





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
مهندسی اکتشاف معدن

مدل سازی انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های شیب‌دار تحت شرایط حفاری زیر تعادلی (UBD)

دانشجو:

رضا روکی

اساتید راهنما:

دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی

دکتر علی مرادزاده

اساتید مشاور:

دکتر محمود نوروزی

Dr. Vassilios C. Kelessidis

رساله دکتری برای اخذ درجه دکتری

شهریور ۱۳۹۲

صورت جلسه دفاع از رساله (فرم شماره ۱۲)

شماره: ۳۳/۱۱۳۲/۴۶-۳
تاریخ: ۳۱/۶/۹۲
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره ۱۲
صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای رضا روکی دانشجوی دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن ورودی سال ۱۳۸۸ در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۸ از رساله خود با عنوان: "مدل سازی انتقال خرده های حفاری در چاه های شیب دار تحت شرایط حفاری زیر تعادلی (UBD)" دفاع و با اخذ ۸۱.۵ به درجه: دکتری نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ذ) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
	دکتر فرامرز دولتی ارده جانی	استاد راهنما	استاد	
	دکتر علی مرادزاده	استاد راهنما	استاد	
	دکتر محمود نوروزی	استاد مشاور	استادیار	
	دکتر مرتضی اصلو	استاد مدعو خارجی	استاد	
	دکتر فضل اله ساغروانی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
	دکتر محسن شاه مردان	استاد مدعو داخلی	استادیار	
	دکتر مهرداد سلیمانی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه
ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء



تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

و

ہمسفر مہربانم

مشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خدای را که همیشه مرا مورد لطف و عنایت خود قرار داده تا به کجک بزرگانی طی طریق کنم و هم اکنون این تحقیق را به پایان برسانم. از این رو ضمن تقدیر و تشکر از این عزیزان، توفیق روز افزون ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

بدین وسیله از زحمات اساتید راهنمای محترم آقای دکتر فرامرزدولتی ارده جانی و آقای دکتر علی مرادزاده، اساتید مشاور آقای دکتر محمود نوروزی و آقای دکتر واسیلیوس کلینیدیس که بارها بنمودهای ارزشمندشان مراد انجام هر چه بهتر این پایان نامه یاری فرمودند تشکر و قدردانی می نمایم.

همچنین از اساتید محترم آقای دکتر مرتضی اصانلو، دکتر محسن شاه مردان و دکتر سید فضل اله ساغزوانی که زحمات داوران این پایان نامه را بر عهده داشتند، و بنمودهای ارزشمندی برای بهبود کار ارائه دادند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از کلیه اساتید دانشکده معدن که افتخار شاگردی اغلب آنها را داشتم و همچنین از کلیه کارمندان دانشکده معدن خصوصاً آقای حسین شاه حسینی تشکر می نمایم.

در پایان از کلیه دوستان و عزیزانی که مراد انجام این پایان نامه یاری نمودند، صمیمانه سپاسگزارم و آرزوی موفقیت برای ایشان دارم.

تعهد نامه

اینجانب **رضا روکی** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی اکتشاف معدن** دانشکده معدن، نفت و

ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **مدل سازی انتقال خرده های حفاری در چاه های**

شیب دار تحت شرایط حفاری زیر تعادلی (UBD) متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.



امضاء

تاریخ:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

حفاری با کف یکی از زیر شاخه‌های حفاری زیر تعادلی است که دارای مزایای زیادی در بسیاری از عملیات حفاری می‌باشد. اطلاع از هیدرولیک و انتقال خرده‌های حفاری (تمیزکاری چاه) توسط سیال کف یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در هزینه، زمان و کیفیت حفاری چاه برای تولید نفت و گاز می‌باشد. هدف این مطالعه، تحقیق و تحلیل کارایی تمیزکاری سیال حفاری کف در چاه‌های شیب‌دار با استفاده از روش‌های هوشمند، آماری و دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که در مطالعات دیگر صورت نگرفته است. پارامترهای رئولوژیکی سیالات حفاری غیرنیوتنی بنتونیتی و سیال کف، با استفاده از الگوریتم ژنتیک با درجه اطمینان بالایی تعیین گردید. با طراحی شبکه عصبی مصنوعی، سرعت سقوط ذرات در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تخمین زده شد. مقادیر R و RMS حاصل از پیش‌بینی در داده‌های آموزش برابر با $0/997$ و $0/021$ و برای داده‌های آزمون برابر با $0/974$ و $0/072$ می‌باشند. همچنین کارایی انتقال خرده‌ها توسط کف در فضای حلقوی افقی پیش‌بینی گردید. مقادیر R و RMS در داده‌های آموزش برابر با $0/993$ و $0/807$ و برای داده‌های آزمون برابر با $0/914$ و $1/9$ حاصل گردید. بعلاوه، کارایی انتقال خرده‌ها با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره، پیش‌بینی گردید و مقادیر R برای دو سری داده آموزش و تست برابر با $0/91$ و $0/84$ می‌باشد. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، توسط نرم افزار فلوئنت برای دو حالت جریان سیال کف و انتقال خرده‌ها با کف انجام پذیرفت. مقایسه نتایج روش عددی با نتایج آزمایشگاهی برای جریان کف، خطای نسبی کمتر از 11% را نشان داد. مقایسه نتایج با مقادیر آزمایشگاهی برای انتقال خرده‌ها، خطای نسبی کمتر از 8% نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله، مدل رئولوژیکی قانون توان در شبیه‌سازی عددی انتقال خرده‌ها در حالت فضای حلقوی شیب‌دار نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل در این مطالعه، روش‌های شبکه عصبی و دینامیک سیالات محاسباتی با قابلیت اطمینان خوبی، می‌توانند در مدل‌سازی انتقال خرده‌ها بکار روند.

کلمات کلیدی: انتقال خرده‌های حفاری، حفاری شیب‌دار، حفاری زیر تعادلی، سیال کف، روش‌های

هوشمند و آماری، دینامیک سیالات محاسباتی

مقالات مستخرج از رساله

مقالات ISI و علمی پژوهشی

- 1 R. Rooki, F. Doulati Ardejani, A. Moradzadeh, V.C. Kelessidis, M. Nourozi, 2012, Prediction of terminal velocity of solid spheres falling through Newtonian and non-Newtonian power law pseudoplastic fluid using artificial neural network, International journal of mineral processing, 110–111, pp. 53–61.
 - 2 Reza Rooki, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Hossein Mirzaei, Vassilios Kelessidis, Roberto Maglione, Mahmood Norouzi, 2012, Optimal determination of rheological parameters for herschel–bulkley drilling fluids using genetic algorithms (GAs), Korea-Australia Rheology Journal, 24, 3, pp. 163-170.
 - 3 Reza Rooki, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Mahmood Norouzi, 2013, Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, DOI 10.1007/s13202-013-0077-7.
- ۴ رضا روکی، محمود نوروزی، فرامرز دولتی ارده‌جانی، علی مرادزاده، ۱۳۹۲، مطالعه عددی جریان سیال حفاری کف در فضای حلقوی چاه‌های نفت، مجله مکانیک تربیت مدرس، ۱۳، ۷، ص ۷۴-۸۶.

مقالات کنفرانسی

- ۵ رضا روکی، فرامرز دولتی ارده‌جانی، علی مرادزاده، Vassilios Kelessidis، ۱۳۹۱، تخمین سرعت سقوط ذرات در سیالات حفاری نیوتنی و غیرنیوتنی با شبکه عصبی، سومین کنگره ملی نفت، تهران.
- ۶ رضا روکی، فرامرز دولتی ارده‌جانی، علی مرادزاده، محمود نوروزی، ۱۳۹۲، مطالعه خواص سیال غیرنیوتنی کف و تعیین پارامترهای رئولوژیکی آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، تهران.
- 7 Reza Rooki, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Mahmood Nourozi, 2013, Cuttings transport modeling in foam drilling using computational fluid

dynamics (CFD), The first Petroleum Technical Conference & Exhibition, Tehran.

- 8 Reza Rooki, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Mahmood Nourozi, 2013, Hole cleaning assessment in horizontal foam drilling using artificial neural network and multiple linear regression, The Second Scientific Conference of Hydrocarbon Reservoir Engineering and Upstream Industries, Tehran.
- 9 Reza Rooki, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Mahmood Nourozi, 2013, Effect of rheological model on cuttings transport in foam drilling, The Second Scientific Conference of Hydrocarbon Reservoir Engineering and Upstream Industries, Tehran.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ث.....	تقدیم.....
ح.....	تعهد نامه.....
خ.....	چکیده.....
د.....	مقالات مستخرج از رساله.....
۱.....	فصل اول: مقدمه.....
۲.....	۱-۱ مقدمه.....
۲.....	۲-۱ سیال حفاری.....
۴.....	۳-۱ حفاری زیر تعادلی (UBD).....
۵.....	۱-۳-۱ روش‌های حفاری زیر تعادلی.....
۶.....	۱-۱-۳-۱ حفاری با هوا.....
۶.....	۲-۱-۳-۱ حفاری با مه.....
۷.....	۳-۱-۳-۱ حفاری با مایع هوازده.....
۷.....	۴-۱-۳-۱ حفاری با کف.....
۸.....	۴-۱ بیان مساله.....
۱۱.....	۵-۱ فرضیات تحقیق.....
۱۱.....	۶-۱ اهداف تحقیق.....
۱۲.....	۷-۱ روش انجام تحقیق.....
۱۲.....	۸-۱ ساختار تحقیق.....
۱۴.....	فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده.....
۱۶.....	۱-۲ مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های قائم.....
۲۱.....	۲-۲ مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های افقی و شیب‌دار.....

۲۴	عوامل تاثیرگذار در انتقال خرده‌های حفاری.....	۳-۲
۲۵	خواص رئولوژیکی سیال حفاری.....	۱-۳-۲
۲۷	سرعت سیال در فضای حلقوی.....	۲-۳-۲
۳۱	رژیم جریان و رژیم لغزش ذره.....	۳-۳-۲
۳۱	پروفیل توزیع سرعت در جریان آرام با توجه به خواص رئولوژیکی.....	۴-۳-۲
۳۲	عدم هم‌مرکزی لوله حفاری و چاه.....	۵-۳-۲
۳۴	جریان دو فازی مایع/جامد در فضای حلقوی شیب‌دار.....	۶-۳-۲
۳۴	سرعت حفاری.....	۷-۳-۲
۳۵	سرعت چرخش لوله حفاری.....	۸-۳-۲
۳۵	خصوصیات خرده‌های حفاری.....	۹-۳-۲
۳۶	شیب چاه.....	۱۰-۳-۲
۳۷	دما و فشار.....	۱۱-۳-۲
۳۷	مطالعات انتقال خرده‌ها.....	۴-۲
۳۸	جریان دو فازی جامد- مایع و جامد- گاز.....	۱-۴-۲
۴۵	مطالعات جریان چند فازی.....	۲-۴-۲
۵۸	مطالعات عددی.....	۳-۴-۲

فصل سوم: خواص سیال کف و تعیین پارامترهای رئولوژیکی سیالات حفاری غیرنیوتنی با

۷۰	استفاده از الگوریتم ژنتیک.....	۷۰
۷۱	خواص سیال کف.....	۱-۳
۷۴	الگوریتم ژنتیک.....	۲-۳
۷۶	تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی سیالات حفاری غیرنیوتنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک.....	۳-۳
۷۹	تعیین پارامترهای رئولوژیکی سیال کف با استفاده از الگوریتم ژنتیک.....	۴-۳
۸۳	جمع بندی.....	۵-۳

فصل چهارم: مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از روش‌های هوشمند و رگرسیون

خطی چند متغیره ۸۵

- ۱-۴ شبکه عصبی پس انتشار خطا (BPNN) ۸۶
- ۲-۴ تخمین سرعت سقوط ذرات با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ۸۹
- ۳-۴ پیش‌بینی کارایی تمیزکاری چاه توسط سیال کف با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در فضای حلقوی افقی ۹۶
- ۱-۳-۴ تخمین غلظت حجمی خرده‌ها با شبکه عصبی مصنوعی ۹۷
- ۱-۳-۵ تخمین غلظت حجمی خرده‌ها با رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) ۱۰۲

فصل پنجم: مدل‌سازی جریان سیال کف در فضای حلقوی توسط دینامیک سیالات محاسباتی ۱۰۸

- ۱-۵ هندسه فضای حلقوی، شرایط مرزی و حل ۱۰۹
- ۲-۵ تجزیه و تحلیل نتایج ۱۱۴
- ۱-۲-۵ تاثیر مدل رئولوژیکی بر افت فشار ۱۱۴
- ۲-۲-۵ تاثیر سرعت سیال بر افت فشار ۱۱۶
- ۳-۲-۵ تاثیر کیفیت کف بر افت فشار ۱۱۷
- ۴-۲-۵ تاثیر پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی بر افت فشار ۱۱۸
- ۱-۴-۲-۵ تاثیر شاخص مقاومت سیال ۱۱۸
- ۲-۴-۲-۵ تاثیر شاخص رفتاری سیال ۱۱۹
- ۳-۴-۲-۵ تاثیر تنش تسلیمی ۱۲۱
- ۵-۲-۵ تاثیر چرخش لوله داخلی بر پروفیل سرعت جریان سیال کف ۱۲۲
- ۳-۵ مقایسه نتایج روش شکاف معادل و حل عددی برای مدل رئولوژیکی قانون توان ۱۲۴
- ۴-۵ جمع بندی ۱۲۵

فصل ششم: مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری با کف توسط دینامیک سیالات محاسباتی ۱۲۷

- ۱-۶ هندسه فضای حلقوی، شرایط مرزی و حل معادلات حاکم ۱۲۸
- ۲-۶ بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال خرده‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج ۱۳۰

۱۳۳.....	تأثیر سرعت و کیفیت سیال کف	۱-۲-۶
۱۳۵.....	تأثیر چرخش لوله حفاری	۲-۲-۶
۱۳۸.....	تأثیر مدل رئولوژیکی	۳-۲-۶
۱۴۰.....	تأثیر پارامترهای رئولوژیکی	۴-۲-۶
۱۴۳.....	تأثیر شیب چاه	۵-۲-۶
۱۴۵.....	تأثیر اندازه ذرات	۶-۲-۶
۱۴۶.....	تأثیر فشار چاه	۷-۲-۶
۱۴۷.....	تأثیر سرعت حفاری (ROP)	۸-۲-۶
۱۴۷.....	جمع بندی	۳-۶
۱۴۹.....	فصل هفتم: بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادها	
۱۵۰.....	۱-۷ بحث و نتیجه‌گیری	
۱۵۴.....	۲-۷ پیشنهادها	
۱۵۵.....	پیوست‌ها	
۱۵۶.....	پیوست الف: نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک	
۱۶۱.....	پیوست ب: داده‌های آزمایشگاهی و روش رگرسیون خطی چندمتغیره	
۱۶۸.....	پیوست ج: روش مدل‌سازی عددی جریان چند فاز و روش شکاف معادل	
۱۸۵.....	منابع	

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: انواع سیال حفاری ۳
- شکل ۱-۲: نمای کلی دکل و فرآیند حفاری دورانی ۱۵
- شکل ۲-۲: نیروهای موثر بر روی ذره در فضای حلقوی شیب‌دار ۱۶
- شکل ۳-۲: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره جامد در جریان قائم ۱۶
- شکل ۴-۲: مدل‌های رئولوژیکی متداول برای سیالات حفاری ۱۹
- شکل ۵-۲: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره ۲۲
- شکل ۶-۲: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره ۲۲
- شکل ۷-۲: تاثیر عوامل مختلف بر تمیزکاری چاه ۲۵
- شکل ۸-۲: تاثیر رئولوژی گل بر سرعت بحرانی سیال در چاه پنج اینچ ۲۷
- شکل ۹-۲: تاثیر رئولوژی گل بر سرعت بحرانی سیال در چاه هشت اینچ ۲۷
- شکل ۱۰-۲: سرعت ته‌نشست ذره در یک فضای حلقوی شیب‌دار ۳۱
- شکل ۱۱-۲: رابطه پروفیل سرعت جریان گل با شاخص رفتاری سیال ۳۲
- شکل ۱۲-۲: عدم هم‌مرکزی فضای حلقوی ۳۳
- شکل ۱۳-۲: فضای حلقوی هم‌مرکز در مقابل عدم هم‌مرکزی ۳۳
- شکل ۱۴-۲: تاثیر عدم هم‌مرکزی بر پروفیل سرعت فضای حلقوی ۳۴
- شکل ۱۵-۲: الگوی کیفی جریان دو فازی جامد/مایع ۳۴
- شکل ۱۶-۲: مکانیسم انتقال فضای حلقوی خرده‌ها در چاه‌های قائم و شیب‌دار ۳۶
- شکل ۱-۳: فرآیند الگوریتم ژنتیک ۷۵
- شکل ۲-۳: مقایسه داده‌های ویسکومتری و دو روش GS و GA برای بنتونیت- لیگنت (نمونه‌های S14، S15 و S17) ۷۷
- شکل ۳-۳: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۷۰٪ (p=۲۵ psi) ۸۰
- شکل ۴-۳: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۸۰٪ (p=۲۵ psi) ۸۰
- شکل ۵-۳: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۹۰٪ (p=۲۵ psi) ۸۰
- شکل ۶-۳: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر (p=۱۰۰ psi) ۸۲
- شکل ۱-۴: الف) شبکه تک لایه با R ورودی و S نرون در لایه میانی ب) توابع محرک ۸۶
- شکل ۲-۴: الف) شماتیکی از شبکه ب) مشخصات لایه‌ها ج) وزن‌ها، بایاس و تابع فعال‌ساز لایه میانی ... ۹۴
- شکل ۳-۴: سرعت سقوط حاصل از شبکه در مقابل سرعت سقوط اندازه‌گیری شده در داده‌های آموزش ۹۴

- شکل ۴-۴: سرعت سقوط ذره حاصل از شبکه در مقابل سرعت سقوط اندازه‌گیری شده در داده‌های آزمون ۹۵.....
- شکل ۴-۵: مقایسه سرعت سقوط حاصل از شبکه و روابط تجربی برای سیالات غیرنیوتنی ($n > 0.5$) ... ۹۵
- شکل ۴-۶: مقایسه سرعت سقوط حاصل از شبکه با رابطه کلیسیدیس برای سیالات غیرنیوتنی ($0.6 < n < 1$)..... ۹۶
- شکل ۴-۱۳: ساختار شبکه پس انتشار خطا جهت تخمین غلظت حجمی خرده‌های حفاری ۹۹
- شکل ۴-۱۴: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آموزش ۱۰۰
- شکل ۴-۱۵: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آزمون ۱۰۰
- شکل ۴-۱۶: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در کل داده‌ها ۱۰۱
- شکل ۴-۱۷: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه و مدل مکانیکی دوان در مقابل مقادیر آزمایشگاهی دوان ۱۰۱
- شکل ۴-۱۸: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه و مدل مکانیکی دوان در مقابل مقادیر آزمایشگاهی چن ۱۰۲
- شکل ۴-۱۹: مراحل مختلف انجام مطالعه آماری ۱۰۳
- شکل ۴-۲۰: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها توسط رگرسیون در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آموزش ۱۰۵
- شکل ۴-۲۱: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها توسط رگرسیون در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آزمون ۱۰۵
- شکل ۴-۲۲: مقایسه مقادیر رگرسیون چند متغیره و مدل مکانیکی دوان با مقادیر آزمایشگاهی دوان ۱۰۶
- شکل ۴-۲۳: مقایسه مقادیر رگرسیون چند متغیره و مدل مکانیکی دوان با مقادیر آزمایشگاهی چن .. ۱۰۶
- شکل ۵-۱: تصویر شماتیک از دستگاه آزمایش دینامیکی ۱۱۰
- شکل ۵-۲: ساختار و مقطع عرضی فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز ۱۱۲
- شکل ۵-۳: توسعه یافتگی جریان در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (سرعت ورودی سیال 0.762 m/s ، کیفیت کف 0.8% و مدل هرشل بالکلی) ۱۱۳

- شکل ۴-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s و کیفیت کف برابر با 0.70) در چرخش‌های مختلف لوله ۱۱۵
- شکل ۵-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s و کیفیت کف برابر با 0.80) در چرخش‌های مختلف لوله ۱۱۵
- شکل ۶-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s و کیفیت کف برابر با 0.90) در چرخش‌های مختلف لوله ۱۱۶
- شکل ۷-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (مدل هرشل-بالکلی، بدون چرخش لوله و کیفیت کف 0.80) در سرعت‌های مختلف سیال ۱۱۷
- شکل ۸-۵: افت فشار حاصل از حل عددی برای کیفیت‌های مختلف کف در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s) در چرخش‌های مختلف لوله ۱۱۷
- شکل ۹-۵: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s) ۱۱۸
- شکل ۱۰-۵: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر پروفیل سرعت ۱۱۹
- شکل ۱۱-۵: تاثیر شاخص رفتاری سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s) ۱۲۰
- شکل ۱۲-۵: تاثیر شاخص رفتاری سیال بر پروفیل سرعت ۱۲۱
- شکل ۱۳-۵: تاثیر تنش تسلیم سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز (سرعت ورودی سیال 0.762 m/s) ۱۲۲
- شکل ۱۴-۵: تاثیر تنش تسلیم سیال بر پروفیل سرعت در فضای حلقوی هم‌مرکز ۱۲۲
- شکل ۱۵-۵: کنتور سرعت محوری (m/s) جریان کف با کیفیت 0.80 در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز در سرعت‌های مختلف چرخش لوله (سرعت ورودی سیال 0.762 m/s و مدل هرشل بالکلی) ۱۲۳
- شکل ۱۶-۵: کنتور سرعت مماسی (m/s) جریان کف با کیفیت 0.80 در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز (سرعت سیال 0.762 m/s و مدل هرشل بالکلی) ۱۲۴
- شکل ۱۷-۵: افت فشار حاصل از حل عددی و شکاف معادل در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (سرعت سیال 0.762 m/s) ۱۲۵
- شکل ۱۷-۵: برای مدل قانون توان (کیفیت کف 0.80 ، چرخش لوله 0 rpm) ۱۲۵

- شکل ۶-۱: طرح شماتیک از دستگاه پیشرفته انتقال خرده‌ها..... ۱۲۹
- شکل ۶-۲: هندسه و شبکه محاسباتی فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز..... ۱۳۰
- شکل ۶-۳: نیروی عمل کننده گرانی با توجه به شیب چاه..... ۱۳۱
- شکل ۶-۴: تاثیر سرعت سیال و کیفیت کف بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز..... ۱۳۳
- شکل ۶-۵: تاثیر سرعت سیال و کیفیت کف بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز..... ۱۳۴
- شکل ۶-۶: تاثیر کیفیت کف بر توزیع خرده‌ها در دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال ۵ ft/s)..... ۱۳۵
- شکل ۶-۷: تاثیر چرخش لوله بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=/.90$)..... ۱۳۶
- شکل ۶-۸: تاثیر چرخش لوله بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($\Gamma=/.90$)..... ۱۳۶
- شکل ۶-۹: تاثیر چرخش لوله بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=/.90$)..... ۱۳۷
- شکل ۶-۱۰: تاثیر چرخش لوله بر توزیع غلظت خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال ۵ ft/s)..... ۱۳۷
- شکل ۶-۱۱: تاثیر چرخش لوله بر سرعت خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال ۵ ft/s)..... ۱۳۸
- شکل ۶-۱۲: تاثیر سرعت بر نسبت انتقال خرده‌ها در شیب‌های مختلف با مدل رئولوژیکی HB ($\Gamma=/.70$)..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱۳: تاثیر سرعت بر نسبت انتقال خرده‌ها در شیب‌های مختلف با مدل رئولوژیکی PL ($\Gamma=/.70$)..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱۴: تاثیر مدل رئولوژیکی بر توزیع خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز افقی و قائم (سرعت سیال ۵ ft/s)..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۵: تاثیر تنش تسلیم بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=/.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s..... ۱۴۱
- شکل ۶-۱۶: تاثیر تنش تسلیم بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=/.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s..... ۱۴۱
- شکل ۶-۱۷: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=/.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s..... ۱۴۲
- شکل ۶-۱۸: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=/.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s..... ۱۴۲

- شکل ۶-۱۹: تاثیر شاخص رفتاری بر انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=0.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s ۱۴۳
- شکل ۶-۲۰: تاثیر شاخص رفتاری بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=0.70$)، سرعت سیال ۵ ft/s ۱۴۳
- شکل ۶-۲۱: تاثیر شیب چاه بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$) ۱۴۴
- شکل ۶-۲۲: تاثیر شیب چاه بر توزیع خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)، سرعت سیال ۵ ft/s ۱۴۵
- شکل ۶-۲۳: تاثیر اندازه خرده‌ها بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$) ۱۴۶
- شکل ۶-۲۴: تاثیر فشار محیط بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$) ۱۴۶
- شکل ۶-۲۵: تاثیر فشار محیط بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$) ۱۴۷
- شکل ۶-۲۶: تاثیر سرعت حفاری بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$) ۱۴۷
- شکل الف-۱: مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش GS و GA برای گل حفاری بنتونیت- لیگنیت (نمونه‌های S11، S12) که روش NL مقادیر تنش تسلیمی منفی دارند ۱۵۷
- شکل الف-۲: مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش NL و GA برای گل حفاری بنتونیت- لیگنیت (نمونه‌های S7، S8) که هر دو روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند ۱۵۸
- شکل الف-۳: مقایسه بین داده‌های تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش NL و GA برای گل حفاری بنتونیت- لیگنیت (نمونه‌های S9 و S10) که هر دو روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند ۱۵۸
- شکل الف-۴: خطای حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که روش NL تنش تسلیمی منفی دارد ۱۵۸
- شکل الف-۵: خطای حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که هر سه روش تنش تسلیمی مثبت دارند ۱۵۹
- شکل الف-۶: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر ($p=25 \text{ psi}$) ۱۵۹
- شکل الف-۷: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر ($p=200 \text{ psi}$) ۱۵۹
- شکل الف-۸: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر ($p=400 \text{ psi}$) ۱۶۰
- شکل الف-۹: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف ۸۰٪ پلیمری (۵٪) در شرایط مختلف فشار ۱۶۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مروری بر مهمترین کارهای انجام شده انتقال خرده‌های حفاری ۶۸
- جدول ۱-۳: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت- لیگنیت ۷۷
- جدول ۲-۳: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت- لیگنیت ۷۸
- جدول ۳-۳: پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۲۵ psi ۸۱
- جدول ۴-۳: پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل- بالکلی کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۲۵ psi ... ۸۱
- جدول ۵-۳: پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل- بالکلی برای سیال کف در کیفیت‌ها (Γ) و فشارهای (p) مختلف ۸۲
- جدول ۶-۳: پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان برای سیال کف در کیفیت‌ها (Γ) و فشارهای (p) مختلف ۸۳
- جدول ۱-۴: ماتریس آزمایشات انتقال خرده‌ها با استفاده از کف بدون پلیمر ۹۷
- جدول ۲-۴: ماتریس همبستگی بین پارامترهای مستقل و غلظت حجمی خرده‌ها ۹۸
- جدول ۳-۴: نتایج آماری مدل رگرسیون خطی چند متغیره برای پیش‌بینی غلظت خرده‌ها ۱۰۴
- جدول ۴-۴: مقایسه R و AAPE حاصل از دو روش مختلف در مرحله آموزش و آزمون برای غلظت حجمی خرده‌ها ۱۰۵
- جدول ۵-۴: مقایسه خطای میانگین نسبی (AAPE) حاصل از روش‌های مختلف برای دو سری داده آزمایشگاهی ۱۰۷
- جدول ۱-۵: بررسی شبکه‌های محاسباتی مختلف ۱۱۴
- جدول ۱-۶: سرعت ورودی فاز جامد (خرده‌ها) ۱۳۱
- جدول ۲-۶: مقادیر ورودی مدل برای بررسی تاثیر گرانی در شیب‌های مختلف ۱۳۲
- جدول ۳-۶: خلاصه‌ای از پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی انتقال خرده‌ها با استفاده از کف ۱۳۲
- جدول الف-۱: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت- لیگنیت ۱۵۷
- جدول ب-۱: خواص سیال و ذرات جامد کروی و نتایج آزمایشگاهی سرعت سقوط ۱۶۲
- جدول ب-۲: داده‌های آزمایشگاهی انتقال خرده‌ها توسط کف در فضای حلقوی افقی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز ۱۶۴

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

با توجه به افزایش روز افزون تقاضای انرژی، توسعه فعالیت‌های حفاری در جهان افزایش یافته است. فرآیند حفاری یکی از مراحل مهم تولید نفت و گاز است و هزینه زیادی را در بر می‌گیرد. در چند دهه اخیر حفاری چاه‌های شیب‌دار به دلیل افزایش قابل توجه در میزان برداشت از سازندهای نازک مورد توجه قرار گرفته است. برای انتقال خرده‌های حفاری، سیال حفاری معمولاً از مرکز لوله حفاری به داخل چاه پمپاژ شده و همراه با خرده‌های کنده شده، از فضای حلقوی (فضای حلقوی^۱) بین لوله و چاه به سطح زمین بر می‌گردد. انتقال خرده‌های حفاری یک عامل مهم در حفر چاه‌های نفت و گاز به خصوص چاه‌های شیب‌دار است که تاثیر زیادی در موفقیت عملیات حفاری دارد. از طرفی در حفاری‌های شیب‌دار و افقی مشکلاتی همچون گیر افتادگی لوله بر اثر اختلاف فشار بین سیال حفاری و سیال منفذی وجود دارد. از جمله روش‌هایی که برای حل این مشکلات ارائه شده و به سرعت در حال توسعه می‌باشد، حفاری زیر تعادلی (UBD)^۲ است. یکی از روش‌های حفاری UBD، حفاری با سیال کف می‌باشد. حفاری با کف به عنوان یک سیستم جریان چند فازی دارای مزیت‌هایی از جمله بهبود کارایی تمیزکاری چاه، محافظت مخزن هیدروکربنی، افزایش در سرعت حفاری و کاهش هزینه حفاری می‌باشد (Zhu et al., 1995). با این حال، کارایی انتقال خرده‌های حفاری با سیال چند فازی به خاطر پیچیدگی آن کمتر توصیف گردیده است و مطالعات مربوط به انتقال خرده‌های حفاری با سیال کف با روش‌های عددی و هوشمند در مراحل اولیه است.

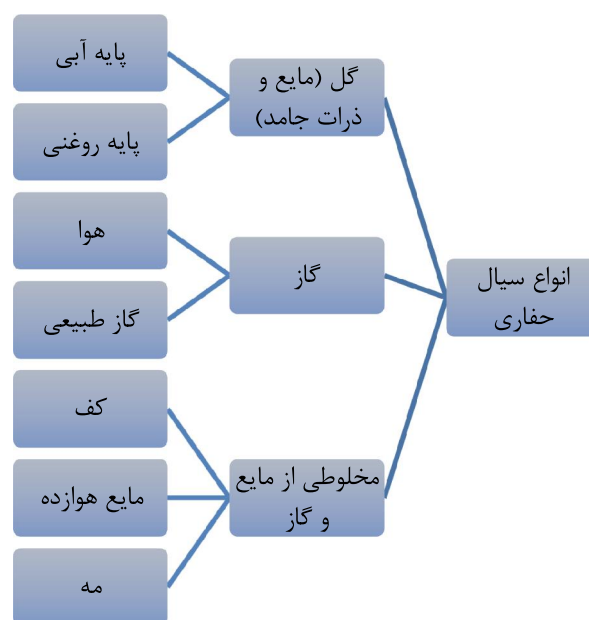
۲-۱ سیال حفاری

برای تامین فشار هیدرولیک چاه و خارج‌سازی خرده‌های حفاری، احتیاج به سیال (یا گل حفاری) می‌باشد. در ساخت سیال حفاری باید دقت زیادی به خرج داد به دلیل این که اکثر مشکلات حفاری به طور مستقیم یا غیر مستقیم به انتخاب نامناسب سیال حفاری مربوط می‌شوند و کیفیت آن در راندمان حفاری نقش اساسی دارد. به علاوه اینکه هزینه تهیه سیال حفاری بسیار بالاست. مهمترین

1- Annulus

2- Under Balanced Drilling

وظایف سیال حفاری شامل موارد زیر می‌شود (اصانلو، ۱۳۷۵، Azar and Bourgoyne et al., 1991، Robello Samuel, 2007): انتقال خرده‌های حفاری به سطح، تعلیق خرده‌های حفاری در زمان توقف گردش سیال حفاری، خنک کردن مته و کاهش اصطکاک رشته ابزار حفاری، پایداری دیواره‌های چاه، جلوگیری از ورود سیال‌های موجود در تشکیلات به داخل چاه، ارائه اطلاعات زمین‌شناسی و تحمل بخشی از وزن لوله‌های حفاری و جداری در هنگام معلق بودن داخل چاه. به طور کلی سیالات حفاری را می‌توان بر حسب فاز غالب به سه نوع گاز، مایع و مخلوطی از هر دو تقسیم بندی کرد (اصانلو، ۱۳۷۵؛ عادل زاده، ۱۳۸۵). در شکل ۱-۱ انواع سیال حفاری ارائه شده است:



شکل ۱-۱: انواع سیال حفاری

سیالات از دیدگاه رئولوژیکی، به دو گروه نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم می‌شوند. در سیال نیوتنی، رابطه بین تنش برشی و کرنش برشی مستقیم است ولی در بیشتر سیالات حفاری که دارای رفتار رئولوژیکی غیرنیوتنی هستند، رابطه مستقیمی بین تنش برشی و کرنش برشی وجود ندارد. مدل‌های رئولوژیکی مختلفی (مدل بینگهام پلاستیک^۱، مدل قانون توان^۲، مدل قانون توان تسلیمی (هرشل - بالکلی)^۳)،

1- Bingham Plastic Model (BP)

2- Power Law Model (PL)

3- Herschel-Bulkley Model (HB)

یکپارچه^۱، مدل رابرتسون استیف^۲، مدل کاسون^۳ برای توصیف سیالات غیرنیوتنی وجود دارند و در فصل دوم در مورد مهمترین مدل‌های رئولوژیکی کاربردی سیالات حفاری توضیح داده می‌شود.

۱-۳ حفاری زیر تعادلی (UBD)

در هنگام حفاری دو نوع فشار در ته چاه موجود است. اول فشار سیال حفاری که ناشی از وزن ستون آن است و دیگری فشار سازند که ناشی از فشار سیال داخل آن است. با توجه به غالب بودن هر کدام از این فشارها، روش‌های حفاری، شامل حفاری فرا تعادلی (OBD)^۴، حفاری تعادلی و حفاری زیرتعادلی می‌شود. در حفاری معمولی، فشار سیال ناشی از وزن ستون آن در داخل چاه، بیشتر از فشار محلی سازند می‌باشد. برای کنترل افت سیال و نفوذ ذرات به داخل سازند، یک فیلتری از کیک گل با نفوذپذیری کم بر روی دیواره چاه در مقابل سازندهای تراوا تشکیل می‌شود، ولی کنترل پیوسته و موثر افت سیال و مهاجرت جامدات از بین فیلتر، به طور واقعی غیرممکن است. عمل تشکیل کیک گل احتیاج به مقداری افت سیال دارد. در بیشتر موارد، فشار فرا تعادلی همراه با سیستم‌های گل و خرده‌های حفاری، می‌تواند به طور جدی به سازندها صدمه وارد کند و نفوذپذیری را پایین آورد. خسارت سازند یکی از نگرانی‌های اصلی در حفاری چاه‌های افقی و توسعه‌ای می‌باشد، زیرا چاه‌ها به مدت طولانی در معرض سیالات حفاری و تکمیلی قرار می‌گیرند، و تکمیل چاه باز، برای بیشتر چاه‌های افقی و توسعه‌ای که در معرض هجوم سیال قرار می‌گیرند، کاری معمول است. اخیراً، حفاری زیر تعادلی (حفاری با فشاری کمتر از فشار محلی سازند) به عنوان یک گزینه برای کاهش خسارت سازند در چاه‌های افقی و قائم مطرح می‌باشد. با طراحی مناسب، حفاری زیر تعادلی می‌تواند از خسارت سازند جلوگیری کرده، تولید را افزایش داده و باعث کاهش هزینه تکمیل شود. ولی در طی حفاری زیر تعادلی، ایجاد و نگه داشتن شرایط زیر تعادلی در کل زمان حفاری چاه بسیار مشکل است (Shale, 1995). در نتیجه باید شرایط جریان چند فازي تحلیل گردد. یکی از مهم‌ترین مسائل در

1- Unified Model
2- Robertson and Stiff Model
3- Casson Model
4- Over Balance Drilling

حفاری افقی زیر تعادلی، انتقال خرده‌های حفاری به سطح می‌باشد. خرده‌های حفاری یا به صورت لایه ساکن و یا لایه متحرک جمع می‌شوند، که می‌تواند باعث گیر افتادن لوله، هرزروی جریان، نیروهای گشتاور و کششی اضافی و سیمان کاری ضعیف گردد. شدت این مسائل به اندازه، دانسیته و شکل خرده‌های حفاری، رئولوژی و سرعت سیال حفاری و ساختار چاه بستگی دارد (Adewumi et al., 1993). مکانیسم کار به شیب چاه نسبت به حالت قائم بستگی دارد، برای چاه‌های با شیب زیاد که امکان تشکیل بستر ساکن خرده‌های حفاری وجود دارد، غلطش مکانیسم اصلی انتقال می‌باشد. برای شیب‌های متوسط که امکان تشکیل لایه متحرک وجود دارد، مکانیسم اصلی انتقال، نیروی برآ می‌باشد (Clark and Bickham, 1994). بنابر این، می‌توان با بکارگیری روش‌های مناسب از انتقال کافی خرده‌های حفاری در چاه‌های افقی و شیب‌دار اطمینان حاصل کرد (Guo et al., 1996).

۱-۳-۱ روش‌های حفاری زیر تعادلی

همان‌طور که اشاره شد، حفاری زیر تعادلی زمانی حاصل می‌شود که فشار موثر سیال حفاری درون چاه کمتر از فشار منفذی سازند باشد. در بسیاری از موارد، در سازندهایی که مواد هیدروکربوری استخراج شده، لازم است به طور مصنوعی دانسیته گل و فشار هیدرواستاتیک را برای ایجاد شرایط زیرتعادلی، کاهش داد. چهار نوع روش حفاری زیر تعادلی وجود دارد که هر کدام کاربرد و هدف خاصی دارد: حفاری با هوا، حفاری با مه^۱، حفاری با سیالات هوازده^۲، حفاری با کف^۴. این روش در حفاری مناطق مستعد هرزروی گل، مخازن تخلیه شده، مخازن شکافدار طبیعی، مناطق حساس به آب بکار رود و شامل مزایای افزایش سرعت حفاری و عمر مته، کاهش احتمال گیر کردن رشته حفاری در درون چاه، به حداقل رساندن هرزروی گل در حین حفاری، بهبود بخشیدن به ارزیابی سازند، افزایش تولید چاه، کاهش و یا عدم نیاز به تحریک اولیه چاه، مزایای زیست محیطی می‌باشد. مواردی که UBD توصیه نمی‌شود شامل سازندهای به شدت سست، سازندهای با احتمال تورم دیواره، سازندهای فوق‌العاده پرفشار، مخازن کم تراوا می‌باشند. با انتخاب روش صحیح، حفار می‌تواند به طور موفقیت آمیزی حفاری زیر تعادلی را برای برخی کاربردهای خاص بکار گیرد (Zhu et al., 1995).

1- Lift

2- Mist drilling

3 - Gasified liquid drilling

4 - Foam drilling

۱-۳-۱ حفاری با هوا

در این روش، از هوا (یا گاز)، نیتروژن یا گازهای هیدرو کربوری دیگر به عنوان سیال حفاری استفاده می‌شود. حفاری با هوا، احتیاج به مقدار کافی هوا برای تمیزکاری موثر چاه دارد. سرعت‌های پایین منجر به تجمع خرده‌ها در چاه، بخصوص در حفاری افقی می‌گردد. استفاده از هوا به عنوان سیال حفاری دارای مزیت‌های مختلف از جمله افزایش سرعت حفاری، مزایای محیط زیستی و برای سازندهای حساس به آب و خشک مناسب است (Zhu et al., 1995, Adewumi and Tian, 1989).

۱-۳-۲ حفاری با مه

در حفاری با مه، هوا فاز پیوسته و یک فاز آبی به صورت قطرات ناپیوسته می‌باشد. حفاری با مه معمولاً برای سازندهای خیس استفاده می‌شود اما مقدار آب سازند نباید زیاد باشد چون می‌تواند باعث مشکلات تمیزکاری چاه گردد (Zhu et al., 1995). در طی حفاری با مه، مقدار کمی آب شامل ماده کف‌ساز با گاز (هوا، نیتروژن، گاز طبیعی، دی اکسید کربن یا گازهای غیر فعال) در سطح زمین تزریق می‌گردد. ماده کف‌ساز تنش‌های سطحی بین آب و خرده‌های حفاری را کاهش داده و باعث می‌گردد که قطرات کوچک آب و خرده‌های حفاری به صورت مه ریز در سیال برگشتی پراکنده شوند و از تشکیل لایه گل جلوگیری شود. این روش معایبی دارد. باید مقدار مناسبی از ترکیب صابون و آب برای دستیابی به شرایط عملیاتی عادی به چاه تزریق گردند. ولی تعیین ترکیب مناسب آب و صابون بسیار مشکل است. بسیاری از سازندهای شور، کف زدهای موثری هستند و احتیاج به انواع خاصی از صابون برای ایجاد کف دارند. حفاری با مه، احتیاج به حجم بیشتری گاز نسبت به حفاری با هوا دارد، در نتیجه فشاری دو برابر ایجاد می‌کند. اگر ماده کف‌ساز یا هوای ناکافی استفاده شود، فشار تزریق به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. در حفاری با هوا یا حفاری با مه، اگر هوا (شامل اکسیژن) به عنوان گاز تزریقی استفاده شود در مواجهه با هیدروکربن‌ها، احتمال آتش سوزی در ته چاه وجود دارد. آتش سوزی ته چاه زمانی رخ می‌دهد که گاز و نفت همراه با هوا در فشار و دمای کافی برای شرایط آتش سوزی به هم برسند. انفجار ته چاه یک رخداد بسیار مهم است که می‌تواند باعث ذوب

مته و لوله‌ها گشته و ابزارهایی را غیر ممکن کند (Shale, 1995). با این حال می‌توان با وارد کردن مقادیری از آب سرد قبل از رسیدن به دمای آتش سوزی، از بروز آن جلوگیری گردد. همچنین برای جلوگیری از آتش سوزی می‌توان از گازهای نیتروژن، دی اکسید کربن یا گازهای غیر فعال به جای هوا استفاده نمود.

۳-۱-۳-۱ حفاری با مایع هوازده

یک سیال حفاری دو فازی گاز-مایع در این عملیات استفاده می‌شود. مایع هوازده زمانی استفاده می‌شود که مقدار آب تولیدی سازند برای خارج‌سازی با روش‌های حفاری با کف و مه خیلی بیشتر باشد. سیستم گل هوازده، یک سیال دارای هوا است که از تزریق هوا یا یک گاز غیر فعال (نیتروژن یا دی اکسید کربن) به داخل گل معمولی ایجاد می‌گردد. این سیستم مزایای مربوط به حفاری با گل و حفاری با هوا را با هم ترکیب می‌کند. گل هوازده می‌تواند برای حفاری مخازن کم فشار، مخازن شکسته یا مخازن تولید کننده آب بدون هرزروی گل استفاده شود. سیستم گل هوازده می‌تواند دارای مواد افزودنی شیمیایی برای کاهش گرانروی، فشار اصطکاکی و کاهش هرزروی باشد (Zhou, 2008).

۴-۱-۳-۱ حفاری با کف

در این حفاری، سیال حفاری از آب، مواد شیمیایی و گاز (از قبیل هوا) تشکیل شده است. آب فاز پیوسته و گاز قطرات ناپیوسته هستند. کف می‌تواند با پمپ نمودن محلول آب و مواد شیمیایی از بین یک لوله و نتوری به داخل سیستم گاز، تولید شود. کف بسیار پایدار و چسبنده می‌باشد. کف نیز علاوه بر خاصیت تمیزکاری چاه، اندود گل نازکی روی دیواره چاه ایجاد می‌کند که تا حدودی باعث پایدار دیواره چاه می‌شود. این روش حفاری در سنگ‌های پایدار استفاده می‌شود (Teichrob and Manuel, 1997, Okpobiri and Ikoku, 1986, Shale, 1995, Ramalho, 2006).

استفاده از کف، دارای مزیت‌هایی نسبت به سیستم هوا و مه می‌باشد. اولاً چون کف دارای گرانروی بالاست دارای قابلیت بالایی در انتقال خرده‌ها می‌باشد و احتیاج به سرعت‌های کمتری در فضای حلقوی دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که کف ۲ تا ۸ برابر آب قابلیت برآ خرده‌ها را دارد.

همچنین مشاهده شده این سیالات توانایی انتقال خرده‌های تا ۱۵ گرم و اندازه دو در دو سانتی متر را دارند (Li, 2004). در حفاری با کف، سرعت فضای حلقوی کمتر از ۵۰ فوت بر دقیقه غیر معمول نیست (Zhu et al., 1995). سرعت کمتر فضای حلقوی می‌تواند فرسایش چاه را کاهش دهد. در بعضی از سازندها که حفاری زیر تعادلی با توجه به گرادیان کم شکستگی لازم می‌شود، فرسایش سازند در سرعت‌های بالای سیستم‌های هوا و مه، استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. از دیگر مزیت‌های حفاری با کف، جلوگیری از آتش سوزی ته چاه می‌باشند. پتانسیل آتش سوزی در این روش با توجه به سیستم هوای درونی کف، وجود ندارد. همچنین کف در خارج‌سازی آب تولید شده، قابلیت بهتری دارد. سیال کف قادر است تا ۵۰۰ بشکه در ساعت (bbl/hr) از سیالات تولیدی ته چاه را خارج کند (Shale, 1995). همه این مزایا، سیستم کف را به یکی از انعطاف پذیرترین سیستم‌های حفاری زیر تعادلی تبدیل کرده است. ظرفیت انتقال جامدات با کف، تابعی از سرعت، دانسیته و خواص رئولوژیکی آن است. دانسیته کف وابسته به نسبت حجمی مایع/هوا است که با عمق و فشار نیز تغییر می‌کند. بنابر این درک رئولوژی و مکانیسم جریان چند فازی سیستم‌های کف با توجه به طبیعت تراکم‌پذیری آنت از موارد مهم در پیش‌بینی پارامترهای عملیاتی مختلف مورد نیاز در حفاری با کف است. از نکات مهم دیگر در حفاری با کف، پایداری کف است. سازندهای شور و هیدروکربن‌ها، معمولاً کف زدهای موثر هستند. کیفیت کف (نسبت حجم گاز به مجموع حجم گاز و مایع) توسط تولید بالای سیال سازند، کاهش می‌یابد. برای اطمینان از تولید کم یا تولید نشدن سیال سازند، چاه‌ها اندکی در شرایط فشار فرا تعادلی حفر می‌شوند. ولی نگه داشتن این شرایط فرا تعادلی یا تعادلی بسیار مشکل است (Guo et al., 1996, Adewumi et al., 1993). با توجه به استفاده از سیال کف در این مطالعه برای شبیه‌سازی انتقال خرده‌ها، در فصل چهارم بیشتر به خواص کف پرداخته می‌شود.

۴-۱ بیان مساله

انتقال خرده‌های حفاری (تمیزکاری چاه) یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در هزینه، زمان و کیفیت حفاری چاه برای تولید نفت و گاز می‌باشد. برای انتقال خرده‌های حفاری، سیال از مرکز لوله حفاری

به داخل چاه پمپاژ شده و از فضای حلقوی بین لوله و چاه همراه با خرده‌ها به سطح زمین بر می‌گردد. با افزایش انجام حفاری شیب‌دار و بسیار شیب‌دار یا افقی، ملاحظات بیشتری باید برای فرآیند انتقال با توجه به تمایل خرده‌های حفاری به سقوط از حالت معلق و تشکیل بستری از خرده‌های حفاری در بخش‌های پایین فضای حلقوی، در نظر گرفته شود. سیال حفاری باید دارای هیدرولیک خاص برای ایجاد سرعت کافی برای خارج نمودن خرده‌های حفاری باشد. مشکلات حفاری که باعث پایین آمدن کارایی حفاری می‌گردد شامل تمیزکاری نامناسب چاه، افت‌های فشار قابل توجه، زون‌های هرزروی گل، شکستگی سازند، ژله‌ای شدن سیال و هجوم سیال سازند می‌باشند. اگر خارج‌سازی خرده‌های حفاری به خوبی کنترل نشود، می‌تواند باعث مشکلات جدی از قبیل گیر افتادن لوله (ابزار یابی یا خروج از مسیر چاه)، کاهش سرعت حفاری، خوردگی وسایل درون چاهی، گشتاور اصطکاکی اضافی (افزایش در قدرت مورد نیاز سیستم چرخش)، مشکل شدن لوله‌گذاری، مشکلات شکاف‌دار شدن در طی عملیات سیمان‌کاری و مشکل شدن عملیات نمودارگیری گردد. هر کدام از این مشکلات به تنهایی می‌توانند هزینه و زمان زیادی را هدر بدهند. بنابر این سعی صنعت حفاری باید غلبه بر این مشکلات باشد.

با افزایش نیاز به چاه‌های افقی و شیب‌دار، مسائل انتقال خرده‌های حفاری از چاه‌های قائم به سمت چاه‌های افقی و شیب‌دار متمرکز شده است. انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های افقی و شیب‌دار به مدت طولانی با سیالات معمولی مطالعه شده است (Pigott, 1941; Gavignet and Sobey, 1989; Loureiro et al., 2010; Wang et al., 2007; Clark and Bickham, 1994; Larsen, 1990). با توجه به اهمیت زیاد ذخایر هیدروکربنی و مشکلات عدیده در توسعه میادین نفت و گاز، تکنولوژی حفاری نیاز به پیشرفت‌هایی برای کم نمودن هزینه‌ها برای موقعیت‌های اکتشافی پیچیده دارد. برای حفاظت از مخازن هیدروکربنی، کاهش مخاطرات حفاری، کاهش هزینه و افزایش تولید چاه، حفاری زیر تعادلی و حفاری با فشار مدیریت شده، زمینه‌های مورد علاقه شرکت‌های جهان می‌باشند. حفاری با سیال کف به عنوان یک سیال انعطاف پذیر یکی از گزینه‌های مورد استفاده

در حفاری زیر تعادلی می‌باشد که با توجه به خواص آن، می‌تواند در زمینه انتقال خرده‌ها بسیار مفید و مثمر ثمر باشد. مطالعات زیادی در زمینه انتقال خرده‌ها با سیال کف انجام نشده است (Machado and Ikoku, 1982; Owayed, 1997; Saintpere et al., 2000; Martins et al., 2001; Ozbayoglu, 2002; Ahmed et al., 2003; Li and Kuru 2003; Capo et al., 2006; Chen, 2005; Osunde and Kuru, 2008; Wang et al., 2009; Duan, 2007; Gumati and Takahshi, 2011) که بیشتر این مطالعات یا آزمایشگاهی هستند و یا مدل‌سازی عددی آنها به صورت یک بعدی می‌باشد. و به جزء مطالعه دوان (Duan, 2007) بقیه مطالعات چرخش لوله را در مدل‌سازی‌ها در نظر نگرفته‌اند. همچنین در همه مدل‌سازی‌ها، سیال کف با مدل رئولوژیکی قانون توان در نظر گرفته شده است.

روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)¹ در زمینه انتقال خرده‌های حفاری با سیالات حفاری معمولی به خوبی بکار گرفته شده است (Bilgesu et al., 2007; Pereira et al., 2010; Wang et al., 2009; Hajidavalloo et al., 2013; Han et al., 2010; Al-Kayiem et al., 2010; Zhonghou et al., 2011) ولی مدل‌سازی دینامیک سیالات انتقال خرده‌ها توسط سیال کف به صورت سه بعدی با در نظر گرفتن تاثیر مدل رئولوژیکی و دیگر پارامترهای عملیاتی وجود ندارد.

با توجه به مزایای روش‌های هوش مصنوعی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در مدل‌سازی‌ها، مطالعه حاضر به مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری در حفاری زیرتعادلی با استفاده از سیال کف توسط این روش‌ها، می‌پردازد. در این راستا سوالات اساسی زیر مطرح می‌باشند:

- آیا می‌توان از قابلیت بالای روش هوش مصنوعی نسبت به روش‌های آماری و مکانیکی برای مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری استفاده نمود؟
- آیا مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی (قانون توان تسلیمی) نسبت به سایر مدل‌ها (مانند قانون توان و مدل بینگهام پلاستیک) برای توصیف رفتار سیال غیرنیوتنی کف مناسب‌تر است؟

1- Computational Fluid Dynamics

- آیا مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به عنوان یک روش موثر برای شبیه‌سازی پدیده انتقال خرده‌های حفاری تحت شرایط UBD بکار رود؟
- آیا استفاده از مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها، نسبت به مدل قانون توان بهتر است؟

۱-۵ فرضیات تحقیق

- با نگاهی به نتایج بررسی‌های انجام شده، می‌توان سیال کف را به عنوان یک سیال غیرنیوتنی مدل رئولوژیکی قانون توان تسلیمی تراکم ناپذیر در نظر گرفت.
- فرض می‌شود خرده‌های حفاری دارای شکل، اندازه و دانسیته یکنواخت باشند و خرده‌های حفاری متحرک دارای سرعت یکسانی هستند.

۱-۶ اهداف تحقیق

- این تحقیق بر روی رئولوژی سیال کف، مدل‌سازی هوشمند و عددی انتقال خرده‌های حفاری با سیال کف در چاه‌های شیب‌دار متمرکز می‌گردد که نتایج تحقیق می‌تواند در طراحی حفاری با سیال کف جهت صرفه جویی در زمان و هزینه بکار رود. اهداف اصلی این تحقیق شامل موارد زیر است:
- مطالعه رئولوژی سیال غیرنیوتنی کف تحت شرایط فشار مختلف و تعیین مدل رئولوژی مناسب برای آن و تعیین پارامترهای مدل با الگوریتم ژنتیک برای استفاده در مدل‌سازی عددی
 - مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری با کف با استفاده از طراحی شبکه عصبی مصنوعی در نرم افزار مطلب و مدل رگرسیون چند متغیره در نرم افزار SPSS
 - شبیه‌سازی CFD جریان سیال غیرنیوتنی کف و همچنین انتقال خرده‌ها با کف در فضای حلقوی شیب‌دار و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی
 - ارائه نمودارهای انتقال خرده‌های حفاری بر اساس شبیه‌سازی عددی جهت کاربردهای میدانی

۱-۷ روش انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق، پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی برازش شده بر داده‌های تنش- کرنش سیال کف در مطالعات قبلی، در شرایط مختلف توسط الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردد که این پارامترها در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

یک برنامه شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سرعت سقوط ذرات در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی و همچنین کارایی تمیزسازی چاه توسط سیال کف با نوشتن کد شبکه عصبی در نرم افزار مطلب طراحی می‌شود. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) هندسه فضای حلقوی در نرم افزار گمبیت^۱ ساخته، مش بندی و مرزهای مختلف آن مشخص می‌گردد. با در نظر گرفتن معادلات پیوستگی و ممنتوم حاکم بر جریان و شرایط ورودی، جریان سیال غیرنیوتنی کف و انتقال خرده‌های حفاری در فضای حلقوی، شرایط جریان در هندسه مورد نظر با استفاده از نرم افزار فلوئنت^۲ شبیه‌سازی می‌گردد.

۱-۸ ساختار تحقیق

به طور کلی ساختار تحقیق به قرار زیر می‌باشد:

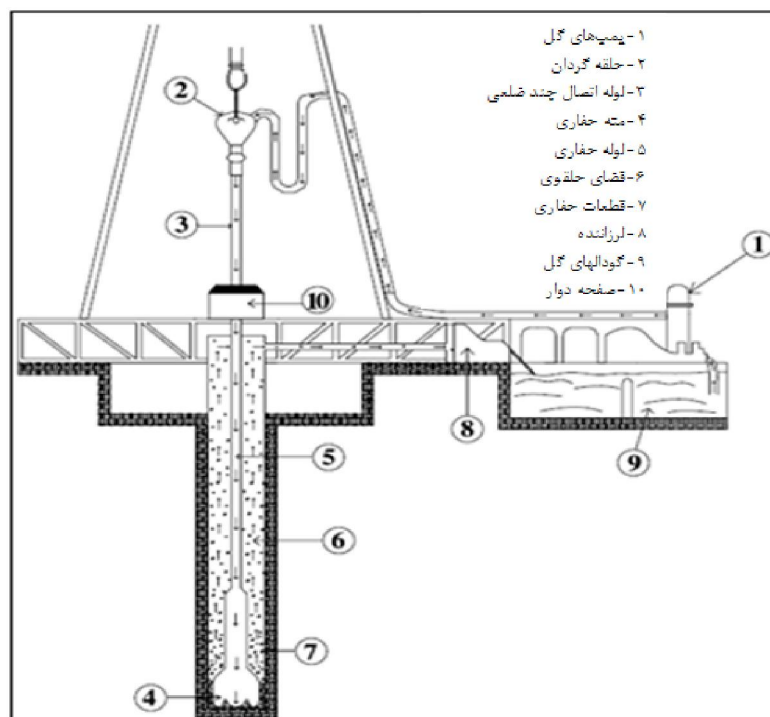
در فصل دوم مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری و مرور کارهای انجام شده در زمینه جریان‌های چند فاز و انتقال خرده‌های حفاری آورده شده است. در فصل سوم خواص مهم سیال کف بررسی و پارامترهای رئولوژیکی سیال غیرنیوتنی کف با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردد. در فصل چهارم، از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سرعت سقوط ذرات در سیالات غیرنیوتنی و انتقال خرده‌های حفاری استفاده خواهد شد و نتایج انتقال خرده‌ها با شبکه عصبی با مدل رگرسیون خطی چند متغیره و مدل مکانیکی مقایسه می‌شود. در فصل پنجم مدل‌سازی دینامیک سیالاتی جریان سیال کف در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز برای بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر افت

1 -Gambit
2- FLUENT

فشار صورت می‌گیرد. در فصل ششم، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها (جریان دو فازی) در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز شیب‌دار توسط سیال غیرنیوتنی کف انجام می‌گیرد و تاثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال خرده‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات در فصل هفتم ارائه می‌گردد.

فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده

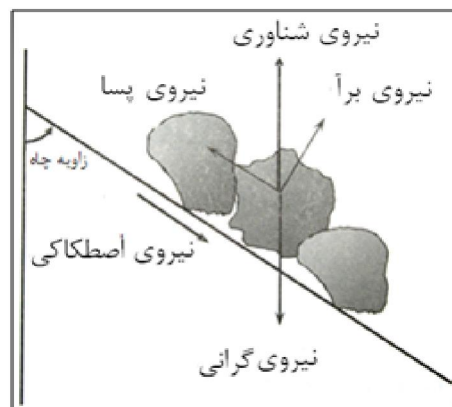
یکی از وظایف اصلی سیال حفاری در حفاری دورانی، تمیزکاری چاه می‌باشد. با گردش سیال حفاری از داخل لوله‌های حفاری و بالا آمدن در فضای بین دیواره چاه و لوله حفاری، باید خرده‌های حفاری شده به سطح چاه انتقال یابند (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: نمای کلی دکل و فرآیند حفاری دورانی (Nazari et al., 2010)

قابلیت انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال حفاری را ظرفیت حمل سیال حفاری می‌گویند که اگر انتقال خرده‌ها به طور مناسب کنترل نشود می‌تواند باعث مشکلات جدی از افزایش گشتاور و نیروی کشش رشته حفاری، خوردگی وسایل درون چاه، کاهش سرعت حفاری، شکستگی سازند، گیر افتادگی مکانیکی لوله حفاری در حفاری گردد (Li, 2004, Azar and Robello Samuel, 2007). جریان خرده‌های حفاری در فضای حلقوی، فرآیندی دینامیکی است که بسیاری از نیروها از قبیل گرانی، شناوری، اصطکاک، پسا، نیروی برآ و نیروهای تماسی بین ذره‌ای حرکت ذره را در فضای حلقوی کنترل می‌کنند (شکل ۲-۲).

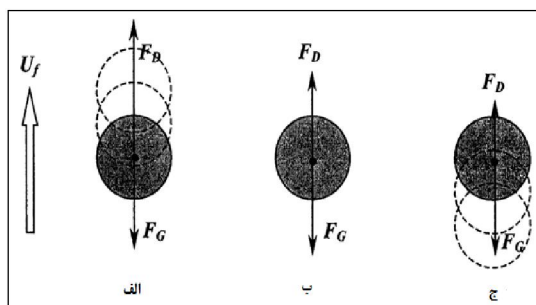
1- Drag
2- Lift



شکل ۲-۲: نیروهای موثر بر روی ذره در فضای حلقوی شیب‌دار (اصلاح شده از: Azar and Robello Samuel, 2007)

۲-۱ مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های قائم

نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره جامد: در چاه‌های قائم، خرده‌های حفاری شده توسط سیال حفاری از میان فضای حلقوی بین لوله حفاری و دیواره چاه به سمت بالا انتقال می‌یابد. برای حمل پیوسته خرده‌ها، باید یک نیروی ویسکوز بر روی خرده‌های حفاری توسط سیال حفاری اعمال گردد و بیشتر از سنگینی جامدات باشد. شکل ۲-۳ نشان می‌دهد که دو نیروی اصلی، نیروی گرانی و نیروی پسا در خلاف برای هم در هنگام انتقال قائم خرده‌های حفاری بر روی ذره وارد می‌شوند. اگر نیروی پسا بیشتر از نیروی گرانی باشد، خرده‌های حفاری به سمت بالا حرکت خواهند نمود (شکل ۲-۳ الف) و اگر نیروی پسا کمتر از نیروی گرانی باشد، خرده‌های حفاری به سمت پایین حرکت خواهند نمود (شکل ۲-۳ ب). شکل ۲-۳ ج، موقعیتی را نشان می‌دهد که نیروهای وارد بر ذره متعادل می‌باشند و حرکت ذره توسط حرکت قبلی آن تعیین می‌شود.



شکل ۲-۳: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره جامد در جریان قائم (اصلاح شده از: Li, 2004)

نیروی پسا: تعیین نیروی گرانی مشکل نیست ولی تعیین نیروی پسا به خاطر عوامل تاثیرگذار شامل دانسیته (ρ_f) و گرانی سیال حفاری، سرعت لغزش بین سیال حفاری و ذرات جامد، شکل، اندازه و دانسیته ذره، پیچیده تر می باشد. نیروی پسا با استفاده از ضریب پسا می تواند محاسبه گردد (Li, 2004).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_s \rho_f (V_f - V_s)^2 \quad (1-2)$$

که در آن:

C_D : ضریب پسا، A_s : مساحت ذره، V_f : سرعت سیال و V_s : سرعت ته نشینی ذره است.

تعیین ضریب پسا به عنوان یک موضوع تحقیقاتی از سال ۱۸۵۱ زمانی که استوکس^۱ یک رابطه کلاسیک از ضریب پسا به عنوان تابعی خطی از عدد رینولدز ذره (قانون استوکس) برای جریان خزشی یک ذره کروی در سیال نیوتنی ارائه داد، شروع شد (Chhabara, 2006). کلیفت و همکاران (Clift et al., 1978) روابطی برای محاسبه ضریب پسا برای همه رژیم های جریان در سیال نیوتنی ارائه نمودند. آزمایشات همچنین برای تعیین ضریب پسا در انواع مختلف سیالات غیرنیوتنی انجام گردید (Shah et al., 2007). مدل های رئولوژیکی مختلف (Miura et al., 2001, Kelessidis and Mpandelis, 2004) برای توصیف سیالات غیرنیوتنی وجود دارند (مدل بینگهام پلاستیک، مدل قانون توان، مدل قانون توان تسلیمی (هرشل- بالکلی)، مدل یکپارچه، مدل رابرتسون استیف، مدل کاسون). ولی هیچ مدل رئولوژیکی به تنهایی نمی تواند به طور کامل مشخصات رئولوژیکی تمام سیالات حفاری را بر روی تمام کرنش های برشی توصیف کند (API, 2009, Azar and Robello Samuel, 2007, Bourgoyne et al., 1991, Kelessidis et al., 2006, Kelessidis and Maglione, 2006, Vilorio Ochoa, 2006). اندازه گیری پارامترهای رئولوژیکی سیال حفاری می تواند با استفاده از کیف مارش یا ویسکومتر دوار

1- Stokes

2- American Petroleum Institute

انجام گیرد. چنین ویسکومترهایی مقادیر تنش برشی را برای سرعت‌های مختلف سرعت برشی ارائه می‌دهند.

