



Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Su/Bağlayıcı Oranına Sahip Betonlarda Nano Silika ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu Kullanımının Mekanik ve Elastik Özellikler Üzerine Etkisi

The Effect of Using Nano Silica and Granulated Blast Furnace Slag on Mechanical and Elastic Properties in Concretes with Different Water/Binder Ratios

Hasan Nuri TÜRKMEÑOĞLU^{1*}, Esen ÖNDER², Hakan Nuri ATAHAN³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. turkmenoglu@itu.edu.tr

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4765-8590>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. esen.onder92@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0975-8638>

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. atahanh@itu.edu.tr

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7917-3021>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 23 Temmuz 2022
Revizyon 4 Eylül 2022
Kabul 5 Eylül 2022
Online 30 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler:

nano silika, granüle yüksek fırın cürufu, basınç dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı

ÖZ

Yapılan çalışmada, farklı su/bağlayıcı oranına sahip üç farklı beton karışımına, ağırlıklıkça %1 oranında nano silika (NS) ve/veya ağırlıklıkça %20 oranında granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) eklenmesi ile birlikte basınç dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerinde meydana gelen değişimler ve mineral katkıların, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip beton karışımlarının özellikleri üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, su/bağlayıcı oranı 0.68 olan beton grubunda NS ve/veya GYFC kullanımının beton özelliklerine olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Fakat su/bağlayıcı oranının azalması ile birlikte, mineral katkı kullanımı hem basınç dayanımı hem de elastisite modülü değerleri üzerinde belirgin iyileştirmeler sağlamıştır. Bu etki, özellikle NS ve GYFC'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Örneğin, 0.53 su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda sadece NS veya sadece GYFC kullanımı ile referans karışıma göre basınç dayanımında elde edilen artış oranları sırasıyla %8.8 ve %7.8 iken, NS ve GYFC'nin birlikte kullanılmasıyla artış oranı %15.1 olarak elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, Poisson oranı değerlerinin referans betonlarda su/bağlayıcı oranının azalması veya karışımda GYFC kullanılması ile birlikte azaldığı fakat karışıma NS eklenmesi ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, su/bağlayıcı oranının azalmasıyla ve özellikle NS kullanımı ile birlikte, betonun davranışı belirgin bir şekilde lineer-elastik davranışa yaklaşmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 July 2022
Received in revised form 4 Sept. 2022
Accepted 5 Sept. 2022
Available online 30 September 2022

Keywords:

nano silica, ground granulated blast furnace slag, compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio

ABSTRACT

In the current study, changes in compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio with the addition of 1% (by wt.) nano silica (NS) and/or 20% (by wt.) ground granulated blast furnace slag (GGBS) to three different concrete mixtures with different water/binder ratios and the effectiveness of mineral additives on the properties of concrete mixtures with different water/binder ratios were investigated. When the results obtained were examined, it was seen that the use of NS and/or GGBS did not have a positive effect on concrete properties in the concrete group with a water/binder ratio of 0.68. However, with the decrease in the water/binder ratio, the use of mineral additives significantly improved both compressive strength and modulus of elasticity values. This effect has reached the highest level, especially for mixtures in which NS and GGBS are used together. For instance, the compressive strength increases, obtained by individual use of NS or GGBS in concrete with a water/binder ratio of 0.53 are 8.8% and 7.8%, respectively. However, this ratio was obtained as 15.1% when NS and GGBS were used together. It was determined that the Poisson's ratio values decreased with the decrease of the water/binder ratio or the addition of GGBS in the reference concretes, but increased with the addition of NS to the concrete mixture. Additionally, with the decrease of the water/binder ratio, and especially with the use of NS, the behavior of concrete has prominently approached the linear-elastic behavior.

Doi: 10.24012/dumf.1147581

* Sorumlu Yazar

Giriş

Son yıllarda nano teknolojinin gelişmesiyle birlikte, hayatımızın birçok alanında olduğu gibi yapı malzemelerinde de nano malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yapılan araştırmalar, NS, nano alüminyum oksit, nano titanyum oksit, nano kil gibi malzemelerin çimento esaslı malzemelerde kullanımının, taze hal, dayanım ve dayanıklılık özellikleri açısından belirgin etkilerinin olduğunu göstermektedir [1]. Çimento esaslı malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda en çok tercih edilen nano malzeme ise şüphesiz NS'dir. Bunun nedeni, NS'nin özgül yüzey alanının çok yüksek olması ve tamamen SiO₂ içermesi nedeniyle oluşturduğu yüksek çekirdeklenme etkisi ve sahip olduğu yüksek puzolanik reaktivitedir [2], [3]. Yapılan içyapı incelemeleri göstermektedir ki, hem hamur fazı içerisinde hem de agregaya ile harç arasındaki ara yüzey bölgesinde, NS kullanımı ile birlikte kalsiyum hidroksit (CH) miktarının belirgin bir şekilde azaldığı ve içyapının çok daha yoğun ve boşluksuz olduğu belirlenmiştir [4], [5]. Bu sayede, NS kullanımı basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve yarma dayanımı gibi mekanik ve elastik özelliklerle birlikte durabilite özelliklerini de etkin bir şekilde geliştirmektedir [6], [7]. Diğer yandan, NS'nin özgül yüzey alanının çok yüksek olması taze hal özelliklerini negatif yönde etkilemektedir. Örneğin, NS kullanılan betonlarda çökme değeri veya yayılma değerleri düşerken kimyasal katkı ihtiyacı ciddi bir şekilde artmaktadır [8]. Ancak, kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılması durumunda ise viskoziteyi ve segregasyon direncini artırmakta ve daha az miktarda bağlayıcı kullanımı ile kendiliğinden yerleşen beton elde edilebilmesini sağlamaktadır [9], [10]. Çalışmada kullanılan diğer mineral katkı olan GYFC ise en sık kullanılan puzolanik malzemelerden birisidir. Atık bir ürün olması nedeniyle çimento esaslı malzemelerde kullanımı, ekonomik yönden ve sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir [11]. Diğer yandan, çimento esaslı malzemelerde kullanıldığı zaman işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve durabiliteyi etkin bir şekilde iyileştirmektedir [3].

