



**NANO BOYUTTA MODİFİYE EDİLMİŞ YÜKSEK HACİMDE UÇUCU  
KÜL İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN BETON ONARIM  
MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

**Kenan TOKLU**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2019**

Kenan TOKLU tarafından hazırlanan “NANO BOYUTTA MODİFİYE EDİLMİŞ YÜKSEK HACİMDE UÇUCU KÜL İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN BETON ONARIM MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 05/04/2019

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

.....  
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

Kenan TOKLU

05/04/2019

# NANO BOYUTTA MODİFİYE EDİLMİŞ YÜKSEK HACİMDE UÇUCU KÜL İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN BETON ONARIM MALZEMESİ OLARAK

## KULLANILMASI

(Doktora Tezi)

Kenan TOKLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2019

### ÖZET

Alt yapı elemanlarının tekrarlı mekanik ve çevresel yükler altında hasar görmesine veya bozulmasına sık rastlanmaktadır. Bozulan bu yapıların tekrar onarılması, çevresel ve ekonomik açıdan ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Son yıllarda yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin (YPLDÇK), onarım ve güçlendirme işlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlemlenmiştir. YPLDÇK' ların üretiminde mikro-mekanik tabanlı tasarım kriterleri nedeni ile yüksek hacimde uçucu kül kullanımı neredeyse bir gereksinim olmaya başlamıştır. Yüksek hacimli uçucu kül içeren YPLDÇK özellikle önemli beton yol vb. gibi betonarme altyapıların onarım işlerinde kullanılabilmesi için erken yaş yüksek dayanıma sahip olması ve aynı anda boyutsal kararlılığının yüksek olması gerekmektedir. Erken yaş yüksek dayanımlı, boyutsal uyumluluk ve yüksek bağ performansı gösteren nano boyutta modifiye edilmiş YPLDÇK karışımlarının geliştirilmesi bu tezin temel amacıdır. Bu amaç doğrultusunda, %0, %55 ve %65 uçucu kül ve %1.5 nano silika, % 1,0 nano alümin ilave edilerek ayrı ayrı hazırlanan karışımlarla YPLDÇK karışımları üretilmiştir. YPLDÇK karışımlarında kullanılacak kimyasal katkı maddesinin oranının belirlenmesinde mini yayılma testi yapılmış olup sertleşmiş numunelerin temel mekanik özellikleri ise eğilmede çekme, basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyleri ile belirlenmiştir. Modifiye edilmiş YPLDÇK' nin onarım malzemesi olarak kullanılabilirliği açısından çok önemli bir özellik olan bağ performansı eğik kesme mukavemeti test yöntemiyle saptanmış olup boyutsal stabilite özelliklerinin araştırılması için kısıtlanmış rötre deneyi, dayanıklılık performansı için ise hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyi yapılmıştır. Son olarak, deneyler sonrası hazırlanan numuneler üzerinde matris ve lif-matris ara yüz özellikleri mikroyapısal analiz (SEM) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak, nano malzemelerin yüksek hacimde uçucu kül içeren karışımlara ikame edilmesiyle harç numunelerinin mekanik ve mikro-yapısında iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Ayrıca, karışımlarda kullanılan nano malzemeler, numunelerdeki boşluk miktarlarını azaltarak numunelerin daha geçirimsiz olmasını sağlamışlardır.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : Lifli kompozitler, boyutsal stabilite, nano malzeme, onarım malzemesi

Sayfa Adedi : 106

Danışman : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

USING NANO MODIFIED CEMENT BASED COMPOSITES INCORPORATING  
HIGH VOLUME FLY ASH AS A CONCRETE REPAIR MATERIAL

(Ph. D. Thesis)

Kenan TOKLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2019

ABSTRACT

Infrastructures are often found to be damaged or deteriorated under repetitive mechanical and environmental loads. The damaged structures which are repaired frequently cause big problems in terms of environment and economy. In recent years, it has been concluded that high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) can be used successfully in repair and strengthening works. The use of high volume fly ash due to micromechanics-based design criteria in the production of HPFRCC has nearly become a requirement. To use of HPFRCC including high volume fly ash for especially important repair works of infrastructure (concrete road etc.) it should possess high strength for early age as well high dimensional stability. The main purpose of the thesis is that nanomodified HPFRCC mixtures will be produced to have high early age strength and durability, high dimensional stability and high connection performance between nanomodified HPFRCC mixtures and concrete that will be repaired. For this purpose, 0 %, 55 % and 65 % fly ash and 1.5 % nano silica, 1% nano alumina were added separately to mixtures to produce HPFRCC. Flow table test for mortar was used to determine the ratio of chemical additives to be used in HPFRCC mixtures. The basic mechanical properties of hardened samples were determined by flexural, compressive strength and elasticity modulus tests. While bond performance of nanomodified HPFRCC, a feature that is very important for repair materials, were be determined by slant shear test, a restricted shrinkage test was conducted to investigate the dimensional stability properties of the hardened samples and a rapid chloride ion permeability test was performed for durability performance. Finally, the matrix and fiber-matrix interface properties of the samples prepared after the experiments were examined by using the microstructural analysis (SEM) method. As a result, improvements in the mechanical and microstructure of the mortar samples were observed by substituting nano materials to mixtures containing high volumes of fly ash. In addition, nano materials used in the mixtures reduced the amount of voids in the samples and allowed the samples to be more impermeable.

Science Code : 91127

Key Words : Fiber reinforced composites, dimensional stability, nano materials, repair material

Page Number : 106

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasındaki her aşamada beni destekleyen ve yönlendiren ayrıca, inovatif çalışmalara önem veren, bana ve diğer öğrencilerine her daim yardım eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e teşekkür ederim.

Doktora tez jürime katılan Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU, Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ, Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN, Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan Arş. Gör. Rüya Kılıç DEMİRCAN, Arş. Gör. Murat PINARLIK, Arş. Gör. Müge ÖZGENOĞLU ve Dr. Seydrahim BAHARAVAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez, TÜBİTAK tarafından desteklenen TÜBİTAK 1001 projesinin 214 M 041 numaralı araştırma projesi kapsamında üretilmiştir. Destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak, doktora çalışmalarım sırasında bana hep destek olan ve beni hiç yalnız bırakmayan aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	7
2.1. Beton Karışımında Kullanılan Mineral Katkılar .....	7
2.1.1. Uçucu kül (UK).....	7
2.1.2. Yüksek fırın cürufu .....	11
2.1.3. Silis dumanı.....	12
2.2. Lif Kullanılarak Üretilen Betonlar .....	13
2.2.1. Lif kullanılarak üretilen betonların özellikleri .....	13
2.3. Nano Malzeme ile Üretilen Harçlar (Betonlar).....	14
2.3.1. Nano malzemeler .....	14
2.3.2. İnşaat sektöründe kullanılan nano malzemeler .....	18
2.4. Literatürde Nano Malzemeler ve Beton ile Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar .....	19
3. MATERYAL VE METOT .....	27
3.1. Materyal .....	27
3.1.1. Silis Kumu.....	27
3.1.2. Uçucu külün sınıfı ve özellikleri .....	27

	<b>Sayfa</b>
3.1.3. Çimento .....	28
3.1.4. Karışım suyu .....	29
3.1.5. Nano silika (Nano SiO <sub>2</sub> ) .....	29
3.1.6. Nano alumina (Nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	30
3.1.7. PVA lif .....	31
3.1.8. Süper Akışkanlaştırıcı .....	32
3.1.9. Priz hızlandırıcı .....	32
3.2. Metot .....	33
3.2.1. Nano malzemelerin doygunluk derecelerinin belirlenmesi (ön deney) ....	34
3.2.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri .....	43
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>51</b>
4.1. Basınç Dayanımı .....	51
4.1.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları deney sonuçları .....	51
4.1.2. Uçucu kül katkı oranı %55 YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları .....	53
4.1.3. Uçucu kül katkı oranı %65 YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları .....	56
4.2. Eğilmede Çekme Dayanımı .....	58
4.2.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı .....	58
4.2.2. Uçucu kül oran %55 Olan YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı .....	60
4.2.3. Uçucu kül oranı %65 Olan YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı .....	62
4.3. Elastisite Modülü .....	64
4.4. Bağ Dayanımı.....	66
4.4.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı.....	66
4.4.2. Uçucu kül oranı%55 olan YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı.....	68

	<b>Sayfa</b>
4.4.3. Uçucu kül oranı %65 olan YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı.....	70
4.5. Kısıtlanmış Rötire .....	72
4.5.1. Uçucu külsüz karışımların kısıtlanmış rötire özelliğinin belirlenmesi .....	73
4.5.2. Uçucu kül oranı %55 olan karışımların kısıtlanmış rötire özelliğinin belirlenmesi .....	75
4.5.3. Uçucu kül oranı %65 olan karışımların kısıtlanmış rötire özelliğinin belirlenmesi .....	78
4.6. Hızlı Klor İyon Geçirimsizliği .....	81
4.7. Mikro ve Mineralojik Yapı İncelemesi .....	83
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>91</b>
5.1. Sonuçlar.....	91
5.2. Öneriler .....	93
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>95</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>105</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye’ deki kömürle çalışan termik santraller.....	7
Çizelge 2.2. Türkiye’de bulunan bazı UK’lerin kimyasal kompozisyonları .....	9
Çizelge 2.3. Uçucu kül içeren betonun özellikleri.....	11
Çizelge 3.1. Beton karışımlarında kullanılan silis kumun özellikleri.....	27
Çizelge 3.2. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	28
Çizelge 3.3. CEM I 52.5 R Portland çimentosu’nun özellikleri .....	28
Çizelge 3.4. Karışım suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 3.5. Nano silikanın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 3.6. Nano alüminin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	30
Çizelge 3.7. PVA liflerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	31
Çizelge 3.8. Priz Hızlandırıcıya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	32
Çizelge 3.9. Nano silikalı karışımların oranları .....	35
Çizelge 3.10. Nano alüminli karışımların oranları.....	37
Çizelge 3.11. Karışımların mini yayılma deney sonuçları.....	40
Çizelge 3.12. YPLDÇK karışımlarının oranları .....	42
Çizelge 4.1. Karışımların elastisite modülleri.....	66
Çizelge 4.2. Betonun klor geçirgenliği deneyinde geçen yüke göre klor geçirgenliği sınıflandırılması .....	82

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Onarım malzemelerinin tasarımında bütünsel model .....	3
Şekil 1.2. Çimento bağlayıcılı farklı kompozitlerin çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi .....	5
Şekil 2.1. Nanoteknoloji' deki yaklaşımlar.....	15
Şekil 2.2. Atomik kütle mikroskobu ile elde edilen çimento erken yaş hidratasyonu....	16
Şekil 2.3. A) Çimento hidratasyonu B) Nano katkılı çimento hidratasyonu C) C-S-H oluşumu .....	17
Şekil 3.1. Ön deneyde nano silikalı YPLDÇK numunelerde basınç dayanımı-nano silika oranı ilişkisi .....	36
Şekil 3.2. Ön deneyde nano alüminli YPLDÇK numunelerde basınç dayanımı-nano alümin oranı ilişkisi .....	38
Şekil 3.3. Üç noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği.....	44
Şekil 4.1. UK <sub>0</sub> +Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi .....	53
Şekil 4.2. UK <sub>55</sub> +Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi.....	55
Şekil 4.3. UK <sub>65</sub> +Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi.....	57
Şekil 4.4. UK <sub>0</sub> +Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi .....	59
Şekil 4.5. UK <sub>55</sub> +Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi.....	61
Şekil 4.6. UK <sub>65</sub> +Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi.....	63
Şekil 4.7. Kontrol harcı (UK <sub>0</sub> )+ YPLDÇK karışımların bağ dayanımı.....	67
Şekil 4.8. UK <sub>55</sub> + YPLDÇK karışımların bağ dayanımı.....	69
Şekil 4.9. UK <sub>65</sub> + YPLDÇK karışımların bağ dayanımı.....	71
Şekil 4.10. UK <sub>0</sub> (KB) numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi.....	74
Şekil 4.11. UK <sub>0</sub> +nAl100 numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	74
Şekil 4.12. UK <sub>0</sub> +nSi150 numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi.....	75
Şekil 4.13. UK <sub>55</sub> +KB numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	77
Şekil 4.14. UK <sub>55</sub> +nAl100 numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi.....	77

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.15. UK <sub>55</sub> +nSi <sub>150</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	78
Şekil 4.16. UK <sub>65</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	80
Şekil 4.17. UK <sub>65</sub> +nAl <sub>100</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	80
Şekil 4.18. UK <sub>65</sub> +nSi <sub>150</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi .....	81
Şekil 4.19. Hızlı klor geçirgenliği değerleri ve grafiği .....	83
Şekil 4.20. 90 günlük UK <sub>0</sub> nSi <sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği.....	84
Şekil 4.21. 90 günlük UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği .....	85
Şekil 4.22. 3 günlük UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği .....	86
Şekil 4.23. 90 günlük UK <sub>65</sub> n Si <sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği .....	87
Şekil 4.24. 3 günlük UK <sub>65</sub> nSi <sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği .....	88
Şekil 4.25. 28 günlük UK <sub>0</sub> nAl <sub>100</sub> Numunenin EDS grafiği .....	89
Şekil 4.26. 90 günlük UK <sub>55</sub> nAl <sub>100</sub> Numunenin EDS grafiği.....	89

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Tipik bir F sınıfı UK' nin SEM' den elde edilen görünüşü.....	9
Resim 3.1. Mini yayılma testi.....	39
Resim 3.2. Mini yayılmanın ölçülmesi.....	39
Resim 3.3. 20 litre kapasiteli harç mikserinde YPLDÇK üretimi .....	42
Resim 3.4. Küp numune üzerinde basınç dayanımı testi.....	43
Resim 3.5. Elastisite modülü deneyi numuneleri .....	45
Resim 3.6. Elastisite modülü deney düzeneği .....	46
Resim 3.7. Bağ dayanımı (eğik kesme deneyi) için deney numuneleri.....	47
Resim 3.8. YPLDÇK betonu kısıtlanmış rötre deney aleti [98] .....	48
Resim 3.9. YPLDÇK betonu kısıtlanmış rötre çatlakların ölçülmesi.....	48
Resim 3.10. Hızlı klor geçirgenliği testi için hazırlanmış 100x200 mm boyutundaki numuneler .....	49
Resim 3.11. Hızlı klor geçirgenliği testi için gerekli ekipman .....	49
Resim 4.1. Uçucu kül içermeyen YPLDÇK karışımına ait elastisite modülü deneyi...	66
Resim 4.2. Uçucu kül içermeyen YPLDÇK karışımının farklı günlere ait numunelerin test sonucu .....	68
Resim 4.3. UK <sub>55</sub> ve nano alümin ile oluşturulmuş numunelerin farklı günlere ait test sonuçları .....	69
Resim 4.4. UK <sub>65</sub> ve YPLDÇK numunelerinin farklı günlere ait test sonuçları .....	70
Resim 4.5. Kısıtlanmış rötre deneyi ölçümü.....	72
Resim 4.6. 90 günlük UK <sub>0n</sub> Si <sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü.....	84
Resim 4.7. 90 günlük UK <sub>55n</sub> Si <sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü .....	85
Resim 4.8. 3 günlük UK <sub>55n</sub> Si <sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü .....	85
Resim 4.9. 90 günlük UK <sub>65n</sub> Si <sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü .....	86
Resim 4.10. 3 günlük UK <sub>65n</sub> Si <sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü .....	87
Resim 4.11. 28 günlük UK <sub>0n</sub> Al <sub>100</sub> Numunenin SEM görüntüsü.....	88

**Resim**

**Sayfa**

Resim 4.12. 90 günlük UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> Numunenin SEM görüntüsü..... 89



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

$\epsilon$	Birim Boy Değişimi
$\sigma$	Gerilme
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\text{CO}_2$	Karbondioksit

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alüminyum Oksit
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bağlayıcı=(Çimento+UK+Nano malzeme+Kalsiyum Format)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum Hidroksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CEM I 52.5 R	Portland Çimentosu
CF	Calcium Formia (Kalsiyum Format) (Priz Hızlandırıcı)
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
Ç	Çimento
E	Elastisite Modülü
EDS	Elektron Kırınımı
GPa	Giga Paskal
HKİG	Hızlı Klor İyonu Geçirimsizliği
KOH	Potasyum Hidroksit
LiOH	Lityum Hidroksit
MPa	Mega Paskal
n	Nano
NaOH	Sodyum Hidroksit

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>NH<sub>4</sub>OH</b>	Amonyum Hidroksit
<b>PÇ</b>	Portland Çimento
<b>PVA</b>	Poly(vinyl alcohol) Lif
<b>S</b>	Karışım Suyu
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum Dioksit
<b>TS</b>	Türk Standardı
<b>UK</b>	Uçucu Kül
<b>UK<sub>55</sub></b>	%55 Uçucu Kül içeren karışımın kontrol harcı
<b>UK<sub>55n</sub>Si<sub>25</sub></b>	YPLDÇK amaçlı karışım
<b>YFC</b>	Yüksek Fırın Cürufu
<b>YPLDÇK</b>	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit

## 1. GİRİŞ

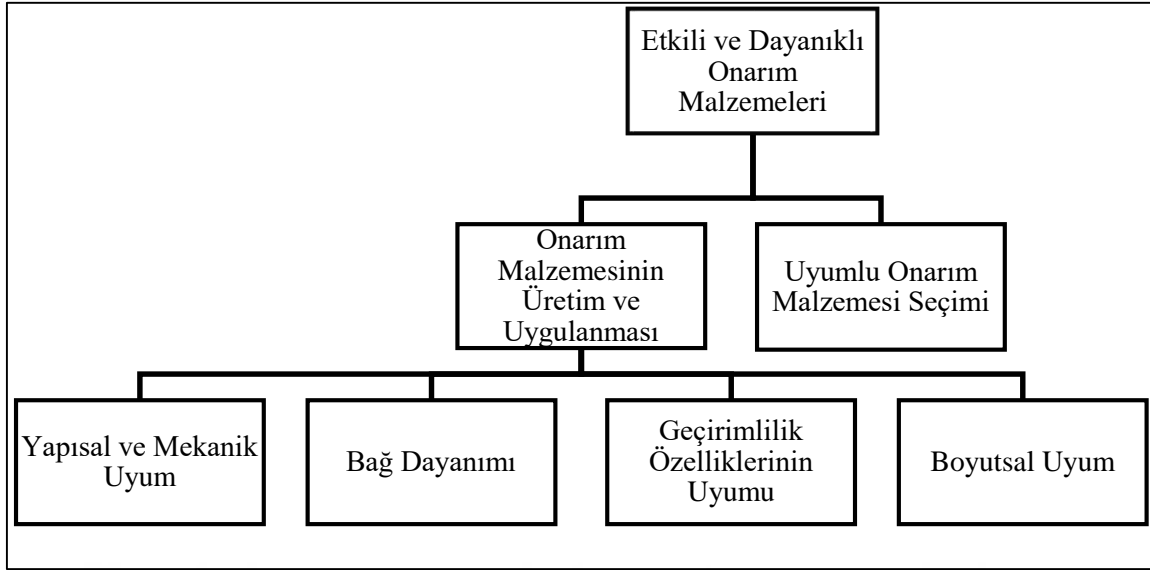
Dünyada olduğu gibi Türkiye’ de de son yıllardaki bilimsel çalışmalarda sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunmasıyla ilgili araştırmalarda artış görülmektedir. Sürdürülebilir kalkınmanın ana mantığı doğal kaynakları yok etmeden, var olan kaynakların düzgün bir biçimde kullanılmasını sağlayarak gelecek nesillerin gereksinimlerinin giderilmesine ve kalkınmasına olanak verecek biçimde planlanmasıdır [1]. Tüm dünyada ülkeler, sürdürülebilirliği olmayan kalkınma problemleriyle mücadele etmektedir. Bu mücadelenin sonuçları, ülkemiz gibi, gelişen ve hızlı büyüyen ekonomilere sahip ülkelere daha açık görülebilmektedir. Genellikle, hızlı büyüyen ekonomilerde otoyollar, havaalanları, köprüler, yer altı toplu taşıma sistemleri, barajlar, atık su arıtma tesisleri, deniz yapıları ve bina formatlarında gelişen altyapı, ticareti destekleyen ve dış yatırımı teşvik eden unsurların belkemiğini oluşturmaktadır. Bu sebeple, bu tür yapılarda kullanılan beton, ekonomik gelişmenin temel taşlarından biri kabul edilebilir.

Genel olarak, önemli beton altyapılar için en az 50-75 yıl arası bir servis ömrü biçilmektedir. Fakat edinilen gözlem ve araştırmalar sonucu, birçok yapının çevresel koşulların, beton bileşenlerinin kalitesizliği, karışım tasarımındaki olumsuzluklar, aşırı yükler, kür ve diğer bazı iç etkenler nedeniyle 20 ya da 30 yıl sonucunda bozulmaya başladığı ve kısa sürede onarım güçlendirme gereksinimi ihtiyacının ortaya çıktığı görülmüştür. Beton yapıların servis ömürlerinin kısalığı, bozulan yapıların tamir ve değişimi, inşaat sırasında oluşan trafik yoğunluğu, salınan gazlar ve yakıt tüketimi gibi olası olumsuz sonuçlardan dolayı önemlidir. Betonarme yapıların düşük dayanıklılığı ile ilgili olan çatlak oluşumu, beton yapıların servis ömürlerinin beklenenden çok daha kısa olmasının temel sebeplerinden biridir [2-4]. Küresel bir problem olan, atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun artması beton yapıların kimyasal kararlılığını zamanla daha da zayıflatması beklenmektedir. Beton yapıların bakım ve onarımı, mekanik yüklerin ve çevresel faktörlerin ortak etkisi altında doğal olarak bozulan malzemeler ve altyapı sebebiyle, sürekli tekrarlanan bir ihtiyaç durumuna gelmiştir. Geçmişte, bozulmuş eski ve hasarlı yapılar yenileriyle değiştirilmekteydi. Ancak, bugünün belirsiz ekonomik koşulları ve değişim için gerekli yüksek maliyet sebebiyle, bozulan yapıların değiştirilmesinden ziyade onarılması/güçlendirilmesi üzerinde daha çok durulmaktadır [5,6]. Hem Türkiye hem de Avrupa’da inşaat işlerinin büyük bir bölümü var olan yapıların onarım, güçlendirme ve iyileştirmesini kapsamaktadır. Otoyol kaplamalarının, havaalanı pistlerinin, köprü tabliyelerinin, deniz yapılarının ve diğer beton

yapıların bozulması birçok ciddi problemlere sebep olup bu yapıların onarımı/güçlendirilmesi için milyonlarca lira paraya ihtiyaç vardır. Bazı tahminlere göre, son yıllarda var olan yapıların onarımı/güçlendirilmesi için harcanan para yeni yapılar için kullanılan miktarı aşmaktadır [7]. Birçok Avrupa ülkesinde sadece köprülerin bakımı için yıllık harcanan para yaklaşık 1 milyar Avro dur. Tüm yapılar için tahmin edilen onarım maliyetinin ise yıllık yaklaşık 20 milyar Dolar olduğu tahmin edilmektedir. Bu maliyetin büyük bir kısmı beton yapıların onarımı için kullanılmaktadır. Birçok ülkede, yeni yapıların inşa edilmesini kapsayan işlerin oranı düşmektedir; ancak, yapıların servis ömürlerinin kısılmasıyla, onarım ve güçlendirme sektörü önemli ölçüde gelişmektedir [8].

Beton onarım malzeme endüstrisi hızlı bir gelişme göstermesine rağmen, beton onarım malzemelerinin ihtiyaçlarını karşılayamadığı durumlar oldukça yaygındır. Beton onarımında kullanılan malzemelerin neredeyse yarısının uygulama saha şartlarında başarısız olduğu tahmin edilmektedir [9]. Mevcut durumda kullanılmakta olan onarım malzemelerinin genellikle erken yaş düşük performanslarından veya uzun vadede düşük dayanıklılık özelliklerinden kaynaklanan ciddi problemleri bulunmaktadır. Bu sebeple, erken ve nihai yaşta yüksek performans özelliğine sahip ve mevcut yapıyı uzun vadede mekanik ve çevresel yüklere karşı koruyabilecek etkili çok yüksek performanslı onarım malzemelerinin geliştirilmesi beton yapıların onarımında hayati bir öneme sahiptir [10,11].

Beton yapıların onarımında kullanılacak malzemelerin tasarımında bu tür onarımları etkileyecek özelliklere tek tek bakmak yerine bu özelliklerin hepsini aynı anda dikkate alan bütünsel yaklaşımın benimsenmesi gerekmektedir [12]. Bütünsel yaklaşım, onarım malzemelerinin hem tasarım hem de uygulama açısından performansını etkileyebilecek tüm hususların aynı anda düşünülmesini gerektirmektedir. Onarım malzemelerinin tasarımı için literatürde bulunan bütünsel model Şekil 1.1. [13]'de özetlenmiştir. Bu modelde her bir faktörün işlevi ve birbiriyle ilişkileri tam olarak kavranması gerekmektedir [14,15].

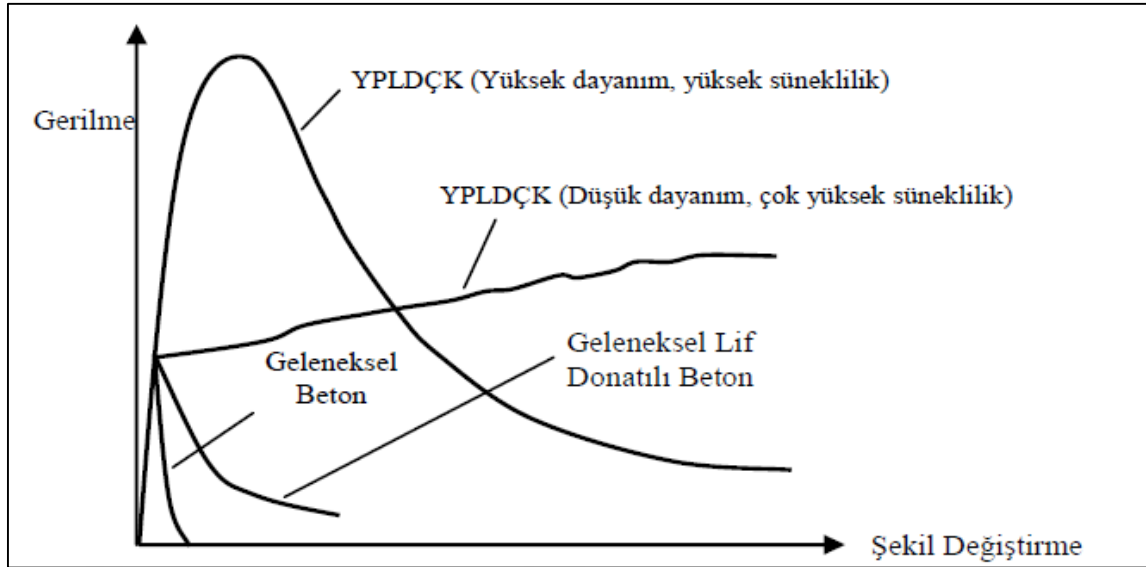


Şekil 1.1. Onarım malzemelerinin tasarımında bütünsel model

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere beton yapılar için ideal onarım ve güçlendirme malzemesinin, boyutsal olarak onarılan yapı ile uyumlu olması gerekmektedir. Onarımın yapılmasından sonra eski betonla yeni onarım malzemesi ciddi oranda rötre ya da genleşme göstermemeli ve eski betonla uyumlu elastisite modülü, dayanım ve geçirimsizlik özelliklere sahip olmalıdır. Bütün bu özelliklerin yanı sıra onarım çalışmalarında kullanılacak malzemelerin yüksek elastik olmayan deformasyon gösterebilme (sünek) özelliğine sahip olması, onarılmış yapıların servis ömrü açısından ciddi avantajlar sağlayacağı tartışılmaz bir gerçektir. Maalesef, tüm çabalara rağmen, bu tipte onarım malzemelerinin üretimi başarılı bir biçimde mevcut durumda gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple, uygun elastisite modülüne ve büzülme ya da genleşme sebebiyle çatlak oluşumuna sebep olmayacak seviyede hacimsel kararlılığa sahip ve gerektiğinde bu tür ve mekanik deformasyonları fazlasıyla telafi edebilecek sünekliliğe sahip, bağ kopmalarına neden olabilecek ara yüz kesme ve doğrudan çekme gerilmelerini sönmüleyebilecek malzemelerin üretimi beklenmektedir. Beklenen bu özelliklere ilaveten birçok hızlı onarım faaliyetinde erken yaş yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri önemli bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır.

Beton mineral ve kimyasal katkı maddelerindeki hızlı gelişmeyle beraber farklı tür beton teknolojisindeki gelişmelerde hızlı olmuştur. Betonun kırılma yapısını iyileştirmek için yapılan çalışmalar, aksenal çekme yüklemeleri altında sünek davranış gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin (YPLDÇK) ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Geleneksel beton aksenal çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumundan

hemen sonra aniden gevrek bir biçimde kırılmaktadır (Şekil 1.2). Geleneksel lif donatılı betonda ise matristeki çatlamaı şekil değiştirme yumuşaması (strain-softening) olarak bilinen yük taşıma kapasitesindeki düşüş eğrisi takip eder (Şekil 1.2.'de daha aşağıda bulunan eğri). YPLDÇK' de, ilk çatlak oluşumundan sonra, lifler fazladan yük taşıyabilmektedir. Yüklemedeki artış ile birlikte, 100  $\mu\text{m}$ 'dan daha dar çatlak genişliğine sahip çoklu mikro-çatlaklar oluşmakta ve betonun şekil değiştirme kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu sebeple, çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi metallerde olduğu gibi sünek malzemelere benzer şekilde çatlak sonrası sertleşme göstermektedir (Şekil 1.2.'de üstteki eğriler). Sünek davranışın (elastik olmayan şekil değiştirme) elde edilebilmesi için gerekli malzeme ve geometrik parametreler, Li ve Leung [16] tarafından öngörölmüş ve Li [17] ve Kanda [18] tarafından geliştirilmiştir. Parametrelerin uygun olarak seçilmesiyle, lif oranı %1.5 ile %5 arasında değişen farklı dayanımlara sahip sünek kompozitler üretilebilmektedir. YPLDÇK' nin maksimum aksenal çekme gerilmesindeki şekil değiştirmesi olarak tanımlanan sünekliliği, matrisin tokluğu ve liflerin gerilmeyi matrise etkin bir şekilde aktarmasıyla ilişkilidir [19]. Normalde, belirli lif yüzdesinde, yüksek matris tokluğu, daha düşük sünekliliğin elde edilmesine sebep olur. Uygulamaya bağlı olarak, dayanım ve süneklilik ihtiyaçlarını karşılayan en uygun çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi çeşitlilik gösterebilir. YPLDÇK' ler hacimsel olarak % 2 oranında lif kullanımı ile aksenal çekme yüklemesi altında % 3 ila % 5 arasında çekme birim şekil değiştirme deformasyonu gösterebilmektedir. Bu değer, normal betonun ve lif donatılı betonun çekme-şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ila 500 katı kadardır. YPLDÇK ilk çatlaktan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemekte ve bu özelliği ile YPLDÇK 'nin betondan öte sünek bir metal gibi davranış sergilemesini sağlamaktadır. Öte yandan, YPLDÇK hasarlara karşı oldukça toleranslı olup, şiddetli eğilme ve çekme yükleri altında da sünekliliğini korumaktadır. Yüke tabi tutulan lif içeren betonlarda meydana gelen çatlak genişliği 500-750  $\mu\text{m}$  mertebelerindeyken, bu çatlak genişliği yük altındaki YPLDÇK numunelerinde 100  $\mu\text{m}$ ' nin altında bir değere sahip olmaktadır. YPLDÇK farklı beton çeşitleri ile karşılaştırıldığında YPLDÇK' nin düşük çatlak genişliğine sahip olmasıyla çevresel koşullar altında daha dayanıklı ve mekanik yüklemeler altında bile çok daha düşük geçirimsizliğe sahip olmasını sağlamaktadır [20,21].



Şekil 1.2. Çimento bağlayıcılı farklı kompozitlerin çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi [17]

Birçok araştırmacılarında belirttiği gibi, YPLDÇK çok çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir [22]. Bu malzemenin en umut verici uygulama alanlarından biri beton yapılarının onarımıdır (güçlendirilmesi). Normal dayanıma sahip YPLDÇK ile onarılmış yapıların avantajları üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Lim ve Li [23] YPLDÇK / donatılı beton ara yüz çatlak yakalama mekanizmalarının mekanik avantajları hakkında kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. Li ve Li [24] onarım malzemesinde oluşan yüzey çatlaklarını ve YPLDÇK/mevcut onarılacak beton ara yüz tabakalanmasını önleyebilmek için onarım malzemesinin rötre deformasyonlarını karşılayabilmesi ve bu sayede kısıtlanmış rötre durumlarında oluşan gerilme yığımlarını elastik olmayan şekil değiştirme – yani çekme sünekliliği yoluyla azaltması gerektiğini göstermişlerdir. Yapılan araştırma sonucu kısıtlanmış rötre çatlakları azaltılabilmek için; betonda s/ç oranı düşük tutulması, kalıp alma ve kür süresine uyulması ve üretim sırasında betona kısa lif katılması önerilmektedir. Bu yollarla, yüzey çatlak genişliği ve ara yüz tabakalanması en aza indirgenmiştir olacaktır. Mikro-çatlak oluşumu şeklinde görülen elastik olmayan şekil değiştirme YPLDÇK' nin onarım malzemesi olarak kullanılması durumunda da elde edilmiştir [25]. Ayrıca, çatlak genişliğinin çok dar olduğu durumlarda çatlakların kendiliğinden iyileşebilme olasılığı ortaya çıkmaktadır. Eğer asıl amaç dayanıklılık ve sonuç olarak sürdürülebilir kalkınma ise, yüksek dayanıma tercihen dar açıklığa sahip çatlaklı ya da tamamen çatlaksız beton yapıların elde edilmesi için var olan uygulamalar ve tavsiye edilen standartların yaklaşımında değişime gidilmesi gerekmektedir.

YPLDÇK' nin sünek davranışı ve kendiliğinden iyileşme özelliği, onarım ve güçlendirme uygulamaları için gerekli ve istenen birçok özellik ile doğrudan ilişkilidir. Bunlar;

- Yüksek enerji kapasitesi, darbe dayanımı ve çekme sünekliği (yüksek elastik olmayan şekil değiştirme),
- Bölgesel gerilmeleri düzenli bir biçimde yayabilmeleri ve bu sayede malzemenin gerilme yığılması hassasiyetinin düşürülmesi,
- Yüksek işlenebilirlik, dar aralıklardan geçebilme, kalıbın en dar kesitini bile mükemmel bir biçimde doldurabilme, segregasyona karşı yüksek direnç ve püskürtme ve kendiliğinden yerleşebilirlik gibi üretim kolaylıkları,
- Yüksek kesme dayanımı.

