




Al₂O₃ Nanopartikülleri İçeren Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler Kullanılarak Na Bentonit-Su Bazlı Sondaj Çamurlarının Reolojik ve Filtrasyon Özelliklerinin Geliştirilmesinde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Deneysel Araştırma

Abdullah ÖZKAN¹, Nilay Hayriye ASKER², Vildan ÖZKAN³

^{1,2,3}Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun/Hatay, Türkiye

✉: abduallah.ozkan@iste.edu.tr,  0000-0002-6799-2396,  0000-0001-8546-0820,  0000-0001-8719-9099

Geliş (Received): 24.08.2020

Düzeltilme (Revision):10.10.2020

Kabul (Accepted): 25.11.2020

ÖZ

Sondaj çamuru kuyu tabanın temizlenmesi, yüksek basınçlı formasyonları kontrol etme, korozyona karşı koruma gibi önemli görevleri yerine getiren hayati derece öneme sahip bir akışkandır. Bu çalışmada Al₂O₃NP/ÇDKNT; kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile üretilmiş, X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ve Geçirimli Elektron Mikroskopu (TEM) ile karakterize edilmiş, ardından su bazlı sondaj çamurlarına farklı oranlarda (0.001 – 0.01% k/h) eklenmiştir. Hazırlanan sondaj çamurlarının plastik viskozitesi (PV), görünür viskozitesi (AV), kopma noktası (YP), jel mukavemeti (10 saniye ve 10 dakika) gibi reolojik analizleri FANN viskozimetresi ile, sıvı (filtrasyon) kaybı ve sondaj çamuru kek kalınlığı analizleri de Amerikan Petrol Enstitüsü (API) sıvı kaybı test ekipmanları ile API standartlarına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Katkısız su bazlı sondaj çamuru ile karşılaştırıldığında; Al₂O₃NP/ÇDKNT'ün su bazlı sondaj çamurlarının PV değerini %85.7, AV değerini %41.8, YP değerini %20, 10 saniye ve 10 dakika değerlerini sırasıyla %16.6 ve %11 oranında arttırdığı, filtrasyon kaybı değerini %13.8 oranında azalttığı; aynı zamanda kek kalınlığı değerini de %18.5 oranında arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonelleştirilmiş Çok Katmanlı Karbon Nanotüp, Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi, Nanopartikül Madde, Su Bazlı Sondaj Çamuru

A Novel Approach to Improve the Rheological and Filtration Properties of Na Bentonite - Water Based Drilling Muds Using Multi-Walled Carbon Nanotubes Decorated with Al₂O₃ Nanoparticles: Experimental Investigation

ABSTRACT

Drilling mud is a vitally important fluid that performs important tasks such as cleaning the bottom of the well, cooling and lubricating the drill string, controlling high pressure formations and protecting against corrosion. In this study Al₂O₃NPs/MWCNTs was produced by chemical vapor deposition (CVD) method, characterized by X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) and Transmission Electron Microscopy (TEM), and then added to water based drilling fluids in different ratios (0.001 - 0.01% w/v). The rheological analyzes of the prepared drilling fluids such as plastic viscosity (PV), apparent viscosity (AV), breaking point (YP), gel strength (10 seconds and 10 minutes) were performed by FANN viscometer and loss of liquid (filtration) and drilling fluid cake thickness analyzes were performed by American Petroleum Institute (API) liquid loss test equipment. Compared with pure water based drilling fluid; Al₂O₃NPs/MWCNTs increased the PV value of water based drilling fluid by 85.7%, AV value by 41.8%, YP value by 20%, 10 seconds and 10 minutes by 16.6% and 11% respectively, and decreased filtration loss value by 13.8%; At the same time, the value of cake thickness increased by 18.5%.

