf ilişki olduğu saptanmıştır.

Elde edilen değerlere göre UK_{C30}nFe₅₀ karışımının UK_{C30}nFe₀ olan kontrol karışımli harca göre dayanımda meydana gelen artış oranları 1. gün %19,46, 3. gün %12,57 ve 7. gün %1,58'tür. 1, 3 ve 7 günlük numunelerin tamamında maksimum basınç dayanımı sonuçları UK_{C30}nFe₅₀ karışımında elde edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı değerlerine göre, nFe'li karışımlardan optimum doygunluk derecesini UK_{C30}nFe₅₀ karışım vermiştir.

Kimyasal katkı maddesi miktarının tespit edilmesi

Hazırlanan taze harç karışımlarının işlenebilirliğini belirlemek için ASTM C 230/C 230M – 08 [133]'e uygun olarak mini yayılma testi yapılmıştır. Deney çapı 255 mm olan tablanın üzerinde bulunan alt taban çapı 100 mm, üst taban çapı 70 mm ve yüksekliği 50 mm boyutlarında pirinçten üretilmiş kalıp içerisine 3 tabaka şeklinde yerleştirilmiştir. Her bir tabaka da yerleştirilen harçlar 15 tokmak vuruşu ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın üstü spatula ile düzeltilerek düşüm yüksekliği 10 mm olan yayılma tablası manuel olarak 25 defa döndürülmüş ve bu düşüşler sonunda tabla üzerinde yayılan harcın yayılma çapları ölçülüp aritmetik ortalaması alınmıştır. Numunelerin yayılma değerleri harcın işlenebilme, akıcılık özelliğini belirler. Karışımındaki çimento, agrega ve nano malzemeler ve suyun miktarı dikkate alınarak ana deneylerden önce deneme karışımları yapılarak karışımın yayılma davranışı araştırılmalıdır. İstenen yayılım değerini elde etmek için kimyasal katkı ve süper akışkanlaştırıcının miktarı birbiriyle uyumlu olmalıdır.



Resim 3.1. Mini yayılma test cihazı ve numune



Resim 3.2. Mini yayılma testi numune ölçümleri

Çizelge 3.11. Karışımların mini yayılma deney sonuçları

Karışımlar	UK _{F0n0}	UK _{F0n} Si ₁₀₀	UK _{F0n} Fe ₅₀	UK _{F50}	UK _{F50n} Si ₁₀₀	UK _{F50n} Fe ₅₀	UK _{F60}	UK _{F60n} Si ₁₀₀	UK _{F60n} Fe ₅₀
Yayılma Çapı (mm)	240	245	245	242	247	246	243	248	246
Karışımlar	UK _{C0}	UK _{C0n} Si ₁₅₀	UK _{C0n} Fe ₅₀	UK _{C30}	UK _{C30n} Si ₁₅₀	UK _{C30n} Fe ₅₀	UK _{C35}	UK _{C35n} Si ₁₅₀	UK _{C35n} Fe ₅₀
Yayılma Çapı (mm)	240	244	244	241	246	247	242	248	248

Çizelge 3.11. incelendiğinde deneylerden elde edilen sonuçlara göre; UK_F miktarı %0 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 245 mm ile UK_{F0n}Si₁₀₀ karışımında en düşük yayılma değeri ise UK_{F0} karışımında 240 mm olarak görülmektedir. UK_F miktarı %50 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 247 mm ile UK_{F50n}Si₁₀₀ karışımında en düşük yayılma değeri ise UK_{F50} karışımında 242 mm olarak görülmektedir. UK_F miktarı %60 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 248 mm ile UK_{F60n}Si₁₀₀ karışımında en düşük yayılma değeri ise UK_{F60} karışımında 243 mm olarak görülmektedir.

UK_C miktarı %0 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 244 mm ile UK_{C0n}Si₁₅₀ ve UK_{C0n}Fe₅₀ karışımlarında en düşük yayılma değeri ise UK_{C0} karışımında 240 mm olarak görülmektedir. UK_C miktarı %30 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 247 mm ile UK_{C30n}Fe₅₀ karışımında en düşük yayılma değeri ise UK_{C30} karışımında 241 mm olarak görülmektedir. UK_C miktarı %35 olan karışımlarda en yüksek yayılma değeri 248 mm ile UK_{C35n}Si₁₅₀ ve UK_{C35n}Fe₅₀ karışımlarında en düşük yayılma değeri ise UK_{C35} karışımında 242 mm olarak görülmektedir.

UKc kullanımında doygunluk derecesi tayini yapmış olduğumuz UKc %30 ile birlikte UKc %0 ve UKc %35 olmak üzere 3 farklı UKc oranı (%0, %30 ve %35) ile birlikte hem nSi hem de nFe için yapmış olduğumuz doygunluk tayini sonucunda çıkan oranlar olan UK_{C30}nSi₁₅₀ ve UK_{C30}nFe₅₀ haricinde birde nano katkısız olmak üzere 3 farklı oran kullanılarak toplamda 3x3=9 farklı karışım dizaynı yapılmıştır. Üretim esnasında kullanılan malzemelerin oranları, S/B=0,27, S/Ç=0,39, UK/Ç=0,43, B/Kum=2,5, PVA/B=0,0124, PH/B=0,02 ve SA/B=0,015'tir. 20 dm³'lük harç mikserinde bu sabit oranların dışında diğer değişkenlerle beraber numunelerin üretimi yapılmıştır. Çizelge 3.13.'te üretimi amaçlanan UKc'lü YPLDÇK karışımlarının oranları görülmektedir.

Çizelge 3.13. UKc ve nano malzemeli karışımların oranları

Malzemeler	UKc %0			UKc %30			UKc %35		
	UK _{C0}	UK _{C0} nSi ₁₅₀	UK _{C0} nFe ₅₀	UK _{C30}	UK _{C30} nSi ₁₅₀	UK _{C30} nFe ₅₀	UK _{C35}	UK _{C35} nSi ₁₅₀	UK _{C35} nFe ₅₀
N/B	0,00	0,015	0,005	0,00	0,015	0,005	0,00	0,015	0,005
B/Kum	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Su/B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Su/Ç	0,27	0,27	0,27	0,39	0,39	0,39	0,42	0,42	0,42
UKc/Ç	0,00	0,00	0,00	0,43	0,43	0,43	0,54	0,54	0,54
PH/B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
SA/B	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
PVA/B	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124

Tasarımın karışım süreci(aşaması):

Karışımların tamamının dizaynı 20 lt kapasiteye sahip Hobart marka mikserle yapılmıştır (Resim 3.3.).

1. Nano malzeme karışıma başlamadan 5 dk önce 10 dk suyun yarısı ile mikserle ayrı bir kaptaki karıştırıldı.
2. Kuru karışım (çimento, uçucu kül ve silis kumu) ise nano malzeme mikserle karıştırıldıktan 5 dk sonra yine 5 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.

3. Nano malzeme ve kuru karışım karıştırılarak 2 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.
4. Priz hızlandırıcı karışıma eklendi ve 1 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.
5. Suyun kalan yarısı eklenerek, 1 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.
6. Süper akışkanlaştırıcı yavaş yavaş damıtılarak 1 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.
7. Ardından 2 dk boyunca tüm karışım 200 dk/devirle karıştırıldı.
8. PVA lif karışıma eklenerek, 2 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldı.
9. PVA lifli tüm karışım, 1 dk boyunca 200 dk/devirle karıştırıldı.
10. Karışım 1 dk boyunca 300 dk/devirle karıştırıldı.
11. Karışım 2 dk boyunca 200 dk/devirle karıştırıldı.
12. Karışım 1 dk boyunca 100 dk/devirle karıştırıldıktan sonra numunelere dökülmeye hazır hale gelmiştir.



Resim 3.3. 20 lt kapasiteli Hobart marka mikser

3.2.3. Sertleşmiş harç deneyleri

Basınç dayanım deneyi

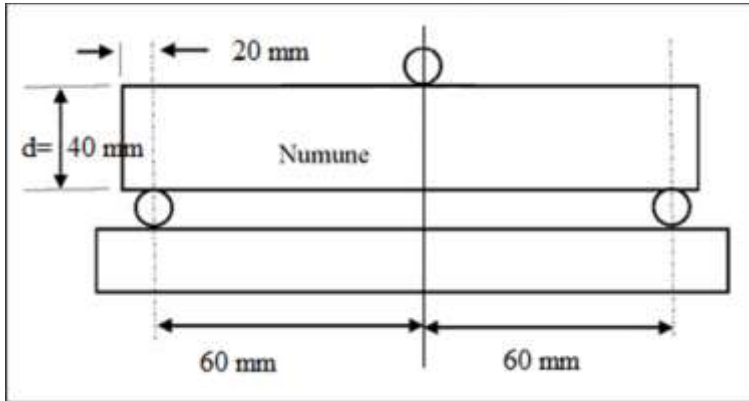
Hazırlanan karışımların 50x50x50 mm boyutunda küp örneklerin 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Her karışım için her yaşta ve tasarım için 3'er adet kullanılmıştır. Küp numuneler 95 ± 5 nemli, ortalama sıcaklığı 23 ± 2 °C olan kür tanklarında kür edilmiştir test yaşına kadar.



Resim 3.4. Basınç ve eğilme deneyi aleti

Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Hazırlanan karışımların 40x40x160 mm boyutunda prizma örneklerin 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Her karışım için her yaşta ve tasarım için 3'er adet kullanılmıştır. Deney numuneleri %95 ± 5 nemli, ortalama sıcaklığı 23 ± 2 °C olan kür tanklarında kür edilmiştir test yaşına kadar.



Şekil 3.5. Üç noktalı eğilmede çekme testi deney düzeneği

$$R_f = 1.5 \times F_f \times l / b^3$$

R_f = Eğilme Dayanımı (N/mm²),

F_f = Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

l = Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm),

b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm).

Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü (E), Harç numunelerinin elastik bölgesinde uygulanan yükün oluşturduğu basınç gerilmelerinin, numunede meydana getirdiği boyuna şekil değiştirmeye (ϵ) oranıdır. ASTM C469 [134]'e göre gerçekleştirilen E 'nin tayini deneyinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma döngüleri boyunca numuneler üzerinde gerçekleştirilen deformasyonlar, Doğrusal Değişken Fark Transformatoru (LVDT) aracılığı ile 90 günlük 100 mm çapında 200 mm boyunda silindir örnekler üzerinde ölçülmüştür. Her bir karışım için 3'er adet kullanılmıştır. Silindir numuneler 95 ± 5 nemli, ortalama sıcaklığı 23 ± 2 °C olan kür tanklarında kür edilmiştir test yaşına kadar.



Resim 3.5. Elastisite modülü numunesi ve deney düzeneği

Eğik kesme deneyi

Bu özelliğin belirlenmesinde beş yıllık eski Ø100×200 mm boyutundaki beton silindir numuneler 45° açı ile taş kesme makinasında kesilerek eğik yüzey elde edilmiştir (Resim 3.6; Resim 3.7.). Bu eğik yüzey tasarlanan farklı nano malzeme ve UK ile üretilen harçla 200 mm'lik silindir haline getirilmiştir. Her bir karışım için 3'er adet kullanılmıştır. Silindir numuneler 95 ± 5 nemli, ortalama sıcaklığı 23 ± 2 °C olan kür tanklarında kür edilmiştir test yaşına kadar. Hazırlanan bu örnekler 1, 3, 7, 28 ve 90 gün sonunda basınç dayanımına

tabi tutularak kayma meydana gelip gelmediği, eski betonla taze harcın aderansı gözlenmiş aynı zamanda basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.



Resim 3.6. Taş kesme makinası ve 45 derece eğik kesilmiş numuneler



Resim 3.7. Eski 45 derece eğik kesilmiş numunelerle birlikte dökülen numuneler

Kuruma rötresi deneyi

Sertleşmiş harç ve betonda suyun buharlaşarak kaybolmasıyla, hacminde zamanla meydana gelen şekil değişikliğine kuruma rötresi denir. Çoğunlukla kuruma rötresi; sertleşmiş harç ve beton yüzeyindeki buharlaşmadan dolayı su kaybına uğramaktadır. Rijit yapıya sahip olan çimento içerikli malzemelerde, şekil değişikliği büzülerek eksenel küçülme biçiminde meydana gelmektedir [135-137].

Her bir karışım için 3'er adet kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. ASTM C157/157 [138]'e göre 25x25x285 mm boyutlarında prizma numune hazırlanmıştır. 28 gün boyunca 0,002 mm hassaslıkla çalışan cihazla boy değişimi ölçülmüştür.



Resim 3.8. Kuruma rötresi deney aleti ve rötre değeri ölçülen numune

Hızlı klor iyon ge irirnililiği deneyi

Hazırlanan karışımların 3, 7 ve 28 günlük klor geçirgenlik değerleri her karışım için her yaşta 1 adet $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyundaki silindirden 3 adet $\text{Ø}100 \times 50$ mm boyutlarındaki silindir disk numune hazırlanmıştır.

ASTM C 1202 [139]'a göre hızlı klor iyon ge irirnililiği (HKİG) deneyi yapılmak üzere (Resim 3.9.) $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numuneler $23 \pm 2^\circ \text{C}$ ve $\%50 \pm 5$ bağıl neme sahip laboratuvar ortamında 24 saat kalıp içinde bekletilerek k r edilmiştir. Elmas bıçaklı testere kullanılarak $\text{Ø}100 \times 50$ mm boyutlarında silindir disk numuneler elde edilmiştir. $\text{Ø}100 \times 50$ mm boyutundaki numuneler 3, 7 ve 28. güne kadar $23 \pm 2^\circ \text{C}$ ve $\%95 \pm 5$ bağıl nemde hava geçirmeyen özel poşetlerde saklanmıştır. Suyun sızmasını ve elektrik iletkenliğini engellemek için disk numunelerin yan yüzeyleri kaplanmıştır. Numunelere 3 saat vakum işlemi uygulanmıştır. Numunelerin suya doygun olması için vakum haznesi suyla doldurularak 1 saat daha vakum işlemi uygulanmıştır. Deney anına kadar su içinde bırakılan numuneler sudan çıkarıldıktan sonra $\%3$ konsantrasyonlu NaCl ve 0,3M NaOH   z ltnin içine yerleştirilmiştir. Daha sonra 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak 30 dk'lık dilimlerle akım şiddeti değeri  l  l r k kayıt altına alınmıştır. Resim 3.10.'da görülen elektro-mekanik test cihazı kullanılarak numunelere ait klor geçirgenliği değerleri Coulomb cinsinden hesaplanmıştır.



Resim 3.9. Ø100×200 mm silindir numune ve elmas bıçaklı testere ile kesilmiş Ø100×50 mm silindir disk numune



Resim 3.10. Hızlı klor iyon geçirimsizliği, elektro-mekanik test cihazı ve ekipmanları

SEM analizi

Hazırlanan karışımların 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deneylerinden sonra mikro yapıyı incelemek üzere küp şekeri boyutunda bir parça alınarak içi asetonla doldurulmuş boş su şişesinde saklanmıştır. Sonradan şişelerin üzerine kodlanarak yerleştirilmiş olan numuneler, asetondan çıkarılarak SEM analizi yapılmıştır.



Resim 3.11. SEM analizinde kullanılmak üzere aseton içerisinde atılmış olan numuneler

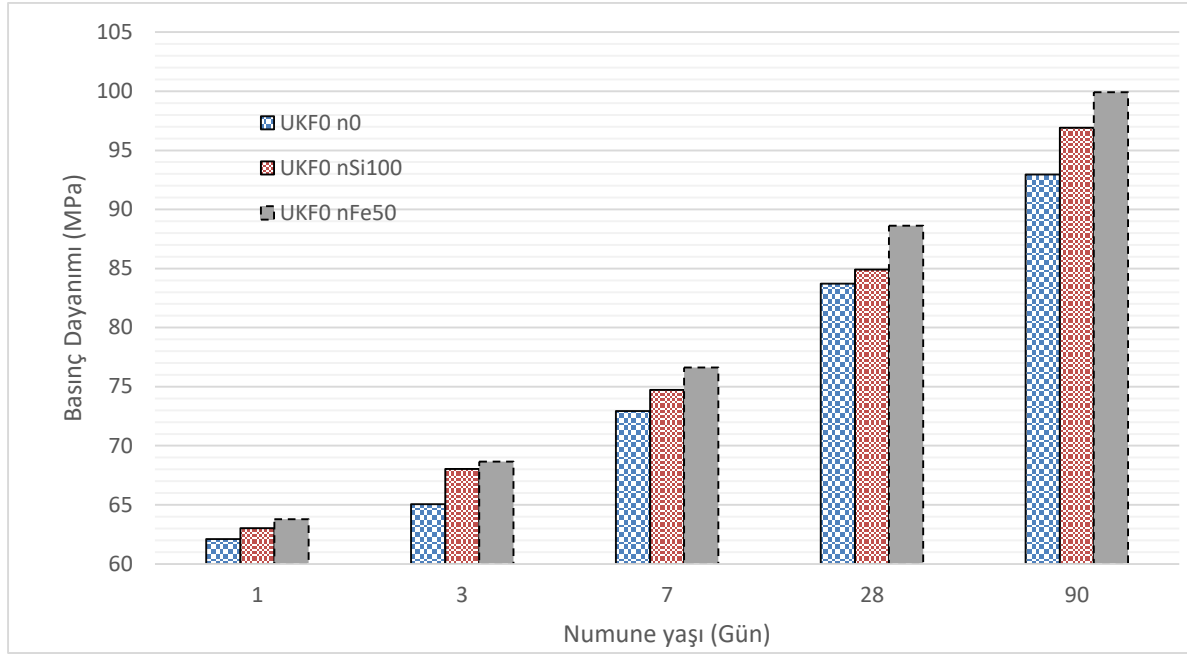
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımları

4.1.1. Kontrol (UK_{F0}) karışımların basınç dayanımları

Kontrol (UK_0) harçları yani uçucu külsüz ve optimum nano malzemeler ile hazırlanan harç karışımlarıyla üretilen numunelerin yaşa bağlı olarak basınç dayanımı ilişkisi incelenmiştir. Doğal olarak bütün karışımlarda yaş artıkça basınç dayanımı artacaktır. Burdada bu doğal varsayımla paralellik görülmüştür. Uçucu külsüz ve nano malzemesiz (UK_{0n0}) üretilen harç karışımların 1. gün sonunda basınç dayanımı 62,1 MPa, 3. gün 65,05 MPa, 7. gün 72,95 MPa, 28. gün 83,71 MPa ve 90. gün 92,97 MPa olduğu şekil 4.1.'de görülmektedir. Nano silisyum oksit %1,0(nSi_{100}) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık olarak UK_{0n0} karışımların basınç dayanımına paralellik gösterdiği görülmektedir. Nano demir oksit %0,50(nFe_{50}) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık olarak UK_{0n0} ve $UK_{0nSi_{100}}$ karışımın basınç dayanımına paralellik gösterdiği görülmektedir.

