



ژئومکانیک در مهندسی نفت کاربردها، بررسی شکافت هیدرولیکی و مدل‌سازی ژئومکانیکی

مهدی علی پور^۱ ■ برنامه‌ریزی تلفیقی شرکت ملی نفت ایران بهمن بهلولی^۲ ■ دانشگاه تهران

مقدمه

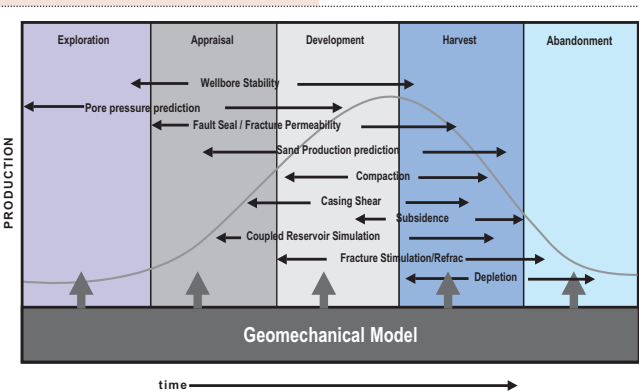
کاربرد مکانیک سنگ از سال‌ها پیش در بخش‌های مختلف صنعت نفت دنیا و در موضوعاتی چون شکافت هیدرولیکی، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، ماسه‌دهی چاه‌ها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسل‌ها، تغییر تراوایی، بهره‌دهی چاه‌ها، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و... مطرح شده و پروژه‌های زیادی در رابطه با آن تعریف گردیده است. در ایران به‌رغم ثبت مشکلاتی نظیر مجالگی لوله جداری، تولید ماسه، بهره‌دهی چاه‌ها در مخازن شکافدار، مشکلات آینده ذخیره‌سازی گاز و... مطالعات ژئومکانیکی مورد توجه جدی قرار نگرفته است. به‌همین دلیل اطلاعات ناچیزی در مورد خواص مکانیکی سنگ مخزن و پوش سنگ میادین هیدروکربوری موجود است. در بسیاری از میادین تولیدی کشور، هیچ‌گونه آزمایش مکانیک سنگ انجام نشده و هیچ بانک اطلاعاتی در این‌باره تهیه نگردیده است. در اکثر شرکت‌های نفتی، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های دنیا، ژئومکانیک مخزن^۳ مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در برخی از این شرکت‌ها بخش ویژه‌ای با همین عنوان تشکیل شده

است؛ این بخش بر تحقیق و اجرای پروژه‌های عملیاتی مربوط به موضوع یاد شده تمرکز دارد. چنان‌که گفته شد، مکانیک سنگ در بخش‌های مختلف صنعت نفت کاربرد گسترده‌ای دارد. این نوشتار بخشی از این کاربردها را عنوان کرده و مباحث شکافت هیدرولیکی، تغییر تراوایی و فعالیت گسل‌ها را با جزئیات بیش‌تری واکاوی می‌نماید؛ تا با روشن شدن اهمیت آن، شاهد حرکت جدی در زمینه جمع‌آوری اطلاعات و انجام مطالعات ژئومکانیکی در شرکت ملی نفت ایران بوده و در نهایت، مدیریت مخازن نفت و گاز کشور بهبود یابد.

به زبان ساده، مکانیک سنگ یا ژئومکانیک^۴ در مهندسی نفت با تأثیر تنش و مقاومت سنگ بر رفتار سازندها در نتیجه فعالیت‌های نفتی سر و کار دارد. مسایل مربوط به ژئومکانیک در تمامی دوران توسعه میادین هیدروکربوری یعنی از همان مراحل اولیه اکتشاف که سؤالات اساسی، نظیر پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری مطرح می‌شود تا مراحل ارزیابی، توسعه و استخراج میدان که اپراتور با مسایلی نظیر بهینه‌سازی پایداری چاه، جهت حفاری و پیش‌بینی بسته بودن گسل‌ها و تراوایی شکاف روبه‌رو است، عنوان می‌شود. شکل ۱ نمایی از مسایل متعدد ژئومکانیکی را که

در دوره‌های مختلف اکتشاف، توسعه و ترک مخزن مطرح است، نشان می‌دهد [۸]. علاوه بر اهمیت زیاد ژئومکانیک در مدیریت مخزن و در مسایلی نظیر پایداری چاه، تولید ماسه، شکافت هیدرولیکی و نشست زمین، اخیراً علاقه روزافزونی به توسعه رابطه بین شبیه‌سازی‌های جریان سیال^۵ و مدل‌های ژئومکانیکی نیز به‌وجود آمده است [۷].

