



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

KESİNTİ TAŞINIMININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAKLAŞIMIYLA KESTİRİMİ

**ALİ ETTEHADİ OSGOUEI
BAGTYAR DURDYEV
GÜRŞAT ALTUN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

KESİNTİ TAŞINIMININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAKLAŞIMIYLA KESTİRİMİ

Ali Ettehadı OSGOUEI
Bagtyyar DURDYEV
Gürşat ALTUN

ÖZET

Sondaj sırasında kesintilerin (kırıntıların) yüzeye etkin bir şekilde taşınmalarının önemi reddedilmeyecek bir gerçektir. Yetersiz veya zayıf olarak kesintilerin taşınması kuyuda birçok soruna yol açabilir. Kesintilerin kuyu içerisinde depolanma oranının artmasına bağlı olarak dizi sıkışması sorunu daha da kötü bir probleme dönüşebilir. Reolojik özellikler, sondaj akışkanı yoğunluğu, sondaj kesintilerinin boyut ve yoğunluğu, kuyu eğim açısı, sondaj dizisinin döndürülmesi ve çamur dolaşım hızı gibi birtakım parametrelerin kesinti taşınması ve kuyu temizliği üzerine etkileri sondaj endüstrisinde tartışılan önemli konulardan birisidir.

Bu çalışma Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanarak çamur yoğunluğu, görünür çamur viskozitesi, ortalama anülüs çamur hızı ve kesinti boyutu gibi parametrelerin kesinti taşınması üzerine etkilerinin incelenmesi üzerinedir. 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. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak daha iyi bir HAD analizi değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ayrıca, daha iyi bir yorumlama yapabilmek amacıyla hata analizi de gerçekleştirilmiştir.

HAD yöntemi kullanılarak ortalama çamur hızı, görünür viskozitesi, çamur yoğunluğu ve kesinti boyutu etkilerinin simülasyondan elde edilen sonuçlarının analitik hesaplamalardan elde edilenler ile çok iyi bir uyum gösterdiği ve %10'dan daha düşük bir göreceli hata verdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak herhangi bir sondaj operasyonundan önce kesinti taşınmasının tahmininde HAD yöntemi çok önemli bir fikir vererek, kesinti taşınması ilişkili sorunlarının önceden belirlenmesiyle birlikte gerekli önlem alınmasında etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesinti taşınımı, Kuyu temizliği, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Moore korelasyonu, Çamur özellikleri.

ABSTRACT

The importance of efficient cutting transport during drilling operation is an undeniable fact. Poor transportation of cutting might cause some difficulties through well drilling. Stuck pipe could be a worse problem as a result of drill cutting accumulation. Effect of some parameters such as rheological properties and density of drilling fluid, size and density of drill-cutting, well inclination, drillpipe rotation, and mud circulation rate on cutting transport is among the top discussed issues in drilling industry.

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. Navier-Stokes equations, the continuity equation and the non-Newtonian rheology model were applied to establish the mathematical model of the cutting transport process in the annulus of the well. Results of CFD method was verified with an experimentally reported study. Both analytical method based on 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. In addition, error analysis was carried out to make better interpretation.

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%. It can be inferred that CFD method is a powerful tool in predicting cutting transport to give an impressive idea prior to any operation and can be used to determine cutting transport related problems in advance along with taking necessary remedial actions.

Key Words: Cutting transport, Borehole cleaning, Computational fluid dynamics, Moore correlation, Mud properties.

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 anüler hızın çamur taşıma kapasitesine etkisinin çok önemli olduğunu, taşıma kapasitesinin YP/PV oranının artmasıyla arttığını, düşük (12 inç/s) ve orta (18 inç/s) değerli anüler 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 vd. [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 vd. [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 depolanmış kesinti yataklarının akışkan yönünün aksine aşağı doğru kaydıklarını, düşey kuyuda anülüs eksantrikliğinin kuyu temizliği üzerine olan etkilerinin az veya sınırlı olduklarını belirtmişlerdir.

Ford vd. [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° açılıya, 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 vd. [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 laminar akış durumunda YP artışı ile kesinti konsantrasyonunun düştüğünü, türbülanslı akışın aksine 0-45° eğimli kuyularda kesinti konsantrasyonunun laminar akışta daha düşük olduğunu, 45-55° açılarda türbülanslı ve laminar 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 yatağını 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 geliştirmişlerdir. Su ve sondaj çamurunun kesinti taşınımı üzerine yaptıkları 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 belirtmişlerdir.

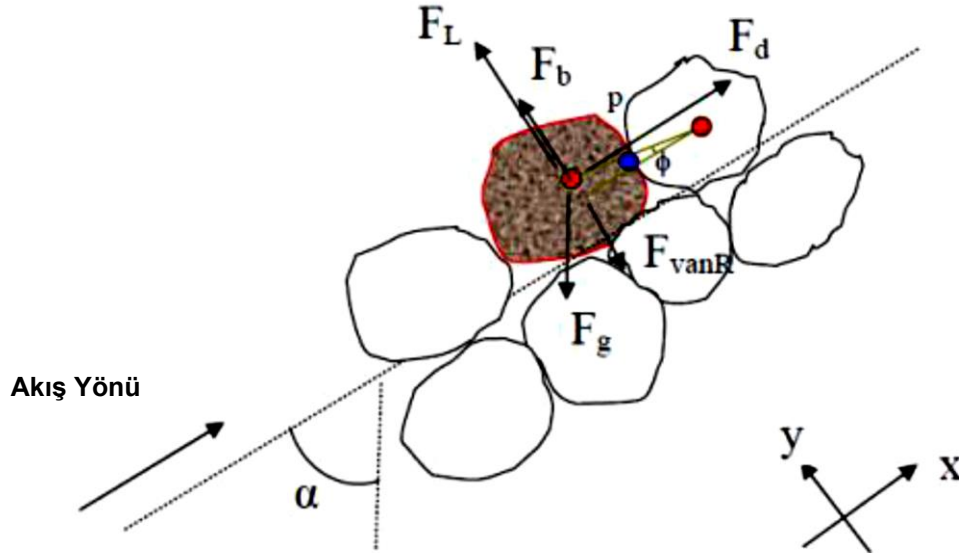
Duan vd. [9] deneysel çalışmalarında yatak oluşumu erozyonu üzerinde minimum hızın, kritik yeniden süspansiyon hızının (CRV, critical re-suspension velocity) ve kritik depolanma hızının (CDV) etkilerini

su ve polimer akışkanlar kullanarak eğimli durumlar için 0.45 mm ve 1.4 mm boyutlu parçacıklar için incelemiştir. Yatak oluşumunun önlenmesi için minimum CDV değerinin CRV değerinden 2 veya 3 kat fazla olması gerektiğini, 0.25 lbm/gal polimer içerikli çözeltisiye 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 belirtmiştir.

1.2. Kesinti Taşınımı Teorisi

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

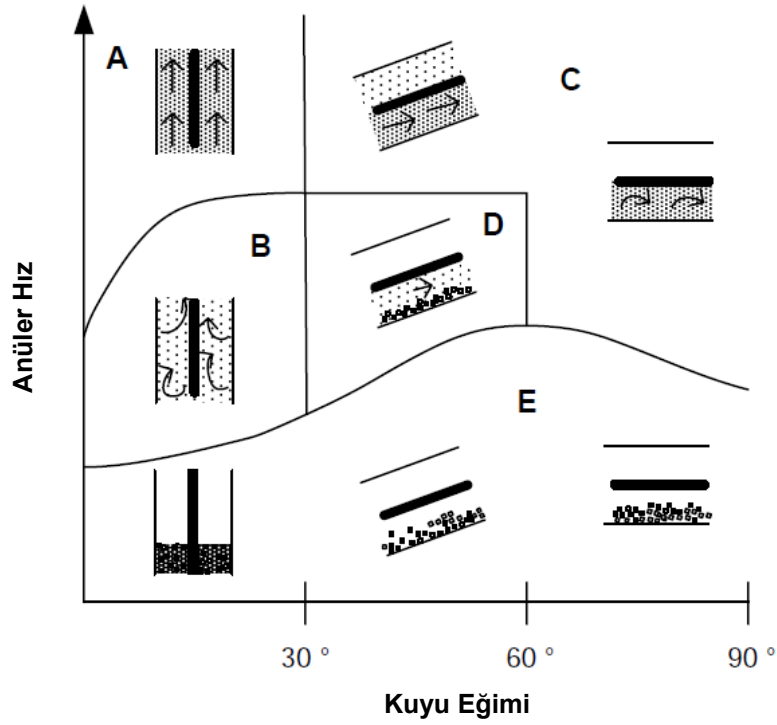
Duan vd. [9]'ne göre anülüste taşınan kesinti parçası bir kaç tip kuvvetlerin etkisindedir. Bunlar hidrodinamik kuvvetler (sürtünme "drag" kuvveti, F_d , kaldırma kuvveti, F_L), statik kuvvetler (gravite kuvveti, F_g , Buoyant kuvvet, F_b) ve koloidal kuvvetler (Van der Waals kuvvet, F_{vanB}) olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 1 akışkan akışı sırasında parçacığa etkileyen kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 1. Parçacığa etki eden kuvvetler, [9].

