

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANO SİLİKA’NIN YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN BETONLARIN
TAZE HAL, PRİZ SÜRESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet BARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Haziran 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANO SİLİKA’NIN YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN BETONLARIN
TAZE HAL, PRİZ SÜRESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet BARAN

501181002

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN

Haziran 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501185002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet BARAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NANO SİLİKA’NIN YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN BETONLARIN TAZE HAL, PRİZ SÜRESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özgür Çakır**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Özgür Ekincioğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Mayıs 2022

Savunma Tarihi : 20 Haziran 2022





Aileme,



ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleşen bu çalışmada bana yol gösteren, engin bilgilerini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının deneysel kısmında, değerli görüşlerinden ve yardımlarından dolayı sayın Araş. Gör. Şervan BARAN, Sidar Nihat BIÇAKÇI ve Hasan Nuri TÜRKMENOĞLU'na sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Değerli görüşlerinden ve katkılarından dolayı Jüri üyesi Prof.Dr. Özgür Çakır, Jüri üyesi Dr. Öğr. Üyesi Özgür Ekincioğlu'na teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her anında bana desteklerini veren ve eğitim hayatımda benim için her zaman ellerinden gelenin en iyisini yaptıklarından bir an bile olsun şüphe duymadığım tüm aileme minnettarım. Ayrıca, tanıdığım ilk günden beri her zaman bana desteklerini esirgemeyen arkadaşım Şervan BARAN'a da ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın yapılmasına vesile olan Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN tarafından yürütülen ve araştırmacı (tez öğrencisi) olarak yer aldığım MYL-2021-43045 numaralı BAP projesi kapsamında, bu çalışmaya sağladığı desteklerden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2022

Ahmet BARAN
(İnşaat Mühendisi-Mimar)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Tezin Metodolojisi	8
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ	9
2.1 Kullanılan Malzemeler	9
2.1.1 Agregası	10
2.1.2 Uçucu kül	11
2.1.3 Nano silika	12
2.1.4 Çimento	13
2.1.4 Akışkanlaştırıcı	13
2.2 Beton Tasarımı	14
2.3 Beton Dökümü ve Numunelerin Hazırlanması	15
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	17
3.1 Taze Hal Beton Deneyleri	17
3.1.1 Birim ağırlık deneyi	17
3.1.2 Çökme (Slump) deneyi	17
3.1.3 Reoloji deneyleri	18
3.1.4 Priz süresi tayini	19
3.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri	20
3.2 Sertleşmiş Hal Beton Deneyleri	20
3.2.1 Basınç dayanımı deneyi	21
3.2.2 Elastisite modülü deneyi	21
4 DENEY SONUÇLARI	23
4.1 Taze Hal Beton Deney Sonuçları	23
4.1.1 Birim ağırlık deneyi	23
4.1.2 Çökme (Slump) deneyi	23
4.1.3 Reoloji deneyleri	24
4.1.4 Priz süresi tayini	24
4.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri	25
4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	25
4.2.1 Basınç dayanımı deneyi	25
4.2.2 Elastisite modülü deneyi	26
5 DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	27

5.1 Taze Beton Deneyleri.....	27
5.1.1 Birim ağırlık deneyi	27
5.1.2 Çökme (Slump) deneyi.....	28
5.1.3 Reoloji deneyleri.....	28
5.1.4 Priz süresi tayini.....	32
5.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri	35
5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri	38
5.2.1 Basınç dayanımı deneyi.....	38
5.2.2 Elastisite modülü deneyi	42
6. GENEL SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR.....	51
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

REF	: Referans Betonu
UK	: Uçucu Kül
NS	: Nano Silika
KT2	: Kırma Taş 2
KT1	: Kırma Taş 1
KK	: Kırma Kum
DK	: Doğal Kum
C₃A	: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
C₃S	: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
C H	: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
C-S-H	: Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli
ASTM	: American Society for Testing and Materials
LVDT	: Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
TS	: Türk Standartı
EN	: European Norm
psi	: Basınç Birimi
SCC	: Self Compacted Concrete
HRWR	: High-Range Water Reducer



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 : Malzemelerin özgül ağırlıkları.....	9
Tablo 2.2 : Agregaların elek analizleri ve karışım oranları.....	10
Tablo 2.3 : Uçucu külün kimyasal bileşimi.....	11
Tablo 2.4 : Nano silikanın (17nm) kimyasal bileşimi.....	12
Tablo 2.5 : Çimentonun kimyasal bileşimi.....	13
Tablo 2.6 : Teorik beton karışım oranları (kg/m^3) ($S_u=170 \text{ kg/m}^3$).....	14
Tablo 3.1 : Penetrasyon Direnci [17].....	19
Tablo 4.1 : Birim ağırlık deney sonuçları.....	23
Tablo 4.2 : Reolojik özellikler (Plastik viskozite, dinamik ve akma gerilmesi).....	24
Tablo 4.3 : Priz başlangıç ve bitiş süreleri (dk).....	24
Tablo 4.4 : Mekanik (Basınç dayanımı) test sonuçları.....	25
Tablo 4.5 : Mekanik (Elastisite modülü) test sonuçları.....	26
Tablo A.1 : Mekanik test (Basınç deneyi) sonuçları.....	56
Tablo A.2: Mekanik test (Elastisite modülü) test sonuçları.....	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Çimento, uçucu kül ve nano silika partikül boyutu dağılımları.	9
Şekil 2.2 : Agregra granülometrisi ve referans eğrileri (TS 802 [20]).	10
Şekil 2.3 : Beton karışımlarında kullanılan uçucu külün SEM görüntüsü.	11
Şekil 2.4 : Nano silikaya ait örnek bir SEM görüntüsü [21].	12
Şekil 2.5 : Beton karışımlarında kullanılan çimentonun özgül ağırlık ölçümü.	13
Şekil 2.6 : Beton üretimi aşamaları.	15
Şekil 3.1 : Çökmenin (Slump) ölçülmesi [22].	17
Şekil 3.2 : ICAR reometresi deney düzeneği.	18
Şekil 3.3 : Penetrasyon Direnci Deneyi [17].	19
Şekil 3.4 : Sıcaklık ölçümü test düzeneği.	20
Şekil 3.5 : 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğundaki silindirik numuneler.	20
Şekil 3.6 : Basınç dayanımı test düzeneği.	21
Şekil 3.7 : Mekanik test (Elastisite modülü) düzeneği.	21
Şekil 5.1 : Beton karışımlarının birim ağırlıkları.	27
Şekil 5.2 : Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcı tüketim miktarları.	28
Şekil 5.3 : Beton karışımlarına ait plastik viskozite, dinamik akma gerilmesi ve statik akma gerilmesi değerleri.	29
Şekil 5.4 : Uçucu külün geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (Mpa) ilişkisine etkisi. a- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.)	32
Şekil 5.5 : Nano silikanın geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (Mpa) ilişkisine etkisi. a- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.)	33
Şekil 5.6 : Uçucu kül ve nano silikanın geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (Mpa) ilişkisine etkisi. a,c,e- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b,d,f- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.) ..	34
Şekil 5.7 : Uçucu külün geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.	35
Şekil 5.8 : Nano silikanın geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.	36
Şekil 5.9 : Nano silika ve uçucu külün geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.	37
Şekil 5.10 : Uçucu külün betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (Mpa) b- Normalize edilmiş basınç dayanımı).	38
Şekil 5.11 : 7 günde Nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (Mpa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).	39
Şekil 5.12 : 28 günde nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (Mpa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).	40
Şekil 5.13 : 90 günde nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (Mpa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).	41
Şekil 5.14 : Uçucu külün betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (Gpa) b- Normalize edilmiş elastisite modülü).	42

Şekil 5.15 : 7 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (Gpa) b,c- Normalize edilmiş elastiste modülü).	44
Şekil 5.16 : 28 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (Gpa) b,c- Normalize edilmiş elastiste modülü).	45
Şekil 5.17 : 90 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (Gpa) b,c- Normalize edilmiş elastiste modülü).	46
Şekil 5.18 : Beton örneklere ait bazı SEM görüntüleri (NS: %3,4).....	47



NANO SİLİKA’NIN YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN BETONLARIN TAZE HAL, PRİZ SÜRESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARASTIRILMASI

ÖZET

Beton; çimento, agrega, su ve katkı malzemelerinden oluşmaktadır. Beton ve harç yapımında bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimentonun üretim ve nakliye aşamalarında çevreye yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) salınmaktadır. Bu nedenle, çimento üretimi, çevreye sürdürülebilirlik anlamında büyük zarar vermektedir. Son yıllarda daha sürdürülebilir bir çevre için bilim insanları, çimentoya alternatif malzemeler geliştirmeye çalışmaktadır. Bu malzemeler, bazı durumlarda çimentonun yerini tamamen almasa da çimentonun belirli bir miktarı ile ikame edilerek (puzolanik malzemeler) kullanılmaktadır. Bu puzolanik malzemelerden birisi olan uçucu kül, hem atık bir malzeme olması hem de çimento hidratasyonu sonucu oluşan serbest kireci nemli ortamda bağlayarak çimento esaslı malzemeye ileri yaşlarda mukavemet kazandırması ve malzeme dürabilitesine katkı sağlaması nedenleri ile kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca araştırmalar, uçucu külün, betonun işlenebilirlik özelliklerini arttırdığı ve hidratasyon sıcaklığını düşürdüğünü de göstermektedir. Uçucu kül ile çimentonun ikamesi sürdürülebilirliğe ciddi bir katkı yapsa da bu malzemenin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, uçucu kül içeren betonların erken yaş dayanımları genel olarak düşüktür. Bunun sebebi uçucu külün bağlayıcılık özelliği kazanması için ortamda hidratasyon ürünlerinden olan CH kristallerinin bulunması gerekliliğidir. Çimentonun hidratasyonu başlamadan uçucu külün bağlayıcılık özelliği kazanamaması, priz süresinde de gecikmeye yol açmaktadır.

Betonu daha sürdürülebilir yapmanın başka bir yolu da beton kalitesini arttırarak servis ömrünü uzatmaktır. Bu anlamda, yüksek özgül yüzey alanı ve yüksek reaktiflerinden dolayı nanomalzemeler, son yıllarda birçok çimento esaslı kompozitlerde kullanılmaktadır. Bu nanomalzemelerden, beton üzerinde en çok araştırma yapılan malzemelerden biri de nano silikadır. Nano silika, amorf silikanın ayrı parçacıklarının su içindeki kararlı dağılımları olarak tanımlanabilir. Nano silikanın, ana bileşeni olan amorf silika (>%99), CSH jelleri oluşturmak için Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer (puzolanik etki). Oluşan CSH, hem matrisin hem de arayüzey geçiş bölgesinin mikro yapısını iyileştirmektedir. Ek olarak, nano silika, sahip olduğu yüksek özgül alanına bağlı olarak bir çekirdeklenme etkisi yaratarak hidratasyon sürecini hızlandırmakta ve buna bağlı olarak priz süresini azaltmaktadır. Ayrıca, betonun erken yaş dayanımını arttırdığı da bilinmektedir. Nano silikanın görece dezavantajları ise hidratasyon sıcaklığını arttırması ve işlenebilirlik özelliklerini azaltmasıdır.

Son yıllarda, nano silika ile puzolanik malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı) sinerjistik etkisi araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılmaktadır. Uçucu kül kullanmanın dezavantajları olan erken yaş dayanımının düşük olması ve geciken priz süresinin, nano silika ile telafi edilip edilemeyeceği ile alakalı bir literatür boşluğu

bulunmaktadır. Araştırmalarda kullanılan betonlarda, aynı akışkanlaştırıcı miktarları kullanılmış ve bu durumun da yerleşme özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratabileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda, bu tez kapsamında sunulan çalışmada, aynı kıvamlarda (Naftalin esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır; Slump: 20 ± 1 cm) 4 farklı uçucu kül oranında (çimentonun hacimce %0, %20, %35 ve %50 ikame edilmiş) ve 3 farklı nano silika dozajındaki (bağlayıcının hacimce %0, %1,7 ve %3,4 ü oranlarında) toplam 12 farklı karışım üzerinde reoloji (Plastik viskozite, statik ve dinamik akma gerilemesi), priz süresi, hidratasyon sıcaklık ölçümü, ve 3 farklı yaşta (7, 28 ve 90 gün) basınç dayanımı ve elastisite modülü testleri yapılmıştır. Sunulan bu çalışmanın önemli bir amacı, çimentonun, normal ve yüksek oranlarda uçucu kül ile yer değiştirilmesi sonucu oluşacak dayanım kayıplarının veya gecikmelerinin nano silika kullanımı ile ne derece tolere edilebileceğinin araştırılmasıdır. Ayrıca, nano silikanın ve/veya uçucu külün dayanım ve elastisite modülü gelişimi üzerine etkileri de araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre; uçucu kül ikame oranı arttıkça aynı kıvamı elde edebilmek için kullanılması gereken katkı miktarı azalırken, nano silika dozajı arttıkça, aynı kıvamı elde edebilmek için gerekli katkı miktarı artmıştır. Uçucu külün ikame oranı arttıkça işlenebilirlik özelliklerinin geliştiği ve tersine, nano silika dozajı arttıkça işlenebilirlik özelliklerinin zayıfladığı gözlemlenmiştir. Kullanılan katkı miktarlarının, reolojik özelliklere ve hidratasyon sıcaklığı üzerine ciddi olarak etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, uçucu külün priz süresini geciktirdiği ve nano silikanın priz süresini azalttığı sonucuna varılmıştır. Kullanılan nano silika, uçucu kül kullanımı ile oluşan priz süresindeki gecikmeyi bir nebze tolere etse de gecikmenin tamamını karşılayamamıştır.

Mekanik deneylere ait sonuçlar irdelendiğinde, uçucu kül ikamesi arttıkça 7 ve 28. günlerde basınç dayanımının azaldığı fakat aradaki dayanım farkının 90 günde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Nano silika, öte yandan, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları üzerinde bir artış etkisi gösterse de bu etki 28 ve 90 günlerde azalmaktadır. Uçucu külün erken yaşlarda oluşturduğu olumsuz etkinin, nano-silika ilavesi ile kısmen dengelendiği görülmüştür. Ancak ilerleyen yaşlarda nano silikanın etkisi azalmıştır. Elastisite modülü deney sonuçlarına göre, genel olarak, artan basınç dayanımı ile elastisite modüllerinin arttığı söylenebilir. 28-90 günlük elastisite sonuçları, uçucu külün ve/veya nano silikanın elastisite modülü üzerinde ciddi bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bunun yanında, 7 günlük elastisite deneyi sonuçlarına göre artan uçucu kül ikamesi ile elastisite modülü azalmıştır (%20 uçucu kül içeren karışım hariç).

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF NANO-SILICA ON THE FRESH STATE, SETTING TIMES AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH HIGH FLY ASH CONTENT

SUMMARY

Concrete is a composite building material that is widely used in the world due to the abundance of raw materials used in its components, high compressive strength and workability. Concrete consists of a combination of cement, aggregates, water and various minerals and chemical additives. A qualified concrete should have three basic properties. The first of these should be workable in fresh condition, the second should be able to meet the desired strength properties in hardened state, and the third should be able to meet the expected quality requirements throughout its service life (durability).

Cement is the most basic component used in concrete and mortar mixtures. Cement is released high amount of carbon dioxide (CO_2) to the environment during the production and transportation stages. Therefore, cement production causes great harm to the environment in terms of sustainability. In recent years, scientists have been trying to develop alternative materials to cement for a more sustainable environment. Although these materials cannot completely replace cement in some cases, they are used by replacing a certain amount of cement (pozzolanic materials). Fly ash is one of these pozzolanic materials.

Fly ash is a waste product formed after the burning of pulverized coal in power generation plants. Therefore; fly ash contributes significantly to sustainability. In addition, it has a critical importance as it binds the free lime formed as a result of cement hydration in a humid environment, giving strength to the cement-based material at advanced ages and contributing to the material durability. Moreover, studies show that fly ash increases the workability properties of concrete and lowers the hydration temperature. Although fly ash, which substitution of cement with, makes a serious contribution to sustainability, this material also has some disadvantages. For example, concrete, which contain fly ash, is low generally the early age strength. The reason for this, is that the presence of CH crystals, which is one of the hydration products, is required in order for the fly ash to gain binding property. The inability of fly ash to gain binding property before the hydration of the cement begins, causing a delay in the setting time.

Another way to make concrete more sustainable is to increase the concrete quality and extend its service life. In this sense, in recent years nanomaterials have been used in many cement-based composites due to their high specific surface area and high reactivity. Nano silica, among these nanomaterials, is one of the most researched materials on concrete. Nano silica can be defined as stable dispersions of discrete particles of amorphous silica in water. Amorphous silica, which is the major (>99%) component of this material, reacts with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to form CSH products. The resulting CSH improves the microstructure of both the matrix and the interfacial transition zone

(ITZ). In addition, nano silica accelerates the hydration process by creating a nucleation effect due to its high specific area and accordingly reduces the setting time. It is also known to increase the early age strength of concrete. The relative disadvantages of nano silica are that it increases the hydration temperature and decreases the workability properties.

In recent years, the synergistic effect of nano silica and pozzolanic materials (fly ash, blast furnace slag, silica fume) has been frequently studied by researchers. There is a literature gap regarding the disadvantages of using fly ash, which are the low early age strength and whether the delayed setting time can be compensated with nano silica. The same plasticizer amounts were used in the concretes used in the studies and it was thought that this situation might have a negative effect on the settlement properties.

In this context, in the study presented within the scope of this thesis, the effects of fly ash and nano-silica on the rheological properties, initial and final setting times and the temperature increment during hydration of concrete were investigated. 400 kg/m³ cement dosage was selected for the reference mixture and the amount of cement was replaced with the fly ash (by volume) at 3 different ratios (20%, 35%, and 50%). It is aimed to keep the aggregate volume of concrete mixtures at the same level and for all mixtures, the w/b (by vol.) ratio was kept constant. Therefore, the substitution of cement with fly ash was by volume. Three different ratios of nano silica were added to the concrete mixtures (0%, 1.7%, and 3.4% by volume of the total binder) for each of the four mixtures (REF, FA20, FA35, and FA50). In total, 12 different concrete mixtures were produced at the laboratory. In addition, the consistency of all the mixtures was adjusted at the same level (Slump: 20±1 cm) using a naphthalene-based high-range water reducer (HRWR). An important aim of this study is to investigate to what extent the strength losses or delays that will occur as a result of replacing the cement with fly ash at normal and high rates can be tolerated with the use of nano silica. In addition, the effects of nano silica and/or fly ash on the development of strength and modulus of elasticity were also investigated.

Initial and final setting times were determined using the penetration resistance test in accordance with ASTM C403. After the casting process, the temperature change was monitored for 45 hours using a data logger and thermocouple. The rheological properties were determined using ICAR rheometer. ICAR rheometer was used to obtain plastic viscosity, dynamic and static yield stresses of the mixtures. In addition, for the determination of the mechanical properties, uniaxial compressive strength and modulus of elasticity tests were performed on 7 samples for each age (7, 28 and 90 days). For this purpose, uniaxial compressive test machine with a capacity of 3000 kN was used to determine the compressive strength, according to TS EN 12390-3 and to determine the modulus of elasticity, according to ASTM C469.

According to the results obtained; the amount of high-range water reducer (HRWR) required to obtain a constant slump value increases significantly with increasing dosage of nano silica for each concrete group. On the other hand, the amount of HRWR dosage required by mixtures with similar nano silica contents tends to decrease significantly with the increase in the fly ash displacement (by vol.) rate. When the concrete mixtures were evaluated in terms of plastic viscosity values, it is seen that plastic viscosity decreases with the use of nano silica for all mixtures (REF, FA20, FA35 and FA50). In terms of plastic viscosity values, a similar trend can also be seen for the with the use of fly ash for REF mixture. When the "dynamic yield stress" values are examined, it is seen that the general tendency is to increase the yield stress with

the increase in the amount of nano silica used in the mixture. The addition of nano silica to fly ash-replaced (FA20, FA35, and FA50) and non-replaced (REF) mixtures resulted in an increase in the dynamic yield stress of concretes in general. This trend is not valid only for REF (without fly ash) concrete containing 1.7% NS by volume. In terms of "static yield stress" values of concrete mixtures, the general trend, without any exception, is that the yield stress increases with the increase in the amount of nano silica used in the mixture. Another important point is that the yield stress values tend to decrease up to 35% fly ash by volume, while this trend reverses at 50% FA, that is, the dynamic and static yield stresses tend to increase again.

