



شبیه سازی المان محدود ذخیره سازی زیرزمینی سیال درون مخازن متخلخل

امین چمنی^۱

چکیده

ذخیره سازی زیر زمینی سیالات در چند دهه اخیر توجه قابل ملاحظه ای را چه در زمینه ذخیره سازی گاز طبیعی و چه در زمینه ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن به خود جلب کرده است. ذخیره سازی زیر زمینی گاز طبیعی در سازندهای مخازن هیدرو کربن تهی شده متداول ترین روش ذخیره سازی می باشد. تزریق سیالات در لایه های زیر زمینی سبب افزایش فشار منفذی سازند می گردد که خود باعث از بین رفتن تعادل تنشهای وارده بر سازند و فشار منفذی سیالات سازند میشود. همچنین در اثر تزریق یک میدان جابجایی القایی گسترش می یابد. این میدان جابجایی و میدان تنشهای القا شده در اثر تزریق سبب ناپایداری صفحات ناپیوستگی و گسله های از پیش موجود، ناپایداری و حتی گسیختگی لوله های جداری و بالا زدگی و جابجایی قائم و افقی در سازندهای فوقانی و سطح زمین می گردند که از حیث پایداری سازه های سطحی در نزدیکی زون تزریق حائز اهمیت می باشد. برای بررسی اثر تزریق و میدانهای تنش و جابجایی القایی در اثر تزریق یک برنامه المان محدود ویژه توسط مولف در این پژوهش تهیه شد که این اثرات ژئومکانیکی پدیده تزریق را آنالیز می کند. این برنامه میدان تنشهای ثانویه ناشی از تزریق سیال را نیز نمایش می دهد.

کلیدواژه ها: ذخیره سازی زیر زمینی، المان محدود، گاز طبیعی، دی اکسید کربن، مخازن هیدروکربوری تهی شده.

۱- مقدمه

روش المان محدود در تحلیل پاسخ مصالح بویژه شبیه سازی مسائل مهندسی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. سه دسته مختلف از محققین در پیش برد و استفاده از این روش آنالیز عددی پیشگام می باشند: ریاضی دانان، فیزیک دانان و مهندسی [۱]. در میان مدل های مختلف برای بررسی رفتار مصالح تحت بارگذاری، مدل ساختاری ایزوتروپیک خطی الاستیک علیرغم سهولت نسبی در خلق بینش اولیه مناسب بسیار مورد توجه می باشد. از مزایای این مدل ساختاری اینست که تنها دو ویژگی مکانیکی برای تبیین آن کافیهست: مدول الاستیک (Young's Modulus) و نسبت پواسون (Poisson's Ratio).

Settari and Mourits (1998) مدلسازی با مدل الاستیک خطی و غیرخطی انجام دادند. Minkoff et. al. (2003) رفتار ژئومکانیکی یک مخزن را در طول ۲۵ سال تولید آنرا مورد مطالعه و تحقیق قرار دادند. Yin et. al. (2007) یک مدل مرکب از روش المان محدود و Displacement Discontinuous Model (DDA) را برای بررسی پاسخ مخزن مورد استفاده قرار دادند.

^۱ نویسنده مسؤل: استادیار دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن aminchamani@birjand.ac.ir و aminchamani@gmail.com

۲..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت
در این مقاله مدل ساختاری ایزوتروپیک خطی الاستیک برای سرتاسر مدل مفروض می باشد. در ابتدا نتیجه یک مدل تحلیلی یک بعدی مورد بررسی قرار میگیرد و سپس نتایج تحلیل به روش المان محدود مورد بحث قرار میگیرند. و در پایان یک سری نتایج کاربردی معرفی می گردند.

۲- مشخصات مکانیکی سازندهای مدل

در این تحقیق تزریق سیالات زیرزمینی در سازند-X مورد مطالعه قرار میگیرد که خصوصیات زمین شناسی و مکانیکی کل مدل یکسان و در جدول (۱) خلاصه شده است. به نام و محل این سازند بنا به توافق محرمانه اشاره نمی شود.

