نشریه‌ی علمی-پژوهشی ژئومکانیک نفت
JOURNAL OF PETROLEUM GEOMECHANICS
(JPG)

مطالعه آزمایشگاهی اثر افزایه‌های کنترل هرزروی بر روی احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری: مطالعه موردی گل‌های پایه نمکی اشباع و لیگنوسولفوناتی

محسن ده‌دار[1]، ساسان یوسفی راد[2]، احسان آزاد[3]*، پرویز معارف وند[4]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی شریف
۳. کارشناس‌ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ
۴. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۷
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63112

واژگان کلیدی

افزایه‌های کنترل هرزروی
سیال پایه نمکی اشباع
گیر اختلاف فشاری
سیال حفاری لیگنوسولفونایتی
دستگاه اندازه‌گیری خواص اندود گل

چکیده

حضور سازندهای متخلخل کم فشار در هنگام حفاری، یکی از دلایل اصلی زیاد شدن ضخامت اندود گل در دیواره چاه است. این عامل باعث شدت احتمال بروز گیر اختلاف فشاری در چاه خواهد شد. افزایه‌های فراوانی جهت کنترل هرزروی سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه سعی شده است تا اثر این افزایه‌ها در کنترل افت صافاب و احتمال گیر اختلاف فشاری بررسی شود. جهت این امر دو سیال مطرح در صنعت حفاری انتخاب و اثر افزایه‌های مذکور مطالعه شد. اثر این نوع افزایه‌ها در سیالات لیگنوسولفوناتی و سیالات پایه نمکی اشباع به کمک دستگاه بررسی خواص اندود گل و فیلتر پرس مطالعه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به طور کلی مشکلات افت صافاب و گیر اختلاف فشاری در گل‌های پایه نمکی اشباع نسبت به گل‌های لیگنوسولفوناتی و گل‌های مقاله مرجع بیشتر است. در ضمن به نظر می‌رسد که شکل هندسی افزایه در کنترل هرزروی و همچنین کاهش احتمال گیر اختلاف فشاری مؤثر است. افزایه پوست گردو و افزایه سلفون به ترتیب بهترین کاهنده‌های افت صافاب و احتمال گیر اختلاف فشاری در گل‌های پایه نمکی اشباع و افزایه‌های میکا و خاک‌اره به ترتیب بهترین کاهنده‌های افت صافاب و احتمال گیر اختلاف فشاری در گل‌های لیگنوسولفوناتی بودند.

۱. مقدمه

مشکلات متعددی با مکانیزم‌ها و دلایل مختلف، حین حفاری ممکن است رخ دهد. گاهی مواقع بعضی از این مشکلات با مطالعات قبلی روی سازندهای حفاری شونده قابل پیشگیری هستند و در نتیجه اقدامات پیشگیرانه حین حفاری صورت می‌گیرد. اما گاهی مواقع به دلایل مختلفی از جمله عدم دسترسی مستقیم به سازند حفاری شونده، حوادث پیش‌بینی نشده حین حفاری، اطلاعات کم درباره سازند حفاری شونده، خطا در حین جمع‌آوری و تفسیر اطلاعات و ... ممکن است مشکلات شدیدی حین حفاری رخ دهد. اولین مسئله مهم این است که باید از وقوع چنین مشکلاتی تا حد امکان و با هر روش اقتصادی قابل اجرا جلوگیری کرد. همچنین در صورت وقوع حوادث، باید برای شرایط بحرانی آماده بود و اگر مشکلی حین حفاری رخ داد، باید اقدامات لازم را در اسرع وقت اتخاذ نمود.

از جمله این مشکلات که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته شدند، می‌توان به هرزروی سیال حفاری و گیر اختلاف فشاری اشاره کرد. حین حفاری سازندهایی با تراوایی

* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن، شماره‌ی تلفن: ۰۹۳۵۱۲۱۴۶۶۸، رایانامه: ehsazad@aut.ac.ir

بالا، پر از شکاف یا بعداً شکافدار شده و مناطق فشار پایین ممکن است به علت نفوذ و حرکت سیال حفاری به سازند حفاری شونده، هدرروی سیال حفاری رخ دهد، که به آن هرزروی سیال حفاری گفته می‌شود (*Al Sabagh et al., 2014*). هرزروی سیال حفاری معمولاً همراه با مشکلات پایداری چاه هست که در نهایت باعث گیر لوله‌ها و حتی از دست دادن چاه می‌شود (*Ay et al., 2014*).

آمارگیری‌های سال ۱۹۹۱ موسسه نفت آمریکا[1] نشان می‌دهد که حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد چاه‌های حفاری شده‌از هرزروی سیال حفاری رنج می‌برند. طبق گزارش منتشر شده توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا به طور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد هزینه‌های حفاری در چاه‌های دما بالا فشار بالا صرف هدرروی گل می‌شود (*Cook et al., 2011*). برآوردی دیگر نشان می‌دهد که سالانه حدود ۲ تا ۴ میلیارد دلار به علت مدت زمان تلف شده به خاطر هرزروی سیال حفاری و موادی که برای قطع کردن هرزروی استفاده می‌شوند، به هزینه‌های دکل‌های حفاری افزوده می‌شود (*Cook et al., 2011*). به دلیل شدت مشکل هرزروی سیال حفاری و کمبود فنّاوری حفاری فرو تعادلی، بعضی از چاه‌های منطقه خاورمیانه به مدت ۱۵ سال رها شده بودند (*Moazzeni et al., 2012*).

هرزروی سیال حفاری بر اساس طبقه‌بندی *(Pilehvari & Nyshadham, 2002)* به سه دسته تقسیم شده است: نشت یا اصطلاحاً چکه کردن با دبی هرزروی بین ۱ تا ۱۰ *bbl/hr*، هرزروی مختصر با دبی هرزروی بین ۱۰ تا ۵۰۰ *bbl/hr* و هرزروی کامل یا شدید وقتی که دبی هرزروی بالای ۵۰۰ *bbl/hr* باشد. برای جلوگیری و درمان هرزروی از ماده کنترل هرزروی سیال حفاری[2] استفاده می‌شود. این مواد انواع مختلفی دارند که شامل مواد فلسی، فیبر مانند، دانه‌ای یا پودری و ورقه ورقه می‌شوند *(Cook et al., 2011)*.

بر حسب این که در منطقه تولید کننده نفت یا منطقه غیر تولیدی باشیم نوع ماده‌ای که برای کنترل هرزروی سیال حفاری استفاده می‌شود متفاوت است، چون در مناطق تولید کننده نفت باید از موادی استفاده کرد که بعداً بتوان با استفاده از سیالاتی چون اسیدها و گازوئیل، حذفشان کرد (*Fink et al., 2015*) و (*Boukadi et al., 2004*).

در مورد گیر لوله‌ها هم آمارها نشان می‌دهند که در سال‌های اخیر، سالیانه حدود ۸۶۰ میلیون دلار صرف هزینه حوادث ناشی از گیر رشته حفاری می‌شود. همچنین در حدود ۱۴ درصد چاه‌های حفاری شده گیر لوله‌ها رخ می‌دهد (*Okwu & Dosunmu, 2013*) یکی از انواع گیر لوله‌ها که در این مقاله به بررسی آن پرداخته می‌شود گیر اختلاف فشاری است. منظور از گیر اختلاف فشاری، انحراف لوله به سمت دیواره چاه و گیر کردن آن در داخل اندود گل به علت اختلاف فشار زیاد بین فشار ستون گل حفاری و فشار سازند است (*Fink, & Karl Fink, 2015*).

هرزروی سیال حفاری با گذر زمان می‌تواند باعث مشکلات دیگری از جمله آسیب به منطقه حفاری شونده در اثر نفوذ شدید سیال حفاری به داخل آن، تشکیل اندود گلی ضخیم در اثر عبور سیال و باقی ماندن ذرات جامد روی دیواره چاه که حتی می‌تواند منجر به گیر لوله‌ها شود (*Fink, & Karl Fink, 2015*)، تغییر خواص گل به علت از دست دادن بخش عظیم سیال موجود در گل که متعاقباً می‌تواند منجر به مشکلات حفاری مربوط به گل شود (*Amanullah, & Al-Arfaj, 2016*). بر این اساس رابطه تنگاتنگی بین هرزروی سیال حفاری و گیر لوله‌ها به خصوص از نوع اختلاف فشاری وجود دارد.

هرزروی گل با گذر زمان به دلیل ایجاد اندود گل ضخیم‌تر در اثر عبور سیال، احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری را بالا می‌برد (*Jahanbakhshi & Keshavarzi, 2016*)، (*Fink & Karl Fink, 2015*)، (*Benaissa et al., 2005*). بنابراین با درمان و رفع آن می‌توان این دو مشکل را هم‌زمان کنترل و رفع کرد. البته برخی پژوهشگران هم بر این باورند که گاهی درمان هرزروی با استفاده از مواد کنترل کننده نامناسب و به خصوص با اندازه ذرات بالا، احتمال گیر اختلاف فشاری را نه تنها کاهش نمی‌دهد، بلکه به علت اندازه بالای مواد کنترل هرزروی سیال حفاری و در نتیجه شکل‌گیری اندود گل ضخیم‌تر، حتی احتمال رخ دادن این نوع گیر را می‌تواند افزایش هم بدهد (*Fink & Karl Fink, 2015*)، (*Benaissa et al., 2005*)، (*Collins et al., 2010*). یکی

[1] American Petroleum Institute (API)
[2] Loss Circulation Material (LCM)

از اهداف این مقاله بررسی این رابطه و نحوه اثرگذاری نوع گل و افزایه‌ها بر آن است. نوع گل و نوع مواد کنترل کننده هرزروی به طرق مختلف دیگری از جمله اثرگذاری روی مقاومت کششی و پیچشی اندود گل (*Amanullah, 2004*)، میزان روانی و استحکام اندود گل (*Reid et al., 1996*)، تراوایی اندود گل و خواص رئولوژیک گل، می‌توانند بر روی احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری بعد از رفع هرزروی سیال حفاری اثرگذار باشند.

بیشترین تغییر ایجاد شده توسط مواد افزاینده کنترل هرزروی گل، شکل‌گیری اندود گلی با تراوایی تا حد امکان پایین برای جلوگیری از هرزروی است. از طرفی دیگر طبق نظر پژوهشگران اندود گل نقش تعیین کننده‌ای در فرآیند گیر اختلاف فشاری دارد. تشکیل اندود گل نرم و ضخیم در دیواره چاه احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری در چاه را افزایش می‌دهد (*Amanullah & Tan, 2000*). همچنین سهولت بازیابی لوله گیر کرده در چاه متناسب با مقاومت فشاری اندود گل است (*Amanullah, 2002*).

بنابراین برآورد خواص اندود گل ایجاد شده بعد از افزودن مواد کنترل کننده هرزروی، به درک نحوه اثر این مواد به افزایش یا کاهش احتمال گیر اختلاف فشاری کمک می‌کند. در سال ۲۰۰۳، امان‌الله با سرمایه‌گذاری شرکت استرالیایی سی سایرو اقدام به ساخت دستگاه اندازه‌گیری خواص اندود گل حفاری کرد و به دنبال آن به بیان استانداردی برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت پیچشی اندود گل حفاری پرداخت (*Amanullah, 2003*). در سال ۲۰۰۴، امان‌الله در ادامه فعالیت‌های قبلی خود به کمک دستگاه اندازه‌گیری خواص اندود گل حفاری[3]، به بررسی تغییرات مقاومت پیچشی اندود گل با توجه به تنوع افزایه‌های گل حفاری پرداخت و طی آن متوجه شد که مقاومت پیچشی اندود گل حفاری شدیداً تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی افزایه‌های گل حفاری است (*Amanullah, 2004*).

هدف اصلی این مقاله درک چگونگی اثر نوع گل و نوع مواد کنترل‌کننده هرزروی بر احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری است؛ و این که آیا مواد افزوده شده برای کنترل هرزروی باعث رفع یا افزایش احتمال گیر اختلاف فشاری می‌شوند؟ متغیرهایی که برای این منظور در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند عبارت‌اند از: هرزروی ناگهانی اولیه، حجم صافاب گل (حجم هرزروی) در مدت زمان ۷/۵ و ۳۰ دقیقه، مدت زمان لازم برای رسیدن به حجم هرزروی $100ml$، ضخامت اندود گل، مقاومت پیچشی اندود گل به ازای جابجایی زاویه‌ای، حداکثر مقاومت پیچشی در میزان نفوذ مدنظر در اندود گل[4]. در مورد نحوه اندازه‌گیری این متغیرها در قسمت روش و مراحل تحقیق به طور کامل توضیح داده شده است.

