Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

بررسی تاثیر پارامتر های عملیاتیفرآیند لایه شکافی با اسید بر هدایت پذیری شکاف القایی

حبیب الله ظفریان ریگکی[۱]، بابک امین شهیدی[۲]، محمد رضا اکبری[۳]

تهران، تقاطع خیابان حافظ و سمیه، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

ha.zafarian@gmail.com

چکیده

فرآیند لایه شکافی با اسید یکی از روش های موثر در انگیزش چاههای نفت و گاز است که سابقه اجرای آن به اوایل قرن بیستم میلادی بر می گردد. اما متاسفانه در کشور به دلیل ضعف فناوری و عملیاتی و علی رغم نیاز چاه‌های کشور، تا کنون به مرحله اجرا در نیامده است. در این فرآیند پس از ایجاد شکاف و تزریق اسید، نفوذ پذیری اطراف چاه به طور قابل توجهه ای افزایش پیدا می کند که در نهایت منجر به افزایش دبی تولیدی چاه می گردد. یکی از پارامترهای موثر در طراحی فرآیند لایه شکافی با اسید، تعیین میزان قابلیت هدایت شکاف ناشی از تماس اسید می‌باشد. پیش بینی دقیق این پارامتر تاثیر قابل توجه ای در برنامه ریزی و انتخاب روش موثر جهت انگیزش چاه و صرفه جویی در زمان و هزینه های عملیاتی دارد. این پارامتر همچنین به عنوان یکی از متغیرهای موثردر تعیین نقطه سر به سر عملیات های ایجاد شکاف در نظر گرفته می شود که از منظر شرکت های مجری و بهره بردار عملیات اهمیت ویژه ی اقتصادی دارد. تا کنون مدل های مختلفی جهت پیش بینی قابلیت هدایت شکاف ارائه شده است که در این میان موضوع رفتار ژئو مکانیکی سنگ سازند و تاثیر پارامترهای عملیاتی قابل کنترل از جمله موضوعات مورد بحث در این حوزه می باشد. در این مقاله سعی شده است با استفاده از یک مدل شبکه عصبی به بررسی پارامترهای مذکور پرداخته شود. سپس با مقایسه نتایج مدل هوشمند و مدل نیرود کراک -به عنوان یک مدل پرکاربرد صنعتی- توانمندی ها هر یک از مدل ها جهت پیش بینی هدایت پذیری شکاف مورد ارزیاقی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تحریک چاه، فرآیند لایه شکافی با اسید، قابلیت هدایت شکاف، استحکام سنگ، مدل سازی هوشمند.

---

[۱] دانشجوی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
[۲] استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
[۳] دانشجوی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

فرآیند لایه شکافی با اسید[1] یکی از فرآیند های متداول انگیزش چاه در مخازن کربناته می باشد که قدمت آن به بیش از نیم قرن می رسد. در طی سال های متمادی این فرآیند از نظر دانش فنی و عملیاتی پیشرفت های قابل توجهه ای داشته است و کاربرد آن روز به روز افزایش چشمگیری پیدا کرده است. به طوری که با بررسی گزارش‌ها منتشر شده تنها در کشور آمریکا در بیش از ۷۰ درصد چاه های این کشور فرآیند های ایجاد شکاف (هیدرولیکی و اسید) جهت افزایش تولید به ثبت رسیده است.