Bu basınç dayanımı artış oranı %62 olduğu söylenebilir, 3. gün sonunda bu artışı ortalama %65 civarında olur iken, 7. gün sonunda bu artışı ortalama %75 civarında ve nihai dayanım olan 28. gün sonunda bu artışı ortalama %85 civarında olduğu Şekil 4.1.'de görülmektedir. Bütün yaşlarda nFe_{50} ile üretilen harçlar en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Nano demir oksit parçacıklarının yüksek reaktivitesine bağlı olarak erken yaşlarda oluşan $Ca(OH)_2$ 'nin hızlı tüketiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bütün yaşlarda en düşük dayanımı nano malzeme ilave edilmeyen kontrol harcı vermiştir. Bunun nedeni nano malzemeler harç içindeki boşlukları belirli oranda doldurarak boşlukları en aza indirmesinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.1. UK_{F0} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı - yaş ilişkisi

Şekil 4.1. incelendiğinde UK_{F0}n₀ olan numunelerin yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 62,1 MPa, 90 günlük dayanım değeri 92,97 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 30,87 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%74'üne denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%67'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

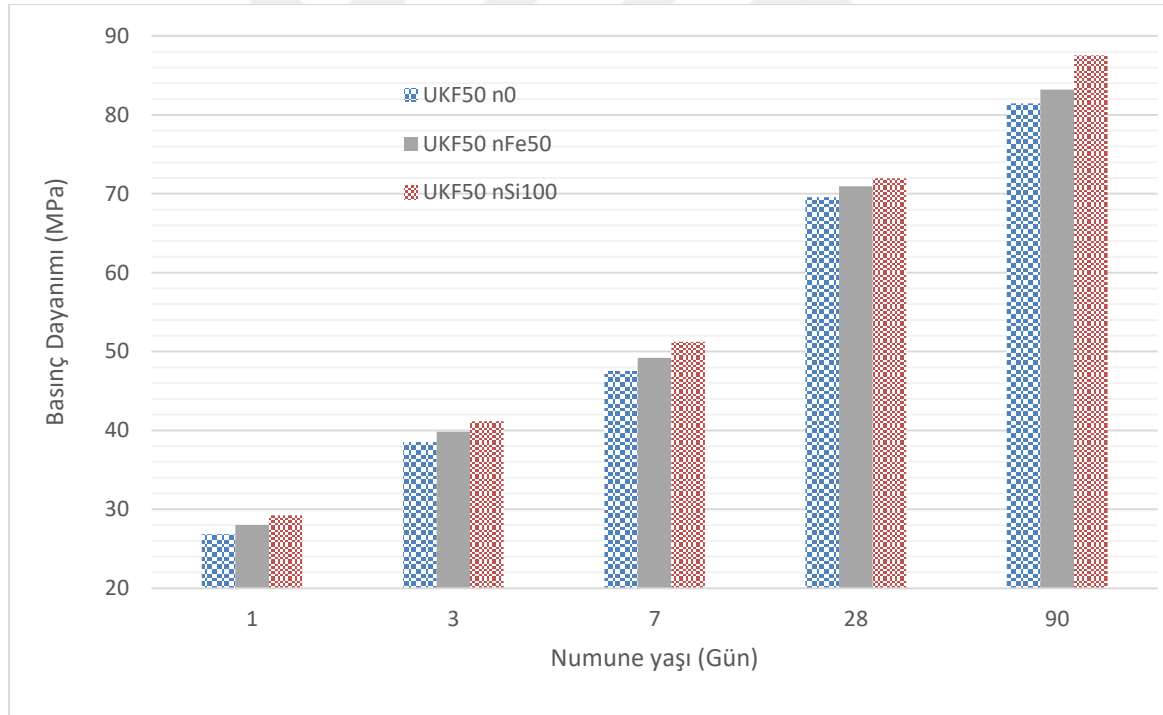
UK_{F0}nSi₁₀₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F0}nSi₁₀₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 63,02 MPa, 90 günlük dayanım değeri 96,91 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 33,89 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%74'üne denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%64'üne denk gelmektedir. Artış hızı oranının azalmasına rağmen UK_{F0}nSi₁₀₀'lü numunelerin UK_{F0}n₀ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F0}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F0}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 63,79 MPa, 90 günlük dayanım değeri 99,91 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark

36,12 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%70'ine denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%62'sine denk gelmektedir. Artış hızı oranının azalmasına rağmen UK_{F0n0} ve $UK_{F0nSi100}$ numunelerine göre yaş arttıkça dayanım hızının biraz daha arttığı görülmektedir.

4.1.2. UK_{F50} karışımların basınç dayanımı

Bu karışım da kullanılan çimentonun %50'si F sınıfı uçucu kül oranı (%50 Ç+%50 UK_F) ikame edilerek optimum nano malzemelerle yaşa bağlı basınç dayanımı ilişkisi incelenmiştir. UK_{F50} ikameli harçlarda nano kullanılmayan (kontrol) numunelerin basınç dayanımı 1. günde 26,86 MPa, 3. gün 38,52 MPa, 7. gün 47,54 MPa, 28. gün 69,55 MPa ve 90. gün 81,45 MPa olduğu Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.2. UK_{F50} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Nano silisyum oksit %1,0 (nSi_{100}) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık olarak UK_{0n0} karışımların basınç dayanımına paralellik gösterdiği görülmektedir. Nano demir oksit %0,50(nFe_{50}) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık. İlk ve son gün dayanım değerleri

arasındaki fark 54,59 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%39$ 'una denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%33$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır.

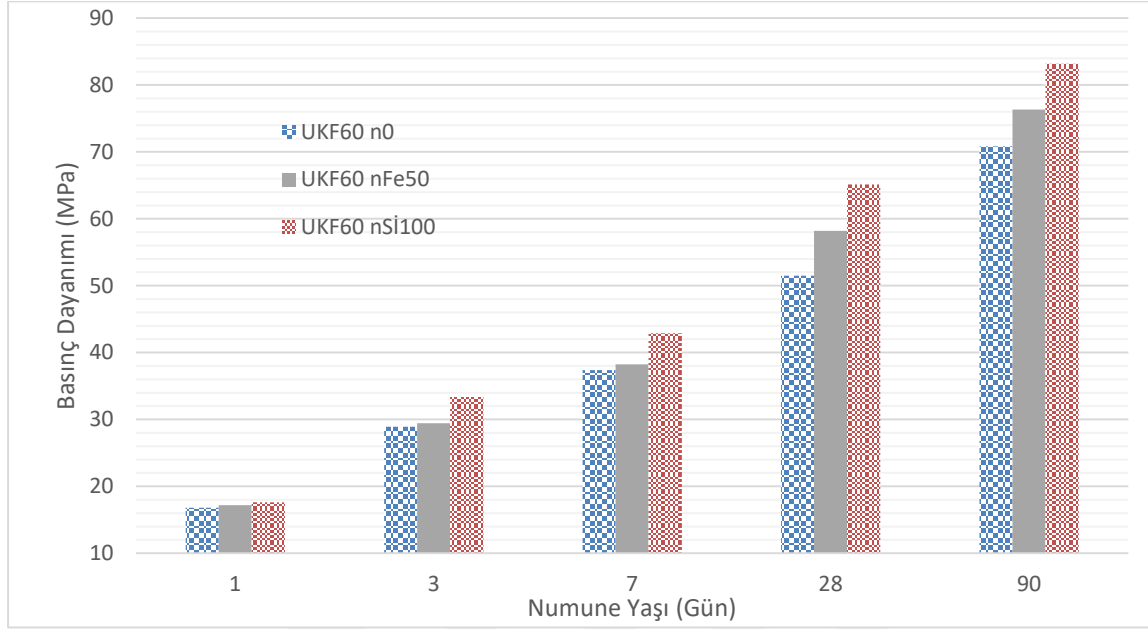
UK_{F50nSi100} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F50nSi100} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 29,22 MPa, 90 günlük dayanım değeri 87,53 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 58,31 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%40$ 'ına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%33$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır. UK_{F50nSi100}'lü numunelerin UK_{F50n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F50nFe50} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F50nFe50} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 28,03 MPa, 90 günlük dayanım değeri 83,21 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 55,18 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%40$ 'ına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%33$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır. Hem nano katkısız hemde nano malzeme (nSi ve nFe) ikameli her 3 harç karışımında da UK kullanımından dolayı dayanımın artış hızı oranı artmaktadır.

4.1.3. UK_{F60} karışımların basınç dayanımı

Harç karışımında F sınıfı uçucu kül ikame oranı $\%60$ oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Yani karışımdaki çimento $\%60$ oranında azaltılmıştır. Burada optimum nano malzemelerin $\%60$ uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.3. incelenip analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan UK_{F60n0} olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 16,8 MPa, 90 günlük dayanım değeri 70,83 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 54,03 MPa'dır. Bu artış UK_{F60} puzolanik etkisi olarak bu artış literatüre uygun olduğu değerlendirilmektedir. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%33$ 'üne denk gelmektedir. 90 günlük

dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%24$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır.



Şekil 4.3. UK_{F60} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

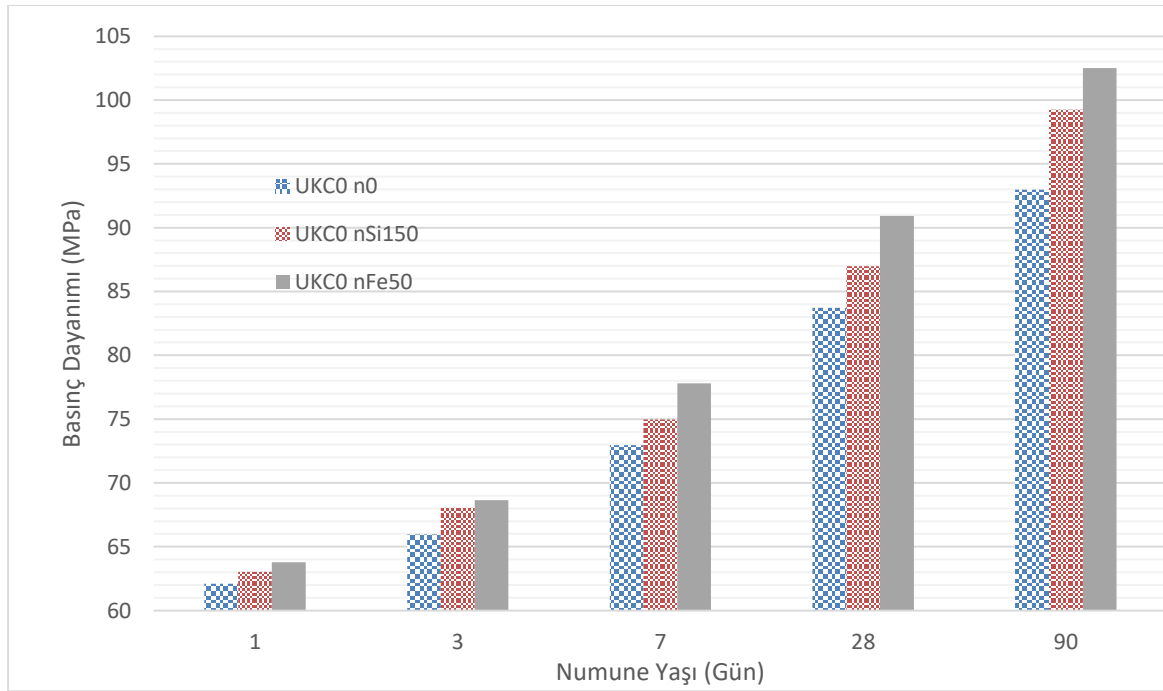
UK_{F60}nSi₁₀₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F60}nSi₁₀₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 17,61 MPa, 90 günlük dayanım değeri 83,17 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 65,56 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%27$ 'sine denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%21$ 'ine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır. UK_{F60}nSi₁₀₀'lü numunelerin UK_{F60}n₀ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F60}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F60}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 17,18 MPa, 90 günlük dayanım değeri 76,31 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 59,13 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğimizde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%29$ 'una denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%22$ 'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış hızı oranı artmaktadır. Hem nano katkısız hemde nano malzeme

(nSi ve nFe) ikameli her 3 harç karışımında da UK kullanımından dolayı dayanımın artış hızı oranı artmaktadır.

4.1.4. UK₀ karışımların basınç dayanımı

Uçucu külsüz ve optimum nano malzemeler ile hazırlanan harç karışımlarıyla üretilen numunelerin yaşa bağlı olarak basınç dayanımı ilişkisi incelenmiştir. Doğal olarak bütün karışımlarda yaş artıkça basınç dayanımı artacaktır. Burda da bu doğal varsayımla paralellik görülmüştür. Uçucu külsüz ve nano malzemesiz (UK₀n₀) üretilen harç karışımlar 1. gün basınç dayanımı 62,1 MPa, 3. gün 65,95 MPa, 7. gün 72,95 MPa, 28. gün 83,71 MPa ve 90. gün 92,97 MPa olduğu Şekil 4.4.'de görülmektedir. Nano silisyum oksit %1,5 (nSi₁₅₀) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık olarak UK₀n₀ karışımların basınç dayanımına paralellik gösterdiği görülmektedir. Nano demir oksit %0,50(nFe₅₀) oranıyla üretilen karışımın yaşa bağlı basınç dayanımı incelendiğinde basınç dayanımının biraz daha yüksek olmasına rağmen yaklaşık olarak UK₀n₀ ve nSi₁₅₀ karışımların basınç dayanımına paralellik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.4. UK₀ nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Şekil 4.4. incelendiğinde UK_{C0n0} olan numunelerin yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 62,1 MPa, 90 günlük dayanım değeri 92,97 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 30,87 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%74$ 'üne denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%67$ 'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

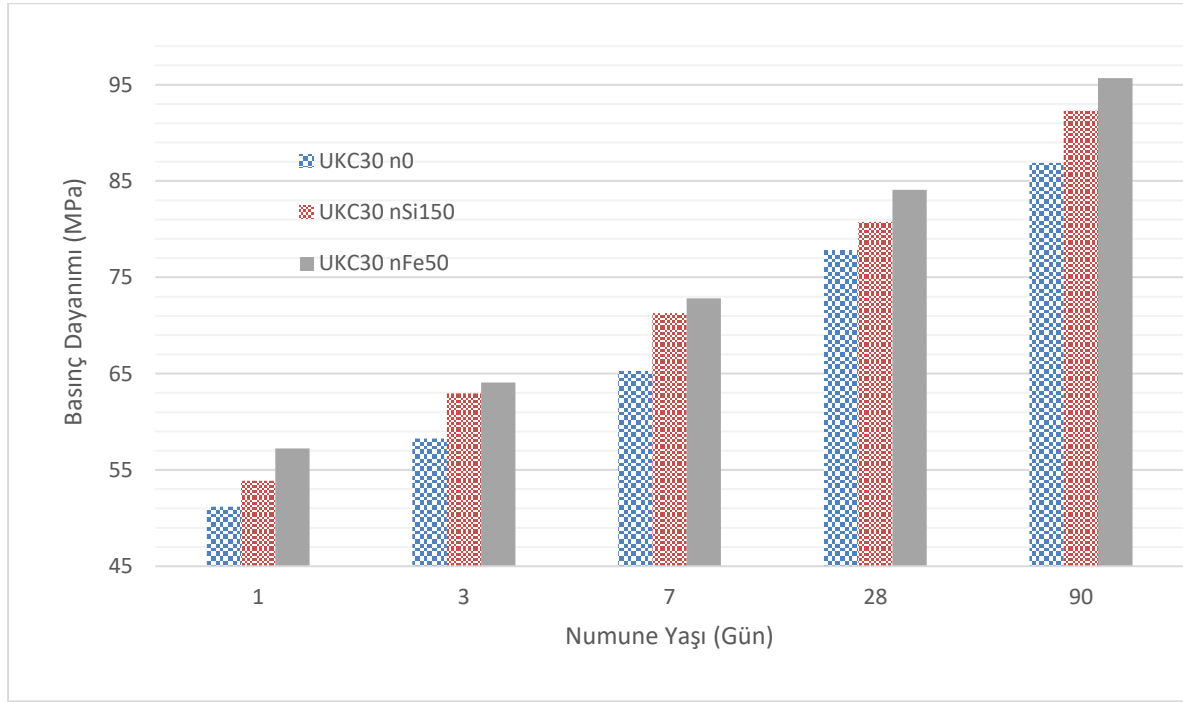
$UK_{C0nSi150}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C0nSi150}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 63,02 MPa, 90 günlük dayanım değeri 99,25 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 36,23 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%72$ 'sine denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%63$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. $UK_{C0nSi150}$ 'lü numunelerin UK_{C0n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

$UK_{C0nFe50}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C0nFe50}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 63,79 MPa, 90 günlük dayanım değeri 102,51 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 38,72 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%70$ 'ine denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin $\sim\%62$ 'sine denk gelmektedir. Artış hızı oranının azalmasına rağmen UK_{C0n0} ve $UK_{C0nSi150}$ numunelerine göre yaş arttıkça dayanım hızının biraz daha arttığı görülmektedir.

4.1.5. UK_{C30} karışımların basınç dayanımları

Harç karışımında C sınıfı uçucu kül ikame oranı $\%30$ oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Yani karışımındaki çimento $\%30$ oranında azaltılmıştır. Burada optimum nano malzemelerin $\%30$ C sınıfı uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5. incelenip analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan UK_{C30n0} olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1

günlük dayanım değeri 51,18 MPa, 90 günlük dayanım değeri 86,87 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 35,69 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%66'sına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%59'una denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.5. UK_{C30} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

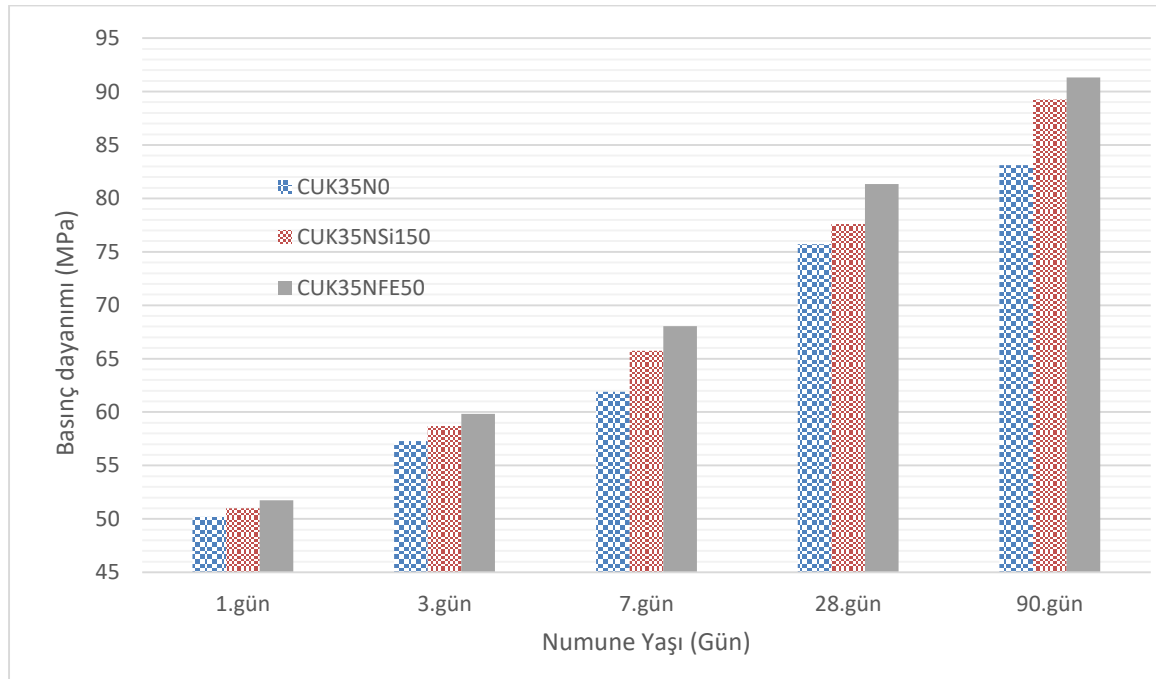
UK_{C30}nSi₁₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C30}nSi₁₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 52,97 MPa, 90 günlük dayanım değeri 92,29 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 39,32 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%66'sına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%57'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. UK_{C30}nSi₁₅₀'li numunelerin UK_{C30}n₀ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{C30}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C30}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 56,22

MPa, 90 günlük dayanım değeri 95,67 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 39,45 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%67'sine denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde ilk gün dayanım değerinin ~%60'ına denk gelmektedir. Artış hızı oranının azalmasına rağmen UK_{C30}n₀ ve UK_{C30}nSi₁₅₀ numunelerine göre yaş arttıkça dayanım hızının biraz daha arttığı görülmektedir.

4.1.6. UKC₃₅ karışımların basınç dayanımları

Harç karışımında C sınıfı uçucu kül ikame oranı %35 oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Yani karışımdaki çimento % 35 oranında azaltılmıştır. Burada optimum nano malzemelerin %35 C sınıfı uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.6. incelenip analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan UK_{C35}n₀ olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım Şekil 4.6. incelendiğinde UK_C içermeyen karışım ve UK_{C30} içeren karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %35 UK_C ikame edilmiştir (%65 Ç + %35 UK_C). UK_{C35}n₀ olan numunelerde yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 50,19 MPa, 90 günlük dayanım değeri 83,1 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 32,91 MPa'dır.