جدول (۱): مشخصات هندسی و مکانیکی سازند-X

Property	Formation X
Top of the formation (m) - MDRT	840
Thickness (m)	660
Density (g/cm ³)	2.25
Young's Modulus (GPa)	10
Poisson's Ratio	0.3

Fjaer et. al. (2008) بر پایه یک سری ساده سازیها پاسخ یک مدل یک بعدی (نشست سازند) در اثر تولید را با توجه به رابطه (۱) بصورت زیر تعیین کردند:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{E_{static}} \cdot \frac{(1 + \nu_{static}) \cdot (1 - 2\nu_{static})}{(1 - \nu_{static})} \cdot \alpha \cdot \Delta P \quad (1)$$

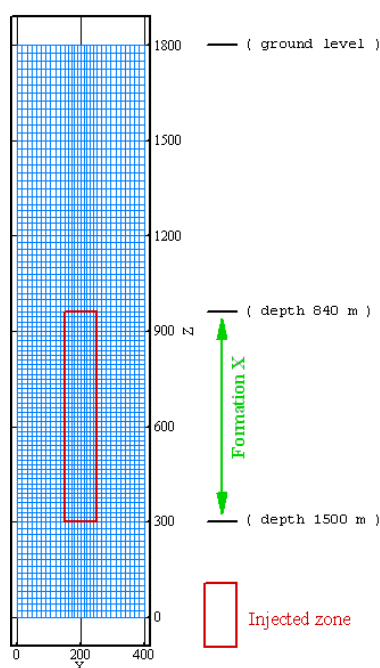
E_{static} ، ν_{static} ، α ، ΔP ، h و Δh عبارتند از مدول الاستیک استاتیکی، نسبت پواسون استاتیکی، ضریب Biot، میزان تغییر فشار منفذی، ضخامت سازند (زون تزریق) و میزان جابجایی در اثر استحصال از سازند. در این مدل اگر تغییر فشار منفذی سازند روند کاهشی داشته باشد مدل میزان نشست را و اگر روند افزایشی داشته باشد مدل میزان فرازگیری (Uplift) را پیش بینی می کند. این مدل یک بعدی می باشد و مبتنی بر رفتار ایزوتروپیک خطی الاستیک توسعه داده شده است. با توجه به فرمولاسیون این مدل تحلیلی یک بعدی میزان فراز گیری در مراحل تزریق به ازای ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد فشار منفذی اولیه سازند-X محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): تخمین میزان فرازگیری در اثر تزریق در سازند-X

Injection Step	Reservoir Thickness (m)	Initial reservoir pressure, P_i (MPa)	Injection pressure		Uplift Δh (cm)
			ΔP (%)	ΔP (MPa)	
I	660	12.0	10	1.2	5.9
II	660	12.0	25	3.0	14.7
III	660	12.0	50	6.0	29.4
IV	660	12.0	75	9.0	49.1

