

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت - حفاری

طراحی کنترل کننده‌ی فازی مبتنی بر مدل TS برای تکنیک CBHP از حفاری MPD

نگارنده:

حسن کرجی زاده

استاد راهنما:

دکتر سجاد گلستان

دکتر محسن قلعه نوبی

استاد مشاور:

دکتر امیر حسین نیکوفرد

اسفند ۱۴۰۰

به آمان که خاک را به نظر کیمیا کنند

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن

توانند. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصر

و دست ناتوان، چیزی بخاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را

تأمین می کند و سلامت امانت بایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه از پدر و مادر عزیزم؛ این دو معلم

بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و

یاری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از اساتید با کالات و شایسته؛ جناب آقایان دکتر جادنگهبان، دکتر محسن قلعه نویی

و دکتر امیر حسین نیکوفرد که در کمال سه صدر، از هیچ کلمی در این عرصه بر من دریغ نمودند و بدون مساعدت ایشان، این پروژه

به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

# تعمیر نامه

اینجانب حسن گرجی زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت- حفاری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی کنترل کننده فازی مبتنی بر مدل TS برای تکنیک CBHP از حفاری MPD تحت راهنمایی دکتر سجاد نگهبان و دکتر محسن قلعه‌نوئی متعهد می‌شوم؛

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . 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 نمی‌باشد.

## چکیده

این تحقیق به فشار ته‌چاهی ثابت به عنوان یکی از تکنیک‌های رایج در حفاری با فشار مدیریت شده، یک فرآیند غیرخطی پیچیده که از استراتژی‌های کنترلی مختلفی برای تنظیم فشار ته‌چاه استفاده می‌کند، می‌پردازد. برای داشتن عملیاتی با سطح دقت بالا، کنترل‌کننده‌های غیرخطی معمولاً مدل دقیقی از سیستم را در نظر می‌گیرند که ناشی از بار محاسباتی بالایشان، منجر به ساختار پیچیده‌ای می‌شوند که اجرای عملی آن‌ها را با چالش روبرو می‌کند. علاوه بر برخورداری از سطح پایینی از بار محاسباتی، روش‌های کنترلی به منظور پیاده‌سازی در عمل باید محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی را نیز در نظر بگیرند.

این مطالعه با استفاده از رویکرد مدل‌سازی TS فازی و همچنین به کارگیری ایده‌ی جبران توزیع‌شده موازی، یک کنترل‌کننده‌ی فازی ساده بر اساس مدل دقیق سیستم طراحی می‌کند و همچنین معیارهای پایداری را در قالب نامساوی‌های ماتریسی خطی پیشنهاد می‌کند. این معیارها نه تنها پایداری سیستم را تضمین می‌کنند، بلکه محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی موجود در فرآیند حفاری را نیز برآورده می‌سازند. سپس، یک مسئله بهینه‌سازی برای به‌دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده و یافتن بزرگ‌ترین فضای که در آن کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی محدودیت‌های عملیاتی و پایداری را تضمین می‌کند، معرفی شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر شرایط اولیه فرآیند حفاری از بین محدوده‌ی گرادیان‌های فشار شکست و فشار سازندی آغاز شود، علاوه بر این که پنجره‌ی فشار نقض نشده و محرک اشباع نمی‌شود، فشار ته‌چاهی نیز به مقدار مطلوب خود همگرا می‌گردد. حین فرآیند حفاری، به دلیل عدم اشباع کنترل‌کننده و قابلیت‌های ذاتی منطق فازی، در روش پیشنهاد شده در حالی که خطای حالت پایدار کمتری وجود دارد، هم‌گرایی زودتر از روش‌های سنتی رخ می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** اشباع محرک، فشار ته‌چاهی ثابت، مدل‌سازی TS فازی، جبران توزیع‌شده موازی،

محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1. Fuzzy controller design for constant bottomhole pressure drilling under operational/physical constraints

# فهرست مطالب

ج	فهرست جداول
د	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه پژوهش
۲	۱-۱- مقدمه و بیان مسئله .....
۴	۲-۱- پیشینه پژوهش .....
۶	۳-۱- اهمیت انجام پژوهش .....
۷	۴-۱- اهداف و روش انجام پژوهش .....
۹	۵-۱- ساختار پایان نامه .....
۱۱	فصل ۲: بررسی مبانی نظری پژوهش
۱۲	۱-۲- مقدمه .....
۱۲	۲-۲- حفاری با فشار مدیریت شده .....
۱۵	۳-۲- انواع حفاری با فشار مدیریت شده .....
۱۶	۱-۳-۲- فشار ته‌چاهی ثابت (CBHP) .....
۱۹	۲-۳-۲- گرادیان دوگانه (DGD) .....
۲۰	۳-۳-۲- کلاهک گلی تحت فشار (PMCD) .....
۲۰	۴-۲- کنترل در عملیات حفاری با فشار مدیریت شده .....
۲۲	۵-۲- کنترل فازی .....
۲۳	۶-۲- حادثه ماکندو .....

۲۴..... جمع‌بندی ۷-۲

۲۵ فصل ۳: مراحل انجام پژوهش، اثبات پایداری و نتایج شبیه‌سازی

۲۶..... مقدمه ۱-۳

۲۷..... مدل هایدرولیکی سیستم و نقاط تعادل ۲-۳

۳۱..... سیستم خطا ۳-۳

۳۳..... مدل‌سازی TS فازي سیستم خطا ۴-۳

۳۶..... طراحی کنترل‌کننده فازي ۵-۳

۳۹..... قضیه پایداری (۱) ۶-۳

۴۱..... اثبات قضیه پایداری (۱) ۱-۶-۳

۴۲..... تبصره ۲-۶-۳

۴۲..... اشباع محرک ۷-۳

۴۳..... قضیه پایداری (۲) ۸-۳

۴۴..... اثبات قضیه پایداری (۲) ۱-۸-۳

۴۶..... نتایج شبیه‌سازی ۹-۳

۵۵..... جمع‌بندی ۱۰-۳

۵۷ فصل ۴: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵۸..... مقدمه ۱-۴

۵۸..... نتیجه‌گیری ۲-۴

۵۹..... پیشنهادات ۳-۴

۶۰ مراجع

# فهرست جداول

- جدول ۱-۳: مفاهیم فیزیکی پارامترهای مدل داینامیکی چاه ..... ۲۹
- جدول ۲-۳: مقادیر استفاده شده برای پارامترهای موجود در مطالعات شبیه‌سازی ..... ۴۶
- جدول ۳-۳: مقادیر مرجع برای حالات سیستم حفاری ..... ۴۶
- جدول ۴-۳: ضرایب کنترل‌کننده‌های PI و PID در مطالعات شبیه‌سازی ..... ۴۸

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: بررسی فصول پایان نامه از نظر کمی ..... ۱۰
- شکل ۱-۲: محدوده‌های فشاری در یک سازند فرضی ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: نواحی عملیاتی تکنیک‌های مختلف حفاری ..... ۱۴
- شکل ۳-۲: دستگاه کنترل دوار ..... ۱۸
- شکل ۴-۲: محل قرارگیری RCD بر روی یک دکل دریایی در خلیج مکزیک ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: سناریوی گسترش لوله در شرایط ایده‌آل ..... ۲۱
- شکل ۶-۲: سناریوی خرابی پمپ در شرایط ایده‌آل ..... ۲۱
- شکل ۷-۲: روند کار کلی سیستم‌های فازی ..... ۲۳
- شکل ۸-۲: نگاهت غیرخطی ورودی/ خروجی سیستم کنترل فازی ..... ۲۳
- شکل ۱-۳: شماتیک سیستم حفاری CBHP با دو حجم کنترلی ..... ۲۸
- شکل ۲-۳: شیر جداری ته چاهی ..... ۳۰
- شکل ۳-۳: طراحی کنترل فازی مبتنی بر مدل ..... ۳۳
- شکل ۴-۳: ناحیه اعتبار، بزرگترین بیضی گون درون  $\Omega$  و ناحیه جذب ..... ۳۹
- شکل ۵-۳: ناحیه اعتبار  $\Omega$  برای سیستم حفاری معرفی شده و بزرگترین بیضی گون  $B_{\Omega}$  مربوطه ..... ۴۷
- شکل ۶-۳: سیگنال فشار ته‌چاهی مبتنی بر کنترل فازی، PI و PID در حین عملیات حفاری ..... ۴۹
- شکل ۷-۳: سیگنال کنترل بازشدگی چوک تولید شده توسط رویکرد فازی، PI و PID ..... ۴۹
- شکل ۸-۳: مکانیسم پدیده بادکردن چاه ..... ۵۰
- شکل ۹-۳: هم‌گرایی حالت خطا  $e_1$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده ..... ۵۳
- شکل ۱۰-۳: هم‌گرایی حالت خطا  $e_2$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده ..... ۵۳
- شکل ۱۱-۳: هم‌گرایی حالت خطا  $e_3$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده ..... ۵۴

شکل ۳-۱۲: هم‌گرایی مسیر حالت به نقطه تعادل حین باقی ماندن در بیضی گون  $(P, 1)$  ..... ۵۴



# فصل ۱

## مقدمه پژوهش

## ۱-۱ مقدمه و بیان مسئله

در طول فرآیند حفاری مخازن نفت و گاز، نگهداری فشار چاه در یک محدوده‌ی خاص یک ضرورت مطلق است؛ به ویژه در حفاری چاه‌های عمیق دریایی، مخازن تخلیه‌شده<sup>۱</sup> و سازندهای ضعیف که گرادیان‌های فشار سازندی و فشار شکست<sup>۲</sup> آن‌ها بسیار به هم نزدیک می‌باشد و یا به عبارت دیگر، سازند دارای پنجره‌ی فشار باریک<sup>۳</sup> است. حین عملیات حفاری، با توجه به سیستم گردش گل حفاری که پمپ اصلی آن را در کل فرآیند به وجود می‌آورد، هم‌زمان کننده‌های حفاری به سطح آورده شده و ته چاه تحت تاثیر فشار ناشی از این گردش قرار می‌گیرد. عدم توانایی در حفظ و نگهداری فشار، درون محدوده‌ی بین گرادیان‌های فشارهای سازندی و شکست می‌تواند عواقبی چون سیلان سیال سازندی<sup>۴</sup>، مچالگی چاه<sup>۵</sup>، از دست دادن گل حفاری<sup>۶</sup>، و در بدترین حالت فوران<sup>۷</sup> را به همراه داشته باشد. به منظور جلوگیری از رخ دادن این حوادث و خسارات انسانی، زیست محیطی و مالی متعاقب آن باید از روش‌های مناسب، پایدار و مقاومی از کنترل فشار استفاده نمود.

به طور کلی استراتژی‌های کنترلی مورد استفاده در عملیات حفاری را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی کرد. دسته اول نمونه‌های سنتی از کنترل فشار چاه هستند که با تنظیم پارامترهای موثر بر مقدار افت فشار اصطکاکی چاه، مانند چگالی گل حفاری و نرخ جریان پمپ، فشار چاه را دست‌خوش تغییرات مورد نظر می‌نمایند. از عوامل تاثیرگذار بر پارامتر فشار ته‌چاهی<sup>۸</sup> می‌توان به وزن گل<sup>۹</sup>، عمق عمودی واقعی<sup>۱۰</sup>، افت فشار اصطکاکی و فشار برگشتی از پمپ فشار برگشتی<sup>۱۱</sup> اشاره کرد. این استراتژی برای کنترل فشار چاه نه تنها سرعت بسیار پایینی به ویژه در چاه‌های عمیق دارد، بلکه به دلیل مداخله انسان در این عملیات فرآیند در معرض خطاهای احتمالی قرار گرفته و از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد (Lordejani et al., 2020).

<sup>1</sup> Depleted reservoirs

<sup>2</sup> Pore and fracture pressure gradients

<sup>3</sup> Narrow Pressure Window

<sup>4</sup> Kick

<sup>5</sup> Wellbore Collapse

<sup>6</sup> Mud Loss

<sup>7</sup> Blowout

<sup>8</sup> Bottom-hole Pressure (BHP)

<sup>9</sup> Mud Weight (MW)

<sup>10</sup> True Vertical Depth (TVD)

<sup>11</sup> Back Pressure Pump

نوع دیگری از سیستم‌های کنترل مورد استفاده در حفاری، به کارگیری رویکرد حفاری با فشار مدیریت شده<sup>۱</sup> است که ایده‌ی اولیه آن در دانشگاه لوئیزیانا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۷ ایجاد شد (Rehm et al., 2008). این تکنیک به روش‌های کنترلی متفاوتی تجهیز شده است و نسبت به روش‌های سنتی، جزء مهم و برتری از سیستم‌های حفاری امروزی به شمار می‌رود (Stamnes et al., 2008).

مطابق با (Pui et al., 2017) و تعریف انجمن بین المللی پیمان‌کاران حفاری<sup>۳</sup>، MPD یک رویکرد کنترلی سریع و تطبیقی است که پروفایل فشار دقیقی را در طول و ته‌چاه ارائه داده و از نظر یک‌پارچگی چاه<sup>۴</sup> به عنوان یک راه‌حل ایمن و پیشرفته در نظر گرفته می‌شود. یکی از اجزای اساسی سیستم حفاری با فشار مدیریت شده دستگاه کنترل دوار<sup>۵</sup> است که قسمت فوقانی آنالوس را مهر و موم کرده و جریان برگشتی از آن را به سمت چوک هدایت می‌کند. با جابجایی مقدار بازشدگی شیر چوک، فشار برگشتی مورد نظر اعمال گردیده و متعاقباً BHP دست‌خوش تغییرات می‌شود. علاوه بر این، در سیستم‌های MPD به منظور تامین جریان عبوری از چوک در صورت خاموشی پمپ برای انجام سناریوهایی چون اتصالات لوله و در صورت خرابی احتمالی پمپ اصلی، یک پمپ فشار برگشتی نیز در سر چاه تعبیه می‌شود تا عملیات کنترل با چوک ناکارآمد نگردد.

رویکرد MPD متشکل از تکنیک‌هایی چون فشار ته‌چاهی ثابت<sup>۶</sup>، گرادیان دوگانه<sup>۷</sup>، کلاhek گلی تحت فشار<sup>۸</sup> و غیره می‌باشد که با توجه به شرایط عملیاتی مختلف انتخاب می‌گردند (Breyholtz et al., 2010). بنابراین، موقعیت‌های حساس در حفاری سازندهایی با پنجره فشار باریک، دلیلی کافی و منطقی است تا پیمان‌کاران و شرکت‌های مختلف حفاری، از تکنیک CBHP به منظور ثابت نگه داشتن BHP در طول عملیات حفاری استفاده کنند (Ask, 2020).

---

<sup>1</sup> Managed Pressure Drilling (MPD)

<sup>2</sup> Louisiana

<sup>3</sup> International Association of Drilling Contractors (IADC)

<sup>4</sup> Wellbore Integrity

<sup>5</sup> Rotating Control Device (RCD)

<sup>6</sup> Constant Bottom-hole Pressure (CBHP)

<sup>7</sup> Dual Gradient Drilling (DGD)

<sup>8</sup> Pressurized Mud Cap Drilling (PMCD)

## ۱-۲- پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه‌ی روش‌های کنترلی مورد استفاده در MPD، به ویژه در تکنیک CBHP انجام شده است. از جمله‌ی این روش‌ها، کنترل تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر<sup>۱</sup>، کنترل پیش‌بین مدل<sup>۲</sup>، کنترل غیرخطی پیش‌بین مدل<sup>۳</sup>، کنترل تطبیقی<sup>۴</sup> و کنترل خطی-درجه دوم-گوسی<sup>۵</sup> می‌باشند. غیرخطی بودن در سیستم‌های دینامیک به دلیل عدم تبعیت از اصول همگنی<sup>۶</sup> و برهم‌نهی<sup>۷</sup> آشکار می‌شود. بر اساس اصل همگنی، خروجی یک سیستم خطی همواره با ورودی آن نسبت مستقیم دارد. علاوه بر این، زمانی که خروجی یک سیستم خطی برابر با مجموع پاسخ‌ها برای هر کدام از ورودی‌ها باشد، اصل برهم‌نهی برقرار می‌گردد. با توجه به غیرخطی بودن ذاتی فرآیند حفاری (Aires et al., 2020; Park, 2018) و همچنین وجود نیاز به یک روش کنترلی دقیق که بار محاسباتی پایینی داشته باشد، هر یک از این روش‌های کنترلی ذکر شده به نحوی توسط گروهی از محققین یا شرکت‌های حفاری مورد توجه قرار می‌گیرند.

در (Nygaard and Nævdal, 2006) و (Nygaard et al., 2007b, 2004) نویسندگان به جهت دستیابی هم‌زمان به بازشدگی و جابه‌جایی مطلوب چوک و تنظیمات بهینه‌ی نرخ جریان پمپ، از NMPC استفاده کرده‌اند. بازرترین ویژگی روش‌های کنترلی خطی و غیرخطی پیش‌بین مدل، توانایی بهینه‌سازی شیار زمانی<sup>۸</sup> فعلی و در نظر گیری شیارهای زمانی آینده به‌طور هم‌زمان می‌باشد. بنابراین در این استراتژی کنترلی بهینه‌سازی یک افق زمانی محدود، فاکتوری با ضریب اهمیت بالا شناخته می‌شود. به علاوه، این روش‌های کنترلی با پیش‌بینی رویدادهای آینده می‌توانند اقدامات کنترلی مناسبی را اتخاذ نمایند.

فرا روی وجود این ویژگی‌های مثبت و کارآمد، این روش‌های کنترلی دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشند که این امر می‌تواند کارایی سیستم را تحت الشعاع قرار دهد.

<sup>1</sup> Proportional-Integral-Derivative (PID)

<sup>2</sup> Model Predictive Control (MPC)

<sup>3</sup> Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

<sup>4</sup> Adaptive Control

<sup>5</sup> Linear-Quadratic-Gaussian (LQG)

<sup>6</sup> Homogeneity Principle

<sup>7</sup> Superposition Principle

<sup>8</sup> Time Slot

از مهم‌ترین نقاط ضعف سیستم‌های کنترلی خطی و غیرخطی پیش‌بین مدل می‌توان به ضرورت در وجود یک مدل دینامیک دقیق و یک الگوریتم بهینه‌سازی اشاره کرد که این موضوع، بار محاسباتی بالایی را اعمال کرده و حل آن در منابع مختلفی از عدم قطعیت را چالش برانگیز می‌نماید. از این رو، در مطالعات دیگری چون (Eaton et al., 2015) نویسندگان و محققان راه‌کارهایی برای کاهش بار محاسباتی پیشنهاد کرده‌اند. گفتنی است که روش‌های ساده‌تر دیگری نیز مانند کنترل PID وجود دارد که دارای بار محاسباتی پایینی می‌باشند؛ اما آن‌ها معمولاً بر اساس مدل خطی شده سیستم حول نقطه تعادل<sup>۱</sup> طراحی می‌گردند و به دلیل احتمال جابه‌جایی نقطه‌ی کار ناشی از هرگونه اختلال یا عدم قطعیت، تضمینی برای عملکرد مناسب کنترل‌کننده را ارائه نمی‌دهند.

برای یک سیستم دینامیکی که با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی<sup>۲</sup> توصیف می‌شوند، نقطه تعادل یک راه‌حل (حالت<sup>۳</sup>) بوده که در طول زمان تغییر نمی‌کند. از این رو، کنترل‌کننده باید یک سیگنال کنترل مناسب برای هدایت وضعیت فعلی سیستم به نقطه تعادل تولید کند. به طور کلی، برای دیگر حالات کاری، هیچ تضمینی برای مناسب عمل کردن کنترل‌کننده طراحی شده در اطراف نقطه تعادل یک سیستم غیرخطی وجود ندارد، به ویژه که اگر وضعیت فعلی سیستم به دلیل اختلال یا عدم قطعیت از نقطه تعادل فاصله داشته باشد. بنابراین، اعتبار سیستم‌های کنترل PID صرفاً در حالت تعادلی است که کنترل‌کننده در آن طراحی شده و سیستم‌های کنترلی ساده از این قبیل، بر خلاف MPCها، مسائل فیزیکی/ عملیاتی مانند محدودیت در سیگنال کنترل و نرخ جریان پمپ را در نظر نمی‌گیرند.

