

## Nano parçacık silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ile yüksek fırın cürufu karışımının kompaksiyon özelliklerine etkisi

### Effects of the mixture of nanoparticle silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) with blast furnace slag on the compaction characteristics

Firdevs Uysal<sup>1,\*</sup> , Vedat Yılmaz<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

#### Özet

Bu çalışma, silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) nanoparçacıkları ile yüksek fırın cürufu karışımının ince daneli zemin stabilizasyonundaki etkisini araştırmaktadır. Bu çalışmanın ana amacı, SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları ve yüksek fırın cürufu kullanarak stabilize edilmiş ince daneli zeminin kompaksiyon özelliklerini (maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği) değerlendirmektir. Stabilize edilmiş ince daneli zeminlerin kompaksiyon özelliklerini elde etmek için standart proktor testleri yapılmıştır. Zeminin farklı yüksek fırın cüruf yüzdeleri (%10, %20, %30 ve %40) ve küçük miktarlarda (%1 ve %1.5) SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları ile karıştırıldığı iki farklı tip numune hazırlanmıştır. Yüksek fırın cürufunun etkisi ve SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının yüksek fırın cürufu ile karışımının etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Test sonuçları, yüksek fırın cüruf içeriğindeki artışla birlikte maksimum kuru yoğunlukta bir düşüş olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, zemine yüksek fırın cürufu ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının eklenmesi maksimum kuru yoğunluğu arttırmıştır. Elde edilen sonuçlar küçük miktarlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının genellikle kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, Kompaksiyon özellikleri, Nanoparçacık silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), Yüksek fırın cürufu, İnce daneli zemin

#### 1 Giriş

Zemin stabilizasyonu, mühendis ve tasarımcıların zayıf zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli katkı malzemelerinin zemine ilave edilmesi şeklinde uyguladıkları en yaygın yöntemlerdendir [1].

Günümüzde nanomalzeme ve nanoparçacıkların özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı araştırmacıların ilgisini oldukça arttırmaktadır [2]. Nanoparçacıklar, nanokristaller olarak adlandırılmakta ve boyutu genellikle 1-100 nm aralığında değişmektedir [3]. Küçük dane boyutlarına sahip nanomalzemelerin büyük özgül yüzey alanları vardır. Bu özelliği nedeniyle zemin içinde oldukça az miktarda kullanımı bile zeminin morfolojik yapısında değişimlere neden olmaktadır. Nanomalzemelerin bu etkisi zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla nano teknolojinin kullanımı yaygınlaştırmaktadır [4]. Khalid vd. [5] çok az miktarlarda kullanılan nanoparçacıkların kaolenin temel mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde değişime neden olduğunu vurgulamıştır. Khalid vd. [6], nanozemin kullanarak yumuşak zeminin dayanım ve kıvam

#### Abstract

This study investigates the effect of using the mixture of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) nanoparticles with blast furnace slag in fine grained soil stabilization. The main motive of this study is to evaluate the compaction characteristic (maximum dry density and optimum water content) of stabilized fine-grained soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and blast furnace slag. The standard proctor tests were conducted to obtain compaction characteristics for stabilized fine-grained soils. Two different types of samples were prepared in which soil was mixed with different blast furnace slag percentages (10%, 20%, 30%, and 40%) and small amounts (1% and 1.5%) of SiO<sub>2</sub> nanoparticles. The effect of the blast furnace slag and the mixture of SiO<sub>2</sub> nanoparticles with blast furnace slag were investigated, separately. The test outcomes revealed that a decrease in maximum dry density with the increase in blast furnace slag content. Moreover, the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles with blast furnace slag to the soil increased the maximum dry density. The obtained results show that the small amount of SiO<sub>2</sub> nanoparticles generally improves compaction characteristics.