NS'nin, mikro silika, uçucu kül veya GYFC gibi diğer mineral katkılar ile birlikte ikili veya üçlü kullanımları üzerine yapılan çalışmalar, NS'nin diğer mineral katkılar ile birlikte kullanımının mekanik ve durabilite özellikleri açısından, tek başına kullanımına göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir [3], [12], [13]. En az ikili mineral katkı kullanımı ile elde edilen bu durum literatürde "sinerjik etki" olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, Sharkawi ve arkadaşlarının [14] mikro silika ve NS kullanarak betonun durabilite özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada, %10 mikro silika veya %2 NS kullanımı ile birlikte hızlı klor geçirimsizliği sırasıyla %16 ve %14 oranlarında azalırken, bu iki mineral katkının birlikte kullanımıyla birlikte azalma oranı %47 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte %10 mikro silika veya %2 NS kullanımı basınç dayanımını 28 günde sırasıyla %9 ve %38 oranlarında artırırken, mikro silika ile NS'nin birlikte kullanımı basınç dayanımını %52 oranında artırmıştır [15].

Yapılan çalışmada, farklı su/bağlayıcı oranına sahip üç farklı beton karışımında, NS ve GYFC'nin ayrı ayrı kullanımlarının yanında, birlikte kullanılmaları durumunda basınç dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerinde meydana

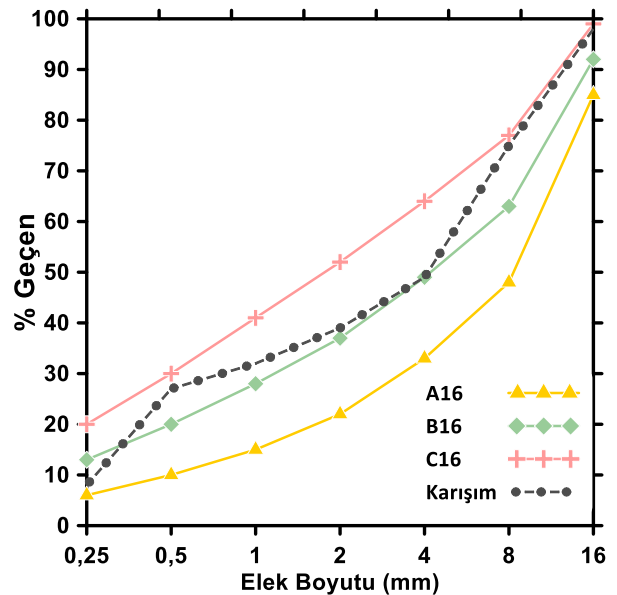
gelen değişimler ve bu mineral katkılarının, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip betonların özellikleri üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır.

Malzeme ve Karışım Özellikleri

Çalışma kapsamında, en büyük tane boyutu 16 mm olacak şekilde 0-2 mm doğal kum, 0-8 mm kırma kum ve 4-16 mm kırma taş olmak üzere 3 tip agregaya kullanılmıştır. Karışım agregaya granülometrisi belirlenirken, TS 802 standardında [16] verilen B16-C16 eğrileri arasından geçen bir agregaya karışım granülometrisi hedeflenmiştir. Böylece, agregaya kullanım oranları, doğal kum, kırma kum ve kırma taş için sırasıyla %20, %30 ve %50 olarak belirlenmiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak Akçansa marka CEM I 42,5R sınıfı çimento ve Nuh Beton firmasından temin edilen granüle yüksek fırın çürufu (GYFC) kullanılmıştır. Bununla birlikte, ortalama tane büyüklüğü 17 nm olan Levasil CB17 marka NS, mineral katkı olarak kullanılan bir diğer malzemedir. Kullanılan NS, koloidal formda olup su içerisindeki nano silika miktarı ağırlıkça %40 oranındadır. Beton karışımlarına NS eklenirken, toplam bağlayıcıya oranla %1 olarak belirlenen NS miktarını sağlayabilmek için gerekli koloidal form ağırlığı belirlenmiş ve NS ile birlikte karışıma giren su miktarı, beton karışım suyundan eksiltmiştir. Diğer yandan, kimyasal katkı olarak CHRYSO marka Optima 280 kodlu süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan malzemelere ait özgül ağırlık değerleri Tablo 1'de ve TS 802'de [16] tanımlanan standart eğriler ile birlikte karışım agregaya granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzemelere ait özgül ağırlık değerleri.

Malzeme	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Çimento	3.15
Granüle Yüksek Fırın Çürufu	2.90
Nano Silika	2.33
Doğal Kum	2.63
Kırma Kum	2.73
Kırma Taş No.1	2.74
Kimyasal Akışkanlaştırıcı	1.03



Şekil 1. Karışım agregaya granülometri eğrisi.

Tablo 2. Betonlara ait karışım bilgileri.

Karışım Kodu	Çimento (kg/m ³)	GYFC (kg/m ³)	NS (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	S/B Oranı	Kimyasal Katkı (%)	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırma Kum (kg/m ³)	Kırma Taş No.1 (kg/m ³)
C280	280	-	-				368	573	958
C280+NS	280	-	2.8	190	0.68	0.8	368	572	956
GYFC56	224	56	-				366	569	951
GYFC56+NS	224	56	2.8				365	568	950
C320	320	-	-				361	562	939
C320+NS	320	-	3.2	190	0.59	1.1	360	560	937
GYFC64	256	64	-				359	558	933
GYFC64+NS	256	64	3.2				359	557	932
C360	360	-	-				353	549	919
C360+NS	360	-	3.6	190	0.53	1.2	353	548	917
GYFC72	288	72	-				352	547	915
GYFC72+NS	288	72	3.6				351	546	914

Yapılan çalışmada, 3 farklı su/bağlayıcı oranına sahip beton karışımları hazırlanmış olup, her bir referans karışımda kullanılan çimento miktarları sırasıyla, 280, 320 ve 360 kg/m³'tür. Tüm karışımlarda, kullanılan karışım suyu miktarı 190 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Her bir farklı su/bağlayıcı oranına sahip karışımda, GYFC kullanım oranı çimento ağırlığının %20'si olarak belirlenmiştir ve GYFC, çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Diğer yandan, kullanılan NS miktar olarak çok düşük olduğundan, çimento ile yer değiştirilmeden karışıma direkt kimyasal katkı gibi eklenmiştir. NS kullanım oranı %1 olarak seçilmiştir ve hem referans hem de GYFC içeren betonlarda aynı oranda kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen beton karışımlarına ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Deneysel Çalışma ve Kullanılan Yöntemler

Betonlara ait karışım bilgilerinin verildiği Tablo 2'de görüldüğü üzere, her bir su/bağlayıcı grubunda referans, referans+NS, GYFC ve GYFC+NS olmak üzere 4 farklı karışım, toplamda ise 12 farklı beton üretilmiştir.