۲. روش و مراحل تحقیق

بخش اصلی این پژوهش بر پایه استفاده از دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی اندود گل ساخته شده توسط امان‌الله، انجام شده است. در ابتدا جهت تأیید داده‌های حاصل از مقالات امان‌الله و کالیبراسیون دستگاه، به اندازه‌گیری خواص گل‌های موجود در مقاله مرجع پرداخته شده است. در ادامه دو نوع گل پایه نمکی اشباع و گل پایه آبی لیگنوسولفوناتی و افزایه‌های سلفون و پوست گردو در گل پایه نمکی اشباع و افزایه‌های کائوچو و خاک‌اره در گل پایه آبی لیگنوسولفونایتی، با توجه به تغییرات مقاومت پیچشی و سایر متغیرهای هدف، به طور قیاسی بررسی شده‌اند. ممکن است این سؤال برای خواننده مطرح شود که افزایه‌هایی پوست گردو به همراه سایر زباله‌ها به علاوه سایر الیاف‌های صنعتی تاکنون بررسی‌شده‌اند و وجه تمایز این کار با کارهای صورت گرفته شده، چیست؟ وجه تمایز این کار با کارهای قبلی این هست که اولاً در اکثر مطالعات قبلی یا فقط مطالعه روی افت صافاب به تفصیل انجام شده است یا این که مطالعه فقط روی احتمال گیر اختلاف فشاری و رفع آن انجام شده است. حال آن که مطالعاتی که به طور هم‌زمان به بررسی این دو مسئله و ارتباط آن‌ها پرداخته باشند، اندک هستند. ثانیاً اگر هم راجع به این دو مشکل و اثر متقابل آن‌ها به طور هم‌زمان مطالعاتی هر چند معدود انجام شده باشد، مطمئناً روند کاری متفاوت با روند کاری این پژوهش داشته است، چون در این پژوهش از دستگاه اندازه‌گیری خواص اندود گل حفاری ساخت موسسه سایرو

[3] Mud Cake Characterization Equipment (MCCE)
[4] Maximum Torsional Resistance at Targeted Embedment Depth (MTRTED)

استرالیا استفاده شده است. این در حالی است که مطالعات قبلی اندود گل با استفاده از این دستگاه محدود به چند مقاله منتشر شده توسط این موسسه و شخصی به نام امان‌الله است. در ضمن در این پژوهش به تفصیل ارتباط تمام متغیرهای افت صافابی از جمله هرزروی ناگهانی اولیه، زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر، ضخامت اندود گل با احتمال رخداد گیر اختلاف فشاری و شدت آن مطالعه شده‌اند. از نظر نویسندگان مسائل ذکر شده وجه تمایز و نوآوری‌های این مطالعه هستند این پژوهش در آزمایشگاه حفاری و آزمایشگاه ژئومکانیک دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. در این پژوهش متغیرهای وزن گل، گرانروی گل، دمای آزمایش، میزان افت صافاب در ۷/۵ و ۳۰ دقیقه، مدت زمان لازم برای افت صافاب ۱۰۰ml، ضخامت اندود گل، و مقاومت پیچشی اندود گل اندازه‌گیری شده‌اند که از میان آن‌ها مقاومت پیچشی حداکثر اندود گل، ضخامت اندود گل و متغیرهای افت صافاب به عنوان متغیرهای اصلی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. در جدول ۱ متغیرهای اندازه‌گیری شده به همراه واحد و ابزار اندازه‌گیری آن‌ها آورده شده‌اند.

جدول ۱. اطلاعات متغیرها

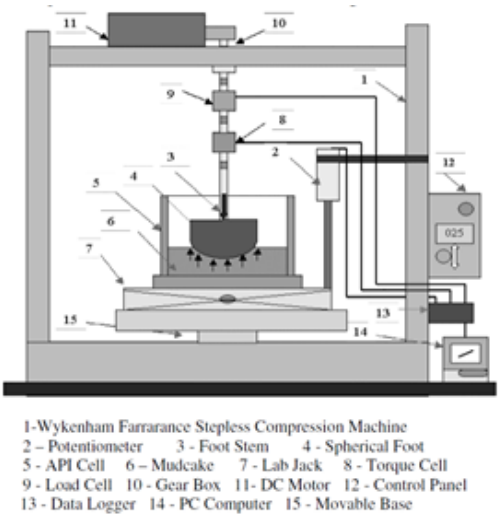
نام متغیر	واحد اندازه‌گیری	ابزار اندازه‌گیری
وزن گل	lb/ft^3	ترازوی گل
گرانروی گل	$Sec/946.33ml$ یک کوارت	قیف مارش
دما	$°C$	دماسنج
میزان افت صافاب	ml	$API\ filter\ press$
ضخامت	mm	کولیس دیجیتال
مقاومت پیچشی	$gmf.cm$	$MCCE$

در ترکیبات گل استفاده شده ابتدا جهت تأیید و مقایسه داده‌ها، گل‌های موجود در مقاله *(Amanullah, 2003)* که با پیشوند A نام‌گذاری شده‌اند، ساخته و آزمایش‌شده‌اند. گل‌های ساخته شده توسط امان‌الله از نوع گل‌های بنتونایتی هستند، که به ترتیب در گل $A2$ نمک سدیم کلرید، در گل $A3$ نمک پتاسیم کلرید و در گل $A4$ نمک سدیم کلرید به همراه پلی آنیونیک سلولز نمک‌ها و افزایه‌های محلول در گل هستند. در ادامه گل‌های پایه نمکی اشباع و پایه آبی لیگنوسولفونایتی ساخته شده‌اند که به ترتیب با پیشوند $Prehyd$ و $Ligno_$ نام‌گذاری شده‌اند. در جدول ۲ ترکیب گل‌های مورد آزمایش آورده شده است. در حین ساخت گل با استفاده از یک PHسنج PH گل در بازه مورد نظر ثابت نگه داشته شد. بعد از ساخت گل‌ها و اندازه‌گیری چگالی و ویسکوزیته آن‌ها، گل‌ها درون سلول مخصوص دستگاه API Filter Press قرار داده شدند و سپس آزمایش فیلتراسیون تحت فشار ۱۰۰±۵Psi تا رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر ادامه داده شد. این مدت زمان با توجه به نوع افزایه‌های گل، می‌تواند از ۲۰ دقیقه تا ۴۸ ساعت و یا بیشتر طول بکشد که به شدت وابسته به ترکیب گل و بخصوص نوع افزایه است. در طول آزمایش باید داده‌های افت صافاب در ۷/۵ و ۳۰ دقیقه برای بررسی افت صافاب ثبت شود. مراحل بعدی آزمایش در مقاله‌های *(Amanullah, 2003)* و *(Amanullah, 2004)* به طور کامل توضیح داده شده‌اند، اما دوباره به طور مختصر به شرح این مراحل پرداخته می‌شود. بعد از رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر سلول دستگاه API Filter press باز شده و گل اضافی باقی مانده درون سلول به آرامی تخلیه شد تا هیچ آسیبی به اندود گل نرسد. سپس اندود گل به آرامی و احتیاط با آب مقطر تمیز شد تا لایه ژل مانند روی اندود گل حذف شود. تصویر گل‌ها و اندود گل‌های ساخته شده در قسمت پیوست مقاله قابل مشاهده است.

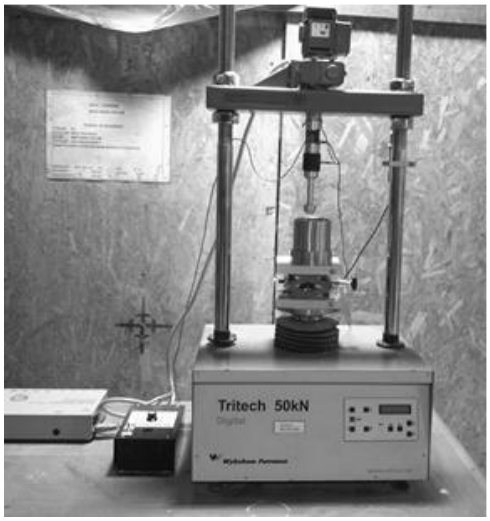
سپس ضخامت اندود گل به وسیله کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. در نهایت سلول API که حاوی گل است بر روی پایه دستگاه MCCE قرار می‌گیرد. دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی کیک گل مطابق آنچه در شکل ۱ به صورت شماتیک دیده می‌شود به کمک دو حس‌گر بارسنج و گشتاورسنج خود خواص مکانیکی کیک گل ازجمله نرخ نفوذ، مقاومت کششی و مقاومت پیچشی را اندازه‌گیری می‌کند. در شکل ۲ نیز نمایی از خود دستگاه آورده شده است.

جدول ۲. ترکیب گل‌های مورد آزمایش

نام گل / نام افزایه (gr)	A1	A2	A3	A4	Prehyd 0	Prehyd 1	Prehyd 2	Ligno_0	Ligno_1	Ligno_2
آب مقطر ml	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰
بنتونایت	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵
NaCl	–	۳۵	–	۳۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	–	–	–
KCl	–	–	۳۵	–	–	–	–	–	–	–
Polyanionic Cellulose(PAC)	–	–	–	۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	–	–	–
Soda Ash	–	–	–	–	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵
لیگنایت	–	–	–	–	–	–	–	۱	۱	۱
Red starch	–	–	–	–	۴	۴	۴	–	–	–
لیگنوسولفونایت	–	–	–	–	–	–	–	۲	۲	۲
باریت	–	–	–	–	–	–	–	۳	۳	۳
سلفون	–	–	–	–	–	۳	–	–	–	–
پوست گردو	–	–		–	–	–	۳	–	–	–
میکا	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	–
خاک اره	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳
NaOH	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.8-10	PH 9.5-10.5	PH 9.5-10.5	PH 9.5-10.5



شکل ۱. طرح شماتیکی از دستگاه خواص سنجی کیک گل (MCCE) (*Amanullah, 2004*).



شکل ۲. نمایی از دستگاه خواص سنجی کیک گل (MCCE) (آزاد، ۱۳۹۴).

به منظور تعیین مقاومت پیچشی به کمک گشتاورسنج دستگاه آزمایش را انجام می‌دهیم، روش انجام آزمایش به این نحو است که بعد از تولید کیک گل در دستگاه mud filter press، لیوان حاوی کیک را در مرکز دستگاه قرار می‌دهیم. ابتدا مقداری بار اعمال کرده تا تماس مؤثر با کیک گل برقرار شود، اجازه می‌دهیم تا سیستم به پایداری برسد، سپس جک را با سرعت 0.25mm/min به سمت بالا حرکت می‌دهیم تا عمق نفوذ کیک گل به مقدار معین ۵ mm برسد. میله با سر نیم‌کره را با سرعت ۵ degree/second می‌چرخانیم. چرخش میله را ادامه داده تا مقاومت پیچشی به مقدار ثابتی برسد. به کمک نمودار ترسیم شده می‌توان تخمینی از مقاومت پیچشی بیشینه کیک گل به دست آورد.

نمونه کامل‌تری از این دستگاه نیز تحت عنوان HPHT MCCE ساخته شده است که توانایی اندازه‌گیری خواص مکانیکی کیک گل را در شرایط تحت فشار دیفرانسیلی بالای ۱۰۰۰psi و دمای بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. این نمونه می‌تواند شبیه‌سازی دقیق‌تری را از شرایط درون‌چاهی نسبت به دستگاه استفاده شده در این تحقیق ارائه دهد *(Lourenço & Marcelo, 2012)*.

سپس ارتفاع پایه باید طوری تنظیم شود تا بازوی نیمه کروی دستگاه MCCE فقط سطح اندود گل را لمس کند. در ادامه این بازوی نیمه کروی با نرخ نفوذ ۰/۲۵ min/mm با استفاده از بخش کنترل نرخ دستگاه MCCE به درون اندود گل نفوذ می‌کند. نفوذ تا زمانی که بازوی نیمه کروی به عمق ۵ میلی‌متری اندود گل برسد، ادامه پیدا می‌کند.

