

بررسی یکپارچگی پوش سنگ در تزریق زیر زمینی کربن دی اکسید در سازند آسماری

محسن تقی زاده^۱، علیرضا طباطبائی نژاد^۲، رضا فلاح^۳

^۱دانشجو، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Taghizadehmohsen90@gmail.com

^۲پروفسور، نام دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Tabalireza@yahoo.com

^۳استادیار، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Rezafalahat2001@gmail.com

چکیده

با گسترش صنایع گوناگون و در پی آن ازدیاد گازهای گلخانه ای در جو زمین، کشورهای مختلف در سال ۱۹۹۷ تحت با قراردادی تحت عنوان پیمان کیوتو بر آن شدند تا از گسترش انتشار این گازها در اتمسفر جلوگیری کنند. بهترین روش برای این مهم جدا سازی و ذخیره سازی زیرزمینی کربن دی اکسید می باشد. با توجه به وجود مخازن زیاد خالی شده از نفت در ایران، بررسی یکپارچگی کلی سیستم مخزن و پوش سنگ برای نگهداری کربن دی اکسید تزریق شده امری اجتناب ناپذیر می باشد. در این تحقیق با توجه به داده های مخزن آسماری با لایه پوش سنگ گچساران-۱، یک مدل سه بعدی ساخته شده و هدف از این پروژه بررسی تغییرات ژئومکانیکی صورت گرفته در ناحیه زیرمخزن، مخزن و پوش سنگ می باشد. در این تحقیق پارامترهای مختلفی از جمله جابجایی عمودی پوش سنگ، تغییرات فشار منبذی، تغییرات تنش های افقی و به طور کلی بررسی یکپارچگی پوش سنگ در طی فرآیند تزریق کربن دی اکسید در بازه های زمانی مختلف شبیه سازی شده است. با توجه به شبیه سازی های صورت گرفته و تحلیل تنش های موجود به کمک معیار تشخیص مهر-کولومب (Mohr-Coulomb) یکپارچگی مخزن در طول بازه زمانی شبیه سازی شده تزریق حفظ خواهد شد. در این پروژه همچنین تاثیر اعمال تغییرات پارامترهای سنگ و سیال بر رژیم تنش های مخزن مورد نظر بررسی شده است که از جمله آن می توان به تغییرات کم تنش در پی تغییرات پارامترهایی از جمله نسبت پواسون (Poisson Ratio) و مدول یانگ (Young's Modulus) اشاره کرد.

واژه های کلیدی: یکپارچگی پوش سنگ، تحلیل عددی، شبیه سازی، ذخیره سازی کربن دی اکسید

Investigation of Caprock Integrity in CO₂ Geological sequestration In Asmari Formation

Mohsen Taghizadeh¹, Alireza Tabatabaei Nejad², Reza Falahat³

¹Student, Sahand University of Technology

²Professor, Sahand University of Technology

³Assistant Professor, Sahand University of Technology

Abstract

By development of various industries and the consequent increase in greenhouse gas emissions in the atmosphere, various countries under the Kyoto Protocol in 1997 were subjected to prevent the spread of these gases in the atmosphere. The best method for this is the geological CO₂ sequestration. As there are so many depleted reservoirs in Iran, investigation of overall integrity of the reservoir system and the storage of carbon dioxide is inevitable. In this research, according to the data of Asmari reservoir which is sealed by Gachsaran-1 caprock, a three-dimensional model was constructed and the purpose of this project was to investigate geomechanical changes in the subsurface, reservoir and caprock area. In this research, various parameters have been simulated, including vertical caprock displacement, pore pressure variations, horizontal stress variations and, in general, the investigation of the integrity of the caprock during the carbon dioxide injection process in different time periods. According to simulations and analysis of existing stresses, using Mohr-Coulomb Measurement Criteria, the integrity of the reservoir will be maintained over the simulated injection time interval. In this project, the effect of applying rock and fluid parameters changes on the reservoir stress regime has been studied, including low tension changes following changes in parameters such as Poisson's ratio and Young's modulus.