The addition of nano silica had an accelerating effect on the setting time for all mixtures (REF, FA20, FA35, and FA50). On the other hand, when the effect of fly ash on the setting times was examined, it was observed that as the ratio of fly ash substitution increased, the initial and final setting times were delayed. One of the important goals of the study presented in this article is to investigate to what extent the delay in setting time caused by fly ash can be recovered by nano silica. Although the use of nano silica dosages used within the limit of this study reduced the initial and final setting times, it was not able to recover the delay which took place as a result of partial fly ash replacement completely.

According to the results temperature (°C) vs. elapsed time graph of the mortar phase obtained, it was observed that the addition of nano silica slightly decreased the peak temperature for REF mixtures and increased the time required to reach the peak. On the other hand, when the effect of fly ash on the the results temperature (°C) vs. elapsed time graph of the mortar phase was examined, it was observed that as the ratio of fly ash substitution increased, slightly decreased the peak temperature for REF mixtures and increased the time required to reach the peak. It has been concluded that the amount of additives used has a serious effect on the rheological properties, setting time and hydration temperature.

When the mechanical results were examined, the use of fly ash decreased the compressive strengths, as expected, especially at early ages (7 and 28 years old). In the advanced ages, the difference between the reference concrete and concrete mixes containing fly ash gradually decreased. In fact, it was observed that the FA20 mixture gave a higher compressive strength value than REF concrete in 90 days. Nano silica, on the other hand, shows an increasing effect on the 7-day compressive strength results, but this effect decreases at 28 and 90 days. It has been observed that the negative effect of fly ash at early ages is partially balanced by the addition of nano-silica. However, the effect of nano silica decreased with advancing age.

According to the modulus of elasticity test results, it can be said that the modulus of elasticity increases with increasing compressive strength. The 28-90 day elasticity results show that fly ash and/or nano silica do not have a serious effect on the modulus of elasticity. When nano silica was added to REF, FA20 and FA50 mixtures, although the modulus of elasticity showed a small increase in 28 days and 90 days, a decrease was observed in the modulus of elasticity of the FA35 mixture. In general, the increase in strength from 28 days to 90 days was not reflected in the modulus of elasticity results. In addition, according to the results of the 7 day elasticity test, the elasticity modulus decreased with increasing fly ash substitution (except for the 20% fly ash mixture).



1. GİRİŞ

Beton, bileşenlerinde kullanılan hammaddelerinin bolluğu, yüksek basınç dayanımı ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı dünyada yaygın olarak kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. Çimento, agrega, su ve katkı malzemelerinin birleşimi sonucu meydana gelen beton; binalar, fabrikalar, köprüler, barajlar, yollar ve havaalanları v.b gibi yapılarda sıkça kullanılmaktadır. Nitelikli bir betonda bulunması gereken 3 temel özellik vardır. Bunlardan birincisi taze halde işlenebilir olması, ikincisi sertleşmiş halde istenen dayanım özelliklerini karşılayabilmesi ve üçüncüsü ise servis ömrü boyunca beklenen kalite gereksinimlerini karşılamasıdır (dürabilite).

Betonun en temel bileşeni olan çimento, imalat aşamasında yüksek miktarda enerji tüketmesi, çevreye yüksek miktarda CO₂ salması sebebiyle betonun en az sürdürülebilir bileşenidir [1]. Öte yandan çimentoya olan talep ise inşaat sektöründeki gelişmelere bağlı olarak son yıllarda artarak devam etmektedir. İnşaat endüstrisinde, sürdürülebilirlik anlamında çimentonun bu olumsuz etkilerini en aza indirmek için betonda çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır (puzolanlar, nano malzemeler v.b.).

Puzolanlar yapısında silis ve/veya alüminyum silikat içeren, tek başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan, ince öğütüldüğünde nemli ortamda Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanan katkı malzemelerdir. En önemli yapay puzolanlardan birisi de uçucu küldür. Uçucu kül, elektrik üretim santrallerinde toz haline getirilmiş kömürün yakılmasından sonra oluşan bir atık üründür. Bu nedenle; sürdürülebilirliğe ciddi anlamda katkı sunmaktadır. Ayrıca, uçucu kül, betonun karışım suyu ihtiyacını azaltması, taze hal özelliklerini, betonun ileri yaş mekanik özelliklerini ve betonun dürabilite özelliklerini artırması yönleri ile betonda sıkça kullanılmaktadır. Ancak uçucu kül çimentonun hidratasyonu başlamadan ortamda serbest kireç bulunmadığından, erken puzolanik aktivitesi genellikle zayıftır, bu da betonun priz süresini geciktirerek erken yaşta düşük dayanıma neden olmaktadır.

Nanomalzemeler, yüksek özgül yüzey alanı ve dolayısıyla yüksek reaktivite sağlamalarından dolayı birçok çimento esaslı kompozitlerde kullanılmaktadır. Kullanılan bu nanomalzemeler; nano-SiO₂, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-Al₂O₃,

karbon nanotüpler v.b. dir [2]. Nano silika betona sağladığı katkılardan dolayı üzerinde en çok araştırma yapılan nanomalzemelerden birisidir. Nano silika; suda amorf silisin ayrık parçacıklarının kararlı dispersiyonları veya solüsyonları olarak betonda kullanılabilir. Bu malzemenin ana (>% 99) bileşeni olan amorf silika, Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek CSH ürünleri oluşturmaktadır. Bu oluşan ürünler hem matrisin hem de ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) yapısını iyileştirmektedir. Ayrıca, nano silika, sahip olduğu yüksek özgül alanına bağlı olarak bir çekirdeklenme etkisi yaratarak hidratasyon sürecini hızlandırmakta ve buna bağlı olarak priz süresini azaltmaktadır.

Nano silika ile uçucu külün, birlikte kullanımı betonun taze ve sertleşmiş hal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Betonun taze hal özelliklerinden olan işlenebilirlik, betonda nano silikanın kullanılmasıyla azalmaktadır. Bu nedenle, istenen işlenebilirliği elde etmek için, nano silika kullanımı ile su azaltıcı katkı talebi artırmaktadır. Ayrıca betonun kohezyon ve viskozite parametreleri nano silika kullanımı ile artmaktadır [3]. Ancak uçucu külün nano silika ile birlikte kullanıldığında, nano silikanın işlenebilirlik üzerindeki negatif etkisini dengelemektedir [4]. Betonun bir diğer kritik parametrelerinden birisi de priz süresidir. Priz süresi, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında (kalıp sökülmesi, inşaat maliyeti ve zaman hesaplamaları) önem arz etmektedir. Betonda uçucu kül kullanıldığında priz süresi artmaktadır. Bunun aksine, nano silika ise hidratasyon sürecini hızlandırarak priz süresini kısaltmaktadır [5].

Betonda çimentonun uçucu kül ile ikamesi genel olarak erken yaş dayanımının düşmesi ile sonuçlanır. Bunun sebebi uçucu külün bağlayıcılık özelliği kazanması için ortamda serbest kirecin ve suyun bulunması zorunluluğudur. Nano silika ise erken yaş dayanımı iyileştirmektedir. Nano-silika boşluk doldurma (filler) özellikleri ve yüksek reaktivitesinden dolayı bir çekirdeklenme etkisi yaparak hidratasyon reaksiyonunu hızlandırır ve priz süresini azaltır. Uçucu kül ve nano silika, mukavemet gelişimini arttırmak için kalsiyum-hidroksit (CH) ihtiyaç duymaktadırlar. Ancak nano silika uçucu külden daha reaktif olduğu için daha yüksek oranda CH tüketmektedir [6]. Bu nedenle erken yaşlarda dayanımın, nano silika kullanımı ile arttığı söylenebilir. Ancak, ileri yaşlarda ortamda yeteri kadar CH bulunmaması durumunda nano silika sadece filler olarak çalışmaktadır. Sonuç olarak, su/çimento oranı, çimento dozajı ve optimal nano silika dozajı belirlendiğinde çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı, elastisite modülü değerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır [7].

1.1 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında sunulan çalışmada, aynı kıvamlarda (Kıvamlar naftalin esaslı akışkanlaştırıcı yardımı ile slump: 20 ± 1 cm olacak şekilde ayarlanmıştır) 4 farklı uçucu kül oranında (çimentonun hacimce %0, %20, %35 ve %50 ikame edilmiş) ve 3 farklı nano silika dozajındaki (bağlayıcının hacimce %0, %1,7 ve %3,4 ü oranlarında) toplam 12 farklı karışım üzerinde reolojik özellikler (Plastik viskozite, statik ve dinamik akma gerilemesi), priz süresi, hidrasyon sıcaklık ölçümü, ve 3 farklı yaşta (7, 28 ve 90 gün) basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri incelenmiştir. Sunulan bu çalışmanın önemli bir amacı, çimentonun, normal ve yüksek oranlarda uçucu kül ile yer değiştirilmesi sonucu oluşacak dayanım kayıplarının veya gecikmelerinin nano silika kullanımı ile ne derece tolere edilebileceğinin belirlenmesidir.

1.2 Literatür Araştırması

Bu bölümde araştırılan konuya dair kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatürdeki araştırmalar taranarak elde edilen sonuçlar tezde araştırılan konu gözetilerek aşağıda özetlenmiştir.

Zhang ve Islam [5] %50 oranında uçucu kül ve fırın cürufu içeren beton karışımlara, farklı dozajlarda nano silika ve silis dumanını katarak; çimento hidrasyonu, priz süresi ve erken yaş dayanımı üzerindeki etkileri deneysel bir çalışma olarak incelemişlerdir. Çalışmada, uçucu kül ve cüruf ile birlikte ağırlıkça %1 ile %2 oranında nano silika ve silis dumanı ayrı ayrı kullanılarak harçlar üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Ağırlıkça %50 çimento ikamesine sahip uçucu kül içeren harç karışımlarına, ağırlıkça %2 oranında nano silika ilave edilmesi erken yaş (3 ve 7 gün) basınç dayanımlarını sırasıyla %30 ve %20 oranlarında artırmıştır. Cüruf lu harçlarında da benzer yükselmeler gözlenmiştir. Ağırlıkça %2 oranında nano silika ilave edilmesi beton karışımlarda başlangıç ve bitiş priz sürelerini yaklaşık olarak 90 ve 100 dakika kısaltmıştır. Hidrasyon sıcaklığı nano silika kullanımı ile artmıştır. Silis dumanının kullanımda da nano silikanın artışı kadar olmasa da kayda değer artış gözlemlenmiştir. İleri yaş (28 ve 91 gün) dayanımları incelendiğinde ise uçucu kül ile birlikte nano silika kullanılan numunelerde dayanım artışı olmuştur. Ancak cüruf içeren numunelerde dayanım artışı olmamıştır. Yazarlar bu durumun nedeni kullanılan agreganın dayanım limitine ulaşmasına bağlamıştır.

Güneyisi ve ark. [3] tarafından yapılan deneysel çalışmada; nano-silika ve uçucu külün, kendiliğinden yerleşen betonun (SCC) taze hal ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dört seri beton grubu için çimentonun ağırlıkça %0, %25, %50, ve %75 oranında uçucu kül ile ikame edilmiş, ağırlıkça %0, %2, %4 ve %6 oranlarında nano silika ilave edilmiştir. Betonlar 570 kg/m^3 sabit toplam bağlayıcı içeriği ve 0.33 su/bağlayıcı (s/b) oranında tasarlanmıştır. Beton gruplarına ait taze hal özelliklerini belirlemek için, yayılma deneyi, V hunisi ve L-kutu deneylerini yaparak incelenmiştir. Öte yandan, reolojik özellikler ICAR reometresinden elde edilen veriler üzerinde Herschel-Bulkley ve modifiye edilmiş Bingham modelleri kullanarak belirlenmiştir. Nano silika ve uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton karışımları için 700 mm ile 800 mm arasında değişen yayılma çapları elde edilmiştir. Nano silika kullanımı yayılma çapını ve slump değerini azaltırken, uçucu kül kullanımı ise yayılma çapını ve slump değerini artırmıştır. Nano silika kullanılması hem çökme akışını hem de huni akış sürelerini artırırken, uçucu kül kullanımı ise, çökme akışını ve V-hunisi akış sürelerini azaltmıştır. NS içeriğinin artması L-kutu yükseklik oranını düşürürken, uçucu kül içeriğinin artması L-kutu yükseklik oranını yükseltmiştir. Tork ile reometreden elde edilen dönme hızı arasındaki ilişki, artan nano silika içeriğinin daha yüksek tork değerleri ile sonuçlandığını, artan uçucu kül içeriğinin ise tork değerlerini azalttığını göstermiştir.

Björnström ve ark. [8] kolloidal silikanın, (CS) Ca_3SiO_5 (C_3S) çimentosunun hidratasyon süreci üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Çalışmada; 5 nm boyutunda kolloidal nano silika kullanmıştır. Nano silikanın dozajı ağırlıkça %1'den %5'e artırdığında hidratasyon sürecinde hızlanma olmuştur. Yüzey DR-FITR analizleri ile C_3S fazının çözünmesi, silikat polimerizasyonu, hidrojen bağı olan ve olmayan OH gruplarını izlenmiş ve kaydedilmiştir. Yüzey DR-FITR analizleri ve kitle DSC analizlerinden elde edilen veriler, özellikle hidratasyonun başlangıç evrelerinde (4-12 saat) C_3S tüketiminin ve C-S-H oluşumunun kolloidal silika katkısı ile hızlandığını ve nano tanelerin birer yoğunlaşma merkezi olarak rol aldıklarını göstermiştir. Yazarlar bu çalışmanın kolloidal nano silikanın C_3S hidratasyonu üzerindeki etkisini kimyasal olarak anlaşılması üzerine yoğunlaştığını ancak ileriki çalışmalarda klinker – nano silika sistemlerinin işlenebilirliği artıran kimyasal katkılar ile etkileşiminin incelenmesi gerekliliğine vurgu yapmışlardır.

Li ve ark. [9] nano-Fe₂O₃ ve nano-SiO₂ malzemelerinin çimento harçlarında mekanik özelliklerin değişimini araştırmışlardır. Her karışımdan altı adet küp numune üretilmiştir. Tüm karışımlarda kıvamı sabitlemek için akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Nano parçacıklı harçların farklı yaş dayanımlarının etkisini gözlemlemek için üç küp 7. günde ve diğer üç küp 28. günde test edilmiştir. Nano tanecikler kullanılarak üretilen harçlardan 7. ve 28. günde elde edilen basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarının normal çimento ile üretilen harçlara göre daha yüksek değerler vermiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları, nano-parçacıkların sadece filler etkisi göstermediğini, aynı zamanda hidratasyonu hızlandıran bir aktivatör olarak da hareket ettiğini ve eğer nano-parçacıklar homojen bir şekilde dağılmışsa çimento hamurunun mikro yapısını iyileştirdiğini gözlemlenmiştir. Yazarlar; nano-parçacıkların kullanımının beton özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir olduğu ancak hangi oranlarda kullanmak gerektiğini belirlemek için geniş çaplı çalışmalar yapılması gerektiği vurgulamışlar.

Hou ve ark. [10] %20, %40 ve %60 uçucu kül ikame oranına sahip ve kütlece %0, %2,25 ve %5 oranlarında kolloidal nano silika kullanarak üretilen harçların taze hal ve sertleşmiş hal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında numunelerin priz süresi, viskozite ve akışkanlık özellikleri, erken yaş ile ileri yaş dayanımları araştırılmıştır. Aynı çimento ikame oranına uçucu kül için; kolloidal nano silikanın kullanıldığı ve kullanılmadığı karışımlarda su ihtiyacı çok belirgin bir farklılık göstermemiştir. Sadece nano silika kullanılan numunelerde %5 kadar kullanılmasıyla viskozite 4,3 kat yükselirken, uçucu küllü karışımlarda aynı oranda nano silika kullanılması 2,5 kat artışa neden olmuştur. Her iki katkının beraber kullanıldığı örneklerde ise viskozite, nano silikanın oranına bağlı olarak yükselmiştir. Sonuçlar her karışım oranında nano silikanın katkısının akmaya karşı direncinin artırdığını göstermiştir. Uçucu kül ile kolloidal nano silikanın beraber kullanılmasının ise durumu dengelediği, düşen slump ve akışkanlık değerlerini artırdığını göstermiştir. Dayanım değerleri açısından incelendiğinde ise kolloidal nano silikanın, özellikle uçucu külün erken yaşta yapmış olduğu basınç dayanımdaki düşüşleri iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Tüm dayanım sonuçları nano silikalı numunelerde daha yüksek elde edilmiş ve nano silikanın içyapı üzerindeki iyileştirici etkisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile desteklenmiştir.

Said ve ark. [11] tarafından çimento ve %30 F tipi uçucu kül bağlayıcılar içeren beton üzerinde koloidal nano-silikanın basınç dayanımı ve hidrasyon ısısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Toplamda altı beton karışımı hazırlanmıştır. Çalışmada %50 SiO₂ içeriğine sahip bir sulu çözeltinin koloidal formunda olan toplam çimento malzeme kütlesine göre %3 ve %6 nano-silika (35nm), ilave edilmiştir. Sabit bir işlenebilirlik seviyesi elde etmek için su azaltıcı katkı malzeme kullanılmıştır. Nano silika hem referans betonun hem de % 30 uçucu kül içeren beton karışımlarda hidrasyon ısını artırmıştır. En yüksek hidrasyon ısısına %3 ile %6 nano silika içeren beton karışımların; nano silika içermeyen karışımlara göre yaklaşık olarak %20 daha yüksek ve daha kısa bir zaman diliminde (4 saat önce) ulaşılmıştır. Beton üretiminden sonraki 15 saat içinde pik sıcaklıktaki artış, nano-silikanın etkisi olarak yorumlanmıştır. Basınç dayanımı açısından ise, nano-silika ilavesiyle basınç ve çekme dayanımlarının belirgin şekilde arttığını görülmüştür. Referans betonu ile %30 uçucu kül beton karışımlardan alınan numuneler için, ortalama erken yaş (3 ve 7 gün) mukavemeti, nano-silika ilaveleriyle sırasıyla yaklaşık %18 ve %14 artmıştır. 28 günde ise basınç dayanımı artışı %36'ya kadar daha da iyileştirmiştir. Nano-silika içeren karışımların mekanik özelliklerindeki iyileşme, nano-silikanın pozolanik ve filler etkilerine bağlanmıştır.

Supit ve ark. [12] tarafından yapılan deneysel çalışmada; nano silika ve ultra ince uçucu külün; yüksek hacimli uçucu kül harcının 7 ile 28 gün basınç dayanımının üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Üç seri harç ele alınmıştır. Birinci seride çimentonun kısmi ikamesi olarak %40, %50 ve %60 uçucu kül, ikinci seride çimentonun kısmi ikamesi olarak %5, %8, %10, %12 ve %15 gibi beş farklı ultra ince uçucu kül içeriği ve üçüncü seride ise çimentonun kısmi ikamesi olarak %1, %2, %4, %6 ve %8 oranında 5 farklı nano silika oranı kullanılmıştır. Ultra ince kül içeriğinin %10'a kadar artmasıyla harcın basınç dayanımının arttığı ancak ultra ince kül içeriğinin daha da artmasıyla basınç dayanımında azalma görülmüştür. Ultra ince kül içeren harcın, 28 günde kontrol çimento harcından yaklaşık %35 daha yüksek basınç dayanımını elde edilmiştir. Öte yandan, karışımda uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında önemli derecede bir azalma eğilimi sergilemiştir. Nano silikanın son derece ince parçacık boyutu ve yüksek yüzey alanı nedeniyle C-S-H (Calcium-silicate hydrate) oluşumunu hızlandırdığını sonucuna varmışlardır.

Berra ve ark. [13] nano silika tanelerinin; çimentolu karışımların reolojik davranışları ve dayanım gelişimleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Betonların üretiminde üç farklı miktarda nano silika ve değişik oranlarda su/bağlayıcı kullanılmıştır. Mini slump testleri ile çimento hamurların reolojik davranışları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan nano silika katkısının işlenebilirliği düşürdüğü görülmüştür. Uygun oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmasının nano silikanın meydana getirdiği bu etkiyi ortadan kaldırmıştır. Mekanik test sonuçları irdelendiğinde, literatürdeki gibi etkili bir dayanım artışı görülmemiştir. Nano silika içeren numunelerin muazzam yüzey alanından dolayı su tutması nedeniyle hidrasyon kinetiklerinin arzu edildiği gibi ilerleyememesi ve bunun sonucunda yeterli dayanıma ulaşamamış örnekler oluşmasına neden olmuştur. Bunu aynı kıvamı elde etmek için yüksek miktarda akışkanlaştırıcı miktarına bağlamışlardır. Araştırmadan elde edilen sonuçlar, nano silika ile birlikte süper akışkanlaştırıcı kullanılmasının önemi ortaya koymuştur.