Beton karışımları hazırlanırken 50 litre kapasiteli beton mikseri kullanılmıştır. Tartım işlemi tamamlanan malzemelerden, öncelikle agregalar mikserin kazanına yerleştirilerek kısa bir süre kuru halde karıştırıldıktan sonra, karışım suyunun bir miktarı eklenerek kısa bir süre daha karıştırılmıştır. Ardından, bağlayıcı malzemeler ve suyun kalan kısmı mikserin kazanına eklenerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Kolloidal formdaki NS, akışkanlaştırıcı katkı betona katıldıktan sonra kimyasal katkı ekler gibi yavaş bir şekilde eklenmiştir. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkının kullanım miktarı, referans betonlarda ortalama çökme değeri 15±2 cm aralığında olacak şekilde belirlenmiş ve her bir gruptaki mineral katkı betonlarda bu oranlar sabit tutulmuştur. Karıştırma işlemi tamamlanan taze betonlar üzerinde, öncelikle TS EN 12350-2 [17] standardına uygun olarak kıvam deneyi ve TS EN 12350-6 [18] standardına göre birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Ardından, her bir karışımdan 8'er adet $\Phi 150 \times 300$ mm boyutunda silindirik numune alınmıştır. Numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkarılıp 4 tanesi 28. güne kadar, kalan 4 tane ise 120. güne kadar 21±2°C sıcaklığa sahip kirece doygun kür havuzunda

bekletilmiştir. Deney günü gelmeden 10 gün önce numunelerin üst yüzeyine çimento başlık yapılmış ve 1 gün sonra tekrar kür havuzuna yerleştirilmiştir. Deney günü gelen numuneler üzerinde, TS EN 12390-3 [19] standardına uygun bir şekilde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyleri gerçekleştirilirken, elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerini de belirleyebilmek için her bir numune üzerine düşey ve yanal deformasyonları ölçebilen bir çerçeve sistemi bağlanmıştır. Deneyde kullanılan test cihazı (Besmak marka 3000 kN kapasiteli) yük kontrollü olarak çalışmaktadır. Bu nedenle deney sonuna doğru numunede çözülme çatlakları hızla ilerlemeye başladığında, cihaz uygulanan yüklemeyi sabit tutabilmek için test plakasını çok daha hızlı bir şekilde hareket ettirmektedir. Nihayetinde numunelerin kırılması ani ve gevrek bir biçimde olmakta ve çerçeveye zarar vermektedir. Bu nedenle yüklemeyi hız olarak standarda göre biraz daha düşük bir değer seçilmiştir (5 kN/s). Basınç deneyinde kullanılan numune ve çerçeve sistemini gösteren fotoğraf Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Basınç deneyinde kullanılan çerçeve sistemi.

Verilen şekilden de görüldüğü üzere, çerçeve üzerinde boyuna deplasmanı ölçen ve simetrik olarak yerleştirilmiş 2 adet [20], yanal deplasmanı ölçen 1 adet lineer değişken diferansiyel transformatör (LVDT) bulunmaktadır. LVDT'ler aracılığı ile kaydedilen veriler kullanılarak, her bir

numune için boyuna ve enine birim şekil değiştirmeler hesaplanmış ve gerilme-deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, formül (1) kullanılarak elastisite modülü değerleri ve formül (2) kullanılarak Poisson oranı değerleri hesaplanmıştır.

$$E = (S_2 - S_1)/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (1)$$

$$\mu = (\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1})/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (2)$$

Formül (1) ve formül (2)'de; "E" elastisite modülünü, "S₂" ve "ε₂" sırasıyla maksimum yükün %40'ına karşılık gelen gerilme ve boyuna deformasyonu, "S₁" ve "ε₁" sırasıyla maksimum yükün %10'una karşılık gelen gerilme ve boyuna deformasyonu, "μ" Poisson oranını, "ε_{t2}" ve "ε_{t1}" sırasıyla maksimum yükün %40'ına ve %10'una karşılık gelen yanal deformasyonları göstermektedir.

Deney Sonuçları ve Değerlendirmeler

Birim Ağırlık ve Çökme (Slump) Değerleri

Birim ağırlık ve çökme deneyleri neticesinde elde edilen taze hal özelliklerine ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Birim ağırlık ve çökme (slump) değerleri.

Karışım Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)
C280	2335	13.0
C280+NS	2341	11.5
GYFC56	2348	17.0
GYFC56+NS	2348	12.5
C320	2341	16.0
C320+NS	2357	11.0
GYFC64	2351	15.0
GYFC64+NS	2362	10.0
C360	2351	15.0
C360+NS	2354	5.5
GYFC72	2360	15.5
GYFC72+NS	2371	9.5

Tablo 3'te görüldüğü üzere taze birim ağırlık değerleri 2330 kg/m³ ile 2370 kg/m³ arasında değişmiştir. Deneysel çalışma ve kullanılan yöntemler bölümünde de belirtildiği gibi referans betonlarda çökme değerleri yaklaşık 15±2 cm olacak şekilde ayarlanan akışkanlaştırıcı katkı miktarı, her bir beton grubu içerisindeki mineral katkılı betonların tamamında sabit tutulmuştur. Referans betonlara göre karşılaştırıldığında, GYFC ikamesi yapılan karışımlarda kimyasal katkı ihtiyacında önemli bir değişiklik olmazken, karışıma %1 oranında NS eklenmesiyle çökme değerleri, azalan su/bağlayıcı oranı ve artan çimento dozajı ile birlikte giderek artan oranda düşmüştür. Üretici firmaların beyanına göre, çalışmada kullanılan NS'nin özgül yüzey alanı 170 m²/g iken, çimento ve GYFC'nin özgül yüzey alanı değerleri ise birbirine yakın olup 0.40 m²/g mertebesinde. Sonuç olarak, NS'nin sahip olduğu son derece yüksek olan özgül yüzey alanı nedeniyle, su ihtiyacı ciddi oranda artmış ve betonların kıvamı belirgin bir şekilde düşmüştür.