بعد از ثبات پایه نیمه کروی در عمق ۵ میلی‌متری، آزمایش مقاومت پیچشی با جا به جایی زاویه‌ای (چرخش) با نرخ ثابت ۰/۵ degree/sec آغاز می‌شود. یک نرم‌افزار مخصوص در کامپیوتر شخصی مخصوص و متصل به دستگاه، به طور اتوماتیک داده‌های مقاومت پیچشی را بر حسب جابه‌جایی زاویه‌ای ثبت و یک نمودار هم رسم می‌کند. چرخش میله تا زمانی که مقاومت پیچشی به مقدار ثابتی برسد، ادامه داده می‌شود.

در شرایط ثابت در یک آزمایش، حداکثر مقاومت پیچشی که اندود گل در مقابل یک نیروی پیچشی از جانب پایه نیمه کروی از خود نشان می‌دهد را مقاومت پیچشی بیشینه در عمق مورد نظر می‌نامند. به کمک نمودار ترسیم شده می‌توان تخمینی از مقاومت پیچشی بیشینه اندود گل بدست آورد. نمودارهای به دست آمده با استفاده از آزمون‌های مختلف با گل‌های دارای ترکیبات شیمیایی مختلف روند تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. در تحلیل داده‌ها بعد از به دست آوردن اطلاعات مربوط به افت صافاب و داشتن ضخامت اندود گل و در نهایت مقاومت پیچشی حداکثر، می‌توان به طور مقایسه‌ای بیان کرد که کدام گل و ماده کنترل کننده هرزروی گل، باعث تشدید و یا کاهش گیر اختلاف فشاری می‌شود.

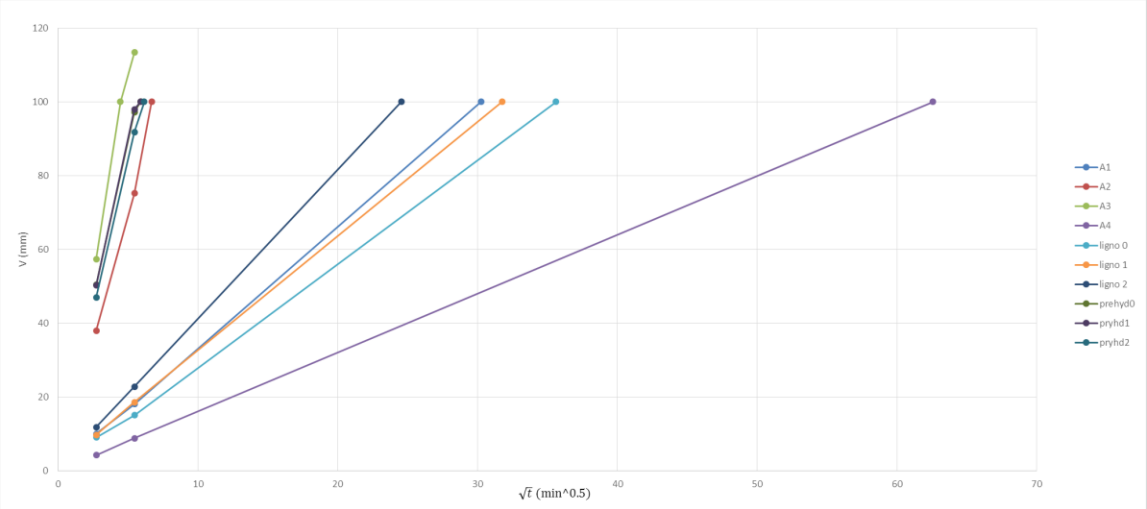
۳. ارائه و تحلیل نتایج

در این قسمت به بیان نتایج حاصل از هر یک از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. در هر آزمایش متغیرهای فرعی شامل دمای آزمایش، فشار پمپ هوا، وزن گل و گرانروی گل‌ها و متغیرهای اصلی شامل میزان افت صافاب در ۷/۵ و ۳۰ دقیقه، مدت زمان لازم برای افت صافاب ۱۰۰*ml*، نمودارهای افت صافاب، ضخامت اندود گل، نمودارهای مربوط به تغییرات روند مقاومت پیچشی و مقدار بیشینه آن گزارش شدند. در نهایت اطلاعات به دست آمده برای افت صافاب، ضخامت اندود گل و مقاومت پیچشی با هم مقایسه شدند. اثر متقابل این متغیرها مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت معیار انتخاب گل با عملکرد بهتر تعیین شد. با کمک تحلیل این سه متغیر اصلی، تحلیل جامعی درباره اثر افت صافاب و جلوگیری از آن بر احتمال گیر اختلاف فشاری و شدت سختی رفع آن ارائه می‌شود.

۱.۳ افت صافاب

۱.۱.۳ نمودارهای افت صافاب

نمودار افت صافاب همه گل‌های ساخته شده به طور یکجا در یک نمودار در شکل ۳ درج شده است. همان‌طور که در نمودار افت صافاب (شکل ۱) مشاهده می‌کنید، برای هر گل بهترین خط گذرنده از نتایج آزمایش رسم شده است. هر یک از این خطوط دارای یک عرض از مبدأ هستند که معرف هرزروی ناگهانی اولیه است. در ضمن هر یک از این نمودارها دارای یک شیب هستند که معرف میزان سرعت افت صافاب است. بدین صورت که هر چه شیب نمودار بیشتر باشد، شدت افت صافاب بیشتر است.



شکل ۳. نمودار افت صافاب

همان‌طور که در نمودار شکل ۳، مشاهده می‌کنید، تعداد داده‌های آزمایشگاهی کمتر از تعداد مرسوم است و تنها با ۳ نقطه نمودار افت صافاب رسم شده است، در حالی که حداقل ۶ نقطه لازم است.

این که چرا تعداد داده‌های هر نمودار کم است علت اصلی عدم نیاز به نقاط بیشتر بوده است. طبق استاندارد آزمایش فیلتراسیون استاتیکی API، تنها به داده‌های افت صافاب در ۷/۵ و ۳۰ دقیقه نیاز بوده است. و همچنین طبق متغیرهای تعریف شده در آزمایش مدت زمان لازم برای افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر هم اندازه‌گیری شد. پس درواقع همین ۳ نقطه برای بررسی‌های بعدی نیاز بوده است. در ضمن هدف اصلی نگارندگان به دست آوردن نمودار افت صافاب نبوده است، چون پارامترهای ذکر شده برای مقایسه خواص افت صافابی گل‌ها کافی هستند و نمودار تنها مقایسه‌ای بصری برای خواننده ارائه می‌دهد. البته باید ذکر شود که نمودار به دست آمده با تقریب قابل قبولی نزدیک به نمودار اصلی افت صافاب است و حتی در کتاب‌های مرجعی چون مهندسی حفاری کاربردی (*Bourgoyne et al., 1986*) تنها با داشتن افت صافاب در دو نقطه ۰/۵ و ۳۰ دقیقه بسیاری از نمودارهای افت صافاب رسم شده‌اند. البته اگر هدف اصلی رسم نمودارهای افت صافاب بود، باید حداقل از ۵ یا ۶ نقطه برای رسم نمودار افت صافاب استفاده می‌شد. بحث دیگری که ممکن است خوانندگان را به خطا اندازد، این است که آیا این نمودارها بدون خطا از داده‌ها رسم شده‌اند؟ باید گفت که خیر این‌طور نیست. علت چنین برداشتی، کمبود فضا در صفحه و کوچک شدن نمودار و خطوط رسمی است. وگرنه اگر هر کدام از نمودارها به طور مجزا نمایش داده شوند خواهید دید که اکثر نمودارها از نقاط عبور نکرده‌اند و دارای خطایی جزئی نسبت به داده‌ها می‌باشند.

جدول ۳. شیب و عرض از مبدأ نمودارهای افت صافاب (شکل ۱)

نام گل	شیب	عرض از مبدأ
A1	۳/۲۹	۰/۵۲
A2	۱۵/۲۸	-۴/۹۴
A3	۲۰/۹	۱/۸۷
A4	۱/۶	-۰/۰۷
Prehyd 0	۱۶/۱۳	۶/۵۳
Prehyd 1	۱۶/۳	۵/۹۳
Prehyd 2	۱۵/۷۲	۴/۲۳
Ligno_ 0	۲/۷۹	۰/۵۷
Ligno_ 1	۳/۱	۱/۳۸
Ligno_ 2	۴/۰۴	۰/۶۹

با توجه به مقادیر شیب به دست آمده، می‌توان گل‌ها و افزایه-های با هرزروی کم و زیاد را از هم تمایز داد. بر این اساس گل

A4 از میان گل‌های مقاله مرجع، گل *Prehyd2* از میان گل-های پایه نمکی اشباع با افزایه پوست گردو و گل *Ligno_2* با افزایه خاکاره از بین گل‌های لیگنوسولفوناتی، سه گل با کمترین میزان شیب بودند، پس در بحث افت صافاب و هرزروی این سه گل بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. در ضمن گل *A3* از میان گل‌های مقاله مرجع، گل *Prehyd 0* از میان گل‌های پایه نمکی اشباع که فاقد افزایه است و گل *Ligno_1* با افزایه میکا از میان گل‌های لیگنوسولفوناتی، سه گل با بیشترین میزان شیب و در نتیجه ضعیف‌ترین عملکرد در کنترل افت صافاب بودند.

علت این مسئله بر اساس نوع ترکیب و افزایه متفاوت است. به عنوان مثال برای گل‌های مقاله مرجع تنها نوع یون و افزایه مؤثر است. در مورد نحوه اثر یون‌ها ابتدا باید به ساختار رس‌ها و شیمی آن‌ها توجه کرد. ذرات رس شکلی ورقه‌ای یا سینی شکل دارند. هر صفحه سینی شکل رس دو بخش دارد: رویه با بار منفی لبه با بار مثبت، منفی یا هر دو. این بارهای الکتریکی به اضافه کاتیون‌های قابل تعویض رویه، یک میدان الکتریکی در اطراف هر صفحه رس به وجود می‌آورند که رفتار این صفحه را در رابطه با سایر صفحات رس معلق در گل تعیین می‌کند. در موارد معمول بین صفحات رس اتصالی به وجود می‌آید که به یکی از سه شکل مختلف زیر و یا ترکیبی از آن‌ها خواهد بود: ۱- رویه به رویه. ۲- لبه به لبه. ۳- لبه به رویه *(Gray & Darley, 1983)*.

افزودن سدیم کلراید یا هر کاتیون یک ظرفیتی دیگر به گل حاوی رس متبلور و پراکنده، موجب افزایش چگالی یونی محیط گل می‌شود. یون‌های کلراید بار منفی و یون‌های سدیم بار مثبت محلول را افزایش می‌دهند. از طرفی چون مولکول-های رس روی سطوح خارجی خود دارای بار الکتریکی منفی هستند، همواره تمایل دارند که به‌وسیله ابری از کاتیون‌ها محاصره شوند. بنابراین گروهی از یون‌های سدیم حاصل از یونیزه شدن سدیم کلراید به سوی سطوح صاف این صفحات رفته و خود را نسبت به آن‌ها نزدیک‌تر از کاتیون‌هایی می‌کنند که قبلاً روی آن‌ها بوده‌اند. بدین ترتیب بار منفی این صفحات و در نتیجه نیروی دافعه بین آن‌ها را کاهش می‌دهند. در نتیجه صفحات رس به یکدیگر نزدیک‌تر شده و با نیروی قوی-تری به هم پیوسته می‌گردند. به طوری که آب به سختی می‌تواند در لابه‌لای آن‌ها نفوذ کرده و آن‌ها را متبلور سازد و آن‌ها هم که متبلور شده‌اند به این ترتیب آب تبلور خود را از دست می‌دهند *(Gray & Darley, 1983)*.

نیروی دافعه کاهش یافته بین صفحات به اضافه ظرفیت‌های پیوند شکسته شده که در لبه این صفحات هستند و نیروی جاذبه دارند، به اضافه نیروی دافعه شدید بین ذرات رس که ناشی از شارژهای منفی محیط گل است باعث کلوخه‌ای شدن رس می‌شود. یعنی صفحات رس معلق در گل را مجبور می‌کنند که به یکدیگر ملحق شده و به صورت کلوخه‌هایی در محلول ظاهر شوند. جابه‌جا شدن و حرکت کردن این کلوخه‌ها در محلول مشکل‌تر از حرکت کردن تک‌تک صفحات رس در آن است و باعث افزایش ویسکوزیته گل می‌شود.