در فرایند لایه شکافی با اسید پس از ایجاد شکاف در دیواره اطراف چاه، اسید به درون شکاف ها جریان پیدا می‌کند و پس از واکنش با سطح دیواره های شکاف، شیارهایی را روی سطح سنگ بوجود می آورد که این شیارها پس از اتمام عملیات و بسته شدن شکاف باعث افزایش نفوذ پذیری اطراف چاه و به تبع آن افزایش میزان تولید می‌گردد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی فرآیند لایه شکافی با اسید، قابلیت هدایت شکاف[2] است که عبارتست از مقدار ظرفیت یا توانایی یک شکاف برای عبور سیال. این پارامترتحت تاثیر متغیرهایی مانند الگوی ایجاد شیار بر روی سطح سنگ[3]، مقدار سنگ حل شده، مقاومت سنگ[4] و تنش لازم جهت بسته شدن شکاف[5] می باشد. قابلیت هدایت شکاف به همراه متغیر میزان نفوذ شکاف[6]، میزان بهره دهی شکاف را کنترل می‌کند و از حاصل ضرب نفوذپذیری و عرض شکاف[7] بدست می آید. به منظور دستیابی به قابلیت هدایت مطلوب بایستی سطوح اسیدکاری شده به طور غیریکنواخت دچار انحلال شوند تا این سطوح هنگام قرار گرفتن در مقابل یکدیگر مانند ستون عمل کرده و مسیر را برای عبور جریان باز نگه دارند[1].

از اویل دهه ۷۰ میلادی تا کنون تلاش هایی متعددی برای بدست آوردن روابط و مدل هایی جهت پیش بینی قابلیت هدایت شکاف صورت گرفته است. این مدل ها که در دو گروه مدل های تئوری و مدل های تجربی تقسیم بندی می شوند دارای نقاط ضعف و قوتی می باشند. در مدل های تجربی با انجام آزمایش های مختلف و بررسی نتایج، رابطه ای میان قابلیت هدایت شکاف و پارامترهای تاثیر گذار مانند دبی تزریق، قدرت انحلال اسید، استحکام سنگ، فشار بسته شدن شکاف و هندسه شکاف بر قرار می گردد. از مهمترین این مدل ها می توان به مدل نیرود و کراک (۱۹۷۳)، نصرالدین (۲۰۰۸)، پورنیک (۲۰۰۸) و رودریگز (۲۰۱۱) اشاره کرد. در مدل های تئوری با استفاده از روابط و اصول موجود و با درنظرگرفتن فرضیاتی، مدلی برای بسته شدن شکاف ها و کاهش عرض شیارها بدست می آید که می توان نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود و به میزان دقت آن را تعیین کرد که از مهمترین این مدل ها می توان به مدل گنجی (۱۹۷۸)، والش (۱۹۸۱) و گنگ (۱۹۹۸) اشاره کرد.[1-10]

[1] Acid fracturing
[2] Acid fracture conductivity
[3] Etching pattern
[4] Rock embedment strength
[5] Closure stress
[6] Fracture penetration
[7] Fracture width

www.SID.ir

Archive of SID

نیرود و کراک در سال ۱۹۷۳ مدلی تجربی برای محاسبه ی قابلیت هدایت شکاف در فرایند لایه شکافی با اسیدارائه دادند. در این مدل قابلیت هدایت شکاف به استحکام سنگ[1]، فشار لازم جهت بسته شدن شکاف ها و قابلیت هدایت اولیه شکاف[2] یا میزان معادل حل شوندگی سنگ[3] وابسته بود. این روابط علیرغم سادگی و گستردگی استفاده در صنعت ولی اثر ویژگی‌های سازند را بر هدایت پذیری در نظر نمی گرفت.[1] اندرسون و همکارانش در سال ۱۹۸۹ بیان داشتند ویژگی های سازند تاثیر قابل توجه ای بر روی هدایت پذیری شکاف دارد. به عنوان مثال سازند های تبخیری (گچی) به علت استحکام ضعیف شان، در اثر اعمال فشار بسته شدن، دارای هدایت‌پذیری پایین تری می باشند.[11]نصرالدین در سال ۲۰۰۶ تاثیر کاهش استحکام سنگ متاثر از تزریق اسید را برای روی هدایت پذیری شکاف مورد بررسی قرار داد. نتایج کار آنها نشان می داد میزان کاهش استحکام سنگ ناشی از تزریق اسید در نمونه های آهکی بیشتر از نمونه های دولومیتی است. این میزان نرم شدگی سازند بسیار وابسته به نوع اسید و نوع سازند بود.[6] پورنیک در سال ۲۰۰۹ با توسعه دستگاه هدایت پذیری و انجام آزمایش های متعدد نشان داد مدل نیرود و کراک تطابق خوبی با دادهای آزمایشگاهی ندارد. این نتایج همچنین بیان می داشت که فرآیند تزریق اسید بر استحکام سنگ تاثیر می گذارد و این موضوع به طور قابل توجه ای در هدایت پذیری شکاف تحت فشار بسته شدن موثر است. داده‌های آزمایشگاهی بیان گر این موضوع بود که برای هر نوع اسید تزریقی یک میزان بهینه وجود دارد که در صورت عبور از آن لزوماً میزان هدایت پذیری افزایش پیدا نمی کند. همچنین سازند های متفاوت رفتار یکسانی از خود در برابر تزریق اسیدهای مشابه نشان نمی دهند.[7]