Keywords: Caprock integrity, Numerical Analysis, Simulation, CO₂ Storage

۱ مقدمه

افزایش روزافزون غلظت گازهای گلخانه ای (به خصوص دی اکسید کربن) از انقلاب صنعتی تاکنون منجر به افزایش دمای میانگین زمین و لذا تغییرات شدید آب و هوایی شده است. پس از پیمان کیوتو در سال ۱۹۹۷ کشورها متعهد شدند که جلوی

انتشار و افزایش غلظت CO₂ در اتمسفر را بگیرند، لذا راه حل‌هایی ارائه شد که جداسازی و ذخیره‌سازی کربن (Carbon Capture and Storage) بهترین و کارآمدترین راه حل موجود بود که شامل سه فرآیند جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی دی-اکسید کربن است. آن چه که اهمیت فراوان دارد وجود یک لایه نگهدارنده است که مانع نشت و خروج گاز تزریق شده پس از ذخیره‌سازی آن در دراز مدت شود که مسئولیت این امر بر عهده پوش سنگ بالای مخزن ذخیره‌سازی است. نشت CO₂ از طریق پوش سنگ گاهی به دلیل غلبه فشار گاز بر نیروهای موینگی است اما در اغلب موارد ناشی از شکست مکانیکی سنگ می‌باشد. تزریق CO₂ موجب افزایش فشار منفذی شده و تنش‌های موثر در مخزن را کاهش می‌دهد. در نتیجه وقوع پدیده‌هایی همچون تغییر تنش‌ها، گسیختگی برشی، گسیختگی کششی و جابجایی قائم پوش سنگ در منطقه تزریق محتمل است. لذا مطالعه مکانیک سنگ پوش سنگ در عملیات ذخیره‌سازی زیرزمینی CO₂ به لحاظ اهمیت و حساسیت آن موضوع این تحقیق است. در صورت نشت CO₂ ذخیره شده در مخزن از طریق پوش سنگ و ورود آن به اتمسفر یا منابع آب‌های طبیعی زیرزمینی که موجب اسیدی شدن آن‌ها می‌شود، جدا از همه هزینه‌هایی که تاکنون روی پروژه انجام شده است، صدمات جدی به محیط زیست و حتی خسارت جانی ممکن را به همراه خواهد داشت. لذا قبل از انتخاب مخزن کاندید و پیاده‌سازی تسهیلات عملیات در سایت ذخیره‌سازی، باید مطالعات کافی صورت گیرد و قابلیت‌های سایت کاندید بررسی شود. تا کنون مطالعات بسیاری برای مدل سازی زیرزمینی و مدل عددی کربن دی اکسید صورت گرفته است. راتکوئیست و تسانگ در سال ۲۰۰۲ تغییرات مکانیکی و هیدرومکانیکی بر یک پوش سنگ نیمه تراوای شیلی در عملیات تزریق کربن دی اکسید در لایه آبدۀ شور را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل دو بعدی در لایه آبدۀ شور پوشیده شده با پوش سنگ نیمه تراوا را برای مدت ۱۰ سال تزریق شبیه سازی کردند [۱] شی و دوروکان در سال ۲۰۰۹ مدلی را برای ارزیابی پاسخ هیدرومکانیکی مخزن نسبت به تولید گاز، تزریق کربن دی اکسید و ذخیره آن در درازمدت معرفی کردند. آن‌ها احتمال شکست برشی و فعالسازی مجدد گسل‌ها و میزان بالآمدگی لایه‌ها را بررسی نموده و رابطه‌ای را برای حداکثر فشاری که لایه می‌تواند در طول دوره تزریق تحمل کند را پیشنهاد کردند. [۲] ویلاراسا و همکاران یک سیستم همگون آبدۀ-پوش سنگ با استفاده از شبیه ساز کد برایت (CODE_BRIGHT) ساختند. یک ساختار ویسکوپلاستیک برای بررسی ایجاد شکاف در پوش سنگ توسط آنان پیشنهاد شد. [۳] دمپسی و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل از مخزن محصور در محور عمودی و آزاد در محوری افقی را با استفاده از کد المان انتقال جرم ارائه کردند. هدف آنان محاسبه تنش‌های موجود در پوش سنگ با توجه به افزایش فشار در مخزن (با توجه به تزریق کربن دی اکسید) بود. از دیگر اهداف آنان پیش بینی تغییر شکل مکانیکی در پوش سنگ و همچنین بالآمدگی سطح مورد تماس با کربن دی اکسید بود. [۴] ونبین فی و همکاران در سال ۲۰۱۵ از کوپل کننده دوگانه اکلیپس و آباکوس برای ارائه مکعبی سه بعدی برای محاسبه تغییرات ژئومکانیکی و دمایی در لایه اوردوس چین با استفاده از نرخ تزریق صنعتی و تحقیقاتی استفاده کردند. [۵]