مدل نیوتنی

$$\tau = \mu\gamma \quad (2-2)$$

$$\mu = \theta_{300}$$

مدل بینگهام پلاستیک

$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ |\tau| = \tau_y + \mu_p |\gamma| & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\mu_p = PV = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (\text{cP})$$

$$\tau_y = YP = \theta_{300} - PV \quad (\text{lb}/100\text{ft}^2)$$

مدل قانون توان

$$\tau = K\gamma^n \quad (4-2)$$

$$n = 3.32 \log_{10} \left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right)$$

$$K = \frac{\theta_{300}}{511^n}$$

مدل قانون توان تسلیمی (هرشل-بالکلی) (Herschel and Bulkley, 1926)

$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ |\tau| = \tau_y + K|\gamma|^n & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (5-2)$$

$$\tau_y = 2\theta_3 - \theta_6$$

$$n = 3.32 \log_{10} \left(\frac{\theta_{600} - \tau_y}{\theta_{300} - \tau_y} \right)$$

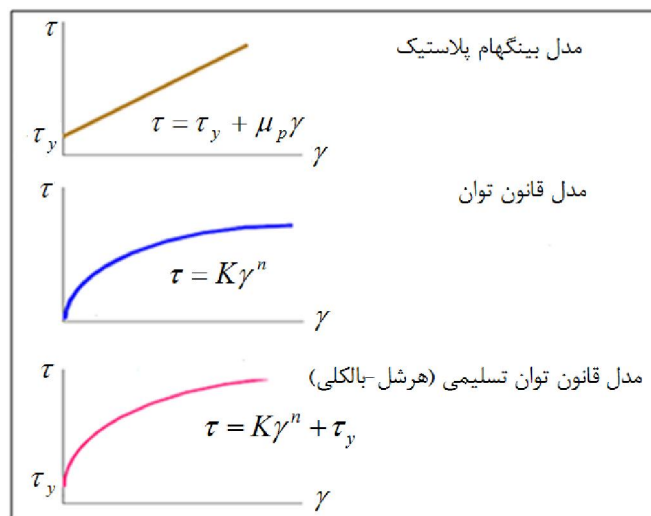
$$K = \frac{\theta_{300} - \tau_y}{511^n}$$

مدل روبرتسون-استیف (Robertson and Stiff, 1976)

$$\tau = (\tau_y + K\dot{\gamma})^n \quad (۶-۲)$$

که در آن‌ها:

μ گرانیوی نیوتنی (پواز یا سانتی پواز)، θ_{300} و θ_{600} قرائت گرانیوی سنج در سرعت چرخش ۳۰۰ و ۶۰۰، γ سرعت برشی (1/s)، μ_p گرانیوی پلاستیکی، τ_y تنش تسلیمی (lb/100ft² یا dynes/cm²) یا θ_3 و θ_6 قرائت گرانیوی سنج در سرعت چرخش ۳ و ۶، n شاخص رفتاری جریان^۱، K شاخص مقاومت سیال^۲ و $\dot{\gamma}_0$ ضریب تصحیح سرعت برشی است. مهمترین مدل‌های استفاده شده در محاسبات هیدرولیکی سیال حفاری، مدل‌های بینگهام پلاستیک، قانون توان و هرشل-بالکلی می‌باشند (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲: مدل‌های رئولوژیکی متداول برای سیالات حفاری

در آزمایشات عملاً سرعت حد ته‌نشینی ذره کروی در سیال اندازه‌گیری می‌شود و سپس ضریب پسا می‌تواند با استفاده از روابط (۲-۷ الف و ب) به ترتیب برای سیال بدون تنش تسلیمی و سیال با تنش تسلیمی محاسبه گردد:

1- Fluid behavior index
2- Fluid consistency index

$$C_D = \frac{4 d_s g (\rho_s - \rho_f)}{3 \rho_f V_t^2} \quad (۷-۲ \text{ الف})$$

$$C_D = \frac{4 d_s g (\rho_s - \rho_f)}{3 \rho_f V_t^2} - \frac{2\pi\tau_y}{\rho_f V_t^2} \quad (۷-۲ \text{ ب})$$

که در آن‌ها:

V_t سرعت حد ته‌نشینی، ρ_s و ρ_f به ترتیب دانسیته ذره و دانسیته سیال، τ_y تنش تسلیمی و d_s قطر ذره هستند.

ددگیل (Dedegil, 1987) رابطه زیر را برای محاسبه ضریب پسا در سیالات بینگهام پلاستیک ارائه نمود:

$$C_d = \frac{24}{Re_B}, \quad Re_B < 8 \quad (۸-۲ \text{ الف})$$

$$C_d = \frac{22}{Re_B} + 0.25, \quad 8 < Re_B < 150 \quad (۸-۲ \text{ ب})$$

$$C_D = 0.4, \quad Re_B > 150 \quad (۸-۲ \text{ ج})$$

که Re_B عدد رینولدز ذره برای سیال بینگهام پلاستیک بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Re_B = \frac{\rho_f V_s d_s}{\mu_p} \quad (۹-۲)$$

چاهابارا (Chhabra, 1990) دریافت که ضریب پسا برای سیال قانون توان می‌تواند با استفاده از معادله سیال نیوتنی با جایگذاری عدد رینولدز با عدد رینولدز برای سیالات قانون توان (Re_{pl})، محاسبه گردد:

$$C_D = \left(2.25 Re_{pl}^{-0.31} + 0.36 Re_{pl}^{0.06} \right)^{3.45}, \quad 1 \leq Re_{pl} \leq 1000 \quad (۱۰-۲)$$

که در آن:

Re_{pl} عدد رینولدز ذره برای سیال قانون توان و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Re}_{pl} = \frac{\rho_f d_s^n |V_f - V_s|^{2-n}}{K} \quad (11-2)$$

بعداً فنگ (Fang, 1992) نشان داد زمانی که عدد رینولدز بزرگتر از ۱۰۰ باشد، ضریب پسا به مقدار ثابت (تقریباً ۱) می‌رسد. چاهابارا (Chhabra, 2006) ارزیابی جامعی از کارهای موجود در زمینه حرکت ذره در محیط غیرنیوتنی انجام داد. چین (Chien, 1994) یک معادله ضریب پسا برای سیالات قانون توان ارائه دادند که برای ذرات با شکل نامنظم استفاده می‌گردد:

$$C_D = \frac{30}{\text{Re}_s} + \frac{67.289}{e^{5.03\psi}}, \quad 0.2 \leq \psi \leq 1 \quad (12-2)$$

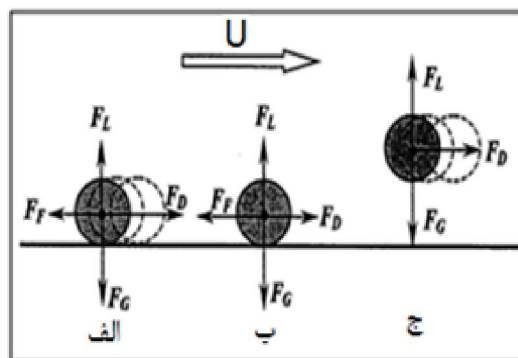
که در آن:

ψ کرویت ذره را بیان می‌کند و به صورت نسبت مساحت یک شکل کره که حجم یکسانی با ذره واقعی دارد به مساحت واقعی ذره و $0.001 < \text{Re}_s < 200000$ تعریف می‌شود.

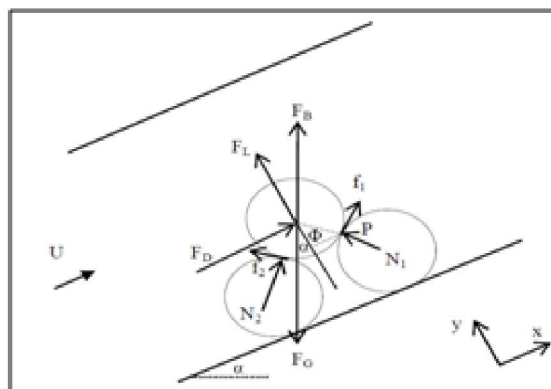
۲-۲ مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های افقی و شیب‌دار

تحلیل نیرو: شکل ۲-۵ حرکت یک ذره با سیال را در جریان افقی توصیف می‌کند، در ضمن، برخورد بین ذره با ذره و ذره با دیواره نشان داده نشده است. می‌توان نشان داد که نیروی پسا، F_D که مسئول حمل ذره است عمود بر نیروی گرانی، F_G عمل کننده بر روی ذره است. در نتیجه ذره جامد تمایل به سقوط از داخل جریان دارد حتی اگر نیروی پسا بیشتر از نیروی گرانی باشد. نیروی مسئول برای بلند کردن ذره به عنوان نیروی برآ بیان می‌گردد که بر خلاف نیروی گرانی بر روی ذره عمل می‌کند. زمانی که نیروی برآ F_L کمتر از نیروی گرانی باشد، ذره یا در قسمت پایین باقی می‌ماند (شکل ۲-۵ ب) یا اگر اصطکاک خشک بین خرده‌های حفاری و دیواره توسط نیروی پسا غلبه گردد، توسط لغزش بر روی دیواره چاه انتقال می‌یابد (شکل ۲-۵ الف). هنگامی که نیروی برآ بیشتر از نیروی گرانی باشد، ذرات در حالت معلق توسط نیروهای برآ وارد شده از سیال اطراف، انتقال می‌یابند (شکل ۲-۵ ج).

شکل ۲-۶ مکانیزم حرکت ذره در فضای حلقوی شیب‌دار را نشان می‌دهد. بسیاری از نیروها از قبیل گرانی (F_G)، شناوری (F_B)، برآ (F_L)، پسا (F_D)، اصطکاکی بین ذره‌ای (f_1 و f_2) و نیروهای تماسی بین ذره‌ای (N_1 و N_2)، حرکت خرده‌های حفاری در سیال را کنترل می‌کنند. حرکت یک ذره در فضای حلقوی توسط نیروهای غالب محدود می‌گردد (Zhou, 2006a, Azar and Robello Samuel, 2007, Li, 2004).



شکل ۲-۵: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره در جریان افقی (اصلاح شده از Li, 2004)



شکل ۲-۶: نیروهای عمل‌کننده بر روی ذره در جریان شیب‌دار (Zhou, 2006a)

نیروی‌های گرانی ($F_G = \frac{1}{6} \rho_s g \pi d_s^3$)، پسا ($F_D = \frac{1}{8} C_D \rho_f V_f^2 (\pi d_s^2)$) و شناوری ($F_B = \frac{1}{6} \rho_f g \pi d_s^3$) به راحتی می‌توانند تعیین گردند. نیروی اصطکاک ساکن و نیروی برآ عمل‌کننده بر روی ذره، در قسمت پایین دیواره چاه به صورت زیر بیان می‌گردند (Li, 2004):

$$F_F = f_{sd}[V_s(\rho_s - \rho_f)g - F_L] \quad (13-2)$$

9

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A_s \rho_f V_f^2 \quad (14-2)$$

که در آن‌ها:

f_{sd} ضریب اصطکاک استاتیک، V_f سرعت سیال، C_D ضریب پسا و C_L ضریب برآ می‌باشند. معمولاً f_{sd} مقدار ثابتی فرض می‌گردد. ای‌هو (Iyoho, 1980) مشخص کرد که وقتی بستر خرده‌های حفاری در یک چاه ۶۰ درجه، به سمت پایین می‌لغزد، f_{sd} حدود ۰/۶ می‌باشد. به طور تئوری، در جریان آرام (جریانی است که همه ذرات در جهت خطوط موازی در مسیر حرکت سیال حرکت می‌کنند و لایه‌های سیال بدون مخلوط شدن با هم دیگر، بر روی هم می‌لغزند) نیروی برآ، از چرخش ایجاد شده ذره توسط گرادیان برشی، برخورد ذره-ذره یا برخورد ذره-دیواره، حاصل می‌گردد (Ozbayoglu et al., 2005, Li, 2004). در جریان متلاطم (ذرات سیال به صورت نامنظم (حرکت متلاطم) حرکت می‌کنند)، نیروی برآ که ذره را در حالت معلق نگه می‌دارد، ممکن است از پراکندگی گردابه‌های متلاطم ایجاد گردد. همان‌طور که توسط اوروسکار و توریان (Oroskar and Turian, 1980) بیان شده، فقط گردابه‌های با سرعت آنی برابر یا بزرگتر از سرعت‌های ته‌نشینی حد جامدات، می‌توانند نیروی برآ کافی برای معلق نمودن ذرات در سیال ایجاد نمایند. اما در جریان واقعی لوله، مشخص کردن نیروی برآ به خاطر مشکلات در تعیین چرخش ذره، گرادیان سرعت محلی، برخورد ذره با ذره و برخورد ذره با دیواره، مشکل می‌باشد.

مکانیسم جابجایی ذرات: برای جابجایی ذرات دو مکانیسم اصلی وجود دارد، مکانیسم لغزش و جهش^۱ که مسئول انتقال خرده‌های حفاری در چاه افقی هستند (Gavignet and Sobey, 1989).

1- Saltation

(Ford et al., 1990). جهش به صورت بلند شدن ذرات در داخل جریان و منتقل شدن آن توصیف می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲-۵ ج نشان داده شده است، وقتی $F_L > F_G$ باشد، ذره در داخل جریان مایع به سمت بالا حرکت می‌کند و تحت تاثیر نیروی پسا (FD) منتقل می‌گردد. لغزش در مواردی است که ذره در قسمت پایین چاه بوده و در طول چاه با توجه به نیروی پسا اعمال شده توسط لایه بالایی مایع حرکت می‌کنند (شکل ۲-۵ الف). اگر همه مکانیسم‌های انتقال، جهش، لغزش و غلطش دارای تاثیر حداقل برای انتقال خرده‌های حفاری باشند، بستر ساکن خرده‌های حفاری در قسمت پایین چاه تشکیل خواهد شد (شکل ۲-۵ ب).

الگوهای جریان: پدیده‌های فیزیکی مختلفی در انتقال خرده‌های حفاری در مقیاس آزمایشگاهی مشاهده شده‌اند. فورد و همکاران (Ford et al., 1990) هفت نوع از الگوهای جریان در جریان محلول آبی تشخیص دادند که شامل لایه‌های معلق همگن، معلق ناهمگن، معلق، کلاستر ماسه، بستر متحرک پراکنده، بستر متحرک پیوسته، بستر ساکن می‌شوند. بعداً لو و همکاران (Luo et al., 1992) پنج نوع الگوی جریان از ترکیب مایع-خرده‌های حفاری در فضای حلقوی تشخیص دادند. این الگوها شامل معلق همگن و ناهمگن، لایه متحرک پراکنده، لایه متحرک پیوسته، لایه ساکن می‌شود.

۲-۳ عوامل تاثیرگذار در انتقال خرده‌های حفاری

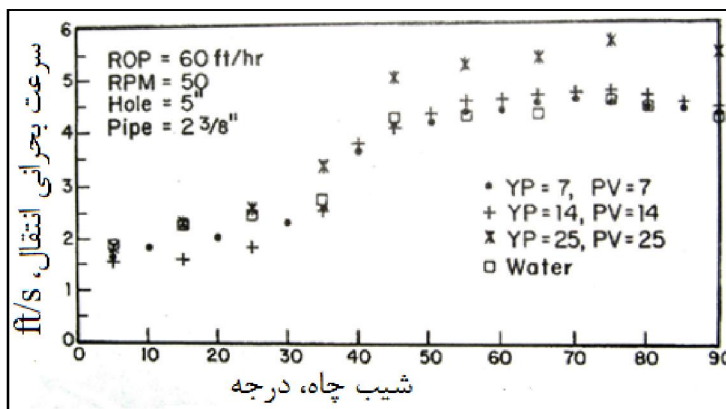
عوامل تاثیرگذار در تمیزکاری چاه و انتقال خرده‌های حفاری شامل هندسه چاه (قطر، عدم هم‌مرکزی فضای حلقوی، زاویه شیب)، پارامترهای عملیاتی حفاری (سرعت لغزش خرده‌های حفاری، سرعت جریان سیال در فضای حلقوی، رژیم جریان، سرعت چرخش لوله حفاری، سرعت حفاری (ROP))، خواص سیال حفاری (دانسیته، رئولوژی یا مشخصات جریان سیال حفاری) و مشخصات خرده‌های حفاری (اندازه، شکل و دانسیته) می‌شوند. در شکل ۲-۷ درجه تاثیر پارامترهای مختلف در تمیزکاری چاه آورده شده است.

(ECD)¹ دارد. گرانروی و وزن حجمی گل از مهم‌ترین خواص سیال حفاری هستند که در انتقال خرده‌های حفاری دخیل می‌باشند (Okranji and Azar, 1986, Hussaini and Azar, 1983).

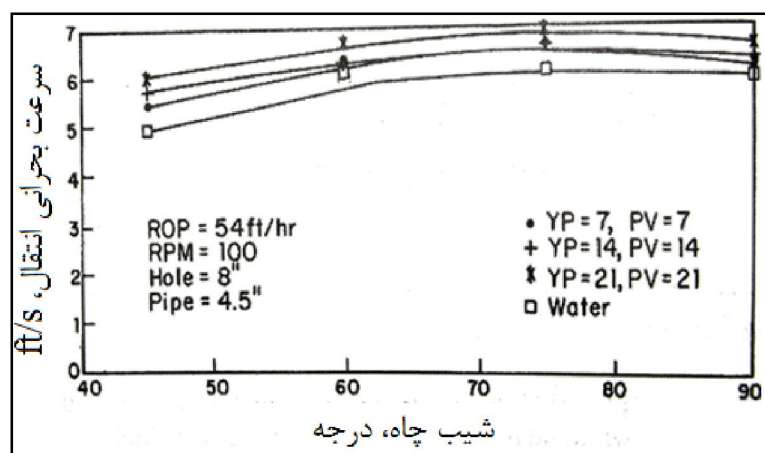
• گرانروی

گرانروی سیال در نیروهای برآ و پسا وارده از طرف سیال بر ذره موثر است. در رژیم جریان یکسان، سیالات با گرانروی بیشتر، انتقال بهتری از خرده‌ها را ارائه می‌دهند. سیالات با ویسکوزیته بالا در رژیم جریان متلاطم، شبیه سیالات با ویسکوزیته پایین در رژیم جریان آرام به خصوص در حالت غیر قائم عمل می‌کنند (Tomren et al., 1986). رژیم جریان متلاطم برای حفاری افقی موثر است. برای ایجاد این رژیم در چاه می‌باید سرعت جریان گل درون چاه به اندازه کافی بالا باشد. ولی برای افزایش سرعت جریان محدودیت‌هایی وجود دارد. راه دیگر رسیدن به رژیم جریان متلاطم، کاهش گرانروی است، چرا که با کاهش آن عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بنابر این در حفاری‌های افقی استفاده از سیال با گرانروی پائین و در حفاری‌های عمودی سیال با گرانروی بالا مطلوب‌تر است (Hareland et al., 1993). از طرفی، با کاهش گرانروی سیال حفاری، توانایی آن در حمل خرده‌های حفاری کاهش می‌یابد. برای رفع این مشکل، پیشنهاد شده که از روش تزریق متناوب سیال با گرانروی پائین (برای ایجاد تلاطم موضعی در سطح بستر خرده‌ها) و به دنبال آن از سیال با گرانروی بالا (به منظور افزایش قدرت حمل خرده‌های حفاری) استفاده گردد. در چاه‌های قائم، با افزایش نسبت نقطه تسلیمی (YP) به گرانروی پلاستیک (PV)، ظرفیت انتقال گل افزایش می‌یابد و گرانروی ظاهری و استحکام ژله‌ای در سرعت‌های پایین تا متوسط سیال، بر روی ظرفیت حمل گل موثرند (Okranji and Azar, 1986). در حفاری چاه‌های با شیب زیاد (بیشتر از ۴۰ درجه) حفاری با آب شیرین در تمیزکاری چاه نسبت به گل با نسبت YP به PV برابر با ۷/۷ یا بیشتر، به مقدار جزئی تاثیر بیشتری دارد (شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹). همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود با افزایش این نسبت، برای شیب‌های بیشتر از ۴۰ درجه، سرعت بیشتری از سیال لازم است.

1- Equivalent Circulating Density



شکل ۲-۸: تاثیر رئولوژی گل بر سرعت بحرانی سیال در چاه پنج اینچ (اصلاحی Azar and Robello Samuel, 2007)



شکل ۲-۹: تاثیر رئولوژی گل بر سرعت بحرانی سیال در چاه هشت اینچ (اصلاحی Azar and Robello Samuel, 2007)

• وزن گل

افزایش وزن گل، نیروی شناوری خرده‌های حفاری را افزایش داده و انتقال آن‌ها را میسر می‌سازد ولی از طرفی، بالا رفتن آن سبب کاهش نرخ نفوذ شده و نهایتاً منجر به افزایش هزینه حفاری می‌گردد. بطور کلی می‌توان گفت اگر سایر پارامترهای حفاری ثابت باشند، افزایش وزن گل باعث افزایش عدد رینولدز شده و راه رسیدن به رژیم جریان متلاطم را هموار می‌سازد. تاثیر وزن گل بیشتر در چاه‌های با شیب زیاد مشهودتر است (Azar and Robello Samuel, 2007).

۲-۳-۲ سرعت سیال در فضای حلقوی

سرعت سیال در فضای حلقوی در حفاری قائم باید برای جلوگیری از ته نشست خرده‌های حفاری و انتقال به موقع آن‌ها به سطح زمین به اندازه کافی باشد. با افزایش سرعت، بدون در نظر گرفتن سایر

پارامترها، عمل انتقال بهبود می‌یابد. ولی محدودیت‌هایی برای افزایش مقدار سرعت جریان مانند توان و قدرت هیدرولیک مته، توان پمپ گل، خوردگی و فرسایش لوله حفاری و امکان شستشوی دیواره چاه توسط جریان گل وجود دارد. در مورد فضای حلقوی شیب‌دار، مولفه محوری سرعت لغزشی، نقش کمتری دارد. بنابر این به نظر می‌رسد که برای انتقال رضایت بخش، سرعت گل در فضای حلقوی در این مورد می‌تواند کمتر از زمانی باشد که فضای حلقوی عمودی است. ولی ممکن است این یک نتیجه‌گیری اشتباه باشد. مولفه شعاعی سرعت لغزشی ذره، باعث می‌شود ذره به سمت دیواره پایین فضای حلقوی هدایت گردد که باعث ایجاد بستری از ذرات خواهد شد. در نتیجه سرعت سیال در فضای حلقوی برای جلوگیری از تشکیل بستر باید به اندازه کافی بزرگ باشد. مطالعات نشان داده که برای جلوگیری از تشکیل بستر خرده‌های حفاری، سرعت سیال در فضای حلقوی در حالت افقی باید بیشتر از حالت قائم باشد (Tomren et al., 1986, Hemphill and Ravi, 2006).

• حداقل سرعت انتقال خرده‌های حفاری (MTV)^۱

در زمان طراحی چاه‌های افقی یا شیب‌دار یکی از پارامترهای کلیدی که باید تعیین گردد حداقل سرعت مورد نیاز سیال حفاری برای انتقال خرده‌های حفاری به سطح زمین و تمیز نگه داشتن چاه می‌باشد. این حداقل سرعت مورد نیاز سیال، سرعت بحرانی سیال نامیده می‌شود. اگر سرعت جریان ناکافی باشد، خرده‌های حفاری در قسمت انتهایی چاه ته نشین شده و تشکیل یک لایه ساکن خواهند داد که نتیجه آن مشکلات شدید حفاری از قبیل گیر افتادن لوله، مسدود شدن چاه، افزایش گشتاور و برآ می‌باشند (Ozbayoglu et al., 2010, Li and Kuru, 2008).

در حفاری چاه‌های قائم یا نزدیک قائم، مفهوم سرعت لغزش برای حداقل سرعت انتقال (MTV) استفاده می‌شود. سرعت لغزش ذره، سرعت سیال منهای سرعت ذره است. زمانی که سرعت لغزش بیشتر از ۵۰٪ سرعت سیال باشد، تمیزکاری چاه ضعیف خواهد بود. برای محاسبه سرعت لغزش با استفاده از اطلاعات حفاری روش‌های مختلفی ارائه شده است (Nazari et al., 2010, API, 2009).

1- Minimum Transport Velocity

زمانی که شیب چاه بیشتر از ۳۰ درجه باشد، سرعت فضای حلقوی تنها پارامتر کنترل کننده نیست و رژیم جریان، رئولوژی سیال، چرخش رشته حفاری و غیره نیز به عنوان پارامترهای کنترل کننده هستند. برای بهینه‌سازی این پارامترها تعدادی نمودارهای ویژه توسط لو و همکاران (Luo et al., 1994) و انستیتو نفت آمریکا (API, 2009) برای تعیین MTV، برای تمیزکاری چاه، منتشر شده است. بر اساس پارامترهای رئولوژیکی، عامل رئولوژیکی^۱ (RF) برای اندازه‌های مختلف چاه تعریف شده است. با استفاده از RF، عامل زاویه^۲ (AF) و وزن گل^۳ (MW) شاخص انتقال^۴ (TI)، می‌تواند حاصل گردد:

$$TI = RF \times AF \times MW \quad (2-15)$$

برای اندازه‌های مختلف چاه و مقادیر TI و ROP مختلف، نمودارهایی برای محاسبه MTV وجود دارند. تحقیقات دیگر بر روی MTV، مدل‌هایی را برای تعیین MTV ارائه کرده‌اند. ورودی‌های این مدل‌ها اطلاعات حفاری از قبیل دانسیته خرده‌های حفاری و سیال حفاری، پارامترهای رئولوژیکی، شیب، سرعت حفاری و هندسه چاه می‌باشند (Mirhaj et al., 2007, Nazari et al., 2010, Ozbayoglu et al., 2010).

• سرعت لغزش خرده‌های حفاری

خرده‌های حفاری تمایل به سقوط (لغزش) از محیط سیال با یک سرعت لغزش خاص دارند. آگاهی از سرعت حد سقوط جامدات در سیالات دارای کاربردهای مختلفی می‌باشد که می‌توان به انتقال خرده‌های حفاری، حفاری منابع زمین گرمایی، فرآوری مواد معدنی، و غیره اشاره نمود. پیش‌بینی سرعت سقوط ذرات جامد در این فرآیندها دارای اهمیت زیادی برای طراحی سیال می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در فصل پنجم بیشتر در این مورد بحث می‌گردد.

1- Rheological Factor
2- Angle Factor
3- Mud Weight
4- Transport Index

برای یک سیال حفاری که خرده‌های حفاری را به سطح حمل می‌کند، سرعت متوسط سیال در فضای حلقوی (V_a) باید بیشتر از سرعت متوسط لغزش (V_s) خرده‌های حفاری باشد. تفاوت بین سرعت‌های V_a و V_s به سرعت انتقال خرده‌های حفاری (V_t) معروف است (Azar and Robello, Samuel, 2007):

$$V_t = V_a - V_s \quad (۱۶-۲)$$

$$\frac{V_t}{V_a} = 1 - \frac{V_s}{V_a} = R_T \quad (۱۷-۲)$$

که در آن:

R_T نسبت انتقال خرده‌های حفاری شده می‌باشد که توسط سیفرمن و همکارانش (Sifferman et al., 1974) تعریف شده است. در حفاری چاه‌های قائم پیشنهاد می‌گردد که R_T حداقل بین ۵۰٪ تا ۵۵٪ باشد. در فضای حلقوی قائم فقط مولفه محوری سرعت لغزش وجود دارد.

$$\bar{V}_s = \bar{V}_{sa} \quad (۱۸-۲)$$

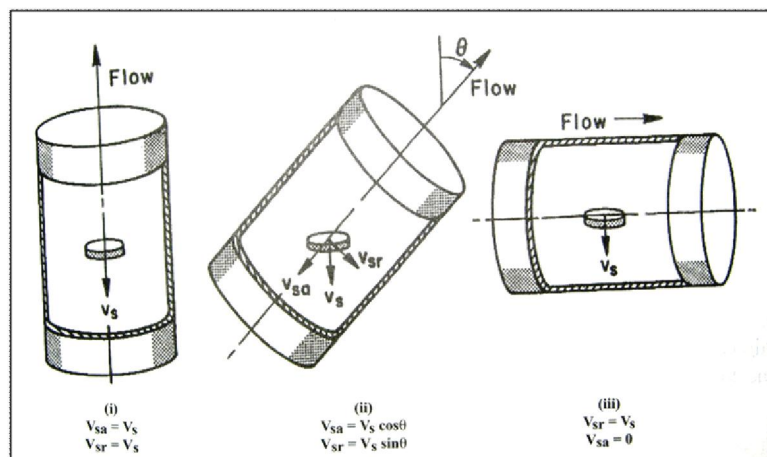
در مقابل برای فضای حلقوی شیب‌دار با زاویه شیب θ ، دو مولفه برای سرعت وجود دارد:

$$\bar{V}_{sa} = \bar{V}_s \cos\theta \quad (۱۹-۲)$$

$$\bar{V}_{sr} = \bar{V}_s \sin\theta \quad (۲۰-۲)$$

که در آن‌ها:

\bar{V}_{sa} و \bar{V}_{sr} به ترتیب مولفه‌های محوری و شعاعی سرعت متوسط لغزشی می‌باشند (شکل ۲-۱۰). هنگامی که زاویه شیب نسبت به قائم افزایش می‌یابد، مولفه محوری سرعت لغزشی کاهش می‌یابد، تا اینکه در حالت افقی به صفر می‌رسد. در همین موقعیت مولفه شعاعی به حداکثر می‌رسد.



شکل ۲-۱۰: سرعت ته نشست ذره در یک فضای حلقوی شیب‌دار (Tomren, 1979)

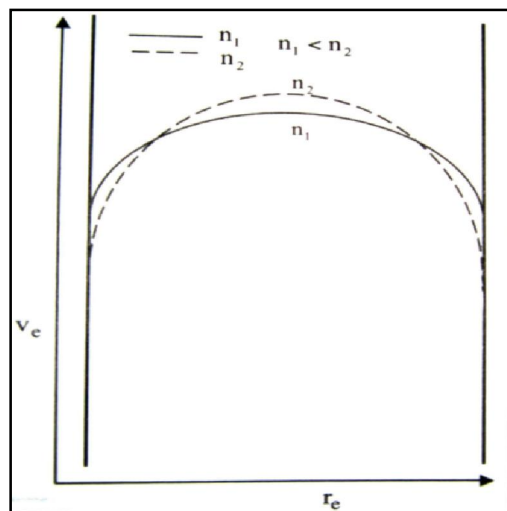
۲-۳-۳ رژیم جریان و رژیم لغزش ذره

هنگامی که پدیده انتقال خرده‌های حفاری شده مورد نظر باشد، رژیم جریان سیال و لغزش قائم نیز باید در نظر گرفته شود. جریان متلاطم سیال، همیشه باعث القاء رژیم متلاطم به لغزش ذره مستقل از شکل و ابعاد ذره، می‌گردد. بنابر این، در این مورد تنها عاملی که سرعت لغزش ذره را تعیین می‌کند، نیروهای ممانتوم سیال می‌باشند و گرانیوی سیال بی‌تاثیر یا تاثیر کمی دارد. اگر جریان گل به صورت آرام باشد، آن‌وقت بسته به شکل و ابعاد خرده‌های حفاری، امکان رژیم آرام یا متلاطم از لغزش ذره وجود دارد. رژیم آرام ذره همیشه سرعت کمتری از سرعت لغزش ذره را فراهم می‌کند. معمولاً رژیم آرام در حالت قائم انتقال بهتری فراهم می‌کند. ولی در مورد فضای حلقوی شیب‌دار، چون مولفه محوری سرعت لغزش کاهش می‌یابد، با افزایش شیب نسبت به قائم، در صورت یکسان بودن گرانیوی موثر برای سیال، اثر جریان آرام کاهش می‌یابد و جریان متلاطم قابلیت انتقال بهتری دارد که در مطالعات مختلف اثبات شده است (Azar and Robello Samuel, 2007).

۲-۳-۴ پروفیل توزیع سرعت در جریان آرام با توجه به خواص رئولوژیکی

شاخص رفتار جریان (n)، در مدل رئولوژیکی قانون توان با توزیع پروفیل سرعت به صورت شکل ۲-۱۱ ارتباط دارد. با کاهش n، پروفیل سرعت جریان گل هموارتر می‌شود. در چاه‌های قائم این عامل در

کارایی انتقال خرده‌های حفاری، مزیت محسوب می‌شود. ولی در چاه‌های شیب‌دار با عدم تقارن بالای فضای حلقوی، کاهش n سبب افزایش در هیدرولیک مورد نیاز برای تمیزکاری موثر چاه می‌شود که علت آن، افزایش انحراف جریان سیال از قسمت باریک به قسمت پهن‌تر، با کاهش n می‌باشد.



شکل ۲-۱۱: رابطه پروفیل سرعت جریان گل با شاخص رفتاری سیال (Okranji and Azar, 1986)

۲-۳-۵ عدم هم‌مرکزی لوله حفاری و چاه

در چاه‌های قائم، معمولاً لوله حفاری در مرکز چاه قرار می‌گیرد، ولی در چاه‌های افقی و شیب زیاد نسبت به قائم، لوله با توجه به نیروی گرانی، تمایل به سمت پایین چاه پیدا می‌کند که به عدم هم‌مرکزی لوله و چاه معروف است (Walker and Li, 2000). عدم هم‌مرکزی به صورت نسبت فاصله مرکز چاه و لوله (e) به تفاوت شعاع چاه و لوله بیان می‌شود:

$$\varepsilon = e / (R_h - R_p) \quad (2-21)$$

یا

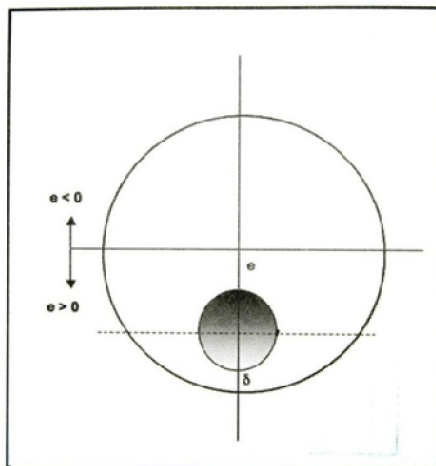
$$e = \varepsilon (R_h - R_p) \quad (2-22)$$

که در آن‌ها:

R_h شعاع چاه، R_p شعاع لوله و فاصله بین لوله و دیواره چاه به صورت زیر بیان می‌شود:

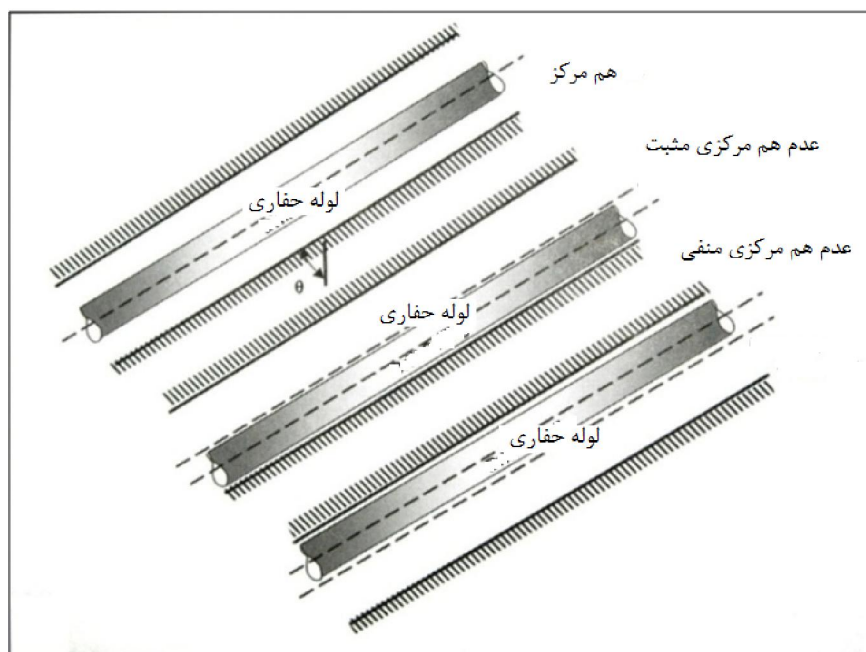
$$\delta = (1 - \varepsilon)(R_h - R_p) \quad (2-23)$$

پارامترهای استفاده شده در معادلات فوق در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

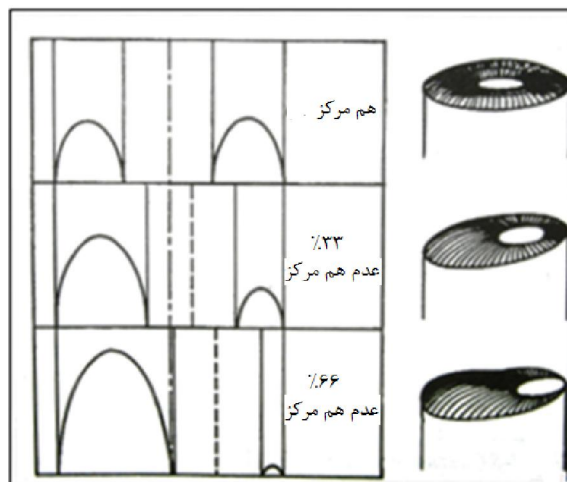


شکل ۲-۱۲: عدم هم‌مرکزی فضای حلقوی (Azar and Robello Samuel, 2007)

موقعیت لوله داخلی ممکن است در فضای حلقوی مانند شکل ۲-۱۳ متغیر باشد. جابجایی لوله نسبت به دیواره پایینی فضای حلقوی (خروج از مرکز مثبت)، همان‌طور که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده، سرعت گل را در این ناحیه کاهش می‌دهد. بنابر این برای چاه‌های شیب‌دار با خروج از مرکز مثبت، مشکلات انتقال خرده‌های حفاری حادث می‌شود (Azar and Robello Samuel, 2007).



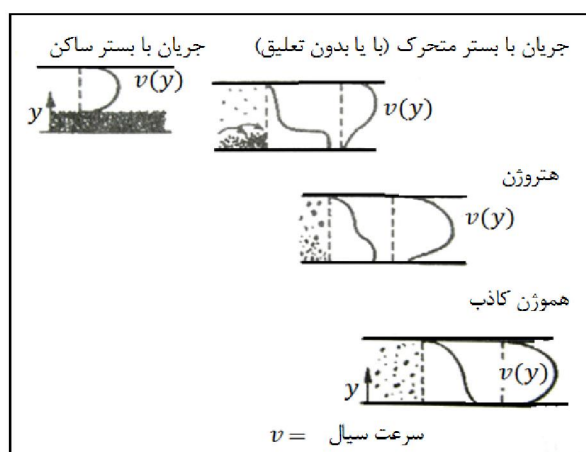
شکل ۲-۱۳: فضای حلقوی هم‌مرکز در مقابل عدم هم‌مرکزی (اصلاحی از Azar and Robello Samuel, 2007)



شکل ۲-۱۴: تاثیر عدم هم‌مرکزی بر پروفیل سرعت فضای حلقوی (اصلاحی از Azar and Robello Samuel, 2007)

۲-۳-۶ جریان دو فازي مایع/جامد در فضای حلقوی شیب‌دار

در حفاری چاه‌های شیب‌دار، جریان مایع/جامد در مقطع شیب‌دار گاه ممکن است هموزن کاذب^۱، هتروژن^۲، جریان با بستر متحرک^۳ (با یا بدون تعلیق) و جریان با بستر ساکن^۴ باشد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: الگوی کیفی جریان دو فازي جامد/مایع (اصلاحی از Okranji and Azar, 1986)

۲-۳-۷ سرعت حفاری

به محض افزایش سرعت حفاری، غلظت خرده‌های حفاری در فضای حلقوی افزایش می‌یابد. برای خارج‌سازی موثر خرده‌های حفاری شده، به محض افزایش سرعت حفاری، هیدرولیک مورد نیاز

- 1- Pseudo- homogeneous flow
- 2- Heterogeneous flow
- 3- Flow with moving bed-saltation(with or without suspension)
- 4- Flow with stationary bed

افزایش خواهد یافت (Sanchez et al., 1999, Jyoho and Azar, 1981). سرعت خرده‌ها به صورت زیر تابع سرعت حفاری می‌باشد:

$$V_{cut} = \frac{ROP}{3600 \left(1 - \frac{D_{pipe}}{D_{hole}}\right)^2} (1 - \phi) \quad (2-24)$$

که در آن:

V_{cut} سرعت خرده‌ها (ft/s)، ϕ تخلخل خرده‌ها (%)، D_{pipe} قطر لوله داخلی (in)، D_{hole} قطر چاه (in)، ROP سرعت حفاری (ft/h) و cc غلظت خرده‌های حفاری (%).

۲-۳-۸ سرعت چرخش لوله حفاری

یکی دیگر از عوامل موثر در تمیزکاری چاه، چرخش رشته حفاری است چون باعث ایجاد رژیم جریان متلاطم در سیستم سیالات حفاری گشته و تنش برشی بر روی بستر خرده‌های حفاری را افزایش داده و تمیزکاری چاه را بهبود می‌بخشد که بیشتر در چاه‌های افقی و شیب‌دار مشهود است. ولی از طرف چاه محدودیت‌هایی بر مقدار چرخش آن اعمال می‌شود چرا که در اثر این چرخش یک تنش دوره‌ای ایجاد می‌شود که به دلیل ایجاد خستگی در لوله حفاری باعث تخریب سریع و از بین رفتن آن‌ها می‌گردد. برای چاه‌های قائم، افزایش در سرعت چرخش لوله حفاری، بسته به قطر لوله و قطر چاه، دارای تاثیر کم تا متوسط بر روی افزایش انتقال خرده‌های حفاری، می‌باشد. برای اندازه‌های با قطر بزرگ، افزایش در سرعت چرخش باعث افزایش متوسط در روی ظرفیت حمل گل می‌شود (Azar and Robello Samuel, 2007, Hemphill and Ravi, 2006).

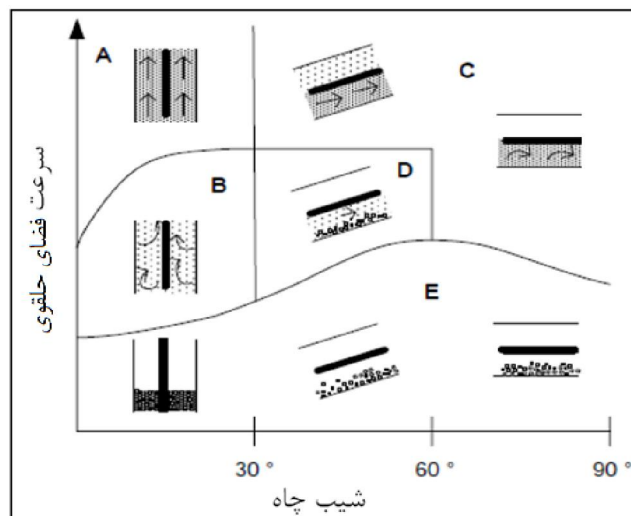
۲-۳-۹ خصوصیات خرده‌های حفاری

اندازه، شکل و وزن مخصوص خرده‌های حفاری در رفتار دینامیکی آن‌ها در فضای حلقوی چاه موثر هستند. سرعت حد، نیروی کشش، نیروی شناوری و نیروهای برشی بین خرده‌ها، توسط خواص خرده‌ها و سیال حامل، تاثیر می‌پذیرند. میزان تأثیر وزن خرده‌های حفاری بر افزایش ضخامت بستر، معمولاً در حد کم یا متوسط است. بدیهی است حمل و انتقال خرده‌های حفاری سنگین‌تر به مراتب

مشکل تر می‌باشد. اندازه خرده‌های حفاری، اثر بیشتری بر میزان حمل خرده‌ها بخصوص در سیالات با دانسیته کمتر از خود نشان می‌دهند. با افزایش قطر ذره سرعت سقوط افزایش خواهد یافت بنابر این انتقال خرده‌ها کاهش می‌یابد. بطور کلی اندازه و شکل خرده‌های حفاری تابعی از عوامل متعدد از جمله نوع مته بکار گرفته شده است. بنابر این به طور نسبی کنترل آن‌ها با انتخاب صحیح مته امکان‌پذیر است (Bilgesu et al., 2007, Azar and Robello Samuel, 2007)

۲-۳-۱۰ شیب چاه

در چاه‌های شیب‌دار، خرده‌ها تمایل به ته‌نشینی در قسمت دیواره پایینی چاه و تشکیل بستر خرده‌ها را دارند. این خرده‌ها اغلب در قسمت پایین چاه یا به صورت بستر متحرک پیوسته یا به صورت لایه‌های مجزا منتقل می‌شوند. شکل ۲-۱۶ به صورت شماتیک، مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری را در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۶: مکانیسم انتقال فضای حلقوی خرده‌ها در چاه‌های قائم و شیب‌دار (اصلاحی از API, 2009)

در شکل ۲-۱۶، A: تمیزکاری موثر چاه، B: انتقال کم خرده‌ها، C: تمیزکاری خوب چاه با بستر متحرک خرده‌ها، D: تمیزکاری کم و تشکیل بستر خرده‌ها، E: بدون تمیزکاری در چاه‌های با شیب کمتر از ۳۰ درجه، خرده‌ها به خوبی توسط تنش سیال معلق هستند و بستر خرده‌ها تشکیل نمی‌شود (نواحی A و B). برای چنین مواردی محاسبات انتقال معمول بر اساس

سرعت‌های لغزش قائم کاربرد دارند. در چنین زوایای کم، سرعت مورد نیاز فضای حلقوی معمولاً ۲۰ تا ۳۰٪ بیشتر از چاه‌های قائم است. در زوایای بیشتر از ۳۰ درجه، تشکیل بستر خرده‌ها در قسمت پایین چاه رخ می‌دهد که می‌تواند باعث مسدود شدن فضای حلقوی شود (نواحی E و D شکل ۲-۱۶). چرخش لوله حفاری می‌تواند به پراکنده سازی بستر خرده‌ها کمک کند و باعث سریعتر شدن حرکت خرده‌ها به سمت بالای چاه شود. الگوهای جریان در فضای حلقوی وابسته به نرخ جریان و رئولوژی سیال حفاری است. سیالات با گرانروی و نقطه تسلیم بالا باعث افزایش نیروی کشش سیال و در نتیجه باعث لغزش بستر خرده‌ها می‌شود. نواحی ایده‌آل برای انتقال خوب خرده‌ها، نواحی A و B شکل ۲-۱۶ هستند. در نواحی E و D، امکان مسدود شدن چاه وجود دارد (API, 2009).

۲-۳-۱۱ دما و فشار

مطالعات نشان می‌دهند که رئولوژی و گرانروی سیال با افزایش دما، کاهش و با افزایش فشار، افزایش می‌یابد و در نتیجه بر انتقال خرده‌ها تاثیر خواهد داشت (Chen, 2005, Yu et al., 2007).

۲-۴ مطالعات انتقال خرده‌ها

مطالعات بر روی انتقال خرده‌های حفاری، در طی ۷۰ سال گذشته در حال پیشرفت بوده است. این مطالعات به دو بخش تقسیم می‌شوند: (۱) تجربی و آزمایشگاهی (۲) تئوری و مدل‌سازی. در چاه‌های قائم، سرعت لغزش نهایی برای بررسی مسئله انتقال خرده‌ها، مورد تحقیق قرار گرفت. با توجه به افزایش حفاری چاه‌های افقی و شیب‌دار، مطالعات پدیده انتقال به سمت روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های مکانیکی برای تمام زوایای شیب متمرکز شد. حفاری زیرتعادلی، به عنوان یکی از روش‌های مورد علاقه برای انتقال خرده‌ها با سیالات چند فاز برای چاه‌های افقی و شیب‌دار در سال‌های اخیر اهمیت پیدا کرده است. مطالعه انتقال خرده‌ها با کف به عنوان یکی از گزینه‌های حفاری زیر تعادلی، نه تنها در تمیزکاری چاه می‌تواند مهم باشد بلکه در کنترل دانسیته سیال در حال گردش و پروفیل فشار چاه نیز مهم است. در این فصل به مهمترین کارهای انجام شده در زمینه انتقال خرده‌ها در

چاه‌های شیب‌دار با سیالات حفاری معمولی و کارهای انجام شده در زمینه انتقال خرده‌ها در شرایط زیر تعادلی و همچنین مدل‌سازی‌های عددی انتقال خرده‌های حفاری پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱ جریان دو فازی جامد- مایع و جامد- گاز

پیگوت (Pigott, 1941) اولین کسی بود که مطالعه‌ای از جریان گل در لوله‌ها، چاه‌ها و گودال‌های گل را منتشر نمود. قانون استوکس، برای جریان آرام و فرمول ریتینگر برای جریان متلاطم برای محاسبه سرعت ته‌نشست ذره، مورد بحث قرار گرفت. با توجه به مطالعه پیگوت حداکثر حجم خرده‌های حفاری داخل چاه باید ۵٪ باشد. غلظت‌های بالاتر خرده‌های حفاری، باعث مشکلاتی در چاه خواهد شد. او اهمیت سرعت گل در فضای حلقوی و دانسیته سیال را خاطر نشان نمود ولی گرانروی بالا را نامطلوب تشخیص داد. او همچنین بیان نمود که جریان متلاطم باعث ایجاد سرعت‌های لغزشی متلاطم می‌گردد و پیشنهاد نمود که جریان آرام در کارایی انتقال موثرتر است.

زیدلر (Zeidler, 1972) یکی از مطالعات اولیه انتقال خرده‌های حفاری حالت ناپایدار را انجام داد. یک وسیله آزمایشگاهی شامل ۱۵ فوت طول، لوله شیشه‌ای با قطر داخلی ۳ اینچ برای مطالعه و بدست آوردن رابطه سرعت ته‌نشینی بر اساس خواص قابل اندازه‌گیری، بکار گرفته شد. این رابطه بر اساس نمودارهای عدد رینولدز- ضریب پسا می‌باشد.

سیفرمن و همکاران (Sifferman et al, 1974) یک کار حالت پایدار کوچک مقیاس با یک دکل میدان نفتی ۱۴۰ فوتی، با لوله جداری به قطر داخلی ۱۲ اینچ و لوله حفاری با قطر ۱/۲-۳ اینچ را انجام دادند. سه نوع گل با وزن‌های مختلف، سرعت فضای حلقوی (۲۰۰-۴) و اندازه مختلف از خرده‌های حفاری، برای مطالعه آزمایشگاهی استفاده گردیدند. آنها گزارش نمودند که کارایی انتقال با افزایش گرانروی افزایش می‌یابد. در جریان آرام انتقال خرده‌های حفاری برابر ۷۵ تا ۹۰٪ مقادیر تئوری بر مبنای سرعت نهایی لغزش خرده‌های حفاری می‌باشد. در جریان متلاطم انتقال خرده‌های حفاری ۷۵٪ مقدار تئوری می‌باشد. آنها همچنین نشان دادند که نسبت انتقال با افزایش سرعت جریان گل در فضای حلقوی به سرعت افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که وزن گل و اندازه

ذرات دارای تاثیر متوسطی بر روی ظرفیت انتقال ذرات می‌باشند. چرخش لوله و عدم هم‌مرکزی دارای تاثیر جزئی در انتقال خرده‌های حفاری می‌باشد.

تومرن (Tomren, 1979) یکی از اولین مطالعات انتقال خرده‌های حفاری را در چاه‌های شیب‌دار انجام داد. او شیب چاه را به سه دسته تقسیم نمود: ۰-۳۰، ۳۰-۵۰، ۵۰-۹۰ درجه. زاویه حدود ۴۰ درجه را با توجه به بستر لغزشی، مشکل‌ترین حالت، برای انتقال خرده‌ها تشخیص داد. او ادعا نمود که سرعت انتقال خرده‌ها حتی با وجود نرخ‌های متغیر جریان، در سطح مقطع سیال ثابت است. او وجود سه لایه مختلف که ممکن است در طی جریان سیال حفاری و خرده‌های حفاری در یک چاه تشکیل شود را مشخص نمود: لایه ساکن، لایه لغزشی و لایه معلق هتروژن. در نهایت او پیشنهاد نمود که در چاه‌های شیب‌دار، باید بر روی غلظت بر جای خرده‌های حفاری تمرکز نمود نه سرعت نهایی ته‌نشینی خرده‌ها.

ایهو (Iyoho, 1980) مطالعات گسترده‌ای بر روی کارایی انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های شیب‌دار با استفاده از دستگاه ساخته شده در دانشگاه تولسا^۱ انجام داد. مقطع مورد مطالعه دارای طول ۴۰ فوت و قطر ۵ اینچ می‌باشد که شیب آن از صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که عوامل اصلی موثر در انتقال خرده‌های حفاری، سرعت و گرانروی سیال، زاویه شیب و سرعت حفاری می‌باشند. افزایش شیب چاه و سرعت حفاری دارای تاثیر منفی در انتقال خرده‌های حفاری می‌باشند. سیالات با گرانروی بالا برای انتقال خرده‌های حفاری نسبت به سیالات گرانروی پایین با رژیم جریان یکسان، مطلوب‌تر می‌باشند. عدم هم‌مرکزی دارای تاثیر متوسطی در انتقال خرده‌های حفاری است و فضای حلقوی هم‌مرکز برای انتقال خرده‌های حفاری مناسب‌تر است.

اوکرانجی و آذر (Okranji and Azar, 1986) تاثیر رئولوژی گل بر روی انتقال خرده‌ها در چاه‌های شیب‌دار را بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش نسبت تنش تسلیم به گرانروی پلاستیکی، باعث بهبود انتقال خرده‌ها می‌شود. همچنین مشاهده نمودند که در جریان‌های متلاطم، رئولوژی گل

1- Tulsa

هیچ تاثیری بر انتقال خرده‌ها ندارد. برای جریان آرام، تنش تسلیم، انتقال خرده‌ها را در شیب‌های پایین بهبود می‌بخشد و در شیب‌های بالا تاثیر تنش تسلیم ناچیز است. همچنین مشاهده نمودند که شیب‌های ۴۵ تا ۵۰ درجه مشکل‌ترین شیب‌ها برای انتقال خرده‌ها می‌باشند.

هارلند و همکاران (Hareland et al., 1993) گل‌های پایه آبی را با گل‌های پایه نفتی مقایسه نمودند. آن‌ها مشاهده نمودند که در شیب‌های پایین، هیچ تفاوتی در کارایی دو گل وجود ندارد. با افزایش شیب، گل‌های پایه آبی قابلیت انتقال بهتر خرده‌ها را دارند. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که کاهش نسبت تنش تسلیمی به گرانروی پلاستیک در انتقال خرده‌ها مفید نمی‌باشد.

تومرن و همکاران (Tomren et al., 1986) یکسری مطالعات آزمایشگاهی (۲۴۲ آزمایش) بر روی انتقال خرده‌های حفاری در یک فضای حلقوی شیب‌دار انجام دادند. آن‌ها وجود لایه‌های مختلفی (مدل سه لایه) که ممکن است در طی جریان گل و خرده‌های حفاری در فضای حلقوی تشکیل شود را مشاهده نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پارامترهای سرعت سیال، شیب چاه و خواص رئولوژیکی سیال بیشترین تاثیر را در انتقال خرده‌های حفاری دارند. آن‌ها متذکر شدند که چرخش لوله حفاری تاثیر کمی دارد مگر اینکه فضای حلقوی غیر هم‌مرکز و لوله در قسمت پایین هندسه فضای حلقوی باشد. گل‌های با گرانروی بالا ظرفیت انتقال بیشتری دارند. در زوایای تقریباً ۴۰ تا ۵۰ درجه تمایل لغزش بستر خرده‌های حفاری به سمت پایین با احتمال بیشتری رخ می‌دهد. در نظر گرفتن حالت ترکیبی بین سرعت سیال و رئولوژی گل، نشان می‌دهد که گرانروی پایین در جریان متلاطم نتایج مشابهی با گرانروی بالا در جریان آرام در چاه‌های غیر قائم دارد.

میانو (Meano, 1987) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های شیب‌دار انجام داد. او تاثیر نرخ جریان، شیب، سرعت حفاری، عدم هم‌مرکزی و رئولوژی سیال را در غلظت حجمی خرده‌های حفاری بررسی نمود. وی مشاهده نمود که با افزایش تنش تسلیمی، غلظت حجمی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش شیب باعث افزایش غلظت خرده‌ها می‌شود. او اختلاف چشم‌گیری در غلظت با تغییر سرعت حفاری مشاهده نمود.

براون و همکاران (Brown et al., 1989) انتقال خرده‌های حفاری با آب و گل‌های پلیمری را مطالعه نمودند. آن‌ها یک مدل دو لایه (لایه ساکن و لایه سیال) توسعه دادند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که برای شیب‌های پایین، سیالات پلیمری و در شیب‌های بالا آب کارایی انتقال بهتری دارند. آن‌ها محدوده شیب ۵۰ تا ۶۰ درجه را مشکل‌ترین شرایط برای تمیزکاری چاه تشخیص دادند.

بکر و همکاران (Becker et al., 1991)، یکسری مدل‌های ریاضی بر اساس آزمایشات قبلی توسعه داد. او تاثیر رئولوژی را با آنالیز تنش تسلیمی، گرانروی پلاستیک، شاخص رفتاری، شاخص پایداری و استحکام ژله‌ای سیال به طور جداگانه بررسی نمود. او مشاهده نمود که جریان متلاطم، انتقال خرده‌ها را در شیب‌های زیاد بهبود می‌بخشد و تاثیر رئولوژی سیال در شیب‌های پایین غالب است.

لارسن و همکاران (Larsen et al., 1997) بیش از ۷۰۰ آزمایش با استفاده از یک چاه بزرگ مقیاس در دانشگاه تولسا انجام دادند. تاثیر بسیاری از متغیرها بر روی سرعت بحرانی انتقال مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان دادند که زاویه شیب و سرعت جریان سیال موثرترین پارامترها در تمیزکاری چاه هستند.

سانچز و همکاران (Sanchez et al., 1999) تاثیر چرخش لوله را بر روی تمیزکاری چاه در حفاری چاه‌های شیب‌دار مورد مطالعه قرار دادند. متغیرهای در نظر گرفته شده در این مطالعه سرعت چرخش، شیب چاه، رئولوژی گل، اندازه خرده‌های حفاری و سرعت جریان گل را شامل می‌شود. بالغ بر ۶۰۰ آزمایش انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که چرخش لوله تاثیر بسزایی در تمیزکاری چاه در حفاری چاه‌های شیب‌دار دارد. مشخص شد پس از توقف حفاری، در حال چرخش نگه داشتن لوله، به تخریب بستر خرده‌های حفاری کمک می‌کند و باقیمانده خرده‌های حفاری را خارج می‌سازد. انتقال خرده‌های حفاری کوچک‌تر، مشکل‌تر است. همچنین افزایش در سرعت حفاری، هیدرولیک مورد نیاز برای تمیزکاری موثر چاه را افزایش می‌دهد. حالت ترکیبی سرعت پایین جریان و سرعت بالای چرخش در چاه‌های افقی باعث افزایش انتقال خرده‌های حفاری می‌گردد.

فیلیپ و همکاران (Philip et al., 1998) یکسری آزمایشات برای تعیین تاثیر رئولوژی سیال و سرعت چرخش لوله بر انتقال خرده‌های حفاری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش گرانروی سیال نیوتنی، قابلیت انتقال خرده‌های حفاری افزایش می‌یابد. با افزایش گرانروی سیالات غیرنیوتنی، بر خلاف انتظار قابلیت پسای کاهش می‌یابد. مقادیر بالاتر n (بر اساس مدل قانون توان) سبب نیروی برآی بیشتری می‌گردد. تشکیل گرده‌های تیلور (بعد از یک سرعت چرخش مشخص) به افزایش نیروی برآ در مقاطع افقی کمک می‌کند.

پیلهوری و همکاران (Pilehvari et al, 1999) مروری از انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های افقی را انجام دادند. آن‌ها خلاصه‌ای از تحقیقات انتقال خرده‌های حفاری را بیان داشتند. آن‌ها پیشنهاد دادند که کار بیشتری در زمینه جریان متلاطم سیالات غیرنیوتنی، تاثیر چرخش لوله حفاری، مدلی کامل در مورد جریان سیال جامد-مایع و توسعه سیستم ثبت تمیزکاری چاه صورت گیرد.

چو و همکاران (Cho et al., 2001, 2002) یک مدل هیدرولیکی سه لایه برای انتقال خرده‌ها در چاه‌های شیب‌دار و افقی با لوله مارپیچی، توسعه دادند. آن‌ها سه حالت برای برخورد با شیب چاه مدل کردند: حالت افقی (۶۰-۹۰ درجه)، حالت شیب‌دار (۳۰-۶۰ درجه)، حالت قائم (۰-۳۰ درجه). برای هر حالت، آن‌ها معادلات پیوستگی و ممنوم را تشکیل دادند. برای هر حالت مدل‌های انتقال جداگانه در نظر گرفته شد. برای حالت افقی، مدل، سه لایه زیر را شامل می‌شود: (۱) بستر ساکن خرده‌ها در قسمت پایین چاه (۲) لایه متحرک بالای لایه ساکن (۳) لایه معلق هموزن در بالا. برای حالت شیب‌دار دو لایه (لایه ساکن و لایه معلق) و برای حالت قائم یک لایه (لایه معلق) در نظر گرفته شد. آن‌ها تاثیرات سرعت فضای حلقوی، رئولوژی سیال و زاویه شیب را در انتقال خرده‌ها بررسی نمودند و سرعت فضای حلقوی را از $3/5$ تا 4 فوت بر ثانیه در چاه‌های با مقاطع افقی طولانی، پیشنهاد نمودند. اوزبای اوقلو و همکاران (Ozbayoglu et al., 2002) با استفاده از شبکه عصبی، ارتفاع بستر خرده‌ها را در چاه‌های افقی و شیب‌دار تخمین زدند.

دوان و همکاران (Duan et al., 2008) مطالعه خود را روی انتقال خرده‌ها با اندازه کوچک در محدوده $1/3$ تا 7mm متمرکز ساختند. آزمایشات با یک چرخه جریان 100 فوتی با قطر 8 in انجام شده است. انتقال خرده‌های کوچک‌تر با سیالات آب و پلیمری انجام شد. از طریق آزمایشات روابطی برای پیش‌بینی غلظت خرده‌ها در فضای حلقوی و ارتفاع بدون بعد خرده‌ها توسعه داده شد. مشاهده شد که خرده‌های کوچک‌تر برای انتقال در آب در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر سخت‌تر است ولی با استفاده از محلول‌های پلیمری از قبیل پلی آکریل (PAC) آسانتر است. همچنین چرخش لوله و رئولوژی پارامترهای مهم در انتقال خرده‌های کوچک‌تر هستند.

همفیل و راوی (Hemphill and Ravi, 2006) تاثیر چرخش لوله حفاری و عدم هم‌مرکزی چاه را بر روی تمیزکاری چاه بررسی نمودند. کار آنها نشان می‌دهد که چرخش، خارج‌سازی خرده‌ها را از قسمت باریک فضای حلقوی در یک چاه غیر هم‌مرکز افزایش می‌دهد.

یو و همکاران (Yu et al., 2007) مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی تمیزکاری چاه با مقطع $54/7$ فوتی در شرایط ته چاهی شبیه‌سازی شده انجام دادند. آنها در 116 آزمایش با سیال آب و سیالات غیرنیوتنی، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله رئولوژی سیال، دانسیته گل، دما، شیب چاه، عدم هم‌مرکزی، سرعت حفاری و سرعت جریان را در ظرفیت انتقال خرده‌ها بررسی نمودند. نتایج نشان داد که سه پارامتر چرخش لوله، دما و پارامترهای رئولوژیکی بیشترین تاثیر را در کارایی انتقال دارند. همچنین روابطی بین غلظت خرده‌ها و پارامترهای موثر توسعه داده شد که برای کاربردهای میدانی می‌تواند بکار رود.

کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al., 2007) جریان مخلوط مایع-جامد رقیق را در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز کامل، با استفاده از سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی مطالعه کردند. الگوهای جریان در شرایط آزمایشگاهی مختلف با استفاده از پایش مشاهده و نقشه‌های الگوها تحلیل گردید. آنها روشی برای تشخیص الگوی جریان با استفاده از اندازه‌گیری‌های جریان برای کاربردهای واقعی، ارائه نمودند.

لی و همکاران (Li et al., 2007) مدلی مکانیکی گذرای یک بعدی انتقال خرده‌ها با سیالات حفاری معمولی در چاه‌های افقی ارائه دادند. مدل به صورت عددی برای پیش‌بینی ارتفاع بستر به صورت تابعی از نرخ جریان سیال حفاری و پارامترهای رئولوژیکی (n, K)، سرعت حفاری، هندسه چاه و عدم هم‌مرکزی لوله حفاری توسعه پیدا نمود. نتایج آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای مختلف عملیات حفاری بر روی کارایی انتقال جامدات، ارائه شدند. مدل توسعه یافته در این مطالعه می‌تواند برای توسعه برنامه کامپیوتری برای طراحی عملی در تعیین بهینه پارامترهای مورد نیاز در حفاری چاه‌های افقی به کار رود.

انوری (انوری، ۱۳۸۷) مدلی هیدرولیکی سه لایه برای انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌ها افقی و شیب‌دار ارائه نمود که مشابه کار چو (Cho et al., 2002) می‌باشد.

مورونی و همکاران (Moroni et al., 2009) تاثیر چرخش لوله بر تمیزکاری چاه را در طی سیمان‌کاری بررسی نمودند. آن‌ها سرعت موثر و افت فشار برای حالت چرخش و بدون چرخش لوله را برای سیال مدل هرشل- بالکلی شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان دهنده بهبود تمیزکاری چاه با چرخش لوله در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز می‌باشد. نتایج مدل‌سازی با داده‌های صحرائی مقایسه شدند. مقایسه نشان دهنده تطابق خوبی بین بهبود سیمانکاری پیش‌بینی شده و حاصل از نگارهای سیمان است. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بهینه‌سازی عوامل گوناگون در طی سیمان‌کاری برای کمک به حداکثر نمودن تمیزکاری چاه و سیمان‌کاری بهینه، استفاده گردد.