Keywords: Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube, Chemical Vapor Deposition Method, Nanoparticle Substance, Water Based Drilling Mud

GİRİŞ

Bir rezervuara ulaşmak için ilk basamak sondaj operasyonudur. Bu operasyonun doğru bir şekilde planlanması, geliştirilmesi ve verimliliğinin artırılmasında sondaj çamurları önemli rol oynar. Sondaj çamurları değişen ortam koşulları göz önünde bulundurulduğunda, su bazlı, hava bazlı ve yağ bazlı olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Su bazlı sondaj çamurları diğer çamur türleri ile kıyaslandığında daha

ekonomik olup, sondaj operasyonlarının yaklaşık % 80'inde kullanılmaktadır [1-4]. Su bazlı sondaj çamurları; su, bentonit ve çeşitli katkı kimyasallarının belirli oranlarda birbiri ile karıştırılmasıyla elde edilir [5]. Sondaj operasyonlarını sıkıntısız bir şekilde tamamlamak ve maliyetini düşürmek için, sondaj çamurlarının reolojik ve filtrasyon özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir. Özellikle nano ve mikro boyutlu

malzemeler eklenerek sondaj çamurlarının özelliklerinin daha da iyileştirilmesi hedeflenmektedir [6-10]. Nano boyutlu malzemeler 1-100 nm boyutunda olup oldukça geniş yüzey alanına sahip olmasından dolayı kuyu stabilitesini artırarak delme işlemini kolaylaştırmak, açığa çıkan kırıntıların rahat bir şekilde yüzeye taşınması sağlamak, filtrasyon kaybını ve kek kalınlığını azaltmak gibi birçok sondaj sorununun çözülmesinde önemli katkıda bulunmaktadır [11-20].

Özkan, A., 2018 yaptığı çalışmada çok duvarlı karbon nanotüpü (ÇDKNT) kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle sentezleyerek, su bazlı sondaj çamuruna 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 ve 0.1 % k/h oranlarında eklemiş ve bu çamurları API standartlarına göre test etmiştir. Analiz sonuçlarına göre araştırmacı; ÇDKNT'ün su bazlı sondaj çamuruna olumlu etki ettiğini ve en iyi katkılama oranının % 0.1 k/h olduğunu belirtmiştir [21]. Bég ve ark., 2018'de; su bazlı sondaj çamuruna farklı konsantrasyonlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartikül maddeleri ekleyerek sondaj çamurunun görünür viskozite, plastik viskozite ve jel mukavemeti değerleri üzerindeki olası etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda TiO_2 nanopartiküllerinin SiO_2 nanopartiküllerine oranla daha olumlu etki ettiği ve en iyi katkılama oranının da 0.60 % (k/h) olduğunu bulmuşlardır [22].

Özkan, A., 2020'de yaptığı çalışmada; altın nanopartikülü içeren çok duvarlı karbon nanotüpü su bazlı sondaj çamuruna farklı oranlarda ekleyerek olası etkilerini tespit etmeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda altın nanopartikülü ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpünün su bazlı sondaj çamuruna olumlu yönde etki ettiğini tespit etmiştir. Söz konusu çalışma ile su bazlı sondaj çamurunun plastik viskozite değerinin % 85.7, görünür viskozite değerinin % 113, kopma noktası değerinin % 187.5, jel mukavemeti değerlerinin (10 s ve 10 dk) % 275, % 166.6 oranında arttığını, aynı zamanda su kaybı değerinin de % 6 oranında azaldığını bulmuştur [23].

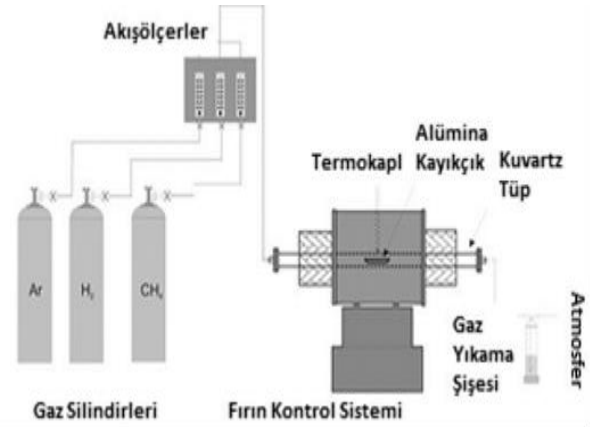
Bu çalışmada; kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile Al_2O_3 nanopartikülü içeren çok duvarlı karbon nanotüp sentezlenmiş ve su bazlı sondaj çamurlarına 0.001, 0.05 ve 0.01 konsantrasyonlarında (% k/h) eklenmiştir. Al_2O_3 NP/ÇDKNT katkılı sondaj çamurlarının; plastik viskozitesi, görünür viskozitesi, jel mukavemeti gibi reolojik özellikleri FANN 35 Viskometre cihazı ve su kaybı ile sondaj çamuru kek kalınlığı ise Amerikan Petrol Enstitüsü (API) sıvı kaybı test ekipmanları kullanılarak, API standartlarına göre detaylı bir şekilde analiz edilmiştir [24, 25].