**Keywords:** Soil stabilization, Compaction characteristics, Nanoparticle silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>), Blast furnace slag, Fine-grained soil

limitlerindeki değişimi araştırmıştır. Yumuşak zemine %2, %3 ve %4 oranlarında nanozemin ilave edilmesinin kayma dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Ancak aynı oranlarda nanozemin ilavesinden sonra zemin plastisitesinde düşüş tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda çok az miktarlarda kullanılan nano zeminin yumuşak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirme ve geliştirmede etkili olduğu belirtilmiştir. Ghazi vd. [7], çimento ve %2 oranında kullanılan SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının killi zeminlerin basınç dayanımını %46 oranında arttırdığını belirtmiştir. Taha [8], nanoparçacıkların zemin stabilizasyonuna etkisini araştırmak için çeşitli laboratuvar deneyleri yapmış ve bu malzemelerin, zemin iyileştirmede kullanılabilecek mükemmel bir katkı adayı olduğunu vurgulamıştır. Ghasabkolaei vd. [9], %9 çimento ile farklı oranlarda SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarını karıştırarak zeminin kıvam limitleri, basınç dayanımı ve CBR değerlerindeki değişimini araştırarak, kullanılan malzemelerin bu parametrelerin iyileştirmesindeki performansını değerlendirmiştir. Zemine eklenen SiO<sub>2</sub> ile killi zeminin basınç dayanımının arttığı, ayrıca %1.5 SiO<sub>2</sub> ve çimentonun 28 günde basınç dayanımı %38 arttırdığı belirtilmiştir. Çalışmada yapılan SEM ve

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, firdevsuysal@ohu.edu.tr (F. Uysal)

Geliş / Received: 23.10.2020 Kabul / Accepted: 07.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.815399

AFM analizlerinin deneysel sonuçları desteklediği, SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının da zemin iyileştirmesinde kullanılabileceğini vurgulanmıştır. Nohani ve Alimakan [10], farklı oranlarda (%0.5, %1, %1.5 ve %2) nanokil kullanarak kıvam limitleri, CBR, drenajsız üç eksenli basınç ve kompaksiyon deneyleri yapmıştır. Zemine nanokil eklenmesi ile kıvam limitlerinin arttığı, drenajsız dayanım ve CBR değerlerindeki en iyi sonucun zemine %1.5 oranında nanokil eklenmesi ile elde edildiği belirtilmiştir. Ancak, nanokil oranının %1.5'dan %2'ye çıkarılması durumunda hem drenajsız dayanım hem de CBR değerlerinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Priyadharshini ve Arumairaj [11], farklı nanomalzemeler (nanokil, nanoMgO, nanoalümina) kullanarak standart laboratuvar deneyleri yapmış ve bu malzemelerin zemin stabilizasyonundaki etkinliğini araştırmıştır. Nanokilin artması ile kıvam limitlerinde artış gözlemlenirken, nanoMgO ve nanoalümina miktarlarındaki artışın kıvam limitlerini azalttığı tespit edilmiştir. Nanokil ve nanoalümina miktarındaki artış optimum su içeriğini arttırmış ve kuru birim hacim ağırlık değerlerini azaltmıştır. NanoMgO oranındaki artış ise optimum su içeriğini azaltarak kuru birim hacim ağırlık değerini arttırmıştır. Drenajsız dayanımda ise, %1 nanokil ile %48, %0.3 nanoMgO ile %41 ve %0.75 nanoalümina ile de %43 oranında artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak nanoMgO'in diğer iki malzemeye göre oturmaların azaltılması ve taşıma gücü değerinin artırılmasında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiği zaman nanomalzemelerin az miktarda kullanılması durumunda da zemin özelliklerinde oldukça etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Ancak, bu malzemelerin alanda kullanımını yaygınlaştırmak için daha fazla araştırma yapılması gerektiği de oldukça açıktır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel araştırmaların nanomalzemelerden SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kullanımının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada doğal ince daneli zemine farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) yüksek fırın cürüfu (YFC) ve YFC'ye farklı oranlarda (%1 ve % 1.5) SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları ilave edilerek zeminin kompaksiyon parametreleri olan kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerlerindeki değişim araştırılmıştır. Çalışma sonucunda ince daneli zemine sadece YFC ilave edilmesi durumunda zeminin kompaksiyon özelliklerinde beklenen iyileşme gerçekleşmemiştir. Ancak, YFC ile birlikte kullanılan küçük miktarlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kompaksiyon özelliklerinden  $\gamma_k$ 'nın iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.