Chen ve ark. [14] çimentonun kısmi ikamesi olarak ağırlıkça %40 ve %60 oranda uçucu kül içeren betonların ile ağırlıkça %2 nano silikanın yarı statik ve dinamik özelliklerini deneysel çalışma olarak incelemişlerdir. Su çimento oranı 0,4 olarak seçilmiştir. İyi bir işlenebilirlik elde etmek için tüm karışımlarda 50 mL'lik sabit bir süper akışkanlaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Beklendiği gibi, uçucu kül içeriğinin dozajı artıkça (%40 ve %60) yarı statik basınç dayanımı, sırasıyla %15 ve %40 oranında azalmıştır. Yazarlar erken yaşta uçucu külün basınç dayanımının üzerindeki olumsuz etkiyi nano silika ilave ederek tolere edebileceğini vurgulamışlardır.

Gündoğdu [15] tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında; kolloidal nano silikanın uçucu küllü harçlar üzerindeki mekanik etkisini araştırmıştır. %20, %40, %60 çimento ikame oranında uçucu kül içeren kontrol numuneleri üretilmiştir. Her bir uçucu kül oranı için %0, %5, %10, %15 oranlarında kolloidal silika ilave edilmiştir. Bu karışımlar 0,33, 0,38 0,43, 0,48 olmak üzere dört farklı su/bağlayıcı oranı ile üretilmiştir. Toplam 48 seri harç üretilmiştir. Üretilen harçlar 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletildikten sonra mekanik testlere tabi tutulmuştur. Deneyler sonunda kolloidal silikanın erken yaşlarda uçucu külün yaratmış olduğu dayanım kayıplarını giderdiği, buna karşın kolloidal silikanın geç yaşlarda dayanım düşüklüğüne sebebiyet verdiği görülmüştür.

Qing ve ark. [16] nano silika ve silis dumanının, taze ve sertleşmiş çimento harcı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Silis dumanı kullanımı başlangıç ve bitiş priz sürelerini geciktirmiş, nano silika ise başlangıç ve bitiş priz süresi hızlandırmıştır. Nano silika dozajı arttıkça başlangıç ve bitiş priz süresi arasındaki süreler daha da kısalmıştır. Basınç dayanımı değerleri, XRD ve SEM analizleri kullanılarak nano silika ile silis dumanı birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bütün çimento harcı karışımlarda basınç dayanımları katkısız çimento harcına göre daha yüksek çıkmıştır. Özellikle nano silika katkılı erken aşamada (3 gün) karışımların basınç dayanımları referans karışımından fazla çıkmıştır. Silis dumanında ise erken yaş (1 ve 3 gün) basınç dayanımı referans karışımından daha düşük çıkmıştır. Nano silikanın kullanımı ile CH kristallerinin büyük oranda tüketildiği görülmüş, ara yüzeyde toplanan kristal boyutu azalmıştır. Böylece ara yüzeyi silis dumanına göre daha çok geliştirmiş ve bağ kuvvetleri güçlendirmiştir. Sonuçlar, nano silikanın silis dumanına göre daha reaktif olduğunu ve küçük bir nano silika dozajı ile ara yüzeydeki CH kristallerinin erken yaşlarda tüketilebildiği göstermiştir.

1.3 Tezin Metodolojisi

Laboratuvar koşullarında üretilen beton karışımlarının reolojik özelliklerini (plastik viskozite, dinamik ve statik akma gerilmeleri) belirlemek amacıyla ICAR reometresi kullanıldı. Priz başlangıç ve bitiş süreleri, ASTM C403'e [17] göre penetrasyon direnci testi kullanılarak belirlendi. Döküm işleminden sonra sıcaklık değişimi bir datalogger ve termocouple kullanılarak 45 saat boyunca izlendi. Ayrıca basınç yüklemesi altında 3 farklı yaşta (7, 28 ve 90) beton grupların mekanik özellikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü) belirlenmiştir.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ

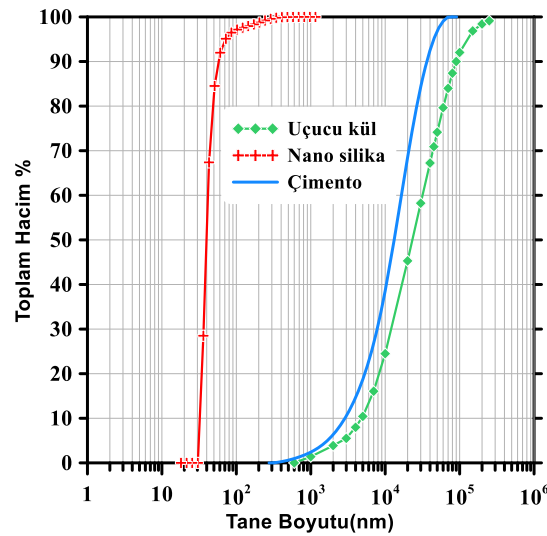
2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında; beton karışımında EN 197-1 [18] standardına uygun CEM I 42.5-R çimento, ASTM C 618-15 [19] standardına uygun F tipi uçucu kül ve 17 nm ortalama tane büyüklüğüne sahip (Levasil CB17) kolloidal nano-silika kullanılmıştır. Çimento, uçucu kül ve nano silikaya ait fiziksel özellikler Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 : Malzemelerin özgül ağırlıkları.

Bileşen (kg/dm ³)	
Kırma Taş 2	2,76
Kırma Taş 1	2,78
Kırma Kum	2,77
Doğal Kum	2,64
Uçucu Kül	2,2
Nano Silika	2,3
Çimento	3,15

Ayrıca bu malzemelere ait tane boyutu dağılımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Beton karışımında iki tip iri agrega (Kırma taş 1; 5-14 mm ve kırma taş 2; 12-22 mm) ve iki tip ince agrega (kırma kum; 0-5 mm ve doğal kum; 0-2 mm) kullanılmıştır.



Şekil 2.1 : Çimento, uçucu kül ve nano silika partikül boyutu dağılımları.

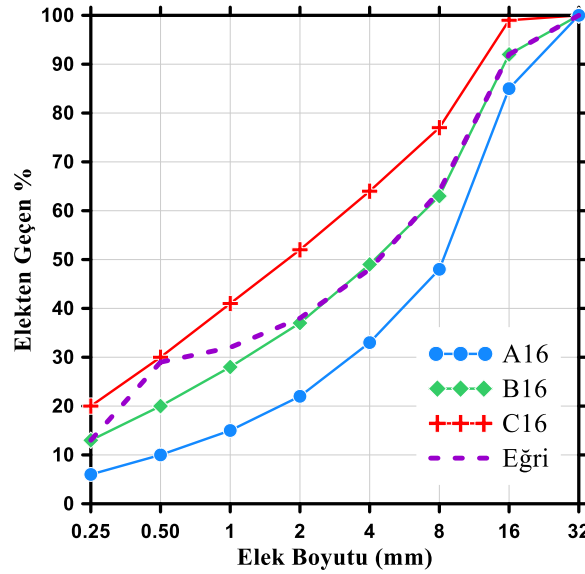
2.1.1 Agreg

Agrega, harç ve beton yapımında çimento ve suyla kullanılan mineral yapıya sahip inorganik malzemelerdir. Bir agreganın çapı içinden geçebildiği maksimum çaptaki eleğin çapı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmadaki beton karışımlarında kırma taş 1, kırma taş 2, kırma kum ve doğal kum kullanılmıştır. Agreg

Tablo 2.2 : Agregaların elek analizleri ve karışım oranları (TS 802 [20]).

Elek Boyutu(mm)	Kırma Taş 2	Kırma Taş 1	Kırma Kum	Doğal Kum	A16	B16	C16	Karışım
32	100	100	100	100	100	100	100	100
16	68	100	100	100	85	92	99	92
8	0	60	100	100	48	63	77	64
4	0	6	92	100	33	49	64	48
2	0	0	59	99	22	37	52	38
1	0	0	32	98	15	28	41	32
0,5	0	0	21	96	10	20	30	29
0,25	0	0	12	39	6	13	20	13

Yapılan bu tez çalışması kapsamında kullanılan agregaların maksimum agreg



Şekil 2.2 : Agreg granülometrisi ve referans eğrileri (TS 802 [20]).

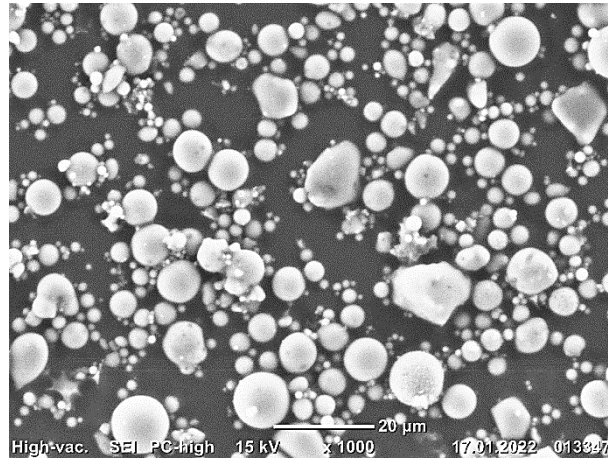
2.1.2 Uçucu kül

Yapılan çalışmada ASTM C 618-15 [19] standardına uygun F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Bu standarta göre uçucu küller; C tipi uçucu kül ve F tipi uçucu kül olmak üzere iki sınıfa ayrılır . Uçucu külde bulunan bileşenlerin miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Uçucu küldeki temel oksitlerden % 25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir. F tipi uçucu kül yaklaşık %0-10 arası kalsiyum içerir. Uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 2.3 verilmiştir.

Tablo 2.3 : Uçucu külün kimyasal bileşimi.

Bileşen	Uçucu Kül
SiO_2	%58,75
CaO	%1,46
Al_2O_3	%25,24
Fe_2O_3	%5,76
SO_3	%0,08
MgO	%2,22
K_2O	%4,05
Na_2O	%0,60
Cl^-	%0,015
Serbest Kireç	%0,65
Kızdırma Kaybı	%1,12

Uçucu küllerin tane çapları 1-100 mikron arasında olup mikroskopik açıdan incelendiğinde küre şekline sahiptir. Çalışmada kullanılan uçucu kül taneciklerine ait bir SEM resmi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Beton karışımlarında kullanılan uçucu külün SEM görüntüsü.

2.1.3 Nano silika

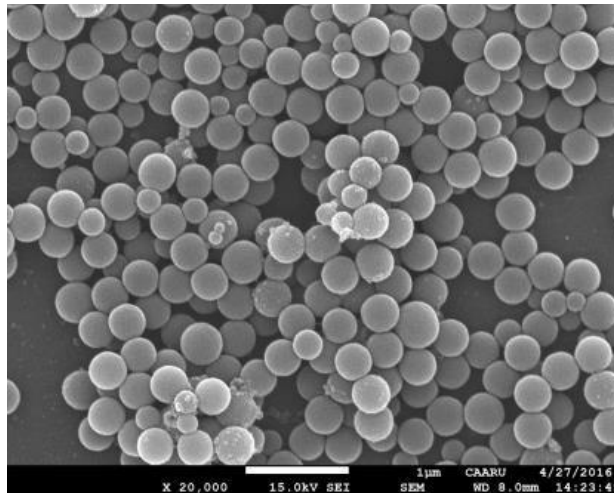
Bu çalışmada kullanılan Levasil CB17 kolloidal nano silikanın parçacık boyutu 17 nm’ dir. Levasil CB17, ağırlıkça %40 katı, %60 su olan bir dispersiyondur. Nano silika parçacıkları ayırık, düzgün, küresel bir şekle sahiptir ve geniş bir parçacık boyutu dağılımına sahiptir. Dispersiyonun fiziksel görünümü, sudan biraz daha viskoz bir sıvıdır. Levasil CB17 malzemesine ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4 : Nano silikanın (17nm) kimyasal bileşimi.

Bileşen	Nano Silika
SiO ₂ (%)	99*
Ortalama tane boyut(nm)	17
Yoğunluk (g/cm ³)	2,3
PH	9,5
Viskozite (cP)	15
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	170

* Üretici tarafından beyan edilmiştir.

Nano silikanın çok büyük bir kısmını amorf silika (>%99) oluşturmaktadır. Nano silika, parçacık boyutları 1–100 nm mertebelerinde olan partiküllerdir. Taramalı elektronik mikroskopu (SEM) ile incelendiğinde, küre şekline sahip olan bir nano malzemedir. Yüksek saflık ve ultra yüksek özgül yüzey alanı (>80 m²/g) bu malzemenin en önemli özelliklerindendir. Nano silikaya ait bir SEM görüntüsü Şekil 2,4’te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Nano silikaya ait örnek bir SEM görüntüsü [21].

2.1.4 Çimento

Bu deneysel çalışmada CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun üretici firma tarafından yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 : Çimentonun kimyasal bileşimi.

Bileşen	Çimento
SiO ₂	%19,7
CaO	%62,0
Al ₂ O ₃	%4,73
Fe ₂ O ₃	%3,52
SO ₃	%3,45
MgO	%1,11
K ₂ O	%0,72
Na ₂ O	%0,30
Cl ⁻	%0,04
Serbest Kireç	%1,28
Kızdırma Kaybı	%2,41

Ayrıca kullanılan çimentonun özgül ağırlık ölçümüne ait görsel Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Beton karışımlarında kullanılan çimentonun özgül ağırlık ölçümü.

2.1.4 Akışkanlaştırıcı

Bu tez çalışması kapsamında, üretilen betonların aynı kıvamında olması için, naftalin esaslı bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

2.2 Beton Tasarımı

Nano silika ve uçucu külün; betonun reolojik özellikleri (plastik viskozitesini, dinamik ve statik akma gerilmeleri), hidrasyon sıcaklık değişimi, sertleşme süreci, basınç dayanımı, elastisite modülü üzerindeki etkisini araştırmak için beton karışımları tasarlanmıştır. Referans betonun bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Referans beton karışımında %100 çimento kullanılmış ve bu çimento miktarı diğer karışımlarda hacimce %20, %35 ve %50 oranlarında uçucu kül ile ikame edilmiştir. Beton karışımlarının agrega hacminin aynı seviyede tutulması amaçlanmış ve tüm beton karışımlar için su/bağlayıcı oranı hacimce sabit tutulmuştur. Bu nedenle, çimentonun uçucu kül ile ikamesi hacimce olmuştur. Hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen bu beton karışımlara sırasıyla toplam bağlayıcının hacimce %1,7 ve %3,4 oranlarında koloidal nano silika ilave edilmiş ve toplamda 12 farklı beton karışımı laboratuvarında üretilmiştir. Koloidal nano silika içerisinde bulunan su (nano silikanın ağırlıkça %60 ı), karışım suyundan düşülmüştür. Bunlara ek olarak, tüm karışımların kalıplara yerleşme özelliklerinin aynı olması için eşit kıvam değeri hedeflenmiştir (Slump: $20 \pm 1 \text{ cm}$). Bunu sağlamak için naftalin esaslı yüksek miktarda akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton tasarımına ait detaylar Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 : Teorik beton karışım oranları (kg/m^3) ($S_u=170 \text{ kg/m}^3$).

Numune Kodu	Çimento	UK	s/(ç+uk) kütlege	s/(ç+uk) hacimce	NS	Katkı	DK	KK	KT1	KT2
REF	400	-	0,43	1,34	-	5,3	448	432	509	468
REF_NS1,7	400	-	0,43	1,34	5	9,4	446	431	507	466
REF_NS3,4	400	-	0,43	1,34	10	13,4	445	429	506	465
UK20	320	56	0,45	1,34	-	4,4	448	432	509	468
UK20_NS1,7	320	56	0,45	1,34	5	7,6	446	431	507	466
UK20_NS3,4	320	56	0,45	1,34	10	11,8	445	429	506	465
UK35	260	98	0,48	1,34	-	4,2	448	432	509	468
UK35_NS1,7	260	98	0,48	1,34	5	7,5	446	431	507	466
UK35_NS3,4	260	98	0,48	1,34	10	11,3	445	429	506	465
UK50	200	140	0,50	1,34	-	2,9	448	432	509	468
UK50_NS1,7	200	140	0,50	1,34	5	5,7	446	431	507	466
UK50_NS3,4	200	140	0,50	1,34	10	9,7	445	429	506	465

2.3 Beton Dökümü ve Numunelerin Hazırlanması

Beton karışımları hazırlanırken İTÜ İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan beton mikseri kullanılmıştır. Öncelikle kuru malzemeler (Çimento, uçucu kül ve agregalar) düşük devirde karıştırılmış olup, daha sonra suyun yaklaşık %70'i ilave edilerek yüksek devirde karıştırılmış ve nano silika içeren karışımlara da nano silika eklenip son olarak akışkanlaştırıcı ve suyun kalan kısmı birlikte karışıma dahil edilerek belli bir süre yüksek devirde karıştırılmıştır. İstenen slump (çökme) değeri elde edildikten sonra taze beton üzerinde birim ağırlık testi yapılmıştır.

Betonun reolojik özellikleri, ICAR reometre cihazı kullanılarak belirlenmiştir. ICAR reometresinde reolojik özelliklerin belirlenmesinden sonra kaptaki beton miksere dökülerek bir dakika karıştırıldı. Sonrasında, priz başlangıç ve bitiş süresi, hidrasyon sıcaklık ölçümleri ve mekanik testler için numuneler hazırlandı.

Betonun ilk ve son priz sürelerini belirlemek için beton karışımı 4.75 mm'lik bir elekten taze olarak elenmiştir. Elenen harç 15 cm uzunluğundaki plastik küp kalıpların içine yüzeyden 1 cm mesafe kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Elenen harç, sıcaklık değişimi ölçümü için izole bir kaba yerleştirilmiştir. Daha sonra bir thermocouple kullanılarak 45 saat boyunca elenen harcın sıcaklık değişimleri izlenmiştir.

Mekanik testler için her karışımdan 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda 21 adet silindirik numunelere konulmuştur. Betonların bir sarsma tablası yardımı ile kalıba yerleştirilmesi sağlanmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra su tanklarına yerleştirildi. 7, 28 ve 90 gün süreyle suda kürlenен numuneler üzerinde mekanik testler yapılmıştır. Beton üretim aşamasına ait resimler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Beton üretimi aşamaları.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Taze Hal Beton Deneyleri

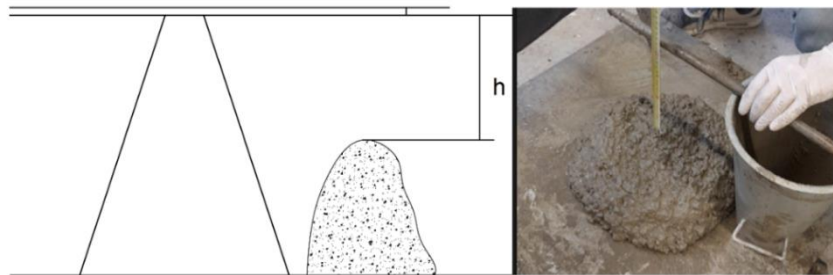
Taze hal beton deneyleri, üretim aşamasından hemen sonra yani beton daha taze haldeyken yapılmaktadır. Taze betonda, ilk olarak birim ağırlık deneyi ve çökme deneyi yapılmıştır. Daha sonra reolojik özelliklerin (plastik viskozite, dinamik ve statik akma gerilmesi) belirlenebilmesi için ICAR reometresi kullanılmıştır. Ayrıca ASTM C403'e [17] göre penetrasyon direnci testi kullanılarak betonun priz süreleri belirlenmesinin yanı sıra, betonun hidratasyon sıcaklık ölçümü de yapılmıştır.

3.1.1 Birim ağırlık deneyi

Darası alınmış belirli bir hacime sahip kap, üretilen taze beton ile doldurulmuş olup, betonun ağırlığı ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen betonun ağırlığı, kabın hacmine bölünerek betonun birim ağırlığı elde edilmiştir. Birim ağırlık deneyinde, kabın yüzeyine kadar dolu ve düz olmasına dikkat edilmiştir.

3.1.2 Çökme (Slump) deneyi

Çökme (slump) deneyi yapılırken TS EN 12350-2 [22] standartına uygun bir şekilde yapılmıştır. Slump deneyinin yapılma şekli: Kesik koni biçimindeki huninin, üçte birlik kısmı üretilen beton ile doldurulmuştur. Daha sonra huninin içerisindeki beton 25 defa şişlenmiştir. Bu işlem iki defa daha tekrar edildikten sonra, huni yavaşça çekilerek betonun yanına konulmuştur. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasından sonra betonun ne kadar çöktüğü metre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.1 : Çökmenin (Slump) ölçülmesi [22].

3.1.3 Reoloji deneyleri

ICAR reometresi ilk olarak Austin'deki Texas Üniversitesi'nde bulunan Uluslararası Agregat Araştırmaları Merkezi'nde (ICAR) ve ardından Germann Instruments tarafından beton karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek için geliştirilmiş olan bir düzeneştir.

