

# KESİNTİ TAŞINIMININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAKLAŞIMIYLA KESTİRİMİ\*

**Ali Ettehadı Osgouei\*\***

Arş. Gör.,  
İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü,  
İstanbul  
ettehad@itu.edu.tr

**Gürşat Altun**

Yrd. Doç. Dr.,  
İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü,  
İstanbul  
galtun@itu.edu.tr

## ÖZ

Sondaj sırasında kesintilerin yüzeye etkin bir şekilde taşınmalarının önemi reddedilmeyecek bir gerçektir. Bu çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemini kullanarak çamur yoğunluğu, görünür çamur viskozitesi, çamur hızı ve kesinti boyutu gibi parametrelerin kesinti taşınımı üzerine etkilerini incelemektedir. HAD yöntemi sonuçları, rapor edilmiş bir deneysel çalışma sonuçlarıyla test edilmiştir. Tanımlı bir örnek durum problem için analitik model (Moore Korelasyonu) ve HAD analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak daha iyi bir HAD analizi değerlendirmesi, hata analizi ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve analitik hesaplamalardan elde edilenler, sonuçların çok iyi bir uyum gösterdiği ve %10'dan daha düşük bir göreceli hata verdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kesinti taşınımı, çamur özellikleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Moore korelasyonu

## MODELLING CUTTING TRANSPORT USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

### ABSTRACT

The importance of efficient cutting transport during drilling operation is an undeniable fact. This study is an attempt to investigate the effects of mud weight, mud apparent viscosity, average annular velocity, and cutting size on cutting transport using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Results of CFD method was verified with an experimentally reported study. Both analytical method (Moore Correlation) and CFD analysis method were applied to a well-defined study case. Obtained results were compared to have better evaluation of CFD application along with error analysis. Simulating effects of average annular velocity, apparent viscosity, mud density, and cutting size on transport ratio using CFD were in a good agreement with analytical calculations with a relative error less than 10%.

**Keywords:** Cutting transport, mud properties, computational fluid dynamics, Moore correlation

\*\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.04.2015  
Kabul tarihi : 26.05.2015

\* 8-11 Nisan 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İzmir'de düzenlenen 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde sunulan bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Osgouei, A. E., Altun, G. 2015. "Kesinti Taşınımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımıyla Kestirimi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 664, s. 32-47.

## 1. GİRİŞ

Sondaj sırasında kesintilerin etkin bir şekilde yüzeye taşınmasının gerekliliği yadsınamayacak önemi olan bir gerçektir. Bu nedenle, konunun daha iyi anlaşılabilmesi için teorik çalışmaların yanı sıra, çok sayıda deneysel çalışma da yapılmıştır. Ancak, deneysel çalışmaların önemli bir bölümü fiziksel kısıtlamalar altında gerçekleştirilebilmiştir. Deneysel çalışmaların zor ve sistemlerin kurulması ve işletilmesinin pahalı olmaları nedeniyle, günümüzde bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak simülasyon çalışmaları bu konudaki açığı doldurmak için giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akış problemlerinin yer aldığı mühendislik konuları araştırma çalışmalarında yeni bir yaklaşım sağlamaktadır. Analitik ve deneysel olarak geliştirilmiş ampirik denklemler kullanılarak elde edilemeyen parametreler ve analitik çözümü olmayan problemler, sayısal çözüm yöntemi kullanan HAD gibi yaklaşımlar ile elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, HAD, yöntemi kullanılarak çamur yoğunluğu, görünür çamur viskozitesi, ortalama anülüs çamur hızı ve kesinti boyutu gibi bağımsız değişkenlerin kuyu temizliği üzerine olan etkileri incelenmektedir. Kuyu anülüsünde kesintilerin taşınması işleminin matematiksel modelinin oluşturulması için Navier-Stokes denklemleri, süreklilik denklemi ve Newtonian olmayan akışkan reolojisi modeli kullanılmıştır. HAD yöntemi sonuçları, rapor edilmiş bir deneysel çalışma sonuçlarıyla test edilmiştir. Hem Moore korelasyonu kullanan analitik model hem de HAD analizi, tanımlı bir örnek durum problemi için uygulanmıştır. Ayrıca daha iyi bir yorumlama yapabilmek amacıyla, hata analizi de gerçekleştirilerek HAD analizinin etkinliği, özellikle eksik veri veya analitik çözümlerin olmadığı durumlar için gösterilmektedir.

### 1.1 Literatür Çalışması

Sondaj sırasında kesinti taşınımı üzerine etki eden parametreler ve önemlerini belirleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, yaygın olarak olayın fiziği üzerine etki eden kesinti (parçacık) boyutu, akış debisi, görünür viskozite, reolojik model (Newtonian veya Newtonian olmayan), viskozite gibi değişkenlerin etkileri incelenmiştir.

Hussain ve Azar [1] yaptıkları çalışmada, kesinti boyutu, görünür viskozite (GV), akma noktası (YP), plastik viskozitenin (PV) çamurun taşıma kapasitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Zeidler'in ampirik transfer (transport) modelini kullandıkları çalışmalarında, anülüs hızı çamur taşıma kapasitesine etkisinin çok önemli olduğunu, taşıma kapasitesinin YP/PV oranının artmasıyla arttığını, düşük (12 inç/s) ve orta (18 inç/s) değerli anülüs hızlarda, GV, YP ve başlangıç jel kuvvetinin

(GS) taşıma etkisinde önemli olduğunu; ancak yüksek (23.9 inç/s) hızlarda etkilerinin ihmal edilebilir olduklarını, Zeidler modelinin parçacık boyutunun 5/16 inç veya daha büyük olması durumunda etkin olduğunu belirtmişlerdir. Daha düşük parçacık boyutlarında anülüs hızının parçacık çökme hızına oranı 12 veya daha yüksek ise iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Bilgesü ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışmada, HAD kullanarak kesinti taşınımı üzerine akışkan viskozitesi, parçacık boyutu, ilerleme hızı, dizi döndürmesi ve kuyu açısının etkilerini incelemişlerdir. Küçük parçacıkların aksine büyük parçacık durumunda, kuyu temizliğinin daha etkin olduğunu, yatay kuyularda akış debisinin küçük parçacıklar üzerinde daha etkin olduğunu, dizi döndürmesinin büyük parçacıklarda daha marjinal bir etki gösterdiğini, kuyu açısının kuyu temizliği üzerinde büyük önemi olduğunu ve artan kuyu açısıyla kuyu temizliğinin ters orantılı olduğunu göstermişlerdir.

Tomren ve arkadaşları [3] yaptıkları deneysel çalışmada, kesinti taşınımı üzerine kuyu açısının, anülüs eksantrikliğinin, dizi döndürme hızının ve akış rejiminin etkilerini araştırmışlardır. Deney düzenekleri 40 ft uzunlukta olup, 200 gal/dak'ya kadar sirkülasyon hızına izin vermektedir. Çalışmalarında, 40°den yüksek açılı kuyuda kesinti yatağının oluştuğunu gözlemlemişler, kuyu açısının artırılmasıyla kuyu temizliğinin önemli oranda düştüğünü, yüksek viskoziteli akışkanların daha iyi temizlik sağladığını, 45° ve 50° orta eğimli kuyuda depolanan kesinti yataklarının akışkan yönünün aksine aşağı doğru kaydıklarını, düşey kuyuda anülüs eksantrikliğinin kuyu temizliği üzerine olan etkilerinin az veya sınırlı olduklarını belirtmişlerdir.

Ford ve arkadaşları [4] yaptıkları çalışmada, kesintilerin süspansiyonda hareketi ve ileri yönlü yuvarlanma/kayma için Minimum Transfer Hızı (MTV) analizini 21 ft uzunluğundaki deneysel sistemde incelemişlerdir. Deney düzeneği 0°-90° açılı, 0-150 dev/dak dizi döndürme hızına, 0-7 ft/s anülüs akışkan hızına ve %30, %50 ve %70 dizi eksantrikliğine izin vermektedir. MTV değerinin hem akışkan reolojisine hem de akış patternine bağlı olduğunu, artan viskozite ile MTV'nin azaldığını, dizi döndürmesinin su kullanılan deneylerde kesintilerin süspansiyonda kalmalarında veya yuvarlanma/kayma mekanizması üzerine yok veya ihmal edilebilir bir etkisinin olduğunu bildirmişlerdir.

Horeland ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada, eğimli kuyularda su bazlı ve düşük toksinli ters emülsiyon mineral bazlı petrol çamurlarında kireçtaşı kesintilerinin davranışını incelemişlerdir. Eğimli kuyularda YP ve PV değerlerinin artmasının kesinti taşınımı oranını her iki çamurda da düşürdüğünü, yüksek eğimlerde YP ve PV'nin düşürülmesinin yüksek akış debilerinde kuyu temizliğini arttırdığını, su bazlı çamurun 40-50° açı arasında daha yüksek kesinti taşıma oranı

sağladığını, her iki çamurun çok yüksek eğimli durumlarda düşük YP ve düşük PV durumlarda aynı kesinti taşıma oranı verdiğini belirtmişlerdir.

Okraji ve Azar [6], eğimli kuyularda su ve bentonit polimer çamurunun reolojik özelliklerinin kesinti taşınımı üzerine etkisini çalışmışlardır. Hem düşey ve hem de yatay kuyularda, çamurun akma (yield) değerinin kesinti konsantrasyonu üzerinde önemsiz olduğunu, çamur reolojisinin türbülanslı akışta kesinti taşınımına etkisinin önemli olmadığını, 0-45° eğimli kuyularda laminer akış durumunda YP artışı ile kesinti konsantrasyonunun düştüğünü, türbülanslı akışın aksine 0-45° eğimli kuyularda kesinti konsantrasyonunun laminer akışta daha düşük olduğunu, 45-55° açılarda türbülanslı ve laminer akış sonucu elde edilen kesinti konsantrasyonları arasındaki farkın önemsiz olduğunu, yüksek eğimli kuyularda (55-90°) kesinti konsantrasyonunun türbülanslı akışta daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Sifferman ve Becker [7] yapmış oldukları deneysel çalışmada, kuyu temizliği üzerinde çamur ağırlığının, kesinti boyutunun, dizi döndürmesinin ve kuyu eğiminin kritik etkisi olduğunu, artan çamur yoğunluğu ile kesinti yatağının azaldığını, yüksek eğimli kuyularda dizi döndürmesinin 0.08 inç'ten küçük parçacıklarda önemli bir etkisinin olduğunu, 45-60° eğimli kuyularda kesinti yatağı oluşumunun kararlı olmadığını; ancak 60-90° arasında kalıcı bir kesinti yatağı oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Zeidler [8], Newtonian akışkanlarda kesinti çökme hızını çalışmış ve korelasyon geliştirmiştir. Su ve sondaj çamurunun kesinti taşınımı üzerine yaptığı deneysel çalışmada, iç dizinin döndürülmesi ile kesintiler, yüksek akış hızını olduğu bölgeye doğru hareket ettirilerek kesinti transferinin arttığını ve türbülanslı akışta türbülans gerilmeler nedeniyle kesintilerin taşındığını belirtmiştir.