اخوان صفار در سال ۱۳۸۹ با استفاده از مدل هیدرولیکی سه لایه شبیه کار چو (Cho et al., 2002) انتقال خرده‌های حفاری را در چاه‌های افقی بررسی نمود.

اوزبای اوقلو و همکاران (Ozbayoglu et al., 2010) فرمولی تجربی، با استفاده از پارامترهای بدون بعد برای تعیین سرعت بحرانی جریان برای جلوگیری از تشکیل بستر خرده‌ها با استفاده از آزمایشاتی توسط سیال آب و سیالات دیگر پایه آبی ارائه دادند. مشاهدات نشان داد که لایه ساکن خرده‌ها حتی در زوایای شیب کمتر از ۵۰ درجه نیز تشکیل می‌شود. نتایج نشان داد که سرعت بحرانی با رابطه ارائه

شده در مقاله آنها، با صحت قابل قبول تخمین زده می‌شود. برای سرعت‌های جریان کمتر از مقادیر بحرانی، ضخامت لایه ساکن اغلب با خطایی در محدوده $\pm 15\%$ محاسبه شد.

نظری و همکاران (Nazari et al., 2010) به مرور انتقال خرده‌های حفاری در حفاری چاه‌های شیب‌دار پرداخته و روش سیستماتیک برای دستیابی به تمیزکاری بهینه چاه را ارائه دادند.

لوریرو و همکاران (Loureiro et al., 2010) با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر چرخش لوله در تعلیق بستر خرده‌ها در چاه‌های شیب‌دار و افقی را بررسی نمودند. هدف آن‌ها بدست آوردن تعداد ذرات معلق با توجه به چرخش لوله بود. نتایج مطالعه می‌تواند برای درک پارامترهای حاکم بر تعلیق بستر با توجه به چرخش لوله بکار رود. در این مطالعه گرانروی سینماتیک بدون بعد و عدد رینولدز چرخشی با ظرفیت معلق سازی مرتبط شدند.

پیروزیان و همکاران (Piroozian et al., 2012) تاثیر گرانروی و سرعت سیال و شیب چاه در انتقال خرده‌ها را در چاه‌های شیب‌دار و افقی با استفاده از سیال آب، سیال بنتونیتی و CMC به صورت آزمایشگاهی در یک چرخه جریان ۱۷ فوتی با قطر ۲ اینچ بررسی نمودند.

۲-۴-۲ مطالعات جریان چند فازی

راضا و مارسدن (Raza and Marsden, 1965) مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی رئولوژی کف با استفاده از لوله‌های باریک انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که رئولوژی کف به صورت مدل قانون توان است.

میشل (Mitchell, 1969) بر روی گرانروی کف در لوله‌های باریک تحقیق کرد و معادلات زیر را برای گرانروی کف ارائه نمود: برای کیفیت کف در محدوده ۰ و ۰/۵۴ گرانروی برابر است با:

$$\mu_f = \mu_l(1 + 3.6\Gamma) \quad (2-25)$$

معادله دوم او برای گرانروی برای کیفیت‌های کف بین ۰/۵۴ و ۰/۹۷ به صورت زیر می‌باشد:

$$\mu_f = \frac{\mu_l}{(1 - \Gamma^{0.49})} \quad (2-26)$$

در معادلات ۳-۳ و ۳-۴، Γ کیفیت کف که نسبت حجم گاز به حجم کل مایع و گاز تعریف می‌شود.

دیوید و مارسدن (David and Marsden, 1969) به صورت آزمایشگاهی و تئوری بر روی رفتار جریان کف تحقیق نمودند. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان داد که کف به صورت یک سیال شبه پلاستیک با تنش تسلیمی کم رفتار می‌کند.

کروگ و میشل (Krug and Mitchell, 1972) نمودارهایی برای تخمین سرعت جریان مورد نیاز برای حفاری کف به عنوان تابعی از سرعت حفاری، عمق و فشار ته چاه توسعه دادند. آن‌ها فرض کردند که کف به عنوان یک سیال بینگهام پلاستیک عمل می‌کند. آن‌ها تاثیر جامدات را در محاسبات خود نادیده گرفتند.

بیر و همکاران (Beyer et al., 1972) مدل رئولوژیکی بینگهام پلاستیک را برای توصیف رفتار جریان کف بر اساس نتایج آزمایشگاهی توسعه دادند.

بلاور و همکاران (Blauer et al., 1974) با استفاده از لوله باریک مشاهده نمودند که کف شبیه مواد بینگهام پلاستیک در جریان پایدار عمل می‌کند.

اوکپوبیری (Okpobiri, 1982) با استفاده از آزمایشاتی تحت شرایط فشار پایین و دمای محیط در یک فضای حلقوی قائم، یک رابطه نیمه تجربی برای تعیین افت‌های فشار اصطکاکی با توجه به فاز جامد در جریان کف توسعه داد. وی حداقل حجم مورد نیاز کف برای عملیات حفاری را پیش‌بینی کرد. برای یک عدد رینولدز ثابت، او مشاهده نمود که با افزایش در سرعت جریان جامد، افت فشار اصطکاکی افزایش می‌یابد. در این مطالعه فرض شد که تمام عملیات حفاری با کف در ناحیه جریان آرام و کیفیت کف بین ۵۵٪ و ۹۶٪ تغییر می‌کند.

سنقانی و ایکوکو (Sanghani and Ikoku, 1983) بر روی رئولوژی کف برای جریان این سیال در فضای حلقوی تحقیق نمودند و دریافتند که کف به صورت یک سیال شبه پلاستیک بدون تنش تسلیمی رفتار می‌کند. نتایج آزمایشگاهی با استفاده از ویسکومتر هم‌مرکز که می‌تواند شرایط واقعی چاه را شبیه‌سازی کند انجام پذیرفت. آن‌ها مقادیر شاخص رفتاری جریان (n) و شاخص مقاومت سیال (K) را به صورت تابعی از کیفیت کف بدست آوردند.

برای $\Gamma \leq 0.915$:

$$K = 0.0074e^{3.5163\Gamma} \quad (27-2)$$

$$K = 0.0074e^{3.5163\Gamma} \quad (28-2)$$

برای $0.915 < \Gamma < 0.98$:

$$K = -2.1474.\Gamma + 2.1569 \quad (29-2)$$

$$n = 2.5742.\Gamma - 2.1649 \quad (30-2)$$

معمولاً اگر ماده ژله‌ای به آب اضافه شود، کف رفتار شبیه پلاستیک تسلیمی نشان می‌دهد. رییدنباخ و همکاران (Reidenbach et al., 1986) مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی رئولوژی کف با و بدون فاز ژله‌ای انجام دادند و دریافتند که کف بدون ژله شبیه یک سیال بینگهام پلاستیک عمل می‌کند در حالی که کف ژله‌ای شبیه سیال هرشل- بالکلی رفتار می‌کند. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که شاخص رفتاری سیال (n) تقریباً شبیه به مایع پایه است و تنش تسلیمی و شاخص مقاومت سیال به صورت نمایی تابع کیفیت کف می‌باشند. یکسری روابط برای محاسبه تنش تسلیم و شاخص مقاومت سیال کف‌های نیتروژنی و دی اکسید کربنی ارائه دادند.

اوکپوبیری و ایکوکو (Okpobiri and Ikoku, 1986) از یک روش تکراری برای توسعه رابطه‌ای برای تعیین حداقل دبی کف تزریقی برای اطمینان از انتقال خرده‌ها، استفاده نمودند. در مطالعه آن‌ها فرض شد که برای انتقال موثر خرده‌ها، جریان خرده‌ها- کف، هموزن باشد و پیشنهاد کردند که سرعت سیال در کف چاه باید حداقل ۱۰٪ بیشتر از سرعت حد ته‌نشینی در همان عمق باشد.

کالورت و نژاتی (Calvert and Nezhati, 1986) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، کف را به صورت مدل هرشل بالکلی مدل کردند. آن‌ها عبارت "نسبت گسترش"^۱ را معرفی نمودند که به صورت نسبت حجم نمونه کف به حجم مایع پایه آن به جای کیفیت کف برای توصیف خواص کف تعریف

1 -Expansion ratio

می‌شود. مشخص شد که شاخص رفتاری و شاخص مقاومت سیال مستقل از دبی جریان و نسبت گسترش می‌باشند، در حالیکه تنش تسلیمی با دبی جریان و نسبت گسترش قویاً تغییر می‌کند. هلر و کونتاموکولا (Heller and Kuntamukkula, 1987) مروری بر رئولوژی کف انجام دادند. آنها گزارش نمودند که بعضی نتایج آزمایشگاهی از قبیل مقادیر گرانروی ظاهری وابسته به هندسه هستند. کاندو و پترسون (Kundu and Peterson, 1987) کارایی انتقال با سیال کف را در خطوط لوله تحلیل کردند. آنها نتیجه گرفتند که کف می‌تواند به عنوان یک سیال انتقال نوید بخش در لوله‌ها بکار رود. دو مزیت اصلی آن، کاهش آب و لوازم مورد نیاز بود ولی یک عیب بزرگ آن افزایش افت‌های فشار می‌باشد.

کاویزل و نیلز (Cawiezel and Niles, 1987) تاثیر حرارت، فشار، کیفیت و نرخ برشی را بر روی خواص رئولوژیکی کف بررسی نمودند. با توجه به کار آنها، رفتار رئولوژیکی سیال کف به صورت سیال شبه پلاستیک با تنش تسلیمی است و می‌تواند با مدل هرشل-بالکلی توصیف گردد. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش کیفیت کف، گرانروی ظاهری کف، افزایش می‌یابد و بیشتر حالت شبه پلاستیکی پیدا می‌کند. همچنین در کیفیت‌های بالای کف، گرانروی ظاهری به صورت نمایی با کیفیت کف افزایش می‌یابد. آنها خاطر نشان کردند که افزایش دما به طور چشم‌گیری گرانروی ظاهری کف را کاهش می‌دهد. بعلاوه افزایش فشار در نرخ‌های برشی کم، گرانروی سیال کف را افزایش می‌دهد.

رانکین و همکاران (Rankin et al., 1989) تاثیر شیب را در افت فشار و تمیزکاری چاه برای شرایط حفاری زیر تعادلی بررسی نمودند. تاثیر خرده‌ها در این مطالعه نادیده گرفته شد.

والکو و اکونومیدس (Valko and Economides, 1992) یک معادله جدید برای محلول‌های کف

پلیمری بر اساس اصل برابری حجم ارائه نمودند. آنها یک نسبت گسترش حجم $(\varepsilon_s = \frac{\rho_f}{\rho_l})$ که به

صورت نسبت حجم مخصوص کف به حجم مخصوص مایع تشکیل دهنده تعریف می‌شود، ارائه نمودند. این معادله برای سیالات بینگهام پلاستیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma = 0, \quad |\tau| < \tau_y \varepsilon_s \quad (31-2)$$

$$\tau = \left(\mu_p + \frac{\tau_y \varepsilon_s}{|\gamma|} \right) \gamma, \quad |\tau| \geq \tau_y \varepsilon_s \quad (32-2)$$

برای سیالاتی که از قانون توان تبعیت می‌کنند:

$$\tau = \left(K |\gamma|^{n-1} \varepsilon_s^{1-n} \right) \gamma \quad (33-2)$$

گیو و همکاران (Guo et al., 1995) مدلی تحلیلی برای محاسبه فشار ته چاه توسعه دادند. در مدل آن‌ها کف به صورت یک سیال قانون توان در نظر گرفته شد. مدل آن‌ها شبیه به مدل اوکیوبیری و ایوکو (Okpobiri and Ikoku, 1986) بود به جز اینکه عامل اصطکاک جامدات در نظر گرفته نشد. به همین دلیل فشار ته چاهی حاصل از مدل آن‌ها، کمتر از روش اوکیوبیری و ایوکو بود. مدل آن‌ها یکی از اولین مطالعات مدل‌سازی انتقال خرده‌ها با سیال کف در چاه‌های افقی و پر شیب بود.

گیو و همکاران (Guo et al, 1996) ظرفیت حمل گل هوازده را به صورت حجم حداکثری از خرده‌ها که می‌تواند توسط آن حمل شود، تعریف نمودند. آن‌ها سرعت لغزش نهایی (V_{sl}) را با استفاده از معادله ریتینگر برای ذرات مسطح، که ضریب پسا آن‌ها برابر با ۰/۹۴ فرض می‌شود، به صورت معادله (۳۴-۲) محاسبه نمودند.

$$V_{sl} = 7.3 \sqrt{\frac{d_c (\rho_c - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (34-2)$$

که در آن:

ρ_f دانسیته سیال (lbm/ft^3)، ρ_c دانسیته خرده‌ها، V_{sl} (ft/s) و d_c قطر خرده‌ها (ft) می‌باشد.

آن‌ها سرعت مورد نیاز انتقال خرده‌ها (V_t) را بر حسب سرعت حفاری به صورت زیر تعریف نمودند:

$$V_t = \frac{ROP}{C_c} \quad (35-2)$$

آن‌ها غلظت قابل قبول خرده‌ها (C_c) را ۰/۴ حجم مقطع برای جریان قائم در نظر گرفتند. اگر سرعت سیال ترکیبی بیشتر از $V_{sl} + V_t$ باشد، گل هوازده قادر به حمل خرده‌های حفاری به سطح خواهد بود. در این روش، آن‌ها جریان چند فازی را به صورت ترکیب همگنی از مایع، گاز و جامد در

نظر گرفتند که با رژیم جریان حبایی حرکت می‌کرد. لغزش بین فاز مایع و فاز گاز و همچنین الگوهای مختلف جریان در نظر گرفته نشد. در نظر گرفتن ترکیب چند فاز به صورت همگن، واقعی نیست و پیش‌بینی‌های ضعیف رفتار جریان را در بر دارد.

لیو و مدلی (Liu and Medley, 1996) مدلی کامپیوتری برای تحلیل عملیات حفاری زیرتعادلی با کف توسعه دادند. آن‌ها کف را به عنوان یک سیال همگن در نظر گرفتند و بیان نمودند که افت اصطکاکی فشار به رئولوژی کف و معادله حالت بستگی دارد. آن‌ها نتایج حاصله را با داده‌های آزمایشگاهی یک چاه کم عمق اعتبارسنجی کردند که خطایی برابر با $11/2$ درصد حاصل گردید. ژائو و همکاران (Zhou et al., 1996) تئوری جریان چند فاز برای محاسبه و کنترل فشار تزریقی، نرخ جریان، افت‌های فشار اصطکاکی در لوله و فضای حلقوی و افت فشار در نازل‌های مته را بکار بردند. آن‌ها همچنین رئولوژی گل هوازده، نسبت گاز-مایع، دانسیته گل و فشار برگشتی فضای حلقوی را تحلیل نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوی جریان برای انتقال بهتر خرده‌ها باید یا حبایی یا لخته‌ای باشد.

اوواید (Owayed, 1997) مدل تک بعدی حالت پایدار شبیه مدل اوکوپیری و ایکوکو توسعه داد با این تفاوت که آن‌ها شار مخزن (آب) را هم در مدل در نظر گرفتند.

گیلیز و همکاران (Gillies et al., 1997) نتایج آزمایشگاهی انجام شده در مورد قابلیت ترکیبات مایع-گاز برای انتقال ماسه در لوله یا چاه افقی را در سرعت‌های پایین ارائه دادند. با استفاده از یک چرخه جریان ۳۰ متری، آن‌ها تاثیرات افزودن گاز برای انتقال ماسه در رژیم‌های جریان آرام و متلاطم را بررسی کردند. یکی از نتایج مطالعه آنها، این است که تزریق گاز تاثیر کمی در قابلیت انتقال جریان آرام در سرعت‌های سطحی پایین دارد. این نتیجه با توجه به این حقیقت است که گاز و جامدات در نواحی مختلفی از لوله حرکت می‌کنند. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که تزریق گاز، سرعت انتقال جامدات و گرادیان محوری فشار را زمانی که جریان سیال متلاطم است، افزایش می‌دهد.

ویلکس و همکاران (Wilkes et al., 1998) عوامل مهم برای حفاری مه و کف را مطالعه نمودند. آن‌ها روش‌ها و وسایل جدید را برای حفاری موثرتر پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها نتایج مدل را با داده‌های صحرایی مقایسه کردند.

سانتپیر و همکاران (Saintpere et al., 1999)، بر روی رئولوژی کف ژله‌ای مطالعه کردند و مشخص شد که کف به صورت سیال شبه پلاستیک با تنش تسلیمی رفتار می‌کند.

هرزافت (Herzhaft, 1999) مروری بر مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر رئولوژی کف انجام داد. لورنکو و همکاران (Lourenco et al., 2000) آزمایشات گسترده‌ای بر روی پایداری کف و خواص رئولوژیکی آن با استفاده از ویسکومتر لوله‌ای انجام دادند. روابط جدیدی برای شاخص رفتاری و شاخص مقاومت سیال کف در ارتباط با کیفیت کف توسعه دادند.

$$n = a_1' \left(\frac{1-\Gamma}{\Gamma} \right)^{a_2'} \quad (36-2)$$

$$K = b_1' \left(\frac{1-\Gamma}{\Gamma} \right)^{b_2'} \quad (37-2)$$

که در آن:

a_1' ، a_2' ، b_1' و b_2' ضرایب رگرسیون و به ترتیب برابر با ۰/۸۲۴۲، ۰/۵۱۶۴، ۰/۰۸۱۳ و ۱/۵۹۰۹- می‌باشند (Li, 2004).

تیان و همکاران (Tian et al., 2000) طراحی هیدرولیک سیستم‌های حفاری زیر تعادلی برای پیش‌بینی نرخ بهینه جریان برای هر نوع سیال را شبیه‌سازی کردند. ولی مقاله آنها هیچ نوع اطلاعاتی در مورد مدل‌سازی ارائه نمی‌دهد. به علاوه، آن‌ها ادعا می‌کنند که سیال کف نسبت به دیگر گل‌های هوازده ظرفیت حمل بهتری دارد. ولی این فقط برای چاه‌های قائم و با شیب کم معتبر است.

سانتپیر و همکاران (Saintpere et al., 2000) تمیزکاری چاه را با کف و سیالات معمولی در چاه‌های شیب‌دار با استفاده از روش مکانیک سیالات و نادیده گرفتن نیروهای اینرسی، تحلیل کردند. در کار آن‌ها کف به عنوان سیال قانون توان تسلیمی در نظر گرفته شد. آن‌ها چند پارامتر بدون بعد

برای توصیف رئولوژی، خواص سیال کف، زمان جریان و غیره، را معرفی کردند. آن‌ها بدترین کارایی تمیزکاری چاه را در زوایای ۶۰-۴۰ درجه مشاهده نمودند.

مارتینز و همکاران (Martins et al., 2001) به صورت آزمایشگاهی تمیزکاری موثر چاه را با کف بررسی نمودند. آن‌ها معادلات تجربی برای پیش‌بینی ظرفیت تخریب بستر را در چاه‌های افقی به صورت تابعی از کیفیت کف و عدد رینولدز توسعه دادند.

لی و واکر (Li and Walker, 2001) تاثیرات مربوط به نسبت گاز-مایع، نرخ جریان، سرعت‌های لغزش فاز، سرعت حفاری، شیب و خواص سیال را بر روی ضخامت بستر خرده‌ها برای سیستم سیالات هوازده مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده نمودند که مایع عامل غالب در انتقال خرده‌ها در سیستم گل هوازده می‌باشد. با افزایش نسبت مایع، با نرخ جریان ثابت، انتقال خرده‌ها بهبود می‌یابد.

اوزبای اوقلو (Ozbayoglu, 2002) در رساله دکتری خود، آزمایشاتی بر روی انتقال خرده‌ها با کف در ساختارهای شیب‌دار و افقی تحت شرایط دمای محدود و فشار پایین در یک چرخه جریان ۸ in در ۴/۵ in انجام داد. حدود کیفیت کف ۷۰٪ تا ۹۰٪ در نظر گرفته شد. برای شیب‌های بالا (بالتر از ۷۰ درجه نسبت به قائم)، زاویه شیب در ضخامت لایه تاثیر چندانی ندارد. یک مدل مکانیکی سه لایه برای پیش‌بینی ارتفاع بستر خرده‌ها و افت فشار توسعه داده شد. بیشتر آزمایشات حضور بستر ساکن خرده‌ها در پایین فضای حلقوی را نشان دادند. براساس مقایسه افت اصطکاکی فشار اندازه‌گیری شده در طی جریان کف در لوله‌ها با پیش‌بینی‌های مدل، آن‌ها نتیجه گرفتند که برای کیفیت کف بین ۷۰ تا ۸۰٪، کف به صورت سیال قانون توان عمل می‌کند و وقتی کیفیت کف ۹۰٪ است به صورت سیال بینگهام پلاستیک عمل کند.

بونیا و شاه (Bonilla and Shah, 2000) در مقیاس آزمایشگاهی رئولوژی کف‌های ژله‌ای و آبی را با استفاده از ویسکومتر دوار مطالعه نمودند. تمام آزمایشات در متوسط فشار ۶۹۸۰ KPa (۱۰۰۰ psi) انجام پذیرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که رئولوژی کف می‌تواند توسط مدل هرشل-بالکلی توصیف گردد. روابطی بین نقطه تسلیم و شاخص مقاومت سیال با کیفیت کف توسعه پیدا نمود.

دوان و همکاران (Doan et al., 2003) هر دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی را برای انتقال خرده‌ها در حفاری UBD در فضای حلقوی شیب‌دار با عدم هم‌مرکزی اختیاری انجام دادند. آزمایشات با آب و سه نوع گل مختلف انجام شدند. رفتار خرده‌های حفاری شده هم در حالت پایدار و هم در حالت ناپایدار توسط دوربین ویدئویی ثبت گردید. با استفاده از عکس‌های گرفته شده، توزیع مقطعی و سرعت متوسط خرده‌ها در فضای حلقوی تحلیل گردید. نتایج حاصل از این تحقیق آزمایشگاهی در مقابل مدل عددی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در سرعت‌های پایین تزریق خرده‌ها، بسیار ضعیف است. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل دو لایه، پدیده فصل مشترک ایجاد شده در دینامیک لایه را به طور مناسب توصیف نمی‌کند.

کاکادجیان و هرزافت (Kakadjian et al., 2003) رئولوژی سیالات تراکم پذیر آبی را تحت شرایط کاری فشار برابر با ۷۳۵ psi و دمای ۱۹۴ F مطالعه نمودند. کف با مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی مشخص شد و پارامترهای رئولوژیکی با کیفیت، فشار و دما مرتبط شدند.

میسکا و همکاران (Miska et al., 2004) در چندین طرح پژوهشی جداگانه مساله انتقال خرده‌های حفاری را با سیالات کف، هوازده و سیالات مصنوعی در شرایط دمایی و فشار مختلف بررسی نمودند. ژائو (Zhou, 2004) در رساله دکتری خود، انتقال خرده‌های حفاری با گل هوازده در فضای حلقوی افقی هم‌مرکز را در شرایط دما و فشار بالا مطالعه نمود. مدل او از یک مقطع حلقوی ۷۳ فوتی با قطر لوله داخلی ۳/۵ اینچ و قطر لوله جداری ۶ اینچ برای انتقال خرده‌ها با سیالات مختلف تشکیل شده است. الگوهای جریان دو فازی با استفاده از مشاهدات ویژه مشخص شدند. مدلی مکانیکی برای پیش‌بینی غلظت حجمی خرده‌های حفاری در فضای حلقوی و گرادیان فشار بحرانی برای جلوگیری از ته‌نشینی خرده‌ها، بر اساس معادلات بقایی و روابط جریان دو فازی موجود لوله، توسعه یافت. مدل توسعه یافته، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارزیابی گردید. نتیجه گرفته شد که نرخ جریان مایع، نسبت گاز به مایع و دما در کارایی انتقال خرده‌ها تاثیر دارند. مقایسه بین نتایج پیش‌بینی و آزمایشگاهی، متوسط خطای ۱۲/۲ درصد را نشان داد.

واشینگتن (Washington, 2004) رئولوژی کف را با استفاده از ویسکومتر دوار مطالعه نمود. کف با مدل رئولوژیکی قانون توان توصیف گردید.

چن (Chen, 2005) رئولوژی کف پلیمری و بدون پلیمری را با استفاده از ویسکومتر دوار و لوله‌ای در شرایط دما محیطی مطالعه نمود. غلظت پلیمر تاثیر زیادی بر روی رئولوژی کف دارد. آزمایش‌های بیشتر در شرایط فشار و دمای بالاتر پیشنهاد گردید.

اوزبای اوقلو و همکاران (Ozbayoglu et al., 2003, 2005, 2009) مدلی سه لایه برای توصیف انتقال خرده‌ها در چاه‌های افقی ارائه دادند. با توجه به وجود بستر خرده‌ها، پارامترهای مدل رئولوژیکی اصلاح شده برای سیال کف به صورت تحلیلی و تابعی از خواص سیال و هندسه پیچیده هادی اصلاح شدند. با استفاده از این پارامترها، اصطکاک بین سیال و دیواره، بین لایه‌ها و لغزش بین خرده‌ها و سیال تعیین شدند. کارایی مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند ضخامت بستر خرده‌ها و افت فشار در چاه را با خطای کمتر از ۲۰٪ تخمین بزند. مشاهده شد که برای به حرکت در آوردن بستر خرده‌های ضخیم، سرعت بالاتری از سیال کف لازم است. همچنین سیالات با گرانروی پایین، کارایی بهتری در جلوگیری از توسعه بستر در داخل چاه نسبت به سیالات با گرانروی بالا دارند.

چن (Chen, 2005) انتقال خرده‌های حفاری را با کف در شرایط فشار و دمای بالا بدون چرخش لوله بررسی نمود. آزمایشات در یک چرخه جریان ۷۳ فوتی و فضای حلقوی هم‌مرکز افقی با لوله داخلی به قطر ۳/۵ اینچ و لوله خارجی به قطر ۵/۷۶ اینچ انجام پذیرفت. محدوده تغییرات دما، ۸۰ تا ۱۷۰ درجه فارنهایت و فشار از ۱۰۰ تا ۴۰۰ psi در نظر گرفته شد. محدوده کیفیت کف نیز ۷۰٪ تا ۹۰٪ و سرعت آن از ۲ تا ۶ فوت بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که غلظت خرده‌های حفاری با افزایش کیفیت کف، کاهش می‌یابد، در حالی که فشار و دما تاثیر کمی دارند.

کاپو و همکاران (Capo et al., 2006) به صورت آزمایشگاهی انتقال خرده‌ها با کف در شیب‌های متوسط چاه (۴۵ تا ۵۵) را در شرایط فشار پایین و دمای محیطی، مطالعه کردند. مشاهده شد که زاویه شیب حدود ۵۵ درجه، مشکل‌ترین زاویه برای انتقال خرده‌ها می‌باشد.

ژائو (Zhou, 2006a) مدلی مکانیکی برای حفاری UBD با سیالات هوازده ارائه داد. این مدل، الگوی جریان را تعیین می‌کند و افت‌های اصطکاکی فشار را در فضای حلقوی هم‌مرکز افقی پیش‌بینی می‌کند. تاثیر نسبت گاز-مایع و پارامترهای دیگر بر روی افت فشار با استفاده از مدل تحلیل شدند. همچنین در این مطالعه، آزمایشاتی در یک چرخه جریان دما و فشار بالا برای تایید پیش‌بینی‌های مدل انجام گردید. مقایسه نتایج پیش‌بینی‌های مدل با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تطابق خوبی را نشان می‌دهد. مدل ارائه شده، برای طراحی حفاری زیر تعادلی مفید می‌باشد.

لورنکو و همکاران (Lourenco et al., 2006) از نتایج دو مجموعه از آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه مقیاس واقعی، برای ارزیابی زمان برگشت ذرات جامد با سیالات هوازده استفاده کردند. آنها تاثیر نرخ تزریق مایع و گاز، قطر ذره، گرانیوز فاز مایع و فشار برگشتی فضای حلقوی را بر ظرفیت انتقال جامدات در چاه‌های قائم با آب و سیالات حفاری پلیمری هوازده تحلیل نمودند. آنها نتیجه گرفتند که گاز دارای تاثیر زیادی در سرعت بخشی به فاز مایع برای انتقال خرده‌ها به سطح می‌باشد.

ژیمینگ و همکاران (Zhiming et al., 2007) مدلی دینامیکی برای پیش‌بینی فشار چاه در حفاری با سیالات گازدار ارائه دادند. معادلات پیوستگی و ممنتوم و معادله جریان سیال در محیط متخلخل، برای ایجاد مدل دینامیکی استفاده شدند. مدل، توسط روش عددی تفاضل محدود به زبان برنامه نویسی فرترن ۹۰ حل گردید. مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی بزرگ مقیاس خطای متوسط ۵٪ را نشان داد که کاربرد مدل را در حفاری UBD ممکن می‌سازد.

دوان (Duan, 2007) انتقال خرده‌های حفاری را با کف در شرایط فشار و دمای بالا با چرخش لوله بررسی نمود. آزمایشات در یک چرخه جریان ۷۳ فوتی و فضای حلقوی غیر هم‌مرکز (۰/۷۸) افقی با لوله داخلی به قطر ۳/۵ اینچ و لوله خارجی به قطر ۵/۷۶ اینچ برای بررسی تاثیر چرخش لوله، کیفیت

و سرعت کف، فشار و دمای ته چاه بر روی انتقال خرده‌ها و افت‌های فشار در چاه افقی، انجام پذیرفت. محدوده تغییرات دما، ۸۰ تا ۱۶۰ درجه فارنهایت و فشار از ۱۰۰ تا ۴۰۰ psi در نظر گرفته شد. محدوده کیفیت کف ۶۰٪ تا ۹۰٪ و سرعت آن از ۲ تا ۵ فوت بر ثانیه و چرخش لوله ۰ تا ۱۲۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که غلظت خرده‌های حفاری و افت اصطکاکی فشار با افزایش چرخش لوله کاهش می‌یابد. یک مدل مکانیکی برای طراحی عملی و کاربردهای میدانی توسعه داده شد. این مدل برای پیش‌بینی غلظت حجمی خرده‌ها، ارتفاع بستر خرده‌ها و افت فشار در حفاری افقی با کف در سرعت‌های مختلف چرخش لوله، عدم هم‌مرکزی، سرعت و کیفیت‌های مختلف کف تحت شرایط مختلف فشار و دما، توسعه پیدا نمود. مقایسه بین پیش‌بینی‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اختلاف در بیشتر موارد کمتر از ۱۵٪ می‌باشد.

چن و همکاران (Chen et al., 2007) در یک مطالعه آزمایشگاهی در دانشگاه تولسا انتقال خرده‌ها با کف را در فضای حلقوی افقی، تحت شرایط فشار و دما ته چاهی بررسی نمودند. تاثیر افزودنی‌های پلیمری، کیفیت کف، سرعت جریان، دما و فشار بر روی انتقال خرده‌ها بررسی گردید. فشار مورد مطالعه در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ psi و دما در محدوده ۸۰ تا ۱۷۰ F در نظر گرفته شد. غلظت خرده‌ها با یک غلظت‌سنج هسته‌ای اندازه‌گیری شد. پارامترهای اندازه‌گیری در طی آزمایشات شامل نرخ‌های تزریق گاز و مایع، وزن خرده‌ها، دانسیته ترکیب، افت اصطکاکی فشار، فشار و دما در فضای حلقوی بودند. الگوهای جریان، بستر ساکن خرده‌ها و جریان کاملاً معلق در طی آزمایش‌های انتقال خرده‌ها مشاهده گردیدند. الگوی جریان وابسته به غلظت خرده‌ها، کیفیت کف و سرعت فضای حلقوی است.

اوزبای اوقلو و اومورلو (Ozbayoglu and Omurlu, 2007) مدلی ریاضی برای تخمین مشخصات جریان مربوط به جریان چند فاز از میان یک فضای حلقوی ارائه دادند. الگوهای جریان و افت اصطکاکی فشار با استفاده از مدل ارائه شده محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی شامل محدوده وسیعی از سرعت‌های جریان مایع و گاز در یک چرخه آزمایشگاهی شامل لوله‌های چرخشی و فضای حلقوی، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل برای الگوهای جریان و افت اصطکاکی فشار

به خوبی صحت دارند. در این کار مشاهده گردید که هندسه چاه و گرانروی فاز مایع تاثیر به سزایی در الگوهای جریان و افت اصطکاکی فشار دارند. با وجود تاثیر قوی گرانروی، تغییر دانسیته فاز مایع تاثیر کمی در افت فشار دارد و هیچ تاثیری بر الگوی جریان ندارد.

آویلا و همکاران (Avila et al., 2008) مطالعه‌ای در زوایای شیب متوسط چاه با استفاده از سیالات هوازده، برای تعیین مقدار جامدات موجود در چاه و حداقل جریان مورد نیاز برای تمیزکاری چاه ارائه دادند. این مطالعه با بیش از ۳۰۰ آزمایش در یک وسیله آزمایشگاهی بزرگ مقیاس در دانشگاه تولسا انجام پذیرفت. زوایای مقطع آزمایش ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق بودند. چهار سرعت چرخش لوله (۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۱۰ دور در دقیقه) برای ترکیب‌های مختلف از سرعت‌های جریان گاز و مایع استفاده شدند. روابط جدیدی برای تخمین سرعت‌های بحرانی گاز و مایع برای تمیزکاری چاه در ترکیب‌های خاص چرخش لوله و جریان مایع و برای پیش‌بینی غلظت حجمی به صورت تابعی از سرعت جریان آب و هوا، سرعت چرخش و زاویه شیب ارائه شد.

ژائو (Zhou, 2008) مدلی مکانیکی برای انتقال خرده‌ها توسط ترکیب معادلات هیدرولیکی دو فاز، تئوری لایه مرزی متلاطم و مکانیسم انتقال ذره توسعه دادند. تاثیر دما، فشار ته چاه، نرخ جریان مایع، نرخ تزریق گاز، دانسیته و اندازه ذرات، زاویه شیب و خواص رئولوژیکی گل حفاری بر روی تمیزکاری چاه با استفاده از این مدل تحلیل شدند. مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود، اعتبارسنجی شد.

فالكون و همکاران (Falcone et al., 2008) مروری بر چرخه‌های چند فازي در جهان را با اشاره به مزایا و معایب هر کدام با توجه به ایجاد و نمایش موقعیت‌های جریان چند فازي ارائه دادند. آن‌ها روشی برای بهبود در زمینه مدل‌سازی جریان چند فازي ارائه دادند.

اسکویی (Osgouei, 2010) در رساله دکتری خود در دانشگاه خاورمیانه آنکارا، به صورت آزمایشگاهی به تحلیل کارایی تمیزکاری سیالات حفاری گازدار در چاه‌های افقی، شیب‌دار و قائم پرداخت. مدلی مکانیکی به کمک نتایج آزمایشگاهی توسعه داد. مدل توسعه یافته می‌تواند برای

تخمین نرخ‌های بهینه جریان فازهای مایع (آب) و گاز برای انتقال موثر خرده‌های حفاری و همچنین برای افت فشار و درصد حجمی هر فاز در شرایط حفاری مشخص، استفاده شود. مدل مکانیکی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، می‌تواند برای توسعه برنامه هیدرولیکی و انتخاب وسایل در کاربردهای صحرایی حفاری زیر تعادلی مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۴-۳ مطالعات عددی

چین (Chin, 2001) با استفاده از روش تفاضل محدود، حلی عددی برای جریان غیرچرخشی فضای حلقوی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی را با استفاده از "تطبيق مرزها و مختصات مناسب" به دست آورد که برای ساختارهای پیچیده از قبیل چاه‌های با بستر خرده‌های حفاری و شسته شدگی یا لوله‌های حفاری غیر دایره‌ای با پایدار کننده‌ها یا مرکز دهنده‌ها می‌تواند استفاده شود. او پروفیل‌های سرعت فضای حلقوی و گرانیوی ظاهری را برای شکل‌های مختلف جریان فضای حلقوی برای ساختارهای ساده مثل فضای حلقوی هم‌مرکز تا ساختارهای پیچیده‌تر مثل طوقه حفاری مربعی در یک چاه دایره‌ای ارائه داد.

وینود (Vinod, 1994) در رساله دکتری خود به صورت عددی تاثیر رئولوژی سیال بر تمیزکاری چاه را در چاه‌های با شیب زیاد بررسی نمود و نشان داد که شاخص رفتار جریان سیال (n) ، یک پارامتر مهم در تعیین رژیم محلی جریان فضای حلقوی است. در نتیجه کنترل صحیح شاخص رفتار، یک عامل مهم در بهینه نمودن جریان چاه می‌باشد.

حسین و شریف (Hussain and Sharif, 1997, 1998, 2000) روش‌های عددی و تحلیلی را برای جریان آرام سیالات غیرنیوتنی مدل قانون توان تسلیمی، در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز بکار بردند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی‌شان را با حل‌های تحلیلی موجود از توزیع سرعت محوری در یک فضای حلقوی هم‌مرکز مقایسه کردند.

اسکودیر و همکاران (Escudier et al., 2002) با استفاده از روش عددی، جریان آرام سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی مدل قانون توان را در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز، بررسی نمودند.

علی (Ali, 2002) یک مطالعه بر روی انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از CFD در چاه‌های افقی و قائم انجام داد. برای تعیین تاثیر وزن گل، اندازه ذرات، سرعت حفاری و گرانیروی بر روی انتقال خرده‌های حفاری هم در مقاطع افقی و هم در مقاطع عمودی، مقطعی از فضای حلقوی لوله حفاری با استفاده از روش فاز گسسته در نرم افزار فلونت شبیه‌سازی شد. داده‌های جمع آوری شده به شکل گرافیکی، سرعت فضای حلقوی را با انتقال خرده‌های حفاری مربوط می‌سازد، که می‌تواند به عنوان معیاری برای کارایی انتقال مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهند که برای سیال حفاری یکسان، چاه افقی دارای تمیزکاری بهتر نسبت به چاه قائم می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر سیال در خارج‌سازی خرده‌های حفاری نه تنها وابسته به رئولوژی سیال است بلکه به نوع رژیم سیال یعنی آرام یا متلاطم بودن آن هم بستگی دارد. برای اندازه ذرات $0/1$ تا $0/275$ اینچ، کارایی تمیزکاری تا حدودی وابسته به اندازه ذرات می‌باشد و خارج‌سازی خرده‌های ریزتر راحت‌تر می‌باشد.

لی (Li, 2004) و لی و کورو (Li and Kuru, 2003, 2005) به صورت عددی انتقال خرده‌ها با کف را در چاه‌های افقی و عمودی به صورت مدل دولایه بررسی نمود و کارایی انتقال خرده‌ها را در این موقعیت پیش‌بینی نمود. آنها تاثیر شار جریان از مخزن را نیز در معادلات در نظر گرفتند. مدل آنها در توسعه مفاهیم جدید بهینه‌سازی هیدرولیکی، برای کاربردهای صحرائی می‌تواند استفاده گردد. پیشنهادات ارائه شده آنها برای کارهای آتی، در نظر گرفتن مدل رئولوژیکی قانون توان تسلیمی در شبیه‌سازی‌ها، مدل‌سازی انتقال خرده‌ها با کف در چاه‌های شیب‌دار، تحقیق در مورد شرایط مرزی مختلف بر روی انتقال خرده‌ها و هیدرولیک حفاری را شامل می‌شوند.

ژائو (Zhou, 2006) به صورت تئوری و آزمایشگاهی جریان آرام و متلاطم پنج نوع سیال قانون توان را در لوله مارپیچی¹ بررسی نمود و رابطه عامل اصطکاک جدید از جریان آرام در لوله مارپیچی توسعه داد. نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلونت برای شبیه‌سازی جریان آرام و متلاطم نیوتنی و جریان آرام غیرنیوتنی در لوله مارپیچی $2/8-3/8$ اینچ استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی خواص اساسی

1- Coiled Tubing

از جریان سیال در لوله‌های مارپیچی، از جمله تاثیر جریان ثانویه و تغییر مکان ناحیه سرعت بالا به سمت دیواره خارجی لوله را نشان می‌دهد.

سان (Sun, 2007) شسته‌شدگی ماسه را در چاه‌های قائم، شیب‌دار و افقی مطالعه نمود. روش فاز گسسته در نرم افزار فلونتت برای شبیه‌سازی قابلیت حمل ماسه توسط سیال کف مورد استفاده قرار گرفت و روابط سرعت حمل ماسه و زمان ته‌نشینی از سیال کف با لوله حلقوی شیب‌دار و سرعت سیال مورد تحقیق قرار گرفت.

پیرا و همکاران (Pereira et al., 2007) مطالعه‌ای بر روی پیش‌بینی‌های CFD سرعت سیال حفاری و پروفیل‌های فشار در جریان مارپیچی آرام با استفاده از مدل سه پارامتری کراس (Cross, 1965) توسط نرم افزار فلونتت انجام دادند. آن‌ها جریان سیالات غیرنیوتنی از میان فضای حلقوی افقی تشکیل شده از دو لوله در حالت‌های هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز را مطالعه نمودند. نتایج به دست آمده از CFD با نتایج مطالعات قبلی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها، مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج شبیه‌سازی پروفیل سرعت برای جریان مارپیچی با داده‌های آزمایشگاهی اسکودیر و همکاران (Escudier et al., 2002) برای موارد فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز تطابق بسیار خوبی را نشان داد.

در کار بیلگس و همکاران (Bilgesu et al., 2007) مقطعی از فضای حلقوی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل فاز پیوسته (Eulerian) برای تعیین تاثیرات پارامترهای مختلف از قبیل سرعت سیال، اندازه خرده‌های حفاری، سرعت حفاری، چرخش لوله حفاری و زاویه شیب بر روی تمیزکاری چاه در چاه‌های شیب‌دار با استفاده از نرم افزار فلونتت شبیه‌سازی گردید. شبیه‌سازی‌ها در حالت پایدار انجام شدند و نتایج برای غلظت حداکثر خرده‌های حفاری در فضای حلقوی تحلیل گردیدند. کار آزمایشگاهی ژائو (Zhou, 2004) برای تایید مدل CFD استفاده شد. مدل ژائو یک مقطع حلقوی ۷۵ فوتی با قطر لوله داخلی ۳/۵ اینچ و قطر لوله جداری ۶ اینچ برای انتقال خرده‌های حفاری با سیالات مختلف می‌باشد. اندازه متوسط ذرات ۳ میلی‌متر با سرعت ثابت ۵۰ ft/h، تزریق شدند.

مقادیر پیش‌بینی شده افت فشار در تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی بودند. نتایجی که از شبیه‌سازی‌های بیلگس و همکاران حاصل شد به قرار زیر می‌باشد:

- ۱- تمیزکاری چاه برای ذرات بزرگتر نسبت به ذرات کوچک‌تر با توجه به بیشتر بودن نیروی پسا از نیروی گرانی برای ذرات بزرگتر، موثرتر است.
- ۲- افزایش سرعت جریان برای ذرات ریزتر نسبت به ذرات بزرگتر در چاه افقی، موثرتر است.
- ۳- چرخش لوله تمیزکاری چاه را بهبود می‌بخشد ولی در مورد ذرات ریزتر مشهودتر است.
- ۴- شیب چاه تاثیر بسزایی در انتقال خرده‌های حفاری دارد و با افزایش شیب، تمیزکاری چاه مشکل‌تر می‌شود.

یائو و روبلو (Yao and Robello, 2008)، نتایج مدل CFD خودشان را برای پیش‌بینی افت فشار اصطکاکی در فضای حلقوی برای اجزاء مختلف دخیل در حفاری منتشر نمودند. با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی CFD، آن‌ها معادلاتی را توسعه دادند که افت فشار را در وسایل مختلف از قبیل تثبیت‌کننده‌ها و دیگر وسایل تمیزکننده چاه محاسبه می‌کند.

اوسوند و کورو (Osunde and Kuru, 2008) مدلی دو لایه مکانیکی گذرای یک بعدی، برای مطالعه عددی انتقال خرده‌های حفاری توسط کف در چاه‌های شیب‌دار توسعه دادند. فرضیات مدل موارد زیر را شامل می‌شود: ۱- کف به عنوان سیال غیرنیوتنی با مدل رئولوژیکی قانون توان در نظر گرفته می‌شود، ۲- خرده‌های حفاری کروی با اندازه و شکل یکسان در نظر گرفته می‌شوند، ۳- سیالات ورودی از مخزن با کف به طور کامل مخلوط می‌شوند، ۴- سیالات ورودی از مخزن، حداقل سرعت جریان را تسریع می‌کنند و ۵- بین کف و خرده‌های حفاری لغزش وجود دارد. این مدل به صورت عددی برای پیش‌بینی سرعت بهینه جریان کف (سرعت گاز و مایع) و خواص رئولوژیکی برای حداکثر نمودن کارایی انتقال در چاه‌های شیب‌دار استفاده گردید. در این مطالعه، یک آنالیز حساسیت کلی از تاثیر سرعت‌های گاز و مایع، سرعت حفاری، خواص رئولوژیکی کف، هندسه چاه، شیب چاه و شارش جریان گاز و مایع وارد شده از مخزن، بر روی انتقال خرده‌های حفاری صورت گرفت. کارایی انتقال

خرده‌های حفاری با افزایش شیب چاه نسبت به حالت قائم، در شرایط جریانی یکسان، کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت تزریق گاز، کارایی انتقال خرده‌های حفاری بالا می‌رود. شارش جریان گاز مخزن به داخل چاه، دارای تاثیر مثبت بر فرآیند انتقال و شارش آب دارای تاثیر منفی می‌باشد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به پایداری فشار ته چاه، با افزایش سرعت حفاری و شیب چاه، افزایش می‌یابد. مشخص شد که توزیع خرده‌های حفاری در طول فضای حلقوی حتی در شرایط پایدار نیز یکنواخت نیست. بیشترین غلظت خرده‌های حفاری همیشه در قسمت پایین و کمترین غلظت در قسمت بالا می‌باشد.

بر اساس مطالعه چنگ و وانگ (Cheng and Wang, 2008) بیشتر کارهای منتشر شده، انتقال خرده‌های حفاری در شیب‌های مختلف چاه را با مدل‌های ساده‌سازی شده توصیف می‌کنند. برای مثال مدل مکانیکی دو لایه ایجاد شده توسط مارتینز و همکاران (Martins et al., 1999)، دوان (Doan, 2003) و لی و کرو (Li and Kuru, 2003)، نمی‌تواند ماهیت انتقال خرده‌های حفاری در زوایای شیب نسبتاً زیاد را هنگامی که لایه متحرک و لایه ساکن همزمان وجود دارند، توصیف کند. مدل سه لایه مکانیکی ارائه شده توسط نگوین و رحمان (Nguyen and Rahman, 1998)، چو و شاه (Cho and Shah, 2000) و اوزبای اوقلو و همکاران (Ozbayoglu et al., 2005) در زوایای شیب متوسط کارایی لازم را ندارد. آن‌ها متذکر شدند که تحقیقات انجام شده، بیشتر بر روی مکانیسم‌ها و آزمایشات جریان دو فازی متمرکز شده (Wang and Zhang, 2004) و کمتر به جریان سه فازی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز پرداخته شده است. بنابر این چنگ و وانگ (Cheng and Wang, 2008) با استفاده از تحلیل مکانیکی، مدلی هیدرولیکی پیشرفته برای انتقال خرده‌های حفاری با کف در حفاری افقی ارائه دادند. بر اساس دو زاویه شیب بحرانی، کل چاه به سه قطعه (افقی، شیب‌دار، قائم) تقسیم گردید. مدل رئولوژیکی قانون توان و سرعت ته‌نشینی اصلاح شده ذرات در سیال کف، برای بهبود صحت نتایج شبیه‌سازی، در مدل در نظر گرفته شدند. مدل ارائه شده می‌تواند برای پیش‌بینی دقیق ماهیت انتقال خرده‌های حفاری در تمام محدوده زاویه شیب چاه استفاده گردد. کارایی مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات قبلی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج

شبیه‌سازی توسط روش تکرار پیشرو و سعی و خطا، در تطابق خوب با داده‌های صحرایی حفاری افقی مورد مطالعاتی است و مقایسه بین داده‌های پیش‌بینی توسط مدل و داده‌های آزمایشگاهی کاپو و همکاران (Capo et al., 2006) تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان دو فاز مایع - جامد در فضای حلقوی چاه‌های توسعه‌ای استفاده نمودند و شرایط مختلف چرخش لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که جریان شبه مارپیچی، الگوی اصلی جریان برای انتقال جامد - مایع در فضای حلقوی افقی است. تاثیر چرخش بر روی انتقال خرده‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفت که با افزایش چرخش لوله، اختلال جامد-مایع در فضای حلقوی افزایش می‌یابد. در نتیجه، جریان جامدات بهبود یافته و حجم جامد کاهش می‌یابد. نتایج برای تایید تاثیر چرخش لوله با مطالعات قبلی نیز مورد مقایسه قرار گرفت. در این مطالعه عوامل کلیدی برای تمیزکاری چاه مورد مطالعه قرار گرفتند. این عوامل سرعت جریان، چرخش لوله حفاری، پارامترهای رئولوژیکی و هیدرولیکی را شامل می‌شوند. در این مطالعه یک فرمول تجربی برای پیش‌بینی ارتفاع لایه ارائه گردید و نتایج مدل، با نتایج مدل‌سازی‌های قبلی و داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت.

کوی و همکاران (Cui et al., 2009) با در نظر گرفتن معادلات حاکم برای جریان یک سیال قانون توان در فضای حلقوی با چرخش سیلندر داخلی با استفاده از روش ضریب نامعین، تغییرات فشار را برای یک نرخ جریان مشخص و روش محاسبات عددی بدست آوردند. با استفاده از آزمایشات بر روی جریان محلول آبی هیدرولیز شده پلی آکریل آمید (HPAM) که به عنوان سیال قانون توان در نظر گرفته شده است، نتایج تغییرات فشار محاسباتی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند و خطای نسبی میانگین بین آن‌ها کمتر از ۵٪ است که نتایج پیش‌بینی شده آن‌ها را تایید می‌کند.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2009a) با در نظر گرفتن انتقال جرم و شارش جریان از مخزن، مدلی هیدرولیکی دو لایه یک بعدی برای توصیف مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری توسط کف در چاه افقی تشکیل دادند. شبیه‌سازی عددی معادلات اندازه حرکت و پیوستگی توسط الگوریتم اصلاح

شده SIMPLE¹ با در نظر گرفتن شرایط مرزی انجام پذیرفت و ارتفاع بستر خرده‌های حفاری با استفاده از یک روش سعی و خطا محاسبه گردید. آنالیز حساسیت روی عوامل تاثیرگذار بر روی کارایی انتقال خرده‌های حفاری انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که بستر خرده‌های حفاری در امتداد افقی چاه از سمت منته حفاری حرکت می‌کند و در نهایت، به یک حالت پایدار با تعادل دینامیکی می‌رسد. ارتفاع بدون بعد لایه خرده‌های حفاری با افزایش کیفیت کف و سرعت جریان، کاهش می‌یابد و با افزایش عدم هم‌مرکزی، سرعت حفاری و اندازه خرده‌های حفاری افزایش می‌یابد. جریان آب و گاز از مخزن به داخل چاه به کارایی کف در انتقال خرده‌های حفاری کمک می‌کند. مدل ارائه شده خط و مشی‌هایی برای کنترل تمیزکاری چاه در حفاری افقی با کف ارائه می‌دهد.

در مطالعه اوگوگبو (Ogugbue, 2009) جریان حلقوی سیالات غیرنیوتنی با استفاده از چهار غلظت مختلف از سیال پلیمری که در میدان نفتی استفاده شده و نسبت‌های قطری و عدم هم‌مرکزی‌های مختلف فضای حلقوی مورد تحقیق قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی این مطالعه با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت توسعه یافته توسط ANSYS انجام پذیرفت.

هان و همکاران (Han et al., 2010)، انتقال هیدرودینامیکی ترکیب جامد-مایع در فضای حلقوی چاه‌های باریک قائم و شیب‌دار با چرخش سیلندر درونی را به صورت آزمایشگاهی و CFD مورد مطالعه قرار دادند. تاثیر شیب فضای حلقوی و چرخش لوله حفاری روی ظرفیت حمل سیال حفاری، سرعت صعود ذره و افت فشار در یک فضای حلقوی باریک برای جریان‌های کاملاً توسعه یافته از آب و محلول‌های آبی کربوکسیل متیل سلولز سدیم (CMC²) و بنتونیت بررسی گردید. محاسبات عددی برای محلول CMC ۰/۴ درصد به عنوان سیال حمل کننده انجام شد که تطابق خوبی بین نتایج با نتایج آزمایشگاهی برای افت فشار بود ولی نتایج عددی به مقدار جزئی کمتر از داده‌های آزمایشگاهی بود. با توجه به محاسبات عددی، اغلب ذرات در قسمت پایین فضای حلقوی ته نشست می‌کند و به مقدار کمی به صورت معلق در قسمت بالای فضای حلقوی می‌باشند. با افزایش شیب چاه از حالت

1 - Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

2 - sodiumcarboxymethylcellulose

قائم، درصد حجمی ماسه افزایش می‌یابد. قابلیت انتقال محلول ۰.۵٪ بنتونیت از محلول ۰/۴ درصد CMC بیشتر است. تفاوت محسوس در گرانروی دو سیال وجود ندارد، اما وزن مخصوص محلول ۰.۵٪ بنتونیت از محلول ۰/۴ درصد CMC بیشتر است. بنابر این، دو عامل گرانروی و دانسیته سیالات در طراحی سیال حفاری دارای اهمیت می‌باشند. افت فشار در جریان ترکیبی جامد-مایع با افزایش سرعت جریان، شیب فضای حلقوی و چرخش سلیندر داخلی، افزایش می‌یابد. افت فشار سیال ترکیبی جامد-مایع نسبت به سیال تک فاز با توجه به اصطکاک بین جامدات و دیواره و خود جامدات، بیشتر می‌باشد. چرخش سلیندر داخلی به طور چشم‌گیری کارایی انتقال ذرات را مخصوصاً در حالت فضای حلقوی غیر هم‌مرکز افزایش می‌دهد که بیشتر در سرعت‌های پایین سیال مشهود است و به نظر می‌رسد در سرعت‌های بالای جریان، ضعیف باشد. تاثیر چرخش سلیندر داخلی بر روی افت فشار در سیال آب بیشتر است و در محلول‌های ۰.۵٪ بنتونیت و ۰/۴ درصد CMC ضعیف است. دلیل آن، این است که مقاومت در مقابل جریان سیال برشی-نازک شونده^۱ با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد.

پیرا و همکاران (Pereira et al., 2010)، با استفاده از نرم افزار فلونت به بررسی جریان سیال غیرنیوتنی مدل هرشل بالکلی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز پرداختند و تاثیر پارامترهای سرعت سیال و چرخش لوله را بر روی افت فشار برای پنج نوع سیال بررسی نمودند.

گیو و همکاران (Guo et al., 2010) مدلی سه لایه حالت ناپایدار انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های توسعه‌ای، بر اساس مدل سه لایه حالت پایدار مقطع شیب‌دار و مدل دو لایه حالت ناپایدار توسعه دادند. مکانیسم‌های غلطش، چرخش و لغزش خرده‌های حفاری، سرعت نسبی بین جامد و مایع در لایه معلق و تاثیر چرخش لوله در کار آن‌ها در نظر گرفته شد. آن‌ها چهار معادله پیوستگی و چهار معادله ممنتوم برای مدل ناپایدار سه لایه (لایه یکنواخت، لایه پراکنده و لایه معلق) تشکیل دادند. مدل رئولوژیکی استفاده شده در این مطالعه، مدل قانون توان بود. فرضیات آن‌ها برای ساده‌سازی مسئله شامل موارد زیر است: ۱- فازهای جامد و مایع غیر قابل تراکم هستند و لغزش بین

1 - Shear-thinning

فازهای جامد و مایع بجز در لایه معلق، در نظر گرفته نمی‌شوند ۲- خواص فیزیکی سیالات حفاری و خرده‌های حفاری ثابت می‌باشند و مدل رئولوژیکی در نظر گرفته شده مدل قانون توان است ۳- غلظت خرده‌های حفاری در لایه معلق نسبتاً پایین است و بر اساس قوانین نفوذ می‌باشد ۴- غلظت حجمی خرده‌های حفاری در لایه یکنواخت برابر با ۵۵٪ و غلظت حجمی خرده‌های حفاری در لایه پراکنده ۸/۰ لایه یکنواخت است. مدل می‌تواند برای محاسبه و شبیه‌سازی همه مقاطع (عمودی، شیب‌دار و افقی) و فرآیندها در حفاری واقعی و شرایط شستگی چاه استفاده گردد.

الکایم و همکاران (Al-Kayiem et al., 2010) توسط CFD، انتقال خرده‌های حفاری را در فضای حلقوی شیب‌دار با شیب ۳۰ درجه توسط سیال اگزانتان گوام با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها مدل رئولوژیکی قانون توان را در مدل‌سازی‌ها استفاده نمودند. آن‌ها مشاهده نمودند که برای تمیزکاری کافی چاه باید سرعت جریان گل در این شیب بیشتر از ۸۰۰ گالن بر دقیقه باشد. همچنین مشاهده شد که اندازه خرده‌های حفاری تاثیر بسزایی بر روی انتقال خرده‌های حفاری دارد و خرده‌های حفاری ریزتر راحت‌تر حمل می‌شوند.

گوماتی و تاکاشی (Gumati and Takahshi, 2011) به صورت آزمایشگاهی و مدل عددی یک بعدی بر روی افت فشار جریان کف و جریان کف- خرده‌ها در لوله افقی با در نظر گرفتن کیفیت‌های مختلف کف، تحقیق نمودند. آن‌ها سیال کف را به عنوان سیال قانون توان در نظر گرفتند.

ژونگو و همکاران (Zhonghou et al., 2011) با استفاده از CFD، قابلیت انتقال خرده‌های حفاری را توسط دی اکسید کربن فوق بحرانی (SC-CO₂) شبیه‌سازی کردند. مشخص شد که با افزایش دانسیته و گرانی سیال، قابلیت انتقال خرده‌ها افزایش می‌یابد.

قاسمی کفرودی در سال ۱۳۹۱، شبیه‌سازی انتقال خرده‌های حفاری را توسط گل‌های حفاری غیرنیوتنی معمولی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در حالت فضای حلقوی قائم انجام داد و نتایج افت فشار عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود.

حاجی دولو و همکاران (Hajidavalloo et al., 2013) با استفاده از CFD، جریان دو فازی گاز-جامد را در فضای حلقوی چاه قائم با استفاده از نرم افزار فلونت بررسی نمودند. در این مطالعه اثر پارامترهای خرده‌های حفاری، چرخش لوله و عدم هم‌مرکزی لوله بر انتقال خرده‌ها بررسی گردید. ژائوفنگ و همکاران (Xiaofeng et al., 2013) مروری بر مطالعات انجام شده بر تمیزکاری چاه به روش‌های آزمایشگاهی، تئوری و عددی پرداختند.

در این فصل مروری بر کارهای انجام شده در زمینه انتقال خرده‌های حفاری در چاه‌های شیبدار توسط روش‌های آزمایشگاهی و عددی انجام گرفت. کارهای مربوط به انتقال خرده‌های حفاری از سال ۱۹۴۰ به بعد آغاز شده است که بیشتر مطالعات بر روی انتقال خرده‌های حفاری، مطالعات آزمایشگاهی توسط سیالات حفاری معمولی در چاه‌های قائم بوده است. از سال ۱۹۸۰ به بعد مطالعات آزمایشگاهی به سمت چاه‌های شیبدار و افقی با استفاده از سیالات حفاری معمولی پیش رفته است. از اوایل ۱۹۹۰ مدل‌های تجربی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی توسعه پیدا نمودند. مطالعات مربوط به حفاری UBD با استفاده از هوا از اواخر ۱۹۵۰ و برای سیالات هوازده از اواسط ۱۹۹۰ در حفاری چاه‌های قائم شروع شده است. مطالعات مربوط مشخصات جریانی کف توسط محققین مختلف از سال ۱۹۶۵ به بعد آغاز شده و مدل‌های غیرنیوتنی مختلف برای سیال کف بکار برده شده است. در مورد انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف، مطالعات از سال ۱۹۷۲ در چاه‌های قائم شروع شده است و مطالعات مربوط به چاه‌های افقی و شیبدار از سال ۲۰۰۰ به بعد می‌باشند. مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها از سال ۲۰۰۰ به بعد شروع شده است. در جدول ۱-۲ به صورت خلاصه مروری بر مهمترین کارهای انجام شده انتقال خرده‌ها توسط سیالات معمولی و سیال کف با روش‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۲-۱: مروری بر مهمترین کارهای انجام شده انتقال خرده‌های حفاری

منبع	آزمایشگاهی (E) - مکانیکی (M) - عددی (N)	قائم (V) - شیب‌دار (I) - افقی (H)	معمولی (C) - (U)UBD	نیوتنی (N) - غیر نیوتنی (NN)
Pigott, 1941	E	V	C	NN
Krug and Mitchell, 1972	E	V	(کف)U	NN(BP)
Tomren, 1979	E	I	C	NN
Okpobiri and Ikoku, 1986	E+M	V	(کف)U	NN(PL)
Vinod, 1994	N	I	C	NN(PL)
Guo et al., 1995	M	V	(کف)U	NN(PL)
Liu and Medley, 1996	M	V	(کف)U	NN(PL)
Larsen et al., 1997	E	I	C	NN
Hussain and Sharif, 2000	N	H	C	NN(YPL)
Saintpere et al., 2000	M	V	(کف)U	NN(YPL)
Martins et al., 2001	E+M	H	(کف)U	NN(PL)
Ozbayoglu, 2002	E+M	I	(کف)U	NN (PL, BP)
Ali, 2002	CFD	V+H	C	NN
Li, 2004	N	V+H+I	(کف)U	NN(PL)
Chen, 2005	E+M	H	(کف)U	NN (PL)
Capo et al., 2006	E	I	(کف)U	NN(PL)
Duan, 2007	E+M	H	(کف)U	NN(PL)
Bilgesu et al., 2007	CFD	I	U (TP)	NN
Pereira et al., 2007	CFD	H	C	NN (Cross)
Sun, 2007	CFD	I	(کف)U	NN(PL)
Cheng and Wang, 2008	M	I	(کف)U	NN (PL)

Osunde and Kuru, 2008	N	I	U(کف)	NN(PL)
Ogugbue, 2009	E+CFD	H	C	NN(PL)
Wang et al., 2009	E+CFD	V	C	NN(PL)
Wang et al., 2009a	N	H	U(کف)	NN(PL)
Han et al., 2008 and 2010	E+CFD	I	C	NN(PL)
Al-Kayiem et al., 2010	CFD	I	C	NN(PL)
Kelessidis et al., 2011	E	H	C	NN(YPL)
Zhonghou et al., 2011	CFD	H	U(SC-CO2)	
Gumati and Takahshi, 2011	N	H	U(کف)	NN(PL)
Hajidavalloo et al., 2013	CFD	V	U(air)	N
Xiaofeng et al., 2013	review			

جمع‌بندی کارهای انجام شده نشان می‌دهد که از روش‌های هوشمند در زمینه انتقال خرده‌های حفاری چندان استفاده نشده است. همچنین مطالعات عددی مربوط به سیال کف به صورت تک بعدی بوده و مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها توسط سیال کف با در نظر گرفتن مدل رئولوژیکی و حالت سه بعدی جریان صورت نگرفته است. بر این اساس در این تحقیق این موضوع مورد بحث قرار خواهد گرفت.

فصل سوم: خواص سیال کف و تعیین
پارامترهای رئولوژیکی سیالات حفاری
غیرنیوتنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد سیال کف به عنوان یکی از گزینه‌های حفاری زیر تعادلی می‌باشد. این سیال معمولاً شامل ۵ تا ۲۵٪ فاز مایع و ۷۵ تا ۹۵٪ فاز گاز می‌باشد. فاز مایع می‌تواند آب خالص یا آب شور باشد. فاز گاز معمولاً یک گاز خنثی است. اغلب، یکسری مواد شیمیایی به عنوان کف‌ساز به سیستم اضافه می‌شوند که کمتر از ۵٪ کل سیستم سیال را شامل می‌شوند. وزن سیال می‌تواند توسط نمک‌ها یا باریت افزایش داده شود. سیال کف مانند خیلی از سیالات حفاری دیگر رفتار غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهد. این سیال دارای گرانروی بالا می‌باشد که گرانروی آن از هر دو فاز تشکیل دهنده کف یعنی آب و گاز بیشتر است که این خاصیت در انتقال بهتر خرده‌های حفاری موثر است. در این فصل به توضیح مهمترین خواص سیال کف پرداخته شده و خواص رئولوژیکی سیالات حفاری غیرنیوتنی با الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردند.