تولید از مخازن نفت و گاز با تغییراتی در خواص ژئومکانیکی همراه است. این تغییرات، وضعیت و مقدار تنش زیر سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر اساس گزارش‌ها و بررسی‌های انجام شده، وجود مشکلات و چالش‌های زیاد در توسعه و تولید از مخازن سخت نشده، چالکی^۶، شکافدار و بسیار متراکم دنیا به این پدیده نسبت داده می‌شود. تغییر در عوامل ژئومکانیکی می‌تواند تراکم سازند^۷ و



شکل ۱ | نمایی از مسایل متعدد ژئومکانیکی در دوره مختلف اکتشاف، توسعه و ترک مخزن [۸]

¹ Mhk_alipour@gmail.com

² Bahman.bohloli@gmail.com

³ Reservoir geomechanics

⁴ Rock mechanic, Geomechanic

⁵ Fluid flow simulator

⁶ Chalk

⁷ Compaction



فرو نشست^۸ زمین، تراوایی مخزن، بازدهی جارویی^۹ در سیلاب‌زنی، میان‌شکنی آب^{۱۰} و فعالیت مجدد گسل‌ها^{۱۱} را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. تغییرات ژئومکانیکی حاصل از شیوه‌های تولید در مخزن و طبقات بالایی^{۱۲} آن به همراه زمین‌شناسی پیچیده میدان، می‌تواند پایداری چاه‌ها را متأثر سازد و موجب مچالگی لوله‌گذاری^{۱۳} و تولید ماسه در میدان گردد. هم‌چنین تغییر در وضعیت تنش (افقی) منطقه می‌تواند باعث تغییر رفتار و واکنش سنگ مخزن به عملیات شکافت هیدرولیکی شود. در مخازن ذخیره‌سازی گاز، تناسوب تزریق و تولید و تغییر درجه حرارت باعث ایجاد مشکلات زیادی در مخزن و حتی پوش سنگ می‌شود. در روش ازدیاد حرارتی، تزریق بخار همراه با ریزش ثقلی^{۱۴} و افزایش دما و فشار باعث تغییر تنش‌های سنگ شده و موجبات شکست آن را فراهم می‌آورد. افزایش تخلخل، تراوایی و قدرت انتقال آب، شتاب فرایند را افزایش می‌دهد. از طرفی، این تغییرات باعث تغییراتی در الگوی حرکت بخار نیز می‌گردد [۱۷، ۱۰].

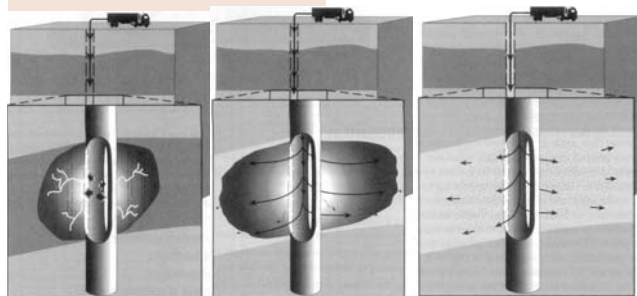
حفاری در لایه‌های مخزنی و لایه‌های عمیق‌تر میادین تخلیه شده با مشکلاتی همراه است. در مخازنی که به تغییر تنش حساس هستند، در آزمایش‌های چاه^{۱۵}، واکنش فشاری چاه مورد آزمایش به تولید یا تزریق متفاوت است و باید در تفسیر این داده‌ها، رفتار ژئومکانیکی سنگ مد نظر قرار گیرد. بنابراین برای تصمیم‌گیری بهینه هنگام حفاری، تکمیل و انگیزش چاه، تعبیر و تفسیر اطلاعات تولید، آزمایش چاه و تدوین استراتژی بهینه تولید، ساخت مدل مناسب ژئومکانیکی و مطالعه کامل رفتار مخزن و سازندهای محیط بر آن (طبقات رومی، جانبی و زرین) در دوره تولید میدان ضروری است. در دوره تولید از مخزن، هر قدر این مدل زودتر ساخته شود، زودتر از مشکلات اشاره شده اجتناب می‌گردد [۱۰].