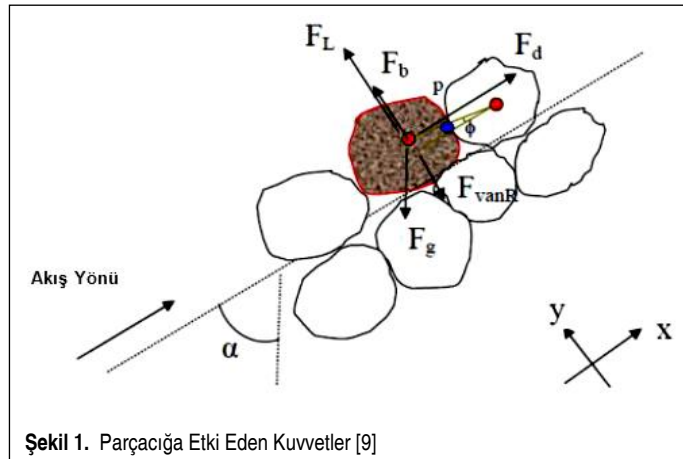
Duan ve arkadaşlarının [9] deneysel çalışmalarında, yatak oluşumu erozyonu üzerinde minimum hızın, kritik yeniden süspansiyon hızının (CRV, Critical Re-Suspension Velocity) ve kritik depolanma hızının (CDV) etkilerini su ve polimer akışkanlar kullanarak eğimli durumlarda için 0,45 mm ve 1,4 mm boyutlu parçacıklar için incelemişlerdir. Yatak oluşumunun önlenmesi için minimum CDV değerinin CRV değerinden 2 veya 3 kat fazla olması gerektiğini, 0,25 lbm/gal polimer içerikli çözeltisine göre yatak erozyonunda suyun daha etkin olduğunu, kesintilerin 0,2 mm'den küçük olması

durumunda parçacıklar arası kuvvetlerin parçacıkların yatak üzerinde hareketlerinin engellenmesinde daha etkin olduğunu belirtmişlerdir.

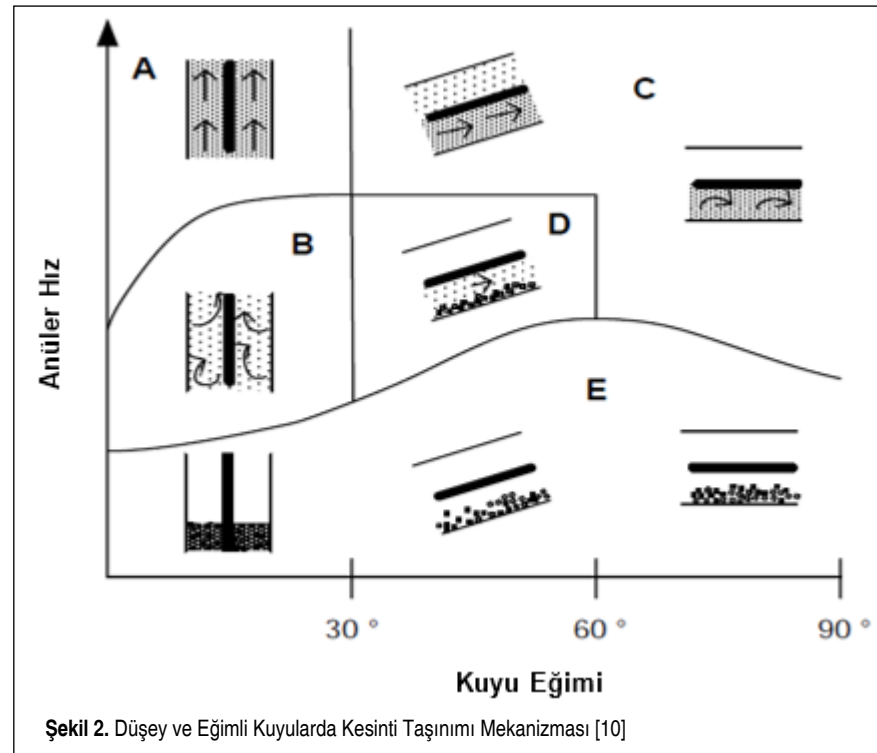
## 1.2 Kesinti Taşınımı Teorisi

Kesinti taşınımı olayı sondaj mühendisliğinde en çok ilgi duyulan konulardan biridir. İdeal koşullar için çok sayıda analitik ve ampirik korelasyonlar ve modeller geliştirilmiştir. Parçacık hareketine etkiyen çok sayıda parametre nedeniyle (örneğin akışkan reolojisi, akış patterni, sınır koşulları, kuyu geometrisi vb.), günümüzde gerçek kuyu koşullarında kesinti parçacığının nasıl davranacağı tam olarak anlaşılamamıştır.

Duan ve arkadaşlarına [9] göre, anülüste taşınan kesinti parçası bir kaç tip kuvvetin etkisindedir. Bunlar, hidrodinamik



Şekil 1. Parçacığa Etki Eden Kuvvetler [9]



Şekil 2. Düşey ve Eğimli Kuyularda Kesinti Taşınımı Mekanizması [10]

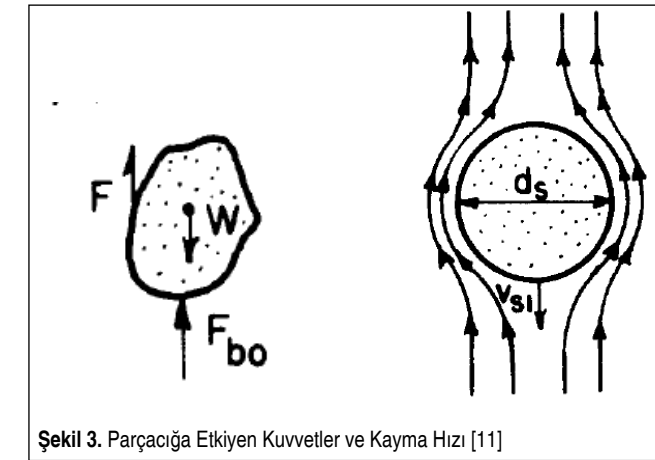
kuvvetler (sürtünme “drag” kuvveti, F<sub>d</sub>, kaldırma kuvveti, F<sub>L</sub>), statik kuvvetler (gravite kuvveti, F<sub>g</sub>, Buoyant kuvvet, F<sub>b</sub>) ve koloidal kuvvetler (Van der Waals kuvvet, F<sub>vanF</sub>) olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 1, akışkan akışı sırasında parçacığa etkileyen kuvvetleri göstermektedir.

API RP 13D'de [10] ifade edildiği gibi, eğimli kuyularda gravite etkisiyle sondaj kesintileri kuyunun düşük tarafında (low side), kesinti yatağı eğilimi içerisinde. Kuyu eğiminin ve anülör hızın fonksiyonu olarak kesintiler farklı davranacaktır. Şekil 2'de, kuyu eğimine bağlı olarak kesinti taşınımı mekanizması resimsel olarak gösterilmektedir. Burada;

- Zone A – Efektif kuyu temizliği,
- Zone B – Düşük kesinti uzaklaşımı,
- Zone C – Hareketli kesinti yataklı iyi kuyu temizliği,
- Zone D – Kısmi kuyu temizliği (kesinti yatağı oluşumu),
- Zone E – Kuyu temizliği yok anlamına gelir.

## 1.3 Newtonian Akışkanlarda Parçacık Kayma Hızı

Borgoyne ve arkadaşları [11], akışkan içerisinde aşağı doğru düşen bir katı parçacığın gravite, viskoz sürtünme ve Bouyant kuvvetlerinin etkisinde olduğunu (Şekil 3) ve parçacığa etkiyen kuvvetlerin toplamının sıfır olduğu durum için parçacık kayma hızı (slip velocity) bağıntısını ideal küre şeklindeki kesinti için vermektedir. Bu ilişki Stokes Kanununa göre geliştirilmiştir ve parçacık Reynolds Sayısının (N<sub>pre</sub>) 0.1'den küçük akış durumu (creep flow), Newtonian akışkan ve laminer akış için geçerlidir.



Şekil 3. Parçacığa Etkiyen Kuvvetler ve Kayma Hızı [11]

$$V_{sl} = \frac{d_s^2}{18\mu} (\rho_s - \rho_f) g \quad (1)$$

$$V_{sl} = \frac{138d_s^2}{\mu} (\rho_s - \rho_f) \quad (2)$$

Parçacık Reynolds Sayısının (N<sub>pre</sub>) 0.1'den büyük olduğu durumlarda, ampirik olarak geliştirilmiş olan sürtünme faktörü kullanılır. Bu durumda, sürtünme faktörü ve kayma hızı aşağıdaki bağıntılar ile verilmektedir.

$$f = 4/3 \times g d_s / v_{sl}^2 \times (\rho_s - \rho_f) / \rho_f \quad (3)$$

$$f = 3.57 d_s / v_{sl}^2 \times (\rho_s - \rho_f) / \rho_f \quad (4)$$

$$V_{sl} = 1.89 \sqrt{d_s / f \times (\rho_s - \rho_f) / \rho_f} \quad (5)$$

Bu denklemlerde yer alan semboller şunlardır:

μ : Viskozite

v<sub>sl</sub> : Kayma hızı

d<sub>s</sub> : Küresel parçacığın çapı

ρ<sub>f</sub> : Akışkan yoğunluğu

ρ<sub>s</sub> : Parçacık yoğunluğu

f : Sürtünme faktörü

Parçacık şeklinin küreden farklı olması durumunda, sürtünme faktörünün grafiksel olarak elde edilebileceği kaynaklar mevcuttur. Farklı küresellikler için ilgili grafik, Borgoyne ve arkadaşlarının [11] çalışmalarından elde edilebilir.

## 1.4 Newtonian Olmayan Akışkanlarda Parçacık Kayma Hızı ve Moore Korelasyonu

Borgoyne ve arkadaşlarının çalışmalarında [11] ifade edildiği gibi, Buoyant ve gravite kuvvetleri akışkanın GS değerini geçmedikçe, parçacık çökelmeyecektir. Yüzey alanı π d<sub>s</sub><sup>2</sup> olan küresel bir parçacığın çökmesi için gerekli minimum Buoyant ve gravite kuvveti, akışkanın GS ve yüzey alanının çarpımına eşittir. Diğer bir ifadeyle, parçacığın çökebilmesi için gerekli minimum çap, aşağıdaki bağıntıdan elde edilebilir.

$$\tau_g = d_s (\rho_s - \rho_f) / 6 \quad (6)$$

Burada;

τ<sub>g</sub> : Jel kuvveti,

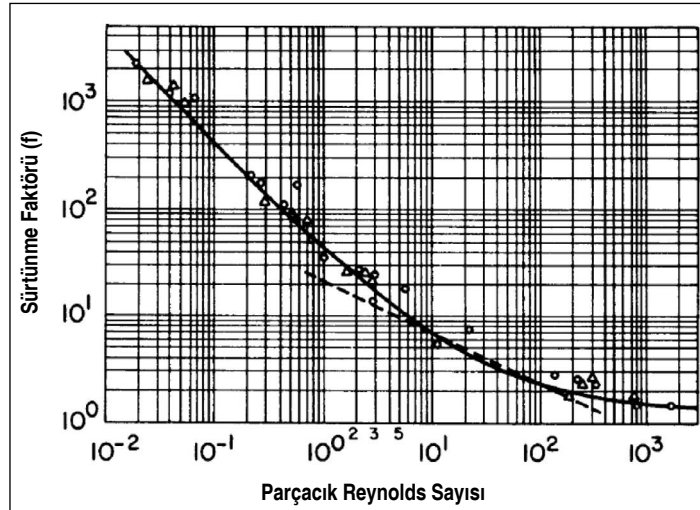
d<sub>s</sub> : Küresel parçacığın çapı,



$\rho_f$  : Akışkan yoğunluğu,

$\rho_s$  : Parçacık yoğunluğu olarak gösterilir.

Newtonian olmayan akışkan (Power Law) için kayma hızını veren korelasyonlardan biri, Moore tarafından geliştirilmiştir, [11]. Moore korelasyonu, Newtonian olmayan akışkan için eşdeğer görünür Newtonian viskozitesinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Böylece, görünür viskozitenin kullanılmasıyla parçacık Reynolds sayısı hesaplanabilmektedir. Elde edilen parçacık Reynolds sayısı, Şekil 4 ile verilen grafikte (Kireçtaşı ve şeyl kesintilerinin kullanılmasıyla deneysel olarak elde edilmiştir.) kullanılarak sürtünme faktörü belirlenebilmekte ve dolayısıyla kayma hızı belirlenerek kesinti taşımını veya kuyu temizliği değerlendirmesi yapılabilmektedir.