با توجه مطالب اشاره شده مشخص است رفتار هدایت پذیری شکاف تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی و ژئومکانیکی همچنان پیچیده و مبهم است و نیاز به بررسی های عمیق تر در این موضوع احساس می شود. لذا در این پژوهش تلاش شده است با توجه به رفتار پیچیده هدایت پذیری شکاف متاثر از پارامترهای عملیاتی و همچنین توانمندی های شبکه های عصبی در مدل سازی توابع پیچیده و غیر خطی، از یک مدل هوشمند عصبی جهت پیش‌بینی هدایت پذیری شکاف استفاده گردد. پس از آنبامقایسه دقت مدل پیشنهادی با مدل های نیرود و کراک، تاثیر پارامترهای عملیاتی و استحکام سازند مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- ارائه یک مدل هوشمند

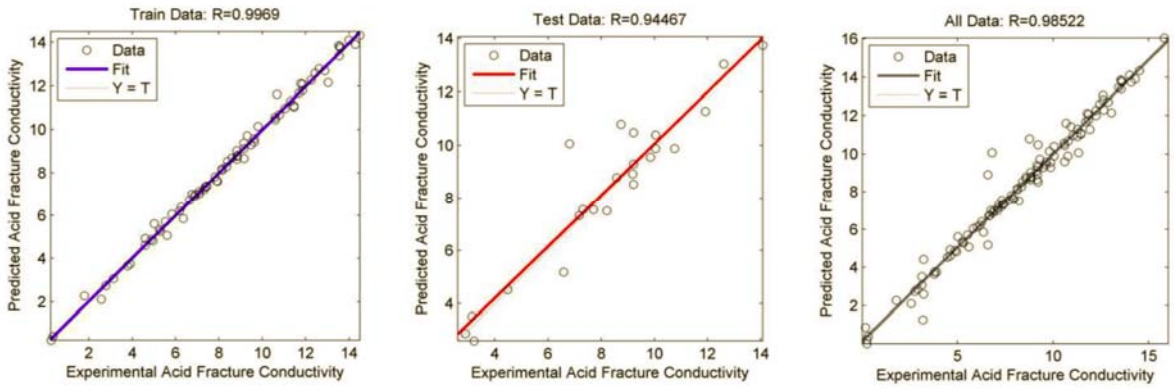
در این پژوهش از داده های مدل نیرود و کراک جهت توسعه شبکه عصبی مورد نظراستفاده شده است.[1]این مجموعه شامل ۱۱۶ داده آزمایشگاهی متشکل از استحکام سازند (S_{RE})، قابلیت هدایت شکاف معادل با میزان حل شوندگی سنگ (DREC)و تنش لازم جهت بسته شدن شکاف ها (σ_c) می باشد که به عنوان متغیر های ورودی مدل شبکه عصبی در نظر گرفته شده اند.هدایت شکاف معادل با میزان حل شوندگی سنگ در واقع پارامتری عملیاتی است که از حاصل ضرب قدرت انحلال اسید تزریقی در حجم اسید تقسیم بر حجم موثر شکاف بدست می‌آید. به عبارت دیگر دو پارامتر حجم اسید تزریقی و غلظت آن دو متغیر قابل کنترل هستند که در عملیات های لایه شکافی جهت بهینه کردن فرآیند می توان از آنها بهره جست.

