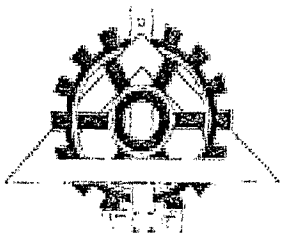
بسم الله الرحمن الرحيم

٩٦٢٢٢



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان:

مدلسازی و مانیتورینگ
فرآیند حفاری زیرتعادلی
با استفاده از تخمین و نظریه ترکیب اطلاعات

نگارش:

تهمینه نظری

استاد راهنما:

پروفسور بهزاد مشیری

استاد مشاور:

دکتر کریم سلحشور

۱۳۸۷ /۷۷/ ۱۱۱

۱۳۸۷ /۷۷/ ۱۱۱

۹۶۲۳۳

پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ

مهندسی برق-گرایش کنترل

تیر ۱۳۸۷

به نام خدا

دانشگاه تهران

معاونت تحصیلات تکمیلی
پردیس دانشکده های فنی
دانشگاه تهران

پردیس دانشکده های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیأت داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقای/خانم تهمینه نظری در رشته مهندسی برق و کامپیوتر، گرایش : کنترل

با عنوان: " مدلسازی و مانیتورینگ فرایند حفاری به روش زیر تعادلی ، با استفاده از تخمین ونظریه ترکیب اطلاعات "

در تاریخ ۱۳۸۷/۰۴/۳۱ نمره نهایی پایان نامه: به عدد ۱۹٫۳ به حروف نوزده و سه دهم

و درجه عالی ارزیابی نمود.

مشخصات هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱-استاد راهنما استاد راهنمای دوم (حسب مورد)	دکتر بهزاد مشیری	استاد	تهران	
۲-استاد مشاور	دکتر کریم سلحشور	استادیار	صنعت نفت	
۳ -استاد مدعو خارجی (یا استاد مشاور دوم)	دکتر ریاض خراط	دانشیار	دانشکده صنعت نفت	
۴-استاد مدعو داخلی	دکتر اشکان رحیمی کیان	استادیار	تهران	
۵-داور و نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر بابک نجاراعرابی	دانشیار	تهران	

تذکر:این برگه پس از تکمیل توسط هیأت داوران در نخستین صفحه پایان نامه درج می گردد.

دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی برق – گرایش کنترل

عنوان:

مدلسازی و مانیتورینگ
فرآیند حفاری زیرتعادلی
با استفاده از تخمین و نظریه ترکیب اطلاعات

نگارش: تهمینه نظری

این پایان‌نامه در تاریخ ۸۷/۴/۳۱ در مقابل هیأت داوران دفاع گردید و مورد تصویب قرار گرفت.

معاون آموزش و تحصیلات تکمیلی پردیس دانشکده‌های فنی: دکتر جواد فیض

رئیس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر سعید نادر اصفهانی

اساتید راهنما: دکتر بهزاد مشیری

استاد مشاور: دکتر کریم سلحشور

عضو هیأت داوران: دکتر بابک نجار اعرابی

عضو هیأت داوران: دکتر اشکان رحیمی کیان

عضو هیأت داوران: دکتر ریاض خراط

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب تهمینه نظری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل دانشگاه تهران گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد؛ و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرکی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

تهمینه نظری

تیر ۱۳۸۷

تقدیم به مادر عزیزم، اسطوره اراده و تلاش برای من
و تقدیم به همسر مهربانم، انگیزه و همراه زندگی من

سپاسگزاری

در انجام این پروژه اساتید و دوستان بسیاری من را یاری کرده‌اند. در ابتدا باید از جناب آقای دکتر مشیری و جناب آقای دکتر سلحشور برای راهنمایی‌های مفید و متداومشان سپاسگزاری کنم. از همسر عزیزم، آقای وحید مصطفوی در همراهی و راهنمایی‌های همیشگی ایشان تشکر می‌کنم. جناب آقای دکتر جلال حبیبی با صبر بسیار به سیل پرسش‌های من پاسخگو بوده‌اند که از ایشان کمال سپاسگزاری را دارم. در نهایت نیز از آقای دکتر Nygaard برای کمکهای علمی فراوان و در اختیار قرار دادن داده‌های آزمایشگاه IRIS، نهایت تشکر را دارم. امیدوارم این پروژه در استفاده از روشهای ارائه شده در مهندسی کنترل برای پیشبرد صنعت نفت کشور موفق بوده باشد.