Basınç Dayanımı, Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Değerleri

Eksenel basınç deneyi sonucunda elde edilen 28 ve 120 günlük ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

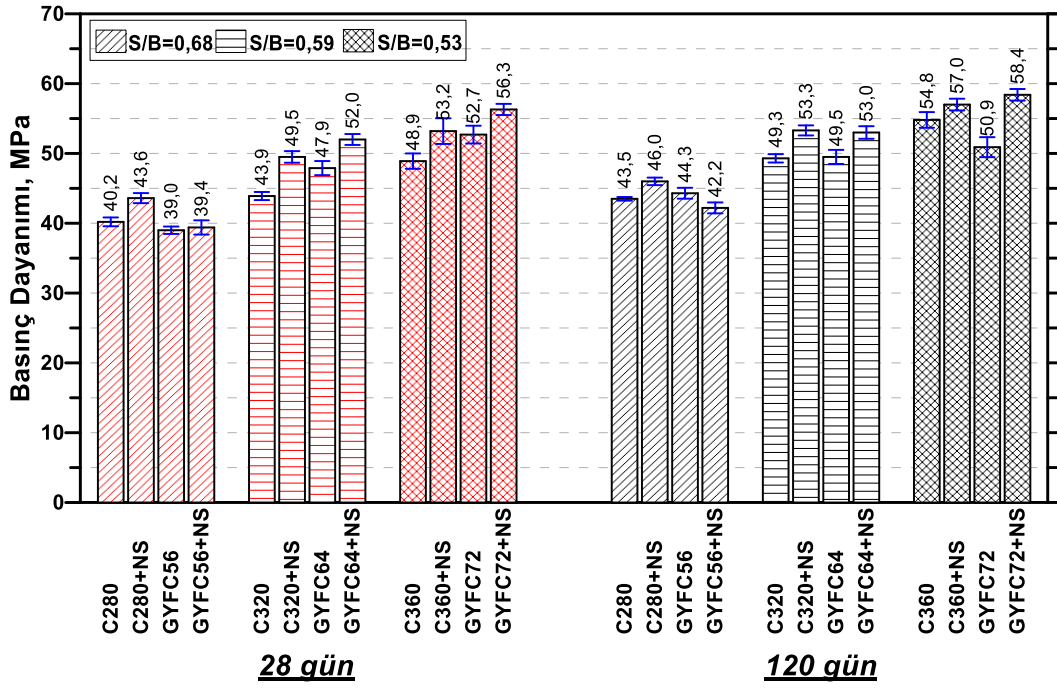
Tablo 4. Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri (parantez içerisindeki değerler standart sapmayı göstermektedir).

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
	28 Gün		120 Gün	
C280	40.2 (0.63)	23.4 (1.52)	43.5 (0.26)	27.0 (1.03)
C280+NS	43.6 (0.72)	22.9 (0.98)	46.0 (0.54)	26.9 (0.77)
GYFC56	39.0 (0.53)	21.9 (1.08)	44.3 (0.78)	25.9 (1.10)
GYFC56+NS	39.4 (1.02)	22.1 (0.83)	42.2 (0.78)	25.8 (1.14)
C320	43.9 (0.58)	24.4 (0.64)	49.3 (0.60)	29.2 (1.16)
C320+NS	49.5 (0.83)	23.6 (0.98)	53.3 (0.72)	28.7 (0.52)
GYFC64	47.9 (1.01)	25.5 (0.78)	49.5 (1.01)	27.2 (0.73)
GYFC64+NS	52.0 (0.78)	28.6 (0.84)	53.0 (0.90)	29.8 (0.91)
C360	48.9 (1.10)	22.3 (2.37)	54.8 (1.12)	28.3 (0.93)
C360+NS	53.2 (1.84)	23.9 (0.17)	57.0 (0.84)	30.6 (2.37)
GYFC72	52.7 (1.27)	26.2 (1.55)	50.9 (1.43)	28.6 (1.35)
GYFC72+NS	56.3 (0.80)	27.9 (1.75)	58.4 (0.83)	31.1 (1.22)

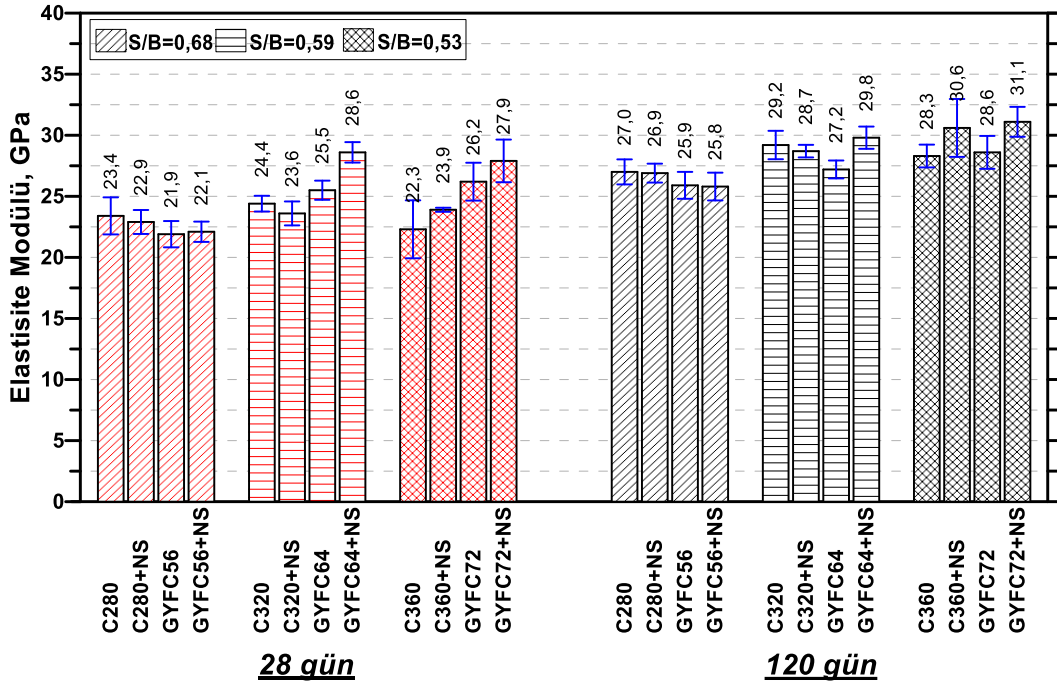
Tablo 4'te görüldüğü üzere, 0.68, 0.59 ve 0.53 su/bağlayıcı oranlarına sahip referans betonlara ait basınç dayanımı değerleri 28 günde sırasıyla 40.2, 43.9 ve 48.9 MPa iken, 120 günde 43.5, 49.3 ve 54.8 MPa'dır. Yani beklenildiği üzere su/bağlayıcı oranı azaldıkça elde edilen basınç dayanımı değerleri artmıştır. Diğer taraftan, elastisite modülü değerlerine bakılacak olursa, elde edilen değerler 28 günde sırasıyla 23.4, 24.4 ve 22.3 GPa iken, 120 günde 27.0, 29.2 ve 28.3 GPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar her ne kadar birbirine çok yakın olsa da, hem 28 hem de 120 günde en yüksek elastisite modülü değerleri 0.59 s/b oranına sahip referans karışımdan (C320) elde edilmiştir. Bu sonuca göre, C320 kodlu referans betonun, kullanılan çimento dozajı, s/b oranı ve buna bağlı olarak agrega konsantrasyonu sayesinde, çalışma kapsamında üretilen karışımlar arasında elastisite modülü açısından en uygun dizayna sahip olduğu söylenebilir. Çünkü her ne kadar C280 karışımında agrega konsantrasyonu daha fazla olsa da hamur fazının dayanımı daha düşük kalırken, C360 karışımında da hamur fazının dayanımı daha yüksek olmasına rağmen agrega konsantrasyonu daha düşük seviyede kalmıştır.