[1] Rock embedment strength
[2] Initial fracture conductivity under zero closure stress
[3] Dissolved Rock Equivalent Conductivity (DREC)

www.SID.ir

Archive of SID

در اینتحقیقازشبکه هایعصبیچندلایهباالگوییادگیریپسانتشارخطاکهکاربردزیادیدرمدلسازی دارند استفادهشده است. ۸۰ درصد داده های ورودی به طور تصادفی جهت آموزش و۲۰ درصد باقی مانده جهت تست شبکه انتخاب شدند. درهردومرحلهآموزشوتست، حداقلخطای تستوضریبرگرسیونبهعنوانمعیارهاییبررسیدقت شبکهانتخابگردید. حداقل خطای تست، کمترین خطایی است که در یکی از مراحل اجرای شبکه به ازای داده های تست بدست آمده است و ضریب رگرسیون معیاری جهتنشاندادنمیزانانحرافمقادیرپیشبینیشدهومقادیرآزمایشگاهی است.در این مدلتابع انتقال لگاریتمی[1]و الگوریتم آموزش لونبرگ-مارکوارتاستفاده شد. نمودار رگرسیون مربوط به داده های آزمایشگاهی مورد استفاده به تفکیک داده های آموزش و تست این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است که انطباق قابل قبولی را میان داده های پیش بینی و آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار رگرسیون داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده به تفکیک داده های آموزش و تست

جدول ۱ میزان خطای مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل های نیرود – کراک را نشان می دهد. همان طور که مشخص است میزان خطای مدل هوشمند به طور قابل توجه ای پایین است.

جدول ۱: مقادیر میانگین خطاهای نسبی برای کلیه داده ها

مدل	میانگین درصد خطاهای نسبی
مدل هوشمند	۹/۵۵
نیرود-کراک	۵۹/۴۳

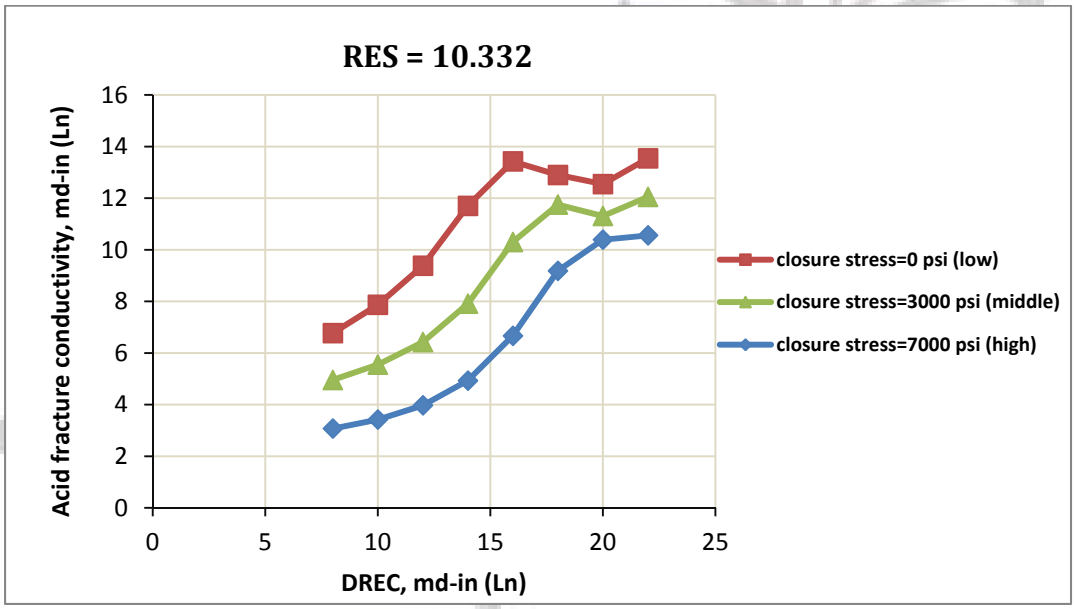
۳- تاثیر پارامترهای عملیاتی بر هدایت پذیری شکاف ایجاد شده