MATERYAL ve YÖNTEM

Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT) Sentezi

Çok duvarlı karbon nanotüp yaygın olarak kullanılan kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile sentezlenmiştir. Bu yöntem; yüksek sıcaklıktaki (2000°C) metal katalizörün yerleştirildiği borusal reaktörden geçen hidrokarbon buharının ısıl bozunması temeline dayanır. Genel olarak CVD reaktörü Şekil 1'de görüldüğü gibidir. CVD reaktörü, esas olarak

silisyum karbon (SiC) ısıtıcı elementli sıcak cidarlı fırın, kuvars tüp (20 mm çapında) ve gaz akış ölçerlerden oluşmaktadır [26].



Şekil 1. Kimyasal Buhar Biriktirme Reaktörü

CVD yönteminin ilk basamağında metal nano partiküller substrat (silisyum) üzerinde tutturulur. İkinci basamakta substrat H_2 veya NH_3 ortamında yaklaşık 30 dak ısıtılarak nano partiküllerin indirgenmesi sağlanır. Ardından buhar halinde grafit fırına beslenir ve 2000 °C sıcaklık ve 100 torr basınç altında katalitik bozunma sonucu metal nano partiküller üzerinde karbon birikimi sağlanır [27].

Al_2O_3 Nanopartiküllerinin Üretimi

0.5 M Sodyum Hidroksit (NaOH) içinde 1.0 M alüminyum oksit (Al_2O_3) (1:1) (h/h) süspansiyonu hazırlanmış ve ardından 75 °C'de 30 dakika boyunca kalsine edilmiştir. Daha sonra bu süspansiyon 50 °C'de 3 saat karıştırılmıştır. Elde edilen kalıntının filtrasyon işleminden sonra distile su ile yıkama işlemi gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 24 saat kurutma işlemine tabi tutularak Al_2O_3 nanopartikülleri üretilmiştir [28].

Nanopartikül/Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Kompozit Sentezi (Al_2O_3 NP/ÇDKNT)

Şekil 1'de gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilen Al_2O_3 NP/ÇDKNT'in sentezi için çok duvarlı karbon nanotüp+nanopartikül madde (1:1 h/h) içeren dispersiyon karbon kaynağı olarak kullanılmıştır. Reaksiyon öncesi ve sonrasında da inert atmosfer sağlamak için yüksek saflıkta argon (%99,999) gazı kullanılmıştır [25]. Ardından ilk olarak çok duvarlı karbon nanotüp+nanopartikül madde (1:1 h/h) içeren dispersiyon substrat (silisyum) üzerine tutturulmuştur. Daha sonra substrat H_2 ve NH_3 ortamında yaklaşık 30 dakika ısıtılmış ve nanopartiküllerin çok duvarlı karbon nanotüp üzerine tutturulması sağlanmıştır. Son olarak buhar halindeki dispersiyon fırına beslenerek, 2000 °C sıcaklık, 100 torr basınç altında ısıl bozunmaya tabi tutulmuş ve karbon nanotüp+nanopartikül birikimi sağlanmıştır [27].