Şekil 4. Parçacık Reynold Sayısının Fonksiyonu Olarak Sürtünme Faktörü [11]

Moore, geliştirdiği korelasyonda eşdeğer Newtonian viskozitesini ve parçacık Reynold sayısını aşağıdaki bağıntılar ile tanımlamıştır. Ayrıca Şekil 4 ile verilen davranış için üç farklı durumun (farklı Reynold sayısı aralıkları için) sürtünme faktörünü veren fonksiyonlar, Moore tarafından tanımlanarak kayma hızını veren denklemler elde edilebilmektedir [11].

$$\mu_a = K/144 \left( d_2 - d_1/\bar{v}_a \right)^{(1-n)} \left( 2 + \frac{1}{n}/0.0208 \right)^n \quad (7)$$

$$N_{Re} = 928 \rho_f v_{sl} d_s / \mu \quad (8)$$

Burada yer alan semboller şunlardır:

f : Friction factor

$d_s$  : Küresel parçacık çapı

$d_2$  : Anülüs dış çapı

$d_1$  : Anülüs iç çapı

$\rho_f$  : Akışkan yoğunluğu

$\rho_s$  : Parçacık yoğunluğu

$v_{sl}$  : Kayma hızı

$N_{Re}$  : Parçacık Reynolds sayısı

$\mu_a$  : Görünür Newtonian viskozite

$\mu$  : Viskozite

K : Kıvamlilik indeksi – Power Law akışkan

n : Akış davranış indeksi – Power Law akışkan

## 2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

HAD, karmaşık akış geometrilerinde karşılaşılan çok farklı mühendislik akışkan akışı probleminin çözümünü sayısal olarak elde eden bir yöntemdir. HAD, bu çözümler için kütle korunumu, momentum korunumu ve enerjini korunumu ilkelerini kullanır [12]. HAD çözümü ve analizi için bu çalışmada, ANSYS FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımın kullanılmasıyla, sıkıştırılabilir veya sıkıştırılmaz akışkan akışı, kararlı ve geçiş (transient) akışı, ağıdalı (viscid) laminar ve türbülans akış, Newtonian ve Newtonian olmayan akışkan akışı, konveksiyon-kondüksiyon-ışınım ısı akışı, gözenekli ortamda akış, yayılmış (dispersed) ve sürekli fazlı akışlarda Lagrangian yörünge hesaplamaları, çok fazlı akış ve ayrık (discrete) faz akış problemleri incelenebilmektedir. Bu çalışmada, çamurun kesinti taşıma özelliklerini belirlemek için yazılımdaki farklı türbülans modelleri ve ayrık faz akışı kullanılmıştır.

Çözümlerde kullanılan kütle ve momentumun korunumu denklemleri aşağıdaki bağıntılar ile verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

Burada;

$S_m$  : Sürekli faza eklenen kütle,

p : Statik basınç,

$\bar{\tau}$  : Stres tensörü,

v : Hız,

$\rho \vec{g}$  : Cisme etkiyen gravite kuvvetleri,

$\vec{F}$  : Cisme etkiyen dış kuvvetler olarak gösterilir.

HAD alanındaki gelişmeler çok fazlı akışkanın fiziksel akışını incelemek için iki sayısal yaklaşım kullanır: Euler-Lagrange yaklaşımı ve Euler-Euler yaklaşımı. Euler-Lagrange yaklaşımı, akışkan fazını sürekli bir faz (continuum phase) olarak değerlendirerek Navier-Stokes denklemlerini çözer. Bu yaklaşım, parçacık ve damlacıkları hesaplanan akış alanında takip ederek yayılmış ayrık fazı (dispersed discrete phase) çözer. Ayrık faz, akışkan fazında momentum, kütle ve enerjinin değişimine izin verilebilmektedir. ANSYS FLUENT yazılımı, sürekli faz içerisinde, parçacığın hareketini ve yönünü parçacık üzerine etkiyen kuvvet dengesinin entegrasyonunu yaparak tahmin eder. Kartezyen koordinatlarda etkiyen kuvvetler nedeniyle, parçacığın hareketi denklemi aşağıdaki bağıntılar ile verilmektedir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) + \vec{g} (\rho_p - \rho) / \rho_p + \vec{F} \quad (11)$$

$$F_D = 18 \mu C_D Re / \rho_p d_p^2 24 \quad (12)$$

$$Re = \rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}| / \mu \quad (13)$$

Burada yer alan semboller şunlardır:

$\vec{F}$  : Ek ivme terimi (kuvvet/birim parçacık kütlesi)

$\bar{u}$  : Akışkan faz hızı

$\bar{u}_p$  : Parçacık hızı

$\mu$  : Akışkanın moleküler viskozitesi

$\rho$  : Akışkan yoğunluğu

$\rho_p$  : Parçacık yoğunluğu

$d_p$  : Parçacık çapı

Re : Görelî Reynolds sayısı

## 3. ÇALIŞMANIN DOĞRULANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların, yayımlanmış diğer araştırma çalışmalarının sonuçlarıyla (özellikle deneysel ve analitik olarak elde edilen sonuçlar ile) doğrulanması çok önemlidir. Bu amaçla, Hussain ve Azar'ın [1] çalışmasından elde edilen sonuçlar, bu çalışmada, HAD ile elde edilen sonuçların doğrulanması için göz önüne alınarak kullanılacaktır.

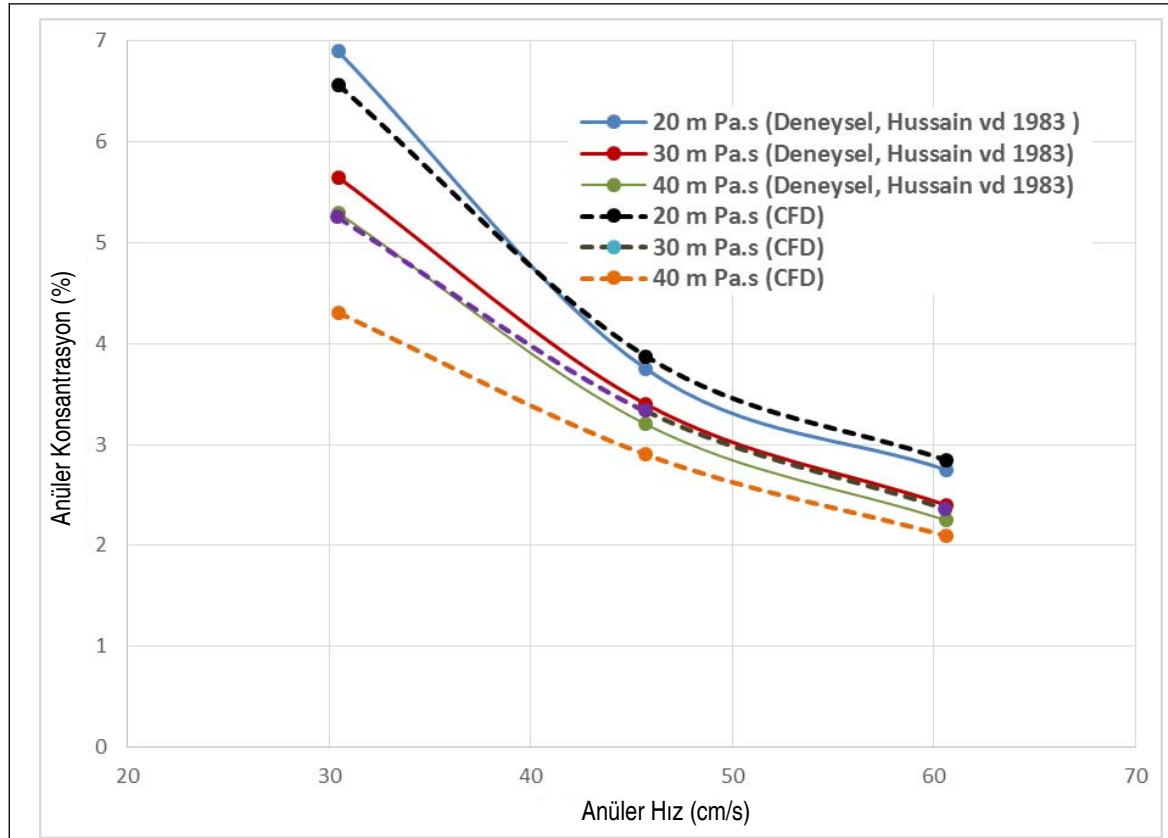
Hussain ve Azar [1], deneysel çalışmalarında anüler akışın simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Deneysel donanımların uzunluğu 50.2 ft (15,3 m), iç çapı 5 inç (12,7 cm) ve et kalınlığı şeffaf 0.3 inç (0,635 cm) olan dış borunun içerisinde 1.2 inç (2,975 cm) sabit dış çapı olan çelik iç borudan oluşmaktadır. Çalışmalarında, Tablo 1'de verilen farklı çamur türleri kullanılmışlardır. Ortalama anüler çamur hızları 30,45 cm/s, 45,72 cm/s ve 60,6 cm/s ile birlikte, 0,7 cm ve 0,79 cm boyutlu kesintileri çalışmalarında incelemişlerdir.

### 3.1 Hussain ve Azar Deneysel Çalışmasının HAD Çözümü

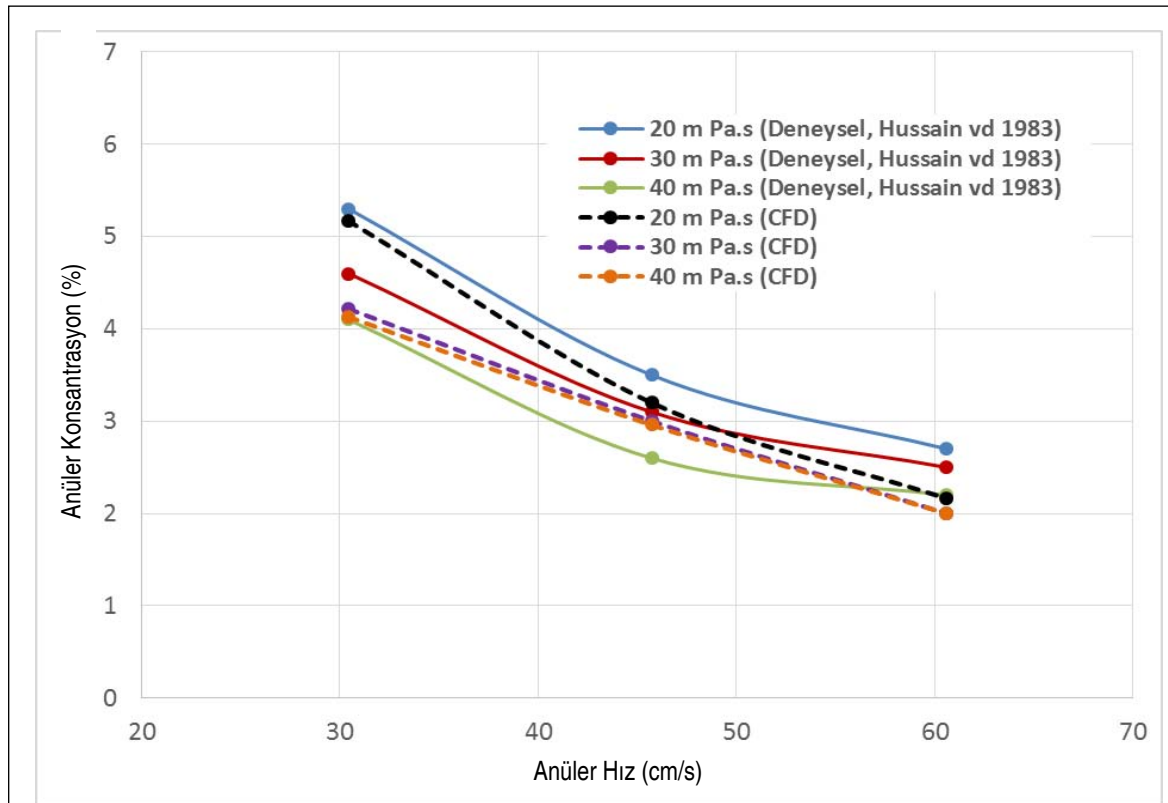
ANSYS FLUENT yazılımı kullanılarak Hussain ve Azar'ın [1] deneysel çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar, bu çalışmada, HAD analizi ile ayrık faz ve k-ε, k-ω türbülans modelleri kullanılarak aynı deneysel kuyu geometrisi için simüle edilmiştir. Anülüsteki kesinti konsantrasyonunun belirlendiği HAD sonuçları, deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisindedir ve birbirlerine yakın değerler vermektedir. HAD simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar, Hussain ve Azar'ın deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve görelî hatalar belirlenerek Tablo 2 ve 3'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardaki hatanın bir kaynağının nedeni, HAD analizinde sabit boyutlu parçacığın ve şeklinin küresel olarak kul-