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

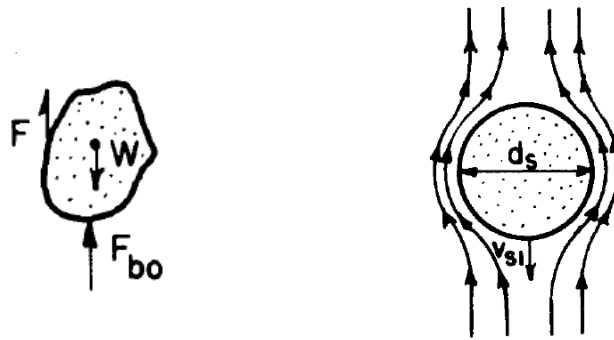
- Zone A – Efektif kuyu temizliği
- Zone B – Düşük kesinti uzaklaşımı
- Zone C – Hareketli kesinti yataklı iyi kuyu temizliği
- Zone D – Kısmi kuyu temizliği (kesinti yatağı oluşumu)
- Zone E – Kuyu temizliği yok.



Şekil 2. Düşey ve eğimli kuyularda kesinti taşınımı mekanizması, [10].

1.3. Newtonian Akışkanlarda Parçacık Kayma Hızı

Borgoyne vd. [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_{PRE}) 0.1'den küçük akış durumu (creep flow), Newtonian akışkan ve laminer akış için geçerlidir.



Şekil 3. Parçacığa etkiyen kuvvetler ve kayma hızı, [11].

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

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



Parçacık Reynolds Sayısının (N_{pRe}) 0.1'den büyük olduğu durumlarda ampirik olarak geliştirilmiş olan sürtünme faktörü kullanılır. Bu durumda sürtünme faktörü ve kayma hızı aşağıdaki bağıntılar ile verilmektedir.

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

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

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

Bu denklemlerde,

μ : viskozite

v_{sl} : kayma hızı

d_s : küresel parçacığın çapı

ρ_f : akışkan yoğunluğu

ρ_s : parçacık yoğunluğu

f : Sürtünme faktörü.

Parçacık şeklinin küreden farklı olması durumunda sürtünme faktörünün grafiksel olarak elde edilebildiği kaynaklar mevcuttur. Farklı küresellikler için ilgili grafik Bourgoyne vd. [11] kaynağından elde edilebilir.

1.4. Newtonian Olmayan Akışkanlarda Parçacık Kayma Hızı ve Moore Korelasyonu

Bourgoyne vd.'de [11] ifade edildiği gibi Buoyant ve gravite kuvvetleri akışkanın GS değerini geçmedikçe parçacık çökmeyecektir. Yüzey alanı πd_s^2 olan küresel bir parçacığın çökmesi için gerekli minimum Buoyant ve gravite kuvveti akışkanın GS ve yüzey alanının çarpımına eşittir. Diğer bir ifade ile, parçacığın çökebilmesi için gerekli minimum çap aşağıdaki bağıntıdan elde edilebilir.

$$\tau_g = \frac{d_s (\rho_s - \rho_f)}{6} \quad (6)$$

Burada;

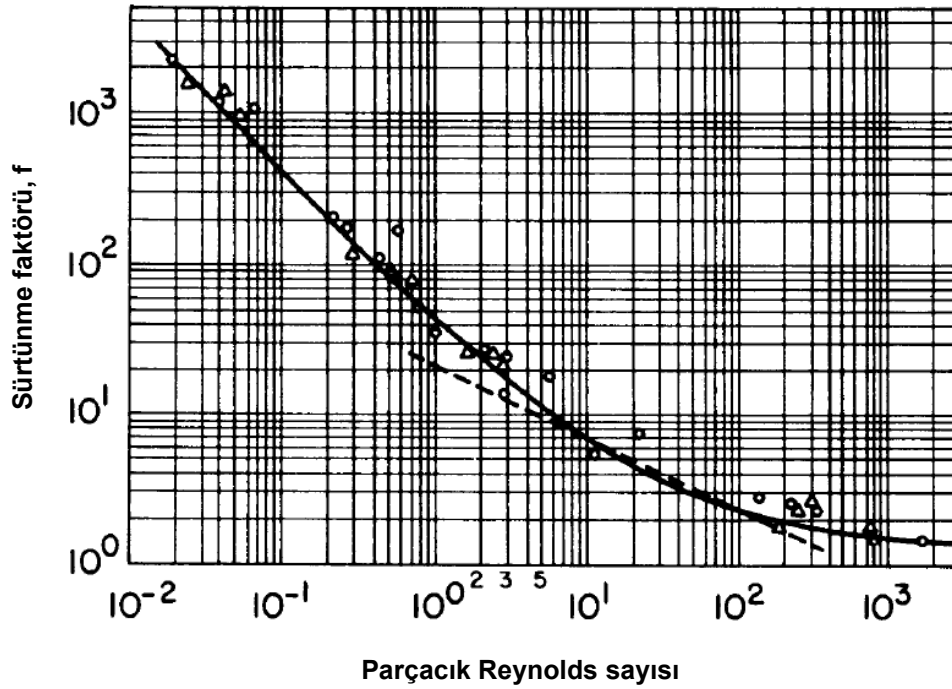
T_g : Jel kuvveti

d_s : küresel parçacığın çapı

ρ_f : akışkan yoğunluğu

ρ_s : parçacık yoğunluğu.

Newtonian olmayan akışkan (Power Law) için kayma hızını veren korelasyonlardan birisi 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 Reynold sayısı Şekil 4 ile verilen grafikte (kireçtaşı ve şeyl kesintilerinin kullanılmasıyla deneysel olarak elde edilmiştir) kullanılarak sürtünme faktörü belirlenebilmekte ve dolayısı ile kayma hızı belirlenerek kesinti taşınımı veya kuyu temizliği değerlendirilmesi 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 durum için (Farklı Reynold sayısı aralıkları için) sürtünme faktörünü veren fonksiyonlar Moore tarafından tanımlanarak kayma hızını veren denklemler elde edilebilmektedir, [11].

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

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

Burada;

f : friction factor

d_s : küresel parçacık çapı

d_2 : anülüs dış çapı

d_1 : anülüs iç çapı

ρ_f : akışkan yoğunluğu

ρ_s : parçacık yoğunluğu

v_{sl} : kayma hızı

N_{Re} : parçacık Reynolds sayısı

μ_a : görünür Newtonian viskozite

μ : 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, momentumun korunumu ve enerjini korunumu ilkelerini kullanır, [12]. HAD çözümü ve analizi için bu çalışmada ANSYS FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımın kullanılmasıyla sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz akışkan akışı, kararlı ve geçiş (transient) akışı, ağıdalı (viscid) laminar ve türbülans akışı, 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

\vec{v} : hız

$\rho \vec{g}$: cisme etkiyen gravite kuvvetleri

\vec{F} : cisme etkiyen dış kuvvetlerdir.

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 parçacıkları ve damlacıkları hesaplanan akış alanında takip ederek yayılmış ayrık fazı (dispersed discrete phase) çözer. Ayrık faz akışkan fazında momentum, kütle ve enerjinin değişimine izin verebilmektedir. ANSYS FLUENT yazılımı sürekli faz içerisinde parçacığın hareketini ve yönünü parçacık üzerine etkiyen kuvvet dengesinin integrasyonunu yaparak tahmin eder. Kartezyon koordinatlarda etkiyen kuvvetler nedeniyle parçacığın hareketi denklemini aşağıdaki bağıntılar ile verilmektedir.

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

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

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

Burada,

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

\vec{u} : akışkan faz hızı

\vec{u}_p : parçacık hızı

μ : akışkanın moleküler viskozitesi

ρ : akışkan yoğunluğu

ρ_p : parçacık yoğunluğu

d_p : parçacık çapı

Re : görelî Reynolds sayısıdır.

3. ÇALIŞMANIN DOĞRULANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

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

Hussain ve Azar [1] deneysel çalışmalarında anüler akışın simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Deneysel donanımları 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 kullanmışlardır. 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 ayrıık faz ve $k-\epsilon$, $k-\omega$ türbülans modelleri kullanılarak aynı deneysel kuyu geometrisi için simüle edilmiştir. Anülüsteki kesinti konsantrasyonunun belirlendiği HAD sonuçları deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde ve birbirlerine yakın değerler vermektedir.