Sondaj Çamurlarının Hazırlanması (WBDM) ve Analiz Edilmesi

500 g su, 32.25 g bentonit ve 14.25 g barit 15 dakika boyunca yüksek hızlı mikser ile karıştırılarak su bazlı

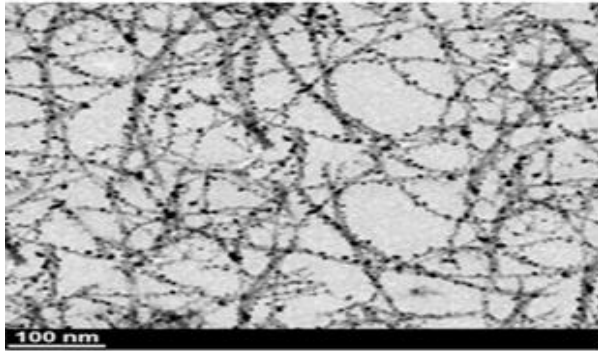
sondaj çamurları hazırlanmıştır. Daha sonra $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ 0.001, 0.005 ve 0.01 oranlarında (% k/h) ayrı ayrı sondaj çamurlarına eklenmiş ve karıştırılarak iyice homojenize edilmiştir. Homojenize edilen sondaj çamurları 16 saat boyunca oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta bekletilerek yaşlandırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan sondaj çamurlarının PV, AV, YP ve GS gibi reolojik özellikleri FANN 35 Viskometre cihazı ile, su kaybı ve sondaj çamuru kek kalınlığı Amerikan Petrol Enstitüsü (API) sıvı kaybı test ekipmanları kullanılarak, API standartlarına uygun olarak analiz edilmiştir [24, 25].

TARTIŞMA

Na-Bentonit ve $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ Karakterizasyonu
Sondaj çamuru hazırlanırken kullanılan bentonit; ARL OPTIMX model X-Ray Floresans cihazı, CVD yöntemiyle sentezlenen $Al_2O_3NP/ÇDKNT$; LeO EVO40 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) cihazları kullanılarak karakterize edilmiştir (Tablo 1, Şekil 2 ve Şekil 3). Analiz sonuçlarına (Tablo 1) göre kullanılan bentonit türünün Na-bentonit olduğu anlaşılmıştır.

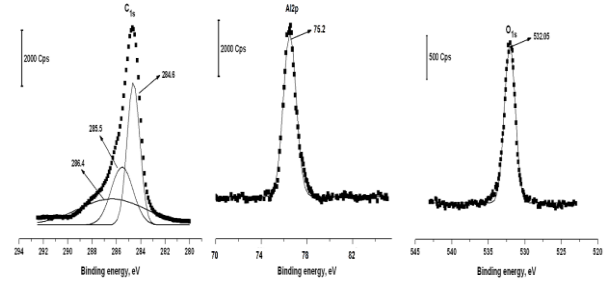
Tablo 1. Na-Bentonitin Oksit Kompozisyonu

Oksit Türü	Oksit İçeriği (%)
Na_2O	2.52
MgO	2.40
Al_2O_3	20.8
SiO_2	65.95
P_2O_5	-
K_2O	0.71
CaO	1.48
TiO_2	0.32
MnO	-
Fe_2O_3	5.82



Şekil 2. $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ 'in SEM Görüntüsü

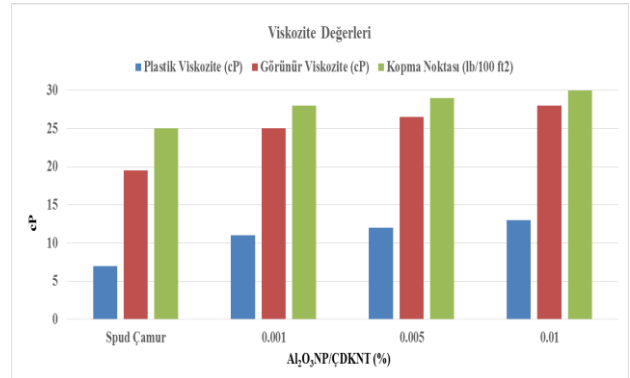
Çalışmamızda sentezlenen $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ 'e ait XPS görüntüsü incelendiğinde; $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ içerisinde alüminyum, karbon ve oksijenin bağlanma enerjilerinin sırasıyla 76.5 eV, 284.6 eV ve 532.05 eV olduğu görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde alüminyum bağlanma enerjisi değerinin 74-78 eV arası [29], C'nun bağlanma enerjisi değerinin 284 eV ve O'nin bağlanma enerjisi değerinin de 532 eV civarı olduğu ifade edilmektedir [30, 31]. Bu bilgiler ışığında sentezlenen $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ 'ün literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Sentezlenen $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ 'e ait XPS Görüntüsü