Şekil 4.6. UK_{C35} nSi, nFe numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%66'sına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerlerini incelediğinde ilk gün dayanım değerinin ~%60'ına denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

UK_{C35nSi150} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C35nSi150} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 51 MPa, 90 günlük dayanım değeri 89,26 MPa'dır. İlk ve son günlük dayanım değerleri arasındaki fark 38,26 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%66'sına denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerlerini incelediğinde ilk gün dayanım değerinin ~%57'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. UK_{C35nSi150}'li numunelerin UK_{C35n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{C35nFe50} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C35nFe50} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 51,74 MPa, 90 günlük dayanım değeri 91,33 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 39,59 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%64'üne denk gelmektedir. 90 günlük dayanım değerlerini incelediğinde ilk gün dayanım değerinin ~%57'sine denk gelmektedir. Artış hızı oranının azalmasına rağmen UK_{C35n0} ve UK_{C35nSi150} numunelerine göre yaş arttıkça dayanım hızının biraz daha arttığı görülmektedir.

Sonuçları incelediğinde nano malzeme (nSi ve nFe) ikame edilen harçların nano malzeme ikame edilmeyen harçlara göre ilk yaşlardan itibaren basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Nano malzemelerin geniş ve yüksek reaktif yüzey alanlarından dolayı hidrasyon tepkimelerinde belirli artış ortaya getirdiği söylenebilir [106]. Nano malzemeler küçük tanecik boyutu ve yapısından dolayı gözenekleri daha iyi doldurarak mikro düzeyde dolgu etkisi oluşturmaktadır [25].

Parçacıklar mikro ince boyutlarından dolayı gözenekleri doldurur (nano dolgu etkisi), mikro yapının daha da sıkışmasına yol açar, gözenek miktarını azaltarak, agrega ile çimento matrisi arasındaki bağı geliştirerek ve çimentolu kompozitin yoğunluğunu artırarak mikro yapının

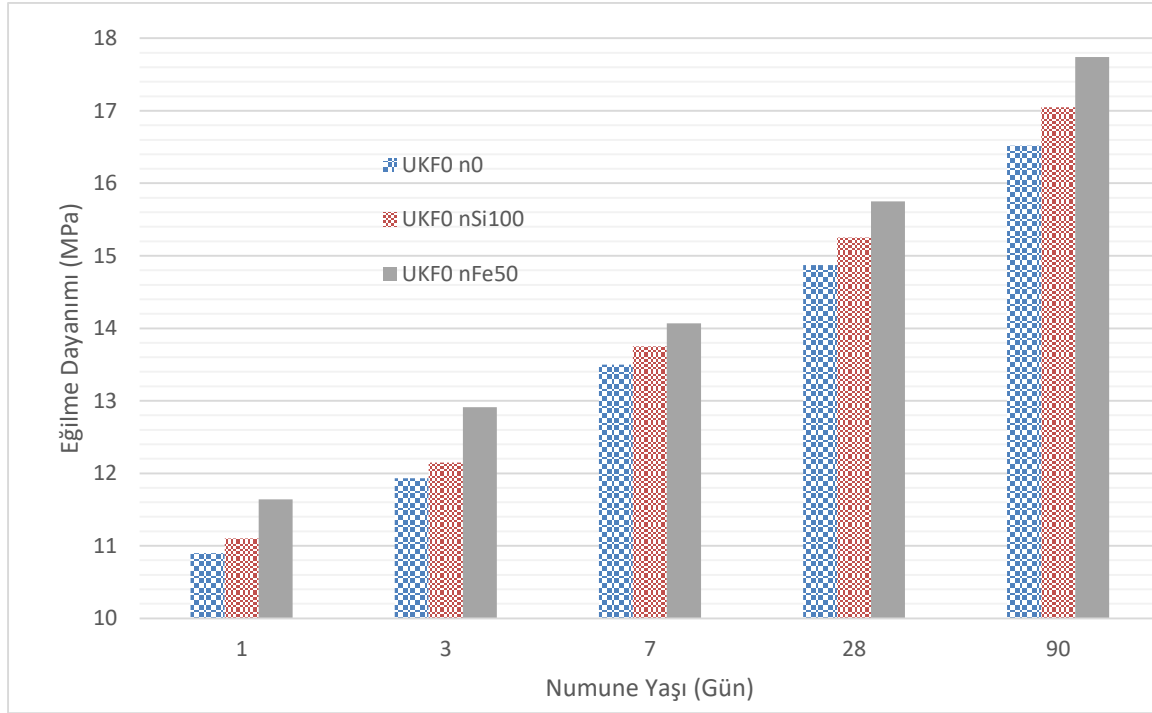
iyileştirilmesine yol açmaktadır. Çimento oranı %100 olan ve UK_C 'lü karışımlarda, UK_F karışımlarına nazaran daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesi nano demir katkılı harçların basınç dayanımının yüksek oranda artması, çimento ve UK_C 'de CaO oranı UK_F 'den daha yüksektir. Böylelikle hidratasyonu sırasında, özellikle nano- Fe_2O_3 parçacıklarının yüksek reaktivitesine bağlı olarak erken yaşlarda oluşan $Ca(OH)_2$ 'nin hızlı tüketiminden kaynaklanmaktadır [140,141].

İlk yaş dayanımlarında yüksek dayanımlı beton elde etmek istediğimizden nano malzeme kullanıyoruz. Nano malzeme ilk yaşlarda tanecik boyutları küçük olduğundan hem boşlukları doldurur hem de $Ca(OH)_2$ reaksiyona girerek CSH oluşturur. Böylelikle boşlukları ekstra doldurarak çimento arayüzünü iyileştirir. İlerleyen yaşlarda $Ca(OH)_2$ sayısı azaldığından CSH oluşumu azalır bundan dolayı hidratasyon hızı yavaşlıyor.

4.2. Eğilme Dayanımları

4.2.1. UK_{F0} karışımların eğilme dayanımları

Basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da kontrol (UK_0) harçları yani uçucu külsüz ve optimum nano malzemeler ile hazırlanan harç karışımlarıyla üretilen numunelerin yaşa bağlı olarak eğilme dayanımı ilişkisi incelenmiştir. Doğal olarak bütün karışımlarda yaş artıkcı eğilme dayanımı basınç dayanımına paralellik göstermesi beklenir. Burdada bu doğal varsayımla paralellik görülmüştür. Uçucu külsüz ve nano malzemesiz (UK_{0n0}) üretilen harç karışımlar 1. gün sonunda eğilme dayanımı 10,9 MPa, 3. gün 11,93 MPa, 7. gün 13,5 MPa, 28. gün 14,87 MPa ve 90. gün 16,52 MPa olduğu Şekil 4.7. de görülmektedir. Bu eğilme dayanımı sağlayan harç numunelerinde UK ve nano malzeme kullanılmamıştır. Karımın yaşa bağlı eğilme dayanımı görülmektedir. Bu kontrol karışıma nano silisyum oksit %1,0(nSi_{100}) ve nano demir oksit %0,50(nFe_{50}) ilave edilerek bu nano malzemelerin yaşa bağlı eğilme dayanımı araştırılmıştır.



Şekil 4.7. UK_{F0} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

Şekil 4.7. incelendiğinde UK_{F0}n₀ olan numunelerin yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 10,9 MPa, 90 günlük dayanım değeri 16,52 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 5,62 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%73'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

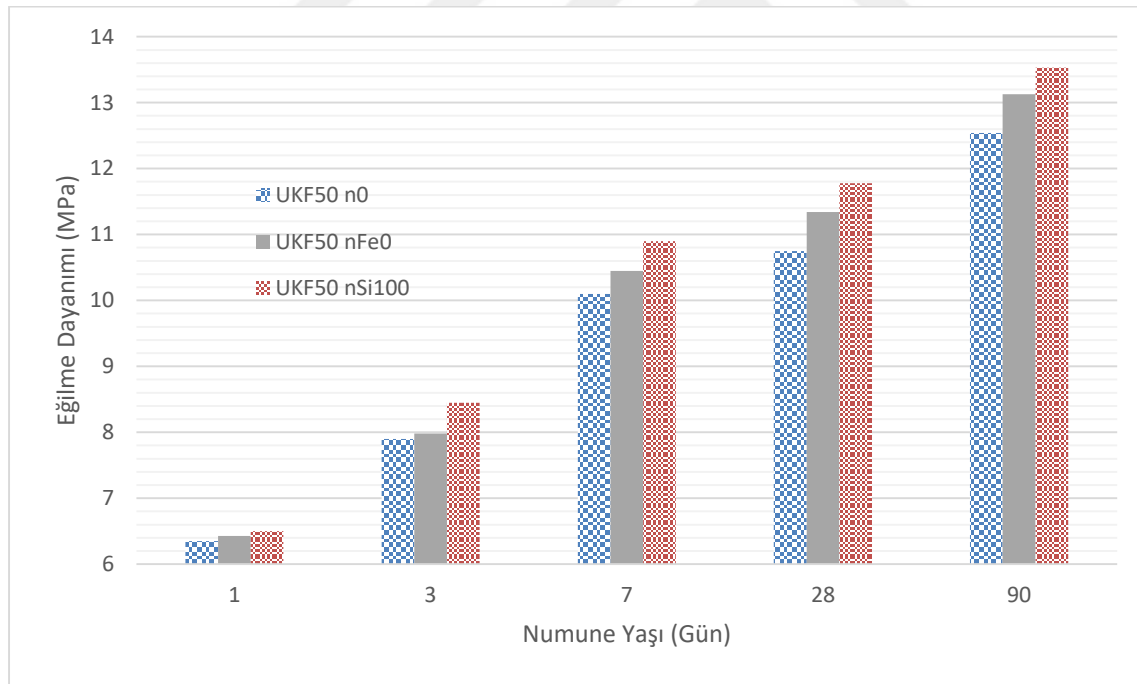
UK_{F0}nSi₁₀₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F0}nSi₁₀₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 11,1 MPa, 90 günlük dayanım değeri 17,05 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 5,95 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%73'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. UK_{F0}nSi₁₀₀'lü numunelerin UK_{F0}n₀ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F0}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F0}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 11,64 MPa, 90 günlük dayanım değeri 17,74 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,1 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım

değerinin ~%74'üne denk gelmektedir. UK_{F0n0} ve $UK_{F0nSi100}$ numuneleri gibi yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

4.2.2. UK_{F50} karışımların eğilme dayanımları

Harç karışımında basınç dayanımında olduğu gibi F sınıfı uçucu kül ikame oranı %50 oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Burada optimum nano malzemelerin %50 uçucu kül ikameli karışımların eğilme dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.8. incelenip analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan UK_{F50n0} olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük eğilme dayanım değeri 6,35 MPa, 3 günlük eğilme dayanımı 7,9 MPa, 7 günlük eğilme dayanımı 10,1 MPa 28 günlük eğilme dayanımı 10,75 MPa ve 90 günlük eğilme dayanımı 12,54 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,19 MPa'dır. Bu artış oranı gün bazlı incelendiğinde artış hızı oldukça azdır.



Şekil 4.8. UK_{F50} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

Şekil 4.8. incelendiğinde UK_F içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %50 UK_F ikame edilmiştir (%50 Ç + %50 UK_F). UK_{F50n0} olan numunelerde yaş artışı ile beraber basınç dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 6,35 MPa, 90 günlük dayanım değeri 12,54 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark

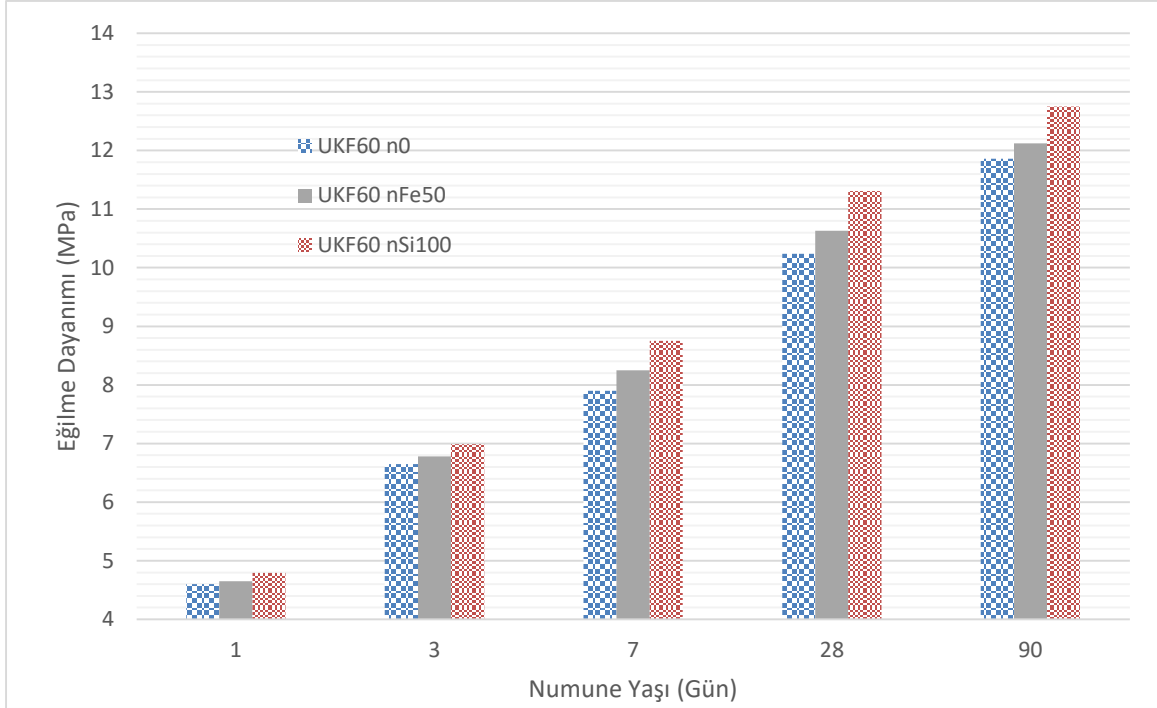
6,19 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%59'una denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

UK_{F50nSi100} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F50nSi100} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 6,5 MPa, 90 günlük dayanım değeri 13,53 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,03 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%55'ine denk gelmektedir. UK_{F50nSi100}'lü numunelerin UK_{F50n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F50nFe50} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin basınç dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F50nFe50} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 6,43 MPa, 90 günlük dayanım değeri 13,13 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,7 MPa'dır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%57'sine denk gelmektedir. UK_{F50n0} ve UK_{F50nSi100} numuneleri gibi yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

4.2.3. UK_{F60} karışımların eğilme dayanımları

F sınıfı uçucu kül %60 ikame oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Burada optimum nano malzemelerin %60 uçucu kül ikameli karışımların eğilme dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.9. incelenip analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan UK_{F60n0} olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük eğilme dayanım değeri 4,6 MPa, 3 günlük 6,65 MPa, 7 günlük 7,9 MPa 28 günlük 10,24 MPa ve 90 günlük 11,86 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,26 MPa'dır. Bu artış oranı gün bazlı incelendiğinde artış hızı oldukça azdır. Dayanım değerlerini incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%45'ine denk gelmektedir.



Şekil 4.9. UK_{F60} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

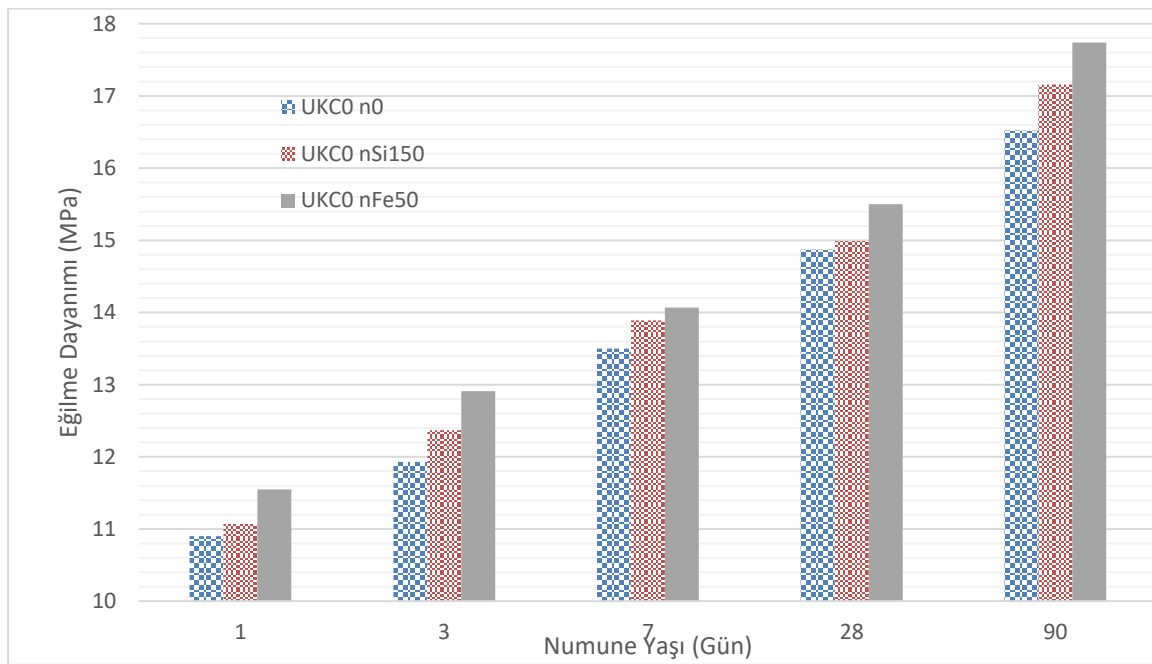
UK_{F60}nSi₁₀₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F60}nSi₁₀₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 4,79 MPa, 90 günlük dayanım değeri 12,75 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,96 MPa'dır. Dayanım değerleri incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%44'üne denk gelmektedir. UK_{F60}nSi₁₀₀'lü numunelerin UK_{F60}n₀ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{F60}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{F60}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 4,65 MPa, 90 günlük dayanım değeri 12,12 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,47 MPa'dır. Dayanım değerleri incelediğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%42'sine denk gelmektedir. Hem nano katkısız hemde nano malzeme (nSi ve nFe) ikameli her 3 harç karışımında da UK kullanımından dolayı dayanım artış hızı oranı artmaktadır.