◆ شکافت هیدرولیکی

شکافت هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌هایی است که به منظور افزایش تولید نفت و گاز از چاه‌ها انجام می‌شود. در خلال این فرآیند، برای شکست سنگ، سیال با فشار کافی به سازند تزریق می‌شود؛ پس از ایجاد شکست، با ادامه تزریق، شکافت ایجاد شده در سازند گسترش یافته و در نهایت با افزودن ماسه (پروپانث) به سیال تزریقی، شکافت ایجاد شده باز نگه داشته می‌شود.

اگرچه بیش از ۶۰ سال است که در صنعت نفت دنیا شکافت هیدرولیکی با موفقیت اجرا می‌شود، اما در ایران گزارشی از اجرای موفق این عملیات ارایه نشده است.

کالیبراسیون^{۱۷} و... می‌باشد که متأسفانه جایگاه آن در شرکت‌های متولی این امر در ایران خالی است. بررسی وضعیت تولید چاه‌های میادین نفتی ایران نشان می‌دهد که متوسط تولید روزانه از حدود ۲۰۰۰ بشکه نفت خام در سال‌های اولیه بهره‌برداری به ۱۸۰۰ بشکه تنزل یافته است. این امر موجب شده است که اولاً چاه‌های مراحل بعدی توسعه در دامنه مخزن (که احتمالاً توزیع شکافت محدود است) حفر گردند و ثانیاً توسعه میادین کوچک‌تر با مخازن کم‌تراوتر در برنامه قرار گیرد. در سال‌های اخیر، مخازن گروه بنگستان و سازند فهلیان از جمله مخازنی هستند که مورد توجه واقع شده‌اند. این سازندها



۲ | نمایی از فرآیند شکافت هیدرولیکی

در میادینی چون جفیر، آزادگان، دارخوین، بندکرخه، آذر و... توسعه یافته‌اند (با توصیف شده و دارای برنامه توسعه می‌باشند). مشخصه بارز این مخازن، تراوایی اندک، توزیع محدود شکافت یا وجود شکافت‌های بسته است؛ از این رو این مخازن برای اجرای شکافت هیدرولیکی یا شکافت با اسید^{۱۸} مستعد بوده و این عملیات با یک برنامه‌ریزی مدون قابل اجرا می‌باشند [۱، ۴].

◆ تغییر تراوایی سنگ مخزن و فعال شدن گسل‌ها

از جمله پدیده‌هایی که یک مهندس نفت هنگام مطالعه دقیق مخازن (به‌ویژه مخازن شکافتدار با گسل‌های متعدد) با آن روبه‌روست، عدم تطابق مناسب تاریخچه تولید

چاه‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری‌های پیچیده نشان می‌دهد که بعضی تغییرات در بهره‌دهی چاه‌ها به رابطه بین تغییر فشار سیال، تنش در مخزن و تراوایی شکافت‌های طبیعی هنگام تولید و تزریق وابسته است. هم‌چنین در مخزنی که گسل‌ها سبب بخشی عمل کردن مخزن می‌گردند، تخلیه ممکن است با فعال شدن گسل‌ها همراه بوده و علاوه بر تداخل جریان و مخلوط شدن سیال‌های مختلف، وضعیت تراوایی اطراف مخزن را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

با انجام آزمایش‌های مناسب مشخص می‌شود که بهره‌دهی چاه^{۱۹} تا حدودی تابع هدایت‌پذیری شکافت است که با تغییر تنش تغییر می‌کند. این حساسیت به تغییر تنش احتمالاً در مخازن شکافتدار پر فشار^{۲۰} و متراکم قابل توجه است. در مخازن شکافتدار ممکن است هنگام تزریق، شکافت‌ها منبسط و هنگام تخلیه بسته شوند. وقتی در نتیجه تولید، فشار مخزن کم می‌شود، تنش مؤثر وارد بر یک المان مشخص از سنگ افزایش می‌یابد. در لیتولوژی‌های مختلف، مقدار تنش مؤثر وارد بر صفحه شکافت مطابق ضریب پوروالاستیک و امتداد صفحه شکافت نسبت به تنش‌های اصلی تغییر می‌کند. بنابراین در صورت شناخت جهت شکافت‌ها و تنش اصلی و خواص سنگ، کاهش تراوایی و امکان فعال شدن گسل‌ها قابل پیش‌بینی است. تشخیص مخزنی که به تغییر تنش حساس هستند، به ثبت و بررسی دقیق اطلاعات تولید و تکنیک‌های پیچیده اندازه‌گیری نیاز دارد. اگر چه ممکن است این پدیده در یک مخزن شکافتدار وجود داشته باشد و