برخی دیگر از مطالعات در حوزه این فرآیندها، به منظور به حداکثر رساندن قابلیت‌ها و به حداقل رساندن معایب برجسته به طور هم‌زمان، پیشنهادهایی مبنی بر به کارگیری ترکیبی از روش‌های مختلف کنترلی را در تکنیک MPD ارائه کرده‌اند. به عنوان نمونه، به جهت جلوگیری و جبران حرکات عمودی رشته‌ی حفاری در چاه و اثرات عواقب احتمالی آن، نویسندگان در (Landet et al., 2013) از تکنیک تنظیم خروجی<sup>۴</sup> به همراه

---

<sup>1</sup> Equilibrium point

<sup>2</sup> Ordinary differential equations

<sup>3</sup> State

<sup>4</sup> Output Regulation

روش کنترلی مدل داخلی<sup>۱</sup> استفاده کرده‌اند و در (Mahdianfar and Pavlov, 2017)، با استفاده از المان وارونگی غیرخطی<sup>۲</sup> یک کنترل کننده بازخورد خروجی<sup>۳</sup> و یک جبران کننده‌ی تطبیقی<sup>۴</sup> طراحی شده است. همچنین، در (Nandan et al., 2017) ایده یک کنترل کننده‌ی مقاوم زمان بندی بهره<sup>۵</sup> در تکنیک CBHP مورد بررسی قرار گرفته که در آن از چندین کنترل کننده‌ی خطی به منظور تثبیت فشار ته‌چاهی استفاده شده است. با هدف تنظیم فشار برگشتی از چوک، (Iversen et al., 2006) ترکیب هم‌افزایی<sup>۶</sup> از کنترل کننده‌های PID و NMPC را پیشنهاد کردند که همچنان این رویکرد ترکیبی دارای بار محاسباتی بالایی است. در این راستا، برخی از مطالعات انجام شده در این زمینه مانند (Nygaard et al., 2007a) و (Lordejani et al., 2021) از مدل‌های دینامیک مرتبه پایین<sup>۷</sup> و یا از استراتژی‌های کاهنده مرتبه مدل<sup>۸</sup> استفاده کرده‌اند. بهره‌گیری از این استراتژی به طور نامطلوب و با شدت زیادی، از دقت سیستم می‌کاهد و در نتیجه این سیستم‌ها در صورت مواجهه با عدم قطعیت عملکرد مطلوبی نخواهند داشت. برای فائق آمدن بر این مشکل نیز مطالعاتی چون (Landet et al., 2013) و (Nikoofard et al., 2014) انجام شدند که از به خطر انداختن دقت سیستم با به کارگیری مدل‌های مرتبه بالا و استفاده از چندین حجم کنترلی جلوگیری می‌کنند؛ اما همچنان فاکتور پیچیدگی عضو جدانشدنی از این سیستم‌ها می‌باشد.

### ۱-۳- اهمیت انجام پژوهش

با نظر به این که حساسیت‌های بسیار زیادی نسبت به نوسان فشار در سراسر چاه وجود دارد، اهمیت ثابت نگه داشتن فشار در طول و ته چاه زمانی بیشتر آشکار می‌گردد که سازند دارای پنجره فشار باریک باشد. ناتوانی در مدیریت و حفظ فشار در طول و ته چاه، و در نتیجه انحراف از محدوده‌ای که گرادیان‌های فشار برای عملیات

---

<sup>1</sup> Internal Model Control

<sup>2</sup> Nonlinear Inversion

<sup>3</sup> Output Feedback Controller

<sup>4</sup> Adaptive Compensator

<sup>5</sup> Gain Scheduling Robust Controller

<sup>6</sup> Synergistic Combination

<sup>7</sup> Low-Order Dynamic Model

<sup>8</sup> Model Order Reduction (MOR)

حفاری تعریف می‌کند، می‌تواند عواقب زیان‌باری که پیش‌تر ذکر شد را به همراه داشته باشد. به جهت پوشش ضعف سیستم‌های کنترلی موجود در تکنیک حفاری CBHP، و به دلیل آگاهی از نیاز روز صنعت حفاری دنیا، این مطالعه در نظر دارد تا سیستم کنترلی مقاومی معرفی کند که به طور هم‌زمان خطاهای احتمالی را به صفر میل داده، در کوتاه‌ترین زمان ممکن فرآیند را به هدف مطلوب سوق دهد و همچنین حالت پایدار و مطمئنی را برای فرآیند به وجود آورد.

## ۱-۴- اهداف و روش انجام پژوهش

با هدف تأمین کنترل‌پذیری و افزایش یا کاهش فشار ته‌چاهی، تا کنون تحقیقات متعددی در زمینه‌ی خودکارسازی بازشدگی چوک انجام شده است. با مطالعه و آگاهی از نقاط قوت و ضعف استراتژی‌های کنترلی پیشنهادی در این تحقیقات و همچنین در نظرگیری ضرورت انجام تحقیق ذکر شده، این پژوهش بنا دارد تا به جای مدل‌های ساده شده، با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی/ عملیاتی، از یک مدل دقیق هایدرولیکی استفاده کرده و یک کنترل‌کننده ساده با بار محاسباتی کم و سطح پایداری بالا طراحی کند. این موارد سیستم را به استفاده از رویکرد مدل‌سازی TS فازی هدایت می‌کند؛ این روش می‌تواند دقیقاً یک سیستم پیچیده را به عنوان مجموعه‌ای از قوانین نشان داده که بخش‌های تالی<sup>۱</sup> آن مدل‌های خطی محلی می‌باشند (Ghalehnoie et al., 2020; Tanaka and Wang, 2001).

ساختار کنترل فازی ارائه شده برای ایجاد این کنترل‌کننده ساده با حداقل بار محاسباتی، بر اساس ایده جبران توزیع موازی<sup>۲</sup> است؛ به طوری که هر قانون کنترل از قاعده متناظر مدل TS فازی ساخته می‌شود. از نظر مفهومی، روش طراحی ساده و شهودی می‌باشد.

از آن‌جا که متود اصلی کنترل‌کننده مبتنی بر PDC، ایجاد هر قاعده کنترلی به منظور جبران قاعده متناظر مدل فازی است، کنترل‌کننده فازی طراحی شده مجموعه‌های فازی مشابهی را با مدل فازی در قسمت‌های

<sup>1</sup> Consequent parts

<sup>2</sup> Parallel Distributed Compensation (PDC)

مقدم<sup>۱</sup> به اشتراک می‌گذارد. در حالی که، یک کنترل‌کننده بازخورد حالت خطی<sup>۲</sup> نیز در بخش‌های تالی هر قاعده کنترلی وجود دارد. هدف از طراحی کنترل‌کننده فازی شناسایی ضرایب<sup>۳</sup> بازخورد حالت محلی می‌باشد. با وجود این واقعیت که کنترل‌کننده فازی با یک ساختار طراحی محلی ساخته شده است، ضرایب بازخورد باید با استفاده از معیارهای طراحی جهانی<sup>۴</sup> محاسبه گردند. معیارهای طراحی جهانی برای ارائه پایداری جهانی و عملکرد کنترل، مورد نیاز می‌باشند (Tanaka and Wang, 2001).

در این مرحله، ضرایب این کنترل‌کننده‌های محلی با حل یک مسئله بهینه‌سازی با محدودیت‌هایی در قالب نابرابری‌های ماتریس خطی<sup>۵</sup> به گونه‌ای به دست می‌آیند که نه تنها پایداری سیستم تضمین می‌شود، بلکه محدودیت‌های فیزیکی فرآیند مانند اشباع محرک<sup>۶</sup> (محدودیت در بازشدگی چوک) و جلوگیری از نقض پنجره فشار نیز برآورده می‌گردد. باید توجه داشت که ناحیه اعتبار<sup>۷</sup> به فضایی گفته می‌شود که در آن متغیرهای فرآیند باید محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی فرآیند را متحقق سازند. در واقع محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی معرفی شده بر اساس این ناحیه شکل می‌گیرد.

در بهینه‌سازی محدب<sup>۸</sup> که مسئله‌ای با قیدهایی از جنس توابع محدب می‌باشد، یک نابرابری ماتریس خطی در متغیر  $x = [x_1 x_2 \dots x_n] \in \mathbb{R}^n$ ، عبارتی به شکل  $F(x) = F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_n F_n \geq 0$  است که در آن  $F_0, \dots, F_n \in \mathbb{R}^{m \times m}$  ماتریس‌های متقارن<sup>۹</sup> می‌باشند. این مسئله یک قید محدب بر روی متغیر  $x$  فراهم می‌کند. همچنین، روش‌های عددی موثری برای ایجاد امکان‌سنجی مجموعه‌ای از قیود محدب و حل یک مسئله بهینه‌سازی محدب با محدودیت‌های LMI، وجود دارد. در نتیجه، LMI یک ابزار موثر در طراحی کنترل می‌باشد؛ زیرا معیارهای پایداری به عنوان قیود محدب مجدداً تفسیر می‌شوند و ضرایب کنترل را می‌توان مستقیماً با استفاده از روش‌های محاسباتی محدب، محاسبه نمود.

<sup>1</sup> Antecedent parts

<sup>2</sup> Linear state feedback controller

<sup>3</sup> Controller gains

<sup>4</sup> Global design criteria

<sup>5</sup> Linear Matrix Inequality (LMI)

<sup>6</sup> Actuator saturation

<sup>7</sup> Region of validity

<sup>8</sup> Convex optimization

<sup>9</sup> Symmetric matrices

جستجو و تحقیقات کامل در زمینه‌ی روش‌های کنترل پیشنهاد و پیاده‌سازی شده در صنعت حفاری نشان می‌دهد که رویکرد در نظر گیری کنترل‌کننده فازی مبتنی بر ایده PDC به همراه قیود محدب که محدودیت‌های فیزیکی/ عملیاتی را برآورده می‌کنند، تاکنون در تکنیک CBHP مورد مطالعه قرار نگرفته است.

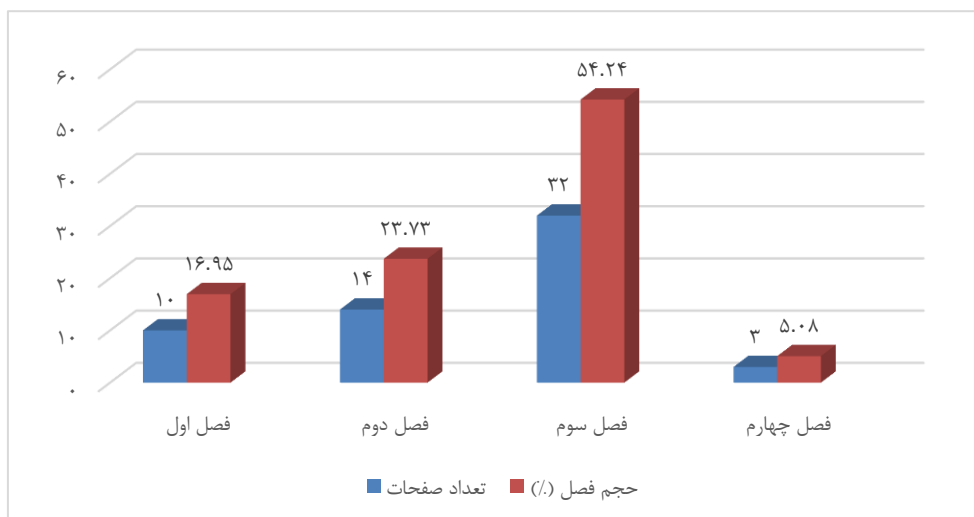
## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه متشکل از چهار فصل می‌باشد که در فصل اول با عنوان «مقدمه پژوهش»، چالش مورد نظر این مطالعه به نحوی شفاف و مشخص بیان شده است و در ادامه آن خلاصه‌ای از تلاش‌ها و تحقیقات انجام شده در زمان‌های مختلف به منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود با عنوان پیشنهادی تحقیق ذکر گردیده است. همچنین در فصل اول به طور کلی اهمیت، اهداف و روش انجام پژوهش نیز بیان شده است.

تئوری کنترل فازی، اصول مهندسی حفاری و چارچوب تکنیک MPD بخش گسترده‌ای از فصل دوم با عنوان «بررسی مبانی نظری پژوهش» را به خود اختصاص داده و استراتژی‌های کنترلی مرسوم، متعارف و جدید قابل پیاده‌سازی در چالش مدیریت فشار چاه، در بخش‌های باقی‌مانده فصل دوم ارائه شده است.

فصل سوم با عنوان «مراحل انجام پژوهش، اثبات پایداری و نتایج شبیه‌سازی سیستم» به طور مبسوط به تمامی روش‌ها و مراحل به کار گرفته شده برای طراحی کنترل‌کننده مورد نظر این پژوهش اشاره می‌کند. در این فصل همچنین بخش اثبات پایداری، وظیفه اثبات قضایایی که در پایداری و پایداری سیستم کنترلی پیشنهادی نقشی کلیدی داشته اند را بر عهده داشته و به طور مفصل به آن می‌پردازد. بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم، در ابتدا برآیندهای به دست آمده از پژوهش را تحلیل و بررسی کرده و سپس آن را با یک روش کنترلی متداول در صنعت مقایسه می‌نماید.

در فصل آخر نیز به نتیجه‌گیری و برداشت نهایی از تمامی شبیه‌سازی‌ها و روش پیشنهادی اشاره شده و پیشنهادات مرتبط با دامنه کنترل فشار آنالوس و ته‌چاهی به محققین علاقه‌مند ارائه شده است.



شکل ۱-۱: بررسی فصول پایان‌نامه از نظر کمی

## فصل ۲

### بررسی مبانی نظری پژوهش

## ۲-۱- مقدمه

علم حفاری همواره در طول تاریخ از جایگاهی ویژه در صنعت نفت و گاز برخوردار بوده است. بنا به اهمیت بالای استخراج نفت و گاز که منابعی با روند تجدید بسیار طولانی مدت می‌باشند، افراد متخصص در حوزه‌ی حفاری مخازن کشف شده و مستعد بهره‌دهی بالا همواره در تلاش بوده‌اند تا عملیاتی دقیق و با حداقل میزان تلفات نفت و گاز ارائه دهند. با گذشت زمان از شروع اولین عملیات حفاری در دنیا، به تدریج مخازن نزدیک‌تر به سطح زمین و کف دریاها تخلیه شده و نیاز به حفاری مخازن عمیق‌تر روز به روز افزایش یافت. به دلیل شرایط خاص فشاری در اعماق بسیار زیاد، حفاری به روش مرسوم بیش از این ممکن نبود و با چالش‌هایی جدی و مخاطره آمیز رو به رو شده بود. از این رو تکنیک‌های جدیدی از حفاری مانند MPD، حفاری پایین فشار تعادل<sup>۱</sup> و ... به صنعت نفت و گاز معرفی گردیده‌اند.

## ۲-۲- حفاری با فشار مدیریت شده

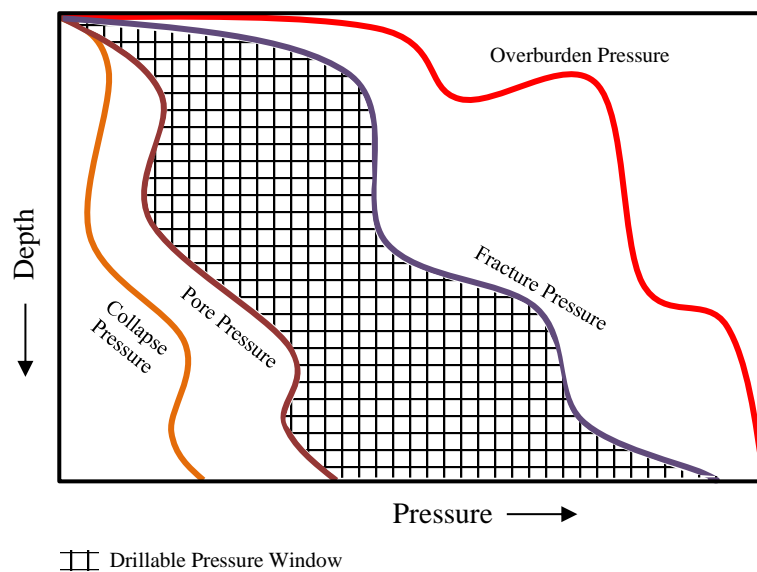
حفاری با فشار مدیریت شده (MPD) شکل پیشرفته‌ای از کنترل اولیه چاه است که عمدتاً از یک سیستم سیال حفاری بسته استفاده می‌کند که امکان کنترل دقیق‌تری از پروفایل‌های فشار در سرتاسر چاه را نسبت به روش‌های کنترلی متعارف (مانند تنظیم و تغییر وزن گل و نرخ جریان پمپ گل) فراهم می‌سازد. انجمن بین‌المللی پیمان‌کاران حفاری، MPD را یک فرآیند تطبیقی از حفاری معرفی کرده است که برای کنترل دقیق پروفایل فشار آنالوس در سراسر چاه استفاده می‌شود. اهداف این رویکرد، مشخص کردن کران‌های محیط فشار ته‌چاهی و متعاقباً مدیریت پروفایل فشار هایدرولیک آنالوس می‌باشد. به عبارت دیگر، هدف اصلی MPD جلوگیری از هجوم مداوم و پیوسته سیالات سازندی به سطح با حفظ حالت تعادل می‌باشد. در حین حفاری این کار با اعمال فشار برگشتی از سطح انجام می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Underbalanced Drilling (UBD)

از طرف دیگر، مسائل و مشکلات مربوط به حفاری از قبیل پنجره فشار باریک و سناریوهای مرتبط با آن، از دست دادن گردش سیال<sup>۱</sup> و هزینه‌های اضافی متعاقب آن، گیر اختلاف فشاری<sup>۲</sup> و نرخ نفوذ<sup>۳</sup> آهسته به ضرورت استفاده از فناوری MPD که تکنیک موثرتری از حفاری است، می‌افزاید. همچنین، مقدار بالای زمان غیر مولد<sup>۴</sup> در حفاری‌های دریایی و خشکی منجر به افزایش چشم‌گیر هزینه‌های کلی حفاری شده و نیاز به وجود کنترل دقیق‌تر فشار چاه را افزایش می‌دهد.

حفاری با فشار مدیریت شده این مسائل و نیازهای اساسی عملیات حفاری را کاملاً تحت پوشش قرار داده و شرایط مناسبی از لحاظ ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی فراهم می‌کند که پیمان‌کاران صنعت حفاری را به استفاده از این رویکرد تشویق می‌نماید. عمده روش‌های MPD بر توانایی اعمال مقدار مطلوب فشار برگشتی سطحی به سیستم برگشت گل متکی بوده و در نتیجه حفظ BHP حتی در پنجره‌های فشاری بسیار باریک متشکل از فشارهای منفذی و شکست که عملی چالش برانگیز می‌باشد، میسر می‌گردد.



