

Nano-CuO İle Hazırlanan Kompozit Kil Karışımlarının Kıvam Limitleri, pH ve Elektrik İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi

Ahmet Şahin ZAIMOĞLU¹, Faruk ALTUN², Fatih IŞIK³, Rahim Kağan AKBULUT³

ÖZET: Nano malzemelerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Günümüzde birçok alanda olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de nano partiküllerin kullanılabilirliği araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Çalışma kapsamında, % 0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında nano-CuO, yüksek plastisiteli kil ile interkalasyon yöntemi kullanılarak karıştırılmış ve elde edilen kompozit kil örneklerinin kıvam limitleri, pH ve elektrik iletkenlik özelliklerinin nano-CuO oranı ile değişimi incelenmiştir. Nanopartikülün eklenmesi likit limit değerlerini arttırırken, plastik limit değerlerinde göreceli olarak bir düşüşe neden olmuştur. Diğer taraftan, nano-CuO katkı oranı arttıkça pH ve elektrik iletkenlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanopartikül, bakır oksit, kil, kıvam limitleri, elektrik iletkenlik, pH

Investigation of Liquid Limit, pH and Electrical Conductivity Properties of Composite Clay Mixtures Prepared With Nano-CuO

ABSTRACT: The usage areas of nano materials are increasing day by day. As in many other fields, the availability of nano-particles in civil engineering attracts the attention of researchers. In this study, 0.5%, 1%, 2% and 3% nano-CuO was mixed with high plasticity clay by using intercalation method and the changes of consistency limits, pH and electrical conductivity properties with nano-CuO ratio of the composite clay samples were investigated. The addition of the nanoparticle increases the liquid limit values, also resulting in a relative decrease in the plastic limit values. On the other hand, as the ratio of nano-CuO additives increases, pH and electrical conductivity values increase.

Keywords: Nanoparticle, copper oxide, clay, consistency limits, electrical conductivity, pH

¹ Ahmet Şahin ZAIMOĞLU (Orcid ID: 0000-0001-5245-0212), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

² Faruk ALTUN (Orcid ID: 0000-0002-0627-2811), Serbest Eczacı, Erzurum, Türkiye

³ Fatih IŞIK (Orcid ID: 0000-0003-3641-3512), Atatürk Üniversitesi, Erzurum Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Erzurum, Türkiye

³ Rahim Kağan AKBULUT (Orcid ID: 0000-0002-6342-1019), Atatürk Üniversitesi, Erzurum Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fatih IŞIK, e-mail: fatih.isik@atauni.edu.tr

* Bu çalışma Faruk ALTUN'un Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Nanoteknoloji, mikron boyutundan daha küçük boyutlardaki işleme teknolojisi olup, nanopartiküllerin katkı malzemesi olarak kullanılması sonucu nanokompozitler üretilmektedir. Nanoteknolojinin uygulama alanları gün geçtikçe artmaktadır. Nanoteknoloji ile atom, molekül ve makromolekül ölçeklerinde incelenen malzemelerin makro boyutlarındaki fiziksel veya kimyasal özelliklerden çok farklı fiziko-kimyasal özellikler kazandırılmaktadır (Baykara, 2008).

Lee ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada, kil kimyasının kille yapılan nanokompozitlerin özellikleri ve uygulamaları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Polipropilene altı farklı kilin eritme işlemiyle muamele edilmiştir. Çalışmada, alkil onyum iyonu ara katkılı killerin, alkilamin ara katkılı killere oranla daha iyi termal durabiliteye sahip oldukları belirtilmiştir. Nano katkılı dolgu malzemesinin hidrolik iletkenlik, basınç dayanımı, şişme, katyon değişim kapasitesi üzerine etkileri Kananizadeh ve ark. (2011) tarafından araştırılmış ve %4 nano katkılı dolgu malzemesinin hidrolik iletkenliği önemli ölçüde düşürdüğü ifade edilmiştir.