[1]logsig

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲ تاثیر تغییرات پارامتر عملیاتی فرایند لایه شکافی را بر هدایت پذیری شکاف برای فشار های مختلف بر اساس مدل پیشنهادی عصبی نشان می هد. همان طور که مشخص است با افزایش این پارامتر که متاثر از حجم اسید تزریقی و غلظت آن است میزان هدایت پذیری افزایش می یابد و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه روندی کاهشی دارد. موضوعی که در نتایج کار برخی محققین پیشین نیز اشاره شده بود و به دلیل رفتار پیچیده و غیر خطی سنگ مدل صحیحی در این زمینه ارائه نشده بود. در حقیقت نتایج مدل هوشمند پیشنهادی بیان گر این موضوع است که افزایش غلظت و حجم اسید تزریق به هر میزان لزوماً منجر به افزایش هدایت پذیری نمی گردد و یک مقدار بهینه برای آن وجود دارد. این امر از اقتصادی برای شرکت های مجری پروژه ای لایه شکافی بسیار حائز اهمیت می باشد و باعث صرفه جویی قابل توجه ای در میزان اسید تزریقی در این فرایند می شود. ضمن اینکه نتایج و بازده فرآیند را نیز ارتقا می بخشد و منتج به افزایش تولید چاه پس از عملیات لایه شکافی می شود.

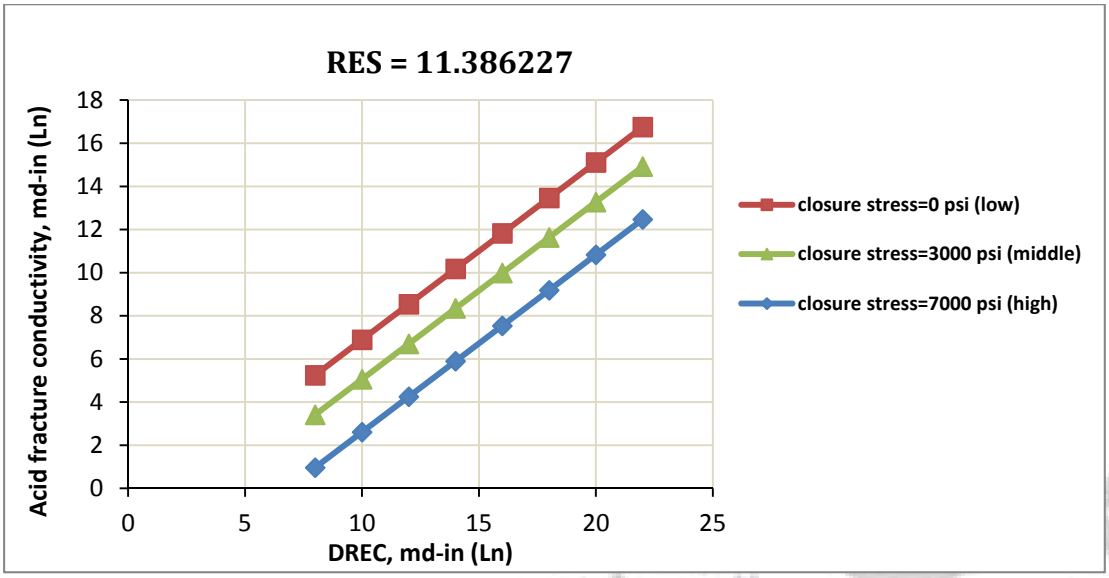


شکل ۲. تاثیر تغییرات پارامتر عملیاتی فرایند لایه شکافی را بر هدایت پذیری شکاف برای فشار های مختلف بر اساس مدل پیشنهادی