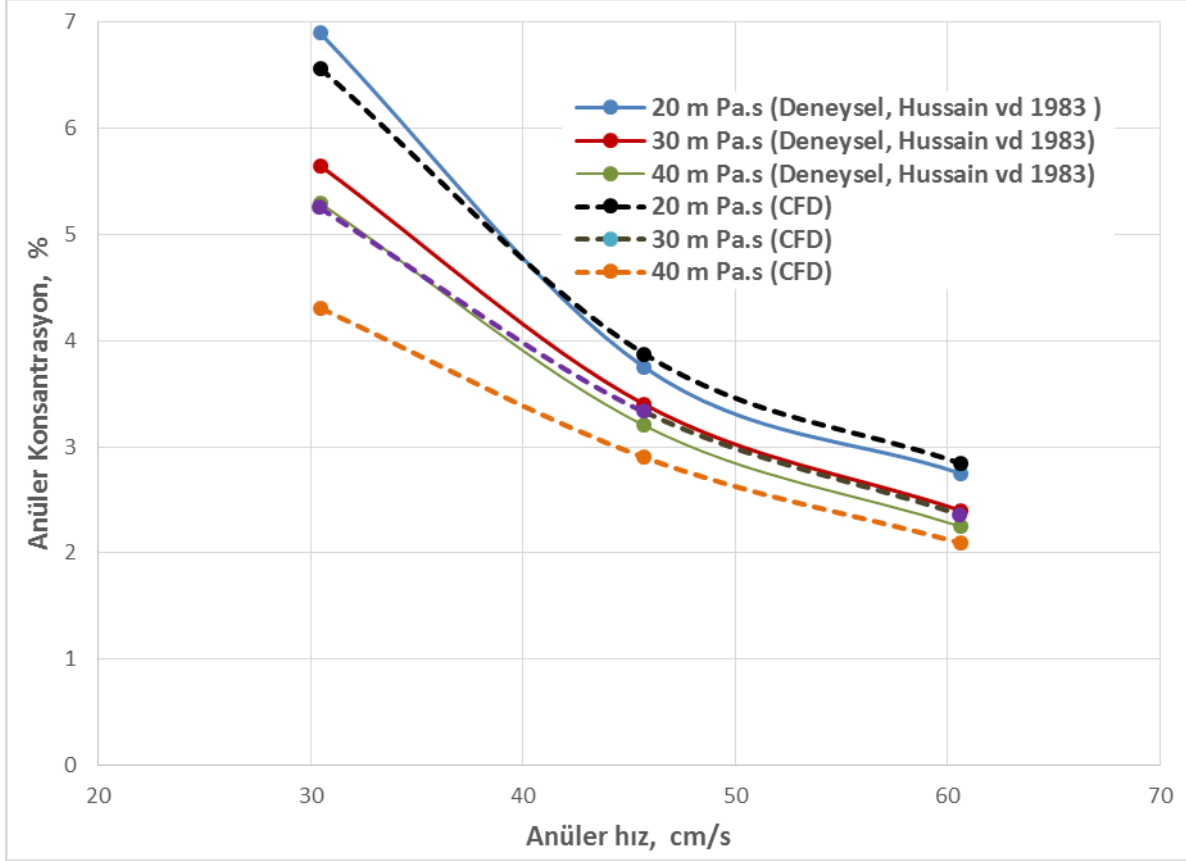
HAD simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve 6'da verilmektedir. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar Hussain ve Azar'ın deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve görelî hatalar belirlenerek Tablo 2 ve 3'te verilmektedir. Elde edilen sonuçlardaki hatanın bir kaynağının nedeni HAD analizinde sabit boyutlu parçacığın ve şeklinin küresel olarak kullanılmış 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 viskozitedeki artış etkisini her iki çamur sisteminde de kaybetmektedir.

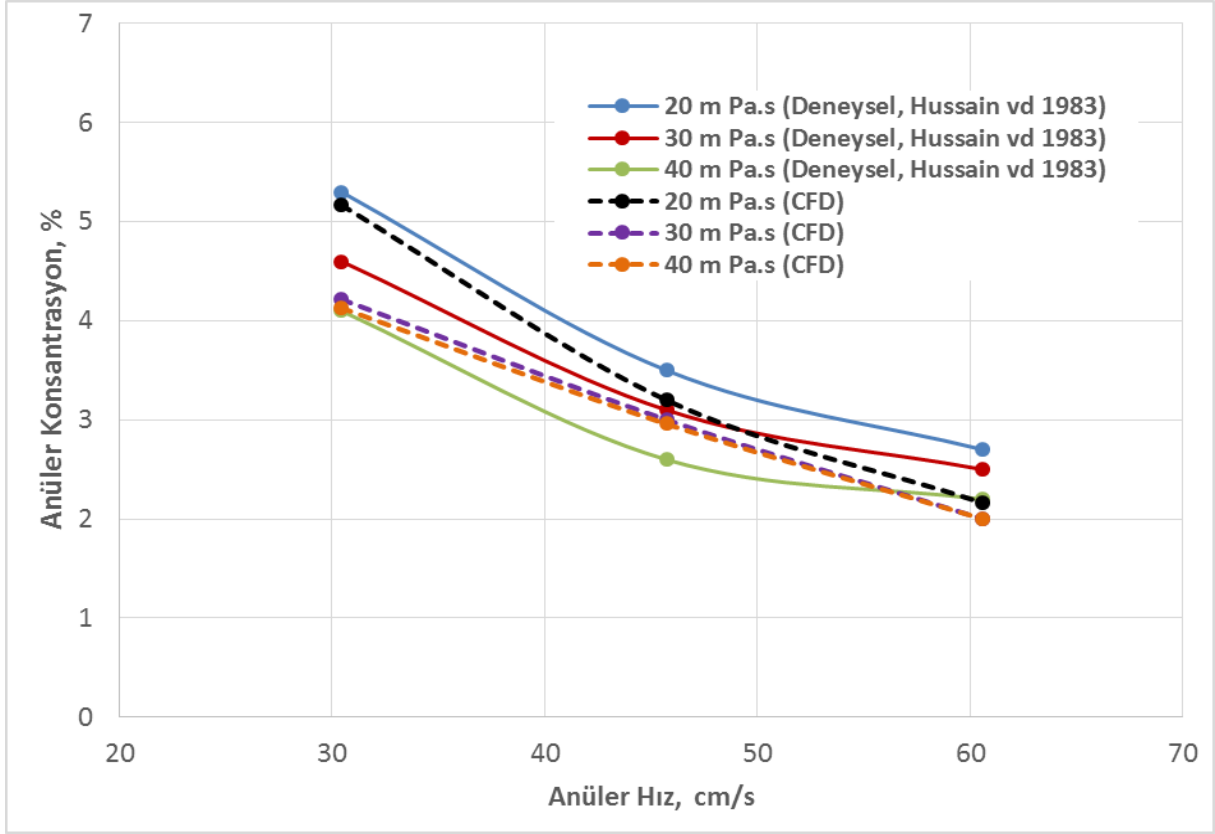
Tablo 1. Çamur sistemi katkı konsantrasyonları, [1].

Floküle Jel Sistem						
Çamur	Bentonite (kg/m ³)	KCL (%)	Carboxymethyl-cellulose (kg/m ³)	XC (kg/m ³)	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 ³)	Peltex (kg/m ³)	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 için HAD ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 6. Floküle jel çamur sistemi için HAD ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Tablo 2. Jel kimyasal çamur sistemi için göreceli hata.

		Anüler Hız, cm/s		
		30.45 cm/s	45.72 cm/s	60.6 cm/s
Viskozite	20 mPa.s	4.88 %	3.24 %	3.38 %
	30 mPa.s	7.07 %	2.05 %	1.66 %
	40 mPa.s	23.25 %	10.34 %	6.66 %

Tablo 3. Floküle jel çamur sistemi için göreceli hata.

		Anüler Hız, cm/s		
		30.45 cm/s	45.72 cm/s	60.6 cm/s
Viskozite	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 %

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 yöntemde elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu ve aralarındaki göreceli 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 içerisinde hesaplanmasında kullanılan parametreler.