Tablo 1. Çamur Sistemi Katkı Konsantrasyonları [1]

| Floküle Jel Sistem  |                                |                             |  |                               |       |                               |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| Çamur               | Bentonite (kg/m <sup>3</sup> ) | KCL (%)                     | Carboxymethyl-cellulose (kg/m <sup>3</sup> ) | XC (kg/m <sup>3</sup> )       | YP/PV | API Görünür viskozite (mPa*s) |
| 1                   | 34.24                          | 1                           | -  | 0.28                          | 4.0   | 20±2                          |
| 2                   | 39.94                          | 1.15                        | 0.14   | 0.86                          | 4.0   | 30±2                          |
| 3                   | 42.80                          | 1.22                        | 0.71   | 1.90                          | 4.0   | 40±2                          |
| Kimyasal Jel Sistem |                                |                             |  |                               |       |                               |
| Çamur               | Bentonit (kg/m <sup>3</sup> )  | Peltex (kg/m <sup>3</sup> ) | YP/PV  | API Görünür viskozite (mPa*s) |       |                               |
| 1                   | 52.78                          | 4.28                        | 0.5  | 20±2                          |       |                               |
| 2                   | 61.34                          | 2.85                        | 0.5  | 30±2                          |       |                               |
| 3                   | 77.04                          | 7.85                        | 0.5  | 40±2                          |       |                               |



Şekil 5. Kimyasal Jel Çamur Sistemi İçin HAD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması



Şekil 6. Floküle Jel Çamur Sistemi İçin HAD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Tablo 2. Jel Kimyasal Çamur Sistemi İçin Göreli Hata

| Viskozite | Anüler Hız (cm/s) |            |           |
|-----------|-------------------|------------|-----------|
|           | 30.45 cm/s        | 45.72 cm/s | 60.6 cm/s |
| 20 mPa.s  | 4.88 %            | 3.24 %     | 3.38%     |
| 30 mPa.s  | 7.07 %            | 2.05 %     | 1.66 %    |
| 40 mPa.s  | 23.35 %           | 10.34 %    | 6.66 %    |

Tablo 3. Floküle Jel Çamur Sistemi İçin Göreli Hata

| Viskozite | Anüler Hız (cm/s) |            |           |
|-----------|-------------------|------------|-----------|
|           | 30.45 cm/s        | 45.72 cm/s | 60.6 cm/s |
| 20 mPa.s  | 2.45 %            | 8.57 %     | 20 %      |
| 30 mPa.s  | 8.41 %            | 3.22 %     | 20 %      |
| 40 mPa.s  | 0.73 %            | 13.84 %    | 9.09 %    |

lanılmış olmasıdır. Diğer taraftan, deneysel çalışmada farklı boyutlu ve şekilli parçacıklar kullanılmıştır. HAD sonuçları literatürde ifade edilen sonuçlar ile uyumludur. Artan anüler akış hızı ile kesinti konsantrasyonu düşmektedir. Benzer şekilde, artan görünür viskozite ile kesinti konsantrasyonu düşük hızlarda azalmakta; ancak yüksek anüler hızlarda viskozite-deki artış etkisini her iki çamur sisteminde de kaybetmektedir.

### 3.2 Örnek Uygulama

Bu bölümde, aşağıda, Tablo 4 ile verilen Power Law reolojik model davranışı gösteren çamurlar için parametre analizi HAD yöntemiyle yapılmaktadır. Çamur viskozitesi, çamur yoğunluğu, akış debisi ve kesinti boyutu parametrelerinin kesinti taşınımı oranına olan etkisi dokuz farklı çamur için incelenmektedir. HAD sonuçlarını doğrulamak için aynı zamanda analitik model (Moore Korelasyonu) kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu ve bunların aralarındaki görece hatalar %10'dan küçüktür.

Tablo 4. İncelen Power-Law Çamurların Özellikleri

| Çamur kodu | Yoğunluk (lbm/gal) | K (cp)   | n       |
|------------|--------------------|----------|---------|
| M1         | 10                 | 37.367   | 0.598   |
| M2         | 12                 | 37.367   | 0.598   |
| M3         | 15                 | 37.367   | 0.598   |
| M4         | 10                 | 42.57172 | 0.768   |
| M5         | 12                 | 42.57172 | 0.768   |
| M6         | 15                 | 42.57172 | 0.768   |
| M7         | 10                 | 44.9065  | 0.87575 |
| M8         | 12                 | 44.9065  | 0.87575 |
| M9         | 15                 | 44.9065  | 0.87575 |

### 3.2.1 Su İçin (Newtonian Akışkan) Kayma Hızının Analitik Çözümü

Su içerisinde bulunan parçacıkların kayma hızları (slip velocity) Tablo 5'te listelenen verilerin Stokes Kanunu ile birlikte, Bölüm 1.3 başlığı altında verilen denklemlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Farklı anüler hızlar için tekrarlanan analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Şekil 7, 8 ve 9'da gösterilmektedir.

Tablo 5. Kayma Hızının Su İçerisinde Hesaplanmasında Kullanılan Parametreler

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| Kesinti çapı (inç)               | 0.1   |
| Kesinti yoğunluğu (lbm/gal)      | 21.44 |
| Akışkan yoğunluğu (lbm/gal)      | 8.34  |
| Akışkan viskozitesi (cp)         | 1     |
| Küresellik, ( $\psi$ ), boyutsuz | 1     |

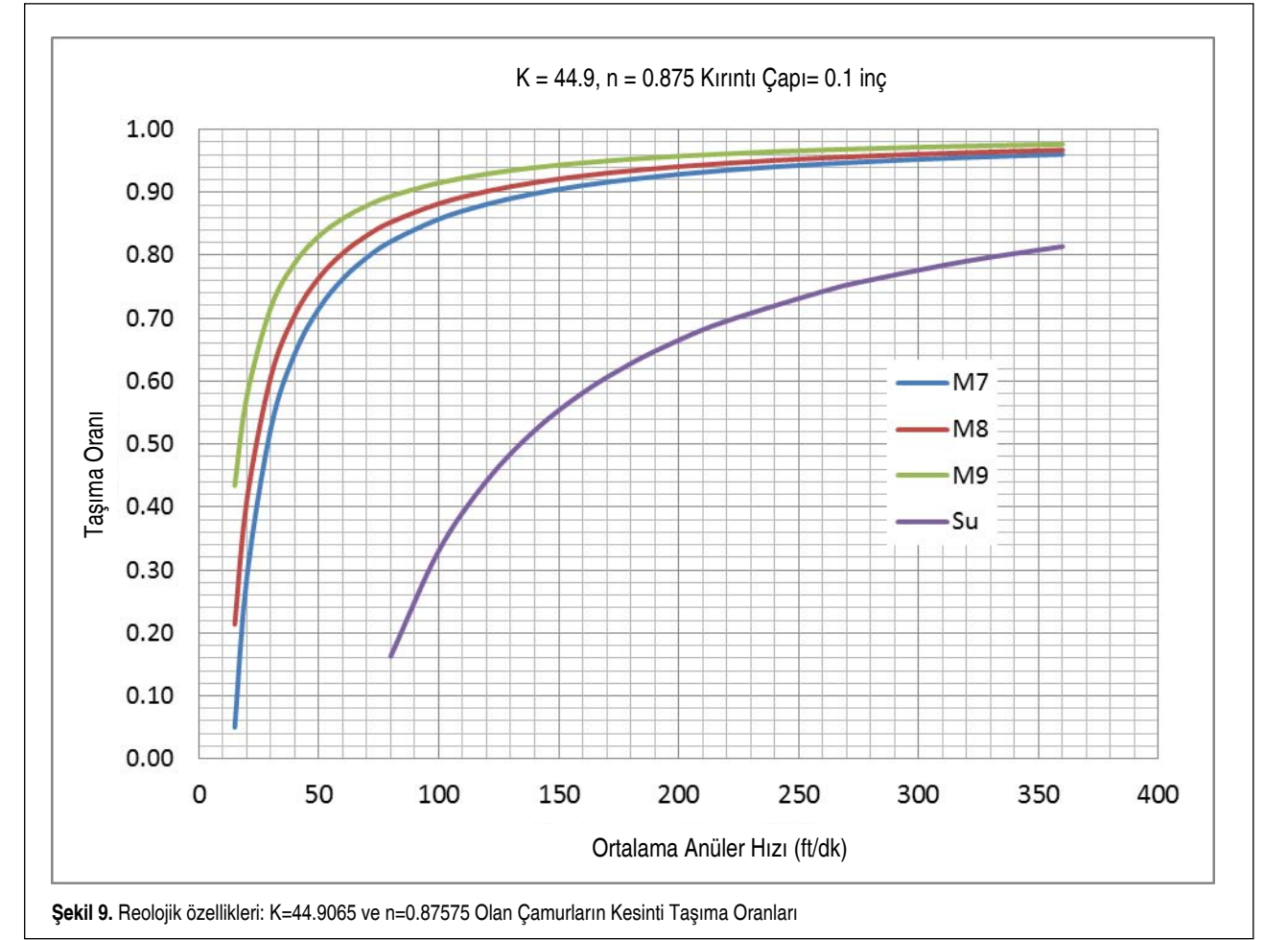
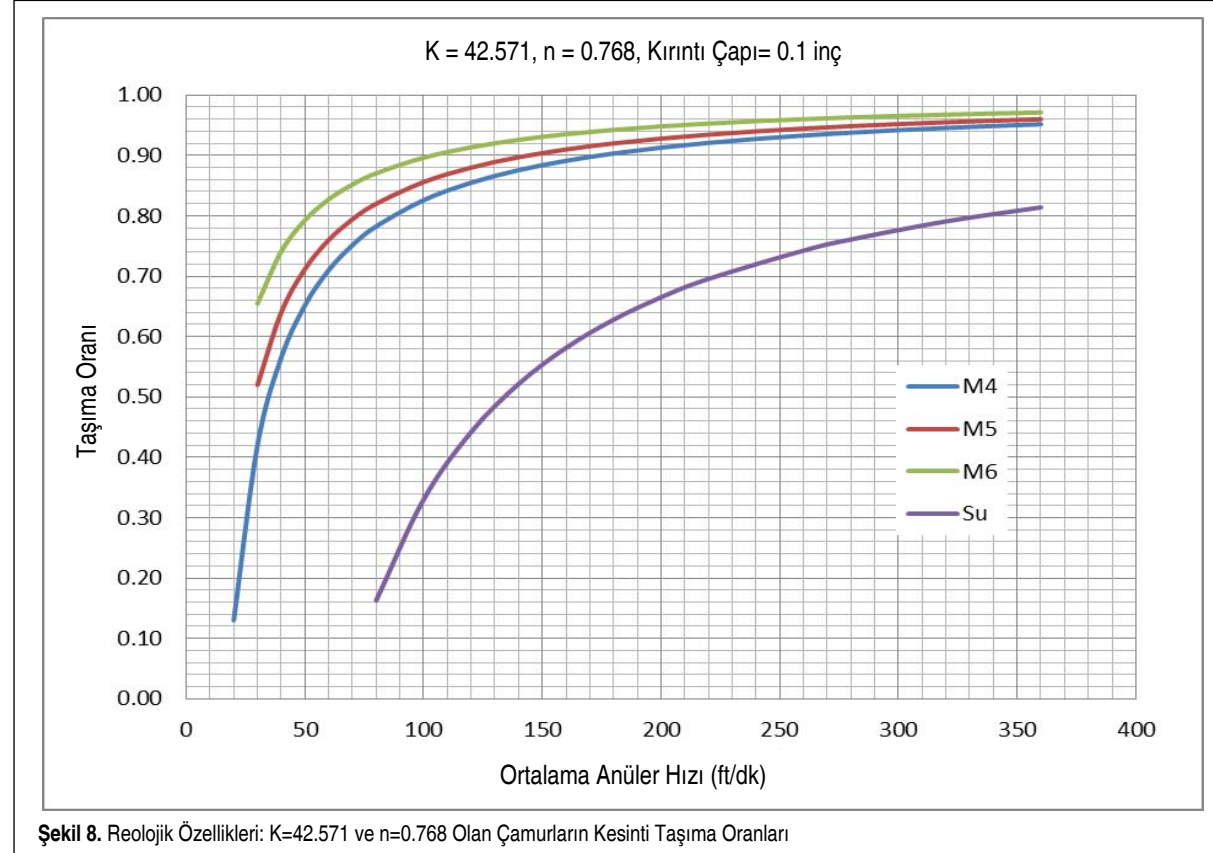
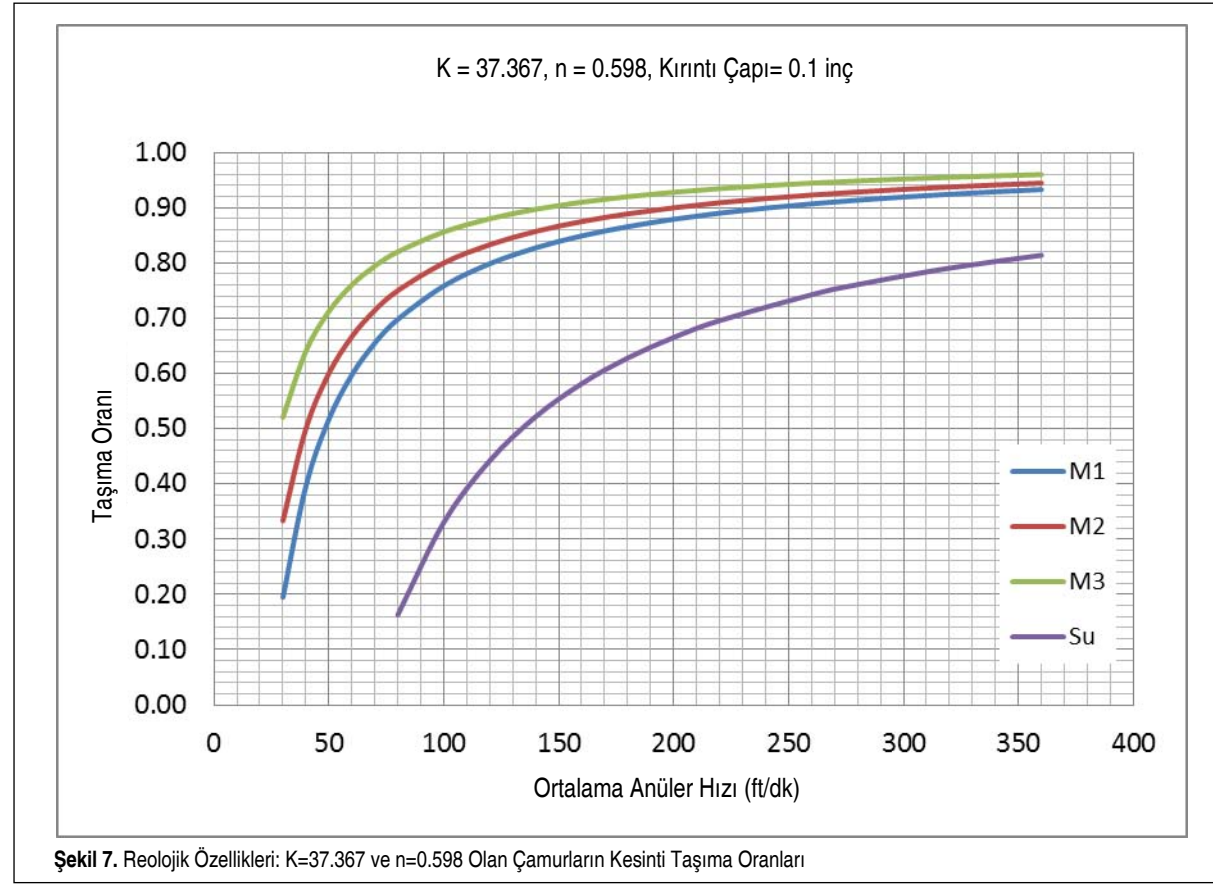
### 3.2.2 Newtonian Olmayan Akışkan İçin Kayma Hızının Moore Korelasyonu ile Analitik Çözüm