$Al_2O_3NP/ÇDKNT$ Katkılı Su Bazlı Sondaj Çamurlarının Reolojik Özellikleri

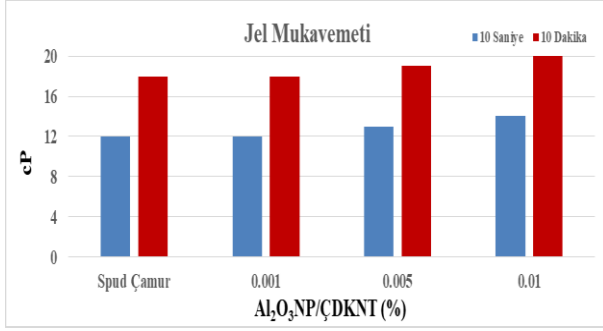
Sondaj sırasında ortam koşulları ile sondaj çamuruna eklenen katkı maddelerinden etkilenen viskozite, akmaya karşı gösterilen direnç olarak ifade edilmektedir. Fann viskozimetresinin 300 rpm ve 600 rpm kadran okumaları ile görünür viskozite (AV), plastik viskozite (PV) ve akma sınırı (kopma noktası) (YP) hesaplanmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda sondaj çamurunun viskozite değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ Katkılı Su Bazlı Sondaj Çamurunun Viskozite Değerleri

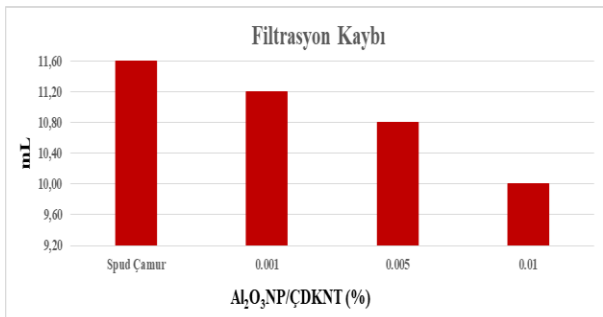
Şekil 4 incelendiğinde sondaj çamurlarında $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ miktarının artmasıyla orantılı olarak PV, AV ve YP değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca katkısız sondaj çamuruna (spud) kıyasla $Al_2O_3NP/ÇDKNT$ içeren sondaj çamurlarında PV, AV ve YP değerlerinde sırasıyla % 85.7, % 41.8 ve % 20 oranında bir iyileşmenin olduğu tespit edilmiştir. Yüksek viskozite değerine sahip sondaj çamurları sondaj pompasında aşırı basınca, benzer şekilde düşük viskoziteli sondaj çamurlarının da derin rezervuarların sondajı için uygun olmayan düşük bir hidrostatik basınca neden olmasından dolayı pek tercih edilmez [32]. Bu nedenle, sondaj çamuru, çamur viskozitesi ile doğrudan ilişkisi olan hidrostatik basıncı geliştirmek için uygun bir viskoziteye sahip olmalıdır [33]. Oda sıcaklığındaki bir sondaj çamurunun PV değerinin 18-29 cP aralığında olması gerektiği [34] göz önünde bulundurulduğunda çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçların bu tarz sıkıntıların giderilmesine yönelik yarar sağlayacağı tespit edilmiştir.

