



## طراحی سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی جهت تخمین خستگی لوله‌ی حفاری چاه نفت

محمدعلی فردوسی‌زاده<sup>\*</sup>، علیرضا خدایاری، نادر محمدی • دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

### چکیده

هنگامی که اجسام تحت تنش‌های متناوب و نوسانی قرار گیرند پدیده‌ی خستگی اتفاق می‌افتد و منجر به شکست ناگهانی می‌شود. شکست ناشی از خستگی لوله‌های حفاری از مشکلات هزینه‌بر صنعت نفت در صنعت حفاری است. خستگی موضعی از یک نقطه‌ی رشته شروع و به تدریج در مدت طولانی جمع می‌شود و سبب سوراخ‌شدگی یا قطع رشته‌ی حفاری می‌گردد. این فرآیند در شرایطی رخ می‌دهد که هیچ تغییری در شرایط حفاری بوجود نیامده است. این اتفاق سبب توقف عملیات حفاری شده و زیان هنگفتی به شرکت‌های پیمانکار حفاری وارد خواهد آورد. به همین دلیل کنترل و مقابله با ضایعات ناشی از خستگی بسیار حساس و در عین حال مشکل است. با مشاهده‌ی نخستین شوفیدگی در حین حفاری ضروری است تمامی رشته‌ها از چاه خارج شده و بازرسی گردد؛ چرا که ترک‌های خستگی همزمان تشکیل شده، شروع به رشد می‌کنند و نخستین ترکی که به درون رشته راه یابد سبب شکست می‌گردد. در حالی که با هر بار خارج کردن لوله‌ی حفاری از درون چاه وقت و هزینه‌ی بسیاری صرف خواهد شد و در برخی موارد حتی خارج کردن آن از درون چاه غیرممکن خواهد بود. بنابراین باید به دنبال روشی بود که در بسیاری از موارد بتوان از این آزمایش‌های پرهزینه جلوگیری کرد. در این پژوهش با طراحی سیستم فازی-عصبی استنتاجی تطبیقی (انفیس) و بارگذاری داده‌ها خستگی لوله‌ی حفاری بدون خارج شدن آن از داخل چاه و با استفاده از داده‌های روزانه‌ی حفاری پیش‌بینی می‌شود. در نهایت با استفاده از این سیستم پیشگو، می‌توان خستگی را در هر نقطه از لوله‌ی حفاری پیش‌بینی کرد.

### اطلاعات مقاله

\* دریافت:

۹۴/۵/۱۹

\* پذیرش:

۹۴/۵/۱۹

\* ارسال برای چاپ:

۹۴/۱۰/۲

### واژگان کلیدی

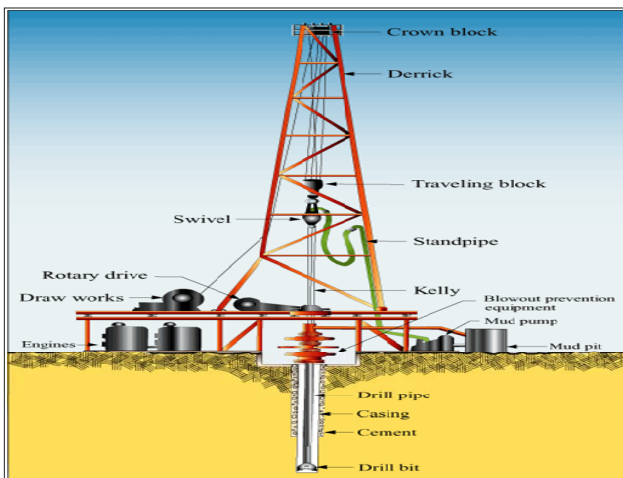
لوله‌ی حفاری  
خستگی  
تنش  
شکست  
سیستم‌های فازی  
انفیس

### مقدمه

جمع‌شونده و برگشت‌ناپذیر است که بحث بسیار گسترده‌ای دارد. به عبارتی کرنش‌های پلاستیک در بارهای بادامه‌ی کوتاه و رشد ترک در بارهای بادامه‌ی زیاد، سبب ایجاد خستگی خواهند شد. برای محاسبه‌ی خستگی روش‌های زیادی از جمله ماشین آزمایش استاندارد خستگی و رسم منحنی آزمایش خستگی تا حد دوام وجود

با توجه به روند رو به رشد تقاضای انرژی در جهان، هزینه‌های مربوط به اکتشاف، حفاری و توسعه‌ی میادین نفتی جدید در حال افزایش است. بر اساس پیش‌بینی مؤسسه‌ی مالی بارکلی، هزینه‌های جهانی اکتشاف و تولید (E&P) در سال ۲۰۱۳، حدود ۱۰ درصد رشد داشته و رکورد جدید ۶۷۸ میلیارد دلار را به ثبت رسانده [۱] که بخش اعظمی از این هزینه‌ها مربوط به عملیات حفاری است. از این رو بهبود عوامل مؤثر بر عملیات حفاری، تأثیر به‌سزایی در موفقیت‌های اقتصادی صنعت نفت و گاز خواهد داشت. خستگی و شکست لوله‌ی حفاری از عوامل مؤثر بر هزینه‌های کلی عملیات حفاری است که بخش عمده‌ای از هزینه‌های حفاری را شامل می‌شود. از آنجا که شکست ناشی از خستگی ناگهان اتفاق می‌افتد، اگر به‌موقع تشخیص داده نشود صدمات سنگینی به رشته‌ی حفاری وارد آورده و هزینه‌ی فراوانی را به این صنعت تحمیل می‌کند. شکست رشته‌ی لوله‌های حفاری در ۱۴ درصد تمامی دکل‌های حفاری انجام می‌شود و هزینه‌ی زمان‌های تلف شده مجموعاً حدود ۱۰۶۰۰۰ دلار به‌ازای وقوع هر شکست است [۱]. در اکثر چاه‌های نفت و گاز در ایران از حفاری چرخشی استفاده می‌شود.