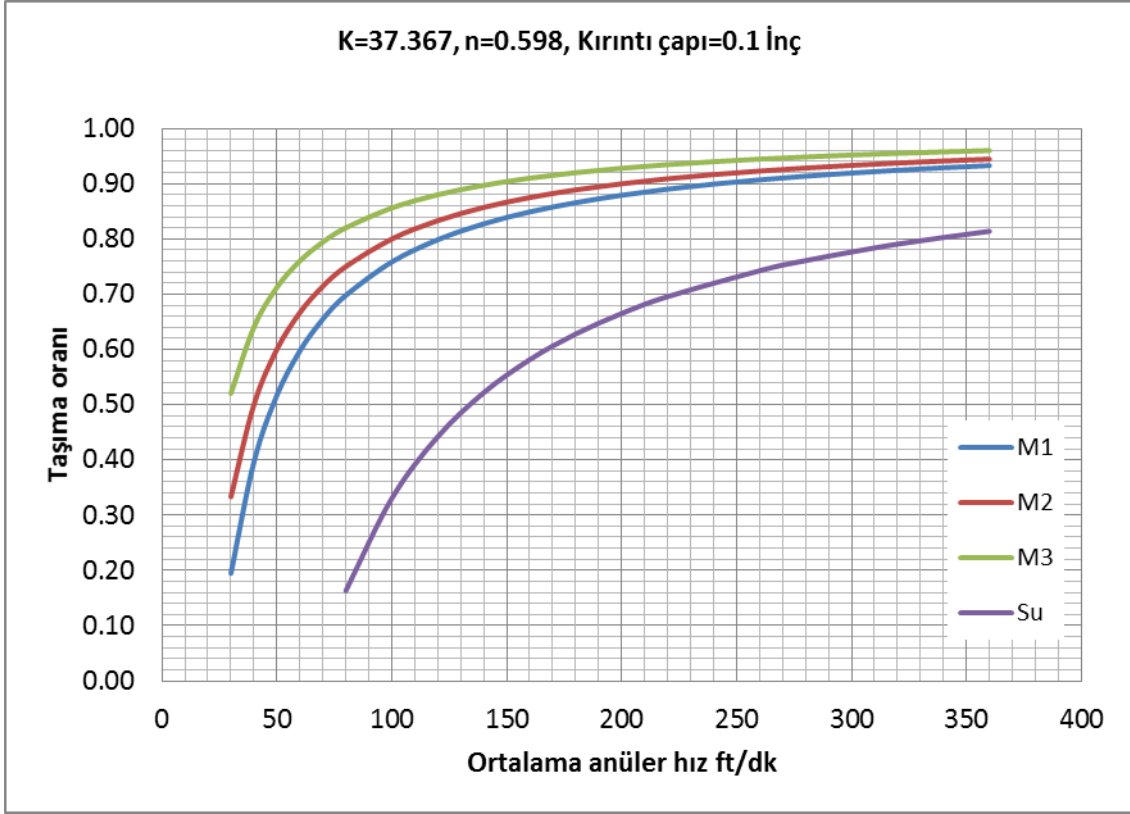
Kesinti çapı, inç.	0.1
Kesinti yoğunluğu, lbm/gal	21.44
Akışkan yoğunluğu, lbm/gal	8.34
Akışkan viskozitesi, cp	1
Küresellik, (Ψ), boyutsuz	1

3.2.2. Newtonian Olmayan Akışkan İçin Kayma Hızının Moore Korelasyonu İle Analitik Çözüm

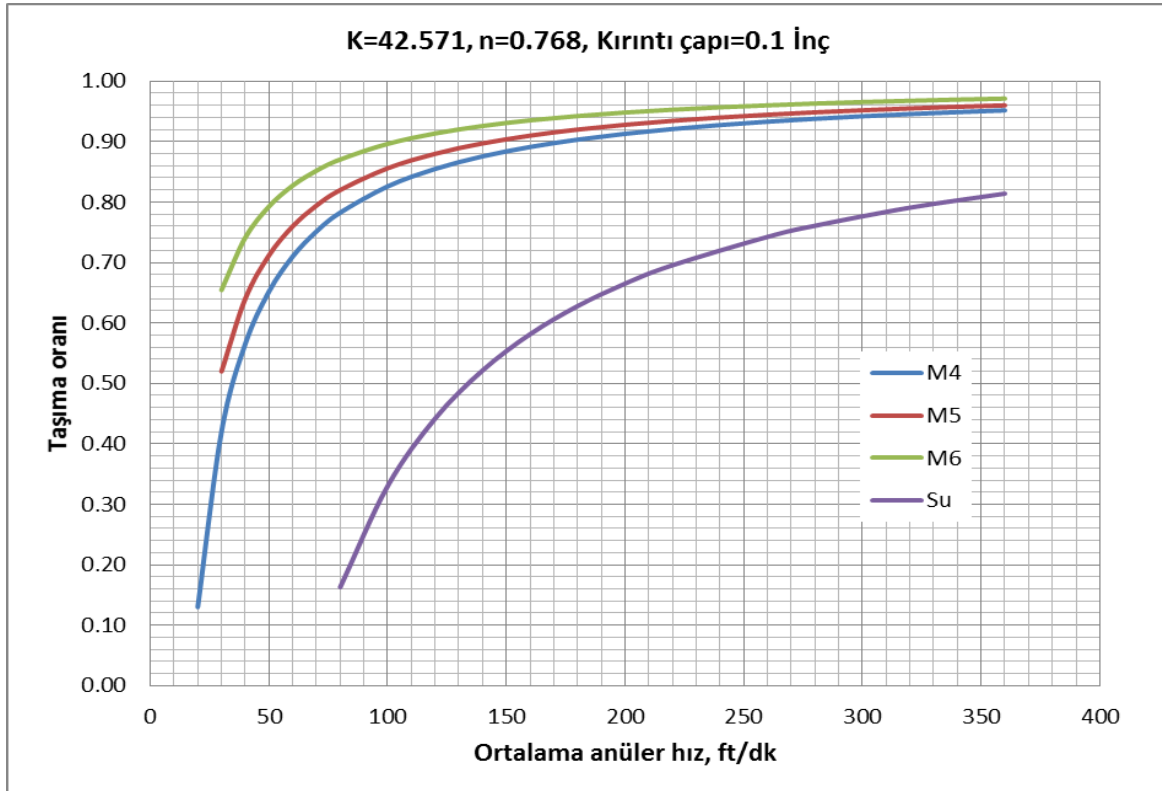
Yukarıda Bölüm 1.4'te verilen Moore yöntemi kullanılarak Newtonian olmayan Power Law bir akışkan için kayma hızı hesaplanmış ve sonuçlar aşağıda verilmektedir. Öncelikle eşdeğer görünür viskozite hesaplamaları yapılarak, parçacık Reynolds sayısı hesaplanmıştır. Daha sonra Şekil 4'ten elde edilen sürtünme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

Tablo 7. Kayma hızı hesaplarında kullanılan çamur ve kuyu özellikleri.

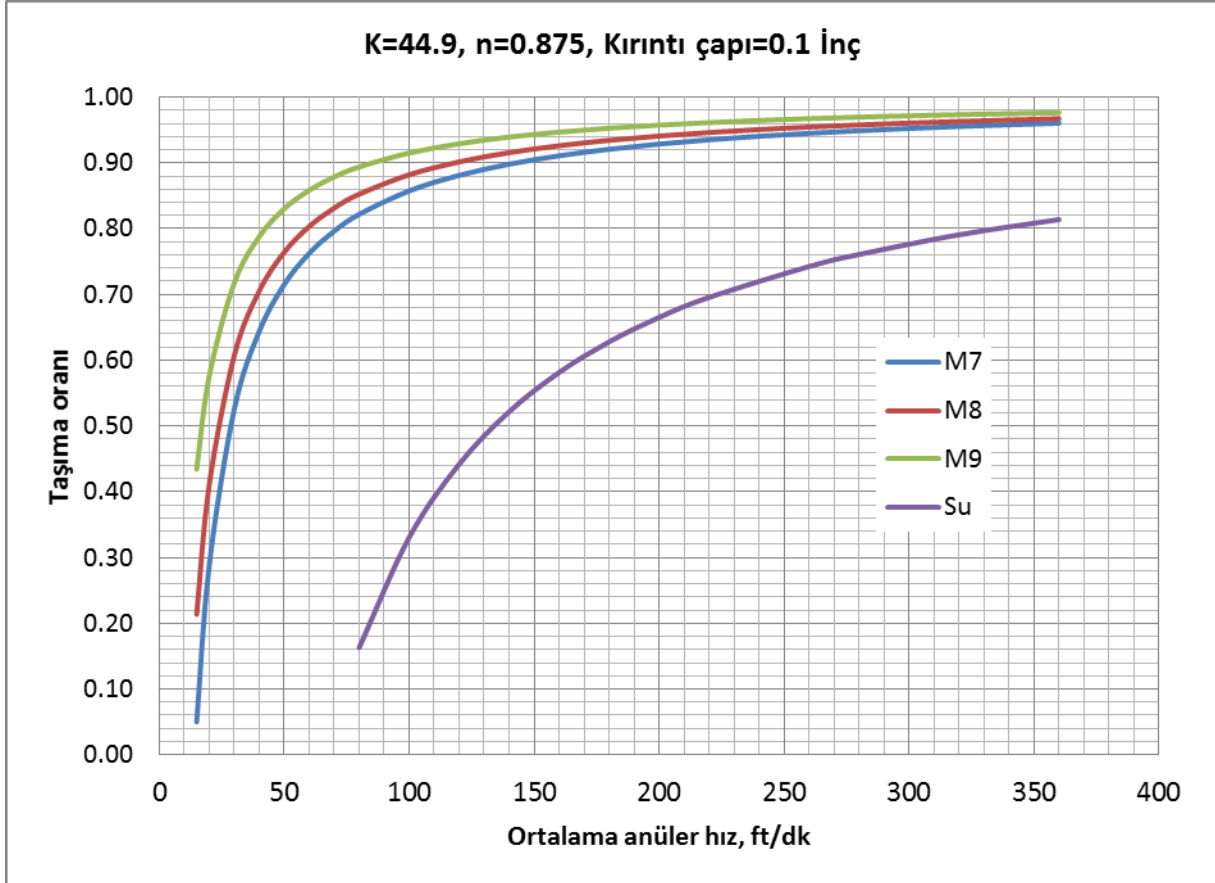
Kuyu çapı, inç	8
Boru çapı, inç	4
Çamur yoğunluğu, lbm/gal	10
Parçacık yoğunluğu, lbm/gal	21.44
Parçacık çapı, inç	0.1
Ortalama anüler hız, ft/dak	30
Ortalama anüler hız, ft/s	0.5
Kıvamlilik indeksi (K), cp	37.367
Akış davranış indeksi (n)	0.598