البته باید توجه شود که در غلظت‌های کم یون‌ها این پدیده غالب است و اگر غلظت یون از حدی که برای هر نوع یون از طریق مطالعات آزمایشگاهی به دست می‌آید بیشتر شود، آنگاه غلظت بالای یون‌ها باعث ایجاد تجمع رویه به رویه صفحات رس و تشکیل ورقه‌های ضخیم‌تر می‌شود که به نسبت حالت قبلی که ورقه‌های نازک یا کلوخه وجود داشت تحرک راحت‌تری دارند در نتیجه گرانروی گل کاهش می‌یابد. همچنین در گل‌های پایه نمکی اشباع که در این پژوهش هم از آن‌ها استفاده شده است، چون قبل از افزایش بنتونایت آب شور شده است، امکان هیدارته شدن ذرات رس به شدت کاهش یافته و در نتیجه گرانروی کمی ایجاد می‌کنند و گرانروی گل به شدت کاهش می‌یابد (*Gray & Darley, 1983*).

از نظر اندازه و ظرفیت یون‌ها هر چه اندازه یون کوچک‌تر یا تعداد بار یونی آن بیشتر باشد، قدرت اثر آن در تغییر ویسکوزیته به علت چگالی بار بیشتر، بیشتر است. در بین گل‌های مرجع، گل A2 حاوی یون محلول سدیم است، در حالی که گل A1 بدون یون محلول، گل A3 دارای یون محلول پتاسیم و گل A4 دارای یون محلول سدیم و PAC است. یون سدیم محلول در آب شعاع بزرگ‌تری نسبت به یون پتاسیم محلول در آب دارد. وجود یون‌های محلول در آب بزرگ‌تر به خودی خود می‌تواند باعث کاهش افت صافاب شود. البته این عامل از طرف دیگر باعث تشکیل اندود گل متخلخل‌تر و در نتیجه افزایش افت صافاب هم می‌شود، اما اثر کلی آن در جهت کاهش افت صافاب است. به علاوه وجود

PAC که نوعی پلیمر آنیونی - سلولزی محلول در آب و یکی از کاهنده‌های شناخته شده افت صافاب است، عامل دیگری برای کاهش بیشتر افت صافاب در گل A4 است.

در مورد گل‌های پایه نمکی اشباع افزایه پوست گردو بهترین عملکرد در کاهش افت صافاب را داشته است که دلیل اصلی آن می‌تواند اولاً استحکام بیشتر پوست گردو (*Prehyd 2*) نسبت به سلفون (*Prehyd 1*) و ثانیاً شکل ذرات پوست گردو نسبت به سلفون باشد. ذرات پوست گردو غالباً شکلی سه بعدی، غیر هم شکل و غیر کروی دارند، اما ذرات سلفون به شکل صفحه‌ای هستند. بنابراین در مواقع استفاده از سلفون، در صورتی که صفحات سلفون عمود بر کاغذ صافی قرار بگیرد، تقریباً قدرت خود را در مسدود کردن جریان تا حد زیادی از دست می‌دهند. پس در غلظت یکسان احتمال مسدود شدن جریان و کاهش افت صافاب در هنگام استفاده از پوست گردو نسبت به سلفون بیشتر است. البته بدون داشتن تصاویر میکروسکوپی مانند *SEM* نمی‌توان با قطعیت دراین‌باره سخن گفت. اما طبق بررسی در منابع مختلف و همین مطالعه، پوست گردو و سلفون هردو تقریباً در خواص شیمیایی گل و اندود گل بی اثر هستند. بنابراین تنها باعث تغییر در خواص فیزیکی گل و اندود گل شده‌اند. این خواص فیزیکی هم محدود به تغییر چگالی گل، تغیر ساختار گل و اندود گل و تا حدی تغییر گرانروی گل هستند، که در نهایت منجر به تغییر در افت صافاب و ضخامت اندود گل می‌شوند. به علاوه گرانروی گل با افزایه سلفون به علت گیر کردن ذرات سلفون در خروجی قیف مارش قابل اندازه‌گیری نبود. بنابراین تنها متغیرهای قابل مقایسه چگالی و ساختار گل و اندود گل بودند.

از طرفی دیگر اثر چگالی در این پژوهش به دو علت تقریباً ناچیز بود: ۱- در این آزمایش حجم اندکی از گل داخل سلول فیلتراسیون استاتیکی قرار گرفته است و اثر تغییر چگالی با توجه به فشار بالا و حدود *psig* ۱۰۰ در سلول، ناچیز است. ۲- تغییر چگالی دو گل با افزایه‌های سلفون و پوست گردو هم ناچیز و در حدود *lb/ft3* ۷ است. بنابراین تنها متغیر قابل مقایسه ساختار گل و اندود گل می‌باشند.

اما علت این که چرا بدون داشتن تصاویر میکروسکوپی مانند *SEM* با قطعیت درباره ساختار اندود گل سخن گفته شده است، بررسی‌های آماری و مطالعات پیشین است. به طور کلی این که ذرات سلفون ساختار ورقه‌ای و ذرات پوست گردو ساختاری سه‌بعدی و توده‌ای دارند امری بدیهی است و حتی با چشم غیر مسلح هم این موضوع قابل مشاهده است. از طرفی دیگر طبق بررسی‌های آماری و مطالعات پیشین در مورد وضع قرارگیری ذرات در اندود گل، درصدی از ذرات ورقه‌ای سلفون می‌توانند با موقعیتی عمود و درصدی دیگر به طور موازی بر صفحه اندود گل در ساختار اندود گل قرار بگیرند، بنابراین عملاً ذرات ورقه‌ای سلفون که به طور عمود بر صفحه اندود گل قرارگرفته‌اند، کمترین اثر در کاهش تراوایی اندود گل و کاهش افت صافاب را داشته‌اند و بالعکس ذرات ورقه‌ای سلفون که به طور موازی بر صفحه اندود گل قرارگرفته‌اند، بیشترین اثر در کاهش تراوایی اندود گل و کاهش افت صافاب را داشته‌اند.

اما در مورد ذرات پوست گردو این مسئله صادق نیست و تمام ذرات به علت شکل توده‌ای با هر وضعیت سه‌بعدی نسبت به صفحه کیک گل، قابلیت کاهش تراوایی و کاهش افت صافاب را دارند و تنها اندازه ذرات پوست گردو عامل مؤثر در نحوه عملکرد آن‌ها هستند. بنابراین این مقایسه از لحاظ کیفی و با توجه به بررسی‌های آماری و مطالعات پیشین در مورد وضع قرارگیری ذرات در اندود گل قابل انجام است. هر چند با داشتن تصاویر میکروسکوپی نتایج قطعی‌تر و قابل‌قبول‌تری را می‌توان ارائه داد.

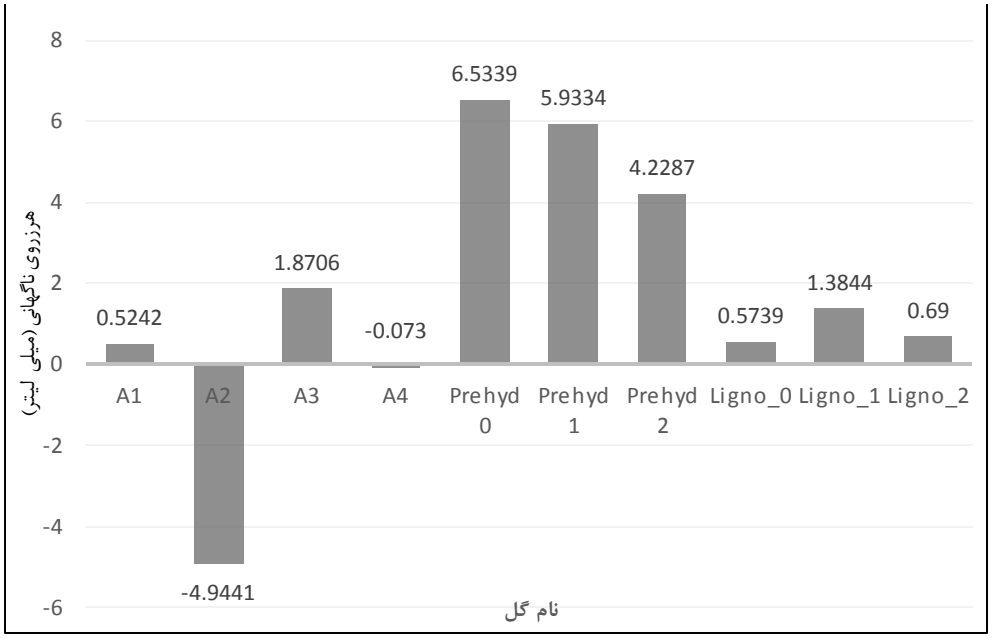
در مورد گل‌های لیگنوسولفوناتی هم باز به دلیل مشابه برای افزایه گل‌های پایه نمکی اشباع، گل *Ligno_2* با افزایه خاکاره کم‌ترین و گل *Ligno_1* با افزایه میکا بیشترین میزان رشد افت صافاب را با گذر زمان داشته‌اند.

۲.۱.۳ هرزروی ناگهانی اولیه

مسئله قابل استنباط دیگر از نمودارهای افت صافاب (شکل ۱) مقادیر هرزروی ناگهانی اولیه است که در واقع همان عرض از مبدأ نمودارهای افت صافاب هستند. بر اساس مقادیر هرزروی ناگهانی اولیه به دست آمده برای گل‌ها و افزایه‌های مختلف، نموداری مطابق شکل ۴ رسم شده است.

با توجه به شکل ۴ گل‌های پایه نمکی اشباع به طور کلی بیشترین میزان هرزروی ناگهانی اولیه را داشته‌اند. و گل-های لیگنوسولفوناتی و گل‌های مرجع هم تقریباً از این لحاظ با هم برابری داشته‌اند. مسئله مهم در این نمودار مقادیر منفی

برای هرزروی ناگهانی گل‌های *A2* و *A4* است. نکته قابل توجه این است که هرزروی ناگهانی به هیچ وجه در آزمایش فیلتراسیون استاتیکی به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه با برون‌یابی نمودار به دست آمده و محاسبه عرض از مبدأ آن به دست می‌آید. بنابراین گاهی مواقع ممکن است با توجه به نمودار و نتایج آزمایش مقدار هرزروی ناگهانی منفی به دست آید. هر چند از نظر فیزیکی و عملی یا حتی صنعتی وجود هرزروی منفی ممکن نیست اما تنها از منظر تئوری و بررسی نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که منفی بودن هرزروی ناگهانی به این معنی است که هرزروی گل در لحظه آغاز آزمایش ($t=0s$) وجود نداشته و صفر است و حتی تا مدتی بعد از شروع آزمایش هم صفر است و از یک زمان خاص به بعد که همان طول از مبدأ نمودار افت صافاب ($x=Ts$) است، آغاز می‌شود. البته این مسئله هم باید به طور دقیق‌تری در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد، چون با اندازه‌گیری دقیق‌تر و پیوسته‌تر افت صافاب دقت آزمایش بالاتر رفته و در نتیجه نتایج قابل اطمینان‌تری به دست خواهد آمد

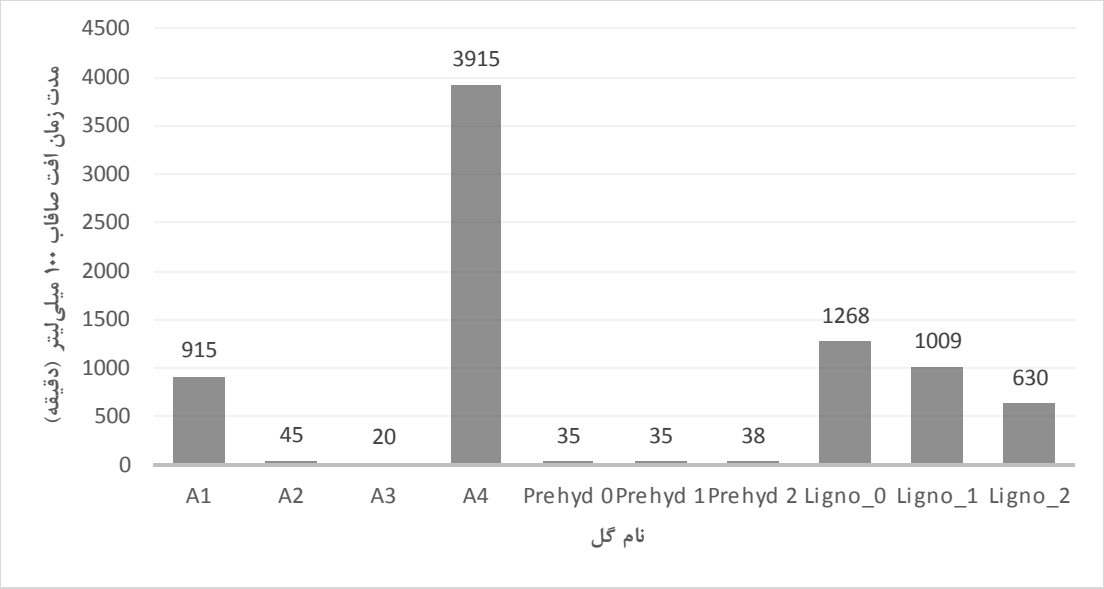


شکل ۴. نمودار هرزروی ناگهانی گل‌های مختلف

طبق شکل ۴ افزایه‌های سلفون و پوست گردو هر دو عملکرد خوبی در کاهش هرزروی ناگهانی اولیه داشته‌اند، که در این میان به دلایلی که در بخش قبلی توضیح داده شد، عملکرد افزایه پوست گردو بهتر بوده است. در مورد گل‌های لیگنوسولفوناتی به طور کلی هرزروی ناگهانی اولیه مقدار کمتری نسبت به گل‌های پایه نمکی اشباع دارد. در گل‌های پایه نمکی اشباع از انعقاد ذرات رس توسط یون‌ها جلوگیری می‌شود و باعث کاهش ویسکوزیته می‌شود اما کنترلی روی هرزروی وجود ندارند. در سیالات لیگنوسولفوناتی جلوگیری از انعقاد ذرات رس با کمک زنجیرهای هیدروکربنی با یک یا چند شاخه فرعی یونی انجام می‌شود، در نتیجه علاوه بر این که ویسکوزیته سیال را کاهش می‌دهند (حتی تا مقادیری کمتر از سیالات پایه نمکی اشباع)، هرزروی سیال را به خوبی و تا حد قابل قبولی کنترل می‌کنند. این مسائل با توجه به نتایج هرزروی ناگهانی اولیه به طور کامل تأیید می‌شود.