به‌طور کلی می‌توان گفت فرآیند خستگی (که در حقیقت آسیب‌های ناشی از خستگی به دلیل اعمال تنش‌های سیکلی مختلف است) فرآیندی



شکل ۱ | نمای کلی یک دکل حفاری

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Mafzn2006@yahoo.com)

دارد که در این مورد برای آزمایش قطعات تحت بارگذاری تکراری باید آنها را در ماشین خاصی قرار داد. متداولترین ماشین آزمایش خستگی R.R. MOORE است [۲]. روش دیگر، استفاده از منحنی S-N، شامل دامنه‌های تنش‌های متناوب در برابر مقدار مجاز تعداد تناوب‌های مورد نیاز برای شکست است. این نمودار در شرایط مشخص و کنترل شده و از طریق آزمایش خستگی در آزمایشگاه رسم می‌شود.

روش‌های دیگر عبارتند از به کارگیری نمودار سودبرگ، نمودار گودمن و نمودار گربر است که این نمودارها بر اساس روش تجربی و آزمایشگاهی به دست آمده‌اند و مبنای فیزیکی لازم جهت بررسی خستگی به عنوان پدیده‌ای پیش‌رونده و وابسته به زمان را ندارند.

ترک ناشی از خستگی معمولاً در نقاطی از مصالح آغاز می‌شود که در آن نقصی موضعی وجود داشته باشد یا به دلیل تغییر ناگهانی مقطع، در آنجا تمرکز تنش داشته باشیم. در ابتدا ترک‌هایی در ابعاد اتم‌ها تشکیل می‌شود. در بیشتر موارد این ترک‌ها از سطح یا نزدیکی سطح آغاز می‌شوند و تفاوتی ندارد که نمونه تحت تنش خمشی، کششی، فشاری یا تنش‌های دیگر قرار گرفته باشد. این ترک‌ها بسیار ریز هستند و با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰۰ یا بیشتر دیده می‌شوند. این ترک‌ها در مراحل اولیه‌ی فرآیند بوجود می‌آیند و بسته به روش مورد استفاده و مهارت آزمایش‌کننده، می‌توان آنها را پس از گذشت حدود ۲ درصد از عمر خستگی شناسایی کرد. در مرحله‌ی بعد این ترک‌ها خیلی کند و به صورت تدریجی رشد می‌کنند؛ به طوری که در اواخر این مرحله با چشم غیر مسلح قابل تشخیص هستند و در مرحله‌ی سوم (شامل تکثیر، انتشار و ادغام)، قابل دیدن هستند. در این مرحله ترک‌ها آن قدر بزرگ هستند که سبب واماندگی می‌شوند [۳].

به طور کلی رابطه‌ی خستگی لوله‌ی حفاری و عوامل مؤثر بر آن رابطه‌ای غیرخطی است که سبب می‌شود محاسبات مربوط به آن (به خصوص زمانی که تعداد تنش‌ها زیاد است) به آسانی امکان‌پذیر نباشد. امروزه در شرکت‌های حفاری و تأمین کالای نفت با آزمایش‌هایی مانند X-RAY، سی‌تی اسکن، ام‌آر‌آی و امواج میکرو، خستگی لوله‌ی حفاری را بررسی می‌کنند که نیازمند خارج کردن لوله‌ی حفاری و توقف تولید نفت است. مقدار خستگی لوله‌ی حفاری بدون نیاز به خارج کردن آن از درون چاه از عواملی است که مهندسان حفاری حین عملیات حفاری نیازمند اطلاع از آن هستند.

هوش مصنوعی فن‌آوری جدیدی است که می‌توان توسط آن رابطه‌ای غیرخطی به دست آورد. در این پژوهش سعی شده با تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر خستگی لوله‌های حفاری و با استفاده از داده‌های یک شرکت حفاری، سیستمی هوشمند طراحی کرد که بتواند با دقت

زیادی مقدار و شرایط خستگی در طول لوله‌ی حفاری را پیش‌بینی و ارائه کند. در طراحی این سیستم برای تخمین خستگی لوله‌ی حفاری از روش منطق فازی استفاده می‌گردد و نتایج آن با اطلاعات واقعی یک چاه نفتی مقایسه خواهد شد.