Taha ve Taha (2012) yaptıkları çalışmada kile ağırlıkça yüzde 0.075, 0.3, 0.5 ve 0.7 oranlarında nano-bakır ilave etmişlerdir. Yöntem olarak ağırlıkça hesap yapılarak kaba karıştırma yöntemi kullanılmış olan çalışma sonucunda katkılı killerin katkısız killere göre büzülmesinin arttığı sonucuna varmışlardır. Lou ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada kil ve lağım atığına ağırlıkça %1, %2, %3 oranlarında nano Al₂O₃ ilave etmişlerdir. Yöntem olarak mekanik karıştırıcıda karıştırma yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda katkılı killerin mukavemet özelliklerinin katkı oranlarına bağlı olarak arttığı, şişme potansiyelinin ve plastisite indisinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Arabani ve ark. (2012) çalışmalarında asfaltın önemli bir parçası olan bitüm yapısına nano malzeme eklenerek sürtünmeye karşı dayanımı artmış asfalt elde etmek amacıyla %5 SBS nano kil kompoziti kullanmışlardır. Nano malzeme eklendikten sonra sürtünme testleri yapılmış ve nano kil kompozitlerin asfalt karışımının sürtünme durumunu değiştirdiği sonucuna varmışlardır. Ghasabkolaei (2013) yaptığı çalışmada Nano partikülün kum zeminin geoteknik özelliklerine etkisini incelemiştir. Nanopartikül katkılı kum zemininde oturma özelliklerinde azalma olduğunu tespit etmiştir.

Çalışma kapsamında Erzurum İli, Oltu-Narman Havzası'ndan alınan kil kullanılmıştır. Alınan numune etüvde kurutulduktan sonra öğütülmüş, 40 nolu elekten elenerek hazır hale getirilmiştir. Çalışmada nanopartikül olarak CuO kullanılmıştır. Nanopartikül, önceden belirlenen spesifik maksimum miktarda alınarak günlük iyonlarından arındırılmış suda magnetik karıştırıcıda 50°C'de topaklanmadan ve homojen bir şekilde dağılıncaya kadar karıştırılmıştır. Oluşan çözeltiye azar azar kil ilave edilerek karıştırma kabının dibinde çökelti kalmayınca kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Seramikleşme olmaması için 90°C'de 48 saat etüvde bekletilerek nanopartikül-kil karışımı (kompozit) elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kil numunelere, %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında nanopartikül katılarak elde edilen kompozitin kıvam limitleri, pH ve elektrik iletkenlik değerleri belirlenmiş ve katkısız kile göre değişimi incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kil

Çalışmada kullanılan kil Erzurum'un kuzey doğusunda yer alan Oltu-Narman Havzasında bulunan kil rezervinden alınmıştır. Laboratuvara getirilen kil etüvde 105°C'de kurutulduktan sonra öğütülmüştür. Kil üzerinde yapılan kıvam limitleri deneylerinden, likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla %58 ve %22 olarak belirlenen kilin plastisite indisi değeri %36 olarak hesaplanmıştır. Bulunan değerler göre kil zemin Birleştirilmiş Sınıflandırma Yöntemi (USCS) ne göre yüksek

plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. ASTM D-698'e uygun olarak yapılan Standart Proctor deneyi sonucunda kil zemine ait optimum su içeriği (w_{opt}) değeri %19 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) değeri 14.95 kN m^{-3} olarak belirlenmiştir.

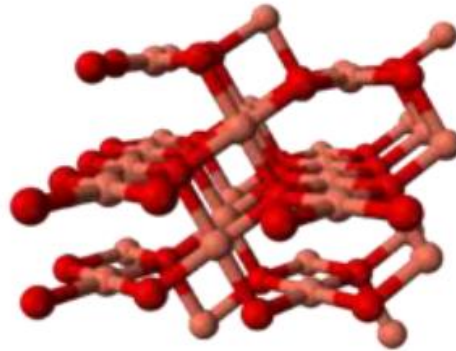
Nano-CuO

Bakır, periyodik cetvelde Cu simgesiyle gösterilen, iletken özelliğe sahip, bol bulunan bir elementtir. Kimya sanayi, inşaat, ulaşım gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bakır ısıyı ve elektriği en iyi ileten aynı zamanda ucuz bir metal olduğu için kullanımı yaygındır. Paslanmaz özelliğe sahip olduğundan kaplama sanayinde de kullanılmaktadır.