Jel mukavemeti (GS) hareketsiz haldeki sondaj çamurunun içindeki kırıntıları askıda tutma yeteneğidir. Jel mukavemeti, statik şartlar altında, akışkan içindeki elektrokimyasal kuvvetlerin şiddetini de temsil eder [35]. Jel mukavemeti değerinin çok yüksek olması durumunda, pompalar üzerinde aşırı baskı oluşturup kuyu içerisinde duran çamur sirkülasyonunun tekrar başlamasını engeller [32]. Şekil 5'te çalışma sonucunda elde edilen jel mukavemetine ait sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 5. Al₂O₃NP/ÇDKNT Katkılı Su Bazlı Sondaj Çamurunun Jel Mukavemeti Değerleri

Al₂O₃NP/ÇDKNT miktarının artmasıyla orantılı olarak jel mukavemeti (10 s ve 10 dk) değerlerinin de arttığı görülmektedir. Her ne kadar bu artış istenirse de, çalışma sonucunda elde edilen değerler referans değerlerden (10 için 15, 10 dk için 31) düşük olduğu için, sondaj çamuruna olumsuz yönde herhangi bir etki söz konusu olmayacaktır. Sondaj çamurlarında yüksek miktarda filtrasyon (sıvı) kaybı, formasyonda hasar, kuyu içi kararsızlık ve sondaj borularının yapışması gibi olumsuz etkilere sebebiyet oluşturabileceğinden dolayı arzu edilmez [32]. Olası bu sıkıntıların yaşanmaması için, çamur filtrat katkı maddeleri ilave edilmektedir. Çalışmamız sonucunda elde edilen sonuçlar (Şekil 6) incelendiğinde filtrasyon kaybının Al₂O₃NP/ÇDKNT miktarının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Al₂O₃NP/ÇDKNT ilavesinin sondaj çamuru filtrasyon kaybını % 13.8 azalttığı ve kuyu içi dengenin sağlanması adına olumlu yönde etti ettiği tespit edilmiştir.

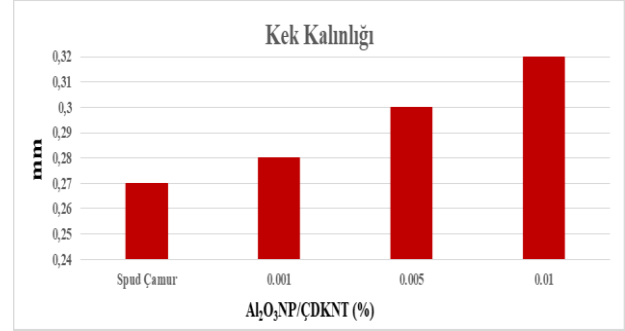


Şekil 6. Al₂O₃NP/ÇDKNT Katkılı Su Bazlı Sondaj Çamurunun Filtrasyon Kaybı Değerleri

Sondaj akışkanı basıncına bağlı olarak kuyudan formasyona ya da formasyondan kuyuya sürekli bir akış söz konusudur. Bu açıdan değerlendirildiğinde sondaj çamurunun en önemli görevlerinden birisinin de sondaj

kuyusunun bütünlüğünü korumak olduğu anlaşılmaktadır. Kalın filtrat keki, stabil ve düşük maliyetli bir kuyu içi işlem için tercih edilmez.

Yaptığımız bu çalışmada sondaj çamurundaki Al₂O₃NP/ÇDKNT konsantrasyonunun artışla birlikte kek kalınlığının da arttığı görülmektedir (Şekil 7). İstenmeyen bu artış maksimum kek kalınlığı değeri olan 4 mm'den düşük olduğu için tolere edilebilecek seviyededir.



Şekil 7. Al₂O₃NP/ÇDKNT Katkılı Su Bazlı Sondaj Çamurunun Kek Kalınlığı Değerleri

SONUÇ

Bu çalışmada; Al₂O₃NP/ÇDKNT'in su bazlı sondaj çamuruna 0.001, 0.005 ve 0.01 % (k/h) oranlarında eklenmesi sonucu reolojik ile filtrasyon özelliklerindeki olası değişimler araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak; CVD yöntemiyle Al₂O₃NP/ÇDKNT sentezlenmiş, SEM ve XPS ile karakterize edilmiştir. Ardından Al₂O₃NP/ÇDKNT'in su bazlı sondaj çamurlarına eklenmesi ile hazırlanan sondaj çamurlarının PV, AV, YP, GS (10 s ve 10 dk), filtrasyon kaybı ve kek kalınlığı analizleri API standartlarına uygun şekilde analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilen ışığında Al₂O₃NP/ÇDKNT eklenmiş sondaj çamurunun, spud (Al₂O₃NP/ÇDKNT eklenmemiş) çamura kıyasla;

- PV değerinin % 85.7;
- AV değerinin % 41.8;
- YP değerinin % 20;
- 10 s değerinin % 16.6;
- 10 dk değerinin % 11;
- Kek kalınlığı değerini % 18.5 oranında arttırdığı,
- Filtrasyon kaybı değerinin de % 13.8 oranında azaldığı görülmüştür.