با توجه به اینکه تا کنون پیش‌بینی خستگی لوله‌ی حفاری از طریق هوش مصنوعی انجام نشده و این پژوهش برای نخستین بار به صورت مورد کاوانه در میدان مدنظر انجام می‌شود به نظر می‌رسد با در اختیار داشتن داده‌های سایر میدان‌ها، این روش قابلیت تعمیم به آنها را نیز داشته باشد.

به طور کلی اهداف و ضرورت‌های انجام این تحقیق عبارتند از:

■ شناسایی فرآیند خستگی لوله‌های حفاری و بررسی عوامل مؤثر بر آن

■ طراحی سیستم پیش‌بینی خستگی در لوله‌ها جهت برنامه‌ریزی صحیح با استفاده از سیستم هیبریدی هوش مصنوعی

■ هوشمندسازی و ایجاد قابلیت آموزش بر خط سیستم پیش‌بین با هدف ارتقاء دقت آن

■ کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی حفاری از طریق کاهش شکست لوله‌های حفاری

این پژوهش که در واقع تحقیق کاربردی و بین‌رشته‌ای است (مابین مهندسی نفت و مهندسی مکانیک) می‌تواند برای مهندسان بخش برنامه‌ریزی و طراحی عملیات حفاری و شرکت‌های حفاری سودمند باشد.

در این پژوهش از یک سیستم استنتاج نروفازی انطباقی استفاده شده است. در این روش شبکه‌ی عصبی و سیستم فازی در ساختاری هماهنگ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این مدل را می‌توان شبکه‌ی عصبی با عامل فازی یا سیستمی فازی با یادگیری توزیع شده دانست. انفیس برای مدل‌سازی داده‌ها از روش استنتاج فازی استفاده می‌کند و بر اساس داده‌های ورودی و خروجی، یک سیستم استنتاج فازی را تشکیل می‌دهد که متغیرهای تابع عضویت آن، به تدریج با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار یا با ترکیبی از الگوریتم پس‌انتشار و الگوریتم حداقل مربعات خطا تخمین زده می‌شوند.

#### ۱- مروری بر مطالعات پیشین

در یکی از پژوهش‌های انجام شده‌ی مرتبط با موضوع این تحقیق، در ۱۹۹۸ بیلگسو و همکاران [۴] با استفاده از هوش مصنوعی، روش جدیدی برای پیش‌بینی فرسایش دندان‌ها و یا تاقان‌های مته‌ی حفاری ارائه کردند.



کردند که تئوری اساسی آن بر پایه‌ی المان‌های آنالیز برخال (فراکتال) همانند شبکه‌ی عصبی مصنوعی است. بسیاری از سیستم‌های چندمتغیره‌ی پیچیده (که شامل سیستم حفاری نیز می‌شوند) به‌طور متناوب و به‌صورت الگوهای نامتغیر مقیاسی یا برخالی خواص زمان-فضا هستند. بر این اساس برخی روش‌های مهندسی (جهت مدل‌سازی) و همچنین روش‌های عیب‌یابی، گسترش یافته و استفاده شده‌اند. در اینجا سیستم نظارتی هوشمندی به کار رفته که در آن از شاخصی کلی مانند متغیر خروجی استفاده می‌شود. این سیستم بر اساس یکی از شاخه‌های هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی) بنا نهاده شده است. این شبکه‌ی عصبی از نوع شبکه‌ی عصبی کوهنن است که برای کاربردهای شناسایی الگوهای سیستم کنترل پیشرفته استفاده می‌شود.

در ۲۰۱۲ هاینزه و اسلام‌البیات [۶] گیر کردن لوله‌ی حفاری را به‌عنوان مشکلی چالش‌برانگیز و قابل پیش‌بینی که می‌توان از وقوع آن پیشگیری کرد بررسی کردند. در این تحقیق از دو روش یادگیری ماشین شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبانی (SVM) که از روش‌های یادگیری با نظارت هستند برای پیش‌بینی استفاده شده است. این مطالعه نشان داد که هر دو شبکه توانایی پیش‌بینی گیر کردن لوله با دقت مناسب بیش از ۸۵ درصد را دارند.

## ۲- طراحی سیستم تخمین گر خستگی در لوله‌ی حفاری مبتنی بر روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در یکی از میادین جنوب‌غربی ایران و قابل تعمیم به سایر میادین

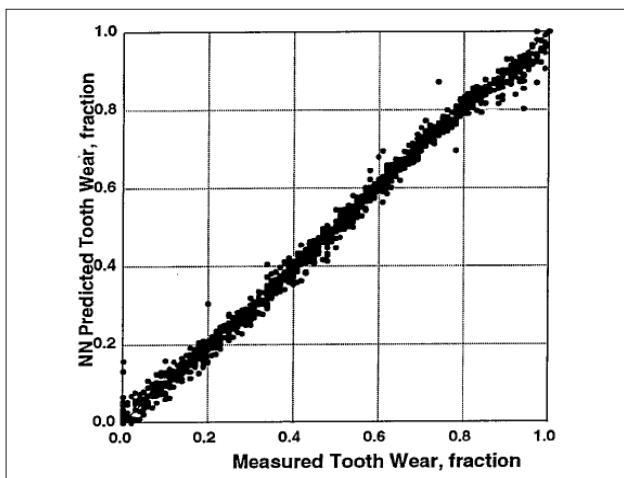
نخستین بار در ۱۹۹۳ جانگک با استفاده از قدرت زبانی سیستم‌های فازی