Bölüm 1.4'te verilen Moore yöntemi kullanılarak Newtonian olmayan Power Law bir akışkan için kayma hızı hesaplanmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir (Tablo 6). Öncelikle, eşdeğer görünür viskozite hesaplamaları yapılarak parçacık Reynolds sayısı hesaplanmıştır. Daha sonra, Şekil 4'ten elde edilen sürütme faktörü kullanılarak bulunmaları amaçlanan kayma hızları Moore korelasyonundan hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, Tablo 6 ile listelenen veriler kullanılmıştır. Farklı ortalama anüler hızlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7, 8 ve 9'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Kayma Hızı Hesaplarında Kullanılan Çamur ve Kuyu Özellikleri

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Kuyu çapı (inç)              | 8      |
| Boru çapı (inç)              | 4      |
| Çamur yoğunluğu (lbm/gal)    | 10     |
| Parçacık yoğunluğu (lbm/gal) | 21.44  |
| Parçacık çapı (inç)          | 0.1    |
| Ortalama anüler hız (ft/dak) | 30     |
| Ortalama anüler hız (ft/s)   | 0.5    |
| Kıvamlilik indeksi (K), cp   | 37.367 |
| Akış davranış indeksi (n)    | 0.598  |





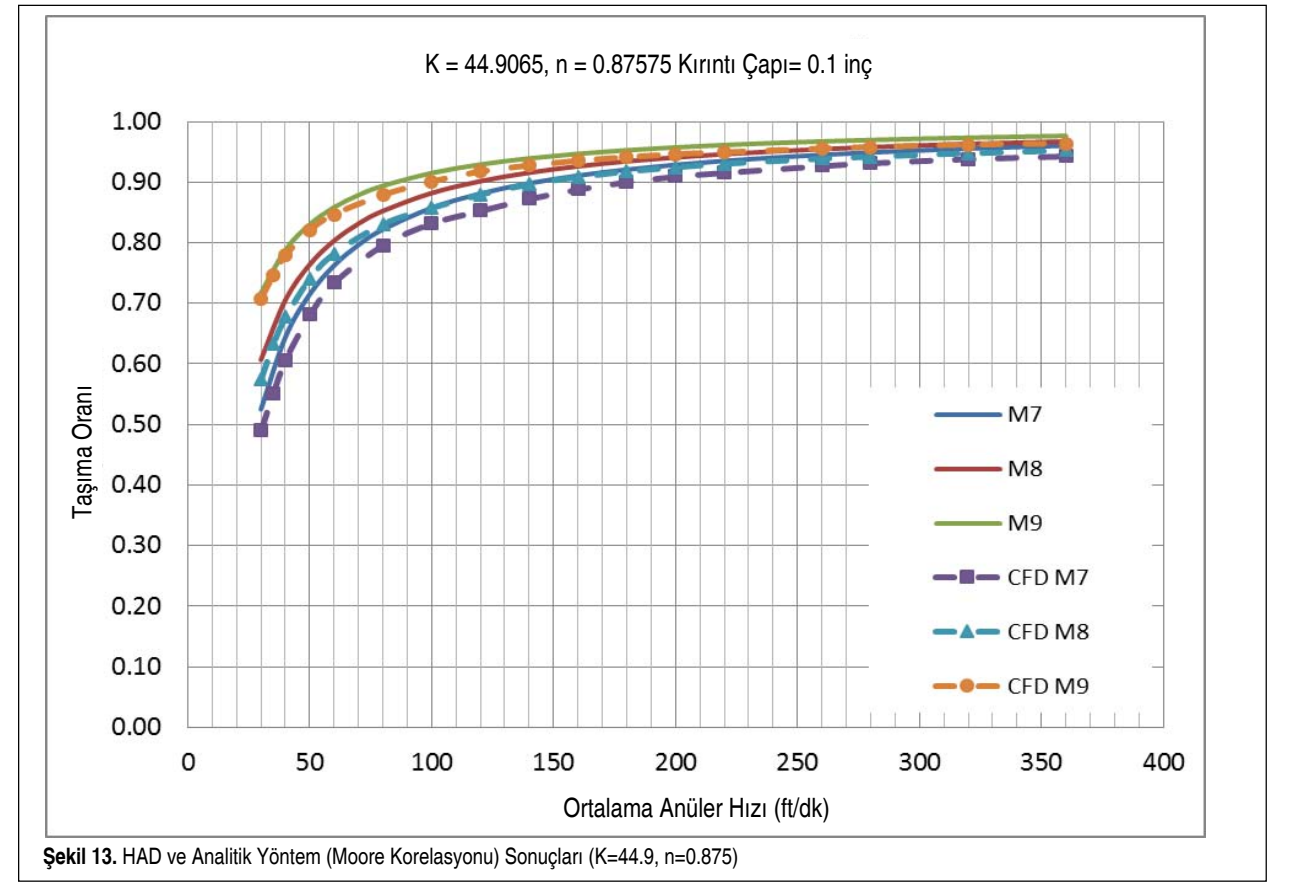
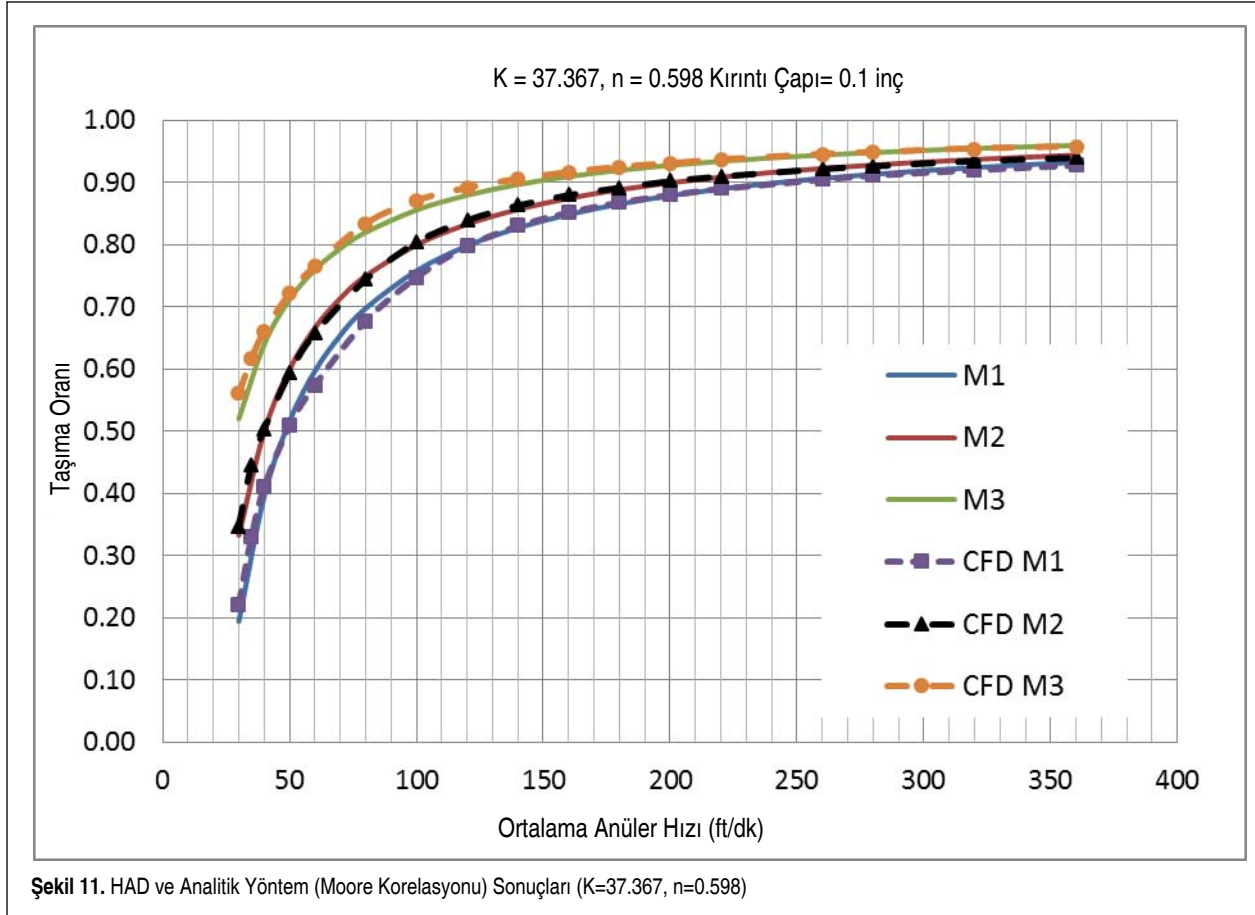
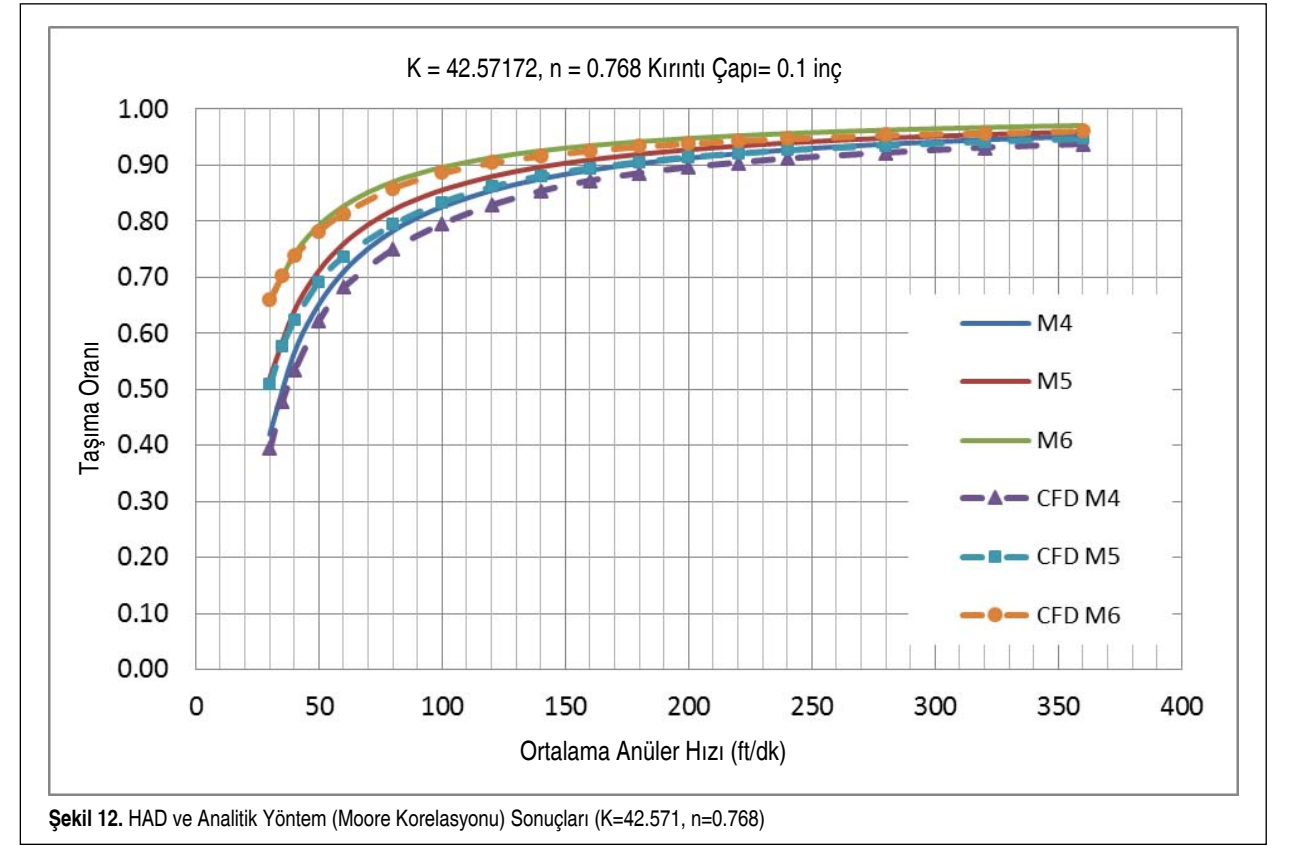