Ayrıca, Tablo 4'te yer alan 28 ve 120 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerine ait grafikler sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Karışıma, NS ve/veya GYFC katılması durumunda basınç dayanımında veya elastisite modülünde meydana gelen değişimler, bu grafikler üzerinden daha kolay bir şekilde değerlendirilebilecektir.

Öncelikle karışım gruplarına ait grafiklerin genel değişim eğilimlerine bakıldığında, C280 grubunun hem 28 hem de 120 günde, C320 ve C360 karışım gruplarından ayrıldığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni olarak çimento dozajının daha az ve s/b oranının daha yüksek olması



Şekil 3. Karışımlara ait 28 ve 120 günlük basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4. Karışımlara ait 28 ve 120 günlük elastisite modülü değerleri.

gösterilebilir. Çünkü bilindiği üzere NS ve GYFC, dayanıma esas katkıyı puzolanik reaktiviteleri sayesinde sağlamaktadırlar. Yani, C280 karışım grubunda hem çimento miktarının az olmasına bağlı olarak hidrasyon ürünü olan CH miktarının yetersiz kalmış olması, hem de su/bağlayıcı oranının yüksek olmasına bağlı olarak beton içerisindeki kılcal boşlukların boyut ve miktarının daha fazla olması mineral katkıların etkinliğini azaltmıştır. Nitekim C280 karışım grubunda sadece NS eklenmesi basınç dayanımına katkı sağlayabilmiştir (28 günde %8.5). Bu durum üzerinde ise, NS'nin yüksek reaktiviteye sahip olması etkili olmuştur. Daha önce belirtildiği üzere, çalışmada kullanılan NS'nin özgül yüzey alanı (170 m²/g), GYFC ve çimentonun yaklaşık 420 katı bir değere sahiptir. Bu durum, NS'nin hem çok

yüksek puzolanik reaktiviteye sahip olmasına, hem de oluşturduğu çekirdeklenme etkisi ile çimento tanelerinin çok erken yaşlarda hızlı bir şekilde hidrasyon ürünü oluşturmasını sağlamasına bağlanmaktadır. Böylece NS, dayanım üzerindeki etkisini çok erken yaşlarda gösterebilmektedir [21].

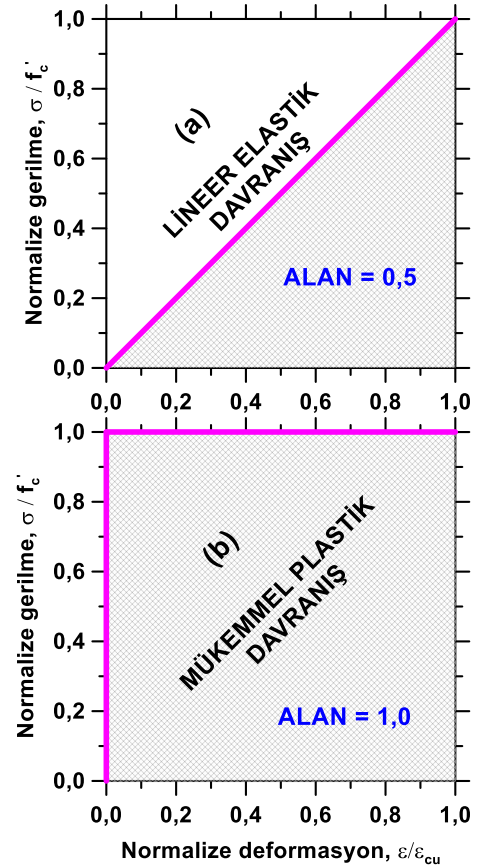
Şekil 3'te verilen C320 ve C360 karışım grubuna ait 28 günlük dayanım değerlerine bakıldığında, karışıma %1 oranında NS eklenmesi, dayanımı referans karışıma göre sırasıyla %12.8 ve %8.8 oranında artırırken, GYFC eklenmesi durumunda bu artış oranları sırasıyla %9.1 ve %7.8 olmuştur. Fakat en dikkat çekici sonuç NS ve GYFC'nin birlikte kullanımı ile elde edilmiştir. NS+GYFC mineral katkıları içeren C320 ve C360 karışımlarında,

referans karışıma göre elde edilen dayanım artış oranları sırasıyla %18.5 ve %15.1'tir. Bu sonuç açık bir şekilde göstermektedir ki NS ve GYFC'nin birlikte kullanılmasının oluşturduğu sinerjik etki, dayanım değerlerinin çok daha yüksek oranlarda artış göstermesini sağlamaktadır. Aynı karışım grupları için 120 günlük sonuçlar incelendiğinde, sadece GYFC eklenen karışımlardan C320 grubunda olanın dayanım değeri, referans ile neredeyse eşit çıkarken, C360 grubunda olan karışımın dayanım değeri referans karışımdan daha düşük çıkmıştır. Hatta 28 günlük deney sonucuna göre, 120 günde C360+GYFC karışımından elde edilen dayanım değeri %3.4 daha düşük elde edilmiştir. Diğer yandan, C320 referans karışımına NS veya GYFC+NS eklenmesi 120 günde dayanımı %8.1 ve %7.5 oranlarında artırırken, C360 referans karışımına NS veya NS+GYFC eklenmesi dayanım değerlerini %4.0 ve %6.6 oranlarında artırmıştır. Mineral katkıların kullanımıyla, 28 günde çok daha yüksek mertebelerde olan referans betona göre dayanım artış oranlarının 120 günde azalmasının nedeni, referans karışımların hidrasyon sürecini mineral katkılı betonlara göre daha geç tamamlıyor olmasıdır. Örneğin, C320 ve C360 referans betonlarının 28 günden 120 güne dayanım artış oranları sırasıyla %12.3 ve %12.1 iken, 28 günde en yüksek dayanımları veren GYFC+NS katkılı betonların 28 günden 120 güne dayanım artış oranları sırasıyla %1.9 ve %3.7'dir. Son olarak, %20'lik GYFC kullanım oranının etkinliği 120 günlük nihai dayanım değerleri üzerinden değerlendirilecek olursa, bu kullanım oranında GYFC'nin etkinlik değerinin yaklaşık 1'e eşit olduğu söylenebilir.