جهت مقایسه توانمندی های مدل پیشنهادی، تاثیر تغییرات این پارامتر عملیاتی فرایند لایه شکافی را بر هدایت پذیری شکافدر فشار های مختلف بر اساس مدل نیرود و کراک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ نشان داده می شود این مدل تاثیر این تغییرات را بر روی هدایت پذیری شکاف به صورت خطی و با شیب یکنواخت افزایشی پیش بینی می کند که همان طور که پیشتر توسط برخی از محققین اعلام شد با نتایج آزمایشگاهی تطابق کمتری دارد. به عبارت دیگر بر اساس نتایج مدل نیرود و کراک هر چه میزان غلظت و حجم اسید تزریقی افزایش یابد میزان هدایت پذیری شکاف نیز افزایش خواهد یافت که این موضوع با نتایج آزمایشگاهی منتشر شده در سال ها اخیر در تعارض است.[7]

www.SID.ir

Archive of SID

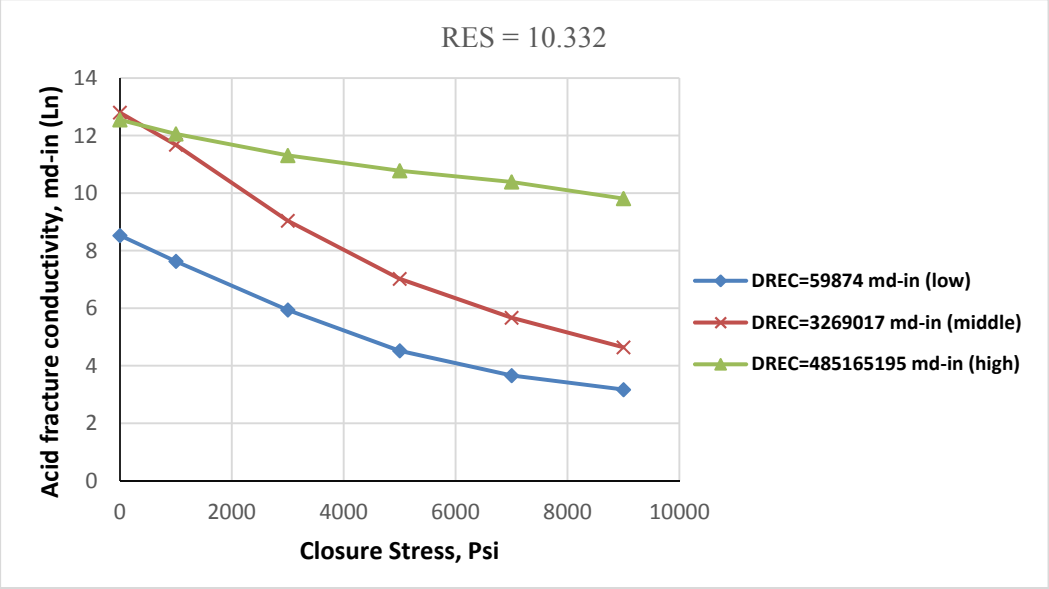


شکل ۳. تاثیر تغییرات پارامتر عملیاتی فرایند لایه شکافی را بر هدایت پذیری شکاف برای فشار های مختلف بر اساس مدل نیرود کراک