شکل ۱-۲: محدوده‌های فشاری در یک سازند فرضی

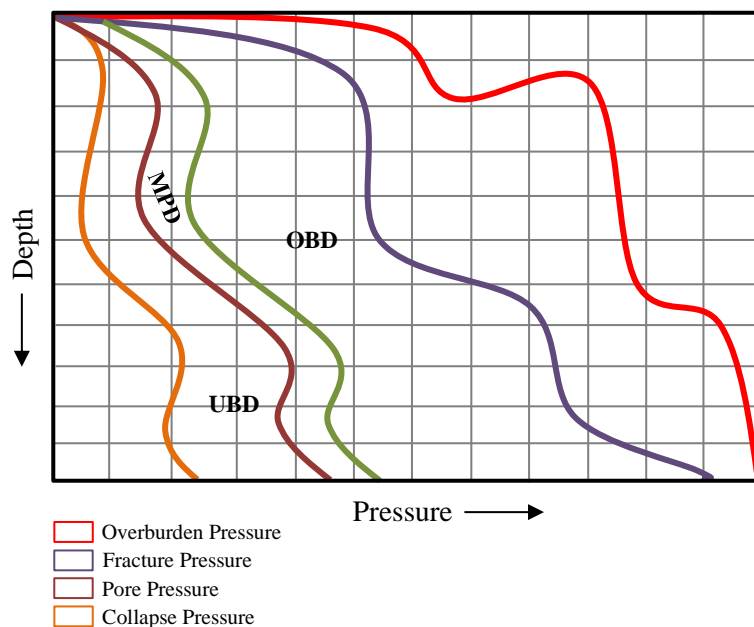
<sup>1</sup> Lost Circulation

<sup>2</sup> Differentially Stuck Pipe

<sup>3</sup> Rate of Penetration (ROP)

<sup>4</sup> Non-Productive Time (NPT)

همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، دامنه فشاری که عملیات حفاری مجاز است در آن انجام شود توسط گرادیان‌های فشار شکست و فشار منفذی محدود شده است. در حفاری‌های متعارف که از روش بالای فشار تعادل<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند، حفاری به منظور از بین بردن احتمال وقوع هجوم سیالات سازندی به درون چاه، در نواحی نزدیک به فشار شکست سازند انجام می‌شود. بنابراین، در تکنیک OBD مکانیسم اولیه کنترل چاه متکی بر وزن ستون سیال درون چاه که دارای یک چگالی مشخص است، بوده و فشار ته‌چاهی (BHP) از مجموع وزن گل هایدرواستاتیک چاه و فشار اصطکاک گردش سیال (چگالی گردش معادل<sup>۲</sup>) به دست می‌آید. در مقابل، تکنیک UBD بنا به دلایل متعددی مانند جلوگیری از هرزروی سیال، از دست دادن گردش، اجتناب از ایجاد کیک گل<sup>۳</sup> و احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری، سیالات سبک‌تری را برای انجام فرآیند حفاری به کار گرفته و در نتیجه حفاری در نواحی بین فشار سازندی و فشار مچالگی چاه<sup>۴</sup> انجام می‌گردد. در حفاری با فشار مدیریت شده حفاری در نزدیکی حاشیه فشار منفذی سازند انجام شده و فشار درون چاه توسط فشار برگشتی به درون آنالوس مدیریت می‌گردد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲: نواحی عملیاتی تکنیک‌های مختلف حفاری

<sup>۱</sup> Overbalance Drilling (OBD)

<sup>۲</sup> Equivalent Circulating Density (ECD)

<sup>۳</sup> Mud Cake

<sup>۴</sup> Wellbore Collapse Pressure

در حال حاضر اکثر سازندها و مخازن دریایی در صورت استفاده از روش‌های متعارف حفاری (OBD) و به کارگیری تجهیزات معمولی، از نظر اقتصادی غیر قابل حفاری می‌باشند. دلایل اصلی غیر قابل حفاری بودن این مخازن از نظر اقتصادی، هزینه‌های مازاد و بسیار زیاد ناشی از مسائل و مشکلات احتمالی عملیات حفاری متعارف می‌باشد که پیش‌تر به آن اشاره شد. به طور کلی مزایای استفاده از روش MPD به شرح زیر می‌باشد؛

- حفاری با پنجره‌های فشاری باریک و جلوگیری از سناریوهای کنترل چاهی ناشی از آنها
- کاهش تعداد جداری‌های مورد استفاده در برنامه
- بهبود ROP، کاهش NPT و در نتیجه کاهش هزینه‌های حفاری
- افزایش ایمنی با تکنیک‌های تخصصی و تجهیزات سطحی (Rehm et al., 2008)

## ۲-۳- انواع حفاری با فشار مدیریت شده

پیش از اشاره به انواع مختلف حفاری با فشار مدیریت شده، شایان ذکر است که دو رویکرد اساسی واکنشی<sup>۱</sup> و فعال<sup>۲</sup> برای استفاده از MPD وجود دارد. نوع واکنشی حفاری با فشار مدیریت شده، از روش‌ها و یا تجهیزات MPD به منظور کاهش مسائل و مشکلات احتمالی استفاده می‌کند. به طور معمول، در این روش مهندسان حفاری چاه را به طور متعارف برنامه‌ریزی کرده و تجهیزات و روش‌های MPD در طول تحولات غیر منتظره فعال می‌شوند. در مقابل، نوع فعال حفاری با فشار مدیریت شده، به طور کارآمد و دینامیک از روش‌ها و یا تجهیزات MPD برای کنترل پروفایل فشار در سرتاسر چاه استفاده می‌کند. این رویکرد از طیف گسترده‌ای از ابزارهای موجود استفاده می‌کند تا مقاصد زیر عملی گردند:

- کنترل بهتر قرارگیری جایگاه نشست جداری<sup>۳</sup> با حداقل رشته‌های جداری
- کنترل بهتر الزامات چگالی و هزینه‌های گل
- فراهم کردن کنترل فشار دقیق‌تری در مواقع احتمالی وقوع حوادث کنترل چاهی

---

<sup>1</sup> Reactive MPD

<sup>2</sup> Proactive MPD

<sup>3</sup> Casing seat

تمامی این موارد به طور همزمان منجر به افزایش زمان عملیاتی حفاری و کاهش NPT چاه می‌گردند. به طور خلاصه، MPD فعال چاه‌های غیر قابل حفاری و دارای چالش‌های عملیاتی و اقتصادی را حفر می‌کند. با توجه به این دو رویکرد اساسی برای استفاده از MPD، حفاری با فشار مدیریت شده فعال به انواع مختلفی طبقه‌بندی می‌شود که در ادامه به طور خلاصه به مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲-۳-۱- فشار ته‌چاهی ثابت (CBHP)

روش فشار ته‌چاهی ثابت به فرآیندی اشاره دارد که در آن فشار فضای آنالوس چاه، در یک عمق خاص و در حالت خاموش یا روشن بودن پمپ‌های گل، ثابت یا نزدیک به ثابت نگه داشته می‌شود. در این زمینه، ثابت به معنای حفظ BHP در پنجره‌ای است که توسط کران‌های فشار بالا و پایین محدود شده است. فاصله بین این کران‌ها، حاشیه<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شود. به طور کلی رابطه‌ای که بین فشارهای موجود در پنجره‌های فشاری وجود دارد به صورت زیر می‌باشد:

$$P_p < P_{wbs} < BHP < P_{ds} \leq P_{ls} \leq P_f \quad (1-2)$$

در رابطه‌ی فوق،  $P_p$  فشار منفذی سازند،  $P_{wbs}$  فشار پایداری چاه،  $P_{ds}$  فشار گیر اختلافی،  $P_{ls}$  فشار از دست دادن گردش و  $P_f$  فشار شکست سازند می‌باشد. کران پایینی که در پنجره فشار به عنوان حداقل فشار مجاز عملیاتی در نظر گرفته می‌شود معمولاً توسط فشار سازندی و فشار پایداری چاه، و در کران بالا فشارهای گیر اختلافی، از دست دادن گردش و شکست حداکثر فشار مجاز را تعریف می‌کنند (Rehm et al., 2008).

مقدار فشار ته‌چاهی در زمان‌هایی که پمپ گل خاموش و یا روشن است متفاوت می‌باشد. زمانی که پمپ روشن است و گردش گل حفاری در کل سیستم در حال انجام است، علاوه بر فشار هایدرواستاتیکی که از طرف سیال حفاری به ته چاه اعمال می‌شود و فشاری که توسط پمپ فشار برگشتی به چاه تزریق می‌گردد، فشار اصطکاکی فضای آنالوس<sup>۲</sup> نیز بر مقدار BHP تأثیرگذار می‌باشد؛

<sup>1</sup> Margin

<sup>2</sup> Annular Frictional Pressure (AFP)

$$BHP_{dynamic} = P_{static} + P_{AFP} + P_{bp} \quad (2-2)$$

ترم  $BHP_{dynamic}$  به عنوان چگالی گردش معادل و بعضاً به عنوان وزن گل معادل<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شود. معمولاً زمانی که از EMW استفاده می‌شود، واحد فشار بر حسب پوند در هر گالن<sup>۲</sup> و یا وزن مخصوص<sup>۳</sup> می‌باشد. در مقابل، زمانی که پمپ گل بنا به دلایلی مختلف چون اتصالات لوله، خرابی احتمالی پمپ و غیره خاموش می‌باشد، فاکتور AFP عملاً حذف شده و فشار ته‌چاهی برابر با مجموع فشار هایدرواستاتیکی سیال حفاری و فشار پمپ فشار برگشتی است؛

$$BHP_{static} = P_{static} + P_{bp} \quad (3-2)$$

در تکنیک فشار ته‌چاهی ثابت، با ثابت بودن فشار هایدرواستاتیک سیال حفاری، زمانی که پمپ خاموش است دست‌کاری و یا حفظ فشار ته‌چاهی تنها به وسیله تغییراتی که در فشار پمپ فشار برگشتی ایجاد می‌شود، قابل تحقق است. در صورتی که در زمان پیوسته کار کردن پمپ گل، با ثابت فرض شدن فشار هایدرواستاتیک سیال حفاری و فشار AFP، اعمال تغییرات و یا حفظ فشار ته‌چاهی توسط باز و بسته شدن شیر چوک<sup>۴</sup> انجام می‌شود. بنابراین، تکنیک CBHP به گونه‌ای اثرگذار می‌باشد که BHP محدوده‌ی مجاز از پیش تعیین شده را هیچ‌گاه نقض نکرده و از حوادث زیان‌بار مالی و جانی جلوگیری به عمل می‌آید.

کنترل چوک سیستم MPD که سیستمی بسته است (جریان برگشتی از چاه در فشار اتمسفر قرار نمی‌گیرد)، می‌تواند دارای حالات مختلف دستی، خودکار و یا نیمه خودکار که ترکیبی از هر دو است باشد. تمامی سیستم‌های MPD که فشار ته‌چاهی ثابتی را ارائه می‌کنند، به یک RCD به عنوان مهر و موم کننده اولیه فشار متکی هستند (شکل ۲-۳). این دستگاه، قطعه‌ای از تجهیزات حفاری MPD است که اطراف رشته حفاری را در تمامی شرایط (توقف عملیات، چرخش و رفت و برگشت رشته) مهر و موم کرده و جریان‌های برگشتی از چاه را به منظور ایجاد فشار برگشتی و کنترل فشار چاه، به سمت شیر چوک سوق می‌دهد.

<sup>1</sup> Equivalent Mud Weight (EMW)

<sup>2</sup> Pounds Per Gallon (PPG)

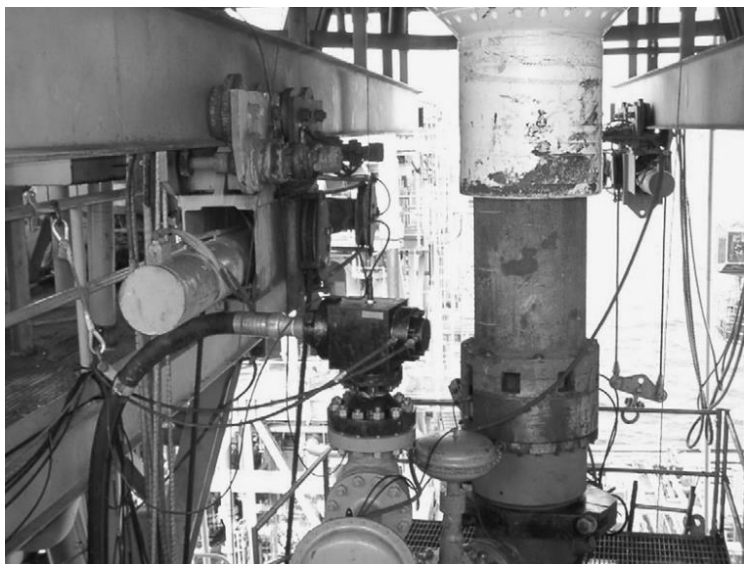
<sup>3</sup> Specific Gravity (SG)

<sup>4</sup> Choke Valve



شکل ۲-۳: دستگاه کنترل دوار (Rehm et al., 2008)

محل قرار گیری این دستگاه بر روی سر چاه بوده و به طور دقیق، پایین کف دکل و بالای فوران گیر<sup>۱</sup> حلقوی نصب می شود (شکل ۲-۴). سیستم های حفاری با فشار مدیریت شده که برای ثابت نگه داشتن BHP طراحی شده اند، فشار برگشتی آنالوس را با یک چوک منی فولد (کاهنده فشار سرچاه که شامل چندین شیر فشار بالا و چوک می شود) متصل به RCD مدیریت می کنند (Rehm et al., 2008).



شکل ۲-۴: محل قرارگیری RCD بر روی یک دکل دریایی در خلیج مکزیک (Rehm et al., 2008)

با این حال، نه لزوماً برای تکنیک CBHP، بلکه در برخی از کاربردها نیز اپراتورها از چوک منی فولد کنترل چاهی دکل به منظور مدیریت فشار برگشتی استفاده می کنند.

<sup>۱</sup> Blowout preventer (BOP)

به طور کلی، سیستم‌های چوک برای تکنیک CBHP از نظر عوامل زیر با هم متفاوت می‌باشند:

- روش کنترل
- ادغام کنترل چوک و مدل هایدرولیک
- استفاده از داده‌های فشار حین حفاری<sup>۱</sup> برای کالیبره کردن مدل هایدرولیک
- قابلیت زمان واقعی<sup>۲</sup> و سرعت مدل هایدرولیک
- قابلیت ایجاد فشار برگشتی با یک پمپ فشار برگشتی مستقل

## ۲-۳-۲- گرادیان دوگانه (DGD)

حفاری با روش گرادیان دوگانه مربوط به عملیات حفاری دریایی<sup>۳</sup> می‌باشد که در آن گل از طریق رایزر<sup>۴</sup>های متعارف و با قطر زیاد، به سطح برنمی‌گردد. رایزرها لوله‌هایی هستند که به طور موقت چاه‌هایی که در کف دریا حفر شده‌اند را به دکل روی آب متصل می‌کنند. گل‌های برگشتی در تکنیک DGD یا در کف دریا تخلیه می‌شوند، که اصطلاحاً به این کار پمپ و تخلیه<sup>۵</sup> گفته می‌شود، و یا از طریق یک یا چند خط برگشت با قطر کم، توسط پمپ کف دریایی<sup>۶</sup> و یا پمپ گل کش<sup>۷</sup> از کف دریا به سطح بازگردانده می‌شوند. روش‌های برگشت گل بدون رایزر<sup>۸</sup> و پمپ و تخلیه روش‌هایی هستند که در تکنیک گرادیان دوگانه مورد استفاده قرار می‌گیرند و با تنظیم فشار ورودی پمپ کف دریایی به فشار هایدرواستاتیک نزدیک به آب دریا، یک گرادیان فشار دوگانه بر آنالوس چاه وارد می‌شود.

پمپ کف دریایی فشار وارد شده بر قسمت‌های کم عمق چاه را در حالی کاهش می‌دهد که گل با چگالی بالاتر زیر کف دریا، فشار ته‌چاهی مورد نیاز را برای کنترل فشار منفذی سازند فراهم می‌کند.

---

<sup>1</sup> Pressure-While-Drilling (PWD)

<sup>2</sup> Real-time

<sup>3</sup> Offshore drilling

<sup>4</sup> Riser

<sup>5</sup> Pump and dump

<sup>6</sup> Seafloor pump

<sup>7</sup> Mud-lift pump

<sup>8</sup> Riserless mud return

## ۲-۳-۳- کلاهک گلی تحت فشار (PMCD)

هدف استفاده از این تکنیک، مقابله با مشکلات شدید از دست رفتن گردش سیال می‌باشد. از دست رفتن گردش سیال به عنوان از دست دادن کلی یا جزئی سیالات حفاری در مناطق با نفوذپذیری بالا، سازندهای غار مانند و شکستگی‌های طبیعی یا القایی حین حفاری تعریف می‌شود. در این تکنیک از MPD، برگشتی از چاه به سطح وجود ندارد. در صورتی که حین حفاری از دست دادن شدید گل رخ بدهد، یک گل سنگین به درون آنالوس با ارتفاع ستون<sup>۱</sup> از پیش تعیین شده پمپ می‌شود. ستون سیال، با کمک فشار اعمالی از سطح، در قسمت بالای سازندی که قادر به پذیرش سیال و کنده‌های حفاری است قرار گرفته و سپس از سیالی سبک برای حفاری در نواحی سازندی با فشار تخلیه شده استفاده می‌شود. سر انجام به دلیل استفاده از سیال سبک، ROP افزایش یافته و سیال ارزان قیمت به همراه کنده‌های حفاری وارد سازندهای مشکل‌ساز می‌شوند. این تکنیک PMCD نامیده شده و به عنوان یک مانع آنالوس<sup>۲</sup> عمل می‌کند.

## ۲-۴- کنترل در عملیات حفاری با فشار مدیریت شده

در کنترل‌کننده‌های خودکار MPD، هدف اصلی ردیابی<sup>۳</sup> مسیر فشار و حفظ نرخ جریان مطلوب در سیستم می‌باشد. نقطه تنظیم<sup>۴</sup> فشار را می‌توان به صورت دینامیکی توسط یک ناظر<sup>۵</sup> بر اساس اندازه‌گیری‌های موجود (به عنوان مثال فشار چوک، نرخ جریان) تعیین کرد. علاوه بر این، از این کنترل‌کننده‌ها انتظار می‌رود چندین سناریوی عملیاتی مانند گسترش لوله<sup>۶</sup>، رد کردن سیلان سیال سازندی<sup>۷</sup> و از دست دادن گردش سیال ناشی از خرابی پمپ را مدیریت کند (Rehm et al., 2008). در گسترش رشته حفاری، همان‌طور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، ابتدا چرخش رشته حفاری متوقف شده و سپس نرخ جریان پمپ به تدریج در یک زمان

---

<sup>1</sup> Column height

<sup>2</sup> Annulus barrier

<sup>3</sup> Tracking

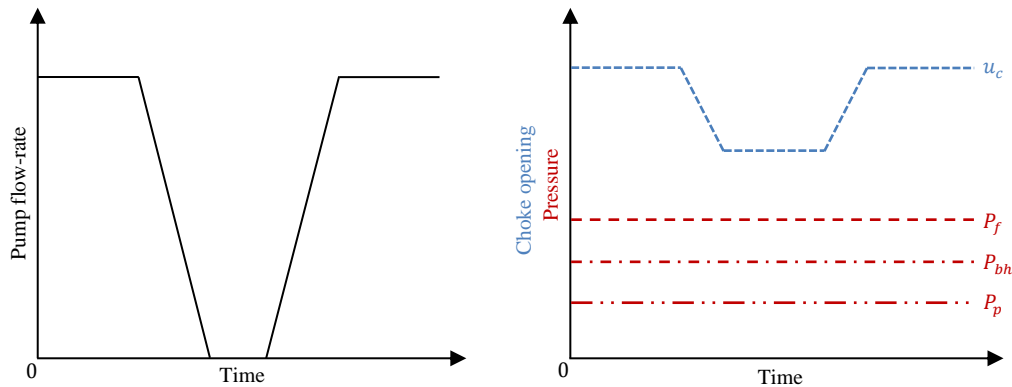
<sup>4</sup> Set point

<sup>5</sup> Observer

<sup>6</sup> Pipe extension

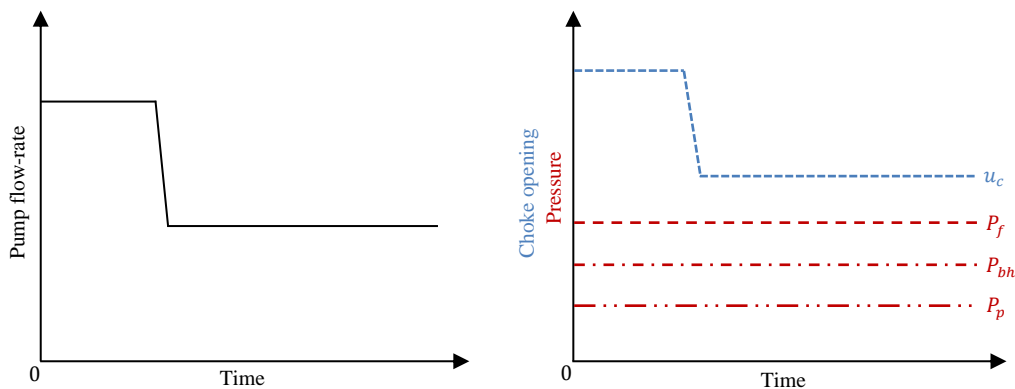
<sup>7</sup> Kick rejection

ثابت به صفر می‌رسد. زمانی که نرخ گردش به حالت بدون جریان<sup>۱</sup> کاهش یافت، یک لوله حفاری<sup>۲</sup> به رشته اضافه می‌گردد. در طول این مدت، مطلوب است که BHP در ناحیه ته چاه مقداری ثابت را دنبال کند.



شکل ۵-۲: سناریوی گسترش لوله در شرایط ایده‌آل

پس از انجام اتصال، دبی پمپ به مقدار مورد نظر افزایش یافته و چرخش رشته حفاری از سر گرفته می‌شود. شکل ۶-۲ خرابی ناگهانی پمپ گردش را نشان می‌دهد که یکی از نقاط اصلی کنترلی است. در هر دو حالت گسترش لوله و خرابی پمپ، باید با دست‌کاری بازشدگی شیر چوک BHP در پنجره فشار حفظ گردد.



شکل ۶-۲: سناریوی خرابی پمپ در شرایط ایده‌آل

مدیریت سناریوهای کنترل چاهی در حفاری با فشار مدیریت شده، با داشتن سیستم‌های کنترلی مقاوم، دقیق و با بار محاسباتی کم به درستی و به طور مطلوبی انجام می‌شود تا از وقوع حوادث مختلف جلوگیری شود.

<sup>۱</sup> No-flow condition

<sup>۲</sup> Drill pipe

همان‌طور که در مقدمه پژوهش به آن اشاره شد، سیستم‌های کنترلی متفاوتی در این عملیات پیشنهاد و پیاده‌سازی شده‌اند که هر کدام از آن‌ها به نوعی دارای مزایا و معایبی بودند. این مطالعه با علم بر محدودیت‌های سیستم‌های کنترلی پیشین، سیستم کنترل فازی برای تکنیک CBHP از حفاری MPD را پیشنهاد می‌دهد.