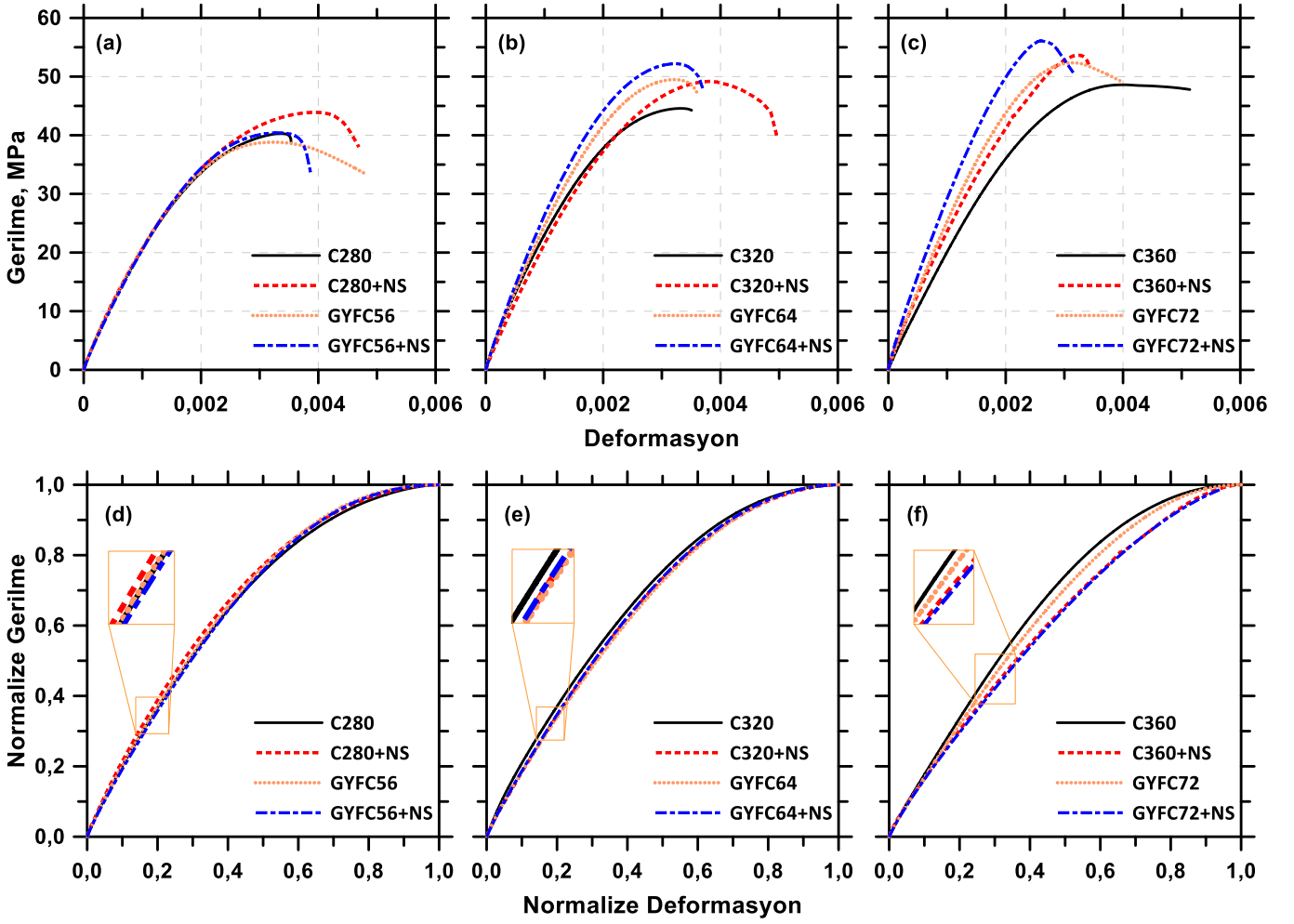
Şekil 4'te verilen grafik incelendiğinde, öncelikle basınç dayanımı sonuçları ile paralel bir şekilde C280 karışım grubundan elde edilen elastisite modülü değerleri, hem 28 hem de 120 günde referans karışıma göre daha düşük çıkmıştır. Daha önce de açıklandığı gibi, bu karışım grubunda kullanılan çimento miktarının düşük olması ve yüksek su/bağlayıcı oranına sahip olması bu sonucu açıklamaktadır. Diğer yandan C320 karışım gruplarına bakıldığında, 28 günde sadece NS katkısının elastisite modülü değerini artırmadığı, en yüksek artışın ise, NS ve GYFC'nin birlikte kullanıldığı karışımdan elde edildiği görülmektedir. Ancak 120 günlük sonuçlara bakıldığında, referans karışımın elastisite modülü değerinin sadece NS ve sadece GYFC kullanılan karışımlara ait modül değerlerini geçtiği görülmekle birlikte, yine bu deney yaşında da en yüksek modül değeri NS ve GYFC'nin birlikte kullanıldığı karışımdan elde edilmiştir (referansa göre %17.2 daha yüksek). Diğer yandan, C360 karışım grubuna odaklanıldığında, mineral katkıların hem 28 hem de 120 günde referans karışımlara göre elastisite modülü değerlerini artırdığı açık bir şekilde görülmektedir. 28 günlük sonuçlar incelenecek olursa, elastisite modülü değerlerinin referans karışıma göre C360+NS, GYFC72 ve GYFC72+NS karışımlarında sırasıyla %7.2, %17.5 ve %25.1 oranında arttığı, 120 günde ise bu artış oranlarının aynı sırayla %8.1, %1.1 ve %9.9 olduğu hesaplanmıştır. Diğer yandan, C360 grubundaki referans, NS, GYFC ve NS+GYFC karışımlarının elastisite modülü değerlerinde, 28 günden 120 güne kadar meydana gelen artış oranları, sırasıyla %26.9, %28.0, %9.2 ve %11.5'tir. Elde edilen bu sonuçlar açık bir şekilde göstermektedir ki basınç dayanımında olduğu gibi NS ve GYFC'nin birlikte kullanılması durumunda oluşan sinerjik