۳.۱.۳ زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر

یکی دیگر از معیارهایی که برای سنجش قابلیت کنترل هرزروی توسط گل تعریف شده است، مدت زمان لازم تا رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر است (*Amanullah, 2003*). البته این معیار خود جزء استانداردهای آماده‌سازی گل برای انجام آزمایش با دستگاه *MCCE* است که توسط *(Amanullah, 2003)* تعریف شده است.



شکل ۴- نمودار مدت زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر برحسب دقیقه

هرچه مدت زمان افت صافاب در رسیدن به ۱۰۰ cc بیشتر باشد به معنی سرعت افت صافاب کمتر گل است (یوسفی راد، ۱۳۹۵). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود گل-های پایه نمکی اشباع به طور کلی زمان افت صافاب خیلی کمی دارند. مدت زمان افت صافاب برای گل‌های مرجع در بعضی موارد خیلی کم است، مثل گل $A3$ که حتی از گل‌های پایه نمکی اشباع هم مدت زمان کمتری دارد و به طور عکس در گل $A4$ این زمان به بیشترین مقدار خود که حدود ۳ روز است، می‌رسد. علت کاهش شدید افت صافاب در گل $A4$ به خاطر وجود پلیمر آنیونی-سلولزی به نام PAC است که قبلاً در مورد آن توضیح داده شده است. گل‌های پایه نمکی اشباع و به طور کلی گل‌های نمکی هم به علت وجود یون محلول و خاصیت روانی بالا در طولانی مدت افت صافاب بیشتری نسبت به سایر گل‌ها دارند، و در نتیجه زمان کمتری برای رسیدن به یک حجم ثابت افت صافاب نیاز دارند. این مسئله به خوبی با توجه به نمودار شکل ۴ قابل توجیه است.

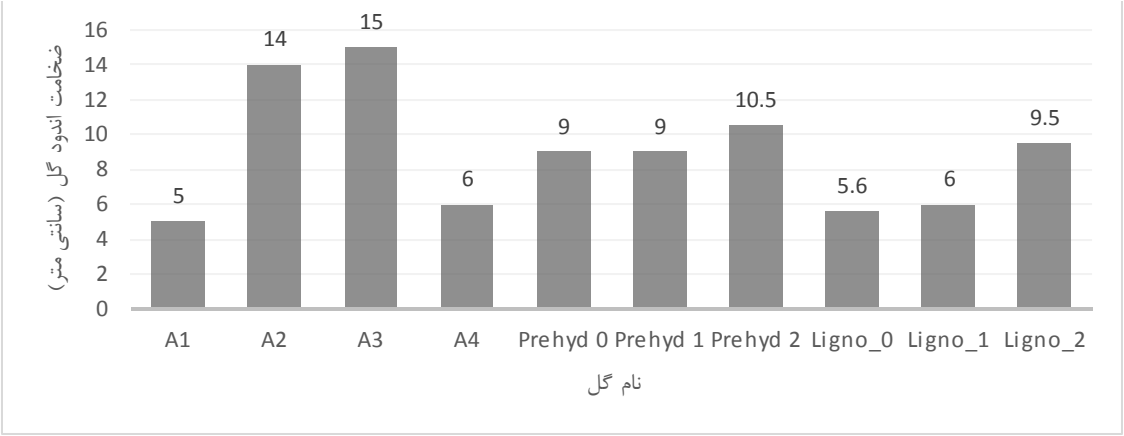
در میان گل‌های پایه نمکی اشباع دو افزایه سلفون و پوست گردو اثر محسوسی بر مدت زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر نداشته‌اند و نشان‌دهنده بی‌اثر بودن این افزایه‌ها در درازمدت است. اما در مورد گل‌های لیگنوسولفوناتی هر دو افزایه مورد استفاده اثری منفی بر افت صافاب داشته و باعث تشدید آن در دراز مدت و کاهش زمان رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر شده‌اند. گل $A1$ نیز با توجه به طولانی شدن زمان افت صافاب آن می‌تواند گل مناسبی در برابر سازندهای متخلخل و مستعد پدیده گیر اختلاف فشاری باشد. گل $A4$ دارای بیش‌ترین زمان افت صافاب است که ناشی از وجود PAC در آن است. این ماده به عنوان کاهنده افت صافاب در چاه‌های نفت به کار می‌رود.

در سیالات لیگنوسولفونایتی نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی زمان رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر بالا است که ناشی از وجود تینرهای لیگنوسولفونایت و لیگنایت در گل حفاری است. دراین‌باره در قسمت قبلی به‌طور کامل توضیح داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزودن خاک‌اره به عنوان یک عامل منفی در این زمینه تلقی شده و با توجه به افت صافاب بالایی که به وجود می‌آورد نمی‌تواند به عنوان یک افزایه مناسب در رفع هرزروی به کار رود.

۲.۳ ضخامت اندود گل

یکی از اهداف اصلی این مقاله بررسی اثر افزایه‌ها و گل‌های کنترل‌کننده هرزروی بر احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری است. بر این اساس یکی از تحلیل‌هایی که کمک زیادی به ما در فهم این ارتباط می‌کند، تحلیل ضخامت اندود گل و رابطه

آن با میزان هرزروی گل مورد مطالعه است. بر اساس پژوهش-های قبلی و روابط فیزیکی ارائه شده، در شرایط یکسان هر چه ضخامت اندود گل بیشتر باشد، احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری بیشتر است. باید توجه داشت که در این مطالعه تمام شرایط به جز ترکیب گل ثابت است. پس می‌توان با تقریب خوبی، ضخامت اندود گل را به عنوان شاخصی برای تعیین احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری در نظر گرفت. البته باید توجه داشت که در بخش بعدی گیر اختلاف فشاری به طور مجزا و مستقیم مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تمام ادعاهای مربوط به رابطه بین ضخامت اندود گل و احتمال رخ دادن گیر اختلاف فشاری در بخش بعدی راستی آزمایی می‌شود. با توجه به شکل ۵ و تطبیق آن با شکل ۴ می‌توان به این نتیجه کلی رسید که هر گلی که سرعت افت صافاب آن کمتر است، ضخامت اندود گل آن هم کمتر است. به عنوان نمونه گل *A4* از میان گل‌های مرجع کندترین سرعت افت صافاب را داشت و در اینجا هم از میان این گل‌ها تقریباً با اختلاف کمی بعد از گل *A1* کمترین میزان ضخامت اندود را دارد. در حالی که دو گل *A2* و *A3* که هر دو سرعت بالای افت صافاب را در میان گل‌های مرجع داشتند، هر دو اندود گلی به شدت ضخیم و حدود ۲/۵ تا ۳ برابر سایر گل‌های مرجع دارند. در میان گل-های پایه نمکی اشباع هم باز به این دلیل که سرعت افت صافاب بالاست، ضخامت اندود گل نسبت به متوسط ضخامت اندود گل در گل‌های لیگنوسولفوناتی، بیشتر است.



شکل ۵. نمودار ضخامت اندود گل‌های مختلف

البته در این بین انحرافاتی از این فرض کلی دیده می‌شود. یکی از دلایل آن می‌تواند نوع افزایه مورد استفاده باشد. به عنوان مثال در گل *Ligno_2* از افزایه خاکاره استفاده شده است، که با وجود کاهش افت صافاب باعث شکل‌گیری اندود گل ضخیم‌تر می‌شود. پس در این مورد افزایه خاکاره عملکردی منفی داشته است.

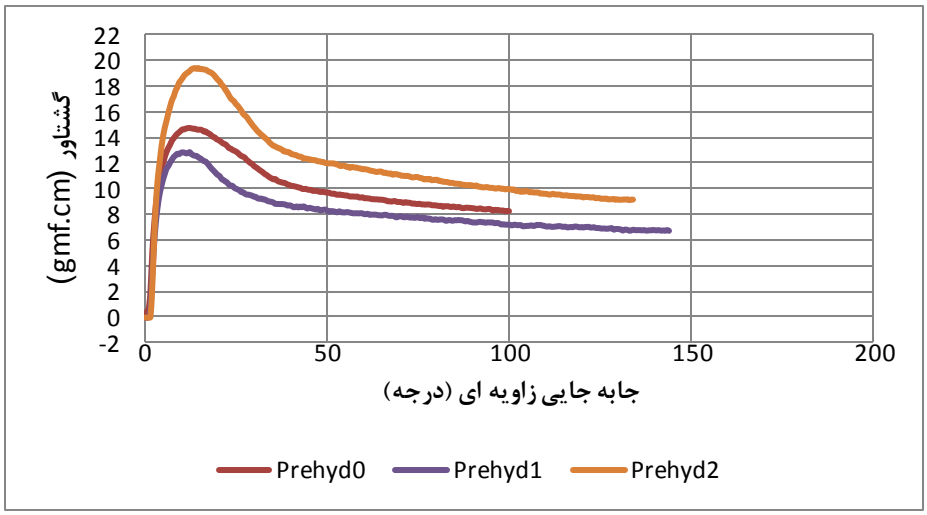
البته مسئله دیگری که ممکن است در این انحرافات دخیل باشد، روش اندازه‌گیری ضخامت اندود گل است. به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری ضخامت اندود گل از دقت بالایی برخوردار نیستند و حتی مخرب اندود گل هم هستند. البته روش‌های جدیدی مثل روش غیرمخرب اندازه‌گیری ضخامت اندود گل به کمک اشعه لیزر *(Amanullah, 2000)* ارائه شده است که باز هم جای پیشرفت دارد. پس در نهایت با توجه به مقادیر ضخامت اندود گل به طور پیش فرض می‌توان این طور انتظار داشت که احتمال گیر اختلاف فشاری در گل-های پایه نمکی اشباع بیشتر از گل‌های لیگنوسولفوناتی است. البته با توجه به مؤثر بودن عوامل مختلف، این رابطه در حد یک فرضیه است که با استفاده از نتایج قسمت بعد درستی آن تأیید می‌شود. در مورد میزان راحتی رفع این گیر هم باز احتمال داده می‌شود که رفع گیر در گل‌های لیگنوسولفوناتی به دو دلیل راحت‌تر باشد: ۱- ضخامت کمتر اندود گل. ۲- خاصیت روانکاری گل‌های لیگنوسولفوناتی که ناشی از لیگنایت و لیگنوسولفونایت موجود در ترکیب است. البته باز هم صحت این فرضیه دوم در قسمت بعد مورد بررسی قرار

می‌گیرد.