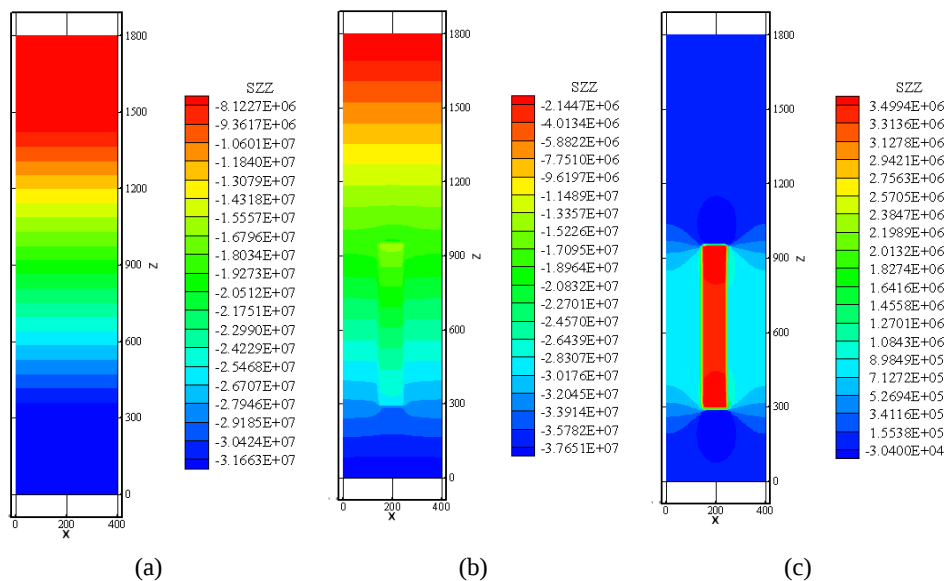
۳- شبه سازی المان محدود

در این تحقیق تحلیل عددی با روش المان محدود توسط برنامه تهیه شده توسط مولف انجام شده است. فرض شده است تزریق سیال تا میزان ۵۰ درصد فشار منفذی اولیه سازند-X (۶ مگاپاسکال) صورت پذیرفته است. همچنین تزریق در تمام افق سازند-X صورت پذیرفته است. ویژگیهای هندسی مدل و سازند تزریق و نحوه چیدمان المانهای مدل در شکل (۱) نشان داده شده اند. این برنامه از حیث ویژگیهای عددی از المانهای شش وجهی هشت گره ای سه بعدی و فرمولاسیون ایزوپارامتریک بنا شده است. همچنین وضعیت کرنش صفحه ای مفروض قرار گرفته است.