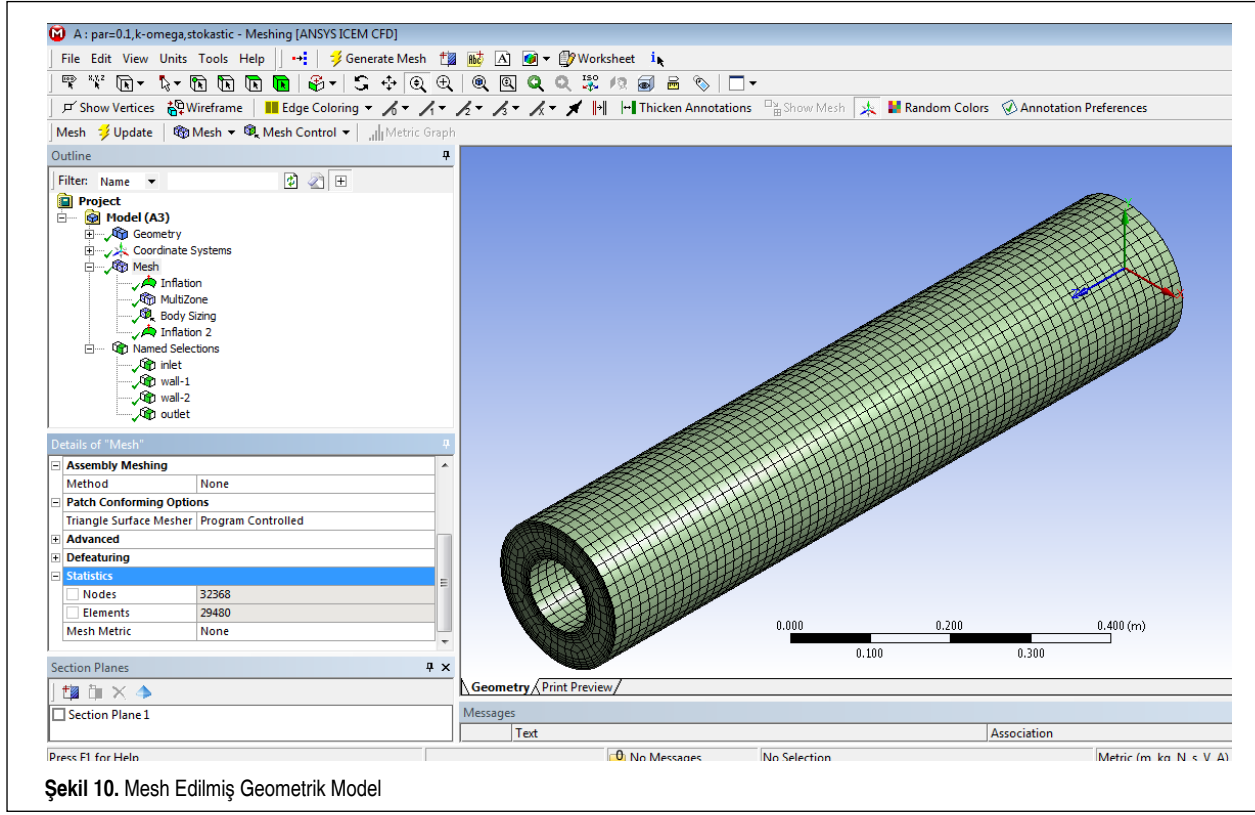
### 3.2.3 HAD Simülasyon Analizi

Yukarıda, Bölüm 3.2.2 ile analitik olarak elde edilen sonuçlar, HAD simülasyonu kullanılarak da incelenmiş ve aşağıda verilmiştir. Öncelikle, simülasyonun yapılabilmesi için Tablo 7'de tanımlanan koşulları içeren akış geometrisi Design Modeler yazılımı kullanılarak çizdirilmiştir. Simülasyonda, standart  $k-\omega$  türbülans modeli kullanılmıştır. Kesintiler, inört materyal olarak tanımlanmış, 200-250 iterasyon yapılarak yakınsamanın gerçekleşmesi sağlanmış, kararlı akış koşulunun sağlandığı belirlendikten sonra, yazılım durdurularak sonuçlar alınmıştır. Geometri için kullanılan node ve elemet sayısı sırasıyla, 32368 ve 29480'dir ve geometrinin görünümü Şekil 10 ile verilmektedir.

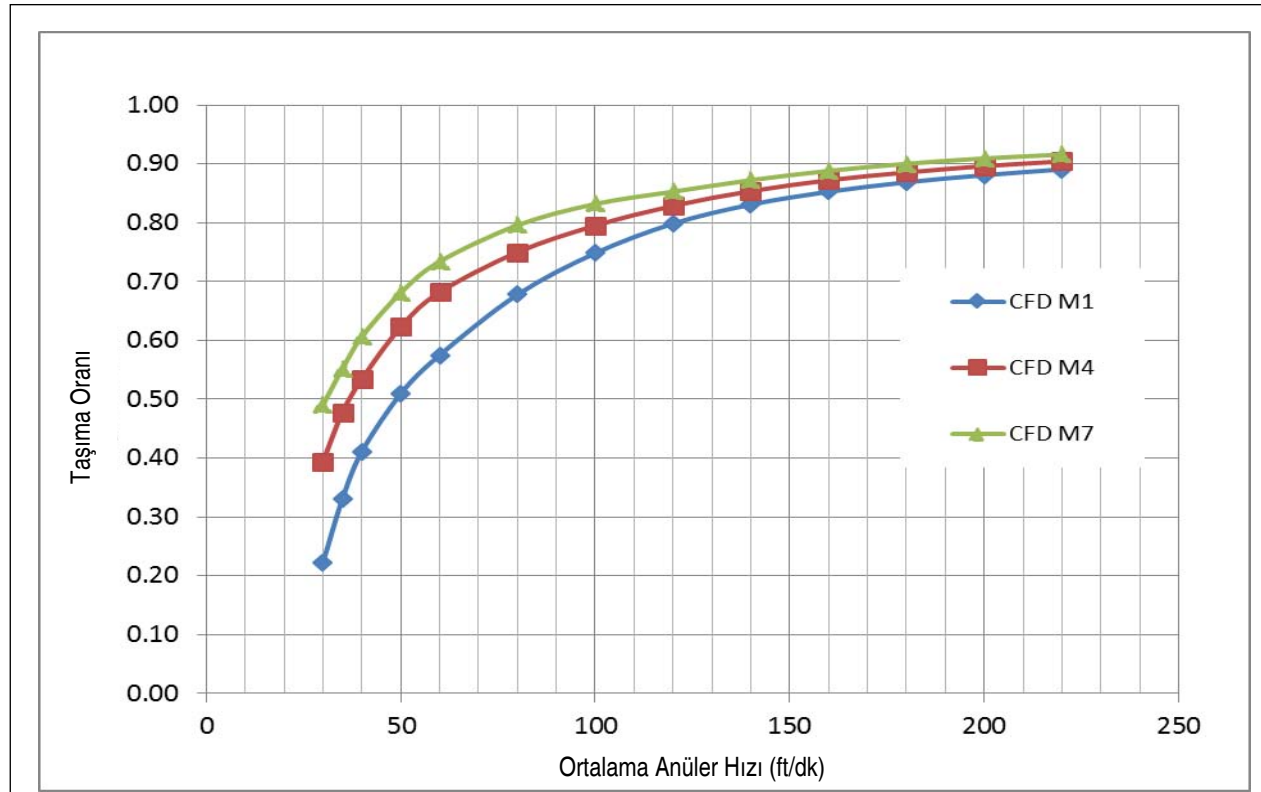
Farklı çamur reolojik özellikleri ve farklı ortalama çamur akış hızları için HAD kullanılarak elde edilen sonuçlar, aşağıda, Şekil 11-13 arasında Moore korelasyonunun kullanılmasıyla elde edilen analitik çözüm sonuçlarıyla birlikte verilmektedir. Aynı zamanda, hem analitik ve hem de HAD sonuçları arasındaki göreceli hatalar da belirlenmiştir. HAD sonuçları, analitik çözüm sonuçlarıyla oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