## 2 Materyal ve metot

Deneysel çalışmaların ilk adımı olarak kullanılan malzemelerin çeşitli mühendislik özellikleri tespit edilmiştir. Doğal zeminin sınıfı Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre CH olarak tespit edilmiştir. Plastik limit değeri ASTM D 4318 [12] ve likit limit değeri de BS 1377-2 [13] standartlarına uygun olarak elde edilmiştir (Tablo 1). Doğal zeminin özgül ağırlığı 2.55, YFC'nin özgül ağırlığı ise 2.05 olarak belirlenmiştir. SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının boyutu

28nm'dir. YFC'nin dane boyutu dağılımı da Şekil 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Doğal zeminin özellikleri

Sınıfı (USCS)	CH
Likit limit (%)	104
Plastik limit (%)	26
Plastisite İndisi	78

SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları, doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriğinin tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Tablo 2 ve 3). Ayrıca ticari bir firmadan temin edilen SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının fiziksel özellikleri de Tablo 4'te sunulmuştur.

**Tablo 2.** SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kimyasal içeriği

	(%)
Si	>97
Fe	0.002
Ca	0.007
Ti	0.012
Na	0.003
Diğer	<0.01

**Tablo 3.** Doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriği

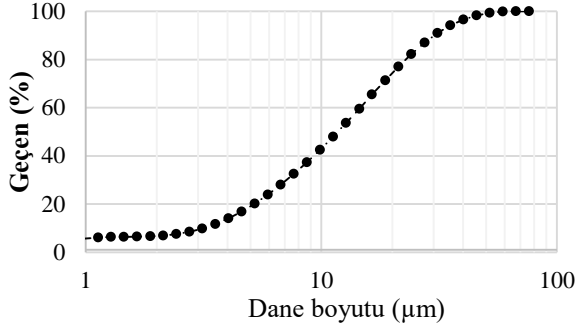
	Doğal Zemin	YFC
	(%)	(%)
SiO <sub>2</sub>	77.186	36.824
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.928	13.314
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.646	0.727
CaO	2.504	38.834
MgO	0.715	5.648
K <sub>2</sub> O	0.647	0.777
TiO <sub>2</sub>	0.337	0.761
SO <sub>3</sub>	0.142	0.562
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.039	1.17
Na <sub>2</sub> O	0.668	-
ZnO	-	0.001
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.005
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.016
BaO	0.084	0.157
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.111	0.009
SrO	0.045	-

SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları, doğal zemin ve YFC'nin mikro yapısını görmek için SEM (Taramalı Elektron mikroskobu) analizleri yapılarak Şekil 2'de sunulmuştur.

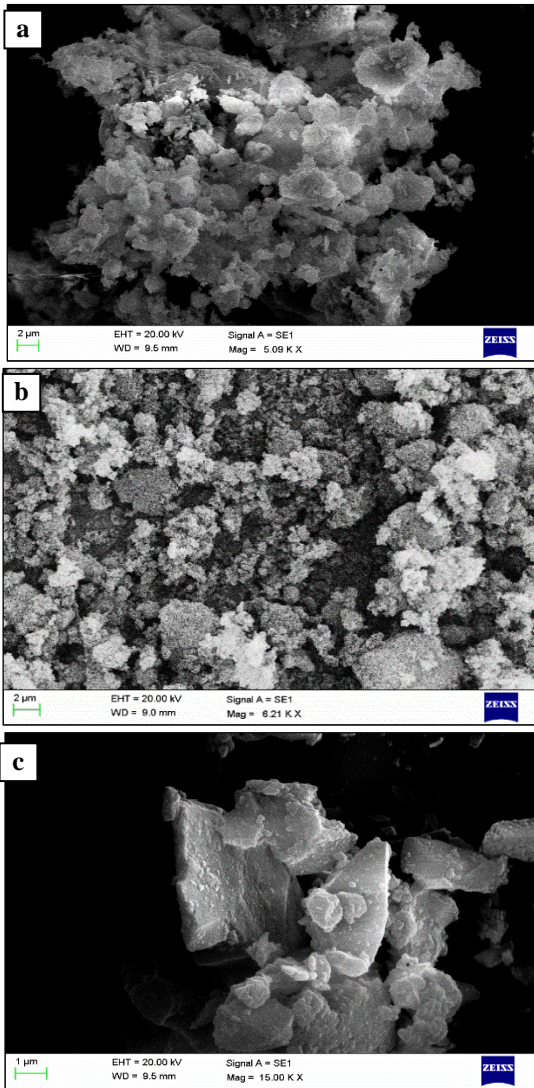
SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları zemine ilave edilmeden önce kullanılan oranlarda (%1 ve % 1.5) ayrı ayrı solüsyonlar hazırlanarak ultrasonik banyo cihazında bekletilmiş ve nanomalzemenin suda homojen olarak dağılması sağlanmıştır (Şekil 3).