Şekil 7. Reolojik özellikleri K=37.367 ve n=0.598 olan çamurların kesinti taşıma oranları.



Şekil 8. Reolojik özellikleri K=42.571 ve n=0.768 olan çamurların kesinti taşıma oranları.



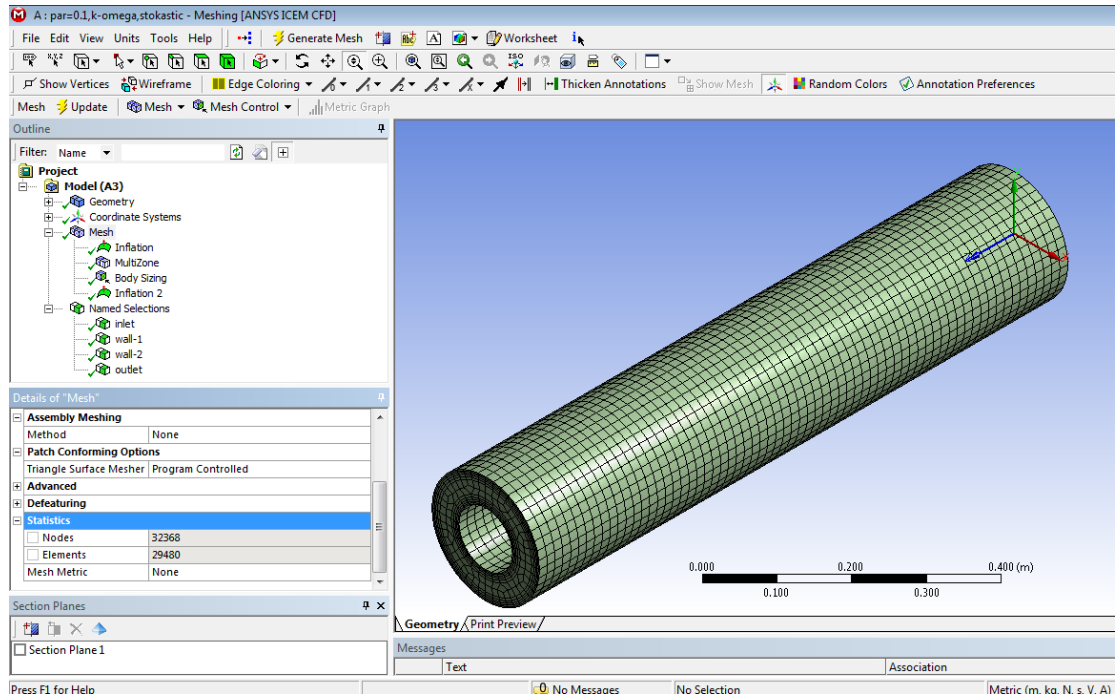
Şekil 9. Reolojik özellikleri K=44.9065 ve n=0.87575olan çamurların kesinti taşıma oranları.

3.2.3. HAD Simülasyon Analizi

Yukarıda Bölüm 3.2.2 ile analitik olarak elde edilen sonuçlar HAD simülasyonu kullanılarak incelenmiş ve aşağıda verilmektedir. Öncelikle simülasyonun yapılabilmesi için Tablo 7’de tanımlanan koşulları içeren akış geometrisi Design Modeler yazılımı kullanılarak çizdirilmiştir. Simülasyonda standart k- ω 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.

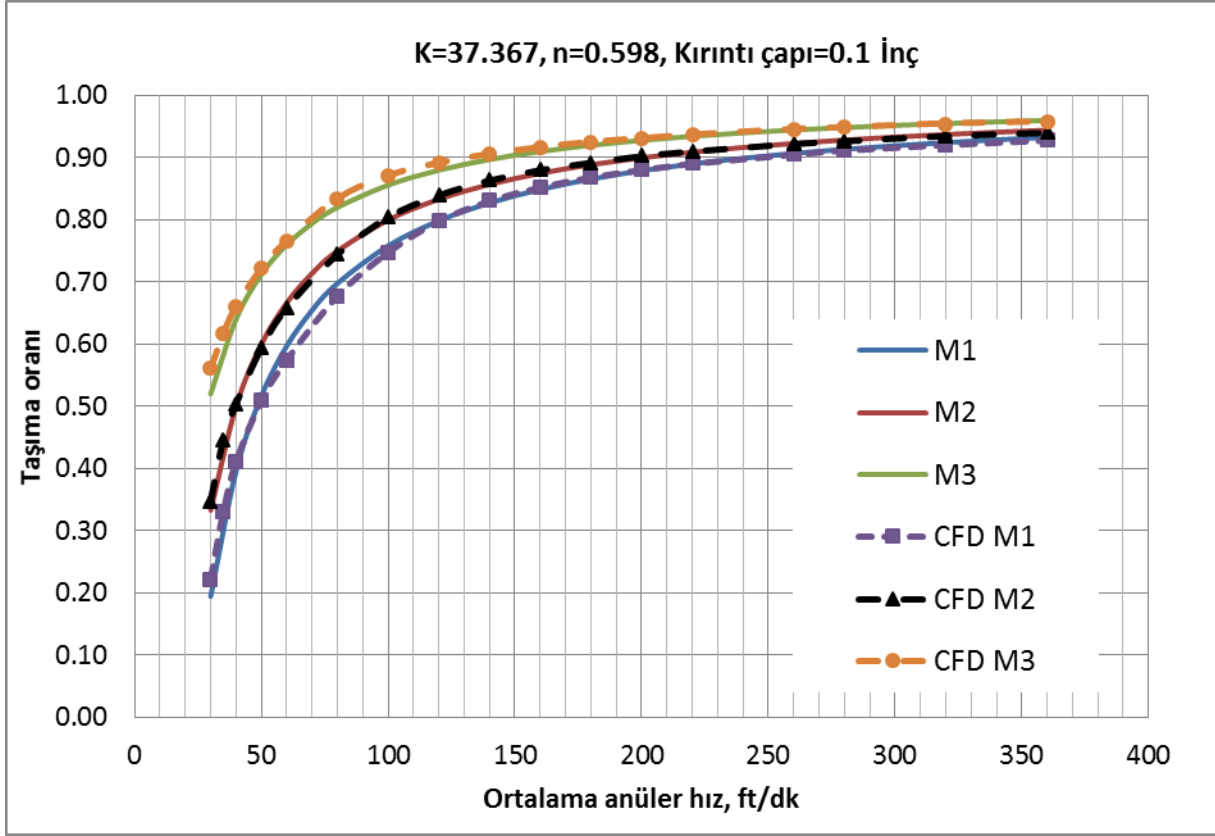
Şekil 11, 12 ve 13’den görüleceği gibi sabit reolojik değerlerde artan anüler hız ile birlikte kesinti taşınım oranı çamur yoğunluğunun artması ile artmakta ve daha iyi kuyu temizliği vermektedir. Ancak yoğunluğun etkisi anüler çamur hızının 150 ft/dak (2.5 ft/s) üzerinde etkisini kaybetmektedir. Benzer 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.