Bakır (II) oksit veya kükrik oksit bakırın oksit formlarının yüksek olanlarındandır. Bakır II oksit bakırın çift değerlilik aldığı formudur. Bakır bileşiklerinin içerisinde siyah renkli formu CuO'dur. CuO bakırın nitratin kireçlenmesi veya yakılması yöntemleri ile elde edilmektedir (Yoon ve ark., 2000). Bakır (II) oksite ait bazı kimyasal özellikler Çizelge 1'de, atomik gösterimi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. CuO'in fiziko-kimyasal özellikleri (Yoon ve ark., 2000)

Formül	CuO
IUPAC numarası	Copper(II)oxide
Molar kütle	$79.545 \text{ g mol}^{-1}$
Erime noktası	1326°C
Kaynama noktası	2000°C
Yoğunluk	6.31 g cm^{-3}



Şekil 1. CuO atomik gösterimi (Yoon ve ark., 2000)

Kompozit Kil Hazırlama Yöntemi

Kil malzeme 105°C 'de 24 saat kurutulduktan sonra öğütülmüştür. Daha sonra 40 nolu elekten elenerek hazırlanan kil malzemesinden 500g tartılarak temiz cam behere alınmıştır. 5 g Nano CuO cam petri kabına alınmıştır. İyonlarından arındırılmış su cam behere konulmuş üzerine nano-CuO yavaş yavaş eklenerek magnetik karıştırıcıda 50°C 'de, 250rpm'de topaklanmadan ve tamamen homojen bir şekilde dağılıncaya kadar karıştırılmıştır (Şekil 2). Önceden hazırlanan kuru CH kili karışımın içerisine yavaş yavaş ilave edilerek 750rpm'de, yaklaşık 1 saat karıştırılmıştır. Karışım içerisindeki kil ile CuO tamamen homojen bir dağılım gösterdikten sonra karıştırma işlemine son verilmiştir. Karışımındaki suyu tamamen uzaklaştırmak için 90°C 'de etüvde 48 saat bekletilmiştir. Belirtilen süre sonunda nano-CuO

katkılı kompozit kil elde edilmiştir. Çalışma kapsamında %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında nano-CuO katılarak aynı yöntemle 4 farklı kompozit kil elde edilmiştir.



Şekil 2. Nano-CuO katkıli kompozit kilin hazırlanışı

pH ve Elektrik İletkenlik

Elde edilen nano-CuO katkıli kompozit kil örneklerinin pH ve elektrik iletkenlik değerlerini belirlemek amacıyla her bir kompozit kil örneğinden kuru olarak 50gr balon jojeye konulmuş ve üzeri 100ml olacak şekilde de-iyonize su ile tamamlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon 30dk süre ile 750rpm değerinde karıştırılmıştır. Daha sonra Şekil 3'te gösterilen ölçüm cihazı (Thermo Scientific Orion Star A111) kullanılarak süspansiyonların hem pH değeri, hem de elektrik iletkenlik değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3. PH ve elektrik iletkenlik ölçüm cihazı

Kıvam Limitleri

Nano-CuO katkıli kompozit killerin likit limit değerleri düşen koni yöntemi (BS 1377-2) ile belirlenmiş, plastik limit deneyleri ise ASTM D-4318 standardına uygun olarak yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

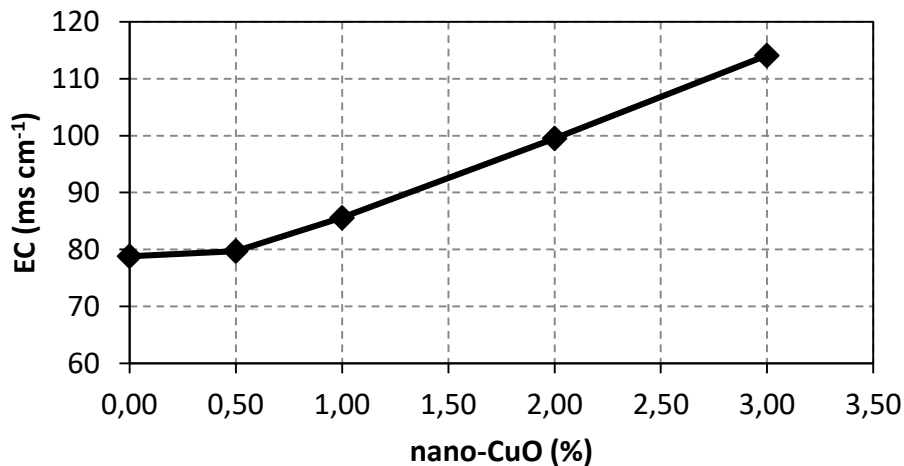
Çalışmada katkısız ve nano-CuO katkılı numunelerin fiziko-kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için pH ve elektrik iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Katkısız kil ve farklı oranlarda nano-CuO katkılı kompozit kil numuneleri üzerinde yapılan pH ve elektrik iletkenlik (EC) ölçümleri Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde genel olarak nano-CuO oranı arttıkça hem EC, hem de pH değerinin katkısız kile göre arttığı görülmektedir.