۳-۱-۳ خواص سیال کف

۳-۱-۱-۳ کیفیت کف^۱

کیفیت کف به صورت نسبت حجم گاز به حجم کل کف (مایع و گاز) تعریف می‌شود.

$$\Gamma = \frac{V_g}{V_g + V_l} \times 100 = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \times 100 \quad (1-3)$$

که در آن:

Q_g شدت جریان گاز (cfm)، Q_l شدت جریان مایع (cfm)، V_g حجم گاز و V_l حجم مایع می‌باشند. افزایش نرخ جریان گاز، کیفیت کف را افزایش می‌دهد و متعاقب آن گرانروی موثر کف افزایش و دانسیته کف کاهش می‌یابد. افزایش نرخ جریان مایع، باعث افزایش فشار ته چاهی و کاهش کیفیت کف می‌شود. کف‌های با کیفیت پایین به کف‌های خیس و کف‌های با کیفیت بالا به کف‌های خشک معروف هستند. محدوده مورد نظر گاز به مایع (آب) برابر با ۳ تا ۵۰ فوت مکعب بر گالن است (Shale, 1995, 1995, Zhu et al., 2004, Li). با توجه به حضور گاز در کف، کیفیت آن با عمق و فشار تغییر

1- Foam quality
2- Cubic feet per minute

می‌کند و با توجه به شرایط ته چاهی می‌تواند تنظیم شود. افزودنی‌های دیگر از قبیل بنتونیت و پلیمرها برای تغییر خواص کف، می‌تواند به آن اضافه گردد. قانون گاز واقعی را می‌توان برای تعیین حجم گاز در شرایط فشار و دمای مختلف استفاده کرد (Li, 2004):

$$\frac{V_{g1}}{V_{g0}} = \frac{Z_1}{Z_0} \cdot \frac{p_0}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (2-3)$$

برای تعیین نسبت دانسیته گاز در شرایط دما و فشار مختلف از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\rho_{g1}}{\rho_{g0}} = \frac{Z_0}{Z_1} \cdot \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad (3-3)$$

که در آن:

ρ دانسیته، p فشار، T دما و Z عامل انحراف گاز می‌باشد و از طریق نمودارهای خاصی بدست می‌آید. زیرنویس ۰ و ۱ نشان دهنده دو شرایط مختلف g و l نشان دهنده گاز و مایع هستند. در نتیجه با ترکیب معادلات ۱-۴ تا ۳-۴، کیفیت کف در شرایط دما و فشار مختلف به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{\Gamma_1} = 1 + \left(\frac{1 - \Gamma_0}{\Gamma_0} \right) \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_1} \cdot \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} \right) \quad (4-3)$$

۳-۱-۲ دانسیته و گرانی کف

تغییر در حجم گاز با توجه به دما و فشار باعث تغییر در دانسیته آن می‌شود. برای یک فشار و دمای خاص، کف به صورت یک سیال همگن در نظر گرفته می‌شود و دانسیته و گرانی آن به ترتیب با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho_f = \Gamma \rho_g + (1 - \Gamma) \rho_l \quad (5-3)$$

$$\mu_f = \Gamma \mu_g + (1 - \Gamma) \mu_l \quad (6-3)$$

با در نظر گرفتن تاثیرات فشار و دما بر روی دانسیته و روابط (۴-۴) و (۵-۴)، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\rho_{f0}}{\rho_{f1}} = (1 - \Gamma_0) \cdot \Gamma_0 \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_0} \cdot \frac{p_0}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_0} \right) \quad (7-3)$$

۳-۱-۳ رئولوژی کف

همان طور که قبلاً در فصل دوم اشاره شد رئولوژی و رفتار جریان کف توسط محققین مختلفی مطالعه شده است. کیفیت کف و گرانیوی فاز مایع، پارامترهای تاثیرگذار در رئولوژی کف هستند. گرانیوی کف به طور قابل توجهی به کیفیت کف بستگی دارد.

خواص رئولوژیکی سیالات حفاری از جمله سیال کف تاثیر مستقیمی در مشخصات جریان، محاسبات هیدرولیکی، بازدهی تمیزی چاه، پیش‌بینی پروفیل‌های سرعت، افت‌های اصطکاکی فشار سیال، دانسیته معادل جریان (ECD) دارد. تعیین پارامترهای رئولوژیکی از روی داده‌های تنش برشی- کرنش برشی مربوط به اندازه‌گیری‌های ویسکومتر و با استفاده از فرمول‌های ارائه شده توسط API و روش‌های آماری رگرسیون غیر خطی^۱ (NL) و روش Golden Section (GS) انجام می‌گیرد. مطالعات زیادی (Saintpere et al., 2000, Bonilla and Shah, 2000, Kelessidis et al, 2006, 2009, 2011, Ahmed et al., 2009) نشان داده‌اند که مدل سه پارامتری هرشل- بالکلی به خوبی رئولوژی خیلی از سیالات غیرنیوتنی حفاری از جمله سیالات حاوی بنتونیت، سیال کف و ... را توصیف می‌کند. به خاطر پیچیده بودن تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل - بالکلی، این مدل تاکنون نسبت به سایر مدل‌های رئولوژیکی دیگر به طور گسترده استفاده نشده است. مدل هرشل- بالکلی همان‌طور که قبلاً هم در فصل دوم اشاره شد، دارای سه پارامتر رئولوژیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (8-3)$$

که در آن:

τ و τ_y به ترتیب تنش برشی و تنش تسلیم، K و n به ترتیب استحکام و شاخص رفتاری سیال و $\dot{\gamma}$ کرنش برشی می‌باشند. تنش تسلیم می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های ویسکومتری (API, 2009)

در صورت وجود تنش برشی در نرخ برش‌های پایین تعیین گردد که در فصل دوم اشاره گردید، همچنین روش رگرسیون غیرخطی و تکنیک‌های عددی (Khataniar et al., Hemphill et al., 1993)، 1994، (Turian et al., 1997) برای بدست آوردن این پارامترها استفاده می‌گردند. روش رگرسیون غیرخطی، در بعضی مواقع داده‌های تنش تسلیم منفی ارائه می‌دهد که از نظر فیزیکی بی معنی می‌باشد. کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al., 2006) از روش Golden Section برای بدست آوردن پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی سیال حفاری حاوی بنتونیت-لیگنیت و فائق آمدن بر مقادیر منفی تنش تسلیمی روش رگرسیون غیر خطی، استفاده نمودند که مقادیر تنش برشی بدست آمده با استفاده از این روش در تطابق خوبی با داده‌های ویسکومتری بودند. در مطالعه حاضر قابلیت بالای روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های آماری و روش Golden section استفاده شده در مطالعات قبلی (Kelessidis et al., 2006) برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی با استفاده از داده‌های تنش- کرنش کار کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al., 2006) تایید می‌شود و سپس از این روش برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی سیال کف استفاده می‌گردد. پارامترهای رئولوژیکی سیال کف حاصل از روش الگوریتم ژنتیک برای محاسبات عددی در فصل پنجم و ششم مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

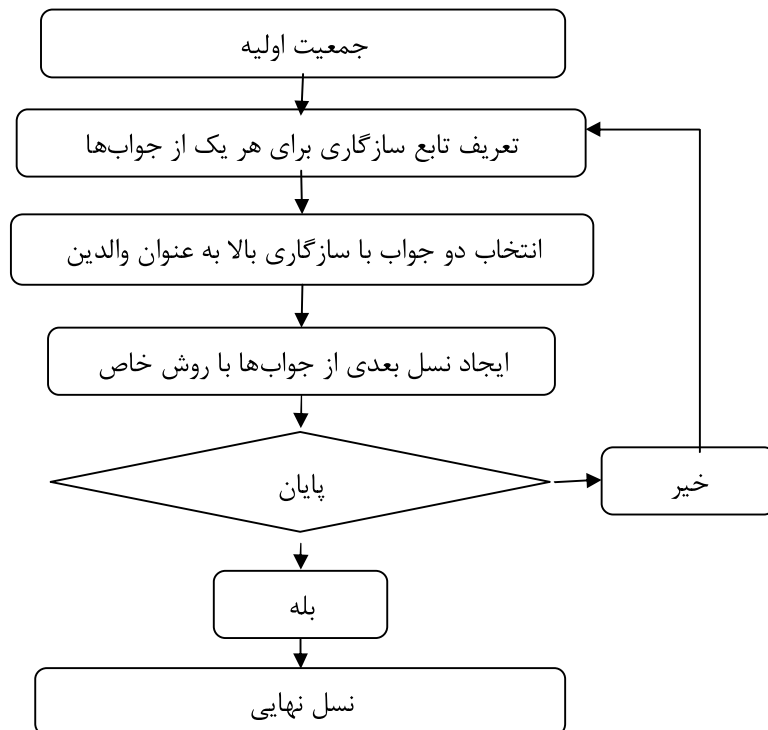
۲-۳ الگوریتم ژنتیک

یکی از زیر شاخه‌های محاسبات نرم^۱، الگوریتم ژنتیک است که تکامل طبیعی موجودات را الگو قرار می‌دهد. این روش تقلیدی از فرآیند تکامل با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری است. اساسی‌ترین اصل تکامل، وراثت است. هر نسل، خصوصیات نسل قبلی را به ارث می‌برد و به نسل بعد انتقال می‌دهد. با تقلید از فرآیند تکامل طبیعی با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری، محققین توانستند از توانایی بالای فرآیند تکامل در حل مسائل، الگوبرداری کنند. بهترین این روش‌ها، الگوریتم ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک، روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی است. الگوریتم ژنتیک ابتدا یک جمعیت

1- Soft computing

اولیه از جواب‌ها را به صورت تصادفی در نظر می‌گیرد و مرتباً جمعیت جواب‌ها را اصلاح می‌کند و در هر مرحله جواب‌های بهتری نسبت به مرحله قبل حاصل می‌گردد. با گذشت نسل‌های متمادی، جمعیت جواب‌ها به سمت یک جواب بهینه میل می‌کند. این روش اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط هلند (Holland, 1975) از دانشگاه میشیگان در بهینه سازی مهندسی مطرح شد. الگوریتم ژنتیک در حالت کلی از ساختار زیر پیروی می‌کند (Man et al., 1996, Michalewicz, 1996).

- ۱- یک جمعیت اولیه^۱ از جواب‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.
- ۲- برای هر یک از جواب‌ها، یک تابع سازگاری^۲ تعریف می‌شود و با توجه به تابع هدف دو جواب با سازگاری بالا به عنوان والدین انتخاب می‌شوند.
- ۳- نسل بعدی از جواب‌ها با روش‌های خاص پدید می‌آید مادامی که جواب‌ها، به یک جواب بهینه همگرا نشود این فرآیند ادامه پیدا می‌کند (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: فرآیند الگوریتم ژنتیک

1- Initial population
2- Fitness function

۳-۳ تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی سیالات حفاری غیرنیوتنی با

استفاده از الگوریتم ژنتیک

برای تایید و برتری روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های آماری برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی (معادله ۳-۸)، داده‌های آزمایشگاهی تنش برشی- کرنش برشی مطالعه کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al., 2006) که توسط ویسکومتر دوار اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده شد. برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از جعبه ابزار^۱ نرم افزار مطلب استفاده گردید. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک، باید تابع هدف و محدودیت‌های مساله مشخص شوند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده شامل $\tau_y \geq 0$ ، $K > 0$ و $1 > n > 0$ ، و تابع هدف استفاده شده، مجموع مربعات خطاها است که به صورت معادله (۳-۹) تعریف می‌شود. دو پارامتر آماری مجموع مربعات خطاها^۲ و ضریب همبستگی^۳ برای ارزیابی این روش نسبت به روش‌های دیگر استفاده گردید که این دو پارامتر به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$SSE = \sum_1^N (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2 \quad (۳-۹)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2}{\sum_1^N \tau_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^m \hat{\tau}_i^2}{N}} \quad (۳-۱۰)$$

که در این روابط، τ_i تنش برشی اندازه‌گیری شده ویسکومتر و $\hat{\tau}_i$ مقدار تخمینی حاصل از معادله

(۳-۸) با استفاده از پارامترهای رئولوژیکی حاصل از الگوریتم ژنتیک، و N تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج حاصل از روش‌های الگوریتم ژنتیک (GA) و نتایج دو روش رگرسیون غیر خطی (NL) و

روش Golden Section (GS) استفاده شده در مطالعه کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al.,

2006) در جداول ۳-۱ و ۳-۲ برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. تنش برشی حاصل از الگوریتم

1- Toolbox

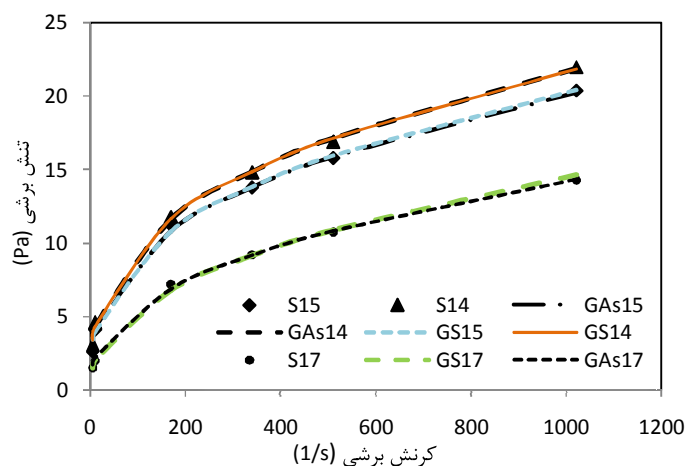
2- Sum Square error (SSE)

3- Correlation coefficient (R)

ژنتیک و روش Golden Section، برای نمونه‌هایی که روش رگرسیون غیر خطی دارای تنش تسلیم منفی است (جدول‌های ۱-۳ و الف-۱)، در شکل‌های ۲-۳ و پیوست الف (شکل الف-۱) در مقابل مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. مقایسه بین نتایج الگوریتم ژنتیک و روش رگرسیون غیرخطی برای نمونه‌هایی که هر سه روش دارای تنش تسلیم مثبت می‌باشند (جدول ۲-۳)، در شکل‌های الف-۲ و الف-۳ ارائه شده است. خطای حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که در روش رگرسیون غیرخطی تنش تسلیم منفی دارد در شکل الف-۴ و برای نمونه‌هایی که هر سه روش دارای تنش تسلیم مثبت هستند در شکل الف-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۳: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت-لیگنت

نمونه و روش	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	τ_y (Pa)	SSE (Pa ²)	R ²
S14					
NL	۱/۹۵۸۰	۰/۳۴۸۸	-۰/۰۹۳۲	۰/۲۵۹۵	۰/۹۹۹۰
GS	۱/۹۰۵۰	۰/۳۵۲۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۲۶۰۸	۰/۹۹۹۰
GA	۱/۸۷۶۰	۰/۳۵۴۲	۰/۰۵۶۱	۰/۲۶۲۹	۰/۹۹۹۰
S15					
NL	۲/۳۹۹۰	۰/۳۱۵۸	-۱/۱۶۵۰	۰/۲۸۵۰	۰/۹۹۸۸
GS	۱/۵۵۵۷	۰/۳۵۴۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۸۴۱۰	۰/۹۹۸۱
GA	۱/۷۷۷۰	۰/۳۵۱۱	۰/۰۰۶۶۶	۰/۵۰۹۲	۰/۹۹۸۲
S17					
NL	۱/۱۴۰۱	۰/۳۷۰۴	-۰/۶۲۱۳	۰/۰۷۳۹	۰/۹۹۹۴
GS	۰/۷۴۸۶	۰/۴۲۹۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۳۷۷	۰/۹۹۷۳
GA	۰/۸۴۳۲	۰/۴۰۹۱	۰/۰۰۴۰۴	۰/۱۶۳۵	۰/۹۹۸۰



شکل ۲-۳: مقایسه داده‌های ویسکومتری و دو روش GS و GA برای بنتونیت-لیگنت (نمونه‌های S14، S15 و S17)

جدول ۳-۲: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت-لیگنیت

R ²	SSE (Pa ²)	τ_y (Pa)	n (-)	K (Pa.s ⁿ)	نمونه و روش
					S7
۰/۹۹۷۵	۰/۹۱۸۸	۲/۴۰۹۵	۰/۷۰۱۲	۰/۱۲۵۱	NL
۰/۹۹۹۱	۱/۳۱۲۴	۲/۴۱۴۱	۰/۶۸۴۲	۰/۱۳۶۹	GS
۰/۹۹۹۷	۰/۹۸۲۸	۲/۲۲۲۲	۰/۶۸۳۷	۰/۱۴۲۷	GA
					S8
۰/۹۹۶۵	۰/۵۶۷۱	۱/۱۸۴۳	۰/۶۴۳۶	۰/۱۲۶۵	NL
۰/۹۹۶۷	۰/۶۰۱۳	۱/۳۰۱۲	۰/۶۶۸	۰/۱۰۵۸	GS
۰/۹۹۹۶	۰/۵۷۰۲	۱/۱۸۴۸	۰/۶۴۰۳	۰/۱۲۸۹	GA
					S9
۰/۹۹۶۶	۳/۳۲۰۹	۳/۴۷۰۱	۰/۸۰۴۵	۰/۰۳۱۳	NL
۰/۹۸۱	۴/۸۲۸۴	۲/۸۹۷۳	۰/۵۶۶۱	۰/۱۵۶۶	GS
۰/۹۶۵۱	۳/۴۶۶۸	۳/۳۸۵۶	۰/۷۲۹۵	۰/۰۵۲	GA
					S10
۰/۹۹۸۳	۰/۰۳۹۵	۰/۳۷۹۳	۰/۶۱۹۶	۰/۰۵۶۷	NL
۰/۹۹۶۱	۰/۰۶۷۱	۰/۲۸۴۷	۰/۵۶۲۵	۰/۰۸۳۹	GS
۰/۹۹۹۸	۰/۰۳۹۷	۰/۳۶۸۷	۰/۶۱۶۲	۰/۰۵۸۲	GA
					S13
۰/۹۹۷۱	۱/۰۸۴۷	۱/۷۰۲	۰/۴۳۵۲	۱/۲۰۶۳	NL
۰/۹۹۵۲	۱/۸۱۰۵	.	۰/۳۷۰۴	۱/۹۹۴	GS
۰/۹۹۷۲	۱/۰۸۵	۱/۷۳۵۸	۰/۴۳۶۵	۱/۱۹۴۶	GA
					S16
۰/۹۹۹۹	۰/۱۵۶۳	۰/۱۷۴۷	۰/۴۰۹۷	۰/۹۴۴۸	NL
۰/۹۹۹۵	۰/۱۶۳۶	۰/۰۳۷۹	۰/۳۹۹۳	۱/۰۲	GS
۰/۹۹۹۹	۰/۱۵۶۳	۰/۱۷۵۹	۰/۴۰۹۷	۰/۹۴۴۶	GA
					S18
۰/۹۹۸۲	۰/۷۳۷۵	۲/۶۷۵	۰/۶۶۰۷	۰/۲۴۹۲	NL
۰/۹۹۹۵	۵/۱۲۴۴	۱/۶۸۱۳	۰/۵۱۷۳	۰/۶۴۹۶	GS
۰/۹۹۹۸	۰/۷۹۰۱	۲/۴۵۱۴	۰/۶۴۶۲	۰/۲۷۷۲	GA

در جدول‌های ۱-۳ و ۲-۳، S: نمونه، NL: رگرسیون غیرخطی، GS: روش Golden Section، GA: الگوریتم ژنتیک می‌باشند. در جداول فوق نتایج حاصل از دو روش NL و GS از مطالعه کلیسیدیس و همکاران (Kelessidis et al., 2006) گرفته شده است.

با توجه به نتایج حاصل در جداول ۱-۳ و ۲-۳، روش GA نسبت به دو روش NL و GS در تخمین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی، بهتر عمل می‌نماید. این روش ضعف روش NL در تولید

مقادیر منفی تنش تسلیم را برطرف می‌سازد و نسبت به روش GS دارای خطای کمتری در تخمین پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی می‌باشد. در نتیجه این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار مطمئن در تخمین پارامترهای رئولوژیکی سیالات غیرنیوتنی بکار رود. در قسمت بعدی پارامترهای سیال غیرنیوتنی کف با این روش محاسبه می‌شوند.

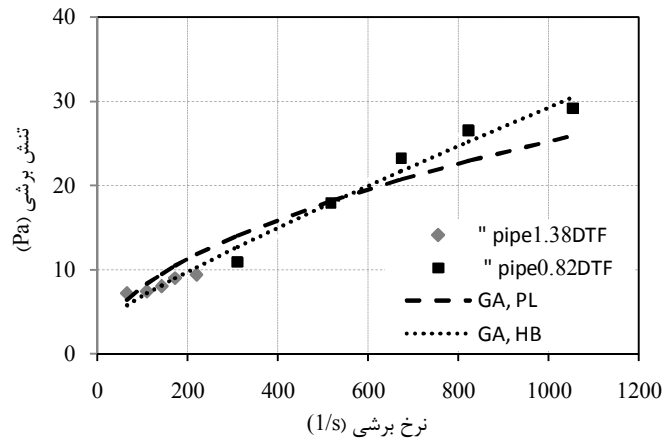
۳-۴ تعیین پارامترهای رئولوژیکی سیال کف با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این قسمت برای استخراج پارامترهای رئولوژیکی کف از داده‌های آزمایشگاهی تنش برشی- کرنش برشی مطالعه دوان (Duan, 2007) استفاده گردید. در مطالعه آزمایشگاهی دوان، جریان سیال کف، رئولوژی و رفتار جریانی آن با کیفیت‌های مختلف در دستگاه آزمایشی دینامیکی (DTF)^۱ برای بررسی هیدرولیک جریان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رفتار رئولوژیکی کف در ویسکومتر تولید کف (FGV)^۲ برای بررسی تاثیر فشار محیط بر رئولوژی کف مطالعه گردیده و داده‌های تنش برشی- کرنش برشی اندازه‌گیری شده‌اند.

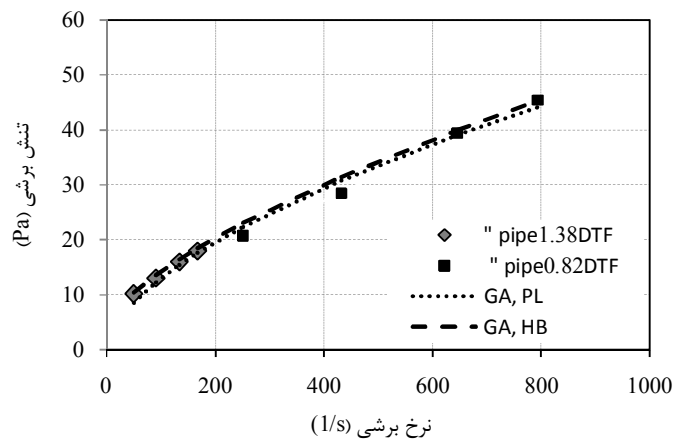
در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های تنش برشی- کرنش برشی آزمایشگاهی و روش الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی (HB) برازش شده به این داده‌ها بدست آورده شدند. شکل‌های ۳-۳ تا ۳-۵ داده‌های تنش برشی- کرنش برشی DTF برای دو لوله با قطر متفاوت (۱/۳۸ و ۰/۸۲ اینچ) و مدل‌های برازش شده بر آن‌ها توسط الگوریتم ژنتیک را به ترتیب برای کف با کیفیت‌های ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ در شرایط فشار ۲۵ psi نشان می‌دهند. مدل قانون توان (PL) زمانی است که تنش تسلیمی مدل HB برابر صفر باشد.

1- Dynamic Test Facility(DTF)

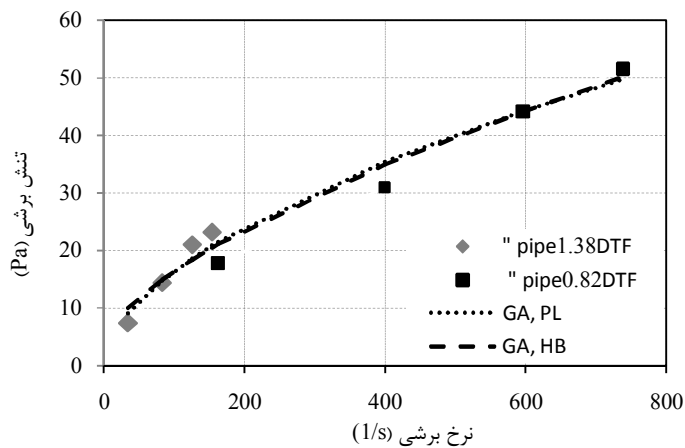
2- Foam generator viscometer(FGV)



شکل ۳-۳: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۷۰٪ (p=۲۵ psi)



شکل ۳-۴: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۸۰٪ (p=۲۵ psi)



شکل ۳-۵: مقایسه بین داده‌های DTF و روش GA برای سیال کف ۹۰٪ (p=۲۵ psi)

پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان یعنی شاخص رفتاری سیال (n) و شاخص مقاومت سیال (K) و همچنین مقادیر SSE و ضریب همبستگی (R) بین مقادیر حاصل از برازش الگوریتم ژنتیک و مقادیر واقعی، برای داده‌های DTF با توجه به روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) در جدول ۳-۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳-۳: پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۲۵ psi

R	SSE (Pa ²)	K(Pa.s ⁿ)	n (-)	کیفیت کف (%)
۰/۹۸۷	۳۷/۳۵	۱/۲۸۳	۰/۵۵۳۸	۹۰
۰/۹۹۴	۱۳/۷۸	۰/۸۵۴۶	۰/۵۹۱	۸۰
۰/۹۸۱	۱۷/۲	۰/۳	۰/۶۶	۷۰

پارامترهای مدل هرشل بالکلی یعنی تنش تسلیم (τ_y)، شاخص مقاومت سیال (K) و شاخص رفتاری سیال (n) با استفاده از الگوریتم ژنتیک در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۲۵ psi

R	SSE (Pa ²)	τ_y (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	کیفیت کف (%)
۰/۹۸۷	۳۸/۰۶	۳/۸	۰/۶۲۷۳۶	۰/۶۵۱۶	۹۰
۰/۹۹۶	۱۱/۱	۳/۷۷۵	۰/۴۹	۰/۶۶۵	۸۰
۰/۹۹۱	۱۱/۸۲	۳/۵	۰/۰۶۰۵	۰/۸۷۶۵	۷۰

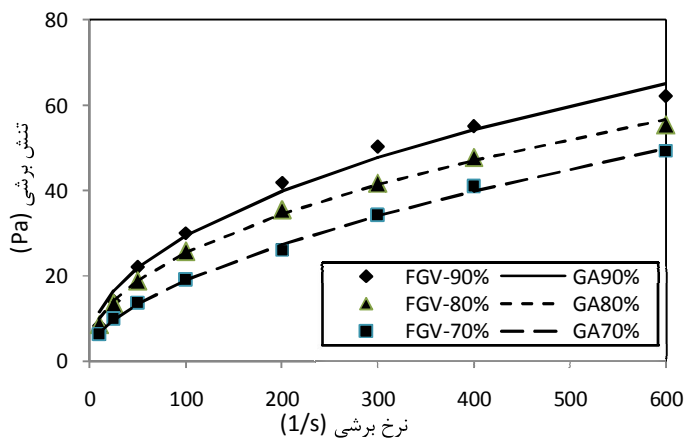
نتایج جداول ۳-۳ و ۳-۴ نشان دهنده آن است که کف با کیفیت ۷۰٪ با مدل هرشل بالکلی (خطای کمتر) و کف با کیفیت ۸۰٪ و ۹۰٪ با مدل قانون توان (خطای کمتر) برازش بهتری دارند. دو مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی و قانون توان به داده‌های آزمایشگاهی FGV، توسط الگوریتم ژنتیک برازش گردیدند. پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی برای داده‌های تنش-کرنش FGV توسط الگوریتم ژنتیک در جدول ۳-۵ و مدل قانون توان در جدول ۳-۶ آورده شده است. مقادیر ضرایب همبستگی R در همه نمونه‌ها بیشتر از ۰/۹۹ می‌باشد. نتایج نشان دهنده توصیف خوب رفتار رئولوژیکی سیال کف با هر دو مدل رئولوژیکی می‌باشد ولی با توجه به مقادیر خطای حاصل از برازش، مشخص است که کف با کیفیت ۷۰٪ از مدل هرشل بالکلی و کف با کیفیت‌های ۸۰٪ و ۹۰٪ از مدل قانون توان پیروی می‌کنند.

جدول ۳-۵: پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی برای سیال کف در کیفیت‌ها (Γ) و فشارهای (p) مختلف

$p=400$ psi	τ_y (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	SSE (Pa ²)	R
$\Gamma=90\%$	۳/۷۶	۳/۷۷۴	۰/۴۶۷	۱۸/۶۴۵	۰/۹۹۸
$\Gamma=80\%$	۳/۷۳	۲/۹۴۳	۰/۴۷۶	۱۲/۰۴۳	۰/۹۹۸
$\Gamma=70\%$	۳/۷۰	۱/۷۸۹	۰/۵۲۹	۳/۴۸۵	۰/۹۹۹
P=200 psi					
$\Gamma=90\%$	۳/۶	۲/۷۸۳	۰/۴۹۹	۲۲/۵۹	۰/۹۹۷
$\Gamma=80\%$	۳/۵۵	۲/۳۴۳	۰/۵۰۱	۱۱/۲۲۱	۰/۹۹۸
$\Gamma=70\%$	۳/۴	۱/۹۵۶	۰/۵۰۵	۷/۴۳	۰/۹۹۸
P=100 psi					
$\Gamma=90\%$	۲/۲۵	۳/۱۳۷	۰/۴۶۹	۴۳/۴	۰/۹۹۴
$\Gamma=80\%$	۲/۲۰	۲/۵۹۴	۰/۴۷۶	۵/۷۷۸	۰/۹۹۹
$\Gamma=70\%$	۲/۱۰	۱/۱۶۲	۰/۵۸۱	۳/۳۵	۰/۹۹۹
P=25 psi					
$\Gamma=90\%$	۲/۲۳	۲/۲۳۹	۰/۵	۱۳/۱۷۴	۰/۹۹۹
$\Gamma=80\%$	۲/۱۸	۱/۶۱۸	۰/۵۰۱	۰/۹۱۳	۰/۹۹۹
$\Gamma=70\%$	۲/۰۸	۱/۰۱۸	۰/۵۵۵	۱/۶۵۶	۰/۹۹۹
$\Gamma=80\%$ (polymer=۰/۵%)					
$p=400$ psi	۳/۸	۵/۳۰۶	۰/۴۴۳	۱۲/۵۷۱	۰/۹۹۹
$p=200$ psi	۳/۶	۵/۲۴۶	۰/۴۴۴	۱۳/۶۲۳	۰/۹۹۹
$p=100$ psi	۲/۳	۴/۸۶۵	۰/۴۵۸	۶/۱۰۹	۰/۹۹۹
$p=25$ psi	۲/۲۵	۳/۷۱۶	۰/۴۳۶	۴/۴۲۱	۰/۹۹۹

شکل ۳-۶ داده‌های تنش برشی- کرنش برشی آزمایشگاهی FGV و مدل HB برازش شده بر آن

توسط الگوریتم ژنتیک در شرایط فشار ۱۰۰ psi و کیفیت‌های مختلف کف را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر ($p=100$ psi)

جدول ۳-۶: پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان برای سیال کف در کیفیت‌ها (Γ) و فشارهای (p) مختلف

$p=400$ psi	τ_y (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	SSE (Pa ²)	R
$\Gamma=90\%$.	5/179	0/4243	8/896	0/998
$\Gamma=80\%$.	4/320	0/4236	4/522	0/999
$\Gamma=70\%$.	2/976	0/4581	0/531	0/999
P=200 psi					
$\Gamma=90\%$.	4/2	0/44	11/67	0/997
$\Gamma=80\%$.	3/544	0/4447	3/776	0/998
$\Gamma=70\%$.	2/788	0/46	8/7	0/998
P=100 psi					
$\Gamma=90\%$.	3/92	0/438	33/14	0/994
$\Gamma=80\%$.	3/385	0/439	2/66	0/999
$\Gamma=70\%$.	2/36	0/47	15/6	0/999
P=25 psi					
$\Gamma=90\%$.	2/936	0/4619	7/46	0/998
$\Gamma=80\%$.	2/392	0/4465	2/79	0/999
$\Gamma=70\%$.	1/641	0/4875	3/55	0/999
$\Gamma=80\%$ (polymer=0/5%)					
$p=400$ psi	.	6/912	0/407	8/7	0/999
$p=200$ psi	.	6/735	0/410	7/89	0/999
$p=100$ psi	.	5/865	0/431	2/787	0/999
$p=25$ psi	.	4/729	0/403	2/158	0/999

شکل‌های الف-۶ تا الف-۹ داده‌های تنش برشی- کرنش برشی آزمایشگاهی FGV و مدل HB برازش شده بر آن توسط الگوریتم ژنتیک را در شرایط فشار و کیفیت‌های مختلف کف نشان می‌دهند.

۳-۵ جمع بندی

با توجه به مطالعه حاضر و مطالعات قبلی (Sanghani and Herzhaft, 1999, Beyer et al., 1972, Duan, 2007, Sani et al., 2001, Chen et al., 2005, Saintpere et al., 2000, Ikoku, 1983, Shah et al., 2010) مشخص است که تنش برشی و گرانیوی ظاهری، با افزایش کیفیت کف، افزایش فشار محیطی، کاهش دمای محیط و مقدار پلیمر افزودنی به کف، افزایش می‌یابد. با افزایش کیفیت کف، شاخص مقاومت سیال افزایش، و شاخص رفتاری سیال (خاصیت غیرنیوتنی) در اکثر موارد

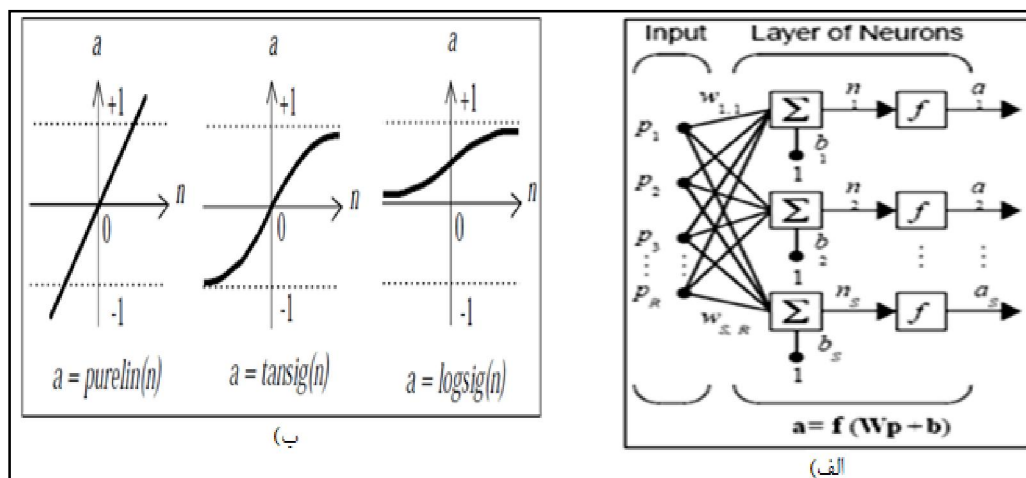
کاهش می‌یابد. با افزایش کیفیت کف، درصد حجمی گاز افزایش می‌یابد و باعث ایجاد حباب‌های بیشتر و متعاقب آن تلاطم حباب‌ها افزایش و گرانروی ظاهری افزایش می‌یابد. افزایش فشار محیطی باعث فشردگی حباب‌های گاز داخل سیستم شده و باعث کوچکتر شدن حباب‌ها می‌گردد. در نتیجه سطح کلی حباب‌ها در واحد حجم بزرگتر شده و باعث افزایش گرانروی ظاهری می‌گردد که این تاثیر در فشارهای پایین ۱۰۰ psi مشهودتر می‌باشد. نتایج تعیین پارامترهای رئولوژیکی نشان دهنده قابلیت بالای روش الگوریتم ژنتیک در تعیین این پارامترها است. با توجه به نتایج فوق، مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی برای سیال کف با کیفیت ۷۰٪ و مدل قانون توان برای سیال کف با کیفیت ۸۰٪ و ۹۰٪ برازش بهتری دارد. بنابر این هر دو مدل در شبیه‌سازی CFD جریان سیال کف و انتقال خرده‌ها توسط سیال کف در فصل‌های ششم و هفتم بررسی می‌گردند.

فصل چهارم: مدل سازی انتقال خرده های
حفاری با استفاده از روش های هوشمند و
رگرسیون خطی چند متغیره

در این فصل از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سرعت سقوط ذرات (لغزش) در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی و مدل سازی انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از سیال کف استفاده می‌شود. همچنین از روش رگرسیون خطی چند متغیره برای مدل سازی انتقال خرده‌ها توسط کف استفاده می‌گردد.

۱-۴ شبکه عصبی پس انتشار خطا^۱ (BPNN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی تکنیک‌های محاسباتی یادگیر هستند که به کمک آن‌ها می‌توان یک نگاهت خاص را تقریب زد و یا داده‌های مختلفی را دسته‌بندی کرد. بر خلاف کامپیوترهای رقومی که نیازمند دستورات کاملاً صریح و مشخص هستند، شبکه‌های عصبی به مدل‌های ریاضی محض نیاز ندارند بلکه مانند انسان قابلیت یادگیری به وسیله تعدادی مثال مشخص را دارند. هر شبکه عصبی دارای سه مرحله آموزش، آزمایش و اجرا می‌باشد و از واحدهایی به نام نرون تشکیل شده است. هر شبکه ساده (شکل ۵-۱)، شامل یک لایه ورودی، لایه میانی همراه با تابع محرک (فعال‌ساز) و لایه خروجی است که لایه ورودی، سیگنال‌ها را از محیط خارج (یا دیگر نرون‌ها) دریافت می‌کند و تابع محرک، سیگنال‌های ورودی را جمع و پردازش و از طریق لایه خروجی به بیرون منتقل می‌کند (Hagan et al., 1996; Haykin., 1999).



شکل ۴-۱: الف) شبکه تک لایه با R ورودی و S نرون در لایه میانی ب) توابع محرک (Demuth and Beale, 2002)

شبکه تک لایه (شکل ۴-۱ الف) دارای R واحد ورودی P_1, \dots, P_n و S نرون در لایه میانی می‌باشد. در این شبکه هر عضو ورودی از بردار P به هر ورودی نرون از طریق ماتریس وزن W متصل می‌گردد. نرون j ام، واحد جمع کننده‌ای دارد که ورودی‌های وزن دار شده و بایاس را به شکل خروجی اسکالر $n(j)$ جمع می‌کند. $n(j)$ های مختلف بردار ورودی n را با S عضو تشکیل می‌دهند. در نهایت خروجی‌های لایه نرون، بردار ستونی a را تشکیل می‌دهند.

$$n_j = \sum_{i=1}^R (p_i w_{ij} + b_j) \quad , j=1,2,\dots,S \quad (1-4)$$

که در آن:

w_{ij} وزن‌های اتصال واحد ورودی p_i و واحد خروجی n_j و b_j بایاس مربوط به سلول j ام است.

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_S \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_R \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

نقش بایاس افزایش یا کاهش مجموعه وزن دار می‌باشد و به شبکه کمک می‌کند تا الگوهای موجود را بهتر بشناسد. خروجی نهایی شبکه (a) با استفاده از تابع فعال ساز $f(x)$ به صورت رابطه (۴-۲) محاسبه می‌گردد. وزن‌های محاسبه شده از آموزش، ذخیره شده و اطلاعات را برای کاربردهای آتی آماده می‌کنند (Demuth and Beale, 2002).

$$a_S = f(n_S) \quad (2-4)$$

آموزش شبکه عصبی مصنوعی

آموزش، فرآیندی است که با توجه به الگوهای ورودی و خروجی معلوم منجر به دستیابی به وزن‌های بهینه برای ورودی هر سلول شبکه عصبی می‌گردد. آموزش را می‌توان توسط الگوریتم‌های مختلف انجام داد. شبکه معمولاً بعد از چندین تکرار الگوها را یاد می‌گیرد، که این تکرار به بزرگی شبکه بستگی دارد. اساساً شبکه بعد از رسیدن به یک تکرار حداکثر، متوقف می‌گردد. به همین خاطر از خطای مجاز حداقل استفاده می‌شود که میانگین مربعات اختلاف بین مقدار خروجی شبکه و

خروجی مطلوب است که باید کمتر از یک مقدار بخصوصی باشد. یعنی تا رسیدن به این مقدار خطا، وزن‌ها با توجه به قانون پس انتشار خطا اصلاح می‌گردند. در طی آموزش، شبکه ممکن است بیش از اندازه تعلیم ببیند. این مشکل به عنوان بیش‌برازش^۱ ذکر می‌گردد. بیش‌برازش یک مشکل بحرانی در بیشتر ساختارهای شبکه‌های عصبی متعارف است که با قانون پس انتشار خطا آموزش می‌بینند (Demuth and Beale, 2002). برای حل این مشکل می‌توان از دو روش آموزش توقف سریع^۲ و منظم‌سازی بیزین^۳ استفاده نمود. در روش توقف سریع، داده‌ها به سه قسمت آموزش، اعتبارسنجی و تست تقسیم می‌شوند. این روش برای زمانی مناسب است که الگوهای آموزش زیادی وجود داشته باشد. با توجه به الگوهای کم در این مطالعه از روش منظم‌سازی بیزین استفاده می‌شود.

الگوریتم منظم‌سازی بیزین

روش منظم‌سازی بیزین، بر اساس اصلاح تابع کارایی که معمولاً همان میانگین مربعات خطا در مجموعه آموزشی است (رابطه ۴-۳)، کار می‌کند.

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (4-3)$$

که در آن:

t_i : خروجی مطلوب، a_i : خروجی شبکه و N : تعداد داده‌های آموزشی

با اضافه کردن عبارت میانگین مربعات وزن‌ها (msw) می‌توان این تابع را اصلاح نمود:

$$msereg = \gamma mse + (1 - \gamma) msw \quad (4-4)$$

که در آن γ نسبت کارایی بوده و msw از رابطه ۴-۵ به دست می‌آید:

$$msw = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \quad (5-4)$$

استفاده از این تابع کارایی باعث می‌شود تا شبکه وزن‌ها و انحرافات کمتری داشته باشد و این

شبکه را وادار می‌کند که پاسخ هموارتری ایجاد کند و کمتر به سوی بیش‌برازش پیش رود. مشکل

1- Overfitting
2- Early stopping
3- Bayesian regularization

اصلی در این روش تعیین مقدار بهینه نسبت کارایی (γ) است. اگر مقدار این پارامتر زیاد گرفته شود ممکن است شبکه به سمت بیش‌برازش پیش رود و اگر این نسبت بیش از اندازه کوچک باشد، شبکه برآزش مناسبی برای داده‌های آموزشی نخواهد داشت. پس مطلوب است که مقدار بهینه با روشی که به طور اتوماتیک کار می‌کند، تعیین گردد. یک روش برای این کار، روش دیوید مکی^۱ است که از روش بیزین استفاده می‌کند و در نرم افزار مطلب به الگوریتم آموزش trainbr معروف است. این الگوریتم هنگامی بهتر کار می‌کند که ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه در بازه [۱ و -۱] مقیاس‌بندی شوند. در هنگام استفاده از این الگوریتم، مهم است که اجازه دهیم شبکه تا زمان همگرایی پارامترها اجرا گردد. آموزش ممکن است با پیغام "Maximum MU reached" متوقف گردد، این مشخصه خوبی برای همگرایی الگوریتم است. از معایب این روش زمان همگرایی طولانی‌تر آن نسبت به روش توقف سریع می‌باشد. همچنین این روش آن‌چنان که برای تقریب توابع کاربرد دارد، در تشخیص الگو کارایی خوبی ندارد و مزیتی که نسبت به روش توقف سریع دارد در این است که تعدادی از الگوهای موجود برای داده‌های اعتبارسنجی در نظر گرفته نمی‌شوند و این باعث می‌شود تا زمانی که تعداد الگوها کم است تعداد داده بیشتری برای آموزش به کار گرفته شود زیرا در روش توقف سریع تعدادی از داده‌های مجموعه آموزش، برای مجموعه اعتبارسنجی بکار می‌روند (Demuth and Beale, 2002).

۴-۲ تخمین سرعت سقوط ذرات با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

سرعت سقوط ذرات کاربردهای فراوانی از جمله صنعت حفاری نفت و گاز، منابع زمین گرمایی، فرآوری مواد معدنی و سیستم‌های چند فازی دارد. روش معمول تخمین سرعت سقوط آزاد، استفاده از ضریب پسا (C_D) است. ضریب پسا، نسبت نیروی وارده بر ذره سقوط کننده به حاصل ضرب مساحت ذره و انرژی جنبشی در واحد حجم می‌باشد (Kelessidis and Mpandelis, 2004):

$$C_D = \frac{F}{AE_K} \quad (۴-۶)$$

که در آن:

1- David MacKay

F نیروی پسا ویسکوز که در شرایط سقوط حد با نیروی شناوری در تعادل است و به صورت زیر

بیان می‌شود:

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \quad (7-4)$$

مساحت ذره به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (8-4)$$

و انرژی جنبشی در واحد حجم از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$E_K = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9-4)$$

از ترکیب معادلات (۶-۴) تا (۹-۴)، ضریب پسا به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$C_D = \frac{4 dg(\rho_s - \rho)}{3 \rho V_s^2} \quad (10-4)$$

که در آن:

d قطر ذره (m)، ρ_s دانسیته ذره (kg/m^3)، ρ دانسیته مایع (kg/m^3)، V_s سرعت ذره (m/s) و g شتاب گرانی (m/s^2) می‌باشند.

تحلیل ابعادی برای ذرات کروی در حال سقوط در سیالات نیوتنی نشان می‌دهد که ضریب پسا تابعی از عدد رینولدز می‌باشد.

$$\text{Re} = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (11-4)$$

تلاش‌های زیادی برای ارتباط ضریب پسا به عدد رینولدز صورت گرفته است. از معروفترین معادلات پیش‌بینی C_D از عدد رینولدز (Re) برای سیالات نیوتنی، می‌توان به کار کلیفت و همکاران (Clift et al., 1978) اشاره نمود که اعداد رینولدز محدوده ($0.1 < \text{Re} < 3.38 \times 10^5$) را پوشش می‌دهد. یک رابطه ساده‌تر توسط حیدر و لونسپیل (Heider and Levespiel, 1989) از طریق رگرسیون غیرخطی با استفاده از ۴۰۸ داده آزمایشگاهی ارائه گردید:

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0.186Re^{0.6459}) + \frac{0.4251}{1 + 688095/Re} \quad (12-4)$$

علی رغم اینکه کارهای زیادی در مورد سیالات نیوتنی انجام شده، در زمینه سیالات غیرنیوتنی کمتر کار شده است. سیالات غیرنیوتنی در صنایع مختلف از جمله حفاری کاربرد دارند. با توجه به کارهای انجام شده، بیشتر سیالات غیرنیوتنی از مدل رئولوژیکی قانون توان (معادله ۴-۱۳) برای ارتباط بین تنش برشی- نرخ برشی استفاده می‌کنند (Kelessidis and Mpandelis, 2004) ولی در بعضی کارها مدل رئولوژیکی بینگهام پلاستیک نیز بکار رفته است (Saha et al., 1992).

$$\tau = K\gamma^n \quad (13-4)$$

که در آن:

τ : تنش برشی، γ : نرخ برشی، n : شاخص رفتاری سیال، K : شاخص مقاومت سیال.

بیشتر کارهای قبلی از روابط استاندارد نیوتنی (C_D - Re) برای پیش‌بینی سرعت حد سقوط ذرات در سیال غیرنیوتنی با عدد رینولدز اصلاح شده (Re_{gn})، استفاده می‌کنند. برای توصیف سرعت سقوط در سیالات غیرنیوتنی روابط نیوتنی مختلفی ارائه شده است (Miura et al., 2001, Lali et al., 1989, Shah et al., 2007). رابطه لالی و همکاران (Lali et al., 1989) یکی از این روابط می‌باشد:

$$C_D = \frac{24}{Re}[1 + 0.15Re^{0.687}], \quad 1 < Re < 1000 \quad (14-4)$$

همه روابط، برای سیالات نیوتنی، صدق می‌کنند و یک رابطه واحدی که برای همه داده‌ها و سیالات غیرنیوتنی نتایج دقیقی بدهد وجود ندارد. در کار کلیسیدیس (Kelessidis, 2003) نشان داده شد که هر دو رابطه (۴-۱۲) و (۴-۱۴) برای داده‌های آن‌ها به خوبی صدق می‌کند. همچنین این دو رابطه برای داده‌های سیالات غیرنیوتنی (Miura et al., 2001, Kelessidis, 2003) به طور قابل قبولی صدق می‌کرد. در کار دیگری، کلیسیدیس و امپاندلیس (Kelessidis and Mpandelis, 2004) رابطه جدید زیر را با استفاده از ۸۰ داده آزمایشگاهی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی شبیه رابطه (۴-۱۲) ارائه نمودند:

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0.1466 Re^{0.378}) + \frac{0.44}{1 + 0.2635/Re} \quad (15-4)$$

آن‌ها همچنین اعتبار رابطه (۴-۱۲) را برای پیش‌بینی ضریب پسا در داده‌های خود بررسی نمودند. در مقایسه با رابطه (۴-۱۲)، رابطه کلیسیدیس و امپاندلیس (رابطه ۴-۱۵)، دارای RMS کمتری (۱۰٪ در مقابل ۱۳٪) بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که با توجه به اختلاف کم خطای دو روش، چون رابطه (۴-۱۲) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بیشتری (۴۰۸ داده) توسعه پیدا کرده بود، پس برای پیش‌بینی ضریب پسا مناسب‌تر است. بیشتر روابط اشاره شده دارای محاسبات پیچیده بوده و برای محدوده خاصی از عدد رینولدز معتبر هستند، بنابر این در این قسمت از شبکه عصبی مصنوعی برای فائق آمدن بر این مشکل استفاده می‌گردد.

برای طراحی شبکه عصبی مصنوعی جهت تخمین مستقیم سرعت سقوط ذره، پارامترهای تاثیر گذار بر سرعت سقوط شامل خواص سیال (شاخص رفتاری سیال (n)، شاخص مقاومت سیال (K) و دانسیته سیال (ρ)، خواص ذره (دانسیته (ρ_s) و قطر (d_p))، شتاب گرانی (g)، به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی انتخاب شدند. برای به دست آوردن سرعت سقوط ذره، از تعداد ۸۸ داده آزمایشگاهی موجود (جدول ب-۱) مربوط به سرعت سقوط ذرات در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی، ۶۹ داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) به صورت تصادفی برای آموزش و بقیه (۳۰ درصد داده‌ها) برای آزمون شبکه انتخاب شدند. در این مطالعه از دستورات شبکه عصبی مصنوعی در جعبه ابزار نرم افزار مطلب برای نوشتن برنامه کامپیوتری شبکه عصبی، استفاده گردید. برای بالا بردن قابلیت تشخیص شبکه، ورودی‌ها و خروجی شبکه توسط رابطه (۴-۱۶) در بازه [۱ تا -۱] نرمال شدند.

$$p_n = 2 \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} - 1 \quad (16-4)$$

آموزش شبکه برای تخمین سرعت سقوط ذره، با نرون‌های مختلف در لایه میانی انجام پذیرفت. در نهایت با توجه به ضریب همبستگی (R)^۱، جذر میانگین مربعات خطاها (RMS)^۲ و خطای نسبی

1-Correlation coefficient
2-Root mean square error

میانگین مطلق (AAPE)^۱ مربوط به روابط (۱۷-۴) تا (۱۹-۴) برای دو سری داده آموزش و آزمون، شبکه پس انتشار خطا (Cybenko, 1989, Hornik et al., 1989) طراحی شده که از الگوریتم آموزش اتوماتیک بیزین استفاده می‌کند، دارای یک لایه ورودی با شش نرون، یک لایه میانی با ۱۲ نرون (فلچر و گوس (Fletcher and Goss 1993) پیشنهاد نمودند که تعداد نرون مناسب در لایه میانی می‌تواند در محدوده $(2\sqrt{n} + m)$ تا $(2n + 1)$ باشد، که n تعداد ورودی و m تعداد خروجی و لایه خروجی با یک نرون (سرعت سقوط ذره) می‌باشد. شماتیکی از شبکه و مشخصات جزئی تر لایه‌ها و وزن‌های مربوط به نرون‌ها که با استفاده از نرم افزار مطلب طراحی شده، در شکل ۴-۲ آمده است. تابع فعال‌ساز لایه میانی از نوع تانژانت هیپربولیک و تابع فعال‌ساز لایه خروجی، خطی می‌باشد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i^2}{N}} \quad (17-4)$$

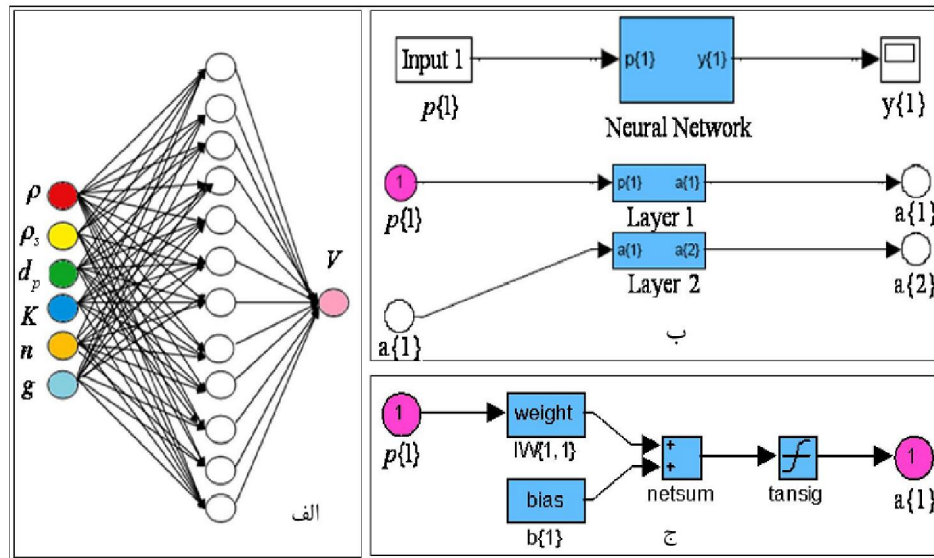
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (18-4)$$

$$AAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right| \quad (19-4)$$

که در آن‌ها:

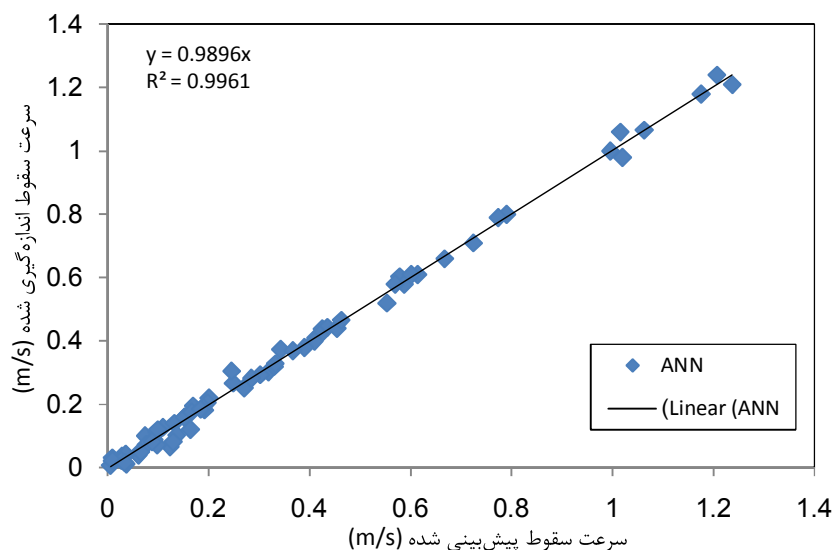
p مقدار هر پارامتر، y_i مقدار اندازه‌گیری شده^۲، \hat{y}_i مقدار پیش‌بینی شده^۳ و N تعداد داده‌ها می‌باشند.

1 - Average absolute percent relative error
2 - Measured
3 - Predicted

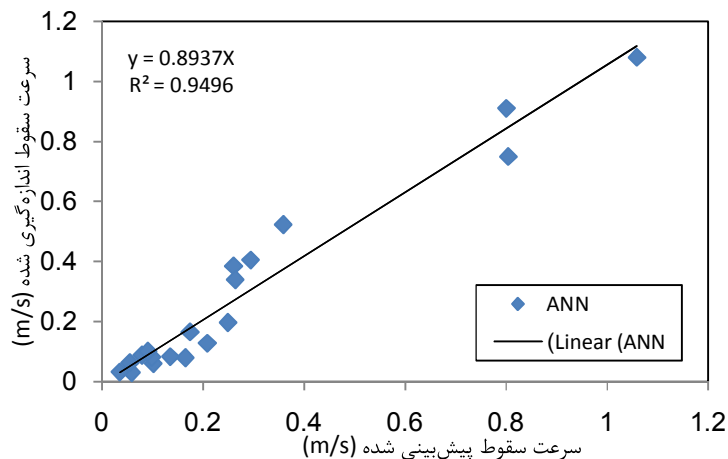


شکل ۴-۲: الف) شماتیکی از شبکه (ب) مشخصات لایه‌ها (ج) وزن‌ها، بایاس و تابع فعال‌ساز لایه میانی

مقادیر R ، RMS و $AAPE$ در داده‌های آموزش به ترتیب برابر با 0.997 ، 0.21 و 32.9% و در داده‌های آزمون برابر با 0.974 ، 0.72 و 18.7% می‌باشند. مقادیر سرعت سقوط ذره حاصل از پیش‌بینی شبکه در مقابل مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی (جدول ب-۱) برای دو سری آموزش و آزمون به ترتیب در شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴ نشان داده شده‌اند.

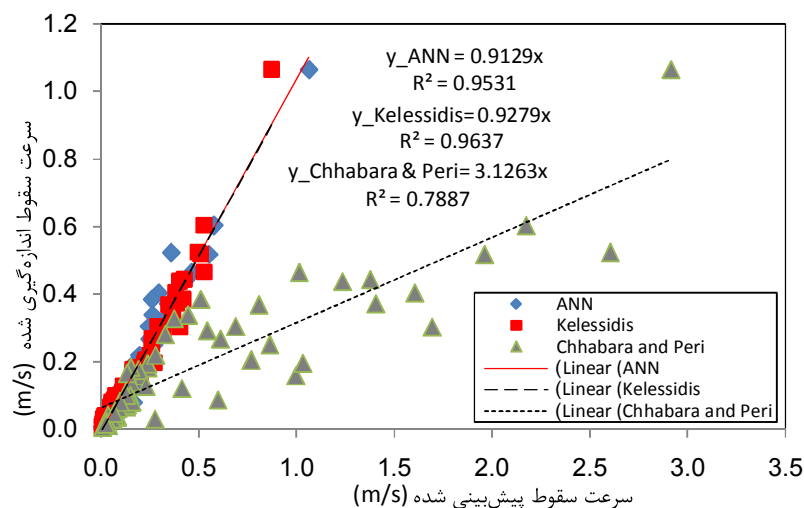


شکل ۴-۳: سرعت سقوط حاصل از شبکه در مقابل سرعت سقوط اندازه‌گیری شده در داده‌های آموزش



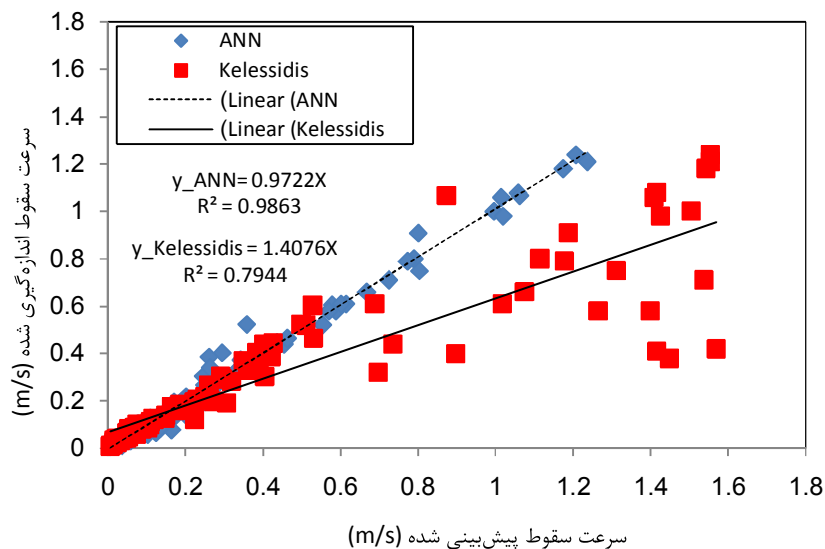
شکل ۴-۴: سرعت سقوط ذره حاصل از شبکه در مقابل سرعت سقوط اندازه‌گیری شده در داده‌های آزمون

برای ارزیابی کارایی شبکه عصبی، در شکل ۴-۵ برای مقادیر $n > 0.5$ ، نتایج روش شبکه عصبی با نتایج دو کار تجربی کلیسیدیس (Kelessidis, 2004) و کار چاهابارا و پری (Chahabara and Peri, 1991) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی، مقایسه شده است. مقادیر R^2 برای سه روش شبکه عصبی، روش کلیسیدیس و روش چاهابارا و پری به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۹۶ و ۰/۷۸ و مقادیر RMS برای سه روش به ترتیب برابر با ۰/۰۴۱، ۰/۰۳۶ و ۰/۵۸ می‌باشند. همان‌طور که مشخص است، برای این سری داده‌ها، دو روش شبکه عصبی و رابطه کلیسیدیس نتایج تقریباً مشابهی دارند و نسبت به روش چاهابارا و پری در پیش‌بینی سرعت سقوط ذرات کارایی بهتری دارند.



شکل ۴-۵: مقایسه سرعت سقوط حاصل از شبکه و روابط تجربی برای سیالات غیرنیوتنی ($n > 0.5$)

برای مقادیر $0.06 < n < 1$ نتایج روش شبکه عصبی و کار کلیسیدیس (Kelessidis, 2004) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی، در شکل ۴-۶ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر R^2 و RMS برای روش شبکه عصبی به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۰۳۸ و برای رابطه کلیسیدیس برابر با ۰/۸۹ و ۰/۲۹۹ می‌باشند.



شکل ۴-۶: مقایسه سرعت سقوط حاصل از شبکه با رابطه کلیسیدیس برای سیالات غیرنیوتنی ($0.06 < n < 1$)

نتایج نشان می‌دهند که می‌توان از شبکه عصبی با قابلیت پیش‌بینی بالا برای تخمین مستقیم سرعت سقوط ذرات در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی استفاده نمود. با استفاده از سرعت سقوط ذره، می‌توان در طراحی سرعت سیال برای اطمینان از انتقال موثر خرده‌ها در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی در صنایع مختلف از جمله حفاری استفاده کرد.

۳-۴ پیش‌بینی کارایی تمیزکاری چاه توسط سیال کف با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

و رگرسیون خطی چند متغیره در فضای حلقوی افقی

امکان بررسی همه پارامترهای تاثیرگذار در پدیده انتقال خرده‌ها وجود ندارد. این پارامترها همان‌طور که قبلاً در فصل دوم اشاره شد شامل سرعت سیال در فضای حلقوی، خواص سیال حفاری، هندسه چاه، چرخش لوله، سرعت حفاری و شرایط درون چاهی می‌باشد. اما در نظر گرفتن پارامترهای بحرانی در انتقال خرده‌ها ضروری است. در این مطالعه، غلظت حجمی خرده‌های حفاری که یکی از

معیارهای تمیزکاری چاه است، در حفاری با سیال کف، با استفاده از پارامترهای موثر در آن از جمله سرعت سیال کف، دما و فشار محیطی، کیفیت کف و چرخش لوله حفاری توسط شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در فضای حلقوی افقی با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای دیگر، تخمین زده می‌شود و با نتایج آزمایشگاهی مطالعات قبلی در جدول ب-۲ (Chen, 2005; Chen et al., 2007; Duan, 2007; Duan et al., 2010) مقایسه می‌گردد.

۴-۳-۱ تخمین غلظت حجمی خرده‌ها با شبکه عصبی مصنوعی

ورودی‌های انتخاب شده برای طراحی شبکه عصبی، دما (T) و فشار (P) محیط، کیفیت کف (Γ)، سرعت سیال کف (V)، عدم هم‌مرکزی فضای حلقوی (ε) و چرخش لوله حفاری (RPM)^۱ می‌باشند. برای به دست آوردن غلظت حجمی خرده‌های حفاری (C)، از ۷۷ داده موجود در پیوست ب (جدول ب-۲) مربوط به داده‌های آزمایشگاهی انتقال خرده‌های حفاری مطالعات قبلی (Chen, Duan, 2007) استفاده گردید که در جدول ۴-۱ ماتریس این آزمایشات آورده شده است.

جدول ۴-۱: ماتریس آزمایشات انتقال خرده‌ها با استفاده از کف بدون پلیمر (Chen, 2005. Duan, 2007)

پارامتر/ کمیت	مقدار
اندازه فضای حلقوی	۳/۵" در ۵/۷۶"
عدم هم‌مرکزی (-)	۰ و ۰/۷۸
سرعت سیال کف (ft/s)	۲، ۳، ۴، ۵ و ۶
کیفیت کف (%)	۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰
دما (F)	۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۱۷۰
فشار (psi)	۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰
چرخش لوله (rpm)	۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰
اندازه خرده‌ها (mm)	۳
دانسیتة خرده‌ها (kg/m ³)	۲۶۱۰

با استفاده از نرم افزار SPSS 18 (SPSS, 1993) ^۲، ماتریس همبستگی بین پارامترهای مستقل و غلظت خرده‌ها تشکیل شد که در جدول ۴-۲ آورده شده است. همان‌طور که از این جدول دیده

1 - Root per minute

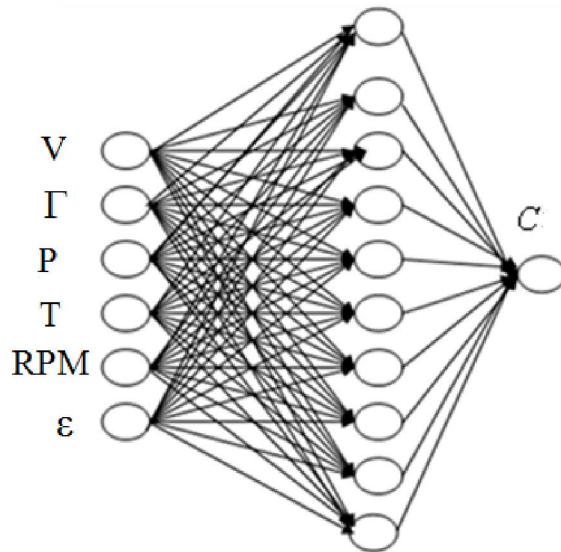
2 - Statistical package for social science

می‌شود پارامترهای سرعت سیال، کیفیت کف و چرخش لوله دارای تاثیر بیشتری در غلظت حجمی خرده‌های حفاری هستند.