چکیده

در انواع روشهای حفاری، با استفاده از یک سیال یک فازی و یا دو فازی (بسته به فشار مخزن نفتی[1]) تکه‌های[2] تولید شده توسط مته[3]، به سطح انتقال می‌یابد. در حفاری به روش فرا تعادلی[4] ابتدا چاه حفر شده و برای محافظت از چاه و مخزن[5] از سیمان‌کاری و لوله جداری[6] استفاده می‌گردد. پس از پایان حفاری، بهره‌برداری از چاه آغاز می‌گردد. در روش جدید حفاری زیر تعادلی[7] که از سال ۱۹۳۲ ارائه گردید، در حین انجام عملیات حفاری، بهره‌برداری از چاه نیز انجام می‌گیرد. این روش با توجه به صدمات بسیار کمتری که به مخزن وارد می‌کند و صرفه اقتصادی بسیار بالاتر، مورد توجه قرار گرفته است. تولید نفت از مخزن به چاه در روش حفاری زیرتعادلی محقق نمی‌گردد مگر با استفاده از گل حفاری دوفازی (گاز و مایع) که فشار ته چاه[8] را پایینتر از فشار مخزن قرار دهد. برای ایجاد شرایط امنیتی مناسب برای چاه، محدوده های خاصی برای برخی حالات سیستم تعیین می‌گردد که مانیتورینگ آنها را الزامی می‌کند. برای بررسی و کنترل شرایط حفاری، مدلسازی و مانیتورینگ حالات مهم سیستم، در اولویت قرار دارد، حال آنکه مدل منتخب باید توانایی اعمال تفسیر بر روی آن از دیدگاه یک مهندس کنترل را ارائه دهد.

در این تحقیق در ابتدا انواع مدلهای موجود برای یک عملیات حفاری زیر تعادلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین انواع مدلهای موجود با توجه به پیش زمینه ارائه شده در متن، یک مدل با دقت کمتر و پیچیدگی کمتر انتخاب می‌گردد. در ادامه برای رویت سرعت سیال در لوله‌های حفاری از رویتگرهای

---

[1] Oil Reservoir
[2] Mud
[3] Bit
[4] Over Balanced Drilling
[5] Reservoir
[6] Casing
[7] Under Balanced Drilling
[8] Bottom Hole Pressure

حالت غیرخطی[9] استفاده می‌شود. نتایج با استفاده از فیلتر کالمن بی‌بو[10] نسبت به فیلتر کالمن گسترش یافته[11] بسیار بهتر خواهد بود و تا حدودی همگرایی تخمین‌زن به ازاء محدوده معقولی از ورودی‌ها تضمین می‌گردد، اما هیچ تضمینی برای مقاومت تخمین‌زن در مورد افزایش ناگهانی نویز وجود ندارد و برای بالا بردن حاشیه اطمینان، ترکیب تخمین[12] معرفی می‌شود.

ترکیب تخمین در دو دسته متمرکز و غیر متمرکز ارائه شده‌است که دسته اول دقت بالاتر و دسته دوم مقاومت بالاتر در مقابل نویز را ارائه می‌کنند. تخمین متمرکز، استفاده از رویتگر با استفاده از بردار خروجی متشکل از همه منابع داده است. در مقابل تخمین غیرمتمرکز چندین مجموعه تخمین با تخمین-زن‌های محلی را ارائه می‌کنند که در نهایت حالات تخمین‌زده شده با استفاده از وزنهای بهینه بدست آمده، ترکیب می‌گردند.

محدودیت‌های اعمالی برای یک فرآیند حفاری زیر تعادلی نهایتا ناحیه باریکی برای مقدار فشار خروجی ایجاد می‌کند. این محدوده باریک، لزوم افزایش دقت مدل استفاده شده را دو چندان می‌کند. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده برای چاه و دادههای موجود از یک مدل دقیقتر روشی برای بالا بردن دقت مدل ساده‌تر با استفاده از روشهای تخمین پارامترهای مدل[13] ارائه می‌گردد که در نهایت این روش به دو بخش مدلسازی برخط[14] و خارج از خط[15] منجر می‌شود.