**Tablo 4.** SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının fiziksel özellikleri

Safılık (%)	99.5
Renk	Beyaz
Kitle yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	<0.1
Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.2
Dane boyutu (nm)	28
Özgül yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	150-550



**Şekil 1.** Yüksek fırın cürufunun dane dağılım eğrisi [14]



**Şekil 2.** SEM Görüntüleri; (a) doğal zemin (b) SiO<sub>2</sub> nanoparçacığı (c) yüksek fırın cürufu



**Şekil 3.** Ultrasonik banyo

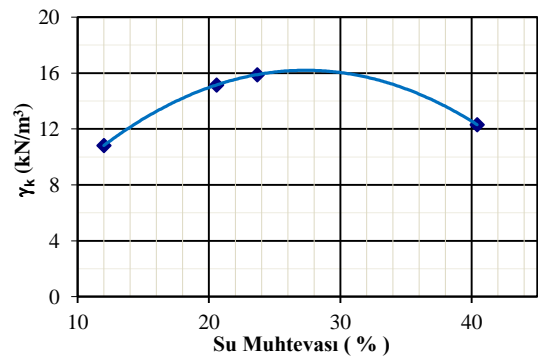
Kompaksiyon deneyleri ASTM D 698 [15] standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bu deneyler, doğal zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) ilave edilmiş sadece YFC ile, son olarak da aynı YFC oranlarına ağırlıkça %1 ve %1.5 SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde sadece YFC ve YFC ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının birlikte kullanılması ile kompaksiyon özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler iki seri olarak tamamlanmıştır. İlk seri deneylerde sadece YFC, ikinci seri deneylerde ise YFC ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları karışımlarının ince daneli zeminin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği değerlerindeki değişime etkisi araştırılmıştır.

#### 3.1.1. Seri Deneyler

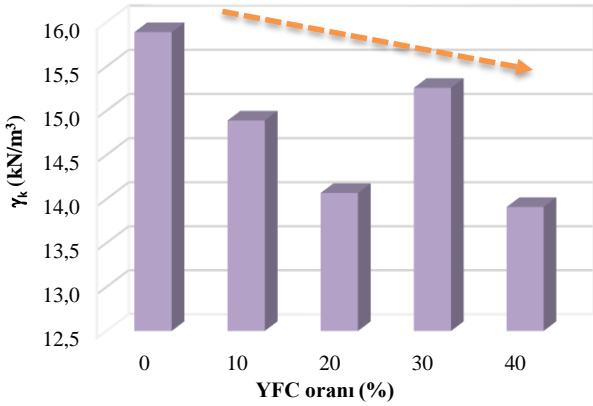
İlk seri deneylere başlamadan önce sadece doğal zemin için kompaksiyon deneyi yapılarak örnek sıkışma eğrisi olarak sunulmuştur (Şekil 4). Sonraki aşamada YFC'nin etkisini görmek için literatürden seçilen %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC zemine karıştırılarak deneyler tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



**Şekil 4.** Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi

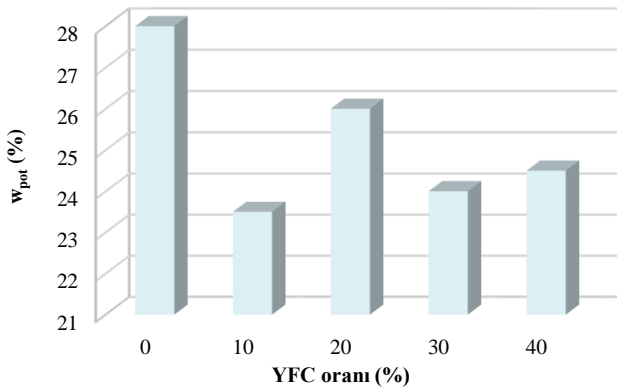
YFC'nin artan oranları ve  $\gamma_k$  değişimi incelendiği zaman genel eğilim olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5). Optimum su içeriğindeki artış ve azalmalara paralel olarak da birim hacim ağırlık değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir (Şekil 5 ve