Şekil 11, 12 ve 13'ten görüleceği gibi, sabit reolojik değerlerde artan anüler hız ile birlikte kesinti taşınım oranı, çamur yoğunluğunun artması ile artmakta ve daha iyi kuyu temizliği vermektedir. Ancak, yoğunluğun etkisi anüler çamur hızının 150 ft/dak (2.5 ft/s) üzerinde etkisini kaybetmektedir. Benzer şekilde, çamurun reolojik değerlerinin ( $K$  ve  $n$ ) artmasıyla birlikte, kesinti taşınımında az da olsa bir iyileşme görülmekle beraber, bu etki, yoğunluktan sağlanan etkiye göre daha azdır ve yüksek hızlarda önemsiz olmaktadır.

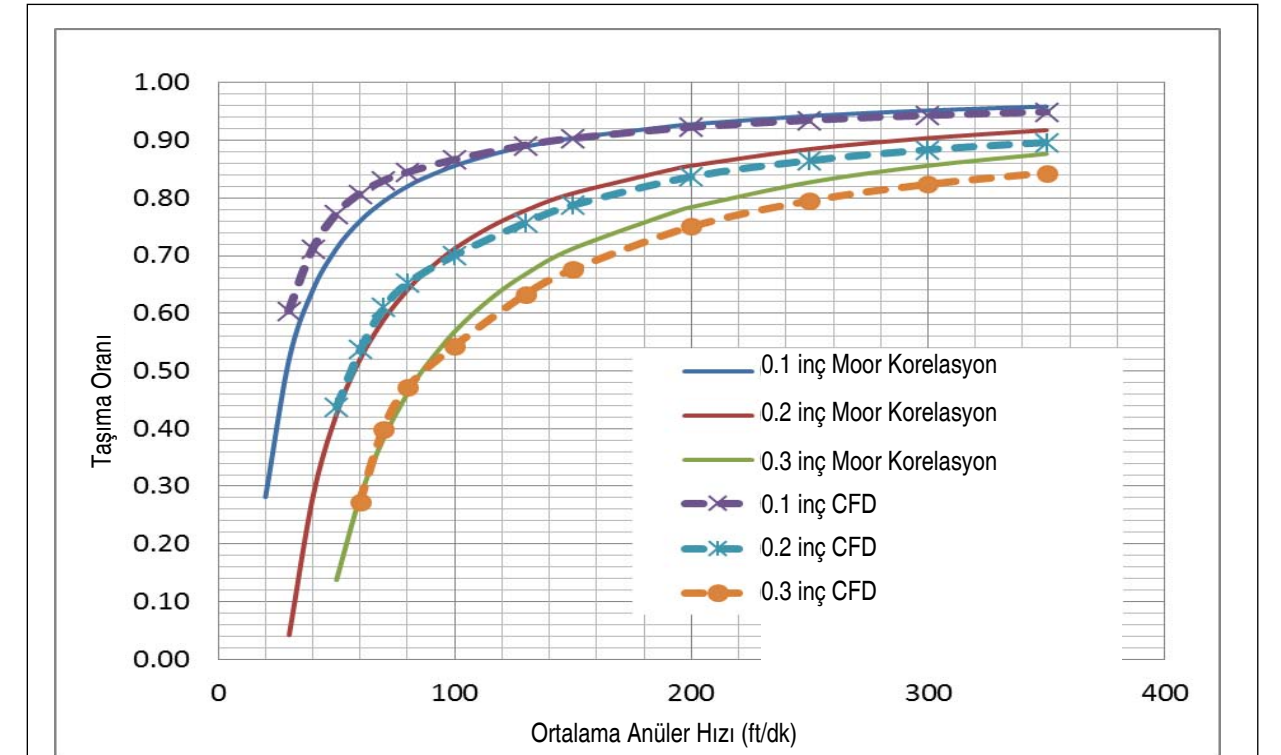
HAD yönteminin en önemli özelliği, analitik çözümü olmayan akış problem ve sistemlerinin incelenerek tasarım yapılmasına olanak sağlamasıdır veya deney yapılmamış koşullar için sistem analizine izin vermesidir. Bu bölümde, yukarıda tanımlanan problemler için farklı parametre değişkenleri için kesinti taşınım oranının değişimi sonuçları, görünür viskozite (Şekil 14) ve kesinti boyutu (Şekil 15, 16 ve 17) etkileri için de incelenmiştir. Artan görünür viskozite ile birlikte, özellikle düşük anüler hızlarda kesinti taşıma oranının iyileştiği, 10 yoğunluklu ve 0.1 inç boyutlu kesinti içeren sistem için Şekil 14'te görülmektedir. Ancak bu iyileşme, artan anüler hız ile



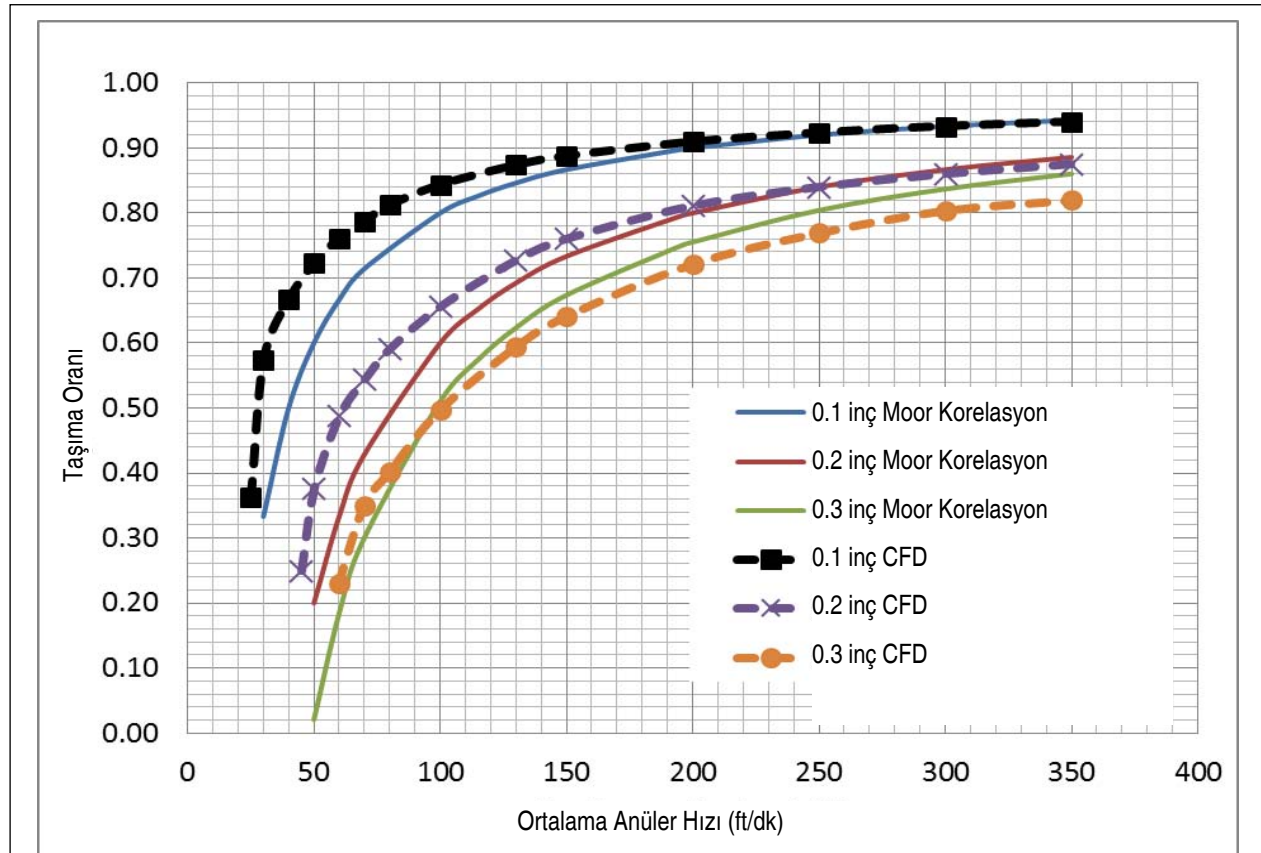




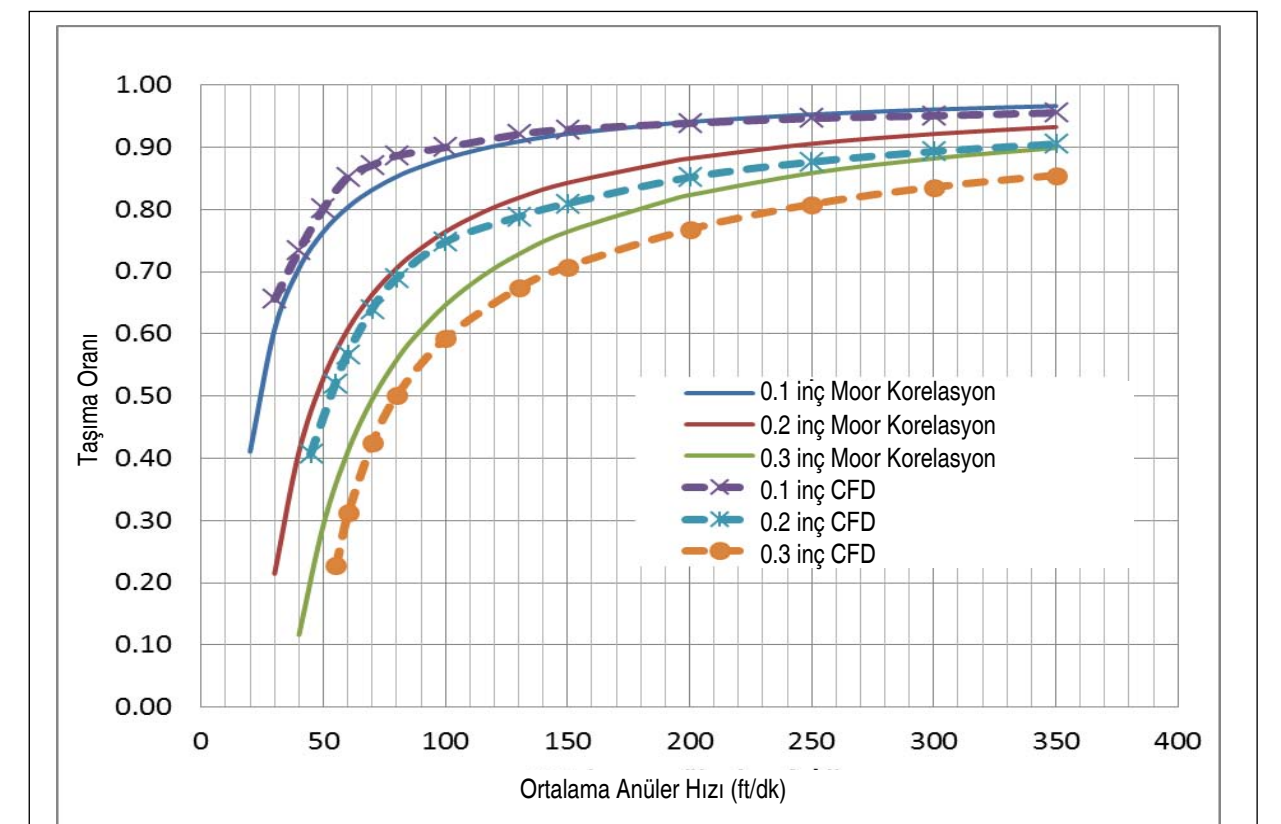
Şekil 14. Görünür Viskozitenin Taşınım Oranına Etkisi (10 lbm/gal çamur, 0.1 inç parçacık)