در این مطالعه که شامل مجموعه‌ی اطلاعات میدانی و شبیه‌ساز است با استفاده از شبیه‌ساز حفاری تقریباً ۸۰۰۰ داده اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش برای پیش‌بینی مقدار فرسایش دندان‌ها و یاتاقان‌های مته‌ی حفاری، چندین شبکه‌ی عصبی طراحی شده‌اند. تمامی این شبکه‌ها سه لایه هستند و در آنها از الگوریتم آموزشی پس‌انتشار خطا استفاده شده است. شبکه‌ی عصبی اول و دوم به ترتیب برای پیش‌بینی مقدار فرسایش دندان‌ها و یاتاقان‌های مته طراحی شده‌اند. شبکه‌ی سوم نیز برای پیش‌بینی هم‌زمان مقدار فرسایش دندان‌ها و یاتاقان‌های مته طراحی شده است.

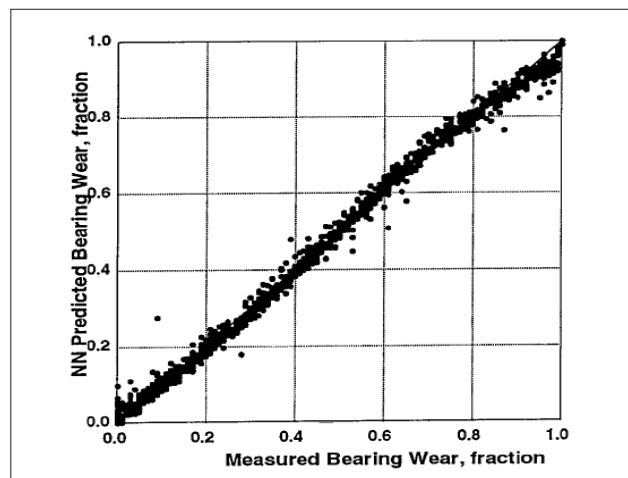
شکل ۲- مقادیر پیش‌بینی شده‌ی فرسایش دندان‌های مته توسط شبکه‌ی عصبی را در برابر مقادیر واقعی برای داده‌های آزمایش نشان می‌دهد. شبکه‌ی عصبی طراحی شده در این مرحله شامل ۹ متغیر ورودی است که عبارتند از نوع مته، وزن روی مته، سرعت گردش مته، نرخ پمپ گل، قابلیت حفاری سازند، سختی سازند، گشتاور زمان، مقدار فرسایش یاتاقان‌ها و نرخ حفاری. مجموعه‌ی اطلاعات مورد استفاده، دامنه‌ی وسیعی از مقادیر بین صفر و یک را برای مقدار فرسایش دندان‌های مته پوشش داده است. این شبکه‌ی عصبی تعداد ۸۰ نرون مخفی دارد و ضریب همبستگی نتایج (I) ۰/۹۷۷ است.

شکل ۳- نتایج حاصل از شبکه‌ی عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی مقدار فرسایش یاتاقان‌های مته‌ی حفاری را نشان می‌دهد. این شبکه‌ی عصبی از متغیرهای شبیه به شبکه‌ی عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی مقدار فرسایش دندان‌های مته‌ی حفاری استفاده کرده و ضریب همبستگی نتایج حاصل (I) ۰/۹۹۷ است.

در پژوهشی دیگر در ۲۰۰۸ سالاخوف و یامالیو [۵] نظریه‌ای ارائه



شکل ۳ | مقدار فرسایش دندان‌های مته (مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده)

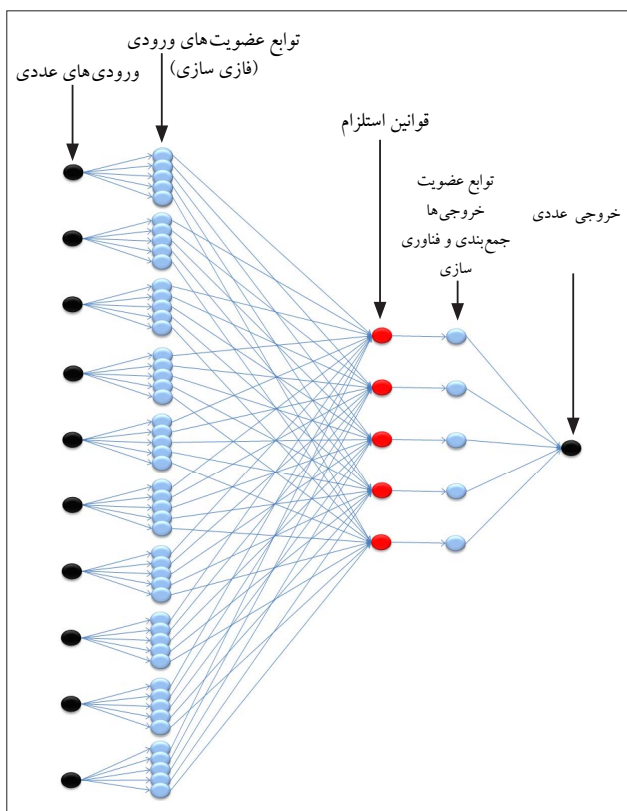


شکل ۲ | مقدار فرسایش یاتاقان‌های مته (مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده)