جدول ۴-۲: ماتریس همبستگی بین پارامترهای مستقل و غلظت حجمی خرده‌ها

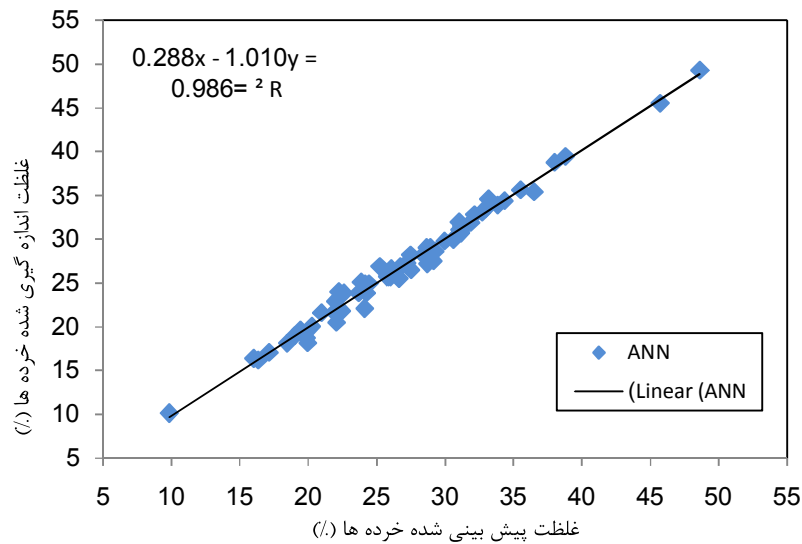
		P	T	V	RPM	Γ	ε	C
فشار	P	۱						
دما	T	۰/۰۷۱	۱					
سرعت	V	-۰/۱۲	۰/۰۵۹	۱				
چرخش لوله	RPM	-۰/۱۲۱	-۰/۱۴۷	-۰/۲۲۳	۱			
کیفیت کف	Γ	۰/۰۲۶	۰/۱۸۳	۰/۴۰۴	-۰/۱۱۵	۱		
عدم هم‌مرکزی	ε	-۰/۲۶۶	-۰/۲۴۵	-۰/۲۹۸	۰/۶۱۳	-۰/۱۴۴	۱	
غلظت خرده‌ها	C	-۰/۰۴۶	۰/۱۴	-۰/۵۷	-۰/۲۵۶	-۰/۶۷۹	۰/۰۵۳	۱

برای بالا بردن قابلیت تشخیص شبکه، ورودی‌ها و خروجی شبکه با استفاده از رابطه ۴-۱۶ در بازه [۱ و -۱] نرمال شدند. از داده‌های موجود، ۶۰ داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) به صورت تصادفی برای آموزش و بقیه (۳۰ درصد داده‌ها) برای آزمون شبکه انتخاب شدند. آموزش شبکه برای تخمین غلظت حجمی خرده‌ها، با نرون‌های مختلف در لایه میانی انجام پذیرفت. در نهایت با توجه به ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMS) و میانگین خطای نسبی مربوط به روابط ۴-۱۷ تا ۴-۱۹ برای دو سری داده آموزش و آزمون، شبکه بهینه طراحی گردید که از الگوریتم آموزش اتوماتیک بیزین استفاده می‌کند. این شبکه یک لایه ورودی با شش نرون ($P, T, V, RPM, \varepsilon, \Gamma$)، یک لایه میانی با ۱۰ نرون و یک لایه خروجی با یک نرون (غلظت حجمی خرده‌ها) دارد. تابع فعال‌ساز لایه میانی، تانزانت هایپربولیک و تابع فعال‌ساز لایه خروجی، خطی در نظر گرفته شد. نمایش شماتیکی از شبکه، در شکل ۴-۱۳ آمده است.

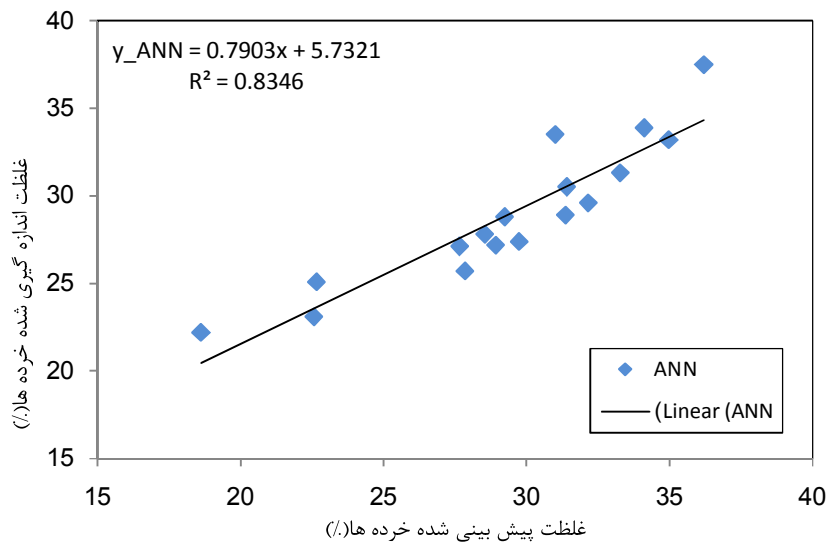


شکل ۴-۱۳: ساختار شبکه پس انتشار خطا جهت تخمین غلظت حجمی خرده‌های حفاری

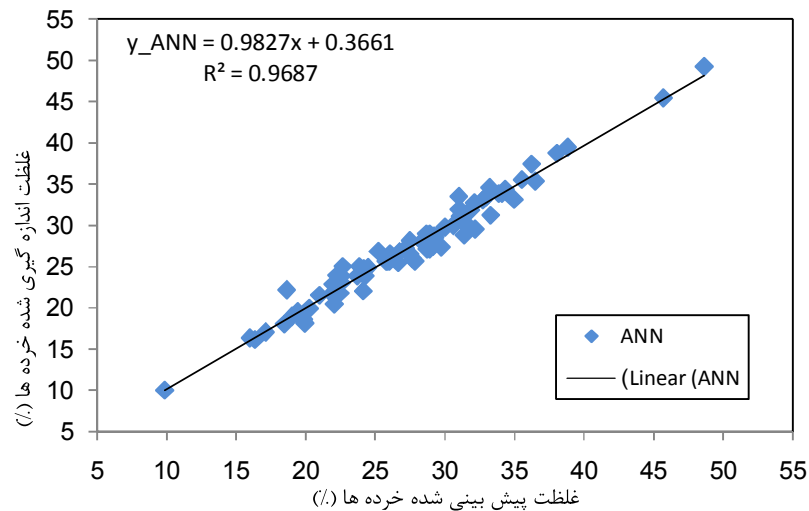
در شکل ۴-۱۴ مقایسه مقادیر پیش‌بینی (تخمینی) غلظت حجمی خرده‌ها توسط شبکه عصبی با مقادیر آزمایشگاهی یا اندازه‌گیری شده (Chen, 2005; Duan, 2007) برای داده‌های آموزش نشان داده شده است. مقادیر R ، RMS و $AAPE$ برای این داده‌ها به ترتیب برابر با $۰/۹۹۳$ ، $۰/۸۰۷$ و $۲/۳۸\%$ می‌باشند. نتایج نشان دهنده انجام آموزش خوب شبکه می‌باشد. برای ارزیابی شبکه، داده‌های گروه آزمون که در آموزش شبکه استفاده نشده است، استفاده گردید. مقادیر پیش‌بینی شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی (Chen, 2005; Duan, 2007) برای داده‌های آزمون در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. مقادیر R ، RMS و $AAPE$ برای این داده‌ها به ترتیب برابر با $۰/۹۱۴$ ، $۱/۹$ و $۵/۹۳\%$ می‌باشند. در شکل ۴-۱۶ نیز مقادیر پیش‌بینی شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی برای کل داده‌های آموزش و آزمون آورده شده است.



شکل ۴-۱۴: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آموزش

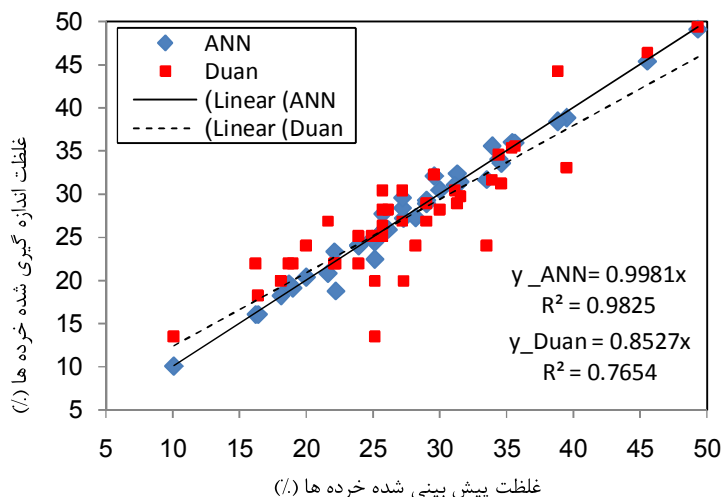


شکل ۴-۱۵: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آزمون

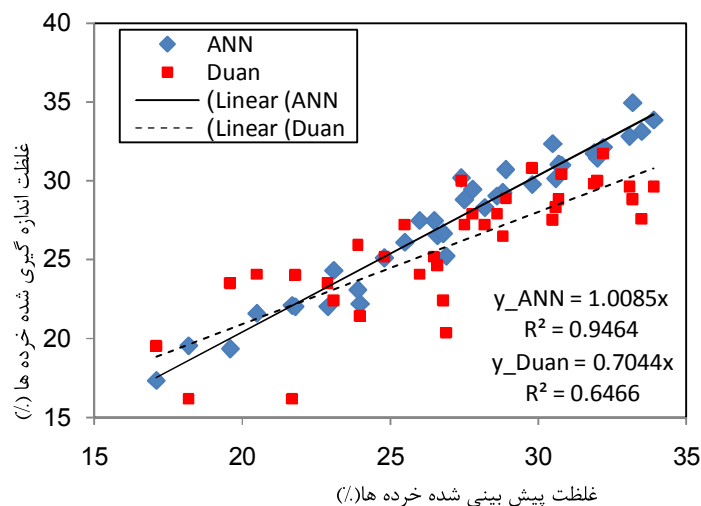


شکل ۴-۱۶: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در کل داده‌ها

برای نشان دادن قابلیت شبکه عصبی طراحی شده در پیش‌بینی، نتایج غلظت حجمی خرده‌های حفاری حاصل از این روش با نتایج حاصل از مدل مکانیکی ارائه شده در مطالعه دوان (Duan, 2007) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی دوان (Duan, 2007) و داده‌های آزمایشگاهی چن (Chen, 2005) (جدول ب-۲) به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نشان داده شده است. مقدار AAPE شبکه عصبی برای داده‌های دوان، برابر با ۳/۱٪ در حالی که این مقدار خطا برای مدل مکانیکی دوان برابر با ۱۱/۲ درصد می‌باشد. مقدار AAPE برای داده‌های چن با شبکه عصبی برابر با ۳/۲٪ و با مدل مکانیکی برابر با ۹/۴٪ می‌باشد.



شکل ۴-۱۷: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه و مدل مکانیکی دوان در مقابل مقادیر آزمایشگاهی دوان



شکل ۴-۱۸: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها حاصل از شبکه و مدل مکانیکی دوان در مقابل مقادیر آزمایشگاهی چن

۵-۳-۱ تخمین غلظت حجمی خرده‌ها با رگرسیون خطی چند متغیره (MLR)

در اکثر مسائل مهندسی از جمله مسائل مربوط به مهندسی نفت، بیش از یک متغیر برای توصیف تغییرات یک متغیر وابسته وجود دارد. در این مسائل از روش رگرسیون چند متغیره خطی (پیوست ب) یا غیر خطی استفاده می‌شود. مدل کلی رابطه خطی به صورت زیر می‌باشد:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + e \quad (۴-۲۰)$$

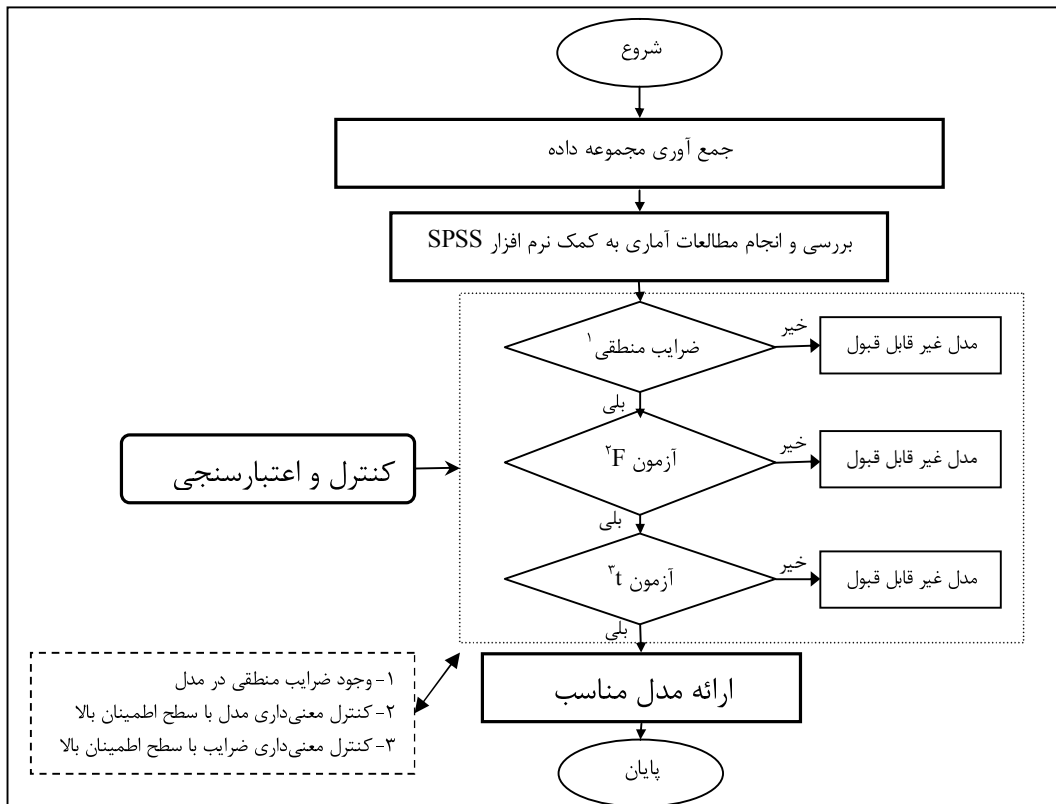
که در آن:

β ، ضرایب رگرسیون که نامشخص هستند، x ها متغیرهای مستقل و y متغیر وابسته و e خطای تصادفی می‌باشد. اغلب، تفاوتی بین نقاط واقعی و خط رگرسیون برآزش شده وجود دارد. تفاوت بین نقطه مشاهده شده از خط رگرسیون (مقدار پیش‌بینی شده)، مقدار باقیمانده نامیده می‌شود. مقادیر باقیمانده کمتر، نشان دهنده پیش‌بینی بهتر می‌باشد. برای قضاوت در مورد رابطه خطی چند متغیره خوب از ضریب همبستگی استفاده می‌شود.

برای تعیین ضرایب مجهول رگرسیون می‌توان از نرم افزارهای آماری مانند SPSS و ... استفاده نمود که محاسبات را آسان تر می‌کنند. در این مطالعه از نرم افزار SPSS 18 (SPSS, 1993) برای این

هدف استفاده گردید. در تعیین غلظت حجمی خرده‌ها (متغیر وابسته) توسط رگرسیون چند متغیره، متغیرهای X_1, X_2, \dots, X_n به عنوان متغیرهای مستقل، پارامترهای عملیاتی شامل دما، فشار، کیفیت کف، سرعت سیال، عدم هم‌مرکزی لوله، سرعت چرخش لوله می‌باشند.

داده‌های لازم برای برازش معادله رگرسیون خطی چند متغیره و اعتبارسنجی آن، همان داده‌های آموزش (۶۰ داده) و آزمون (۱۷ داده) قسمت شبکه عصبی می‌باشند. از ۶۰ داده آموزش برای تخمین معادله رگرسیون توسط SPSS و از ۱۷ داده باقیمانده برای اعتبارسنجی معادله استفاده گردید. به طور خلاصه مراحل مختلف مدل آماری برای پیش‌بینی غلظت حجمی خرده‌ها مطابق با فلوجارت شکل ۴-۱۹ انجام شد.



شکل ۴-۱۹: مراحل مختلف انجام مطالعه آماری

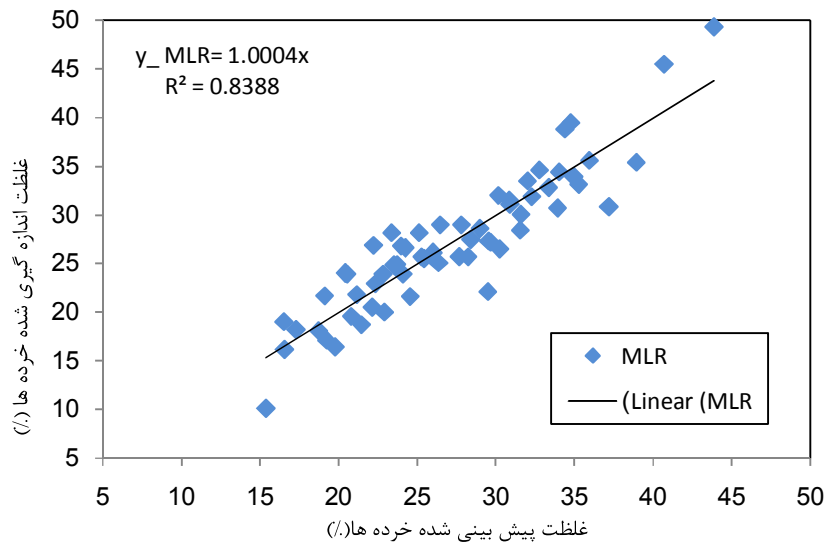
نتایج به دست آمده از بررسی آماری در جدول ۴-۳ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، برای کنترل معنی‌داری مدل از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است. با توجه به این که مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح

اعتماد ۹۹ درصد کوچکتر از مقدار F به دست آمده از مدل می‌باشد، می‌توان فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل وجود ندارد را رد کرده و نتیجه گرفت که حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. با استفاده از آزمون t می‌توان فرضیه صفر بودن هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل را آزمایش کرد. از آنجا که مقدار t حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد ۹۵ درصد کوچکتر از مقدار tهای به دست آمده از متغیرهای مستقل می‌باشد، می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد.

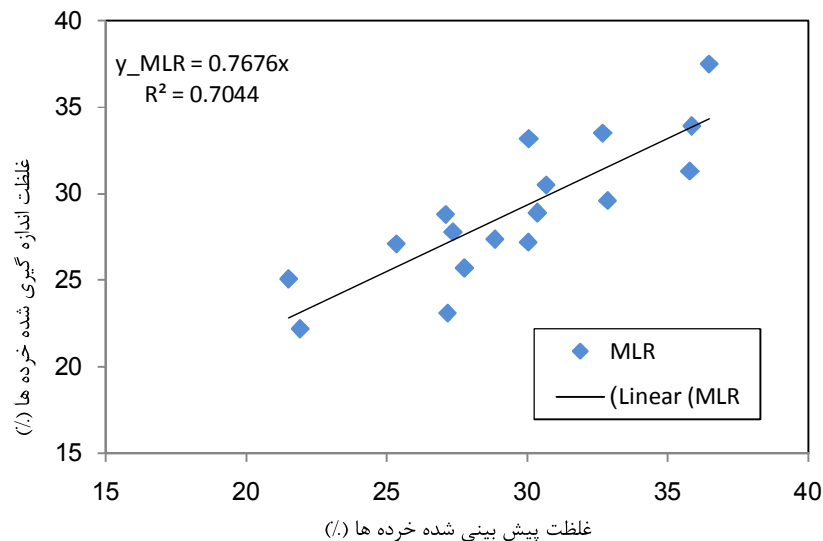
جدول ۴-۳: نتایج آماری مدل رگرسیون خطی چند متغیره برای پیش‌بینی غلظت خرده‌ها

پارامتر	ضرایب	خطای معیار	F مدل	F جدول	t	t جدول	سطح معنی داری
مقدار ثابت	۷۴/۲۱	۴/۱۰۵			۱۸/۰۷۸		۰/۰۰۰
P	-۰/۰۰۹	۰/۰۰۴			-۲/۰۱۹		۰/۰۴۹
T	۰/۰۴۸	۰/۰۱۳			۳/۶۳۵		۰/۰۰۱
V	-۳/۱۰۵	۰/۴۹۴	۴۵/۹۸	۷/۰۵۹	-۶/۲۸	۲/۰۰۱	۰/۰۰۰
RPM	-۰/۰۷۹	۰/۰۱۰			-۷/۶۶۵		۰/۰۰۰
Γ	۴۹/۲۴۸	۵/۲۲۵			-۹/۴۲۶		۰/۰۰۰
ε	۳/۱۹	۱/۳۷۹			۲/۳۱۴		۰/۰۲۵

نتایج حاصل از پیش‌بینی با مدل مذکور برای داده‌های آموزش و آزمون در شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نشان داده شده‌اند. مقادیر ضریب همبستگی و خطای متوسط نسبی بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای داده‌های آموزش به ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۶/۵٪ و این مقادیر برای داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۷/۱۹٪ می‌باشند.



شکل ۴-۲۰: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها توسط رگرسیون در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آموزش



شکل ۴-۲۱: مقادیر غلظت حجمی خرده‌ها توسط رگرسیون در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در داده‌های آزمون

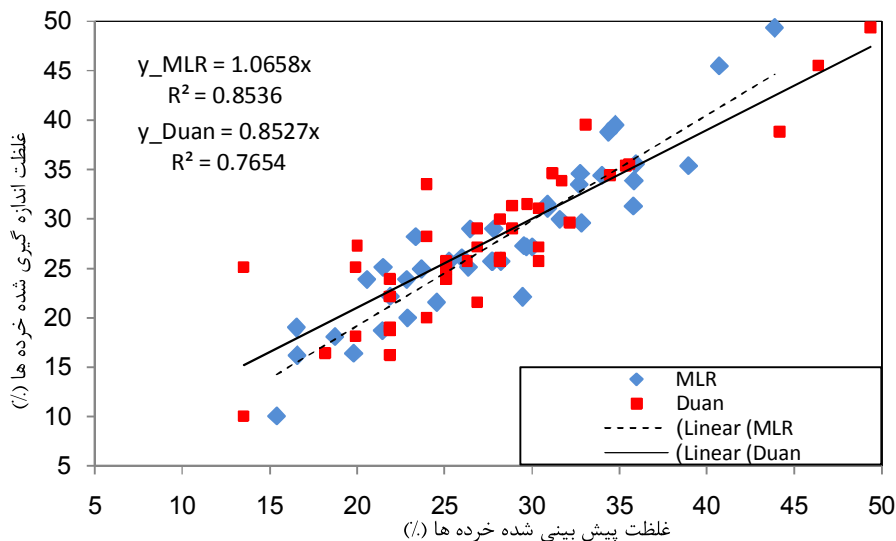
در جدول ۴-۴ نتایج حاصل از دو روش شبکه عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره برای

داده‌های آموزش و آزمون مقایسه شده‌اند که برتری شبکه را نسبت به رگرسیون نشان می‌دهد.

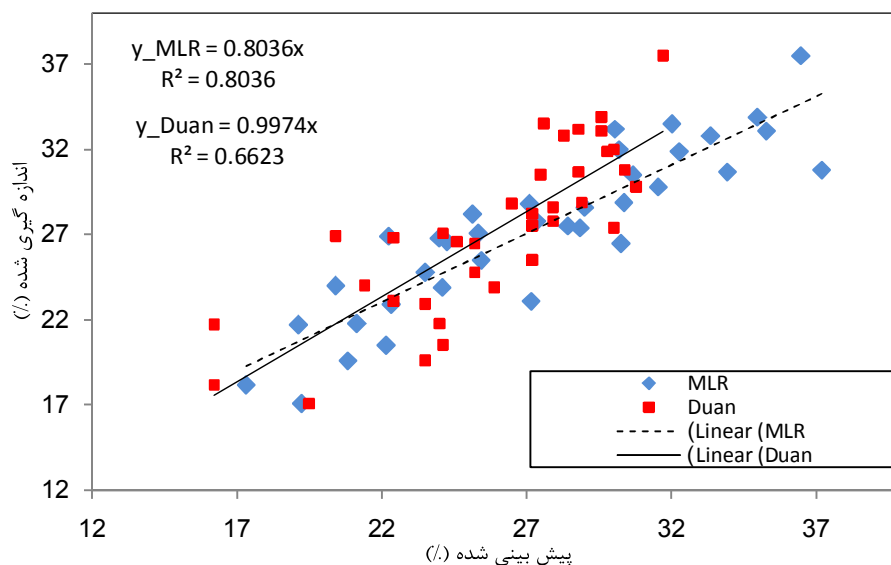
جدول ۴-۴: مقایسه R و AAPE حاصل از دو روش مختلف در مرحله آموزش و آزمون برای غلظت حجمی خرده‌ها

روش	R آموزش	R آزمون	AAPE آموزش	AAPE آزمون
شبکه عصبی مصنوعی	۰/۹۹۳	۰/۹۱۴	٪۲/۳۸	٪۵/۹۳
رگرسیون خطی چند متغیره	۰/۹۱	۰/۸۴	٪۶/۵	٪۷/۱۹

نتایج غلظت حجمی خرده‌های حفاری حاصل از روش رگرسیون خطی چند متغیره نیز با نتایج حاصل از مدل مکانیکی برای داده‌های آزمایشگاهی دوان (Duan, 2007) و داده‌های آزمایشگاهی چن (Chen, 2005) (جدول ب-۲) به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۲ و ۴-۲۳ مقایسه شده است. مقدار متوسط خطای نسبی روش رگرسیون چند متغیره برای داده‌های دوان، برابر با ۹/۸٪ در حالی که این مقدار خطا برای مدل مکانیکی دوان برابر با ۱۱/۲ درصد می‌باشد. این مقدار خطا برای داده‌های مطالعه چن با رگرسیون چند متغیره برابر با ۷٪ و با مدل مکانیکی دوان برابر با ۹/۴٪ می‌باشد.



شکل ۴-۲۲: مقایسه مقادیر رگرسیون چند متغیره و مدل مکانیکی دوان با مقادیر آزمایشگاهی دوان



شکل ۴-۲۳: مقایسه مقادیر رگرسیون چند متغیره و مدل مکانیکی دوان با مقادیر آزمایشگاهی چن

در جدول ۴-۵ نتایج حاصل از سه روش شبکه عصبی، رگرسیون خطی چند متغیره و مدل مکانیکی در تخمین کارایی تمیزکاری چاه، برای داده‌های آزمایشگاهی دوان (Duan, 2007) و داده‌های آزمایشگاهی چن (Chen, 2005) با هم مقایسه شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی نسبت به دو مدل دیگر نتیجه بهتری ایجاد کرده است. همچنین مدل رگرسیون خطی چند متغیره نسبت به مدل مکانیکی دوان پیش‌بینی بهتری داشته است.

جدول ۴-۵: مقایسه خطای میانگین نسبی (AAPE) حاصل از روش‌های مختلف برای دو سری داده آزمایشگاهی

روش	AAPE (داده‌های دوان)	AAPE (داده‌های چن)
شبکه عصبی	۳/۱٪	۳/۲٪
رگرسیون خطی چند متغیره	۹/۸٪	۷٪
مدل مکانیکی دوان (Duan, 2007)	۱۱/۲٪	۹/۴٪

فصل پنجم: مدل سازی جریان سیال کف در
فضای حلقوی توسط دینامیک سیالات
محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) عبارت از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه، نظیر واکنش‌های شیمیایی، براساس شبیه‌سازی کامپیوتری می‌باشد. با ساخت کامپیوترهای مدرن قوی و کدهای CFD پیشرفته، جریان سیال از میان هندسه‌های پیچیده می‌تواند در یک سطح بسیار خوبی مدل و تحلیل گردد. استفاده از CFD به عنوان یک وسیله مدل‌سازی در محدوده وسیعی از مهندسی نفت به طور موفق بکار برده شده است. روش‌های محاسباتی جدید برای تحلیل جریان سیال در شبیه‌سازی دو بعدی و اخیراً سه بعدی دارای مزایای زیاد می‌باشند. مثال‌های از این نوع و کاربرد آن برای مسائل مهندسی نفت و حفاری، در تحقیقات مختلف آورده شده است (Zhou and Shah, 2003, Ozbayoglu and Omurlu, 2006, Bilgesu et al., 2007, Al-Kayiem et al., Wang et al., 2009, Pereira et al., 2007, Ogugbue, 2009, al., 2007, Hahidavalloo et al., Zhonghou et al., 2011, Pereira et al., 2010, Han et al., 2010, 2010, 2013).

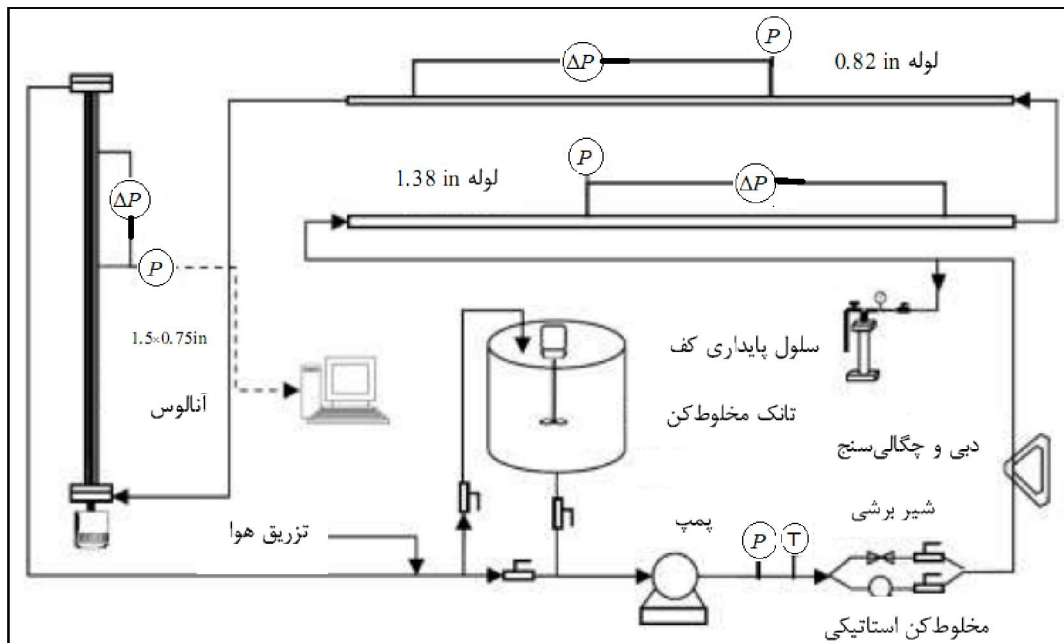
در پیوست ج به طور مفصل در مورد دینامیک سیالات محاسباتی و مراحل انجام مدل‌سازی جریان‌های تک فازی و چند فازی توضیح داده شده است و فرآیند شبیه‌سازی در شکل ج-۱ آورده شده است. در این فصل جریان سیال کف توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی جهت بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی از جمله مدل رئولوژیکی، چرخش لوله حفاری، سرعت سیال، کیفیت کف بر روی افت فشار شبیه‌سازی می‌گردد.

۵-۱ هندسه فضای حلقوی، شرایط مرزی و حل

فضای حلقوی قائم در نظر گرفته شده برای بررسی هیدرولیک جریان کف مربوط به دستگاه آزمایش دینامیکی^۱ (شکل ۵-۱) در دانشگاه تولسا^۲ می‌باشد، که دارای یک لوله داخلی به قطر (d_i) 0.1905 m و لوله خارجی به قطر $1/5 \text{ in}$ (d_o) 0.381 m و طول فضای حلقوی 10 ft (3.048 m) می‌باشد.

1- Dynamic Test Facility (DTF)

2- Tulsa



شکل ۵-۱: تصویر شماتیک از دستگاه آزمایش دینامیکی (اصلاحی از Duan et al., 2008)

طولی از هندسه که جریان توسعه یافته برای جریان آرام و جریان متلاطم پیش می‌آید به ترتیب در روابط (۵-۱) و (۵-۲) آورده شده است. بنابراین در مدلسازی عددی برای کاهش حجم و زمان محاسبات، طول (L) شبیه‌سازی، ۰/۵ متر در نظر گرفته شد که بیشتر از طول حاصل از روابط زیر است.

$$L = (0.06)(d_o - d_i) Re \quad (۱-۶)$$

$$L = 4.4(d_o - d_i) Re^{\frac{1}{6}} \quad (۲-۶)$$

که:

Re عدد رینولدز، d_i قطر لوله داخلی (m) و d_o قطر لوله خارجی می‌باشند.

در این مطالعه دو مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل بالکلی به داده‌های DTF برازش شدند و پارامترهای رئولوژیکی دو مدل توسط الگوریتم ژنتیک تخمین زده شدند. پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان و مدل هرشل بالکلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در جداول ۳-۳ و ۳-۴ آورده شده‌اند.

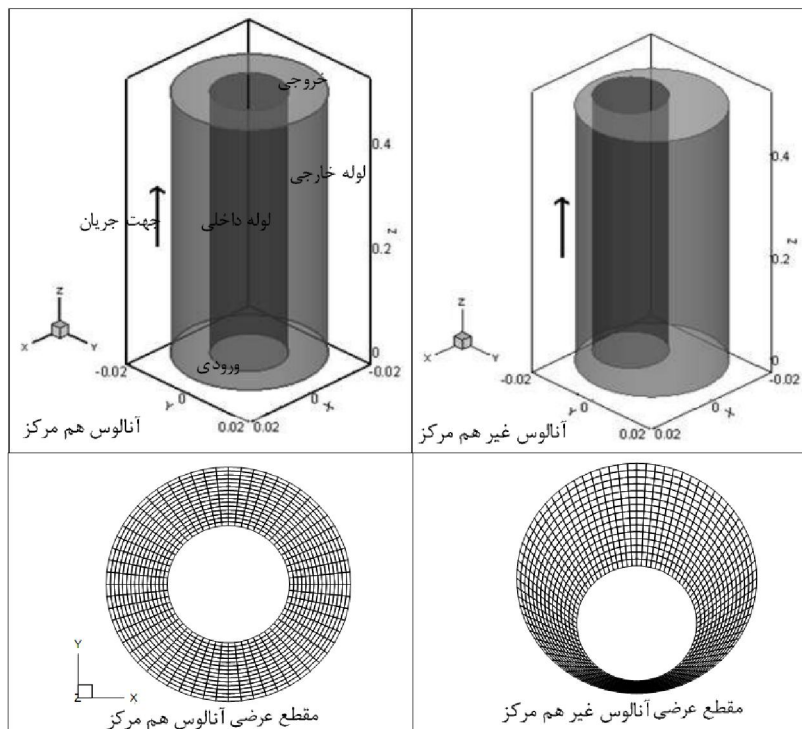
دانسیته کف با توجه به کیفیت آن و معادله (۳-۵) و همچنین دانسیته آب و گاز استفاده شده به عنوان فازهای اصلی تشکیل دهنده کف، برای سه کیفیت ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۲۰۰ و 100 kg/m^3 در نظر گرفته شد. شرایط زیر برای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است:

- جریان هم دما،

- حالت دائمی و آرام،

- سیال کف به عنوان سیال غیرنیوتنی همگن.

ابتدا در نرم افزار گمبیت^۱، هندسه مورد نظر فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز ($\epsilon=0/78$) ساخته و مش‌بندی شد و شرایط مرزی ورودی، خروجی و دیواره برای آن تعیین گردید. شکل ۵-۲ ساختار و مقطع عرضی هندسه مورد نظر را نشان می‌دهد. تعداد تقسیمات در فاصله حلقوی برابر با ۱۵، تعداد تقسیمات روی مقطع دایره حلقوی هم‌مرکز برابر با ۶۰ و در طول فضای حلقوی ۵۰۰ مش ($15 \times 60 \times 500$) می‌باشند. این تعداد مش برای فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($0/78$)، $15 \times 80 \times 400$ در نظر گرفته شد.



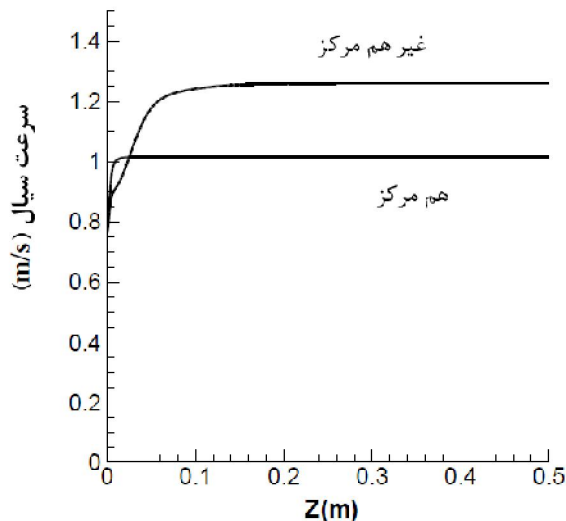
شکل ۵-۲: ساختار و مقطع عرضی فضای حلقوی هم مرکز و غیر هم مرکز

گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و ممنوم حاکم بر جریان (معادلات ج-۱ تا ج-۳) بر پایه روش حجم محدود می‌باشد که در آن میدان‌های فشار و سرعت با روش جداسازی متغیرها بدست می‌آیند و معادلات جفت شده، از روش تکرار عددی، حل می‌گردند. بدین منظور از الگوریتم سیمپل-سی^۱ که اصلاح شده الگوریتم سیمپل است، برای حل همزمان فشار و سرعت استفاده شده است. از الگوریتم کوئیک^۲ برای گسسته‌سازی معادلات اندازه حرکت با توجه به دقت مرتبه دوم آن و از الگوریتم PRESTO برای گسسته‌سازی فشار که در جریان‌های همراه با چرخش لوله موثر می‌باشد، استفاده گردید. برای گسسته‌سازی و حل معادلات از نرم افزار FLUENT 6.3.2 (FLUENT, 2006) استفاده گردید. معیارهای مختلفی برای بررسی همگرایی وجود دارد. معیار انتخاب شده در این مطالعه مقدار باقی‌مانده‌ها برای معادله پیوستگی و معادلات ممنوم می‌باشد که برای همه معادلات برابر 10^{-10} در نظر گرفته شده است. توسعه یافتگی جریان در اینجا در حدود کمتر از ۰/۱ متر رخ می‌دهد که برای

1- SIMPLEC

2-Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics (QUICK)

دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز در شکل ۵-۳ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که طول (Z) در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی به اندازه کافی بزرگ می‌باشد.



شکل ۵-۳: توسعه یافتگی جریان در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (سرعت ورودی سیال 0.762 m/s ، کیفیت کف 80% و مدل هرشل بالکلی)

به منظور کاهش وابستگی نتایج حاصل از حل جریان به شبکه تولید شده، تاثیر شبکه بر روی نتایج حاصل از حل جریان، مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، پنج شبکه با تراکم متفاوت انتخاب شده و مقدار فشار در فاصله 0.1 متر از انتهای لوله برای پنج شبکه برای سیال کف 70% و سرعت کف $2/5 \text{ ft/s}$ (0.76 m/s) مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج در جدول ۵-۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت زیادی بین جواب‌های شبکه‌های با سلول‌های بیشتر از $10 \times 40 \times 200$ وجود ندارد و برای بیشتر از این تعداد مش، حل مستقل از شبکه می‌باشد. ولی برای اطمینان بیشتر از نتایج حل عددی، تعداد تقسیمات در فاصله حلقوی برابر با ۱۵، تعداد تقسیمات روی مقطع دایره حلقوی هم‌مرکز برابر با ۶۰ و در طول فضای حلقوی ۵۰۰ مش ($15 \times 60 \times 500$) در نظر گرفته شد. این تعداد مش برای فضای حلقوی غیر هم‌مرکز (0.78) ($15 \times 80 \times 400$) در نظر گرفته شد.

جدول ۱-۵: بررسی شبکه‌های محاسباتی مختلف

شبکه				
۸×۶۰×۲۰۰	۱۰×۴۰×۲۰۰	۱۵×۶۰×۲۰۰	۱۵×۶۰×۵۰۰	۲۰×۸۰×۵۰۰
فشار در (Pa) $z/L=0.8$				
۷۶۲/۴۱	۷۶۵/۶۶	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۶۷

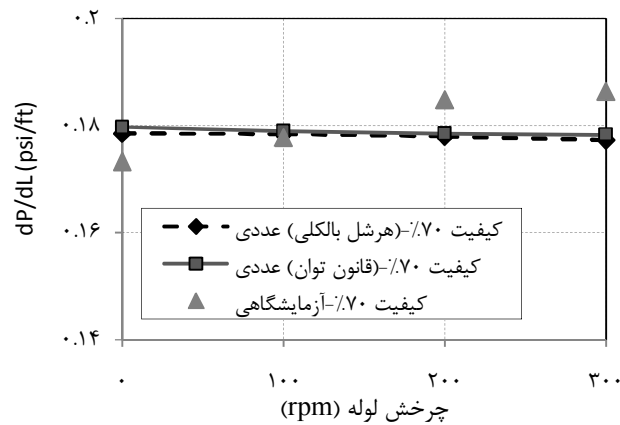
نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی آنها با نتایج آزمایشگاهی و روش شکاف معادل (قسمت ج-۲) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۵ تجزیه و تحلیل نتایج

۱-۲-۵ تاثیر مدل رئولوژیکی بر افت فشار

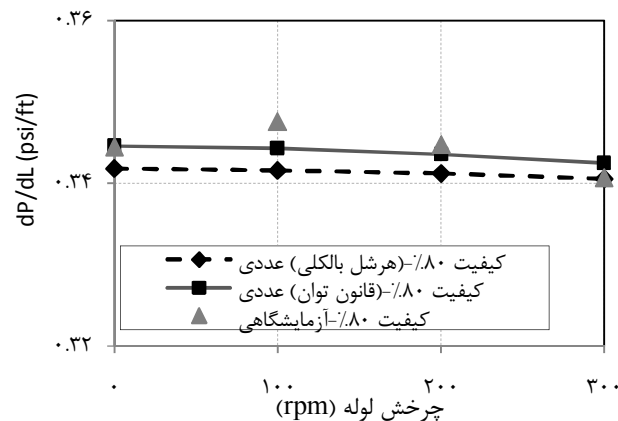
نتایج افت‌های فشار حاصل از مدلسازی عددی برای دو مدل قانون توان (PL) و هرشل بالکلی (HB) با داده‌های آزمایشگاهی (Duan, 2007) برای فضای حلقوی هم‌مرکز با سرعت‌های مختلف چرخش لوله و سرعت سیال برابر با 0.762 m/s ($2/5 \text{ ft/s}$) در شکل‌های ۴-۵ تا ۶-۵ برای کیفیت‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند.

در شکل ۴-۵، مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از حل عددی جریان سیال کف 70% با دو مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل بالکلی، در چرخش‌های مختلف لوله نشان داده شده است. نتایج آزمایشگاهی، افزایش در افت فشار با چرخش لوله را نشان می‌دهد که می‌تواند به خاطر ایجاد حالت تلاطم در کیفیت‌های پایین کف باشد. در حالی که نتایج عددی به مقدار خیلی جزئی کاهش افت فشار با افزایش چرخش لوله را نشان می‌دهد که تقریباً قابل چشم‌پوشی است. دلیل این کاهش، کاهش گرانروی موثر است که به نوبه خود اصطکاک نزدیک دیواره چرخشی کاهش یافته و باعث کاهش افت فشار می‌گردد. ولی اگر چرخش لوله در حدی باشد که باعث شکستن "لایه‌های خطی" جریان گردد، تلاطم القاء شده باعث افزایش افت فشار خواهد شد. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر عددی برای دو مدل HB و PL به ترتیب برابر با 3% و $3/1\%$ می‌باشد.

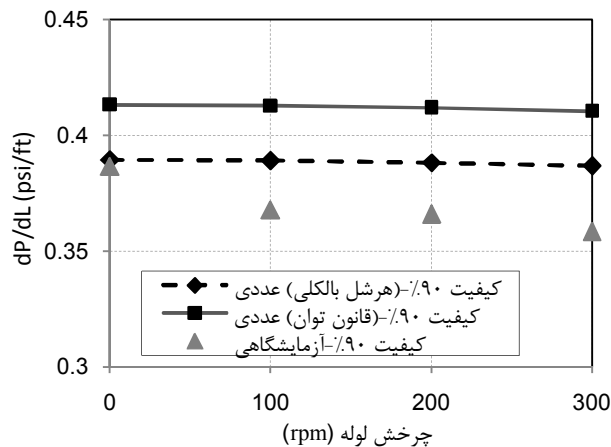


شکل ۴-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s و کیفیت کف برابر با 70%) در چرخش‌های مختلف لوله

شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ افت فشار حاصل از حل عددی برای دو مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل بالکلی را با نتایج آزمایشگاهی در کیفیت‌های بالای کف (80% و 90%) برای فضای حلقوی هم‌مرکز مقایسه می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد افت فشار به مقدار جزئی روند کاهشی با افزایش چرخش لوله دارد که این روند کاهشی ناشی از تاثیرات رفتار کاهش گرانروی در اثر افزایش نرخ برش است. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی برای دو مدل PL و HB برای کف 80% به ترتیب برابر با 0.08 و 0.05 و برای کف 90% برابر با 0.05 و 0.11 می‌باشد.



شکل ۵-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال 0.762 m/s و کیفیت کف برابر با 80%) در چرخش‌های مختلف لوله

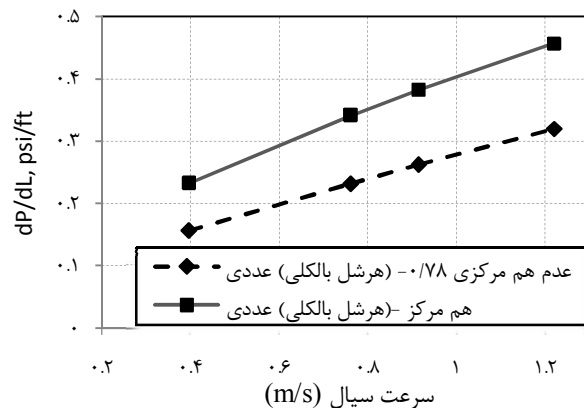


شکل ۵-۶: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی (سرعت سیال ۰/۷۶۲ m/s و کیفیت کف برابر با ۹۰٪) در چرخش‌های مختلف لوله

با وجود تطابق بهتر مدل هرشل-بالکلی به داده‌های تنش-کرنش برای کف ۰/۷ و مدل قانون توان برای کف ۰/۸ و ۰/۹، خطاهای حاصل از دو مدل، اختلاف چشم‌گیری با هم ندارند. در نتیجه با توجه به سادگی مدل قانون توان در شبیه‌سازی‌های عددی، بهتر است از مدل رئولوژیکی قانون توان برای محاسبات هیدرولیکی استفاده نمود.

۵-۲-۲ تاثیر سرعت سیال بر افت فشار

شکل ۵-۷، نتایج حاصل از حل عددی را برای سیال با مدل هرشل بالکلی برای دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز ($\mathcal{E}=0/78$) در سرعت‌های مختلف سیال در کیفیت کف ۰/۸ مقایسه می‌نماید. افت فشار با افزایش سرعت سیال در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز، افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که افت فشار در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز در صورت ثابت بودن سایر پارامترها، نسبت به حالت هم‌مرکز حدود ۰/۳ کمتر می‌باشد. علت این امر به خاطر این است که در فضای حلقوی هم‌مرکز عبور جریان از کل فضای حلقوی است و اصطکاک بیشتری بین سیال و دیواره‌ها به وجود می‌آید و افت فشار بیشتر می‌گردد.

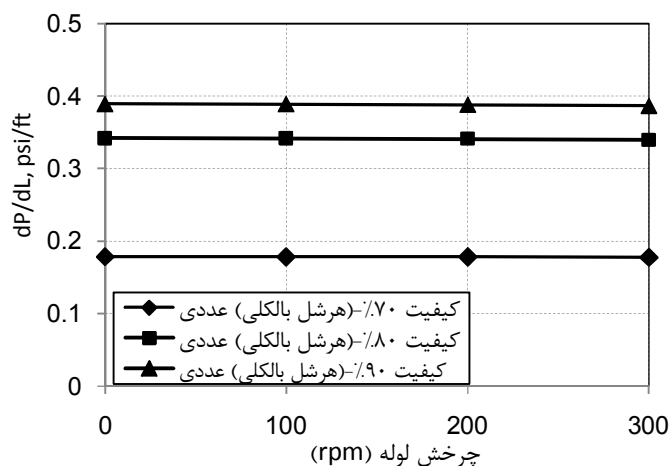


شکل ۷-۵: مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (مدل هرشل - بالکلی،

بدون چرخش لوله و کیفیت کف ۰/۸۰) در سرعت‌های مختلف سیال

۳-۲-۵ تاثیر کیفیت کف بر افت فشار

شکل ۵-۸، مقایسه‌ای بین افت فشار حاصل از حل عددی برای کیفیت‌های مختلف کف با مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش کیفیت کف، افت فشار نیز افزایش می‌یابد که متاثر از پارامترهای رئولوژیکی است. چون با افزایش کیفیت کف، تراکنش بین حباب‌ها و گرانروی موثر سیال افزایش می‌یابد و باعث افزایش افت فشار می‌گردد.



شکل ۵-۸: افت فشار حاصل از حل عددی برای کیفیت‌های مختلف کف در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل -

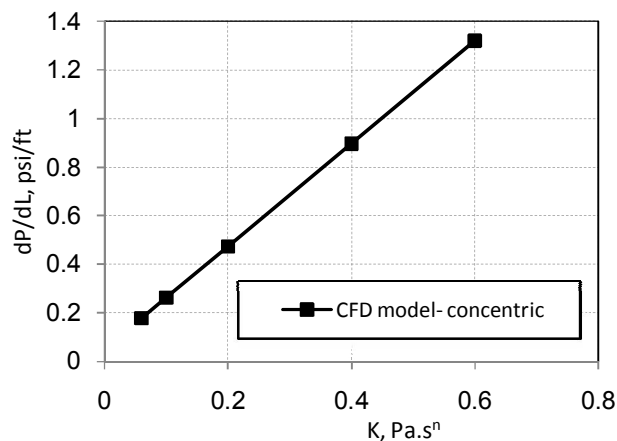
بالکلی (سرعت سیال ۰/۷۶۲ m/s) در چرخش‌های مختلف لوله

۴-۲-۵ تاثیر پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی بر افت فشار

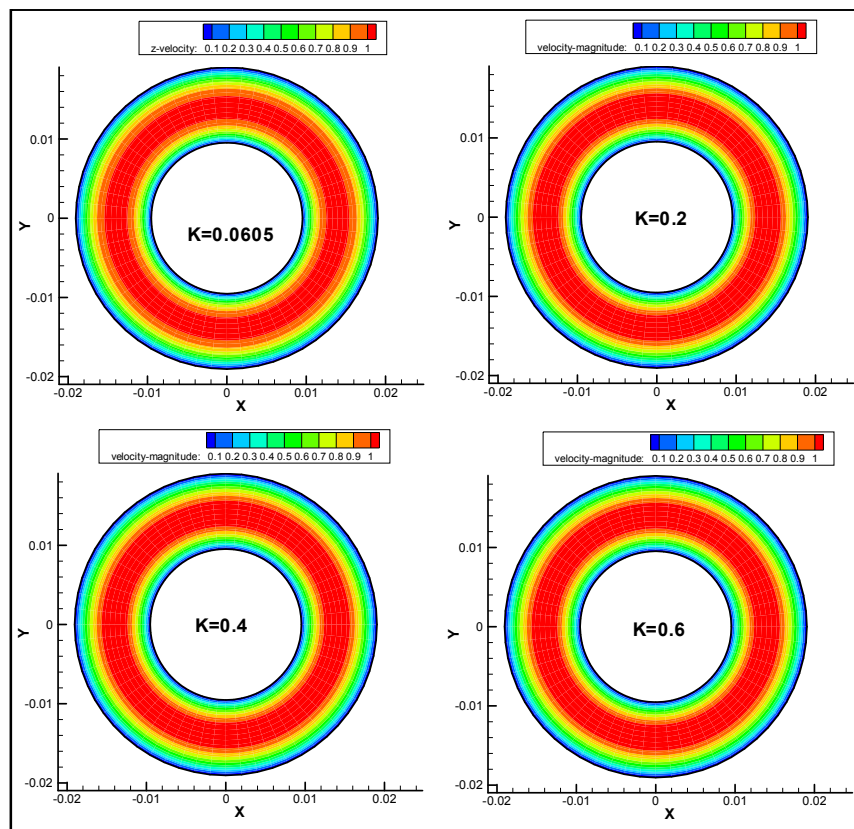
در این قسمت تاثیر سه پارامتر شاخص مقاومت سیال (K)، شاخص رفتاری سیال (n) و تنش تسلیمی (τ_y) بر افت فشار بررسی می‌گردد.

۱-۴-۲-۵ تاثیر شاخص مقاومت سیال

شکل ۹-۵، تاثیر شاخص مقاومت سیال بر افت فشار را در حالتی که بقیه پارامترهای رئولوژیکی سیال ($n=0.876$ و $\tau_y=3/5$) و سرعت سیال (0.762m/s) ثابت باشند را برای حالت بدون چرخش برای سیال کف با کیفیت ۷۰٪ نشان می‌دهد. با افزایش جزئی شاخص مقاومت سیال، افت فشار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۵-۱۰ پروفیل سرعت محوری سیال در مقادیر مختلف شاخص مقاومت سیال نشان داده شده است، همان‌طور که مشخص است، تغییر شاخص مقاومت سیال تاثیر چندانی در پروفیل سرعت ندارد.



شکل ۹-۵: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل بالکلی (سرعت سیال 0.762m/s)



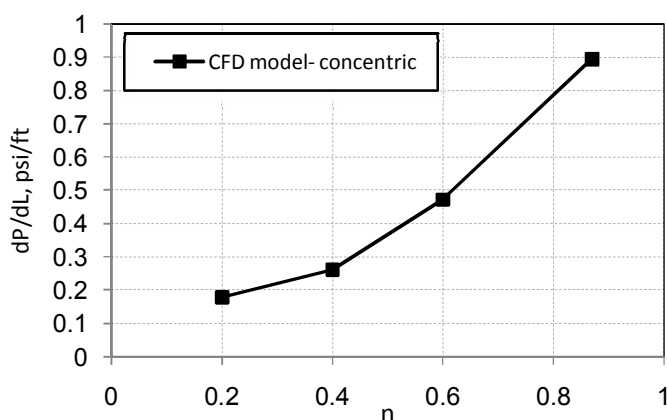
شکل ۵-۱۰: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر پروفیل سرعت

۵-۲-۴-۲ تاثیر شاخص رفتاری سیال

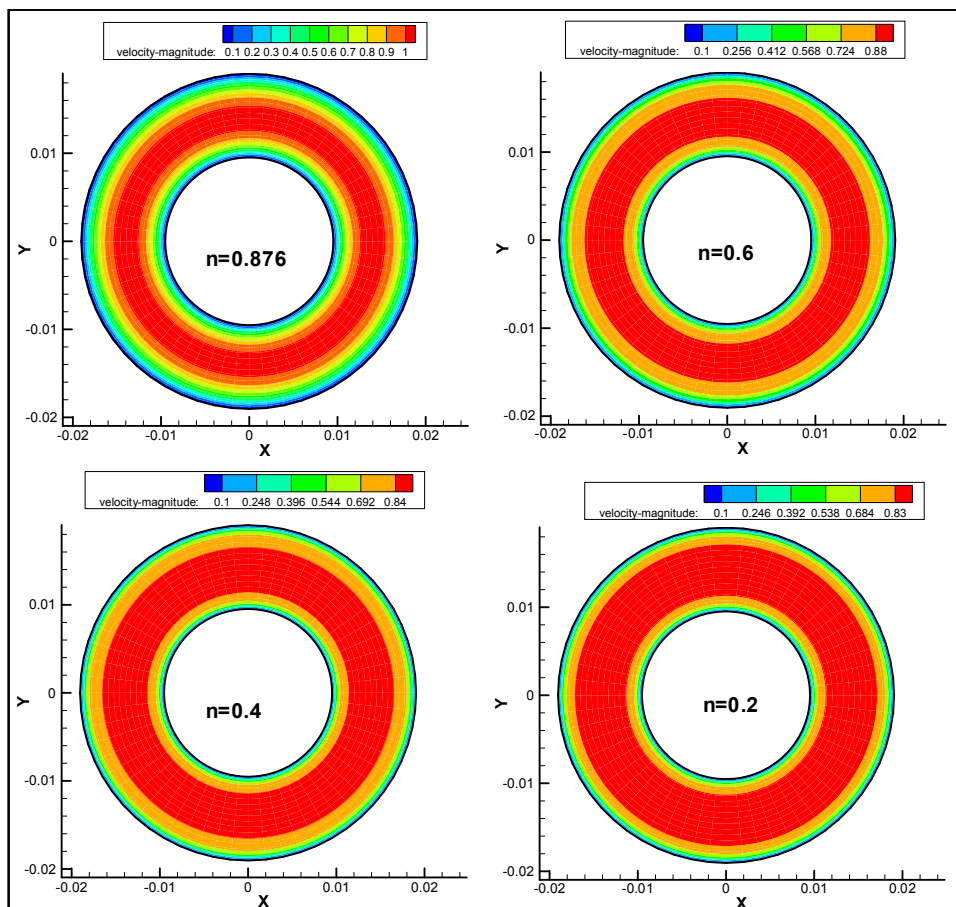
شکل ۵-۱۱ تاثیر شاخص رفتاری سیال بر افت فشار را در حالتی که بقیه پارامترهای رئولوژیکی سیال و شرایط جریان ($\tau_y = 3/5$ و $K = 0.0605$) ثابت باشند را نشان می‌دهد. به طور کلی افزایش طبیعت برشی-نازک شونده^۱ سیال، افت فشار را با توجه به کاهش در گرانروی موثر کاهش می‌دهد. برای سیال با شاخص رفتاری بالا، گرانروی موثر بالا است بنابراین تمامی نواحی در حالت جریان آرام می‌باشد. با کاهش شاخص رفتاری، طبیعت برشی-نازک شونده سیال افزایش می‌یابد و باعث کاهش در گرانروی موثر و در نتیجه کاهش افت فشار می‌گردد. هر چند این کاهش در گرانروی باعث افزایش عدد رینولدز و تغییر رژیم جریان در نواحی فضای حلقوی می‌گردد. بنابراین اگر افزایش طبیعت برشی-نازک شونده سیال باعث تغییر در رژیم جریان در نواحی محلی گردد،

1- Shear-thinning

می‌تواند باعث افزایش افت فشار گردد. جریان آرام سیالات نیوتنی از میان لوله و فضای حلقوی با پروفیل سرعت پارابولیک مشخص می‌گردد یعنی سرعت در دیواره به صفر می‌رسد و در مرکز به مقدار حداکثر خود می‌رسد. سیالات غیرنیوتنی ضرورتاً دارای پروفیل سرعت پارابولیک نیستند. با افزایش غیرنیوتنی سیال، پروفیل سرعت در مرکز (جریان پلاگ) هموارتر می‌شود. قطر پلاگ با افزایش خروج از حالت نیوتنی، افزایش می‌یابد (شکل ۵-۱۲). در قسمت هموار پروفیل سرعت، نرخ برشی نزدیک به صفر می‌باشد.



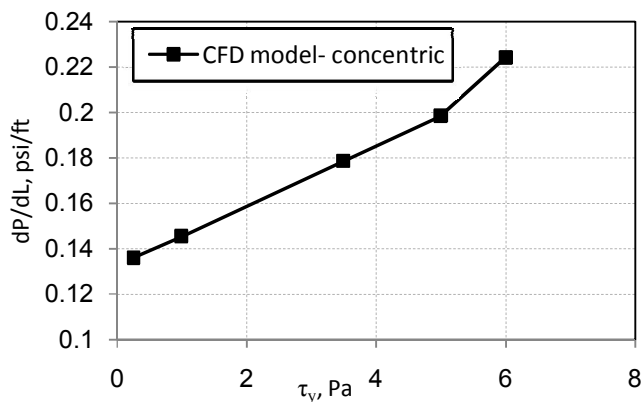
شکل ۵-۱۱: تاثیر شاخص رفتاری سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز برای مدل هرشل-بالکلی (سرعت سیال ۰/۷۶۲m/s)



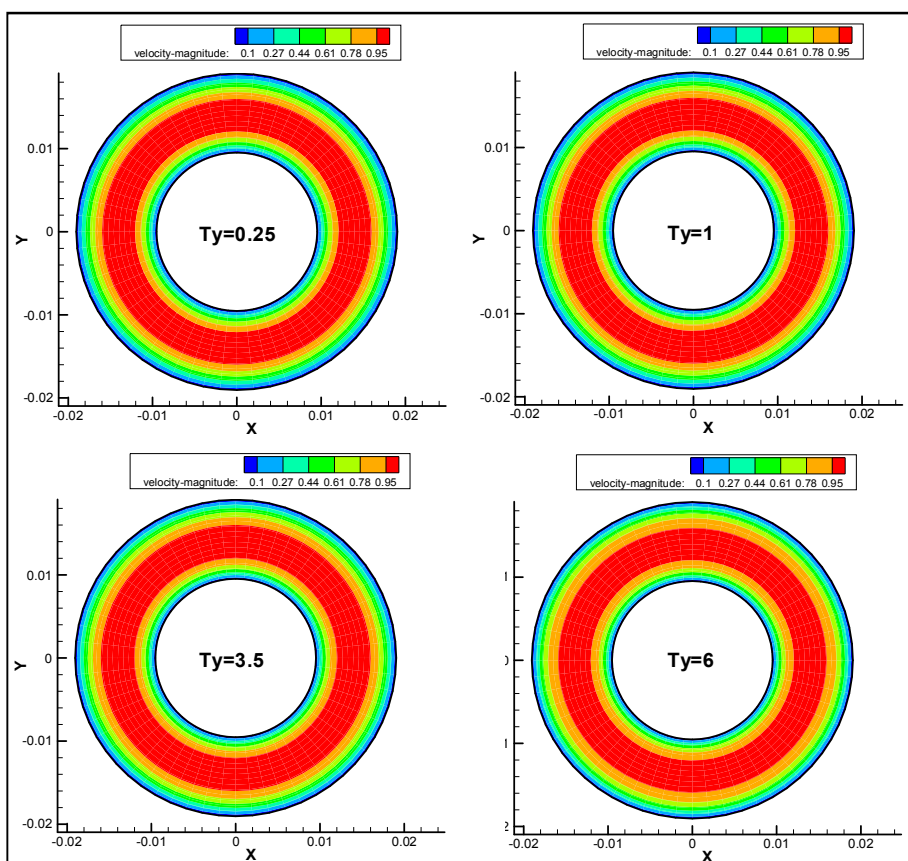
شکل ۵-۱۲: تاثیر شاخص رفتاری سیال بر پروفیل سرعت

۵-۲-۴-۳ تاثیر تنش تسلیمی

شکل ۵-۱۳ تاثیر تنش تسلیم سیال بر افت فشار، در حالتی که بقیه پارامترهای رئولوژیکی سیال ($n=0.876$ و $K=0.0605$) و شرایط جریان ($0.762m/s$) ثابت باشند را برای سیال کف با کیفیت ۷۰٪ در حالت بدون چرخش لوله داخلی، نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص است با افزایش تنش تسلیم سیال، افت فشار افزایش می‌یابد. در شکل ۵-۱۴ پروفیل سرعت سیال در مقطع عرضی برای مقادیر مختلف تنش تسلیمی نشان داده شده است، همان‌طور که مشخص است پروفیل سرعت‌ها اختلاف چندانی با هم ندارند.