Çizelge 2. pH ve EC ölçüm değerleri

Nano-CuO (%)	EC (ms cm ⁻¹)	pH
0.0	78.8	8.37
0.5	79.7	7.87
1.0	85.6	8.40
2.0	99.5	8.70
3.0	114.1	9.00

Genel olarak geoteknik mühendisliğinde elektrik iletkenlik ile ilgili yapılan çalışmalarda, elektrik iletkenlik ile zeminlerin doygunluk derecesi, su içeriği, boşluk yapısı, hidrolik iletkenlik vb. özellikleri ile ilişki kurulmuştur (Kalinski ve Kelly, 1993; Abu-Hassanein ve ark., 1996; Bryson ve Bathe, 2009). Diğer taraftan, kil zeminler geoteknik mühendisliğinde malzeme olarak da (baraj mühendisliğinde geçirimsizlik tabakasında) kullanılmaktadır. Bu nedenle kil zeminlerin modifiye edilerek bir takım geoteknik özelliklerinin (kıvam, geçirimsizlik vb) iyileştirilmesi son yıllarda sıklıkla çalışılan konular arasındadır. Kil modifikasyonunda EC ve pH gibi fiziko-kimyasal özellikleri önem arz etmektedir (Akbulut, 2008).

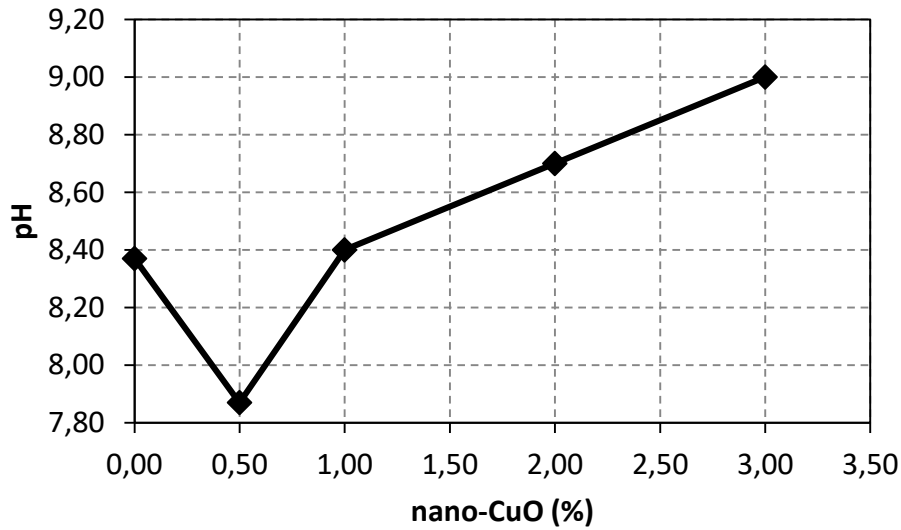
Yapılan bu çalışmada nano-CuO katkı oranı ile EC’nin değişimi incelenmiştir. EC değerinin nano-CuO katkı oranı ile değişimi Şekil 4’da gösterilmiştir. Beklenildiği gibi nano-CuO oranı arttıkça EC değeri artmıştır (Şekil 4). İletken bir element olan bakırın, EC ölçümü için hazırlanan nano-CuO ~ kil süspansiyonunun EC değerini arttırdığı tespit edilmiştir. Katkısız kilin EC değeri 78.8 ms cm⁻¹ değerinden nano-CuO oranı arttıkça kademeli olarak artmış ve %3 nano-CuO katkılı kompozit kil numunesinde 114.1 ms cm⁻¹ değerine yükselmiştir. %3 nano-CuO katkılı kompozit kilde EC değerinin yaklaşık %44.7 arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Elektrik iletkenlik ~ nano-CuO ilişkisi