Üretilen beton karışımlarının reolojik özellikleri (statik akma gerilmesi, dinamik akma gerilmesi ve plastik viskozitesi) ICAR reometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. ICAR reometresi, 305 mm çapında ve 312 mm yüksekliğinde silindirik bir kap üzerinde tork ölçerli bir motor ve beton karıştırmak için 4 parçadan oluşan 127 mm uzunlukta ve aynı çapta pervanesi olan bir sistemden oluşmaktadır. Beton ile çelik kap arasındaki aderansı artırmak için silindirik haznenin içine yerleştirilmiş plastik nervürler bulunmaktadır.

Öncelikle “stres büyüme testi” uygulanır. Bu testte, kanat "statik akma gerilimi" hesaplanarak yaklaşık 0.025 rps gibi çok düşük bir hızda çalışır. Bu test, statik durumdan akış durumuna geçişi yapmak için gereken kayma gerilmesi değerini belirler. Başka bir deyişle, bu değer, katı halden sıvı hale geçiş yapmak için üstesinden gelinmesi gereken parçacıklar arası çekici kuvvetler arasındaki kuvvetin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Bu testten hemen sonra “akış eğrisi testi” yapılır. Başlangıçta, kanat maksimum 0,50 rpm dönüş hızında döner. Daha sonra dönme hızını 0,50'den 0,05 rps'ye 7 adımda düşürerek “Dinamik akma gerilimi” ve “plastik viskozite” değerleri belirlenir. ICAR reometresine ait deney düzeneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : ICAR reometresi deney düzeneği.

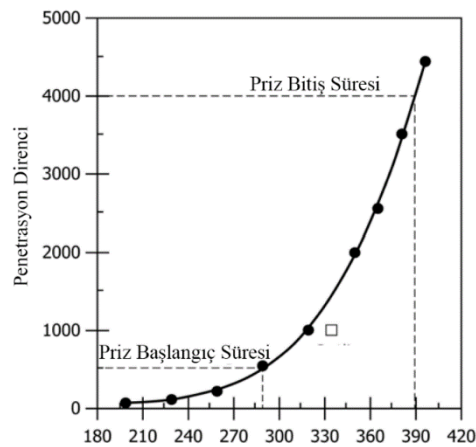
3.1.4 Priz süresi tayini

Priz başlangıç ve bitiş süresi, ASTM C403 [17] standartına uygun olarak penetrasyon direnci yöntemi kullanılarak ölçüldü. Bu test için öncelikle taze haldeki beton 4.75 mm çaplı elekten elenerek betonun harç fazı elde edildi. Bu harç 150×150×150 mm ölçülerinde küp kalıplara yüzeyden 10 mm boşluk kalacak şekilde yerleştirildi. Numunelerden, 22±2 °C de ve sabit neme sahip (%60) bir ortamda penetrometer ile her yarım saatte bir ölçüm alınmıştır. ASTM C403 [18] standartında örnek olarak verilen priz süresi ölçümleri Tablo 3.1 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1 : Penetrasyon Direnci [17].

Penetrasyon Direnci(psi)	Geçen Zaman(t)	Log(PR)	Log(t)
44	200	1,644	2,301
110	230	2,041	2,362
216	260	2,334	2,415
540	290	2,732	2,462
1000	320	3,000	2,505
1000	335	3,000	2,525
2000	350	3,301	2,544
2560	365	3,408	2,562
3520	380	3,547	2,580
4440	395	3,647	2,597

Elde edilen veriler ile penetrasyon direnci-geçen zaman grafiği elde edilmiştir. 3.5 (500 psi) MPa a denk gelen zaman değeri priz başlangıç süresi ve 27.6 MPa (4000 psi) değerine denk gelen zaman değeri ise priz bitiş süresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3 : Penetrasyon Direnci Deneyi [17].

3.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri

Çimento hidratasyonu ekzotermik bir reaksiyon olduğundan, hidratasyon sırasında zamanla sıcaklık değişiklikleri olmaktadır. Sıcaklıktaki zamana bağlı değişiklikler, hidratasyon etkinliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Hidratasyon sırasında olan, gecikme ve hızlanma durumlarının bu şekilde daha iyi değerlendirileceği düşünülmektedir. Bu amaçla 4.75 mm'lik elekten (harç fazı) elenen taze beton, yalıtımlı bir kaba yerleştirilmiştir. Harç fazına yerleştirilmiş bir thermocouple kullanılarak sıcaklık değişimi 45 saat boyunca izlenilmiş ve "Sıcaklık-Geçen Süre" grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.4 : Sıcaklık ölçümü test düzeneği.

3.2 Sertleşmiş Hal Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton karışımların farklı yaşlarda (7, 28 ve 90 gün) basınç dayanımı ve elastisite modülü tayini için, her karışım için 21 adet 100 mm çaplı 200 mm uzunluğunda silindirik numuneler üzerinde mekanik testler yapılmıştır. Her bir yaş için, 3 numune üzerinde eksenel basınç dayanımı ve 4 numune üzerinde, elastisite modülü testleri yapılmıştır. Bu numunelere ait resimler Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğundaki silindirik numuneler.

3.2.1 Basınç dayanımı deneyi

Eksenel basınç deneyi, TS EN 12390-3 [23] standartına uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanımı sonuçlarını elde etmek için, yük kontrollü, 3000 kN kapasiteli tek eksenli basınç test cihazı kullanılmıştır. 100 mm çapında 200 mm uzunluğundaki silindir numune pres makinesine yerleştirildi. Daha sonra yükleme hızı 5 kN/s olarak ayarlandı. Tek eksenli basınç test düzeneği Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Basınç dayanımı test düzeneği.

3.2.2 Elastisite modülü deneyi

ASTM C469 [24] standartına uygun bir şekilde; elastisite modülünü belirlemek için numune silindirik bir çerçeveye yerleştirildi ve numunenin önüne dikey yönde bir doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT) takıldı. LVDT'den elde edilen deformasyon verileri ve buna karşılık gelen yük verileri, bir veri kaydedici aracılığıyla toplanmıştır.



Şekil 3.7 : Mekanik test (Elastisite modülü) düzeneği.



4 DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Hal Beton Deney Sonuçları

4.1.1 Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deney sonuçları üretilen tüm beton karışım grupları için aşağıdaki Tablo 4.1’te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.1 : Birim ağırlık deney sonuçları.

Numune Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)
REF	2403
REF_NS1.25	2450
REF_NS2.50	2469
UK20	2435
UK20_NS1,7	2412
UK20_NS3,4	2444
UK35	2432
UK35_NS1,7	2442
UK35_NS3,4	2414
UK50	2413
UK50_NS1,7	2448
UK50_NS3,4	2447

4.1.2 Çökme (Slump) deneyi

Referans betonu ile hacimce %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül karışımların ile hacimce %1,7 ile %3,4 nano silika içeren bu beton gruplara çökme (slump) deneyleri yapılmıştır. Tüm karışımların kalıplara yerleşme özelliklerinin aynı olması için eşit kıvam değeri hedeflenmiştir (Slump: 20±1 cm). Bunu sağlamak için naftalin esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Aynı kıvamları elde etmek için kullanılan yüksek miktarda akışkanlaştırıcı miktarları tezin ilerleyen bölümlerinde (Tablo 5.2) verilmiştir. Ayrıca tezin 5. bölümünde çökme (slump) ile reolojik özellikler arasındaki ilişki ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

4.1.3 Reoloji deneyleri

Reoloji deneyleri sonucu elde edilen değerler (plastik viskozite, dinamik ve statik akma gerilimi) tüm beton karışım grupları için Tablo 4.2’de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2 : Reolojik özellikler (Plastik viskozite, dinamik ve akma gerilmesi).

Numune Kodu	Plastik Viskozite	Dinamik Akma G.	Statik Akma G.
REF	72,2	407,3	678,8
REF_NS1,7	50,3	224,3	1207,7
REF_NS3,4	20,8	500,6	1260,3
UK20	54,3	106,9	465,7
UK20_NS1,7	49,6	336,9	917,5
UK20_NS3,4	35,7	278,9	1122
UK35	57,9	93	369,7
UK35_NS1,7	54,4	145	605,3
UK35_NS3,4	41,5	217,7	701,6
UK50	46,6	212,7	820
UK50_NS1,7	41,1	299,2	938
UK50_NS3,4	27,5	290,8	1001

4.1.4 Priz süresi tayini

Betonun başlangıç ve bitiş priz sürelerinin belirlenmesi için yapılan penetrasyon direnci testinin sonuçları Tablo 4.3 te verilmiştir.

Tablo 4.3 : Priz başlangıç ve bitiş süreleri (dk).

Numune Kodu	Priz Süresi		Referans betonuna göre fark		Her beton grubunun kendi referansına göre farkı	
	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş
REF	320	405	+0	+0	+0	+0
REF_NS1,7	315	395	-5	-10	-5	-10
REF_NS3,4	305	375	-15	-30	-15	-30
UK20	355	440	+35	+35	+0	+0
UK20_NS1,7	345	415	+25	+10	-10	-25
UK20_NS3,4	330	400	+10	-5	-25	-40
UK35	385	495	+65	+90	+0	+0
UK35_NS1,7	380	480	+60	+75	-5	-15
UK35_NS3,4	350	460	+30	+55	-35	-35
UK50	405	540	+85	+135	+0	+0
UK50_NS1,7	400	520	+80	+115	-5	-20
UK50_NS3,4	400	505	+85	+100	-5	-35

4.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri

Betonun harç fazlarından hazırlanan karışımların sıcaklık (°C)-geçen zaman grafikleri tezin 5. bölümde (Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9) sunulmuştur.

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Basınç dayanımını belirlemek için her üretimden 3 adet 100 mm çaplı 200 mm uzunluğunda silindirik numunelerin basınç dayanımları hesaplanıp ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiştir. Öte yandan elastisite modülünü belirlemek için ise her üretimden 4 adet 100 mm çaplı 200 mm uzunluğunda silindirik numuneler kullanılmıştır. Ayrıca standart sapmalarda hesaplanıp Tablo 4.4 ile Tablo 4.5'e verilmiştir.

4.2.1 Basınç dayanımı deneyi

3 farklı yaş için tüm beton karışım grupları için elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4 : Mekanik (Basınç dayanımı) test sonuçları.

	7 gün	28 gün	90 gün
Numune Kodu	Basınç Dayanımı, Mpa (S. Sapma)		
REF	53,2 (0,23)	60,0 (0,81)	63,4 (2,18)
REF_NS1,7	62,2 (1,09)	71,3 (0,33)	74,8 (0,35)
REF_NS3,4	64,2 (0,57)	71,1 (1,96)	75,7 (0,41)
UK20	42,7 (0,56)	57,1 (0,81)	68,1 (2,28)
UK20_NS1,7	45,2 (0,47)	57,6 (0,50)	67,3 (2,26)
UK20_NS3,4	51,0 (1,05)	62,9 (0,75)	73,5 (0,41)
UK35	33,8 (0,74)	43,6 (0,64)	58,8 (0,95)
UK35_NS1,7	36,7 (0,93)	49,7 (0,48)	61,6 (1,06)
UK35_NS3,4	40,1 (0,38)	52,6 (0,16)	63,3 (1,23)
UK50	21,7 (0,11)	33,8 (0,59)	43,5 (1,53)
UK50_NS1,7	26,1 (0,27)	37,5 (0,67)	47,9 (0,88)
UK50_NS3,4	29,9 (0,36)	42,0 (0,84)	51,1 (0,74)

4.2.2 Elastisite modülü deneyi

3 farklı yaş için tüm beton karışım grupları için elde edilen elastisite modülü değerleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5 : Mekanik (Elastisite modülü) test sonuçları.

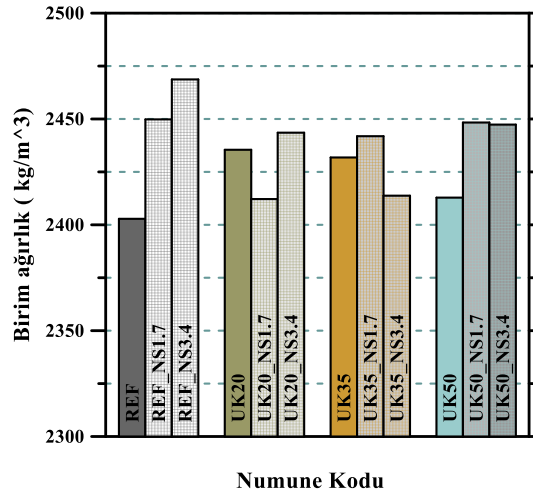
	7 gün	28 gün	90 gün
Numune Kodu	Elastisite modülü, Gpa (S. Sapma)		
REF	37,2 (4,40)	37,2 (1,64)	37,2 (1,64)
REF_NS1,7	38,3 (4,20)	41,6 (1,04)	41,6 (1,04)
REF_NS3,4	40,9 (2,89)	41,0 (1,33)	41,0 (1,33)
UK20	36,9 (1,58)	40,5 (1,33)	40,6 (1,51)
UK20_NS1,7	38,4 (0,52)	39,5 (1,83)	39,5 (1,83)
UK20_NS3,4	39,4 (0,85)	35,2 (3,38)	35,2 (3,38)
UK35	32,4 (1,17)	40,2 (0,68)	40,2 (0,68)
UK35_NS1,7	31,7 (1,91)	39,1 (0,63)	39,1 (0,63)
UK35_NS3,4	31,9 (1,19)	37,3 (2,83)	37,3 (2,83)
UK50	21,3 (1,25)	40,5 (1,79)	40,5 (1,79)
UK50_NS1,7	26,3 (2,43)	39,7 (2,93)	39,6 (2,93)
UK50_NS3,4	29,7 (3,73)	39,5 (0,84)	39,5 (0,84)

5 DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

5.1 Taze Beton Deneyleri

5.1.1 Birim ağırlık deneyi

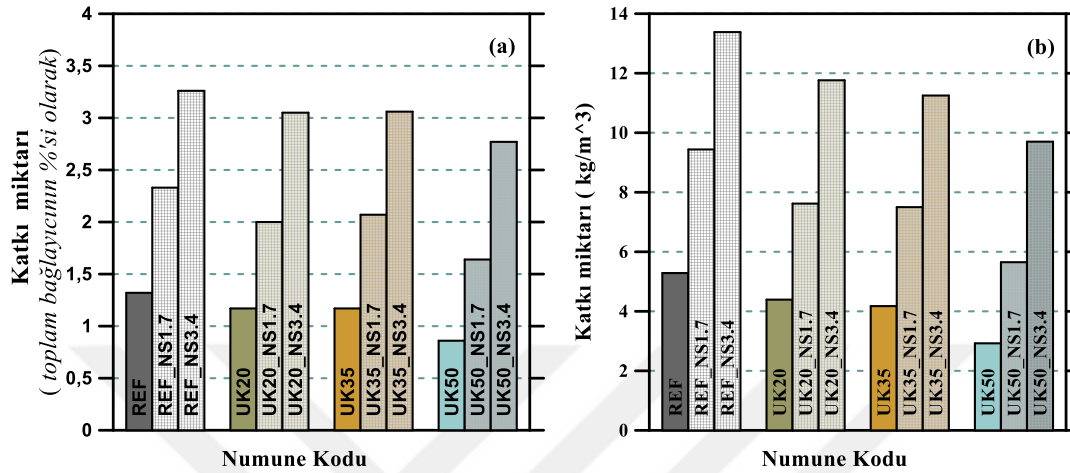
Beton karışımlarının birim ağırlık değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Birim ağırlıklar 2403 ile 2469 kg/m³ arasında değişiklik göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, birim ağırlık, referans betonları için, nano silika ilavesi ile artmıştır. Hacimce %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül karışımların özgül ağırlığı referans betonuna göre biraz daha yüksek çıkmıştır. En yüksek birim ağırlık (2469 kg/m³) değeri REF NS 3,4 beton karışımı ile elde edilmiştir. En düşük birim ağırlık (2403 kg/m³) değeri ile REF beton karışımından elde edilmiştir. Nano silika ultra yüksek özgül yüzey sahip olup, betondaki ara boşlukları doldurma özelliğinden dolayı birim ağırlık değerlerinde artış beklenirken fazla değişim olmamıştır. Bunun nedeni, kıvamı sabit tutmak için kullanılan akışkanlaştırıcının yarattığı hava sürüklemeye etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.1 : Beton karışımlarının birim ağırlıkları.

5.1.2 Çökme (Slump) deneyi

Üretilen karışımlarda 20 ± 1 cm sabit çökme değerinin elde edilebilmesi için kullanılan naftalin esaslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tüketim miktarları Şekil 5.2’de verilmektedir.

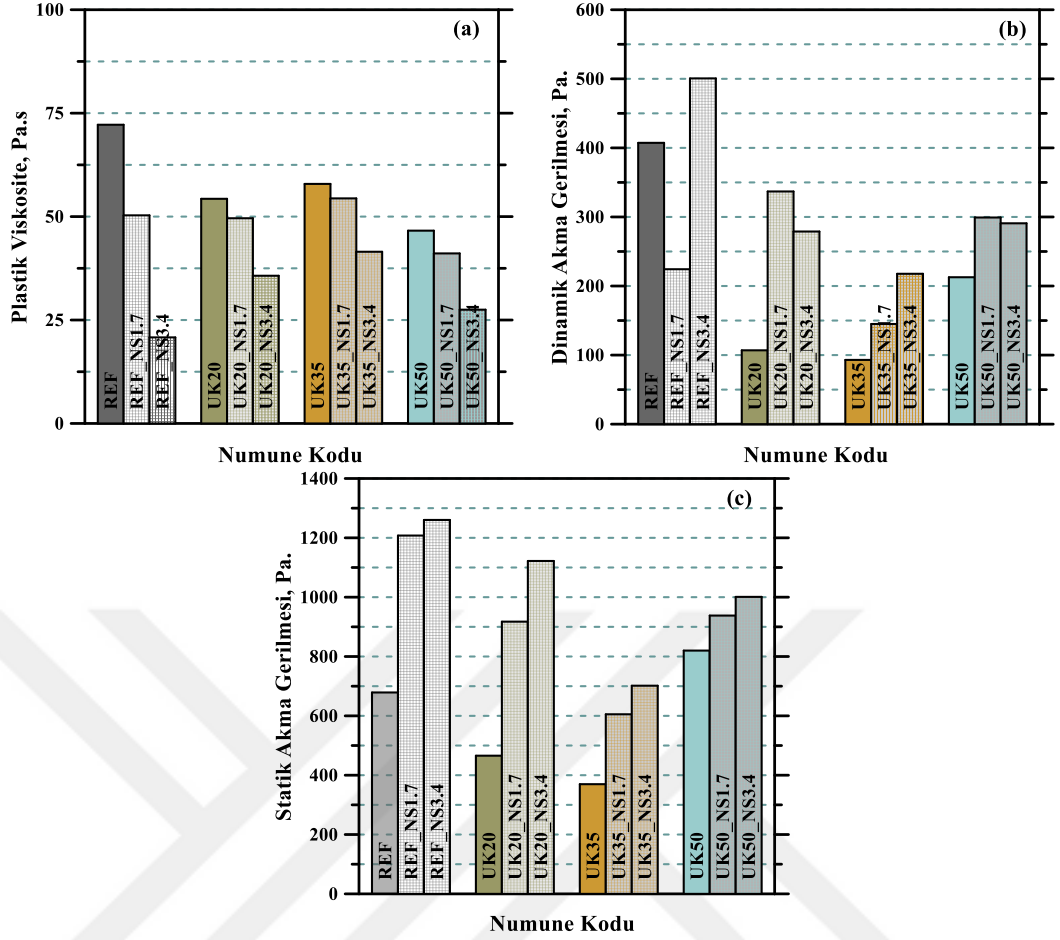


Şekil 5.2 : Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcı tüketim miktarları.

Şekil 5.2 incelendiğinde, her bir beton grubu için nano silika dozajının artması ile birlikte sabit çökme değeri elde etmek için gerekli olan akışkanlaştırıcı miktarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, artan nano silika miktarı ile birlikte artan toplam yüzey alanından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, hacimsel olarak gerçekleştirilen uçucu kül yer değiştirme oranının artması ile birlikte, benzer nano silika içeriklerinde olan karışımların ihtiyaç duyduğu kimyasal katkı dozajı miktarı önemli bir azalma eğilimi göstermektedir. Kullanılan uçucu kül taneciklerinin küresel yapıda olması, literatürde de iyi bilinen “yağlanma etkisi” yaratması neticesinde [25,26] beton karışımlarının işlenebilirliğini kolaylaştırmıştır.

5.1.3 Reoloji deneyleri

Sabit çökme (slump) değerinde üretilen beton karışımlarının ait plastik viskozite, dinamik akma gerilmesi ve statik akma gerilmesi gibi belirlenen reolojik parametreleri Şekil 5.3’te verilmektedir.