تنش شعاعی، تنش برشی، تنش پیچشی، تنش خمشی، تنش حلقه‌ای، تنش ون‌مایرز، فاصله‌ی نقطه‌ی مدنظر تا مته، داده‌ی خروجی (که ابتدا به سیستم وارد و در مرحله‌ی آزمون حذف می‌شود)، عمق نقطه‌ی مدنظر از لوله‌ی حفاری (که می‌خواهیم خستگی را در آنجا محاسبه نماییم) و نسبت خستگی.

در مرحله‌ی بعد تقسیم‌بندی داده‌ها به داده‌های آموزش و آزمایش انجام می‌شود و سپس یک شبکه‌ی انفیس طراحی می‌گردد. در مرحله‌ی نخست با استفاده از داده‌های آموزش، شبکه اجرا می‌شود. در مرحله‌ی بعد با استفاده از داده‌های آزمایش، شبکه‌ی آموزش دیده‌ی ارزیابی خواهد شد و در نهایت نتایج هر دو مرحله ارائه می‌گردد. در شکل ۴-فلوچارت چگونگی عملکرد سیستم هیبریدی تخمین گر خستگی در لوله‌ی حفاری مبتنی بر روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی ارائه شده است.

در مرحله‌ی نخست (بارگذاری داده‌ها) داده‌های ذخیره شده در فرم Excel توسط دستور Load وارد نرم‌افزار Matlab می‌شوند. معمولاً دامنه‌ی تغییرات و ابعاد متغیرها با یکدیگر متفاوت است. در مرحله‌ی دوم مقادیر داده‌ها با روش‌های نرمال‌سازی همگن می‌شوند. در همین راستا برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطه‌ی ۱- استفاده می‌شود:



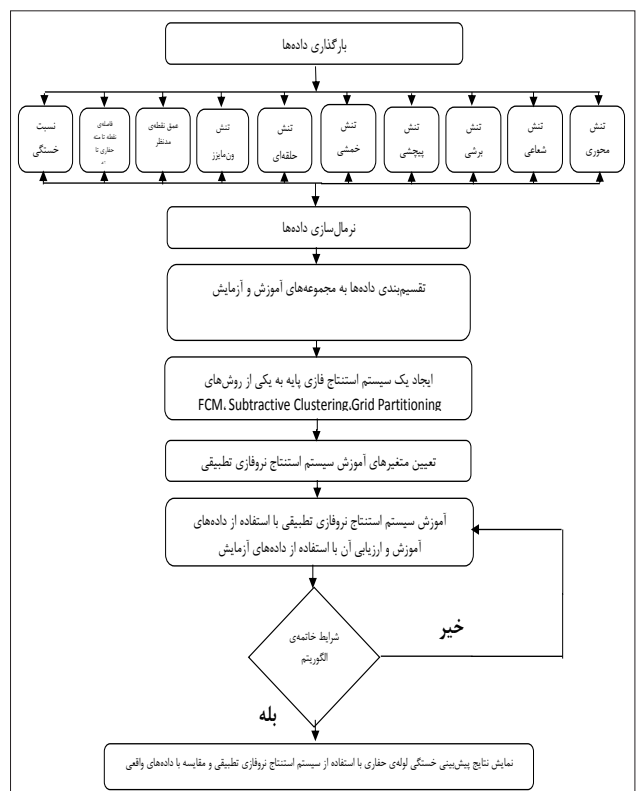
شکل ۵ | ساختار کلی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستمی را به عنوان سیستم‌های فازی و بر اساس شبکه‌ی عصبی تطبیقی ارائه کرد که به سیستم‌های انفیس معروف شده‌اند [۷].

این پژوهش به صورت مورد کاوانه و در یکی از میداين جنوب غربی ایران انجام شده است. این حوزه شامل سازندهای شکاف دار آسماری و بنگستان است که در جهت عمومی شمال غربی-جنوب شرقی طاقدیس‌های میداين نفتی جنوب ایران قرار گرفته‌اند. است. مطالعات مقدار بهره‌دهی چاه‌ها در این میدان نشان می‌دهد که شاخص بهره‌دهی از ۲ تا بیش از ۵۰۰ پام (بشکه در روز) متغیر است که این اختلاف زیاد بین شاخص بهره‌دهی چاه‌ها، بیانگر تأثیر شدید سیستم شکاف دار، تراکم شکاف‌ها و در نهایت برخورد دهانه‌ی چاه با شکاف‌هاست. در ادامه روش کار و طراحی سیستم تشریح خواهد شد.