Nano-CuO oranına bağlı olarak pH değerindeki değişim Şekil 5’de gösterilmiştir. Katkısız kilin pH değeri 8.37’den %0.5 nano-CuO katkılı kompozit kilde pH değeri 7.87’ye düştüğü ve daha sonra nano-CuO katkı oranı arttıkça pH değerinin de arttığı Şekil 5’de görülmektedir. %3 nano-CuO katkılı kompozit kilin pH değeri 9.00 olarak ölçülmüştür. pH ölçeğinin logaritmik olduğu düşünüldüğünde, katkısız kil ile %3 katkılı kil arasındaki pH değeri artışının yaklaşık 6 kat olduğu belirlenmiştir. Bazik olan CuO’nun bu artışa neden olduğu düşünülmektedir. pH değerindeki değişim zemin-su ilişkisini etkilemekte olup zeminlerin yapısal özelliklerini değiştirebilmektedir. Genel olarak düşük pH değeri flokülasyona (topaklanmaya) ve yüksek pH değeri ise dispersiyona neden olmaktadır. Ünver (2015) yaptığı çalışmada, pH değerinin düşük olmasının zeminde flokülasyonu arttırdığını ve buna bağlı olarak gevşek zemin koşullarını oluşturduğunu, diğer taraftan pH değerinin yüksek olmasının ise dispers yapının ve sıkı zemin koşullarının oluşmasına neden olduğunu belirlemiştir. Benzer bir durumun nano-CuO katkılı numunelerde de olacağı ve dayanıma olumlu yönde etki edeceği düşünülmektedir.

Ayrıca Ünver (2015) yaptığı çalışmada, pH değerindeki değişimin kil danelerinin adsorpsiyon özelliklerini etkilediğini tespit etmiştir. Yüksek pH değerinde adsorpsiyonun arttığını ve kil danelerinin pozitif yüklü hale geldiğini, düşük pH değerinin ise kil danelerinin elektriksel potansiyelini düşürdüğünü belirlemiştir. Benzer davranış nano-CuO katkılı numunelerde de tespit edilmiş olup pH değeri arttıkça EC değerinin arttığı belirlenmiştir.