---

[9] Non-linear Observers
[10] Unscented Kalman Filter
[11] Extended Kalman Filter
[12] Estimation Fusion
[13] Model Parameter Estimation
[14] Online
[15] Offline

فهرست مطالب

فهرست شکلها I

فهرست جداول II

مقدمه ۱

فصل اول: آشنایی با عملیات حفاری زیر تعادلی و انواع مدلهای آن ۲

۱-۱ مقدمه ۳

۱-۲ تعریف حفاری زیر تعادلی ۳

۱-۳ مزایای عملیات حفاری زیر تعادلی ۴

۱-۳-۱ افزایش سرعت حفاری (ROP) ۴

۱-۳-۲ کاهش احتمال چسبیدن لوله ۴

۱-۳-۳ کم کردن خطر هرزروی گل حفاری ۵

۱-۳-۴ افزایش دقت ارزیابی مخازن ۶

۱-۳-۵ آسیب وارده کمتر به مخزن ۶

۱-۳-۶ تولید زودهنگام ۸

۱-۳-۷ منافع محیط زیستی ۸

۱-۳-۸ نیاز کمتر به انگیزش چاه ۹

۱-۴ معایب حفاری زیر تعادلی ۹

۱-۴-۱ مشکلات پایداری چاه ۹

۱-۴-۲ افزایش هزینه های حفاری ۹

۱-۴-۳ شرایط زیرتعادلی غیرپیوسته ۱۰

۱-۴-۴ افزایش وزن رشته حفاری به علت کاهش بویانسی ۱۰

۱-۴-۵ فرسایش احتمالی دیوارهٔ چاه ۱۰

۱-۵ سیالهای مورد استفاده در حفاری زیر تعادلی ۱۰

۱-۵-۱ سیالهای گازدار و تراکم پذیر (دوفازی) ۱۰

۱-۵-۲ سیالهای تک فازی ۱۱

۱-۵-۳ سیستمهای فرازآوری با گاز ۱۱

۱-۵-۴ تزریق از طریق رشته پارازیت ۱۲

۱-۶ انتخاب مخزن مناسب ۱۲

۱-۷ تاریخچه حفاری زیر تعادلی : ۱۳

۱-۸ انواع مدلهای جریان دو فازی ۱۴

۱-۸-۱ مدل‌های تجربی ۱۶

۱-۸-۲ مدلهای مکانیستیک ۱۷

۱-۸-۳ مدلهای دینامیک ۱۸

۱-۸-۳-۱ مدلهای جزئی یا درجه بالا ۱۹

۱-۸-۳-۲ معرفی مدل درجه پایین اصلاح شده ۱۹
۱-۹ شبیه سازی مدل درجه پایین اصلاح شده و مقایسه با داده های مدل جزیی ۲۳
۱-۱۰ خلاصه فصل ۲۵
فصل دوم: مانیتورینگ عملیات حفاری زیر تعادلی با استفاده از روشهای تخمین حالت و ترکیب تخمین ...۲۶
۲-۱ مقدمه ۲۷
۲-۲ دلایل مانیتورینگ سیستم: محدودیت های حفاری زیر تعادلی ۲۷
۲-۲-۱ پایداری دهانه چاه ۲۷
۲-۲-۲ شسته شدن دیواره چاه ۲۸
۲-۲-۳ توانایی انتقال کنده ها از ته چاه به سطح زمین ۲۸
۲-۲-۴ فرسایش لوله حفاری ۲۸
۲-۳ بررسی رویت پذیری یک سیستم غیر خطی ۲۹
۲-۳-۱ شرایط هندسی رویت پذیری ۳۰
۲-۳-۲ شرایط رویت پذیری تحلیلی ۳۱
۲-۴ تخمین حالات سیستم غیرخطی حفاری زیر تعادلی ۳۲
۲-۴-۱ چگونگی عملکرد فیلتر کالمن گسترش یافته ۳۳
۲-۴-۲ تخمین حالات سیستم حفاری زیرتعادلی با فیلتر کالمن گسترش یافته ۳۴
۲-۴-۳ چگونگی عملکرد فیلتر کالمن بیبو ۳۷
۲-۴-۳-۱ تبدیل بیبو ۳۷
۲-۴-۳-۲ تبدیل بیبو قابل تنظیم ۳۹
۲-۴-۳-۳ فیلتر کالمن بیبو ۴۱
۲-۴-۴ تخمین حالات سیستم حفاری زیرتعادلی با فیلتر کالمن بیبو ۴۲
۲-۵ ترکیب تخمین ۴۴
۲-۵-۱ ترکیب تخمین متمرکز ۴۴
۲-۵-۲ ترکیب تخمین غیرمتمرکز(گسترده) ۴۵
۲-۶ جایگاه ترکیب تخمین در مانیتورینگ سرعت در سیستم حفاری زیر تعادلی ۴۸
۲-۷ نتایج اعمال ترکیب تخمین ۴۹
۲-۷-۱ تخمین ترکیب متمرکز ۴۹
۲-۷-۲ ترکیب تخمین غیرمتمرکز ۵۱
۲-۷ خلاصه فصل ۵۴
فصل سوم: تصحیح مدل درجه پایین با استفاده از روشهای تخمین پارامترهای مدل ۵۵
۳-۱ مقدمه ۵۶
۳-۲ چگونگی تصحیح ۵۶
۳-۳ روشهای تخمین پارامتر مدل ۵۹
۳-۳-۱ سیستمهای خطی ۶۰
۳-۳-۱-۱ استفاده از فیدبک رله ای ۶۰