شکل ۵-۱۳: تاثیر تنش تسلیم سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز (سرعت ورودی سیال ۰/۷۶۲m/s)

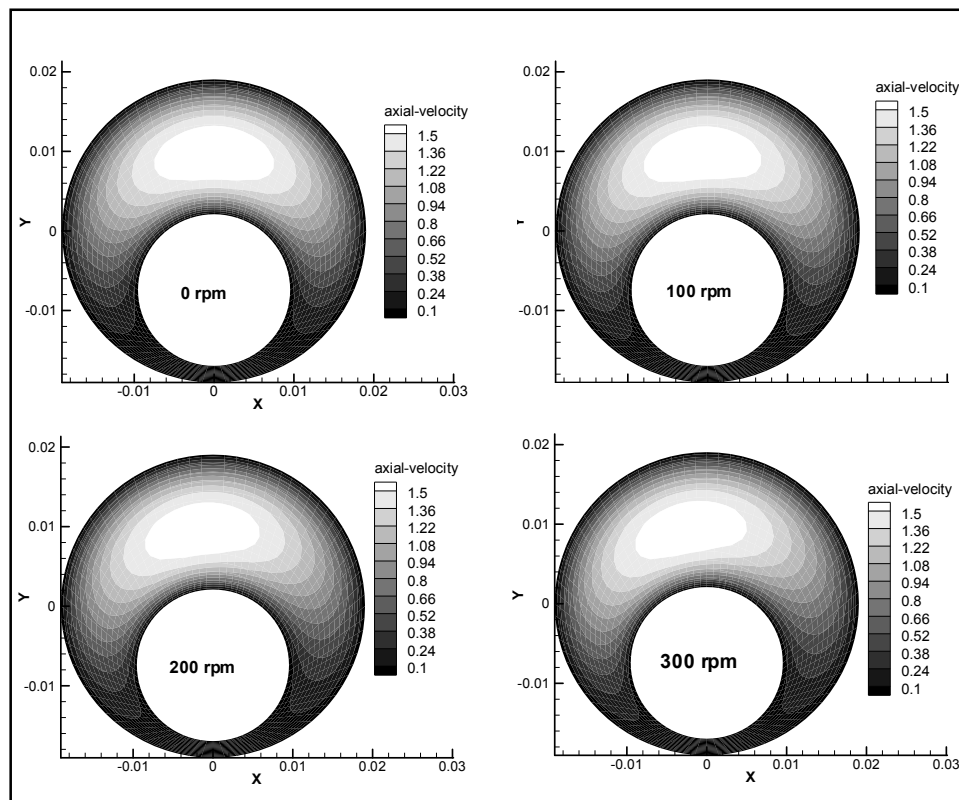


شکل ۵-۱۴: تاثیر تنش تسلیم سیال بر پروفیل سرعت در فضای حلقوی هم‌مرکز

۵-۲-۵ تاثیر چرخش لوله داخلی بر پروفیل سرعت جریان سیال کف

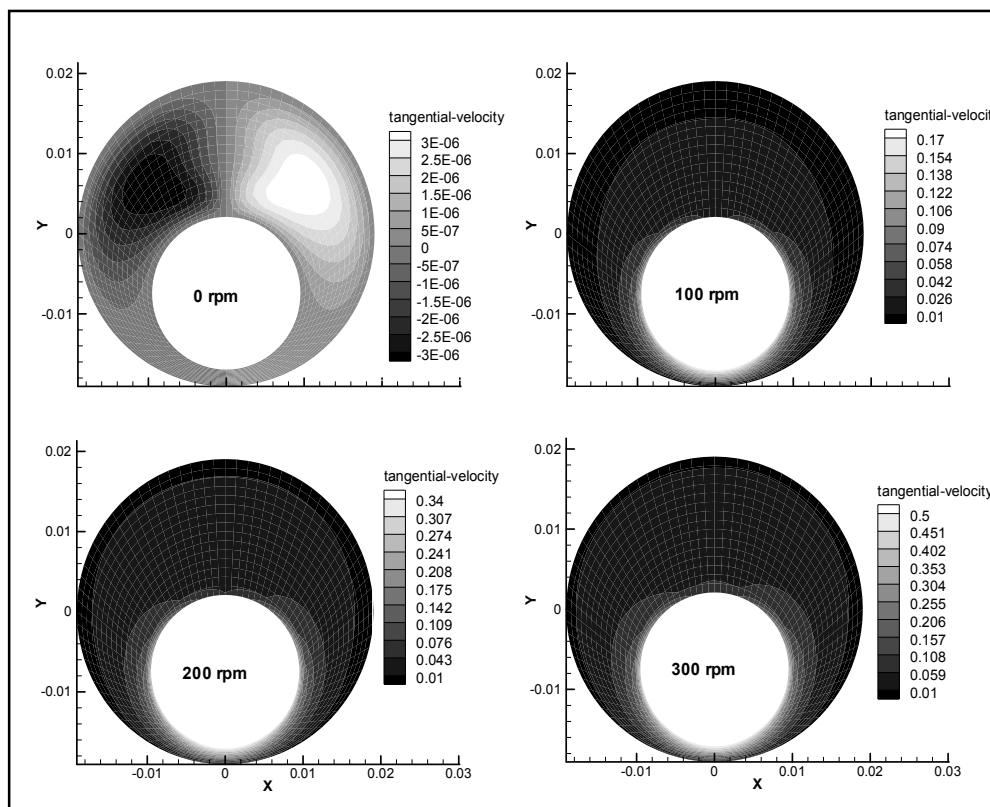
چرخش لوله باعث ایجاد جریان‌های ثانویه در فضای حلقوی می‌گردد. سرعت ثانویه در فضای حلقوی دارای تاثیر به سزایی در تمیزکاری چاه و در به هم زدن بستر تشکیل شده از خرده‌ها در

فضای حلقوی دارد. شکل ۵-۱۵، تاثیر چرخش لوله بر سرعت محوری را در فضای حلقوی با عدم هم‌مرکزی ۰/۷۸ برای کف ۸۰٪ نشان می‌دهد. بیشتر جریان سیال از قسمت گشادتر شکاف می‌گذرد و سرعت محوری در قسمت باریک حتی با چرخش لوله، اغلب صفر است. نتایج حل عددی نشان می‌دهند که چرخش لوله تاثیر چشم‌گیری در پروفیل سرعت محوری در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($\varepsilon=0.78$) ندارد و مرکز سرعت محوری بیشینه را برای چرخش لوله به مقدار کم جابجا می‌کند. چرخش لوله باعث توزیع دوباره سرعت در فضای حلقوی شده که این حالت بیشتر در تمیزکاری چاه‌های افقی و شیب‌دار موثر است که از تشکیل بستر خرده‌ها در فضای حلقوی جلوگیری می‌کند. پروفیل سرعت مماسی وابسته به چرخش لوله است و با شعاع کاهش می‌یابد، و به تدریج در دیواره لوله خارجی به صفر می‌رسد.



شکل ۵-۱۵: کنتور سرعت محوری (m/s) جریان کف با کیفیت ۸۰٪ در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز در سرعت‌های مختلف چرخش لوله (سرعت ورودی سیال ۰/۷۶۲m/s و مدل هرشل بالکلی)

شکل ۵-۱۶، سرعت مماسی در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($\mathcal{E}=0/78$) را برای کف ۸۰٪ در سرعت‌های مختلف چرخش لوله نشان می‌دهد. با افزایش سرعت چرخش لوله، تاثیر آن بر سرعت مماسی بیشتر شده و از گستردگی بیشتری در قسمت پهن فضای حلقوی برخوردار است که می‌تواند به انتقال بیشتر خرده‌ها در فضای حلقوی کمک کند.

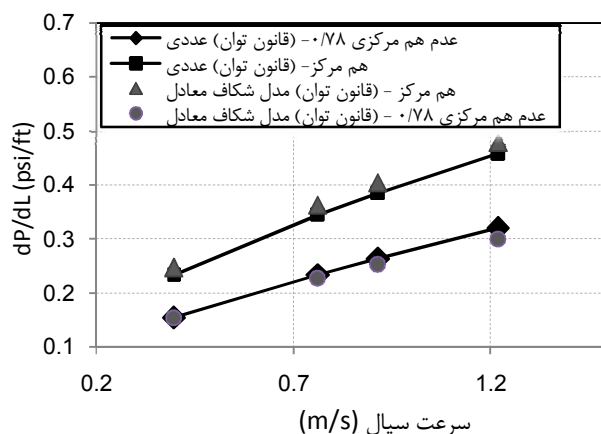


شکل ۵-۱۶: کنتور سرعت مماسی (m/s) جریان کف با کیفیت ۸۰٪ در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($0/78$) در سرعت‌های مختلف چرخش لوله (سرعت سیال $0/762$ m/s و مدل هرشل بالکلی)

۵-۳ مقایسه نتایج روش شکاف معادل و حل عددی برای مدل رئولوژیکی قانون توان

در شکل ۵-۱۷، نتایج افت فشار حاصل از مدلسازی عددی و روش شکاف معادل برای سیال قانون توان در حالتی که لوله حفاری بدون چرخش است، در سرعت‌های مختلف سیال کف با کیفیت ۸۰٪ در فضای حلقوی هم‌مرکز و فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($\mathcal{E}=0/78$) نشان داده شده است. با توجه به پارامترهای مسئله و معادله (۵-۹)، مقدار ضریب تصحیح فضای حلقوی در شکاف معادل برابر با

۰/۶۲۴ محاسبه گردید، یعنی $(\Delta P_{ecc} = 0.624 \Delta P_{con})$. مقایسه نتایج بین مقادیر افت فشار حاصل از حل عددی و مدل شکاف معادل حاکی از انطباق خوب آنها بوده و اختلاف جزئی (خطای نسبی کمتر از ۵٪) با همدیگر دارند.



شکل ۵-۱۷: افت فشار حاصل از حل عددی و شکاف معادل در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (۰/۷۸) برای مدل قانون توان (کیفیت کف ۰/۸۰، چرخش لوله ۰ rpm)

۴-۵ جمع بندی

شبیه‌سازی عددی افت فشار با استفاده از روش حجم محدود در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز چاه انجام گرفت. تأثیر پارامترهای مختلف از جمله رئولوژی سیال کف، سرعت سیال کف، کیفیت کف، چرخش لوله حفاری و عدم هم‌مرکزی لوله و چاه، بر افت فشار بررسی شدند. نتایج عددی در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی پیشین است. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی برای دومدل *HB* و *PL* برای کف ۰/۷، به ترتیب برابر با ۳٪ و ۳/۱٪، برای کف ۰/۸ برابر با ۰/۸٪ و ۰/۵٪ و برای کف ۰/۹ برابر با ۵/۱٪ و ۱۱٪ است. بنابر این اگر خطای حاصل از برآزش دو مدل به داده‌های تنش- کرنش ناچیز باشد، می‌توان از مدل قانون توان معادل با مدل هرشل- بالکلی، با توجه به سادگی این مدل، در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که افت فشار با افزایش سرعت سیال و کیفیت کف افزایش، و با افزایش چرخش لوله کاهش می‌یابد. همچنین افت فشار حاصل برای فضای حلقوی هم‌مرکز در شرایط

جریانی یکسان، نسبت به فضای حلقوی غیرهم‌مرکز بیشتر است. چرخش لوله تأثیر چشم‌گیری در سرعت محوری ندارد و به مقدار کم باعث جابجایی هسته سرعت محوری بیشینه در جهت چرخش لوله در عدم هم‌مرکزی بالا (۰/۷۸) می‌شود. ولی با توجه به ایجاد سرعت مماسی با چرخش لوله، این پدیده در تمیزسازی چاه در حالت‌های افقی و شیب‌دار بسیار مفید است. نتایج افت فشار حاصل از حل عددی می‌تواند در طراحی فشار مورد نیاز پمپ در حفاری مفید واقع شود و از هزینه‌های جانبی بکاهد. در فصل بعدی جریان دو فازی مایع- جامد (انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف) شبیه‌سازی می‌گردد.

فصل ششم: مدل سازی انتقال خرده‌های
حفاری با کف توسط دینامیک سیالات
محاسباتی

در مورد جریان‌های چند فاز در طبیعت، مسائل زیادی وجود دارند. مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری یکی از این موارد می‌باشد. در این فصل از مدل اویلری-دانه‌ای (پیوست ج) نرم افزار فلونت برای مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری استفاده می‌گردد و تاثیر پارامترهای عملیاتی مختلف بر انتقال خرده‌ها بحث می‌گردد.

۱-۶ هندسه فضای حلقوی، شرایط مرزی و حل معادلات حاکم

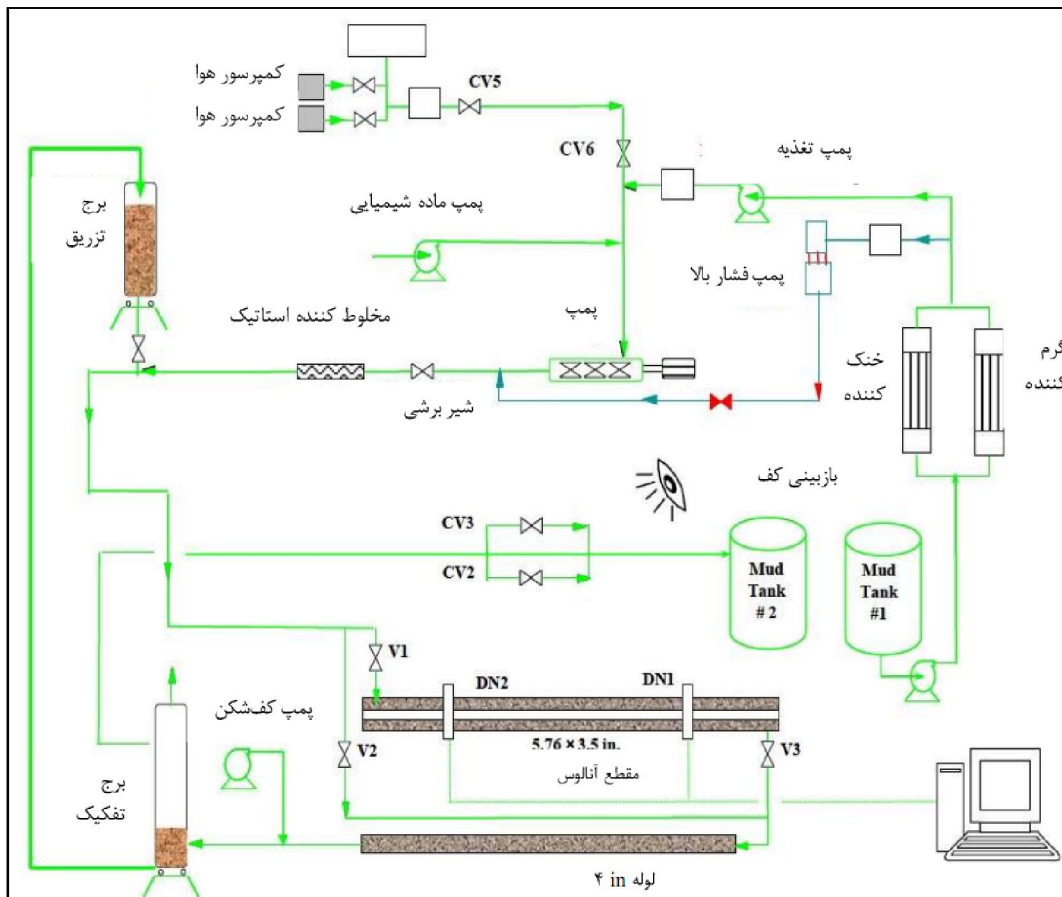
برای شبیه‌سازی جریان دو فاز مایع-جامد مربوط به انتقال خرده‌ها توسط سیال کف، دستگاه پیشرفته انتقال خرده‌ها^۱ (ACTF) در دانشگاه تولسا که با شیب‌های مختلف می‌تواند طراحی گردد، در نظر گرفته شد (Duan et al., 2010; Chen et al., 2007). قطر خارجی لوله داخلی D_i و قطر داخلی لوله خارجی D_o به ترتیب برابر $88/95\text{mm}$ ($3/5\text{in}$) و $148/3\text{mm}$ ($5/76\text{in}$) و طول لوله‌ها $22/25\text{m}$ (73ft) می‌باشد. شماتیکی از دستگاه آزمایشگاهی در شکل ۱-۶ آورده شده است. برای اندازه‌گیری غلظت حجمی خرده‌ها در دستگاه آزمایشگاهی دو دانسیته‌سنج در فاصله ۴ و $8/5$ متر از انتهای لوله‌ها قرار داده شده است. پس از به حالت پایدار رسیدن قرائت دو دانسیته‌سنج، توسط رابطه زیر مقدار غلظت حجمی خرده‌ها محاسبه گردیده است.

$$\rho_{mix} = c\rho_c + (1-c)\rho_f \quad (1-6)$$

که در آن:

ρ_{mix} دانسیته مخلوط، ρ_c دانسیته خرده‌ها، ρ_f دانسیته کف و c غلظت حجمی خرده‌ها.

1- Advanced Cuttings transport Facility (ACTF)

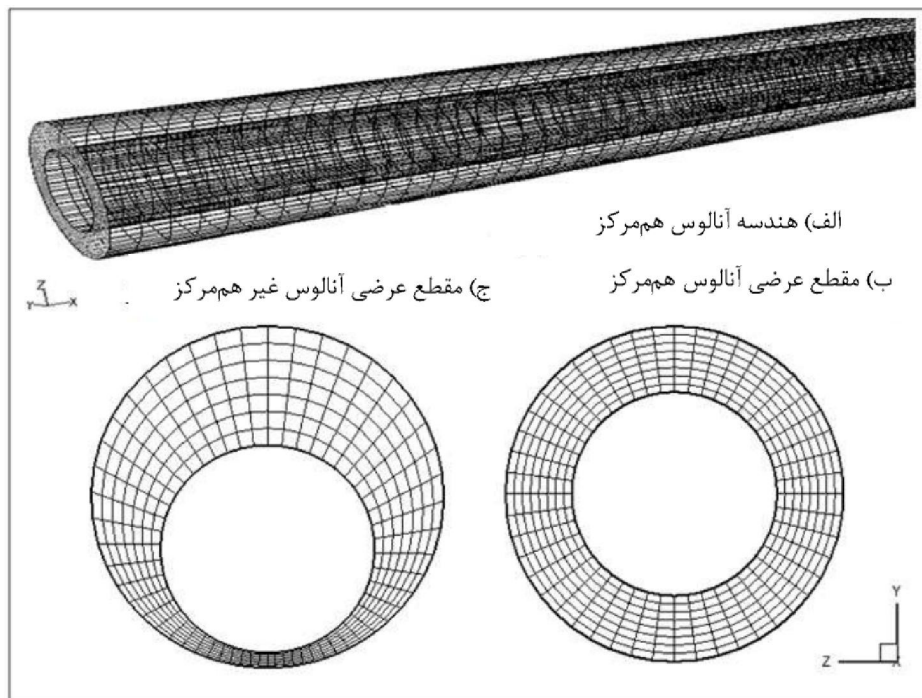


شکل ۶-۱: طرح شماتیک از دستگاه پیشرفته انتقال خرده‌ها (اصلاحی از Duan et al., 2010)

برای شبیه‌سازی، هندسه مورد نظر در دو وضعیت فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز ($\mathcal{E}=0/78$) در نرم افزار گمبیت طراحی و مش‌بندی شد و مرزهای ورودی (سرعت سیال)، خروجی (فشار) و دیواره داخلی (لوله حفاری) و خارجی (لوله جداری) آن مشخص گردید. تعداد مش‌های فضای حلقوی تا جایی افزایش داده شد تا دیگر حساسیتی به تعداد مش نباشد. بنابراین تعداد مش برابر با ۱۹۲۰۰۰ در نظر گرفته شد (شکل ۶-۲). شرایط زیر برای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است:

- جریان هم‌دما،
- حالت دائمی و آرام،
- سیال کف به عنوان سیال غیرنیوتنی همگن،
- ذرات کروی و هم‌اندازه.

معادلات حاکم جریان چند فازی مدل اویلری-دانه‌ای ارائه شده در پیوست ج (معادلات ج-۱۱ تا ج-۱۸)، توسط نرم افزار فلونت گسسته سازی و حل گردید. برای گسسته سازی معادلات از روش کوئیک و برای جفت شدگی فشار و سرعت از الگوریتم phase coupled SIMPLE که توسعه یافته الگوریتم SIMPLE است، استفاده گردید. فرآیند شبیه‌سازی عددی در شکل ج-۱ آورده شده است.



شکل ۲-۶: هندسه و شبکه محاسباتی فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز

۲-۶ بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال خرده‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج

برای بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی انتقال خرده‌ها، پارامترها به صورت زیر انتخاب شدند. سه نوع سیال کف با کیفیت‌های ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته شدند. برای بررسی تاثیر مدل رئولوژیکی بر انتقال خرده‌ها، دو مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی و قانون توان استفاده شد که پارامترهای رئولوژیکی این دو مدل در جداول ۳-۵ و ۳-۶ در شرایط فشار مختلف، آورده شده است. دانسیته کف نیز با توجه به معادله (۳-۵) به ترتیب برای سیال کف با کیفیت ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ برابر با ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب می‌باشد. برای هر کدام از کف‌ها، ۴ سرعت سیال ۲، ۳، ۴

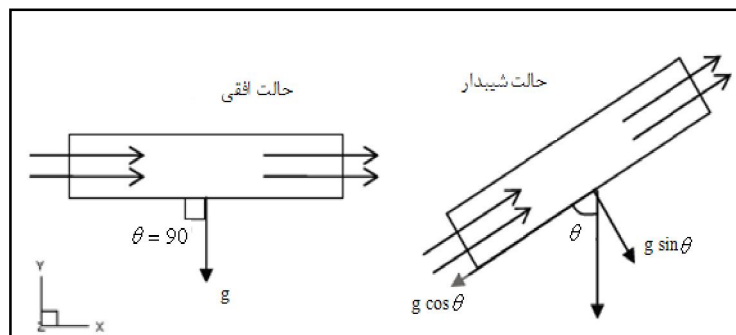
و ۵ فوت بر ثانیه (۰/۶۱، ۰/۹۱۴، ۱/۲۱۹ و ۱/۵۲۴ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شد. برای بررسی تاثیر قطر ذرات کروی، سه قطر ۱mm، ۳ و ۵ با دانسیته ذره ۲۶۱۰ کیلو گرم بر متر مکعب و تخلخل ۰/۳۸ در مدل‌سازی لحاظ شد.

سه سرعت حفاری مختلف (ROP) ۵۰، ۶۰ و ۸۰ فوت بر ساعت با توجه به نرخ تزریق ۱۵ تا ۳۰ پوند بر دقیقه (lb/min) در نظر گرفته شد و برای مشخص کردن درصد حجمی و سرعت فاز جامد در ورودی نرم افزار فلوئنت، با در نظر گرفتن یک درصد حجمی ثابت ۰/۵ (نسبت تزریق جامد به کل حجم تزریق)، برای هر سرعت حفاری، سرعت فاز جامد در ورودی با توجه به رابطه (۲-۲۴) بدست آمد که نتایج سرعت فاز جامد در جدول ۶-۱ آورده شده است. این مقادیر در مدل به واحد متر بر ثانیه تبدیل گردید.

جدول ۶-۱: سرعت ورودی فاز جامد (خرده‌ها)

ROP(ft/h)	سرعت خرده‌ها (ft/s)
۵۰	۰/۲۷
۶۰	۰/۳۲
۸۰	۰/۴۴

شیب‌های در نظر گرفته شده برای فضای حلقوی در این مطالعه نسبت به حالت قائم 0° (قائم)، 15° ، 30° ، 45° ، 65° ، 75° و 90° (افقی) می‌باشند که برای اعمال شیب در نرم افزار فلوئنت با توجه به شکل ۶-۳، مولفه‌های برداری مقدار گرانی در شرایط عملیاتی نرم افزار فلوئنت در جدول ۶-۲، و در جدول ۶-۳ نیز خلاصه پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی عددی آورده شده است.



شکل ۶-۳: نیروی عمل‌کننده گرانی با توجه به شیب چاه

جدول ۲-۶: مقادیر ورودی مدل برای بررسی تاثیر گرانی در شیب‌های مختلف

زاویه نسبت به قائم (درجه)	g در راستای X	g در راستای Y
۰	-۹/۸۱	۰
۱۵	-۹/۴۷۵	-۲/۵۳۹
۳۰	-۸/۴۹۵	-۴/۹۰۵
۴۵	-۶/۹۳۶	-۶/۹۳۶
۶۵	-۴/۱۴۵	-۸/۸۹
۷۵	-۲/۵۳۹	-۹/۴۷۵
۹۰	۰	-۹/۸۱

جدول ۳-۶: خلاصه‌ای از پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی انتقال خرده‌ها با استفاده از کف

پارامتر	مقادیر
اندازه فضای حلقوی	۳/۵" در ۵/۷۶"
عدم هم‌مرکزی	۰ و ۰/۷۸
سرعت سیال کف (ft/s)	۲، ۳، ۴ و ۵
کیفیت کف (%)	۷۰، ۸۰ و ۹۰
شیب چاه	۰° (قائم)، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵°، ۶۵° و ۷۵° و ۹۰° (افقی)
دما (F)	۸۰°
فشار محیطی (psi)	۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰
چرخش لوله (rpm)	۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰
اندازه خرده‌ها (mm)	۱، ۳ و ۵
دانسیته خرده‌ها (kg/m ³)	۲۶۱۰
سرعت حفاری (ft/hr)	۵۰، ۶۰ و ۸۰

در این مطالعه از رابطه نسبت انتقال خرده‌ها^۱ (رابطه ۲-۶) و (۲-۱۷)) ارائه شده توسط سیفرمن

همکاران (Sifferman et al., 1974) که در فصل دوم توضیح داده شده، برای محاسبه نسبت انتقال

خرده‌ها با توجه به نتایج شبیه‌سازی CFD استفاده گردید:

$$R_T = \frac{V_t}{V_a} \quad (۲-۶)$$

که در آن:

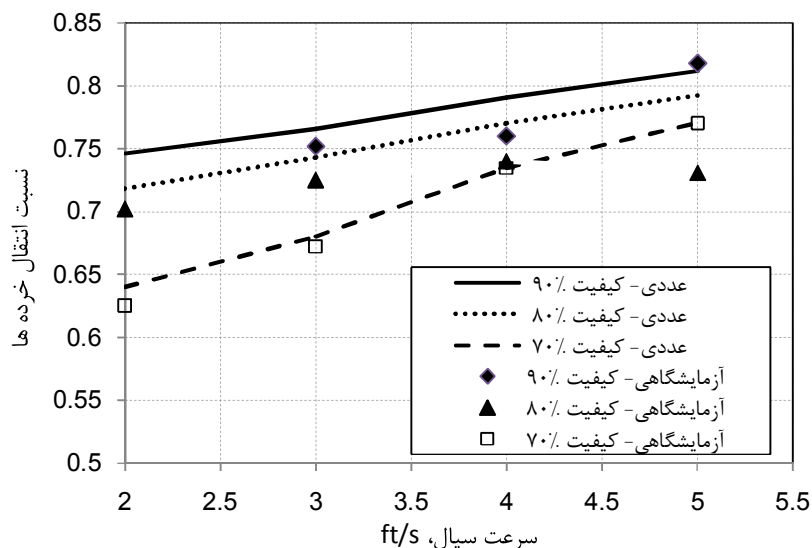
1- Cuttings transport ratio

R_T نسبت انتقال خرده‌ها، V_t متوسط سرعت خرده‌ها در فضای حلقوی و V_a سرعت متوسط سیال در فضای حلقوی با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD می‌باشد. نسبت انتقال خرده‌ها با غلظت حجمی خرده‌ها (c) در فضای حلقوی به صورت رابطه (۳-۶) مربوط می‌شود:

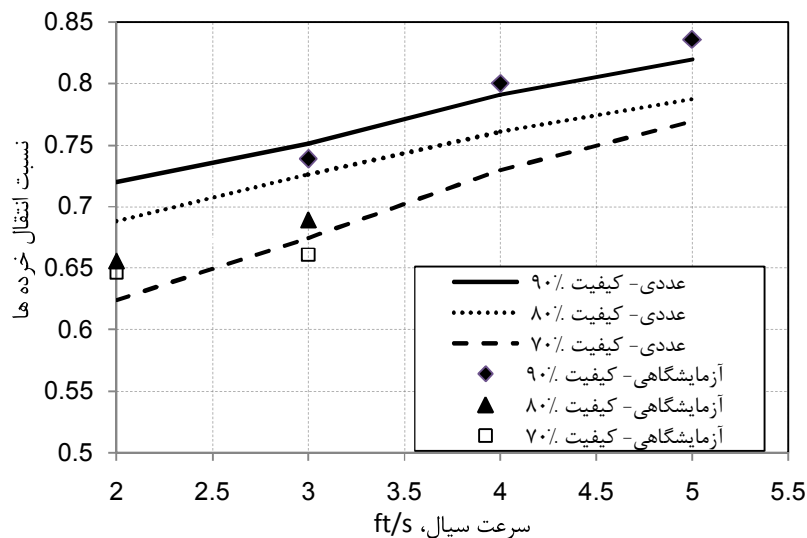
$$R_T = 1 - c \quad (3-6)$$

۱-۲-۶ تاثیر سرعت و کیفیت سیال کف

برای اعتبارسنجی روش عددی، نتایج شبیه‌سازی نسبت انتقال خرده‌ها به صورت تابعی از سرعت سیال برای کیفیت‌های مختلف، برای ذرات با قطر ۳ میلی‌متر، سرعت حفاری ۵۰ ft/h، فشار محیطی ۱۰۰ psi و در حالت بدون چرخش لوله برای دو فضای حلقوی هم‌مرکز (Chen et al., 2007; Chen, 2005) و غیر هم‌مرکز (Duan, 2007; Duan et al., 2010) افقی با در نظر گرفتن مدل رئولوژیکی قانون توان (جدول ۳-۶) در شکل‌های ۴-۶ و ۵-۶ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج CFD انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و خطای نسبی کمتر از ۸٪ را برای تمام موارد نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: تاثیر سرعت سیال و کیفیت کف بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز

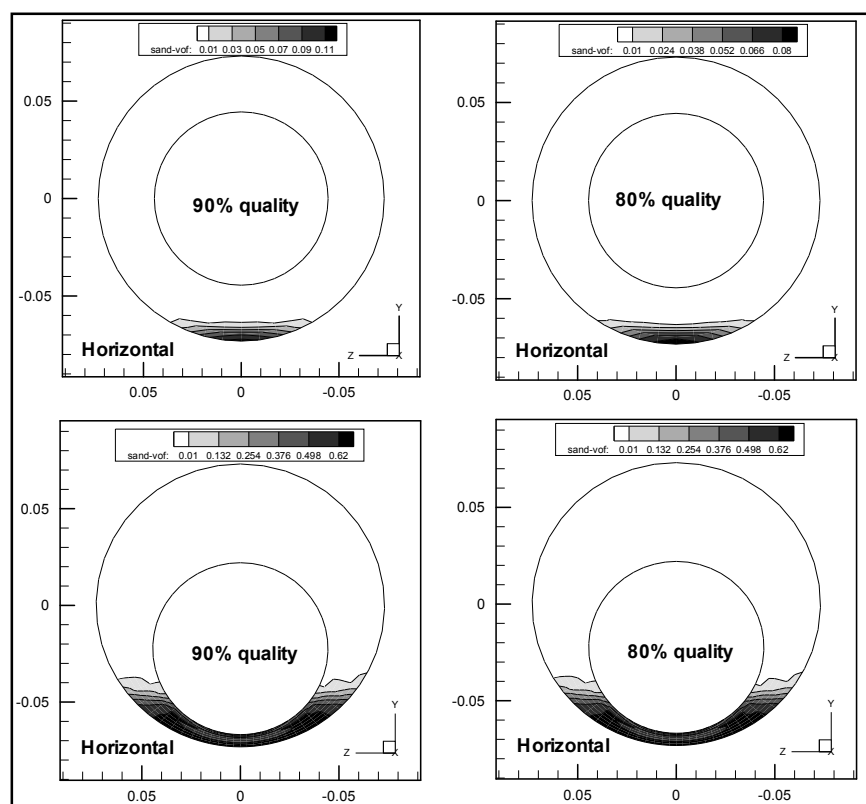


شکل ۵-۶: تاثیر سرعت سیال و کیفیت کف بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز

با افزایش سرعت کف در راستای محوری، نیروی پسا وارد بر خرده‌ها افزایش یافته و باعث افزایش نسبت انتقال می‌گردد. سرعت سیال می‌تواند بیشترین تاثیر را در انتقال خرده‌ها داشته باشد. همچنین با افزایش کیفیت کف، مقدار شاخص مقاومت سیال (K) افزایش و مقدار شاخص رفتاری سیال (n) کاهش می‌یابد و پروفیل هموارتری از سرعت در آنولوس ایجاد می‌گردد. پروفیل هموارتر سرعت به معنی این است که خرده‌ها شانس بیشتری را برای در معرض قرار گرفتن در سرعت‌های بالای فضای حلقوی دارند و احتمال ته‌نشینی کمتر می‌گردد. بنابر این با افزایش کیفیت کف، قابلیت انتقال کف افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت سیال و کیفیت کف، افت فشار نیز افزایش می‌یابد و توان پمپ بیشتری برای پمپاژ گل لازم است و باعث افزایش هزینه و استهلاک دستگاه‌ها می‌شود. در نتیجه باید حالت بهینه‌ای در انتخاب سیال در نظر گرفته شود.

شکل ۶-۶، تاثیر کیفیت کف بر توزیع خرده‌ها را در آنولوس هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی، برای دو کیفیت ۸۰٪ و ۹۰٪ با مدل رئولوژیکی قانون توان نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کف با کیفیت بالاتر دارای دانسیته کمتری است، بنابر این با افزایش کیفیت کف نیروی شناوری کاهش می‌یابد و حداکثر فشردگی خرده‌ها در فضای حلقوی افزایش می‌یابد. ولی همان‌طور که اشاره شد، کف با کیفیت بالاتر با توجه به گرانشی بالاتر آن و متعاقب آن نیروی پسا بیشتر، دارای قابلیت انتقال بیشتری است.

همچنین با توجه به شکل ۶-۶، در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز، فشردگی خرده‌ها در قسمت باریک‌تر نزدیک دیواره پایینی چاه در حالت افقی، خیلی بیشتر از فضای حلقوی هم‌مرکز است. این فشردگی باعث می‌شود که بیشتر سیال از قسمت بالایی فضای حلقوی عبور کند و نسبت به حالت هم‌مرکز فضای کمتر برای عبور سیال و خرده‌ها وجود خواهد داشت و به همین نسبت قابلیت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز کاهش می‌یابد.

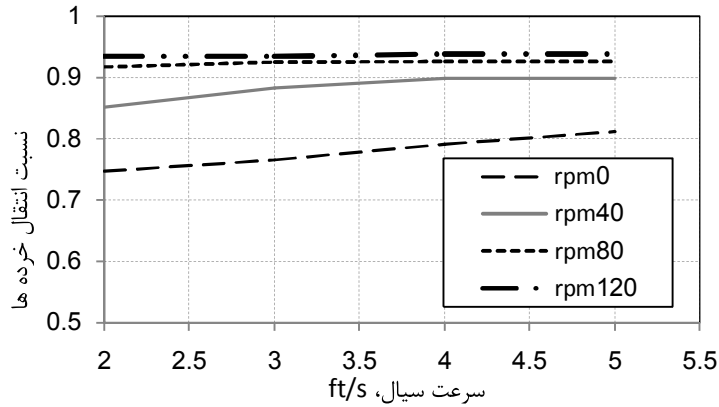


شکل ۶-۶: تاثیر کیفیت کف بر توزیع خرده‌ها در دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال ۵ ft/s)

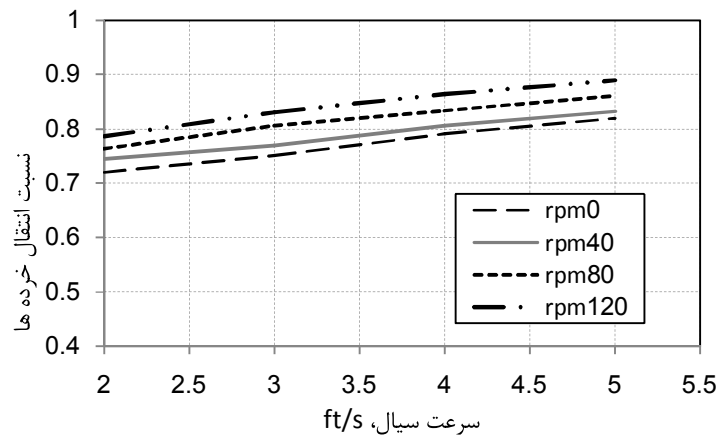
۶-۲-۲ تاثیر چرخش لوله حفاری

چرخش لوله به طور چشم‌گیری در تخریب بستر خرده‌ها به‌خصوص در چاه‌های شیب‌دار تاثیر می‌گذارد ولی با توجه به محدودیت‌های موجود در عملیات حفاری سرعت چرخش لوله نمی‌تواند از حد مجازی بالاتر رود. تاثیر چرخش لوله بر انتقال خرده‌های حفاری در دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی در حالت سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت، قطر ذرات ۳ mm، کیفیت کف ۹۰٪ با

مدل قانون توان و فشار ۱۰۰psi در شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، نسبت انتقال خرده‌ها با افزایش چرخش لوله، افزایش می‌یابد.

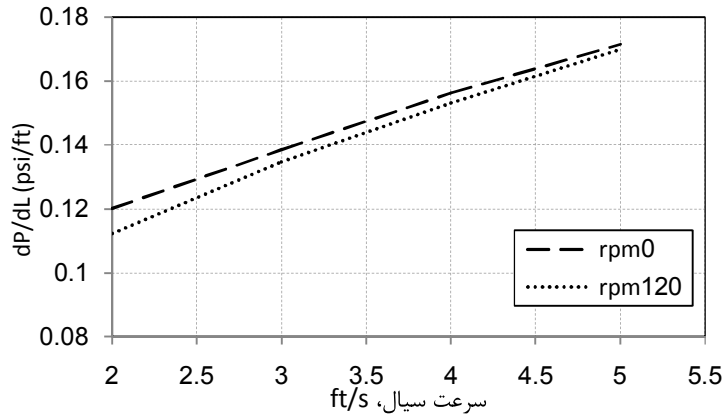


شکل ۶-۷: تاثیر چرخش لوله بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=90^\circ$)



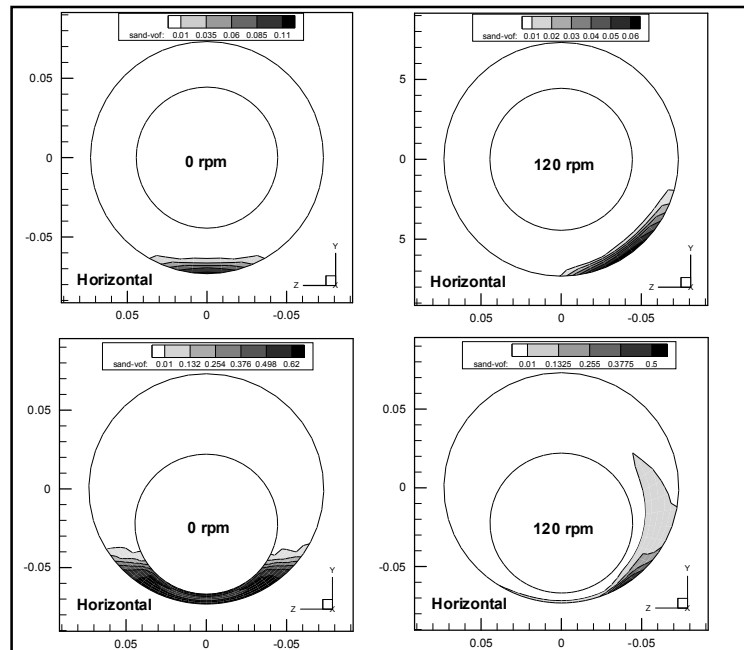
شکل ۶-۸: تاثیر چرخش لوله بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز ($\Gamma=90^\circ$)

افزایش چرخش لوله نه تنها باعث افزایش نسبت انتقال خرده‌ها می‌گردد، بلکه باعث کاهش افت اصطکاکی فشار می‌گردد (شکل ۶-۹). کاهش افت فشار به دو علت کاهش خرده‌ها در فضای حلقوی و افزایش سرعت برشی وارد شده بر سرعت سیال می‌باشد. با چرخش لوله، گر انرژی موثر محلی القاء شده به سیال غیر شبه پلاستیکی کف در نزدیک لوله حفاری چرخان کاهش یافته و متعاقب آن اصطکاک نزدیک دیواره کاهش می‌یابد و باعث کاهش افت فشار خواهد شد.



شکل ۶-۹: تاثیر چرخش لوله بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=90^\circ$)

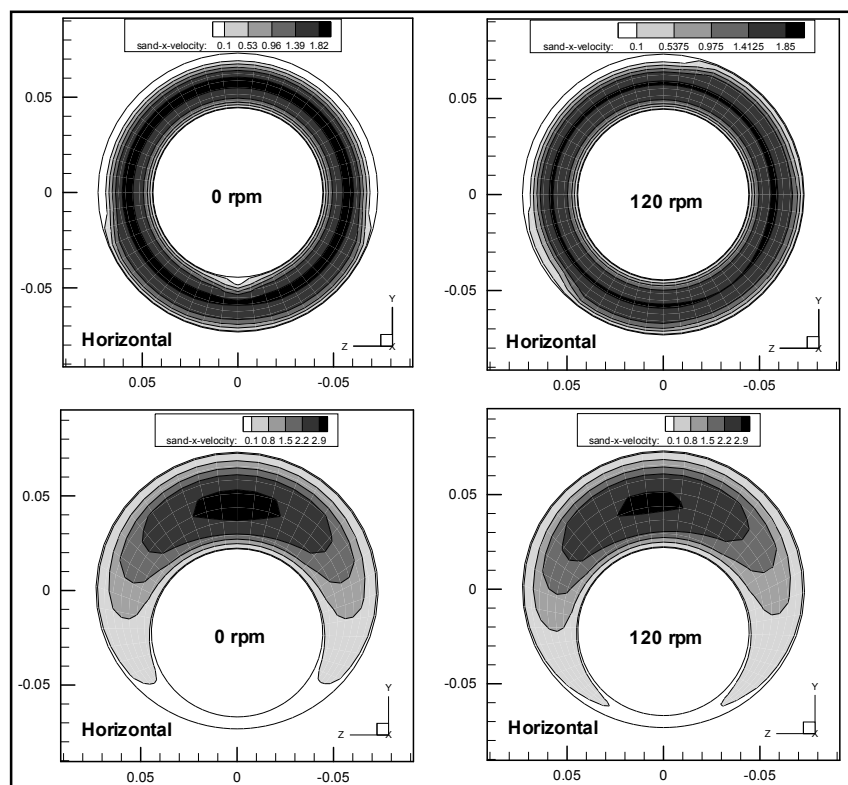
شکل ۶-۱۰، تاثیر چرخش لوله بر توزیع خرده‌ها را در دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز افقی برای سیال کف با کیفیت ۹۰٪ با مدل قانون توان، نشان می‌دهد. در حالت بدون چرخش لوله، پروفیل درصد حجمی خرده‌ها اطراف محور لوله متقارن است و بیشتر خرده‌ها در قسمت پایین فضای حلقوی می‌باشد. در حالت چرخش لوله، چرخش باعث جلوگیری از تشکیل بستر خرده‌ها و بلند کردن خرده‌ها به سمت بالا می‌گردد و احتمال گیر کردن لوله را کاهش می‌دهد. این تاثیر در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز بیشتر مشهود است و در فضای حلقوی هم‌مرکز کمتر می‌باشد.



شکل ۶-۱۰: تاثیر چرخش لوله بر توزیع غلظت خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال

Δ ft/s)

شکل ۶-۱۱ تاثیر چرخش لوله بر سرعت خرده‌ها در دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی برای سیال کف با کیفیت ۹۰٪ با مدل قانون توان را نشان می‌دهد. در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز، چرخش لوله باعث ایجاد جریان چرخشی در نزدیک ته چاه شده و باعث گستردگی سرعت محوری نسبت به حالت بدون چرخش می‌گردد و متعاقب آن تجمع خرده‌ها در نزدیک ته چاه کاهش می‌یابد. هر چند که این تاثیر در فضای حلقوی هم‌مرکز چشم‌گیر نیست.

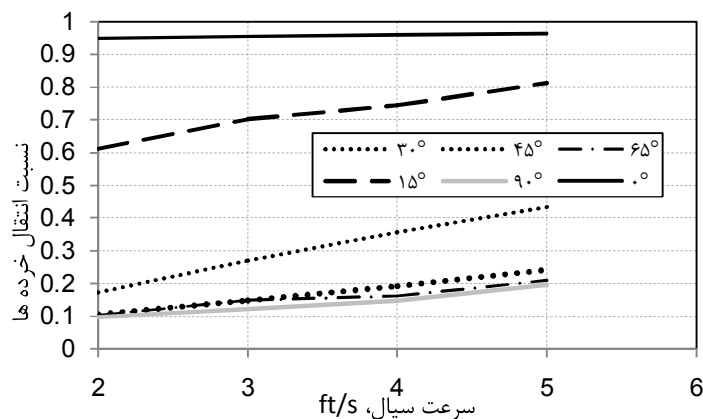


شکل ۶-۱۱: تاثیر چرخش لوله بر سرعت خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز افقی (سرعت سیال ۵ ft/s)

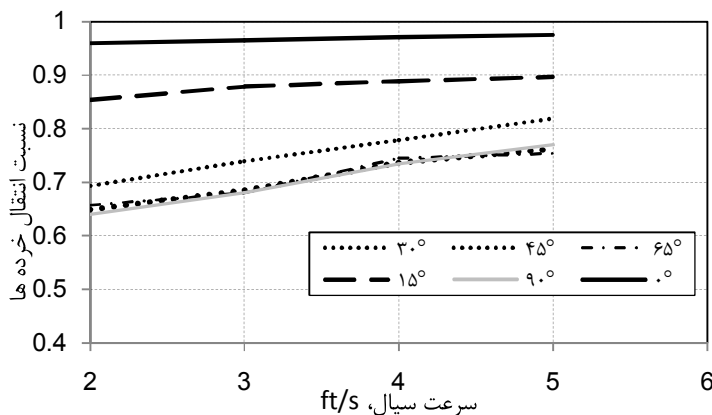
۶-۲-۳ تاثیر مدل رئولوژیکی

در صنعت حفاری انتخاب نوع سیال، اهمیت زیادی در انتقال خرده‌های حفاری دارد. بدین منظور سه نوع کف با کیفیت ۷۰، ۸۰ و ۹۰٪ برای شبیه‌سازی انتقال خرده‌های حفاری انتخاب گردید. در قسمت ۶-۲-۱ در مورد تاثیر کیفیت کف بر انتقال خرده‌ها بحث گردید با توجه به نتایج جداول ۳-۳ و ۳-۴، مشخص است که سیال کف با کیفیت ۷۰٪ با مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی و سیال کف با دو کیفیت ۸۰ و ۹۰٪ با مدل رئولوژیکی قانون توان برآزش بهتری دارند. بنابر این در این قسمت، برای

بررسی تاثیر مدل رئولوژیکی در انتقال خرده‌ها، برای سیال کف ۷۰٪، تاثیر دو مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی و قانون توان در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. شکل‌های ۶-۱۲ و ۶-۱۳، به ترتیب تاثیر مدل‌های رئولوژیکی هرشل بالکلی (HB) و قانون توان (PL) بر انتقال خرده‌های حفاری در شیب‌های مختلف چاه برای کف ۷۰٪ را در فضای حلقوی هم‌مرکز در شرایط سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت، قطر ذرات ۳ mm، فشار ۱۰۰ psi و بدون چرخش لوله نشان می‌دهند. همان‌طور که از نتایج مشخص است، برای چاه‌های قائم، هر دو مدل رئولوژیکی تقریباً نتایج یکسانی دارند. ولی با افزایش شیب چاه نسبت به حالت قائم، نسبت انتقال حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای مدل HB خیلی کمتر از مدل PL است و نتایج شبیه‌سازی با مدل رئولوژیکی قانون توان با نتایج آزمایشگاهی (قسمت ۶-۲-۱) در تطابق بهتری است.

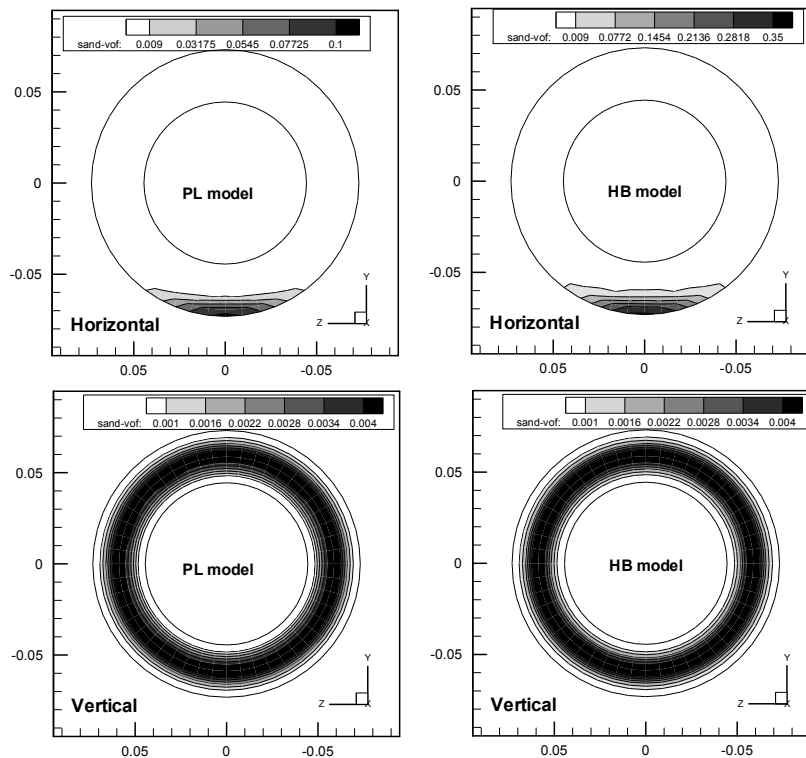


شکل ۶-۱۲: تاثیر سرعت بر نسبت انتقال خرده‌ها در شیب‌های مختلف با مدل رئولوژیکی HB ($\Gamma=70\%$)



شکل ۶-۱۳: تاثیر سرعت بر نسبت انتقال خرده‌ها در شیب‌های مختلف با مدل رئولوژیکی PL ($\Gamma=70\%$)

شکل ۶-۱۴ تاثیر مدل رئولوژیکی بر توزیع خرده‌ها را در فضای حلقوی هم‌مرکز در دو حالت افقی و قائم برای سیال کف ۷۰٪ در سرعت ۵ ft/s نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نتایج شبیه‌سازی دو مدل برای حالت قائم تقریباً یکسان است ولی در حالت افقی، مقدار حداکثر خرده‌ها در فضای حلقوی برای مدل هرشل بالکلی (۰/۳۶۴) بسیار بیشتر از مدل قانون توان (۰/۱۰۵) می‌باشد.

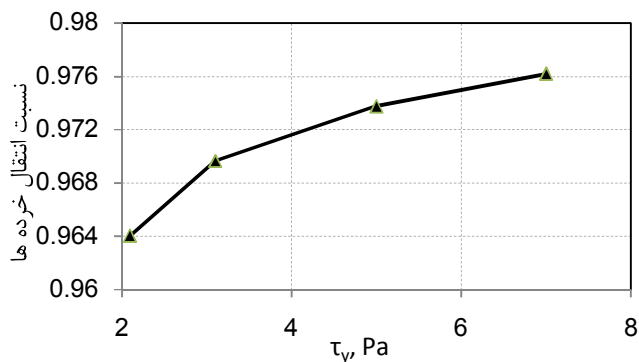


شکل ۶-۱۴: تاثیر مدل رئولوژیکی بر توزیع خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز افقی و قائم (سرعت سیال ۵ ft/s)

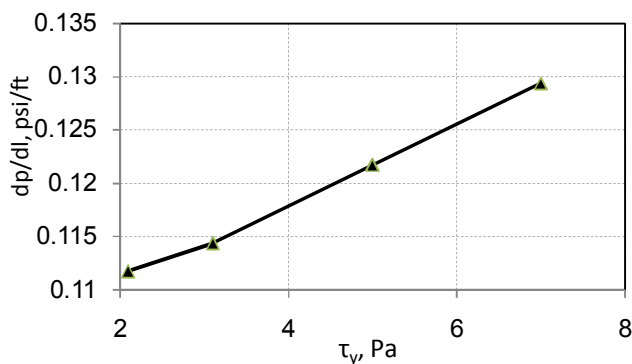
۶-۲-۴ تاثیر پارامترهای رئولوژیکی

تاثیر پارامترهای تنش تسلیم، شاخص رفتاری سیال (n) و شاخص مقاومت سیال (K) بر نسبت انتقال در فضای حلقوی قائم هم‌مرکز برای سیال کف ۷۰٪ با در نظر گرفتن مدل هرشل-بالکلی، در سرعت سیال ۵ ft/s، سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت، فشار محیطی ۱۰۰ psi و در حالت بدون چرخش لوله مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶-۱۵، تاثیر تنش تسلیم در انتقال خرده‌ها با ثابت بودن مقادیر دیگر رئولوژیکی ($K=1/162$ و $n=0/58$) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش

تنش تسلیمی از ۲/۱ به ۷ پاسکال، انتقال خرده‌ها افزایش نسبی حدود ۱٪ دارد. از طرفی، با افزایش تنش تسلیم از ۲/۱ به ۷، افت فشار افزایش نسبی حدود ۱۵٪ دارد (شکل ۶-۱۶).

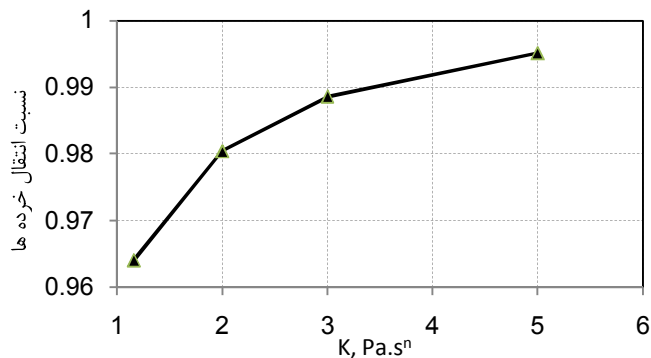


شکل ۶-۱۵: تاثیر تنش تسلیم بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ۵ ft/s)



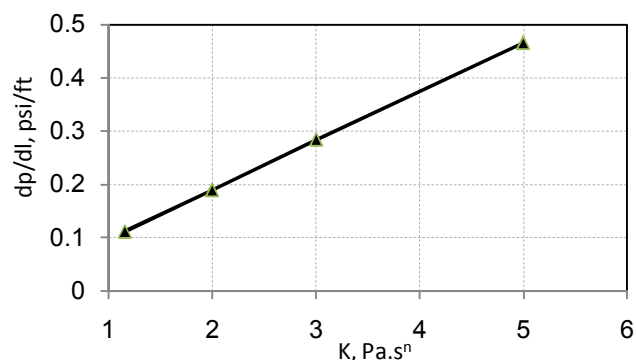
شکل ۶-۱۶: تاثیر تنش تسلیم بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ۵ ft/s)

شکل ۶-۱۷، تاثیر تنش شاخص مقاومت سیال در انتقال خرده‌ها با ثابت بودن سایر مقادیر رئولوژیکی ($\tau_y=1/0.95$ و $n=0.58$) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش شاخص مقاومت سیال از ۱/۱۶ به ۵، انتقال خرده‌ها افزایش نسبی حدود ۱٪ دارد که به علت افزایش گرانروی ظاهری سیال با افزایش K می‌باشد. که این افزایش نسبی کم انتقال خرده‌ها می‌تواند به علت غالب بودن تاثیر سرعت سیال بر انتقال در حالت قائم باشد.



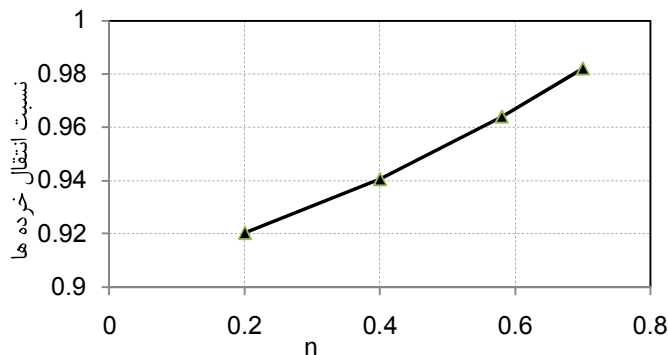
شکل ۶-۱۷: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ft/s) (۵)

در حالی که، با افزایش شاخص مقاومت سیال از $1/16$ به 5 ، افت فشار افزایش نسبی حدود 31.6% دارد. می‌توان نتیجه گرفت که با وجود افزایش جزئی در نسبت انتقال، افزایش افت فشار به طور قابل ملاحظه‌ای رخ می‌دهد که مستلزم مصرف توان بیشتری از پمپ‌ها می‌باشد (شکل ۶-۱۸).

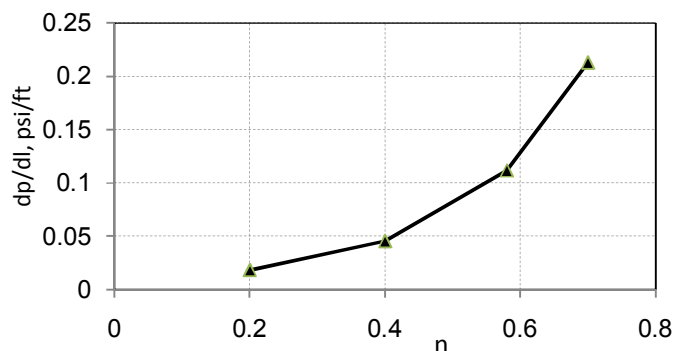


شکل ۶-۱۸: تاثیر شاخص مقاومت سیال بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ft/s) (۵)

با افزایش مقدار شاخص رفتاری سیال (n)، در شرایط ثابت دیگر ($\tau_y=1/0.95$ و $K=1/16$)، گرانروی موثر سیال، نیروی پسا، مقدار سرعت صعود و متعاقب آن نسبت انتقال خرده‌ها افزایش می‌یابد. افزایش نسبی انتقال با افزایش مقدار n از 0.2 تا 0.7 حدود $6/6\%$ می‌باشد که این تغییرات در شکل ۶-۱۹ آورده شده است. این افزایش نسبی برای افت فشار حدود 10.50% می‌باشد (شکل ۶-۲۰) که نشان از تاثیر بسیار چشم‌گیر شاخص رفتاری سیال بر افت فشار دارد.



شکل ۶-۱۹: تاثیر شاخص رفتاری بر انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ۵ ft/s)

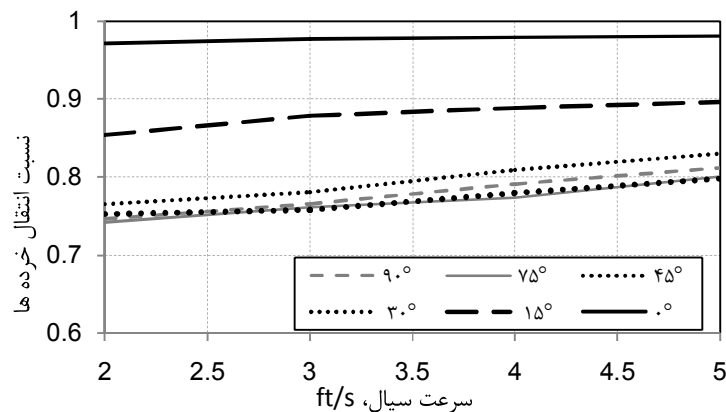


شکل ۶-۲۰: تاثیر شاخص رفتاری بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز قائم ($\Gamma=70\%$ ، سرعت سیال ۵ ft/s)

۵-۲-۶ تاثیر شیب چاه

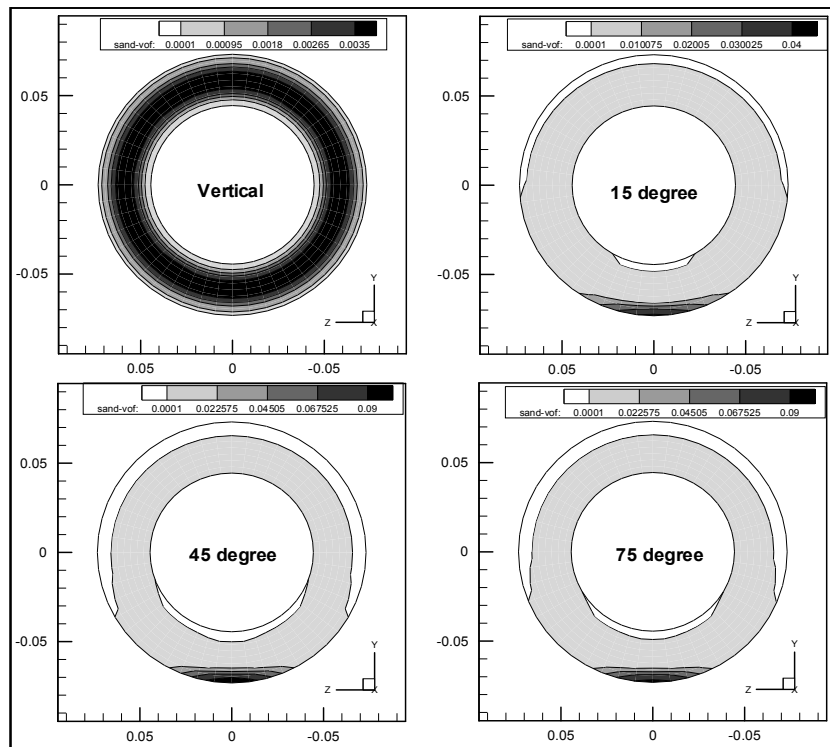
حفاری شیب‌دار مخصوصاً برای خارج‌سازی خرده‌ها دارای مسائلی هست، که در حفاری قائم دیده نمی‌شود. با افزایش شیب نسبت به حالت قائم، خرده‌ها تمایل به ته‌نشینی در قسمت پایین چاه دارند. در چاه‌های شیب‌دار، فاصله برای ته‌نشینی خرده‌ها در مقایسه با چاه‌های قائم کمتر است که این باعث تشکیل لایه‌ای از خرده‌ها در قسمت پایین چاه شده و باعث گیر کردن لوله خواهد شد. شکل ۶-۲۱، تاثیر شیب چاه بر انتقال خرده‌ها را برای سیال کف ۹۰٪ در فضای حلقوی هم‌مرکز در حالت سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت، قطر ذرات ۳ mm و بدون چرخش لوله، نشان می‌دهد. برای شیب‌های بالا نسبت به حالت قائم ($60^\circ - 90^\circ$)، معمولاً بستر ثابتی از خرده‌ها تشکیل می‌شود و خرده‌ها با مکانیسم چرخش و غلطش، منتقل می‌گردند. برای شیب‌های متوسط ($30^\circ - 60^\circ$)، بستر متحرک خرده‌ها تشکیل می‌گردد و خرده‌ها با مکانیسم نیروی برآ منتقل می‌گردند. در شیب‌های نزدیک قائم ($0^\circ -$

30°)، سقوط ذره، انتقال خرده‌ها را کنترل می‌کند. با توجه به شکل ۶-۲۱، نسبت انتقال با افزایش شیب نسبت به قائم، برای یک سرعت سیال مشخص کاهش می‌یابد و از شیب حدود 40° درجه به بالا این کاهش چشم‌گیر نیست و تقریباً حالت ثابتی دارد. نسبت انتقال در چاه‌های نزدیک قائم، با توجه به قابلیت خوب سیال کف در انتقال، به طور چشم‌گیری به سرعت سیال حساس نیست.



شکل ۶-۲۱: تاثیر شیب چاه بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)

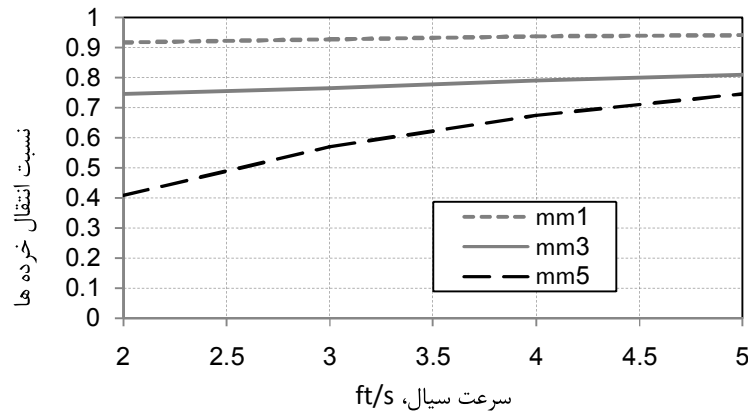
شکل ۶-۲۲، تاثیر زاویه شیب بر توزیع خرده‌ها را در فضای حلقوی هم‌مرکز برای کف 90% در حالت بدون چرخش لوله نشان می‌دهد. برای چاه‌های شیب‌دار و افقی، خرده‌ها تمایل به تجمع در پایین فضای حلقوی با توجه به نیروی گرانی دارند، ولی در حالت قائم این توزیع به صورت یکنواخت در اطراف محور لوله است.