6). YFC'nin %30 oranında  $\gamma_k$  belirgin bir şekilde artış yaparken  $w_{opt}$  değeri de düşüş göstermektedir. Sharma ve Sivapullaiah [16] artan oranlarda YFC ile hem  $\gamma_k$ , hem de  $w_{opt}$  değerlerinde düşüş tespit etmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada elde edilen %30 YFC oranındaki artışı kendi çalışmalarında %60 olarak belirlemiştir. Araştırmacılar bu durumu zemin tarafından tutulan suyun artan YFC oranı ile azalmasından dolayı zeminin yeterince sıkıştırılmaması olarak yorumlamıştır. Benzer sonuçlar Zhang vd. [17] tarafından elde edilmiştir. Bu çalışmada da katkı malzemesi ile hidrasyonun başladığı ve zemin içinde topaklanmalar meydana geldiği, bu nedenle de istenen sıkışmanın sağlanmadığı belirtilmiştir.



Şekil 5. Artan YFC oranları ile  $\gamma_k$  değişimi

Bu çalışmada yapılan ilk seri deney sonuçları incelendiği zaman YFC'nin kompaksiyon özelliklerinin iyileştirilmesinde beklenen etkiyi göstermediği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeninin YFC'nin özgül ağırlığının doğal zemine göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

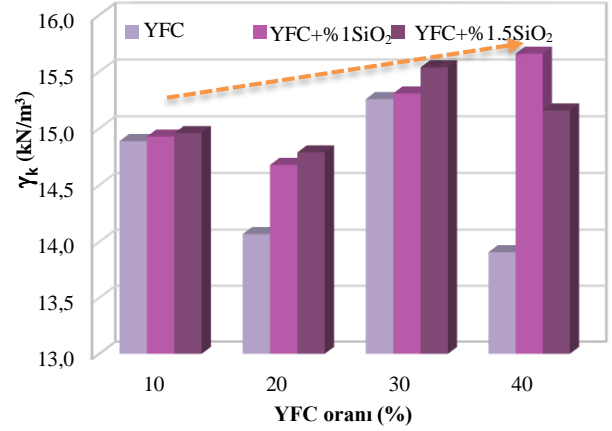


Şekil 6. Artan YFC oranları ile  $w_{opt}$  değişimi

### 3.2. II. Seri Deneyler

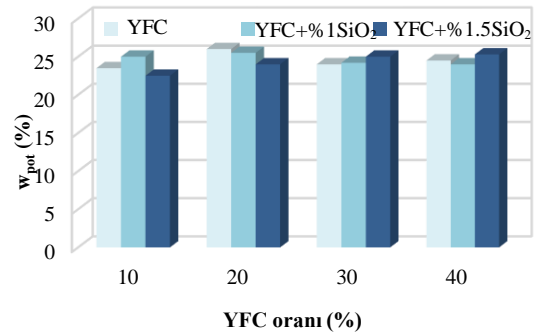
İkinci seri deneylerde YFC ile birlikte SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları karışımlarının kompaksiyon parametrelerine etkini araştırmak için literatürden seçilen %1 ve %1.5 oranlarındaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları, birinci

seride kullanılan oranlardaki (%10, %20, %30 ve %40) YFC ile ince daneli zemine karıştırılarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 7 ve 8).



Şekil 7. YFC ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının  $\gamma_k$  ile değişimi

Yapılan deneysel çalışmalarda tüm YFC oranları için, %1 ve %1.5 SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanılması durumunda  $\gamma_k$ 'yı belirgin bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 7). Sonuçlar, nano malzemelerin çok küçük miktarlarda kullanımının bile zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda her bir YFC oranı kendi arasında değerlendirildiğinde optimum su içeriğinde belirgin bir değişim gözlemlenmezken, %10, %20 ve %30 YFC oranlarında artan SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının  $\gamma_k$ 'yı arttırdığı yani kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ancak %40 YFC oranında ise %1 oranında SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanımında oldukça belirgin bir sıkışma sağlanırken, %1.5 oranında azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Malik vd. [18] de artan SiO<sub>2</sub> oranları ile  $\gamma_k$ 'da azalma tespit etmiştir. Artan YFC oranları birbiri ile karşılaştırıldığı zaman ise, genel olarak YFC oranının artması ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının etkinliğinin arttığı görülmüştür.