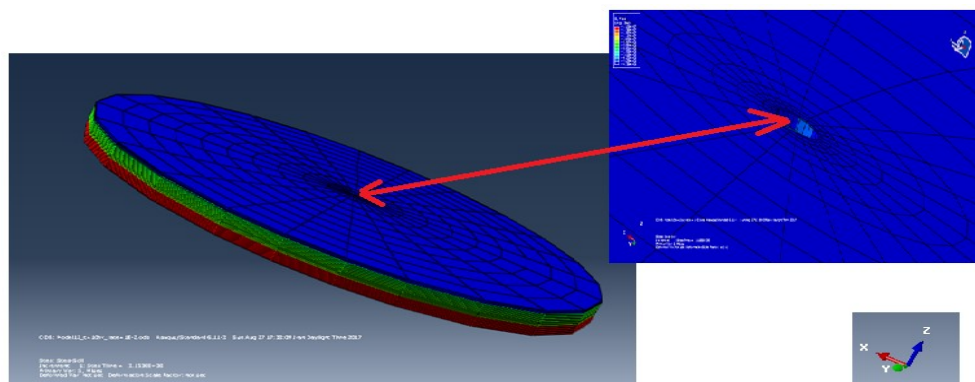
۲ روش تحقیق

۲-۱- تعریف مدل و نسبت دادن خواص سنگ به آن

مخزن مورد بررسی در این تحقیق جهت ذخیره‌سازی زیرزمینی CO₂ مخزن آسماری است که تخلخل نسبتاً بالایی داشته و کربناته می‌باشد. پوش سنگ این مخزن سازند گچساران ۱ می‌باشد. تزریق CO₂ به این مخزن با استفاده از یک چاه تزریقی به مدت ۱۰ سال با دبی تزریق ۱۰^۶ کیلوگرم در ماه شبیه‌سازی شده است. CO₂ تزریق شده در دما و فشار عمق مورد نظر به حالت فوق بحرانی در خواهد آمد. اثرات ژئومکانیکی تزریق CO₂ شامل تغییرات فشار منفذی، تنش‌ها و جابجایی‌های حاصل در پوش سنگ با استفاده از مدل‌سازی المان محدود سه بعدی بررسی شده است.

۲-۲- شرایط اولیه و مرزی مدل

بار معادل لایه‌های بالاسری پوش سنگ که برابر با ۸۳/۱ MPa است بر سطح بالای مدل (سطح بالایی پوش سنگ) اعمال شد. این بار برابر با حاصلضرب دانسیته متوسط لایه‌های بالاسری (۲۶۰۸ kg/m³) در شتاب گرانش زمین (۹/۸۱ N/kg) در ضخامت قائم لایه‌های بالاسری (۳۲۴۸ m) است. شتاب گرانش زمین به صورت نیروی گراویتی برابر با ۹/۸۱ N/kg لحاظ شده تا با توجه به دانسیته سنگ‌های هر لایه، بار ناشی از وزن آن لایه محاسبه شده و بر لایه‌های پایین آن اعمال شود. دیواره داخلی چاه تزریقی و مرزهای افقی مدل در جهت افقی مفید شده‌اند. کف مدل نیز در تمامی جهات مفید شده است.