به منظور بررسی تاثیر استحکام سازند،هدایت پذیری شکاف در فشارهای مختلف بسته شدن شکاف مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۴). این نتایج نشان می داد رفتار یک سازند تحت اثر افزایش فشار بسته شدن شکاف در فرآیندهایی با پارامترعملیاتی مختلف، بسیار متفاوت می باشد. شیب کاهش هدایت پذیری شکاف زمانی که حجم یا غلظت اسید تزریقی بالا باشد بسیار کم است ولی در هر صورت مقادیر بدست آمده هدایت پذیری مقادیر بسیار بالایی هستند. در حالی که همین شیب کاهش هدایت پذیری برای زمانی که از مقادیر متوسط غلظت و حجم اسید استفاده گردد بسیار شدید است و زمانی که از مقادیر کم غلظت یا حجم اسید بهره جسته شود این شیب کاهش ملایم تر خواهد شد. این موضوع که بیان گررفتار غیر خطی هدایت پذیری شکاف تحت فشارهای مختلف بسته شدن است نشان می دهد حجم و غلظت تزریق اسید یک مقدار بهینه دارد.

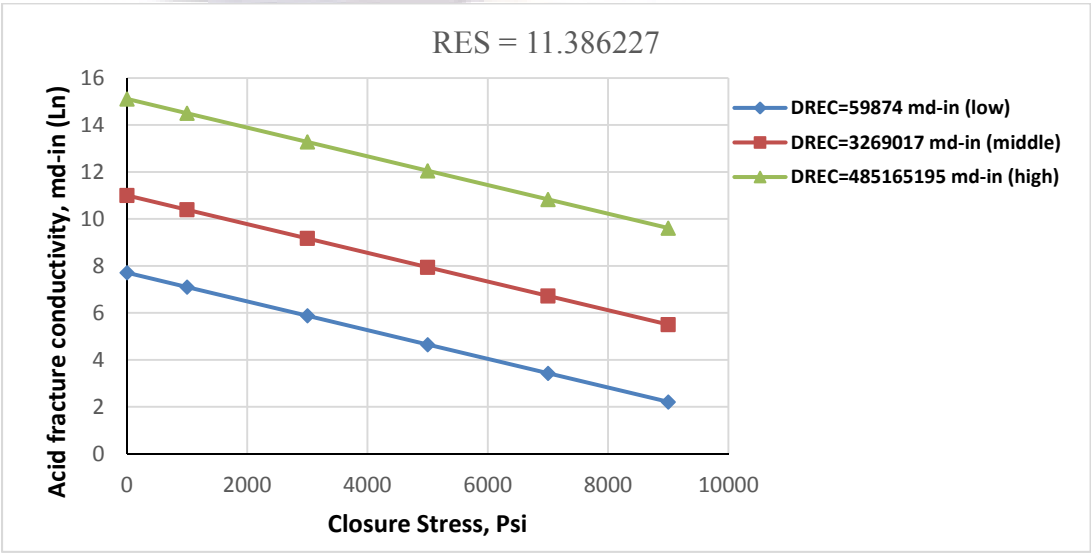
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. هدایت پذیری شکاف در فشارهای مختلف بسته شدن شکاف بر اساس مدل پیشنهادی

این در حالی است که مدل نیرود کراک این رفتار را به صورت خطی و یکنواخت پیش بینی می کند. همان طور که شکل ۵ نشان می دهد،کاهش هدایت پذیری برای پارامترهای عملیاتی مختلف با شیب یکسان صورت می‌پذیرد که با تحلیل های ارائه شده در این زمینه بر اساس رفتار پیچیده سنگ سازند مطابقت ندارد.