۳-۳-۱-۲ استفاده از LS و RLS ۶۱
۳-۳-۱-۳ استفاده از رویتگرهای حالت غیر خطی ۶۱
۳-۳-۲ سیستمهای غیرخطی ۶۲
۳-۴ نتایج تخمین پارامتر با استفاده از فیلتر کالمن بیبو ۷۰
۳-۵ دلایل و نمونه های تعویض معادلات فشار حجم دما با جدول جستجو ۷۲
۳-۶ نتایج استفاده از جدول جستجو ۷۳
۳-۷ خلاصه فصل ۷۴
فصل چهارم ۷۵
نتایج و پیشنهادات ۷۵
۴-۱ نتایج ۷۶
۴-۲ پیشنهادات ۷۷
مراجع ۷۸
پیوست: مقالات ۸۴

فهرست شکلها

شکل (۱-۳-۲-۱): چسبیدن لوله به دیواره چاه ۵
شکل (۱-۳-۳-۱): چگونگی هرزروی سیال حفاری در حین عملیات حفاری فوق تعادلی..... ۶
شکل (۱-۳-۵-۱): آسیب وارد شده به مخزن در اثر حفاری فوق تعادلی..... ۷
شکل (۱-۵-۱-۱): مقایسه توانایی انتقال کنده ها بین سیالها مختلف..... ۱۱
شکل (۱-۷-۱): توزیع جغرافیایی عملیات حفاری زیر تعادلی در سال ۱۹۹۷..... ۱۳
شکل (۱-۷-۲): تعداد چاههای حفر شده توسط تکنولوژی حفاری زیر تعادلی در کشور کانادا..... ۱۴
شکل (۱-۸-۱): الگوهای جریانی در لوله های قائم..... ۱۵
شکل (۱-۸-۳-۲-۱): شماتیک ارائه شده عملیات حفاری زیر تعادلی برای مدل درجه پایین..... ۱۹
شکل (۱-۹-۱): ورودی و خروجی های شبیه‌سازی انجام شده برای عملیات حفاری زیرتعادلی..... ۲۴
شکل (۲-۱-۱): محدوده مجاز فشار درون چاهی..... ۲۷
شکل (۲-۳-۲-۱): پاسخ تخمین‌زنEKFبه ازاء ورودی و شرایط اولیه معادله(۲-۳-۲-۹)..... ۳۶
شکل (۲-۳-۲-۲): پاسخ تخمین‌زن EKF به ازاء ورودی و شرایط اولیه تخمین‌زن معادله (۲-۳-۲-۱۰)..... ۳۶
شکل (۲-۳-۳-۱): محاسبه میانگین و کواریانس حالات تحت تبدیل $y=f(x)$ تحت روشهای مختلف مونت کارلو خطی‌سازی و تبدیل بی‌بو..... ۳۹
شکل (۲-۳-۴-۱): پاسخ تخمین‌زن UKF به ازاء ورودی و شرایط اولیه تخمین‌زن معادله (۲-۳-۴-۲)..... ۴۳
شکل (۲-۳-۴-۲): پاسخ تخمین‌زن UKF به ازاء ورودی و شرایط اولیه تخمین‌زن معادله (۲-۳-۴-۳)..... ۴۳
شکل (۲-۴-۱): شماتیک ترکیب تخمین متمرکز..... ۴۴
شکل (۲-۴-۲): شماتیک ترکیب تخمین غیر متمرکز..... ۴۵
شکل (۲-۵-۱) : سنسور اندازه‌گیری انتهای رشته حفاری..... ۴۹
شکل (۲-۶-۱) : تخمین سرعتها با استفاده از فشار انتها annulus..... ۵۰
شکل (۲-۶-۲) : تخمین سرعتها با استفاده از فشار انتها drillstring..... ۵۰
شکل(۲-۶-۳) : تخمین سرعتها با استفاده از ترکیب تخمین متمرکز و فشار انتها annulus و drillstring..... ۵۱
شکل (۲-۶-۴): تخمین سرعتها با استفاده از ترکیب تخمین غیر متمرکز و فشار انتها a وd..... ۵۲
شکل (۲-۶-۵): تخمین سرعتها با استفاده از ترکیب تخمین غیر متمرکز با استفاده از داده‌های با افزایش نویز ناگهانی..... ۵۳
شکل (۲-۶-۶): تخمین سرعتها با استفاده از ترکیب تخمین متمرکز با استفاده از داده‌های با افزایش نویز ناگهانی..... ۵۳
شکل (۳-۱-۱): نحوه تعیین تعداد پارامترهای اصلاح..... ۵۷
شکل (۳-۳-۱): ورودی و خروجی مدل درجه پایین به ازاء تخمین پارامتر جدید مدل..... ۶۹
شکل (۳-۳-۲): پارامتر تخمین‌زده شده توسط تخمین‌زن UKF..... ۷۰
شکل (۳-۳-۳-الف): تخمین پس از مدلسازی..... ۷۰
شکل (۳-۳-۳-ب): تخمین حالات و مدلسازی به طور همزمان..... ۷۱
شکل (۳-۳-۴): تخمین حالات همراه با تخمین پارامتر تنظیم کننده خروجی..... ۷۱
شکل (۳-۵-۱): خروجی مدل اصلاح شده درجه پایین با استفاده از جدول جستجو..... ۷۲