⁸ Subsidence

⁹ Sweep efficiency

¹⁰ Water breakthrough

¹¹ Fault reactivation

¹² Overburden

¹³ Casing collapse

¹⁴ Steam assisted gravity drainage

¹⁵ Well test

¹⁶ MiniFrac test

¹⁷ Calibration test

¹⁸ Acid fracturing

¹⁹ Deliverability

²⁰ Over pressured



منابع

- [1] Alipour.M, “Hydraulic Fracturing on Soft Rock”, Master Thesis, TU Delft, Netherlands, 2003
- [2] C. DAVID & M. LE RAVALEC-DUPIN, Rock Physics And Geomechanics In The Study Of Reservoirs And Repositories, Geological Society Of London 2007.
- [3] Dwi Hudya F., Sandra Natalia, David Castillo, “The Effect Of Pressure Depletion On Geomechanical Stress And Fracture Behavior In Gunung Kembang Field” Proceedings, Indonesian Petroleum Association, 2007
- [4] Economides M.J, Nolte K.G. “Reservoir Stimulation”, 2000
- [5] Henk, “Perspectives Of Geomechanical Reservoir Models – Why Stress Is Important”, OIL GAS European Magazine 4/2008
- [6] J.C. Lorenz, ”STRESS-SENSITIVE RESERVOIRS”, SPE 50977
- [7] P. Longuemare, M. Mainguy, “Geomechanics in Reservoir Simulation: Overview of Coupling Methods and Field Case Study”, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5
- [8] Patrick M.Collins, “Geomechanical Effects on the SAGD process”, SPE # 97905, 2007
- [9] Zoback, “Reservoir Geomechanics: Current Capabilities And Future Trends”, 2007
- [10] Zoback, M. D “Reservoir Geomechanics” Cambridge University Press, 2007

²¹ Overburden, Side-burden
²² Rock compressibility
²³ Partial coupling
²⁴ Fully coupled
²⁵ Iterative partial coupling
²⁶ Explicit partial coupling

تغییر تنش و تغییر شکل در مخزن بستگی دارد. روش دیگر گنجاندن ژئومکانیک در شبیه‌ساز، حل هم‌زمان معادلات جریان و تغییر شکل است. این روش دقیق‌تر بوده اما برای انجام محاسبات به زمان بسیار زیادی نیاز دارد؛ البته این روش هنوز در مرحله تحقیقات می‌باشد [۶، ۲].

نتیجه‌گیری

۱. اهمیت و میزان تأثیرپذیری تولید مخازن از تغییر تنش‌های برجا در مخازن مختلف، متفاوت است و به بررسی دقیق اطلاعات مربوطه نیاز دارد.

۲. اهمیت ژئومکانیک در مهندسی نفت و مدیریت مخزن سبب شده است که در این زمینه، مطالعات و تحقیقات جدی انجام شود. هم‌اکنون در بسیاری از شرکت‌های نفتی دنیا و دانشگاه‌ها، واحدهای برای این‌گونه مطالعات تشکیل شده و شروع به کار نموده است. حتی شرکت‌های مشاوره‌ای ویژه این موضوع نیز ثبت شده و در حال ارائه خدمات می‌باشند. لازم است شرکت ملی نفت و دانشگاه‌های ایران نیز از این موضوع غافل نشده و در این رابطه به‌طور جدی و سریع اقدام کنند.

۳. به‌رغم این‌که تولید از مخازن بزرگ ایران نظیر اهواز، گچساران، مارون و... به‌شدت از سیستم شکاف تأثیر می‌پذیرد، مطالعات ژئومکانیکی در مراکز پژوهش صنعت نفت و دانشگاهی مغفول مانده است. در مخازن سخت‌تر نیز که گسترش شکاف، محلی و اندک بوده و بی‌شک شکافت هیدرولیکی باعث افزایش بهره‌دهی چاه‌ها می‌گردد نیز، فعالیت اصولی خاصی صورت نپذیرفته است.

۴. حفاری و شکافت هیدرولیکی متأثر از جهت و مقدار تنش‌های اصلی است. در مخازن تخلیه شده به‌دلیل کاهش تنش‌های اصلی، در صورت عدم استفاده از گل سبک‌تر، احتمال شکافت هیدرولیکی ناخواسته و هرزروی جریان گل وجود دارد.