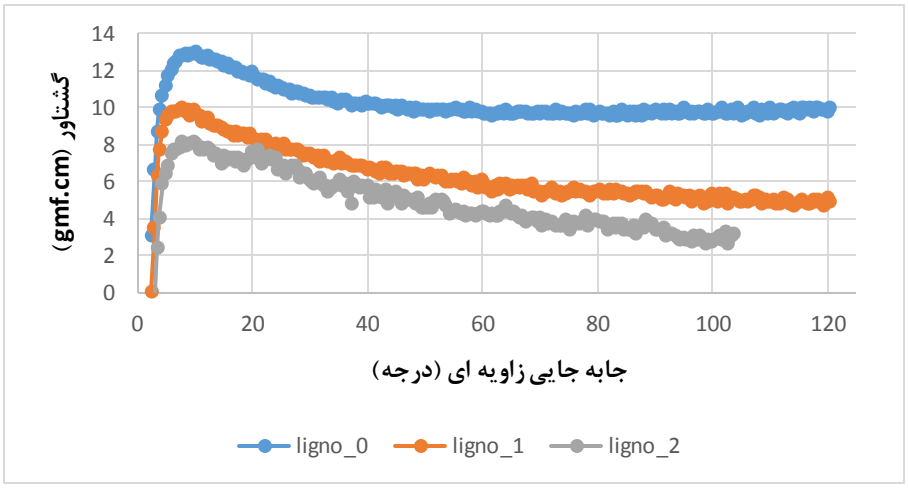
۳.۳ نمودار مقاومت پیچشی به ازای جابه‌جایی زاویه‌ای و مقاومت پیچشی بیشینه (MTRTED)

در گل‌های نرم و ضخیم احتمال گیر اختلاف فشاری بیشتر می‌شود *(Amanullah, 2004)*. از طرفی سطح فعال اندود گل که همان سطح تماس با لوله حفاری است، به عنوان یک عامل مهم تلقی می‌شود. به‌تبع هر چه اندود گل ضخیم‌تر باشد سطح فعال بیشتر خواهد بود و احتمال پدیده گیر اختلاف فشاری بالا خواهد رفت. سیالاتی با افت صافاب بیشتر نیز احتمال وقوع گیر را افزایش می‌دهند، چون مستعد تشکیل اندود گل ضخیم‌تر هستند. اما باید توجه داشت که نقش اصلی در رخ دادن گیر اختلاف فشاری و شدت آن به ترکیب گل (خواص فیزیکی شیمیایی آن) و میزان چسبندگی و استحکام اندود گل بستگی دارد *(Amanullah, 2004)*.

مهم‌ترین متغیر در این آزمایش‌ها مقاومت پیچشی اندود گل است. در این بخش روند تغییر مقاومت پیچشی اندود گل در برابر حرکت دورانی رشته حفاری به ازای جابه‌جایی زاویه‌ای به صورت یک نمودار برای هر گل (شکل‌های ۵ و ۶) ترسیم شده است. حال به تحلیل روند این عامل در نمودارهای به دست آمده از آزمایش‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ پرداخته می‌شود



شکل ۶. مقاومت پیچشی گل‌های پایه نمکی اشباع



شکل ۷. مقاومت پیچشی گل‌های لیگنوسولفونایتی

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، در همه نمودارها در جابه‌جایی زاویه‌ای حدود ۵ تا ۱۰ درجه بیشینه مقاومت پیچشی وارده از طرف اندود گل به رشته حفاری در حال دوران، مشاهده می‌شود. بعد از این جابه‌جایی زاویه‌ای، مقاومت پیچشی اندود گل به شدت افت کرده و در حدود جابه‌جایی زاویه‌ای ۴۰ تا ۵۰ درجه به یک مقدار ثابت می‌رسد. البته در منابع مختلف حدود زاویه‌ای که مقاومت پیچشی در آن به یک مقدار ثابت می‌رسد متفاوت است، به عنوان مثال در مقاله *(Amanullah, 2004)* این حدود بین ۳۰ تا ۴۰ درجه گزارش شده است. این نکته بیان‌گر این است که درست در هنگام گیر اختلاف فشاری به جای جار زدن یا بالا کشیدن رشته لوله با یک چرخش کوچک، می‌توان شانس آزاد کردن رشته لوله گیر کرده در اندود گل را تا حد زیادی افزایش داد، چون مقاومت پیچشی اندود گل تا حد زیادی پایین آمده است (*Azad, Yousefirad, Dehvedar, Moarefvand, In Press*).

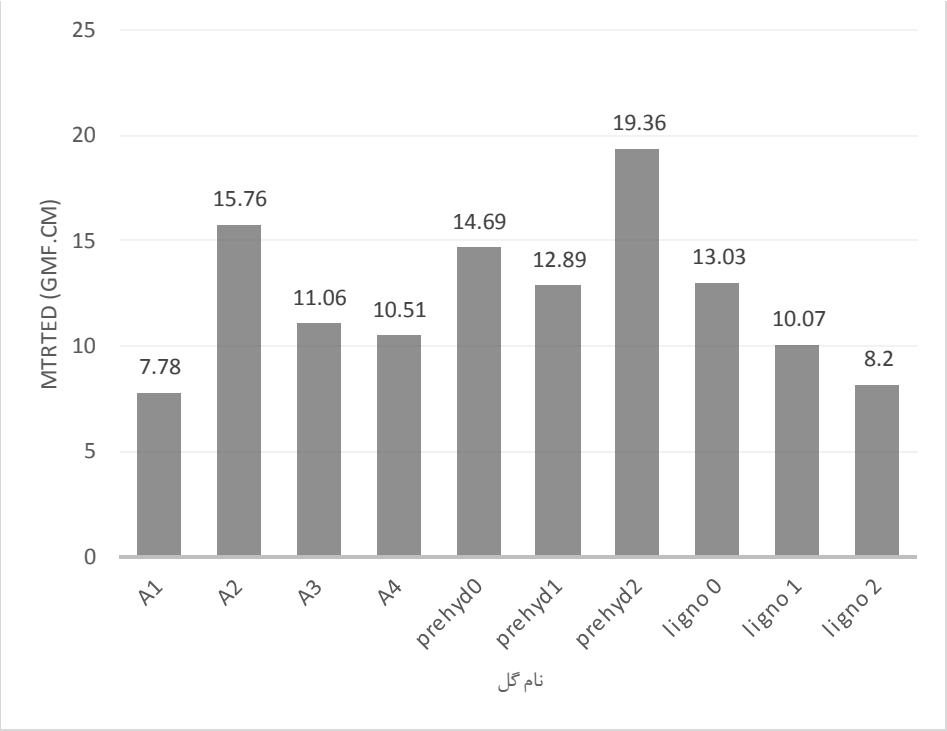
رسیدن به حداکثر مقاومت پیچشی نشان‌دهنده بیش‌ترین مقاومت پیوندهای ارتباطی بین ذرات گل در پاسخ به گشتاور اعمالی است (آزاد، ۱۳۹۴). افت ناگهانی نمودار مقاومت پیچشی بعد از این نقطه اوج و تقریباً ثابت ماندن مقاومت پیچشی به‌عنوان مقیاس تعیین‌کننده شکست گیر اختلاف فشاری در آزمایش مقاومت پیچشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ضمن علت این که نمودار مقاومت پیچشی در ابتدا با شیب زیادی به سمت مقدار حداکثر خود حرکت می‌کند و معمولاً در زاویه گردش کمتر از ۱۰ درجه به این مقدار می‌رسد ولی بعد از این اوج شیب افت نمودار کم می‌شود، دو عامل می‌تواند باشد: ۱- درگیر نبودن پایه دستگاه به صورت پیچشی با کیک گل در ابتدای آزمایش، که خود می‌تواند عاملی برای شیب زیاد نمودار تا رسیدن به نقطه اوج و شیب کمتر نمودار بعد از رسیدن به اوج باشد. ۲- شکسته شدن بسیاری از پیوندهای ذرات کیک گل و سرخوردن آن‌ها از روی هم بعد از گذر از نقطه اوج نمودار مقاومت پیچشی، که همین عامل می‌تواند باعث ایجاد مقاومت بالای پیچشی کیک گل در لحظات ابتدایی آزمایش مقاومت پیچشی و دلیل شیب زیاد نمودار تا رسیدن به نقطه اوج باشد. علت شیب کمتر بعد از نقطه اوج هم این است که اکثر این پیوندها شکسته شده‌اند و این مقاومت پیچشی باقی مانده بعد از نقطه اوج هم تنها به علت مقاومت ذرات برای سر خوردن از روی یکدیگر است. بعد از این نقطه اوج، شکست در پیوندهای فیزیکی شیمیایی بین ذرات اندود گل و ذرات اندود گل با دیواره رشته لوله رخ می‌دهد، که در ابعاد میکروسکوپی نشانگر لیز خوردن ذرات گل روی یکدیگر و یا روی صفحات شامل آن‌ها در اثر نیروهای پیچشی می‌باشد (*Azad, Yousefirad, Dehvedar, Moarefvand, In Press*).

باید توجه داشت که در مرحله‌ای که مقدار مقاومت پیچشی اندود گل به مقدار ثابت می‌رسد، باز هم نوفه‌های افزایشی و کاهشی ریزی دیده می‌شود که ناشی از برهم‌کنش ذرات جداشده روی هم و ایجاد اصطکاک متغیر بین رشته لوله حفاری و اندود گل است. به مقاومت پیچشی ثابت اندود گل که در جابه‌جایی زاویه‌ای حدود ۴۰ درجه تا آخر دیده می‌شود، مقاومت پیچشی باقی‌مانده گفته می‌شود.

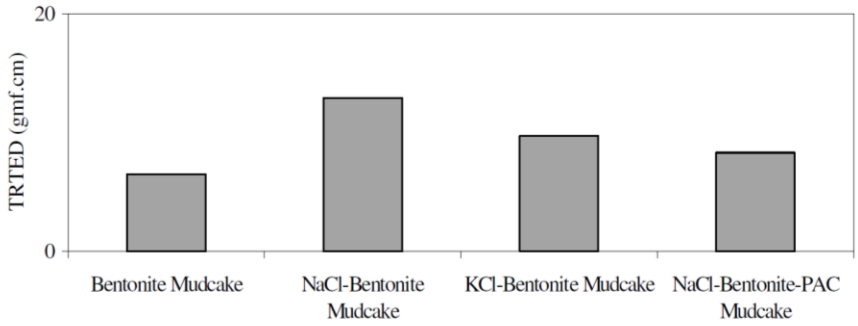
در آزمایش‌های مختلف بر روی یک نمونه اندود گل معمولاً تنوع در میزان حداکثر مقاومت پیچشی دیده می‌شود. مقدار این تفاوت ناچیز و غالباً کمتر از ۱۰ درصد است. این تفاوت ناشی از سطح تماس‌های مختلف نیم‌کره مخصوص دستگاه با ذرات تشکیل‌دهنده اندود و جهت‌گیری‌های متفاوت این ذرات است که البته ضریب تغییرات این داده‌ها در حد قابل قبولی بود (*Amanullah, 2004*).

نکته قابل‌ذکر دیگر این است که در این آزمایش‌ها مدل‌سازی در مقیاس کوچک (به انداز قطر پایه نیمه کروی) انجام گرفته شده است. اگر این مدل‌سازی در مقیاس واقعی چاه باشد، با توجه به سطح فعال بیشتر، انتظار می‌رود که اعداد بسیار متفاوت‌تری برای مقاومت پیچشی اندود گل به دست آید (*Azad, Yousefirad, Dehvedar, Moarefvand, In Press*).

در ادامه و در شکل‌های ۷ و ۸ حداکثر مقاومت پیچشی گل در عمق نفوذ هدف را مشاهده می‌کنید که به آن *MTRTED* هم گفته می‌شود (*Amanullah, 2004*).