## ۲-۵- کنترل فازی

حوزه سیستم‌های کنترل فازی یکی از فعال‌ترین و پربرترین حوزه‌های پژوهشی است که در آن از نظریه مجموعه‌های فازی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. نظریه مجموعه‌های فازی اصولاً توسط دکتر لطفی‌زاده برای رسمیت بخشیدن به مفاهیم کیفی که مرز دقیقی ندارند، ارائه شد. برای مثال، هیچ مقدار شاخص معناداری وجود ندارد که مرزهای بین کم و نرمال، نرمال و زیاد را نشان دهد. در عوض چنین اصطلاحات زبانی<sup>۲</sup> با ارجاع به مجموعه‌های فازی اعداد، رسمیت می‌یابند. در واقع روابط فازی، نوعی شیوه‌ی محاسباتی است که در برخی مواقع استنتاج را بسیار راحت‌تر می‌کند.

به طور کلی، ساختار متعارف یک سیستم فازی از چهار جزء تشکیل شده است که در مجموع سیستم استنتاج فازی<sup>۳</sup> را تعریف می‌کنند؛ فازی ساز<sup>۴</sup>، موتور استنتاج فازی<sup>۵</sup>، پایگاه دانش<sup>۶</sup> و نا فازی ساز<sup>۷</sup>. یک سیستم فازی می‌تواند از داده‌های عددی به عنوان ورودی تغذیه کرده و سپس، فازی ساز مجموعه فازی مناسب را به آن‌ها اختصاص دهد. با توجه به پایگاه دانش، موتور استنتاج که بلوک سازنده آن قواعد فازی است، مقادیر متغیرهای ورودی را به مقادیر زبانی متغیر خروجی نگاشت می‌کند. به عبارت دیگر؛

---

<sup>1</sup> Fuzzy sets theory

<sup>2</sup> Linguistic terms

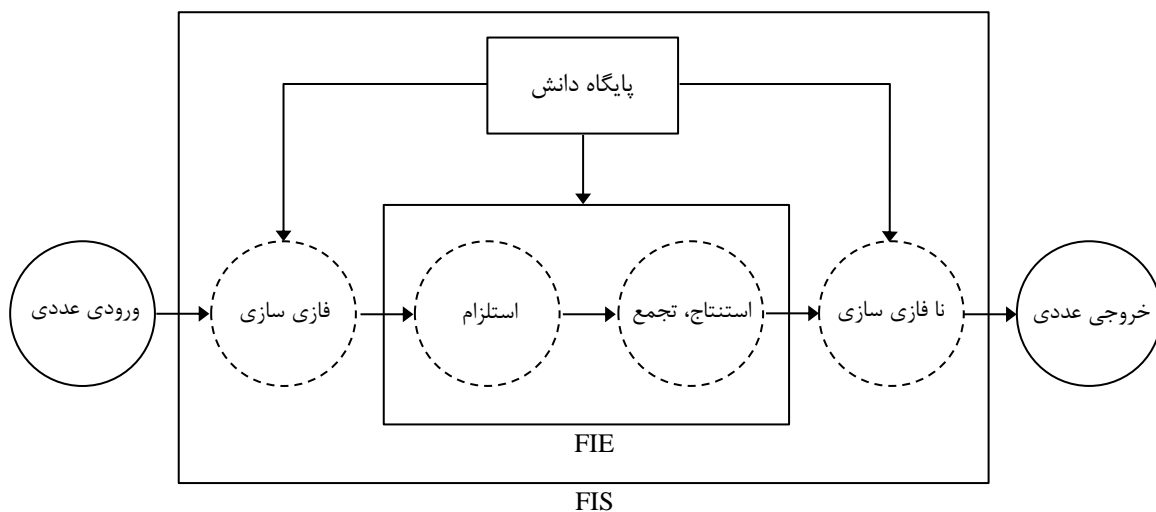
<sup>3</sup> Fuzzy Inference System (FIS)

<sup>4</sup> Fuzzifier

<sup>5</sup> Fuzzy Inference Engine (FIE)

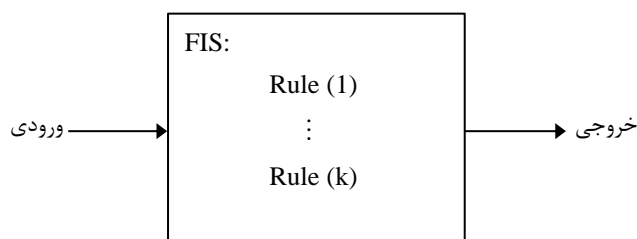
<sup>6</sup> Knowledge base

<sup>7</sup> Defuzzifier



شکل ۲-۷: روند کار کلی سیستم‌های فازی

در حالت کلی نگاهت ورودی/ خروجی (نحوه تبدیل داده‌ها بین فرآیند، ورودی و خروجی) غیرخطی زیر برقرار است؛



شکل ۲-۸: نگاهت غیرخطی ورودی/ خروجی سیستم کنترل فازی

## ۲-۶- حادثه ماکندو

۲۰ آوریل ۲۰۱۰، با وقوع یک رویداد کنترل چاهی، هایدروکربن‌های سازندی از چاه ماکندو<sup>۱</sup> به دکل دریایی Deepwater Horizon، که متعلق به شرکت آمریکایی ترانسوشن<sup>۲</sup> بود، نفوذ کرده و منجر به انفجار و آتش‌سوزی در دکل شدند. آتش‌سوزی که توسط هایدروکربن‌های درون چاه تأمین می‌شد، به مدت ۳۶ ساعت تا زمان کامل غرق شدن دکل ادامه داشت و هایدروکربن‌ها به مدت ۸۷ روز از مخزن به آب‌های آزاد جریان یافتند.

<sup>۱</sup> Macondo well

<sup>۲</sup> Transocean

طبق گزارشی که شرکت صنعتی-نفتی بریتانیا<sup>۱</sup> پس از انجام تحقیقات گسترده به اوپاما رئیس جمهور وقت آمریکا ارائه داد، در این حادثه ۱۱ نفر جان خود را از دست داده، ۱۷ نفر مجروح شدند و ۴/۹ میلیون بشکه نفت خام به آب‌های خلیج مکزیک نشت کرد.

منشأ این حادثه تأسف برانگیز، از پیش تعیین نشده و فاجعه بار، عدم موفقیت در حفظ یکپارچگی چاه، که به حفظ کامل کنترل سیالات درون چاه به منظور جلوگیری از هجوم سیالات سازندی و از دست رفتن سیالات چاه به سازند در تمامی زمان‌ها اشاره دارد، بوده است. به دنبال از دست رفتن یکپارچگی چاه، کنترل هایدرواستاتیک چاه نیز از دست رفت و جریان سیالات سازندی به درون چاه برقرار شد. از طرف دیگر، بنا به دلایلی کنترل این جریان توسط تجهیزات BOP نیز شکست خورد که متعاقباً منجر به آزاد شدن سیالات در دکل، انفجار و آتش‌سوزی شد. همچنین، عملگرهای اضطراری BOP نیز نتوانستند چاه را پس از انفجارهای اولیه به طور کامل ببندند، یا اصطلاحاً Seal کنند.

## ۲-۷- جمع‌بندی

فصل بررسی مبانی نظری پژوهش بخش مهمی از پایان‌نامه است که به بررسی مفاهیم کلی مورد نیاز، با تمرکز بر بیان مفهوم حفاری با فشار مدیریت شده و کنترل فازی، برای درک سیستم پیشنهادی در فصل بعد می‌پردازد. وقوع حادثه ماکندو و نتایج زیان‌بار و جبران ناپذیر جانی، مالی و زیست محیطی متعاقب آن، بار دیگر اهمیت کنترل مؤثر و پیوسته بر سیالات درون چاهی و فشارهایی که ایجاد می‌کنند را نشان داده است. با علم بر اصول ذکر شده در این فصل و اهمیت انجام این پژوهش که در فصل ابتدایی به آن اشاره شد، این پایان‌نامه در فصول بعدی ایده اصلی خود را به صورت تئوری به نحوی پیاده‌سازی می‌کند که سیستم را به هدف نهایی می‌رساند.

---

<sup>۱</sup> British Petroleum (BP)

## فصل ۳

مراحل انجام پژوهش، اثبات پایداری و

نتایج شبیه‌سازی

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل، یک مدل داینامیک از چاه مورد مطالعه با تکنیک حفاری CBHP ارائه می‌گردد که به منظور دستیابی به فشار ته‌چاهی مطلوب در این سیستم، هر حالت از این مدل باید به یک مقدار مرجع و از پیش تعیین شده برسد. با فرض بر این که در این مطالعه گردش سیال حفاری متوقف نشده، حفاری به طور پیوسته در حال انجام بوده و کنترل‌پذیری چوک همواره برقرار است، مقادیر مرجع حالات اصلی سیستم عددی غیر از صفر را به خود اختصاص می‌دهند و در نتیجه، نقاط تعادل سیستم در مبدأ قرار ندارند.

در این تحقیق، از رویکرد لیاپانوف<sup>۱</sup> به منظور هم‌گرایی مسیر به مبدأ استفاده شده است. با توجه به این که اصول رویکرد لیاپانوف این هم‌گرایی را تضمین می‌کند و از آن جایی که نقاط تعادل این سیستم جایی غیر از مبدأ می‌باشد، استخراج معیارهای پایداری به طور مستقیم برای این سیستم قابل اعمال نیست. بنابراین، در این مطالعه یک سیستم معادل با تغییر هماهنگی<sup>۲</sup> معرفی شده است تا هم‌گرایی مسیر آن به مبدأ، منجر به هم‌گرا شدن مسیر حالات سیستم حفاری اصلی به نقاط تعادل مورد نظر گردد.

با علم بر این که هدف از توسعه قضایای پایداری، به طور کلی بررسی پاسخ‌های داینامیکی یک سیستم به اختلالات با نزدیک شدن زمان به بی‌نهایت است، بعد از ارائه مدل‌سازی انجام شده، قضایایی که برای پایداری سیستم پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند به همراه روش اثبات آن‌ها، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به علاوه، در این بخش به یکی از محدودیت‌های فیزیکی/ عملیاتی مهم در سیستم‌های کنترل فشار برگشتی نیز پرداخته شده است.

بخش پایانی فصل سوم، عملکردی که استراتژی کنترلی و کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی شده از خود نشان داده‌ند را در برابر عملکرد کنترل‌کننده‌های معروف و متداول صنعتی PI و PID با رعایت اصول مشابه، ارزیابی و تحلیل کرده است.

---

<sup>1</sup> Lyapunov Method

<sup>2</sup> Changing Coordination

## ۳-۲- مدل هایدرولیکی سیستم و نقاط تعادل

همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، در این مطالعه چاه به دو حجم کنترلی<sup>۱</sup> تقسیم می‌شود. به دلیل شدید نبودن تغییرات چگالی، مدول بالک<sup>۲</sup> سیال و گرانیوی<sup>۳</sup> تحت شرایط عملیاتی عادی حفاری، این پارامترها ثابت فرض شده‌اند.

گل‌های حفاری معمولاً یک رابطه غیر خطی بین تنش برشی<sup>۴</sup> و پروفایل سرعت<sup>۵</sup> دارند. این یکی از ویژگی‌های مطلوب گل است که منجر به رفتار ژلی<sup>۶</sup> در شرایط جریان صفر شده و تضمین می‌کند که کنده‌های حفاری در حال انتقال به بیرون چاه در زمان خاموشی پمپ‌ها توسط گرانش به پایین سقوط نمی‌کنند. برای مدل‌سازی افت فشار اصطکاکی و استخراج افت فشارهای اصطکاکی آنالوس و رشته حفاری، مشابه آنچه که در (Landet et al., 2013)، (Kaasa et al., 2012)، (Park et al., 2020) و (Mahdianfar et al., 2013) انجام شده است، این مطالعه از مدل رئولوژیکی غیرنیوتونی بینگهام<sup>۷</sup> استفاده می‌کند. علاوه بر این، آهسته بودن ROP (معمولاً ۱۵ متر بر ساعت) (Stamnes et al., 2008) در عملیات واقعی حفاری فرصتی را برای ساده‌سازی و حفظ اصول ریاضیات مدل با ثابت در نظر گرفتن عمق، فراهم می‌سازد (Nandan et al., 2017).

به جهت جلوگیری از کاهش نرخ جریان پمپ و توقف گردش گل حفاری، این مطالعه همچنین عملیات اتصال لوله و خرابی احتمالی پمپ اصلی را حذف می‌کند. بنابراین، فرض می‌شود که پمپ اصلی به طور مداوم با یک دبی ثابت و از پیش تعیین شده کار می‌کند. از این رو، پمپ فشار برگشتی عملاً بی‌استفاده بوده و دبی آن صفر در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن این فرضیات و با هدف نوشتن معادلات هایدرولیک سیستم حفاری مورد نظر، معادلات بقای جرم و حرکت<sup>۸</sup> برای سیالات تراکم ناپذیر و تک‌فازی فرض شده در این مطالعه به صورت زیر نوشته می‌شوند (Kaasa et al., 2012):

---

<sup>1</sup> Control volume

<sup>2</sup> Fluid Bulk Modulus

<sup>3</sup> Viscosity

<sup>4</sup> Shear stress

<sup>5</sup> Velocity profile

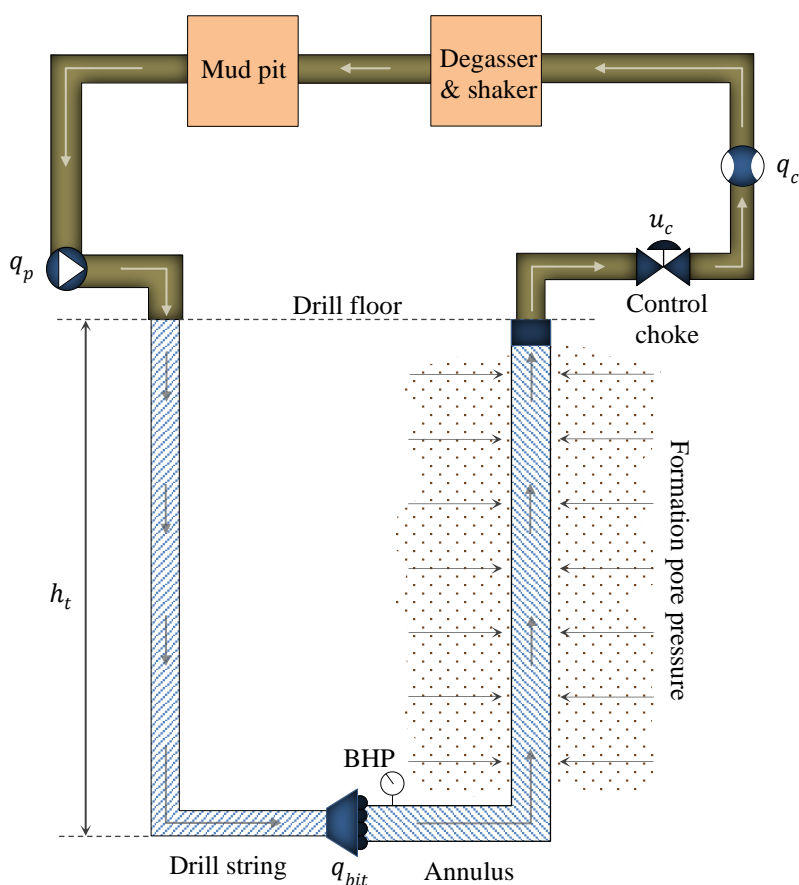
<sup>6</sup> Gelling behavior

<sup>7</sup> Bingham non-Newtonian rheological model

<sup>8</sup> Conservation of mass and momentum

$$\rho_0 \frac{v}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_{in} q_{in} - \rho_{out} q_{out} \quad (1-3)$$

$$M \frac{\partial q}{\partial t} = P_1 - P_2 - P_{fd} - P_{fa} - \Delta \rho g h_t \quad (2-3)$$



شکل ۱-۳: شماتیک سیستم حفاری CBHP با دو حجم کنترلی

با حاکم کردن این معادلات و بر اساس مفروضات توصیف شده، می‌توان مدل داینامیکی سیستم مورد نظر را

به شرح زیر به دست آورد:

$$\dot{P}_p = \frac{\beta_d}{v_d} (q_p - q_{bit}) \quad (3-3)$$

$$\dot{P}_c = \frac{\beta_a}{v_a} \left( q_{bit} + q_{bpp} - u_c C_d A_0 \sqrt{\frac{2(P_c - P_0)}{\rho_a}} \right) \quad (4-3)$$

$$\dot{q}_{bit} = \frac{1}{M} (P_p - P_c - \psi_d |q_p| q_p - \psi_a |q_{bit}| q_{bit} - (\rho_a - \rho_d) g h_t) \quad (5-3)$$

جدول ۳-۱: مفاهیم فیزیکی پارامترهای مدل دینامیکی چاه

توضیحات	پارامتر	توضیحات	پارامتر
Drill string volume (m <sup>3</sup> ) حجم رشته حفاری	$V_d$	Main pump pressure (pa) فشار پمپ اصلی	$P_p$
Frictional pressure drops in annulus (pa) افت فشار اصطکاکی در آنالوس	$P_{fa}$	Frictional pressure drops in drill-string (pa) افت فشار اصطکاکی در رشته حفاری	$P_{fd}$
Acceleration due to gravity (m.s <sup>-2</sup> ) شتاب گرانشی	$g$	Choke pressure (pa) فشار چوک	$P_c$
Main pump flow rate (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) نرخ جریان پمپ اصلی	$q_p$	Bottom-hole pressure (pa) فشار ته‌چاهی	$P_{bh}$
Back-pressure pump flow rate (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) نرخ جریان پمپ برگشتی	$q_{bpp}$	Pressure outside the system (pa) فشار خارج از سیستم	$P_0$
Bit flow rate (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) نرخ جریان مته	$q_{bit}$	Bulk modulus at the annulus (pa) مدول بالک در آنالوس	$\beta_a$
Choke flow rate (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) نرخ جریان چوک	$q_c$	Bulk modulus at drill string (pa) مدول بالک در رشته حفاری	$\beta_d$
Mud density in annulus (kg.m <sup>-3</sup> ) چگالی گل در آنالوس	$\rho_a$	True vertical depth (m) عمق عمودی واقعی	$h_t$
Mud density in drill string (kg.m <sup>-3</sup> ) چگالی گل در رشته حفاری	$\rho_d$	Annulus length (m) طول آنالوس	$L_a$
Frictional coefficient in annulus ضریب اصطکاک در آنالوس	$f_a$	Drill string length (m) طول رشته حفاری	$L_d$
Frictional coefficient in drill string ضریب اصطکاک در رشته حفاری	$f_d$	Annulus diameter (m) قطر آنالوس	$D_a$
Choke opening (% opening) بازشدگی چوک	$u_c$	Drill string diameter (m) قطر رشته حفاری	$D_d$
Pi number عدد پی	$\pi$	Coefficient of discharge at the choke ضریب تخلیه چوک	$C_d$
Effective mud density (kg.m <sup>-4</sup> ) چگالی موثر گل	$M$	Choke opening area (m <sup>2</sup> ) ناحیه بازشدگی چوک	$A_0$
		Annulus volume (m <sup>3</sup> ) حجم آنالوس	$V_a$

در معادلات (۳-۳)-(۳-۵)، بین ترم‌های تشکیل دهنده افت فشارهای اصطکاکی در آنالوس و رشته حفاری روابط زیر برقرار می‌باشد؛

$$P_{fa} = \frac{32\rho_a f_a |q_{bit}| q_{bit} L_a}{\pi^2 (D_a - D_d) (D_a^2 - D_d^2)^2} = \psi_a |q_{bit}| q_{bit}$$

$$P_{fd} = \frac{32\rho_d f_d |q_p| q_p L_d}{\pi^2 D_d^5} = \psi_d |q_p| q_p$$

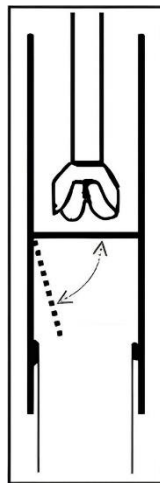
در معادلات فوق،  $P_c$ ،  $P_p$  و  $q_{bit}$  متغیرهای حالت سیستم می‌باشند.