Şekil 8. YFC ile SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının  $w_{opt}$  ile değişimi

## 4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında yapılan ilk seri deneylerde doğal ince daneli zemine dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) YFC ilave edilerek kompaksiyon parametreleri ( $\gamma_k$  ve

$w_{opt}$ ) değerlendirilmiştir. Çalışmada özellikle nano malzemelerin kullanımının yaygınlaştırılması hedeflendiği için aynı YFC oranlarına iki farklı oranlarda (%1 ve %1.5)  $SiO_2$  nanoparçacıkları ilave edilerek yine zeminin kompaksiyonuna olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- İnce daneli zemine sadece artan oranlarda YFC ilave edilmesi durumunda zeminin kompaksiyon özelliklerinde beklenen iyileşme gözlemlenmemiştir.
- YFC'nin tüm oranlarında, YFC ile birlikte iki farklı oranda kullanılan  $SiO_2$  nanoparçacıklarının kompaksiyon özelliklerinin iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.
- $SiO_2$  nanoparçacıklarının artması ile YFC'nin %10, %20 ve %30 oranlarında  $\gamma_k$ 'da iyileşme görülürken, %40 oranında azalma tespit edilmiştir. Bu durum nano malzemeler için efektif bir kullanım oranı olabileceğini düşündürmektedir. Ancak bu oranın tespiti için daha fazla araştırma yapılmalıdır.
- Kompaksiyon deneylerinde ağırlıkça çok küçük miktarlarda kullanılan  $SiO_2$  nanomalzemesinin zeminin sıkışması üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %7**

#### Kaynaklar

- [1] J. Alsharif, M. R. Taha, A. A. Firoozi and P. Govindasamy, Potential of using nanocarbons to stabilize weak soils. Applied and Environmental Soil Science, 5060531, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5060531>.
- [2] U. Faheem, Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. Metallurgical and Material Transactions A, 39 (12), 2084-2814, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9603-5>
- [3] C. Demetzos, Introduction to nanotechnology. in Pharmaceutical Nanotechnology, 3–15, Springer, Berlin, Germany, 2016.
- [4] A. Yeganeh Rikhtehgar, Investigating of effects of nano-materials and nano-polymers on clay. Master Thesis, Istanbul Technical University, Turkey, 2016.
- [5] N. Khalid, M. F. Arshad, M. Mukri. K. Mohamed and F. Kamarudin, The properties of nano-kaolin mixed with kaolin. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 4247-4255. 2005.
- [6] N. Khalid, M. F. Arshad, M. Mukri, K. Mohamad and Kamarudin, F., Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20, 731-738, 2015.
- [7] H. Ghazi, M. H. Baziar, and S. M. Mirkazemi, Assess of the improvement of the behavior of soil strength in the presence of nanoscale additive. Assas Journal Science and Technology, 1(1), 45–50, 2011.
- [8] M. R. Taha, Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixture. Proc. 3rd Symp on Nanotechnology in Construction, Springer-Verlag, 377-382, 2009.
- [9] N. Ghasabkolaei, A. Janalizadeh, M. Jahanshahi, N. Roshan and S. E. Ghasemi, Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study. The European Physical Journal Plus 131(5), 134, 2016, <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16134-3>
- [10] E. Nohani and E. Alimakan, The effect of nanoparticles on geotechnical properties of clay. International Journal of Life Sciences, 9(4), 25–27, 2015. <https://doi.org/10.3126/ijls.v9i4.12670>
- [11] R. Priyadarshini and P. D. Arumairaj, Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterial's. International Journal of Scientific Research, 4(6), 2015.
- [12] ASTM D 4318, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- [13] BS 1377-2, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2, Classification Tests, BSI, 1990.
- [14] F. Uysal, V. Yılmaz ve H. M. Topçu, Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1), 19-26, 2020.
- [15] ASTM D 698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Philadelphia, PA, 2007.
- [16] A. Kumar Sharma and P. V. Sivapullaiah, Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag. State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, 3920-3928, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.402>.
- [17] Y. Zhang, W. Ye and Z. Wang, Study on the compaction effect factors of lime-treated loess highway embankments. Civil Engineering Journal 3, 1008, 2017. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-030933>.
- [18] A. Malik, S. O. Puri, N. Singla and S. Naval, Strength characteristics of clayey soil stabilized with nano-silica. In Recycled Waste Materials, 11-17, Springer, Singapore, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5_2).