فهرست جداول

جدول (۱-۹-۱) : پارامترهای مدل درجه پایین عملیات حفاری زیر تعادلی برای شبیه‌سازی ۲۲
جدول (۱-۹-۲): شرایط اوایه حالات برای شبیه‌سازی ۲۳
جدول (۱-۹-۳): ورودی عملیات حفاری زیرتعادلی ۲۳
جدول (۲-۶-۱): مجموع مربعات خطا برای چهار حالت تخمین با فشار annulus و drillstring و ترکیب این دو به دو روش متمرکز و غیر متمرکز ۵۲
جدول (۲-۶-۲): مجموع مربعات خطا برای داده‌هایی با افزایش نویز ناگهانی یکی از خروجی‌ها ۵۳
جدول (۳-۵-۱): نمونه کوچکی از جدول جستجو ساخته شده برای جایگزین شدن برای تخمین‌زن ۷۲

مقدمه

با توجه به اهمیت منابع نفتی در تامین انرژی روزمره تمام کشورهای دنیا، بسیاری از تحقیقات صنایع نفت دنیا به یافتن روشهای جدید برای بهره‌برداری کامل از مخازن نفتی اختصاص دارد. در روشهای حفاری قدیمی، زمان بهره‌برداری پس از حفاری بوده و میزان آسیب وارده به مخزن در بسیاری از موارد باعث تخریب مخزن برای همیشه می‌گردید. حفاری به روشهای قدیمی برای بهره برداری کامل مخرن در فشارهای پایین مخزن، هزینه اضافی به عملیات تحمیل می‌کرده است. اما با معرفی روش حفاری زیر تعادلی، علاوه بر کاهش صدمات به مخزن، سرعت بهره‌برداری افزایش می-یابد.

در روش حفاری زیرتعادلی همزمان با ورود مته به چاه و تزریق گل حفاری، تولید نفت نیز صورت می‌گیرد. درواقع با پایین‌تر نگاه داشتن فشار انتهای چاه از فشار مخزن در حین عملیات حفاری، تولید نفت نیز خواهیم داشت. این شرایط نیز تنها با پایین آوردن چگالی سیال تزریقی در چاه امکان پذیر می‌باشد. برای پایین آوردن چگالی سیال در بیشتر موارد، از تزریق گاز و مایع به صورت همزمان استفاده می‌شود که در انتهای چاه، نفت تزریقی از مخزن نیز به سیال درون چاه اضافه می-گردد.