etki, her iki mineral katkının ayrı ayrı kullanımına göre çok daha belirgin bir şekilde elastisite modülü değerlerini artırmıştır. Diğer yandan, 120 günde nihai dayanımlar üzerinden değerlendirilecek olursa, NS'nin etkinliği çimento kullanım miktarının artması ve su/bağlayıcı oranının azalması ile birlikte çok daha belirgin bir şekilde artmıştır. Bu durum, NS'nin sadece özgül yüzey alanının çok yüksek olmasının nihai dayanım ve elastisite modülü değerlerini etkin bir şekilde artırması için yeterli olmadığını göstermektedir. Yani, karışıma katılan toplam NS miktarı toplam bağlayıcının %1'i kadar olduğu için karışıma kütleli olarak az miktarda eklenmektedir. Bu da yüksek miktarda ve büyüklükte kılcal boşluk içeren karışımlarda NS'nin oluşturduğu hidrasyon ürünlerinin ve filler etkisinin yeteri kadar görülebilmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak su/bağlayıcı oranı azaldıkça NS'nin etkinliği artmaktadır. Diğer yandan, NS daha büyük tane boyutuna sahip GYFC ile birlikte kullanıldığında ise filler etkisinin yanında, kılcal boşlukları daha etkin bir şekilde dolduracak hidrasyon ürünlerinin oluşumunu sağlayabilmektedirler.

Numunelerin basınç yüklemesi altındaki, normalize gerilme - normalize deformasyon grafikleri çizildiğinde, eğrinin altında kalan toplam alan malzemenin davranışı hakkında bilgi vermektedir. Eğer, malzeme mükemmel lineer elastik ve gevrek ise normalize gerilme-deformasyon eğrisinin altında kalan alan 0.5'e eşit olacaktır. Malzemenin mükemmel plastik olması durumunda ise bu alan 1'e eşit olacaktır. Yani betona ait eğrinin altında kalan alan 0.5 ile 1 arasında değişecektir. Anlatılan bu yöntem şematik olarak Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Lineer elastik (a) ve mükemmel plastik (b) davranışı gösteren şematik grafikler [22].



Şekil 6. Beton gruplarına ait örnek gerilme-deformasyon (a), (b), (c) ve normalize gerilme-normalize deformasyon (d), (e), (f) grafikleri (verilen grafikler 28 günlük deney sonuçlarından elde edilmiştir).

Çalışma kapsamında üretilen her bir beton grubuna ait 28 günlük deneylerden elde edilen örnek gerilme-deformasyon ve normalize gerilme-normalize deformasyon (gerilme değerleri maksimum gerilmeye göre, deformasyon değerleri ise maksimum gerilmeye karşılık gelen deformasyon değerine göre normalize edilmiştir) grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6(a), 6(b) ve 6(c)'de sırasıyla C280, C320 ve C360 beton grupları için verilen gerilme-deformasyon grafikleri incelendiğinde, C280 grubuna ait tüm beton karışımlarına ait grafiklerin çözülme sınırına kadar birbirleri ile çakıştıkları görülmektedir. Diğer taraftan, daha önceki paragraflarda da bahsedildiği üzere su/bağlayıcı oranının azalmaya başlamasıyla birlikte mineral katkıların etkinliklerini göstermeye başladığı ve her bir grup içerisindeki mineral katkılı betonlara ait grafiklerin, lineer elastik bölgeden itibaren birbirinden ayrılmaya başladığı görülmektedir. Bu durum C360 beton grubunda çok daha belirgindir.

Şekil 6(d), 6(e) ve 6(f)'de sırasıyla C280, C320 ve C360 beton grupları için verilen normalize gerilme-deformasyon grafikleri incelendiğinde basınç dayanımı sonuçlarına paralel bir şekilde, C280 beton grubunda, mineral katkıların yetersiz bağlayıcı miktarı ve yüksek su/bağlayıcı oranına bağlı olarak belirgin bir etki gösteremedikleri net bir şekilde görülmektedir. Diğer yandan, C320 grubuna bakıldığında mineral katkılı betonların referans betondan ayrılmaya başlayıp lineer elastik davranışa doğru yaklaştığı

görülmektedir. Bu etki C360 beton grubunda artık çok daha belirgin bir hale gelmekte ve özellikle C360+NS ve GYFC72+NS karışımlarının davranışı, lineer elastik davranışa bir hayli yakınlaşmaktadır. Bu durum aynı zamanda özellikle NS içeren karışımların davranışlarının daha yüksek bir oranda gevrekleştiğini göstermektedir.

Çalışmada incelenen bir diğer özellik de beton numunelerine ait Poisson oranı değerlerinde mineral katkı kullanımı ile meydana gelen değişimlerdir. Üretilen beton karışımlarına ait hesaplanan Poisson oranı değerlerinde belirgin bir değişim eğiliminin olmadığı saptanmıştır. Betonlara ait Poisson oranı değerleri 0.19 ile 0.22 arasında değişmiştir. Sırasıyla C280, C320 ve C360 referans betonlarından elde edilen Poisson oranı değerleri 0.23, 0.21 ve 0.20'dir. Yani dayanım arttıkça Poisson oranı azalmıştır. Karışımlara sadece GYFC eklenmesi durumunda Poisson oranı ya sabit kalmış ya da 0.01 veya 0.02 değer düşmüştür. Diğer yandan referans veya GYFC içeren betonlara NS eklenmesi durumunda ise Poisson oranı değerleri genellikle sabit kalmış veya 0.01 değer artış göstermiştir. Her bir karışım için 28 günden 120 güne gözlemlenen değişimlere bakıldığında ise C280 grubunda Poisson oranı değerlerinin 0.01 veya 0.02 değer azaldığı fakat diğer beton gruplarında genellikle sabit kaldığı görülmüştür. Çok büyük farklılıklar ve belirgin eğilimler elde edilemediği için bu hususta daha detaylı bir değerlendirme yapılamamıştır.