شکل ۸. مقاومت پیچشی بیشینه گل‌های مورد آزمایش



شکل ۹. مقاومت پیچشی بیشینه به‌دست‌آمده برای گل‌های بنتونایتی در مقاله مرجع *(Amanullah, 2003)*

هر چه این عامل بیشتر شود لوله سخت‌تر در چاه می‌چرخد و رفع گیر آن مشکل‌تر خواهد شد. مقاومت پیچشی اندود گل به شدت تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیب گل و افزایه‌های گل است *(Amanullah, 2004)*. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، گل بنتونایتی بدون افزایه *A1* دارای کمترین مقاومت پیچشی و گل *A2* که حاوی نمک *NaCl* است، بیش‌ترین مقاومت پیچشی را دارد. وجود نمک‌ها با پیوندهای یونی و اتصال ذرات کاتیونی آن‌ها با ذرات بنتونایتی، مقاومت پیچشی بالاتری را برای گل‌های بنتونایتی رقم خواهد زد، که هرچه کاتیون آن درشت‌تر باشد، مقاومت پیچشی بیشتر خواهد بود. این پدیده در گل‌های *A2* و *A3* مشهود است. البته گل *A3* به خاطر کوچک‌تر بودن یون K^+ نسبت به یون Na^+ که در گل *A2* محلول است، مقاومت پیچشی کمتری دارد. گل *A4* نیز به علت وجود *PAC* نسبت

به گل *A2* دارای مقاومت پیچشی کمتری است. علت آن ایجاد یک نیروی دافعه نسبتاً قوی توسط *PAC* و شکسته شدن تعدادی از پیوندهای کاتیونی است. با توجه به نکات ذکرشده در قسمت ضخامت اندود گل و نتایج مربوط به مقاومت پیچشی اندود گل، به نظر می‌رسد در میان گل‌های بنتونایتی مقاله مرجع، گل *A1* به علت خاصیت روان‌کاری بالای خود، مقاومت پیچشی پایین اندود گل و همچنین ضخامت کمتر اندود گل، بهترین گل مورد استفاده برای پیشگیری یا سهولت رفع گیر اختلاف فشاری است.

گل‌های *A2* و *A3* و *A4* به علت افت صافاب بالای خود که به نوعی باعث ضخامت اندود گل زیاد است، سطح فعال بیشتری دارند، که در نهایت باعث ایجاد مقاومت پیچشی بالا می‌شود. بنابراین بر اساس هدف این مطالعه که رفع افت صافاب همراه با کاهش احتمال گیر اختلاف فشاری است، گل‌های *A2*، *A3* و *A4* به ترتیب جزء گل‌های با احتمال زیاد تا کم گیر اختلاف فشاری در میان گل‌های مقاله مرجع هستند. نکته حائز اهمیت در مورد گل‌های نمکی این است که شاید در سطح و توسط مهندس حفار از افزودن نمک جلوگیری شود یا تا حدی نمک‌زدایی انجام شود. اما رسیدن چاه به سازندهای تبخیری یا نمکی و آلوده شدن گل حفاری، به خصوص آلودگی گل‌های بنتونایتی با نمک‌ها، می‌تواند احتمال گیر اختلاف فشاری را تا حد زیادی افزایش دهد. سازندهای متخلخل ماسه‌ای نیز از جهت احتمال هرزروی بالا در صورت مجاورت با سازندهای نمکی و تبخیری باعث تشدید احتمال گیر اختلاف فشاری می‌شوند.

گل *A4* به علت وجود *PAC* که یک ترکیب سلولزی پلی آنیونیک کاهنده افت صافاب است، ضخامت اندود گل کمتری دارد. از طرفی دیگر به علت مقاومت پیچشی پایین و خاصیت روان کاری در کنار گل بنتونایتی پایه (*A1*)، این گل نیز می‌تواند به عنوان یک گل مناسب حاوی نمک محلول به کار رود.

در تمام گل‌های پایه نمکی اشباع، افت صافاب نسبت به سایر گل‌ها شدیدتر است. اما ضخامت اندود گل آن‌ها به جز در دو مورد گل *A1* و *A4*، در باقی موارد از ضخامت اندود گل‌های مرجع کمتر و از ضخامت تمام اندود گل‌های لیگنوسولفوناتی بیشتر بوده است. در مورد مقاومت پیچشی اندود گل هم در اکثر موارد به جز گل *A2*، مقاومت پیچشی اندود گل‌های پایه نمکی اشباع از سایر اندود گل‌ها بیشتر است. بنابراین به طور کلی در صورت عدم ضرورت، استفاده از گل‌های پایه نمکی اشباع توصیه نمی‌شود. در میان گل‌های پایه نمکی اشباع، گل *Prehyd 0* (بدون افزایه) و *Prehyd 1* (با افزایه سلفون) تقریباً شرایط افت صافاب مشابه و ضخامت اندود گل برابری دارند. اما گل *Prehyd 2* (با افزایه پوست گردو) افت صافاب کمتر ولی ضخامت اندود گل بیشتری دارد. در مورد مسئله افت صافاب و علت آن به طور مفصل و در انتهای بخش نمودارهای افت صافاب توضیح داده شده است، و علت اصلی این مسئله از نظر نگارندگان شکل هندسی ذرات پوست گردو و ذرات سلفون است. بر این اساس ذرات پوست گردو با گسترش در سه بعد فضا و شکل توده‌ای نسبت به ذرات سلفون با گسترش دوبعدی در فضا و شکل ورقه‌ای یا صفحه‌ای، در رفع افت صافاب مؤثرتر هستند. علت افزایش نسبتاً کم ضخامت اندود گل با وجود کاهش افت صافاب در گل *Prehyd 2* را هم می‌توان ناشی از شکل ذرات پوست گردو و حجم زیاد آن‌ها نسبت به افزایه سلفون دانست.

از نظر مقاومت پیچشی اندود گل، به ترتیب اندود گل *Prehyd 2*، *Prehyd 0* و *Prehyd 1* بیشترین تا کمترین میزان مقاومت پیچشی اندود گل را دارند. با توجه به نتایج قسمت افت صافاب و ضخامت اندود گل تقریباً این ترتیب از مقاومت پیچشی اندود گل قابل پیش‌بینی بود. به این صورت که گل *Prehyd 2* با بیشترین ضخامت اندود گل و همچنین استحکام بیشتر افزایه پوست گردو نسبت به سلفون، مقاومت پیچشی اندود گل بیشتری از دو گل دیگر دارد. در مورد دو گل دیگر با وجود برابر بودن تقریبی ضخامت اندود گل، شاید به علت استحکام پایین سلفون و همچنین شکل هندسی ورقه‌ای آن، درگیری کمتری بین اندود گل و پایه نیمه کروی دستگاه ایجاد می‌شود که این مسئله می‌تواند باعث کاهش مقاومت پیچشی اندود گل شود.

پس در مورد گل‌های پایه نمکی اشباع، افزایه پوست گردو با وجود کنترل هرزروی، احتمال گیر اختلاف فشاری را به شدت بالا می‌برد. اما افزایه سلفون با وجود این که در کنترل هرزروی، به مقدار کمتری اثرگذار بوده است، اما احتمال گیر اختلاف فشاری را به میزان زیادی کم کرده است. گل‌های لیگنوسولفوناتی، به طور کلی به علت خاصیت روان کاری خود در گروه گل‌هایی با مقاومت پیچشی پایین قرار می‌گیرند

که احتمال گیر اختلاف فشاری را تا حد زیادی پایین می‌آورند. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، اندود گل *Ligno_2* که حاوی افزایه خاکاره است، مقاومت پیچشی کمتری را نسبت به بقیه گل‌های لیگنوسولفوناتی نشان می‌دهد. در واقع افزایه خاکاره علیرغم اثر منفی که در دو عامل قبل (افت صافاب و ضخامت) داشت، باعث ایجاد مقاومت پیچشی کمتر نسبت به دو گل دیگر می‌شود. بسته به هدف مهندس حفار و مشکل اصلی حفاری که هرزروی گل یا ضخامت بالای اندود گل یا گیر اختلاف فشاری باشد، گل *Ligno_2* با افزایه خاکاره می‌تواند کارآمد و مفید و یا ناکارآمد و مضر باشد. این نتایج بیان‌گر این است که علیرغم تعریف متغیرهای اصلی جهت انتخاب گل مناسب عوامل تأثیرگذار دیگری نیز وجود دارند که بسته به مشکل و طراحی حفاری و هدف اصلی مهندس حفاری اهمیت پیدا می‌کنند. گل *Ligno_0* طبق توضیحات قبلی، دارای خاصیت روان کاری بالایی است که می‌تواند در رفع گیر چاه مفید باشد. البته نسبت به گل‌های *Ligno_1* و *Ligno_2* مقاومت پیچشی بالاتری دارد که بسیار تعجب‌آور است. چون افت صافاب و ضخامت اندود گل کمتری دارد. در واقع با وجود دو عامل مثبت و کاهنده احتمال گیر اختلاف فشاری، شدت گیر اختلاف فشاری در این گل نسبت به سایر گل‌های لیگنوسولفوناتی بیشتر است. از نظر نگارنده دلایلی از جمله ساختار اندود گل *Ligno_0*، استحکام آن و میزان چسبندگی بین اندود گل آن و پایه نیمه کروی دستگاه آزمایش می‌توانند علت این مسئله باشند. البته بررسی این دلایل و شدت اثر آن‌ها خود می‌تواند موضوع بسیاری از پژوهش‌های آتی باشد و مجالی برای پرداختن به آن‌ها در این پژوهش وجود ندارد. گل *Ligno_1* حاوی افزایه میکا است. در مقایسه با سایر گل‌های لیگنوسولفوناتی میزان افت صافاب آن بیشتر، ضخامت اندود گل آن کمی بیشتر و مقاومت پیچشی اندود گل آن در مقایسه با گل *Ligno_0* کمتر است. به نظر می‌رسد که افزایه میکا تا حدی باعث تشدید افت صافاب و افزایش ضخامت اندود گل شده است اما در نهایت میزان مقاومت پیچشی اندود گل کاهش یافته است. در نتیجه میکا از نظر خواص هرزروی و ضخامت اثری منفی دارد اما احتمال گیر و شدت گیر را تا حد کمی کاهش می‌دهد. در کل از نظر عملکرد گل *Ligno_1* تفاوت زیادی با گل *Ligno_0* ندارد. در گل *Ligno_2* همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد خاکاره از یک طرف افت صافاب و ضخامت اندود گل را افزایش داده اما از طرف دیگر مقاومت پیچشی کمتری از خود نشان داده است. البته گل فوم مانندی را هم ایجاد کرد. این نتایج نشانگر این است که تصمیم‌گیری در مورد افزایه خاک اره نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. چون با توجه به نتایج این پژوهش با وجود این که افت صافاب را کنترل نکرده و حتی باعث افزایش آن شده است، اما مقاومت پیچشی اندود گل را تا حد قابل قبولی کاهش داده است. در جدول ۴ شرح کلی از نتایج به دست آمده در این پژوهش، برای تمامی گل‌های مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۴. نتایج به دست آمده از آزمایش اندود گل‌های مختلف

نام گل	دمای محیط (^{O}C)	فشار پمپ هوا(*Psi*)	گرانروی گل (*quart*)	وزن گل (*lb/ft3*)	ضخامت اندود گل(*mm*)	مدت زمان افت صافاب ۱۰۰ *ml* (*min*)	*MTRTED* (gr.cm)
A1	۲۱	۹۸	غیرقابل اندازه‌گیری	۶۴/۶۸	۵	۹۱۵	۷/۷۸
A2	۲۱/۷	۱۰۳	۲۴۲	۶۸/۹۵	۱۴	۴۵	۱۵/۷۶
A3	۲۳/۲	۱۰۰	۲۷۳	۶۸/۹۵	۱۵	۲۰	۱۱/۰۶
A4	۲۴/۱	۱۰۰	۲۹	۷۶/۹۷	۶	۳۹۱۵	۱۰/۵۱
Prehyd 0	۲۴/۲	۹۷	۲۵	۱۳۷/۲۸	۹	۳۵	۱۴/۶۹
Prehyd 1	۲۴/۱	۱۰۰	غیرقابل اندازه-گیری	۱۱۶/۴۸	۹	۳۵	۱۲/۸۹
Prehyd 2	۲۴/۴	۱۰۰	۲۶	۱۲۴/۸	۱۰/۵	۳۸	۱۹/۳۶
Ligno_0	۲/۲۵	۱۰۳	۱۶	۹۶/۷۶	۵/۶	۱۲۶۸	۱۳/۰۳
Ligno_1	۳/۲۵	۱۰۰	۱۶	۸۸/۷۴	۶	۱۰۰۹	۱۰/۰۷
Ligno_2	۷/۲۴	۱۰۵	۵۳	کمتر از آب	۹/۵	۶۳۰	۸/۲۰

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش بررسی اثر افزایه‌های نمکی *KCl*، *NaCl* و افزایه *PAC* روی گل‌های بنتونایتی مقاله مرجع مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر افزایه‌های پوست گردو و سلفون روی گل‌های پایه نمکی اشباع و افزایه‌های خاکاره و میکا روی گل‌های لیگنوسولفونایتی، در کنترل هرزروی و نحوه اثر هرزروی و نحوه اثر افزایه‌های کنترل هرزروی بر روی رفع گیر اختلاف فشاری مطالعه شد. متغیرهای اصلی شامل مقاومت پیچشی حداکثر اندود گل، ضخامت اندود گل و متغیرهای افت صافاب در هر یک از گل‌ها همراه سایر متغیرهای فرعی معمول گزارش شد. نتایج حاکی از آن است که گل‌های بنتونایتی مورد بررسی به طور کلی عملکرد ضعیفی را نسبت به گل‌های لیگنوسولفوناتی از خود نشان می‌دهند، که این عملکرد ضعیف، با حضور نمک‌ها (یون محلول در آب) ضعیف‌تر هم می‌شود. همچنین گل‌های لیگنوسولفونایتی بررسی شده بدون وجود افزایه‌های هدف (خاک اره و میکا) عملکرد ضعیف‌تری در کنترل افت صافاب، کنترل ضخامت اندود گل و عملکرد بهتری را در جهت رفع گیر اختلاف فشاری نشان می‌دهند. با توجه به آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده، نتایج زیر به دست آمده است:

به طور کلی نمک‌ها باعث تشدید افت صافاب، افزایش ضخامت اندود گل، افزایش میزان مقاومت پیچشی اندود گل و در نهایت افزایش احتمال گیر اختلاف فشاری می‌شوند.