روش حفاری زیر تعادلی بدلیل مزایای بسیار اقتصادی و آسیب‌های کمتری که به مخزن وارد می-سازد، در این سالها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما مانند تمام سیستمهای عملی موجود، محدودیتهای خاصی برای برخی از پارامترهای این عملیات وجود دارد. به عنوان مثال سرعت سیال و فشار انتهای چاه در محدوده‌های خاصی قابل قبول می‌باشد و در غیر آن باعث صدمات قابل توجهی می‌گردد. بدلیل کنترل محدودیت‌های فرآیند مورد نظر، مدلسازی و مانیتورینگ فرآیند الزامی خواهد بود. در این تحقیق ابتدا به بررسی فرآیند و انواع مدلهای موجود بر آن خواهیم پرداخت. پس از انتخاب یک مدل مناسب دینامیکی برای مقاصد کنترلی و اصلاح آن، نتایج شبیه-سازی را با یکی از مدلهای دقیق فرآیند مقایسه خواهیم کرد.

پس از بررسی محدودیت‌های سیستم و انتخاب حالات مهم برای رویت و کنترل، مانیتورینگ سیستم با استفاده از رویتگرهای غیرخطی صورت می‌گیرد. دو رویتگر فیلتر کالمن گسترش یافته و فیلتر کالمن بی‌بو برای این سیستم طراحی و تنظیم می‌گردند. در صورت وجود چندین منبع اطلاعاتی مانند چندین سنسور برای اندازه‌گیری یک پارامتر و یا چندین پارامتر مختلف و همچنین برای بالا بردن حاشیه اطمینان در مقابل نویز موجود در عملیات، ترکیب تخمین معرفی می‌گردد. در نهایت برای بالا بردن دقت مدل انتخاب شده پارامتر جدیدی به مدل اضافه و تخمین زده خواهد شد. این پارامتر به صورت یک جدول جستجو نیز به مدل ارائه می‌گردد.

فصل اول
آشنایی با عملیات حفاری زیر تعادلی
و انواع مدلهای آن

۱-۱ مقدمه

افزایش تعداد مخازن کم فشار و نیاز روزافزون به منابع انرژی فسیلی باعث شده است که صنعت نفت به طور پیوسته در پی توسعه تکنولوژی حفاری و ابداع روشهای جدید در این فناوری باشد. در حال حاضر ترکیب روشهای قدیمی حفاری که از صد سال پیش استفاده می شده اند با تکنولوژیهای نوین منجر به ابداع روشهای بسیار پیشرفته حفاری گردیده است.

این روشها اگر به دقت و درستی، طراحی و اجرا شوند باعث به صرفه ترشدن، امن ترشدن و موفق تر بودن صنعت حفاری می شوند. یکی از این روشها حفاری زیر تعادلی[۱۶] است که به آن حفاری فرو تعادلی نیز می گویند.

۱-۲ تعریف حفاری زیر تعادلی

حفاری زیر تعادلی به نوعی از عملیات حفاری گفته می شود که در آن فشار ته چاه[۱۷] در حین عملیات حفاری کمتر از فشار مخزن است. این اتفاق بصورت عمدی[۱۸] رخ می دهد و در نتیجه سیالات مخزن می توانند در حین عملیات حفاری وارد چاه شوند [۱]. اگرچه به علت اتفاقات متعددی که در حین حفاری رخ می دهد ممکن است فشار ته چاه متغیر باشد، اما تلاش یک مهندس کنترل، بر این است که همیشه فشار ته چاه را متناسب با مکانیک سنگ مخزن، فشار مخزن، و میزان تولید، تعیین و اعمال نماید.

از آنجا که مقدار قابل توجهی از فشار ته چاه، ناشی از ستون هیدروستاتیک[۱۹] درون چاه است، لذا برای پایین آوردن فشار ته چاه معمولاً وزن گل حفاری[۲۰] را پایین می آورند. وزن گل حفاری می تواند بصورت طبیعی پایین باشد و یا اینکه بصورت مصنوعی وزن آن پایین آورده شده باشد. جهت پایین آوردن وزن سیال حفاری گاز طبیعی، نیتروژن و یا هوا به آن اضافه می کنند. اگرچه با توجه به پایین‌تر بودن قیمت نیتروژن معمولاً از نیتروژن استفاده می شود. در بخش شبیه سازی در تحقیق حاضر نیز گاز نیتروژن بعنوان فاز گازی سیال حفاری فرض شده است.