Bütün sağladığı bu avantajların yanı sıra YPLDÇK' de maliyeti geleneksel malzemelere oranla yüksek olan yüksek performanslı liflerin kullanılması yapım maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Ancak, çimento yerine yüksek hacimde uçucu kül (UK) kullanımı bu maliyetin düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek oranda uçucu kül içeren onarım malzemelerinin sahip olduğu düşük değerleri (erken yaş dayanımını, dayanıklılığını, boyutsal stabiliteyi ve bağ yapısını) nano silika ve nano alümin ile mikro-mekanik tabanlı tasarım yöntemleri ile iyileştirmek ve nano boyutta modifiye edilmiş YPLDÇK karışımları tasarlamaktır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Beton Karışımında Kullanılan Mineral Katkılar

#### 2.1.1. Uçucu kül (UK)

Son yıllarda artan sanayi ve hızla yükselen insan nüfusuyla birlikte, ham madde azalması herkes tarafından kabul edilen bir gerçektir. Bu aynı zamanda günlük ihtiyacın karşılanmasındaki güçlüklerin yanında, küresel ısınma ve iklim değişiklikleriyle ilgili endişeler oluşturmaktadır. Küresel ısınma ve hava kirliliğine neden olan önemli faktörlerden biri olan çimento üretimi, endüstriyel kaynaklardan yayılan emisyonların %7'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Uçucu küllerin oluşturduğu olumsuz çevresel etkiyi azaltmak için inşaat sektöründe çimentonun kullanımını azaltmak aynı zamanda atık olan UK'nin belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilmesini sağlayarak kullanım oranını artırmak gerekmektedir. Bu mantık çerçevesinde inşaat maliyetin azaltılıp, enerji tasarrufu elde edilecek ve atıkların değerlendirilmesi sağlanacaktır.

Enerji üretmek için kurulmuş termik santrallerde yakılan taşkömürü veya linyit kömürünün yanması sonucu ortaya çıkan ve bacalar da elektro-filtreler aracılığıyla tutulan atık maddelere uçucu kül denmektedir [26,27]. Betonda mineral katkı olarak kullanılan uçucu küller yapay bir puzolandır. Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri hemen hemen olmayıp sönmüş kireç ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan bir katkı malzemesidir [28]. Türkiye'de kömür ile çalışan termik santraller Çizelge 2.1.'de [29] verilmiştir.

Çizelge 2.1. Türkiye' deki kömürle çalışan termik santraller [29]

No	Santralin Adı	Yakıt Türü	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu Şehir
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla

Çizelge 2.1. (devam) Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller

9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-Yumurtalık	İthal Kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

### Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Birçok faktör, uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin değişiklik göstermesinde rol oynar. Bu faktörleri kısaca özetleyecek olursak; kömürün yanma şartları, bileşimi, emisyon kontrol cihazının tipi, verimliliği ve son olarak da atma yöntemleridir. Bu sebeplerden ötürü küllerin bileşimi ve çevreye verdikleri etkileri değişiklik gösterebilir. Fakat uçucu küllerin bazı ortak özellikleri mevcuttur. Bunlar; uçucu küller camsı, küçük, oyuk yapılı, tane boyutu 0,01-200 µm aralığında ve yoğunluğu 2,1 ile 2,6 g/cm<sup>3</sup> arasında değişkenlik gösteren, yuvarlak şekilli, gri renkli ve çimento inceliğinde [29] malzemeler olmalarıdır. Uçucu küllerin yüzey alanı çok yüksektir. Ayrıca, uçucu küller boş küresel mikro yapılarından ötürü ısısal ve elektriksel iletkenlikleri çok düşüktür. Bundan dolayı uçucu küller iyi bir yalıtıcıdır [30].

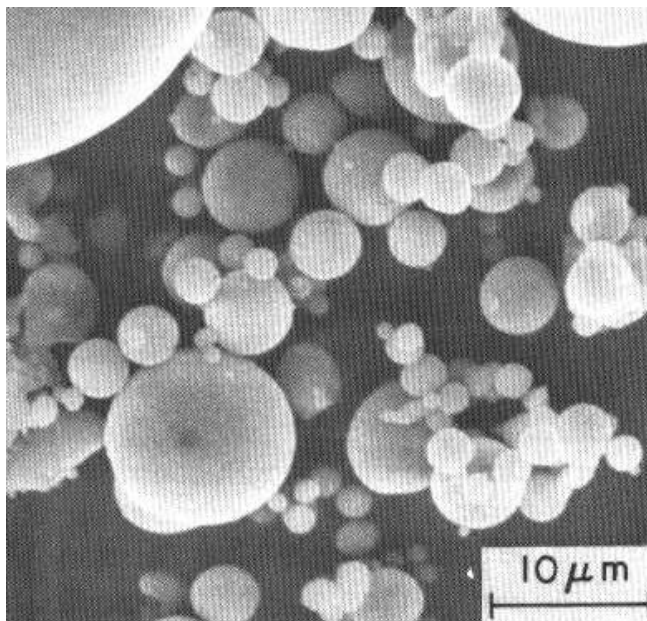
### Uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Uçucu küllerin ASTM C 618-17a [31]’de bulunan şartları sağladığı ve genellikle SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (S+A+F) toplamının %70’i aştığı görülmektedir. Uçucu küllerin elde edilmesinde kullanılan kömür türüne bağlı olarak UK’lerin bazılarında CaO oranı önemli ölçüde fazladır. Eğer UK’lerde bulunan CaO miktarı %10’un altında ise bu tür UK’lere düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu uçucu küller denir. Fakat UK’lerde bulunan CaO miktarı %10’un üstünde ise bu tür UK’ler yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak anılmaktadır. ASTM C 618-17a [31]’ye göre uçucu küller S+A+F toplamına göre sınıflara ayrılır. S+A+F miktarı toplamı %70’in üzerinde ise uçucu küller F sınıfı, S+A+F miktarı toplamı %50’in altında ise uçucu küller C sınıfı olarak adlandırılır.

Türkiye’ de bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.2.’ de [29,31,32] ve Tipik F uçucu küllüne ait SEM görüntüsü Resim 2.1.’ de [29,33] verilmiştir. Çizelge 2.3.’den de anlaşılacağı gibi genel olarak Afşin-Elbistan ‘da elde edilen uçucu küllerin haricinde diğer yerlerde elde edilen UK’ ler TS 639 [32]’ daki sınır değerlere uygundur. ASTM C 618-17a [31]’ ya göre uçucu kül sınıfı olarak da Afşin-Elbistan ‘da elde edilen uçucu küllerin C sınıfı, diğer yerlerde elde edilen UK’ lerin F sınıfı olduğu görülmektedir [29,31,32].

Çizelge 2.2. Türkiye’de bulunan bazı UK’lerin kimyasal kompozisyonları [29,31,32]

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 Sınırları	ASTM C 618-17a Sınırları	
						F	C
SiO <sub>2</sub>	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	<5	-	-
Na <sub>2</sub> O	(N+K) 0.3	(N+K) 3.0	0.24	2.2	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO <sub>3</sub>	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K.K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<6	<6



Resim 2.1. Tipik bir F sınıfı UK’ nin SEM’ den elde edilen görünüşü [29,33]

### Uçucu küllerin kullanım alanları

Son yıllarda uçucu kül hakkında yapılan bilimsel çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. İlk başlarda uçucu külün genel yapısı ve özellikleri araştırılarak kullanım alanlarına yönelik yapılan araştırmalar zaman içerisinde geliştirilerek inşaat alanında özellikle yol yapımlarında kullanılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır. İnşaat alanında birçok yerde uçucu kül kullanılması ile termik santrallerde atık malzeme olarak elde edilen ve çevre için sorun oluşturan bu atık malzemenin oluşturacağı sorunlar ortadan kaldırılmış oldu. Uçucu küller, yol yapımında, zemin stabilizasyonunda, dolgu ve enjeksiyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [26].

### Uçucu kül içeren betondan (harçlardan) beklenen özellikler

Uçucu külün betonda kullanılması betonunun birçok özelliğini iyileştirmektedir. Bunlar;

- Uçucu kül taneciklerinin ince ve küresel şekilde olmalarından dolayı betonda kuma ve segregasyonu azaltan etki yapar [34].
- Uçucu külün beton karışımında çimento miktarı kısmi olarak azaltılarak yerine kullanılması sonucunda betonda kullanılan suyun uçucu kül kullanılmayan beton su ihtiyacına göre aynı slump değeri için betonda kullanılacak su miktarını azaltmaktadır. Suyun azalmasında ki en önemli sebep uçucu külün taneciklerinin inceliğidir. Normalde taneciklerin inceliğinin artması karışımın su ihtiyacını yükseltirken, uçucu küllerin küresel şekillerinden dolayı içsel sürtünme azalacak ve dolayısıyla su ihtiyacında azalma olmaktadır. Ayrıca, bu özelliklerinden dolayı betonun işlenebilirliğini de olumlu yönde etkilemektedir [35].
- Puzolanik malzeme içeren betonlar için priz süreleri uzundur. Bundan dolayı, uçucu kül içeren betonlarında priz süreleri normalden daha uzundur [36].
- Portland çimentosunun hidrasyonu sonunda meydana gelen kalsiyum hidroksit ile uçucu kül arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar çimentonun hidrasyon işleminden daha uzun bir sürede meydana gelir. Bundan dolayı uçucu kül içeren betonların hidrasyonununun gerçekleşmesi geç olur. Bu özelliğinden dolayı uçucu küller kütle betonlarında yaygın olarak kullanılır [35].
- Yapılan bilimsel araştırmalara göre uçucu kül içeren betonun ileriki yaş dayanımının yüksek olduğu ve su emme özelliğinin daha az olduğu anlaşılmıştır [37]. Çizelge 2.3.'de

[37] uçucu kül içeren betonun, taze ve sertleşmiş haldeki beton özelliklerine etkisi özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Uçucu kül içeren betonun özellikleri [37]

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

### 2.1.2. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırınlarda demir üretilirken elde edilen silis, kalsiyum alümin silis ve bazik kökenli bileşikler içeren ve ergimiş halde elde edilen atık bir malzemedir. Yüksek fırın cüruflarının (YFC) tipi G ve H şeklinde belirtilir. Bu tiplerin belirlenmesinde cürufun kimyasal kompozisyonu ve ürün tipi belirleyici iki ana unsurdur. G tipi ergimiş halde bulunan yüksek fırın cürufunun hava ortamında veya su miktarı az olan ortamda soğutulması sonucu tane boyutları çok ince şekline getirilen camsı yapıda, puzolanik özellik bakımından düşük seviyede olan bir tiptir. H tipi ise sıvı şeklinde bulunan cürufun hava ve su kullanılarak söndürülen veya suyla doyurulan ve öğütme işlemi sonucu çok ince taneler haline getirilen puzolanik özellik bakımından kısmen daha yüksek ürün tipidir. YFC' nin Tip H çeşidi camsı madde oranı bakımından yüksek olup çok hızlı bir şekilde soğultulduğu için düzensiz yapı fazladır ve bundan dolayı daha reaktiftir. YFC' nin puzolanik aktivitelerinde kalsiyum içeriğine ek olarak, camsı madde bileşimi, tane boyutu ve özellikleri önemli rol oynar. Cürufun tane boyutundaki küçülmeler betonun erken yaştaki dayanımı olumlu etkiler. Tane boyutu 45 µm ve üstünde olan cüruf taneciklerin hidrasyonunda zorluklar olacağı için betonun dayanımına olumlu etki etmeleri beklenemez [38]. YFC inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir atık malzemedir. YFC, beton karışımlarında çimento yerine kısmi

olarak kullanılır. YFC içeren betonların erken yaş dayanımları düşük ve ileriki yaş dayanımları yüksektir. Ayrıca, betonda işlenebilirliği arttırır, priz süresini uzatır, su ihtiyacını ve hidrasyon ısısını azalttığı bilinmektedir [39].

### 2.1.3. Silis dumanı

Silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime metodu kullanılarak üretilmesi esnasında ortaya çıkan, ana bileşeni  $1\mu$ ' den küçük, amorf bir yapıya ve küresel bir şekle sahip, camsı silis ( $\text{SiO}_2$ ) taneciklerinden meydana gelen ve yüksek puzolanik aktivite gösteren bir yan ürün olarak adlandırılır. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi sırasında meydana gelen gazın hızlı bir şekilde soğutulması sonrasında oluşan, içerisinde % 85 ve üzerinde silis barındıran, yapı olarak amorf olan boyutsal olarak çok ince katı taneciklerden meydana gelen malzemeye kısaca silis dumanı denir. Bu malzeme çok ince taneciklere ve yüksek puzolanik özelliğe sahip olduğundan dolayı çok yüksek dayanımlı veya erken yaşta yüksek dayanım gösterecek betonları üretmek için kimyasal katkı malzemeleri ile beraber kullanılmaktadır [40]. Silis dumanının tanecik boyutları çok ince olduğundan incelik değerleri blain değeri veya elek analizi ile ölçülememektedir. Beton üretiminde kullanılacak silis dumanının taneciklerinin boyutlarının çok küçük olmasından dolayı öğütülmemesinde beton üretiminde teknik bir avantajdır. Silis dumanı yüzey alanı bakımından çok yüksek değerlere sahip olmasından dolayı su ihtiyacı çok fazla olmaktadır. Bu sebeple kimyasal katkı olan süperakışkanlaştırıcılar ile beraber kullanılmaktadırlar. Silis dumanı betonun birçok özelliğini iyileştirmektedir. Örneğin, bağlayıcı malzemenin ağırlıkça % 10' u kadar silis dumanı ve su/çimento oranı 0.6 olan betonlarda betonun kuruma rötresini azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, silis dumanı gibi mineral katkıların çimento yerine ikame edilmesiyle daha az sera gazı emisyonu salınımı, atık malzeme olmasından dolayı doğanın daha az kirlenmesi ve atık malzemelerin saklanmasında kullanılacak enerji tasarrufu gibi çevresel faydaları da vardır. Türkiye' de Antalya ilinin Ferrokrom tesislerinde yıllık ortalama olarak 500-1000 ton civarında silis dumanı üretilmektedir [41]. Silis Dumanının rengi gri, küresel şekilli ve tane çapı 0.1 ile 0.2  $\hat{\mu}\text{m}$  arasında ve yoğunluğu yaklaşık olarak  $2.2 \text{ g/cm}^3$ ' dür [42]. Ayrıca, silis dumanının birim hacim ağırlığı  $200 \text{ kg/cm}^3$  ile  $300 \text{ kg/cm}^3$  arasında değişen bir değere sahiptir [43]. Silis dumanı beton karışımında çimento yerine kısmi olarak kullanılan bir malzemedir. Silis dumanı içeren betonların erken yaş dayanımları yüksek ve geçirimsizlikleri azdır [44]. Taneciklerinin çok ince olmasından dolayı agrega-çimento hamuru ara yüzündeki boşlukları doldurarak ara yüz özelliklerini geliştirmektedir.

## 2.2. Lif Kullanılarak Üretilen Betonlar

Betonun basınç dayanımının yüksek, çekme ve eğilme dayanımının ise düşük olması araştırmacıları betonun çekme ve eğilme dayanımı özelliklerini iyileştirme yönünde araştırmalara yöneltmiştir. 1970 'li yıllarda İngiltere ve İskandinavya ülkelerinde ki bilimsel araştırmalar sonucunda lifli beton teknolojisi meydana gelmiştir [37].

Çimento, agrega ve genel olarak süreksiz dağılımlı lif çeşitlerinin su ile karıştırılması sonucu oluşan beton türüne lifli beton denilmektedir [45]. Lif ile beton üretilmesindeki amaç betonun eğilme dayanımının arttırılmak istenmesi, darbe yüklerine karşı direncin arttırılması ve tok bir malzeme elde edilmek istenmesindedir. Beton karışımında en çok kullanılan lif çeşitleri çelik, polipropilen ve alkali dirençli cam olarak sayılabilir [46].

### 2.2.1. Lif kullanılarak üretilen betonların özellikleri

Betonun büyük yükler altındaki dayanımı iyi olmasına karşın taşıma özelliği, birim boy değişimi ve çekme kuvvetine karşı direnci azdır. Betona ikame edilen liflerden dolayı betonun çekme dayanımı gözle görülebilen iyileşme meydana getirmektedir. Özellikle çelik lif ilave edilmiş betonlarda çekme dayanımının iyileşmesinin yanında basınç, eğilme, yarıлма gibi mekanik özelliklerinin de iyileştiği görülmüştür. Çelik lifli betonlar maksimum taşıma yüküne ulaştıkları halde yük taşıma özelliğini devam ettirirler ve kesme, burulma ve yorulmaya karşı dirençleri kuvvetli olur. Polipropilen lifler ise normal beton basıncını % 0.5 civarında azaltmalarına karşın çekme dayanımı yaklaşık %14 oranında iyileştirmektedir. Çelik lifler ise basınç dayanımı %1 iyileştirirken çekme dayanımlarını %35 kadar iyileştirirler [44].

Bu olumlu katkılarına rağmen, yüksek hacimde UK içeren YPLDÇK' nin özellikle hızlı onarım işlerinde kullanılabilmesinin önünde iki ana engel bulunmaktadır. Bu engellerden en önemlisi YPLDÇK'nin mikro mekanik tabanlı tasarım yaklaşımından dolayı yeterli süneklilik ve çoklu mikro-çatlak özelliklerinin elde edilebilmesi için YPLDÇK matris kırılma tokluğunun ve lif-matris ara yüzey kimyasal bağın en düşük seviyelere indirilmesinin gerekmesidir. Bu amaçla tasarımlarda yüksek hacimlerde UK kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek hacimlerde UK'lerin kullanımı YPLDÇK karışımının erken yaş dayanımını olumsuz bir biçimde etkilemektedir. Erken yaş yüksek dayanımın (birçok şartnamede

istenen 6 saatte 20 MPa'dan daha büyük) elde edilebilmesi için YPLDÇK üretiminde kullanılacak reaktivitesi yüksek bağlayıcı malzemeler, kimyasal katkıları ve düşük s/b malzeme oranı, YPLDÇK matrisinin (lifsiz kompozit) tokluğunu ve lif matris ara yüzey kimyasal bağı önemli ölçüde artırıp böylelikle YPLDÇK'nin en önemli özelliği olan süneklilik özelliğinde ciddi düşüşler meydana gelmektedir. Daha önceleri yapılmış olan erken yaş yüksek dayanımlı YPLDÇK karışım tasarımlarında UK kullanılmadan matriste bazı yapay kusurlar meydana getirip tokluğu düşürmek amacı ile "yapay polistiren tanecikler" kullanılmış ve bu çalışmalarda erken yaşlarda istenen dayanım ve süneklilik özelliği elde edilmiştir [47,48]. Ancak ilerleyen yaşlarda matris-lif yüzeyinde meydana gelen kimyasal bağlar nedeni ile liflerde, çekme yüklemesi altında matristen sıyrılıp çıkma yerine kopmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle ileriki yaşlarda, yüksek erken yaş dayanımlı YPLDÇK karışımları süneklilik özelliklerini sürdürememişlerdir. YPLDÇK'nin onarım işlerinde kullanılmasının önündeki bir diğer engel ise yüksek rötire kapasitesine sahip olmasıdır. YPLDÇK'nin normal betona göre lifin matris içerisinde kolay ve düzgün dağılımı için ihtiyaç olan reolojik karakteristiklerinin sağlanması ve mikro-mekanik tabanlı tasarım yaklaşımının şartı olan düşük değerli matris tokluğunu sağlayabilmek için YPLDÇK üretiminde iri agrega kullanımı ve karışımdaki toplam agrega miktarı sınırlandırılıp, yüksek oranda bağlayıcı malzeme kullanılmaktadır. Erken yaş yüksek dayanımın elde edilebilmesi için YPLDÇK üretiminde kullanılacak çimento bağlayıcı malzeme miktarında artış yapılması, reaktifliği daha yüksek olan (örneğin çok daha yüksek inceliğe sahip) bağlayıcı malzemelerin kullanılması, priz hızlandırıcı gibi kimyasal katkıların kullanılması ve/veya çok daha düşük oranda s/b malzeme oranı kullanılması gerekmektedir. Bu durum ise YPLDÇK'nin mevcut durumda yüksek olan rötire deformasyon kapasitesini daha da olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla, YPLDÇK'nin mevcut durumdaki boyutsal, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinden ödün vermeden erken yaş yüksek dayanımın elde edilmesi gerekmektedir. Bu arayış neticesinde son yılların en önemli araştırma konularından biri olan nano malzemelerin YPLDÇK üretiminde kullanılması fikri doğmuştur [48,49].

### **2.3. Nano Malzeme ile Üretilen Harçlar (Betonlar)**

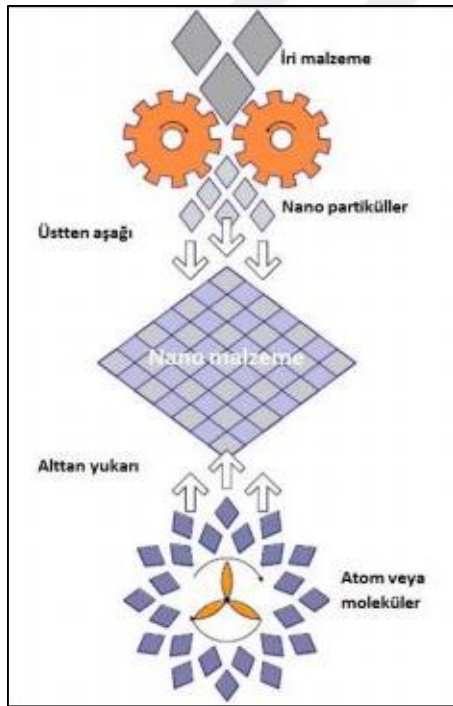
#### **2.3.1. Nano malzemeler**

Nano kelimesinin kökeni Yunanca olup küçü anlamına gelmektedir [50]. Nanoteknoloji, boyut olarak nano ölçekteki maddeleri inceleyen ve ürünlerin daha iyi özelliklere

kavuşmasını amaç edinmiş bilim alanlarından biridir [51,52]. Son zamanlarda birçok alanda nanoteknolojinin önemi artmaktadır. Bu alanlar inşaat, tıp, elektronik vb. sayılabilir [51-53].

Boyutsal olarak nano ölçeği idrak etmenin en basit yöntemi insanda bulunan bir saç telinin yaklaşık olarak 80 bin nanometre olarak ifade edilmesidir. Diğer bir deyişle, 1 metrenin milyarda biri olarak tanımlanır. Maddelerin nano boyuttaki durumları nanomalzeme veya nanopartikül olarak ifade edilir [51,52]. Maddelerin nano boyuttaki fiziksel, kimyasal, iletkenlik vb. özellikleri genel halindeki özelliklerden farklılıklar gösterebilir [51].

Nanoteknoloji de iki yaklaşım vardır. Bunlar; ‘‘üstten aşağı’’ ve ‘‘alttan yukarı’’ olarak adlandırılır. Şekil 2.1.’ den de [51,52] anlaşılacağı gibi ‘‘üstten aşağı’’ yaklaşımı boyut olarak büyük olan maddelerin küçültülerek nano boyuta indirgenmesidir. ‘‘Alttan yukarı’’ yaklaşımı da maddenin en küçük yapıtaşı olan atomik boyuttan nano boyuta çıkartılma yaklaşımıdır. ‘‘Alttan yukarı’’ yaklaşımı ‘‘ moleküler teknoloji’’ olarak da adlandırılmaktadır [51,52].

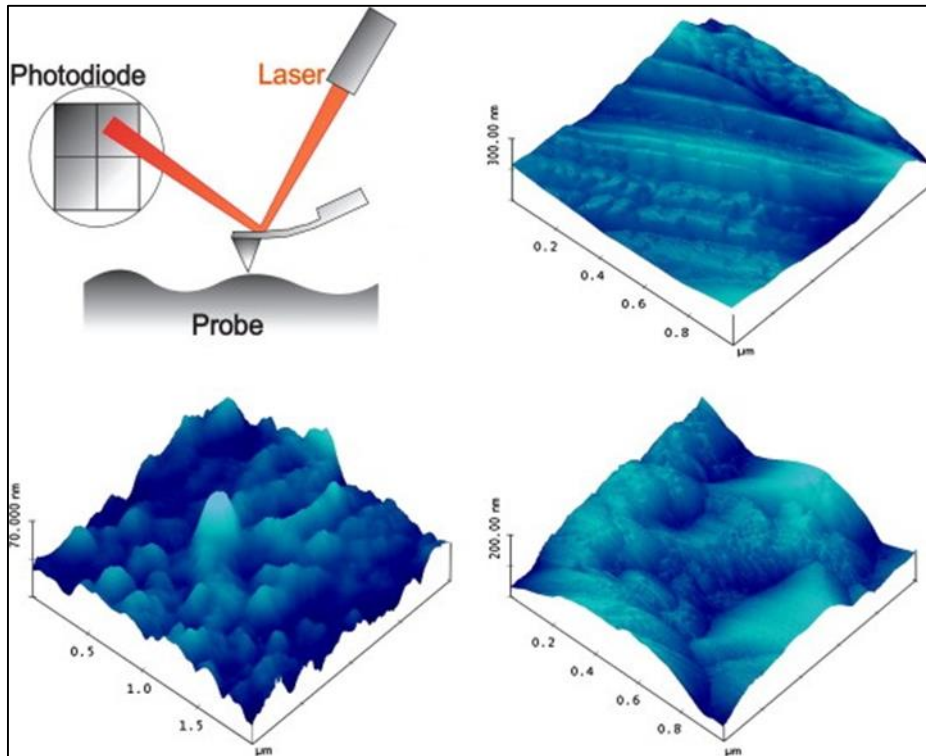


Şekil 2.1. Nanoteknoloji’deki yaklaşımlar [51,52]

İnşaat sektöründe nanoteknolojinin önemi gün geçtikçe artmaktadır ve bu malzemeler sektörün birçok alanlarında kullanılmaktadır. Bu alanların başında yapı malzemeleri gelmektedir. Var olan malzemelerin mevcut özelliklerinin geliştirilmesi ve yeni ürünlerin

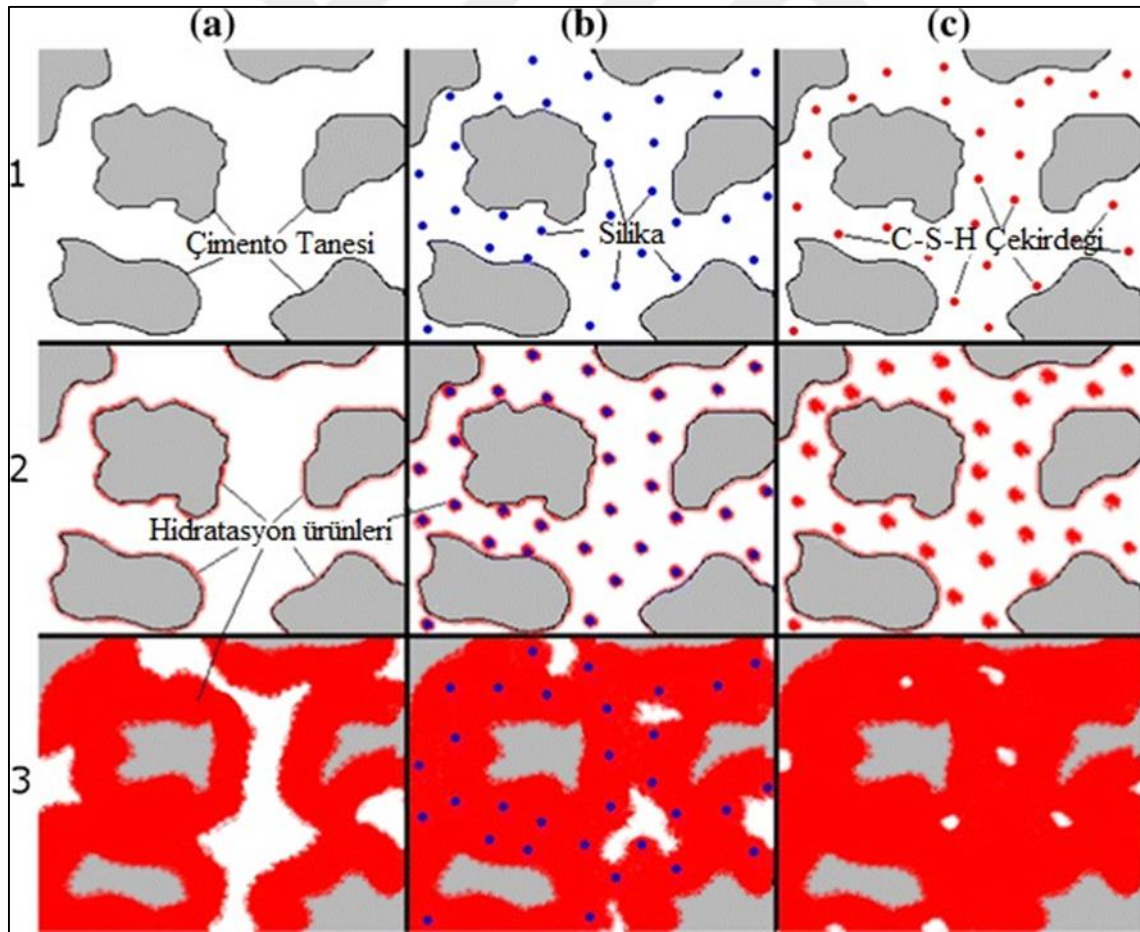
üretilebilmesi için nanoteknoloji yeni yaklaşımlar açmaktadır. Nano katkı malzeme uygulamalarından bazıları, kendi kendini temizleyen, su ve kir itici, ateşe çok daha dayanıklı yüzey koruyucular ve taşıyıcı sistemlerde daha mukavemetli ve daha plastik özellik gösteren betonlar sayılabilir [50].

Nano ölçeğine düşürülen çimento esaslı kompozit malzemelerin nano boyuttaki mekanik özellikleri de farklı yenilikçi deney metotları yardımı ile saptanabilmektedir. Kısa süre içerisinde bir deneyde çok fazla alan tarayarak malzemenin nano boyuttaki mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlayan metotlar olarak nano indentasyon, atomik kuvvet mikroskobu ve buna benzer Peak Force QNM sayılabilir [54-56]. Atomik kütle mikroskobunun farklı bir çeşidi olan lateral force mikroskobu meydana gelen topografik farklılıkların ortaya çıkarılmasında kullanılan bir yöntemdir. Hamur durumundaki malzemenin boşluk oranı ile malzemenin nano ölçekteki yüzey topografyası farklılık göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen yüzey topografyası sayesinde su/çimento oranı, kür zamanı gibi değişkenlerin hamur içerisindeki agrega arayüzü gibi nano ölçekli bölgelerde etkisini gözlemlene şansı doğmuştur [54,57]. Şekil 2.2.' de [58] atomik kütle mikroskobu kullanılan bir deney sonrası oluşturulan yüzey topografyası verilmiştir [52].



Şekil 2.2. Atomik kütle mikroskobu ile elde edilen çimento erken yaş hidratasyonu [58]

Nano teknoloji sayesinde beton teknolojisinin ilerlemesinde önemli rol oynayan bazı nano malzemeler üretilmiştir. Çimento esaslı kompozitler de kullanılması düşünülen veya uygulanan nano malzemeler olarak magnetik nano tanecikleri [54,59,60], nano  $TiO_2$  [54,61], nano ölçek viskozite düzenleyiciler [54,62] sayılabilir. Çimento hidrasyonunda nano malzemeler hidrasyon kinetiklerini hızlandırmada önemli rol oynarlar. Bunlara örnek olarak  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Fe_2O_3$  sayılabilir. Bunlardan bazıları çekirdekler oluşturarak hidrasyonun devam etmesini ve reaksiyon hızının artmasına yardımcı olurken diğerleri (örnek olarak  $SiO_2$ ) puzolonik reaksiyonları aracılığıyla hidrasyon kinetiklerinin daha hızlı olmasını sağlarlar [46,54,63]. Çok yüksek dayanımlı betonlar için çok ince tanecik çok önem arz etmektedir. İnce tanecikler yardımıyla çok yüksek dayanımlar betona kazandırılabilir [54,64]. Ayrıca, eğer kendiliğinden yerleşen betonlarda da çok ince tanecikler kullanılırsa, reolojik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirmektedir [54,65]. Şekil 2.3.' de [63] normal ve nano katkı malzemelerin çimento hidrasyonu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.3. A) Çimento hidrasyonu B) Nano katkı çimento hidrasyonu C) C-S-H oluşumu [63]

### 2.3.2. İnşaat sektöründe kullanılan nano malzemeler

#### Nano silika

Organik çözücüler içerisinde bulunan nano silikaların şekli yoktur ve koloid tanecikler şeklinde bulunurlar. Nano silikalar piyasada satılacaksa sıvı durumda ve pH değeri 8-10 arasında bulunur. pH değerinin bu aralıkta olmasını sağlamak ve sabitlemek amacıyla eriyiğe LiOH, NaOH, KOH, veya NH<sub>4</sub>OH gibi alkalilerin katılması suretiyle elde edilir. Elektriksel olarak nano silikanın tanecikleri negatif yüklüdür. Eğer taneciklerin nötr olması istenir ise pozitif yüklü Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> gibi iyonların vasıtası ile nötr edilebilir. Bununla beraber nano silikanın pozitif yüklenmiş tanecikleri de mevcuttur. Boyut açısından nano silika tanecikleri 5 ile 100 nanometre arasında bulunur. Nano silikanın görünümünü etkileyen iki faktör tanecik boyutlarının dağılımı ve konsantrasyonudur. Eğer görünümü süt gibi ise tanecik boyutları büyük ve konsantrasyonu yüksektir. Eğer görünümü hemen hemen renksiz ise bu tanecik boyutlarının en küçük seviyede olduğunu gösterir [66].

Nano silikanın yüzey alanı silis dumanından daha büyüktür. Bundan ötürü, puzolanik aktivitesi silis dumanına kıyasla çok daha fazladır. Nano silika büyük yüzey alanı sayesinde çimento hamurunda bulunan suyu yüksek puzolanik aktivitesi nedeniyle çok erken zamanda tüketir ve çimento hamurunun çok hızlı sertleşmesini sağlar fakat gözenekli bir yapı meydana getirir. Bundan dolayı, erken yaşta dayanımı yüksek fakat son dayanımın düşük olmasına neden olur. Yapılan deneysel çalışmalarda ağırlıkça % 0.15 ile % 0.20 nano silikanın kullanılmasıyla son dayanımın büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir [66,67].