Şekil 5.3 : Beton karışımlarına ait plastik viskozite, dinamik akma gerilmesi ve statik akma gerilmesi değerleri.

Beton karışımlarına ait özellikler Şekil 5.3a’da verilen plastik viskozite değerleri bakımından değerlendirildiğinde, farklı oranlarda uçucu kül içeren her beton grubu için, nano silika kullanımı ve artan dozajı ile birlikte plastik viskozitenin de azaldığı görülmüştür. Öte yandan, teorik olarak, nano silika kullanımı ile birlikte artan toplam yüzey alanı neticesinde beton karışımlarının viskozite değerlerinde bir artış öngörülmektedir [27]. Ancak elde edilen deney sonuçları bu beklentinin tersini göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, beton karışımlarının işlenebilirliği, sabit bir çökme değeri (20 ± 1 cm) elde edilebilecek şekilde ayarlanmıştır. Bu durumun sağlanabilmesi için ise bir naftalin esaslı kimyasal akışkanlaştırıcı katkı maddesi, ihtiyaç duyulan dozajlarda kullanılmıştır. Sunulan bu çalışmanın önemli bir amacı, çimentonun, normal ve yüksek oranlarda uçucu kül ile yer değiştirilmesi sonucu oluşacak dayanım kayıplarının veya gecikmelerinin nano silika kullanımı ile ne derece tolere edilebileceğinin belirlenmesidir. Bu nedenle, mekanik testlerden elde edilecek sonuçların birbirleri ile sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi bakımından, üretilen

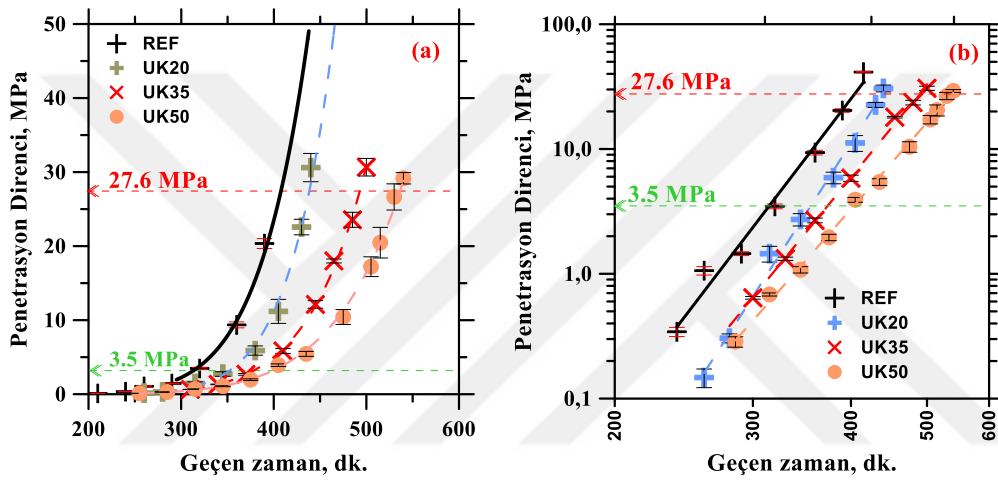
betonun kalıplara benzer işlenebilirlik değerlerinde yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Sonuç olarak, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3a birlikte değerlendirildiğinde, nano silika miktarının artması ile birlikte, sabit bir çökme değerinde üretilen betonların plastik viskozite değerlerinin artan akışkanlaştırıcı dozajına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Çalışmada, nano silika kullanımı ile birlikte artan akışkanlaştırıcı talebinin (ki bu dozaj REF-NS3,4 karışımı için maksimum seviyede olup, toplam bağlayıcı ağırlığının %3,3 oranına karşılık gelmektedir) betonların sertleşme süreci üzerinde pratik açıdan önemli bir etki yaratmadığı görülmüştür. Bu durum, betonların sertleşme sürecinin takip edildiği “penetration direnci” deney sonuçları ile birlikte ilerleyen paragraflarda ayrıca ele alınacaktır. Ayrıca, yüksek oranda akışkanlaştırıcı kullanımı, betonların ayrışmasına da neden olmamıştır. Nano silika’nın çok yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, betonun ayrışma direncini efektif şekilde yükselten bir etki yaratmaktadır [4]. Plastik viskozite, bir sıvının şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla, yukarıda açıklanan gerekçelere bağlı olarak, sözkonusu karışımlarda nano silika kullanımı ile birlikte betonların plastik viskozite değerlerinin herhangi bir segregasyon göstermeden düşmesi, bu karışımları pompalanabilirlik özellikleri bakımından da avantajlı kılacaktır.

Şekil 5.3b ve 3c’de ise sözkonusu beton karışımlarına ait dinamik ve statik akma gerilmesi değerleri gösterilmektedir. “Dinamik akma gerilmesi”, akış halindeki sıvının (taze beton), zamanla azalan kayma gerilmesi etkisi ile durağan hale geçişi aşamasında elde edilen “şekil değiştirme hızı vs. kayma gerilmesi” ilişkisinden Bingham Modeline bağlı olarak elde edilen “eşik kayma gerilmesi” değerini ifade etmektedir. “Statik akma gerilmesi” ise, durağan (akış halinde olmayan) haldeki taze betonun, akış haline geçebilmesi için uygulanması gereken en yüksek gerilme değerini ifade etmektedir. Diğer bir deyişle, statik akma gerilmesi değeri, beton içerisinde partiküller arası bağlanmanın gücünü ifade eden bir büyüklük olarak da kabul edilebilir. Bu büyüklük ile kalıba yerleştirilmiş betonun oluşturacağı kalıp basıncı arasında önemli bir ilişki vardır [28]. Bu durum taze betonun tiksotropisi ile ilgili olup, yüksek statik kayma gerilmesi değerine sahip bir beton karışımının oluşturacağı kalıp basıncı daha düşük olacaktır. Şekil 5.3b’de verilen “dinamik akma gerilmesi” değerleri incelendiğinde genel eğilimin, karışımda kullanılan NS miktarının artması ile akma gerilmesinin artması şeklinde olduğu görülmektedir. Uçucu kül iler yer değiştirilen (UK20, UK35 ve UK50) ve değiştirilmeyen (REF) karışımlara NS ilave edilmesi, genel olarak

betonların dinamik akma gerilmelerinin artışı ile sonuçlanmıştır. Bu genel eğilimin sadece hacimce %1,7 NS içeren REF (uçucu külsüz) betonu için bozulduğu, ancak bu durumun bu beton karışımı için kullanılan NS (%1,7) ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi oranları (toplam bağlayıcının ağırlıkça % 2.3) ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Aynı beton serisinde NS oranının %3,4 değerine çıkması, kimyasal katkı miktarında az bir artışa neden olsa da (bağlayıcının ağırlıkça %3.3 ü), dinamik akma gerilmesinin REF betonun üzerinde bir değere çıkmasını sağlamıştır. Şekil 5.3c’de ise beton karışımlarının “statik akma gerilmesi” değerleri görülebilir. Bu değerler bakımından da genel eğilim, herhangi bir istisna göstermeden, karışımda kullanılan NS miktarının artması ile akma gerilmesinin artması şeklindedir. Şekil 3b ve 3c’de özellikle göze çarpan bir diğer önemli nokta ise, akma gerilmesi değerlerinin hacimce %35 uçucu kül oranına kadar düşüş eğilimi gösterirken, %50 UK oranında bu eğilimin tersine dönmesi, yani dinamik ve statik akma gerilmelerinin tekrar artış eğilimine geçmesidir. Bu durumun, NS içermeyen REF, UK20 ve UK35 karışımlar için ihtiyaç duyulan akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarının (*toplam bağlayıcı ağırlığının yüzdesi olarak sırasıyla 1.3%, 1.2% ve 1.2%*), UK50 karışımı için %0.8 oranına düşmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Diğer bir deyişle, çimentonun %50’sinin uçucu kül ile yer değiştirilmesinin beton işlenebilirliğine sağladığı ekstra katkı, diğer beton karışımlarına kıyasla akışkanlaştırıcı tüketimini önemli derecede azaltmıştır. Bu durum katkı etkinliğinin azalmasına ve dolayısıyla statik ve dinamik akma gerilmelerinin yükselmesine neden olmuştur. Benzer durum, NS içeren betonlar arasında da geçerlidir. Şöyle ki; NS içeren REF, UK20 ve UK35 karışımları ele alındığında, aynı NS içeriklerindeki karışımlar benzer akışkanlaştırıcı oranlarına sahip iken, UK50 karışımlarında ihtiyaç duyulan katkı miktarı önemli derecede azalmıştır. Örneğin, 1,7% NS içeren REF, UK20 ve UK35 karışımlarına giren akışkanlaştırıcı oranları sırası ile %2.3, %2.0 ve %2.1 iken, bu oran UK50 karışımında %1.6 değerine düşmektedir. Öte yandan, sabit bir çökme değerinde üretilen REF, UK20 ve UK35 karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcı oranı yaklaşık olarak aynı olmakla birlikte (1.2% ~ 1.3%), artan UK oranı ile birlikte dinamik ve statik akma gerilmelerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, sabit bir çökme ve akışkanlaştırıcı dozajında, artan uçucu kül dozajının betonların hem statik, hem de dinamik akma gerilmesini düşürdüğünü göstermektedir.

5.1.4 Priz süresi tayini

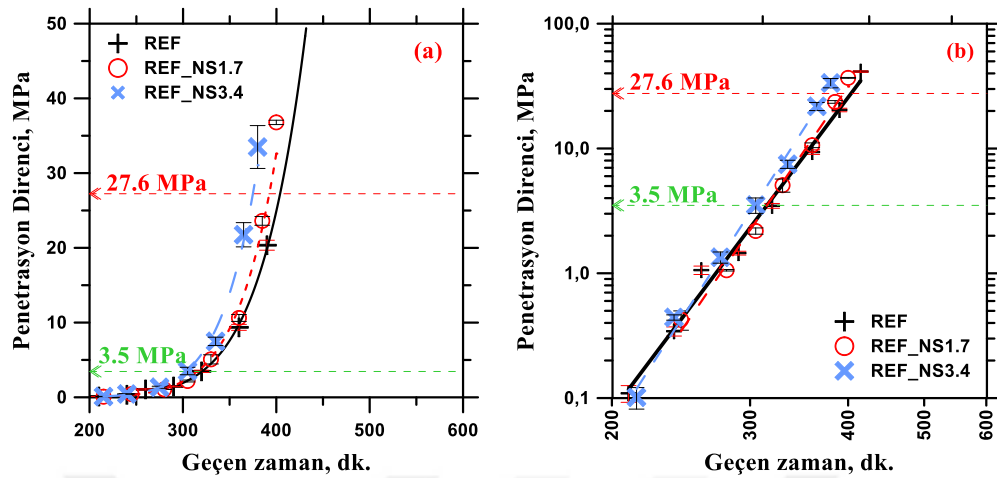
Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, uçucu kül kullanımının referans beton karışımına göre beklendiği gibi başlangıç ve bitiş priz sürelerini geciktirdiği açıkça görülmektedir. Bu gecikme, uçucu kül miktarı artıkça sistematik bir şekilde artmıştır. %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül karışımların referans karışımına göre priz başlangıç süresindeki gecikme sırasıyla 35, 65 ve 85 dakika olarak elde edilmiştir. Priz bitiş süresindeki gecikme ise sırasıyla 35, 90 ve 135 dakika olarak elde edilmiştir (Tablo 4.3). Bu sonuçlar literatürde mevcut olan çalışmalarla uyumludur [29].



Şekil 5.4 : Uçucu külün geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (MPa) ilişkisine etkisi. a- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.)

Referans betonuna nano-silika eklendiğinde Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, hidratasyonu hızlandırarak başlangıç ve bitiş priz süresini kısalttığı görülmektedir. Buna göre, nano silika ilavesi tüm karışımların ilk priz süresini 5 ila 35 dakika hızlandırmış ve son priz süresini 10 ila 40 dakika arasında azaltmıştır. Şekil 5.2'de verilen akışkanlaştırıcı miktarları dikkate alındığında, aynı çökme değerine ulaşmak için gereken akışkanlaştırıcı miktarı, artan nano silika dozu ile artmaktadır. Genel olarak akışkanlaştırıcı miktarı arttıkça priz süresinin arttığı bilinmektedir [30]. Artan akışkanlaştırıcı miktarına rağmen, ilk ve son priz sürelerinde görülen bu azalmanın, nano silikanın yüksek reaktivitesine ve yüksek özgül yüzey alanına bağlı olduğu düşünülmüştür. Nano silika partikülleri çekirdeklenme etkisi yaratması ve puzolanik bir malzeme olması nedeniyle özellikle hidratasyonun erken aşamalarında hidratasyon

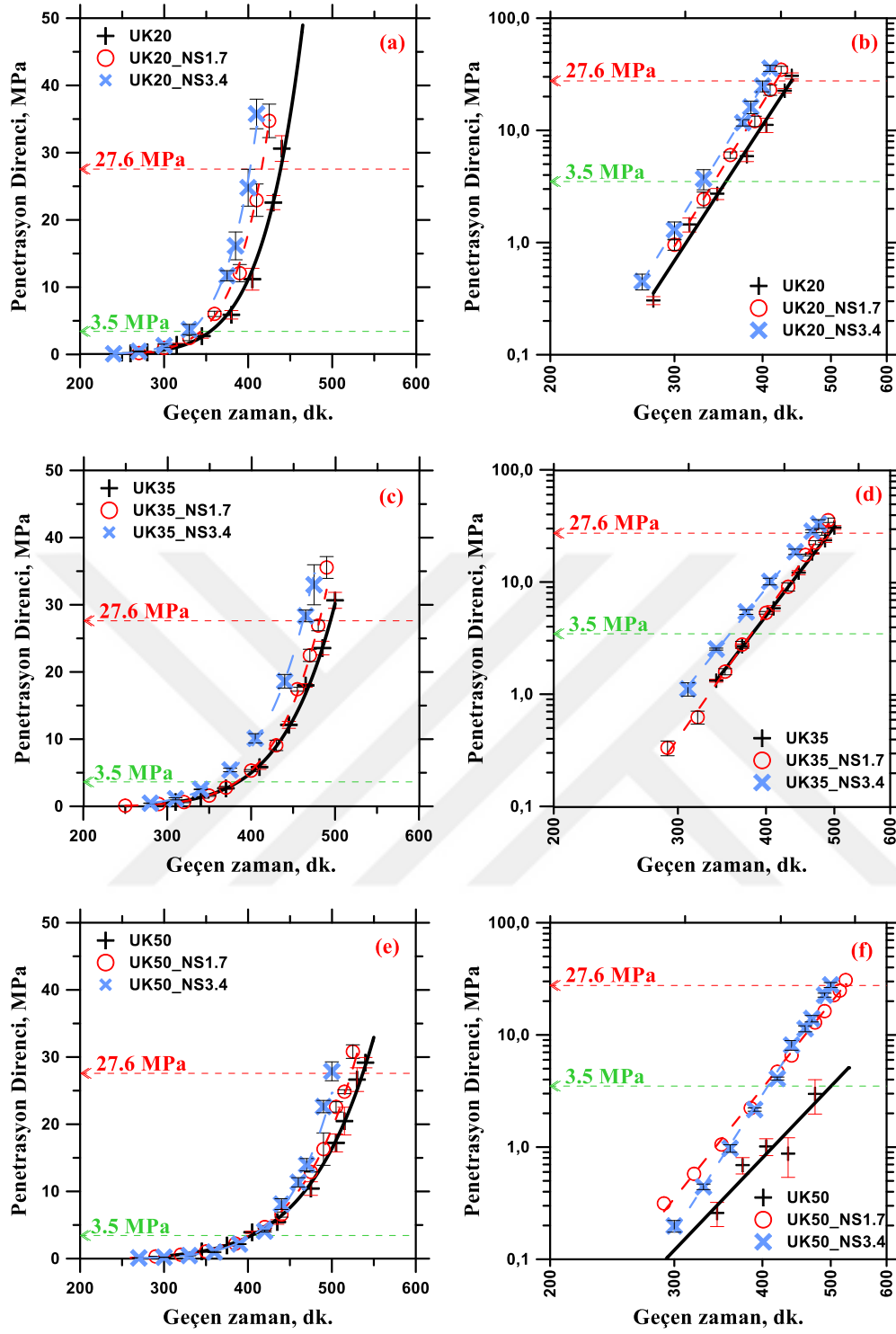
sürecini hızlandırır [31]. Bu anlamda akışkanlaştırıcı miktarındaki artış nedeniyle priz süresinde beklenen gecikmenin nano silika tarafından tolere edildiği söylenebilir.



Şekil 5.5 : Nano silikanın geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (MPa) ilişkisine etkisi. a- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.)

Hacimce %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip uçucu kül beton grubuna, nano-silika katkıları toplam çimento esaslı malzemenin hacimce %1,7 ve %3,4'ü olarak karışıma eklendiğinde Şekil 5.6'da, nano silikanın, uçucu kül içeren beton üzerinde hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ancak bu hızlandırıcı etkinin uçucu külün neden olduğu geciktirici etkiyi tolere edebilecek düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir. Daha önceki bölümde akışkanlaştırıcı miktarının reolojik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğundan bahsedilmişti. Betonun sertleşme özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, akışkanlaştırıcının etkisinin taze özelliklere kıyasla sertleşme özellikleri üzerinde daha az etkisi olduğu söylenebilir.

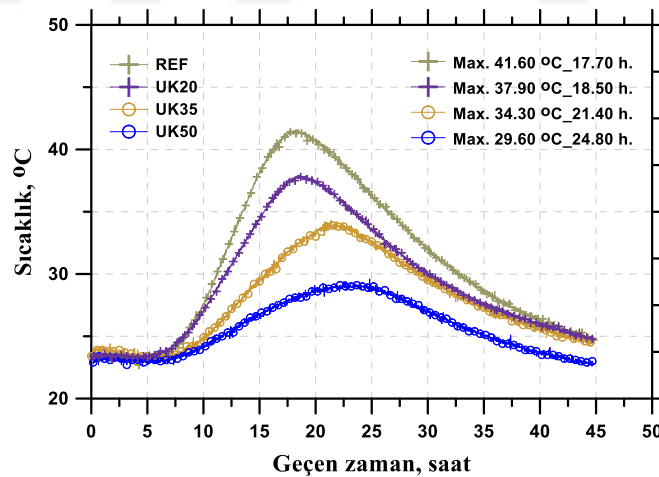
Özellikle UK35 ve UK50 karışımları için bazı eğrilerin (UK35 ile UK35_NS1,7 ve UK50_NS1,7 ile UK50_NS3,4) üst üste çakıştıkları görülmektedir. Bu çakışmaların kullanılan katkı maddesi miktarı ile ilgili olabileceği düşünülmektedir. Fakat bu etkinin taze özelliklere kıyasla, sertleşme sürecinin daha az etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5.6 : Uçucu kül ve nano silikanın geçen süre (dk.) ile penetrasyon direnci (MPa) ilişkisine etkisi. a,c,e- Doğrusal-doğrusal ölçek (solda) ve b,d,f- log-log ölçeği (sağda). (Hata çubukları ± 1 standart sapmayı gösterir.)

5.1.5 Hidratasyon sıcaklık ölçümleri

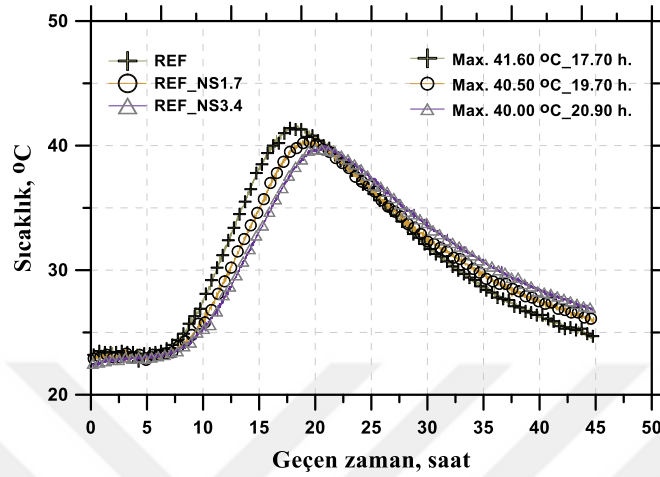
Şekil 5.7’de hacimce %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül karışımların sıcaklık ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlara göre, uçucu kül ilavesi ulaşılan pik sıcaklıkların azalmasına neden olmuştur. REF, UK20, UK35 ve UK50 karışımlarının, pik sıcaklıkları sırasıyla; 41.6, 37.9, 34.3, ve 29.6 °C’olarak elde edilmiştir. En az sıcaklık azalışı %20 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül beton karışımında elde edilmiştir. En fazla sıcaklık azalışı %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül beton karışımında elde edilmiştir. Ayrıca pike ulaşma süresi sırasıyla; 17.7, 18.5, 21.4, ve 24.8 saattir. Pike ulaşma süresi de giderek artmıştır. Uçucu kül, daha önce de bahsediliği gibi rölatif olarak büyük tane boyutuna sahiptir. Uçucu kül puzolanik etkisini göstermesi için ortamda serbest kireç ve su bulunmalıdır. Bu durumda, çimento hidratasyonu sonucu oluşan serbest kirecin bağlanması için belirli bir süreye ihtiyaç vardır. Dolayısıyla uçucu kül parçacıkları erken yaşlarda bağlayıcı etkisinden çok filler etkisi göstermekte olup, buna bağlı olarak artan uçucu ikame oranı ile beraber hidrotasyon sıcaklığı düşmektedir [29]. Bu durum, uçucu külün betonun priz süresini geciktirici etkisini net bir şekilde desteklemektedir.