بنابراین،  $\psi_a$  و  $\psi_d$  به صورت زیر تعریف می‌شوند؛

$$\psi_d = \frac{32\rho_a f_d L_d}{\pi^2 D_d^5} \quad (۶-۳)$$

$$\psi_a = \frac{32\rho_a f_a L_a}{\pi^2 (D_a - D_d)(D_a^2 - D_d^2)^2} \quad (۷-۳)$$

اکثر عملیات حفاری به منظور جلوگیری از جریان معکوس احتمالی از طرف آنالوس به رشته حفاری و ارتباط فشاری، از یک شیر یک طرفه در انتهای رشته حفاری و یا از یک شیر جداری ته‌چاهی استفاده می‌کنند؛



شکل ۳-۲: شیر جداری ته‌چاهی (Rehm et al., 2008)

بنابراین، BHP را می‌توان با استفاده از مسیر آنالوس به جای مسیر رشته حفاری، مشابه معادله زیر به طور موثرتری محاسبه کرد (Kaasa et al., 2012):

$$P_{bh} = P_c + \psi_a |q_{bit}| q_{bit} + \rho_a g h_t \quad (۸-۳)$$

در تکنیک CBHP از حفاری با فشار مدیریت شده، هدف رساندن فشار ته‌چاهی به مقدار مرجع و از پیش تعیین شده می‌باشد (یعنی  $P_{bh} \rightarrow P_{bh}^{ref}$ ). در نتیجه در حالت پایدار<sup>۱</sup> می‌توان مقدار مرجع فشار چوک را از معادله (۸-۳) به دست آورد؛

<sup>۱</sup> Steady-state

$$P_c^{ref} = P_{bh}^{ref} - \psi_a \cdot |q_p| \cdot q_p - \rho_a g h_t \quad (9-3)$$

می‌دانیم که تغییر متغیرهای حالت در نقطه تعادل برابر با صفر می‌باشد. حال با در نظر گرفتن معادله (۳-۵)،

$$\dot{q}_{bit} = 0 \text{ ما را به سمت به دست آوردن مقدار مرجع فشار پمپ هدایت می‌کند؛}$$

$$P_p^{ref} = P_{bh}^{ref} + \psi_a \cdot |q_p| \cdot q_p - \rho_a g h_t \quad (10-3)$$

همچنین به طور مشابه از معادلات (۳-۳) و (۴-۳) نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$q_{bit}^{ref} = q_p \quad (11-3)$$

$$u_c^{ref} = \frac{q_p + q_{bpp}}{C_d A_0 \sqrt{\frac{2(P_{bh}^{ref} - \psi_a |q_p| \cdot q_p - \rho_a g h_t - P_0)}{\rho_a}}} \quad (12-3)$$

### ۳-۳- سیستم خطا

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، بدیهی است که مقادیر مرجع محاسبه شده (۳-۹)-(۳-۱۲) صفر نمی‌باشند و

در نتیجه، نقطه تعادل این سیستم نقطه‌ای غیر از مبدأ می‌باشد. به همین دلیل با تعریف متغیرهای خطای

زیر، یک سیستم معادل معرفی می‌شود که هم‌گرایی مسیر آن به مبدأ منجر به هم‌گرا شدن مسیر حالات

سیستم حفاری اصلی به نقاط تعادل مورد نظر می‌گردد؛

$$e_1 = P_p - P_p^{ref} \quad (13-3)$$

$$e_2 = P_c - P_c^{ref} \quad (14-3)$$

$$e_3 = q_{bit} - q_{bit}^{ref} \quad (15-3)$$

با توجه معادلات (۳-۱۳) - (۳-۱۵)، هم‌گرایی  $e_1$ ،  $e_2$  و  $e_3$  به سمت صفر معادل هم‌گرایی حالات سیستم حفاری به مقادیر مرجع محاسبه شده (۳-۹) - (۳-۱۱) می‌باشد که در نهایت منجر به رسیدن فشار ته‌چاهی (BHP) به مقدار مطلوبش می‌گردد. حال، با استفاده از مشتق معادلات (۳-۱۳) - (۳-۱۵)، فضای حالت<sup>۱</sup> مربوط به سیستم خطا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{e}_1 = -\frac{\beta_d}{v_d} (e_3) \quad (۳-۱۶)$$

$$\dot{e}_2 = \frac{\beta_a}{v_a} \left( e_3 - C_d A_0 \sqrt{\frac{2(e_2 + P_c^{ref} - P_0)}{\rho_a}} \cdot v \right) \quad (۳-۱۷)$$

$$\dot{e}_3 = \frac{1}{M} \left( e_1 - e_2 + \psi_a (|q_p| q_p - |e_3 + q_{bit}| (e_3 + q_{bit})) \right) \quad (۳-۱۸)$$

که در معادلات فوق،  $v$  ورودی کمکی کنترل<sup>۲</sup> در سیستم خطای معادل (۳-۱۶) - (۳-۱۸) بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$v = u_c - \frac{q_p + q_{bpp}}{\sqrt{(e_2 + P_c^{ref}) - P_0}} \quad (۳-۱۹)$$

واضح است که اگر سیگنال کمکی کنترل  $v$  به گونه‌ای تعیین شود که بردار حالت کمکی  $[e_1 \ e_2 \ e_3]^T$  به سمت مبدأ هم‌گرا شود، متغیرهای حالت سیستم اصلی  $P_c$ ،  $P_p$  و  $q_{bit}$  به سمت مقدار مرجع خود هم‌گرا خواهند شد؛ و در نتیجه، فشار ته‌چاهی  $P_{bh}$  به سمت مقدار مورد نظر  $P_{bh}^{ref}$  می‌رود.

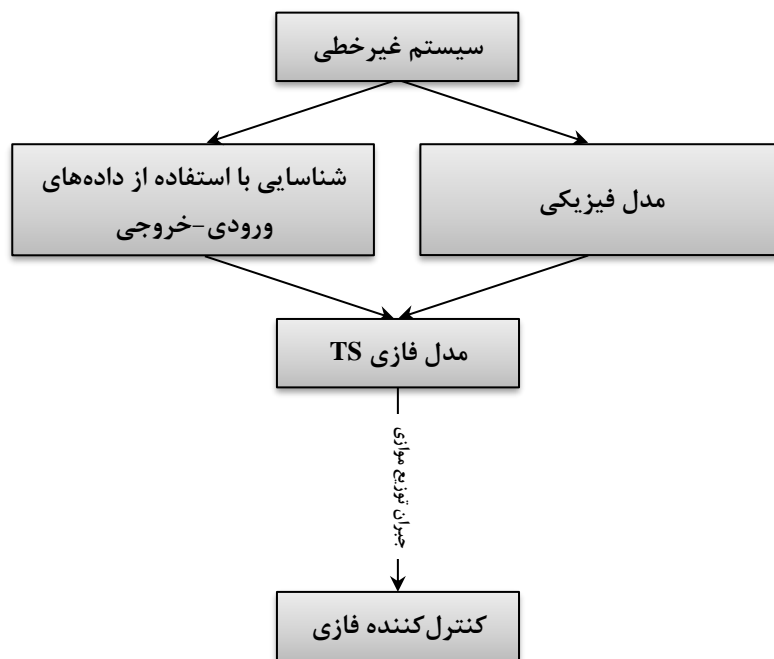
همچنین، باید توجه داشت که وقتی مسیر به نقطه تعادل هم‌گرا می‌شود، قسمت دوم از بخش سمت راست معادله (۳-۱۹) معادل  $u_c^{ref}$  می‌باشد. همچنین، سیستم خطای استخراج شده (۳-۱۶) - (۳-۱۸) نیز غیرخطی است.

<sup>1</sup> State space

<sup>2</sup> Auxiliary control input

### ۳-۴- مدل سازی TS فازی سیستم خطا

همان گونه که در قسمت مقدمه توضیح داده شده است، روش ساده طراحی کنترل برای سیستم های غیرخطی پیچیده می باشد. برای حل این مسئله، محققان معمولاً از رویکرد مدل سازی TS به منظور تسهیل این روش استفاده می کنند. این رویکرد یک سیستم غیرخطی پیچیده را با استفاده از مدل فازی Takagi-Sugeno به عنوان مجموعه ای از زیرمدل های<sup>۱</sup> خطی محلی نشان می دهد که از توصیف خطی محلی سیستم در بخش تالی هر قاعده استفاده می کند. همچنین به منظور ساخت مدل های فازی، محققان معمولاً غیرخطی بخش محلی<sup>۲</sup>، تقریب محلی<sup>۳</sup> و یا ترکیبی از آنها را به کار می گیرند.



شکل ۳-۴: طراحی کنترل فازی مبتنی بر مدل

تکنیک تقریب محلی مولفه های غیرخطی را با عبارات خطی انتخاب شده، به صورت استراتژیک تقریب می زند. اگرچه محصول این تکنیک یک مدل فازی با تعداد کمی از قواعد است، اما ایجاد قواعد کنترلی و انجام تحلیل پایداری مبتنی بر مدل فازی تقریب زده شده ممکن است پایداری سیستم های غیرخطی اصلی را تحت چنین

<sup>1</sup> Sub-models

<sup>2</sup> Local Sector Nonlinearity (LSN)

<sup>3</sup> Local approximation

قواعد کنترلی تضمین نکند. بنابراین، این مطالعه از LSN برای تشکیل یک مدل دقیق فازی TS استفاده می‌کند. در روش LSN، هرچه کران‌ها واقع‌گرایانه‌تر باشند، محافظه‌کاری روش مورد نظر کم‌تر می‌گردد. ایده اصلی و در عین حال ساده این است که قسمت‌های غیرخطی را به عنوان ترکیبی خطی از حدود بالا و پایین آن‌ها توسط توابع عضویت مشخصی بیان کنیم. بر این اساس، مدل فازی TS سیستم خطای معرفی شده (۱۶-۳)-(۱۸-۳) به صورت زیر می‌باشد؛

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } Z_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } Z_2 \text{ is } A_{21} \text{ THEN } \dot{e} = A_1 e + B_1 v \\
 & \text{IF } Z_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } Z_2 \text{ is } A_{22} \text{ THEN } \dot{e} = A_2 e + B_2 v \\
 & \text{IF } Z_1 \text{ is } A_{12} \text{ and } Z_2 \text{ is } A_{21} \text{ THEN } \dot{e} = A_3 e + B_3 v \\
 & \text{IF } Z_1 \text{ is } A_{12} \text{ and } Z_2 \text{ is } A_{22} \text{ THEN } \dot{e} = A_4 e + B_4 v
 \end{aligned} \tag{۲۰-۳}$$

که در آن  $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$  بوده و متغیرهای مقدماتی  $Z_1$  و  $Z_2$  عبارات غیرخطی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{2(e_2 + P_{bh}^{ref} - \psi_a \cdot |q_p| \cdot q_p - \rho_a g h_t - P_0)}{\rho_a}} \tag{۲۱-۳}$$

$$Z_2 = \frac{|q_p| q_p - |e_3 + q_p| (e_3 + q_p)}{e_3} \tag{۲۲-۳}$$

و همچنین  $A$  و  $B$  ماتریس‌های مشخصی هستند که از خطی‌سازی مبتنی بر بسط تیلور سیستم غیرخطی حفاری (۳-۳)-(۵-۳) به دست می‌آیند و به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$A_1 = A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\beta_d}{v_d} \\ 0 & 0 & \frac{\beta_a}{v_a} \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} & \frac{1}{M} \psi_a \overline{Z_2} \end{bmatrix}, \quad A_2 = A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\beta_d}{v_d} \\ 0 & 0 & \frac{\beta_a}{v_a} \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} & \frac{1}{M} \psi_a \overline{Z_2} \end{bmatrix} \tag{۲۳-۳}$$

<sup>1</sup> Premise variables

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\beta_a}{v_a} \gamma \bar{z}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_3 = B_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\beta_a}{v_a} \gamma \underline{z}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

عموما تابع عضویت<sup>۱</sup> به عنوان یک منحنی تعریف می‌شود که نحوه نگاشت هر نقطه در فضای ورودی را با مقدار عضویت (یا درجه عضویت) بین ۰ و ۱ مشخص می‌کند. پارامترهای  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$  و  $A_{22}$  توابع عضویت هستند که به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$A_{11} = \frac{z_1 - \underline{z}_1}{\bar{z}_1 - \underline{z}_1}, \quad A_{12} = \frac{\bar{z}_1 - z_1}{\bar{z}_1 - \underline{z}_1}, \quad A_{21} = \frac{z_2 - \underline{z}_2}{\bar{z}_2 - \underline{z}_2}, \quad A_{22} = \frac{\bar{z}_2 - z_2}{\bar{z}_2 - \underline{z}_2}, \quad (25-3)$$

که در معادله فوق کران‌های بالا و پایین عبارات غیر خطی  $Z_1$  و  $Z_2$  عبارت‌اند از:

$$\bar{z}_1 = \max_{e \in \Omega} Z_1, \quad \underline{z}_1 = \min_{e \in \Omega} Z_1, \quad \bar{z}_2 = \max_{e \in \Omega} Z_2, \quad \underline{z}_2 = \min_{e \in \Omega} Z_2. \quad (26-3)$$

در رابطه (۲۶-۳)، پارامتر  $\Omega$  ناحیه اعتباری است که از طریق محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی سیستم تعیین می‌شود. به عنوان مثال، متغیر حالت  $P_p$  در محدوده مشخص شده توسط خواص فیزیکی و سخت‌افزاری پمپ اصلی تغییر می‌کند. در نتیجه متغیر  $e_1 = P_p - P_p^{ref}$  نمی‌تواند دارای دامنه بی‌نهایت باشد.

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شده، ساختار متعارف یک سیستم فازی از چهار جزء فازی ساز، موتور استنتاج فازی، پایگاه دانش و نا فازی ساز تشکیل شده است. موتور استنتاج حاصل ضرب<sup>۲</sup> با استفاده از منطق فازی، نگاشت از یک ورودی داده شده به یک خروجی را فرموله می‌کند و تاثیر بخش تالی هر قاعده بر وزن‌های خروجی نهایی فازی، به اندازه میزان عضویت مقادیر ورودی در قسمت مقدماتی همان قاعده می‌باشد.

از آن جا که داده‌های عددی به عنوان خروجی سیستم فازی مورد نیاز می‌باشند، روش‌های نا فازی ساز داده‌های واضح<sup>۳</sup> را به مجموعه خروجی فازی نهایی اختصاص می‌دهند.

<sup>1</sup> Membership Function (MF)

<sup>2</sup> Product inference engine

<sup>3</sup> Crisp data

با به کارگیری فازی ساز تکین<sup>۱</sup> (که در آن، در هر نقطه از زمان فقط مقادیر ورودی فعلی، نه حتی مقادیر نزدیک به آن‌ها، نقش موثری در محاسبات خروجی ایفا می‌کند)، استنتاج حاصل ضرب و نا فازی ساز میانگین وزنی<sup>۲</sup> و با در نظر گرفتن موارد زیر؛

$$A_{11} + A_{12} = 1, A_{21} + A_{22} = 1, \quad (27-3)$$

$$Z_1 = A_{11}(\overline{Z_1}) + A_{12}(\underline{Z_1}), Z_2 = A_{21}(\overline{Z_2}) + A_{22}(\underline{Z_2}), \quad (28-3)$$

نگاشت ورودی/ خروجی سیستم فازی (۲۰-۳) دقیقاً مشابه مدل خطای غیرخطی (۱۶-۳)-(۱۸-۳) می‌باشد. بنابراین، کنترل کننده برای مدل فازی (۲۰-۳) می‌تواند سیستم خطا (۱۶-۳)-(۱۸-۳) را نیز پایدار سازد. در بخش بعدی، روند طراحی چنین کنترل کننده‌ای به طور کامل تشریح می‌گردد.

### ۳-۵- طراحی کنترل کننده فازی

با استفاده از طرح مدل‌سازی فازی TS، یک سیستم غیرخطی پیچیده را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از مدل‌های خطی محلی نشان داد.

$$\text{Rule } l : \text{ IF } Z_1(t) \text{ is } A_{1l} \text{ and } \dots \text{ and } Z_q(t) \text{ is } A_{jl} \text{ THEN } \dot{e}(t) = A_l e(t) + B_l v(t) \quad (29-3)$$

جایی که  $e = [e_1, \dots, e_n]^T \in \mathbb{R}^n$  بردار حالت است و  $v \in \mathbb{R}^m$  ورودی کنترل را نشان می‌دهد. علاوه بر این،  $l = 1, 2, \dots, r$  نشان دهنده عدد قاعده بوده و  $r$  به تعداد مدل‌های خطی محلی اشاره دارد. از طرف دیگر،  $Z_1(t), \dots, Z_q(t)$  متغیرهای مقدماتی بوده که تعداد آن‌ها با  $q$  تعیین می‌شود. در قاعده  $l$ م، تابع عضویت متغیر مقدماتی  $Z_j(t)$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ ) توسط مجموعه فازی  $A_{jl}$  داده می‌شود.

$A_l$  و  $B_l$  نیز همان‌طور که اشاره شد، ماتریس‌های مشخص و شناخته شده‌ای می‌باشند.

<sup>1</sup> Singleton fuzzifier

<sup>2</sup> Weighted average defuzzifier

نگاشت ورودی/ خروجی (۳-۲۹) را می توان با استفاده از فازی ساز تکین، استنتاج حاصل ضرب و نا فازی ساز میانگین وزنی به صورت زیر نوشت:

$$\dot{e} = \sum_{l=1}^r h_l(\mathfrak{Z}(t))(A_l e(t) + B_l v(t)) \quad (30-3)$$

جایی که؛

$$\mathfrak{Z}(t) = [Z_1(t), \dots, Z_q(t)]^T \quad (31-3)$$

$$\mu_l(\mathfrak{Z}(t)) = \prod_{j=1}^q A_{jl}(Z_j(t)) \quad (32-3)$$

$$h_l(\mathfrak{Z}(t)) = \mu_l(\mathfrak{Z}(t)) / \sum_{k=1}^r \mu_k(\mathfrak{Z}(t)) \quad (33-3)$$

و شرایط زیر برای تمامی  $t \geq 0$  برقرار می باشند:

$$\mu_l(\mathfrak{Z}(t)) \geq 0, \sum_{l=1}^r \mu_l(\mathfrak{Z}(t)) > 0$$

$$h_l(\mathfrak{Z}(t)) \geq 0, \sum_{l=1}^r h_l(\mathfrak{Z}(t)) = 1$$

در ادامه، از این پس به منظور سادگی به جای  $h_l(\mathfrak{Z}(t))$  از  $h_l$  استفاده می شود. در این مرحله، بر اساس ایده جبران توزیع موازی (Tanaka et al., 1996)، قانون کنترل  $v(t)$  به عنوان مجموعه ای از کنترل کننده های بازخورد حالت محلی انتخاب می گردد؛

$$\text{Rule } l : \text{ IF } Z_1(t) \text{ is } A_{1l} \text{ and } \dots \text{ and } Z_q(t) \text{ is } A_{jl} \text{ THEN } v(t) = K_l e(t) \quad (34-3)$$

که در آن ماتریس بهره<sup>۱</sup>  $K_l \in \mathbb{R}^{m \times n}$  شناخته شده است. همان گونه که پیش تر نگاشت (۳-۳۰) استخراج شد، سیگنال کنترل فازی (۳-۳۴) نیز می تواند به طور مشابه به صورت زیر استنباط گردد؛

---

<sup>1</sup> Gain matrix

$$v(t) = \sum_{l=1}^r h_l K_l e(t) \quad (35-3)$$

حال با جای گذاری (35-3) در (30-3)، حلقه بسته سیستم به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{e} = \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r h_l h_k (A_l + B_l K_k) e(t) \quad (36-3)$$

در معادله (36-3)، ضرایب بازخورد  $K_k$  ( $k = 1, 2, \dots, r$ ) باید به گونه ای ایجاد شود که سیستم حلقه بسته پایدار بوده و محدودیت های فیزیکی / عملیاتی برآورده شوند. به منظور تضمین مسائل فیزیکی / عملیاتی، معیارهای پایداری باید به گونه ای بیان شوند که مسیر حالت در تمامی زمان ها در ناحیه اعتبار  $\Omega$  باقی بماند. از سوی دیگر، به کارگیری تکنیک لیاپانوف درجه دوم<sup>1</sup> به منظور استخراج معیارها در LMI ها روشی رایج و مرسوم می باشد. در صورت عملی و امکان پذیر بودن<sup>2</sup> LMI ها، راه حل منحصر به فرد آن ها با روش های عددی ساده قابل محاسبه است.