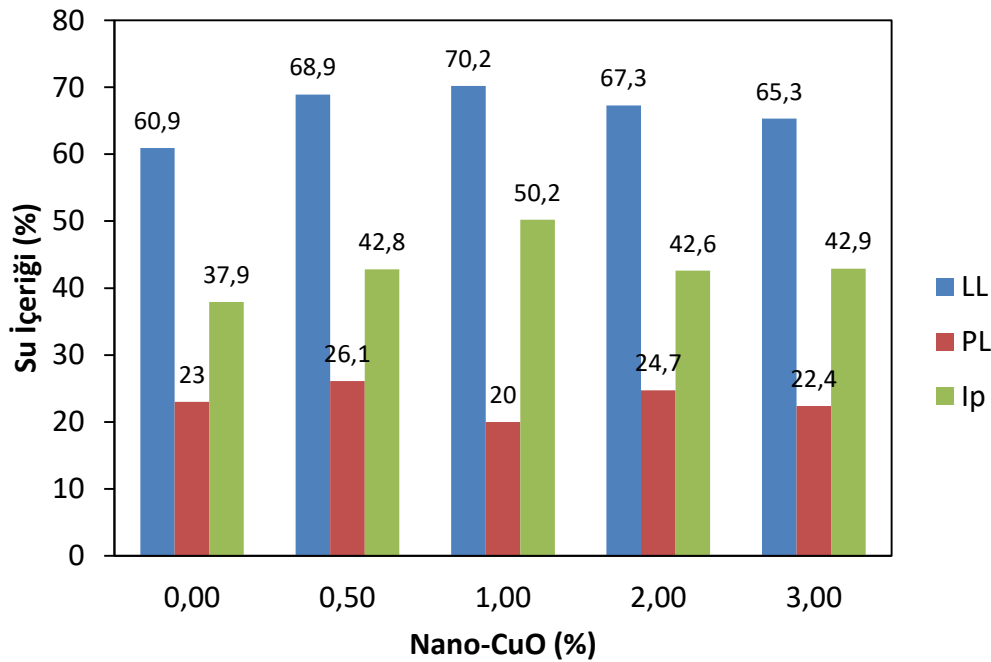


Şekil 5. pH ~ nano-CuO ilişkisi

Katkısız kil ve kompozit kil numuneler üzerinde yapılan likit ve plastik limit deney sonuçları Şekil 6’da verilmiştir. Likit limit (LL) değerleri incelendiğinde katkısız kilde % 60.9 olan LL değeri, katkı oranı arttıkça %1 nano-CuO kadar kademeli olarak artarak %70.2 değerine ulaşmıştır. LL değerindeki artış %1 nano-CuO katkılı kompozit kilde yaklaşık %15’tir. %1 nano-CuO’dan sonra bir azalma eğilimine girdiği ve nihai olarak %3 nano-CuO’da % 65.3 değerine düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 6). Ancak, katkısız kilin LL değeri ile %3 katkılı kompozit kilin LL değeri karşılaştırıldığında, LL değerinin yine de yaklaşık %7 arttığı belirlenmiştir. Farklı adsorpsiyon özelliklerine sahip nano-CuO katkılı kil daneleri arasındaki diffüz çift tabakanın (diffuse double layer, DDL) değişmesinin sebep olduğu düşünülmektedir (Moavenian ve Yasrobi, 2008; Zaimoğlu ve ark., 2016).

Şekil 6’da plastik limit (PL) değerleri incelendiğinde ise artış-azalış trendinin olduğu görülmektedir. Katkısız numunenin plastik limit (PL) değeri %23 iken %0.5 nano-CuO içeren numunenin PL değeri %26.1’e yükselmiş ve %1 nano-CuO içeren numunenin PL değeri ise %20’ye düşmüştür. Diğer taraftan, %2 nano-CuO içeren numunenin PL değeri tekrar artarak %24.7’ye yükselmiş ve daha sonra %3 nano-CuO içeren numunede ise PL değeri azalarak %22.4 ulaştığı belirlenmiştir. Plastik limit değeri için genel olarak kayda değer bir değişimin olmadığı söylenebilir.

Plastisite indeksi (Ip) irdelendiğinde ise likit limite benzer bir davranışın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6). Ip değeri katkı oranı arttıkça %1 Nano-CuO’ya kadar artmış ve bu noktadan sonra azalmıştır.



Şekil 6. Kıvam limitleri ~ nano-CuO ilişkisi

SONUÇ

Bu çalışma, nano-CuO partiküllerinin bir CH kilin kıvam limitleri, pH ve elektrik iletkenlik değerlerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvarında kıvam limitleri, elektrik iletkenlik, pH analiz deneyleri yapılmıştır. Kil zemine %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarda nano-CuO ilave edilerek üretilen kompozit numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Katkısız kilin EC değeri 78.8 ms cm^{-1} olarak ölçülmüş ve Nano-CuO katkı oranı arttıkça EC değeri kademeli olarak artarak %3 nano-CuO katkılı kompozit numunede 114.1 ms cm^{-1} değerine ulaşmıştır.
- Katkısız ve katkılı kompozit numunelerin pH ölçümleri değerlendirildiğinde ise genel olarak nano-CuO katkı oranı arttıkça pH değerinde (%0.5 nano-CuO hariç) bir artış olduğu tespit edilmiştir.
- %0.5 nano-CuO katkılı kompozit numunenin pH değeri katkısız numuneye göre 8.37’den 7.87 değerine düşmüştür. Diğer taraftan, %3 nano-CuO katkılı kompozit kilin pH değeri 9.00 olarak ölçülmüştür. pH ölçeğinin logaritmik olduğu düşünüldüğünde, katkısız kil ile %3 katkılı kil arasındaki pH değeri artışının yaklaşık 6 kat olduğu belirlenmiştir.