Çok duvarlı karbon nanotüp, nanopartikül ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp, grafen oksit gibi nanomalzemelerin çok düşük miktarlarının bile, sondaj çamurlarının performanslarında önemli ölçüde olumlu katkı sağladıkları tespit edilmiştir [21], [23], [36], [37]. Bu açıdan değerlendirildiğinde sondaj operasyonuna ek bir maliyet oluşturmaması ve uygulama noktasında sıkıntı yaratmayacağından dolayı nanomalzemelerin sondaj çamuru katkı maddesi olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların devam etmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Berthezene N., De Hemptinne J.C., Audibert A., Argillier J.F. Methane solubility in synthetic oil-based drilling muds. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23:2 71-81, 1999.
- [2] Sadeghalvaad M., Sabbaghi S. The effect of the TiO₂/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties. *Powder Technology*, 272 113-119, 2015.
- [3] Adewumi M.A., Tian S. Multiphase hydrodynamic analysis of pneumatic transportation of drill cuttings in air drilling. *Powder technology*, 75:2 133-144, 1993.
- [4] Özkan A., Turan S.E., Kaplan B.M. Investigation of Fly Ash Effect on Rheological and Filtration Properties of Drilling Muds. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27:12A 9189-9194, 2018a.
- [5] William J.K.M., Ponmani S., Samuel R., Nagarajan R., Sangwai J.S. Effect of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum on thermal, electrical and high pressure rheology of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 117 15-27, 2014.
- [6] Özkan A., Özkan V. Effect of Clinoptilolite-Rich Zeolite on the Properties of Water Based Drilling Fluid. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28:3 2232-2237, 2019.
- [7] Singh S.K., Ahmed R.M., Growcock F. Vital role of nanopolymers in drilling and stimulations fluid applications. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Floransa, İtalya. 19-22 Eylül, 2010.
- [8] Özkan A., Kaplan B.M. Investigation of the Effects on Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Mud of Boron Minerals: An Experimental Study. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25:7 884-888, 2019.
- [9] Bicerano J. Drilling fluid, drill-in fluid, completion fluid, and workover fluid additive compositions containing thermoset nanocomposite particles; and applications for fluid loss control and wellbore strengthening. U.S. Patent Application No. 12/178, 785, 2009.
- [10] Özkan A., Kaplan B.M., Özkan V., Turan S.E. Effect of Micro-Sized Colemanite on the Rheological Properties of the Water Based Drilling Fluid. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 33:4 83-88, 2018b.
- [11] Dahman Y. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*. Elsevier, 2017.
- [12] Afolabi R.O., Orodu O.D., Seteyeobot I. Predictive modelling of the impact of silica nanoparticles on fluid loss of water based drilling mud. *Applied Clay Science*, 151 37-45, 2018.
- [13] Smith S.R., Rafati R., Haddad A.S., Cooper A., Hamidi H. Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 537 361-371, 2018.
- [14] Abdo J., Haneef M.D. Nano-enhanced drilling fluids: pioneering approach to overcome uncompromising drilling problems. *Journal of Energy Resources Technology*, 134:1 014501, 2012.
- [15] Kang Y., She J., Zhang H., You L., Song M. Strengthening shale wellbore with silica nanoparticles drilling fluid. *Petroleum*, 2:2 189-195, 2016.
- [16] Mao H., Qiu Z., Shen Z., Huang W. Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 129 1-14, 2015a.
- [17] Mao H., Qiu Z., Shen Z., Huang W., Zhong H., Dai W. Novel hydrophobic associated polymer based nano-silica composite with core-shell structure for intelligent drilling fluid under ultra-high temperature and ultra-high pressure. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25:1 90-93, 2015b.