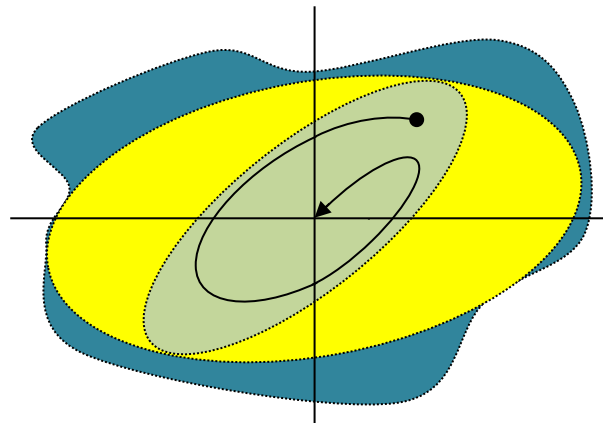
مفهوم بنیادی روش لیاپانوف برای به دست آوردن LMI این است که تمام محدودیت ها باید به صورت درجه دوم ارائه شوند. بنابراین، این مطالعه به دنبال بزرگ ترین بیضی گون<sup>3</sup>  $B_\Omega = \{e \in \Omega | e^T Q e \leq 1\} \subseteq \Omega$  می باشد که در آن  $Q$  یک ماتریس مثبت معین<sup>4</sup> شناخته شده است. هدف این است که هر مسیری که از  $B_\Omega$  شروع می شود در آن باقی مانده و یا زیرمجموعه ای از  $B_\Omega$  را که ملزومات باقی ماندن را برآورده می کند، شناسایی شود (شکل 3-4).

<sup>1</sup> Quadratic Lyapunov

<sup>2</sup> Feasibility

<sup>3</sup> Ellipsoid

<sup>4</sup> Positive definite matrix



Region of validity ( $\Omega$ ):   
 Largest ellipsoid within the  $\Omega$  ( $B_0$ ):   
 Region of attraction ( $\xi(P, 1)$ ):

شکل ۳-۴: ناحیه اعتبار، بزرگترین بیضی گون درون  $\Omega$  و ناحیه جذب

هر مسیری که از ناحیه جذب (Region of attraction) شروع می‌شود، هرگز در طول هم‌گرایی به مبدأ آن را ترک نمی‌کند. از آنجا که این ناحیه زیر مجموعه‌ای از ناحیه اعتبار است، مسائل فیزیکی/ عملیاتی برآورده شده‌اند.

در مجموع، به منظور توسعه ایده کنترل فشار ته چاه در تکنیک CBHP از حفاری MPD، با فرضیات در نظر گرفته شده برای سیستم مطالعاتی و با رعایت اصول علوم حفاری با فشار مدیریت شده و کنترل فازی، سیستم معادلی با هدف هم‌گرا کردن خطاهای سیستم اصلی به سمت صفر و رساندن فشار ته‌چاهی به مقدار مطلوب و از پیش تعیین شده خود، توسط رویکرد فازی TS مدل‌سازی شد. به منظور دست یافتن به این مهم، کنترل‌کننده‌ای فازی برای این سیستم طراحی شد و در بخش‌های بعدی این فصل، پایداری روش پیشنهادی مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳-۶- قضیه پایداری (۱)

در جبر خطی، بردار ویژه<sup>۱</sup> یک تبدیل خطی ( $v$ )، برداری غیر صفر است که وقتی تبدیل خطی بر روی آن اعمال شود، حاصل برابر اسکالری ضرب در آن بردار خواهد بود (این کار باعث تغییر مقیاس، یا تغییر اندازه

<sup>۱</sup> Eigenvector

بردار می‌شود، ولی جهت آن را تغییر نمی‌دهد). همچنین مقدار ویژه<sup>۱</sup> متناظر با یک بردار ویژه که اغلب به صورت  $\lambda$  نشان داده می‌شود، همان اسکالری است که در توصیف بردار ویژه ضرب شد. به عبارت دیگر؛

$$Av = \lambda v \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix}$$

که در آن  $A$  ماتریسی مربعی می‌باشد. مقادیر ویژه از طریق برابر با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس  $A - \lambda I$  به دست آمده، و متناظر با این مقادیر می‌توان بردارهای ویژه را نیز محاسبه کرد. حال اگر ماتریسی متقارن وجود داشته باشد که تمامی مقادیر ویژه آن مثبت باشد، به آن ماتریس مثبت معین<sup>۲</sup> می‌گویند.

فرض کنید که یک ماتریس مثبت معین متقارن  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$  و همچنین  $W_l \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ،  $l = 1, 2, \dots, r$  وجود دارد؛ به طوری که LMIهای زیر نیز برقرار می‌باشند:

$$XA_l^T + A_l X + W_l^T B_l^T + B_l W_l \leq 0, \quad 1 \leq l \leq r \quad (37-3)$$

$$X(A_l^T + A_k^T) + (A_l + A_k)X + W_k^T B_l^T + B_l W_k + W_l^T B_k^T + B_k W_l \leq 0, \quad 1 \leq l < k \leq r \quad (38-3)$$

$$X \leq Q^{-1} \quad (39-3)$$

در صورت برقراری نابرابرهای ماتریس خطی (37-3)-(39-3)، سیستم حلقه بسته (36-3) تحت قانون کنترل فازی (34-3) با  $K_l = W_l X^{-1}$  به مبدأ هم‌گرا می‌گردد. در همان زمان، مسیرهای حالت در داخل بیضی‌گون  $B_\Omega = \{e \in \mathbb{R}^n | e^T Q e \leq 1\}$  باقی می‌مانند که در آن  $Q$  یک ماتریس مثبت معین شناخته شده برای تمامی شرایط اولیه که از آن شروع می‌شوند، می‌باشد.

<sup>1</sup> Eigenvalue

<sup>2</sup> Positive definite matrix

### ۳-۶-۱- اثبات قضیه پایداری (۱)

با در نظر گرفتن لیاپانوف درجه دوم شناخته شده  $V = e^T P e$ ؛ که در آن  $P > 0$  یک ماتریس مثبت معین و  $e$  بردار حالت سیستم (ماتریسی ستونی متشکل از متغیرهای حالت سیستم) است، می توان مشتق آن را به صورت عبارت زیر نوشت:

$$\dot{V} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} = \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r h_l h_k e^T M_{lk} e \quad (۴۰-۳)$$

جایی که  $M_{lk} = A_l^T P + P A_l + K_k^T B_l^T P + P B_l K_k$  می باشد.

برای داشتن یک سیستم پایدار از نظر مفهوم لیاپانوف،  $\dot{V}$  (مشتق لیاپانوف درجه دوم) باید منفی باشد. با توجه به (Zhang et al., 2011) و (Elias et al., 2021)، اگر شرایط زیر به طور همزمان برقرار باشند  $\dot{V} < 0$  ایجاد می شود؛

$$M_{ll} \leq 0, \quad 1 \leq l \leq r \quad (۴۱-۳)$$

$$M_{lk} + M_{kl} \leq 0, \quad 1 \leq l < k \leq r \quad (۴۲-۳)$$

با ضرب قبل و بعد معادله (۴۱-۳) در عبارت  $X = P^{-1}$ ، معادله (۳۷-۳) تولید می شود که در آن عبارت  $W_l = K_l P^{-1} = K_l X$  است. به همین ترتیب، با استفاده از (۴۲-۳)، معادله (۳۸-۳) به دست می آید. مطابق با (۳۷-۳) و (۳۸-۳)، هر مسیر حالتی که از  $\xi(P, 1) = \{e \in \mathbb{R}^n | e^T P e \leq 1\}$  شروع می شود به مبدأ هم گرا شده و در این ناحیه باقی می ماند. به منظور اطمینان از محدودیت های فیزیکی / عملیاتی،  $\xi(P, 1)$  باید درون  $B_\Omega$  باشد. یعنی؛

$$\xi(P, 1) \subseteq B_\Omega = \{e \in \mathbb{R}^n | e^T Q e \leq 1\} \quad (۴۳-۳)$$

□ اگر  $X = P^{-1} \leq Q^{-1}$  باشد شرط (۴۳-۳) برقرار شده و این، اثبات را تکمیل می کند.

### ۳-۶-۲- تبصره

بیضی گون  $\xi(P, 1)$  با حل LMI های بیان شده در قضیه پایداری (۱) طوری به دست می آید که تمامی مسیرهای حالتی که از این ناحیه شروع می شوند، در داخل آن باقی مانده و به سمت مبدأ هم گرا شوند. این بیضی گون باید به حداکثر اندازه خود برسد تا نقاط بیش تری را در ناحیه اعتبار پوشش دهد. بنابراین، در این مطالعه به منظور به حداکثر رساندن ناحیه جذب از مسئله بهینه سازی زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \min: & -\log \det(X) \\ \text{s. t.} & (35) - (37), X > 0 \end{aligned} \quad (44-3)$$

دستور حداقل کردن دترمینان ماتریس  $X$  مسئله ای غیر محدب است (عدم وجود راه حل یکتا برای حل LMI) که با حداقل کردن حاصل ضرب مقادیر ویژه آن ماتریس، حداکثر اندازه بیضی گون  $\xi(P, 1)$  را به وجود می آورد.

### ۳-۷- اشباع محرک

به طور کلی، اشباع سیگنال کنترل یکی از محدودیت های فیزیکی / عملیاتی در فرآیندهای صنعتی است. بر خلاف این که عدم اشباع محرک در کنار قابلیت های کنترل فازی، سرعت هم گرایی بیش تری را به دنبال خواهد داشت، در صورت وقوع اشباع محرک در یک سیستم، ریسک ناپایداری آن سیستم همراه با آسیب های سخت افزاری افزایش می یابد. در نتیجه، الزامات پایداری باید به گونه ای نوشته و در نظر گرفته شوند که دامنه سیگنال کنترل در محدوده قابل قبولی قرار گیرد. به منظور بیان شرایط مورد نیاز به صورت LMI، محدود کردن نرم اقلیدسی<sup>۱</sup> (جذر مجموع مربع های ریشه های بردار) سیگنال کنترل عملی رایج و مرسوم می باشد. به عنوان مثال، در فرآیند حفاری با فشار ته چاهی ثابت (۳-۳)-(۳-۵) سیگنال کنترل  $u_c$  باید متعلق به بازه  $[0, 1]$  باشد. بنابراین، در سیستم خطا (۳-۱۶)-(۳-۱۸) ورودی کمکی کنترل  $v = u_c - u_c^{ref}$  باید مقادیری بین  $-u_c^{ref}$  و  $1 - u_c^{ref}$  داشته باشد.

<sup>1</sup> Euclidean norm

این شرط از محدوده عملکرد سیگنال کنترل سیستم حفاری زمانی برقرار است که  $\|v\|_2^2 \leq \alpha^2$  باشد؛ که در آن  $\alpha = \min\{u_c^{ref}, 1 - u_c^{ref}\}$  می‌باشد. در بخش بعدی، معیارهای پایداری به گونه‌ای بازنگری می‌شوند که نه تنها الزامات قضیه پایداری (۱) برقرار می‌گردد، بلکه کران‌داری نرم<sup>۱</sup> سیگنال کنترل ( $\|v\|_2^2 \leq \alpha^2$ ) نیز در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۸- قضیه پایداری (۲)

ماتریس مثبت معین متقارن  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$  و ماتریس‌های  $W_l \in \mathbb{R}^{m \times n}$  که  $l = 1, 2, \dots, r$  را به گونه‌ای در نظر بگیرید که (۳۷-۳)-(۳۹-۳) و LMI‌های زیر برقرار باشند:

$$\begin{bmatrix} \alpha^2 X & W_l^T \\ W_l & I \end{bmatrix} \geq 0, \quad 1 \leq l \leq r \quad (45-3)$$

$$\begin{bmatrix} 2\alpha^2 X & (W_l + W_k)^T \\ W_l + W_k & I \end{bmatrix} \geq 0, \quad 1 \leq l < k \leq r \quad (46-3)$$

با حل مسئله بهینه‌سازی زیر، سیستم حلقه بسته (۳۶-۳) تحت قانون کنترل فازی (۳۴-۳) با  $K_l = W_l X^{-1}$ ، در عین حال که مسیرهای حالت در داخل بیضی‌گون  $(X^{-1}, 1)$  برای تمامی شرایط اولیه که از آن شروع می‌شود باقی می‌ماند، به مبدأ نیز هم‌گرا می‌گردد (اطلاعات بیشتر در (Nguyen et al., 2021)):

$$\begin{aligned} \min: & -\log \det(X) \\ \text{s. t.} & (35) - (37), (43) - (44), X > 0 \end{aligned} \quad (47-3)$$

به علاوه، این مسئله اشباع محرک را طوری تضمین می‌کند که  $\|v\|_2^2 = v^T v \leq \alpha^2$  می‌باشد و  $\alpha$  یک اسکالر مثبت واقعی است.

<sup>۱</sup> Norm-boundedness

### ۳-۸-۱- اثبات قضیه پایداری (۲)

با در نظر گرفتن معادله (۳-۳۵) داریم:

$$\|v\|_2^2 = v^T v = \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r h_l h_k e^T (K_l^T K_k) e \quad (۴۸-۳)$$

مطابق با قضیه پایداری (۱)، هر مسیر حالتی که از  $\xi(P, 1)$  شروع می‌شود در داخل آن باقی می‌ماند. بنابراین؛

$$e^T P e < 1, \quad \forall t > 0$$

در نتیجه، در نظر گرفتن  $v^T v \leq \alpha^2 e^T P e$ ، نرم کران دار سیگنال کنترل  $v$  را تضمین می‌کند؛ به گونه‌ای که

$$v^T v \leq \alpha^2 \text{ به عبارت دیگر:}$$

$$\sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r h_l h_k e^T (K_l^T K_k) e \leq \alpha^2 e^T P e \quad (۴۹-۳)$$

یا

$$\sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r h_l h_k e^T (K_l^T K_k - \alpha^2 P) e \leq 0 \quad (۵۰-۳)$$

مطابق با (Zhang et al., 2011)، اگر شرایط زیر برقرار باشند معادلات فوق محقق می‌شوند:

$$K_l^T K_l - \alpha^2 P \leq 0, \quad 1 \leq l \leq r \quad (۵۱-۳)$$

$$K_l^T K_k + K_k^T K_l - 2\alpha^2 P \leq 0, \quad 1 \leq l < k \leq r \quad (۵۲-۳)$$

مکمل‌های شور<sup>۱</sup> بلوک‌های یک ماتریس مثبت معین متقارن را به بلوک‌های متناظر معکوس آن مرتبط می‌کند

(Santos et al., 2020). فرض کنید که  $F$  یک تابع Affine است (متشکل از یک تابع خطی و یک ثابت) که

توسط رابطه زیر جزءبندی شده است؛

<sup>۱</sup> Schur complements

$$F(X) = \begin{pmatrix} F_{11}(X) & F_{12}(X) \\ F_{21}(X) & F_{22}(X) \end{pmatrix}$$

جایی که در آن  $F_{11}(X)$  و  $F_{22}(X)$  مربع هستند. مطابق با (Poznyak et al., 2014)، جملات زیر معادل هستند:

$$F(X) < 0 \quad (53-3)$$

$$\begin{cases} F_{22}(X) < 0 \\ F_{11}(X) - F_{12}(X)[F_{22}(X)]^{-1}F_{21}(X) < 0 \end{cases} \quad (54-3)$$

جزئیات بیشتر در مورد مکمل شور را می توان در (Matyas et al., 2020) و (Santos et al., 2020) یافت. حال با ضرب کردن  $P = X^{-1}$  در قبل و بعد مکمل شور معادله (3-45)، معادله (3-51) حاصل می شود. به طور مشابه، می توان از معادله (3-46) نیز نتیجه زیر را به دست آورد؛

$$2\alpha^2 P - (K_l + K_k)^T (K_l + K_k) \geq 0 \quad (55-3)$$

که معادل است با:

$$2\alpha^2 P - K_l^T K_k - K_k^T K_l \geq K_l^T K_l + K_k^T K_k \geq 0 \quad (56-3)$$

جایی که  $K_l^T K_l$  و  $K_k^T K_k$  مثبت معین متقارن می باشند. بنابراین، اگر (3-46) برقرار باشد، معادله (3-52) تحقق یافته و در نهایت، برقراری همزمان (3-51) و (3-52) منجر به تضمین  $\|v\|_2^2 \leq \alpha^2$  می گردد. □

همان طور که در فصول ابتدایی به آن اشاره شد، هدف از این مطالعه رساندن فشار ته چاهی به مقدار مطلوبش می باشد؛ اما تنها رساندن این فشار به آن نقطه مطلوب و مورد نظر نیست و باید در عمق در نظر گرفته شده، فشار در آن نقطه باقی بماند و سیستم پایدار گردد.

از آن جا که ماندن مسیرهای حالت درون بیضی گون  $B_\Omega$  و هم گرایی سیستم حلقه بسته به سمت مبدأ مسئله ای مهم در پایداری سیستم است، مسئله ای بهینه سازی و شرایطی برای منفی شدن مشتق تابع لیاپانوف درجه دوم نوشته شده است که در صورت برقرار بودن، سیستم پایدار می گردد. در بخش بعدی، نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی ارائه می گردد.

### ۳-۹- نتایج شبیه‌سازی

به منظور انجام شبیه‌سازی کنترل فازی پیشنهادی در CBHP، چاهی که مقادیر اسمی پارامترهای آن در جدول ۳-۲ آمده است، در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، در این مطالعه در عمق 1990.99 متری یک پنجره فشار فرضی در نظر گرفته شده است که در آن حداقل و حداکثر فشار ته‌چاهی مجاز به ترتیب برابر با  $2.90 \times 10^7 \text{ pa}$  و  $3.10 \times 10^7 \text{ pa}$  می‌باشد. بنابراین، انتخابی هوشمند برای مقدار مرجع BHP می‌تواند  $P_{bh}^{ref} = 3.00 \times 10^7 \text{ pa}$  باشد تا حداکثر فاصله را از فشار منفذی و فشار شکست داشته باشد.

جدول ۳-۲: مقادیر استفاده شده برای پارامترهای موجود در مطالعات شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار اسمی	پارامتر	مقدار اسمی
$P_0$	$(\text{pa})10^5$	$\beta_a$	$14 \times 10^8 \text{ (pa)}$
$h_t$	1990.99 (m)	$\beta_d$	$(\text{pa})3 \times 10^9$
$C_d$	0.6	$A_0$	0.0020 (m <sup>2</sup> )
$\rho_a$	1500 (kg. m <sup>-3</sup> )	$\rho_d$	1420 (kg. m <sup>-3</sup> )
$V_a$	79.9 (m <sup>3</sup> )	$V_d$	18.5243 (m <sup>3</sup> )
$M$	$4 \times 10^5 \text{ (kg. m}^{-4}\text{)}$		

مطابق با معادلات (۳-۹)-(۳-۱۲)، زمانی که عملیات تنظیم فشار موفقیت‌آمیز باشد مقادیر مرجع برای حالات سیستم حفاری (۳-۳)-(۳-۵) به شرح زیر می‌باشند:

جدول ۳-۳: مقادیر مرجع برای حالات سیستم حفاری

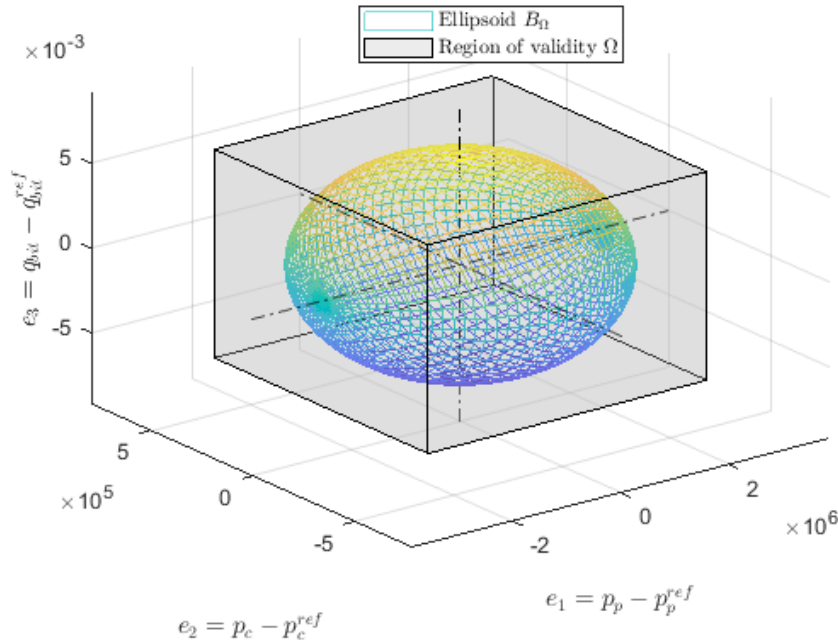
$P_p^{ref}$	$P_c^{ref}$	$q_{bit}^{ref}$	$u_c^{ref}$
$2.5799 \times 10^6 \text{ pa}$	$6.2402 \times 10^5 \text{ pa}$	$0.0062 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.1939

در این مطالعه فرض شده است که فشار پمپ اصلی  $P_p$  بنا به دلیل محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی در طول عملیات حفاری نمی‌تواند منفی باشد. از این رو، کران پایین  $e_1 = P_p - P_p^{ref}$  برابر با  $-P_p^{ref}$  می‌باشد.