#### Nano alumina

Alüminin heterojen kataliz, parlatma malzemesi, emici madde ve seramik malzeme alanları gibi birçok alanda uygulanmasından dolayı alümin hakkında geniş çalışmalar yapılmaktadır. Alümin sekiz farklı biçimde bulunur ve yedi biçimde yarı kararlı haldedir. Bunlar  $\tau, \delta, \kappa, \rho, \eta, \theta, \chi$  ve termal olarak kararlı  $\alpha'$  dır. Yarı kararlı alümin tozları doğada esas olarak nano-kristalimsi olarak bulunur ve kolay bir şekilde birçok metotla sentezlenebilir. Alümin, ince parçacıkları sayesinde yüksek yüzey alanına, yüksek yüzey aktivitesi sahiptir ve bu yüzden endüstride geniş alanlarda kullanılır [68]. Betonda nano alüminin (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) kullanımı hakkında çok az sayıda çalışma raporu vardır. Nano alüminin beton karışımında kısmi olarak

çimento ile yer değiştirmesi sonucu kalsiyum alüminyum silika jellerinin oluştuğu raporlarda bildirilmektedir. Nano alümin, kalsiyum alüminlerin hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer. Bu reaksiyonun hızı reaksiyon için uygun yüzey alanı miktarı ile orantılıdır [69]. Bu yüzden betonun karakteristiklerini iyileştirmek için beton karışımına yüksek saflıkta ve yüksek incelikte nano alümin eklenmesi ile mümkün olmaktadır [70]. Çalışmalar göstermiştir ki nano alümin içeren beton karışımları nano alümine içermeyen karışımlarına göre daha yüksek basınç dayanımları göstermiştir. Ayrıca bilimsel çalışmalar nano alüminin karışıma maksimum %2 ve ortalama tanecik boyutu 15 nm olarak eklenmesi gerektiğini göstermiştir [71]. Ayrıca, nano alümin içeren karışımın nano içermeyen karışıma göre elastisite modülünü önemli ölçüde arttırmıştır. Çalışmada karışıma çimento yerine ağırlıkça % 5 nano alümin eklenmesiyle elastisite modülünde %143 artış olmuştur. Ama 28 günlük basınç dayanımına çok az etki yapmıştır [72]. Genel olarak, nano alümin betonun mekanik özelliklerini ve çekme dayanımını iyileştirmektedir. Aynı zamanda su emmesini ve klor etkisini azaltmaktadır [73].

#### **2.4. Literatürde Nano Malzemeler ve Beton ile Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar**

Mondal ve diğerleri (2010) yaptıkları çalışmada betona belli oranda nano silika ve silis dumanını betona eklemişler ve etkilerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca betonun nano yapısında ne gibi değişikliklerin olduğunu araştırmışlardır. Taramalı sondalı mikroskobu ile nanoizleri kullanılarak %0 ve % 15 çimento miktarı ile yer değiştirilen silis dumanının çimento hamurundaki yerel mekanik özelliklerini ölçmüşlerdir. Silis dumanlı numunede puzolanik reaksiyonun varlığını kanıtlamışlardır. Ayrıca, %15 oranında çimento ile yer değiştirilen silis dumanının yüksek esnemezli kalsiyum silika jellerini (C-S-H) hacimsel oranda arttırdığı sonucuna varmışlardır. Nano silikalı çimento hamurunda yapılan benzer bir çalışmada nano silikanın betonun durabilitesini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışma özünde çimento hamurundaki nano yapılarda nano silikanın etkilerini ve betonun durabilitesi üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Çalışmada nano silikanın numuneye eklenmesiyle yüksek esnemezli C-S-H jellerinin hacimsel oranında önemli derecede bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çalışmada benzer yüzdelerde silis dumanı ve nano silika çimento hamuruna eklenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçta, nano silikalı numunelerin silis dumanlı numunelere göre iki kat daha fazla yüksek esnemezli C-S-H miktarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [74].

Ayrıca, bu çalışmadaki diğer deney sonuçları aşağıda belirtilmiştir:

- 1) C-S-H aşamasının elastik modülleri 10 ile 30 GPa arasında bulunmuştur. Sertlik değeri ise 0.25 ile 1 Gpa arasında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar elastisite modülü ve sertlik sonuçlarını yayınlayan başka araştırmacılarla iyi bir uyum içerisinde olduğu saptanmıştır.
- 2) %15 çimento miktarı ile yer değiştirilen silis dumanının karışımın elastik modülünde değişiklik yapmadığı görülmüştür.
- 3) Nano silikalı çimento harcının C-S-H 'ın ortalama zincir boyunu arttırdığı gözlemlenmiştir [74].

Metaxa ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışmada, karışımlarda mikro ve nano boyutlarda malzemeler kullanarak malzeme karakteristiklerinin iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Çalışmalarında dayanımı arttırmak için polivinil alkol mikro fiberleri kadar iyi olan karbon nano fiberleri kullanmışlardır. Nanokompozitlerin mekanik özellikleri üç noktalı esneme metodu ile mikro yapı ve nano kompozit numunelerinin morfolojisi ultra yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu ile araştırılmıştır. Sonuçlar açıkça göstermiştir ki; mikro ve nano liflerin kullanımı ile malzemelerin eğilme dayanımları, Young Modülü ve çimento matrisinin dayanımı artmaktadır [75].

Li ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışmada, yeni olarak geliştirilmiş polivinil alkol lifinin bir çeşidiyle güçlendirilmiş yüksek erken dayanımlı tasarlanmış çimento esaslı kompozit malzemelerin olağanüstü süneklik özelliği olduğunu belirtmişlerdir. Mikromekanik, malzeme tasarlama sürecinin birçok yerinde kullanılırken, bu çalışmada yüksek esneme yumuşaklığı için matris içinde önceden var olan kusur boyut dağılımının uygun hale getirilmesinin üzerinde durulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda yüksek erken dayanımlı tasarlanmış çimento esaslı kompozit malzemeler, yerleştirme ve %2'nin üzerindeki uzun dönem gerilme dayanımının tespitinden sonra 4 saat içerisinde 21 Mpa lık bir basınç dayanımına ulaşabileceğini göstermiştir [76].

Şahmaran ve diğerleri (2007) yaptıkları çalışmada ASTM C 618 'in incelik koşullarını sağlamayan yüksek hacimde uçucu kül içeren lif donatılı kendiliğinden yerleşen betonun taze ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Polycarboxylic tabanlı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak karışımın viskozitesi ayarlanmıştır. Karışımda uçucu kül ağırlıkça %50 çimento ile yer değiştirilmiştir. İki farklı çelik lif kullanılmış ve toplam lif içeriği  $60 \text{ kg/m}^3$  olarak

sabit tutulmuştur. Yayılma zamanı ve çapı, V Hunisi testi ve hava içeriği deneyleri çalışmada kullanılan betonun taze haldeki özelliklerini değerlendirmek için yapılmıştır. Basınç dayanımı, yarmada çekme deneyi ve ultrasonik dalga hızı deneyleri bu çalışmada kullanılan sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Sonuçta yüksek hacimde uçucu kül kullanımı ile beton mukavemetinde bazı azalmalar olsa da yüksek hacimde uçucu kül kullanılarak lif donatılı kendiliğinden yerleşen beton üretilebilir sonucuna varılmıştır [77].

Lin ve diğerleri (2008) atık/uçucu kül harcının özellikleri üzerinde bu harca eklenmiş olan nano silikanın etkilerini belirlemek amacıyla bu çalışmayı yapmışlardır. Yani, çalışmalarında atık/uçucu kül harcı numunelerine eklenen farklı miktarlarda silikanın harcın mikro yapısında ve fiziksel özelliklerindeki etkilerini araştırmışlardır. Karışımda su bağlayıcı oranı 0.7 olarak belirlenmiş, ikame oranları olarak atık/uçucu külün (1:1) %0, %10, %20, %30 'u önerilmiştir. Ayrıca, karışıma ağırlıkça %0, %1, %2, %3 nano silika ilave edilmiştir. Deney olarak 3, 7 ve 28. günlerde kür edilmiş harç numunelere SEM analizi ve basınç deneyi uygulanmıştır. Sonuçlar atık/uçucu külün çimento hidratasyon ürünlerinin kristallerini daha ince yaptığını göstermiştir. Ayrıca, karışıma nano silika eklendikten sonra kristallerin arttığı gözlemlenmiştir. Başka bir sonuç olarak da, atık külünün düşük pozolanik reaksiyon aktivite indeksinin, atık/uçucu küllü harcın erken basınç dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, nano silikanın hidratasyon kristalleri üretilmesine yardımcı olacağı fikrine varmışlardır. Harca eklenen nano silikanın harcın erken dayanımının gelişmesinde atık/uçucu külün etkilerini arttıracaklarını belirtmişlerdir [78].

Li ve diğerleri (2006) çalışmalarında çimento kompozitinin elastik modülü ve basınç dayanımında nano alüminin etkisini araştırmak amacıyla, farklı kür günlerinde (3 gün, 7 gün, 28 gün) nano alüminin farklı hacimsel oranda karıştırılmasıyla oluşturulan silindirik numuneler ( $\Phi 20 \times 40$  mm) döküp test etmişlerdir. Deneyde harcın basınç dayanımının ve elastik modülünün matrisin içerisine nano alümin eklenmesiyle arttığı gözlemlenmiştir. Nano alümin oranı %5 olduğu zaman, kompozitin elastik modülü 28. günde %143 artmış, nano alümin oranı %7 olduğu zaman, kompozitin basınç dayanımı 7. Günde %30 arttığı gözlemlenmiştir. Harç içerisinde nano alümin miktarının artmasıyla ara yüz geçiş bölgesinin yoğunluğunun arttığı ve çimentonun boşluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu deneylerden nano alümin içeren harcın nano alümin içermeyen harca göre elastik modülü ve basınç dayanımında artış olduğu gözlemlenmiştir [79].

Pekmezci ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada kullanılan numunelerin tamamında, nano silika kullanılması, uçucu külün olması ve uçucu külün olmamasına göre farklı basınç dayanımlarının ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Uçucu kül içermeyen, nano silika içeren numunelerde erken yaş basınç dayanımında nano silikanın çok fazla etkisinin olmadığı fakat 28. gündeki numuneler üzerinde yapılan basınç deneylerinde basınç dayanımını %20 arttırdığını gözlemlemişlerdir. %20 uçucu kül ve %2.5 nano silika içeren numunelerde 7. gün basınç dayanımları uçucu kül içeren fakat nano malzeme içermeyen numunelere göre önemli bir artış meydana getirdiğini belirtmişlerdir. %40 ve %60 uçucu kül içeren numunelerde ilk yaşlarda basınç dayanımının ileri yaş dayanımına kıyasla çok az olduğu gözlemlemişlerdir [54] .

Li ve diğerleri yaptıkları çalışmada, polivinil alkol lif donatılı tasarlanmış çimento kompozitlerinin (engineered cementitious composites) durabilitesini araştırmışlardır. Tasarlanmış çimento kompozitler, çekme gerilme kapasitesi %5' e kadar olan sünek gerinim sertleşmeli çimento esaslı kompozitler olarak adlandırılmıştır. Çalışmalarında, tasarlanmış çimento kompozitler, yeni ve onarım yapılacak yapılarda kullanılan malzemeler olarak belirtilmiştir. Mikro mekanik tabanlı yaklaşım, bu çalışmada betonun durabilitesinin değerlendirilmesi açısından benimsenmiş bir modeldir. Çalışmada mikro mekanik tabanlı yaklaşımın, elastik fazın ötesindeki mikro bozulma mekanizmaları bilgisi ışığında kompozit özelliklerle ara-yüz elemanları, lif, beton matrisi ile ilgili bir model olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, kompozit özelliklerin, çevre yüklerinden dolayı bozulması beklenen lif, arayüz ve/veya matris özelliklerinin değişmesi sonucunda bozulduğu belirtilmiştir. Bu fikir bu makalede deneysel olarak numunelerin hızlandırılmış deneye tabi tutulan ve aynı hızlandırılmış deney koşullarına maruz bırakılmış kompozitin sünekliğindeki değişmeler gibi değişikliklerle ilişkili bir şekilde lif ve lif matris ara-yüz özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada hızlandırılmış deney olarak uzun dönem sıcak ve nemli çevre gibi benzeri ortamda sıcak suya daldırma metodu uygulanmıştır. Sonuç olarak, numunelerin deney koşullarına maruz bırakılma zamanı 26 haftaya ulaştığı zaman lif mukavemetinin azaldığı anlaşılırken kimyasal lif-matris aderansının arttığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, kompozitin sünekliği aynı zamanda azalmıştır. Mikro mekanik modelin, bu iki seviye deneylerinden elde edilen veriyle bağıntılı ve mantıklı yorumlama yapılmasına olanak sağladığı vurgulanmıştır. Bozulmalara rağmen, polivinil alkol lifiyle üretilmiş beton, 70 yıl veya daha fazla yıla eşdeğer sıcak ve nemli hava koşullarına maruz bırakıldıktan sonra normal beton veya normal

lif ile güçlendirilmiş betondan 200 kattan daha fazla esneme yumuşaklığına sahip olduğu bu deneyler sonucunda anlaşılmıştır [80].

Şahmaran ve diğerleri (2009) yaptıkları çalışmada yüksek hacimde F sınıfı uçucu kül içeren tasarlanmış çimento esaslı kompozitleri irdelemişlerdir. Çalışmada, tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin yeni geliştirilmiş yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, bu malzemenin en önemli özelliğinin tek eksenli çekme yükleri altında % 3' den fazla yüksek süneklilik sağlamak, dar ve küçük çatlak genişliğinden dolayı oluşacak dayanıklılık azalmasını arttırmak olduğunu belirtmişlerdir. Karışımı iki farklı orana sahip olacak şekilde yapmışlardır. Bunlar karışımda ağırlıkça %55 çimento yerine uçucu kül kullanımı ve ağırlıkça %70 çimento yerine uçucu kül kullanımınıdır. Bu çalışmada hızlandırılmış yaşlanma (38° C sıcaklıkta sürekli sodyum hidroksite maruz bırakma ve oda sıcaklığında sodyum klorür çözeltisine maruz bırakma), ve taşınma özellikleri testleri (tuz kürü, hızlı klor geçirgenliği testi, sorptivity testi) kullanılarak uçucu külün tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin durabilitesindeki etkisini araştırmışlardır. Hızlandırılmış yaşlanmadan sonra tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin çatlak genişliği, çekme deformasyonu ve çekme gücündeki bozulmaların etkilerini araştırmak için direk çekme deneyleri uygulamışlardır. Kontrol numunesine ek olarak mekanik olarak yüklenmiş numunelerde ayrıca durabilite performansı açısından testler yapılmışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki mekanik olarak yüklenmiş ve yüklenmemiş yüksek hacimde uçucu kül içeren tasarlanmış çimento esaslı kompozit karışımı, hızlandırılmış yaşlanma periyodundan sonra mekanik performans açısından dayanıklı kaldığı ve çekme deformasyon kapasitesinin %2' den fazla olduğunu göstermiştir. Taşınan özellikler açısından, mekanik ön yükleme tarafından oluşan mikro çatlaklar klorür taşınmasını ve tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin sorptivity değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Kılcal emmeden oluşacak su taşınma riski ve difüzyonla oluşacak klorür taşınması çatlaklı veya çatlaksız ortamda normal sağlam betonla karşılaştırılabileceği sonucuna ulaşmışlardır [81].

Nazari ve diğerleri (2010) yaptıkları çalışmada farklı miktarlardaki SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerini, kendiliğinden yerleşen betonda kullanmış ve bu oluşan betonun eğilme mukavemeti, termal özellikleri ve mikroyapısını incelemişlerdir. Ortalama tanecik boyutu 15nm olan SiO<sub>2</sub> nano partikülleri kendiliğinden yerleşen betona belli ölçülerde eklenmiş ve numunelerin çeşitli davranışları ölçülmüştür. Deney sonuçları, SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin, kendiliğinden yerleşen betonun eğilme mukavemetini iyileştirebileceğini göstermiştir. Ayrıca, numunelerin eğilme

mukavemetinde süper akışkanlaştırıcıların negatif etkisini iyileştirilebileceğini de göstermiştir. Çalışmada, SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin ağırlıkça %4 oranına kadar çimentoyla yer değiştirilerek erken yaştaki hidrasyonda Ca(OH)<sub>2</sub> 'nin oluşumunu arttırdığı ve bunun sonucu olarak C-S-H jellerinin oluşumunu hızlandırdığı, ağırlıkça %4' den fazla ilave edilen SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin eğilme mukavemetini azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak da, beton matrisindeki nano malzemelerin dağılımının uygun olmayışı olarak belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada, ısı ölçüm testleri, termal gravimetrik analizi ve ışın kırınımı testleri sonuçları ağırlıkça %4' e kadar ilave edilen SiO<sub>2</sub> nanopartikülleri numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Son olarak, SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin betonun boşluk yapısını iyileştirdiği ve betonda dağılan boşlukların zararsız veya daha az zararlı boşluklar haline gelmesini sağladığı anlaşılmıştır [82].

Venkat ve diğerleri (2015) yaptıkları çalışmada yapı endüstrisinin daha çok malzeme ve enerji kaynaklarına ihtiyacı olduğunu ve nano teknoloji sayesinde yapı sektörünün de birçok avantaj yakaladığını vurgulamışlardır. Yapı içerisinde kullanılan bütün malzemeler arasında betonun, hacim açısından malzemelerin yaklaşık %70' ini oluşturduğunu ve önemli etkiler gösterdiğine değinmişlerdir. Nano teknolojinin varlığının geleneksel betondan daha güçlü ve dayanıklı malzemeler üretilmesine yardımcı olduğunu belirtmişler ve ayrıca beton içerisinde nano boyutlu malzeme kullanılmasının temel amacının, erken yaşlarda basınç ve eğilme dayanımını iyileştirmek olduğunu belirtmişlerdir. Bununda yüksek yüzey/hacim oranı ile olacağını söylemişlerdir. Ayrıca, bunun aynı zamanda betonun boşluklu yapısını da iyileştirmeye yardımcı olacağını belirtmişlerdir. Çalışmada nano boyutlu malzemelerin geleneksel çimento esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında daha az su emerek beton içerisindeki boşluğu azalttığını ve betonda nano malzemelerin varlığının geleneksel betondan daha az çimento miktarı kullanılmasını sağlayacağını belirtmişlerdir. Çalışmalarında nano teknolojinin inşaat mühendisliğinde nasıl kullanılacağını ve çelik, cam, ağaç ve kâğıtta etkilerinin nasıl olacağı sorularına cevap vermişlerdir [83].

Bundan önceki çalışmaların kısaca özeti;

Nano teknolojinin çok etkili ve efektif mükemmel mühendislik özelliklerine sahip malzemeler üretilmesine yardımcı olacağını ve yapıların bakım ücretleri, nano malzeme içeren betonlarda kendi kendini temizleyebilme ve onarabilme özelliğinden dolayı sert bir şekilde düştüğünü sonucuna varmışlardır. Nano teknolojinin ayrıca sağlanan yangın direnci

ve pas önleyici boyalar aracılığıyla malzemelerin durabilitesini iyileştirmeye yardımcı olduğunu da belirtmişlerdir. Nano teknolojinin malzemelere yeni özellikler ve mükemmel işlevsel kabiliyetler kazandırdığını ve nano teknoloji ile üretilen malzemelerin aynı zamanda yapıların yaşam süresini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Sonuç olarak, eğer nano teknoloji büyük pazarlama potansiyeli ve ekonomik etkisi olan şirketlerde ve teknoloji çizgisinde uygun bir şekilde kullanılırsa, teknoloji ve işletmelerde büyük olumlu etkiler meydana getireceğini belirtmişlerdir.





### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Materyal

Tez çalışmasında kullanılan silis kumu, mineral katkı maddesi (uçucu kül), çimento, su, PVA lif, nano malzemeler ve kimyasal katkı maddeleri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

##### 3.1.1. Silis Kumu

Geleneksel betona göre, matris lif dağılımının beton numuneler içerisinde daha homojen olması için istenilen reolojik özellikleri ve düşük matris tokluğu değeri elde edebilmek için tüm karışımlarda agrega olarak 0-400 µm boyutlarına sahip ve Pomza Export Madencilik ve Ticaret A.Ş.' den temin edilen silis kumu kullanılmıştır. Maksimum tane boyutu 400 µm ve özgül ağırlığı yaklaşık olarak 2.65 gr/cm<sup>3</sup> olan silis kumun üretici firmadan temin edilen özellikleri Çizelge 3.1.' de verilmiştir [84].

Çizelge 3.1. Beton karışımlarında kullanılan silis kumun özellikleri

Analiz Edilen Bileşen	% Ağırlık	Analiz Metot No
SiO <sub>2</sub>	99.31	XRF/DM.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	“
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	“
TiO <sub>2</sub>	0.009	“
CaO	0.05	“
MgO	-	“
Na <sub>2</sub> O	-	“
K <sub>2</sub> O	0.02	“
Kızdırma Kaybı	0.09	XRF/DM.02

##### 3.1.2. Uçucu külün sınıfı ve özellikleri

Dayanım performansı yüksek ve düşük kalsiyum oksit oranına sahip, Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül tez çalışmasında kullanılmıştır. Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2.' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri [84]

Kimyasal Bileşim	Sonuçlar (%wt)
SiO <sub>2</sub> (%)	55.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	24.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.33
CaO (%)	2.18
MgO (%)	2.38
SO <sub>3</sub> (%)	0.14
Na <sub>2</sub> O (%)	0.49
K <sub>2</sub> O (%)	3.87
Na <sub>2</sub> O Eşd. Cins. Top. Alkali (%)	3.04
Cl <sup>-</sup> (%)	0.0056
Serbest CaO (%)	0.32
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2130
45 µm Elek Bakiyesi (%)	25.4
28 Günlük Puzolanik Aktivite Endeksi (%)	82.7
90 Puzolanik Aktivite Endeksi (%)	97.3
Kızdırma Kaybı (%)	1.82

### 3.1.3. Çimento

Karışımlarda çimento türü olarak Mersin ÇİMSA tarafından üretilen yoğunluğu 3.15 g/cm<sup>3</sup> olan CEM I 52.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen çimento türüne ait özellikler Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. CEM I 52.5 R Portland çimentosu'nun özellikleri [84]

Kimyasal Özellikler	Sonuçlar (%wt)
SiO <sub>2</sub> (%)	21.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.26
CaO (%)	65.7
MgO (%)	1.30
SO <sub>3</sub> (%)	3.30
Kızdırma Kaybı (%)	3.20
İncelik cm <sup>2</sup> /g	4600

### 3.1.4. Karışım suyu

Karışımlarda su olarak Ankara şebeke suyu kullanılmıştır. Bu suyun ASKİ'den alınan özellikleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Karışım suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametre	Analiz Sonucu	EPA'ca izin verilebilir değer	TS 266'ca izin verilebilir değer
Bulanıklık (NTU Birimi)	0.20	5	5
Koku	Yok	Yok	Yok
Bakiye Klor (mg/L)	0.6	0,8-1	
İletkenlik $\gamma$ =(25°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

### 3.1.5. Nano silika (Nano SiO<sub>2</sub>)

Yüzey alanı oldukça büyük ve bundan dolayı puzolanik aktivitesi yüksek olan nano silika, erken yaş dayanımını iyileştirmek ve harç içerisindeki boşlukları minimuma indirmek için karışımlarda belirli oranlarda ikame edilmesi planlanmıştır.

Karışımlarda kullanılan nano silikanın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5.'de verilmiştir. Bu malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Grafen Chemical Industries Co.'dan temin edilmiştir [84].

Çizelge 3.5. Nano silikanın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Nano SiO <sub>2</sub>
Ortalama Tanecik Boyutu	15-20 nm
Özgül Yüzey Alanı	~300 m <sup>2</sup> /g
Yapısı	Gözenekli
Renk	Beyaz
Gerçek Yoğunluk	2.4 g/cm <sup>3</sup>
Birim Hacim Ağırlığı	<0.05 g/cm <sup>3</sup>

Çizelge 3.5. (devam) Nano silikanın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Ultraviole Relektivite	>%85
Hidroksil İçeriği	>%45
Analiz-ppm	
Ca	<20
Al	<20
Fe	<10
Cr	-
Mg	<10
Na	-
Mn	-
Co	-
Cl	<10

### 3.1.6. Nano alumina (Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Genel olarak nano alüminin harç karışımlarında kısmi olarak çimento yerine ikame edilmesi sonucu kalsiyum alüminyum silika jellerinin oluştuğu bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı karışımların dayanımını iyileştirmektedir. Ayrıca harç içerisindeki boşlukları, taneciklerinin nano boyutta olmasından dolayı en az seviyeye indirerek daha az geçirgen harç numunesi oluşturmaktadır. Araştırmada bu özelliklerinden dolayı nano alüminli karışım tasarımları planlanmıştır.

Karışımlarda kullanılan nano alüminin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.6. 'da verilmiştir [85]. Bu malzeme ve özellikleri Grafen Chemical Industries Co.'dan temin edilmiştir.

Çizelge 3.6. Nano alüminin fiziksel ve kimyasal özellikleri [85]

Özellikler	Nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ortalama Tanecik Boyutu	20 nm
Özgül Yüzey Alanı	~150 m <sup>2</sup> /g
Yapısı	Hemen Hemen Küresel
Renk	Beyaz
Yoğunluk	3890 kg/m <sup>3</sup>
Ultraviole Relektivite	-
Hidroksil İçeriği	-
Analiz-ppm	
Ca	<25

Çizelge 3.6. (devam) Nano alüminin fiziksel ve kimyasal özellikleri [85]

Al	-
Fe	<80
Cr	<4
Mg	-
Na	<70
Mn	<3
Co	<2
Cl	-

### 3.1.7. PVA lif

YPLDÇK üretiminde etkin biçimde kullanılan, mikro-mekanik tabanlı tasarıma göre üretilmiş PVA lifleri kullanılmıştır [84, 86]. Bu lifler Ekvator Kimya'dan temin edilmiş ve bu liflere ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.7.' de verilmiştir [1].

Çizelge 3.7. PVA liflerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Erime Noktası	160° C
Görünüşü	Tek lif
Yumuşama Noktası	150° C
Asit Etkisi	Sabit
Direnç	6.5-7.0 g/denier-Yüksek Direnç
Young's Modülü (TS/E):	3.000-3.500 MPa
Uzama	% 20/25
Özgül Yoğunluk	0.91 g/cm <sup>3</sup>
Renk:	Saydam/Şeffaf
Kesit:	Yuvarlak
Tipi	Çok filamentli
Lif Uzunluğu	6 mm ve 12 mm
Alkali Etkisi	Sabit
Nem Tutuculuğu	21° C' de %70 bağıl nem=< %0.10
Organik Çözücü	Yüksek sıcaklıkta klorür tarafından çözünür
Çimento Uygunluğu	Çok yüksek

### 3.1.8. Süper Akışkanlaştırıcı

YPLDÇK karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için CHRYSO Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan Delta 3531 isimli polikarboksilat esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (Yüksek oranda su azaltıcı) katkı malzemesi kullanılmıştır. Bu katkının kullanım dozajı % 0.6 ile 3 arasında değişmektedir. Katkı malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Görünüm: Sıvı ve Kahverengi, Yoğunluk:  $1.075 \pm 0.02 \text{ gr/cm}^3$ , pH:  $6.00 \pm 1$  Klorür içeriği :  $< \%0.1$ . Burada verilen bilgiler üretici firmadan temin edilmiştir [1]. Deneysel çalışmalarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı, yaklaşık %40 oranında katı madde içeren ve yoğunluğu yaklaşık  $1.075 \text{ g/cm}^3$  olan sıvı halde bir katkıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkı miktarı karışım sırasında katkının performansına, elde edilecek karışımların kıvamına, ayrışmaya karşı direncine ve liflerin matrise homojen olarak dağılmasına bağlı olarak ayarlanmıştır.

### 3.1.9. Priz hızlandırıcı

YPLDÇK karışımlarında priz hızlandırıcı olarak Lanxess Energizing Chemistry'den temin edilen Kalsiyum Formiat kullanılmıştır. Bu ürüne ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.8.'de verilmiştir [1].

Çizelge 3.8. Priz Hızlandırıcıya ait fiziksel ve kimyasal özellikler [1]

Özellikler	Değer
Fiziksel Durum	Katı/Toz
pH	6.7
Renk	Beyazdan Sarıya
Erime Noktası	$>300^\circ \text{ C}$
Yoğunluk	$2 \text{ kg/L (} 20^\circ \text{ C)}$
Dökme Yoğunluğu	$0.9 \text{ kg/dm}^3$
Çözünürlük	$172 \text{ g/L (su)}$
Tutuşabilirlik ( $20^\circ \text{ C}$ )	-
Öztutuşma Sıcaklığı	$292^\circ \text{ C}$
Bozulma Sıcaklığı	$>800^\circ \text{ C}$

### 3.2. Metot

Bu çalışmada çimento, su, agrega, uçucu kül, PVA lifi, hiper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı ve nano malzemeler ile farklı karışımlar elde edilmiştir. İlk olarak nano malzemelerin doygunluk derecesi tayini yapılmıştır. İki farklı nano malzeme (nano silika ve nano alümin) için % 55 UK içeren karışımlarda optimum doygunluk oranları belirlenmiştir. Nano malzemelerin doygunluk derecelerinin belirlenmesinde nano malzemeler toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %0.25' den başlayarak % 2'sine kadar ikame edilmiştir. Nano malzemeler için toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça maksimum %2 seçilmesinin sebebi nano malzemelerin toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça belli bir yüzde oranından sonra karışımın basınç dayanımlarında azalmalara neden olmasından dolayıdır. Basınç dayanımındaki azalmalar nano taneciklerinin karışım içerisindeki dağılımlarında meydana gelen kusurlardan ve topaklaşmadan oluşabilmektedir. Karışım içerisindeki nano oranı belli bir orandan sonra karışımın basınç değerini azalmaktadır. O yüzden nano malzemeler için toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %2' si maksimum değer olarak belirlenmiştir [87,88]. Toplam bağlayıcı malzemeler çimento + UK + priz hızlandırıcı olarak tanımlanmıştır. %55 oranında uçucu kül içeren karışımlarda tüm nano malzemelerin doygunluk tayini yapılmıştır. Her bir nano malzeme için elde edilen doygunluk dereceleri esas karışımlarda nano malzemelerin her biri için sabit tutulmuştur. Ön deney dışındaki esas karışımlarda kullanılan uçucu kül oranları; %0, %55 ve %65'dir. Tüm karışımlarda nano malzeme ve uçucu kül, çimento yerine ikame edilmiştir. Karışımlarda agrega olarak 0-400 µm silis kum kullanılmıştır. Ayrıca, karışımda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı betonun yüksek dayanım hedefini yakalamak için agreganın (silis kumun) 2.5 katı seçilmiştir (toplam bağlayıcı/silis kum=2.5) ve çimento türü olarak CEM I 52.5 R kullanılmıştır. Su miktarı yayılma tablasında 24 cm'yi hedef tutarak karışıma ilave edilmiştir ve su/çimento oranı 0.53 olarak belirlenmiştir. Daha sonra yüksek dayanımı elde etmek amacı ile %1.5 bağlayıcı ağırlığı kadar süper akışkanlaştırıcı kullanılmış ve 24 cm' lik yayılma %1.5 süper akışkanlaştırıcı ile elde edilmiş ve su/çimento oranı %27 olarak belirlenmiştir. Katkı maddesi olarak priz hızlandırıcı Kalsiyum Formiatın (Calcium Formia) (CF) bütün karışımlarda toplam bağlayıcı miktarının %2 si olarak kullanılmıştır.

Betonun sünekliğini ve eğilmede çekme dayanımını arttırmak için 6 mm boyutundaki PVA lifler  $15 \text{ kg/m}^3$  oranında kullanılmıştır.

Hava miktarı normal betonlarda %3 iken diğer çalışmalara göre yüksek performanslı betonda hacimsel olarak %1.5 ile dikkate alınmıştır.

### 3.2.1. Nano malzemelerin doygunluk derecelerinin belirlenmesi (ön deney)

#### Nano silika içeren karışımların doygunluk derecelerinin belirlenmesi

Tipik matris karışım tasarımı esas alınarak 1 m<sup>3</sup> için nano silikalı karışım miktarları Çizelge 3.9.' da verilmiş malzemelerle nano silikanın doygunluk derecesini belirlemek üzere 50x50x50 mm boyutunda küp örnekler için malzeme oranlanarak karışımlar hazırlanmıştır. Basınç dayanımı testi ASTM C39 [89] standardına uygun olarak 200 ton kapasiteli test cihazı kullanılarak 1, 3 ve 7. günlük numuneler üzerinde yapılmıştır.

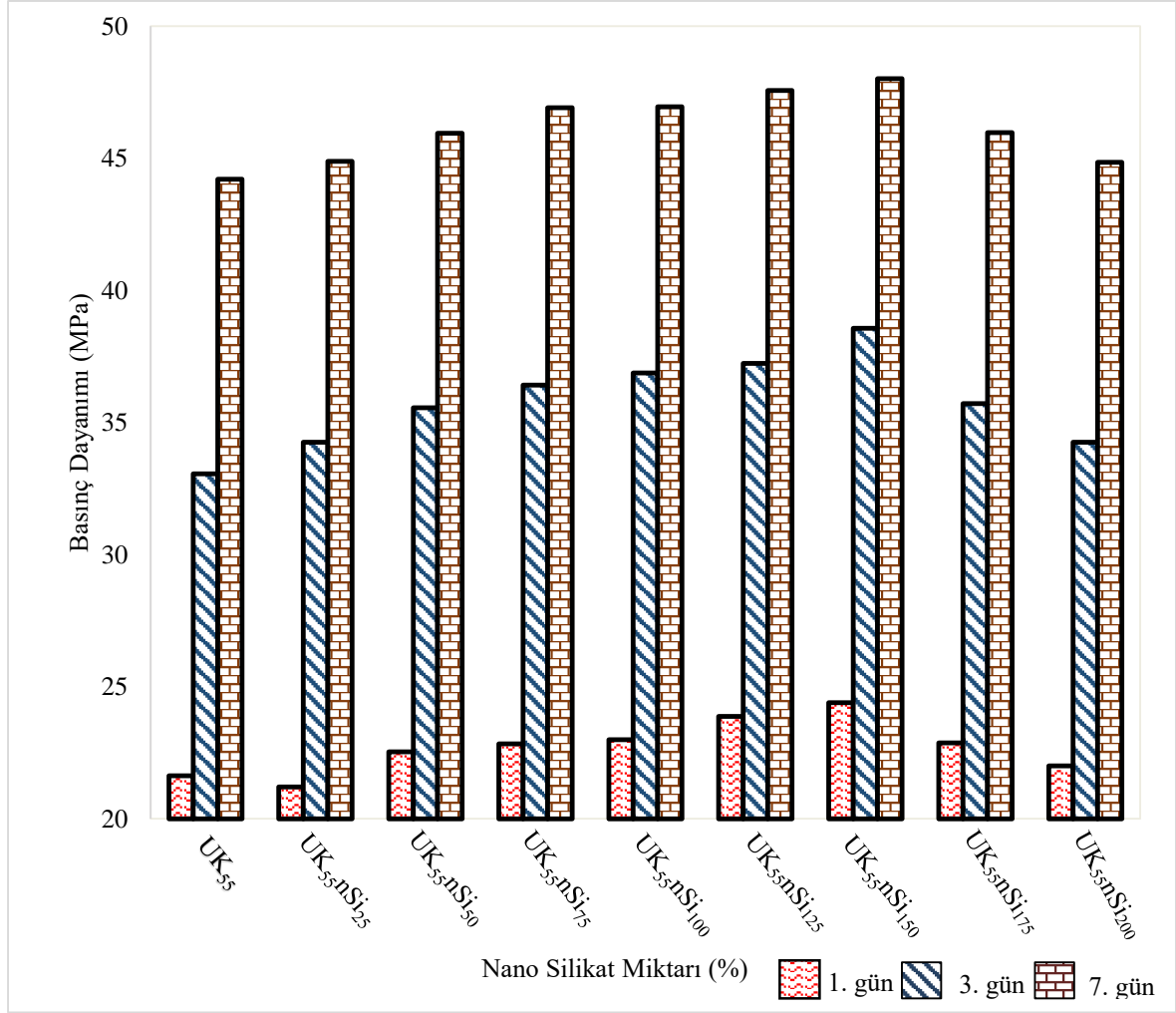
Doygunluk derecesini belirlemede S/B oranı 0.27, S/Ç oranı 0.61, UK/Ç oranı 1.22, B/Kum oranı 2.5, CF/B oranı 0.02 ve S.A/B oranı 0.015 olarak sabit alınmıştır. Değişken ise sadece doygunluk derecesini veren nano silika/bağlayıcı oranıdır. Doymunluk derecesini belirlemek için nano silika, bağlayıcı malzeme miktarının her karışımda ağırlıkça % 0.25 oranında arttırılarak maksimum %2' ye kadar yapılan karışımlarda en yüksek basınç değerini veren oranı belirlemektir.