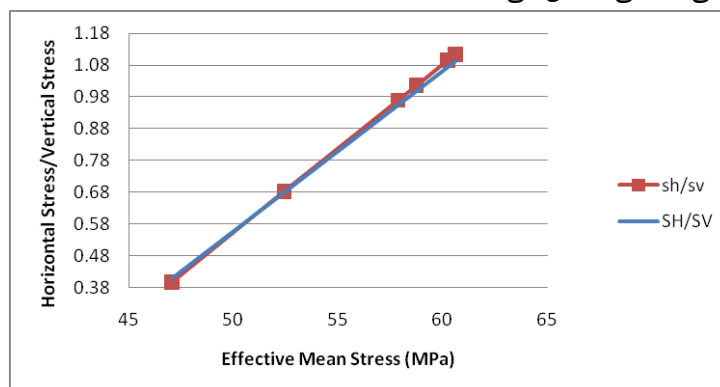


شکل ۱: هندسه مدل و شبکه بندی صورت گرفته بر روی کل مدل و چاه تزریقی

۳-۲ نتایج

۱-۳-۲. میدان تنش‌های اولیه:

حالت تنش اولیه کنترل‌کننده الگوی توسعه کرنش پلاستیک است. اگر تنش افقی بیشتر از تنش قائم باشد، تمرکز کرنش پلاستیک در سطح تماس بین مخزن و پوش سنگ است که می‌تواند موجب شکستگی در این ناحیه شود. در شکل (۲) تاثیر نسبت تنش افقی حداقل و حداکثر اولیه به تنش قائم اولیه پوش سنگ بر تغییرات تنش اصلی موثر حداقل (σ'_3) در یک نقطه از کف پوش سنگ در مجاورت چاه تزریقی پس از ۱۰ سال تزریق نشان داده شده است. کم‌ترین مقدار σ'_3 نشان‌دهنده بیشترین احتمال وقوع گسیختگی کششی است. با افزایش نسبت تنش‌های اولیه مذکور، تنش اصلی موثر حداقل افزایش یافته و لذا احتمال وقوع گسیختگی کششی کاهش می‌یابد.

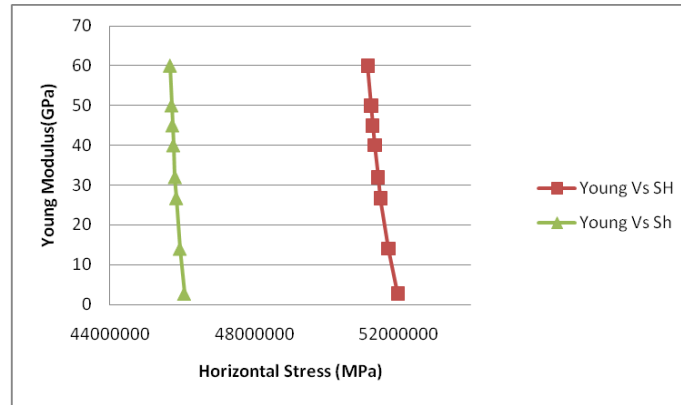


شکل ۲: تاثیر نسبت تنش‌های اولیه بر احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ

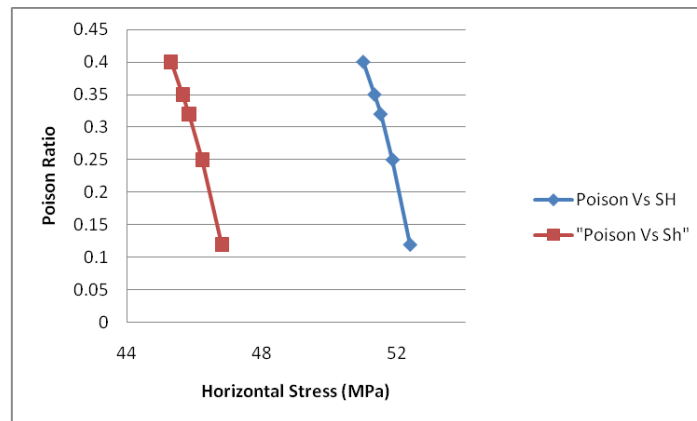
۲-۳-۲. مدول یانگ پوش سنگ:

شکل (۳) تاثیر مدول یانگ پوش سنگ را بر مقدار تنش اصلی موثر حداقل (معیاری از احتمال وقوع گسیختگی کششی) در سطح تماس مخزن و پوش سنگ در مجاورت چاه تزریقی نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار σ'_3 نشان‌دهنده بیشترین احتمال وقوع گسیختگی کششی است. با افزایش مدول یانگ پوش سنگ از ۲/۷ GPa تا ۶۰ GPa مقدار تنش اصلی موثر حداقل تنها ۰/۴ کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش مدول یانگ تنش اصلی موثر حداقل را به مقدار ناچیزی کاهش داده و احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ اندکی افزایش می‌یابد.