- Katkısız numunenin likit limit (LL) değerleri katkılı kompozit numunelerinin LL değeri ile mukayese edildiğinde, genel olarak katkılı kompozit numunelerin LL değerlerinin katkısız numunenin LL değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, LL değerinin %1'den fazla nano-CuO karıştırılan numunelerde bir azalma eğilimine girdiği ve nihai olarak %3 nano-CuO içeren numunede %65.3 değerine düştüğü tespit edilmiştir.
- Katkısız numunenin plastik limit (PL) değeri %23 iken %0.5 nano-CuO içeren numunenin PL değeri %26.1'e yükselmiş ve %1 nano-CuO içeren numunenin PL değeri ise %20'ye düşmüştür. Diğer taraftan, %2 nano-CuO içeren numunenin PL değeri tekrar artarak %24.7'ye yükselmiş ve daha sonra %3 nano-CuO içeren numunede ise PL değeri azalarak %22.4 ulaştığı belirlenmiştir.
- Plastisite indisi (Ip) değeri katkı oranı arttıkça %1 nano-CuO içeren numuneye kadar artmış ve bu katkı oranından sonra nano-CuO içeriği arttıkça azalmıştır. Bu durum fiziksel olarak Ip değerinin hesaplanmasından kaynaklanmaktadır (Ip= LL-PL). Katkı oranının artmasıyla PL'deki değişim ihmal edilebilir seviyedeysen ve Ip değerindeki bu durum ise LL'deki değişime benzer bir trend ortaya çıkarmıştır.

Literatürde nano-CuO katkılı killere ait araştırmalar yeni bir konudur. Bu nedenle farklı nano partiküller farklı zemin çeşitleri farklı oranlar kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abu-Hassanein HS, Benson CH and Blotz LR, 1996, The Electrical Resistivity of Compacted Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5): 397–406.
- Akbulut RK, 2008. Yüzeysel aktif madde ile muamele edilen kilin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arabani M, Haghi AK, Mohamadzadeh Sani A, Kambozia N, 2012. Use of nanoclay for improvement the microstructure and mechanical properties of soil stabilized by cement. *Proceeding of the 4th International Conference on Nanostructures (ICNS4)*, 12–14 March 2012, Kish Island, Iran.
- ASTM D 698-00a, 2003. Standard Test Method for Laboratory compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society For Testing and Materials, 04.08, West Conshohocken, pp. 78–87.
- ASTM D 4318, 2003. Standart Test Methods for Liquid Limite, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society For Testing and Materials, 04.08, West Conshohocken, pp. 582-595.
- Baykara T, 2008. Malzeme Enstitüsü Nano-malzeme Araştırmaları. Nano Teknolojide Ürüne Dönüştürülebilir Araştırma ve Ticarileştirme Konferansı ve Proje Pazarı, 22-23 Aralık 2008, İstanbul.
- Bryson LS and Bathe A, 2009, Determination of Selected Geotechnical Properties of Soil Using Electrical Conductivity Testing. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 3
- BS 1377-2, 1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests. British Standard, 31 August 1990.
- Ghasabkolaei N, 2013. The Effect of Using Nanoparticles on Geotechnical Properties of Cement-Stabilized Clay. Babol Noshirvani University of Technology Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis (Printed).
- Kalinski RJ and Kelly WE, 1993. Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity. *Geotechnical Testing Journal*, 16(3): 323–329.
- Kananizadeh N, Ebadi T, Rizi SEM, Khoshniat SA, 2011. Behavior of nanoclay as an additive in order to reduce Kahrizak landfill clay permeability. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, 26–28 February 2011, Singapore.
- Lee SY, Cho JW, Hahn PS, Lee M, Lee BY, Kim JK, 2005. Microstructural changes of reference montmorillonites by cationic surfactants. *Applied Clay Science*, 30: 174-180.
- Lou HL, Hsiao DH, Lin CK, 2012. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 1 (1): 83–100.

- Moavenian MH and Yasrobi SS, 2008. Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant. *Applied Clay Science*, 39(1): 60-71, DOI: 10.1016/j.clay.2007.04.009.
- Taha MR, Taha OME, 2012. Influence of nanomaterial on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of Nanoparticle Research*, 14: 1190.
- Ünver E, 2015. Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yoon KH, Choi WJ, Kang DH, 2000. PHotovoltaic properties of copper oxide thin films coated on an n-Si substrate. *Thin Solid Films*, 37: 250-256
- Zaimoglu AS, Tan O and Akbulut RK, 2016. Optimization of Consistency Limits and Plasticity Index of Fine-grained Soils Modified with Polypropylene Fibers and Additive Materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20: 662. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0540-8>