#### ۲-۱- فرآیند طراحی سیستم

در ابتدا بارگذاری داده‌ها در سیستم تخمین گر انجام می‌شود و سپس داده‌ها نرمال‌سازی می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۴- نیز مشخص است داده‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از تنش محوری،



شکل ۴ | فلوچارت سیستم هیبریدی تخمین گر خستگی در لوله‌ی حفاری مبتنی بر روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی



$$X = (X - \text{Min } X) / (\text{Max } X - \text{Min } X) \quad (1)$$

در این رابطه X مقدار عددی هر کدام از متغیرهاست. با استفاده از رابطه‌ی ۱- تمامی داده‌ها در بازه‌ی [۰،۱] قرار خواهند گرفت. در سیستم‌های انفیس ۷۰ درصد داده‌ها به مجموعه‌ی آموزشی و ۳۰ درصد باقیمانده به مجموعه‌ی آزمایشی اختصاص داده می‌شود.

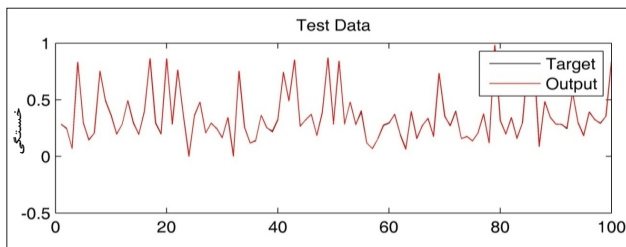
مرحله‌ی چهارم، نخستین قدم ایجاد یک سیستم استنتاج فازی پایه است. سه روش برای ایجاد یک سیستم استنتاج فازی پایه وجود دارد که عبارتند از [۷]:

■ تقسیم‌بندی شبکه‌ای در این روش یک ساختار سیستم استنتاج فازی از نوع سوگنو ایجاد می‌شود و داده‌ها به شکل جدولی تقسیم‌بندی می‌شوند. عوامل مهم در این روش، تعداد توابع عضویت، نوع توابع عضویت برای داده‌های ورودی و نوع توابع عضویت برای داده‌های

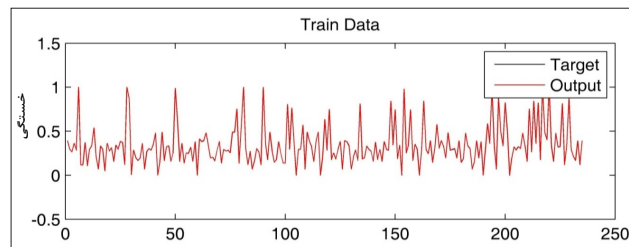
خروجی هستند.

■ خوشه‌بندی تفاضلی: در این روش با استفاده از خوشه‌بندی تفاضلی، یک ساختار سیستم استنتاج فازی از نوع سوگنو ایجاد می‌شود. بدین منظور ابتدا روش‌های استخراج قوانین، با استفاده از توابع خوشه‌بندی تفاضلی، تعداد قوانین و توابع عضویت، "مقدم" را تعیین می‌کنند و سپس با استفاده از تخمین خطی حداقل مربعات، معادله‌ی "تالی" هر کدام از قوانین مشخص می‌گردد. عامل مهم در این روش شعاع تأثیر برای خوشه‌بندی داده‌هاست.

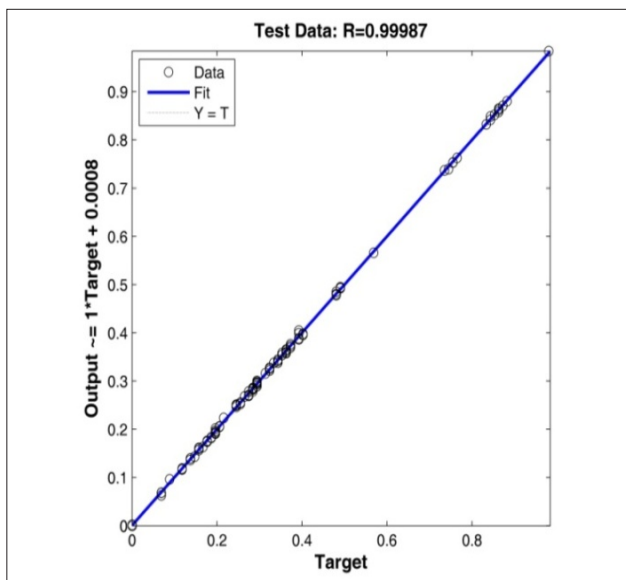
■ خوشه‌بندی فازی c-means: بدین منظور روش‌های استخراج قوانین با استفاده از توابع خوشه‌بندی فازی c-means تعداد قوانین و توابع عضویت مقدم‌ها و تالی‌ها را مشخص می‌کنند. در این روش عوامل