Şekil 5.7 : Uçucu külün geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.

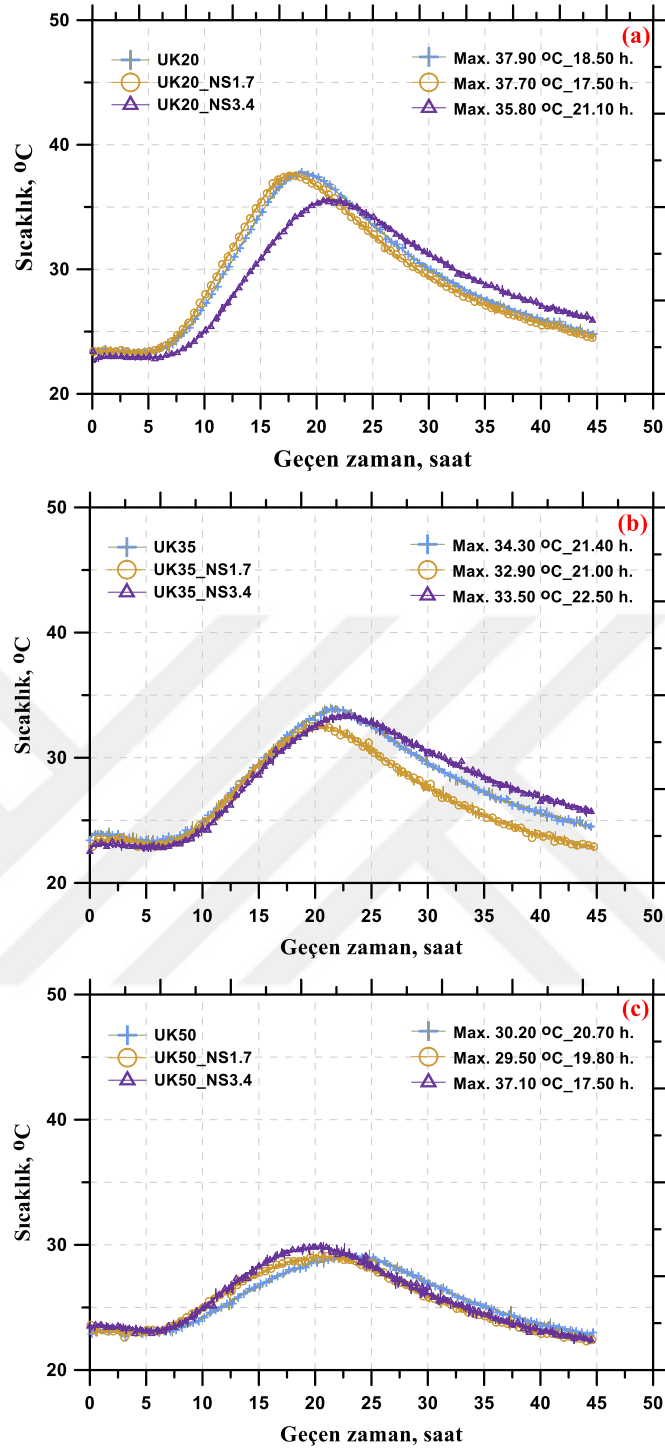
REF, REF_NS1,7 ve REF_NS3,4’e ait sıcaklık ölçümleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Nano silika ilavesinin, referans beton karışımı için pik sıcaklığı biraz azalttığı ve pike ulaşmak için gereken süreyi arttırdığı (%1,7 nano silika için 2 saat, %3,4 nano silika için 3.20 saat) gözlemlenmiştir. Ancak literatürde mevcut olan çalışmalar, nano silikanın ilavesiyle ulaşılan pik sıcaklıkta bir artış olduğunu göstermektedir. Ayrıca, birçok çalışma, nano silikanın eklenmesiyle en yüksek sıcaklığa ulaşmak için gereken

sürenin de azaldığını göstermektedir [5]. Bu durumun, bu çalışmada kullanılan yüksek miktarda akışkanlaştırıcı miktarından kaynaklandığını düşünülmektedir. Benzer şekilde, akışkanlaştırıcı parçacıkları çimento parçacıklarını birbirlerinden ayırdıkları için, bu durum, hidrasyon sürecini de bir nebze olumsuz etkilemiş olabilir [30].



Şekil 5.8 : Nano silikanın geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.

Şekil 5.9.a'da uçucu küllü beton karışımlarına ait sıcaklık ölçüm sonuçları verilmiştir. Hacimce %20 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül karışımların sonuçlar referans betonu karışımına göre azalan akışkanlaştırıcı miktarına bağlı olarak, akışkanlaştırıcının etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. UK20 ile UK20 NS1,7 karışımının sıcaklık-geçen zaman eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. UK20 NS 3,4 ise bünyesinde bulunan ağırlıkça yaklaşık %3 akışkanlaştırıcı etkisi ile bu iki karışımdan ayrılarak sağa doğru bir eğilim göstermiştir. Şekil 5.9 b ve şekil 5.9 c 'deki UK35 ve UK50 ye ait sonuçlar değerlendirildiğine, artan uçucu kül miktarı ile azalan akışkanlaştırıcı (Şekil:5.2) miktarına bağlı olarak nano silika, etkisini daha belirgin bir şekilde göstermiştir. Yani, nano silika ilaveli karışımların pik sıcaklığa ulaşma süreleri kısalmış ve pik sıcaklıkları da artmıştır. UK50 karışımı için nano silika ilavesi ile hem daha yüksek bir pik değerine ulaşmış hem de pike ulaştığı süre UK50 karışımına göre daha erken gerçekleşmiştir. Bu anlamda, akışkanlaştırıcı miktarının sıcaklık-geçen zaman grafiklerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılabilir. Sıcaklık ölçümü sonuçlarının penetration resistance test sonucu elde edilen sonuçlar ile benzer olduğu söylenebilir.

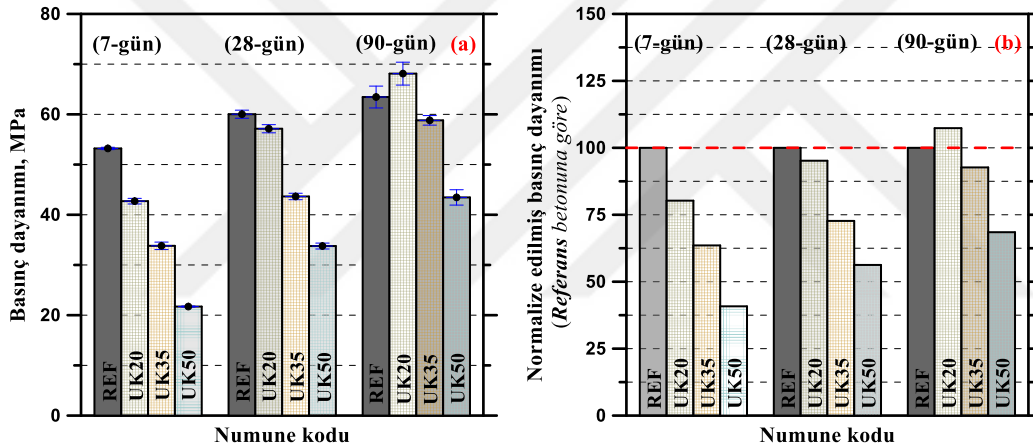


Şekil 5.9 : Nano silika ve uçucu külün geçen süre (saat) ve sıcaklık ilişkisine etkisi.

5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

5.2.1 Basınç dayanımı deneyi

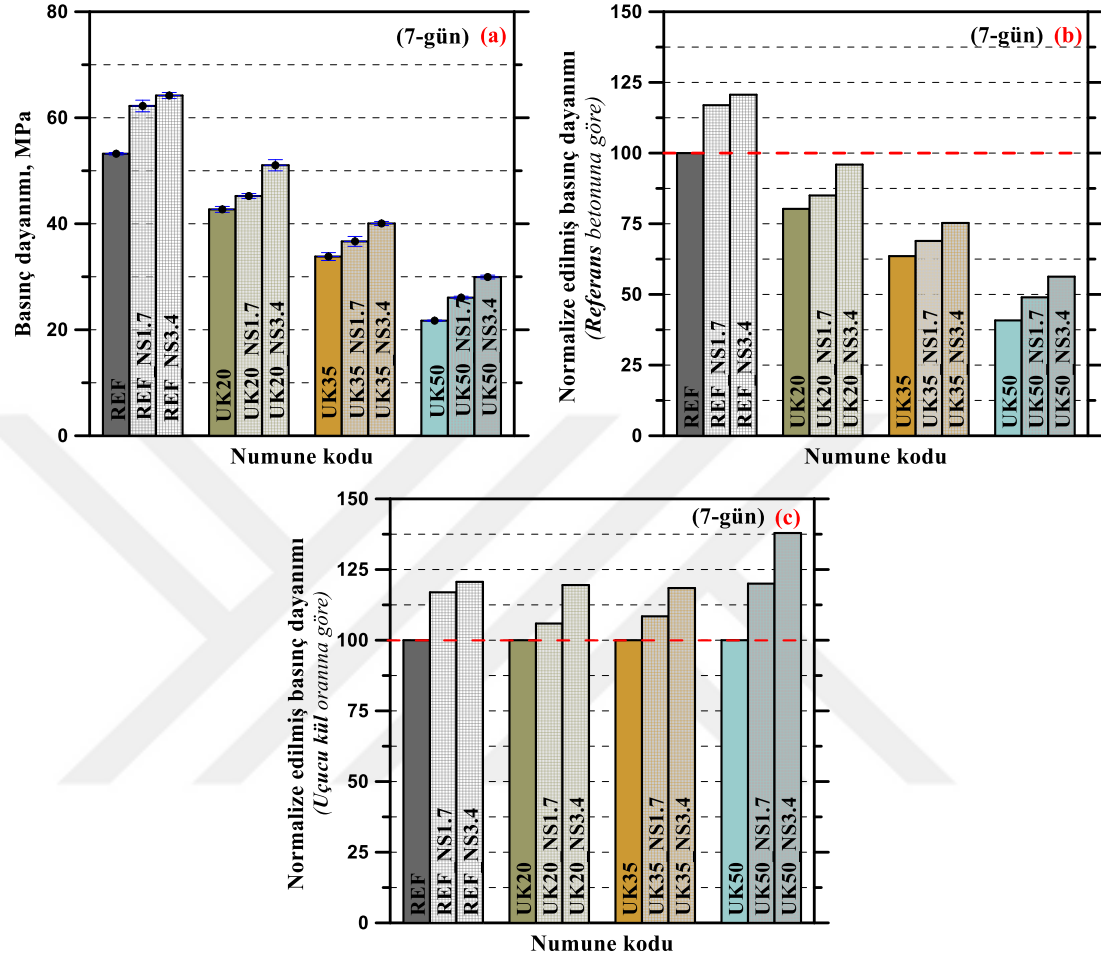
Şekil 5.10'da referans (uçucu külsüz) ve uçucu küllü karışımlara ait basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Hacimce %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu küllü beton grubu sonuçları, referans betonuna göre kıyas edildiğinde, basınç dayanımında sırasıyla 7 gün için %19,7, %36,5, %59,2 ve 28 gün için %4,8, %27,3, %43,7 oranlarında mukavemet düşüşü gözlemlenmiştir. 90 gün için ise %35, %50 çimento ikame oranına sahip uçucu kül beton grubu için sırasıyla %7,3, %31,5 oranlarında mukavemet düşüşü gözlemlenmiştir. Ancak % 20 çimento ikame oranına sahip uçucu kül betonu için 90 günde %7.3 mukavemet artışı olmuştur. Yani, maksimum basınç dayanımı gelişimi 90 günde UK20 karışımı için elde edilmiştir.



Şekil 5.10 : Uçucu külün betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (MPa) b- Normalize edilmiş basınç dayanımı).

Çimento su ile reaksiyona girdiğinde C-S-H ürünlerini ve kalsiyum hidroksit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşturmaktadır. Uçucu kül, suyun varlığında bu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jellerini oluşturur. Çimento ortamdaki su ile hidrate olup C-S-H jeli ve CH kristalleri oluştuğunda, uçucu kül, su ve CH kristalleri ile tepkimeye girerek ekstra C-S-H jeli oluşturur. Bu nedenle uçucu kül, çimentodan daha sonra bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Dolayısıyla betonlarda uçucu kül kullanılması priz süresini arttırmaktadır. Genel olarak uçucu küllü karışımların erken yaş mukavemetleri düşük olmaktadır. Ancak ilerleyen zamanlarda, uçucu külün puzolanik etkisinden dolayı uçucu küllü betonların mukavemetleri de zamanla iyileşmiştir. Uçucu külün puzolanik özelliği, daha sonraki yaşlarda mukavemet gelişimine önemli katkıda bulunur [30].

Şekil 5.11’de tüm karışımların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her bir beton grubu için nano silikanın dozajının artması ile birlikte erken yaşta basınç dayanımı değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

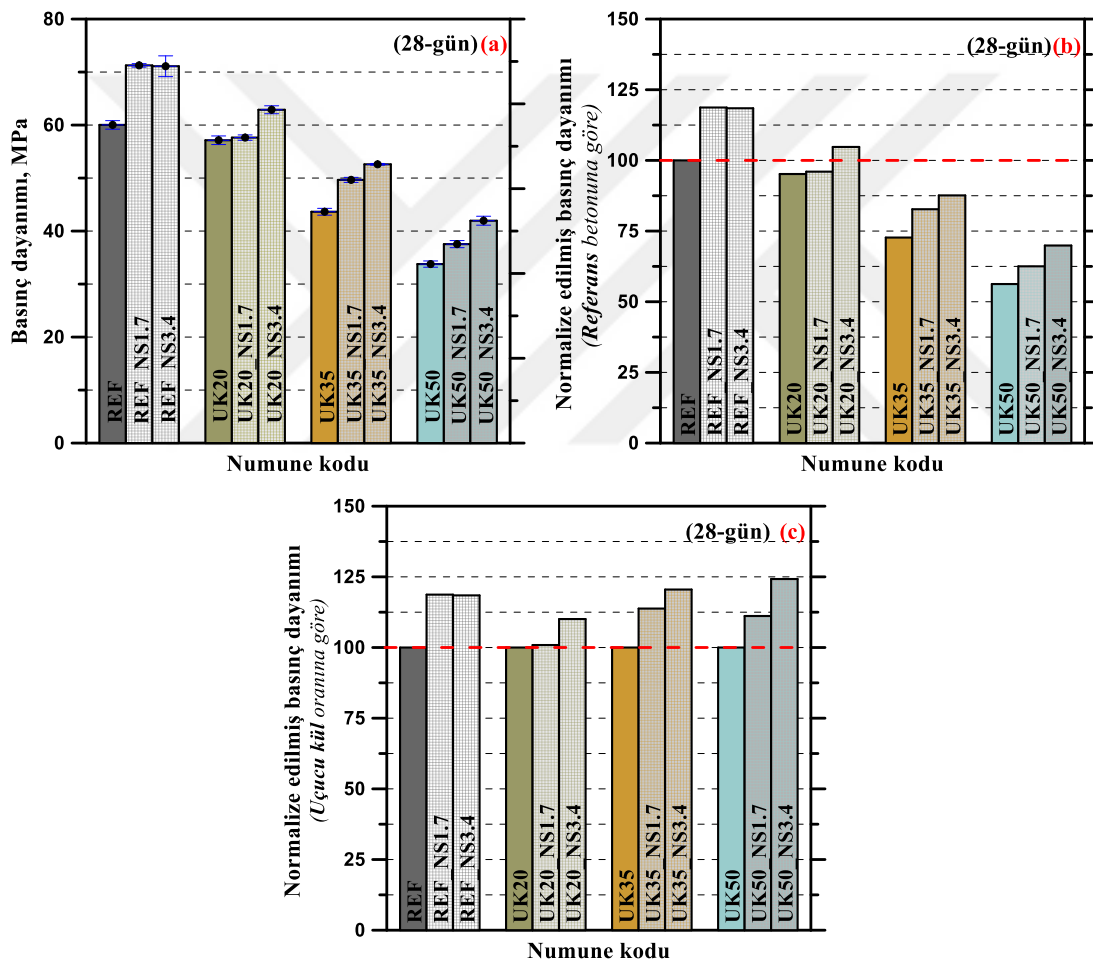


Şekil 5.11 : 7 günde Nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (MPa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).

Uçucu kül içermeyen referans betonu ile uçucu kül (%20, %35, %50) içeren karışımlarına hacimce %1,7 NS eklenmesi durumunda herbirinin kendi referans grubuna göre 7 gün için mukavemet artış oranları sırasıyla %16,9, %5,9, %8,4, %20 olarak elde edilmiştir. %3,4 NS eklenmesi durumunda ise 7 gün için mukavemet artış oranları ise sırasıyla %20,6, %19,5, %18,5, %37,9 olarak elde edilmiştir. Nano silikanın en çok mukavemet arttırdığı karışım UK50 olmuştur. Öte yandan, nano silikanın en az dayanım artışı sağladığı karışım ise UK20 karışımı olmuştur. Uçucu kül dozajının artmasıyla erken yaş basınç dayanımı kademeli olarak azalmıştır, ancak eklenen nano silika, bu azalmayı bir nebze karşılayarak basınç dayanımlarını

arttırmıştır. Tez kapsamında kullanılan nano silika dozajları uçucu kül kullanımı sonucu oluşan dayanım kayıplarını 7 günde tamamen tolere edememiştir.

Şekil 5.12’de tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekil 5.12 incelendiğinde ise, hacimce %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) karışımlar için, nano silikanın dozajının artması ile birlikte 7 günde olduğu gibi 28 günde de basınç dayanımı artmıştır. Ancak REF_NS1,7 ile REF_NS3,4 karışımları arasında belirgin bir fark oluşmağı gözlemlenmiştir. %20 çimento ikame oranına sahip karışım için %3,4 nano silika basınç dayanımında önemli bir katkı yapmasına rağmen, %1,7 nano silika dozajı önemli bir değişim yapmamıştır.