4.2.4. UK_{C0} karışımların eğilme dayanımları

Harç karışımında C sınıfı uçucu kül ikame edilmemiştir yani kontrol harcı üretilerek nano malzemelerin eğilme dayanımına etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.10. incelenip

analiz edildiğinde nano malzeme kullanılmayan $UK_{C0}n_0$ olan karışım numunelerde yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük eğilme dayanım değeri 10,9 MPa, 3 günlük 11,93 MPa, 7 günlük 13,5 MPa 28 günlük 14,87 MPa ve 90 günlük 16,52 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 5,62 MPa'dır. Bu artış oranı gün bazlı incelendiğinde artış hızı oldukça azdır. Eğilme dayanımı incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%73$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.10. $UK_{C0} nSi$, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

$UK_{C0}nSi_{150}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C0}nSi_{150}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 11,07 MPa, 90 günlük dayanım değeri 17,16 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,09 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin $\sim\%74$ 'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. $UK_{C0}nSi_{150}$ 'lü numunelerin $UK_{C0}n_0$ olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

$UK_{C0}nFe_{50}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C0}nFe_{50}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 11,55 MPa, 90 günlük dayanım değeri 17,74 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,19

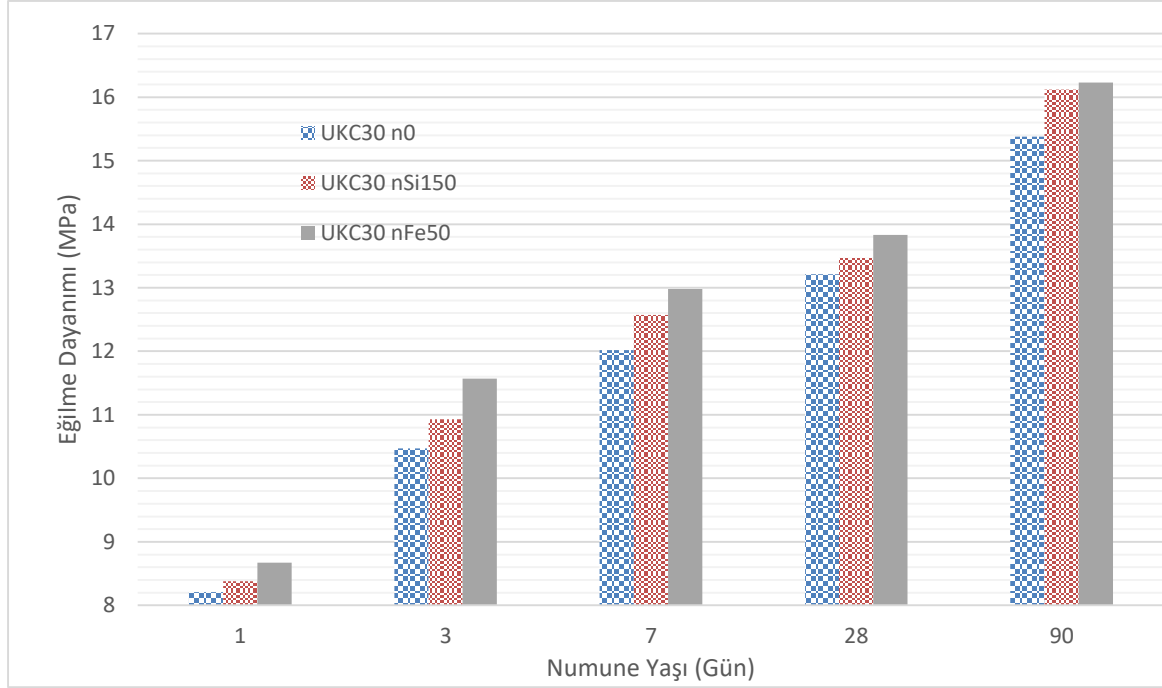
MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%75'ine denk gelmektedir. UK_{C0n0} ve $UK_{C0nSi150}$ numuneleri gibi yaş arttıkça dayanım hızı oranının azaldığı görülmektedir

4.2.5. UK_{C30} karışımların eğilme dayanımları

Şekil 4.11. incelendiğinde UK_C içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %30 UK_C ikame edilmiştir (%70 Ç + %30 UK_C). UK_{C30n0} olan numunelerde yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 8,21 MPa, 90 günlük dayanım değeri 15,38 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,17 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%62'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

$UK_{C30nSi150}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C30nSi150}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 8,38 MPa, 90. günlük dayanım değeri 16,12 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,94 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%62'sine denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. $UK_{C30nSi150}$ 'li numunelerin UK_{C30n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

$UK_{C30nFe50}$ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. $UK_{C30nFe50}$ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 8,67 MPa, 90 günlük dayanım değeri 16,23 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 7,56 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%63'üne denk gelmektedir. UK_{C30n0} ve $UK_{C30nSi150}$ numuneleri gibi yaş arttıkça dayanım hızı oranının azaldığı görülmektedir.



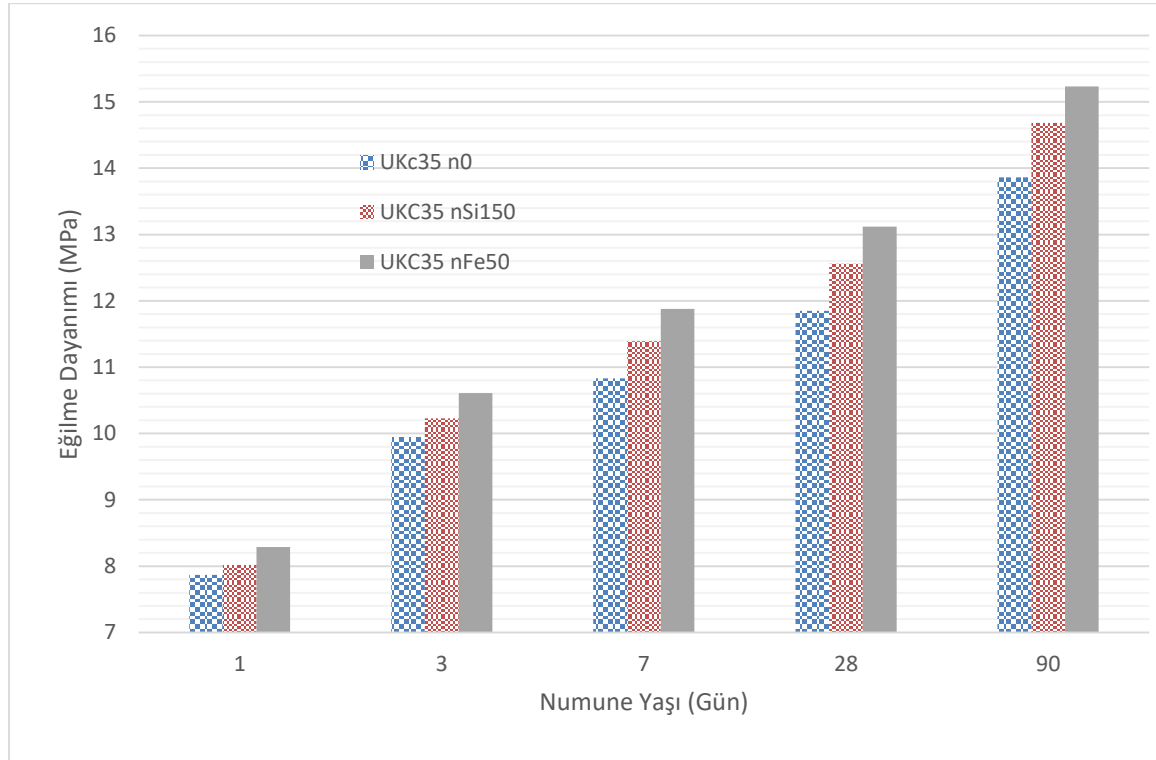
Şekil 4.11. UK_{C30} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

4.2.6. UK_{C35} karışımların eğilme dayanımları

Şekil 4.12. incelendiğinde UK_C içermeyen karışım ve UK_{C30} içeren karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %35 UK_C ikame edilmiştir (%65 Ç + %35 UK_C). UK_{C35n0} olan numunelerde yaş artışı ile beraber eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. Numunenin 1 günlük dayanım değeri 7,87 MPa, 90 günlük dayanım değeri 13,86 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 5,99 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%66'sına denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir.

UK_{C35nSi150} olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C35nSi150} numunesinin 1 günlük dayanım değeri 8,02 MPa, 90 günlük dayanım değeri 14,68 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,66 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%64'üne denk gelmektedir. Böylelikle yaş arttıkça dayanımda artış beklenmesine rağmen artış hızı oranının azaldığı görülmektedir. UK_{C35nSi150}'li numunelerin UK_{C35n0} olan numunelere göre dayanım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

UK_{C35}nFe₅₀ olan numunelerde de yaş artışı ile beraber nano malzemelerin eğilme dayanımına etkileri görülmektedir. UK_{C35}nFe₅₀ numunesinin 1 günlük dayanım değeri 8,29 MPa, 90 günlük dayanım değeri 15,23 MPa'dır. İlk ve son gün dayanım değerleri arasındaki fark 6,94 MPa'dır. Dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanım değeri ilk gün dayanım değerinin ~%63'üne denk gelmektedir. UK_{C35}n₀ ve UK_{C35}nSi₁₅₀ numuneleri gibi yaş arttıkça dayanım hızı oranının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.12. UK_{C35} nSi, nFe numunelerin eğilme dayanımı – yaş ilişkisi

Sonuçlar incelendiğinde nano malzeme (nSi ve nFe) ikame edilen harçların nano malzeme ikame edilmeyen harçlara göre ilk yaşlardan itibaren eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Lifle hidratasyona uğramış çimentonun, ara yüz bölgesi çimentonun mikro yapısını etkilediği için eğilme dayanımı özelliklerini de etkilemektedir. Böylelikle nano malzemelerin (nSi ve nFe) küçük boyutlarından dolayı ara yüz özelliklerini iyileştirip geliştirdiğinden eğilme dayanımını arttırdığı söylenebilir. Nano malzemeler hidratasyon tepkimelerinde hızı arttırıcı özelliğinden dolayı da eğilme dayanımı artışına neden olduğu söylenebilir [83].

4.3. Elastisite Modülü

Betonun en önemli mekanik özelliklerinden biri olan Elastisite modülü (E) betonarme eleman dizaynında oldukça önemlidir. E'nün belirlenmesi, eğilme dayanımının belirlenmesi kadar kolay değildir. Ayrıca E eğilme etkisi altındaki elemanlarda, eğilme dayanımı gibi etki meydana getirmektedir. Araştırmalarda genellikle, E'nü saptamanın önemi ve dayanımı yüksek betonun mekanik özelliklerine etki eden değişkenlerin önemine vurgu yapılmaktadır [142]. Beton sınıfları arasında 4 kata kadar basınç dayanımları arasında fark olabilirken, E'leri arasındaki fark iki kata bile ulaşmadığı bilinmektedir. Neden olarak, su/çimento oranının azalmasıyla ortaya çıkan içyapı farklılıklarına E'nün basınç dayanımı gibi hassas davranış sergilemediğini belirtmektedir [143]. Yükleme anında beton homojen yapıya sahip olmadığından, içyapısındaki agrega-çimento ara yüzü ve çimento hamurunun matrisi değişken davranışlar göstermektedir. Betonun içyapısındaki fazların değişimi ile E'nde farklı değerler ortaya çıkmaktadır. E'nü etki eden en önemli faktörler; çimento hamurunun matrisi, agreganın elastisitesi, porozitesi ve ara yüz özellikleri diyebiliriz. Eğer agrega boşluksuz ve E yüksek olursa betonun elastisite değerini artırır. Su/çimento oranı azalırsa böylelikle harcın elastisitesi yüksek olur [144]. Karışımlardaki E değerlerini tayin etmek için 90 günlük 100x200 mm boyutundaki silindir numunelerin ASTM C469 [134]'a göre E testi yapılmıştır. Hem UK_F 'lü, hemde UK_C 'lü karışımların EM deney düzeneği (Resim 4.1.).

Çizelge 4.1. incelendiğinde UK_{F0n0} (%100 Ç + %0 UK_F) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{F0nFe50}$ 21,04 MPa en düşük değer ise UK_{F0n0} 20,15 MPa'dır. UK_{F50n0} (%50 Ç + %50 UK_F) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{F50nSi100}$ 16,5 MPa en düşük değer ise UK_{F50n0} 15,93 MPa'dır. UK_{F60n0} (%40 Ç + %60 UK_F) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{F60nSi100}$ 15,92 MPa en düşük değer ise UK_{F60n0} 15,07 MPa'dır.

Çizelge 4.2. incelendiğinde UK_{C0n0} (%100 Ç + %0 UK_C) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{C0nFe50}$ 21,04 MPa en düşük değer ise UK_{C0n0} 20,15 MPa'dır. UK_{C30n0} (%70 Ç + %30 UK_C) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{C30nFe50}$ 18,38 MPa en düşük değer ise UK_{C30n0} 17,89 MPa'dır. UK_{C35n0} (%65 Ç + %35 UK_C) olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin E değerleri içinde en büyük değer $UK_{C35nFe50}$ 17,72 MPa en düşük değer ise UK_{C35n0} 16,68 MPa'dır.

Çizelge 4.1. ve 4.2. incelendiğinde çimentoya belli oranlarda hem UK_F hem de UK_C ikame edilmesi ile birlikte E değerini düşüren bir değişken olduğu görülmektedir. UK_F için nSi , nFe ve n_0 numunelerin tamamında %50 ve %60 UK_F ikameli karışımların %0 UK_F 'lü karışımlara göre E düşük, %60 UK_F ikameli karışımlarında %50 UK_F ikameli karışımlara göre E daha düşüktür. UK_C için nSi , nFe ve n_0 numunelerin tamamında %30 ve %35 UK_C ikameli karışımların %0 UK_C 'lü karışımlara göre E düşük, %35 UK_C ikameli karışımlarında %30 UK_C ikameli karışımlara göre E daha düşüktür.

Sonuçlar incelendiğinde nano malzeme (nSi ve nFe) ikame edilen harçların nano malzeme ikame edilmeyen harçlara göre E değerlerinin arttığı görülmüştür. Her 2 nano malzemeninde betonun ara yüz geçiş bölgesini iyileştirerek basınç dayanımı ve mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir. Nano malzemeler betonda gözenekleri doldurduğundan çimento hamurunun mikro yapısını geliştirir. Ayrıca porozitenin düşmesini sağladığı içinde E değerlerini arttırdığı görülmektedir [81].

Çizelge 4.1. UK_F 'lü n_0 , nSi ve nFe 'lü tasarımların EM'leri

Elastisite Modülü	$UK_{F0}n_0$	$UK_{F0}nSi_{100}$	$UK_{F0}nFe_{50}$
E (GPa)	20,15	20,18	21,04
	$UK_{F50}n_0$	$UK_{F50}nSi_{100}$	$UK_{F50}nFe_{50}$
E (GPa)	15,93	16,5	16,42
	$UK_{F60}n_0$	$UK_{F60}nSi_{100}$	$UK_{F60}nFe_{50}$
E (GPa)	15,07	15,92	15,75

Çizelge 4.2. CU_K 'lü n_0 , nSi ve nFe 'lü tasarımların EM'leri

Elastisite Modülü	$UK_{C0}n_0$	$UK_{C0}nSi_{150}$	$UK_{C0}nFe_{50}$
E (GPa)	20,15	20,86	21,04
	$UK_{C30}n_0$	$UK_{C30}nSi_{150}$	$UK_{C30}nFe_{50}$
E (GPa)	17,89	18,2	18,38
	$UK_{C35}n_0$	$UK_{C35}nSi_{150}$	$UK_{C35}nFe_{50}$
E (GPa)	16,68	17,42	17,72



Resim 4.1. UK_F 'lü ve UK_C 'lü tasarımlara ait EM deney düzeneği

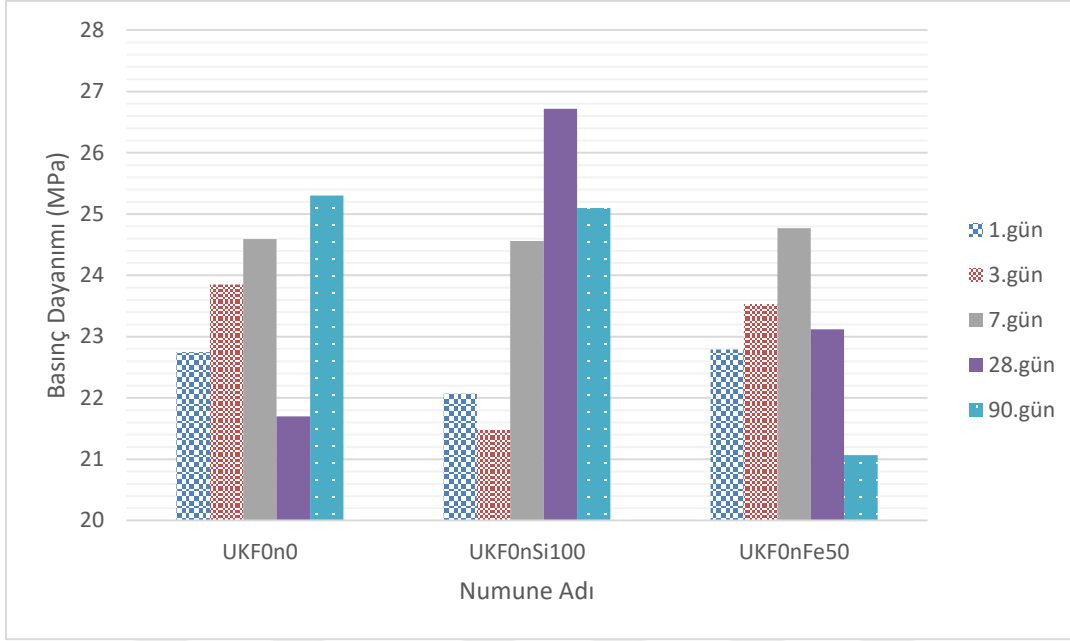
4.4. Eğik Kesme Dayanımı

4.4.1. UK_{F0} karışımların eğik kesme dayanımları

Betonun onarım, tamir, güçlendirme vb. uygulamalarında eski ve yeni beton aderans sağlayıp kompozit bir malzeme gibi hareket etmelidir. Örneğin; otoyollarda, tünellerde vb. zarar gören beton tabakası yeni betonla değiştirilir. Kompozit yapı davranışı sergileyebilmesi için yüzeyin temiz olması, rutubet kalmaması, malzemenin iyi sıkıştırılması ve bağlayıcı madde önemli etkenlerdir. Agreganın; boyutu, şekli ve yüzeyinin hazırlanması agreganın kenetlenmesi ve ara yüzdeki sürtünmesini etkileyen faktörlerdir [145].

Tüm yapılan deneylerde farklı eğik yüzeye sahip 100x200 mm basınç dayanımı 25 MPa olan önceden dökülmüş eski normal beton silindir numunelerle, YPLDÇK malzeme içeren karışımlardan oluşan yeni betonla bağ dayanımı etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.13. incelendiğinde UK_{F0} olan nSi, nFe ve n_0 numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir. eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.2.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.13. UK_{F0} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanım–yaş ilişkisi

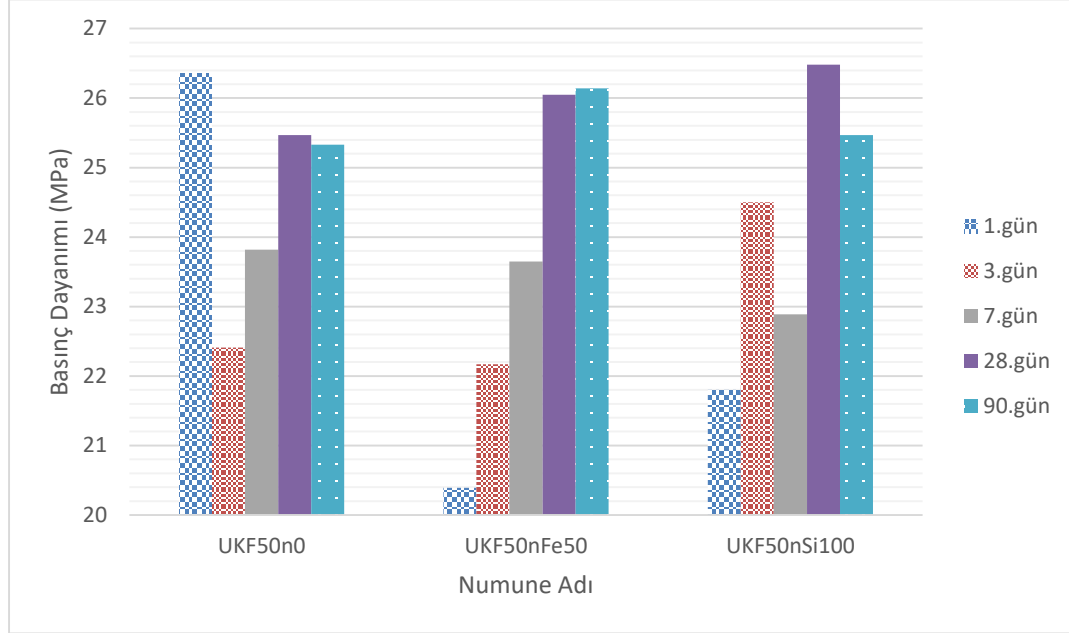


Resim 4.2. UK_F oranı %0 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

4.4.2. UK_{F50} karışımların eğik kesme dayanımları

Şekil 4.14. incelendiğinde UK_F içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %50 UK_F ikame edilmiştir (%50 Ç + %50 UK_F). UK_{F50} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir. eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.3.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana

geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.14. UK_{F50} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi

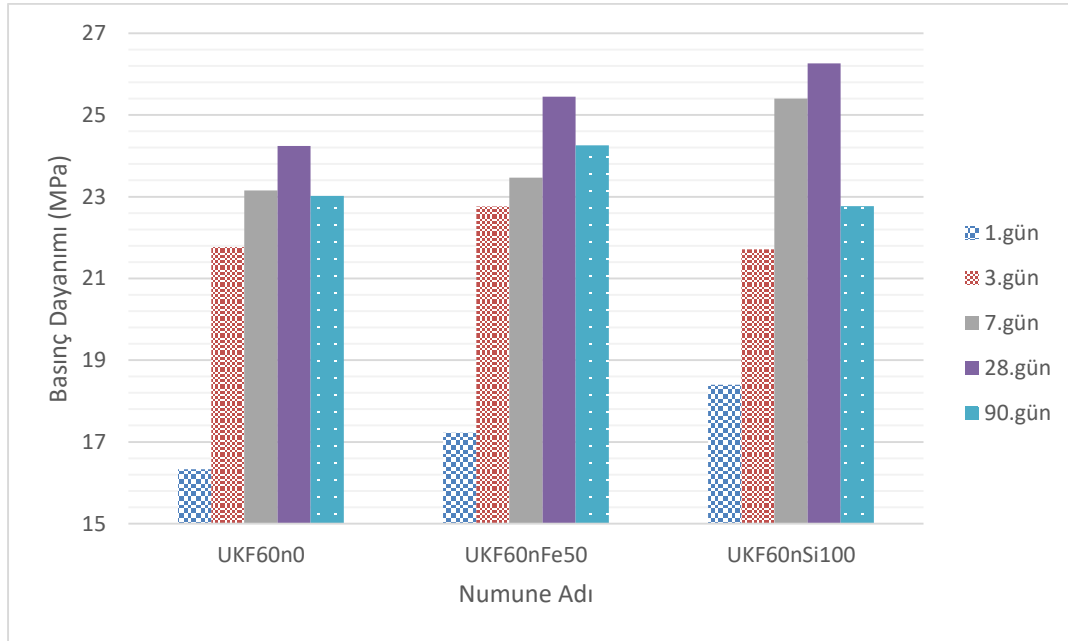


Resim 4.3. UK_F oranı %50 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

4.4.3. UK_{F60} karışımların eğik kesme dayanımları

Şekil 4.15. incelendiğinde UK_F içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %60 UK_F ikame edilmiştir (%40 Ç + %60 UK_F). UK_{F60} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir.

eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.4.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



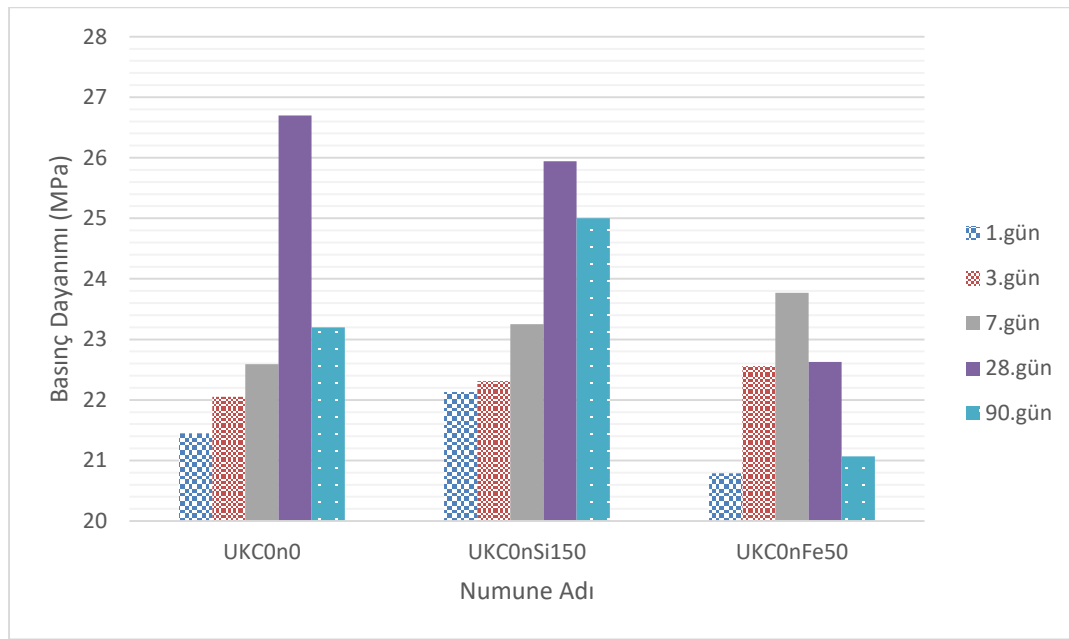
Şekil 4.15. UKF₆₀ nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi



Resim 4.4. UK_F oranı %60 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

4.4.4. UK_{C0} karışımların eğik kesme dayanımları

Şekil 4.16. incelendiğinde UK_{C0} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir. eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.5.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



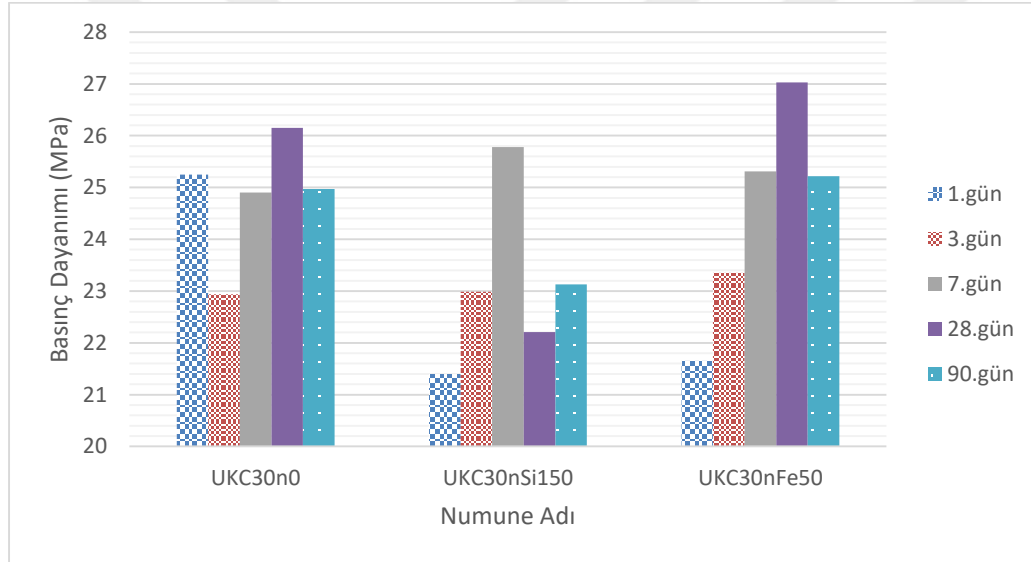
Şekil 4.16. UK_{C0} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı – yaş ilişkisi



Resim 4.5. UK_C oranı %0 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

4.4.5. UK_{C30} karışımların eğik kesme dayanımları

Şekil 4.17. incelendiğinde UK_C içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %30 UK_C ikame edilmiştir (%70 Ç + %30 UK_C). UK_{C30} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir. eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.6.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



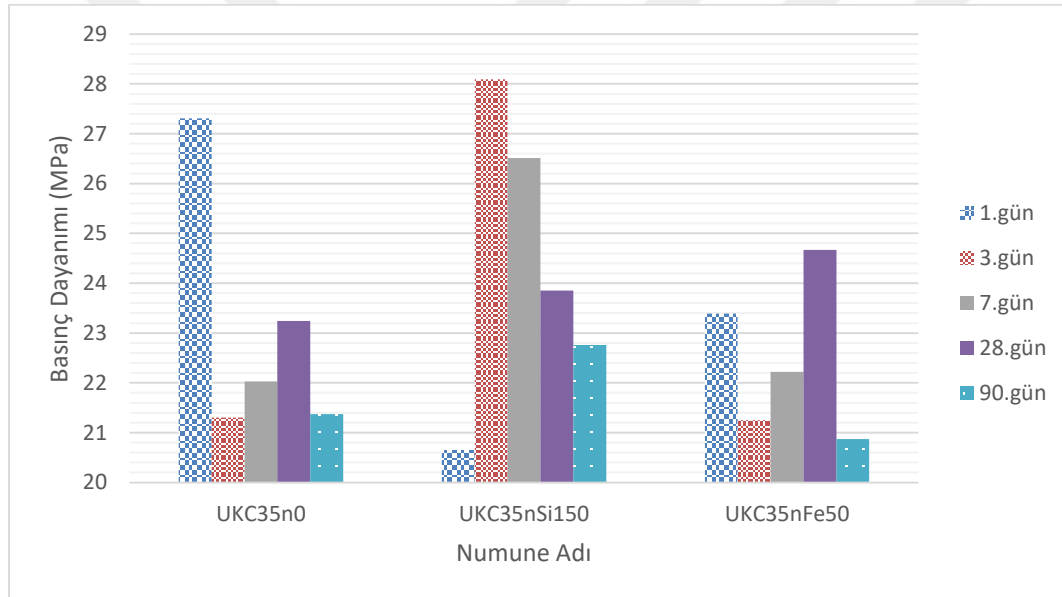
Şekil 4.17. UK_{C30} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi



Resim 4.6. UK_C oranı %30 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

4.4.6. UK_{C35} karışımların eğik kesme dayanımları

Şekil 4.18. incelendiğinde UK_C içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %35 UK_C ikame edilmiştir (%65 Ç + %35 UK_C). UK_{C35} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin tüm yaşlarda meydana gelen kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmiştir. eski normalbeton ile YPLDÇK birleşiminin gerçekleştiği eğik ara yüzeyde kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir. Tüm yaşlarda kırılmalar eski normalbetonda meydana gelmiştir (Resim 4.7.). YPLDÇK malzeme için beklenenin üzerinde bağ dayanımı meydana geldiği ve nano malzemenin boyutundan dolayı ara yüzü iyileştirerek geliştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.18. UK_{C35} nSi, nFe numunelerin eğik kesme dayanımı–yaş ilişkisi



Resim 4.7. UK_C oranı %35 olan eğik kesme numunelerinin basınç dayanımı görseli

Sonuçlar incelendiğinde nano malzeme (nSi ve nFe) ikame edilen harçların nano malzeme ikame edilmeyen harçlara göre bağ dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Nano malzemeler etkisiyle ara yüzde iyileşmeler olduğundan, tüm yaşlar için numunelerin ara yüzlerinde kayma ve sıyrılma meydana gelmemiştir. Kırılmaların tamamı eski normalbetonda meydana gelmesinin sebebi ise dayanım değerlerinin eski normalbetondan yüksek olmasıdır.

4.5. Kuruma Rötresi

Kuruma rötresi sebebiyle, çimento içeren malzemelerde katmanlar arası su hareketi meydana gelmekte, böylelikle çatlama ve performans bozulması ortaya çıkmaktadır [146]. Çimento içeren malzemelerde hidrasyon esnasında hacimde oluşan değişim, kaybolan su hacmine eşit değildir. Kuruma süreci ilerlerken, emilmiş su çimento içerikli harcın yapısından kaybolmaktadır. Böylelikle çimento hamurundaki hacmin değişimi, jel parçacıklarının bütün yüzeylerinden 1 molekül kalınlıkta olan su kaybına eşittir [147]. Bundan dolayı, jelin fiziksel yapısının, kimyasal ve mineralojik özelliklerinden daha önemli olduğu söylenebilir.

Çimento hamurunun rötresi için üç ana mekanizma olarak; kılcal gerilmeler, ayrılma basıncı ve yüzey serbest enerjisindeki değişimler (Gibbs-Bangham etkisi) tanımlanmaktadır [148]. Mindess and Young bu 3 mekanizmayı, i) Küçük kılcal boşluk ağı ve yüksek porozite, ii) C-S-H jelindeki Van der Waals bağları ve iii) Küçük C-S-H parçacıklarına bağlamaktadır. Birçok araştırmacı; kuruma rötresinin ayrılma basıncı, kılcal gerilmeler ve yüzeyde meydana gelen serbest enerjideki değişimden dolayı ortaya çıkan iç basıncın bir fonksiyonu olduğu belirtilmektedir [148,149]. Kılcal gerilmelerden dolayı rötrenin %25 rölatif nemin üzerinde aktif olduğu belirlenmiştir. İlk kuruma rötresinin geriye kalan %67'lik kısmı ise Gibbs-Bangham etkisi ve 25 kılcallık etkisi neticesinde ortaya çıkan gerilmelerin sebep olduğu kalıcı rötre olarak değerlendirilmektedir [150].

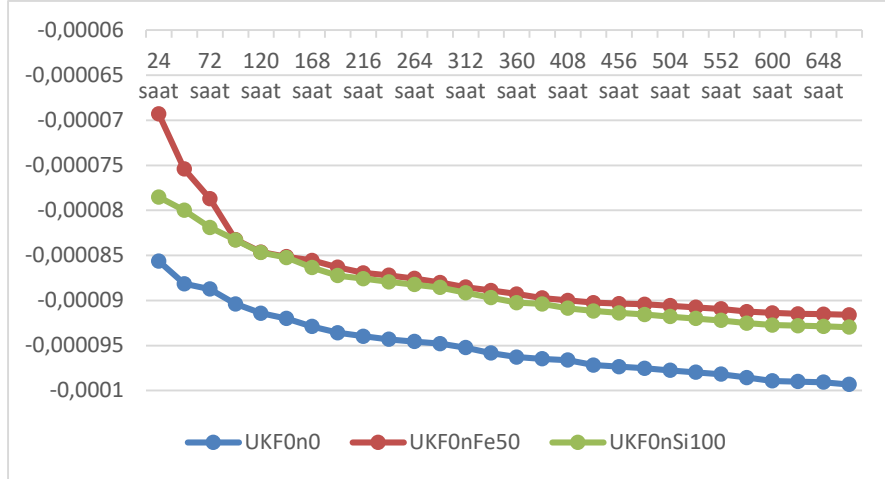
4.5.1. UK_{F0} karışımların kuruma rötreleri

Şekil 4.19. ve çizelge 4.3 incelendiğinde UK_{F0} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 4. güne kadar numunelerin boy kısılması hızlı bir şekilde olurken, 4. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısılması

yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısalma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.3. UK_{F0} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{F0} n ₀	UK _{F0} nSi ₁₀₀	UK _{F0} nFe ₅₀
24	-8,56207E-05	-7,85172E-05	-6,92759E-05
48	-8,81379E-05	-8E-05	-7,54138E-05
72	-8,87241E-05	-8,18966E-05	-7,86897E-05
96	-9,03793E-05	-8,32759E-05	-8,32414E-05
120	-9,14138E-05	-8,46897E-05	-8,46207E-05
144	-9,2E-05	-8,52414E-05	-8,51379E-05
168	-9,28966E-05	-8,63448E-05	-8,55517E-05
192	-9,35862E-05	-8,72414E-05	-8,63103E-05
216	-9,39655E-05	-8,75862E-05	-8,6931E-05
240	-9,43103E-05	-8,7931E-05	-8,72069E-05
264	-9,45517E-05	-8,82414E-05	-8,75517E-05
288	-9,47931E-05	-8,85517E-05	-8,8E-05
312	-9,52414E-05	-8,91379E-05	-8,85172E-05
336	-9,58276E-05	-8,96897E-05	-8,88966E-05
360	-9,62759E-05	-9,02414E-05	-8,92759E-05
384	-9,64828E-05	-9,03793E-05	-8,97241E-05
408	-9,66207E-05	-9,08621E-05	-9E-05
432	-9,71724E-05	-9,11724E-05	-9,02414E-05
456	-9,73448E-05	-9,13793E-05	-9,03448E-05
480	-9,75172E-05	-9,15517E-05	-9,04138E-05
504	-9,77586E-05	-9,17931E-05	-9,05862E-05
528	-9,79655E-05	-9,2E-05	-9,07586E-05
552	-9,81724E-05	-9,22069E-05	-9,0931E-05
576	-9,85517E-05	-9,25172E-05	-9,12414E-05
600	-9,8931E-05	-9,27241E-05	-9,13793E-05
624	-9,9E-05	-9,27931E-05	-9,14828E-05
648	-9,9069E-05	-9,28621E-05	-9,15172E-05
672	-9,93103E-05	-9,29655E-05	-9,15862E-05



Şekil 4.19. UK_{F0} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

4.5.2. UK_{F50} karışımların kuruma rötreleri

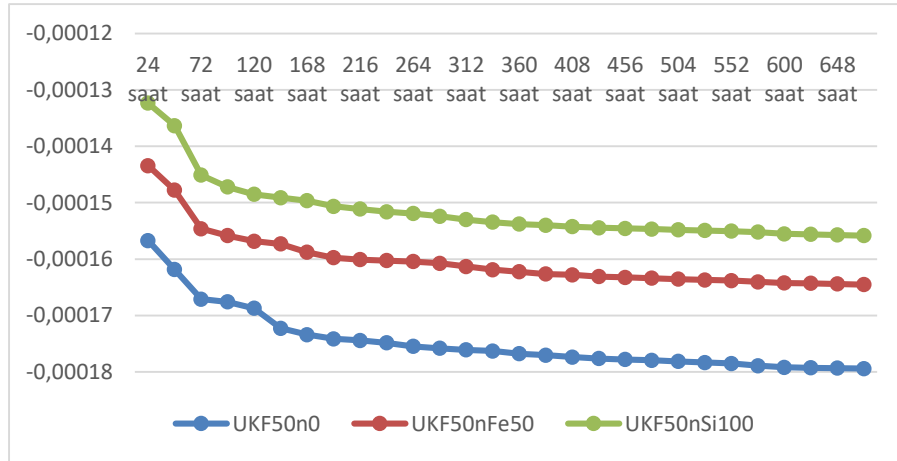
Şekil 4.20. ve çizelge 4.4. incelendiğinde UK_F içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %50 UK_F ikame edilmiştir (%50 Ç + %50 UK_F). UK_{F50} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 3. güne kadar numunelerin boy kısalması hızlı bir şekilde olurken, 3. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısalması yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısalma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.4. UK_{F50} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{F50} n ₀	UK _{F50} nSi ₁₀₀	UK _{F50} nFe ₅₀
24	-0,000156724	-0,0001323448	-0,000143448
48	-0,000161862	-0,0001363448	-0,000147793
72	-0,000167103	-0,0001451034	-0,000154621
96	-0,000167586	-0,0001472069	-0,000155828
120	-0,000168724	-0,0001485172	-0,000156828
144	-0,000172276	-0,0001491034	-0,00015731
168	-0,000173414	-0,0001496552	-0,000158793
192	-0,000174138	-0,0001506552	-0,000159759
216	-0,000174414	-0,0001511379	-0,000160103
240	-0,000174862	-0,0001516207	-0,000160276
264	-0,000175483	-0,0001519310	-0,000160448
288	-0,000175828	-0,0001524138	-0,000160759

Çizelge 4.4. (devam) UK_{F50} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{F50} n ₀	UK _{F50} nSi ₁₀₀	UK _{F50} nFe ₅₀
312	-0,000176103	-0,0001530000	-0,00016131
336	-0,00017631	-0,0001534483	-0,000161897
360	-0,000176793	-0,0001537931	-0,000162241
384	-0,000177034	-0,0001540000	-0,000162655
408	-0,000177379	-0,0001542414	-0,000162793
432	-0,000177621	-0,0001544483	-0,000163103
456	-0,000177793	-0,0001545517	-0,000163241
480	-0,000177931	-0,0001546897	-0,000163379
504	-0,000178138	-0,0001548276	-0,000163552
528	-0,000178345	-0,0001549310	-0,00016369
552	-0,000178517	-0,0001550345	-0,000163828
576	-0,000178897	-0,0001552069	-0,000164034
600	-0,000179207	-0,0001555172	-0,000164241
624	-0,000179276	-0,0001556207	-0,00016431
648	-0,000179345	-0,0001557241	-0,000164414
672	-0,000179414	-0,0001558276	-0,000164517