از طرف دیگر، با توجه به ماهیت متقارن رویکرد بیضی‌گون به کار گرفته شده در این مطالعه، کران بالای  $e_1$  به عنوان  $P_p^{ref}$  انتخاب شده است. باید توجه داشت که اگر پمپ اصلی نتواند حداکثر فشار  $2P_p^{ref}$  را تأمین کند، این حد بالایی کوچک‌تر می‌شود. با این حال، فرض شده است که پمپ اصلی می‌تواند با موفقیت حداکثر فشار  $2P_p^{ref}$  را به سیستم ارائه دهد. به طور مشابه، کران‌های  $e_2$  و  $e_3$  تعریف شده‌اند. به طور خلاصه؛

$$e_1 \in [-P_p^{ref}, P_p^{ref}], e_2 \in [-P_c^{ref}, P_c^{ref}], e_3 \in [-q_{bit}^{ref}, q_{bit}^{ref}] \quad (57-3)$$

با توجه به معادله فشار ته‌چاهی (3-8) و کران‌های معرفی شده در (3-57)، مقدار فشار ته‌چاهی BHP متعلق به بازه  $[2.975 \times 10^7, 3.086 \times 10^7] \text{ pa}$  می‌گردد که دقیقاً در محدوده مجاز تعریف شده توسط پنجره فشار در نظر گرفته شده، می‌باشد. بنابراین، ناحیه اعتبار  $\Omega$  برای سیستم حفاری (3-3)-(3-5) یک مکعب سه بعدی است که توسط کران‌های خطاهای تعریف شده در (3-57) احاطه شده است.



شکل 3-5: ناحیه اعتبار  $\Omega$  برای سیستم حفاری معرفی شده و بزرگترین بیضی‌گون  $B_\Omega$  مربوطه

به منظور استخراج شرایط پایداری سیستم پیشنهادی، همان‌طور که در شکل 3-5 مشاهده می‌شود، بیضی‌گون

$$B_\Omega = \xi(Q, 1) \subseteq \Omega \quad \text{نیز در نظر گرفته می‌شود که در آن } Q = \text{diag}(P_p^{ref}, P_c^{ref}, q_{bit}^{ref})^{-2} \text{ است.}$$

شایان ذکر است که اگر حداقل و حداکثر فشار احتمالی BHP محدودیت‌های فشارهای منفذی و فشار شکست را نقض کند، بیضی‌گون  $B_{\Omega}$  باید کاهش یابد که این مسئله بر فرآیند طراحی کنترل تأثیری نمی‌گذارد. با حل کردن مسئله بهینه‌سازی (۳-۴۷) که در آن  $\alpha = \min\{u_c^{ref}, 1 - u_c^{ref}\} = 0.1939$  می‌باشد، ماتریس مثبت معین  $P$  و همچنین ضرایب کنترل‌کننده فازی (۳-۳۴) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$P = \begin{bmatrix} 0.0983 & 0.0002 & -0.0006 \\ 0.0002 & 0.0366 & 0.0001 \\ -0.0006 & 0.0001 & 0.0265 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = [1.3924 \times 10^{-9} \quad 1.3650 \times 10^{-7} \quad -0.5388]$$

$$K_2 = [1.6018 \times 10^{-9} \quad 1.3654 \times 10^{-7} \quad -0.1868]$$

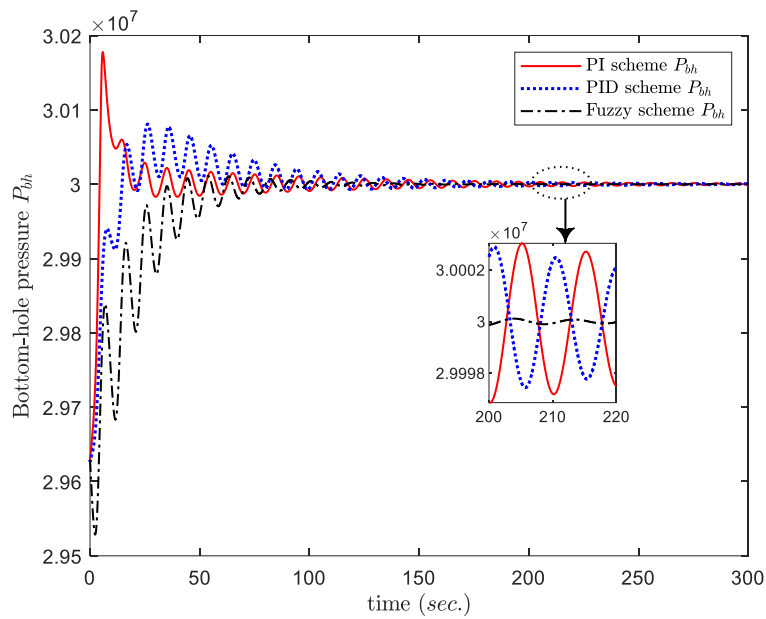
$$K_3 = [2.3695 \times 10^{-9} \quad 1.5970 \times 10^{-7} \quad -0.9682]$$

$$K_4 = [2.7660 \times 10^{-9} \quad 1.5976 \times 10^{-7} \quad -0.4303]$$

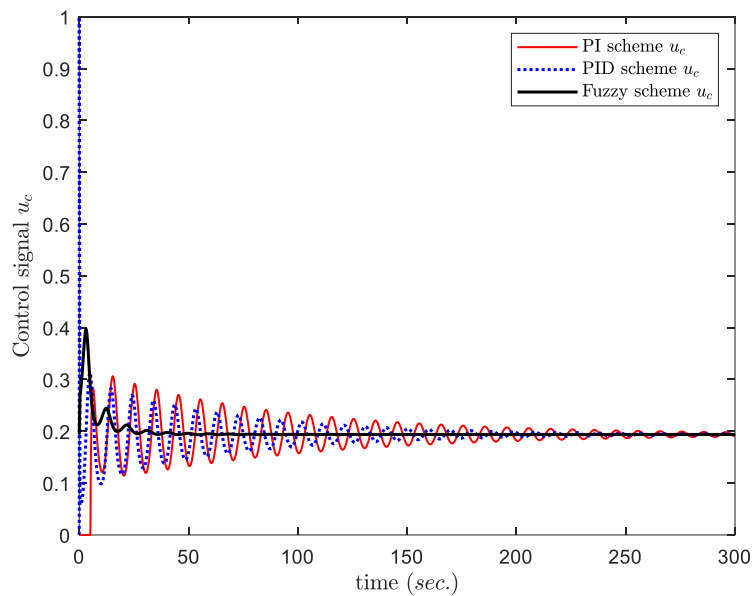
با شبیه‌سازی‌های انجام شده، اشکال ۳-۶ و ۳-۷ عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را در برابر کنترل‌کننده‌های PI و PID نشان می‌دهند که ضرایب آن‌ها با استفاده از جعبه ابزار PID Tuner در MATLAB R2020b، از طریق خطی‌سازی سیستم در اطراف نقطه تعادل به دست آمده و در جدول ۳-۴ نوشته شده است (در این شکل‌ها زمان اولیه  $t = 0$  مربوط به شروع حفاری در عمق مورد نظر می‌باشد).

جدول ۳-۴: ضرایب کنترل‌کننده‌های PI و PID در مطالعات شبیه‌سازی

PI control coefficients	PID control coefficients
$k_p = -3.8931 \times 10^{-6}$	$k_p = -4.5150 \times 10^{-6}$
$k_i = -6.7968 \times 10^{-7}$	$k_i = -1.6037 \times 10^{-7}$
	$k_d = -2.8243 \times 10^{-5}$



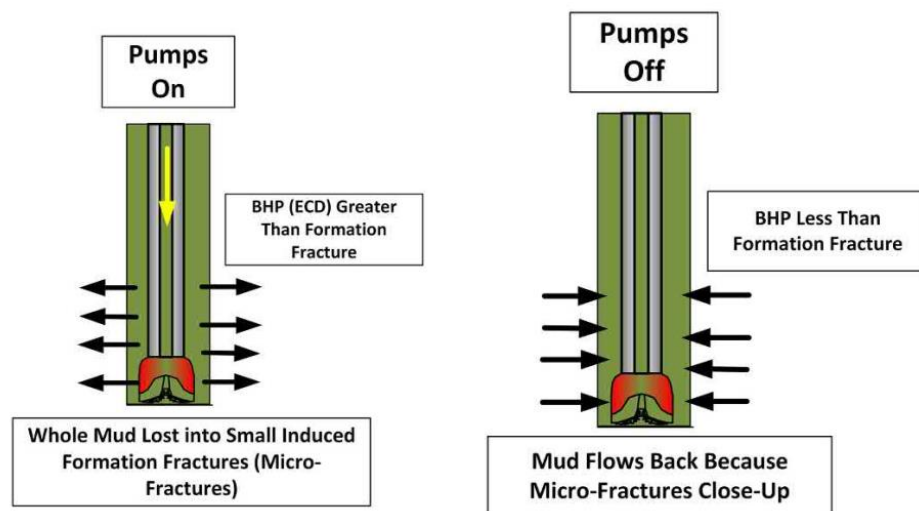
شکل ۳-۶: سیگنال فشار ته‌چاهی مبتنی بر کنترل فازی، PI و PID در حین عملیات حفاری



شکل ۳-۷: سیگنال کنترل بازشدگی چوک تولید شده توسط رویکرد فازی، PI و PID

با استفاده از کنترل PI، سیگنال کنترل برای یک بازه زمانی کوتاه در شروع عملیات حفاری به طور معکوس اشباع می‌شود و در نتیجه  $u_c = 0$  می‌شود. به طور مشابه، اشباع محرک هنگام استفاده از کنترل PID اتفاق می‌افتد که منجر به  $u_c = 1$  می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، کنترل‌کننده فازی بدون هیچ‌گونه بالازدگی<sup>۱</sup>، که به صورت فراتر رفتن یک سیگنال یا یک تابع از مقدار هدف تعریف می‌شود، BHP را سریع‌تر از کنترل‌کننده‌های PI و PID تنظیم می‌نماید. بالازدگی و نوسانات<sup>۲</sup> سیگنال فشار حفاری، بعضاً تأثیرات بسیار شدیدی بر عملیات حفاری می‌گذارد. نخست، نوسانات فشار به طور قابل توجهی باعث کاهش دقت سنسورهای ته‌چاهی می‌شود؛ بنابراین، فرآیندهای مازادی برای اصلاح داده‌های جمع‌آوری شده نادرست مورد نیاز است که طبیعتاً هزینه‌های حفاری را افزایش می‌دهد (Xue, 2020). دوم آن‌که، پدیده بادکردن چاه<sup>۳</sup> ممکن است زمانی اتفاق بیفتد که فشار در حین عملیات حفاری، به ویژه در پنجره‌های باریک فشاری، در نوسان باشد.



شکل ۳-۸: مکانیسم پدیده بادکردن چاه (Raabe and Jortner, 2021)

بادکردن چاه اصطلاحی است که برای شناسایی یک نوع نشانه نادرست از سیلان سیال سازندی استفاده می‌شود. عموماً زمانی که پمپ‌ها روشن هستند، در صورتی که چگالی معادل گردش (ECD) بیش‌تر از فشار شکست سازند شود شکستگی‌های ریزی<sup>۴</sup> تحت عنوان شکستگی‌های القایی<sup>۵</sup> در دیواره چاه به وجود می‌آیند که گل حفاری به درون آن‌ها دچار هرزروی می‌گردد.

<sup>1</sup> Overshoot  
<sup>2</sup> Fluctuations  
<sup>3</sup> Ballooning phenomenon  
<sup>4</sup> Micro fractures  
<sup>5</sup> Induced fractures

اگر چه این شکستگی‌های ریز نمی‌توانند موجب از دست رفتن شدید<sup>۱</sup> یا کلی<sup>۲</sup> گل حفاری شوند، اما می‌توانند با پخش و تکثیر شدن موجب کاهش حجم زیادی از گل گردند. در مقابل، زمانی که پمپ‌ها خاموش هستند، به دلیل کاهش APL چگالی معادل گردش کاهش می‌یابد، شکستگی‌های ریز ایجاد شده بسته می‌شوند و گل‌های حفاری قبلاً نفوذ کرده به درون چاه برمی‌گردند (Raabe and Jortner, 2021).

علاوه بر این که پدیده بادکردن چاه موجب شناسایی نشانه نادرستی از سیلان سیال سازندی می‌شود، برگشت جریان گل به چاه می‌تواند همراه با آب یا گاز سازندی نیز باشد که ممکن است باعث ایجاد چند فازی شدن سیال درون چاه شده و یا گل را به آب سازندی آلوده کند. نوسان فشار در ته چاه می‌تواند تأثیری مشابه با خاموش و روشن شدن پمپ‌ها و در نتیجه بیش‌تر و کم‌تر شدن ECD از فشار شکست سازند، داشته باشد و موجب وقوع پدیده بادکردن یا تنفس چاه<sup>۳</sup> شود. از طرف دیگر، ارتعاش محوری رشته حفاری<sup>۴</sup>، مچالگی چاه ناشی از خستگی رشته حفاری<sup>۵</sup> و گیر لوله از دیگر پدیده‌های ناشی از نوسانات فشار هستند. از آن‌جا که در حالت پایدار از حفاری مبتنی بر کنترل فازی، فشار ته‌چاهی دارای نوسانات کمتری نسبت به کنترل PI و PID می‌باشد، انتظار می‌رود که پدیده‌های خطرناک به ندرت رخ دهند یا رخ ندهند.

اگرچه اشباع محرک در طول تنظیم<sup>۶</sup> ضرایب PI در نظر گرفته می‌شود، اما از آن‌جایی که تفاوت بین  $P_{bh}$  و  $P_{bh}^{ref}$  برای زمان‌های اولیه حفاری قابل توجه است، سیگنال کنترل PI بریده<sup>۷</sup> می‌شود (شکل ۳-۷). به عبارت دیگر، در زمان بریده بودن سیگنال کنترل چوک بسته باقی می‌ماند و هیچ عمل کنترلی وجود ندارد.

به منظور جلوگیری از پدیده اشباع، در روش‌های کنترلی PI و PID باید یک ضریب تناسبی  $k_p$  کوچک‌تر انتخاب شود. در صورتی که این کار بر زمان نشست<sup>۸</sup> (زمان مورد نیاز برای رسیدن خروجی و ثابت ماندن در یک باند تلورانس معین) تأثیر منفی می‌گذارد و روند تنظیم BHP را طولانی‌تر می‌کند.

---

<sup>1</sup> Severe mud loss

<sup>2</sup> Total mud loss

<sup>3</sup> Wellbore breathing

<sup>4</sup> Drill-string axial vibration

<sup>5</sup> Drill-string fatigue

<sup>6</sup> Tuning

<sup>7</sup> Truncate

<sup>8</sup> Settling time

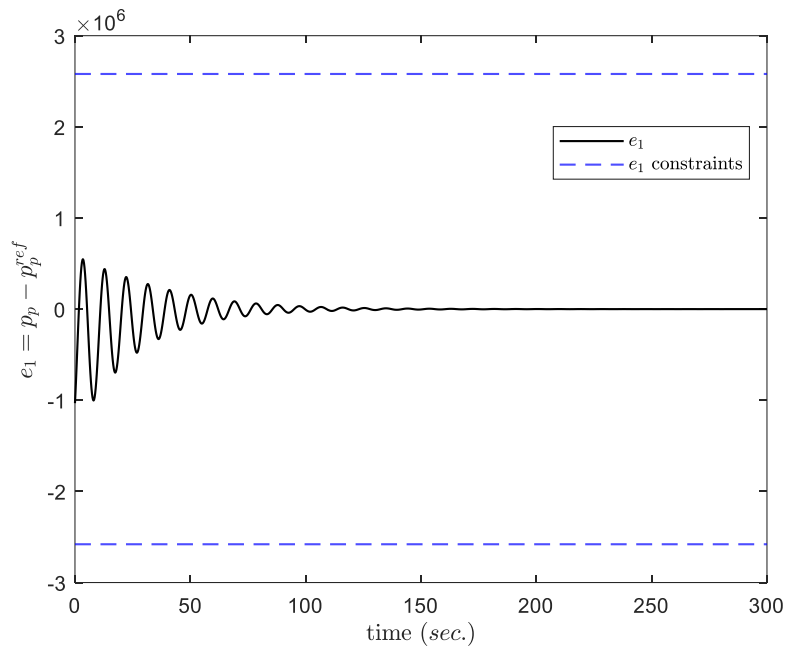
از طرف دیگر، افزایش ضریب تناسبی  $k_p$  زمان نشست را کاهش می‌دهد اما باعث طولانی شدن فاصله اشباع اولیه و یا ایجاد احتمال اشباع سیگنال کنترل برای دیگر فواصل نیز می‌گردد. در نتیجه، زمان نشست به طور غیر منتظره‌ای افزایش می‌یابد. همچنین، در شروع فعالیت کنترل کننده PID نیز اشباع محرک وجود دارد؛ زیرا سیگنال خطا در این نقطه یک تابع پله‌ای<sup>۱</sup> بوده و مشتق آن ضربه‌ای است.

در کنترل کننده‌های PID، اگر چه بخش مشتق‌گیر به عنوان پیش‌بینی کننده رفتار سیستم، زمان نشست سیستم و حداکثر پیک را بهبود می‌بخشد اما نویزهای اندازه‌گیری و فرآیند فرکانس بالا را تقویت می‌کند. این همچنین باعث به اشباع رفتن سریع خروجی کنترل کننده نیز می‌شود. شایان ذکر است که بخش مشتق‌گیر، دامنه سیگنال سینوسی را توسط ضریب فرکانس زاویه‌ای<sup>۲</sup> تقویت می‌کند. با این حال با توجه به شرایط بیان شده در قضیه پایداری (۲)، سیگنال کنترل تولید شده توسط رویکرد فازی برای تمامی زمان‌ها در بازه  $[0,1]$  قرار دارد. این نتیجه، کار کردن و کنترل پیوسته کنترل کننده فازی را القا می‌کند. بنابراین، زمان نشست در کنترل کننده فازی به طور قابل توجهی بهتر از زمان نشست کنترل کننده PI می‌باشد. شکل ۳-۷ نشان می‌دهد که سیگنال کنترل مبتنی بر فازی بسیار سریع‌تر از سیگنال کنترل PI به  $u_c^{ref}$  هم‌گرا می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، کنترل کننده باید به طور مداوم عمل کرده و محدودیت‌های (۳-۵۷) را به منظور جلوگیری از نقض محدوده پنجره فشار در نظر گرفته شده، رعایت کند. اشکال ۳-۹ تا ۳-۱۱ نشان می‌دهند که کنترل مبتنی بر فازی طراحی شده هرگز از کران‌های فرضی فراتر نرفته و به فشار ته‌چاهی اجازه می‌دهند تا در عین حال که به  $P_{bh}^{ref}$  برسد، در داخل پنجره فشار نیز باقی بماند.