Şekil 3.1. incelenip analiz edildiğinde en yüksek basınç dayanımı UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> kodlu karışım vermiştir. Bu her üç yaş grubu içinde geçerlidir. Kontrol harcına göre 1 günde artış oranı %12.7, 3. günde artış oranı % 16.63 ve 7. gündeki artış oranı % 8.59 dir. Kontrol harcı (UK<sub>55</sub>) birinci günde 21.63 MPa dayanım verirken 3. günde 33.06 MPa ve 7 günde ise 44.21 MPa' a ulaşarak karışımlar içerisinde en düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu verilere göre ilk günde 21.63 MPa artış olurken ilk gün ile 3 günlük dayanım farkı 11.43 MPa olmuştur. 1. günle 7. gün arasındaki fark 22.58 MPa olduğu görülmüştür. UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> kodlu harcın birinci günde 24.39 MPa dayanım verirken 3.günde 38.56 MPa ve 7 günde ise 48.01 MPa' a ulaşmaktadır. Bu verilere göre ilk günde 24.39 MPa artış olurken ilk gün ile 3 günlük dayanım farkı 14.17 MPa dayanımı vermiştir. 1. günle 7. gün arasındaki fark 23.62 MPa olmuştur. UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> kodlu karışımlarla üretilen numunelerin basınç dayanımı ise kontrol harcına göre 1. günde %1.13, 3. günde %1.17 ve 7. günde ise %1.10' luk artış olduğu görülmüştür. Bu artışlara göre ilk günlerinde yüksek

dayanım verirken ilk günden sonraki dayanım artışı hızı azalmaktadır. Bu sonuçlara göre nano silikanın doygunluk derecesi olarak UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub>'lı karışım seçilmiştir.

Çizelge 3.9. Nano silikalı karışımların oranları

Malzeme	UK <sub>55</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>25</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>50</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>75</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>100</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>125</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>175</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>200</sub>
(nSi) /B	0.000	0.0025	0.0050	0.0075	0.0100	0.0125	0.0150	0.0175	0.020
B/Kum	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
S/B	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
S/Ç	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63
UK/Ç	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
CF / B	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
PVA/B	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.012
S.A/B	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Kısaltmalar	Açıklama								
UK <sub>55</sub>	Kontrol Harcı (%0 Nano Malzeme)								
(UK <sub>55</sub> nSi <sub>25</sub> )	YPLDÇK amaçlı karışım								
UK	Uçucu Kül								
55	Uçucu külün bağlayıcı grubu içindeki yüzdesi								
n	Nano								
Si	Nano malzemenin cinsi (Si=Silika, Al= Alümin)								
150	Nano malzemenin %' si (150=0.015)								
B	Bağlayıcı= (Çimento+UK+Nano malzeme)								
CF	Calcium Formia (Kalsiyum Format) (Priz Hızlandırıcı)								
PVA	Poly(vinyl alcohol) Lif								
S	Karışım Suyu								
Ç	Çimento								
S.A	Süper Akışkanlaştırıcı								



Şekil 3.1. Ön deneyde nano silikalı YPLDÇK numunelerde basınç dayanımı-nano silika oranı ilişkisi

#### Nano alüminli karışımların doygunluk derecelerinin belirlenmesi

Nano alüminli karışımların doygunluk derecesini belirlemek üzere tipik matris karışım tasarımı esas alınarak 1 m<sup>3</sup> için malzeme karışım miktarları Çizelge 3.10.'da verilmiş malzemelerle 1, 3 ve 7. günde basınç deneyine tabi tutulmak üzere 50x50x50 mm boyutunda küp örnekler hazırlanmıştır.

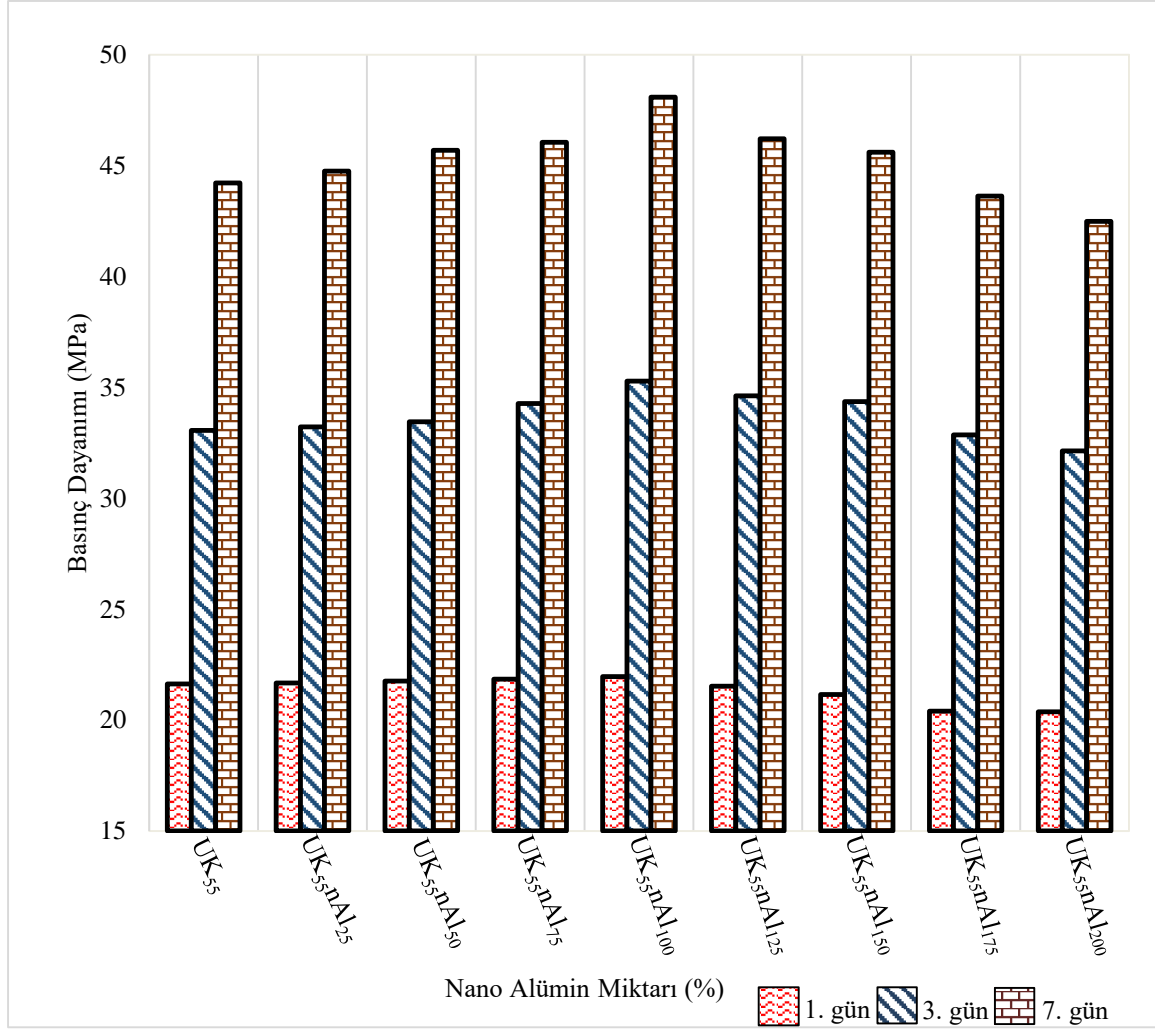
Doygunluk derecesini belirlemede S/B oranı 0.27, S/Ç oranı 0.61, UK/Ç oranı 1.22, B/Kum oranı 2.5 ve CF/B oranı 0.02 olarak sabit alınmıştır. Değişken ise sadece doygunluk derecesini veren nano alümin/bağlayıcı oranıdır. Doymunluk derecesini belirlemek için nano alümin, bağlayıcı malzeme miktarının her karışımda ağırlıkça % 0.25 oranında arttırılarak

maksimum %2' ye kadar yapılan karışımlarda en yüksek basınç değerini veren oranı belirlemektir.

Şekil 3.2. incelenip analiz edildiğinde en yüksek basınç dayanımı UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> kodlu karışım vermiştir. Bu her üç yaş grubu içinde geçerlidir. Kontrol harcına göre 1 günde artış oranı %17.1, 3 günde artış oranı % 20.7 ve 7 günde artış oranı % 28.2 dir. UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> kodlu betonun birinci günde 21.96 MPa dayanım verirken 3.günde 35.28 MPa ve 7 günde ise 48.08 MPa a ulaşmaktadır. Bu verilere göre ilk günde 21.96 MPa artış olurken ilk gün ile 3 günlük dayanım farkı 13.32 MPa olmuştur. 1. gün ile 7. gün arasındaki farkın 25.12 MPa olduğu görülmüştür. UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> kodlu karışımlarla üretilen numunelerin basınç dayanımı ise kontrol harcına göre 1. günde %1.02, 3. günde %1.07 ve 7. günde ise %1.10' luk artış olduğu görülmüştür. Kontrol harcına göre yine artış oranı daha yüksektir. Bu sonuçlara göre nano alüminli karışımlardan doygunluk derecesi olarak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub>' lü karışım seçilmiştir.

Çizelge 3.10. Nano alüminli karışımların oranları

Malzeme	UK <sub>55</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>25</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>50</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>75</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>125</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>150</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>175</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>200</sub>
(nAl) /B	0.000	0.0025	0.0050	0.0075	0.0100	0.0125	0.0150	0.0175	0.020
B/Kum	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
S/B	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
S/Ç	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63
UK/Ç	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
CF / B	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
PVA/B	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.012	0.0124	0.0124	0.012
S.A/B	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Kısaltmalar	Çizelge 3.9.'da açıklanmıştır.								



Şekil 3.2. Ön deneyde nano alüminli YPLDÇK numunelerde basınç dayanımı-nano alümin oranı ilişkisi

### YPLDÇK karışımlarında kimyasal katkı maddesi oranının belirlenmesi

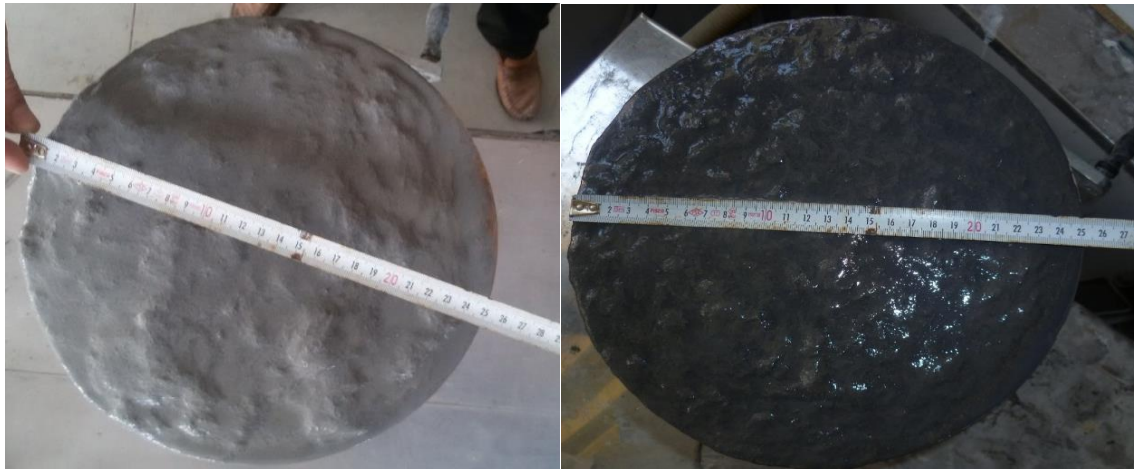
YPLDÇK karışımlarında kullanılacak kimyasal katkı maddesinin oranının belirlenmesinde mini yayılma testi yapılmıştır. Bu test ASTM C 230/C 230M – 08 [90]'e göre yayılma tablasının çapı 255 mm, düşüş yüksekliği 10 mm'dir. Kalıbın iç ölçüleri 100 mm alt çap x 70 mm üst çap x 50 mm yükseklik boyutlarında olup pirinç malzemeden imal edilmiştir (Resim 3.1. ve Resim 3.2.). Manuel yayılma tablası çevrilerek 25 düşüşte 240±10 mm arasında yayılma olacak şekilde kimyasal katkı maddesi ilave edilmiştir. Çimento hamur (harç) numunelerinin (akışkanlık) yayılması çimento hamurunun yerleşme ve işlenebilme yani akıcılık özelliğini belirler. Kimyasal katkı maddesinin kullanım miktarı süperakışkanlaştırıcıyla uygun olacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan miktar ihtiyaçtan fazla olur ise beton karışımının viskozitesinin yüksek olmasından dolayı

süperakışkanlaştırıcı kullanılsa bile arzu edilen yayılma değeri elde edilemeyebilir. Bu sebeple karışım içeriğindeki katı (çimento, nano vb) malzeme ve su miktarları göz önüne alınmalı ve esas deneyler öncesinde deneme karışımları üretilerek karışımın yayılma davranışı araştırılmalıdır.

Deneysel çalışmamızda karışımlar yayılma tablası üzerine yerleştirilen kesik koni içine yerleştirildi ve yerleştirme işlemi bittikten sonra üst yüzey düzeltilerek konik kalıp çıkartılarak serbest düşüşle karışımın yayılma miktarları ölçüldü. Ölçülen bu değerler Çizelge 3.11’ de verilmiştir.



Resim 3.1. Mini yayılma testi



Resim 3.2. Mini yayılmanın ölçülmesi

Çizelge 3.11. Karışımların mini yayılma deney sonuçları

Karışımlar	UK <sub>0</sub>	UK <sub>0</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>0</sub> nSi <sub>150</sub>
Yayılma çapı (mm)	240	240	245
Karışımlar	UK <sub>55</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub>
Yayılma çapı (mm)	240	247	245
Karışımlar	UK <sub>65</sub>	UK <sub>65</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>65</sub> nSi <sub>150</sub>
Yayılma çapı (mm)	250	250	250
Kısaltmalar Çizelge 9'da verilmiştir			

Çizelge 3.11' den de görüldüğü gibi UK kullanılmayan karışımlarda en fazla yayılma 245 mm ile UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> 'de görülür iken UK<sub>0</sub> karışımında 240 mm en düşük yayılma değeri vermiştir.

%55 UK kullanılarak yapılan karışımlarda en fazla yayılma 247 mm ile UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> 'de görülür iken UK<sub>55</sub> ve UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> karışımında 240 mm ve 245 mm olarak en düşük yayılma değeri vermiştir.

%65 UK kullanılarak yapılan karışımlarda en düşük yayılma 250 mm ile UK<sub>65</sub> 'de görülür iken diğer nano katkılı harç karışımları 250 mm olarak eşit olduğu görülmüştür.

#### Matris karışım tasarımı, üretimi ve test edilmesi

Beton yapıların servis ömürlerinin kısalığı, bozulan yapıların tamir ve değişimi, inşaat sırasında oluşan trafik yoğunluğu, salınan CO<sub>2</sub> ve CO gazları ve yakıt tüketimi sonuçlarından dolayı önemlidir. Betonarme yapıların düşük dayanıklılığı ( bozulma, dökülme, ayrışma ve çatlak oluşumu) servis ömrünü kısaltan temel sebeplerden biridir [91]. Bu faktörler genel olarak betonun çevre ile arasında oluşan çeşitli atmosferik, fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin sonucudur. Bu bozulmalar yapının servis ömrü boyunca farklı safhalarda görülebilir. Bunlar, betonun dayanımı ve rijitliğinde azalma ve betonda paslanma, alkali-silika reaksiyonu ve sülfat saldırısı gibi çeşitli ayrışmalara ve çatlak oluşumuna sebep olabilecek diğer bozulma tiplerinin oluşumudur [91,92]. Bu sebeplerden dolayı, dayanıklılık hayati önem taşımaktadır ve betonun kırılğan yapısıyla ilişkilendirilebilir.

Çevresel ve ekonomik sebeplerden dolayı, geleneksel, yüksek performanslı ve yüksek dayanıma sahip betonların üretiminde endüstriyel yan ürünlerden biri olan uçucu külün katkı maddesi olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Katkı malzemeleri içerisinde, uçucu kül en yaygın, en ekonomik ve çimento ve betona uygun olanlardan bir tanesidir.

UK' nin son zamanlarda kimyasal katkı maddesinin yaygınlaşması ile beraber betonda kullanımını artırmıştır. UK'nin betonda kimyasallarla beraber kullanımındaki başarı YPLDÇK karışımlarına da yansımaktadır. Günümüzde ekonomik YPLDÇK karışımları elde etmek için UK vazgeçilmez bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu (YFC) bazı kimyasal özellikleri nedeniyle YPLDÇK üretiminde özellikle tercih edilmektedir. Portland çimentosunun üretimi UK ve YFC gibi malzemelere kıyasla çok daha fazla enerji gerektirmekte, hava kirliliğini artırmakta, doğal kaynakların azalmasına neden olmasının yanında maliyeti arttırmaktadır. Bu malzemeler arasında UK ülkemizde fazla miktarlarda mevcut olup, genel olarak çimentoya kıyasla çok daha ucuzdur.

Bu tez çalışmasında yapıların maruz kaldıkları eğilmede çekme, basınç dayanımı, basınç dayanımı- birim deformasyon (Elastisite Modülü) ilişkisi, eğik kesme mukavemeti testleri yanında dış çevre koşullarının yansıtılabilmesi ve yüksek oranda UK ikameli malzemelerin farklı çevresel koşullardaki etkileri üzerine bir görüş oluşturulması hedeflenmiştir. ASTM 1202 [93] test metodu vasıtasıyla klor iyonu geçirimsizliği ölçülmüştür. Ayrıca taze ve sertleşmiş birim hacim değişimi nedeniyle oluşan çatlaklar ve mikro-yapısal değişiklikler taramalı elektron mikroskobu ve çatlak mikroskobu kullanılarak analiz edilmiştir.

#### Malzemeler ve karışım miktarları

Erken yaş yüksek dayanımlı, boyutsal uyumluluk ve yüksek bağ performansı gösteren nano boyutta modifiye edilmiş YPLDÇK karışımlarının geliştirilmesi tez çalışmasının temel amacıdır. Bu temel amaç doğrultusunda deneysel bir çalışma tasarlanmıştır. Bunun için, UK ve iki farklı nano malzeme kullanarak YPLDÇK karışımları hazırlanmıştır. Üretim süreci boyunca, s/b malzeme oranı 0.27 ve uçucu kül- çimento (UK/Ç) oranı 1.22, S.A./B oranı 0.015, PVA lif – Bağlayıcı (PVA/ B) oranı 0.0124 ve bağlayıcı- silis kumu (B/ Kum) oranı ise 2.50 olarak sabit alınarak diğer değişkenlerle beraber numunelerin üretimi için 20 dm<sup>3</sup>'lük harç mikseri kullanılmıştır. Çizelge 3.12.' de üretimi amaçlanan YPLDÇK karışımlarının oranları görülmektedir.

Çizelge 3.12. YPLDÇK karışımlarının oranları

Karışımın Adı	Uçucu Külsüz Karışım			% 55 Uçucu Küllü Karışım			% 65 Uçucu Küllü Karışım		
	UK <sub>0</sub>	UK <sub>0</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>0</sub> nSi <sub>150</sub>	UK <sub>55</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub>	UK <sub>65</sub>	UK <sub>65</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>65</sub> nSi <sub>150</sub>
Nano/B	0.00	0.010	0.015	0.00	0.010	0.015	0.00	0.010	0.015
B/Kum	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
S/B	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
UK/Ç	-	-	-	1.22	1.22	1.22	1.86	1.86	1.86
CF / B	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
PVA/B	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124
S.A/B	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

Tüm karışımların hazırlanmasında 20 litre kapasiteli Hobart marka mikser kullanılmıştır (Resim 3.3.). PÇ, UK ve kum önce kuru olarak 100 devir/dk hızda 1 dk karıştırılmıştır. Nano malzemeler karışım suyunun büyük miktarı ile 20 dakika karıştırıcı ile ayrı bir kaptaki karıştırılmıştır. PÇ, UK ve kum karışımına nano malzeme karışımına eklenen karışım suyundan kalan su ve kimyasal katkı eklenmiş ve 150 devir/dk hızda 1 dk süreyle 20 litrelik mikserde karıştırılmıştır. Ardından 20 dakika ayrı bir kaptaki karışan nano malzeme karışımına eklenmiş ve daha sonra karıştırma işlemi 300 devir/dk hızda 2 dk daha devam etmiştir. Ardından PVA lifleri matrisine eklenmiş ve karıştırma işlemi mikserde 150 devir/dk hızda 3 dk devam etmiştir.

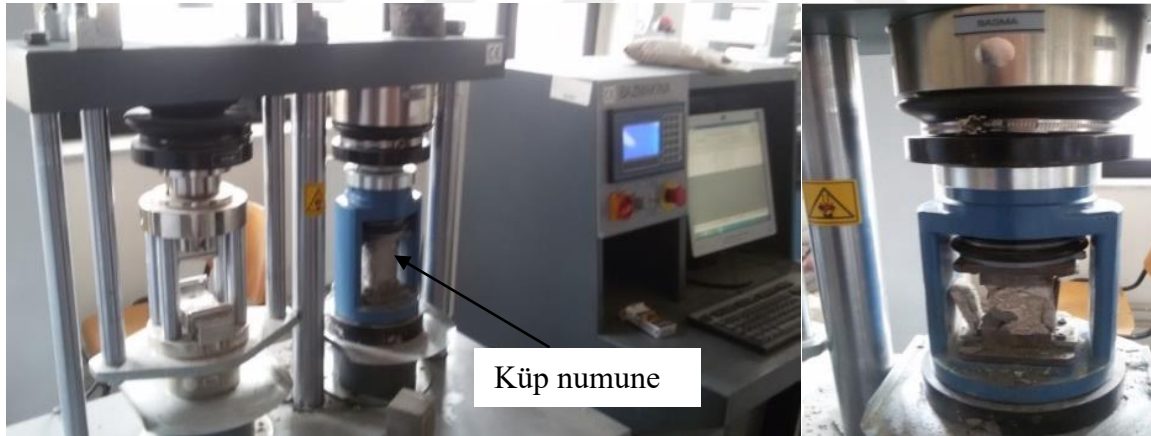


Resim 3.3. 20 litre kapasiteli harç mikserinde YPLDÇK üretimi

### 3.2.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

#### Basınç dayanım deneyi

Hazırlanan YPLDÇK karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı için her yaşta 3 adet numune kullanılmak üzere 50×50×50 mm boyutlarında toplamda 15 adet küp numunesi hazırlanmıştır. Numuneler ortalama sıcaklığı  $23 \pm 2$  °C ve nemi  $\%95 \pm 5$  olan özel kür tankında deneyin yapılacağı tarihe kadar kür edilmiştir. Bu kür yönteminin seçilmesinin ana sebebi literatürde YPLDÇK için kullanılan en yaygın kür yönteminin bu şekilde olmasıdır. Böylelikle tez kapsamında elde edilen deney sonuçları kolaylıkla literatür ile karşılaştırılabilecektir. Basınç dayanımı testi ASTM C 39 [89] standardına uygun olarak 200 ton kapasiteli deney aleti kullanılarak 50 mm boyutlu küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin basınç dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır. Resim 3.4.'de basınç dayanım test aleti görülmektedir.



Resim 3.4. Küp numune üzerinde basınç dayanımı testi

$$R_c = F_c / A \quad (1)$$

Burada;

$R_c$  = Basınç Dayanımı ( $N/mm^2$ ),

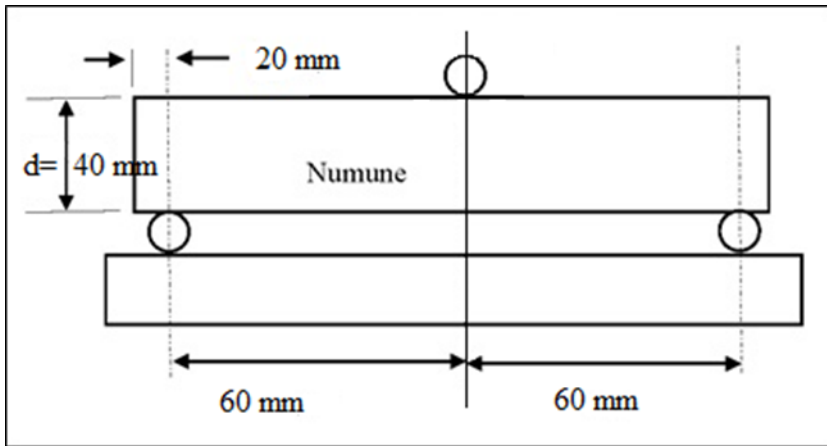
$F_c$  = Kırılma Yüğü (N),

$A$  = Numunenin Kesit Alanı ( $mm^2$ )

### Eğilmede çekme dayanımı deneyi

YPLDÇK’de şekil değiştirme ile birlikte ilk çatlak oluşumu genellikle görülür. Şekil değiştirme sertleşme davranışı sergileyen malzemelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde en uygun test yöntemi tek eksenli çekme testidir. Bu test esnasında yük altında meydana gelen eğilmede çekme dayanımı, şekil değiştirme kapasitesi, orta açıklık deformasyonu, çatlak genişliği, sayısı ve dağılımı saptanacaktır. YPLDÇK karışımlarının şekil değiştirme kapasiteleri üç noktalı eğilmede çekme dayanımı testi uygulanması ile belirlenmiştir. YPLDÇK karışımını ile ilgili yapılan bir çalışmada ilk şekil değiştirme sertleşmesi davranışı çimento bağlayıcılı kompozitlerin üç noktalı eğilmede çekme testi sonucu numunelerin orta noktasında ölçülen şekil değiştirme ile eksenel çekme yüklemesi altında birim şekil değiştirme kapasitesi arasında doğrudan bir bağıntı tespit edilmiştir. Bu bağıntı doğrultusunda ve deney esnasında kullanılan numunelerin geometrik özellikleri de dikkate alınarak modellemeler yapılmıştır [94]. Tezde bu modellemelerden yararlanılmıştır.

Her bir YPLDÇK karışımından eğilmede çekme dayanımı testinde kullanılmak üzere TS EN 196-1 [95]’ e göre  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiş ve 1,3, 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda her yaş için 3 numune olmak üzere her bir karışım için toplam 15 numune test edilmiştir. Eğilmede çekme deney aleti kapalı devre elektro-mekanik test cihazı ile deformasyon kontrollü ve  $0.005$  mm/saniye hızla yükleme yapılmıştır. Ayrıca numunelerin eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki eşiklikten hesaplanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.3.’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Üç noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği

$$R_f = 1.5 \times F_f \times l / b^3 \quad (2)$$

Burada;

$R_f$  = Eğilme Dayanımı ( $N/mm^2$ ),

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

$l$  = Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm),

$b$  = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm).

### Elastisite modülü deneyi

Deney, ASTM C 469 [96] esas alınarak 100 x200 mm boyutunda (Resim 3.5.) 90 günlük silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney, her bir karışımdan 3 adet numune üzerinde yapılarak aritmetik ortalaması YPLDÇK' nin elastisite modülü olarak değerlendirildi.



Resim 3.5. Elastisite modülü deneyi numuneleri

Elastisite modülü ( $E$ ), YPLDÇK numunelerinde elastik bölgede uygulanan yükün meydana getirdiği basınç gerilmelerinin, numune üzerinde oluşturduğu boyuna şekil değiştirmeye ( $\epsilon$ ) oranıdır. Yani  $E = \sigma / \epsilon$  dir. Bu formül elastik bölgede oluşturulan gerilme ( $\sigma_b$ ), deformasyon ( $\epsilon$ ) doğrusunun eğiminden ( $E = tg\alpha$ ) belirlenmiştir (Resim 3.6.). Boy deformasyon ölçümü

verileri LVDT yardımıyla okunmuş ve laboratuvarında mevcut olan dataloger ile bilgisayara aktarılarak Microsoft Excel yardımıyla elastisite modülü hesaplanmıştır.



Resim 3.6. Elastisite modülü deney düzeneği

### Eğik kesme deneyi

Daha önceden dökülmüş (5 yıllık) betondan 10x20 cm' lik silindir numuneler Resim 3.7.'den görüldüğü gibi karotla alınmış ve bu numuneler 45° açı ile kesilip hazırlanmış ve üzerine nano boyutta modifiye edilmiş YPLDÇK karışımları dökülerek yeni silindir numuneler oluşturulmuştur. Bu numunelerin basınç dayanımı ASTM C882 [97] göre ölçülüp hasarın nereden ve nasıl meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Resim 3.7. Bağ dayanımı (eğik kesme deneyi) için deney numuneleri

#### Kısıtlanmış rötre deneyi

Bu deney ASTM C1581/C1581M-18 [98] esaslarına göre yapılmıştır. Genel olarak betonda en çok rastlanan çatlaklar rötre çatlaklarıdır. Bu çatlaklar oluş nedenine göre isim alırlar. Bu rötrelerden birisi de kısıtlanmış rötredir. Kısıtlanmış rötre basit bir deney yardımıyla analiz edilebilir. Beton harcını çelikten yapılmış bir çember (Resim 3.8.) etrafına yerleştirip harcın sertleşmesini bekledikten sonra beton analiz edildiğinde serbest bir şekilde büzülmesi engellenen betonda düşey çatlakların meydana gelmiş olduğu görülür. Bu çatlakların karakterizasyonları (boyut ve dağılım), maksimum 40 kat büyüklüğe çıkabilen ışıklı el mikroskobu (Resim 3.9.) kullanılarak 7 gün boyunca takip edilerek analiz edilebilir. Tezde bu yöntem kullanılmıştır. Bu rötre çatlaklarını genellikle var olan beton üzerine ilave edilen yeni betonlarda, geniş perdelerde görmek mümkündür. Bu tür çatlaklar geniş perde betonları içerisinde var olan boşlukların yakınında belirgin bir şekilde gelişebilir. Kısıtlanmış rötre sebebiyle oluşan çatlakları azaltmak için bazı önlemler alınabilir bunlardan bazıları ise şöyle sıralanabilir; çelik tel veya polietilen fiber kullanmak, dayanımdan ödün vermeden çimento miktarını düşürmek, hidrasyon ısısı düşük çimento kullanmak, betonun su/çimento oranını düşürmek.



Resim 3.8. YPLDÇK betonu kısıtlanmış rötre deney aleti [98]

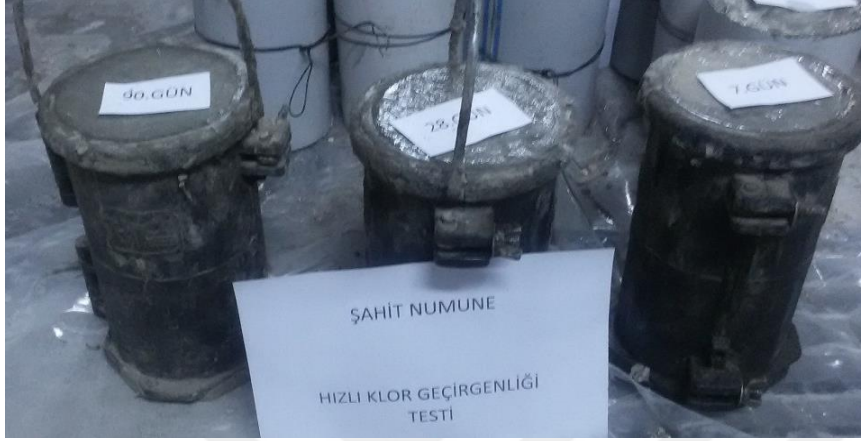


Resim 3.9. YPLDÇK betonu kısıtlanmış rötre çatlaklarının ölçülmesi

### Hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyi

YPLDÇK karışımlarının üretiminin tamamlanması ve temel mekanik özelliklerin belirlenmesinin ardından öncelikli olarak ASTM C 1202 [93]' ye göre hızlı klor iyonu geçirimsizliği (HKİG) testlerine tabi tutulmak üzere YPLDÇK numuneleri Resim 3.10.'da görüldüğü gibi tekrardan üretilmiştir. Başlangıçta  $\text{Ø}100 \times 200$  mm boyutlarında üretilen silindirik numuneler  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  ve  $\%50 \pm 5$  bağıl neme sahip laboratuvar ortamında kalıplar içerisinde bir gün süreyle kür edildikten sonra her bir silindir numuneden elmas bıçaklı testere kullanılarak 50 mm kalınlığında üç adet disk numune hazırlanmıştır. Numuneler 3, 7 ve 28. günlerin sonuna kadar  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  ve  $\%95 \pm 5$  bağıl nemde özel hava geçirimsiz

poşetlerde saklanmıştır.  $\text{Ø}100 \times 50$  mm boyutlarındaki silindir numuneler (Resim 3.10.), belirlenen kür sürelerinin tamamlanmasının ardından Resim 3.11.'de görülen kapalı devre elektro-mekanik test cihazı yardımıyla numunelerin klor geçirgenliği değerleri Coulomb cinsinden hesaplanmıştır.