- [18] Bybee K. Water-Based Drilling-Fluid Systems for Deepwater Norway. *Journal of Petroleum Technology*, 53:11 36-36, 2001.
- [19] Elward-Berry J., Thomas E.W. Rheologically Stable Deepwater Drilling Fluid Development and Application. In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers. Dallas, Texas, 15-18 Şubat, 1994.
- [20] Javeri S.M., Haindade Z.M.W., Jere C.B. Mitigating loss circulation and differential sticking problems using silicon nanoparticles. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Muscat, Oman, 24-26 Ekim, 2011.
- [21] Özkan A. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Water-Based Drilling Muds. *Mus Alparslan University Journal of Science*, 6:2 591-594, 2018.
- [22] Bég O.A., Espinoza D.S., Kadir A., Shamshuddin M.D., Sohail A. Experimental study of improved rheology and lubricity of drilling fluids enhanced with nano-particles. *Applied Nanoscience*, 8:5 1069-1090, 2018.
- [23] Özkan A. Effect of gold nanoparticle functionalized multi-walled carbon nanotubes on the properties of Na-bentonite water based drilling fluid. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29:1 143-151, 2020.
- [24] API RP 13B-1. Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids. API. 4th Edition, 2009.
- [25] Specifications, API, 13A. Specification for Drilling Fluid Materials, API. 2010.
- [26] Shah K.A., Najjar F.A., Sharda T., Sreenivas K. Synthesis of multi-walled carbon nanotubes by thermal CVD technique on Pt-W-MgO catalyst. *Journal of Taibah University for Science*, 12:2 230-234, 2018.
- [27] In J.B., Cho K.R., Tran T.X., Kim S.M., Wang Y., Grigoropoulos C.P., Fornasiero F. Effect of Enhanced Thermal Stability of Alumina Support Layer on Growth of Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Application in Nanofiltration Membranes. *Nanoscale research letters*, 13:1 173, 2018.
- [28] Ansari M.A., Khan H.M., Alzohairy M.A., Jalal M., Ali S.G., Pal R., Musarrat J. Green synthesis of Al₂O₃ nanoparticles and their bactericidal potential against clinical isolates of multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31 153-164, 2015.
- [29] Lv X., Hu Z., Ren J., Liu Y., Wang Z., Yuan Z.Y. Self-supported Al-doped cobalt phosphide nanosheets grown on three-dimensional Ni foam for highly efficient water reduction and oxidation. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 6:1 74-81, 2019.
- [30] Moulder J.F., Stickle W.F., Sobol P.E., Bomben K.D. *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy*, Chastain, J. Perkin-Elmer Corp., Eden Prairie, MN. 1992.
- [31] Cueto L.F., Hirata G.A., Sánchez E.M. Thin-film TiO₂ electrode surface characterization upon CO₂ reduction processes. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 37:2 105-109, 2006.
- [32] Bayat A.E., Shams R. Appraising the impacts of SiO₂, ZnO and TiO₂ nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 581 123792, 2019.
- [33] Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A.S.I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2:3 149-156, 2012.
- [34] Aftab A., Ismail A.R., Khokhar S., Ibupoto Z.H. Novel zinc oxide nanoparticles deposited acrylamide composite used for enhancing the performance of water-based drilling fluids at elevated temperature conditions. *Journal*

- of Petroleum Science and Engineering, 146 1142-1157, 2016.
- [35] Bayat A.E., Moghanloo P.J., Piroozian A., Rafati R. Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 555 256-263, 2018.
- [36] Mohideen A.A.M., Saheed M.S.M., Mohamed N.M. Multiwalled carbon nanotubes and graphene oxide as nano-additives in water-based drilling fluid for enhanced fluid-loss-control gel strength. In *AIP Conference Proceedings*, 2151:1 p. 020001. AIP Publishing, 2019.
- [37] Ismail A.R., Aftab A., Ibupoto Z.H., Zolkifile N. The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139 264-275, 2016.