Sonuçlar

NS ve GYFC mineral katkılarının ayrı ayrı ve birlikte kullanımının farklı su/bağlayıcı oranına sahip beton karışımlarına ait mekanik ve elastik özelliklere etkisinin incelendiği çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- %1 oranında dahi olsa NS kullanımı, sahip olduğu çok yüksek özgül yüzey alanı sayesinde betonun kıvamını ciddi bir şekilde düşürmüştür.
- Betona NS katılması, bütün dayanım sınıflarında 28 günlük basınç dayanımlarını belirgin bir şekilde artırmıştır. Bu durum NS'nin özgül yüzey alanının çok büyük olmasına bağlı olarak sahip olduğu reaktivitenin yüksek olması ve böylece hem çekirdeklenme etkisi oluşturması hem de puzolanik reaksiyonu hızlandırması ile açıklanmıştır.
- Basınç dayanımı sonuçlarının aksine, NS kullanımının elastisite modülü üzerindeki etkisinin, 28 günde değil 120 günde çok daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir.
- Yapılan çalışma sınırları dâhilinde, 320 ve 360 kg/m³ çimento içeren karışımlarda 120 günlük sonuçlara göre, GYFC'nin %20 oranında kullanılması durumunda etkinlik değerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu saptanmıştır. NS'nin etkinliği ise azalan s/b oranı ile birlikte artış göstermiştir.
- Çalışma kapsamında elde edilen en önemli sonuçlardan bir tanesi, tek başına kullanım yerine NS'nin GYFC ile birlikte kullanılması, çimento dozajı ve su/bağlayıcı oranı uygun olan karışımlarda ve tüm deney yaşlarında, hem basınç dayanımını hem de elastisite modülünü çok etkin bir şekilde artırmıştır. Şöyle ki, C320 ve C360 karışım gruplarında en yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri NS ve GYFC'nin birlikte kullanıldığı karışımlardan elde edilmiştir.
- C280 karışım grubunda kullanılan çimento miktarının düşük olması ve s/b oranının yüksek olmasına bağlı olarak, bu karışıma mineral katkıların eklenmesi herhangi bir olumlu etki oluşturmamıştır (28 ve 90 günde sadece NS katkısı içeren karışımların basınç dayanımı değerleri hariç).
- Normalize gerilme-deformasyon grafiklerinden elde edilen sonuç, basınç dayanımı sonuçlarını destekleyici bir şekilde mineral katkı kullanımının, yüksek su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda bir etkisinin olmadığını fakat azalan su/bağlayıcı oranı ile birlikte mineral katkıların (özellikle NS), betonların davranışını belirgin bir şekilde lineer-elastik davranışa doğru yaklaştırarak gevrekliği artırdığını göstermiştir.
- Poisson oranı değerleri su/bağlayıcı oranının azalması ile birlikte azalmıştır. Karışıma GYFC eklenmesi genellikle Poisson oranını düşürürken, NS kullanımı az da olsa artmasına neden olmuştur.

Kaynaklar

- [1] M. Amin and K. Abu El-Hassan, "Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 80, pp. 116–124, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.075.
- [2] J. Björnström, A. Martinelli, A. Matic, L. Börjesson, and I. Panas, "Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 392, no. 1–3, pp. 242–248, 2004, doi: 10.1016/j.cplett.2004.05.071.
- [3] M. Liu, Z. Zhou, X. Zhang, X. Yang, and X. Cheng, "The synergistic effect of nano-silica with blast furnace slag in cement based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 624–631, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.078.
- [4] M. Balapour, A. Joshaghani, and F. Althoey, "Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 27–41, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266.
- [5] M. Jalal, E. Mansouri, M. Sharifipour, and A. R. Pouladkhan, "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles," *Mater. Des.*, vol. 34, pp. 389–400, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.037.
- [6] R. Prashanth, S. Senthil Selvan, and M. Balasubramanian, "Experimental investigation on durability properties of concrete added with nano silica," *Rasayan J. Chem.*, vol. 12, no. 2, pp. 685–690, 2019, doi: 10.31788/RJC.2019.1225165.
- [7] N. Atmaca, M. L. Abbas, and A. Atmaca, "Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 17–26, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.156.
- [8] M. Berra, F. Carassiti, T. Mangialardi, A. E. Paolini, and M. Sebastiani, "Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 666–675, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132.
- [9] M. Y. Durgun and H. N. Atahan, "Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 431–443, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.098.
- [10] P. K. Hou, S. Kawashima, K. J. Wang, D. J. Corr, J. S. Qian, and S. P. Shah, "Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 12–22, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.027.
- [11] A. Nazari and S. Riahi, "The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical

- properties of high strength compacting concrete,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 3, pp. 570–578, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.09.025.
- [12] L. G. Li, J. Y. Zheng, J. Zhu, and A. K. H. Kwan, “Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 168, pp. 622–632, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.181.
- [13] M. Gesoglu, E. Güneyisi, D. S. Asaad, and G. F. Muhyaddin, “Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 706–713, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.020.
- [14] A. M. Sharkawi, M. A. Abd-Elaty, and O. H. Khalifa, “Synergistic influence of micro-nano silica mixture on durability performance of cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 579–588, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.013.
- [15] M. Jalal, A. Pouladkhan, O. F. Harandi, and D. Jafari, “Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 90–104, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001.
- [16] Turkish Standards Institution, “Design of Concrete Mixes (TS 802),” 2016.
- [17] Turkish Standards Institution, “Testing fresh concrete, Part 2: Slump test (TS EN 12350-2:2019),” 2019.
- [18] Turkish Standards Institution, “Testing fresh concrete, Part 6: Density (TS EN 12350-6:2019),” 2019.
- [19] Turkish Standards Institution, “Testing hardened concrete, Part 3: Compressive strength of test specimens (TS EN 12390-3:2019),” 2019.
- [20] V. Abdullah, E. Aydin, and İ. Bedirhanoğlu, “Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 1, no. 8, pp. 43–52, 2017.
- [21] Z. Xu, Z. Zhou, P. Du, and X. Cheng, “Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1169–1177, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.003.
- [22] H. N. Turkmenoglu and H. N. Atahan, “Deformation Properties of Nano-Silica Modified Concrete Mixtures under Uniaxial Compression Loading,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 11, pp. 11009–11025, 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05431-y.