Şekil 4.20. UK_{F50} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

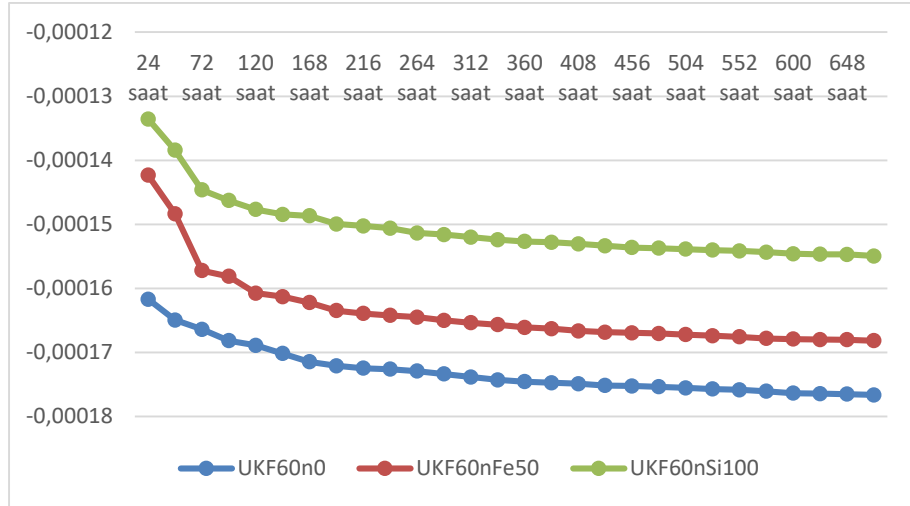
4.5.3. UK_{F60} karışımların kuruma rötreleri

Şekil 4.21. ve çizelge 4.5 incelendiğinde UK_F içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %60 UK_F ikame edilmiştir (%40 Ç + %60 UK_F). UK_{F60} olan nSi, nFe ve n₀

numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 3. güne kadar numunelerin boy kısalması hızlı bir şekilde olurken, 3. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısalması yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısalma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.5. UK_{F60} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{F60} n ₀	UK _{F60} nSi ₁₀₀	UK _{F60} nFe ₅₀
24	-0,00016169	-0,000133552	-0,00014231
48	-0,000164931	-0,000138414	-0,000148345
72	-0,000166379	-0,000144621	-0,000157207
96	-0,000168138	-0,000146276	-0,000158103
120	-0,000168862	-0,000147655	-0,000160724
144	-0,000170138	-0,000148448	-0,000161276
168	-0,000171448	-0,000148655	-0,000162207
192	-0,000172069	-0,000149931	-0,000163448
216	-0,000172448	-0,000150241	-0,000163897
240	-0,000172586	-0,000150586	-0,000164207
264	-0,000172897	-0,000151345	-0,000164483
288	-0,000173345	-0,000151586	-0,000164966
312	-0,000173828	-0,000152	-0,000165345
336	-0,000174276	-0,000152379	-0,000165655
360	-0,000174552	-0,000152655	-0,000166069
384	-0,000174724	-0,000152793	-0,000166276
408	-0,000174862	-0,000153034	-0,000166621
432	-0,000175138	-0,000153345	-0,000166828
456	-0,000175207	-0,000153621	-0,000166931
480	-0,000175345	-0,000153724	-0,000167034
504	-0,000175517	-0,000153862	-0,000167207
528	-0,00017569	-0,000154	-0,000167379
552	-0,000175828	-0,000154138	-0,000167552
576	-0,000176034	-0,000154345	-0,000167793
600	-0,000176345	-0,000154586	-0,000167897
624	-0,000176414	-0,000154655	-0,000167966
648	-0,000176483	-0,00015469	-0,000168
672	-0,000176621	-0,000154931	-0,000168138



Şekil 4.21. UK_{F60} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

4.5.4. UK_{C0} karışımların kuruma rötreleri

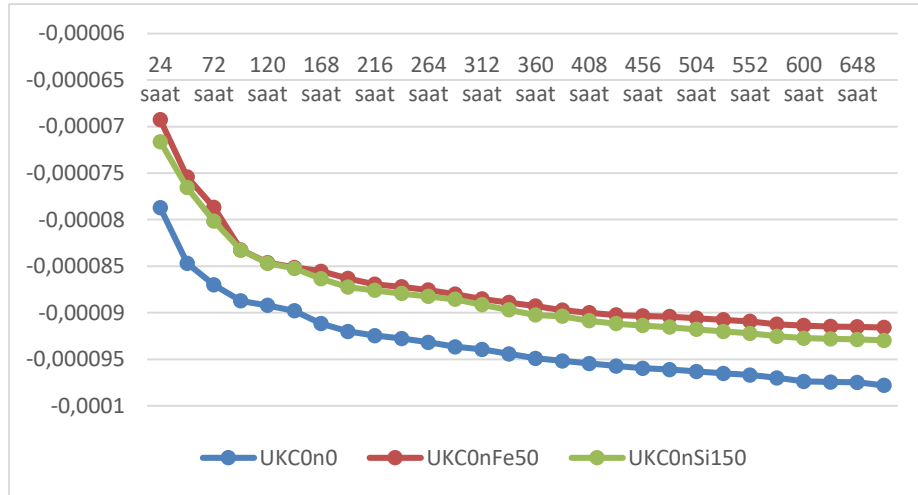
Şekil 4.22. ve çizelge 4.6. incelendiğinde UK_{C0} olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 4. güne kadar numunelerin boy kısalması hızlı bir şekilde olurken, 4. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısalması yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısalma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.6. UK_{C0} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{C0} n ₀	UK _{C0} nSi ₁₅₀	UK _{C0} nFe ₅₀
24	-7,87241E-05	-7,16207E-05	-6,92759E-05
48	-8,46897E-05	-7,65517E-05	-7,54138E-05
72	-8,7E-05	-8,01724E-05	-7,86897E-05
96	-8,87241E-05	-8,32759E-05	-8,32414E-05
120	-8,92069E-05	-8,46897E-05	-8,46207E-05
144	-8,97931E-05	-8,52414E-05	-8,51379E-05
168	-9,11724E-05	-8,63448E-05	-8,55517E-05
192	-9,2E-05	-8,72414E-05	-8,63103E-05
216	-9,24483E-05	-8,75862E-05	-8,6931E-05
240	-9,27586E-05	-8,7931E-05	-8,72069E-05
264	-9,31724E-05	-8,82414E-05	-8,75517E-05
288	-9,36552E-05	-8,85517E-05	-8,8E-05

Çizelge 4.6. (devam) UK_{C0} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{C0n0}	UK _{C0nSi150}	UK _{C0nFe50}
312	-9,3931E-05	-8,91379E-05	-8,85172E-05
336	-9,44138E-05	-8,96897E-05	-8,88966E-05
360	-9,48966E-05	-9,02414E-05	-8,92759E-05
384	-9,51724E-05	-9,03793E-05	-8,97241E-05
408	-9,54483E-05	-9,08621E-05	-9E-05
432	-9,57241E-05	-9,11724E-05	-9,02414E-05
456	-9,59655E-05	-9,13793E-05	-9,03448E-05
480	-9,61034E-05	-9,15517E-05	-9,04138E-05
504	-9,63103E-05	-9,17931E-05	-9,05862E-05
528	-9,65172E-05	-9,2E-05	-9,07586E-05
552	-9,66897E-05	-9,22069E-05	-9,0931E-05
576	-9,7E-05	-9,25172E-05	-9,12414E-05
600	-9,73793E-05	-9,27241E-05	-9,13793E-05
624	-9,74483E-05	-9,27931E-05	-9,14828E-05
648	-9,74828E-05	-9,28621E-05	-9,15172E-05
672	-9,77931E-05	-9,29655E-05	-9,15862E-05

Şekil 4.22. UK_{C0} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

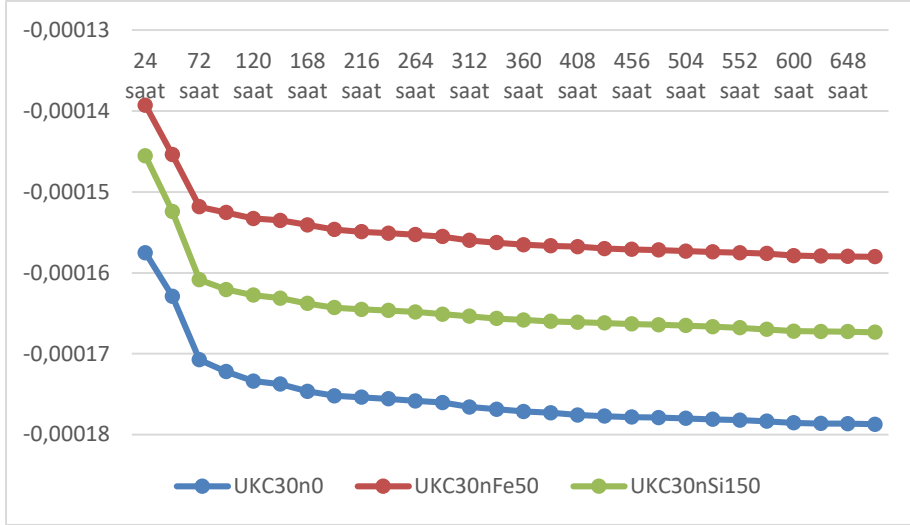
4.5.5. UK_{C30} karışımların kuruma rötreleri

Şekil 4.23. ve çizelge 4.7. incelendiğinde UK_C içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %30 UK_C ikame edilmiştir (%70 Ç + %30 UK_C). UK_{C30} olan nSi, nFe ve n₀

numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 3. güne kadar numunelerin boy kısılması hızlı bir şekilde olurken, 3. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısılması yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısılma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.7. UK_{C30} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{C30} n ₀	UK _{C30} nSi ₁₅₀	UK _{C30} nFe ₅₀
24	-0,000157517	-0,000145552	-0,000139276
48	-0,000162897	-0,000152414	-0,000145379
72	-0,000170759	-0,000160862	-0,000151828
96	-0,000172207	-0,000162069	-0,000152552
120	-0,000173379	-0,000162759	-0,000153276
144	-0,000173759	-0,000163138	-0,000153517
168	-0,000174655	-0,000163793	-0,000154069
192	-0,000175207	-0,00016431	-0,000154655
216	-0,000175379	-0,000164517	-0,000154931
240	-0,000175586	-0,000164655	-0,000155103
264	-0,000175828	-0,000164828	-0,000155276
288	-0,000176034	-0,000165103	-0,000155517
312	-0,000176586	-0,000165379	-0,000156
336	-0,000176862	-0,000165655	-0,000156276
360	-0,000177138	-0,000165828	-0,000156517
384	-0,00017731	-0,000166	-0,000156655
408	-0,000177586	-0,000166103	-0,000156759
432	-0,000177724	-0,000166207	-0,000157
456	-0,000177828	-0,00016631	-0,000157103
480	-0,000177897	-0,000166414	-0,000157172
504	-0,000178	-0,000166517	-0,00015731
528	-0,000178103	-0,000166655	-0,000157414
552	-0,000178207	-0,000166793	-0,000157517
576	-0,000178345	-0,000167	-0,000157621
600	-0,000178552	-0,000167207	-0,000157862
624	-0,000178621	-0,000167241	-0,000157931
648	-0,000178655	-0,000167276	-0,000157966
672	-0,000178724	-0,000167345	-0,000158



Şekil 4.23. UKC₃₀ nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

4.5.6. UKC₃₅ karışımların kuruma rötreleri

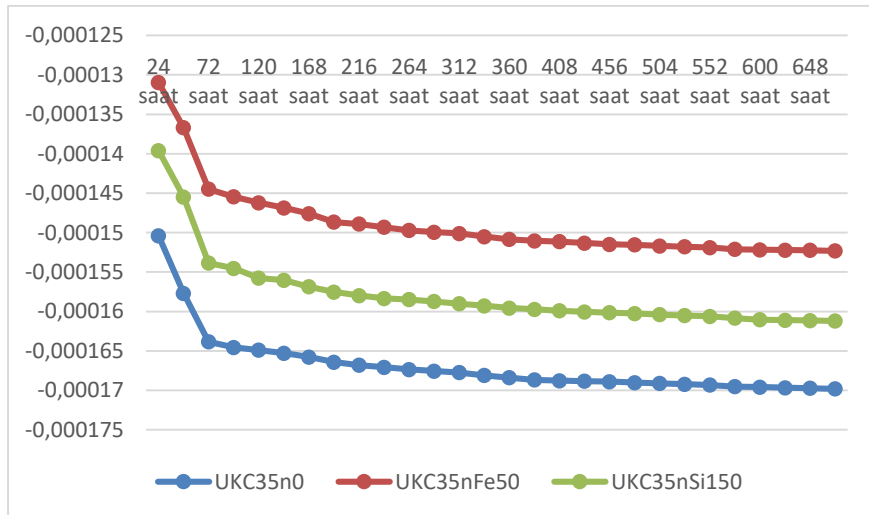
Şekil 4.24. ve çizelge 4.8. incelendiğinde UK_C içermeyen karışımdan farklı olarak %100 çimento yerine %35 UK_C ikame edilmiştir (%65 Ç + %35 UK_C). UKC₃₅ olan nSi, nFe ve n₀ numunelerin 1. gün ile 28. gün arasındaki boy değişimi değerleri incelenmiştir. 3. güne kadar numunelerin boy kısalması hızlı bir şekilde olurken, 3. günden 28. güne kadarki numunelerin boy kısalması yatay bir hal almıştır. Yani zamanla boydaki deformasyon azalmaktadır. Zamanla meydana gelen boy kısalma ilişkisi literatürle uyum göstermektedir.

Çizelge 4.8. UKC₃₅ nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UKC ₃₅ n ₀	UKC ₃₅ nSi ₁₅₀	UKC ₃₅ nFe ₅₀
24	-0,000150414	-0,0001396207	-0,000130966
48	-0,00015769	-0,0001454828	-0,00013669
72	-0,000163828	-0,0001538621	-0,000144483
96	-0,000164552	-0,0001545172	-0,000145448
120	-0,000164897	-0,0001557586	-0,000146207
144	-0,000165276	-0,0001560345	-0,000146862
168	-0,000165759	-0,0001568621	-0,000147586
192	-0,000166414	-0,0001575172	-0,000148655
216	-0,000166793	-0,0001579655	-0,000148897
240	-0,000167069	-0,0001583448	-0,00014931
264	-0,000167345	-0,0001584828	-0,000149724

Çizelge 4.8. (devam) UK_{C35} nSi, nFe numunelerin kuruma rötreleri

Zaman (Saat)	UK _{C35} n ₀	UK _{C35} nSi ₁₅₀	UK _{C35} nFe ₅₀
288	-0,000167552	-0,0001587241	-0,000149931
312	-0,000167724	-0,0001590000	-0,000150103
336	-0,000168103	-0,0001592759	-0,000150517
360	-0,000168379	-0,0001595517	-0,000150862
384	-0,000168655	-0,0001597241	-0,000151034
408	-0,000168759	-0,0001598966	-0,000151138
432	-0,000168828	-0,0001600345	-0,00015131
456	-0,000168897	-0,0001601379	-0,000151483
480	-0,000169	-0,0001602414	-0,000151552
504	-0,000169103	-0,0001603793	-0,00015169
528	-0,000169207	-0,0001605172	-0,000151793
552	-0,00016931	-0,0001606207	-0,000151897
576	-0,000169517	-0,0001608276	-0,000152103
600	-0,000169586	-0,0001610345	-0,000152172
624	-0,000169655	-0,0001611034	-0,000152207
648	-0,000169724	-0,0001611379	-0,000152241
672	-0,000169793	-0,0001612069	-0,00015231

Şekil 4.24. UK_{C35} nSi, nFe numunelerin zaman – kuruma rötresi ilişkisi

4.6. Hızlı Klor İyon Geçirirliiği

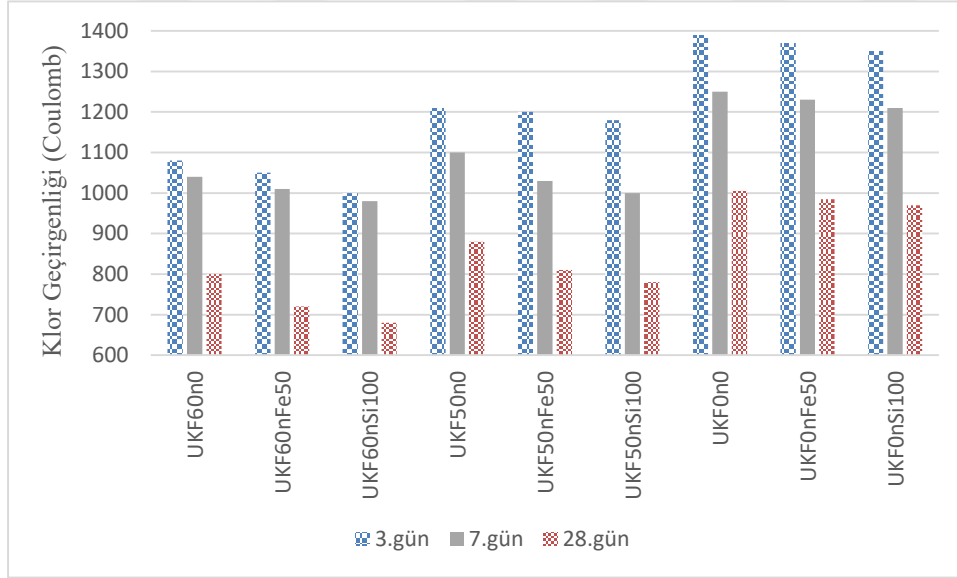
Betona klor; kılcal su emme, hidrostatik basınç, difüzyon ve buharlaşma yoluyla nüfuz edebilir. Betonun dışındaki klor konsantrasyonu içinden fazla olduğunda difüzyon oluşur. Beton içerisindeki klor iyonu difüzyonunu saptayabilmek için konsantrasyon-mesafe ilişkisi ortaya çıkarılmalıdır. Klor konsantrasyonu betonun kalitesi ve çevresel şartlarla bağıntılıdır. Beton yüzeyinde en yüksek olan, fakat; yüzeyden başlayarak artan derinlikle beraber klor iyonu konsantrasyon azalır. Klor iyonlarının beton içerisinde hareketi farklı biçimlerde olabilir. Örneğin; liman yapısında dalga ve çarpmanın olduğu kısımlarda kılcallık, deniz suyu içinde kalan kısımda klorun beton içinde hareketinde difüzyon etkilidir [151,152]. Betonun içerisine nüfus eden klor iyonları donatıya ulaşarak, korozyona neden olur. Donatı korozyonu betonarme yapıların durabilitesi ile ilgili en önemli sorunlardandır. Donatının çevresi beton dökümü esnasında korozyona maruz kalmaması için bir tabaka ile kaplanır. Fakat deniz suyu ve tuzdan klor iyonları betona nüfuz ederek korozyona sebep olur. Betonda çatlakların artmasıyla; su, oksijen ve klor iyonları kolayca beton içerisinde hareket ederek, donatıda korozyonun oluşmasını hızlandırır. Üretilen betonun boşluksuz olmasıyla beraber geçirgenliği azalır. Böylelikle betonun çevresel etkilere zarar görme ihtimali azalır. Günümüzde bilhassa kuvvetli çevresel etkilere maruz yapılarda, olumsuz ortam şartlarına dayanıklı beton üretilirse servis ömrü daha uzun yapılar inşa edilebilir. UK'ün klorür bağlama etkisinden dolayı klorür difüzyonunun katsayısı azaltır. Azalan klorür difüzyon katsayısı, korozyonun başlama süresini uzatır. Böylelikle, UK kullanımı betonun klor geçirgenliğini azaltır [153].