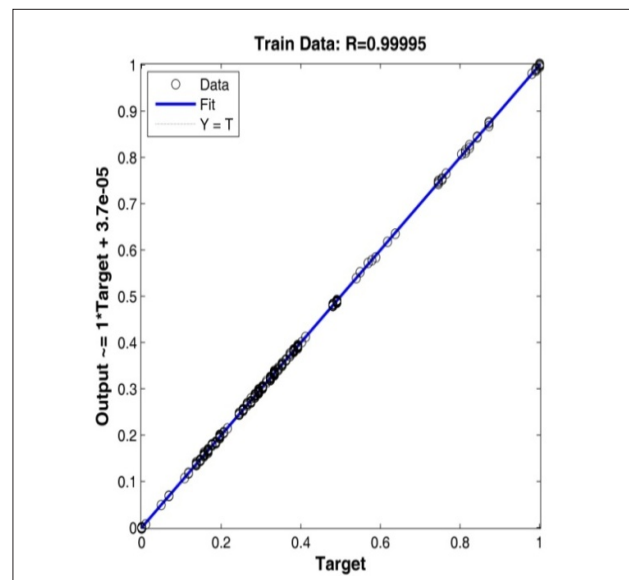
شکل ۸ | مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی‌شده‌ی انفیس در مقابل مقادیر واقعی خستگی لوله‌ی حفاری در مرحله‌ی آزمایش سیستم



شکل ۶ | مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی‌شده‌ی انفیس در مقابل مقادیر واقعی خستگی لوله‌ی حفاری در مرحله‌ی آموزش سیستم



شکل ۹ | نمودار نقطه به نقطه‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی‌شده‌ی انفیس در برابر مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری در مرحله‌ی آزمایش سیستم



شکل ۷ | نمودار نقطه به نقطه‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی‌شده‌ی انفیس در برابر مقادیر خستگی لوله‌ی حفاری در مرحله‌ی آموزش سیستم

خستگی توسط سیستم طراحی شده‌ی انفیس است (شکل-۶). در شکل-۷ مقادیر واقعی خستگی لوله‌ی حفاری در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی خستگی لوله رسم شده است. ضریب همبستگی حاصل برابر  $0.99995$  و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با  $0.023882$  است.

### ۲-۳- نتایج مرحله‌ی آزمایش سیستم تخمین گر مبتنی بر سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی (انفیس)

در شکل-۸ برای هر داده‌ی مرحله‌ی آزمایش، مقادیر پیش‌بینی شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی شده‌ی انفیس و مقادیر واقعی خستگی در یک نمودار رسم شده‌اند. خطوط سیاه‌رنگ، مقادیر واقعی خستگی و خطوط قرمز رنگ، مقادیر پیش‌بینی شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی شده‌ی انفیس است. در شکل-۹ مقادیر واقعی خستگی لوله‌ی حفاری در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری رسم شده است. ضریب همبستگی حاصل برابر  $0.99987$  و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با  $0.043055$  است.

### ۲-۴- سامانه‌ی طراحی شده برای پیش‌بینی خستگی لوله‌ی حفاری در شرایط جدید

در سیستم طراحی شده، پس از طی مراحل آموزش و آزمایش با استفاده از داده‌های میدانی، می‌توان از آن برای پیش‌بینی خستگی لوله‌ی حفاری در شرایط عملیاتی گوناگون استفاده کرد. با پایان یافتن مراحل آموزش و آزمایش این مدل می‌توان با وارد کردن داده‌های مربوط به شرایط عملیاتی مدنظر که قبلاً در شکل-۴ ذکر شد، خستگی لوله‌ی حفاری را تعیین کرد. در شکل-۱۰ داده‌های مدنظر مربوط به عمق لوله‌ی  $3001$  متری وارد شده و نسبت خستگی در آن نقطه از لوله‌ی حفاری بدون هیچ آزمایش و در چند لحظه محاسبه خواهد شد. نسبت خستگی در شکل-۱۱ در خروجی نرم‌افزار طراحی شده به دست آمده است.

#### نتیجه‌گیری

در مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین، نکات زیر قابل توجه هستند:

- در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به اطلاعات، برای پیش‌بینی خستگی لوله‌ی حفاری، از تعداد محدودی مجموعه‌ی اطلاعاتی استفاده شده است. این تعداد در مقایسه با تعداد

مهم، تعداد دسته‌ها، توان ماتریس تقسیم، حداکثر تعداد تکرار و حداقل بهبود است. لازم به ذکر است که دقت این روش در مقایسه با روش قبل بیشتر و در این پژوهش از روش مذکور برای ایجاد ساختار سیستم استنتاج فازی پایه استفاده می‌شود.

پس از تعیین روش برای ایجاد ساختار سیستم استنتاج فازی پایه، نوبت به تنظیم متغیرهای مربوط به آموزش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی می‌شود. عواملی که می‌توان آنها را جهت بهبود کارایی شبکه تنظیم کرد عبارتند از [۸]:

- تعیین تعداد حداکثر تکرار و حداکثر خطای قابل تحمل: این دو عامل در واقع شرایط اتمام آموزش را تعیین می‌کنند.
- اندازه‌ی گام ابتدایی
- نرخ کاهش و افزایش اندازه‌ی گام‌ها

پس از تعیین عوامل، سیستم وارد مرحله‌ی آموزش می‌شود. در مرحله‌ی پنجم پس از تکمیل طراحی سیستم استنتاج فازی پایه، ورودی‌های مربوط به داده‌های آموزشی، به سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی اعمال شده و خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط سیستم به دست خواهد آمد. با استفاده از روش میانگین مربعات خطا، مقدار خطای سیستم در پیش‌بینی خروجی نسبت به خروجی‌های واقعی برای داده‌های آموزشی حاصل می‌شود، نمودارهای مربوط به آموزش رسم می‌گردد، ضریب همبستگی بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های واقعی به دست خواهد آمد.