شکل ۶-۲-۶: تاثیر شیب چاه بر توزیع خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=90\%$ ، سرعت سیال 5 ft/s)

۶-۲-۶ تاثیر اندازه ذرات

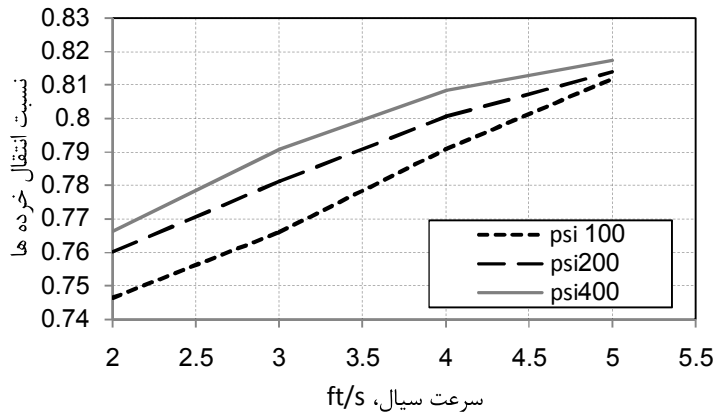
همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، مشخصات خرده‌های حفاری از قبیل شکل، اندازه و دانسیته توسط رفتار دینامیکی سیال حمل‌کننده مرتبط می‌شود. سرعت سقوط، نیروی پسا، نیروی شناوری و نیروهای برشی بین خرده‌ها توسط مشخصات خرده‌ها و خواص سیال در بر گیرنده تاثیر می‌پذیرند. شبیه‌سازی‌های CFD برای سه اندازه از ذرات کروی به قطر ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر با سیال کف با کیفیت ۹۰٪ با مدل قانون توان برای فضای حلقوی هم‌مرکز افقی در سرعت‌های مختلف سیال، سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت و بدون چرخش لوله در شکل ۶-۲۳ نشان داده شده است. نتایج نشان از کاهش نسبت انتقال خرده‌ها با افزایش قطر ذرات دارند. کاهش نسبت انتقال برای ذرات بزرگ، در سرعت‌های پایین سیال بیشتر مشهود است. علت کاهش نسبت انتقال با افزایش اندازه ذرات، افزایش نیروی گرانی وارده بر ذره می‌باشد.



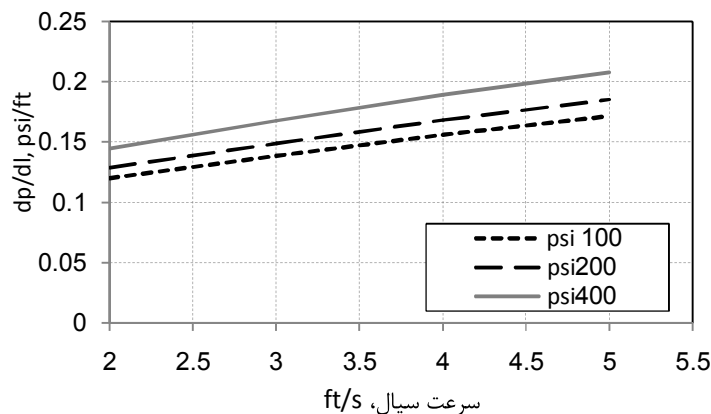
شکل ۶-۲۳: تاثیر اندازه خرده‌ها بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)

۶-۲-۷ تاثیر فشار چاه

برای بررسی تاثیر فشار محیطی بر نسبت انتقال خرده‌ها، خواص سیال کف با توجه به جدول ۳-۶ در نظر گرفته شد. شکل ۶-۲۴، تاثیر فشار محیطی بر نسبت انتقال خرده‌ها را برای کف با کیفیت ۹۰٪ و سرعت‌های مختلف سیال در فضای حلقوی هم‌مرکز افقی برای ذرات با قطر ۳ میلی‌متر و در سرعت حفاری ۵۰ فوت بر ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، افزایش فشار محیطی، تاثیر چشم‌گیری در نسبت انتقال خرده‌ها در یک سرعت سیال مشخص به خصوص در سرعت‌های بالاتر سیال، ندارد و به مقدار کمی نسبت انتقال افزایش می‌یابد. از طرفی، افزایش فشار با توجه به اینکه باعث افزایش گرانیوی سیال می‌گردد، در افزایش افت فشار تاثیر دارد (شکل ۶-۲۵).



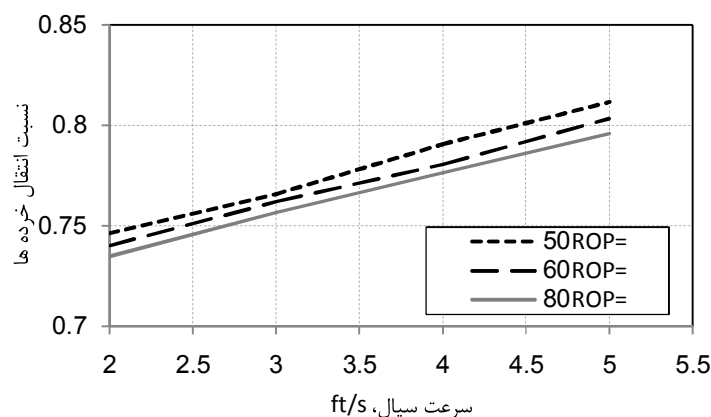
شکل ۶-۲۴: تاثیر فشار محیطی بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)



شکل ۶-۲۵: تاثیر فشار محیط بر افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)

۶-۲-۸ تاثیر سرعت حفاری (ROP)

شبه‌سازی‌ها برای سه سرعت حفاری ۵۰، ۶۰ و ۸۰ فوت بر ساعت برای کف با کیفیت ۹۰٪ در سرعت‌های مختلف سیال برای ذرات با قطر ۳ میلی‌متر در فضای حلقوی هم‌مرکز افقی در حالت بدون چرخش لوله انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۶-۲۶، آورده شده است. به طور کلی نسبت انتقال با افزایش سرعت حفاری، کاهش می‌یابد ولی این کاهش در این بازه سرعت حفاری چشم‌گیر نیست.



شکل ۶-۲۶: تاثیر سرعت حفاری بر نسبت انتقال خرده‌ها در فضای حلقوی هم‌مرکز ($\Gamma=0.90$)

۶-۳ جمع بندی

برای اولین بار مدل‌سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها توسط سیال کف با استفاده از مدل چند فازي اویلری-دانه‌ای در نرم‌افزار فلوئنت با در نظر گرفتن تاثیر مدل رئولوژیکی

و چرخش لوله انجام پذیرفت و تاثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال خرده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که برای مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال خرده‌ها، مدل رئولوژیکی قانون توان در حالت فضای حلقوی شیب‌دار نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل هرشل-بالکلی دارد. نمودارهای نیز برای کاربرد بهتر از سیال کف در حفاری با توجه به شبیه‌سازی‌ها ارائه گردید. مشخص شد که با افزایش سرعت سیال، کیفیت کف، چرخش لوله حفاری و فشار محیطی، نسبت انتقال خرده‌ها افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش شیب چاه نسبت به حالت قائم، اندازه خرده‌ها و سرعت حفاری، نسبت انتقال خرده‌ها کاهش می‌یابد.

فصل هفتم: بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، پارامترهای رئولوژیکی سیالات غیرنیوتنی برای استفاده در مدل‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از طراحی یک شبکه عصبی مصنوعی در نرم افزار مطلب و روش رگرسیون چند متغیره در نرم افزار SPSS مدل‌سازی شد و رابطه رگرسیون خطی چند متغیره برای تخمین معیار تمیز سازی چاه با سیال کف ارائه گردید. هیدرولیک جریان کف و همچنین . انتقال خرده‌های حفاری توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی با در نظر گرفتن معادلات پیوستگی و ممنوم حاکم بر جریان با استفاده از نرم افزار فلونت شبیه‌سازی گردید و تاثیر پارامترهای مختلف در انتقال خرده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این فصل نتیجه‌گیری کارهای انجام شده در این مطالعه می‌باشد و پیشنهاداتی برای کارهای آینده در این زمینه ارائه می‌دهد.

۷-۱ بحث و نتیجه‌گیری

- پارامترهای رئولوژیکی سیالات غیر نیوتنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تخمین زده شد.
 ۱. مشخص شد که سیال کف مانند خیلی از سیالات حفاری دیگر دارای رفتار غیرنیوتنی می‌باشد و مدل‌های رئولوژیکی قانون توان و هرشل بالکی می‌توانند به خوبی رفتار رئولوژیکی این سیالات را توصیف کنند.
 ۲. پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکلی سیال حفاری بنتونیتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در این مطالعه تعیین گردید و مشخص شد که الگوریتم ژنتیک نسبت به دیگر روش‌های آماری دارای قابلیت بهتری می‌باشد.
 ۳. پارامترهای رئولوژیکی سیال کف حاصل از دو سری داده تنش- کرنش توسط الگوریتم ژنتیک گویای آن است که کف با کیفیت ۷۰ درصد دارای تنش تسلیمی بوده و از مدل هرشل بالکلی پیروی می‌کند و کف با کیفیت‌های ۸۰ و ۹۰ درصد که دارای درصد بیشتری فاز گاز می‌باشد، بدون تنش تسلیمی و از مدل قانون توان پیروی می‌کنند.

۴. با افزایش کیفیت کف، مقدار شاخص مقاومت سیال (K) افزایش و مقدار شاخص رفتاری

سیال (n) کاهش می‌یابد که در کیفیت‌های بالا، کاهش مقدار n جزئی می‌باشد.

- مدل‌سازی سرعت سقوط ذرات در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی از روی پارامترهای موثر بر آن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به روش منظم‌سازی بیزین و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مطالعات قبلی، انجام پذیرفت. حدود ۷۰٪ داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش شبکه و ۳۰ درصد مابقی برای آزمون شبکه انتخاب شدند. در این روش انتخاب تعداد نرون‌های لایه پنهان به صورت سعی و خطا در بازه خاصی تعیین شد. برای ارزیابی شبکه بهینه، دو معیار ضریب همبستگی (R) و جذر میانگین مربعات خطا (RMS) بین مقادیر پیش‌بینی و آزمایشگاهی استفاده شدند. در نهایت شبکه‌ای با شش نرون در لایه ورودی (پارامترهای موثر بر سرعت سقوط)، یک لایه میانی با ۱۲ نرون و تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک و یک لایه خروجی با یک نرون (سرعت سقوط) انتخاب گردید. مقادیر R و RMS در داده‌های آموزش به ترتیب برابر با ۰/۹۹۷ و ۰/۰۲۱ می‌باشند و این مقادیر برای داده‌های آزمون برابر با ۰/۹۷۴ و ۰/۰۷۲ به دست آمدند. برای ارزیابی عملکرد شبکه در محاسبه سرعت سقوط، نتایج حاصل به کمک این روش با نتایج تحقیقات سایر محققین مقایسه شد و قابلیت بالای شبکه در مقابل روش‌های قبلی تایید گردید. از این رو می‌توان گفت که این روش برای محاسبه سرعت سقوط ذرات در انواع سیالات حفاری نیوتنی و غیرنیوتنی می‌تواند به کار رود.
- انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف در فضای حلقوی افقی توسط روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره با توجه به پارامترهای تاثیرگذار بر انتقال خرده‌ها انجام پذیرفت. برای استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره، داده‌های آزمایشگاهی مطالعات قبلی استفاده گردید. داده‌ها به دو قسمت آموزش و تست تقسیم شدند و شبکه مانند توضیحات قسمت قبلی طراحی گردید. در نهایت شبکه‌ای با شش نرون در لایه ورودی (پارامترهای موثر بر غلظت خرده‌ها)، یک لایه میانی با ۱۰ نرون و تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک و لایه خروجی با یک نرون (غلظت حجمی خرده‌ها) انتخاب گردید. مقادیر R و RMS بین داده‌های پیش‌بینی و داده‌های آزمایشگاهی برای داده‌های آموزش ۰/۹۹ و ۰/۶۳ و برای

داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۱۵ و ۱/۹۴ حاصل گردید. نتایج روش شبکه عصبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی مدل مکانیکی سایر محققین مقایسه شد. حداکثر خطای میانگین نسبی برای مدل مکانیکی ۱۱/۲٪ و برای شبکه عصبی ۳/۳٪ حاصل گردید که نشان از قابلیت بالای شبکه طراحی شده در تخمین دارد.

- با داده‌های آموزش قسمت شبکه عصبی، یک رابطه خطی چند متغیره بین غلظت حجمی خرده‌های حفاری و پارامترهای موثر بر آن حاصل گردید. در این روش، مقدار R بین مقادیر پیش‌بینی و آزمایشگاهی در دو سری داده آموزش و تست به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۸۴ حاصل گردید. همچنین این روش با مدل مکانیکی مذکور نیز مقایسه شد، که حداکثر خطای میانگین نسبی حاصل از روش رگرسیون چند متغیره برابر ۹/۸٪ و برای مدل مکانیکی ۱۱/۲٪ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از سه روش، می‌توان نتیجه گرفت که شبکه عصبی طراحی شده می‌تواند با هزینه کم و سرعت بالا معیار تمیزی چاه را تخمین بزند.

- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان سیال کف به عنوان یک سیال غیرنیوتنی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز قائم، برای بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی حفاری بر افت فشار برای سه نوع کف با کیفیت‌های ۷۰، ۸۰ و ۹۰٪ با استفاده از نرم افزار فلوئنت انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین و نتایج روش شکاف معادل، مقایسه شدند و ملاحظه شد که آنها در تطابق خوبی (با خطای کمتر از ۱۱٪) با همدیگر در تمام موارد می‌باشند در نتیجه این روش در طراحی هیدرولیکی کف برای حفاری به خوبی استفاده گردد. در این مورد نتایج زیر حاصل گردید.

۱. مشخص شد که افت فشار با افزایش سرعت سیال و کیفیت کف، افزایش و با افزایش چرخش لوله، کاهش می‌یابد.

۲. با بررسی تاثیر دو مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی و قانون توان برازش شده به داده‌های تنش- کرنش، بر افت فشار مشخص گردید که نتایج حاصله برای دو مدل اختلاف چندانی با هم

دیگر ندارند، در نتیجه به علت سادگی مدل قانون توان، پیشنهاد می‌گردد که از آن برای شبیه‌سازی‌های عددی استفاده گردد.

- شبیه‌سازی عددی انتقال خرده‌ها توسط سیال کف (جریان دو فازی مایع- جامد) در فضای حلقوی شیب‌دار هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز با استفاده از مدل اویلری-دانه‌ای نرم افزار فلونت انجام شد. تاثیر پارامترهای عملیاتی از قبیل سرعت سیال، کیفیت کف، مدل رئولوژیکی، چرخش لوله، شیب فضای حلقوی، سرعت حفاری، فشار محیطی، اندازه خرده‌ها و سرعت حفاری در انتقال خرده‌ها بررسی گردید. نتایج عددی بدست آمده از مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه شد و ملاحظه شد که آنها با خطایی کمتر از ۸٪، در تطابق خوبی با هم می‌باشند. در این مورد نتایج زیر حاصل گردید.

۱. با افزایش سرعت سیال، کیفیت کف و چرخش لوله، انتقال خرده‌ها افزایش می‌یابد. بنابر این، برای بهبود کارایی انتقال می‌توان سه گزینه را استفاده کرد: چرخش لوله، افزایش سرعت جریان و افزایش کیفیت کف. در مورد دو گزینه اول، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

۲. در حالت قائم با توجه به قابلیت انتقال خوب سیال کف، تغییر سرعت جریان، تاثیر چشم‌گیری در انتقال خرده‌ها ندارد. ولی در حالت شیب‌دار، انتقال خرده‌ها با افزایش سرعت جریان بهبود می‌یابد ولی در سرعت‌های بالا تفاوت چندانی وجود ندارد در حالی که افت فشار برای سرعت‌های بالاتر به شدت افزایش می‌یابد و افزایش نسبی افت فشار حدود ۴۵٪ می‌باشد.

۳. افزایش کارایی انتقال با افزایش کیفیت کف به خصوص در سرعت‌های بالاتر کف، قابل ملاحظه نیست.

۴. با بکار بردن چرخش لوله، هر دو غلظت خرده‌های حفاری و افت فشار کاهش می‌یابند. بنابر این چرخش لوله در طی حفاری کف، یکی از بهترین گزینه‌ها برای بهبود تمیزی چاه است.

۵. با افزایش شیب نسبت به حالت قائم، نسبت انتقال خرده‌های حفاری کاهش می‌یابد و از شیب حدود ۴۰ درجه به بعد نتایج تقریباً یکسان است.
۶. با افزایش سرعت حفاری و اندازه خرده‌های حفاری، نسبت انتقال خرده‌ها کاهش می‌یابد.
۷. انتقال خرده‌ها و افت فشار با افزایش فشار محیطی افزایش می‌یابد که افزایش نسبت انتقال خرده‌ها قابل ملاحظه نیست در حالی که افزایش افت فشار قابل توجه می‌باشد.
۸. استفاده از مدل رئولوژیکی قانون توان برای شبیه‌سازی انتقال خرده‌ها در حالت شیب‌دار نسبت به مدل هرشل بالکلی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

۲-۷ پیشنهادات

- انجام آزمایشات آزمایشگاهی انتقال خرده‌های حفاری همراه با چرخش لوله در شیب‌های بین ۴۵ تا ۹۰ درجه توصیه می‌گردد که با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه گردد.
- شبیه‌سازی‌های عددی بیشتر برای انتقال خرده‌های حفاری در هندسه‌های مختلف چاه و شیب‌های مختلف برای فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز همراه با چرخش لوله نتایج گرانمایی را به همراه خواهد داشت.
- با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی بیشتر می‌توان رابطه‌ای عمومی برای محاسبه انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف ارائه داد بنابراین برای ایجاد چنین رابطه‌ای نیاز به شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات بیشتر در این زمینه می‌باشد.
- مقایسه بین انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف و سیالات حفاری معمولی توسط شبیه‌سازی عددی توصیه می‌شود.

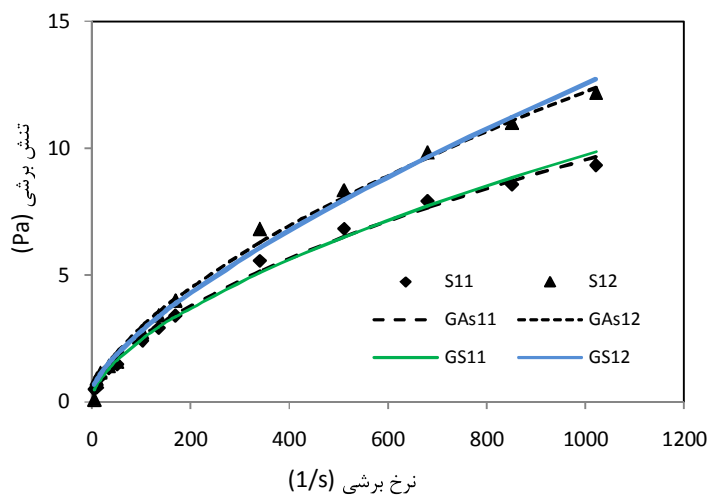
پیوست‌ها

پیوست الف: نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک

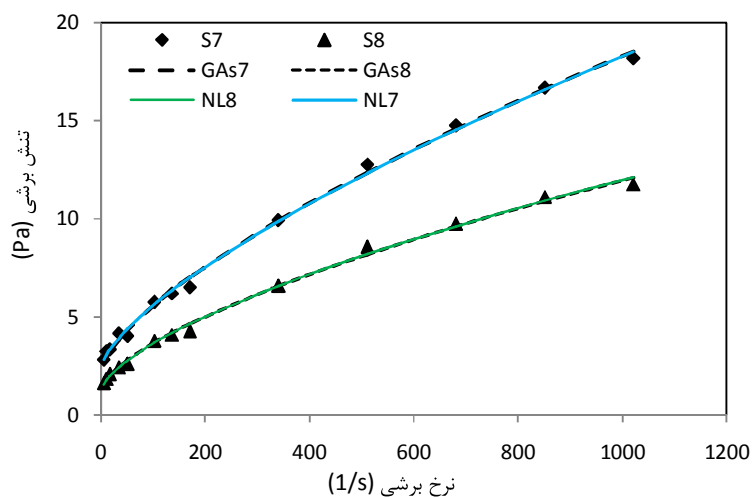
در جدول الف-۱ پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های GA، GS و NL برای نمونه‌های بنتونیت-لیگنیت که روش NL مقادیر تنش تسلیمی منفی دارد، آورده شده است و شکل الف-۱ مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و تنش برشی حاصل از دو روش GA و GS برای نمونه‌هایی که روش NL مقادیر تنش تسلیمی منفی دارد را نشان می‌دهد. در شکل‌های الف-۲ و الف-۳ مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و تنش برشی حاصل از دو روش NL و GA برای نمونه‌هایی است که هر دو روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند. در شکل الف-۴ مجموع مربعات خطا (SSE) حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که روش NL تنش تسلیمی منفی دارد، آورده شده است. شکل الف-۵ مقادیر SSE حاصل از سه روش را برای نمونه‌هایی که هر سه روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند، نشان می‌دهد. شکل‌های الف-۶ تا الف-۹ مقایسه بین داده‌های FGV (Duan, 2007) و روش GA را در شرایط فشار مختلف نشان می‌دهند.

جدول الف-۱: پارامترهای رئولوژیکی حاصل از روش‌های مختلف برای سیال بنتونیت-لیگنیت

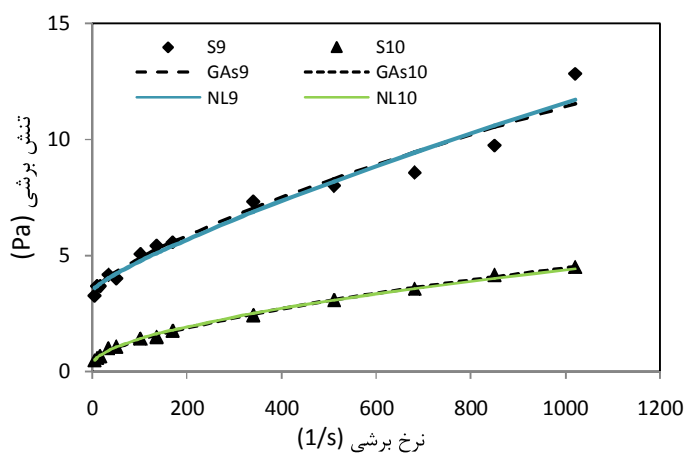
نمونه و روش	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	τ_y (Pa)	SSE (Pa ²)	R ²
S11					
NL	۰/۲۴۸۶	۰/۵۳۱۲	-۰/۲۶۸۵	۰/۵۴۰۲	۰/۹۹۵۷
GS	۰/۱۴۶۲	۰/۶۰۶۸	۰/۰۷۱۸	۰/۷۸۶۵	۰/۹۹۴۲
GA	۰/۱۸۰۱	۰/۵۷۴۵	۰/۰۲۰۲۲	۰/۶۲۱۴	۰/۹۹۵۰
S12					
NL	۰/۲۲۱۰	۰/۵۸۴۱	-۰/۲۸۸۰	۰/۷۸۹۰	۰/۹۹۶۳
GS	۰/۰۹۴۰	۰/۷۰۳۶	۰/۳۹۷۶	۱/۵۶۴۶	۰/۹۹۴۲
GA	۰/۱۷۲۰	۰/۶۱۷۲	۰/۰۰۱۵	۰/۸۹۳۲	۰/۹۹۶۰
S19					
NL	۱/۱۳۷۱	۰/۴۳۹۳	-۰/۰۹۰۶	۱/۳۳۲۰	۰/۹۹۶۴
GS	۰/۶۲۳۴	۰/۵۲۰۳	۱/۴۷۰۱	۲/۲۲۴۴	۰/۹۹۲۷
GA	۱/۰۸۲۵	۰/۴۴۵۷	۰/۰۶۴۹	۱/۳۳۷۸	۰/۹۹۶۲
S20					
NL	۵/۴۴۴۰	۰/۳۲۲۲	-۳/۷۲۶۲	۲/۴۱۳۰	۰/۹۹۸۲
GS	۳/۵۷۷۶	۰/۳۷۳۹	۰	۳/۷۵۷۸	۰/۹۹۷۵
GA	۳/۷۴۷۸	۰/۳۶۵۴	۰/۰۱۸۸۲	۳/۴۱۱۱	۰/۹۹۷۳
S21					
NL	۹/۲۸۸۵	۰/۳۲۰۸	-۶/۰۹۸۰	۴/۷۱۶۰	۰/۹۹۸۸
GS	۶/۱۸۰۳	۰/۳۷۱۲	۰	۸/۴۸۸۸	۰/۹۹۸۷
GA	۶/۳۷۵۱	۰/۳۶۵۲	۰/۲۱۰۳	۷/۲۲۸۹	۰/۹۹۸۲



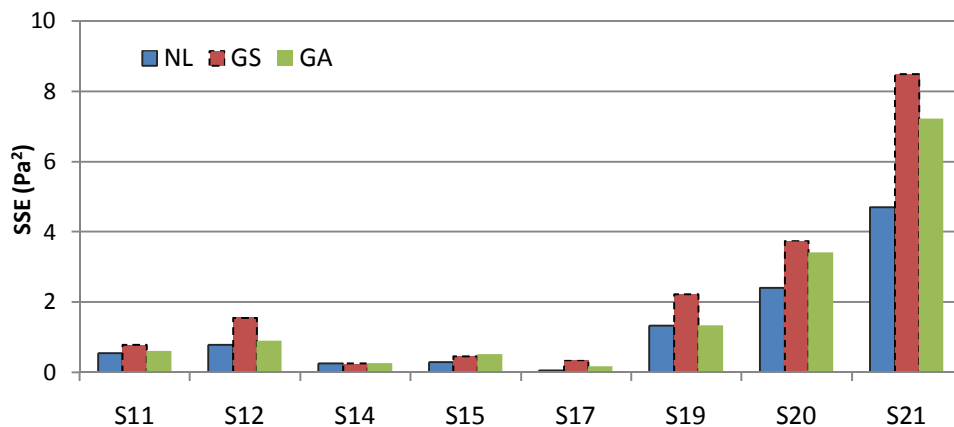
شکل الف-۱: مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش GS و GA برای گل حفاری بنتونیت-لیگنیت (نمونه‌های S11، S12) که روش NL مقادیر تنش تسلیمی منفی دارند



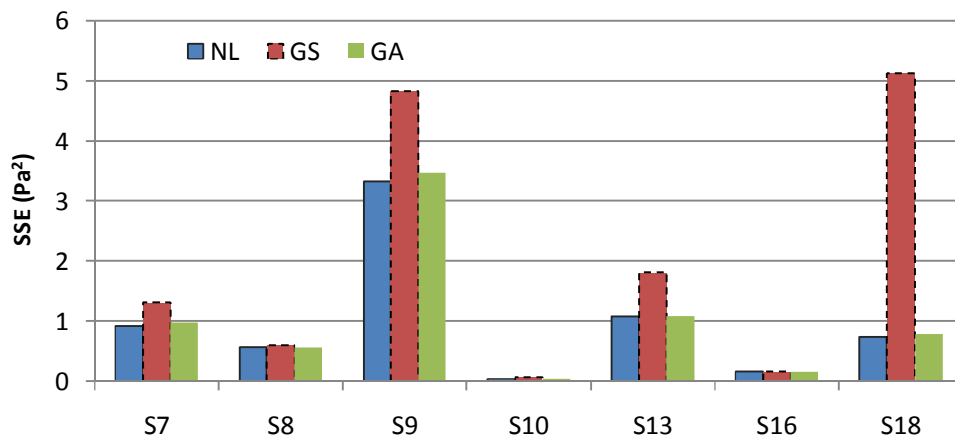
شکل الف-۲: مقایسه بین تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش NL و GA برای گل حفاری بنتونیت- لیگنیت (نمونه‌های S7، S8) که هر دو روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند



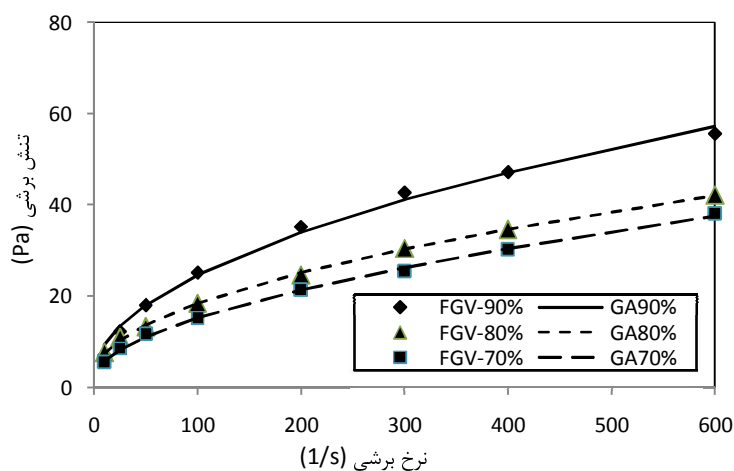
شکل الف-۳: مقایسه بین داده‌های تنش برشی ویسکومتری و داده‌های حاصل از دو روش NL و GA برای گل حفاری بنتونیت- لیگنیت (نمونه‌های S9 و S10) که هر دو روش مقادیر مثبت تنش تسلیمی دارند



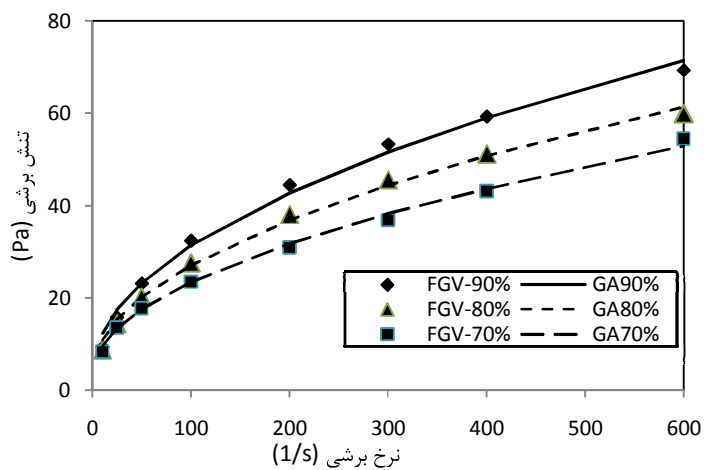
شکل الف-۴: خطای حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که روش NL تنش تسلیمی منفی دارد



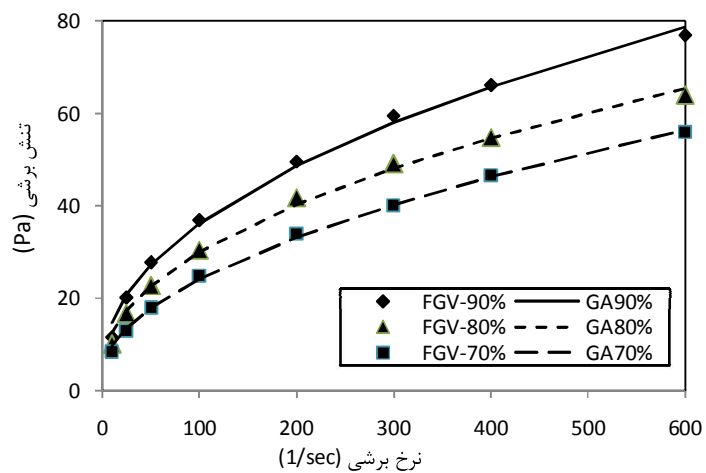
شکل الف-۵: خطای حاصل از سه روش برای نمونه‌هایی که هر سه روش تنش تسلیمی مثبت دارند



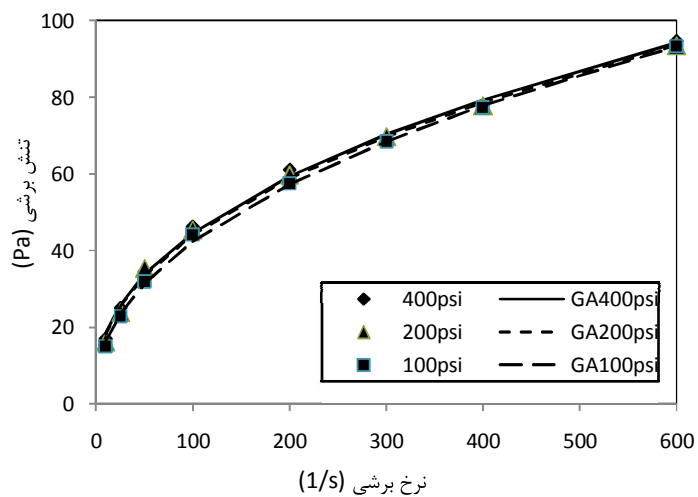
شکل الف-۶: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر (p=۲۵ psi)



شکل الف-۷: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر (p=۲۰۰ psi)



شکل الف-۸: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف بدون پلیمر ($p=400 \text{ psi}$)



شکل الف-۹: مقایسه بین داده‌های FGV و روش GA برای سیال کف ۸۰٪ پلیمری (۵٪) در شرایط مختلف فشار

پیوست ب: داده‌های آزمایشگاهی و روش رگرسیون خطی چندمتغیره**ب-۱ داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق**

جدول ب-۱ داده‌های استفاده شده از منابع مختلف در طراحی شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سرعت سقوط ذرات را در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی نشان می‌دهد. در جدول ب-۲ داده‌های آزمایشگاهی انتقال خرده‌های حفاری توسط سیال کف در فضای حلقوی افقی برای طراحی شبکه عصبی مصنوعی آورده شده است.

جدول ب-۱: خواص سیال و ذرات جامد کروی و نتایج آزمایشگاهی سرعت سقوط

K (Pas ⁿ)	n (-)	d _p (m)	ρ_s (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	V (m/s)	Re (-)	C _D (-)
Kelessidis, 2003							
۰/۲۶۴۸	۰/۷۵۲۹	۰/۰۰۱۵	۲۲۶۰	۱۰۰۰	۰/۰۱۱۹	۰/۱۱۲۵	۱۷۴/۵۷۲
۰/۲۶۴۸	۰/۷۵۲۹	۰/۰۰۲۱	۲۷۲۷	۱۰۰۰	۰/۰۳۶۱	۰/۵۶۷۸	۳۵/۵۳۴
۰/۲۶۴۸	۰/۷۵۲۹	۰/۰۰۲۳	۲۴۴۹	۱۰۰۰	۰/۰۴۰۹	۰/۷۲۳۴	۲۶/۰۵۹
۰/۲۶۴۸	۰/۷۵۲۹	۰/۰۰۳۰	۲۶۰۹	۱۰۰۰	۰/۰۶۶۴	۱/۶۲۹۲	۱۴/۴۶۳
۰/۲۶۴۸	۰/۷۵۲۹	۰/۰۰۳۵	۲۵۷۲	۱۰۰۰	۰/۰۸۰۲	۲/۲۷۳۵	۱۱/۰۲۹
۰/۰۳۵۳	۰/۸۷۲۴	۰/۰۰۱۵	۲۲۶۰	۱۰۰۰	۰/۰۴۴۰	۲/۸۷۷۴	۱۲/۷۶۹
۰/۰۱۶۵	۰/۹۱۹۸	۰/۰۰۱۵	۲۲۶۰	۱۰۰۰	۰/۰۵۹۷	۷/۳۱۰۵	۶/۹۳۶
۰/۰۳۵۳	۰/۸۷۲۴	۰/۰۰۲۱	۲۷۲۷	۱۰۰۰	۰/۱۰۰۸	۹/۶۲۲۸	۴/۵۵۸
۰/۰۳۵۳	۰/۸۷۲۴	۰/۰۰۲۳	۲۴۴۹	۱۰۰۰	۰/۱۱۱۹	۱۱/۹۶۹۰	۳/۴۸۱
۰/۰۱۶۵	۰/۹۱۹۸	۰/۰۰۲۱	۲۷۲۷	۱۰۰۰	۰/۱۲۷۵	۲۲/۱۱۵۳	۲/۸۴۹
۰/۰۳۵۳	۰/۸۷۲۴	۰/۰۰۳۰	۲۶۰۹	۱۰۰۰	۰/۱۵۹۲	۲۲/۶۵۴۱	۲/۵۱۶
۰/۰۱۶۵	۰/۹۱۹۸	۰/۰۰۲۳	۲۴۴۹	۱۰۰۰	۰/۱۴۰۳	۲۷/۲۶۰۸	۲/۲۱۵
۰/۰۳۵۳	۰/۸۷۲۴	۰/۰۰۳۵	۲۵۷۲	۱۰۰۰	۰/۱۸۲۵	۲۹/۵۹۵۰	۲/۱۳۰
۰/۰۱۶۵	۰/۹۱۹۸	۰/۰۰۳۰	۲۶۰۹	۱۰۰۰	۰/۱۹۵۰	۵۰/۱۲۹۹	۱/۶۷۷
۰/۰۱۶۵	۰/۹۱۹۸	۰/۰۰۳۵	۲۵۷۲	۱۰۰۰	۰/۲۱۹۶	۶۴/۲۲۲۵	۱/۴۷۱
Miura et al., 2001							
۰/۵۹۴۰	۰/۵۶۱۰	۰/۰۰۳۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۳۱۴	۰/۴۴۴۶	۵۹/۶۹۸
۰/۵۹۴۰	۰/۵۶۱۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۸۸۱	۲/۶۱۳۱	۱۲/۶۳۹
۰/۵۹۴۰	۰/۵۶۱۰	۰/۰۰۷۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۱۵۹۴	۷/۴۰۷۹	۵/۴۰۵
۰/۱۶۹۰	۰/۶۲۵۰	۰/۰۰۳۰	۲۵۰۰	۹۹۹	۰/۱۲۱۳	۸/۶۱۳۷	۴/۰۰۷
۰/۱۷۷۰	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۹۹۹	۰/۱۹۷۲	۲۴/۰۲۴۴	۲/۵۲۷
۰/۱۶۹۰	۰/۶۲۵۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۹۹۹	۰/۲۵۲۴	۳۲/۴۶۴۴	۱/۵۴۲
۰/۰۶۷۵	۰/۶۲۹۰	۰/۰۰۳۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۲۰۴۹	۴۳/۶۴۴۵	۱/۴۰۲
۰/۱۷۷۰	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۷۰	۲۵۰۰	۹۹۹	۰/۳۰۳۱	۵۳/۶۵۳۵	۱/۴۹۷
۰/۱۶۹۰	۰/۶۲۵۰	۰/۰۰۷۰	۲۵۰۰	۹۹۹	۰/۳۷۳۴	۶۸/۶۴۴۳	۰/۹۸۷
۰/۰۲۹۹	۰/۷۱۹۰	۰/۰۰۳۰	۲۵۰۰	۹۹۷	۰/۲۶۷۳	۹۴/۴۱۹۱	۰/۸۲۸
۰/۰۶۷۵	۰/۶۲۹۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۴۰۵۱	۱۵۳/۲۲۰۳	۰/۵۹۸
۰/۰۱۶۶	۰/۷۵۱۰	۰/۰۰۳۰	۲۵۰۰	۹۹۸	۰/۳۰۵۴	۱۷۴/۱۵۷۴	۰/۶۳۳
۰/۰۲۹۹	۰/۷۱۹۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۹۹۷	۰/۴۳۹۱	۲۵۷/۴۵۸۵	۰/۵۱۱
۰/۰۶۷۵	۰/۶۲۹۰	۰/۰۰۷۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۵۲۳۵	۲۶۹/۰۹۰۱	۰/۵۰۱
۰/۰۲۹۹	۰/۷۱۹۰	۰/۰۰۷۰	۲۵۰۰	۹۹۷	۰/۵۱۹۶	۴۰۶/۸۳۸۱	۰/۵۱۱
۰/۰۱۶۶	۰/۷۵۱۰	۰/۰۰۵۰	۲۵۰۰	۹۹۸	۰/۴۴۳۷	۴۰۷/۵۳۳۸	۰/۵۰۰
۰/۰۱۶۶	۰/۷۵۱۰	۰۰۷۰	۲۵۰۰	۹۹۸	۰/۶۰۳۵	۷۷۰/۴۷۲۲	۰/۳۷۸

جدول ب-۱: ادامه

K (Pa.s ⁿ)	n (-)	d _p (m)	ρ_s (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	V (m/s)	Re (-)	C _D (-)
Pinelli and Magelli, 2001							
۰/۰۵۲۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۰۸	۲۴۷۰	۱۰۰۰	۰/۰۳۰۶	۱/۲۴۵۸	۱۶/۲۲۲
۰/۰۴۷۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۰۸	۲۴۷۰	۱۰۰۰	۰/۰۳۹۲	۱/۸۸۸۸	۹/۸۸۵
۰/۰۵۲۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۱۱	۲۹۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۷۱۸	۴/۷۷۹۲	۵/۴۴۷
۰/۰۵۲۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۱۱	۲۹۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۸۱۸	۵/۶۳۹۹	۴/۱۹۷
۰/۰۵۲۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۳۰	۱۴۷۰	۱۰۰۰	۰/۰۷۳۴	۹/۹۰۲۲	۳/۳۶۶
۰/۰۴۴۶	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۳۰	۱۴۷۰	۱۰۰۰	۰/۰۸۸۷	۱۴/۰۷۵۰	۲/۳۰۵
۰/۰۵۲۱	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۵۹	۱۱۷۰	۱۰۰۰	۰/۰۸۲۹	۱۹/۲۶۴۵	۱/۹۲۲
۰/۰۴۶۲	۰/۷۳۰۰	۰/۰۰۵۹	۱۱۷۰	۱۰۰۰	۰/۱۰۱۳	۲۸/۰۱۲۱	۱/۲۸۷
Ford and Oyenevin, 1994							
۹/۱۶۷۳	۰/۱۷۱۴	۰/۰۰۵۰	۷۹۴۹	۱۰۱۴/۴۰۶	۰/۱۲۰۰	۰/۹۲۴۲	۳۱/۰۴۷
۱۹/۷۳۶۰	۰/۰۶۲۳	۰/۰۰۷۰	۷۷۴۴	۱۰۰۰	۰/۱۹۰۰	۱/۴۸۹۱	۱۷/۱۰۵
۱۹/۷۳۶۰	۰/۰۶۲۳	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۰۰	۰/۴۱۰۰	۶/۷۵۸۲	۵/۲۸۸
۱۹/۷۳۶۰	۰/۰۶۲۳	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۰۰	۰/۴۲۰۰	۷/۱۶۲۲	۵/۹۸۸
۴/۹۱۰۰	۰/۲۰۷۵	۰/۰۰۵۰	۷۹۴۹	۱۰۰۰	۰/۳۲۰۰	۸/۷۹۹۱	۴/۴۳۸
۹/۱۶۷۳	۰/۱۷۱۴	۰/۰۰۷۰	۷۷۴۴	۱۰۱۴/۴۰۶	۰/۴۴۰۰	۱۰/۵۳۵۱	۳/۱۳۷
۱۱/۴۸۹۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۵۰	۷۹۴۹	۱۰۳۲/۴۱۳	۰/۴۰۰۰	۱۰/۹۸۶۰	۲/۷۳۸
۱۶/۱۳۵۰	۰/۱۵۸۰	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۴۴/۴۱۸	۰/۶۱۰۰	۱۲/۵۸۰۱	۲/۲۷۲
۴/۰۰۲۹	۰/۲۸۶۷	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۲۶/۴۱۱	۰/۳۸۰۰	۱۳/۷۴۹۶	۷/۰۹۹
۱۱/۲۰۰۰	۰/۱۱۱۳	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۳۴/۸۱۴	۰/۵۸۰۰	۱۹/۷۸۰۲	۲/۵۴۰
۱۶/۱۳۵۰	۰/۱۵۸۰	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۴۴/۴۱۸	۰/۸۰۰۰	۲۱/۳۳۵۷	۱/۵۷۰
۴/۰۰۲۹	۰/۲۸۶۷	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۲۶/۴۱۱	۰/۵۸۰۰	۲۶/۹۲۹۵	۲/۵۶۴
۱۱/۲۰۰۰	۰/۱۱۱۳	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۳۴/۸۱۴	۰/۷۱۰۰	۲۹/۵۷۵۳	۲/۰۱۵
۹/۱۶۷۳	۰/۱۷۱۴	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۱۴/۴۰۶	۰/۷۵۰۰	۲۹/۶۹۶۶	۱/۵۵۵
۴/۹۱۰۰	۰/۲۰۷۵	۰/۰۰۷۰	۷۷۴۴	۱۰۰۰/۰۰۰	۰/۶۶۰۰	۳۴/۵۳۸۹	۱/۴۱۸
۶/۵۷۰۵	۰/۰۷۹۶	۰/۰۰۵۰	۷۹۴۹	۱۰۲۰/۴۰۸	۰/۶۱۰۰	۳۹/۴۲۴۰	۱/۱۹۳
۱۱/۴۸۹۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۷۰	۷۷۴۴	۱۰۳۲/۴۱۳	۰/۷۹۰۰	۴۱/۹۵۶۶	۰/۹۵۴
۹/۱۶۷۳	۰/۱۷۱۴	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۱۴/۴۰۶	۱/۰۰۰۰	۵۱/۸۴۹۲	۱/۰۳۹
۱۱/۴۸۹۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۳۲/۴۱۳	۱/۰۸۰۰	۷۸/۶۲۶۱	۰/۷۳۵
۴/۹۱۰۰	۰/۲۰۷۵	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۰۰/۰۰۰	۱/۰۶۰۰	۸۶/۹۵۱۹	۰/۷۹۱
۶/۵۷۰۵	۰/۰۷۹۶	۰/۰۰۷۰	۷۷۴۴	۱۰۲۰/۴۰۸	۰/۹۱۰۰	۸۷/۲۹۴۸	۰/۷۲۹
۱۱/۴۸۹۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۳۲/۴۱۳	۱/۱۸۰۰	۹۴/۴۰۲۵	۰/۷۳۱
۶/۵۷۰۵	۰/۰۷۹۶	۰/۰۱۰۰	۷۷۹۶	۱۰۲۰/۴۰۸	۰/۹۸۰۰	۱۰۳/۵۴۴۳	۰/۹۰۴
۴/۹۱۰۰	۰/۲۰۷۵	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۰۰/۰۰۰	۱/۲۱۰۰	۱۱۴/۴۸۳۱	۰/۷۲۱
۶/۵۷۰۵	۰/۰۷۹۶	۰/۰۱۲۰	۷۷۳۰	۱۰۲۰/۴۰۸	۱/۲۴۰۰	۱۶۵/۰۷۶۵	۰/۶۷۱

جدول ب-۱: ادامه

K (Pa.s ⁿ)	n (-)	d _p (m)	ρ_s (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	V (m/s)	Re (-)	C _D (-)
Kelessidis and Mpandelis, 2004							
۰/۰۰۱۰	۱	۰/۰۰۳۲	۲۵۰۶	۹۹۵/۶۲۹	۰/۳۶۹۲	۱۱۶۱/۵۷۲۰	۰/۴۶۰
۰/۰۰۱۰	۱	۰/۰۰۲۲	۲۶۶۸	۹۹۷/۰۶۶	۰/۲۹۳۵	۶۵۵/۵۱۱۲	۰/۵۷۰
۰/۰۰۱۰	۱	۰/۰۰۱۲	۲۳۱۴	۱۰۰۳/۹۰۳	۰/۱۷۶۳	۲۱۵/۹۲۵۴	۰/۶۷۰
۰/۰۰۱۰	۱	۰/۰۰۲۶	۱۱۴۴۴	۹۸۹/۰۵۶	۱/۰۶۶۰	۲۷۷۲/۸۹۷۲	۰/۳۲۰
۰/۱۳۵۰	۱	۰/۰۰۳۲	۲۵۰۶	۱۲۲۷/۱۱۰	۰/۰۴۲۰	۱/۲۰۶۴	۲۴/۴۲۰
۰/۱۳۵۰	۱	۰/۰۰۲۲	۲۶۶۸	۱۲۳۸/۳۹۶	۰/۰۲۳۲	۰/۴۷۶۷	۶۲/۸۴۰
۰/۱۳۵۰	۱	۰/۰۰۱۲	۲۳۱۴	۱۲۲۷/۰۰۳	۰/۰۰۷۲	۰/۰۷۹۸	۲۷۲/۷۰۰
۰/۱۳۵۰	۱	۰/۰۰۲۶	۱۱۴۴۴	۱۲۲۶/۶۸۸	۰/۱۸۴۸	۴/۴۱۶۳	۸/۳۹۰
۰/۱۳۵۰	۱	۰/۰۰۳۱	۷۸۵۹	۱۲۲۶/۴۹۳	۰/۱۶۵۶	۴/۶۴۸۹	۷/۹۷۰
۰/۱۱۵۲	۰/۷۴۴۹	۰/۰۰۳۲	۲۵۰۶	۹۹۹/۵۹۱	۰/۱۲۸۲	۹/۰۳۹۸	۳/۷۹۰
۰/۱۱۵۲	۰/۷۴۴۹	۰/۰۰۲۲	۲۶۶۸	۹۹۹/۹۴۴	۰/۰۸۳۵	۴/۰۸۶۰	۷/۰۱۰
۰/۱۱۵۲	۰/۷۴۴۹	۰/۰۰۱۲	۲۳۱۴	۹۹۹/۹۸۵	۰/۰۳۲۱	۰/۷۸۲۸	۲۰/۳۵۰
۰/۱۱۵۲	۰/۷۴۴۹	۰/۰۰۲۶	۱۱۴۴۴	۹۹۸/۱۳۱	۰/۴۶۵۷	۳۹/۷۴۳۲	۱/۶۶۰
۰/۰۸۶۵	۰/۸۶۱۰	۰/۰۰۳۲	۲۵۰۶	۹۹۹/۵۹۲	۰/۱۰۳۱	۶/۱۱۲۸	۵/۸۶۰
۰/۰۸۶۵	۰/۸۶۱۰	۰/۰۰۲۲	۲۶۶۸	۱۰۰۰/۲۱۱	۰/۰۶۳۷	۲/۶۲۸۲	۱۲/۰۴۰
۰/۰۸۶۵	۰/۸۶۱۰	۰/۰۰۱۲	۲۳۱۴	۹۹۹/۹۸۴	۰/۰۲۲۵	۰/۴۷۶۰	۴۱/۴۲۰
۰/۰۸۶۵	۰/۸۶۱۰	۰/۰۰۲۶	۱۱۴۴۴	۹۹۹/۰۸۹	۰/۳۸۵۵	۲۳/۴۲۸۹	۲/۴۲۰
۰/۰۸۶۵	۰/۸۶۱۰	۰/۰۰۳۱	۷۸۵۹	۹۹۹/۸۲۶	۰/۳۳۹۹	۲۳/۳۳۸۵	۲/۴۰۰
۰/۰۸۴۹	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۳۲	۲۵۰۶	۹۹۹/۸۳۵	۰/۰۸۲۰	۴/۰۹۱۰	۹/۲۶۰
۰/۰۸۴۹	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۲۲	۲۶۶۸	۹۹۹/۹۲۲	۰/۰۴۹۳	۱/۷۱۸۰	۲۰/۱۱۰
۰/۰۸۴۹	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۱۲	۲۳۱۴	۱۰۰۰/۰۰۴	۰/۰۱۶۴	۰/۲۹۷۸	۷۷/۹۶۰
۰/۰۸۴۹	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۲۶	۱۱۴۴۴	۹۹۹/۲۶۷	۰/۳۲۸۶	۱۵/۷۱۱۲	۳/۳۳۰
۰/۰۸۴۹	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۳۱	۷۸۵۹	۹۹۹/۰۷۳	۰/۲۸۲۸	۱۵/۴۴۳۹	۳/۴۷۰

جدول ب-۲: داده‌های آزمایشگاهی انتقال خرده‌ها توسط کف در فضای حلقوی افقی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز

P (psi)	T (F)	V (ft/s)	RPM	Γ	ε (-)	C (%)
Duan, 2007; Duan et al., 2010						
۱۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۴/۴
۱۰۰	۸۰	۲	۴۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۱/۵
۱۰۰	۸۰	۲	۸۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۵/۷
۱۰۰	۸۰	۲	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۱/۶
۱۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۷	۰/۷۸	۳۵/۴
۱۰۰	۸۰	۲	۴۰	۰/۷	۰/۷۸	۳۱/۳
۱۰۰	۸۰	۲	۱۲۰	۰/۷	۰/۷۸	۲۲/۱
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۱/۱
۱۰۰	۸۰	۳	۴۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۵/۷
۱۰۰	۸۰	۳	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۱۸/۷
۱۰۰	۸۰	۴	۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۹
۱۰۰	۸۰	۴	۸۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۵/۱
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۹	۰/۷۸	۲۶/۱
۱۰۰	۸۰	۳	۴۰	۰/۹	۰/۷۸	۲۳/۹
۱۰۰	۸۰	۳	۱۲۰	۰/۹	۰/۷۸	۱۹
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۷	۰/۷۸	۳۳/۹
۱۰۰	۸۰	۳	۴۰	۰/۷	۰/۷۸	۳۳/۵
۱۰۰	۸۰	۳	۸۰	۰/۷	۰/۷۸	۲۷/۳
۱۰۰	۸۰	۳	۱۲۰	۰/۷	۰/۷۸	۲۵/۱
۱۰۰	۸۰	۴	۰	۰/۹	۰/۷۸	۲۰
۱۰۰	۸۰	۴	۸۰	۰/۹	۰/۷۸	۱۶/۲
۱۰۰	۸۰	۵	۰	۰/۹	۰/۷۸	۱۶/۴
۱۰۰	۱۲۰	۵	۸۰	۰/۹	۰/۷۸	۱۰/۱
۱۰۰	۱۲۰	۲	۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۵/۶
۱۰۰	۱۲۰	۲	۴۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۴/۶
۱۰۰	۱۲۰	۲	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۹
۱۰۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۹/۶
۱۰۰	۱۲۰	۳	۴۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۷/۲
۱۰۰	۱۲۰	۳	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۸/۲
۱۰۰	۱۶۰	۳	۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۹/۵
۱۰۰	۱۶۰	۳	۴۰	۰/۸	۰/۷۸	۳۰
۱۰۰	۱۶۰	۳	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۵/۷
۲۰۰	۱۰۰	۳	۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۷/۲
۲۰۰	۱۰۰	۳	۸۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۴/۹
۲۰۰	۱۰۰	۳	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۳/۹

جدول ب-۲: ادامه

P (psi)	T (F)	V (ft/s)	RPM	Γ	ε (-)	C (%)
---------	-------	----------	-----	----------	-------------------	-------

۴۰۰	۱۰۰	۳	۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۵/۷
۴۰۰	۱۰۰	۳	۸۰	۰/۸	۰/۷۸	۲۲/۲
۴۰۰	۱۰۰	۳	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۱۸/۱
۱۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۶	۰/۷۸	۴۹/۳
۱۰۰	۸۰	۲	۴۰	۰/۶	۰/۷۸	۴۵/۵
۱۰۰	۸۰	۲	۱۲۰	۰/۶	۰/۷۸	۳۸/۸
Chen, 2005; Chen et al., 2007						
۱۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۷	.	۳۲/۲
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۷	.	۳۰/۶
۱۰۰	۸۰	۴	۰	۰/۷	.	۲۶/۵
۱۰۰	۸۰	۵	۰	۰/۷	.	۲۳/۱
۱۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۸	.	۲۹/۸
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۸	.	۲۷/۵
۱۰۰	۸۰	۴	۰	۰/۸	.	۲۶
۱۰۰	۸۰	۵	۰	۰/۸	.	۲۶/۹
۱۰۰	۸۰	۶	۰	۰/۸	.	۲۱/۷
۱۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۹	.	۲۴/۸
۱۰۰	۸۰	۴	۰	۰/۹	.	۲۴
۱۰۰	۸۰	۵	۰	۰/۹	.	۱۸/۲
۱۰۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۷	.	۳۳/۱
۱۰۰	۱۶۰	۳	۰	۰/۷	.	۳۰/۸
۱۰۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۸	.	۲۸/۹
۱۰۰	۱۶۰	۳	۰	۰/۸	.	۳۱/۹
۱۰۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۹	.	۲۵/۵
۱۰۰	۱۲۰	۴	۰	۰/۹	.	۲۲/۹
۱۰۰	۱۲۰	۵	۰	۰/۹	.	۱۷/۱
۱۰۰	۱۶۰	۳	۰	۰/۹	.	۲۷/۸
۱۰۰	۱۶۰	۴	۰	۰/۹	.	۲۶/۶
۱۰۰	۱۶۰	۵	۰	۰/۹	.	۲۱/۸
۲۵۰	۸۰	۳	۰	۰/۷	.	۳۳/۵
۴۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۷	.	۳۰/۵
۲۵۰	۸۰	۲	۰	۰/۸	.	۳۲
۲۵۰	۸۰	۳	۰	۰/۸	.	۲۸/۸
۲۵۰	۸۰	۴	۰	۰/۸	.	۲۶/۸
۴۰۰	۸۰	۲	۰	۰/۸	.	۲۸/۴
۲۵۰	۸۰	۳	۰	۰/۹	.	۲۰/۵

جدول ب-۲: ادامه

P (psi)	T (F)	V (ft/s)	RPM	Γ	ε (-)	C (%)
---------	-------	----------	-----	----------	-------------------	-------

۴۰۰	۸۰	۳	۰	۰/۹	۰	۱۹/۶
۲۵۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۷	۰	۳۰/۷
۴۰۰	۱۷۰	۳	۰	۰/۷	۰	۳۳/۹
۲۵۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۸	۰	۲۸/۶
۴۰۰	۱۷۰	۳	۰	۰/۸	۰	۳۳/۲
۲۵۰	۱۲۰	۳	۰	۰/۹	۰	۲۳/۹
۴۰۰	۱۷۰	۳	۰	۰/۹	۰	۲۸/۲

ب-۲ روش رگرسیون خطی چند متغیره

در رگرسیون خطی ساده فرض بر این است که یک رابطه تقریبی خطی بین متغیر مستقل (X) و متغیر وابسته (Y) وجود دارد. این فرض به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (\text{ب-۱})$$

که در آن:

α و β ضرایب مجهول و ε یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و واریانس مجهول σ^2 می‌باشد. ε را جمله اختلال یا خطای غیر قابل مشاهده می‌نامند. برای برآورد α و β می‌توان از روابط زیر استفاده نمود (اهرابی و تقوی‌طلب، ۱۳۸۱).

$$\beta = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{ب-۲})$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (\text{ب-۳})$$

رابطه خطی بین X و Y با معیاری به نام ضریب همبستگی (R) ارزیابی می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{\beta^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{ب-۴})$$

هر چقدر مقدار R^2 به ۱ نزدیکتر باشد، رابطه خطی بین X و Y از اعتبار بیشتری برخوردار است. این که چه مقداری از R^2 قابل قبول است تا رابطه خطی خوبی بین X و Y برقرار باشد، به حجم نمونه‌ها بستگی دارد.

بیوست ج: روش مدل‌سازی عددی جریان چند فازی و روش شکاف معادل

در این بخش روش مدل‌سازی دینامیک سیالات چند فازی و روش تحلیلی شکاف معادل برای حل جریان توضیح داده می‌شود

ج-۱- مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان‌های چند فازی

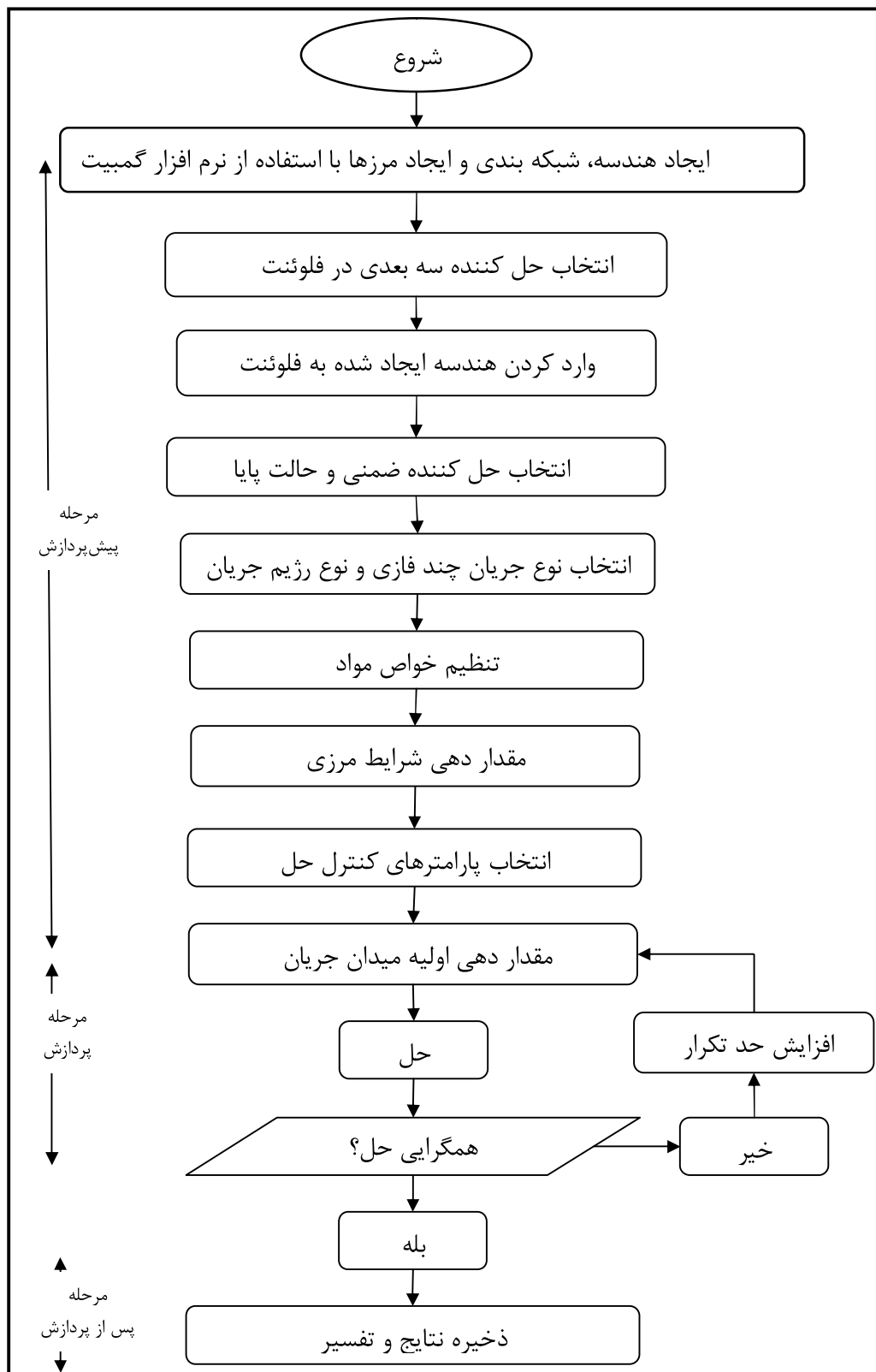
آزمایشات عملی و محاسبات تئوری، دو روش اصلی و مشخص برای چگونگی جریان سیال در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی می‌باشند. در اندازه‌گیری‌های تجربی به دلیل هزینه‌های زیاد ترجیح داده می‌شود که آزمایش‌ها بر روی مدلی با مقیاس کوچک‌تر از نسخه اصلی انجام پذیرد. حذف پیچیدگی‌ها و ساده‌سازی آزمایش‌ها، خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری و بعضی موانع در راه اندازه‌گیری، از جمله مشکلاتی هستند که روش‌های عملی با آن‌ها رو به رو هستند و کارآیی این حالت‌ها را در بعضی موارد مورد سوال قرار می‌دهند. مهم‌ترین امتیاز محاسبات تئوری در مقایسه با آزمایش‌های تجربی، هزینه کم آن است. گرچه در بسیاری موارد ترجیح داده می‌شود با استفاده از روش‌های محاسباتی، آنالیز جریان صورت گیرد ولی تایید تحلیل‌های عددی نیاز به مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و یا نتایج تایید شده دیگری دارد. در میان محققین، انجام پژوهش‌های تجربی ارزش بسیاری دارد و اگر بتوان آزمایش مطلوبی انجام داد، تحلیل‌های زیادی را بر محور آن‌ها می‌توان گسترش داد و اطلاعات فراوانی بدست آورد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارای انعطاف پذیری بالا برای تغییر پارامترهای طراحی، بدون تغییر هزینه زیاد سخت افزاری و از نظر زمانی نیز در مقایسه با آزمایشات بهتر می‌باشد. CFD به مهندسين کمک می‌کند که به اساس مسئله پی برده و بتواند اطلاعات کافی در مورد میدان جریان که اندازه‌گیری‌ها مشکل یا غیرممکن هستند، فراهم کند. وجود نرم افزارهای قوی و چند منظوره از جمله فلوئنت، PHOENICS (Spalding, 1981) و ... محدوده کاربری CFD را گسترش داده است (شجاعی فرد و نورپور هشتروندی، ۱۳۸۹). اکثر نرم افزارهای CFD از جمله فلوئنت، قابلیت شبیه‌سازی و مدل کردن موارد زیر را دارد (FLUENT, 2006) که این قابلیت‌ها باعث کاربرد این نرم افزار در بازه بسیاری از صنایع شامل صنایع نفت و گاز می‌شود.

- جریان در هندسه‌های پیچیده دو بعدی و سه بعدی با امکان بهینه‌سازی حل و شبکه،
- جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر،
- تحلیل پایا یا گذرا،
- جریان‌های لزج، آرام و متلاطم،
- سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی،
- جریان در محیط متخلخل،
- جریان‌های چند فازی^۱ و ...

ج-۱-۱ مراحل انجام تحقیق حاضر توسط نرم افزار فلوئنت

به طور کلی تحلیل مدل توسط فلوئنت دو قسمت دارد: یکی ایجاد هندسه و تولید شبکه توسط نرم افزارهای پیش پردازشگر سازگار با آن از قبیل: PreBFC، eomesh، Gambit و غیره (در این مطالعه از نرم افزار گمبیت استفاده شد) و دیگری پردازشگر اصلی فلوئنت که ساختار اصلی برنامه است. در فلوچارت شکل ج-۱-۱ مراحل انجام کار مشخص شده است.



شکل ج-۱: فلوچارت فرآیند انجام حل دینامیک سیالات محاسباتی

مراحل حل عددی مساله شامل موارد زیر می‌باشد: معادلات حاکم، گسسته‌سازی معادلات، شرایط مرزی و حل معادلات.