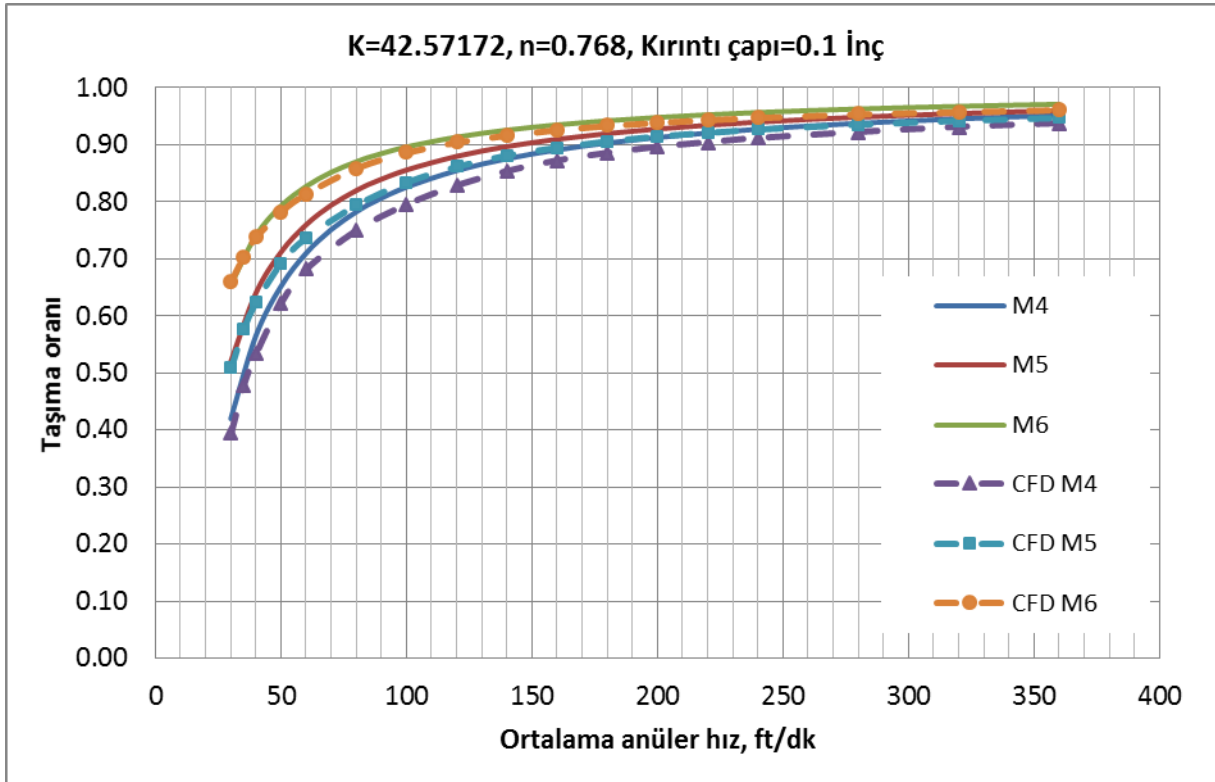
Şekil 10. Mesh edilmiş geometrik model.

HAD yönteminin en önemli özelliği analitik çözümü olmayan akış problemlerinin 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'de görülmektedir. Ancak bu iyileşme artan anüler hız ile 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 kullanılacak pompa çalıştırma koşulu elde edilebilmektedir.

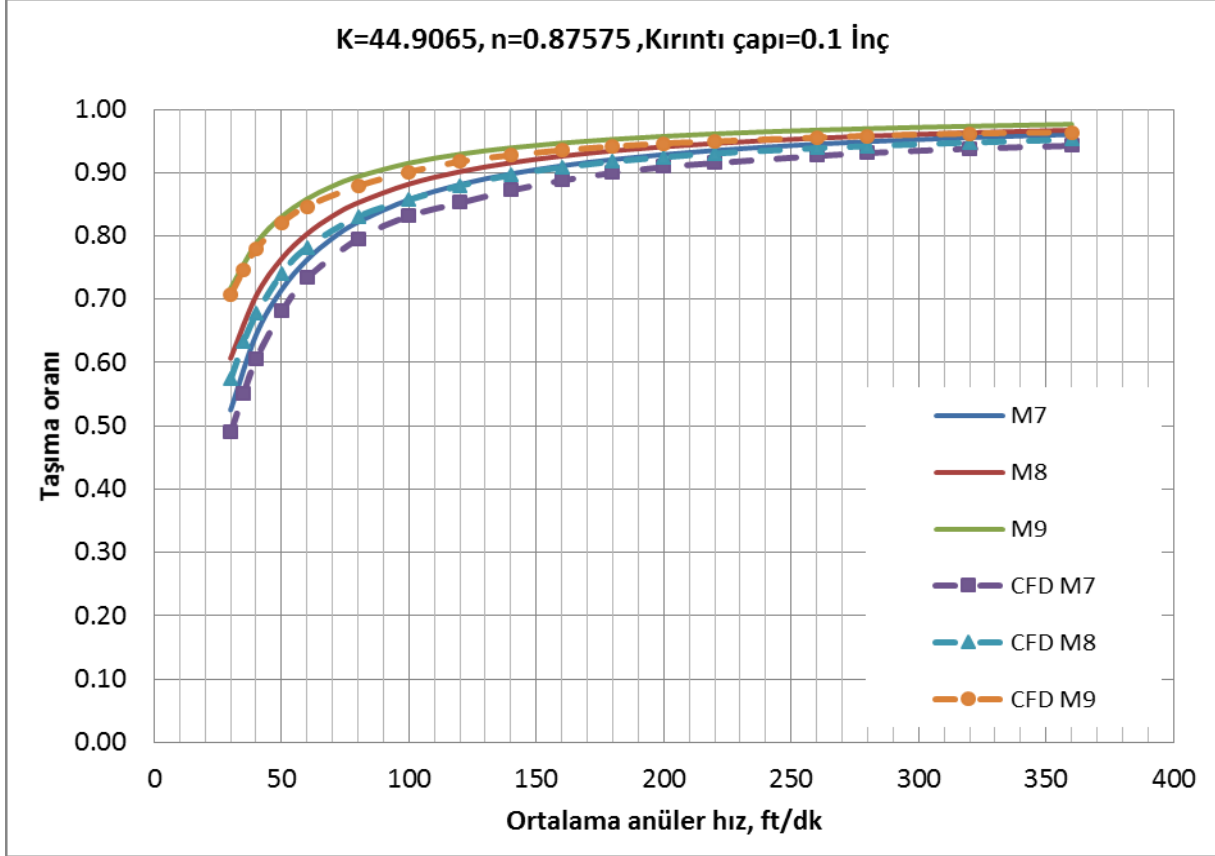
Şekil 15'te farklı kesinti boyutunun kuyu temizliğine veya kesinti taşınım oranına etkisi görülmektedir. Artan kesinti boyutu ile birlikte kesinti taşınım oranı oldukça düşmekte ve kuyu temizliğinin özellikle düşük anüler hızlarda bir sorun oluşturduğu anlaşılmaktadır. Kesinti boyutunun kuyu temizliği için önemli bir faktör olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 16'te 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.



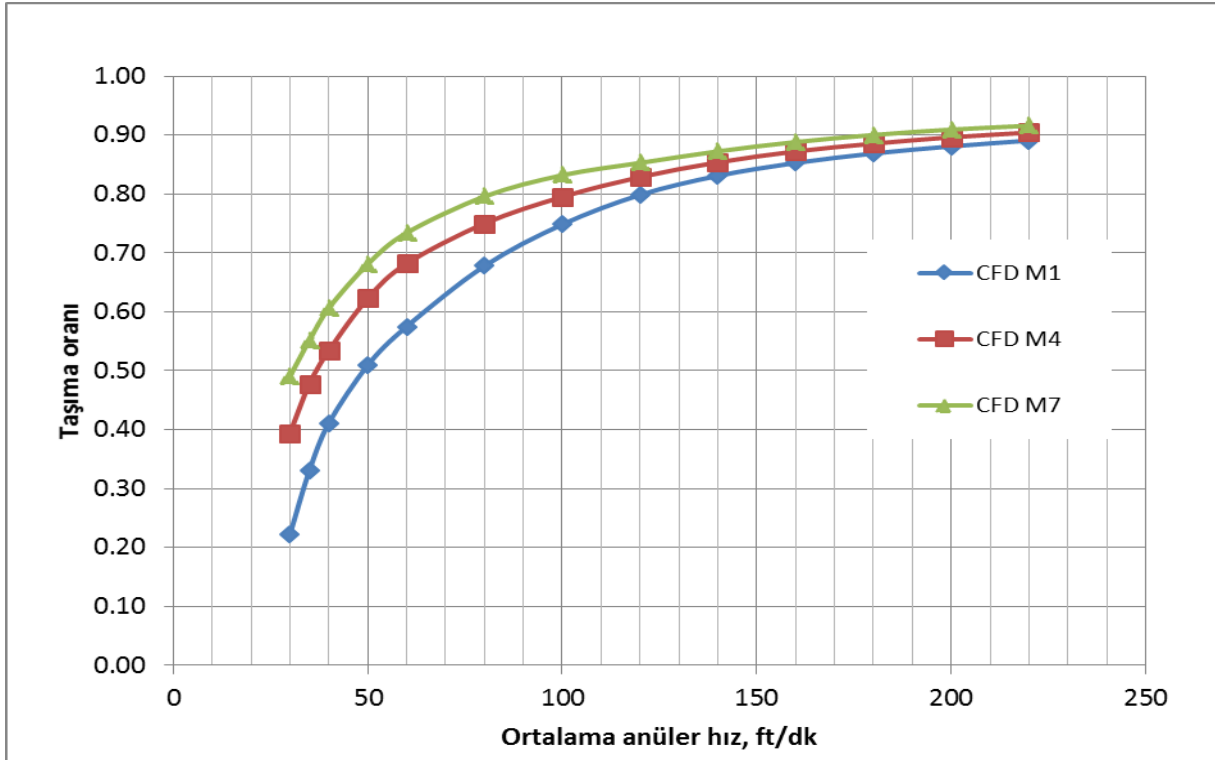
Şekil 11. HAD ve analitik yöntem (Moore korelasyonu) sonuçları (K=37.367, n=0.598).