سیال سعی شده است که تغییرات ژئومکانیکی مخزن نیز به‌گونه مقتضی در عملکرد مخزن گنجانده شود. معمولاً در شبیه‌سازهای جریان، تغییر حجم منفذی از طریق ضریب فشردگی^{۲۲} اعمال می‌شود. بر این اساس تغییر تنش و کرنش ناشی از تولید مخزن به‌طور مستقیم محاسبه نمی‌گردد. از این‌رو شبیه‌ساز در استفاده از این ضریب به‌طور غیر مستقیم فرض می‌کند که هنگام تولید، مسیر تنش در مخزن شناخته شده و ثابت است. به‌علاوه در این شبیه‌سازها تأثیر محیط اطراف نیز در نظر گرفته نمی‌شود. البته برای این منظور فعالیت‌های مهمی صورت پذیرفته است، به‌این ترتیب که در نرم‌افزارهای تجاری مانند Eclipse، CMG و... یک ماژول با عنوان ژئومکانیک گنجانده شده که به‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه، با محدودیت‌های جدی نیز روبه‌روست.

امروزه در نظر گرفتن اثرات ژئومکانیکی در شبیه‌سازی مخزن به دو روش ادغام بخشی^{۲۳} و ادغام کامل^{۲۴} امکان‌پذیر است. در روش ادغام بخشی، ابتدا معادلات در یک شبیه‌ساز جریان سیال حل می‌گردند سپس نتایج به شبیه‌ساز ژئومکانیکی وارد شده و تنش‌ها، تغییر شکل و تراوایی مربوطه محاسبه می‌شوند. ممکن است مدل در یک زمان چندین بار بین شبیه‌ساز جریان و ژئومکانیک رفت و برگشت نماید تا شرایط تعادل و همگرایی حاصل شود^{۲۵} یا نتایج یک شبیه‌ساز در شبیه‌ساز دیگر به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد^{۲۶}. انتخاب نوع ادغام به شرایط مسأله (میزان

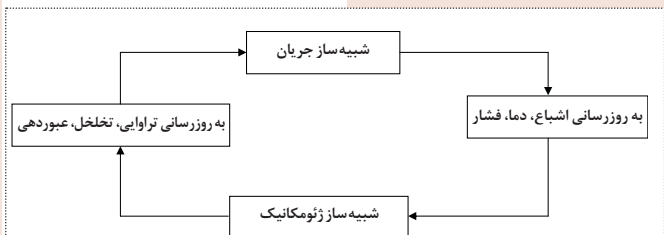
تولید نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر آن قرار گرفته باشد، اما به‌دلیل عدم بررسی‌های ژئومکانیکی کشف نشود [۶].

مدل ژئومکانیکی

یک استراتژی موفق در توسعه مخزن، ناگزیر از انجام مطالعات و مدل‌سازی ژئومکانیکی مخزن است. یک مدل جامع ژئومکانیکی مخزن شامل وضعیت تنش به‌صورت تابعی از عمق (جهت و مقدار)، خواص فیزیکی سنگ مخزن و سازندهای اطراف^{۲۱} آن (مقاومت سنگ و مدول‌های الاستیک)، تخمین فشار منفذی، توصیف و توزیع شکاف‌ها و گسل‌ها می‌باشد. دستیابی به چنین اطلاعات کاملی همیشه دشوار است و این موضوع که چه المان‌هایی از مدل ژئومکانیکی برای حل مسأله، ضروری هستند نیز از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. توجه به این نکته لازم است که همواره در اجزای مختلف مدل ژئومکانیک، عدم قطعیت وجود دارد.

شبیه‌سازی یکپارچه ژئومکانیکی و جریان سیال

در سال‌های اخیر موضوع تأثیر تخلیه مخزن در بهره‌دهی چاه‌ها، تغییر تراوایی سنگ مخزن (شکاف و ماتریکس)، فعالیت گسل‌ها و چگونگی کاربرد آن در تطابق تاریخچه تولید از مخزن، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. به‌گونه‌ای که در برخی موارد بدون در نظر گرفتن رفتار ژئومکانیکی مخزن، تطابق تاریخچه تولید از مخزن با خطای بسیاری روبه‌رو خواهد بود. به‌همین دلیل در شبیه‌سازهای تجاری جریان



شکل ۳ | شبیه‌سازی هم‌زمان جریان و ژئومکانیک به‌طور مستقیم