• معادلات حاکم

حل عددی جریان سیال و سایر فرآیندهای مربوط به آن‌ها وقتی می‌تواند صورت پذیرد که قوانین فیزیکی حاکم بر این فرآیندها به زبان ریاضی، معمولاً بر حسب معادلات دیفرانسیل، بیان شده باشند. معادلات دیفرانسیل خاصی که با آن‌ها مواجه هستیم، بیان‌کننده یک اصل بقای معین می‌باشند. هر معادله یک کمیت فیزیکی را به عنوان متغیر وابسته خود به کار برده و یک موازنه بین عوامل مختلف اثرکننده بر متغیر مذکور را بیان می‌کند. متغیرهای وابسته این معادلات دیفرانسیلی معمولاً خواص مخصوص هستند، یعنی کمیت‌هایی که بر مبنای واحد جرم تعریف می‌شوند. خواصی مانند کسر جرمی، سرعت و آنتالپی مخصوص را می‌توان نام برد. در یک معادله دیفرانسیل از این نوع، هر جمله تغییرات را بر اساس واحد حجم نشان می‌دهد. اساساً معادلات هیدرودینامیک حاکم بر یک سیال توسط معادله پیوستگی و سه معادله اندازه حرکت که برای محورهای سه‌گانه مختصات می‌باشند و برای سیالات نیوتنی به معادلات ناویر-استوکس معروفند، بیان می‌شوند. به عبارتی این معادلات بیانگر بقای جرم و بقای اندازه حرکت به بیان ریاضی هستند. در ادامه به توضیح این معادلات در حالت جریان تک‌فازی و چندفازی پرداخته خواهد شد.

• گسسته‌سازی معادلات

حل عددی معادلات، شامل گسسته‌سازی آنها و ایجاد یک دستگاه معادلات جبری برای مقادیر کمیت‌های مجهول در نقاط خاصی از میدان حل می‌باشد. گسسته‌سازی فرآیندی است که به واسطه آن یک عبارت پیوسته ریاضی مانند معادله دیفرانسیلی یا انتگرالی شامل توابع مختلف، توسط عبارات مشابه ولی متفاوت تقریب زده می‌شوند. روش‌های گسسته‌سازی عبارتند از: تفاضل محدود، اجزاء محدود، روش‌های طیفی و حجم محدود. تفاوت‌های اصلی بین روش‌های فوق به روشی که در آن متغیرهای جریان تقریب می‌خورند و فرآیند گسسته‌سازی صورت می‌گیرد، مربوط می‌شود. متداول‌ترین روش دینامیک سیالات محاسباتی، روش حجم‌های محدود است و با توجه به اینکه نرم افزار فلوئنت از روش حجم محدود استفاده

می‌کند، در ادامه این روش توضیح داده می‌شود. طرح‌های بالادستی^۱ مرتبه اول و دوم، قانون توان^۲، کوئیک^۳ (Quick) و ... می‌تواند برای گسسته‌سازی استفاده شوند (شجاعی فرد و نورپور هشترودی، ۱۳۸۹).

روش حجم‌های محدود

این روش به عنوان یک فرمول‌بندی اختلاف محدود ویژه، توسعه و در برنامه‌های اصلی تجاری CFD مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین ویژگی‌های روش حجم محدود انعطاف‌پذیری این روش برای شبکه‌های باسازمان و بی‌سازمان و مسایل با هندسه پیچیده است. همچنین عدم نیاز به نگاشت‌ها و تبدیل مختصات‌های متداول در روش تفاضل محدود و اطمینان از ارضای قوانین بقاء از مزیت‌های اصلی این روش می‌باشد. از دیگر قابلیت‌های این روش، حفظ فیزیک مسئله در معادلات گسسته‌سازی شده است. اساس این روش به این شکل است که ناحیه ثابت و مشخصی به عنوان دامنه مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود، و به حجم‌های کنترل محدود گسسته می‌شود و سپس از قوانین پایستاری اعمال شده بر آن، بر روی مرزهای حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود (شجاعی فرد و نورپور هشترودی، ۱۳۸۹).

• روش حل

حل معادلات جبری حاصل از گسسته‌سازی معادلات حاکم، با استفاده از یک روش تکرار توسط نرم افزارهای کامپیوتری صورت می‌گیرد. برای کوپل فشار-سرعت در جریان تک فاز از الگوریتم SIMPLE^۴، SIMPLEC^۵ و PISO^۶ و از الگوریتم PC-SIMPLE^۷ برای جریان چند فازی استفاده می‌شود (شجاعی فرد و نورپور هشترودی، ۱۳۸۹، هاشم آبادی و دهنوی، ۱۳۹۰، FLUENT, 2006).

ج-۱-۲ جریان چند فازی

معادله پیوستگی، فرم دیفرانسیلی قانون بقای جرم را برای جریان سیال (جریان تک فاز)، بصورت زیر بیان می‌کند (شجاعی فرد و نورپور هشترودی، ۱۳۸۹):

1 - Upwin
 2 - Power-low
 3 - Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics (QUICK)
 4 - Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
 5 - SIMPLE Consistent
 6 - Pressure-Implicit with Splitting of Operators
 7 - Phase Coupled SIMPLE

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = S_m \quad (\text{ج-۱})$$

که در آن:

V بردار سرعت سیال، ρ ، دانسیته، t زمان و S_m منبع اضافه شده به فاز پیوسته از هر منبع دیگر می‌باشد. برای شرایط حالت ایزوترمال، جریان دائم و تراکم ناپذیر و بدون منبع در این مطالعه، ρ ثابت بوده و معادله فوق به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{ج-۲})$$

معادله اندازه حرکت، قانون دوم نیوتن را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (\text{ج-۳})$$

که در آن:

$\frac{D}{Dt}$ اپراتور مشتق مادی با تعریف $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla$ ، p فشار استاتیکی، τ تنسور تنش و ρg نیروی گرانی می‌باشد.

در مورد جریان‌های چندفازی در طبیعت، مسائل زیادی وجود دارند. فازهای فیزیکی مواد شامل گاز، مایع و جامد می‌شوند ولی در یک سیستم جریان چندفازی، مفهوم فاز به صورت گسترده‌تری بکار می‌رود. در جریان چندفازی، هر فاز قسمتی از جریان است که قابلیت تفکیک آن وجود دارد و نسبت به میدان پتانسیلی که در آن قرار می‌گیرد پاسخ داده و با سایر فازها بر همکنش دارد. برای مثال ذرات جامد با اندازه‌های مختلف از یک ماده خاص می‌توانند به صورت فازهای مختلف عمل کنند زیرا هر مجموعه از ذرات با اندازه یکسان دارای پاسخ دینامیکی مشابهی به میدان جریان می‌باشند. رژیم‌های جریان چندفازی به چهار گروه تقسیم می‌شوند: مایع-گاز یا مایع-مایع، جامد-گاز، جامد-مایع و جریان‌های سه‌فازی (FLUENT, 2006، هاشم آبادی و دهنوی، ۱۳۹۰). جریان‌های مایع-گاز یا مایع-مایع شامل موارد زیر می‌شوند:

- جریان حبابی^۱: جریان گسسته گازی یا حباب‌های سیال در یک محیط پیوسته.
- جریان قطره^۲: جریان گسسته قطرات سیال در یک فاز پیوسته.
- جریان اسلاگ^۳: جریان حباب‌های بزرگ گاز در یک سیال پیوسته.
- جریان سطح-آزاد/لایه‌ای^۴: جریان سیالات غیر قابل امتزاج جدا شده با یک فصل مشترک تعریف شده آشکار

جریان‌های گاز- جامد شامل موارد زیر هستند:

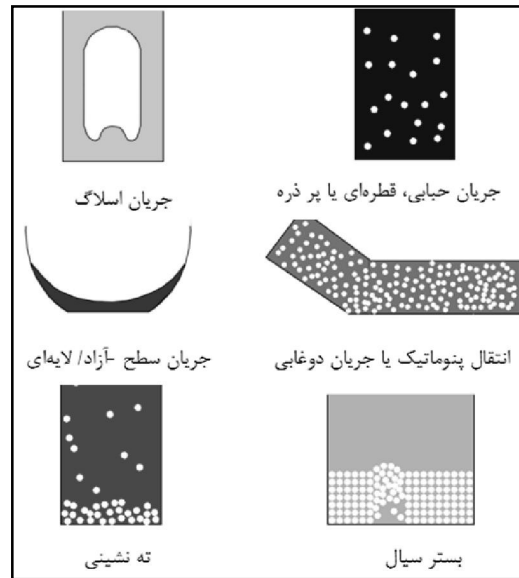
- جریان‌های پر ذره^۵: جریان ذرات جامد با نسبت وزنی بالا در یک گاز
- انتقال پنوماتیک^۶: حمل ذرات جامد توسط جریان گاز است که به عاملهایی از قبیل مقدار جامد، عدد رینولدز و خواص ذرات بستگی دارد. الگوهای نمونه شامل جریان شنی، جریان اسلاگ و جریان یکنواخت می‌باشند.
- بستر سیال^۷: متشکل از یک استوانه عمودی حاوی ذرات است که در آن گاز از طریق توزیع کننده وارد می‌شود. گازی که از میان بستر بالا می‌آید، موجب معلق نگه داشتن ذرات جامد می‌شود. تشدید اختلاط داخل بستر به شدت جریان گاز، ظاهر شدن و بالا رفتن حباب‌ها از میان بستر بستگی دارد.

جریان‌های مایع- جامد شامل موارد زیر می‌شوند:

- جریان دوغابی^۸: این جریان، انتقال ذرات در مایعات می‌باشد. رفتار اساسی جریان‌های مایع - جامد، با خواص ذرات جامد نسبت به مایع، تغییر می‌کند. در جریان‌های دوغاب، عدد استوکس معمولاً کوچکتر از یک می‌باشد. زمانی که عدد استوکس بزرگتر از یک باشد، جریان سیال شده مایع- جامد به وجود می‌آید.

1- Bubbly flow
 2- Droplet
 3- Slug flow
 4- Stratified/ free-surface flow
 5- Particle- laden
 6- Pneumatic transport
 7- Fluidized bed
 8- Slury

- انتقال با آب^۱: این رژیم، توزیع متراکم ذرات در یک محیط مایع می‌باشد.
 - ته‌نشینی^۲: این رژیم یک ستون را توصیف می‌کند که در ابتدا شامل ترکیب یکنواختی از ذرات است. در پایین ستون، ذرات به آرامی می‌نشینند و تشکیل لایه لجن می‌دهند. در قسمت بالا یک فصل مشترک شفاف دیده می‌شود و در قسمت وسط یک ناحیه ته‌نشینی ثابت وجود خواهد داشت.
- شکل ج-۲ این رژیم‌های جریان را نشان می‌دهد.



شکل ج-۲: الگوهای جریان چند فازی (هاشم آبادی و دهنوی، ۱۳۹۰)

به طور کلی برای بررسی جریان‌های سیال-ذره (سیال پیوسته همراه با حباب، قطره یا ذره جامد) دو دیدگاه اوپلر- لاگرانژی^۳ و اوپلر- اوپلر وجود دارد. تفاوت اصلی این دو دیدگاه در گسسته یا پیوسته فرض کردن ذرات می‌باشد. در هر دو دیدگاه فاز سیال پیوسته در دستگاه مختصات اوپلری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در دیدگاه لاگرانژی ذرات به صورت مجزا در داخل ناحیه محاسباتی ردیابی می‌شوند و چارچوب مرجع به همراه ذرات حرکت می‌کند. مدل‌های لاگرانژی که ذرات را به صورت فاز گسسته در نظر می‌گیرند به مدل‌های ناپیوسته نیز معروف هستند. در مدل‌های اوپلری خصوصیات فاز ذره بوسیله حل معادلات دیفرانسیل جزئی در یک دستگاه مختصات معین بدست می‌آید. دستگاه ثابت است و ذرات در داخل

1- Hydrotransport
2- Sedimentation
3- Euler- Lagrange approach

حجم‌های کنترل دیفرانسیلی ثابت عبور می‌کنند. این مدل‌ها که ذرات را مانند یک فاز پیوسته در نظر می‌گیرند به مدل‌های پیوسته نیز معروف هستند. با توجه به نیازهای موجود، هر دو مدل‌های اویلری و لاگرانژی به طور گسترده برای حل انتقال ذرات در جریان‌های سیال-ذره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه هر یک از این دیدگاه‌ها شرح داده می‌شود:

✓ دیدگاه اویلر-لاگرانژ

اساس دیدگاه اویلر-لاگرانژ برای بررسی جریان‌های سیال-ذره در این است که جریان سیال را از دیدگاه اویلری مورد بررسی قرار داده و از دیدگاه لاگرانژی برای ردگیری ذرات در داخل میدان جریان استفاده می‌کند. این دیدگاه برای سیستم‌هایی می‌تواند بکار رود که کسر حجمی فاز گسسته کمتر از ۱۲٪ باشد.

✓ دیدگاه اویلر-اویلر

در دیدگاه اویلر-اویلر هم سیال پیوسته و هم ذرات پراکنده به عنوان محیط‌های پیوسته‌ای که در هم نفوذ می‌کنند در نظر گرفته می‌شوند و همه فازها در چهارچوب مرجع اویلری بررسی می‌شوند. به دلیل اینکه حجم یک فاز نمی‌تواند توسط فازهای دیگر اشغال شود، مفهوم فیزیکی کسر حجمی معرفی می‌شود. این کسر حجمی فازها به عنوان توابع پیوسته‌ای از مکان و زمان فرض می‌شوند و جمع آن‌ها برابر ۱ است. مهم‌ترین مدل‌های چند فازی که از دیدگاه اویلر-اویلر بهره می‌گیرند و در اکثر کدهای تجاری و نرم‌افزارهای معروف در دسترس می‌باشند، عبارتند از: مدل ردیابی فصل مشترک بین فازی یا حجم سیالی (VOF)^۱، مدل مخلوط^۲ و مدل دو سیالی یا اویلری^۳.

برای انتخاب مدل مناسب برای تحلیل سیستم چند فازی مورد نظر می‌توان موارد زیر را در نظر گرفت:

- برای جریان‌های حبابی، قطره‌ای و ذره‌ای که فازها با هم مخلوط می‌شوند یا درصد حجمی فاز پراکنده بیشتر از ۱۰٪ است، از مدل مخلوط یا اویلری استفاده می‌گردد.
- برای جریان‌های لخته‌ای، مدل حجم سیالی استفاده می‌گردد.
- برای جریان‌های لایه‌ای یا سطح آزاد، مدل VOF استفاده می‌گردد.

1 - Volume of fluid

2 - Mixture model

3 - Eulerian model

- برای انتقال پنوماتیکی مدل مخلوط برای جریان همگن یا مدل اوپلری برای جریان دانه‌ای.
 - برای بسترهای سیالی شده و جریان دانه‌ای^۱ از مدل اوپلری استفاده می‌شود.
 - برای جریان‌های دوغابی و انتقال هیدرو از مدل مخلوط یا اوپلری استفاده می‌شود.
 - برای رسوب گذاری از مدل اوپلری استفاده می‌گردد.
 - به طور کلی برای جریان‌های چند فازی که شامل جریان چند رژیم می‌شوند، مدلی انتخاب می‌شود که بیشترین تناسب را داشته باشد.
- برای انتخاب بین مدل مخلوط و اوپلری موارد زیر را باید در نظر گرفت:
- اگر توزیع وسیعی از فازهای پراکنده باشد (به عبارتی اندازه ذرات تغییر می‌کند) مدل مخلوط می‌تواند بهتر باشد. اگر فازهای پراکنده فقط در قسمت‌هایی از محدوده جمع می‌شوند، مدل اوپلری بهتر می‌باشد.
 - اگر قوانین نیروی پسا بین فازی کاربردی برای سیستم مدل در نرم افزار وجود دارند، مدل اوپلری می‌تواند نتایج دقیق‌تری را فراهم کند. حتی اگر بتوان قوانین نیروی پسا یکسانی برای مدل مخلوط بکار برد باز هم بهتر است از اوپلری استفاده نمود ولی اگر نیروهای پسا مشخص نباشد، مدل مخلوط انتخاب بهتری است. برای اکثر موارد با ذرات کروی، قانون چیلر-نیومن^۲ دقیق‌تر می‌باشد. برای موارد ذرات غیر کروی باید تابع تعریف شود.
 - برای حل مسائل ساده که احتیاج به محاسبات کمی می‌باشد، مدل مخلوط گزینه بهتری می‌باشد چون تعداد معادلات کمتری را حل می‌کند. اگر دقت مساله مهم می‌باشد، مدل اوپلری گزینه بهتر می‌باشد. باید در نظر داشت که پیچیدگی مدل اوپلری می‌تواند از نظر محاسباتی نسبت به مدل مخلوط پایداری کمتری داشته باشد.
- مدل اوپلری نسبت به دیگر روش‌ها کامل‌تر می‌باشد و قادر به مدل‌سازی دامنه وسیعی از جریان‌های چند فازی است. در این قسمت به توضیح دو مدل مخلوط و اوپلری می‌پردازیم:

1 - Granular

2 - Schiller- Naumann

- مدل مخلوط

مدل مخلوط مدل چند فازی ساده شده است که می‌تواند در موارد مختلفی استفاده گردد. این مدل می‌تواند برای مدل‌سازی جریان‌های چند فازی که فازها دارای سرعت‌های مختلفی هستند بکار رود. این مدل می‌تواند برای مدل‌سازی جریان‌های چند فازی همگن با درجه کوپلینگ بالا استفاده شود، مدل‌های مخلوط برای محاسبه گرانشی غیرنیوتنی استفاده می‌شوند. مدل مخلوط می‌تواند n فاز را توسط حل معادلات پیوستگی و ممنوم و انرژی برای مخلوط، معادلات درصد حجمی برای فازهای ثانویه و معادلات جبری برای سرعت‌های نسبی، مدل کند. همچنین مدل مخلوط می‌تواند برای فازهای دانه‌ای انتخاب شود و تمامی خواص فازهای دانه‌ای را محاسبه کند که این در جریان‌های مایع-جامد کاربرد دارد.

• معادله پیوستگی برای مخلوط

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (\text{ج-۴})$$

که v_m سرعت جرمی متوسط:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (\text{ج-۵})$$

و ρ_m دانسیته مخلوط:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (\text{ج-۶})$$

α_k کسر حجمی فاز k.

• معادله ممنوم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m \nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T] + \quad (\text{ج-۷})$$

$$\rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)$$

در این معادلات n، \vec{F} و μ_m به ترتیب تعداد فازها، نیروی حجمی و گرانشی مخلوط می‌باشد:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (\text{ج-۸})$$

$\vec{v}_{dr,q}$ سرعت رانشی فاز k نسبت به مخلوط است:

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (\text{ج-۹})$$

• معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه

با استفاده از معادله پیوستگی، معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه p به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{qp} - m_{pq}) \quad (\text{ج-۱۰})$$

که در آن m_{pq} انتقال جرم از فاز p به فاز q است.

- مدل اویلری

همان طور که اشاره شد، در دیدگاه اویلر- اویلر ذرات مانند یک فاز پیوسته مورد بررسی قرار می گیرند. مدل اویلری از پیچیده ترین مدل های چند فازی در نرم افزارهای دینامیک سیالاتی می باشد. این مدل، مجموعه ای از n معادله اندازه حرکت و پیوستگی برای هر فاز حل می کند. وابستگی میان فازها از طریق فشار و ضرایب انتقال فاز میانی حاصل می شود. میزان و نوع وابستگی فازها، به نوع مخلوط دو یا چند فازی بستگی دارد. برای مثال شیوه بررسی جریان های دانه دار (سیال - جامد) با روش های به کار رفته برای جریان های بدون ذرات جامد (سیال - سیال مثل جریان حبابی) متفاوت است. با استفاده از مدل اویلری می توان هر تعدادی از فازهای ثانویه را مدل کرد به شرطی که حافظه کافی در دسترس باشد. البته برای جریان های چندفازی پیچیده ممکن است محدودیت همگرایی نیز وجود داشته باشد. این مدل برای شبیه سازی بسترهای سیالی شده، ستون های حباب، رایزرها و تعلیق ذرات نیز مناسب می باشد. برای تبدیل از یک مدل تک فاز، که در آن مجموعه ای از معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی حل می گردد، به یک مدل چندفازی، معادلات بقاء اضافی بایستی معرفی گردند. ضمن معرفی مجموعه معادلات بقاء اضافی، معادلات اصلی نیز بایستی اصلاح شوند. این اصلاحات شامل، معرفی کسرهای حجمی، $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ برای فازهای

مختلف و نیز مکانیزم‌های تبدیل و تبادل مومنتم، حرارت و جرم میان فازها می‌باشد. جزئیات بیشتری در مورد مدل چند فازی اویلر در ادامه بیان شده است.

کسر حجمی

کسر حجمی بیان کننده فضای اشغال شده به وسیله هر فاز می‌باشد و قوانین بقاء جرم و اندازه حرکت به وسیله هر فاز به طور جداگانه ارضاء می‌شوند. استخراج معادلات بقاء را می‌توان با متوسط‌گیری تجمعی از موازنه همزمان محلی برای هر فاز یا روش تئوری مخلوط انجام داد. حجم فاز V_q, q را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (\text{ج-} 11)$$

باید توجه داشت که مجموع کسر حجمی همه فازها برابر یک است.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (\text{ج-} 12)$$

بر اساس مقادیر محلی α_q ، خصوصیات و متغیرهای مناسب برای هر حجم کنترل در داخل ناحیه محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. برای مثال دانسیته مؤثر فاز q به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (\text{ج-} 13)$$

در معادله فوق ρ_q دانسیته فیزیکی فاز q می‌باشد.

معادلات بقاء

معادلات بقاء کلی که توسط فلوننت حل می‌شوند، در این قسمت معرفی شده‌اند و به دنبال آن روی حل آن‌ها بحث شده است.

بقای جرم

معادله پیوستگی برای فاز q برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (m_{qp} - m_{pq}) + S_q \quad (\text{ج-} 14)$$

که در آن:

\vec{v}_q^p سرعت فاز q و m_{pq} عبارت از انتقال جرم از فاز p به فاز q و m_{qp} از فاز q به فاز p است. S_q نیز عبارت چشمه جرم فاز q است.

بقای ممنتوم (اندازه حرکت) سیال - سیال

موازنه اندازه حرکت برای فاز q خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\bar{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\bar{F}_q + \bar{F}_{lift,q} + \bar{F}_{VM,q}) \quad (ج-۱۵)$$

که $\bar{\tau}_q$ تانسور تنش - کرنش فاز q نام است.

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad (ج-۱۶)$$

μ_q و λ_q به ترتیب گرانیوی برشی و حجمی فاز q می باشد. \bar{F}_q ، $\bar{F}_{lift,q}$ و $\bar{F}_{vm,q}$ به ترتیب نیروی حجمی خارجی، نیروی برآ^۱ و نیروی جرم مجازی^۲ و \bar{R}_{pq} نیروی برهم کنش بین دو فاز و p فشار مشترک بین تمام فازها می باشد.

\vec{v}_{pq} سرعت فاز میانی می باشد و به صورت زیر تعریف می شود. اگر $m_{pq} > 0$ (یعنی جرم فاز p به فاز q منتقل شود) $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$ و اگر $m_{pq} < 0$ (یعنی جرم فاز q به فاز p منتقل شود) $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$. معادله (ج-۱۵) می بایست با استفاده از عبارت مناسب برای نیروی برهم کنش میان فازها \bar{R}_{pq} کامل شود. این نیرو به اصطکاک، فشار، چسبندگی و دیگر اثرات بستگی دارد. این نیرو تحت شرایطی که $\bar{R}_{qp} = -\bar{R}_{pq}$ ، $\bar{R}_{qq} = 0$ است. برای مدل کردن این نیرو از عبارت زیر استفاده می شود.

$$\sum_{p=1}^n \bar{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (ج-۱۷)$$

که K_{pq} (= K_{qp}) ضریب تبادل مومنتم بین دو فاز می باشد.

1- Lift force
2- Virtual mass

بقای ممنتوم (اندازه حرکت) سیال - جامد

فلوئنت از یک مدل دانه‌ای سیال چند گانه برای تشریح رفتار جریان مخلوط سیال - جامد استفاده می‌کند. بقای ممنتوم برای فاز سیال مانند معادله (ج-۱۵) و برای فاز جامد s ام برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{l=1}^n (K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + n_{ls} \vec{v}_{ls} - n_{sl} \vec{v}_{sl}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{VM,s}) \quad (ج-۱۸)$$

جزئیات بیشتری در مورد پارامترهای معادلات فوق در منابع (هاشم آبادی و دهنوی، ۱۳۹۰، FLUENT, 2006, Kaushal et al., 2012) ارائه گردیده است.

ج-۲- روش شکاف معادل

استفاده از شکاف معادل برای هندسه فضای حلقوی به طور گسترده در مهندسی حفاری برای اهداف کاربردی استفاده شده است (Bourgoyne et al., 1991). معادله شکاف که یکی از پرکاربردترین معادلات قطر معادل برای جریان فضای حلقوی است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_e = 0.816(d_o - d_i) \quad (ج-۱۹)$$

که در آن:

d_o قطر لوله خارجی (m) و d_i قطر لوله حفاری (m) است.

رابطه گرادیان اصطکاکی فشار در فضای حلقوی برای روش شکاف معادل به صورت زیر تعریف می‌شود که توسعه یافته معادلات لوله است:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{2f\rho v^2}{d_e} \quad (ج-۲۰)$$

که در آن:

$\frac{dP}{dL}$ گرادیان اصطکاکی فشار (Pa/m)، f عامل اصطکاکی فن (-)، ρ دانسیته سیال (kg/m³) و v

متوسط سرعت ورودی سیال به فضای حلقوی (m/s) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v = \frac{Q}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} \quad \text{(ج-۲۱)}$$

که در آن:

Q دبی جریان (m³/s) است.

عامل اصطکاک برای جریان آرام و جریان متلاطم به ترتیب به صورت روابط (ج-۲۲) و (ج-۲۳) تعریف

می‌شود (Dodge and Metzner, 1959):

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \quad \text{(ج-۲۲)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log(\text{Re} f^{1-\frac{n}{2}}) - \frac{0.395}{n^{1.2}} \quad \text{(ج-۲۳)}$$

عدد رینولدز اصلاح شده برای سیال غیرنیوتنی قانون توان برابر است با:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_e}{\mu_{eff}} = \frac{\rho v^{2-n'} d_e^{n'}}{K' 8^{n'-1}}, \quad n' = n, \quad K' = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad \text{(ج-۲۴)}$$

برای فضای حلقوی غیر هم‌مرکز در جریان آرام و متلاطم باید از عامل تصحیح فضای حلقوی غیر

هم‌مرکز که توسط هسی اسلام اقلو و کارتالوس (Haciislamoglu and Cartalos, 1994) ارائه شده است،

استفاده نمود که این معادله برای مقادیر خاص n و مدل رئولوژیکی قانون توان برای جریان آرام و متلاطم به

ترتیب به صورت روابط (ج-۲۵) و (ج-۲۶) است:

$$\left[\frac{\Delta P_{ecc}}{\Delta P_{conc}} \right]_{lam} = 1 - 0.072 \frac{\varepsilon}{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.8454} - 1.5 \varepsilon^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.1852} + 0.96 \varepsilon^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.2527} \quad \text{(ج-۲۵)}$$

$$\left[\frac{\Delta P_{ecc}}{\Delta P_{conc}} \right]_{Turb} = 1 - 0.048 \frac{\varepsilon}{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.8454} - \frac{2}{3} \varepsilon^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.1852} + 0.258 \varepsilon^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.2527} \quad \text{(ج-۲۶)}$$

که در آن‌ها:

ΔP_{ecc} افت فشار در فضای حلقوی غیر هم‌مرکز، ΔP_{conc} افت فشار در فضای حلقوی هم‌مرکز، n شاخص

رفتاری سیال و ε عدم هم‌مرکزی و به صورت رابطه (ج-۲۷) است:

$$\varepsilon = \frac{2e}{d_o - d_i} \quad (\text{ج-}27)$$

که در آن: e فاصله مرکز دو لوله است.

قطر معادل و عامل تصحیح در این روابط، تجربی هستند. رابطه افت فشار در این بخش، برای ارزیابی

نتایج حل عددی مدل رئولوژیکی قانون توان برای فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز در حالت بدون

چرخش لوله حفاری استفاده می‌شود.

منابع

- اخوان صفار، ا، (۱۳۸۹) "مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان چند فازی سیال حفاری در انتقال خرده‌های حفاری درون چاه‌های افقی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- اصانلو، م، (۱۳۷۵) "روش‌های حفاری"، چاپ اول، مرکز نشر صدا، ۴۶۸ صفحه.
- انوری، ح، (۱۳۸۷) "مدل‌سازی عددی انتقال خرده‌های حفاری به همراه مطالعه پارامتری عوامل موثر بر آن در یکی از میادین نفتی جنوب ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- اهرابی، ف، تقوی طلب، م، (۱۳۸۱) "احتمالات و تحلیل آماری"، مرکز نشر موسسه عالی بانکداری ایران، ۵۸۹ صفحه.
- شجاعی فرد، م ح و نورپور هشترودی ع ر، (۱۳۸۹) "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی"، چاپ سوم، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ترجمه، ۴۲۰ صفحه.
- صادقی بهبهانی زاده، م، (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی جریان دو فاز (گاز-جامد) در فضای حلقوی چاه حفاری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- هاشم آبادی، ح و دهنوی، م ع، (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی CFD جریان‌های چند فاز با نرم افزار FLUENT"، انتشارات اندیشه سرا.
- عادل زاده، م ر، (۱۳۸۵) "اصول مهندسی حفاری، مبانی، اصول نظری و کاربردی در صنعت با تجارب صنعتی"، چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران، ۸۴۴ صفحه.
- قاسمی کفرودی، ا، (۱۳۹۱) "شبیه‌سازی CFD حمل خرده‌ها توسط گل حفاری"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت.
- Adewumi M.A. and Tian S. (1989) "Hydrodynamic modeling of wellbore hydraulics in air drilling", SPE 19333, Eastern Regional Meeting, Morgantown, WV.
- Adewumi M.A., Tian S. and Watson R.W. (1993) "Fundamental study makes improves air drilling possible", SPE 26893, Pittsburgh, Pennsylvania.

- Ahmed R.M., Takach N.E., Khan U.M., Taoutaou S., James S., Saasen A. and Godoy R. (2009) "Rheology of foamed cement", *Cement. Concrete. res.*, 39, 4, pp. 353-361.
- Ali M.W. (2002) "A parametric study of cutting transport in vertical and horizontal well, using computational fluid dynamics (CFD) ", MSc Thesis, West Virginia University, USA.
- Al-Kayiem H.H., Mohd Zaki N., Asyraf M.Z. and Elfee M.E. (2010) "Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation", *Am. J. Appl. Sci.*, 7, 6, pp. 800-806.
- API (American Petroleum Institute). (2009) "Rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids", Recommended Practice 13D API, Washington, USA.
- Avila R., Pereira E., Miska S., Takach N. and Saasen A. (2008) "Correlation and analysis of cuttings transport with aerated fluid in deviated wells", *SPE. Drill. Completion.*, 23, 2, pp. 132-141,
- Azar J.J. and Robello Samuel G. (2007) "Drilling engineering", PennWell Corporation.
- Becker T.E., Azar J.J. and Okranji S.S. (1991) "Correlations of mud rheological properties with cuttings transport performance in directional drilling", *SPE. Drill. Eng.*, 6, 1, pp. 16-24.
- Beyer A.H., Millhone R.S., and Foote R.W. (1972) "Flow behavior of foam as a well circulating fluid", 47th Annual Fall Meeting of AIME, San Antonio, TX.
- Bilgesu H.I., Mishra N. and Ameri S. (2007) "Understanding the effects of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics", SPE 111208, Kentucky.
- Blauer R.E., Mitchel B.J. and Kohllhaas C.A. (1974) "Determination of laminar, turbulent, and transitional foam flow losses in pipes", SPE Annual California Regional Meeting, USA.
- Bonilla L.F. and Shah S.N. (2000) "Experimental investigation on the rheology of foams", Proceedings of the SPE/CERI Gas Technology Symposium, Alberta, Canada.
- Bourgoyne A.T., Chenevert M.E., Millheim K.K. and Young F.S. (1991) "Applied drilling engineering", SPE Textbook Series, Richardson TX.

- Brown N.P., Bern P.A. and Weaver A. (1989) "Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies", SPE/IADC 18636, Drilling Conference, New Orleans.
- Calvert J.R. and Nezhati K. (1986) "A rheological model for a liquid- gas foam", *Int. J. Heat. Fluid. Fl.*, 7, 3, pp. 164–168
- Capo J., Yu M., Miska S.Z., Takach N.E. and Ahmed R. (2006) "Cuttings transport with aqueous foam at intermediate inclined wells [C]", *SPE. Drill. Completion.*, 21, 2, pp. 99-107.
- Carden R.S. (1991) "Air drilling has some pluses for horizontal wells", *Oil & Gas J.*, 8, pp.76-8.
- Cawiezel K.E. and Niles T.D. (1987) "Rheological properties of foam fracturing fluids under downhole conditions", SPE 16191, Dallas.
- Chhabra R.P. and Peri S.S. (1991) "Simple method for the estimation of free-fall velocity of spherical particles in power law liquids", *Powder Technol.*, 67, pp. 287–290.
- Chen Z., Ahmed R.M., Miska S.Z., Takach N.E., Yu M., Pickell M.B. and Hallman J. (2007) "Experimental study on cuttings transport with foam under simulated horizontal downhole conditions", *SPE. Drill. Completion.*, 22, 4, pp. 304-312.
- Chen Z. (2005) "Cuttings transport with foam in horizontal concentric annulus under elevated pressure and temperature conditions", PhD Thesis, Tulsa University.
- Chen Z., Ahmed R.M., Miska S.Z., Takachi N.E., Yu M., Pickell M.B. and Hallman J.H. (2005) "Rheology of aqueous drilling foam using a flow-through rotational viscometer", SPE 93431, Houston.
- Chen Z., Ahmed R.M., Miska S.Z., Takach N.E., Yu M., Pickell M.B. and Hallman J. (2007) "Experimental study on cuttings transport with foam under simulated horizontal downhole conditions", *SPE. Drill. Completion.*, 122, 4, pp. 304-312.
- Cheng R.C. and Wang R.H. (2008) "A three-segment hydraulic model for annular cuttings transport with foam in horizontal drilling [J]", *J. Hydrodyn.*, 20, 1, pp. 67-73.
- Chhabra R.P. (1990) "Motion of spheres in power law (viscoelastic) fluids at intermediate Reynolds numbers, a unified approach", *Chem. Eng. Process.*, 28, pp. 89–94.

- Chhabra R.P. and Peri S.S. (1991) "Simple method for the estimation of free-fall velocity of spherical particles in power law liquids", *Powder. Technol.*, 67, pp. 287–290.
- Chhabra R.P. (2006) "Bubbles, drops and particles in non-Newtonian fluids", Second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Chien S.F (1994) "Settling velocity of irregularly shaped particles", *SPE. Drill. Completion.*, 9, 4, pp. 281-289.
- Chin W.C. (2001) "Computational rheology for pipeline and annular flow", Gulf Professional Publishing.
- Cho H., Shah S.N. and Osisanya S.O. (2001) "Effects of fluid flow in a porous cuttings-bed on cuttings transport efficiency and hydraulics", 71374 SPE, USA.
- Cho H. and Shah S.N. (2000) "A three-layer modeling for cuttings transport with coiled tubing horizontal drilling [C] ", SPE 63269, Dallas, Texas, USA.
- Cho H., Shah S.N. and Osisanya S.O. (2002) "A three-segment hydraulic model for cuttings transport in horizontal and deviated wells", *J. Can. Petrol. Technol.*, 41, 6, pp. 32-39.
- Clark R.K. and Bickham K.L. (1994) "Mechanistic model for cuttings transport", SPE 28306, annual SPE Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana.
- Clift R., Grace J. and Weber M.E (1978) "Bubbles, drops, and particles", Academic Press, New York.
- Cross M.M. (1965) "Rheology of non-Newtonian fluids, a new flow equation for pseudoplastic systems", *J. Coll. Sci.*, 20, pp. 417-437.
- Cui H., Cai M., Zhang S. and Xiu D. (2009) "Numerical computation of pressure gradient for the flow of power-law fluid in annulus with inner cylinder executing a planetary motion", *J. Hydrodyn.*, 21, 5, pp. 699-704.
- Cybenko G. (1989) "Approximation by superposition of a sigmoidal function", *Math. Control. Signals. Syst.*, 2, pp. 303–314.
- David A. and Marsden S. (1969) "The rheology of foam", Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Denver, Colorado.
- Dedegil M.Y. (1987) "Drag coefficient and settling velocity of particles in non-Newtonian suspensions", *J. Fluid. Eng.*, 109, pp. 319- 323.
- Demuth H. and Beale M. (2002) "Neural network toolbox for use with MATLAB", User's Guide Version 4.

- Doan Q.T., Oguztoreli M., Masuda Y., Yonezawa T., Kobayashi A. and Naganawa S. (2003) "Modeling of transient cuttings transport in underbalanced drilling (UBD)", SPE. J., 8, 2, pp. 160-170.
- Dodge D.W. and Metzner A.B. (1959) "Turbulent flow in non-Newtonian systems", AIChE. J. 5, pp. 189–204.
- Duan M. (2007) "Study of cuttings transport using foam with drill pipe rotation under simulated downhole conditions", PhD Thesis, Tulsa University, USA.
- Duan M., Miska S., Yu M., Takach N., Ahmed R. and Hallman J. (2010) "Experimental study and modeling of cuttings transport using foam with drillpipe rotation", SPE. Drill. Completion., 25, 3, pp. 352-362.
- Duan M., Miska S., Yu M., Takach N., Ahmed R. and Zettner C. (2008) "Transport of small cuttings in extended reach drilling", SPE. Drill. Completion., 23, 3, pp. 258-265.
- Enzendorfer C., Harris R., Valko P. and Economides M. (1995) "Pipe viscometry of foams", J. Rheol., 39, pp. 345-358.
- Escudier M.P., Oliveira P.J. and Pinho F.T. (2002) "Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids through annuli, comparison of numerical calculations with experiments", Exp. Fluids., 33, pp. 101–111 .
- Escudier M.P., Oliveira P.J., Pinho F.T. and Smith S. (2002) "Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner cylinder rotation", Int. J. Heat. Fluid. Flo., 23, pp. 52- 73
- Falcone G., Teodoriu C., Reinicke K.M. and Bello O.O. (2008) "Multiphase-flow modeling based on experimental testing: an overview of research facilities worldwide and the need for future developments", SPE Projects, Facilities & Construction., 3, 3, pp. 1-10.
- Fang G. (1992) "An experimental study of free settling of cuttings in newtonian and non-newtonian drillings fluids: drag coefficient and settling velocity", SPE 26125.
- Fletcher D. and Goss E. (1993) "Forecasting with neural networks: an application using bankruptcy data", Inform. Manag., 24, pp. 159–167.
- Fluent Inc. (2006) "Fluent user's guide, Version 6.3.26", Fluent Inc., Lebanon, NH, USA.

- Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin E.G. and Zarrouh R. (1990) "Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes", SPE 20421, New Orleans.
- Ford J.T. and Oyeneyin M. B. (1994) "The formulation of milling fluids for efficient hole cleaning: an experimental investigation", SPE 28819, London, UK.
- Gavignet A. and Sobey I. (1989) "Model aids cuttings transport prediction", J. Petrol. Technol., 9, pp. 916– 921.
- Gillies R.G., McKibben M.J. and Shook C.A. (1997) "Pipeline flow of gas, liquid and sand mixture at low velocities", J. Can. Petrol. Technol., 39, 9, pp. 36-42
- Gumati A. and Takahshi H. (2011) "Experimental study and modeling of pressure loss for foam-cuttings mixture flow in horizontal pipe", J. Hydrodyn., 23, 4, pp. 431-438.
- Guo B., Hareland G. and Rajtar J. (1996) "Computer simulation predicts unfavorable mud rate for aerated mud drilling", SPE. Drill. Completion., 11, 2, pp. 61-66.
- Guo B., Miska S. and Hareland G.A. (1995) "A simple approach to determination of bottom hole pressure in directional foam drilling", ASME drilling technology symposium, New Orleans, LA.
- Guo X.L., Wang Z.G. and Long Z.I. (2010) "Study on three-layer unsteady model of cuttings transport for extended-reach well", J. Petrol. Sci. and Eng 73, pp. 171–180.
- Haciislamoglu M. and Cartalos U. (1994) Practical pressure loss predictions in realistic annular geometries, SPE 28304, New Orleans.
- Hajidavalloo E., Sadeghi Behbahani Zadeh M. and Shekari Y. (2013) "Simulation of gas–solid two-phase flow in the annulus of drilling well", Chem. Eng. Res. Des., 91, 3, pp. 477-484.
- Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M.H (1996) "Neural Neural Network Design", PWS Publishing, Boston, MA.
- Han S.M., Hwang Y.K., Woo N.S. and Kim Y.J. (2010) "Solid–liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus", J. Petrol. Sci. Eng., 70, pp. 308–319
- Hareland G., Azar J.J. and Rampersad P.R. (1993) "Comparison of cuttings transport in directional drilling using low-toxicity invert emulsion mineral-oil-based and water-based muds", 25871 SPE.
- Haykin S. (1999) "Neural networks: a comprehensive foundation", 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Heider A. and Levenspiel O. (1989) "Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles", *Powder Technol.*, 58, pp. 63–70.
- Heller J.P. and Kuntamukkula M.S (1987) "Critical review of the foam rheology literature", *Ind. Eng. Chem. Res.*, pp. 3187–3325.
- Hemphill T., Campos W. and Tehrani M.A. (1993) "Yield power law model accurately predicts mud rheology", *Oil. Gas. J.*, 91, pp. 45–50.
- Hemphill T. and Ravi K. (2006) "Pipe rotation and hole cleaning in eccentric annulus", 99150 IADC/SPE, Miami, Florida.
- Herschel W.H. and Bulkley R. (1926) "Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollosungen", *Kolloid -Z.*, 39, pp. 291–300
- Herzhaft B. (1999) "Rheology of aqueous foams: a literature review of some experimental works", *Oil. Gas. Sci. Technol.*, 54, 5, pp. 587-596.
- Holland J.H. (1975) "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Hornik K., Stinchcombe M. and White H. (1989) "Multilayer feed forward networks are universal approximates", *Neural. Networks.*, 2, 5, pp. 359-366.
- Hussain Q.E. and Sharif M.A.R. (1997) "Viscoplastic fluid flow in irregular eccentric annuli due to axial motion of the inner pipe", *Can. J. Chem. Eng.*, 75, pp.1038–1045.
- Hussain Q.E. and Sharif M.A.R. (1998) "Analysis of yield-power-law fluid flow in irregular eccentric annuli", *J. Energ. Res. Tech.*, 120, pp. 201-207.
- Hussain Q.E. and Sharif M.A.R. (2000) "Numerical modeling of helical flow of viscoplastic fluids in eccentric annuli", *AIChE. J.*, 46, pp. 1937–1946.
- Hussaini S.M. and Azar J.J. (1983) "Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds", *SPE J.*, 23, 1, pp.11-20.
- Ikoku C.U., Azar J.J. and Williams C.R. (1980) "Practical approach to volume requirements for air and gas drilling", SPE 9445, Dallas, TX.
- Iyoho A.W. and Azar J.J. (1981) "An accurate slot model for non-Newtonian flow through eccentric annuli", *SPE J.*, 21, 6, pp. 565-72.
- Iyoho A.W. (1980) "Drilled-cuttings transport by non-Newtonian drilling fluids through inclined eccentric annuli", PhD Thesis, University of Tulsa, Tulsa, USA.

- Kakadjian S., Herzhaft B. and Neau L. (2003) "HP/HT rheology of aqueous compressible fluids for underbalanced drilling using a recirculating rheometer", SPE 80207.
- Kaushal D.R., Thinglas T., Tomita Y., Kuchii S. and Tsukamoto H. (2012) "CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration", *Int. J. Multiphase Flow.*, 43, pp. 85-100.
- Kelessidis V.C. (2003) "Terminal velocity of solid spheres falling in Newtonian and non-Newtonian liquids", *Tech. Chron. Sci. J. TCG.*, 24, 1- 2, pp. 43–54.
- Kelessidis V.C. (2004) "An explicit equation for the terminal velocity of solid spheres falling in pseudoplastic liquids", *Chem. Eng. Sci.*, 59, pp. 4437–4447.
- Kelessidis V.C. (2009) "Drilling fluid challenges for oil-well deep drilling", *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, Albena, Bulgaria.
- Kelessidis V.C. and Bandelis G. E., Li J (2007) "Flow of dilute solid-liquid mixtures in horizontal concentric and eccentric annuli", *J. Can. Petrol. Technol.*, 46, 5, pp. 56-61.
- Kelessidis V.C. and Bandelis, G.E. (2004) "Flow pattern and minimum suspension velocity for efficient cuttings transport in horizontal and deviated well in coiled-tubing drilling", *SPE. Drill. Completion.*, 19, 4, pp. 213-227.
- Kelessidis V.C. and Maglione R. (2006) "Modeling rheological behavior of bentonite suspensions as Casson and Robertson–Stiff fluids using Newtonian and true shear rates in Couette viscometry", *Powder. Technol.*, 168, pp. 134–147
- Kelessidis V.C. and Mpandelis G. (2004) "Measurements and prediction of terminal velocity of solid spheres falling through stagnant pseudo- plastic liquids", *J. Powder. Technol.*, 147, pp. 117-125.
- Kelessidis V.C., Dalamarinis P. and Maglione R. (2011) "Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel–Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows", *J. Petrol. Sci. Eng.*, 77, pp. 305–312
- Kelessidis V.C., Maglione R. Tsamantaki C. and Aspirtakis Y. (2006) "Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling", *J. Petrol. Sci. Eng.*, 53, pp. 203-224.

- Khataniar S., Chukwu G.A. and Hua X. (1994) "Evaluation of rheological models and application to flow regime determination", *J. Pet. Sci. and Eng.*, 11, pp. 155-164.
- Krug J.A. and Mitchell B.J. (1972) "Charts help find volume pressure needed for foam drilling", *Oil. Gas. J.*, pp. 61-64.
- Kundu N. and Peterson G.P. (1987) "Transmission of solid particles using a two-phase medium", *J. Ene. Res. Tech.*, 109, pp.35- 39.
- Lali A.M., Khare A.S., Joshi J.B. and Nigam K.D.P. (1989) "Behavior of solid particles in viscous non-Newtonian solutions: settling velocity, wall effects and bed expansion in solid-liquid fluidized beds", *Powder. Technol.*, 57, pp. 39-50
- Larsen T.I., Pilehvari A.A. and Azar J.J. (1997) "Development of a new cutting transport model for high – angle wellbores including horizontal wells", SPE 25872.
- Li J. and Walker S. (2001) "Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells", *SPE J.*, 6, 4, pp. 356- 363.
- Li Y. (2004) "Numerical modeling of cuttings transport with foam in vertical and horizontal wells [D] ", PhD Thesis, Edmonton, Canada, University of Alberta.
- Li Y., Bjorndalen N., Kuru E (2007) "Numerical modeling of cuttings transport in horizontal wells using conventional drilling fluids", *J. Can. Petrol. Technol.*, 46, 7, pp. 9-15.
- Li Y. and Kuru E. (2003) "Numerical modeling of cuttings transport with foam in horizontal wells [J] ", *J. Can. Petrol. Technol.*, 42, 10, pp. 54-61.
- Li Y. and, Kuru E. (2005) "Numerical modeling of cuttings transport with foam in vertical wells", *J. Can. Petrol. Technol.*, 44, 3, pp. 31-39.
- Li Y. and Kuru E. (2008) "Prediction of critical foam velocity for effective cuttings transport with foam in horizontal well", *Energ. Source.*, 30, pp. 994-1004.
- Liu G. and Medley G.H. (1996) "Foam computer model helps in analysis of underbalanced drilling", *Oil. Gas. J.*, 94, 27, pp. 114-119.
- Loureiro B.V., de Paula R.S. and Serafim M.B. (2010) "Experimental evaluation of the effect of drillsting rotation in the suspension of a cuttings bed", 122071-MS, Lima.
- Lourenco A.M.F., Martins A.L., Andrade Jr P.H. and Nakagawa E.Y. (2006) "Investigating solids-carrying capacity for an optimized hydraulics program in aerated polymer-based-fluid drilling", SPE Drilling Conference, Florida, USA.

- Lourenco A.M.F., Martins A.L., Sa C.H.M., Brandao E.M. and Shayegi S. (2000) "Drilling with foam: stability and rheology aspects", Proceedings of ETCE/OMAE joint conference on energy for the new millennium, New Orleans, LA.
- Luo Y., Bern P.A., Chambers B.D. and Kellingray D.S. (1994) "Simple charts to determine hole cleaning requirements in deviated wells", 27486 IADC/SPE.
- Luo Y., Bern P.A. and Chambers B.D. (1992) "Flow-rate prediction for cleaning deviated wells", SPE 23884, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, LA.
- Man K.F., Tang K.S. and Kwong S. (1996) "Genetic algorithms: concepts and applications", IEEE. T. Ind. Electron., 43, 5, pp. 519-534.
- Martins A.L., Lourenco, A.M.F and de Sa, C.H.M. (2001) "Foam properties requirements for proper hole cleaning while drilling horizontal wells in underbalanced conditions", SPE. Drill. Completion., 16, 4, pp. 195-200.
- Martins A.L., Santana M.L. and Gaspari E.F. (1999) "Evaluating the transport of solids generated by shale instabilities in ERW drilling[J]", SPE. Drill. Completion., 14, 4, pp. 254-259.
- Meano W.J. (1987) "Experimental Study of Shale Cuttings Transport in an Inclined Annulus Using Mineral Oil-Base Mud", M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa.
- Michalewicz Z. (1996) "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3rd edition, Springer - Verlag, New York.
- Mirhaj S.A., Shadizadeh S.R. and Fazelizadeh M. (2007) "Cuttings removal simulation for deviated and horizontal wellbores[C] ", SPE 105442, Bahrain.
- Miska S., et al. (2004) "Advanced cuttings transport study", Technical Report, The University of Tulsa.
- Mitchell B. J. (1969) "Viscosity of foam", PhD Thesis, University of Oklahoma.
- Miura H., Takahashi T., Ichikawa J. and Kawase Y. (2001) "Bed expansion in liquid-solid two-phase fluidized beds with Newtonian and non-Newtonian fluids over the wide range of Reynolds numbers", Powder. Technol., 117, pp. 239-246.
- Moroni N., Ravi K., Hemphill T. and Sairam P. (2009) "Pipe rotation improves hole cleaning and cement-slurry placement, mathematical modeling and field validation", SPE 124726.
- Nazari T., Hareland G. and Azar J.J. (2010) "Review of cuttings transport in directional well drilling, systematic approach", SPE 132372, California.

- Nguyen D. and Rahman S.S. (1998) "A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells [J]", SPE. Drill. Completion., 13, 3, pp. 182-189.
- Ogugbue C.C.E. (2009) "Non-Newtonian power-law fluid flow in eccentric annuli, CFD simulation and experimental study", PhD Thesis, University of Oklahoma.
- Okpobiri G.A. (1982) "Experimental determination of solids friction factors and minimum volumetric requirements in foam and mist drilling and well cleanout operations", PhD Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.
- Okpobiri G.A. and Ikoku C.U. (1986) "Volumetric requirements for foam and mist drilling operations", SPE. Drill. Completion., 1, pp.71-86.
- Okranji S.S. Azar J.J. (1986) "The effect of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells", SPE Drill. Eng., 1, pp. 297-308.
- Oroskar A.R. and Turian R.M. (1980) "The critical velocity in pipeline flow of slurries [J]", AIChE. J., 26, 6, pp. 550-558.
- Osgouei R. (2010) "Determination of cuttings transport properties of gasified drilling fluids", PhD thesis, Middel East Technical University.
- Osunde O. and Kuru E. (2008) "Numerical modelling of cuttings transport with foam in inclined wells", T. Open. Fuels. Ene. Sci. J., 1, pp. 19-33.
- Owayed J.F. (1997) "Simulation of water influx during underbalanced foam drilling", MSc Thesis, University of Tulsa, OK.
- Ozbayoglu M.E. (2002) "Cuttings transport with foam in horizontal and highly-inclined wellbores", PhD Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.
- Ozbayoglu M.E., Kuru E., Miska S. and Takach N. (2002) "Comparative study of hydraulic models for foam drilling", J. Can. Petrol. Technol., 41, 6, pp. 52-61.
- Ozbayoglu M.E., Miska S.Z., Reed T. and Takach N. (2005) "Using foam in horizontal well drilling, a cuttings transport modeling approach [J]", J. Petrol. Sci. Eng., 46, 4, pp. 267-282.
- Ozbayoglu M.E., Miska S.Z., Reed T. and Takach N. (2003) "Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbore", SPE 79856, Netherlands.
- Ozbayoglu M.E., Miska S.Z., Takach N. and Reed T. (2009) "Sensitivity analysis of major drilling parameters on cuttings transport during drilling highly-inclined wells", Petrol. Sci. Technol., 27, pp. 122–133.

- Ozbayoglu M.E. and Omurlu C. (2007) "Modelling of two-phase flow through concentric annuli", *Petrol. Sci. Technol.*, 25, pp. 1027–1040.
- Ozbayoglu M.E., Sorgun M., Saasen A. and Svanes K. (2010) "Hole cleaning performance of light-weight drilling fluids during horizontal underbalanced drilling", *J. Can. Petrol. Technol.*, 49, 4, pp. 21-26.
- Pereira F.A.R., Ataide C.H. and Barrozo M.A.S (2010) "CFD approach using a discrete phase model for annular flow analysis", *Lat. Amer. Appl. Res.*, 40, pp. 53-60.
- Pereira F.A.R., Barrozo M.A.S. and Ataide C.H. (2007) "CFD predictions of drilling fluid velocity and pressure profiles in laminar helical flow", *Brazilian. J. Che. Eng.*, 24, 4, pp. 587-595.
- Philip Z., Sharma M.M. and Chenevert M.E. (1998) "The role of Taylor vortices in transport of drill cuttings", 39504 SPE.
- Pigott R.J.S (1941) "Mud flow in drilling", *Drilling and production practice conference*, API, pp. 91–103.
- Pilehvari A.A., Azar J.J. and Shirazi S.A. (1999) "State of the art cuttings transport in horizontal wellbores", *SPE. Drill. Completion.*, 14, 3, pp. 196-200.
- Pinelli D. and Magelli F. (2001) "Solids settling velocity and distribution in slurry reactors with dilute pseudoplastic suspensions", *Ind. Eng. Che. Res.*, 40, pp. 4456–4462.
- Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P. and Ismail A.S.I. (2012) "Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells", *J. Petrol. Explor. Prod. Tech.*, 2, pp. 149–156.
- Ramalho J. (2006) "Underbalanced drilling in the reservoir, an integrated technology approach[C]", SPE 103576, Moscow, Russia.
- Rankin M.D., Friesenhahn T.J. and Price W.R. (1989) "Lightened fluid hydraulics and inclined boreholes", SPE/IADC 18670, New Orleans-Louisiana.
- Raza S.H. and Marsden S.S. (1965) "The flow of foam: 1. rheology and streaming potential", *Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, Colorado.
- Reidenbach V.G., Harris P.C., Lee Y.N. and Lord D.L. (1986) "Rheological study of foam fracturing fluids using nitrogen and carbon dioxide", *SPE Prod. Eng.*, 1, 1, pp.31-41.

- Robertson R.E. and Stiff Jr H.A. (1976) "An improved mathematical model for relating shear stress to shear rate in drilling fluids and cement slurries", SPE J., 16, 1, pp. 31–36.
- Rooki R., Doulati Ardejani F., Moradzadeh A., Mirzaei H., Kelessidis VC., Maglione R. and Norouzi M. (2012) "Optimal determination of rheological parameters for Herschel–bulkley drilling fluids using genetic algorithms (GAs)", Korea-Aust. Rheol. J., 24, 3, pp. 163-170.
- Saha G., Purohit N.K., Mitra A.K. (1992) "Spherical particle terminal settling velocity and drag in Bingham liquids", Int. J. Miner. Process., 36, 3-4, pp. 273-281.
- Saintpere S., Herzhaft B., Toure A. (1999) "Rheological properties of aqueous foams for underbalanced drilling", Annual Technical Conference and Exhibition, Houston.
- Saintpere S., Marcillat Y., Bruni F. and Toure A. (2000) "Hole cleaning capabilities of drilling foams compared to conventional fluids", SPE 63049, Dallas-Texas.
- Sanchez R.A., Azar J.J., Bassal A.A. and Martins A.L. (1999) "Effect of drill pipe rotation on hole cleaning during directional-well drilling", 56406 SPE.
- Sanghani V. and Ikoku C.U (1983) "Rheology of foam and its implication in drilling and cleanout operations", J. Energ. Resour. Tech., 105, 3, pp. 362-371.
- Sani A.M., Shah S.N. and Baldwin L. (2001) "Experimental investigation of xanthan foam rheology", SPE 67263, Oklahoma.
- Shah S.N., Fadili Y.E. and Chhabra R.P. (2007) "New model for single spherical particle settling velocity in power law (visco-inelastic) fluids", Int. J. Multiphase. Flow., 33, pp. 51-66.
- Shah S.N., Shanker N.H. and Ogugbue C.C. (2010) "Future challenges of drilling fluids and their rheological measurements", AADE Fluids conference and exhibition, Texas.
- Shale L. (1995) "Underbalanced drilling with air offers many pluses", Oil. Gas. J., 93, 26, pp. 33-39.
- Sifferman T.R., Myers G.M., Haden, E.L. and Wahl H.A. (1974) "Drill-cuttings transport in full-scale vertical annulus", J. Petrol. Technol., 26, 11, pp. 1295–1302.
- Spalding D.B. (1981) " A general purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow", Math. Comput. Simulat., 23, 3, pp.267- 276.
- SPSS Inc. (1993) "PASW[®] Statistics18 Core System User’s Guide", 233 South Wacker Drive, 11th Floor Chicago, IL60606-6412.

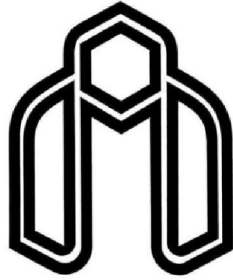
- Sun M.S. (2007) "Numerical simulation and application of foam fluid on sand-flushing [D]", PhD Thesis, China University of Petroleum (East China).
- Teichrob R.R. and Manuel J.J. (1997) Underbalanced foam drilling reduces hole problems and costs, *Oil. Gas. J.* 95, pp. 52-55.
- Tian S., Medley G.H. and Stone C.R. (2000) "Optimization circulation while drilling underbalanced", *World Oil*.
- Tomren P.H. (1979) "The transport of drilled cuttings in an inclined eccentric annulus", MSc Thesis, University of Tulsa, Tulsa, USA.
- Tomren PH., Iyoho AW. and Azar J.J. (1986) "Experimental study of cuttings transport in directional wells", *SPE Drill. Eng.*, 1, 1, pp. 43-56.
- Turian R.M., Ma T.W., Hsu F.L.G. and Sung D.J. (1997) "Characterization, settling and rheology of concentrated fine particulate mineral slurries", *Powder. Technol.*, 93, pp. 219–233.
- Valko P. and Economides M.J. (1992) "Equalized constitutive equations for foamed polymer solutions", *J. Rheol.*, 6, pp. 1033-1055.
- Viloria Ochoa M. (2006) "Analysis of drilling fluid rheology and tool joint effect to reduce errors in hydraulics calculations", PhD Thesis, Texas A & M University.
- Vinod P.S. (1994) "Effect of fluid rheology in hole cleaning in highly-deviated wells", PhD Thesis, Rice University.
- Walker S., Li J. (2000) "The effect of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cutting transport", SPE 60755, Houston.
- Wang R., Cheng R., Wang H. and Bu Y. (2009a) "Numerical simulation of transient cuttings transport with foam fluid in horizontal wellbore", *J. Hydrodyn.*, 21, 4, pp. 437-444.
- Wang Z. and Zhang Z. (2004) "A two-layer time-dependent model for cuttings transport in extended-reach horizontal wells", *J. Hydrodyn.*, 19, 5, pp. 676–681.
- Wang Z.M., Guo X.L., Li M. and Hong Y.K. (2009) "Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well", *J. Hydrodyn.*, 21, 3, pp. 366-372
- Washington A. (2004) "A preliminary study of the rheology of foam using a rotational viscometer", MSc Thesis, The University of Tulsa.
- Wilkes M., Watson R.W. and Graham R.L. (1998) "A new improvement for the design and field implementation of air-mist drilling", IADC/SPE 39301, Texas.

- Xiaofeng S., Kelin W., Tie Y., Yang Z., Shuai S. and Shizhu L. (2013) "Review of hole cleaning in complex structural wells", *T. Open. Petrol. Eng. J.*, 6, pp. 25-32.
- Yao D. and Robello S.G. (2008) "Annular pressure loss predictions for various stand-off devices", IADC/SPE 112544, Orlando, Florida, USA.
- Yu M., Takach N.E., Nakamura D.R. and Shariff M.M. (2007) "An experimental study of hole cleaning under simulated downhole conditions", 109840-MS, SPE conference.
- Zeidler U.H. (1972) "An experimental analysis of the transport of drilled particles", SPE 3064, 45th Annual Meeting, Houston.
- Zhiming W., Liqiu P. and Ke Z. (2007) "Prediction of dynamic wellbore pressure in gasified fluid drilling", *Petrol. Sci.*, 4, 4, pp. 66-73.
- Zhonghou S., Haizhu W. and Gensheng L. (2011) "Numerical simulation of the cutting-carrying ability of supercritical carbon dioxide drilling at horizontal section", *Petrol. Explor. Develop.*, 38, 2, pp. 233-236.
- Zhou L. (2004) "Cuttings transport with aerated mud in horizontal annulus under elevated pressure and temperature conditions", PhD Thesis, The University of Tulsa.
- Zhou L. (2006a) "Hole cleaning during UBD in horizontal and inclined wellbore", SPE 98926, IADC drilling conference, Miami, Florida.
- Zhou L. (2008) "Hole cleaning during underbalanced drilling in horizontal and inclined wellbore", *SPE. Drill. Completion.*, 23, 3, pp. 267-273.
- Zhou L., Wang J. and Hao J. (1996) "Calculation and design of flow parameters for two-phase flow in aerated drilling", SPE 37044, Calgary-Alberta- Canada.
- Zhou Y. (2006) "Theoretical and experimental studies of power – law fluid flow in coiled tubing", PhD Thesis, University of Oklahoma.
- Zhou Y. and Shah S.N. (2003) "Fluid Flow in Coiled Tubing: CFD Simulation", Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta.
- Zhu T., Volk L. and Carroll H. (1995) "Industry state – of the art in underbalanced drilling", Project report, USA.

Abstract

Foam drilling is one of main branches of underbalanced drilling that has many advantages in many drilling operations. A good knowledge of foam hydraulics and cuttings transport using foam is one of the main factors affecting cost, time, and the quality of oil and gas wells. The objective of this study is to investigate of cuttings transport with foam in inclined wellbores using intelligent, statistical and Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. The rheological parameters of non-Newtonian bentonite fluids and foam fluid were determined using genetic algorithm. It was identified that genetic algorithm performs better than statistical methods in determining the rheological parameters of drilling fluids. The terminal velocity of spherical solids in Newtonian and non-Newtonian power law fluids was estimated using artificial neural networks (ANNs). The correlation coefficient (R) and root mean square error between the predicted and experimental data were 0.997 and 0.021 for train data respectively. The R and RMS were 0.974 and 0.072 for test data respectively. Besides, artificial neural networks were used to predict the hole cleaning efficiency using foam fluid in horizontal wellbores. The correlation coefficient (R) and RMS between the predicted and experimental data were 0.993 and 0.807 for train data, respectively. The R and RMS were 0.914 and 1.9 for test data, respectively. Hole cleaning efficiency was predicted using a multiple linear regression (MLR). The correlation coefficients (R) between the predicted and experimental data were 0.91 and 0.84 for train and test data respectively. Computational fluid dynamics modeling of fluid (foam) flow and liquid- solid flow (cuttings transport phenomena) in annulus was further conducted using FLUENT commercial software. In foam flow modeling, the effect of various operational parameters on pressure loss such as fluid rheology, foam fluid velocity, foam quality, drillpipe rotation and wellbore eccentricity was considered. Simulation results were compared with the previously published experimental data. The agreement was close with a relative error less than 11% for all models. For cuttings transport modeling, the effect of foam quality, foam velocity, drill pipe rotation, rheological model and wellbore inclination on cuttings transport phenomena in both concentric and eccentric annulus was investigated. The results of CFD using Power law model are in good agreement with experimental results in horizontal annulus respect to Herschel- Bulkly model with relative error less than 8%. This study shows the reliability of the ANN and CFD modeling in replicating the actual physical process.

Keywords: Drilling Cuttings Transport, Inclined Drilling, Under Balanced Drilling, Foam fluid, Intelligent and Statistical Methods, Computational Fluid Dynamics



Shahrood University of technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Cuttings Transport Modeling of Underbalanced Drilling (UBD) Operation in Inclined Wellbores

PhD Thesis
in Mining Exploration Engineering

By:
Reza Rooki

Supervisors:
Prof. Faramarz Doulati Ardejani
Prof. Ali Moradzadeh

Advisor:
Dr. Mahmood Norouzi
Dr. Vassilios C. Kelessidis

September 2013