به هر صورت این کم شدن فشار ته چاه باعث می شود تا سیالات مخزن به درون چاه جریان یابند و به سطح زمین منتقل شوند و در نهایت در مخزن جداساز[۲۱] نفت از گل حفاری تفکیک می‌گردد. حفاری زیر

[16] Underbalanced Drillling
[17] Bottom Hole Pressure
[18] Intentional
[19] Hydrostatic Column
[20] Drilling Mud
[21] Seperator Tank

تعادلی باعث می شود تا تولید نفت از چند ناحیه بصورت همزمان صورت پذیرد و نواحی کم فشارتر که معمولاً از آنها صرف نظر می شود، مورد توجه قرار گیرند.
همچنین فشار پایین در چاه باعث می شود که فیلتر کیک[۲۲] بر روی دیواره چاه بوجود نیاید و ذرات معلق در سیال حفاری هم به داخل مخزن نفوذ نکنند.
این مسأله باعث افزایش ضریب تولید چاه[۲۳] می شود و مشکلات حفاری را کاهش می دهد. درباره مزایا و معایب این روش حفاری در ادامه این تحقیق بطور مفصل صحبت خواهیم کرد.

۱-۳ مزایای عملیات حفاری زیر تعادلی[۲]

۱-۳-۱ افزایش سرعت حفاری[۲۴] (ROP)

سرعت حفاری یکی از مهمترین پارامترهایی است که بصورت دائمی در حین عملیات حفاری محاسبه می شود. هر چه سرعت حفاری بیشتر باشد مجموع زمان عملیات کاهش یافته و متعاقب آن هزینه عملیات حفاری پایین می آید. اگرچه این پارامتر به تنهایی مورد توجه قرار نمی گیرد، اما یکی از مهمترین پارامترها در بهینه سازی عملیات حفاری است. این پارامتر معمولا بصورت $^{m}/_{hr}$ و یا $^{ft}/_{hr}$ بیان می شود.
در حین عملیات حفاری زیر تعادلی تنش برشی[۲۵] پایین می آید و لذا سرعت حفاری افزایش می یابد.

۱-۳-۲ کاهش احتمال چسبیدن لوله[۲۶]

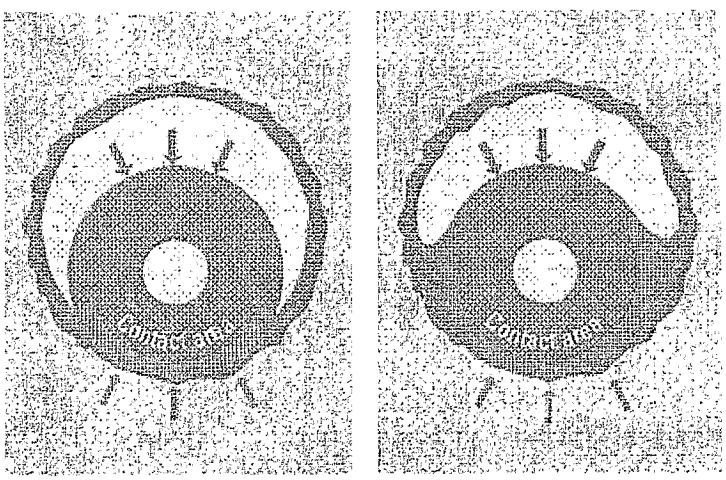
در هنگام عملیات حفاری امکان دارد که رشته حفاری به یک طرف دیواره چاه بچسبد. این اتفاق هنگامی رخ می دهد که فشار در یک طرف دهلیز[۲۷] بیشتر از فشار در طرف دیگر آن باشد. عامل این چسبندگی، کیک گل[۲۸] است که تحت تأثیر گل حفاری بر روی دیواره چاه می نشیند. از آنجا که در عملیات حفاری زیر تعادلی کیک گل بر روی دیواره چاه وجود ندارد خطر چسبیدن لوله به حداقل می‌رسد. هنگامی که این اتفاق می افتد عملیات حفاری متوقف می‌شود و نیروی زیادی برای آزاد کردن لوله لازم است. نیروی لازم برای آزاد نمودن لوله در حین چسبیدن لوله بصورت زیر تعیین می شود.