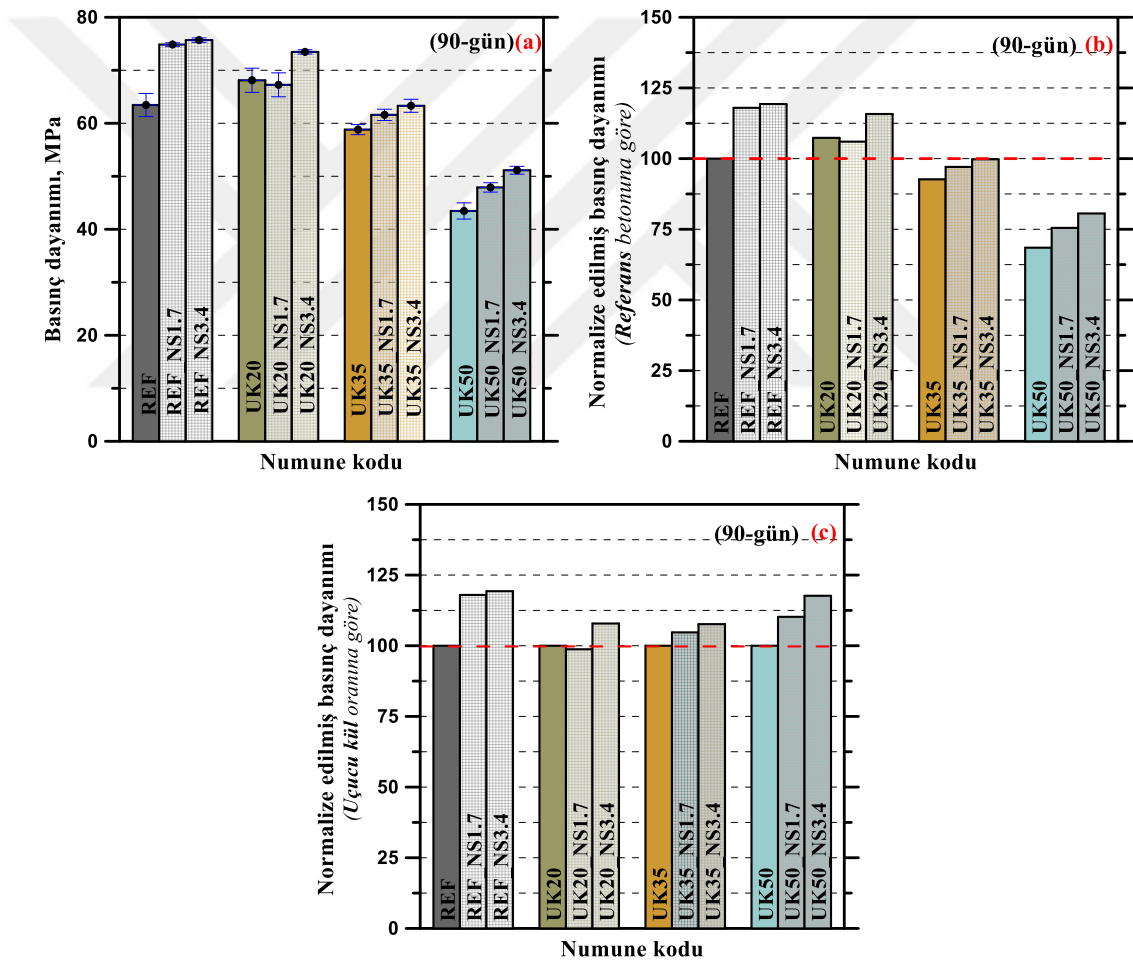


Şekil 5.12 : 28 günde nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (MPa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).

28 gün için uçucu kül içermeyen referans betonu ile uçucu kül (%20, %35 ve %50) içeren karışımlarına hacimce %1,7 nano silika eklenmesi durumunda 28 gün için mukavemet artış oranları sırasıyla %18,7, %0,9, %13,8, %11,1 olarak elde edilmiştir.

%3,4 nano silika eklenmesi durumunda; ise 28.gün için mukavemet artış oranları (referansa göre) sırasıyla %18,4, %10,1, %20,5, %24,2 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 5.13'te tüm karışımların 90 günlük basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, hacimce %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) karışımlar için nano silika dozajının artması ile birlikte 28 günde olduğu gibi 90 günde de basınç dayanımında iyileşme görülmüştür. Ancak referans betonu için 28 günde olduğu gibi 90 günde de %1,7 nano silika dozajı ile %3,4 nano silika dozajı arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. %20 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül beton için %3,4 nano silika basınç dayanımında önemli bir katkı yapmasına rağmen %1,7 nano silika dozajı önemli bir değişim yapmamıştır.



Şekil 5.13 : 90 günde nano silikanın betonun basınç dayanımına etkisi (a- Basınç dayanımı (MPa) b,c- Normalize edilmiş basınç dayanımı).

90 gün için uçucu kül içermeyen referans betonu ile uçucu kül (%20, %35 ve %50) içeren karışımlarına hacimce %1,7 nano silika eklenmesi durumunda 90 gün için mukavemet değişim oranları sırasıyla %18, %-1,3, %4,7, %10,2 olarak tespit

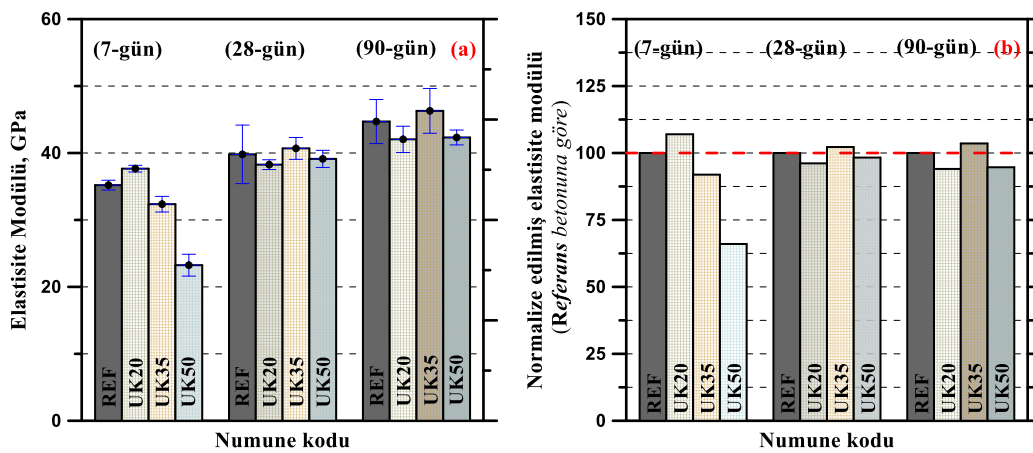
edilmiştir. %3,4 nano silika eklenmesi durumunda; ise 90.gün için mukavemet değişim oranları sırasıyla %19,3, %7,9, %7,6, %7,7 olacak şekilde elde edilmiştir.

Giriş bölümünde bahsedildiği gibi uçucu kül içeren beton karışımları, erken yaşta uçucu kül içermeyen karışımlara göre daha düşük mukavemet değerleri vermiştir. Bu duruma pozolanik etkinin ilerleyen yaşlarda gelişmesi durumunun sebep olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül, erken yaşlarda pozolanik etkisini ortaya koyamadığı için dayanımlarda azalmalara neden olmasına rağmen, 90 günde yapılan deneylerde uçucu külün pozolanik etkisi ile dayanımları iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Nano silika ise daha reaktif olduğu için kalsiyum hidroksit ile arasındaki erken hidratasyon reaksiyonunun yanı sıra, çekirdeklenme etkisi ve mikro boşlukları doldurma etkisi sayesinde hem referans betonunda hem de uçucu kül içeren beton karışımlarda erken yaş dayanımında iyileştirmeler gözlemlendi.

Nano silika ve uçucu kül pozolanik malzemelerdir ve pozolanik reaksiyon sonucunda beton dayanımı üzerinde olumlu etki etmektedir. Bu durum Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'ye bakıldığında açıkça görülmektedir. Nano silika uçucu kül ile birlikte kullanıldığında her ikisi de CH tüketmek ister, erken yaşlarda ortamdaki serbest CH reaktif bir malzeme olması nedeni ile nano silika tarafından tüketilir. Ancak ilerleyen yaşlarda yeterli CH bulunamaması nedeniyle pozolanik etki azalma gösterebilir.

5.2.2 Elastisite modülü deneyi

Hacimce %0, %20, %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) karışımların farklı günlerdeki elastisite modülü sonuçları Şekil 5.14'te verilmektedir.

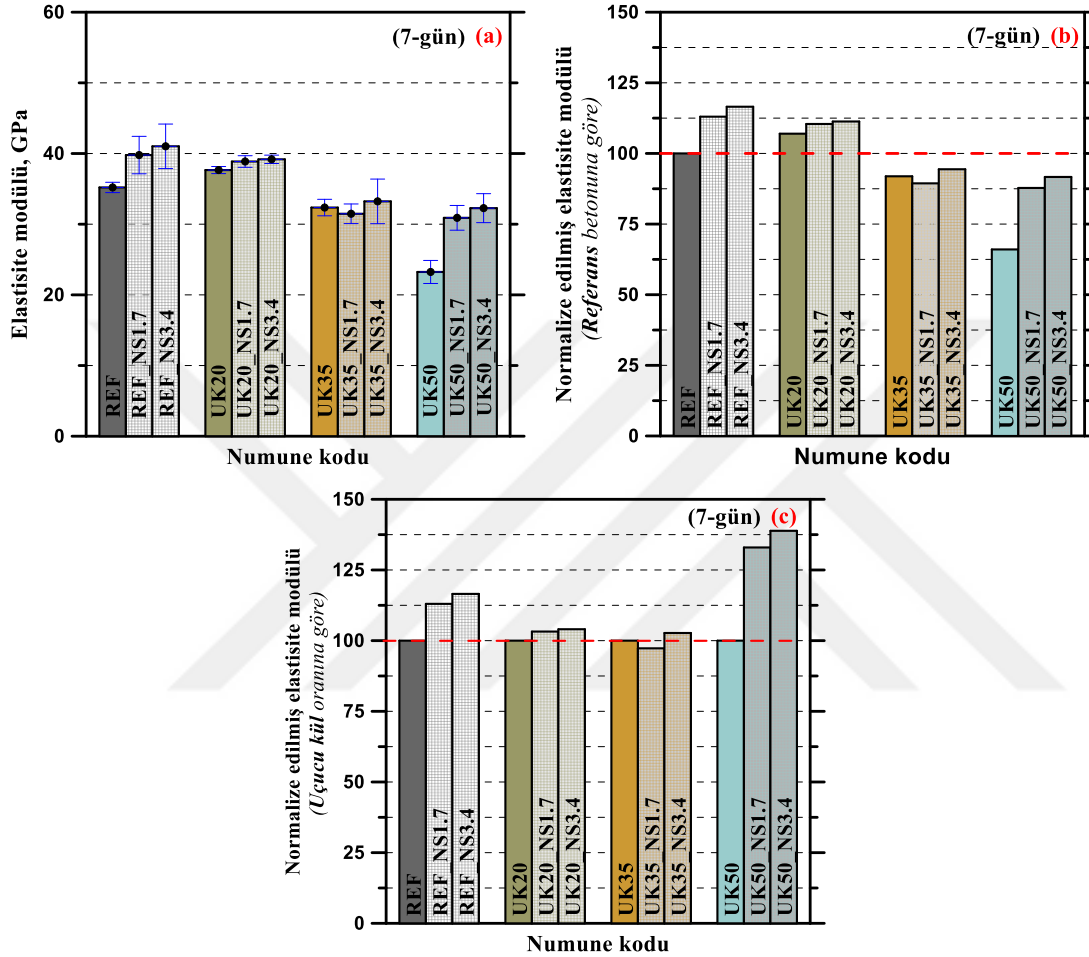


Şekil 5.14 : Uçucu külün betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (GPa) b- Normalize edilmiş elastisite modülü).

Şekil 5.14 incelendiğinde; 7 gün için; UK20 karışımı hariç, artan kül oranına bağlı olarak elastisite modülü azalmıştır. 7 gün sonunda hacimce %35, %50 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) karışımlar için; sırasıyla %8,1 ve %34 oranında elastisite modülü değerlerinde azalma olmuştur. Ancak %20 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu küllü betonda %7 artış olmuştur. Bu durum, uçucu külün filler etkisine bağlanmıştır. Diğer bir deyişle, hacimce %20 uçucu kül yer değiştirme oranında hala çimento dozajı fazla olduğu için matris fazı daha iyi güçlenebilmiş ve bunun yanında henüz hidrate olamayan uçucu kül tanelerinin de bu güçlü matris içerisinde birer rijit “mikro agrega” gibi davranması sonucunda betonun erken yaştaki dayanım değerine olmasa da, rijitliğine ek bir katkı sağladığı düşünülmüştür. Fakat artan yer değiştirme oranlarında bu etki tersine dönerek elastisite modülünde azalma ile sonuçlanmıştır. Artan uçucu kül yer değiştirme oranı ile birlikte çimento miktarı azaldığından, erken yaşta (7 gün), henüz daha zayıf olan (hacimce %20 yer değiştirme oranına sahip betona göre) matris içerisindeki yüksek orandaki anhidr uçucu kül tanelerinin elastiklik modülüne katkı sağlayamadı görülmüştür. Bununla birlikte, 28 ve 90 gün için ise uçucu kül içeren beton karışımları için, referans betona göre elastik modülde kayda değer bir değişim görülmemiştir. 7 günden 90 güne doğru, mukavemet artışına da bağlı olarak elastisite modülü artmıştır. Her bir yaş grubu içerisinde artan kül miktarına bağlı olarak dayanımlar net bir düşüş eğilimi göstermekle birlikte (Şekil 5.10), elastiklik modülleri arasındaki fark anlamsız bir düzeye ulaşmıştır. Bunun nedeni ise, zaman içerisinde gelişen çimento ve uçucu kül hidratasyonuna bağlı olarak, hidrate olamayan ve az önce rijit “mikro agregalar” olarak tanımlanan anhidr uçucu kül taneleri ile hidrate matris arasında daha iyi bir ara yüzey gelişmesi, aynı zamanda rijit doğal agregalar (Kırmataş 1 ve 2 agregaları) ile matris arasındaki arayüzey özelliklerinin de iyileşmesine bağlanabilir. Bu durum betonun elastiklik modülü üzerinde çarpıcı bir etki oluşturken, UK20 karışımı hariç, nihai dayanımlar üzerinde benzer etkiyi oluşturamamıştır. UK20 karışımında uçucu kül miktarının daha düşük olmasına bağlı olarak daha kuvvetli bir matris oluşabilmiş ve aynı zamanda uçucu kül daha efektif olarak tüketilerek daha yoğun bir C-S-H jelinin oluşumuna katkı sağlayabilmiştir.

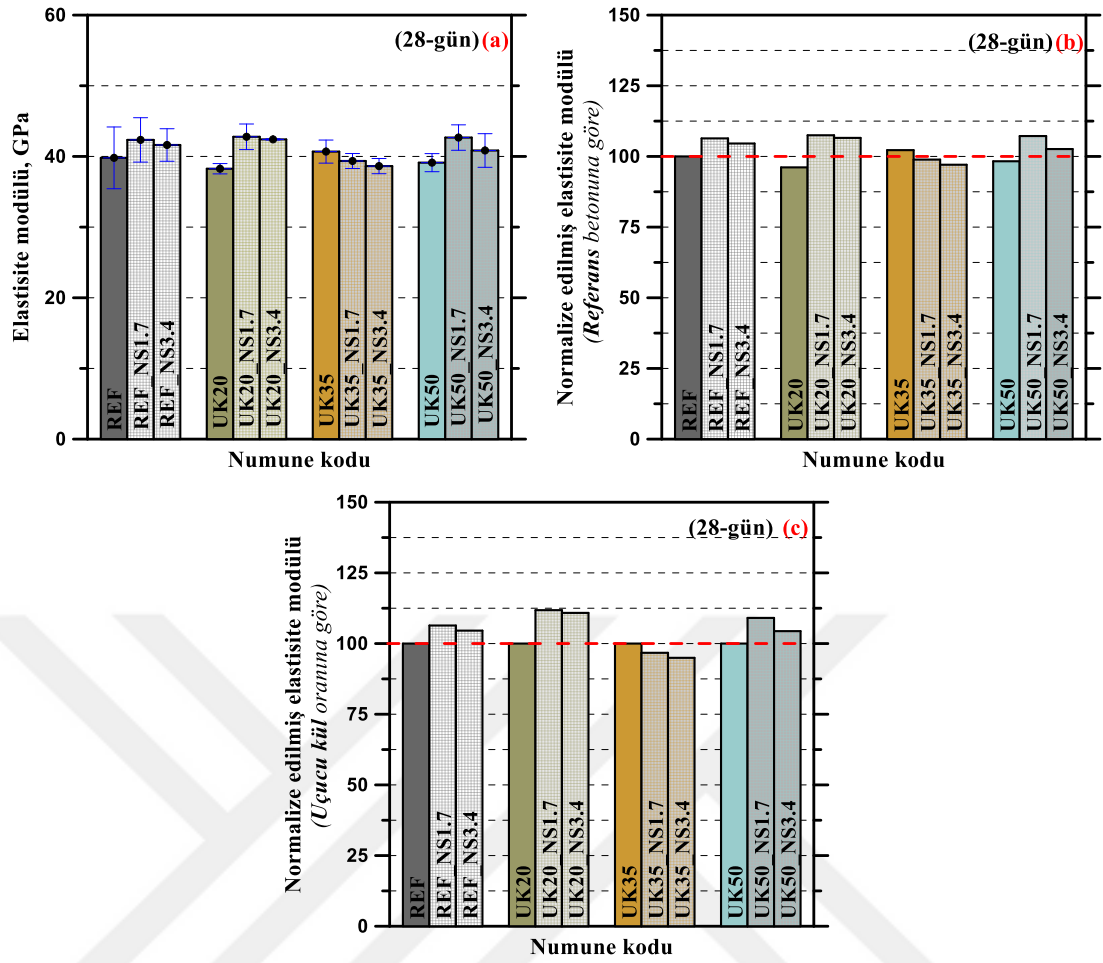
Şekil 5.15’te tüm karışımların 7 günlük elastisite modülü sonuçları verilmiştir. Şekil 5.15 incelendiğinde, REF ile UK50 karışımları için, hacimce %1,7 ve %3,4 nano silika ilave edildiğinde erken yaşta elastisite modülünde belirgin bir iyileşme görülmüştür.

Ancak %20 ve %35 çimento ikame oranına sahip (nano-silika içermeyen) uçucu kül beton grubu için önemli bir değişiklik olmamıştır. 7 günlük elastisite modülüne göre, artan UK miktarına bağlı olarak elastisite modülünde belirgin bir düşüş görülmüştür. Bu düşüşler nanosilika ilavesi ile bir nebze iyileşme gösterse de bu azalmayı tamamen telafi edememiştir.



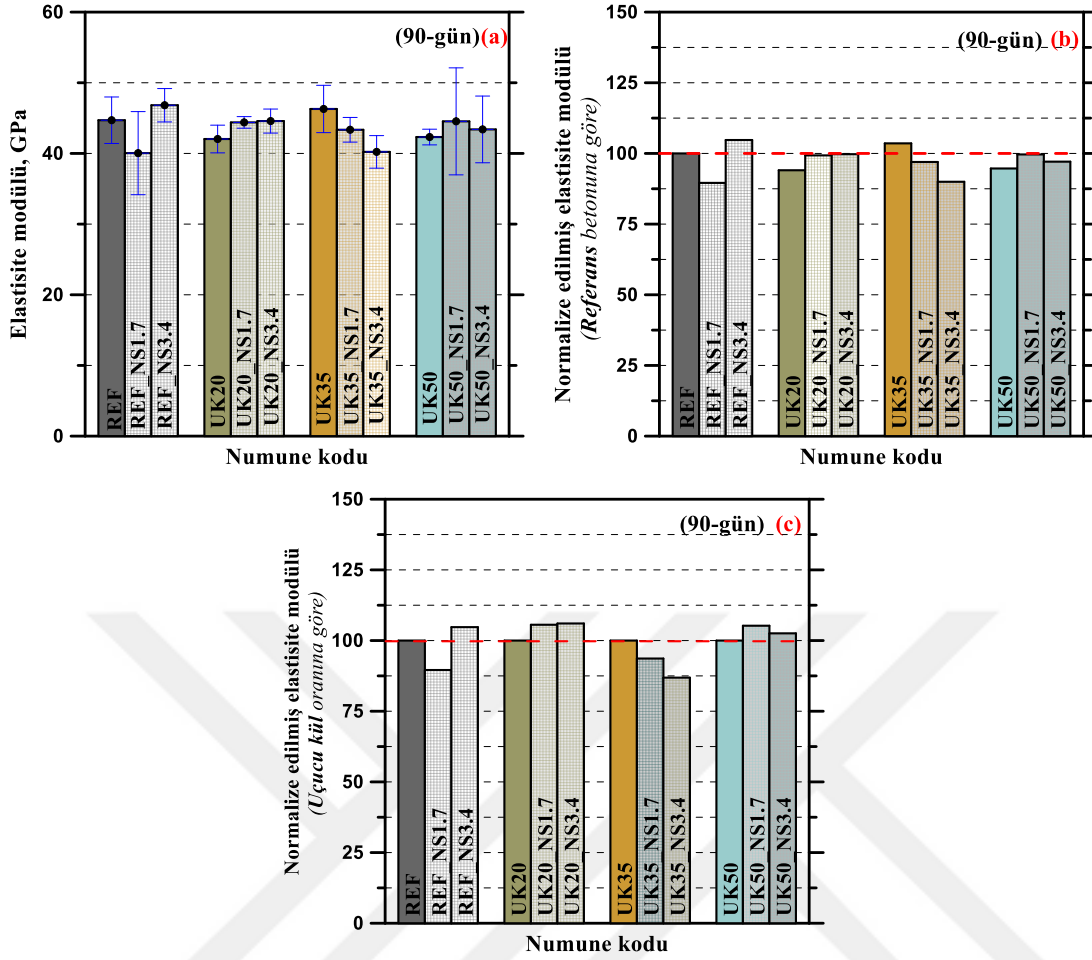
Şekil 5.15 : 7 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (GPa) b,c- Normalize edilmiş elastisite modülü).