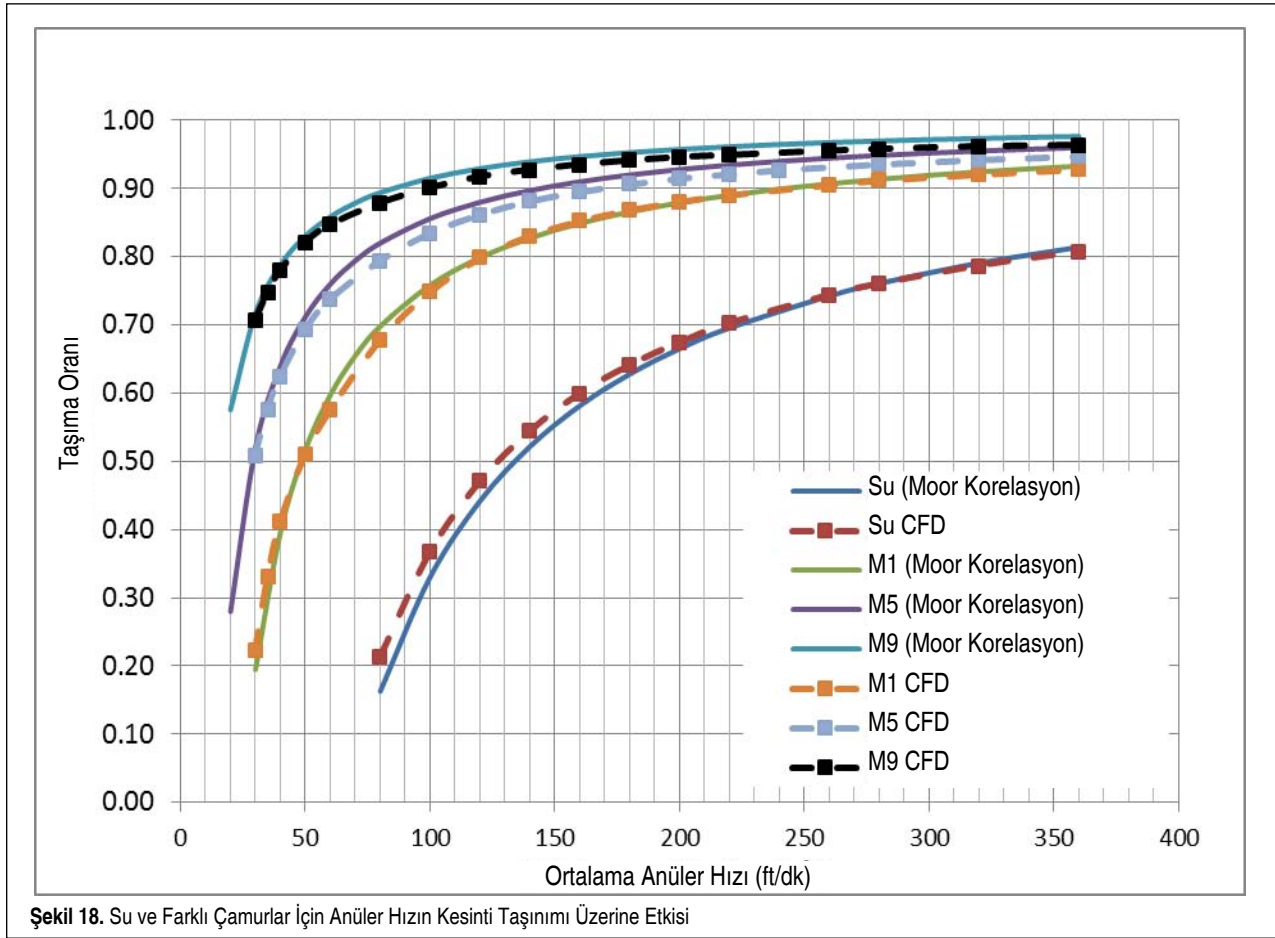
Şekil 16. Kesinti Boyutunun M5 Çamurun Taşınım Oranına Etkisi (12 ppg ve K=42.57, n=0.768)



Şekil 15. Kesinti Boyutunun M2 Çamurun Taşınım Oranına Etkisi (12 ppg ve K=37.367, n=0.598)



Şekil 17. Kesinti Boyutunun M8 Çamurun Taşınım Oranına Etkisi (12 ppg ve K=44.90, n=0.875)



Şekil 18. Su ve Farklı Çamurlar İçin Anüler Hızın Kesinti Taşınımı Üzerine Etkisi

etkisini azaltmaktadır. Bu sonuçların yer aldığı grafiklerden belli bir kesinti, taşıma oranının sağlanabilmesi için (örneğin %80) gerekli minimum ortalama anüler çamur hızı belirlenebilmektedir. Böylece, çamurun reolojik özellikleri ve yoğunluğu değiştirilmeden etkin bir kuyu temizliği için kullanılabilir pompalı çalıştırma koşulu elde edilebilmektedir.

Şekil 15'te, farklı kesinti boyutunun kuyu temizliğine veya kesinti taşınım oranına etkisi görülmektedir. Artan kesinti boyutu ile birlikte, kesinti taşınım oranı oldukça düşmekte ve kuyu temizliğinin, özellikle düşük anüler hızlarda bir sorun oluşturduğu anlaşılmaktadır. Kesinti boyutunun, kuyu temizliği için önemli bir faktör olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 16'da, kesinti taşınım üzerine anüler hızın etkisi gösterilmektedir. Anüler hızın düşük ve orta değerlerinde kesinti, taşınım oranına etkisi çok fazladır; ancak çok yüksek hızlarda bu etki azalmakla birlikte, önemini korumaktadır.

Diğer taraftan, çamur viskozitesinin kesinti taşınımına etkisi Şekil 14'ten de açıkça görülebilmektedir. Suyu göre daha viskoziteli çamurlardan çok daha iyi kesinti taşınım oranı elde edilirken, en yüksek reolojik değerlere sahip M9 çamuru en iyi taşınım oranını vermektedir. Benzer şekilde, çamur

yoğunluğunun etkisi de bu grafikten görülmektedir. En düşük yoğunluklu su, en düşük taşıma oranının sağlarken, artan yoğunluğa bağlı olarak sırasıyla, taşıma oranı M1, M5 ve M9 çamurlarında artmaktadır (Şekil 18). Diğer bir ifadeyle, sabit bir taşıma oranı (örneğin %70) sağlamak için gerekli olan anüler çamur hızı artan çamur yoğunluğu ile birlikte hızla azalmaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışmada, kuyularda kesinti taşınımı veya kuyu temizliği konusu analitik (Moore Korelasyonu) ve sayısal bir yöntem olan HAD analizi yapılarak incelenmiştir. İnceleme, daha önce Hussain ve Azar [1] tarafından yapılmış deneysel çalışma sonuçları ile doğrulanmıştır. Ayrıca, anüler çamur hızı, çamur reolojisi, kesinti boyutu ve çamur yoğunluğunun kuyu temizliğine (kesinti taşınım oranı) olan etkisi ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

- Kesinti taşınımı üzerinde en önemli parametrenin anüler hızın olduğu ve özellikle bu etkinin düşük ve orta değerli hızlarda daha etkin olduğu görülmektedir.

- Görünür viskozite ve çamur yoğunluğu artışına bağlı olarak kesinti taşınım oranında iyileşmeler olmaktadır. İyileşme etkisi, çamur yoğunluğu artışında daha belirgindir; ancak yüksek anüler hızlarda her iki parametrenin de etkisi önemsiz olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, yüksek anüler hızlarda çamur reolojisi ve yoğunluğu üzerinde yapılacak olan değişimlerin kuyu temizliği üzerine sınırlı veya ihmal edilebilir bir etkisinin olacağı beklenmelidir.
- Kesinti boyutunun kuyu temizliğinde önemli bir faktör olduğu, özellikle düşük ve orta anüler çamur hızlarında görülmektedir. Yüksek anüler hızlarda etkisinin azalmasına rağmen, çamur reolojisi ve yoğunluğuna göre kesinti taşınım oranı üzerine daha etkilidir. Bu durum, iyi bir matkap seçiminin önemini de göstermektedir.

HAD sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın, 100 ft/dak anüler akış hızında %10'dan daha düşük olduğu gösterilerek HAD analizinin güvenli bir şekilde kuyu hidrolik tasarımında kullanılabileceği gösterilmiştir.

## KAYNAKÇA

1. Hussaini, S. M., Jamal, A. Z. 1983. "Experimental Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds," SPE 10674, Society of Petroleum Engineers Journal, p. 11-20, DOI: 10.2118/10674-PA.
2. Bilgesu, H. I., Ali, M. W., Aminian, K., Amiri, S. 2002. "Computational Fluid Dynamics (CFD) as a Tool to Study Cutting Transport in Wellbore," SPE Paper 78716. SPE Eastern Regional Meeting, 23-26 October 2002, Lexington, Kentucky, DOI: 10.2118/78716-MS.
3. Tomren, P. H., Iyoho, A. W., Azar, J. J. 1986. "Experimental Study of Cuttings Transport in Directional Wells," SPE 12123, SPE Drilling Engineering, DOI: 10.2118/12123-PA.
4. Ford, J. T., Peden, J. M., Oyenevin, M. B., Gao, E., Zarroug, R. 1990. "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes," SPE 20421, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 23-26 September 1990, New Orleans, Louisiana, DOI: 10.2118/20421-MS.
5. Hareland, G., Azar, J. J., Rampersad, P. R. 1993. "Comparison of Cuttings Transport in Directional Drilling Using Low-Toxicity Invert Emulsion Mineral-Oil-Based and Water-Based Muds," SPE 25871, Low Permeability Reservoirs Symposium, 26-28 April 1993, Denver, Colorado, DOI: 10.2118/25871-MS.
6. Okrajni, S. S., Azar, J. J. 1986. "The Effect of Mud Rheology on Annular Hole Cleaning in Directional Wells," SPE 14178, SPE Drilling Engineering, DOI: 10.2118/14178-PA.
7. Sifferman, T. R., Becker, T. E. 1992. "Hole Cleaning in Full-Scale Inclined Wellbores," SPE 20422, SPE Drilling Engineering, DOI: 10.2118/20422-PA.
8. Zeidler, H. U. 1972. "An Experimental Analysis of the Transport of Drilled Particles," SPE 3064, Society of Petroleum Engineers Journal, p. 39-48, DOI: 10.2118/3064-PA.
9. Duan, M., Miska, S., Yu, M., Takach, N., Ahmed, R. 2007. "Critical Conditions for Effective Sand-Sized Solids Transport in Horizontal and High-Angle Wells," SPE-106707, Production and Operations Symposium, 31 March-3 April 2007, Oklahoma City, Oklahoma, DOI: 10.2118/106707-MS.
10. American Petroleum Institute, 2006. Rheology and Hydraulics of Oil-Well Drilling Fluids, API Recommended Practice 13D, 5th edition, USA.
11. Bourgoyne, T. Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., Young Jr., F. S. 1991. "Applied Drilling Engineering," Richardson, Texas: SPE Textbook Series, Society of Petroleum Engineers, vol. 2.
12. ANSYS, Inc. 2011. "ANSYS FLUENT Theory Guide," Release 14.0, ANSYS Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317.