---

[22] Filter Cake
[23] Well Productivity Index
[24] Rate of Penetration
[25] Shear Stress
[26] Differential Stickling
[27] Annulus
[28] Mud Cake

$$F_S = A_C * \Delta P \alpha_S * ۱۴۴ sq.in/sq.ft \qquad (۱-۲-۳-۱)$$

که در آن F_s نیروی لازم برای آزاد نمودن لوله، A_c سطح تماس، ΔP اختلاف فشار در طول کیک گل و α_s ضریب اصطکاک بین رشته حفاری وکیک گل است. واضح است که در صورت عدم وجودکیک گل به میزان قابل توجه، لوله به دیواره نمی چسبد. در شکل (۱-۳-۲-۱) چگونگی آغاز و ادامه چسبیدن لوله به دیواره نشان داده شده است.



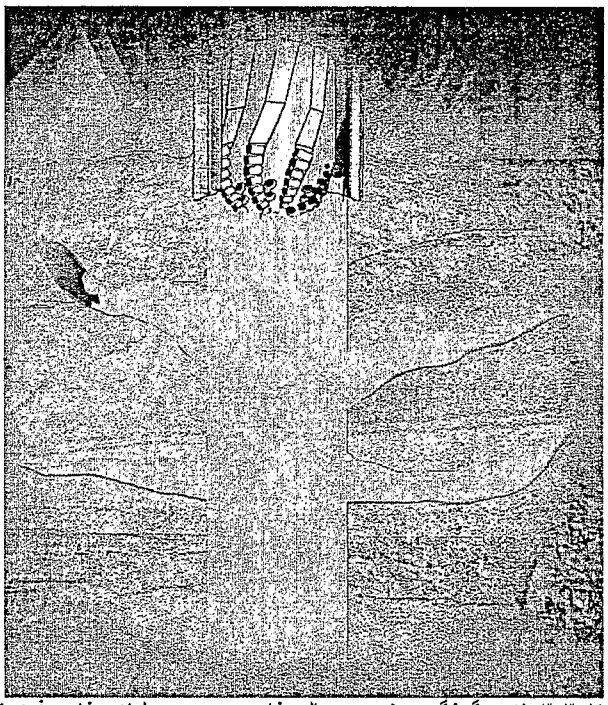
شکل (۱-۳-۲-۱): چسبیدن لوله به دیواره چاه

۱-۳-۳ کم کردن خطر هرزروی گل حفاری[۲۹]

در حین عملیات حفاری معمولی از آنجا که فشار گل بیشتر از فشار مخزن است امکان دارد که سیال وارد حفره‌ها و شکافها[۳۰] شود و هرزروی جزئی یا کلی اتفاق بیافتد. گل حفاری قسمت مهمی از هزینه کل عملیات حفاری را شامل می شود و هرز رفتن آن باعث می شود که هزینه زیادی صرف جایگزینی آن شود. به علاوه ، مشکلات متعدد نظیر خطر انفجار[۳۱] نیز ممکن است در صورت هرزروی بیش از حد گل حفاری بوجود بیاید.

در حین عملیات حفاری زیر تعادلی از آنجا که فشار در چاه کمتر از فشار در مخزن است سیال وارد سازند[۳۲] نمی شود و لذا خطر هرز روی گل به حداقل می رسد. در شکل (۱-۳-۳-۱) شماتیک هرزروی گل حفاری به درون شکافها نمایش داده شده است.

[29] Circulation Loss
[30] Fractures
[31] Blowout
[32] Formation



شکل (۱-۳-۳-۱): چگونگی هرزروی سیال حفاری در حین عملیات حفاری فوق تعادلی

۱-۳-۴ افزایش دقت ارزیابی[۳۳] مخازن

از آنجا که در حین عملیات حفاری زیر تعادلی کیک گل[۳۴] وجود ندارد میزان تولید اندازه گیری شده دقیق است. بعلاوه ابزار نمودارگیری در حین حفاری[۳۵] (LWD) به همین دلیل اطلاعات درست‌تری را ارسال می نمایند.

۱-۳-۵ آسیب[۳۶] وارده کمتر به مخزن

در حین حفاری به روشهای فراتعادلی (عادی) اتفاقات زیر باعث آسیب به مخزن می شوند.

۱. نفوذ رسوبات و ذرات گل حفاری به داخل فضای متخلخل مخزن
۲. اثر فاز مایع گل حفاری بر ذرات رس[۳۷] داخل سازند
۳. نفوذ جامدات[۳۸]

[33] Reservoir Evaluation
[34] Mud Cake
[35] Logging While Drilling
[36] Reservoir Damage
[37] Clay
[38] Solid Invasion