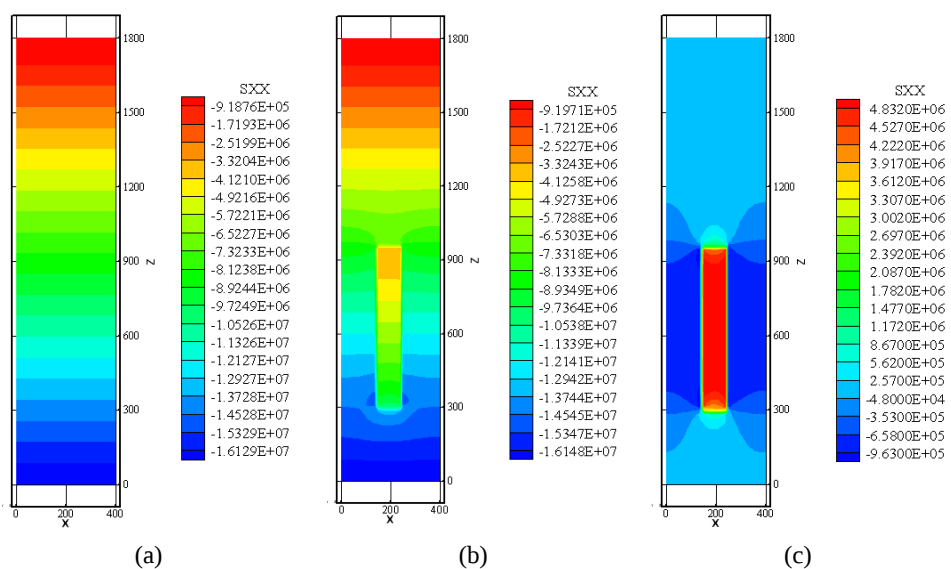


شکل (۱): هندسه مدل المان محدود و زون تزریق

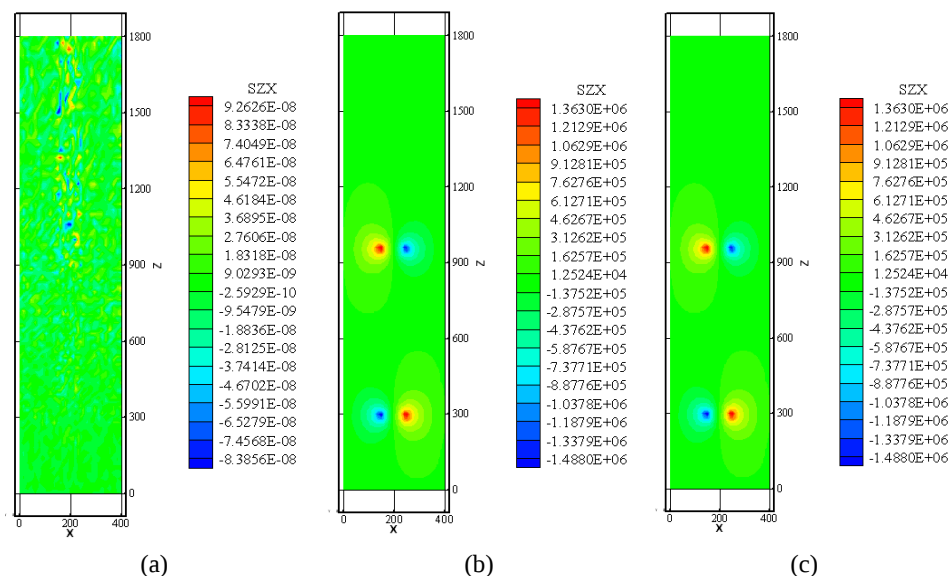
شبه سازی المان محدود تزریق سیال به سازند-X در دو مرحله متوالی صورت پذیرفته است. در مرحله اول کل مدا تحت بارگذاری ثقیلی قرار میگیرد و در مرحله دوم فشار منفذی سیال درون سازند-X تا مرز ۶ مگاپاسکال افزایش می یابد. نتیجه این تحلیل عددی در قالب شکلهای (۲) تا (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۲): نمایش کنتوری تنش قائم در سه وضعیت: تحکیم ثقلی (چپ)، تحکیم ثقلی همراه با تزریق سیال در زون تزریق (میانی) و نتیجه خالی بدون تاثیر تنش ثقلی (راست).



شکل (۳): نمایش کنتوری تنش افقی در سه وضعیت: تحکیم ثقلی (چپ)، تحکیم ثقلی همراه با تزریق سیال در زون تزریق (میانی) و نتیجه خالی بدون تاثیر تنش ثقلی (راست).



شکل (۴): نمایش کنتوری تنش برشی در سه وضعیت: تحکیم ثقلی (چپ)، تحکیم ثقلی همراه با تزریق سیال در زون تزریق (میانی) و نتیجه خالص بدون تأثیر تنش ثقلی (راست).

بر اساس نتایج نمایش داده شده در شکل‌های (۲) تا (۴) می‌توان تفسیرهای ذیل را استنتاج کرد:

- تزریق سیال در زون تزریق و زون‌های طرفین آن یک میدان تنش کششی از حیث تنش‌های قائم القا می‌کند در حالیکه در زون‌های تحتانی و فوقانی بلافصل یک میدان تنش فشاری از حیث تنش‌های قائم القا می‌کند (شکل ۲)،
- از نقطه نظر تنش افقی، تزریق سیال یک میدان تنش کششی در زون تزریق و زون‌های تحتانی و فوقانی بلافصل القا می‌کند در حالیکه در زون‌های طرفین زون تزریق یک میدان تنش فشاری ایجاد می‌کند (شکل ۳)،
- تزریق سیال سبب ایجاد و گسترش زون‌های تنش برشی قابل ملاحظه‌ای در مدل بخصوص در نزدیکی گوشه‌های زون تزریق میگردد. بعبارت دیگر، بعد از تزریق تنش‌های قائم و افقی دیگر تنش‌های اصلی نمی‌باشند.