Şekil 5.16’da tüm karışımlar için 28 günlük elastisite modülü test sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.16’ ya göre, karışımların elastisite modülleri yaklaşık 38-42 GPa arasında bulunmuştur. Değerler arasında ciddi bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir. 7 gün sonuçlarında uçucu külün elastisite modülü üzerindeki olumsuz etkisinin 28 günde ortadan kalktığı söylenebilir. 28 günlük sonuçlara göre nano silika ilavesinin ise genel olarak elastisite modülleri üzerinde küçük de olsa artışa neden olduğu söylenebilir (UK35 hariç).



Şekil 5.16 : 28 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (GPa) b,c- Normalize edilmiş elastisite modülü).

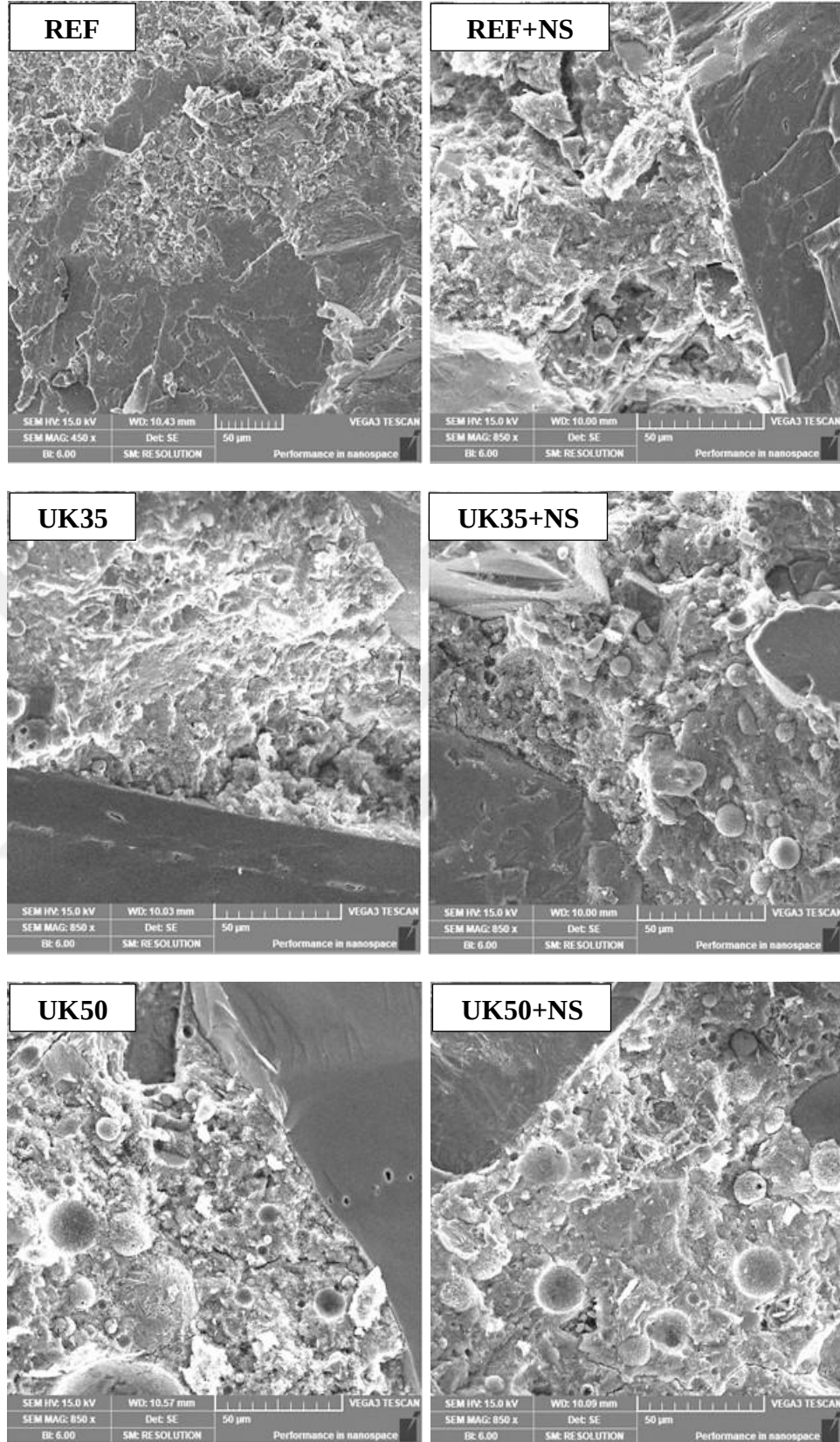
Şekil 5.17’de tüm karışımlar için 90 günlük elastisite modülü test sonuçları gösterilmiştir. 28 günlük sonuçlara benzer şekilde, 90 günlük elastisite sonuçlarında da uçucu kül ve/veya nano silikanın ciddi bir etkisi gözlemlenememiştir. REF_ NS3,4 karışımı 90 günde 46.82 GPa ile en yüksek elastisite modülü değerine sahipken, en düşük değer 39,10 GPa ile UK35_NS3,4 karışımından elde edilmiştir.



Şekil 5.17 : 90 günde nano silikanın betonun elastisite modülüne etkisi (a- Elastisite modülü (GPa) b,c- Normalize edilmiş elastisite modülü).

Genel olarak 28 günden 90 güne belirgin bir dayanım artışı gözlemlenmiştir. Bu artışın benzeri elastisite modülü için 7 günden 28 güne geçişte gözlemlenmiş, fakat 28 ile 90 gün elastisite modülü sonuçları pek farklılık göstermemiştir. Bu durumun nedenleri daha önce tartışılmıştır.

Betonlardan alınan bazı elektron mikroskop görüntüleri (SEM) Şekil 5.18’de verilmektedir. Bu resimler 90 gün hidratasyon süresi sonunda çekilmiş resimler olup, hidrate olamayan uçucu kül tanelerinin miktarı dikkat çekici düzeydedir.



Şekil 5.18 : Beton örneklerine ait bazı SEM görüntüleri (NS: %3,4).



6. GENEL SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, nano-silika ve/veya uçucu külün betonun reolojisi, sıcaklık değişimi ve priz süresi üzerindeki etkilerinin yanı sıra beton karışımların farklı yaşlardaki basınç dayanımı, ve elastisite modülü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Aynı kıvamı (Slump:20±1 cm) elde edebilmek için gerekli akışkanlaştırıcı miktarının, nano silika miktarının artması ile arttığı gözlemlenirken aksine, artan uçucu kül miktarı ile azaldığı gözlemlenmiştir.
2. Nano silika ilavesi ile karışımların plastik viskozite değerleri azalmıştır ancak bu davranışın nano silika içeren betonun yüksek akışkanlaştırıcı içeriğinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca, beklendiği gibi, uçucu kül ikamesi de referans betona göre plastik viskoziteyi azaltmıştır. Genel anlamda, katkı miktarının, reolojik özellikler üzerinde çok etkin bir rolü olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
3. Nano-silika, hem referans hem de uçucu kül içeren betonlar için başlangıç ve bitiş priz sürelerini azaltmıştır. Uçucu kül kullanımı ise priz başlangıç ve bitiş sürelerini geciktirmiştir. Bu gecikme, nano-silika ilavesi ile iyileşse de nano-silika ilavesi ile tamamen tolere edilememiştir.
4. Çimentonun uçucu kül ile ikamesi ile ulaşılan pik sıcaklık değerleri azalış göstermiştir. Pike ulaşma süresi ise artan kül miktarı ile artış göstermiştir. Nano silikanın pik sıcaklığı ve pik sıcaklığa ulaşılan süreyi kısaltması beklenirken bazı karışımlar için bu beklentinin tam tersi sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumun kullanılan katkı miktarları ile ilgili olduğu düşünülmüştür.
5. Uçucu kül kullanımı ile özellikle erken yaşlarda (7 yaş) beklendiği gibi basınç dayanımları azaltmıştır. İlerleyen yaşlarda ise referans betonu ile arasındaki fark giderek azalmıştır. Hatta UK20 karışımı 90 günde REF betonuna göre daha yüksek basınç dayanımı değeri verdiği gözlemlenmiştir. Nano silika ise, erken yaşlarda tüm karışımlar için basınç dayanımını arttırmıştır. Nano silikanın bu etkisi, ilerleyen yaşlarda azalmıştır.

6. 7 gün sonunda UK35 ve UK50 için elastik modülünde bir azalma olmasına rağmen %20 için beton karışımı artış gözlemlenmiştir. Yüksek dozda uçucu kül içeren betonun düşük mukavemeti, betonun daha düşük elastik modülü ile sonuçlanmıştır. Referans betonu ile UK50 beton grubu için hacimce nano silika ilave edildiğinde erken yaşta elastisite modülünde iyileştirme yapmasına rağmen UK20 ile UK35 beton grubu için önemli bir değişiklik yapmamıştır.

7. 28 ve 90 gün için elde edilen elastisite modülü sonuçlarına göre ise, uçucu külün ve/veya nano silikanın elastisite modülü üzerinde ciddi bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. REF, UK20 ile UK50 karışımlarına nano silika ilave edildiğinde 28 gün ile 90 günde elastisite modülü küçük bir artış gösterse de UK35 karışımının elastisite modülünde ise azalma gözlemlenmiştir. Genel anlamda, 28 günden 90 güne gerçekleşen mukavemet artışı, elastisite modülü sonuçlarına yansımamıştır. Bir başka deyişle, 28 ve 90 gün için elde edilen elastisite modülü değerleri çok benzerdir.

KAYNAKLAR

- [1] Shi, C., Jiménez, A. F. ve Palomo, A., (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement, *Cement and Concrete Research* **41** 750–63
- [2] Abhilash, P. P., Nayak, D. K., Sangoju, B., Kumar, R. ve Kumar, V., (2021). Effect of nano-silica in concrete; a review, *Construction and Building Materials* **278**
- [3] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Al-Goody, A. ve Ipek, S., (2015). Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* **95** 29–44
- [4] Durgun, M. Y. ve Atahan, H. N., (2017). Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂, *Construction and Building Materials* **142** 431–43
- [5] Zhang, M. H. ve Islam, J., (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag, *Construction and Building Materials* **29** 573–80
- [6] Shiho, K., Pengkun, H., David, J. C. ve Surendra, P. S., (2013). Modification of cement-based materials with nanoparticles _ Elsevier Enhanced Reader, *Materials Science and Engineering* **36** 8–15
- [7] Durgun, M. Y. ve Atahan, H. N., (2018). Strength, elastic and microstructural properties of SCCs' with colloidal nano silica addition, *Construction and Building Materials* **158** 295–307
- [8] Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L. ve Panas, I., (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement, *Chemical Physics Letters* **392** 242–8
- [9] Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J. ve Ou, J., (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles, *Composites Part B: Engineering* **35** 185–9
- [10] Hou, P. K., Kawashima, S., Wang, K. J., Corr, D. J., Qian, J. S. ve Shah, S. P., (2013) Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar, *Cement and Concrete Composites* **35** 12–22
- [11] Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T. ve Tian, Y., (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica, *Construction and Building Materials* **36** 838–44
- [12] Supit, S. W. M., Shaikh, F. U. A. ve Sarker, P. K., (2013). Effect of nano silica and ultrafine fly ash on compressive strength of high volume fly ash mortar *Applied, Mechanics and Materials* vol 368–370 pp 1061–5

- [13] **Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E. ve Sebastiani, M.,** (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes, *Construction and Building Materials* **35** 666–75
- [14] **Chen, W., Shaikh, F., Li, Z., Ran, W. ve Hao, H.,** (2021). Dynamic compressive properties of high volume fly ash (HVFA) concrete with nano silica *Construction and Building Materials* **301**
- [15] **Gündoğdu, D.,** (2010). *Kollid Silikanın Uçucu Küllü Harçların Mekanik Özelliklerine Etkisi, (Yüksek lisans tezi).* (İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.)
- [16] **Qing Y., Zenan, Z., Deyu, K. ve Rongshen, C.,** (2007). Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Construction and Building Materials* **21** 539–45
- [17] **ASTM C403,** (2017). Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance 1
- [18] **EN 197-1,** (2011). Composition, specifications and conformity criteria for common cements *European Standards Publication*
- [19] **ASTM C618-15,** (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [20] **TS 802,** (2016). Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları *Türk Standartı*
- [21] **Devi, G,** (2009). Synthesis and Application of Nano and Micro-silica particles to enhance the Mechanical Properties of Cement Concrete, Treatment of Refinery Waste Water Using Environmental View project ZnO Nano Photo Catalysts View project
- [22] **TS EN 12350-2,** (2013). Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara *standart*
- [23] **TS EN 12390-3,** (2019). Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. *Türk Standartı*
- [24] **ASTM C469-01,** (2014). Standard Test Method For Static Modulus Of Elasticity Of Concrete In Compression
- [25] **Laskar, A. I. ve Talukdar, S.,** (2008). Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending, *Construction and Building Materials* **22** 2345–54
- [26] **Ferraris, C. F., Obla, K. H. ve Hill, R.,** (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research* 245–55
- [27] **Xu, J., Corr, D. J. ve Shah, S. P.,** (2015). Nanomechanical investigation of the effects of nanoSiO₂ on C-S-H gel/cement grain interfaces, *Cement and Concrete Composites* **61** 7–17
- [28] **Kap, T. ve Arslan, M.,** (2013). Kendiliğinden yerleşen betonlarda donatı oranının kalıp yanal basıncı üzerine etkileri

- [29] **Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. ve Wu, X.,** (2002). Studies on blended cement with a large amount of fly ash, *Cement and Concrete Research* **32** 1153–9
- [30] **Rasheed, A., Usman, M., Farooq, H. ve Hanif, A.,** (2018). Effect of Superplasticizer Dosages on Fresh State Properties and Early-Age Strength of Concrete *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol 431 (Institute of Physics Publishing)
- [31] **Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D. ve Repette, W. L.,** (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials* **23** 2487–91





EKLER

EK A : Mekanik test sonuçları



Tablo A.1 : Mekanik test (Basınç deneyi) sonuçları.

		7.gün			28. gün			90 gün		
Numune Kodu		Basınç Dayanımı (Mpa),Ortalama basınç Dayanımı (Mpa), standart sapma (Mpa)								
REF	1	53,4	53,3	0,2	59,4	60,06	0,8	63,7	63,5	2,2
	2	53,4			59,9			65,5		
	3	53,0			60,9			61,2		
REF_NS1,7	1	62,4	62,3	1,1	70,9	71,30	0,3	74,9	74,4	1,1
	2	61,1			71,4			73,2		
	3	63,3			71,5			75,2		
REF_NS3,4	1	64,8	64,2	0,6	72,0	71,48	1,4	76,2	75,7	0,4
	2	63,7			72,5			75,5		
	3	64,2			69,9			75,5		
UK20	1	42,1	42,7	0,6	56,7	57,16	0,8	70,4	68,1	2,3
	2	43,1			58,1			65,8		
	3	43,0			56,7			68,1		
UK20_NS1,7	1	45,8	45,3	0,5	58,2	57,66	0,5	64,8	67,3	2,2
	2	44,8			57,2			68,9		
	3	45,2			57,5			68,2		
UK20_NS3,4	1	51,7	51,1	1,1	63,4	61,22	3,7	73,3	73,5	0,4
	2	51,7			57,0			74,0		
	3	49,9			63,3			73,3		
UK35	1	33,5	33,8	0,8	43,0	43,66	0,6	59,0	58,8	1,0
	2	34,7			44,3			59,7		
	3	33,3			43,6			57,8		
UK35_NS1,7	1	35,9	36,7	0,9	49,9	49,83	0,4	62,6	61,6	1,1
	2	36,4			50,2			60,5		
	3	37,7			49,4			61,8		
UK35_NS3,4	1	40,2	40,1	0,4	52,7	52,62	0,2	60,8	62,9	1,9
	2	40,4			52,8			64,5		
	3	39,6			52,5			63,5		
UK50	1	21,7	21,7	0,1	33,7	33,77	0,6	41,9	43,5	1,6
	2	21,8			33,2			43,6		
	3	21,6			34,4			45,0		
UK50_NS1,7	1	25,9	26,1	0,3	38,1	37,57	0,7	51,8	51,1	0,8
	2	26,4			36,8			51,3		
	3	26,0			37,8			50,3		
UK50_NS3,4	1	30,3	30,0	0,4	40,0	41,53	1,5	48,8	48,0	0,9
	2	30,0			42,9			48,1		
	3	29,6			41,7			47,0		

Tablo A.2: Mekanik test (Elastisite modülü) test sonuçları.

		7.gün		28 gün			90 gün			
Numune Kodu		Elastisite Modülü (Gpa),Ortalama Elastiste Modülü (Gpa), standart sapma (Gpa)								
REF	1	35,8	35,4	0,9	44,5	39,8	4,4	47,0	44,7	3,3
	2	36,4			36,9			47,7		
	3	34,1			42,3			43,5		
	4	35,3			35,3			40,6		
REF_NS1,7	1		39,8	2,7	45,7	42,3	3,1	48,6	40,0	5,9
	2	40,9			41,5			39,2		
	3	36,8			38,4			36,7		
	4	41,7			43,8			35,7		
REF_NS3,4	1	44,7	41,0	3,2	40,6	41,6	2,3	45,1	46,8	2,4
	2	39,3			41,7			49,5		
	3	39,1			44,8					
	4				39,4			45,9		
UK20	1	37,2	37,7	0,5	39,0	38,3	0,7	40,0	42,0	2,0
	2	37,6			38,3					
	3							43,9		
	4	38,2			37,5			42,2		
UK20_NS1,7	1	37,9	38,9	0,8	40,7	42,8	1,8		44,4	0,8
	2	38,7			43,8			45,1		
	3	39,8			43,9			43,5		
	4	39,1						44,5		
UK20_NS3,4	1		39,2	0,6		42,4	0,1	46,6	44,6	1,7
	2	39,3			42,4			43,0		
	3	39,7			42,4			45,3		
	4	38,5			42,5			43,4		
UK35	1	33,6	32,4	1,2	39,3	40,7	1,6	38,5	44,4	4,7
	2	30,8			40,0			49,8		
	3	32,5			40,4			43,1		
	4	32,5			43,0			46,1		
UK35_NS1,7	1	31,11	27,5	7,3	38,8	39,4	1,1	45,7	43,4	1,7
	2	30,3			40,8			42,0		
	3	33,0			38,4			42,1		
	4	19,2			39,6			44,0		
UK35_NS3,4	1	37,8	33,2	3,2	37,4	37,4	2,6	40,5	38,4	4,1
	2	31,0			39,5			37,8		
	3	32,7			39,0			33,0		
	4	31,3			33,7			42,4		
UK50	1	24,2	23,2	1,6		39,1	1,3	42,3	43,4	1,1
	2	21,4			40,6			44,5		
	3	24,2			38,4			43,4		
	4				38,4					
UK50_NS1,7	1	32,6	30,9	1,7	40,6	42,7	1,8	38,8	40,5	7,6
	2	31,0						48,8		
	3	29,1			43,7			34,0		
	4				43,8					
UK50_NS3,4	1		32,3	2,0	39,4	40,8	2,4	40,3	42,9	4,7
	2	32,4			41,5			40,2		
	3	30,2			38,6			48,4		
	4	34,3			43,9					



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet BARAN

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2016-2018, Yıldız Teknik Üniversitesi , İnşaat Fakültesi, Mimarlık Fakültesi , İnşaat Mühendisliği, Mimarlık

Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi- Yapı Mühendisliği- Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

2016 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde **3,67** ortalama ile **bölüm ikinciliği**, Mimarlık Bölümü ile **Çift Lisans**

Stajyer İnşaat Mühendisi: 1) Yüksel project / Pars Tilgen, Plan, section & elevation drawing with Autocad, revit, sap2000, (31/08/2014-10/09/2014)

2)Yüksel project / Pars Tilgen, Plan, section & elevation drawing with Autocad, revit, sap2000, (30/06/2015-23/07/2015)

Stajyer Mimar: 1) Grup Şerifoğlu Architecture Design consruction

2) Grup Şerifoğlu Architecture Design consruction

2018 Evka 3 Mimarlık Proje Yarışmasında **3.lük** Ödülü.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Baran, A., Bıçakçı, S.N., Baran, Ş., Türkmenoğlu H.N., ve Atahan, H.N., (2021). Effect of Nano-Silica and Fly Ash on the Rheology and Initial-Final Setting Times of Concrete Mixtures (ACE Bildiri).

Baran, A., Bıçakçı, S.N., Baran, Ş., Türkmenoğlu H.N., ve Atahan, H.N., (2021). Evaluation of Strength Development of Fly Ash Concrete with Nano-Silica: A Focus on Pre-Peak Stress-Strain Behavior (ACE Bildiri)