شکل ۵. هدایت پذیری شکاف در فشارهای مختلف بسته شدن شکاف بر اساس مدل نیرود کراک

www.SID.ir

Archive of SID

۴- جمع بندی

با توجه به مطالب ارائه شده می توان دریافت قابلیت هدایت شکاف یکی از متغیرهای بسیار مهم در طراحی فرایند لایه شکافی بااسید است. به همین منظور محققان مختلفی در سرتاسر جهان تلاش هایی را جهت ارائه مدل یا رابطه‌ای دقیق که ارتباط بین متغیرهای تاثیر گذار و قابلیت هدایت شکاف را با کمترین خطا برقرار کنند انجام داده اند. با این وجود، علیرغم مدل های متنوعی که تا کنون ارائه شده است؛موضوع رفتار ژئو مکانیکی سازند و تاثیر پارامترهای عملیاتی قابل کنترل همچنان از جمله موضوعات مورد بحث در این حوزه می باشد. در این پژوهش ابتدا یک مدل هوشمند عصبی جهت پیش بینی هدایت پذیری شکاف بر اساس متغیرهای تاثیر گذار ارائه شد. بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند حجم و یا غلظت اسید تزریقی نشان از وجود یک مقدار بهینه جهت رسیدن به قابلیت هدایت پذیری مطلوب می داد. در واقع نتایج مدل هوشمند عصبی نشان می دهد که افزایش غلظت و حجم اسید تزریقی به هر میزان لزوماً منجر به افزایش هدایت پذیری نمی گردد و یک مقدار بهینه برای آن وجود دارد. این امر از منظر اقتصادی برای شرکت های مجری پروژه ای لایه شکافی بسیار حائز اهمیت است و باعث صرفه جویی قابل توجه ای در میزان اسید تزریقی در این فرایند می شود. همچنین نتایج بدست آمده از این مدل نشان می دهد روند کاهش هدایت پذیری شکاف برای مقادیر متفاوت پارامترعملیاتی، یکسان نمی باشد که موید رفتار غیر خطی سازند و وجود نقاط بهینه در مقدار پارامتر عملیاتی لایه شکافی است.

۵- مراجع

1-Nierode, D.E., and Kruk, K.F. 1973. An Evaluation of Acid Fluid Loss Additives, Retarded Acids, and Acidized Fracture Conductivity. Paper SPE-4549 presented at the 48th Annual Fall Meeting of Society of Petroleum Engineering of AIME, Las Vegas, Nevada, USA, 1973.

2-Gangi, A.F. 1978. Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure. International J. of Rock Mechanics, Mining Sciences, and Geomechanics Abstract **15**(5): 249-257.

3-Williams, B.B., Gidley, J.L., and Schechter, R.S. 1979. Acidizing Fundamentals. New York: SPE of AIME: 55.

4-Walsh, J.B. 1981. Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability. International J. of Rock Mechanics, Mining Sciences, and Geomechanics Abstract **18**(5): 429-435.

5-Gong, M., Lacote, S., and Hill, A.D. 1999. New Model of Acid-Fracture Conductivity Based on Deformation of Surface Asperities. SPEJ 4(3): 206-214. SPE-57017.

6-Nasr-El-Din, H.A., Al-Driweesh, S.M., Metcalf, A.S., and Chesson, J.B. 2008. Fracture Acidizing: What Role Does Formation Softening Play in Production Response? SPE Production & Operations 23(2): 184-191. SPE-103344.

7-Pournik, M., Zou, C., Malagon, C. et al. 2007. Small-Scale Fracture Conductivity Created byModern Acid-Fracture Fluids. Paper SPE-106272 presented at the 2007 SPE Hydraulic FracturingTechnology Conference, College Station, Texas, USA, 29-31 January 2007.

8-Mou, J. 2009. Modeling Acid Transport And Non-Uniform EtchingIn A Stochastic Domain In Acid Fracturing.Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station.

www.SID.ir

Archive of SID

9-Deng, J. 2010. Mechanical Behavior Of Small-Scale ChannelsIn Acid-Etched Fractures.Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station.

10-Valdo F.Rodrigues, Wellington Campos, Ana C.R.Medeiros, Rodoldo A.Victor.2011.Acid-Fracture Conductivity Correlations for a Specific Limestone Based on Surface Characterization. SPE-145298

11-Anderson, M.S., and Fredrickson, S.E. 1989. Dynamic Etching Tests Aid Fracture-AcidizingTreatment Design. SPE Production Engineering 4(4): 443-449. SPE-16452.

www.SID.ir