Şekil 4.25. ve 4.26. incelendiğinde UK_F ve UK_C 'lü numunelere ait HKİG deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 4.25.'te UK_F 'lü karışımlarda en düşük HKİG değerinin UK_{F60N0} numunesine ait olduğu, en yüksek HKİG değerinin UK_{F0N0} numunesine ait olduğu görülmektedir. Şekil 4.26.'da UK_C 'lü karışımlarda en düşük HKİG değerinin UK_{C35N0} numunesine ait olduğu, en yüksek HKİG değerinin UK_{C0N0} numunesine ait olduğu görülmektedir. Hem UK_F 'lü hemde UK_C 'lü karışımlarda UK miktarı arttıkça klor geçirgenliğinin azaldığı görülmektedir. Hazırlanan karışımların 3, 7 ve 28 günlük HKİG değerleri, n_{Si} , n_{Fe} ve n_0 olmak üzere F ve C sınıfı UK'lü toplam 18 karışım incelendiğinde, nano katkılı karışımların, nano katkısız karışımlara nazaran daha düşük klor geçirgenliğine sahip olduğu görülmektedir. Böylelikle karışımlarda kullanılmış olan nano malzemelerin boyutlarının çok küçük olması sebebiyle boşlukları doldurarak geçirimsizliği arttırdığı

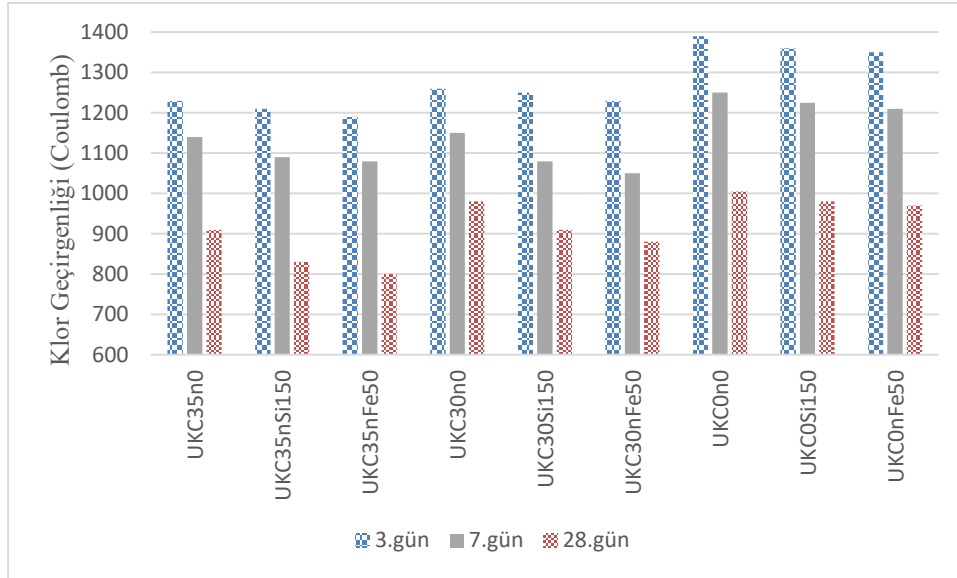
görülmektedir. 28 günlük numunelere ait HKİG değerleri Çizelge 4.9.'daki betonun HKİG sınıflandırılmasına göre hem UK_F hem de UK_C için çok düşük seviye olan (100-1000) coulombs değeri arasında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, YPLDÇK karışımlarının klor geçirgenliği yönünden dayanıklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.9. Betonun klor geçirgenliği deneyinde geçen yüke göre klor geçirgenliği sınıflandırılması

Geçen Yük (Coulombs)	Klor İyonu Geçirirmliliği
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 4.25. UK_F 'lü nSi, nFe ve n_0 numunelerin hızlı klor iyon geçirirmliliği

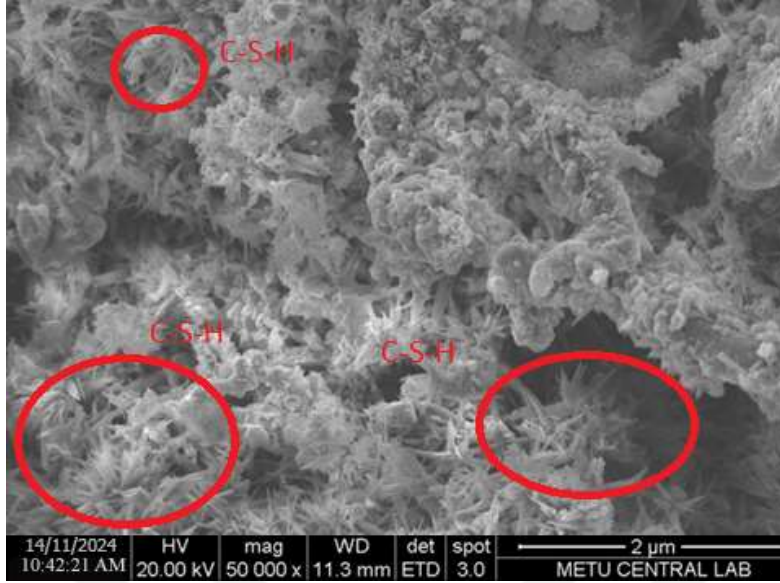


Şekil 4.26. UK_C'lü nSi, nFe ve n₀ numunelerin hızlı klor iyon geçirirliiliği

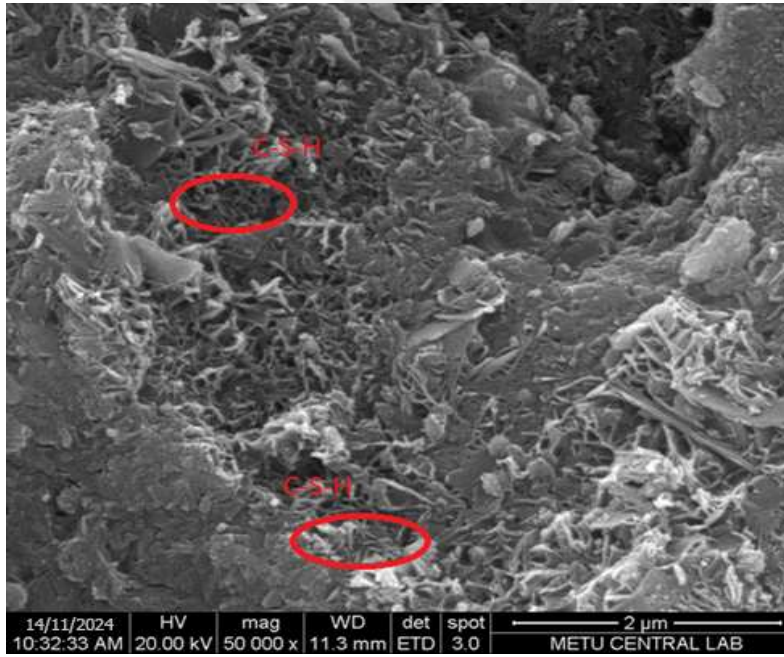
4.7. Mikro Yapı İncelemesi

Deneyler sonrası her yaşta numuneden küp şeker boyutunda bir parça alınarak içi asetonla doldurulmuş boş su şişesinde saklanmıştır. Daha sonra aseton içerisinden çıkarılan numunelerin SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi METU CENTRAL laboratuvarlarında yapılmıştır. Basınç dayanımı değerleri tüm karışımlarda 90 günlük numunelerde en yüksek değer elde edilirken en küçük basınç dayanımı değerleri de 1 günlük numunelerde elde edilmiştir. Tüm karışımlarda en yüksek basınç dayanımı değeri %100 çimento ve % 0,05 nFe içeren numunede elde edilmiştir. SEM analizi Resim 4.8.'de görülmektedir.

90 günlük UK_{C0}nFe₅₀ ve UK_{C0}n₀ numunelerin SEM görüntüleri Resim 4.8. ve Resim 4.9.'da verilmiştir. Resim 4.8.'deki SEM görüntüsüne bakıldığında zaman, çok miktarda C-S-H oluştuğu görülmektedir. Resim 4.9.'a bakıldığında, oluşan C-S-H'ın Resim 4.8.'deki numunenin SEM görüntüsündeki C-S-H miktarına göre daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu iki numunenin 90 günlük basınç dayanımları da incelendiği zaman, 90 günlük UK_{C0}nFe₅₀'in basınç dayanımının 90 günlük UK_{C0}n₀'dan daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak, nanoFe₂O₃ içeren UK_{C0}nFe₅₀ numunesinin nanoFe₂O₃'den dolayı daha çok C-S-H oluşumuna katkı sağladığı söylenebilir.

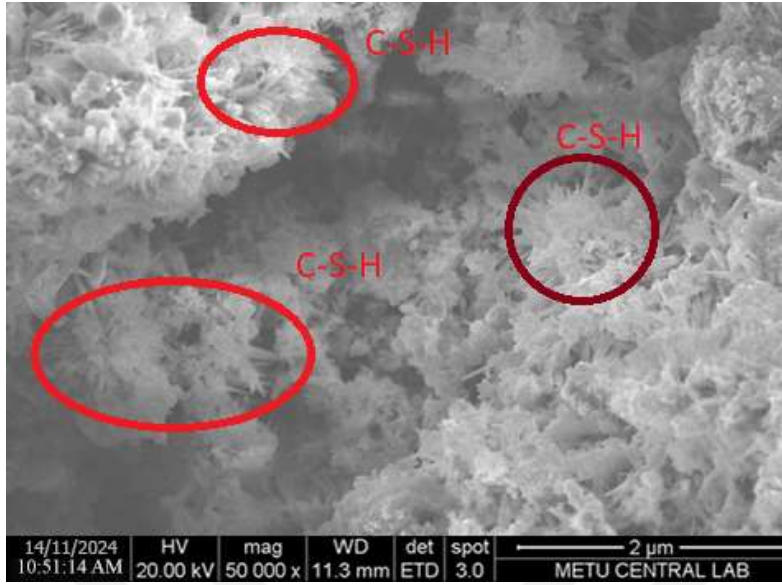


Resim 4.8. 90 günlük UKC₀nFe₅₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü

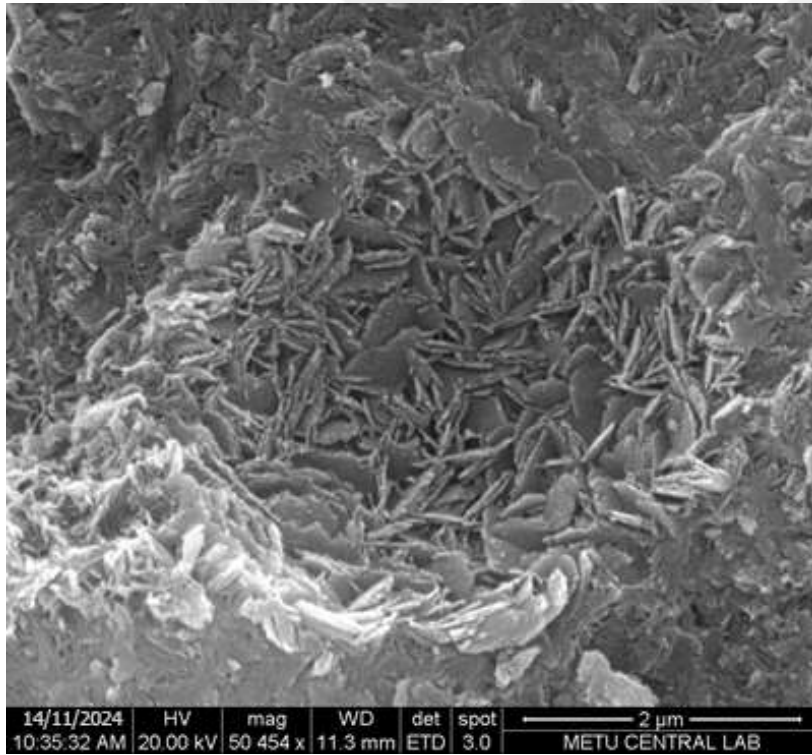


Resim 4.9. 90 günlük UKC₀n₀ kodlu numunenin SEM görüntüsü

Resim 4.10. ve Resim 4.11.' de sırasıyla 28 günlük UK_{F60}nSi₁₀₀ ve UK_{F60}n₀ numunelerinin SEM analizine ait resimler görülmektedir. Resim 4.10. ve Resim 4.11.'e beraber bakıldığında, UK_{F60}nSi₁₀₀ numunesinde UK_{F60}n₀ numunesine göre daha çok C-S-H oluşumunun olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu iki numunenin basınç dayanımları da incelendiği zaman, 28 günlük UK_{F60}nSi₁₀₀'ün basınç dayanımının 28 günlük UK_{F60}n₀'dan daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak, nSi içeren UK_{F60}nSi₁₀₀ numunesinin nSi'den dolayı daha çok C-S-H oluşumuna katkı sağladığı söylenebilir.



Resim 4.10. 28 günlük $UK_{F60nSi100}$ kodlu numunenin SEM görüntüsü



Resim 4.11. 28 günlük UK_{F60n0} kodlu numunenin SEM görüntüsü



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, çimentoya yüksek hacimde farklı oranlarda F ve C sınıfı UK ikame ve nano malzemeler(SiO_2 ve Fe_2O_3) ise farklı oranlarda ilave olarak kullanılarak üretilen lifli harç tasarımlarının mühendislik özellikleri belirlenmiştir

Çalışmada kullanılan mini yayılma testine göre yayılma çapına göre UK oranları belirlenmiştir. Bu sonuca göre ikame oranı F sınıfı UK oranı %50 ve %60 saptanırken C sınıfı UK ise %30 ve %35 olarak saptanmıştır.

UK_{F50} ikameli karışımlarda nano malzeme oranlarının belirlenmesinde doygunluk derecesini yöntemiyle basınç dayanımına göre en yüksek basınç dayanımı nano silisli karışımlarda %0,100 (UK_{F50} nSi₁₀₀) vermiştir. Nano demirli karışımlar içinde en yüksek basınç dayanımı %0,05 (UK_{F50} nFe₅₀) sağlamıştır.

UK_{C30} ikameli karışımlarda nano malzeme oranlarının belirlenmesinde yine doygunluk derecesini yöntemine göre en yüksek basınç dayanımı nano silisli karışımlarda %0,150 (UK_{C30} nSi₁₅₀) vermiştir. Nano demirli karışımlar içinde en yüksek basınç dayanımı %0,05 (UK_{C30} nFe₅₀) sağlamıştır.

UK₀ nSi₁₀₀ ve nFe₅₀ (kontrol) karışımların mekanik test sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 62,1; 65,05; 72,95; 83,71 ve 92,97 MPa olarak saptanırken, eğilme dayanımları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçları ise sırasıyla 10,9; 11,93; 13,5; 14,87 ve 16,52 MPa olarak bulunmuştur. 90 günlük E değeri 20,15 GPa'dır. İlk 72 saatte boy kısalması $6,48 \times 10^{-8}$ m iken 72 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{F50} nSi₁₀₀ karışımlarla üretilen haçların basınç dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla, 29,22; 41,16; 51,23; 71,96 ve 87,53 MPa değerlere ulaşırken, eğilme dayanımı ise 6,5; 8,45; 10,9; 11,78 ve 13,53 MPa olarak saptanmıştır. 90 günlük E değeri 16,5 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $7,79 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{F50} nFe₅₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 28,03; 39,84; 49,2; 70,96 ve 83,21 MPa'dır, eğilme dayanımı ise 6,43; 7,98; 10,45; 11,34 ve 13,13 MPa'dır. 90 günlük E değeri 16,42 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $8,45 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{F60} nSi₁₀₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 17,61; 33,37; 42,9; 65,12 ve 83,17 MPa'dır. Eğilme dayanımı ise 4,79; 6,99; 8,75; 11,31 ve 12,75 MPa'dır. 90 günlük E değeri 15,92 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $7,89 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{F60} nFe₅₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 17,18; 29,42; 38,22; 58,2 ve 76,31 MPa olarak saptanmıştır. Eğilme dayanımları ise 4,65; 6,78; 8,25; 10,63 ve 12,12 MPa olarak bulunmuştur. 90 günlük E değeri 15,75 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $8,97 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{C30} nSi₁₅₀ karışımının basınç dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 52,97; 62,95; 71,29; 80,76 ve 92,29 MPa'dır. aynı karışımın eğilme dayanımı ise yaş sırasına göre 8,38; 10,93; 12,57; 13,47 ve 16,12 MPa olarak bulunmuştur. 90 günlük E değeri 18,2 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $9,29 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{C30} nFe₅₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 56,22; 64,07; 72,83; 84,07 ve 95,67 MPa olur iken eğilme dayanımı 8,67; 11,57; 12,98; 13,83 ve 16,23 MPa'dır. 90 günlük E değeri 18,38 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $8,64 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{C35} nSi₁₅₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 51; 58,69; 66,75; 78,59 ve 89,26 MPa'dır, eğilme dayanımı ise 8,02; 10,23; 11,39; 12,56 ve 14,68 MPa'dır. 90 günlük E değeri 17,42 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $8,27 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

UK_{C35} nFe₅₀ karışımının basınç ve eğilme dayanımı sonuçları 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sırasıyla 51,74; 59,88; 68,03; 81,35 ve 91,33 MPa'dır, eğilme dayanımı ise 8,29; 10,61; 11,88; 13,12

ve 15,23 MPa'dır. 90 günlük E değeri 17,72 GPa'dır. İlk 48 saatte boy kısalması $7,76 \times 10^{-8}$ m iken 48 saat sonunda lineer olarak azalmıştır.

Mekanik dayanıma bağlı olarak bağ dayanımı değerlerinde ise eski normal betona yeni tasarlanan harç karışımlarının 45°C'lik yüzeyde herhangi bir kayma veya sıyrılma meydana gelmemiştir yani kayma sıyrılma kuvvetine bağlı olarak gerilme elde edilmemiştir. Genellikle deformasyonlar normal eski betonlarda meydana gelmiştir bu basınç dayanım değerlerde genel olarak 25 ± 3 MPa civarında olmuştur.

UKF'lü ve UKC'lü nSi, nFe ve n0 numunelerin tamamında yaş arttıkça HKİG değerinin azaldığı görülmektedir. NSi, nFe içeren harç karışımlarının nano katkısız karışımlara nazaran genel olarak daha düşük HKİG değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak, hem nSi hem de nFe'ün boyutunun küçük olmasından dolayı boşlukları daha iyi bir şekilde doldurarak geçirimsizliği azaltması olduğu söylenebilir.

Mikro yapı incelemesi için basınç deneyi sonrası her yaşta numuneden belli boyutlarda numune alınarak, mikro yapısındaki C-S-H oluşumu incelenmiştir. İnceleme sonucunda en yüksek C-S-H oluşumu 90 günlük numuneler verirken en düşük C-S-H oluşumunu 1 günlük numuneler vermiştir. Hem UK_F hem de UK_C'lü numunelerde nSi ve nFe içeren numunelerin mikro yapısındaki iyileşme nano katkısız numunelere nazaran daha çok C-S-H oluşumuna katkı sağladığı söylenebilir.

Sonuç olarak; çalışma sonuçlarının teknik özellikler ilk yaşla niha yaş dikkate alınarak en iyi karışım tasarımı C sınıfı UK için % 30 ikameli UK'lü ve nFe %0,05'li ilaveli karışım olan (UK_{C30} nFe₅₀) üretilen harç sağlamıştır. F sınıfı UK için ise % 50 UK'lü ikameli ve nFe %0,05'li ilaveli karışım olan (UK_{F50} nFe₅₀) üretilen harç sağlamıştır. Bu tasarımla üretilen tamir harçları istenilen ve talep edilen yerlerde tamir harcı olarak kullanılması uygundur.

5.2. Öneriler

Altyapı elamanlarının tamir ve onarımında bu çalışmalardan faydalandığı gibi deprem hasarına uğramış taşıyıcı elanmaların az hasarlı elemanlarında da kullanılabilir.

Bundan sonraki bilimsel çalışmalarda PVA lif boyutu etkisi ve kimyasal ortamlarda harcın davranışı incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Toklu, K., and Şimşek, O. (2018). Investigation of mechanical properties of repair mortars containing high-volume fly ash and nano materials. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 54(2), 261-270.
2. Toklu, K., Şimşek, O., and Aruntaş, H. Y. (2019). Investigation of the usability of high-performance fiber-reinforced cement composites containing high-volume fly ash and nanomaterials as repair mortar. *Journal of Australian Ceramic Society*, 1-9.
3. Sahmaran, M., and Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033-1043.
4. Erdoğan, T. Y. (1993). *Atık malzemelerin inşaat endüstrisinde kullanımı-uçucu kül ve yüksek fırın cürufu*. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-8.
5. Topcu, İ. B., ve Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik.Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.
6. Marlowe, I. (2003). *Emission factors programme Task 4(b): Review of cement sector pollution inventory*, AET/ENV/R/1425/Issue 1 Report, Abingdon, 1-11.
7. Mehta, P. K., and Burrows, R. W. (2001). Building durable structures in the 21st century. *Concrete International*, 23(3), 57-63.
8. Vecchio, F., and Bucci, F. (1999). Analysis of repaired reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 125(6), 644-652.
9. İnternet: HB87-1996. (1996). *Guide to concrete repair and protection*. A joint publication of ACRA, CSIRO and Standards Australia, Sydney, Australia.
10. Cilason, N. (1992). *Quality assurance and quality control for concrete in hot climates*. 9th International RILEM Conference on Concrete in Hot Climates, Torquay, England, 167-171.
11. Alexander, M. G., and Stanish, K. (22-24 August 2005). *Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factored approach*. In Mindess Symposium, Third International Conference on Construction Materials, Vancouver,.
12. Ahunbay, Z. (2007). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon* (Dördüncü Baskı). İstanbul: Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, 5, 10.
13. Raupach, M. (2006). *Concrete repair according to the new European standard EN-1504*. London: Taylor and Francis, 6-8.
14. Boresi, A. P., Chong, K. P., and Saigal, S. (2003). *Approximate solution methods in engineering mechanics* (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 10-12.