Resim 3.10. Hızlı klor geçirgenliği testi için hazırlanmış 100x200 mm boyutundaki numuneler



Resim 3.11. Hızlı klor geçirgenliği testi için gerekli ekipman

### SEM analizi

Basınç deneyi sonrası her yaştaki bir numuneden, mikro yapısını incelemek için yeterli büyüklükte bir parça alınarak aseton içerisinde saklanmıştır. Daha sonra parçalar aseton içinden çıkarılarak SEM analizleri yapılmıştır.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Basınç Dayanımı

#### 4.1.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları deney sonuçları

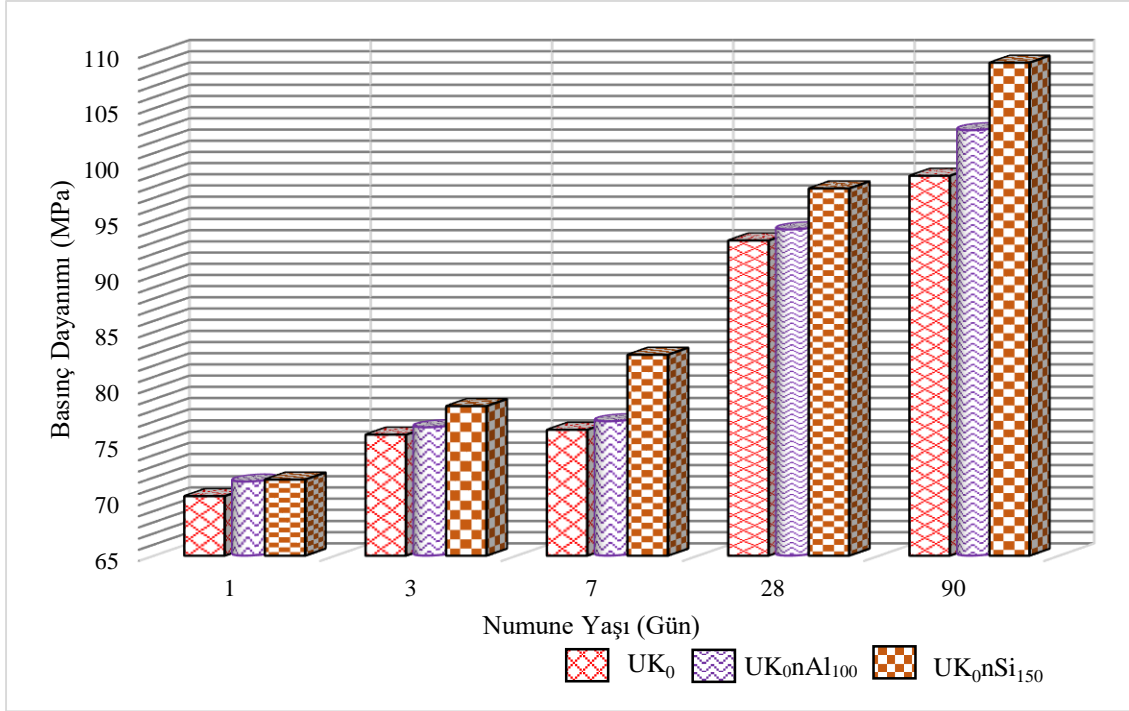
Şekil 4.1. incelenip analiz edildiğinde, numune yaşına bağlı olarak nano malzeme çeşidinin basınç dayanımına etkisi görülmektedir. Bu numunelerde uçucu kül kullanılmamıştır. Kontrol harcı (UK0) için test yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK0'ın 1 günlük basınç dayanımı 70.32 MPa iken 90 günlük basınç dayanımı 98.96 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçüğü ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 28.64 MPa'lık fark olduğu hesaplanmıştır. Numune yaşına bağlı olarak dayanımda artış olması beklenen bir durum olmasına karşı numunelerin ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %75'ini aldığı görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının azaldığı görülmüştür.

Nano malzemeli karışımların basınç dayanımı kendi aralarında yaş bazında karşılaştırıldığında nano malzemenin yaşa bağlı olarak etkisi analiz edilebilir. Bundan dolayı, UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> numunelerinin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub>'ün 1 günlük basınç dayanımı 71.62 MPa iken 90 günlük basınç dayanımı 103.03 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 31.41 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> numunelerin ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %76'nı verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin numune yaşına bağlı dayanıma etkisi UK<sub>0</sub>'a göre daha yüksekte olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak kalsiyum alümin hidrasyonundan oluşan kalsiyum hidroksit ile nano alüminin reaksiyonu sayesinde beton içerisinde C-A-S (kalsiyum alüminat silika) jellerinin oluşmasını sağlayarak karışımın basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir [69]. Yüksek reaktif yüzey alanına sahip olmasından dolayı hidrasyon reaksiyonlarında belli bir artış meydana getirmesi [99] ve ayrıca tanecik boyutlarının çok küçük olmasından dolayı mikro boşlukları doldurması olarak söylenebilir [71].

UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> karışımının test yaşı artıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> 'nun 1 günlük basınç dayanımı 71.80 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 109.07 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 37.27 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> numunelerin ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %74' nü verdiği görülmüştür. Fakat dayanım hızı 7 günlük nano silika içeren numunelerde 28. günlük dayanımının %85' ini kazanarak diğer numunelere göre 7. günde daha hızlı dayanım artışı kazanmış olduğu görülmektedir. Uçucu külsüz YPLDÇK numunelerinin en düşük ve en yüksek basınç dayanımı farkı UK<sub>0</sub> için 28.64 MPa, UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> için 31.41 MPa ve UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> için 37.27 MPa olduğuna göre, bu karışımların arasında en belirgin fark UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub>'li olan karışımda görülmüştür. Bunun sebebi olarak nano silikanın, boyutu yaklaşık olarak 10 nm mertebesindeki C-S-H jeli içerisinde oluşan boşlukları iyi bir biçimde doldurup bu sayede matrisin daha yoğun olmasını sağlaması söylenebilir. Ayrıca nano silika, C-S-H jeli içerisinde çekirdek meydana getirmek suretiyle jel tanecikleri ile sıkı bir bağ oluşturarak hidrasyon ürünlerinin yapısının stabilitesini iyileştirmektedir [100]. Ayrıca nano silikanın çimento hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırarak erken yaş dayanımına katkı sağladığı [101] ve çimento hidrasyonu sürecinde oluşan Ca(OH)<sub>2</sub> ile puzolanik reaksiyonu sonucu daha fazla C-S-H oluşmasını sağlayarak betonun özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir [102].

Şekil 4.1. incelenip analiz edildiğinde, nano malzemelerin birbirleriyle farkı görsel olarak görülmektedir. Bütün karışımlarla üretilen numunelerin test yaşı artıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı arttığı görülmektedir.

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>0</sub>'ın 1 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> ' nın 1 gündeki dayanımı 102; UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> ' nin 1 gündeki dayanımı %102.1 olduğu görülmektedir. UK<sub>0</sub>'ın 3 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak; UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> ' nın 3 gündeki dayanımı 101; UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> ' nin 3 gündeki dayanımı %103 olduğu görülmektedir. UK<sub>0</sub>'ın 7 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> ' nın 7 gündeki dayanımı 102; UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> ' nin 7 gündeki dayanımı %109 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. UK<sub>0</sub>+Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Bu sonuçlara göre nano malzeme içeren karışımların nano malzeme içermeyen karışımlara kıyasla basınç dayanımını erken yaşlarda arttırdığı görülmektedir. En iyi basınç dayanım sonuçlarını nano alümin ve nano silika içeren karışımlar verdiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak nano silika ve nano alümin içeren karışımlarda bu nano malzemelerin geniş ve yüksek reaktif yüzey alanlarının bir sonucu olarak hidrasyon reaksiyonlarında belli bir artış meydana getirmiş olması söylenebilir [99]. Bunun sonucu olarak priz almaları kontrol harcına göre hızlanmış olup erken yaş basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir. Ayrıca, nano malzemelerin taneciklerinin boyutlarının çok küçük olmasından dolayı nano malzeme içermeyen karışımlara göre nano malzeme içeren karışımların küçük taneciklerinin mikro düzeyde dolgu etkisi oluşturduğu söylenebilir [103].

#### 4.1.2. Uçucu kül katkı oranı %55 YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.2. incelenip analiz edildiğinde, UK<sub>55</sub> (%55 uçucu kül + %45 çimentolu) karışımında, değişken olarak ilave edilen nano malzeme cinsi ve deney yaşı olduğu görülmektedir. UK<sub>55</sub> test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>55</sub>'in 1 günlük basınç dayanımı 21.36 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 69.67 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 48.31

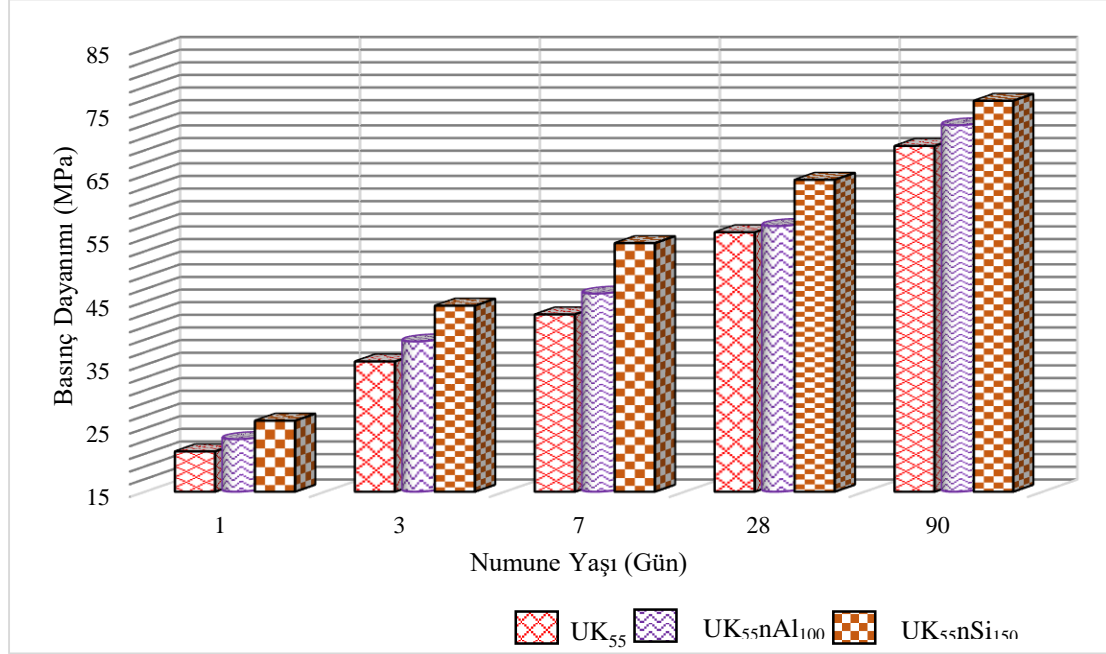
MPa fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>55</sub> numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında bütün numunelerin numune yaşına bağlı basınç dayanımlarında kontrol harcının en düşük basınç dayanım değerleri verdiği görülmektedir. Kontrol harcının ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %38' ini verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir.

Nano malzeme ile üretilen karışımların basınç dayanımı kendi aralarında yaşlarına göre analiz edilebilir. Bundan dolayı; UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> karışımın test yaşı artıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub>'ün 1 günlük basınç dayanımı 23.28 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 72.93 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 49.65 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> numuneler ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %40' ını verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir. Bu sonuca göre UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin numune yaşına bağlı dayanıma etkisinin UK<sub>55</sub>'e göre biraz daha yüksekte olduğu söylenebilir.

UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> karışımın test yaşı artıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub>'nin 1 günlük basınç dayanımı 26.19 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 76.82 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 50.64 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> numuneler ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %41' ini verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir. Bu sonuçlara göre en iyi basınç dayanımı nano silis içeren karışımlar vermiştir.

Şekil 4.2. detaylı olarak analiz edildiğinde, genellikle 1 günlük basınç dayanımları birbirine çok yakın ve 20-23 MPa civarında iken UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> nin basınç dayanımı 25 MPa' nın üzerindedir. Karışımların basınç dayanımı ile numune yaşı arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Bütün karışımlarla üretilen numunelerin deney yaşına bağlı olarak YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı arttığı görülmektedir. Genel olarak UK<sub>55</sub> karışımlarda ilk

günkü basınç dayanımları UK<sub>0</sub>' lı numunelere göre oldukça düşüktür. Bunun nedeninin UK miktarı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.2. UK<sub>55</sub>+Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>55</sub>'ın 1 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub>' nın 1 gündeki dayanımı 109; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 1 gündeki dayanımı %123 olduğu görülmektedir. UK<sub>55</sub>'ın 3 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub>' nın 3 gündeki dayanımı 109; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 3 gündeki dayanımı %125 olduğu görülmektedir. UK<sub>55</sub>'ın 7 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub>' nın 7 gündeki dayanımı 108; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 7 gündeki dayanımı %126 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.2. incelenip analiz edildiğinde, nano malzemeler karışımların erken yaş basınç dayanımlarını ve yaşa bağlı olarak da iler ki yaş basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Genel olarak uçucu kül içermeyen ve nano malzeme içeren karışımların basınç dayanımları ve % 55 uçucu kül ve nano malzeme içeren karışımların basınç dayanımları benzerlik göstermektedir. Uçucu külün puzolanik özelliğinden dolayı karışımın erken yaş basınç dayanımındaki negatif etkisini nano malzemelerin iyileştirdiği söylenebilir. Nano malzemelerin basınç dayanımlarındaki etkilerinin sebepleri genel olarak %0 uçucu kül içeren karışımların basınç dayanımı kısmında verilmiştir.

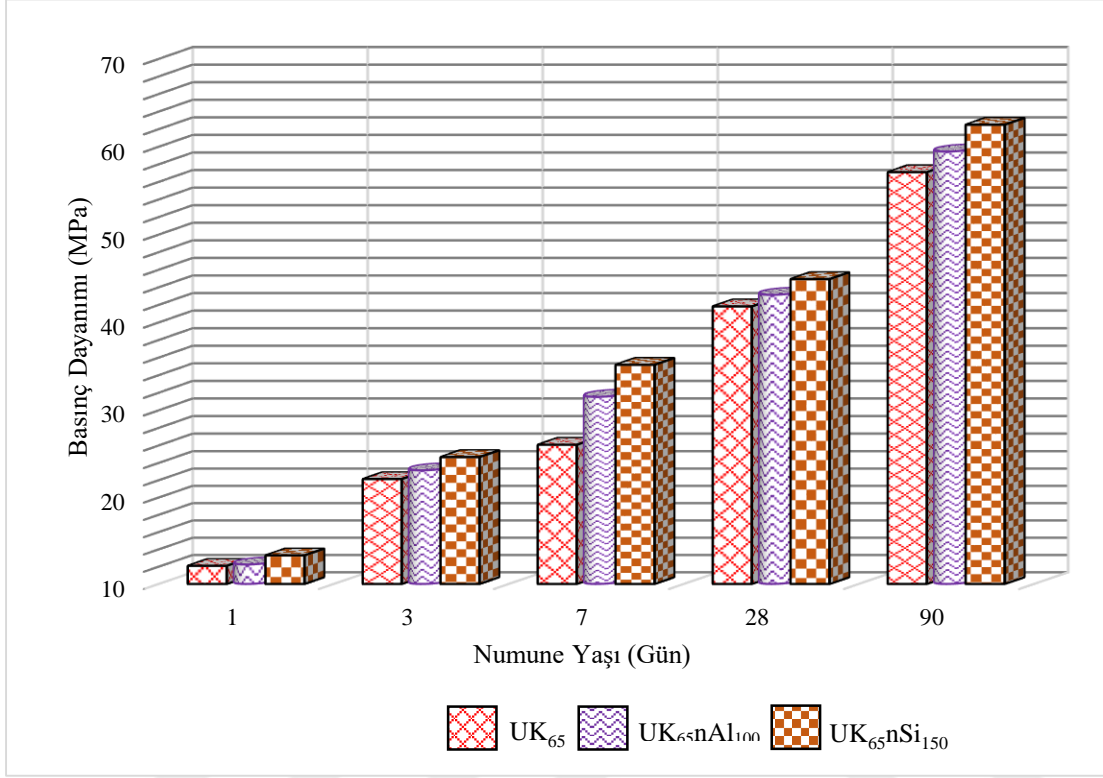
### 4.1.3. Uçucu kül katkı oranı %65 YPLDÇK karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.3. incelenip analiz edildiğinde YPLDÇK karışımların, UK<sub>65</sub> (%65 uçucu kül + %35 çimentolu) numunelerde, değişken olarak ilave edilen nano malzeme cinsi ve test yaşı olduğu görülmektedir. UK<sub>65</sub> test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>65</sub>'nin 1 günlük basınç dayanımı 12.10 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 57.11 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 45.01 MPa fark olduğu hesaplanmıştır. Kontrol harcının ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %29' unu verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir.

UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> karışımın test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nun 1 günlük basınç dayanımı 12.25 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 59.45 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 47.20 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> numuneler ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %29' unu verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir. Bu sonuca göre UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin tüm yaşlara bağlı dayanıma etkisi UK<sub>65</sub>' e göre biraz daha yüksekte olduğu söylenebilir.

UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> karışımın test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı arttığı görülmektedir. UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> 'nun 1 günlük basınç dayanımı 13.31 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımı 62.51 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasında 49.20 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> numuneler ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %30' unu verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına bağlı olduğu söylenebilir. Bu sonuca göre UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> malzemenin tüm yaşlara bağlı dayanıma etkisi UK<sub>65</sub> ve UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> göre biraz daha yüksekte olduğu söylenebilir.

Genel olarak UK<sub>65</sub> karışımlarda ilk günkü basınç dayanımları UK<sub>55</sub> ve UK<sub>0</sub>' lı numunelere göre oldukça düşüktür. Bunun nedenin UK miktarı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.3. UK<sub>65</sub>+Nano malzemeli numunelerin basınç dayanımı – yaş ilişkisi

Şekil 4.3.'de %65 UK basınç dayanımı- numune yaşı ilişkisi incelenip analiz edildiğinde, bütün karışımlarla üretilen numunelerin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Karışımların basınç dayanımı ile numune yaşı (gün) arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir.

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>65</sub>'ın 1 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 1 gündeki dayanımı 101; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 1 gündeki dayanımı %110 olduğu görülmektedir. UK<sub>65</sub>'ın 3 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 3 gündeki dayanımı 105; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 3 gündeki dayanımı %111 olduğu görülmektedir. UK<sub>65</sub>'ın 7 günlük basınç dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 7 gündeki dayanımı 120; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub>' nin 7 gündeki dayanımı %134 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.3. incelenip analiz edildiğinde, nano içeren karışımlar erken yaş basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Yüksek oranda uçucu kül kullanılmasına rağmen erken yaş dayanımında nano malzemelerin uçucu külün erken yaş dayanımındaki negatif etkisini sönmülediği ve basınç dayanımında pozitif etki meydana getirdiği söylenebilir. Nano malzemelerin basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin sebepleri %0 uçucu kül içeren karışımların basınç dayanımı kısmında ele alınmıştır.

## 4.2. Eğilmede Çekme Dayanımı

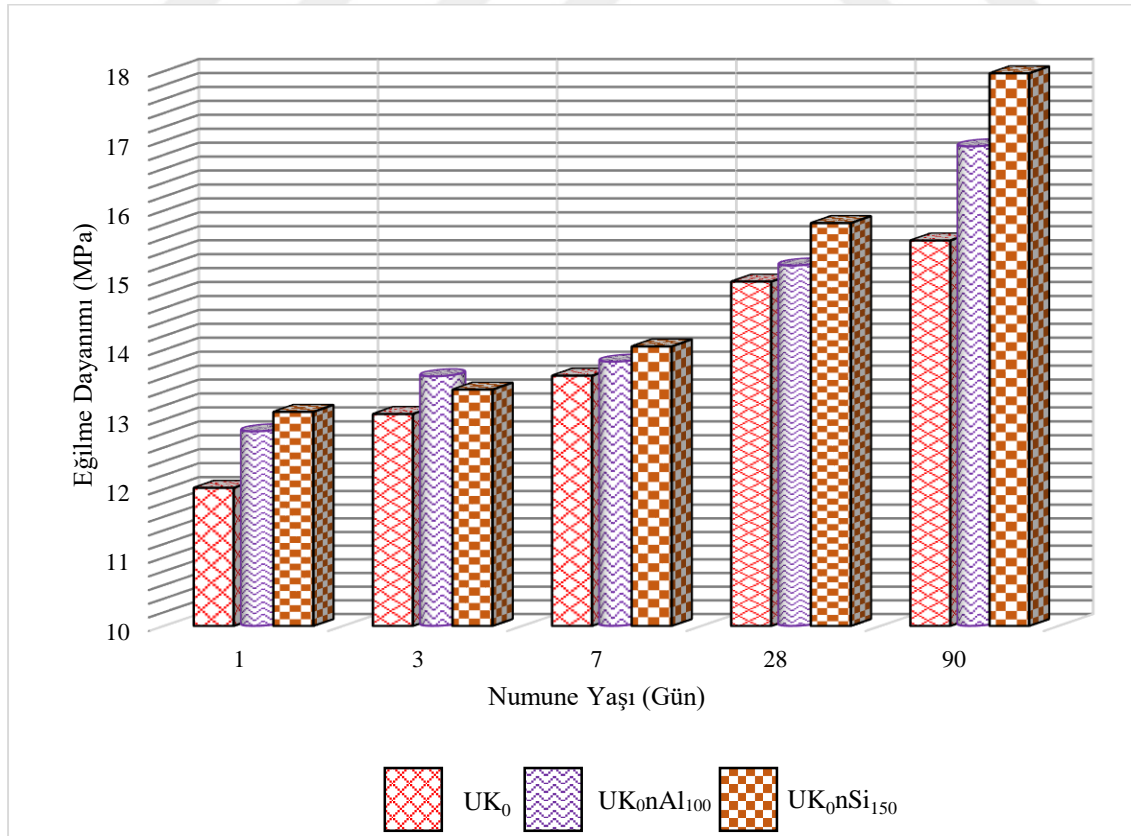
### 4.2.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı

Şekil 4.4. incelenip analiz edildiğinde, kontrol harcının (UK0) test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı arttığı görülmektedir. Bütün YPLDÇK karışımlarla üretilen numunelerin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımlarının arttığı görülmektedir. Karışımların eğilme dayanımı ile numune yaşı (gün) arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. UK0' ın 1 günlük eğilme dayanımı 12.02 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 15.57 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımlar en küçük ile en büyük arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 3.55 MPa fark olduğu hesaplanmıştır. Kontrol numunesinin ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %80' ini verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının azaldığı görülmüştür.

Nano malzemeli karışımların eğilme dayanımı kendi aralarında yaşlara göre karşılaştırılarak analiz edilebilir. Bundan dolayı;

UK<sub>0n</sub>Al<sub>100</sub> 'nun 1 günlük eğilme dayanımı 12.83 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 16.92 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 4.09 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>0n</sub>Al<sub>100</sub> numunesi ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %84' ünü verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre UK<sub>0n</sub>Al<sub>100</sub> malzemenin numune yaşına bağlı dayanıma etkisi UK<sub>0</sub>' a göre daha iyidir.

UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> karışımının test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı arttığı görülmektedir. UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> 'nun 1 günlük eğilme dayanımı 13.11 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 17.97 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 4.86 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> numunesi ilk günde 28 günlük dayanımının yaklaşık %83' ünü verdiği görülmüştür. Yani numune yaşı arttıkça dayanımdaki artış hız oranının azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> malzemenin numune yaşı bağlı dayanıma etkisi UK<sub>0</sub> ve nAl<sub>100</sub> göre çok daha yüksekte olduğu söylenebilir. Çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanım özellikleri ve hidrate olmuş çimentonun mikro yapısı arasında bir ilişki olduğu daha önceki çalışmalarda vurgulanmış ve ayrıca eğilme dayanımını, lif ve hidrate olmuş çimento ürünleri arasındaki ara yüz özelliklerinin büyük oranda etkilediği belirtilmiştir. Nano malzemelerin matrisi ve ara yüzü iyileştirmelerinden dolayı eğilme dayanımlarında da artışlar meydana gelmektedir [104]. Dolayısıyla nano silikanın hidratasyon reaksiyonlarındaki hızlandırıcı rolü ve ara yüzü iyileştirmesindeki etkilerinden dolayı nano silika içeren numunelerin en iyi eğilme dayanımı sonuçlarını vermiş olduğu söylenebilir.



Şekil 4.4. UK<sub>0</sub>+Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>0</sub>'ın 1 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>0nAl100</sub> ' nın 1 gündeki dayanımı 107; UK<sub>0nSi150</sub> ' nin 1 gündeki dayanımı %109 olduğu görülmektedir. UK<sub>0</sub>'ın 3 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>0nAl100</sub> ' nın 3 gündeki dayanımı 104; UK<sub>0nSi150</sub> ' nin 3 gündeki dayanımı %103 olduğu görülmektedir. UK<sub>0</sub>'ın 7 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>0nAl100</sub> ' nın 7 gündeki dayanımı 102; UK<sub>0nSi150</sub> ' nin 7 gündeki dayanımı %103 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.4' ten görüldüğü üzere genel olarak nano malzeme içeren karışımlar erken yaş eğilme dayanımlarını olumlu etkilemişlerdir. Özellikle 1 günlük numunelerin eğilme dayanımları üzerinde nano malzemeli karışımların çok etkili olduğu görülmektedir. Genel olarak nano silika içeren karışımların diğer nano içeren karışıma ve kontrol harcına göre eğilme dayanımı daha yüksektir. Yapılan çalışmalarda, eğilme dayanım özelliklerini hidrate olmuş çimentonun mikro yapısı ve lif ile hidrate olmuş çimento arasındaki ara yüz kısmının etkilediği belirtilmektedir. Bundan dolayı, nano malzemelerin özellikle nano silikanın boyutlarının küçük olmasından dolayı ara yüz özelliklerini iyileştirdiğinden eğilme dayanımını arttırdığı söylenebilir [104]. Ayrıca nano malzemelerin hidratasyon reaksiyonlarının hızını arttırıcı özelliğinden dolayı da eğilme dayanımlarında artış meydana geldiği söylenebilir.

#### **4.2.2. Uçucu kül oran %55 Olan YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı**

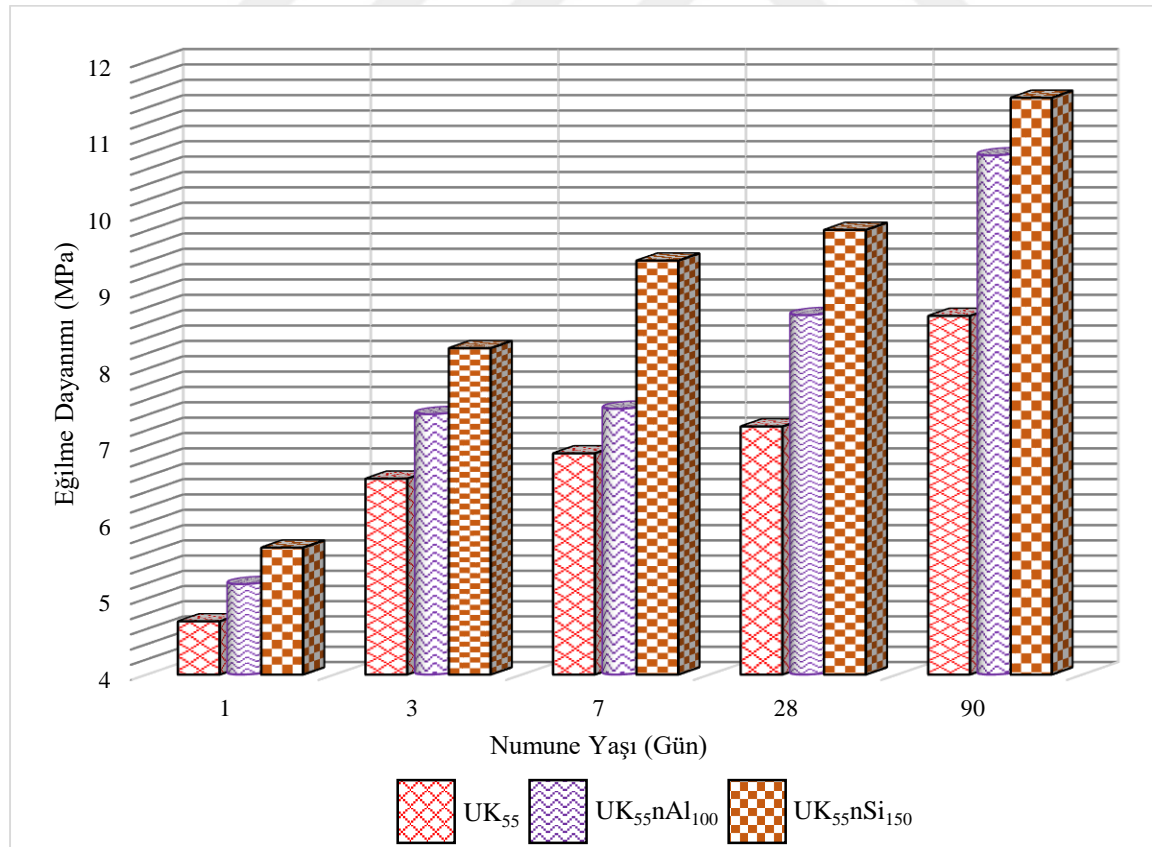
Şekil 4.5. incelenip analiz edildiğinde, UK<sub>55</sub> (%55 UK+ %45 Çimento) numunesinin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı arttığı görülmektedir. Bütün YPLDÇK karışımlarla üretilen numunelerin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımlarının arttığı görülmektedir. Karışımların eğilme dayanımı ile numune yaşı arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir.

UK<sub>55</sub>'in 1 günlük eğilme dayanımı 4.70 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 8.69 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük ve 90 günlük eğilme dayanımı arasında ki fark 3.99 MPa olduğu hesaplanmıştır.

UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> 'ün 1 günlük eğilme dayanımı 5.19 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 10.78 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 5.59 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuca göre UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin yaşa bağlı dayanıma etkisi UK<sub>55</sub> ' e göre biraz daha fazladır. Yani UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin yaşa bağlı eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkisi vardır.

UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> karışımının test yaşı artıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı arttığı görülmektedir. UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> 'nun 1 günlük eğilme dayanımı 5.67 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 11.53 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 5.46 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır.

% 55 uçucu kül içeren karışımlarda eğilme dayanımları %0 uçucu kül içeren karışımlara göre oldukça düşüktür. Bunun nedenin UK miktarı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.5. UK<sub>55</sub>+Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>55</sub>'ın 1 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 1 gündeki dayanımı 110; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 1 gündeki dayanımı %120 olduğu görülmektedir. UK<sub>55</sub>'ın 3 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 3 gündeki dayanımı 113; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 3 gündeki dayanımı %126 olduğu görülmektedir. UK<sub>55</sub>'ın 7 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 7 gündeki dayanımı 108; UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 7 gündeki dayanımı %136 olduğu görülmektedir. Nano malzemeli karışımların yüksek miktarda uçucu kül kullanılmasına rağmen erken yaş dayanımı üzerinde iyileştirmeler meydana getirdiği söylenebilir. Bunların genel sebepleri %0 uçucu kül içeren karışımların eğilme dayanımları kısmında ve bütün karışımların basınç dayanımları kısmında ele alınmıştır.

#### 4.2.3. Uçucu kül oranı %65 Olan YPLDÇK karışımlarının eğilmede çekme dayanımı

Şekil 4.6. incelenip analiz edildiğinde, UK<sub>65</sub> (%65 UK+ %35 Çimento) numunesinin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. Bütün YPLDÇK karışımlarla üretilen numunelerin test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımlarının arttığı görülmektedir. Karışımların eğilme dayanımı ile numune yaşı arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir.

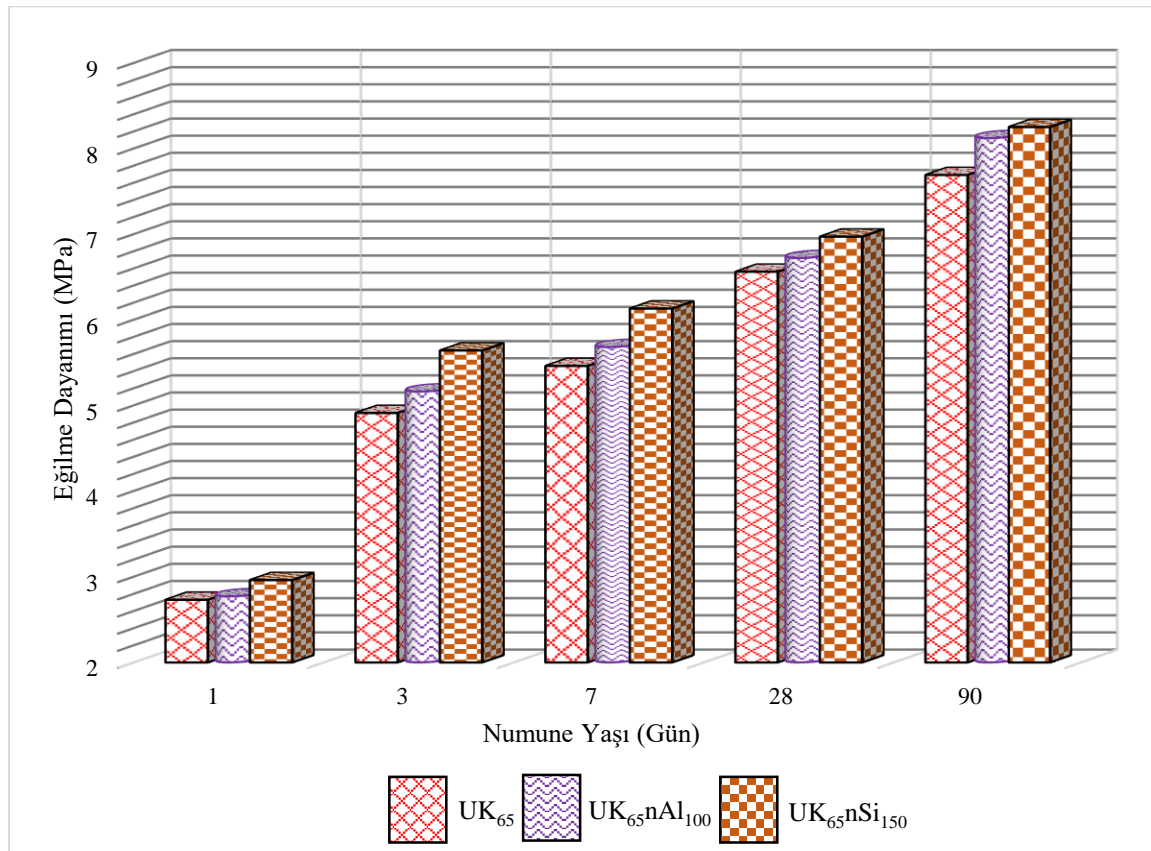
UK<sub>65</sub>'nun 1 günlük eğilme dayanımı 2.73 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımının 7.69 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük ve 90 günlük eğilme dayanımı arasında ki fark 4.96 MPa olduğu hesaplanmıştır.

UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nun 1 günlük eğilme dayanımı 2.67 MPa iken 90 günlük YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımının 8.12 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 5.45 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuca göre nAl<sub>100</sub> malzemenin yaşa bağlı dayanıma etkisi UK<sub>65</sub> 'e göre biraz daha fazladır. Yani UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> malzemenin yaşa bağlı eğilme dayanımı üzerine azda olsa olumlu etkisi vardır.

UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> karışımının test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> 'nun 1 günlük eğilme dayanımı 2.76 MPa iken 90 günlük

YPLDÇK numunelerinin eğilme dayanımı 8.25 MPa olduğu görülmektedir. Bu dayanımların en küçük ile en büyüğü arasındaki fark yani 1 günlük eğilme dayanımı ile 90 günlük eğilme dayanımı arasında 5.49 MPa'lık bir fark olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre en iyi eğilme dayanımını nano silika içeren karışımlar vermiştir.

% 65 uçucu kül içeren karışımlarda eğilme dayanımları % 0 ve % 65 uçucu kül içeren karışımlara göre oldukça düşüktür. Bunun nedenin UK miktarı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.6. UK<sub>65</sub>+Nano malzemeli numunelerin eğilme dayanımı - yaş ilişkisi

Erken yaş dayanımına etkileri değerlendirmek için UK<sub>65</sub>'ın 1 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 1 gündeki dayanımı 101; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 1 gündeki dayanımı %108 olduğu görülmektedir. UK<sub>65</sub>'ın 3 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 3 gündeki dayanımı %105; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 3 gündeki dayanımı %115 olduğu görülmektedir. UK<sub>65</sub>'ın 7 günlük eğilme dayanımı 100 MPa kabul ederek bir değerlendirme yaparsak UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> 'nın 7 gündeki dayanımı 104; UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> 'nin 7 gündeki dayanımı %112 olduğu görülmektedir. Nano malzemelerin, % 65 uçucu kül içeren karışımların erken yaş eğilme

dayanımlarında iyileştirmeler meydana getirdiğini söyleyebiliriz. Bunun ana sebepleri % 0 uçucu kül içeren karışımların eğilme dayanımları kısmında ve tüm karışımların basınç dayanımları kısmında ele alınmıştır.

### 4.3. Elastisite Modülü

Elastisite modülü betonun mekanik özelliklerini değerlendirmede önemli bir parametredir. Ayrıca, elastisite modülü beton yapıların dizaynında elastik deformasyonu deneyimlemek için betonun bu yeteneğini gösteren yararlı bir göstergedir [105]. Basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı gibi betonun mekanik özellikleri beton yapıların yapımında ve dizaynında önemli sayılan faktörlerdir [106]. Farklı bir bakış açısıyla, yapıların davranışları ve dizaynında basınç dayanımının yanında elastisite modülünün de önemli olduğuna değinilmiştir. Beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile geleneksel materyaller ve ürün metotları kullanılarak basınç dayanım değerleri 100 MPa üzerinde yeni betonlar üretilmektedir. Ancak, bu yeni betonların elastisite modülü basınç dayanımları kadar artmamaktadır. Örnek olarak, basınç dayanımı değeri 50 MPa' dan 100 MPa' a yani %100 basınç dayanım değeri artan bir betonun elastisite modülünde % 20' lik bir artış olmaktadır. Dayanım potansiyelini en iyi kullanmak için yüksek dayanımlı yapıların yüksek elastisite modülüne ihtiyaç vardır [107]. Betonun heterojen yapısından dolayı yükleme esnasında betonun içyapısında bulunan agrega-çimento ara yüzü, agrega ve çimento hamuru matrisi birbirinden farklı davranışlar sergilemektedir. Bundan dolayı, beton içyapısındaki bu fazlardan birinin değişmesi sonucu istenilen elastisite modülünün farklı değerler vermesine neden olmaktadır [108,109]. Beton ve betonu meydana getiren malzemelerin gerilme-deformasyon davranışları birbirinden çok farklı olduğu belirtilmektedir. Elastisite modülünü etkileyen en önemli özellikler olarak agrega porozitesi, çimento hamurunun matris özellikleri, agreganın elastisite ve ara yüz özellikleri olarak sayılabilir. Bu sebeplerden ötürü agreganın boşluksuz olması ve elastisite modülünün yüksek olması betonun elastisite değerini yükseltir. Ayrıca, çimento hamurunun matris özellikleri su/çimento oranıyla ilgilidir ve su/çimento oranı ne kadar az olur ise harcın elastisite modülü o kadar yüksek olur. Çimento hamuru ve agrega ara yüzünün iyileşmesi de elastisite modülünü arttıran bir parametre olarak sayılabilir [108].

Karışımların elastisite modülünü belirlemek amacıyla 100 x200 mm boyutunda 90 günlük silindir numuneler üzerinde ASTM C469 [96]' a göre elastisite modülü testi (Resim 4.1.)

yapılmıştır. Çizelge 4.1. incelendiğinde UK kullanılmadan üretilen numunelerin elastisite modülü (E) değerlendirildiğinde nano silika içeren numunenin elastisite modülü değerinin 24.36 GPa ve bu karışımlar içerisinde en yüksek değere sahip olduğu görülürken, en düşük elastisite modülü (E) 22.85 GPa ile UK<sub>0</sub>'da elde edilmiştir. %55 UK kullanılarak üretilen numunelerin elastisite modülü değerlendirildiğinde UK<sub>55</sub>' in elastisite modülü değerinin 18.13 GPa ve bu karışımlarda aynı zaman da en düşük elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Nano malzemeli karışımlarda UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> en yüksek elastisite modülünü 22.85 GPa olarak verirken en düşük elastisite modülü değerini vermiştir. %65 UK kullanılarak üretilen numunelerin elastisite modülü değerlendirildiğinde UK<sub>65</sub>' in elastisite modülünün 15.24 GPa ve aynı zaman da en düşük elastisite modülüne sahip olduğu görülürken, UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub>' nin en yüksek elastisite modülüne 17.05 GPa' a sahip olduğu görülmektedir.

Beton içerisinde çimento yerine belli oranda uçucu kül kullanılmasının betonun elastisite modülünü düşüren bir parametre olduğu söylenebilir [110]. Bundan dolayı %55 ve % 65 UK içeren karışımların elastisite modülü % 0 UK içeren karışımlara göre daha düşük ve ayrıca % 65 UK içeren karışımların elastisite modülü % 55 UK içeren karışımlara göre daha düşüktür. Çizelge 4.1. incelendiğinde %0, %55 ve % 65 UK içeren karışımlar içerisinde en elastisite modülü değerini nano silika içeren karışımların verdiği görülmektedir. Nano silikanın ara yüz geçiş bölgeleri özelliklerini iyileştirdiği ve bununla beraber basınç dayanımı, elastisite modülü gibi numunenin mekanik özelliklerini iyileştirildiği yapılan çalışmada görülmüştür [111]. Ayrıca, nano silikanın hidratasyonu hızlandırıcı etkisi ve çimento harcının mikro yapısını iyileştirmesiyle basınç dayanımında ve bununla beraber elastisite modülünü arttırdığı gözlemlenmiştir [112]. Nano alüminin ise beton içerisindeki boşlukları doldurarak ve poroziteyi düşürerek elastisite modülünü kontrol numunesine göre arttırdığı söylenebilir. Elastisite modülünün nano alümin eklenmesiyle artmasının en önemli sebebi ise nano alüminin ara yüz geçiş bölgesinin yoğunluğunu artırması olarak belirtilebilir [113]. Çizelge 4.1. ' e göre tüm karışımlar içerisinde en iyi sonucu nano silikalı numunelerin verdiği ve nano alüminli numunelerin ise kontrol harcına göre elastisite modülünü arttırdığı söylenebilir.

Çizelge 4.1. Karışımların elastisite modülleri

%0 UK	UK <sub>0</sub>	UK <sub>0</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>0</sub> nSi <sub>150</sub>
Elastisite Modülü E (GPa)	22.85	23.43	24.36
%55 UK	UK <sub>55</sub>	UK <sub>55</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>55</sub> nSi <sub>150</sub>
Elastisite Modülü E (GPa)	18.13	18.39	18.82
%65 UK	UK <sub>65</sub>	UK <sub>65</sub> nAl <sub>100</sub>	UK <sub>65</sub> nSi <sub>150</sub>
Elastisite Modülü E (GPa)	15.24	16.91	17.05



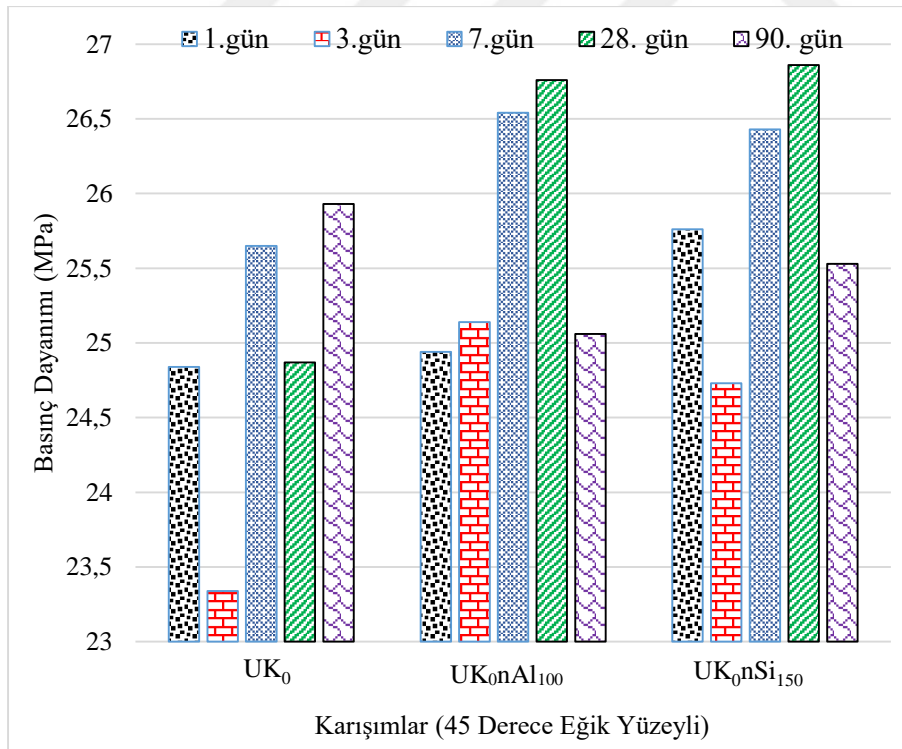
Resim 4.1. Uçucu kül içermeyen YPLDÇK karışımına ait elastisite modülü deneyi

#### 4.4. Bağ Dayanımı

##### 4.4.1. Uçucu külsüz YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı

Beton yapıların onarımı ve güçlendirilmesi alanında yeni betonunun var olan betona yerleştirilmesi ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak beton katmanları kullanılan otoyol yapılarında zarar görmüş beton katmanın yeni betonla yer değiştirilmesi örnek olarak verilebilir. Böyle uygulamalarda eski ve yeni beton arasındaki bağ genellikle zayıf bir halka olarak belirtilir. Bağ dayanımı büyük ölçüde ara yüzdeki yapışma, sürtünme, agrega kenetlenmesi ve zamana bağlı faktörlere bağlıdır. Ara yüz yapışması bağlayıcı madde, malzeme kompaksiyonu, temiz yüzey ve onarım yüzeyindeki rutubet içeriğine bağlıdır. Ara yüzdeki sürtünme ve agrega kenetlenmesi ise agrega boyutu, agrega şekli ve yüzey hazırlanmasına bağlıdır [114].

Şekil 4.7. incelendiğinde iki farklı eğik yüzeyli numunelerde bağ dayanımı analiz edildiğinde, eski betonla YPLDÇK malzeme ile hazırlanan yeni betonun bağ dayanımı etkisi farklı yaşlar ve nano malzeme çeşidi üzerinde araştırılmıştır. Daha önceden dökülmüş (5 yıllık beton) ve basınç dayanımı 25 MPa olan betondan 10x20 cm' lik silindir numuneler 45° lik açıyla karot vasıtasıyla alınmış ortasından kesilmiş ve üzerine %0 uçucu kül ve iki farklı nano malzeme içeren karışımlar dökülerek yeni 10x20 cm' lik silindir numuneler oluşturulmuştur. Şekil 4.7. incelendiğinde kontrol harcı (UK<sub>0</sub>) ve nano katkılı numunelerde bütün yaşlarda kırılmaların tamamının eski betonda meydana geldiği görülmüştür. Eski beton ile YPLDÇK malzemenin eğik ara yüzeyinde herhangi bir sıyrılma ve kayma meydana gelmemiştir. Yani, 45° eğik yüzeyde beklenen kayma meydana gelmemiştir. Kısaca 1. günde olduğu gibi 90 günlük betonlarda ve iki eğik yüzeyde kırılmalar eski betonda meydana gelmiştir (Resim 4.2.). Hedeflenen YPLDÇK malzemenin bağ dayanımı beklenin üstünde olduğu söylenebilir. Ayrıca, nano malzemelerin tane boyutları sayesinde ara yüzde iyileştirmeler meydana getirdiği söylenebilir. Her bir yaş ve açı için 3 numune test edilmiş aritmetik ortalaması Şekil 4.7.' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Kontrol harcı (UK<sub>0</sub>)+ YPLDÇK karışımların bağ dayanımı



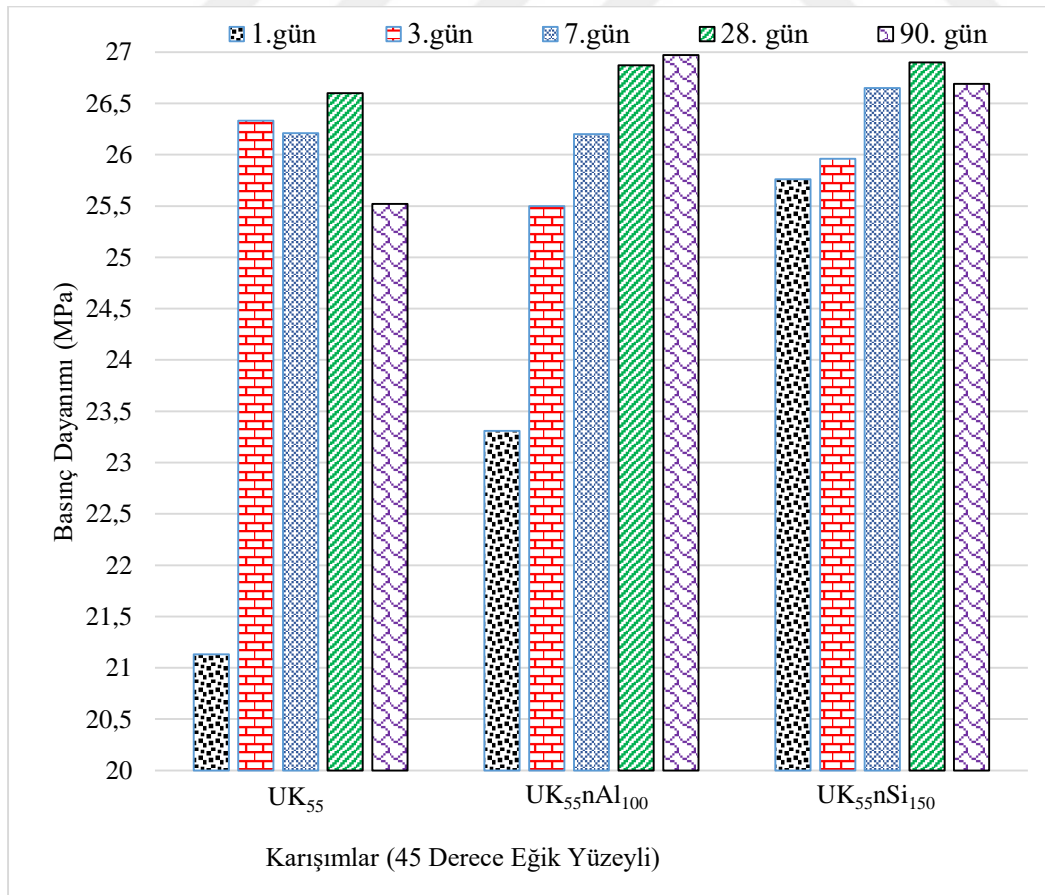
Resim 4.2. Uçucu kül içermeyen YPLDÇK karışımının farklı günlere ait numunelerin test sonucu

#### 4.4.2. Uçucu kül oranı %55 olan YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı

Karot vasıtası ile daha önceden dökülmüş ve basınç dayanımı 25 MPa olan betondan 10x20 cm' lik silindir numuneler 45°' lik bir açıyla alınmış ve ortasından kesilip üzerine %55 uçucu kül ve iki farklı nano malzeme içeren karışımlar dökülerek yeni 10x20 cm' lik silindir numuneler oluşturulmuştur. Şekil 4.8. incelendiğinde, UK<sub>55</sub> numunesinin dışındaki nano katkılı numunelerinde çoğunlukla kırılmalar %100 eski betonlarda meydana geldiği görülmüştür. Eski beton ile YPLDÇK karışımının ara yüzeyinde herhangi bir sıyrılma ve kayma meydana gelmemiştir. Yani 45° eğik yüzeyde beklenen kayma meydana gelmemiştir (Resim 4.3.). 1. günde numunelerin dayanımının eski betondan daha düşük olmasından dolayı kırılmalar yeni betonda meydana gelmiştir fakat nano silika içeren numunede kırılmalar eski betonda meydana gelmiştir. Diğer günlerde kırılmalar tüm numunelerde eski betonda meydana gelmiştir. Ayrıca, bütün yaşlarda ve her numunede ara yüzde kayma meydana gelmemiştir. Nano alümin ve nano silika tane boyutlarının çok küçük olmasından dolayı ara yüzde iyileştirmeler oluşturduğu söylenebilir ve uçucu külün erken yaş dayanımı üzerindeki negatif etkisini iyileştirdikleri de söylenebilir.



Resim 4.3. UK<sub>55</sub> ve nano alümin ile oluşturulmuş numunelerin farklı günlere ait test sonuçları



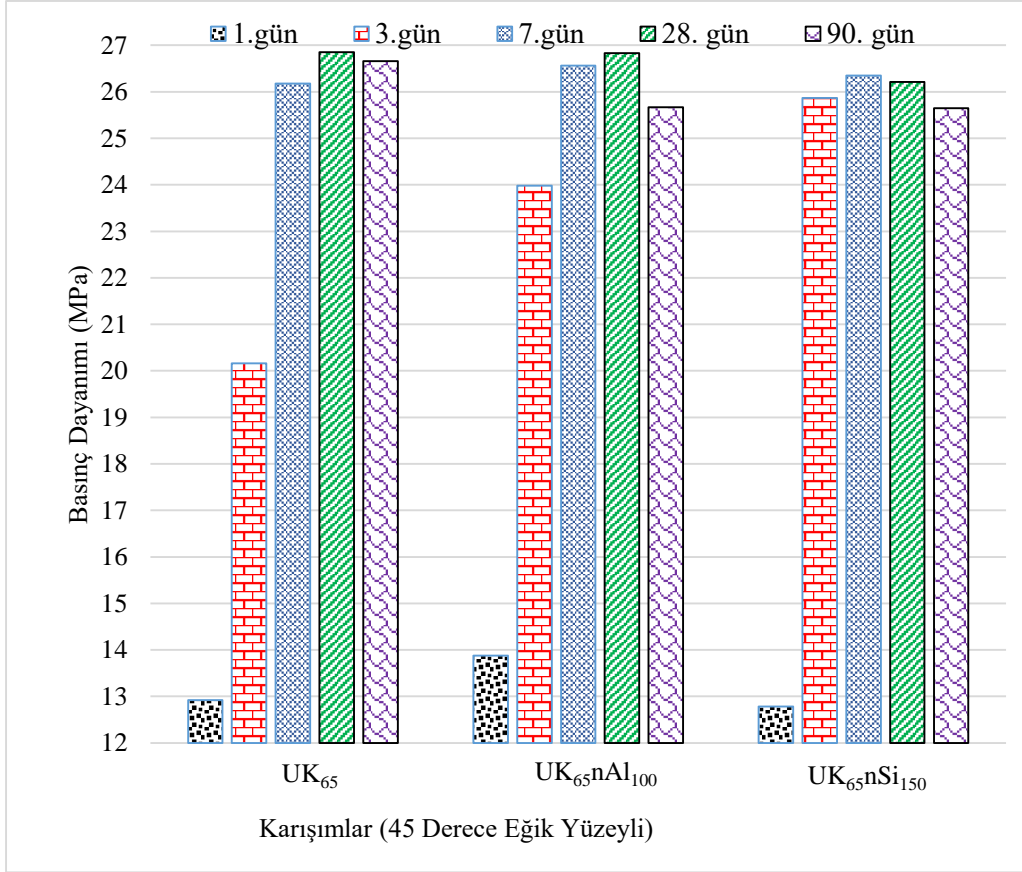
Şekil 4.8. UK<sub>55</sub>+ YPLDÇK karışımların bağ dayanımı

#### 4.4.3. Uçucu kül oranı %65 olan YPLDÇK karışımlarının bağ dayanımı

Daha önceden dökülmüş ve basınç dayanım değeri 25 MPa olan eski betondan 10x20 cm'lik silindir numuneler 45°' lik açıyla karot vasıtasıyla elde edilerek ortasından kesilmiş ve üzerine %65 uçucu kül ve iki farklı nano malzeme içeren karışımlar dökülerek yeni 10x20 cm' lik silindir numuneler oluşturulmuştur. Şekil 4.9. incelendiğinde iki farklı eğik yüzeyli numunelerde bağ dayanımı analiz edildiğinde, eski betonla YPLDÇK malzeme ile hazırlanan numunelerin bağ dayanımı etkisini farklı yaşlar ve nano malzeme çeşidi üzerinde araştırmalar yapılmıştır.



Resim 4.4. UK<sub>65</sub> ve YPLDÇK numunelerinin farklı günlere ait test sonuçları



Şekil 4.9. UK<sub>65</sub>+ YPLDÇK karışımların bağ dayanımı

Bir günlük bütün numunelerde ve 3 günlük kontrol harcı (UK<sub>65</sub>) numunesinin dışındaki nano katkıli numunelerinde bütün yaşlarda kırılmalar %100 eski betonlarda meydana geldiği görülmüştür. Betonun eğik yüzeyinde herhangi bir bozulma, sıyrılma veya kayma meydana gelmemiştir yani 45° eğik yüzeyde beklenen kayma meydana gelmemiştir ( Resim 4.4.). Uçucu külün erken yaşlarda dayanımı düşürmesinden ötürü kırılmalar bir günlük bütün numunelerde yeni betonda meydana gelmiş olup nano katkıli numunelerin kontrol harcına göre dayanımlarında artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Nano katkıli malzemelerin ara yüzü iyileştirdiği ve bütün yaşlarda ara yüzde kayma veya sıyrılmanın meydana gelmediği görülmüştür. 3 günlük kontrol harcı (UK<sub>65</sub>) numunesinin dışındaki nano katkıli numunelerinde bütün yaşlarda kırılmaların eski betonda meydana geldiği ve bunun sebebinin dayanımlarının eski betondan yüksek olduğundan kaynaklandığı söylenebilir. Bu yaşlarda da ara yüzde herhangi bir kayma veya sıyrılma meydana gelmemiş olup nano katkıların ara yüz özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir.

#### 4.5. Kısıtlanmış Rötne

Betonda rötne ve hacim azalması ortamdaki nemin azalmasından meydana gelir ve bunun sonucunda betonda çatlaklar ve deformasyonlar oluşur. Genel olarak, rötne 4 kategoriye ayrılır. Bunlar erken yaştaki rötne (poliolefin veya kılcal rötne), otojen rötne, karbonlaşma rötresi ve kuruma rötresidir. Taze betonda erken yaştaki rötneleler yüzey ve çevre arasındaki nem transferinden (buharlaşma) meydana gelir [115]. Çimento esaslı onarım sistemlerinin genel performansı büyük çoğunlukla onarım malzemesi ve var olan beton arasındaki uyuma bağlıdır. Beton kaplamalar için birçok hızlı priz alan onarım malzemelerinin en önemli sorunu amaçlanan servis süresinin elde edilememesi ve bunun sonucunda ekonomik ve sosyal kayıplar yaşanmasıdır [116]. Ayrıca, betonarme yapıların döşemeleri, köprü tabanları ve kaplama betonlarında erken yaştaki rötne çatlakları bu yapılar için çok önemli sorunlar oluşturabilmektedir. Betonarme yapılarda erken yaş rötne çatlaklarının meydana gelme potansiyelini belirlemek için farklı metotlar uygulanmaktadır [117]. Bu tezde kısıtlanmış rötne deneyi için halka testi kullanılmıştır ve oluşacak rötne çatlaklarının gelişimi takip edilecek (Resim 4.5.) ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılacaktır.



Resim 4.5. Kısıtlanmış rötne deneyi ölçümü

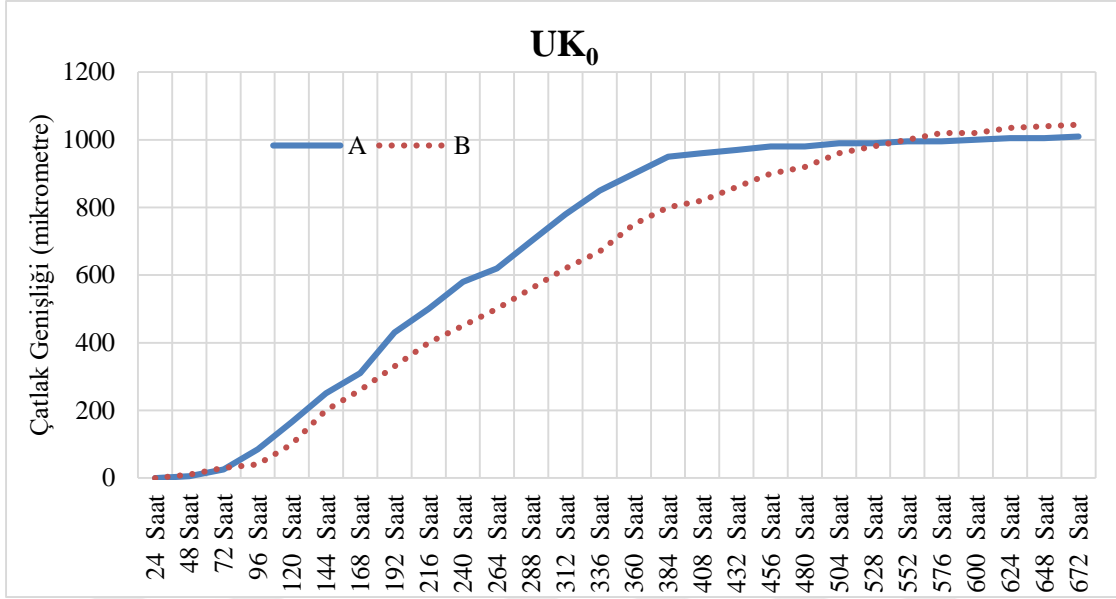
#### 4.5.1. Uçucu külsüz karışımların kısıtlanmış rötre özelliğinin belirlenmesi

Kısıtlanmış rötre deneyinde genellikle 48 saat sonra karşılıklı çatlaklar (A ve B) oluşmuş, fakat bazı numunelerde ise üçüncü bir çatlak (C) oluşmuştur. Çatlak görüldüğü yerde çatlak mikroskobu numune yüzeyi ile çakıştırılarak yüzeyi çizilmek suretiyle sürekli aynı yerdeki çatlak takip edilmiştir. Şekil 4.10. incelendiğinde UK<sub>0</sub> karışımı numunelerde A çatlağı 384 saate kadar hızı azalarak da olsa devam ederken B çatlağı 504 saate kadar çatlak genişlemeye devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak sabitleme şeklinde 672 saate kadar çok azda olsa devam etmekte olduğu görülmüştür.

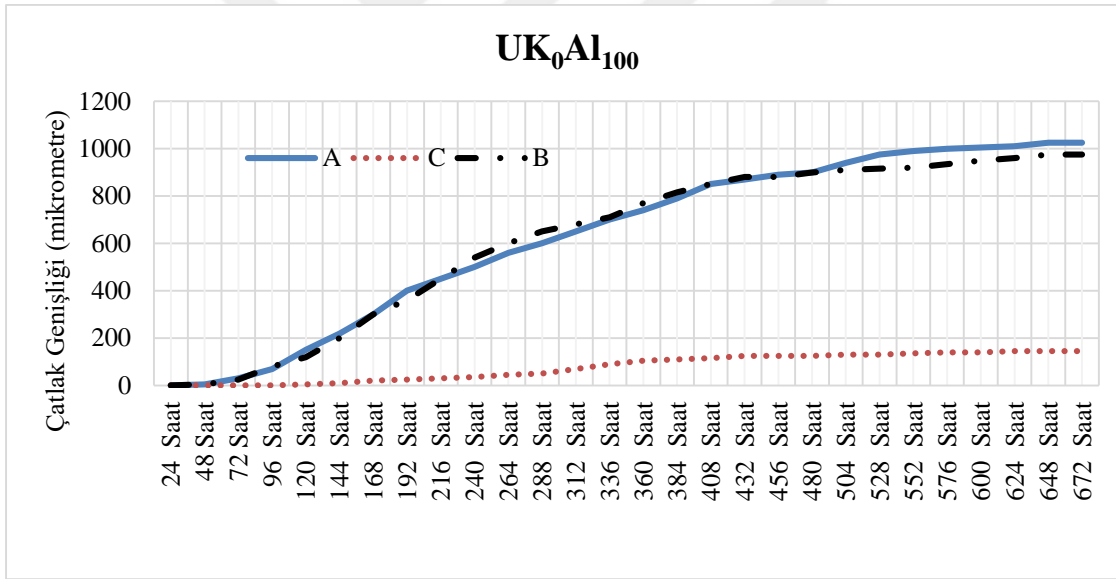
Şekil 4.11. incelendiğinde UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> karışımı numunelerde kısıtlanmış rötre çatlağı takibinde kontrol numunesinde olduğu gibi A, B ve C olmak üzere üç çatlak meydana gelmiştir. A ve B çatlağı 48 saat sonra meydana gelir iken C çatlağı 120 saat sonra başlamış, 624 saat sonunda 145 µm' ye çıkmış ve sabitlenmiştir. Şekil 4.11. incelendiğinde UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> karışımı numunelerde A çatlağı 408 saatte çatlak genişliği 850 µm kadar ulaşmış ve bu genişleme azalarak devam etmiştir. B çatlağı 384 saatte çatlak genişliği 815 µm' e kadar devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak 648 saatten 672 saate kadar 975 µm' de sabitlenmiştir.

Şekil 4.12. incelendiğinde UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> karışımı numunelerde kısıtlanmış rötre çatlağı takibinde kontrol numunesinde olduğu gibi A, B ve C olmak üzere üç çatlak meydana gelmiştir. A çatlağı 48 saat sonra meydana gelir iken B ve C çatlağı 72 saat sonra başlamıştır. C çatlağı 624 saat sonunda 350 µm çıkmış ve sabitlenmiştir. Şekil 4.12. incelendiğinde UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> karışımı numunelerde A çatlağı 360 saatte çatlak genişliği 850 µm kadar ulaşmış ve bu genişleme zaman oranı azalarak devam ederken B çatlağı 456 saate kadar çatlak genişlemeye 700 µm kadar devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak A çatlağı 672 saate kadar 1050 µm ve B çatlağı 576 saate kadar 730 µm ulaşmıştır. C çatlağı, B çatlağına daha yakın olmasından dolayı B çatlağındaki genişleme A çatlağına göre daha az olmuştur.

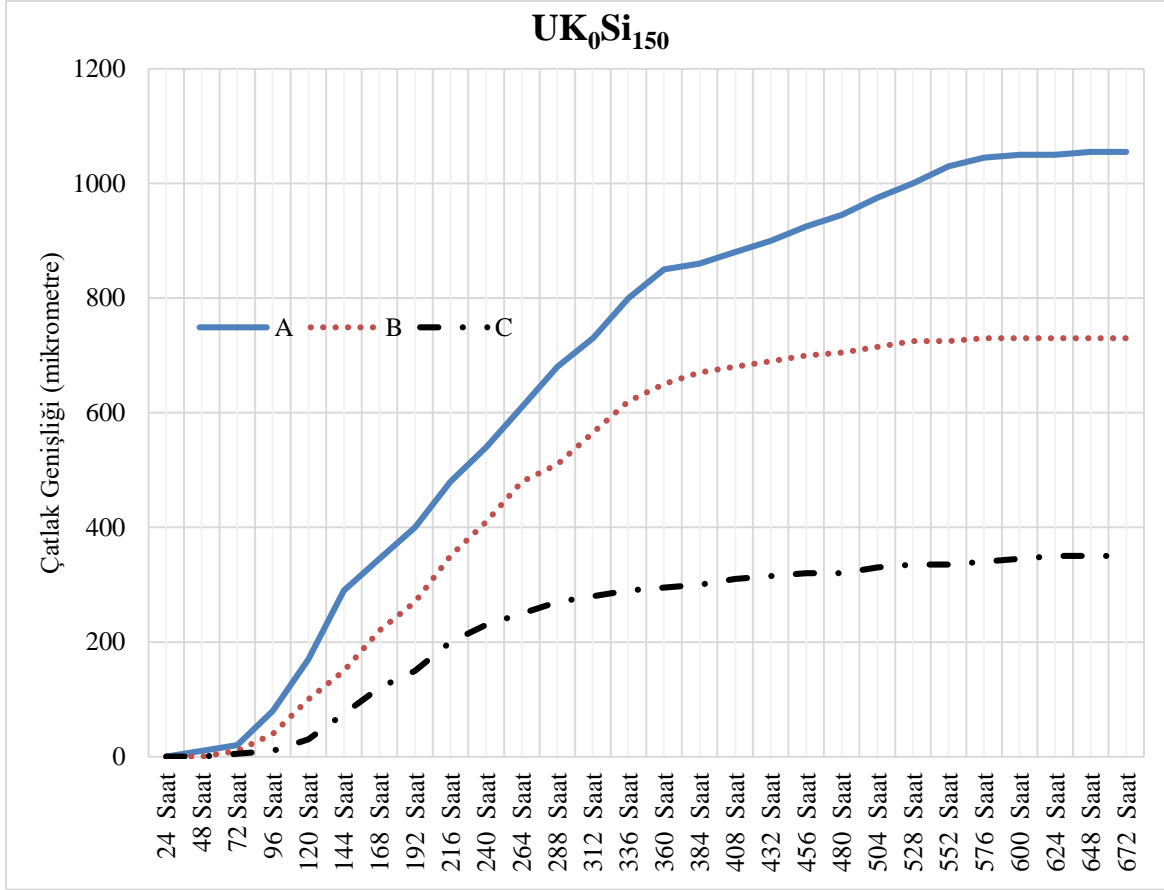
Genel olarak ilgili şekiller analiz edildiğinde, ilk 48 saat içerisinde bütün numunelerde çatlak meydana gelmiş olup nano silika ve nano alümin içeren karışımlarda kontrol harcına göre daha az genişliğe sahip çatlaklar oluşmuştur. 168 ve 672 saat sonra bütün numunelerin yaklaşık olarak birbirlerine benzer çatlak genişliklerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10. UK<sub>0</sub> (KB) numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.11. UK<sub>0</sub>+nAl<sub>100</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.12. UK<sub>0</sub>+nSi<sub>150</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi

#### 4.5.2. Uçucu kül oranı %55 olan karışımların kısıtlanmış rötre özelliğinin belirlenmesi

Kısıtlanmış rötre deneyinde karşılıklı çatlaklar (A ve B) oluşmuştur. Şekil 4.13. incelendiğinde UK<sub>55</sub> karışımı numunelerde A çatlağı 120 saatte, B çatlağı 144 saat sonunda başlamıştır. A çatlağı 504 saate kadar çatlak 400 µm genişlemeye devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak sabitleme şeklinde 672 saate kadar çok azda olsa devam etmekte ve 420 µm genişleme meydana geldiği görülmüştür. B çatlağı 480 saate kadar çatlak 400 µm genişlemeye devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak sabitleme şeklinde 672 saate kadar çok azda olsa devam etmekte ve 430 µm genişleme meydana geldiği görülmüştür.