هر چه اندازه کاتیون موجود در نمک‌ها بزرگ‌تر و پیوند بین آن‌ها قوی‌تر باشد، مقاومت پیچشی اندود گل و به دنبال آن احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری افزایش خواهد یافت.

وجود *PAC* به عنوان کنترل‌کننده افت صافاب می‌تواند به شدت باعث کاهش ضخامت اندود گل و مقاومت پیچشی اندود گل شود. در مجموع احتمال گیر اختلاف فشاری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

افزایه میکا در کنترل افت صافاب و کاهش ضخامت اندود گل ناکارآمد بود، اما طی نتایج تعجب‌آوری باعث کاهش مقاومت پیچشی اندود گل لیگنوسولفونایتی شد، بنابراین جهت رفع گیر مناسب است. البته استفاده از آن به علت اثرات نامطلوب روی افت صافاب و ضخامت اندود گل باید همراه با مطالعه دقیق‌تر و بیشتر و احتیاط انجام شود.

چرخش کم لوله حفاری (حدود ۵ تا ۱۰ درجه) در ابتدای گیر اختلاف فشاری بسیار کارآمد بوده و مقاومت پیچشی اندود گل را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. منظور اصلی نگارنده از چرخش همان سرعت زاویه‌ای است. منتها نه چرخش بر مبنای *rpm* یا همان دور بر دقیقه، بلکه منظور چرخش با واحد درجه بر ثانیه است. در واقع مفهوم یکی است و تنها واحد اندازه‌گیری متفاوت است. اگر هم ذکر شده است که مثلاً چرخش به اندازه چند درجه منظور چرخش با سرعت زاویه‌ای ثابت است تا زمانی که جابه‌جایی زاویه‌ای رشته حفاری به آن میزان چرخش برسد. علت استفاده از واحد درجه بر ثانیه به جای *rpm* هم بیشتر به علت استاندارد واحد اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای دستگاه که بر مبنای درجه بر ثانیه بود، و پرهیز از انجام محاسبات اضافی و تطابق با استانداردهای دستگاه بوده است.

شکل هندسی نوع افزایه بر عملکرد افزایه در کنترل افت صافاب اثرگذار است. به طور کلی در میان افزایه‌های کنترل هرزروی، افزایه‌هایی مثل پوست گردو که از نظر هندسی در همه جهات در فضا گسترده شده‌اند و توده‌ای شکل هستند، نسبت به افزایه‌هایی چون سلفون که تنها در دو بعد فضا گسترش یافته‌اند و شکلی ورقه‌ای یا صفحه‌ای دارند، عملکرد بهتری داشته و کارآمدتر بودند. البته بررسی‌های دقیق‌تر و تکمیلی‌تر باید انجام شود تا به نتایجی علمی‌تر، دقیق‌تر و قابل‌اطمینان‌تر دست یافت.

کاهش افت صافاب در اکثر موارد مورد مطالعه این پژوهش باعث کاهش ضخامت اندود گل، کاهش مقاومت پیچشی اندود گل و در نهایت کاهش احتمال گیر اختلاف فشاری شده است. تنها استثنای این مسئله گل پایه نمکی اشباع با افزایه پوست گردو (*Prehyd 2*) است، که با وجود کاهش افت صافاب و کنترل هرزروی، مقاومت پیچشی اندود گل آن بالا رفته است. البته علت این مسئله هم به نظر نگارندگان شکل هندسی افزایه پوست گردو و استحکام نسبتاً بالاتر آن است.

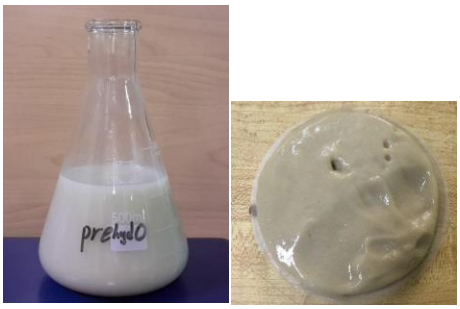
در اکثر موارد گل‌های پایه نمکی اشباع دارای مشکلات هرزروی و افت صافاب بیشتر، ضخامت اندود گل بیشتر و مقاومت پیچشی اندود گل بالاتر هستند. پس احتمال گیر اختلاف فشاری در این نوع گل‌ها نسبت به سایر گل‌های مورد مطالعه این مقاله بالاتر است.

در راستای رسیدن به راه‌حل مناسب جهت رفع گیر اختلاف فشاری پیشنهادهای زیر ارائه می‌شوند:

- بهبود روش‌های اندازه‌گیری مقاومت پیچشی در دستگاه *MCCE*
- بررسی تأثیر نمک‌ها در گل‌های لیگنوسولفونایتی.
- تحقیق بر روی متغیرهای مؤثر بیشتر از جمله شکل افزایه، استحکام آن و سایر خواص فیزیکی و شیمیایی در افت صافاب و اثر آن روی احتمال گیر اختلاف فشاری.
- تحقیقات روی سایر افزایه‌ها جهت رسیدن به ترکیب مناسب گل جهت جلوگیری از گیر اختلاف فشاری.
- تطبیق روش‌های آماری و الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی بر اساس نتایج حاصل از متغیرهای ارائه‌شده در این تحقیق و یافتن مناسب‌ترین گل برای شرایط مختلف.

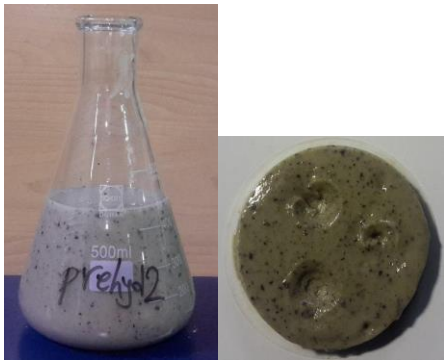
۵. پیوست

الف- تصاویری از گل و اندود گل‌های ساخته شده



شکل ۱۰. نمایی از گل و اندود گل Prehyd 0.

شکل ۱۱. نمایی از اندود گل Prehyd 1.



شکل ۱۲. نمایی از گل و اندود گل Prehyd 2.

شکل ۱۳. نمایی از اندود گل Ligno_0.

شکل ۱۴. نمایی از گل و اندود گل Ligno_1.

شکل ۱۵. نمایی از گل و اندود گل Ligno_2.

۶. مراجع

Amanullah, Md. , & TAN, C.P. (2000). A Non-Destructive Method of Cake Thickness Measurement. Paper presented at Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, SPE: Society of Petroleum Engineering.

Amanullah, Md. , & TAN, C.P. (2001). Embedment Modulus of Mudcakes - Its Drilling Engineering Significance. Paper presented at AADE National Drilling Conference, Houston, Texas, AADE: American Association of Drilling Engineers.

Amanullah, Md. (2002). Experimental Determination of Adhesive-Cohesive Bond Strength and Adhesion Cohesion Modulus of Mudcakes. Paper presented at SPE Asia Pacific Drilling Technology (APDT). Jakarta, Indonesia, AADE: American Association of Drilling Engineers.

Amanullah, Md. (2003). Experimental Determination of Compressive, Pulling and Torsional Resistance of Mudcakes using a Triple Action Load Cell Assembly. Paper presented at 10th ISRM Congress. Sandton, South Africa: International Society for Rock Mechanics.

Amanullah, Md. (2004). Experimental Determination of the Variation of Torsional Resistance of Mudcakes with the Variation of Mud and Mudcake Composition. Paper presented at Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (pp. 18-20). Perth, Australia: Society of Petroleum Engineers.

Amanullah, Md., & Al-Arfaj, M. K. (2016, August 22). Method and Apparatus to Reduce the Probability of Differential Sticking. Paper presented at IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore.

Azad, E., Yousefirad, S., Dehvedar, M., Moarefvand, P. (In Press). Experimental study of freeing stuck pipe by changing in characterization and additives of mud cake. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Accepted & Available Online from 17 May 2017.

Ay, A., Hakki Gucuyener, I., & Verşan Kök, M., (2014). An experimental study of silicate–polymer gel systems to seal shallow water flow and lost circulation zones in top hole drilling, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122, 690-699.

Alsabagh, A.M., Abdou, M.I., Khalil, A.A., Ahmed, H.E., A.A., & Aboulrous, (2014). Investigation of some locally water-soluble natural polymers as circulation loss control agents during oil fields drilling, *Egyptian Journal of Petroleum*, Volume 23, Issue 1, 27-34.

Benaissa, S., Bachelot, A., Ricaud, J., Arquey, G., Yi, X., & Ong, S. (2005, January 1). Preventing Differential Sticking and Mud Losses Drilling through Highly Depleted Sands. Fluids and Geomechanics Approach. Paper presented at SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands.

Boukadi, F., Yaghi, B., AL-Hadrami, H., Bemani, A., Babadagli, T., & DE Mestre, P., (2004). A Comparative Study of Lost Circulation Materials, *Energy Sources*, 26:11, 1043-1051.

Bourgoyne Jr. A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young Jr., F., (1986). Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers.

Collins, N., Whitfill, D., Kharitonov, A., & Miller, M. (2010, January 1). Comprehensive Approach to Severe Loss Circulation Problems in Russia. SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition,

Moscow, Russia.

Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & Van Oort, E. (2011). Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. *Oilfield Review*, *23*(4), 26-35.

Fink, J., & Karl Fink, J., (2015). *Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*, Elsevier Science.

Gray, G. R., & Darley, H. C. H. (1983). Compositional and Properties of Oil Well Drilling Fluid. Gulf Publishing Company.

Jahanbakhshi, R., Keshavarzi, R., (2016). Intelligent Classifier Approach for Prediction and Sensitivity Analysis of Differential Pipe Sticking: A Comparative Study. *The American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. *Journal of Energy Resources Technology*. 138 (5).

Lourenço, A.M.F. & Marcelo, A., (2012).A decision support model for differential sticking avoidance. PHD thesis. Curtin University.

Moazzeni, A., Nabaei, M., Kharrat, R., (2012). A breakthrough in controlling lost circulation in a pay zone by optimizing the particle size distribution of shellfish and limestone chips, *Journal of Petroleum Science and Technology*, 30, 290-306.

Okwu, A. E., & Dosunmu, A., (2013, August 5). A Risk Based Model to Quantify Differential Sticking Risk in Drilling Depleted Reservoir Formations. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, Nigeria, SPE: Society of Petroleum Engineering.

Pilehvari, A. A., & Nyshadham, V. R., (2002, January 1). Effect of Material Type and Size Distribution on Performance of Loss/Seepage Control Material. International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, SPE: Society of Petroleum Engineering.

Reid, P. I., Meeten, G. H., Way, P. W., Clark, P., Chambers, B. D., & Gilmour, A. (1996, January 1). Mechanisms Of Differential Sticking And A Simple Well Site Test For Monitoring And Optimizing Drilling Mud Properties. *SPE Drilling & Completion, 15(02)*.

آزاد، احسان. (۱۳۹۴). *بررسی اثر افزایه های گل حفاری در رفع گیرهای رخ داده در سیالات لیگنوسولفوناتی*. پایان نامه منتشر شده کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، گروه اکتشاف.

یوسفی راد، ساسان. (۱۳۹۵). *اثر کائوچو بر افت صافاب گل‌های پایه نمکی اشباع*. پایان نامه کارشناسی منتشر شده، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، گروه اکتشاف.