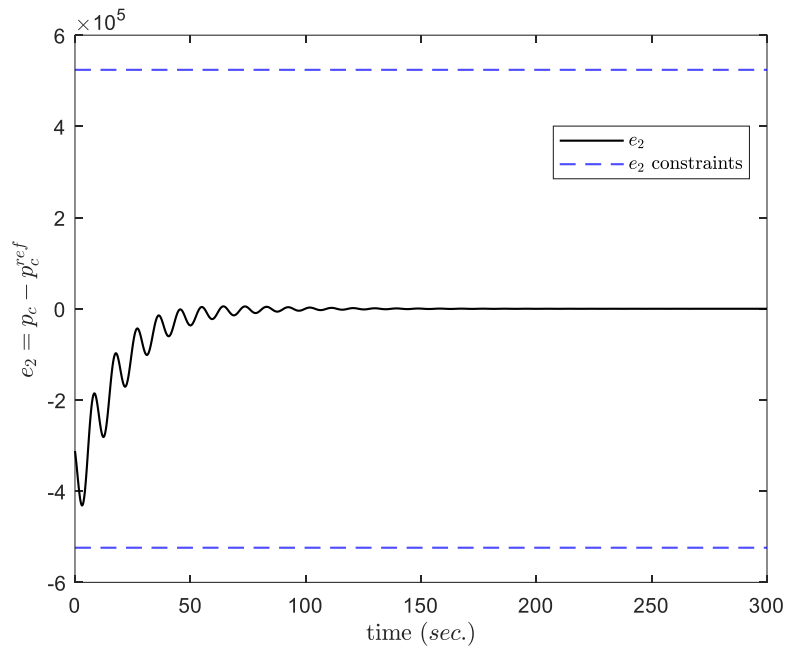
---

<sup>1</sup> Step function

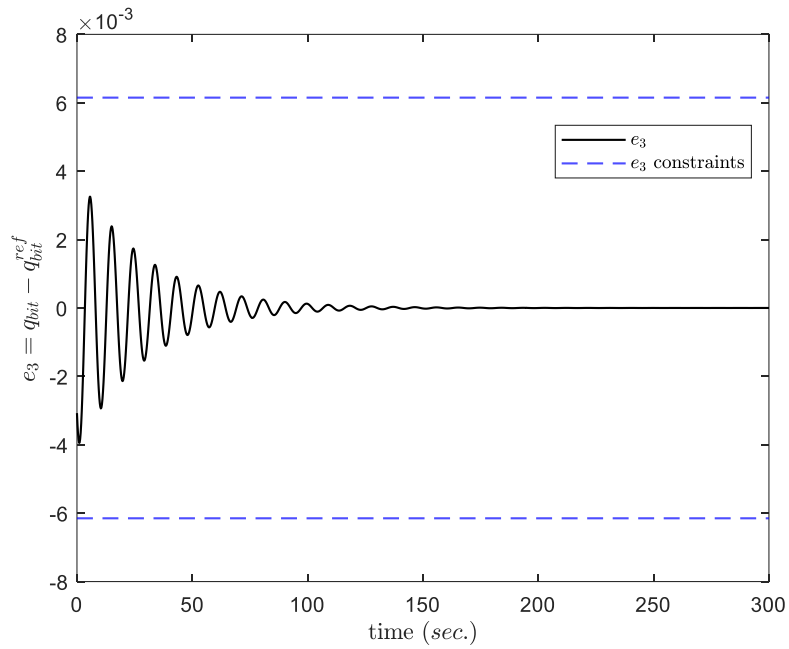
<sup>2</sup> Angular frequency factor



شکل ۳-۹: هم‌گرایی حالت خطا  $e_1$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده

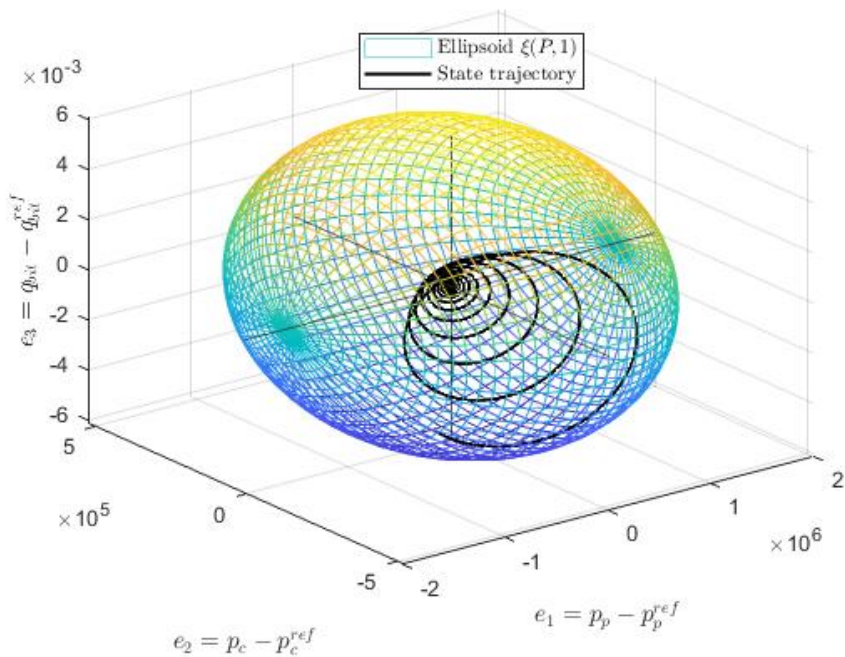


شکل ۳-۱۰: هم‌گرایی حالت خطا  $e_2$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده



شکل ۳-۱۱: هم‌گرایی حالت خطا  $e_3$  به صفر حین باقی ماندن در کران‌های تعریف شده

باقی ماندن حالات سیستم خطا در داخل پنجره فشار حین هم‌گرایی به صفر، به دلیل معیارهای پایداری پیشنهادی در قضیه پایداری (۲) که باقی ماندن مسیر حالت در داخل بیضی‌گون  $\xi(P, 1) \subseteq B_\Omega \subseteq \Omega$  را تضمین می‌کنند، عملی می‌شود. مسیر حالت در حال هم‌گرایی به نقطه تعادل، این بیضی‌گون را ترک نمی‌کند (شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۲: هم‌گرایی مسیر حالت به نقطه تعادل حین باقی ماندن در بیضی‌گون  $\xi(P, 1)$

### ۳-۱۰- جمع‌بندی

در فصل مراحل انجام پژوهش، اثبات پایداری و نتایج شبیه‌سازی، در ابتدا سیستم مورد نظر با فرضیات در نظر گرفته شده در این مطالعه معرفی شد. سپس با استفاده از رویکرد فازی، مدل‌سازی و طراحی کنترل‌کننده مورد بحث قرار گرفت و در مرحله بعد نتایج به دست آمده با نتایج عملکرد کنترل‌کننده‌های PI و PID که کنترل‌کننده‌های رایج صنعتی بوده و از اصول و معادلات اصلی حفاری CBHP پیروی می‌کنند، مورد مقایسه قرار گرفته است. ضرایب و ماتریس مثبت معین کنترل‌کننده فازی با حل یک مسئله بهینه‌سازی به دست آمده و ضرایب کنترل‌کننده‌های PI و PID با استفاده از تنظیم خودکار<sup>۱</sup> PID Tuner در MATLAB R2020b، حاصل شده است. همان‌طور که در نمودار خروجی سیگنال فشار ته‌چاهی آمده است، کنترل فازی  $P_{bh}$  را سریع‌تر از PI و PID و بدون بالازدگی به مقدار مطلوب از پیش تعیین شده رساند.

علاوه بر این، با تعریف اشباع محرکی که در فصل پیش به آن پرداخته شد، سیگنال بازشدگی چوک کنترل فازی بر خلاف سیگنال‌های PI و PID که برای مدت زمانی به اشباع رسیده بودند، بعد از مدت زمانی کوتاه به مقدار مطلوب محاسبه شده  $u_c^{ref}$  رسید که نشان از برتری همه‌جانبه کنترل فازی نسبت به این دو کنترل‌کننده دارد. همچنین، همان‌طور که در فصول ابتدایی هدف از سیستم و متغیرهای حالت خطا معرفی شد، در این فصل مشاهده شد که خطاهایی که به عنوان متغیرهای حالت سیستم معادل در نظر گرفته شده بودند به صفر میل کردند تا متغیرهای حالت سیستم اصلی حفاری برابر با مقادیر مرجع‌شان گردند.

---

<sup>۱</sup> Autotune



## فصل ۲

# نیجگیری و پیشهادات

## ۴-۱- مقدمه

ثابت بودن فشار ته‌چاهی در عملیات حفاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که بخشی جدا نشدنی از تکنیک حفاری با فشار ثابت (CBHP) می‌باشد. در این پایان‌نامه، ایده مدیریت فشار ته‌چاهی و ثابت نگه داشتن آن در یک عمق مخصوص توسط کنترل فازی مبتنی بر مدل TS توسعه داده شد. همچنین، نحوه پایدار شدن این مدل پیشنهادی نیز به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه نتایج شبیه‌سازی با این سیستم در فصل پیش ارائه شد. در ادامه، به نتیجه‌گیری نهایی از این سیستم پرداخته شده است و سپس پیشنهادات برای محققین علاقه‌مند به پژوهش در این زمینه ارائه شده است.

## ۴-۲- نتیجه‌گیری

طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر مدل در سیستم‌های غیرخطی پیچیده مانند حفاری با فشار مدیریت شده، چالش برانگیز بوده و منجر به کنترل‌کننده‌ای می‌شود که اجرا و پیاده‌سازی آن امکان‌پذیر نیست. کنترل‌کننده‌های ساده مانند PI و PID نیز عملکرد مورد نیاز و انتظار را ارائه نمی‌دهند. از سوی دیگر، مسائل کنترل عملی مانند کران‌داری نرم ورودی کنترل و ناحیه اعتبار باید در طول فرآیند طراحی در نظر گرفته شوند؛ که این مسئله فرآیند طراحی و کنترل‌کننده حاصل را پیچیده می‌کند.

این مطالعه، رویکرد مدل‌سازی فازی TS که یک سیستم پیچیده را به عنوان مجموعه‌ای از مدل‌های خطی نشان می‌دهد، را در نظر می‌گیرد. بر اساس ایده جبران توزیع موازی (PDC)، یک کنترل‌کننده فازی ساده اما کارآمد و عملیاتی به گونه‌ای ساخته شده است که علاوه بر پایداری، محدودیت‌های فیزیکی / عملیاتی همراه با اشباع محرک را برآورده می‌کند. به منظور استخراج پارامترهای کنترل‌کننده فازی، یک مسئله بهینه‌سازی با توابع هدف محدب و شرایط LMI معرفی شده است. حل این مسئله با استفاده از نرم‌افزارهای عمومی و در دسترس<sup>۱</sup>، ساده بوده و همچنین ضرایب کنترل‌کننده و بزرگ‌ترین ناحیه جذبی که در آن محدودیت‌های

---

<sup>1</sup> Off-the-shelf software

فیزیکی برآورده می‌شوند را به همراه دارد. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با روش‌های کنترلی PI و PID که از اصول مشابهی تبعیت می‌کردند و طراحی شده بودند، حاکی از آن بوده است که سیگنال کنترل فازی بر خلاف سیگنال‌های PI و PID بدون اشباع و از دست دادن زمان عملیات کنترل را بر روی سیستم اعمال کرده و بعد از مدتی کوتاه به مقدار مرجع می‌رسد. متعاقباً، سیگنال فشار ته‌چاهی در رویکرد فازی بدون بالازدگی و نوسانی به مقدار مطلوب رسید و در مجموع، برتری همه جانبه عملکرد روش کنترلی پیشنهادی در این مطالعه به اثبات رسید.

#### ۴-۳- پیشنهادات

اگرچه کنترل‌کننده‌های فازی نسبتاً در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم هستند، به عنوان گام بعدی این مطالعه می‌توان عدم قطعیت را نیز در این نمونه از سیستم ادغام کرد و متعاقباً معیارهای پایداری را به روز رسانی کرد. سایر معیارهای عملکرد مانند Decay rate نیز می‌توانند بیان شوند. از طرف دیگر، رویکرد پیشنهادی فعلی فرض می‌کند که تمامی حالات سیستم در دسترس هستند. در صورت برقرار نبودن این فرض، گام بعدی باید یک طراحی ناظر فازی را توسعه دهد.

از طرف دیگر، به منظور توسعه این مطالعه، در گام‌های بعدی در نظر گرفتن بازه‌ای مشخص از عمق برای انجام عملیات حفاری و اعمال کنترل فشار بر روی آن می‌تواند مورد بررسی و تحقیقات قرار بگیرد.

## مرجع

- Aires, J.D.M., Gadelha, J.R.T., de A Dantas, A.F.O., Bolonhini, É.H., Dórea, C.E.T., Maitelli, A.L., 2020. Plunger lift optimization: A comparison of fuzzy and predictive controllers with manipulation of a secondary gas valve. *J. Pet. Sci. Eng.* 192, 107261. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107261>
- Ask, K.A., 2020. PI Regulation in CBHP-MPD Simulation using a Transient Flow Model. University of Stavanger.
- Breyholtz, O., Nygaard, G., Nikolaou, M., 2010. Automatic control of managed pressure drilling, in: *Proceedings of the 2010 American Control Conference*. IEEE, pp. 442–447. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531008>
- Eaton, A.N., Beal, L.D., Thorpe, S.D., Janis, E.H., Hubbell, C., Hedengren, J.D., Nybø, R., Aghito, M., Bjørkevoll, K., Boubsi, R. El, Braaksma, J., van Og, G., 2015. Ensemble Model Predictive Control for Robust Automated Managed Pressure Drilling, in: *Day 1 Mon, September 28, 2015*. SPE. <https://doi.org/10.2118/174969-MS>
- Elias, L.J., Faria, F.A., Araujo, R., Oliveira, V.A., 2021. Stability analysis of Takagi–Sugeno systems using a switched fuzzy Lyapunov function. *Inf. Sci. (Ny)*. 543, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.07.020>
- Ghalehnoie, M., Akbarzadeh-Tootoonchi, M.-R., Pariz, N., 2020. Fuzzy control design for nonlinear impulsive switched systems using a nonlinear Takagi-Sugeno fuzzy model. *Trans. Inst. Meas. Control* 42. <https://doi.org/10.1177/0142331219894867>
- Iversen, F.P., Gravdal, J.E., Dvergsnes, E., Nygaard, G.H., Gjeraldstveit, H., Carlsen, L.A., Low, E., Munro, C.G., Torvund, S., 2006. Feasibility Study of Managed-Pressure Drilling With Automatic Choke Control in Depleted HP/HT Field, in: *All Days*. SPE. <https://doi.org/10.2118/102842-MS>
- Kaasa, G.-O., Stamnes, Ø.N., Aamo, O.M., Imsland, L.S., 2012. Simplified Hydraulics Model Used for Intelligent Estimation of Downhole Pressure for a Managed-Pressure-Drilling Control System. *SPE Drill. Complet.* 27, 127–138. <https://doi.org/10.2118/143097-PA>
- Landet, I.S., Pavlov, A., Aamo, O.M., 2013. Modeling and Control of Heave-Induced Pressure Fluctuations in Managed Pressure Drilling. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 21, 1340–1351. <https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2204751>
- Lordejani, S.N., Abbasi, M.H., Velmurugan, N., Berg, C., Stakvik, J.Å., Besselink, B., Iapichino, L., Di Meglio, F., Schilders, W.H.A., van de Wouw, N., 2020. Modeling and Numerical Implementation of Managed-Pressure-Drilling Systems for the Assessment of Pressure-Control Systems. *SPE Drill. Complet.* 35, 598–619. <https://doi.org/10.2118/201108-PA>
- Lordejani, S.N., Besselink, B., Abbasi, M.H., Kaasa, G.-O., Schilders, W.H.A., van de Wouw, N., 2021. Control-Oriented Modeling for Managed Pressure Drilling Automation Using Model Order Reduction. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 29, 1161–1174. <https://doi.org/10.1109/TCST.2020.2994535>
- Mahdianfar, H., Pavlov, A., 2017. Adaptive output regulation for offshore managed pressure drilling. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 31, 652–673. <https://doi.org/10.1002/acs.2704>
- Mahdianfar, H., Pavlov, A., Aamo, O.M., 2013. Joint unscented Kalman filter for state and parameter estimation in Managed Pressure Drilling, in: *2013 European Control Conference (ECC)*. IEEE, pp. 1645–1650. <https://doi.org/10.23919/ECC.2013.6669753>

- Matyas, A., Nagy, Z., Lendek, Z., 2020. Controller design for time-delay TS fuzzy systems with nonlinear consequents, in: 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.9177750>
- Nandan, A., Imtiaz, S., Butt, S., 2017. Robust gain switching control of constant bottomhole pressure drilling. *J. Process Control* 57, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.06.005>
- Nguyen, A.-T., Coutinho, P., Guerra, T.-M., Palhares, R., Pan, J., 2021. Constrained Output-Feedback Control for Discrete-Time Fuzzy Systems With Local Nonlinear Models Subject to State and Input Constraints. *IEEE Trans. Cybern.* 51, 4673–4684. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3009128>
- Nikoofard, A., Johansen, T.A., Mahdianfar, H., Pavlov, A., 2014. Design and Comparison of Constrained MPC With PID Controller for Heave Disturbance Attenuation in Offshore Managed Pressure Drilling Systems. *Mar. Technol. Soc. J.* 48, 90–103. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.48.2.4>
- Nygaard, G., Nævdal, G., 2006. Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling. *J. Process Control* 16, 719–732. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2006.01.002>
- Nygaard, G.H., Imsland, L.S., Johannessen, E.A., 2007a. USING NMPC BASED ON A LOW-ORDER MODEL FOR CONTROLLING PRESSURE DURING OIL WELL DRILLING. *IFAC Proc. Vol. 40*, 159–164. <https://doi.org/10.3182/20070606-3-MX-2915.00025>
- Nygaard, G.H., Vefring, E.H., Fjelde, K.K., Nævdal, G., Lorentzen, R.J., Mylvaganam, S., 2007b. Bottomhole Pressure Control During Drilling Operations in Gas-Dominant Wells. *SPE J.* 12, 49–61. <https://doi.org/10.2118/91578-PA>
- Nygaard, G.H., Vefring, E.H., Fjelde, K.K., Nævdal, G., Lorentzen, R.J., Mylvaganam, S., 2004. Bottomhole Pressure Control During Pipe Connection in Gas-Dominant Wells, in: *All Days. SPE*. <https://doi.org/10.2118/91578-MS>
- Park, J., 2018. Nonlinear Model Predictive Control for a Managed Pressure Drilling with High-Fidelity Drilling Simulators. Brigham Young University.
- Park, J., Price, C., Pixton, D., Aghito, M., Nybø, R., Bjørkevoll, K., Hedengren, J.D., 2020. Model predictive control and estimation of managed pressure drilling using a real-time high fidelity flow model. *ISA Trans.* 105, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.035>
- Poznyak, A., Polyakov, A., Azhmyakov, V., 2014. *Attractive Ellipsoids in Robust Control, Systems & Control: Foundations & Applications*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09210-2>
- Pui, G., Bhandari, J., Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., 2017. Risk-based maintenance of offshore managed pressure drilling (MPD) operation. *J. Pet. Sci. Eng.* 159, 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.066>
- Raabe, G., Jortner, S., 2021. *Universal Well Control*. Gulf Professional Publishing.
- Rehm, B., Schubert, J., Haghshenas, A., Paknejad, A. saman, Hughes, J., 2008. *Managed pressure drilling*. Gulf Publishing Company.
- Santos, T.B.R., Nakanishi, R.M., Kaipio, J.P., Mueller, J.L., Lima, R.G., 2020. Introduction of Sample Based Prior into the D-Bar Method Through a Schur Complement Property. *IEEE Trans. Med. Imaging* 39, 4085–4093. <https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3012428>
- Stamnes, O.N., Jing Zhou, Kaasa, G.-O., Aamo, O.M., 2008. Adaptive observer design for the bottomhole pressure of a managed pressure drilling system, in: 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, pp. 2961–2966. <https://doi.org/10.1109/CDC.2008.4738845>

- Tanaka, K., Ikeda, T., Wang, H.O., 1996. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: quadratic stabilizability,  $H/\sup \infty/$  control theory, and linear matrix inequalities. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 4, 1–13.  
<https://doi.org/10.1109/91.481840>
- Tanaka, K., Wang, H.O., 2001. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. <https://doi.org/10.1002/0471224596>
- Xue, Q., 2020. *Data Analytics for Drilling Engineering, Information Fusion and Data Science*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34035-3>
- Zhang, H., Yan, H., Liu, T., Chen, Q., 2011. Fuzzy Controller Design for Nonlinear Impulsive Fuzzy Systems With Time Delay. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 19, 844–856.  
<https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2011.2147793>

# Abstract

This study deals with the constant bottom-hole pressure as one of the common techniques in Managed pressure drilling (MPD), a complex nonlinear process that employs various control strategies to regulate the bottom-hole pressure. To have an accurate operation, the nonlinear controllers usually consider the exact model of the system, which leads to a complex structure that sophisticates their practical implementation due to resulting high computational load. In addition to low computational load, control methods must take into account physical/operational constraints to be implemented in practice. Utilizing the T-S fuzzy modeling approach as well as the idea of the parallel distributed compensation, this study constructs a simple fuzzy controller based on the plant's exact model and proposes the stabilization criteria in the form of linear matrix inequalities. These criteria not only guarantee the system stability but also satisfy the available physical/operational limitations in the drilling process. We then introduce an optimization problem to obtain the controller gains and find the largest space in which the proposed controller ensures both operational restrictions and stability. The simulation results demonstrate that if the initial condition of the drilling process begins within the margins of the pore and fracture gradients, the bottom-hole pressure converges to the desired reference value while the pressure window is not violated and the actuator is not saturated. Thanks to the unsaturated controller during the drilling process and also due to the inherent capabilities of fuzzy logic, in the proposed method, convergence occurs earlier than traditional methods while there is less steady state error.

**Keywords:** Actuator saturation, Constant bottom-hole pressure, T-S fuzzy modeling, Parallel distributed compensation, Physical/operational constraints.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Drilling

# **Designing of fuzzy controller based on the TS model for CBHP technique in MPD drilling**

By: Hasan Gorjizadeh

Supervisor:

Dr. Sajjad Negahban

Dr. Mohebn Ghalehnoie

Advisor:

Dr. Amirhossein Nikoofard

Feb, 2022