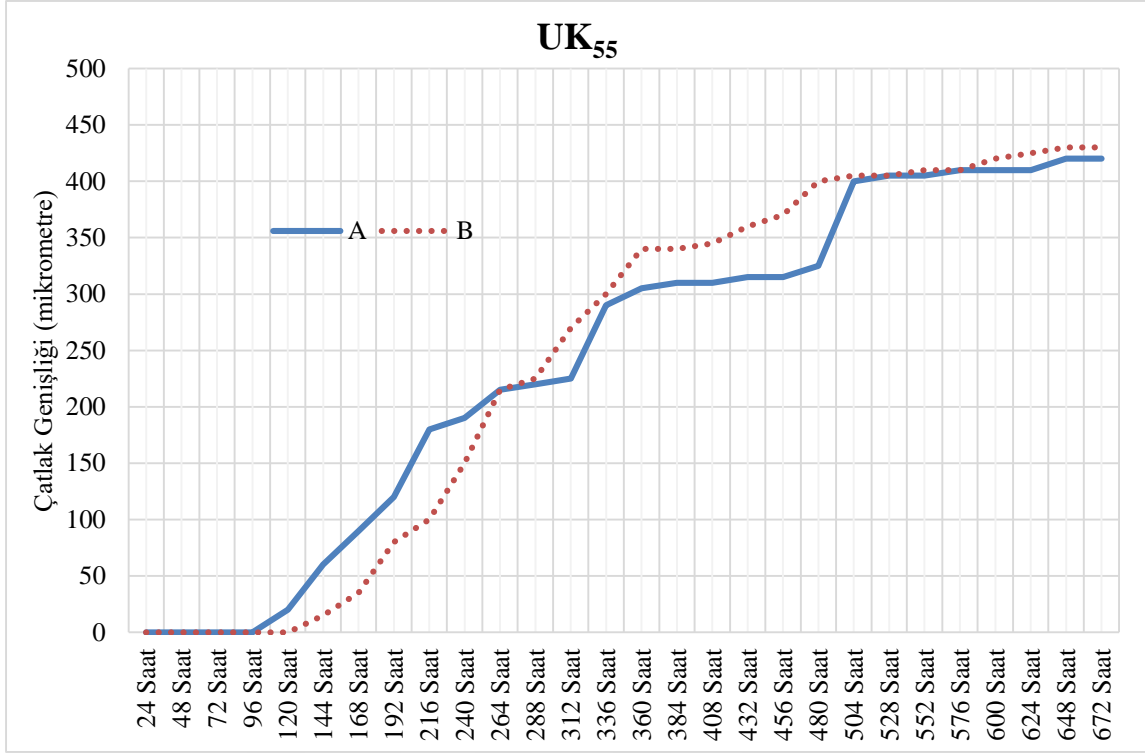
Şekil 4.14. incelendiğinde UK<sub>55</sub>nAl<sub>100</sub> karışımı numunelerde kısıtlanmış rötre çatlağı, kontrol numunesinde olduğu gibi A ve B olmak üzere iki çatlak meydana gelmiştir. A çatlağı 72 saat sonra meydana gelmiş 504 saat sonunda 495 µm çıkmış ve zamana bağlı artış oranı

azalarak sabitlenmiştir. B çatlağı 96 saat sonra meydana gelmiş 552 saat sonunda 435 µm çıkmış ve zamana bağlı artış oranı azalarak sabitlenmiştir.

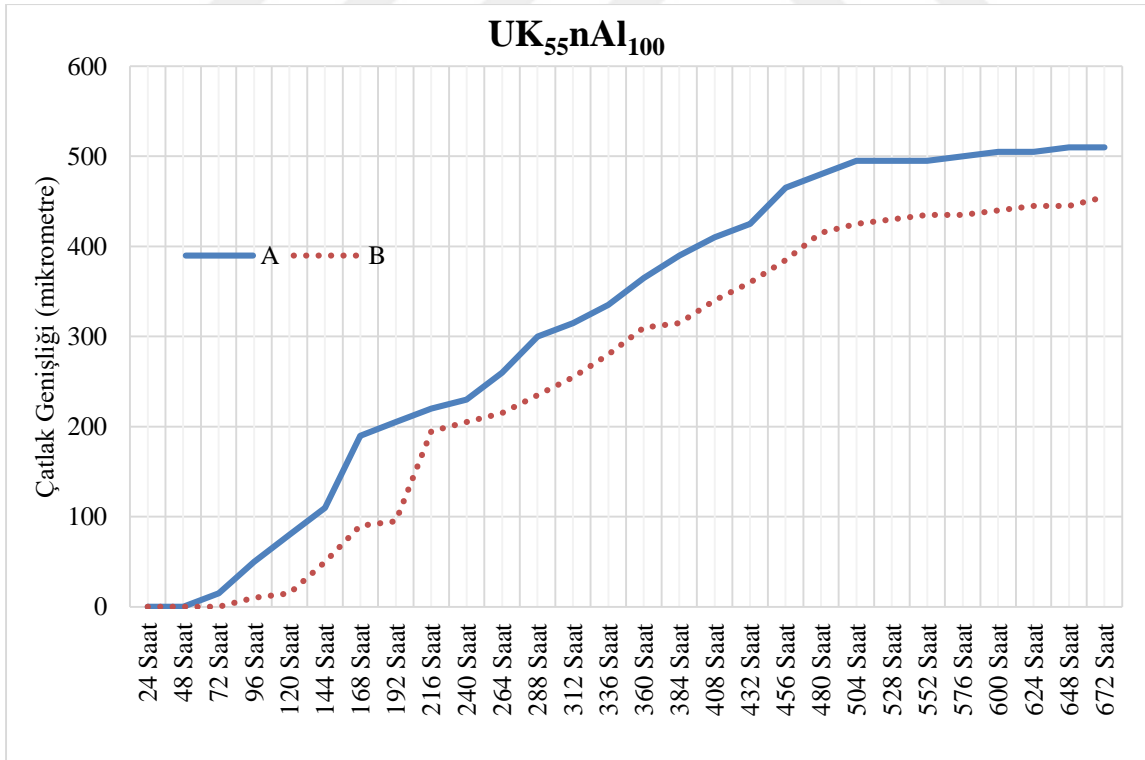
UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> karışımli numunelerde kısıtlanmış rötre çatlağı takibinde kontrol numunesinde olduğu gibi A ve B olmak üzere iki çatlak meydana gelmiştir. A çatlağı 72 saat sonra meydana gelir iken B çatlağı 96 saat sonra başlamıştır. Çizelge 4.12. ve Şekil 4.15. incelendiğinde UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> karışımli numunelerde A çatlağı 360 saatte çatlak genişliğı 370 µm kadar ulaşmış ve bu genişleme zaman oranı azalarak devam ederken B çatlağı 480 saate kadar çatlak genişlemeye 450 µm kadar devam etmiştir. Daha sonraki zaman diliminde doğal olarak A çatlağı 672 saate kadar 400 µm ve B çatlağı 672 saate kadar 465 µm ulaşmıştır.

Genel olarak ilgili şekiller analiz edildiğinde, ilk 120 saat içerisinde bütün numunelerde çatlak meydana gelmiş olup nano silika ve nano alümin içeren karışımlarda kontrol harcına göre daha önce çatlaklar oluşmuş olduğu görülmektedir. 168 ve 672 saat sonra nano silika ve nano alümin içeren karışımlarda kontrol harcına göre daha fazla çatlaklar oluşmuş olduğu görülmektedir.

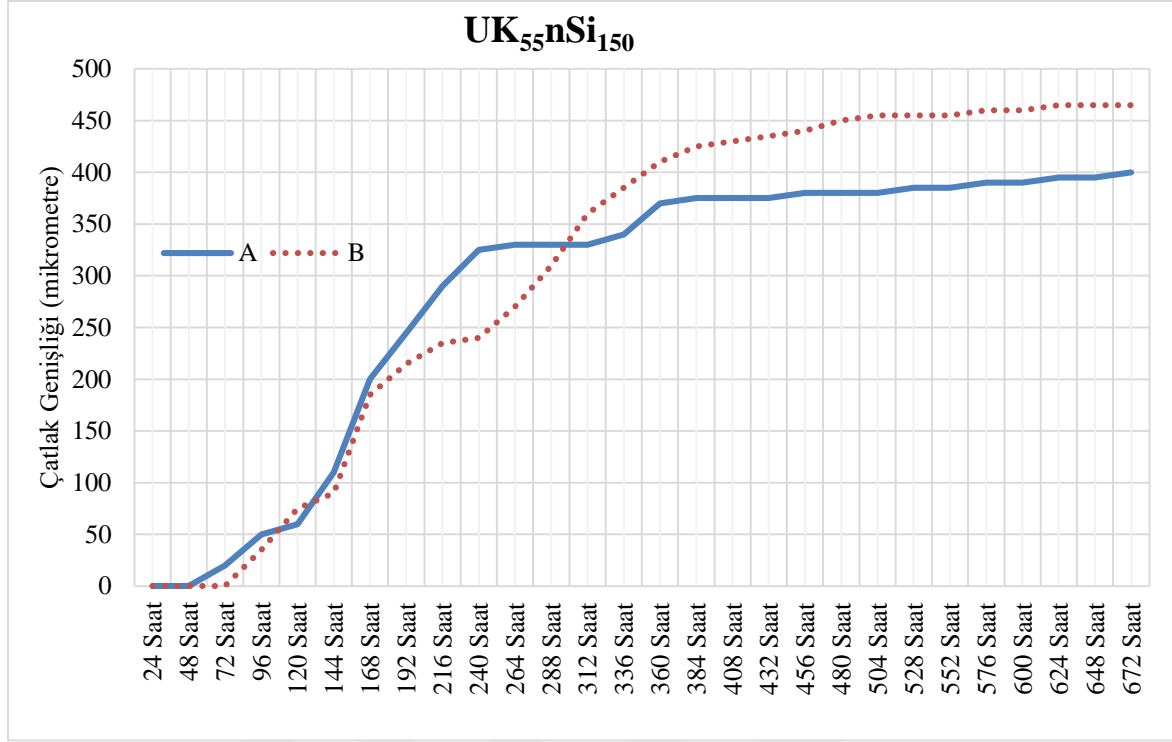
%0 uçucu kül içeren karışımlara göre % 55 uçucu kül içeren karışımlarda çatlak oluşumu daha geç başlamış olduğu ve çatlak genişliklerinin 672 saat boyunca daha az olduğu görülmektedir. Nano malzemeli karışımların % 0 uçucu kül içeren karışımlarda kısıtlanmış rötre üzerinde yaptığı olumlu etkiyi % 55 uçucu kül içeren karışımlarda yapamadığı görülmüştür.



Şekil 4.13. UK<sub>55</sub>+KB numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.14. UK<sub>55</sub>+nAl<sub>100</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.15. UK<sub>55</sub>+nSi<sub>150</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi

#### 4.5.3. Uçucu kül oranı %65 olan karışımların kısıtlanmış rötre özelliğinin belirlenmesi

Şekil 4.16. incelendiğinde UK<sub>65</sub> karışımli numunelerde A ve B çatlakları aynı zaman dilimi olan 144 saatte başlamıştır. A çatlakları 456 saate kadar çatlak 245 µm genişlemeye devam etmiştir ve bu zaman diliminden sonra genişleme hızı azalarak devam etmiş zaman zaman durmuş tekrar genişlemeyi sürdürmüştür. 216 saatlik zaman diliminde sadece 25 µm genişleme meydana gelerek doğal olarak sabitleme görülmüş ve deney sonlandırılmıştır. B çatlakları ise 384 saate kadar çatlak 280 µm genişlemeye devam etmiştir. Daha sonraki 168 saatlik zaman diliminde sadece 20 µm genişleme meydana gelerek doğal olarak sabitleme görülmüştür.

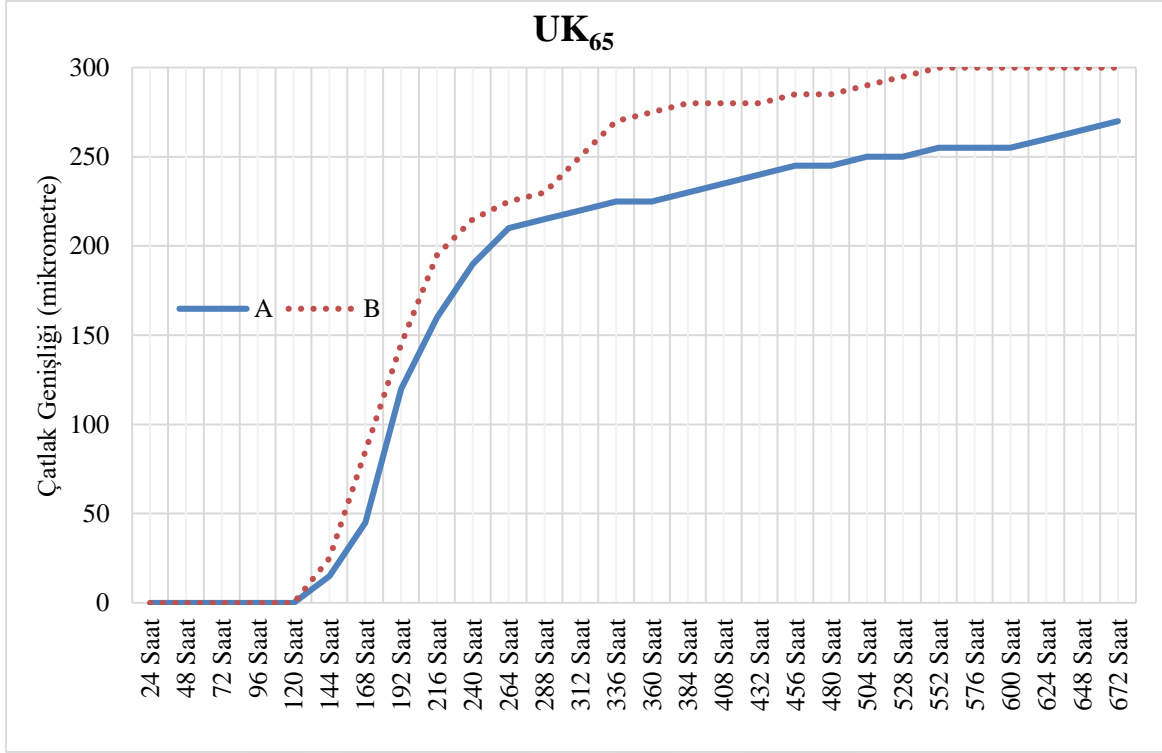
Şekil 4.17. incelendiğinde UK<sub>65</sub>nAl<sub>100</sub> karışımli numunelerde kısıtlanmış rötre çatlakları, kontrol numunesinde olduğu gibi A ve B olmak üzere iki çatlak meydana gelmiştir. A ve B çatlakları 168 saat sonra meydana gelmiş ve her iki çatlak 432 saat sonunda A çatlakları 260 µm, B çatlakları 255 µm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Bu zaman diliminden sonra bitiş zamanına kadar çatlaklar genişlemeye devam etmesine rağmen A çatlakları 240 saat süre içinde çatlak genişliğinde toplam 20 µm artış görülmüş, B çatlakları ise 240 saat süre içinde çatlak genişliğinde toplam 30 µm artış görülmüş. %65 UK oranıyla hazırlanan UK<sub>65</sub> nAl<sub>100</sub>

karişimli numunelerin kısıtlanmış rötre çatlağı 144 saat sonra başlamış ve başladıktan 288 saat sonra zamana bağlı çatlak genişleme hızı azaldığı Şekil 4.17.' de görülmektedir.

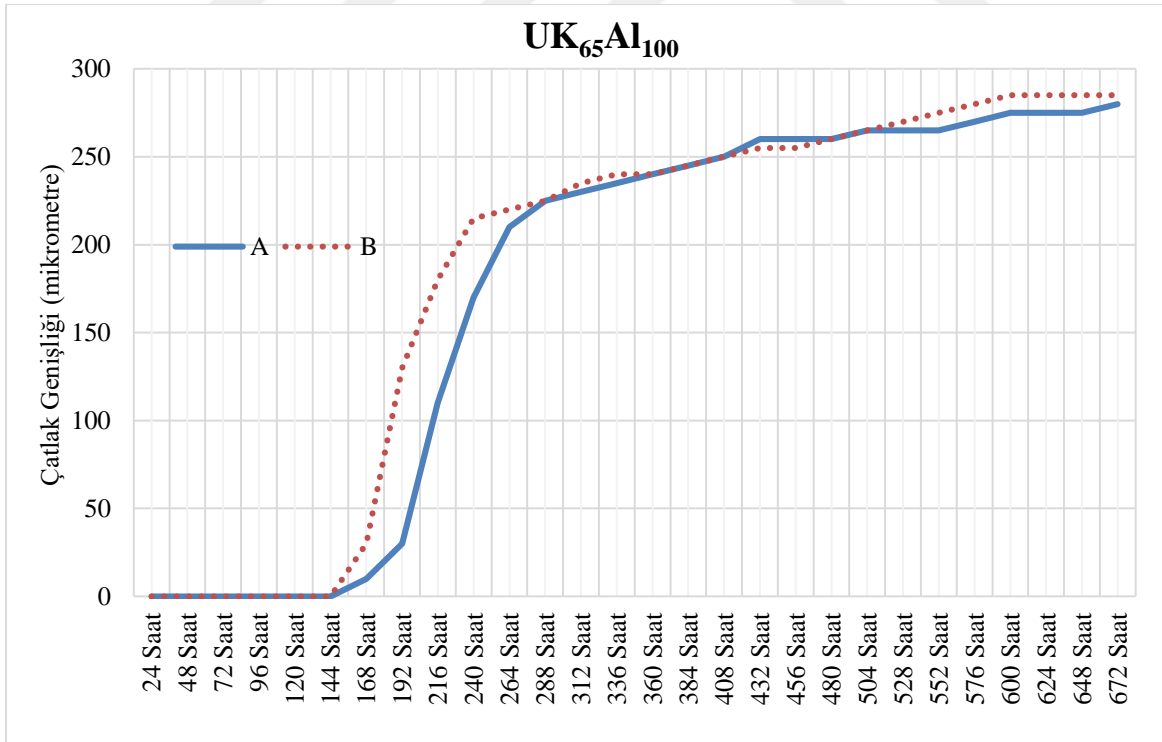
UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> karişimli numunelerde kısıtlanmış rötre atlağı Şekil 4.18. incelendiğinde A, B ve C olmak üzere üç çatlak meydana gelmiştir. A atlağı 144 saat sonra meydana gelir iken B atlağı 120 saat sonra meydana gelmiş ve C atlağı 384 saat sonra başlamıştır. C atlağı 264 saatlik zaman dilimi sonunda 110 µm çıkmış ve sabitlenmiştir. Şekil 4.18. incelendiğinde UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> karişimli numunelerde A atlağı 672 saat sonunda çatlak genişliği 455 µm kadar ulaşmış ve deney süresi tamamlanmıştır. B atlağı 672 saat sonunda çatlak genişliği 495 µm kadar ulaşmış ve deney süresi tamamlanmıştır. C atlağı A çatlağına daha yakın olmasından dolayı A atlağındaki genişleme B çatlağına göre daha az olmuştur.

Genel olarak ilgili Şekiller analiz edildiğinde, ilk 168 saat içerisinde bütün numunelerde çatlak meydana gelmiş olup nano alümin içeren karişimlarda kontrol harcına göre daha geç çatlaklar oluşmuş olduğu görülmektedir. Ayrıca, 168 saat sonra nano silika ve nano alümin içeren karişimlarda kontrol harcına göre daha az çatlak genişlikleri oluşmuş olduğu görülmektedir. 672 saat sonra ise kontrol harcı ve nano alüminli numunelerin nano silika içeren numuneye göre daha küçük genişliğe sahip çatlaklar oluşturduğu görülmektedir.

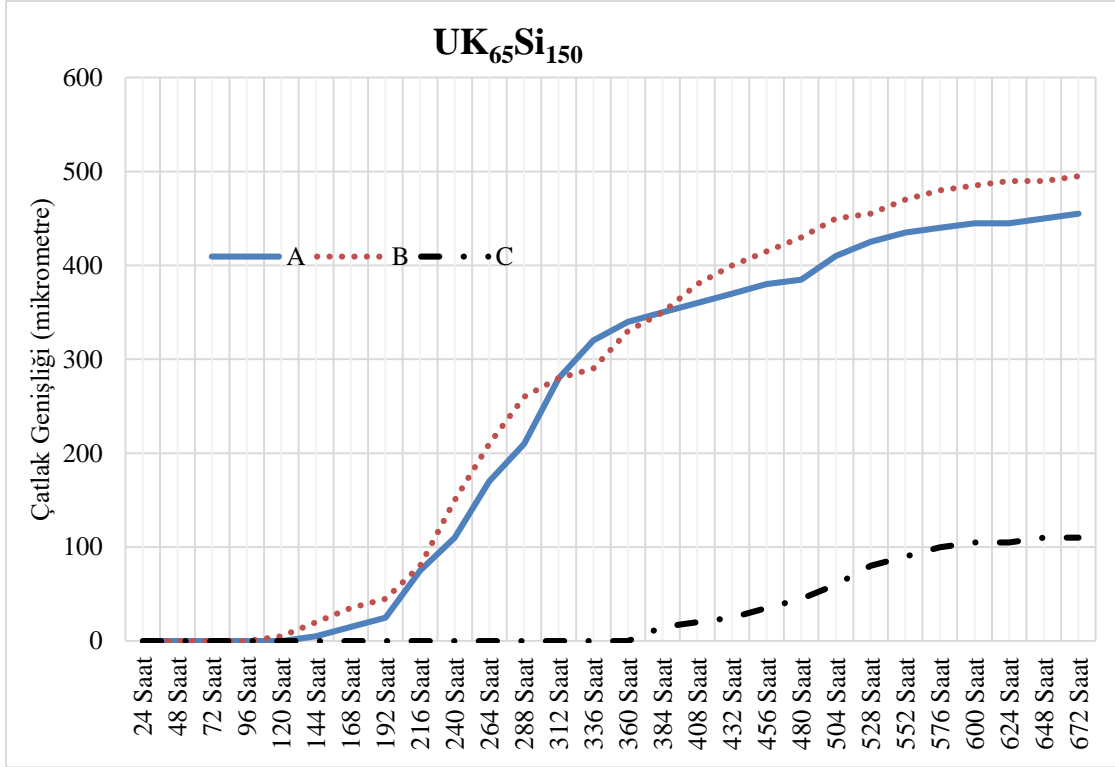
%0 ve % 55 uçucu kül içeren karişimlara göre % 65 uçucu kül içeren karişimlarda çatlak oluşumu daha geç başlamış olduğu ve çatlak genişliklerinin 672 saat boyunca daha az olduğu görülmektedir. Nano malzemeli karişimların % 0 uçucu kül içeren karişimlarda kısıtlanmış rötre üzerinde yaptđı olumlu etkiyi % 65 uçucu kül içeren karişimlarda erken yaşlarda yaptđı fakat ileriki yaşlarda yapamadđı grlmştir.



Şekil 4.16. UK<sub>65</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.17. UK<sub>65</sub>+nAl<sub>100</sub> numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi



Şekil 4.18.  $UK_{65+n}Si_{150}$  numunelerin kısıtlanmış rötre - zaman ilişkisi

#### 4.6. Hızlı Klor İyon Geçirirliği

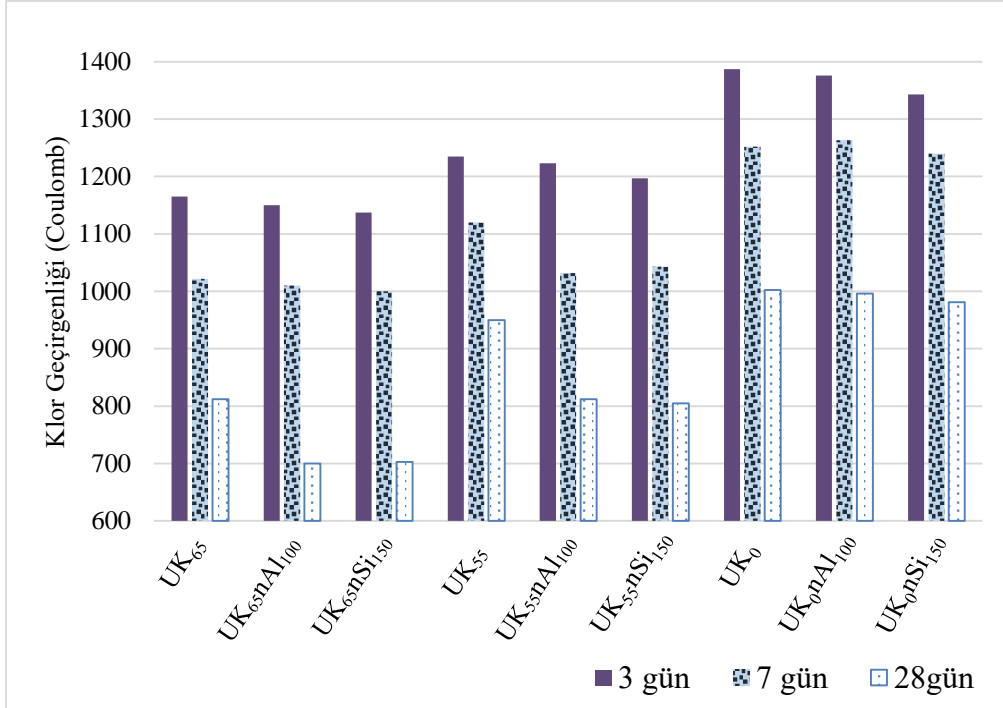
Betona klorun nüfuz etmesinin birçok nedeni vardır. Bunlar kılcal su emme, hidrostatik basınç, difüzyon ve buharlaşmalı taşıma olarak sayılabilir. Bunlar arasından en önemlisi difüzyondur. Betonun dış kısmındaki klor konsantrasyonu betonun iç kısmından fazla olduğu zaman difüzyon meydana gelir. Bunun sonucunda klor iyonları betonun içine doğru ilerler betonun donatısına ulaşır ve donatıyı korozyona maruz bırakır [118]. Betonun içindeki donatının korozyonu betonarme yapıların durabilitesi ile ilgili en önemli problemlerden biridir. Klor iyonlarının beton içerisine nüfuz etmesi korozyonun en önemli nedeni olarak sayılabilir. Genellikle beton dökümünden sonra donatıların etrafı onları korozyondan korumak için bir tabaka ile kaplanır. Ancak, klor iyonları deniz suyundan veya eritici tuzdan betona nüfuz eder ve beton içerisinde gömülü olan donatı ve donatıyı kaplayan tabaka korozyona karşı nem ve oksijen varlığında betonu koruyamazlar. Betonda çatlak oluşumunun artması su, oksijen ve klor iyonlarının kolaylıkla betonun içerisine nüfuz etmesine ve donatıya ulaşmasına neden olur ve beton içerisindeki donatının korozyonunun başlamasını hızlandırır. Bu sebeple klor geçirgenliğini azaltmak için betonun boşluksuz olması istenilen bir özelliktir [20]. Ayrıca, uçucu kül kullanımı uçucu külün klorür bağlama

etkisi yüzünden klorür difüzyonunun katsayısını azaltır. Böylece, düşük etkili klorür difüzyon katsayısı değeri korozyon başlama süresini uzatır. Kısaca, uçucu kül kullanımı betonun klor geçirgenliğini azaltacağı söylenebilir [20,119].

Tüm numuneler ASTM C 1202 [93]' ye göre hızlı klor iyonu deneyine tabi tutulmuştur. Tüm numuneler için elde edilen hızlı klor geçirgenliği deney sonuçları Şekil 4.19.' da verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde, uçucu kül miktarı arttıkça klor geçirgenliğinin azaldığı görülmektedir. En düşük klor geçirgenliğine ağırlıkça % 65 uçucu kül içeren numunelerin verdiği de ayrıca görülmektedir. En yüksek klor geçirgenliğini ise ağırlıkça % 0 uçucu kül içeren numunelerin verdiği görülmektedir. Genel olarak nano silika içeren numunelerin üç farklı ana karışımda da en düşük klor geçirgenliğine sahip olduğu bunun ise nano silikanın boyutlarının çok küçük olmasından dolayı numune içerisindeki boşlukları azalttığından olduğu söylenebilir. Nano alümin içeren karışımların ise genel olarak kontrol harcına göre daha düşük klor geçirgenliğine sahip olduğu ve bunun ise yine nano silika içeren karışımlarda olduğu gibi küçük taneciklere sahip olmasından ve numune içerisindeki boşlukları azalttığından dolayı olduğu söylenebilir. Çizelge 4.2. incelendiğinde 28 günlük numunelere ait klor geçirgenliği deney sonuçlarının betonun klor geçirgenliği sınıflamasına göre çok düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, üretilen YPLDÇK' nin klor geçirgenliği bakımından dayanıklı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.2. Betonun klor geçirgenliği deneyinde geçen yüke göre klor geçirgenliği sınıflandırılması

Geçen Yük (Coulombs)	Klor İyonu Geçirgenliği
>4,000	Yüksek
2,000-4,000	Orta
1,000-2,000	Düşük
100-1,000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



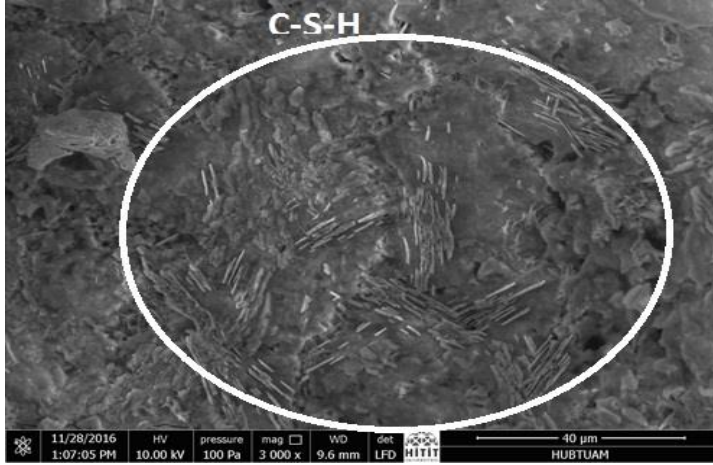
Şekil 4.19. Hızlı klor geçirgenliği değerleri ve grafiği

#### 4.7. Mikro ve Mineralojik Yapı İncelemesi

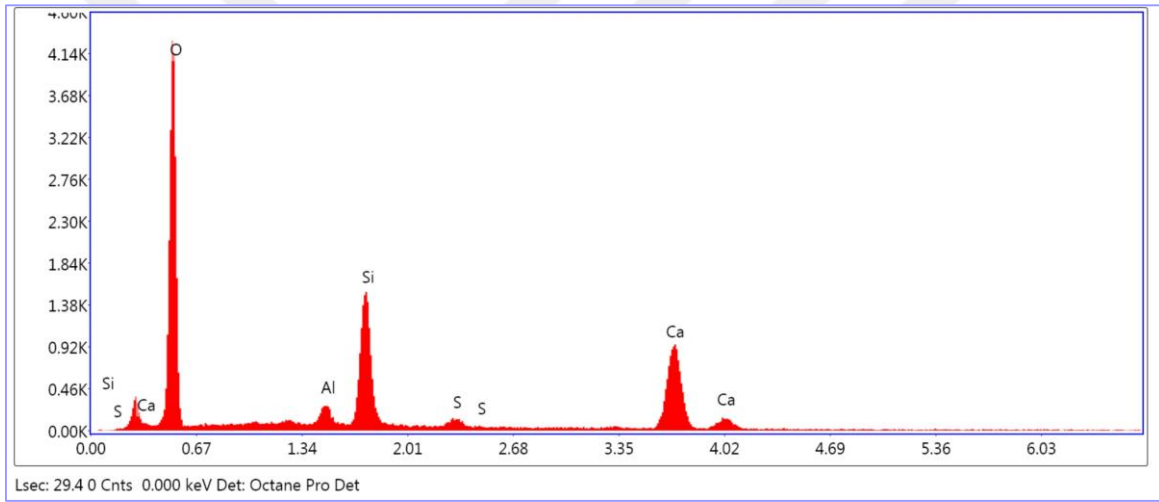
Basınç deneyi sonrası her yaştaki bir numuneden, mikro yapısını incelemek için yeterli büyüklükte bir parça alınarak aseton içerisinde saklanmıştır. Daha sonra numune aseton içinden çıkarılarak mikro yapısı (SEM) ve EDS analizleri Hitit Üniversitesi HÜBTUAM laboratuvarlarında yapılmıştır.

Bu çalışmada en yüksek ve düşük basınç dayanımı veren numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Genellikle en yüksek basınç dayanımını 90 günlükler verirken en düşük dayanımları 1 günlük dayanımlar vermiştir. Bazı uçucu küllü karışımlarda C-S-H oluşumu görüldüğünde C-S-H jeli oluşan en düşük dayanım SEM görüntüleri analiz edilmiştir.

Tüm karışımlar içerisinde basınç dayanımı en yüksek olan %100 çimentolu ve % 1,50 nano silika içeren (UK<sub>0nSi150</sub>) numunenin SEM ve EDS analizi yapılmıştır. UK<sub>0nSi150</sub> numunenin SEM görüntüsü Resim 4.6.' da görülürken ve EDS analizi Şekil 4.20. 'de verilmiştir.