در مرحله‌ی آخر، ورودی‌های مربوط به داده‌های آزمایش به سیستم اعمال می‌گردند و خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط سیستم نشان داده می‌شود. خطای این خروجی‌های پیش‌بینی شده نسبت به خروجی واقعی توسط روش میانگین مربعات خطا محاسبه می‌شود و ضریب همبستگی بین نتایج واقعی و نتایج پیش‌بینی شده ارائه خواهد شد. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی ایجاد شده در این پژوهش در شکل-۵ نشان داده شده است.

### ۲-۲- نتایج مرحله‌ی آموزش سیستم تخمین گر مبتنی بر سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی (انفیس)

در شکل-۶ برای هر داده‌ی مربوط به مرحله‌ی آموزش، نمودار مقادیر پیش‌بینی شده‌ی خستگی لوله‌ی حفاری توسط سیستم طراحی شده‌ی انفیس و مقادیر واقعی خستگی که از رکوردهای حفاری استخراج شده‌اند رسم گردیده است. خطوط سیاه‌رنگ، مقادیر واقعی خستگی و خطوط قرمز رنگ مقادیر پیش‌بینی شده‌ی



مجموعه‌ی اطلاعاتی استفاده شده در پژوهش‌های ذکر شده کمتر است. با این وجود سیستم طراحی شده، در پیش‌بینی مقادیر نسبت خستگی لوله‌ی حفاری موفق عمل کرده و با توجه به ظرفیت سیستم‌های انفیس توانسته بر این مشکل فائق آید.

■ در این پژوهش سیستم طراحی شده‌ی انفیس برای نخستین بار جهت پیش‌بینی نسبت خستگی لوله‌ی حفاری استفاده شده و نتایج مبین توانایی آن در پیش‌بینی مقدار نسبت خستگی لوله‌ی حفاری است. در کل با توجه به مقادیر ضریب رگرسیون، مشخص است که شبکه‌ی طراحی شده به‌خوبی از عهده‌ی کار برآمده و با کمی طراحی گرافیکی بیشتر حتی می‌توان از آن به‌عنوان نرم‌افزاری جهت پیش‌بینی خستگی لوله‌ی حفاری استفاده کرد.

#### پیشنهادها

جهت بهینه‌سازی مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

■ قبل از آغاز و طی عملیات حفاری، عوامل مورد نیاز با دقت بیشتری پایش و کنترل شوند.

■ باید برای مدل‌سازی اطلاعات کافی در اختیار داشت؛ به‌طوری که هر چه تعداد داده‌های چاه‌های مختلف بیشتر باشد پیش‌بینی دقیق‌تری خواهیم داشت.

■ در این مطالعه تأثیر برخی عوامل دیگر مانند ارتعاشات لوله‌های حفاری یا خستگی ناشی از خوردگی، به‌دلیل عدم دسترسی به این داده‌ها در نظر گرفته نشده است. پیشنهاد می‌شود در صورت امکان دسترسی به مقادیر واقعی و میدانی، عوامل دیگر نیز در پیش‌بینی مقدار خستگی استفاده شوند. ■

Parameter	Value
Measure Depth (m)	3001
Dist from Bit (m)	484
Hoop Stress (psi)	5034
Radial Stress (psi)	-5024
Torsional Stress (psi)	4800
Shear Stress (psi)	30.3
Axial Stress (psi)	5032.1
Bending Stress (psi)	1100.6
VonMises Stress (psi)	0.058

شکل ۱۰ | داده‌های شرایط عملیاتی برای یک شرایط جدید

Estimated Drill Pipe Fatigue : 0.05274

شکل ۱۱ | نسبت خستگی پیش‌بینی‌شده توسط سیستم طراحی شده

#### منابع

- [1] NIOC. News number, NO: 13038, 2013.
- [2] شیگلی، جوزف ادوارد، "طراحی اجزای ماشین"، ترجمه‌ی شادروان، ایرج، ویرایش پنجم، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰، تهران، چاپ ششم، ۱۳۷۹
- [3] Otegui, J.L., "Failure Analysis Fundamentals and Applications in Mechanical Components", Springer, England, 2013.
- [4] Bilgesu H., Altmis U., Ameri S., Mohaghegh S., Aminian K., "A new approach to predict bit life based on tooth or bearing failures", SPE 51082, SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburg, PA, 1998.
- [5] Salakhov, R., Yamaliev V.U., Dubinsky V., "An Expert System Approach to Real-Time Diagnosis of Drill Bit Condition and Preventing Its Damage", SPE 114990, SPE Russian oil and gas technical conference and exhibition, Moscow, Russia, 2008.
- [6] Liold H, Al-Baiyat I, "Implementing Artificial Neural Networks and Support Vector Machines in Stuck Pipe Prediction", SPE, Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait, 2012.
- [7] Ross T.J., "Fuzzy logic with engineering applications", John Wiley & Sons, England, pp 648, 2009.
- [8] Siler W., Buckley J.J., "Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, pp 422, 2005.