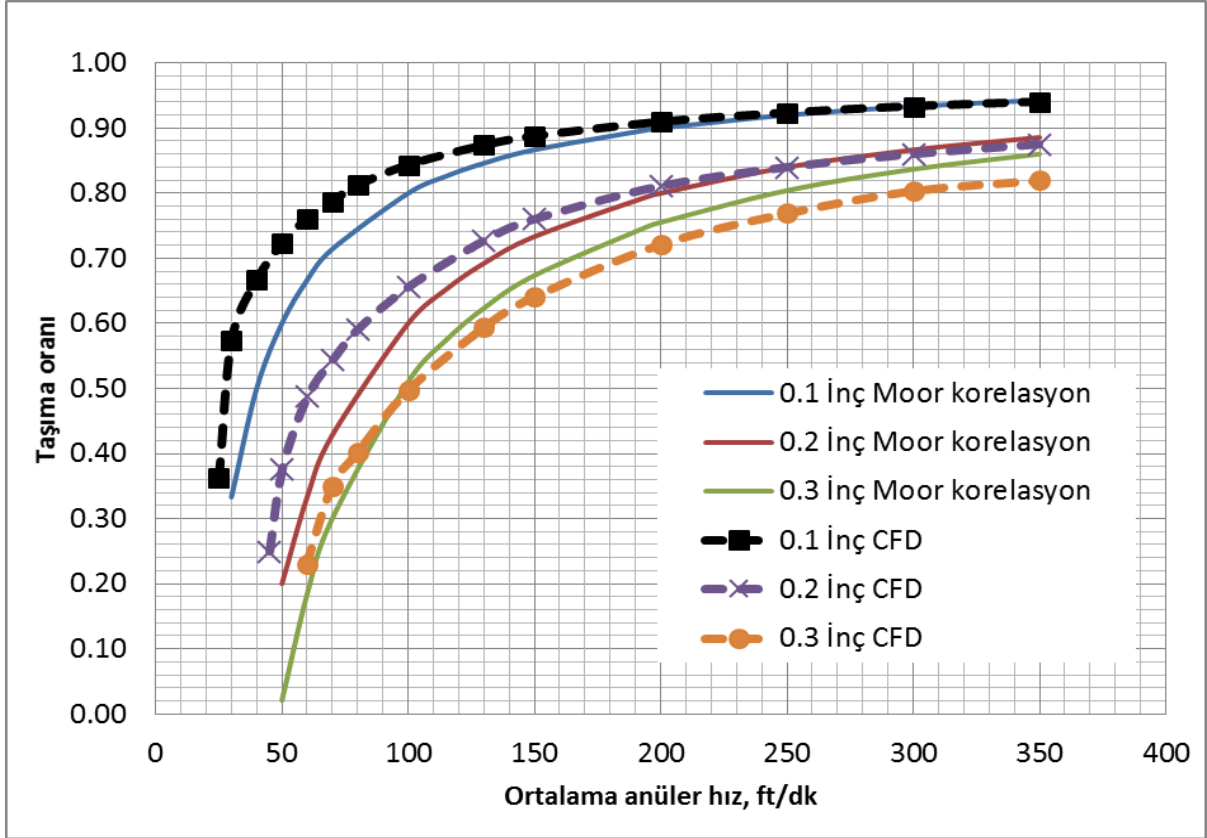
Şekil 12. HAD ve analitik yöntem (Moore korelasyonu) sonuçları, (K=42.571, n=0.768)



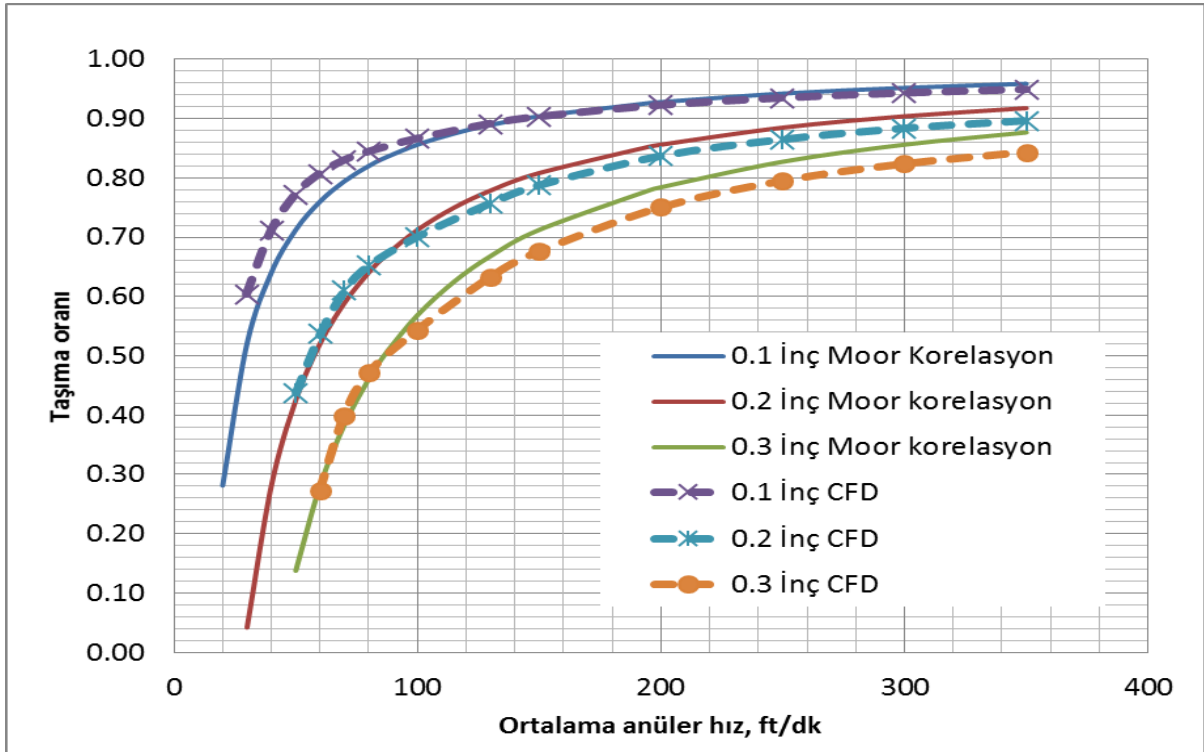
Şekil 13. HAD ve analitik yöntem (Moore korelasyonu) sonuçları, (K=44.9, n=0.875).