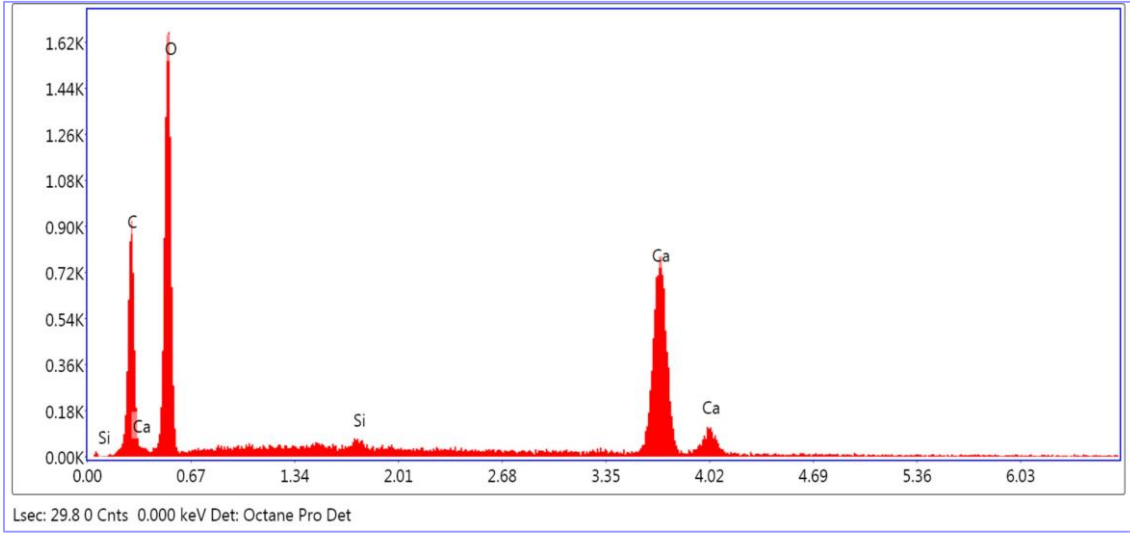
Resim 4.6. 90 günlük UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü



Şekil 4.20. 90 günlük UK<sub>0</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği

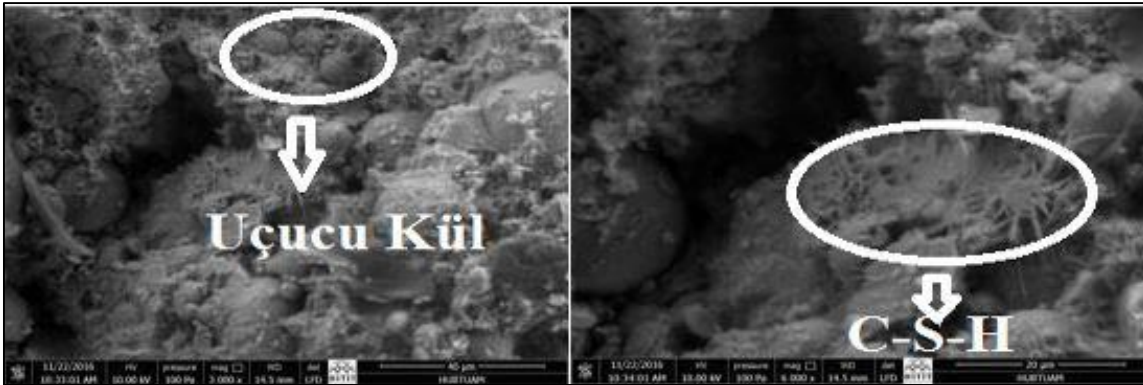
%55 uçucu küllü nano silika içeren karışımın 90. gün sonundaki 3000, 6000 ve 12000 büyütmede mikro yapıları incelendiğinde, basınç dayanımındaki artışa bağlı olarak C-S-H jellerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. 90. gün sonundaki basınç dayanımı ile 28. gün sonundaki basınç dayanımları karşılaştırıldığında yaklaşık %19' luk fark C-S-H ve puzolanların ilerki yaş dayanımındaki etkisinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Resim 4.7. ve Şekil 4.21. incelendiğinde karışıma ilave edilen PVA lifide gözlemlenmiştir.



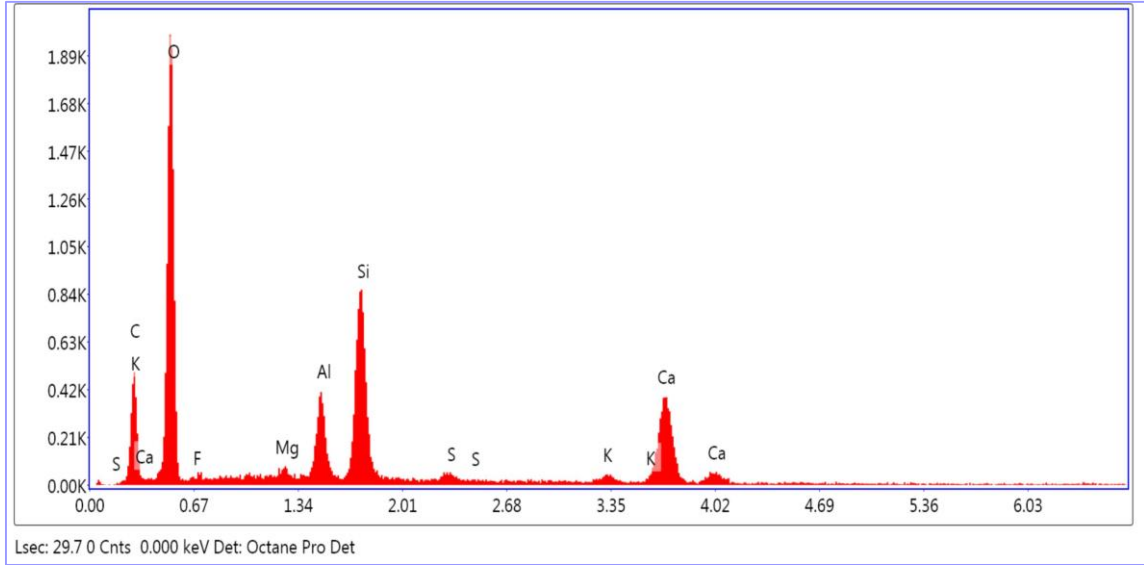


Şekil 4.22. 3 günlük UK<sub>55</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği

%65 uçucu küllü nano silika içeren karışımın 90. gün sonundaki 3000, 6000 ve 12000 büyütmede Resim 4.9. ve Şekil 4.23. incelendiğinde, basınç dayanımındaki artışa bağlı olarak bütün yapıların üzerini C-S-H jellerinin kapladığı gözlemlenmektedir. 90. gün sonundaki basınç dayanımı ile 28. gün sonundaki basınç dayanımları karşılaştırıldığında yaklaşık % 39' luk fark C-S-H ve puzolanların ilerki yaş dayanımındaki etkisinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, % 65 uçucu kül içeren numunenin 90. gün sonunda yoğun uçucu kül içermesi nedeniyle henüz hidrasyona girmemiş uçucu kül partikülü olduğu gözlemlenmiştir. %100 çimentolu karışımlarla karşılaştırıldığında CaO miktarının basınç dayanımına bağlı olarak düşük olduğu gözlemlenmiştir.

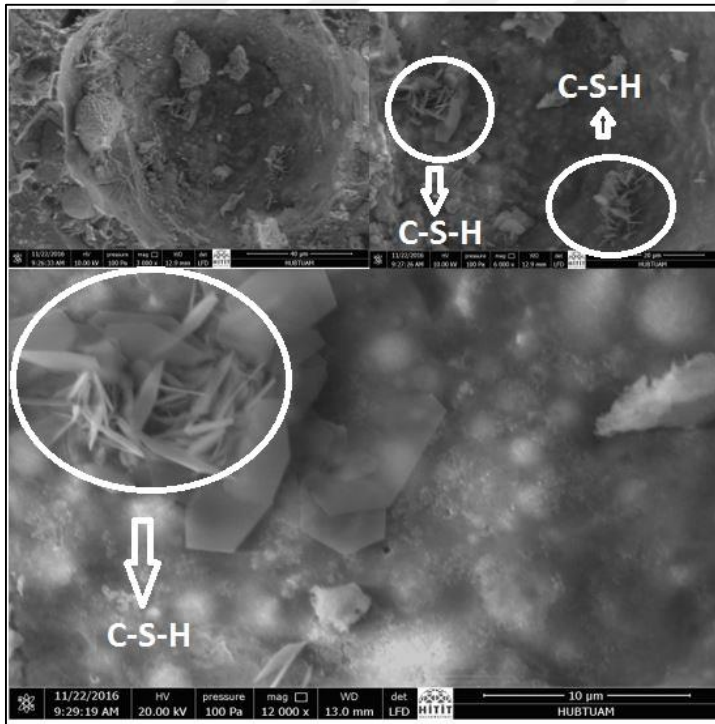


Resim 4.9. 90 günlük UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü

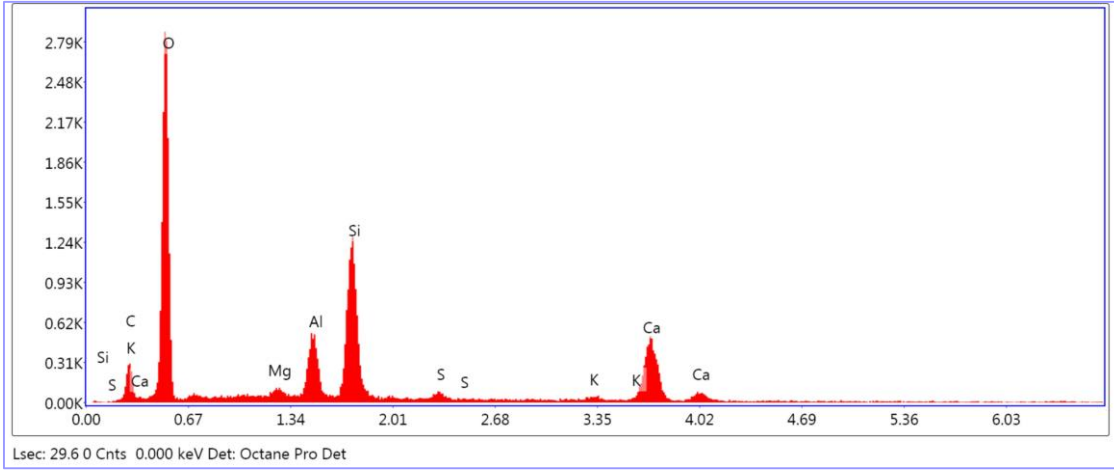


Şekil 4.23. 90 günlük UK<sub>65</sub> n Si<sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği

Resim 4.10. ve Şekil 4.24. incelendiğinde %65 uçucu küllü nano silika içeren karışımın 3. gün sonundaki 3000, 6000 ve 12000 büyütmede mikroyapıları incelendiğinde, basınç dayanımındaki artışa bağlı olarak C-S-H jellerinin oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir.

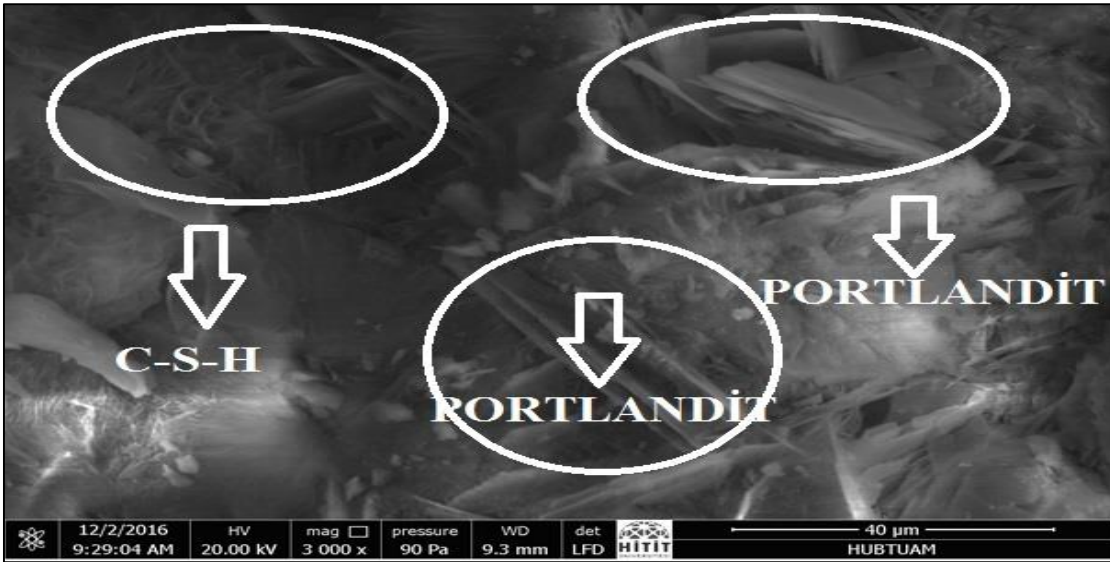


Resim 4.10. 3 günlük UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin SEM görüntüsü



Şekil 4.24. 3 günlük UK<sub>65</sub>nSi<sub>150</sub> Numunenin EDS grafiği

%100 çimentolu nano alümin içeren karışımın 28. gün sonundaki 3000, 6000 ve 12000 büyütmede Resim 4.11. ve Şekil 4.25. incelendiğinde, basınç dayanımındaki artışa bağlı olarak C-S-H jellerinin ve portlandit yapılarının oluştuğu görülmektedir. %55 ve % 65 uçucu kül içeren numunelerin 28. gün sonunda yoğun uçucu kül içermesi nedeniyle hidrasyon ürünlerinin % 100 çimentolu nano alüminli numuneye göre C-S-H oluşumunun çok daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 4.11. 28 günlük UK<sub>0</sub>nAl<sub>100</sub> Numunenin SEM görüntüsü



İlk SEM analizi olarak tüm karışımlar içerisinde basınç ve eğilme dayanımı en yüksek olan %0 uçucu kül ve nano silika içeren numunenin SEM analizi yapılmıştır. 2. ve 3. SEM analizi olarak, %55 uçucu kül ve nano silika içeren numunenin farklı günlerdeki SEM analizi vardır. 4. ve 5. SEM analizlerinde %65 uçucu kül ve nano silika içeren numunelerin 3. ve 90. günlerindeki analizleri vardır. Yani, farklı uçucu kül yüzdelerine ait fakat aynı malzemedan üretilmiş numunelerin SEM analizleri incelenmiştir. 6. olarak incelenen SEM analizi de % 0 uçucu kül ve nano alümin içeren numunenin 28 günlük SEM analizi yapılmıştır. Son olarak da % 55 uçucu kül ve nano alümin içeren numunenin SEM analizi incelenmiştir.

Tüm karışımlar içerisinde en yüksek basınç dayanımı veren %100 çimentolu 90 günlük nano silikalı karışım olmuştur. SEM görüntüsünden de C-S-H jellerinin çok yüksek miktarda oluştuğu gözükmektedir. Buna bağlı olarak da basınç ve eğilme dayanımları da en yüksek değeri vermiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Nano SiO<sub>2</sub>, nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' ün yüksek hacimde uçucu kül içeren karışımlara eklenmesiyle harç numunelerinin mekanik ve mikro-yapısında iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Bu nano malzemeler, özellikle nano SiO<sub>2</sub>, erken ve ileriki yaşlarda kontrol numunelerine göre dayanımlarda iyileştirmeler meydana getirmiştir. Ayrıca, bu nano malzemeler, numunelerdeki boşluk miktarlarını azaltarak numunelerin daha geçirimsiz olmasını sağlamışlardır. Aşağıda, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlenmiştir:

- 1) Kontrol numunelerine göre nano malzemeli karışımların basınç dayanımına olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, bütün numuneler arasında en iyi basınç dayanımını nano silika içeren numunelerin verdiği gözlemlenmiştir. Nano malzemeli karışımlarının en iyi basınç dayanım sonuçlarının vermesinin sebebi olarak hidrasyonunun erken aşamalarında Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek daha yoğun C-S-H oluşturduğu söylenebilir. Nano malzeme içeren karışımlarından en iyi sonucu elde etmek için nano malzemelerin matris içinde homojen olarak dağıtılmasıyla ilgili olduğu gözlemlenmiştir [69,102]. Yüksek hacimde uçucu kül kullanılan karışımlarda da nano malzemelerin erken yaş dayanımlarının da etkili olduğu gözlemlenmiştir [101].
- 2) Eğilmede çekme dayanımı, bütün YPLDÇK karışımlarla üretilen numunelerin basınç dayanımında olduğu gibi test yaşı arttıkça YPLDÇK numunelerinin eğilme çekme dayanımlarının artmıştır. En iyi eğilmede çekme dayanımını nano silika içeren numunelerin verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm numunelerin basınç dayanımına benzer şekilde eğilmede çekme dayanımı sergilediği gözlemlenmiştir.
- 3) Basınç dayanımı-birim deformasyon (Elastisite Modülü) ilişkisi, bütün YPLDÇK karışımlarla üretilen numunelerin basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Yani basınç dayanımı yüksek olan numunelerin elastisite modülü de yüksek çıkmıştır. YPLDÇK karışımlarına PVA liflerinin eklenmesi ve agrega boyutunun çok küçük olmasından dolayı aynı basınç dayanımına sahip geleneksel betonlara göre elastisite modül değerlerinin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Nano malzemenin karışımlarda kullanılmasıyla karışım içerisindeki nano boyuttaki kusurlar giderilmiş ve ara yüzde iyileşmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, nano malzemeli içeren

numunelerin porozitesinin de düşük olması sebebiyle nano malzeme kullanılan numunelerin elastisite modülü değerleri kontrol numunelerine göre yüksek çıkmıştır.

- 4) Bağ dayanımı özelliğinin belirlenmesinde eğik kesme mukavemeti (slant shear) testi sonuçlarında eski betondan alınan numuneler ve yeni karışımlarla oluşturulan 100X200 mm' lik silindir numunelerin tamamında eski ve yeni beton arasındaki 45°'lik yüzeyde kayma meydana gelmediği görülmüştür. YPLDÇK karışımlarıyla üretilen kısımlarda çok nadir olarak bozulmalar meydana geldiği görülürken kırılmaların çoğunluğunun eski betondan meydana geldiği görülmüştür. Eski betonla yeni üretilen YPLDÇK harçları arasındaki eğik yüzey aderansının eski betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak YPLDÇK harçlarının diğer betonlarla yeterli bağ dayanımına sahip olduğu söylenebilir.
- 5) Kısıtlanmış rötre deneyleri sonucunda uçucu kül içermeyen numunelerde çatlak oluşumunun daha erken gerçekleşmesi, beton içerisinde var olan çekme sünmesinin önemini ortaya koymuştur. Uçucu kül miktarı arttıkça çatlak oluşumu daha geç başlamış olup nano malzeme içeren numuneler kısıtlanmış rötre deneyi açısından % 0 uçucu kül içeren karışımlarda ve erken yaşlarda kontrol harcına göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.
- 6) YPLDÇK karışımlarıyla üretilen numunelerin klor geçirgenliğini incelenmiş ve bütün örneklerin yaşı arttıkça geçirgenliğin azalmakta olduğu görülmüştür. Nano silika içeren YPLDÇK karışımlarının bütün karışımlar içerisinde genel olarak en düşük klor geçirimsizliği değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun da sebebinin nano silikanın boyutunun diğer nano malzemesine göre küçük olmasından dolayı boşlukları daha iyi bir şekilde doldurması olarak açıklanabilir.
- 7) Mikro ve mineralojik yapı incelemesi (SEM ve XRD) için basınç deneyi sonrası her yaştaki bir numuneden bir kısım numune alınarak, mikro yapısındaki C-S-H oluşumu incelenmiştir. Genellikle, en yüksek C-S-H oluşumu 90 günlükler verirken en düşük C-S-H oluşumunu 1 günlük numuneler vermiştir. Nano SiO<sub>2</sub>' li numunelerin mikro yapısındaki iyileşme ve C-S-H oluşumu bütün numuneler arasında en iyi sonucu vermiştir.

## 5.2. Öneriler

Bundan sonraki çalışmalarda;

- 1) C sınıfı UK ve YFC ikameli nano boyutta modifiye edilmiş çimento esaslı kompozitler incelenmesi,
- 2) Farklı nano malzemelerin yüksek hacimde uçucu kül içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde etkisinin çalışılması,
- 3) PVA lif oranı ve boyutu üzerinde farklı araştırmalar yapılması,
- 4) Harç numuneleri yerine beton numuneler üzerinde çalışılması,
- 5) Farklı tür lif kullanılarak harçların mekanik özelliğinin incelenmesi,
- 6) Nano malzemelerin karışım içerisinde kullanılan mineral katkıların puzolanik aktiviteleri üzerindeki etkisinin detaylı olarak incelenmesi önerilir.



## KAYNAKLAR

1. Toklu, K., 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. HB87-1996. (1996). *Guide to concrete repair and protection*. A joint publication of ACRA, CSIRO and Standards Australia, Sydney, Australia.
3. 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.
4. Alexander, M.G., Stanish, K. (2005, August). *Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factored approach*. Mindess Symposium, Third International Conference on Construction Materials, Vancouver.
5. Mehta, P.K., Burrows, R.W. (2001). Building durable structures in the 21st century. *Concrete International*, 23(3), 57-63.
6. Ahunbay, Z. (2007). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon* (Dördüncü Baskı), İstanbul: Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, 5, 10.
7. Vecchio, F., Bucci, F. (1999). Analysis of repaired reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 125(6), 644-652.
8. Raupach, M. (2006). *Concrete repair according to the new European standard EN-1504*. London: Taylor and Francis, 6-8.
9. Marlowe, I. (2003, August). Emission factors programme Task 4(b): Review of cement sector pollution inventory, AET/ENV/R/1425/Issue 1 Report, Abingdon, 1-11.
10. Boresi, A. P., Chong, K. P., Saigal, S. (2003). *Approximate solution methods in engineering mechanics* (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 10-12.
11. 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.
12. Cilason N., Aksoy, N. (2000). *Beton yapı hasarları onarım ve korunması ve sıcak iklimlerde beton*. İstanbul: Lebib Yalkın Yayınları, 32-39.
13. Toklu, K., Şimşek, O., 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.
14. Emmons, P., Vaysburd, A. (1995). Performance criteria for selection of repair materials, Phase I. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Technical Report REMR-CS-47. Vicksburg, MS, 7-14.

15. Morgan, D.R. (1996). Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction Building Materials*, 10(1), 57-67.
16. Li, V.C., Leung, C.K. (1992). Steady state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(18), 2247–2264.
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. Kanda, T., Li, V. C. (1999). New micromechanics design theory for pseudostrain hardening cementitious composite. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(4), 373-381.
19. Li, V.C. (1998). ECC - Tailored composites through micromechanical modeling. N. Banthia, (Ed). *Fiber-reinforced concrete: present and future*. Montreal: CSCE Press, 64-97.
20. Sahmaran, M., Li, M., Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *American Concrete Institute Materials Journal*, 104(6), 604-611.
21. Sahmaran, M., Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033-1043.
22. Li, V. C. (2002, October). *Reflection on the research and development of the Engineered Cementitious Composites (ECC)*. In Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC), Takayama, 1-21.
23. Lim, Y.M., Li, V.C. (1997). Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 373-385.
24. Li, M., Li, V. (2009). Influence of material ductility on performance of concrete repair. *American Concrete Institute Materials Journal*, 106(5), 419-428.
25. Taşdemir, M. A. (2002, 2 Kasım). *Betonun dayanım ve durabiliteye göre tasarımı ve üretimi*. İMO (İstanbul Şubesi), Sürekli Eğitim Seminerleri, Harbiye-İstanbul, 1-7.
26. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H. (2005). *Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları*. 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 419-423.
27. Morrison, R.E. (1970). *A review of ash specifications*. Symposium on Fly Ash Utilization, Pittsburgh, USA, 24-31.
28. Topcu, İ. B., Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik.Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.
29. Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.

30. Şengül, Ü. (2001). Uçucu kül ve çevresel etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 89-104.
31. ASTM Standard C 618-17a. (2017). *Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
32. Türk Standartları Enstitüsü. (1975). *TS 639 "Uçucu küller"*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
33. Mehta, P.K. (1986). *Concrete - structure, properties, and materials*. New Jersey: Prentice-Hall, 549.
34. Tokyay, M., Erdoğan, T. Yeğınobalı, A. (1990). *Termik santral küllerinin çimento ve beton katkı maddesi olarak kullanılma imkanlarının etüt ve envanteri prosesi ara raporu*. Ankara: ODTÜ.
35. Baharavar, S. R. (2012). *Karbonatlaşmanın çelik lifli ve uçucu küllü betonlarda etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-24.
36. Çelik, M. H., Aruntaş, H. Y. 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.
37. Şimşek, O. (2015). *Beton ve beton teknolojisi* (Beşinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 50-62.
38. Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş. (2003). Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4), 115-120.
39. Emiroğlu, M., Koçak, Y. Subaşı, S. (2011, May). *Effects of blast furnace slag on physical and mechanical properties of concrete*. 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey, 113-117.
40. Tohumcu, İ., Bingöl, A. F. (2013). Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 31-44.
41. İnternet: ÇİMSA. *Beton tasarımında silis dumanı kullanımı*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.cimsa.com.tr%2Fca%2Fdocs%2F4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8%2F212BE9BF0EB04DABBEADC1CD76DACEF9.pdf&date=2019-03-06>, Son Erişim Tarihi:14.08.2018.
42. Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H. Yiğiter, H. (2001, Mayıs). *Beton teknolojisi*. Yapı Denetim Kuruluşları için Beton Teknolojisi Semineri, İzmir.
43. Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R., Danson, A. (2004). Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 311-319.

44. Duval, R. Kadri, E. H. (1998). Influence of silica fume on the workability and compressive strength of high performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 28(4), 533-547.
45. Land, G., Stephan, D. (2012). The influence of nano-silica on the hydration of ordinary portland cement. *Journal of Materials Science*, 47(2), 1011-1017.
46. Land, G., Stephan, D. (2015). Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 57, 64-67.
47. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (1986). *Concrete: Structure, properties, and materials*. New Jersey: Prentice-Hall, 299-305.
48. Wilson, T. P., Smith, K. L., 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.
49. Li, M., 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.
50. Turan, O. (2011). Bir fırsat penceresi: inşaat sektöründe nanoteknoloji. *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 97, 14-16.
51. Özbora, A. A., Tarhan, M., Engin, Y. (2013, Şubat). *Nanoteknolojinin betonun geleceğindeki rolü*. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri, İstanbul.
52. Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., Sobolev, K. (2012). *Nanotechnology in concrete materials: A synopsis*. Washington: Transportation Research Board, 1-3.
53. İnternet: Balaguru, P., Chong, K. (2006). *Nanotechnology and concrete: research oppurtunities*. Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, 5-28. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fpdfs.semanticscholar.org%2Fb485%2F341b28b1ec0559f1b8cdae9f6cc8fd0d90de.pdf&date=2019-03-06>, Son Erişim Tarihi:14.08.2018.
54. Pekmezci, B. Y., Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, 69-82.
55. Zhu, W., Howind, T., S., Barbhuiya, Stark, R., Kümmerling, B., Dolado, J. S. (2012). *Nanomechanical study of cement pastes by statistical nanoindentation and peakforce QNM*. 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, Amsterdam, The Netherlands, 726-734.
56. Grasley, Z.C., Jones, C. A., Li, X., Garboczi, E. J., 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.

57. Peled, A., Castro, J., 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.
58. Schmidt, M., Amrhein, K., Braun, T., Glotzbach C., Kamaruddin, S., Tanzer, R. (2013). Nanotechnological improvement of structural materials - impact on material performance and structural design. *Cement and Concrete Composites*, 36, 3-7.
59. Blyszko, J., Kiernozycki, W., Guskos, N., Zolnierkiewicz, G., Typek, J., Narkiewicz, U., Podsiadly, M. (2008). Study of mechanical properties of concrete with low concentration of magnetic nanoparticles. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(35-39), 4515-4518.
60. Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J., Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano- particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
61. Li, H., Zhang, M. H., Ou, J. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301.
62. Bentz, D.P. (2010). Blending different fineness cements to engineer the properties of cement-based materials. *Magazine of Concrete Research*, 62(5), 327-338.
63. Land, G., Stephan, D. (2012). The influence of nano-silica on the hydration of ordinary portland cement. *Journal of Material Science*, 47(2), 1011-1017.
64. Korpa, A., Kowald, T., Trettin R., Kota, T., Xhaxhiu, K., Mele, A. (2012, May). Pyrogenic tiny particles for large contributions on the properties of advanced ultra high performance cement-based composites. 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction, Agios Nikolaos, Crete, Greece, 17-30.
65. Collerparadi, S., Borsoi, A., Olagot, J. O., Troli, R., Collerparadi, M., Curzio, A. Q. (2005). Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC. In Applications of Nanotechnology in Concrete Design: Proceedings of the International Congress held at the University of Dundee. Scotland, UK, 55-66.
66. 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.
67. Otterstedt, J. E., Greenwood, P. (2006). Some important, fairly new uses of colloidal silica/silica sol. *Surfactant Science Series*, 131, 737-756.
68. Kumar, S., Kang, K., Bae, G., Selvarajan, V., Lee, C. (2008). Synthesis and characterization of alumina nano-powders by oxidation of molten aluminium in a thermal plasma reactor: Comparison with theoretical estimation. *Materials Chemistry and Physics*, 112(2), 436-441.
69. Behfarnia, K., Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 580-584.

70. Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H., Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nanoSiO<sub>2</sub> particles. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1351–1355.
71. Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F., Khademno, A. (2010). Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete. *Journal of American Science*, 6(5), 6–9.
72. Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356–359.
73. Shekari, A. H., Razzaghi, M. S. (2011). Influence of nanoparticles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Engineering*, 14, 3036–3041.
74. Mondal, P., Shah, S. P., Marks, L., 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.
75. Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S. Shah, S. P. (2011). Crack free concrete made with nanofiber reinforcement, Year 3 Final Report, *Evanston, Illinois*, 115-124.
76. Li, M., 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.
77. Sahmaran, M., 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.
78. Lin, D. F., Lin, K. L., Chang, W. C., Luo, H. L. Cai, M. Q. (2008). Improvements of nano-SiO<sub>2</sub> on sludge/fly ash mortar. *Waste Management*, 28(6), 1081-1087.
79. Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y. Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.
80. Li, V. C., Horikoshi, T., Ogawa, A., Torigoe, S. Saito, T. (2004). Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite. *Materials Journal*, 101(3), 242-248.
81. Sahmaran, M., Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033-1043.
82. Nazari, A., Riahi, S. (2010). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), 7663–7672.
83. Rao, N. V., Rajasekhar, M., Vijayalakshmi, K., 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.

84. Toklu, K., Baharavar, S., Şimşek, O. (2017). Uçucu kül içeren yüksek performanslı güçlendirme harcında nano silikatın etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 38-46.
85. Toklu K., Şimşek O. (2017). *Determination of saturation point of nano aluminate and nano calcite in highperformance repair concrete including highvolume fly ash*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), Ankara, 198-203.
86. Li, V.C. (2003). On engineered cementitious composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230.
87. Kou, W., Lin, K., Chang, W. 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.
88. Behfarnia, L. 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.
89. ASTM C 39/C39M. (2005). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
90. 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.
91. Mindess, S., Young, J. F. Darwin, D. (2003). *Concrete* (Second edition). New Jersey: Prentice Hall, 1-644.
92. Li, M., Li, V. C. (2007). *Durability of HES-ECC repair under mechanical and environmental loading conditions*. Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Bagnex, 399-408.
93. 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.
94. Zhou, J., Qian, S., Beltran, M. G. S., Ye G, Schlangen, E. van Breugel, K. (2008). *Developing engineered cementitious composite with local materials*. International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China.
95. TS EN 196-1. (2016). *Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 1-35.
96. 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.
97. ASTM C882/C882M. (2005). *Standard test method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

98. ASTM C1581/C1581M-18. (2018). *Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
99. Lin, Y., Ehlert, G. Sodano, H. A. (2009). Increased interface strength in carbon fiber composites through a ZnO nanowire interphase. *Advanced Functional Materials*, 19(16), 2654-2660.
100. Yaltay, N. (2017). Nano silika' nın beton basınç dayanımına etkisinin incelenmesi. *Engineering Sciences*, 12(4), 216-223.
101. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, 21(3), 539-545.
102. 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.
103. Norhasri, M. S. M., Hamidah, M. S., Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91-97.
104. Demirhan, S. (2017). *Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 71-88.
105. Fallah, S. Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 13(2), 170-187.
106. Kim, J. K., Han, S. H. Song, Y. C. (2002). Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1087-1094.
107. Zhou, F. P., Lydon, F. D. Barr, B. I. G. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 177-186.
108. Topçu, İ. B. Uğurlu, A. (2007). Betonda elastisite kuramı ve baraj betonları için statik E-modülünün kompozit modellele tahmini. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 18(1), 4055-4067.
109. Shah, S. P., Lange, A.D., Li, Z. Mitsui, K. (1994). Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Aggregate interface. *American Concrete Institute Journal*, 91(1), 30-39.
110. Topçu, İ. B. Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.
111. Mohammed, B. S., Khed, V. C., Nuruddin, M. F. (2017). A review on nano-silica based concrete. *Journal of Nanoscience and Nanomedicine: JNAN*, 5-6, 1-4.

112. Aggarwal, P., Singh, R. P., Aggarwal, Y. (2015). Use of nano-silica in cement based materials- a review. *Cogent Engineering*, 2(1), 1-11.
113. Li, Z., Wang, He, Shan., Lu, Y., Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composites. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.
114. Momayez, A., Ehsani, M.R., Ramezani pour, A.A., Rajaie, H. (2005). Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 748-757.
115. Saradar, A., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Shadmani, A. (2018). Restrained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete. *Fibers*, 6(1), 12.
116. Ghazy, A., Bassuoni, M. T. (2017). Shrinkage of nanomodified fly ash concrete as repair material. *Materials Journal*, 114(6), 877-888.
117. Çorbacioğlu, C. U. (2008). *Beton karışım tasarımının geçirimsizliğe ve mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16-17.
118. Joshi, P., Chan, C. (2002). Rapid chloride permeability testing. *Concrete Construction-World of Concrete*, 47(12), 37-43.
119. Wiens, U., Schiessl, P. (1997). *Chloride Binding of cement paste containing fly ash*. 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Goteberg, Sweden, 4-10.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TOKLU, Kenan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 12.02.1983, Ceyhan  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (312) 202 88 84  
 e-mail : kenantoklu@gazi.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Cleveland State University / Civil Engineering (Faculty of Engineering)	2012
Lisans	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2006
Lise	Danişment Gazi Lisesi (Y.D.A)	2001

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007-2008	Kayhan-Üçer-Su-Yapı Ortaklığı	Saha Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Toklu, K. Şimşek, O. (2017). 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., Baharavar, S., ve Şimşek, O. (2017). Uçucu kül içeren yüksek performanslı güçlendirme harcında nano silikatın etkisi. *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(1), 38-46.
3. Toklu, K. and Şimşek, O. (2017). *Determination of saturation point of nano aluminate and nano calcite in highperformance repair concrete including highvolume fly ash*. 3<sup>rd</sup> International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017).
4. Şimşek, O., Toklu, K. ve Demirel, C. (2015). *Tuğla ununun çimento mukavemetine etkisi*. 2<sup>nd</sup> International Sustainable Buildings Symposium.
5. Toklu, K., Demirel, C., Şimşek, O. ve Baharavar, S. (2015). *Magnezyum sülfat çözeltilisinin beton basınç dayanımına etkisi*. 2<sup>nd</sup> International Sustainable Buildings Symposium.
6. Demirel, C., Toklu, K. ve Şimşek, O. (2015). *Geri dönüşüm agregasının beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi*. 2<sup>nd</sup> International Sustainable Buildings Symposium.
7. 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.

## Hobiler

Sinemaya gitmek, Spor yapmak, Müzik dinlemek.



*GAZİ GELECEKTİR..*