۳-۳-۲. ضریب پواسون پوش سنگ: شکل (۴) تاثیر ضریب پواسون پوش سنگ را بر مقدار تنش اصلی موثر حداقل (معیاری از احتمال وقوع گسیختگی کششی) در سطح تماس مخزن و پوش سنگ در مجاورت چاه تزریقی نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار σ'_3 نشان‌دهنده بیشترین احتمال وقوع گسیختگی کششی است. با افزایش ضریب پواسون پوش سنگ از ۰/۱۲ به ۰/۴۰ پس از ۱۰ سال مقدار تنش افقی و مینیموم به مقدار کمی کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش ضریب پواسون پوش سنگ تنش اصلی موثر حداقل را کاهش داده و احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ را افزایش می‌دهد.



شکل ۳: تاثیر مدول یانگ پوش سنگ بر احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ



شکل ۴: تاثیر ضریب پواسون پوش سنگ بر احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان چنین استنباط کرد که هر چه ضریب پواسون پوش سنگ بیشتر باشد، احتمال وقوع گسیختگی و در نتیجه اختلال در یکپارچگی پوش سنگ افزایش می‌یابد. همچنین میزان حساسیت یکپارچگی پوش سنگ به ضریب پواسون بیشتر از مدول یانگ بوده اما کم‌تر از میزان حساسیت آن نسبت به میدان تنش‌های اولیه است.

۳ نتیجه‌گیری

طبق شبیه سازی صورت گرفته هر چه مدت زمان تزریق CO₂ بیشتر باشد، تنش‌های موثر بیشتر کاهش خواهند یافت. همچنین نرخ کاهش تنش‌های موثر در زمان‌های اولیه پس از شروع تزریق بیشتر بوده و پس از آن با نرخ کم‌تری کاهش می‌یابند. مدول یانگ پوش سنگ تاثیر چندانی بر یکپارچگی پوش سنگ ندارد به گونه‌ای که افزایش مدول یانگ پوش سنگ احتمال وقوع گسیختگی کششی در پوش سنگ را به مقدار بسیار ناچیزی افزایش داده و احتمال وقوع گسیختگی کششی در آن را به مقدار بسیار ناچیزی کاهش می‌دهد. با افزایش ضریب پواسون پوش سنگ احتمال وقوع گسیختگی برشی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ضریب پواسون پوش سنگ احتمال وقوع گسیختگی کششی در آن را به مقدار ناچیزی افزایش می‌دهد.

منابع

- Rutqvist, J., and Tsang, C.F., A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation. *Environmental Geology*, 2002. 42(2-3): p. 296-305.
- Shi, J.Q. and S. Durucan, A coupled reservoir-geomechanical simulation study of CO₂ storage in a nearly depleted natural gas reservoir. *Energy Procedia*, 2009. 1(1): p. 3039-3046.
- Vilarrasa, V., S. Olivella, and J. Carrera, Geomechanical stability of the caprock during CO₂ sequestration in deep saline aquifers. *Energy Procedia*, 2011. 4: p. 5306-5313.
- Dempsey, D., Kelkar, S., Davatzes, N., Hickman, S., Moos, D., and Zemach, E. 2014. Evaluating the roles of thermoelastic and poroelastic stress changes in the Desert Peak EGS stimulation. *Proc., Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, USA.
- Wenbin Fei, Qi Li*, Xiaochen Wei, Ranran Song, Miao Jing, Xiaochun Li, Interaction Analysis for CO₂ Geological Storage and Underground Coal Mining in Ordos Basin, China, *Journal of Engineering Geology*