15. Chong, K. P. (1999). *Smart structures research in the U.S. proceedings of the NATO advanced research workshop on smart structures*. Poland: Kluwer Academic Publishers, 37-44.
16. Cilason N., and Aksoy, N. (2000). *Beton yapı hasarları onarım ve korunması ve sıcak iklimlerde beton*. İstanbul: Lebib Yalkın Yayınları, 32-39.
17. Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Journal of Structural Mechanical Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
18. Li, V. C., and Leung, C.K. (1992). Steady state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(18), 2247–2264.
19. Kanda, T., and Li, V. C. (1999). New micromechanics design theory for pseudostrain hardening cementitious composite. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(4), 373-381.
20. Li, V. C. (1998). *ECC - Tailored composites through micromechanical modeling*. N. Banthia, (Ed). *Fiber-reinforced concrete: present and future*. Montreal: CSCE Press, 64-97.
21. Sahmaran, M., Li, M., and Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *American Concrete Institute Materials Journal*, 104(6), 604-611.
22. Lim, Y. M., and Li, V. C. (1997). Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 373-385.
23. Li, M., and Li, V. (2009). Influence of material ductility on performance of concrete repair. *American Concrete Institute Materials Journal*, 106(5), 419-428.
24. Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., and Alnahhal, M. F. (2017). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar–A review, *Construction and Building Materials*, 1(148), 62–84.
25. Norhasri, M. M., Hamidah, M. S., and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano materialin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 15(133), 91–97.
26. Şimşek, O. (2024). *Beton ve beton teknolojisi* (Yedinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 116-121.
27. Neville, A. M. (1981). *Properties of concrete*. New York: Longman Scientific & Technical.
28. Morrison, R. E. (1970). *A review of ash specifications*. In Symposium on Fly Ash Utilization, Pittsburgh, USA, 24-31.

29. Erdoğan, T. Y. (1993). *Atık malzemelerin inşaat endüstrisinde kullanımı-uçucu kül ve yüksek fırın cürufu*. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-8.
30. Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E., (1937). Properties of cements and concretes containing fly ash. *Journal of the American Concrete Institute Journal, Proceedings*, 33(5), 577-612.
31. Berry, E. E., and Malhotra, V. M. (1986). *Fly ash in concrete, energy, mines and resources*. Canada: CANMET, Ottawa, 223-229,
32. Türker, P., Erdoğan, B., Katnas, F., and Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*. Ankara: TÇMB, 7.
33. Akgül, Ç., ve Yoncacı, S. (2021). *Türkiye kömür yakıtlı termik santral uçucu külleri*. Ankara: TÇSBD, 32.
34. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2023). *Elektrik enerjisi üretimi – tüketimi - kayıplar*. URL: <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Son Erişim Tarihi: 03.02.2025.
35. İnternet: Enerji Atlası. (2024). *Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller*. URL: <https://www.enerjiatlası.com/komur/>, Son Erişim Tarihi: 21.01.2025 .
36. ASTM C618-17a (2017). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
37. TS EN 197-1. (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
38. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., and Mordoğan, H. (2005). *Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları*. 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 419-423.
39. Tokyay, M. (1993 November). *Betonda uçucu kül kullanımı (Türkiye deneyimi)*. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Turkey, 29-36.
40. TS EN 450-1, (2013). *Uçucu Kül – Betonda kullanılan- Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
41. Erdoğan, T. (2015) *Beton* (Beşinci Baskı). Ankara: Odtü Yayıncılık.
42. Baradan, B., Yazıcı H., ve Aydın S., (2015). *Beton* (İkinci Baskı). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
43. Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.
44. Mehta, P. K. (1986). *Concrete - structure, properties, and materials*. New Jersey: Prentice-Hall, 549.

45. İnternet: Atabey, V. *Beton yapımında kullanılan atık malzeme uçucu kül*. URL: <https://volkanatabey.com.tr/beton-yapiminda-kullanilan-atik-malzeme-ucucu-kul>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2024.
46. Kara, I. (2008). *Seyitömer uçucu külünün farklı yapı malzemeleri olarak değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 9-10.
47. Karahan, O. (2006). *Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 9-10.
48. Tokyay, M., ve Erdoğan, K. (1998). *Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu*. Ankara: TÇMB, 69.
49. Tokyay, M., and Hubbard, F. H. (1992). *Mineralogical investigations of high-lime fly ashes*. In Proc of Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, İstanbul, 65-77.
50. ACI Committee 226, (1987). Use of fly ash in concrete. *The American Concrete Institute Materials Journal*, 83(5), 381-409.
51. Bosbach, D., and Enders, M., (1998) Microphotography of high calcium fly ash particle surfaces. *Advances in Cement Research*, 10(1), 17-24.
52. Tokyay, M., Erdoğan, T. ve Yeğinobalı, A. (1990). *Termik santral küllerinin çimento ve beton katkı maddesi olarak kullanılma imkanlarının etüt ve envanteri prosesi ara raporu*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
53. Baharavar, S. R. (2012). Karbonatlaşmanın çelik lifli ve uçucu küllü betonlarda etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-24.
54. Çelik, M. H., Aruntaş, H. Y. and Baran, Y. (2003). Seyitömer ve çayırhan uçucu küllerinin portland çimentosu-uçucu kül hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 6(1), 397-409.
55. Newman, J., and Choo, B. S. (2003). *Advanced concrete technology*. Oxford: Butterworth- Heinemann, An Imprint of Elsevier, 234-239.
56. Yaprak, H., Şimşek, O. ve Öneş, A. (2004). Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 7(4), 353-358.
57. Ünal, M. T., ve Şimşek, O. (2022). Çimento harçlarında optimum uçucu kül ve PVA lif oranının belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 477-489.
58. Land, G., and Stephan, D. (2012). The influence of nano-silica on the hydration of ordinary portland cement. *Journal of Materials Science*, 47(2), 1011-1017.
59. Land, G., and Stephan, D. (2015). Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 57, 64-67.
60. Cattaneo, S., and Biolzi, L. (2009). Assessment of thermal damage in hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), 836-845.

61. Aydın, S., and Baradan, B. (2013). The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 63-69.
62. Toklu, K. (2019). *Nano boyutta modifiye edilmiş yüksek hacimde uçucu kül içeren çimento esaslı kompozitlerin beton onarım malzemesi olarak kullanılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-14.
63. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. (1986). *Concrete: Structure, properties, and materials*. New Jersey: Prentice-Hall, 299-305.
64. Wilson, T. P., Smith, K. L., and Romine, A. R. (1999). *Materials and procedures for rapid repair of partial-depth spalls in concrete pavements*. Washington: Federal Highway Administration Manual of Practice, 135.
65. Li, M., and Li, V. C. (2011). High-early-strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair-material properties. *American Concrete Institute Materials Journal*, 108(1), 3-12.
66. Türk, K., and Kına, C. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671-678.
67. Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J. and Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
68. Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M. H., Şahmaran, M., Yıldırım, G. and Lachemi, M. (2015). Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 76(6), 170-179.
69. Turan, O. (2011). Bir fırsat penceresi: İnşaat sektöründe nanoteknoloji. *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 97, 14-16.
70. Jones, W., Gibb, A., Goodier, C., Bust, P., Song, M. and Jin, J. (2016). Nanomaterials in construction—what is being used, and where? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 14(2), 1-14.
71. Drexler, K. E., Peterson, C. and Pergamit, G. (1991). *Unbounding the future*. New York: William Morrow, 234.
72. Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., and Sobolev, K. (2012). *Nanotechnology in concrete materials: A synopsis*. Washington: Transportation Research Board, 1-3.
73. Sobolev, K. (2006). *Nanomodification of cement*. In NSF Workshop on Nanomodification of Cementitious Materials, Portland Cement Concrete and Asphalt concrete, Florida, USA.
74. Wilson, M., Kannangara K., Geoff S., Simmons M., and Raguse B., (2004). *Nanotechnology basic science and emerging technologies*. Chapman & Hall/CRC.
75. Goesmann, H., Feldmann C., (2010). Nanoparticulate functional materials. *Chemie International Edition*, 49, 1362–1395.

76. Şahin, R., and Oltulu M., (2008). *New materials for concrete technology: nano powders*. In 33rd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore.
77. Demirhan, S. (2017). *Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33.
78. Alexander, M. G. and Magee, B. J. (1999). Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and Concrete Research*, 29(6), 917-922.
79. Basheer, L., Kropp, J. and Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. *Construction and Building Materials*, 15(2), 93-103.
80. Mohr, P., Hansen, W., Jensen, E. and Pane, I. (2000). Transport properties of concrete pavements with excellent long-term in-service performance. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1903-1910.
81. Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y. and Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.
82. Li, H., Zhang, M. H. and Ou, J. P. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301.
83. Pekmezci, B. Y., and Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, 69-82.
84. Zhu, W., Howind, T., S., Barbhuiya, Stark, R., Kümmerling, B., and Dolado, J. S. (2012). *Nanomechanical study of cement pastes by statistical nanoindentation and peakforce QNM*. In 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, Amsterdam, The Netherlands, 726-734.
85. Grasley, Z. C., Jones, C. A., Li, X., Garboczi, E. J., and Bullard, J. W. (2012). *Elastic and viscoelastic properties of calcium silicate hydrate*. 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction, Agios Nikolaos, Crete, Greece, 1-120.
86. Peled, A., Castro, J., and Weiss, W. J. (2013). Atomic force and lateral force microscopy (Afm and Lfm) examinations of cement and cement hydration products. *Cement and Concrete Composites*, 36, 48-55.
87. Schmidt, M., Amrhein, K., Braun, T., Glotzbach C., Kamaruddin, S., and Tanzer, R. (2013). Nanotechnological improvement of structural materials - impact on material performance and structural design. *Cement and Concrete Composites*, 36, 3-7.
88. Tsuzuki, T., and McCormick, P. G., (2004). Mechanochemical synthesis of nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 39, 5143 – 5146.
89. Sanchez, F., and Sobolev, K., (2010). *Nanotechnology in concrete: A review*. *Construction and Building Materials*, 24 (11): 2060–2071.

90. Sobolev, K. (2015). *Nanotechnology and nanoengineering of construction materials*. In 5th International Symposium on Nanotechnology in Construction, Chicago.
91. Ma, B., Li, H., Li, X., Mei, J., and Lv, Y. (2016). Influence of nano- TiO_2 on physical and hydration characteristics of fly ash–cement systems. *Construction and Building Materials*, 122, 242–253.
92. Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, S. K., Scrivener, L. and Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41, 1208–1223.
93. Behfarnia, K. and Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 580–584.
94. Dikme, D. (2010). *Doğal sülfat içeriği yüksek olan kumlarla üretilen harçlarda sülfat etkisinin incelenmesi ve mineral katkıların etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45-66.
95. Otterstedt, J. E., and Greenwood, P. (2006). Some important, fairly new uses of colloidal silica/silica sol. *Surfactant Science Series*, 131, 737-756.
96. Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L. and Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, 392(1), 242-248.
97. Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano- SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1943-1947.
98. Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H. and Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano- SiO_2 particles. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1351-1355.
99. Sobolev, K. and Gutiérrez, M. F. (2005). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14.
100. Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L. M., Valdez, P. L., Zarazua, E. and Cuellar, E.L. (2009). Engineering of SiO_2 nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. *Nanotechnology In Construction*, 3(1), 139-148.
101. İnternet: Nanografi Nano Technology Blografı. URL: <https://nanografi.com/blog/iron-oxide-nanoparticlesnanopowder-and-applications/>, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024.
102. Attarad, A., Hiraz, Z., Muhammed, Z., Ihsan ul, H., Abdul Rehman, P., Joham sarfraz, A. and Altaf, H., (2016). Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology, Science and Applications*, 9, 49-67.
103. Narayanan, K. B., and Sakthivel, N., (2010). Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. *Advances in Colloid and Interface Science*, 156, 1-13.

104. Li, V. C., Horikoshi, T., Ogawa, A., Torigoe, S., and Saito, T. (2004). Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite. *Materials Journal*, 101(3), 242-248.
105. Sahmaran, M., and Yaman, I. O. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21(1), 150-156.
106. Lin, D. F., Lin, K. L., Chang, W. C., Luo, H. L., and Cai, M. Q. (2008). Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar. *Waste Management*, 28(6), 1081-1087.
107. Nazari, A., and Riahi, S. (2010a). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering, A*, 527(29-30), 7663–7672.
108. Mondal, P., Shah, S. P., Marks, L., and Gaitero, J. (2010). Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete. *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board*, 2141, 6-9.
109. Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F., and Khademno, A. (2010b). Benefits of Fe₂O₃ nanoparticles in concrete mixing matrix. *Journal of American Science*, 6(4), 102-106.
110. Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S.F., and Khademno, A., (2010c). The effects of incorporation Fe₂O₃ nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete. *Journal of American Science*, 6(4), 90-93.
111. Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S., and Shah, S. P. (2011). Crack free concrete made with nanofiber reinforcement, *Year 3 Final Report*, Evanston, Illinois, 115-124.
112. Yazdi, N. A., Arefi, M. R., Mollaahmadi, E., and Nejand, B. A. (2011). To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8(4), 550-554.
113. Khoshakhlagh, A., Nazari, A., and Khalaj, G., (2012). Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 73-82.
114. Soleymani, F. (2012). Optimum content of SiO₂ nanoparticles in concrete specimens. *Journal of American Science*, 8(4), 432-437.
115. Kurapati, S. (2014). Nanomaterials for concrete technology. *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development*, 4(3), 79-90.
116. Nivethitha, D., Srividhya, S., and Dharmar, S. (2014). Review on mechanical properties of cement mortar, enhanced with nanoparticles. *International Journal of Science and Research*, 2319-7064.
117. Khayati, G. R., Ghasabe, H. M., and Karfarma, M., (2015). A survey on the application of oxide nanoparticles for improving concrete processing. *Advances in Concrete Construction*, 3(2), 145-159.

118. Rao, N. V., Rajasekhar, M., Vijayalakshmi, K., and Vamshykrishna, M. (2015). The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials. *Procedia Materials Science*, 10, 111-115.
119. Madandoust, R., Mohseni, E., Mousavi, S. Y., and Namnevis, M. (2015). An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO. *Construction and Building Materials*, 86, 4–50.
120. Carmichael, M. J., and Arulraj, G. P., (2017). Strength and permeability studies on concrete with nano-cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1), 132–139.
121. Kwalramani, M. A., and Syed, Z. I. (2018). Application of nanomaterials to enhance microstructure and mechanical properties of concrete. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2), 98-104.
122. Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., and Ozbakkaloglu, T. (2020). Effects of nano-TiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study. *Construction and Building Materials*, 245, 118444.
123. İnternet: CIMSA.2020.0041 Super Beyaz_BROSUR URL: <https://cimsa.com.tr/wp-content/uploads/2022/02/cimsa-super-beyaz-brosur.pdf>, Son Erişim Tarihi: 09.02.2025.
124. İnternet: Pomza Export Madencilik ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen 0-400 µm boyutunda silis kumu. URL: <https://pomzaexport.com/#/product/5>, Son Erişim Tarihi: 25.07.2024
125. İnternet: Ekvator Kimya'dan temin edilen PVA (polivinil alkol) lif. URL: <http://www.ekvatorkimya.com/urunler/127/>, Son Erişim Tarihi:10.08.2024
126. İnternet: CHRYSO Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan süper akışkanlaştırıcı. URL: <https://www.chryso.com.tr/pc/923/yeni-nesil-super-akiskanlastirici-beton-kimyasal-katkilari> / Son Erişim Tarihi:20.10.2020
127. İnternet: CHRYSO Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan priz hızlandırıcı. URL: <https://www.chryso.com.tr/pc/925/priz-hizlandirici-beton-katkilari/> Son Erişim Tarihi:20.10.2020
128. Kou, W., Lin, K., Chang, W., and Luo, H. (2006). Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry-Seoul*, 12(5), 702.
129. Behfarnia, L. and Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 4(8), 580-584.
130. Mora, E. P., Paya, J., and Monzó, J. (1993) Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars. *Cement and Concrete Research*, 23(4), 917-924.

131. Cabrera, J. G., and Hassan, K. E. (1998). *The use of classified fly ash to produce high performance concrete*. Sixth Canmet/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Bangkok, 21-26.
132. ASTM C39/C39M. (2005). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
133. ASTM C230/C230M. (2008). *Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
134. ASTM C469/C469M. (2014). *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
135. Almudaiheem, J. A., and Hansen, W. (1987). Effect of specimen size and shape on drying shrinkage of concrete. *ACI Materials Journal*, 84, 130-135.
136. ACI, ACI 209. 1R-05: *Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete*, Farmington Hills, USA, 12.
137. Zhang, T., Gao, P., Luo, R., Guo, Y., Wei, J., and Yu, Q. (2013). Measurement of chemical shrinkage of cement paste: Comparison study of ASTM C 1608 and an improved method. *Construction and Building Materials*, (48).
138. ASTM C157/C157M – 08. (2014). *Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement, mortar, and concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
139. ASTM C1202. (1997). *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
140. Dai, J., Wang, J., Sangregorio, C., Fang, J., Carpenter, E., and Tang, J. (2000). Benefits of Fe₂O₃ nanoparticles in concrete mixing matrix. *Journal of American Science*, 6, 102-106. 87(10), 7397–7399.
141. Sikora, P., Horszczaruk, E., Cendrowski, K. and Mijowska, E. (2016) The influence of Nano-Fe₃O₄ on the microstructure and mechanical properties of cementitious composites. *Nanoscale Research Letters*, 11, 182.
142. Demir, F. (2005, 23-25 Mart). *Normal ve yüksek dayanımlı betonların elastisite modüllerinin belirlenmesi için bir bulanık yaklaşım*. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 1353.
143. Şengül, Ö. (2000). *Agrega türünün normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

144. Topçu, İ. B., and Uğurlu, A. (2007). Betonda elastisite kuramı ve baraj betonları için statik E-modülünün kompozit modellerle tahmini. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergisi*, 18(1), 4055-4067.
145. Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezaniapour, A. A., and Rajaie, H. (2005). Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 748-757.
146. Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., Setunge, S., and Cwirzen, A. (2021). A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 38, 102210.
147. Karagüler, M. E. (2003). Onarım harçlarında performans kriterleri ve durabilite sorunu. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 151-155.
148. Mindess, S. and Young, J.F. (1981). *Concrete*. New Jersey: Prentice Hall, 639-640.
149. Neville, A. M. (2000). *Properties of concrete*. England: Prentice Hall.
150. Baroghel-Bouny, V. (2003). Hydration and moisture distribution, early age cracking in cementitious systems. *Report of RILEM Technical Committee*, France, 39-45.
151. Joshi, P., Chan, C. (2002). Rapid chloride permeability testing. *Concrete Construction-World of Concrete*, 47(12), 37-43.
152. Taşdemir, M. A., Özkul, M. H. ve Atahan, H. N. (1999). *Türkiye'deki son depremler ve beton*. II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Adana, Türkiye, 9-20.
153. Neville, A.M., (1995) Chloride attack of reinforced concrete: An overview. *Materials and Structures*, (28), 63 – 70.
154. Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials-A review. *Construction and Building Materials*, 47, 1069-1077.





Gazili olmak ayrıcalıktır