۴- نکات و تفسیر کاربردی

با توجه به مطالعه انجام شده توسط برنامه المان محدود ویژه این تحقیق و شکل‌های (۲) تا (۴) یک سری نکات کاربردی استنتاج می‌شوند:

- تنش‌های قائم و افقی فشاری در زون تزریق بدلیل توسعه تنش‌های کششی القایی ناشی از تزریق سیال کاهش می‌یابند که خود از نظر بار فشاری وارده بر چاه‌های افقی و قائم حائز اهمیت است،
- تقلیل تنش‌های فشاری در جهت قائم و افقی پایداری صفحات ناپیوستگی و گسله‌های از پیش موجود در منطقه را بحرانی می‌سازد،

..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

- تزریق سیال سبب توسعه زونهای تنش برشی قابل ملاحظه ای در نزدیکی زون تزریق می گردد که از حیث فعال سازی مجدد ناپیوستگیها و گسله های از پیش موجود در مدل حائز اهمیت می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیرات ژئومکانیکی تزریق و نگهداری سیالات درون سازندهای تهی شده مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا نتیجه یک مدل یک بعدی ساده سازی شده بیان گردید و سپس نتایج تحلیل عددی توسط برنامه المان محدود سه بعدی توسعه داده شده توسط مولف مورد بحث و تفسیر قرار گرفت. و در پایان یک سری نکات کاربردی از نتایج این تحلیل عددی برشمرده شدند.

۶- مراجع

- [1] Bathe K. J. (1996) "*Finite element procedure*". Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [2] Settari A., Mourits F.M. (1998) "*A coupled reservoir and Geomechanical simulation system*". SPE Journal. 219-226.
- [3] Minkoff S.E., Stone C.M., Bryant J., Peszynska M., Wheeler M. (2003) "*Coupled fluid flow and Geomechanical deformation modeling*". Journal of Petroleum Science and Engineering, 38, pp. 37- 56.
- [4] Yin, S., Dusseault M., Rothenburg, L. (2007) "*Coupled multiphase poroelastic analysis of reservoir depletion including surrounding strata*". Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science, 44, 758-766.
- [5] Fjaer J, Holt RM, Horsrud P, Raaen AM, Risenes R. (2008) "*Petroleum related rock mechanics*". 2nd Edition. Developments in petroleum science 53.



Finite Elements Simulation of Underground Fluid Storage in Porous Reservoirs

Amin Chamani¹

Extended Abstract:

Summary: Underground natural gas and Carbon dioxide geologic sequestration have attracted remarkable attention during the past decades. Underground natural gas storage in depleted petroleum reservoir is the most common strategy for natural gas underground storage.

Introduction: Fluid injection inside a formation enhances the tensile stress field tendency which violates the equilibrium between solid phase skeleton's stress field and the applied stress field of the injected formation and the surrounding horizons. The new equilibrium between the applied load on the target formation with the pore fluid pressure are achieved while the displacement field develops inside and around the injected zone and receives to the ground surface that affects the stability and safety of the surface structures.

Methodology and Approaches: To study the geomechanical effects of fluid injection an especial finite element program was developed and used in this research. The geomechanical effects include the redistribution of the vertical and horizontal stress fields as well as shear stress field after gravitational consolidation and fluid injection. Finite element method of numerical analysis is the most suitable method for the current study since the medium of the model is assumed continuous.

Results and Conclusion: The results of this numerical study in terms of stress field redistribution after injection shows the new stress fields development inside and at the surrounding formation which are crucial from geomechanical point of view and stability of the load applied on the wellbore and casing and the prone instability of preexisting discontinuities due to fluid injection.

Keywords: *Underground Fluid Storage, Finite Element Method, Natural Gas, Carbon Dioxide, Depleted Hydrocarbon Reservoir*

¹Corresponding Author: Amin Chamani, Assistant Professor, University of Birjand, Birjand, Iran, | Email Address: aminchamani@gmail.com, aminchamani@birjand.ac.ir .