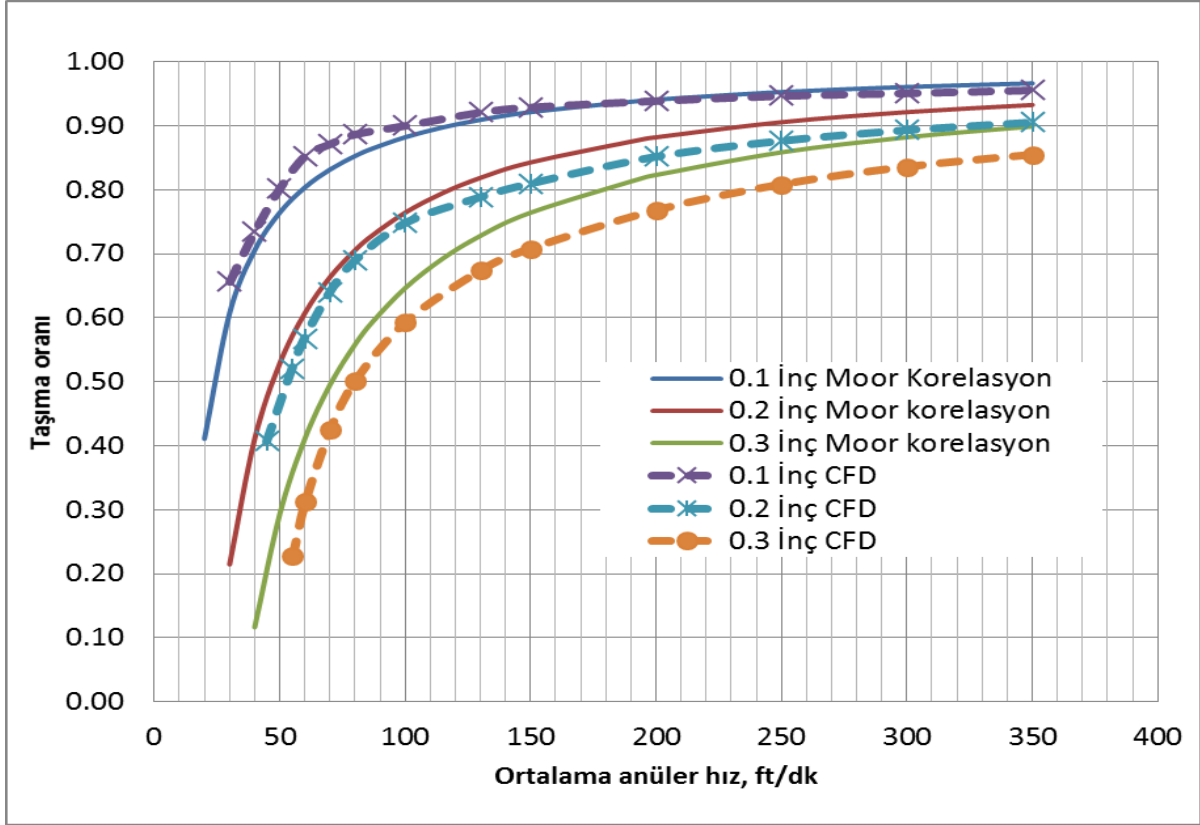
Şekil 14. Görünür viskozitenin taşıma oranına etkisi, (10 lbm/gal çamur, 0.1 inç parçacık).



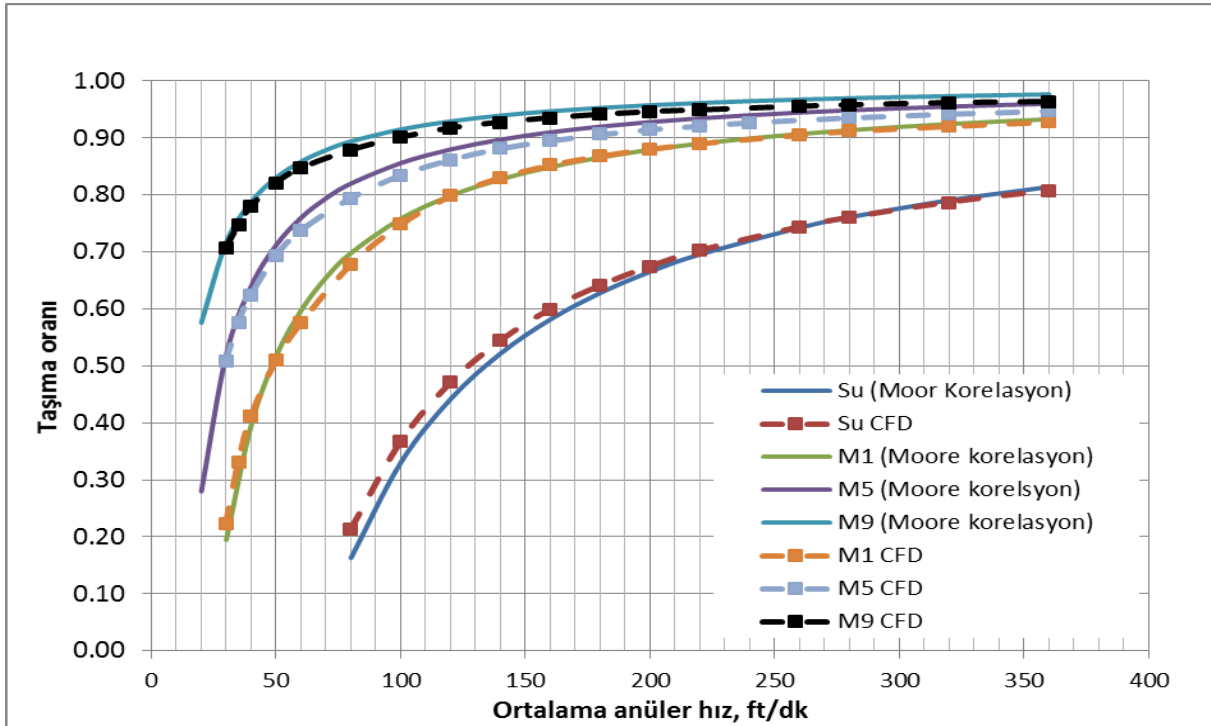
Şekil 15. Kesinti boyutunun M2 çamurun taşıma oranına etkisi, (12 ppg and K=37.367, n=0.598).



Şekil 16. Kesinti boyutunun M5 çamurun taşıma oranına etkisi, (12 ppg and K=42.57, n=0.768).



Şekil 17. Kesinti boyutunun M8 çamurun taşınım oranına etkisi, (12 ppg and $K=44.90$, $n=0.875$).



Şekil 18. Su ve farklı çamurlar için anüler hızın kesinti taşınımı üzerine etkisi.

Diğer taraftan çamur viskozitesinin kesinti taşınımına etkisi Şekil 14'ten de açıkça görülebilmektedir. Suya göre daha viskoziteli çamurlardan çok daha iyi kesinti taşınımı 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. Diğer bir ifade ile 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 taşınımı 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 taşınımı oranında iyileşmeler olmaktadır. İyileşme etkisi çamur yoğunluğu artışında daha belirgindir, ancak yüksek anüler hızlarda her iki parametreninde etkisi önemsiz olmaktadır. Diğer bir ifade ile 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 taşınımı 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.

KAYNAKLAR

- [1] Hussaini, S.M. and Jamal, A.Z., 1983. "Experimental Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [2] Bilgesu, H.I., Ali, M.W., Aminian, K., Amiri, S., 2002. "Computational Fluid Dynamics (CFD) as a Tool to Study Cutting Transport in Wellbores", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [3] Tomren, P.H., Lyoho, A.W., Azar, J.J., 1986. "Experimental Study of Cuttings Transport in Directional Well's", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [4] Ford, J.T., Peden, J.M., Oyenevin, M.B., Gao, E., Zarrough, R., 1990. "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [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", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [6] Okrajni, S.S. and Azar, J.J., 1986. "The Effect of Mud Rheology on Annular Hole Cleaning in Directional Wells", Society of Petroleum Engineers, USA.
- [7] Sifferman, T.R. and Becker, T.E., 1992. "Hole Cleaning in Full-Scale Inclined Wellbores, Society of Petroleum Engineers", USA.



- [8] Zeidler, H.U., 1972. “An Experimental Analysis of the Transport of Drilled Particles”, Rice University, Houston, Texas, USA.
- [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”, Society of Petroleum Engineers, USA.
- [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”, Vol. 2. Richardson, Texas: SPE Textbook Series, Society of Petroleum Engineers., USA.
- [12] ANSYS, Inc., 2011. “ANSYS FLUENT Theory Guide”, Release 14.0, ANSYS Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Ettehadi OSGOUEI

1979 yılı Tebriz-İran doğumludur. Eğitim hayatına İran’da başlamış ve 2004 yılında Tebriz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2007 yılında Türkiye’de İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2010 yılında Yüksek Mühendis unvanını almıştır. 2010 yılından itibaren İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde sondaj mühendisliği konularında doktora eğitimine devam etmektedir.

Bagtyyar DURDYEV

1988 Aşkabat-Türkmenistan doğumludur. İlk orta ve lise öğrenimini Türkmenistan’da tamamladı. 2010 yılında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği programında başladığı üniversite eğitiminden 2014 yılında mezun olmuştur. Mezuniyet tasarımı projesini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile sondaj kesintisinin taşınımı konusu üzerine yapmıştır. Halen Türkmenistan’da bir petrol şirketinde çalışmaktadır.

Gürşat ALTUN

1988 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1993 yılında Yüksek Mühendis ve Louisiana Eyalet Üniversitesinden (ABD) 1999 yılında Doktor unvanını almıştır. 2000 yılından itibaren İTÜ Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Sondaj mühendisliği, Kuyu tamamlama ve Kuyu logları konularında çalışmaktadır.

