



بیست و سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران ۲۰ و ۲۱ آبانماه ۱۳۹۹ The 23rd Symposium of Geological Society of Iran 10-11 November, 2020



بررسی عوامل اثرگذار بر تکامل چین های جدایشی جعبه ای شکل با استفاده از مدلسازی عددی به روش المان مجزا

نازنین اسلامی رضائی، دانشجوی دکتری تکتونیک دانشگاه شهید بهشتی تهران
سید احمد علوی، عضو هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی تهران

چکیده

این پژوهش به بررسی تکامل چین خوردگی جدایشی با استفاده از مدلسازی عددی به روش المان مجزا می پردازد. هدف اصلی واکاوی عوامل موثر در شکل گیری ساختار چین خوردگی جعبه ای و خصوصاً تاثیر ضخامت لایه جدایشی و تعداد لایه های کمتر مقاوم بالایی به عنوان متغیرهای مدلسازی در تکامل اشکال مختلف چین های جدایشی میباشد. در این مطالعه، شبه ماتریسی متشکل از نه^۹ درایه (مدل) طراحی شده که هر کدام از این درایه ها حاصل ترکیب منحصر به فردی از متغیرها (ضخامت لایه جدایشی و تعداد لایه های بالایی ضعیف) میباشد. نتایج نشان میدهد که این ترکیب از متغیرهای موثر میتواند موجب شکل گیری ساختارهای متنوع چین خوردگی جدایشی شوند به عنوان مثال برای مدل های با ضخامت مشابه در لایه جدایشی و تعداد لایه های ضعیف بالایی در حال کاهش، هندسه نهایی بیشتر تحت تاثیر ضخامت لایه جدایشی است و به ساختار چین جعبه ای مشابهت دارد. مدل هایی حاصله نهایی قابل مقایسه با مدل های کینماتیکی ارائه شده پیشین هستند.

کلمات کلیدی: مدلسازی عددی المان مجزا، چین جدایشی، چین جعبه ای

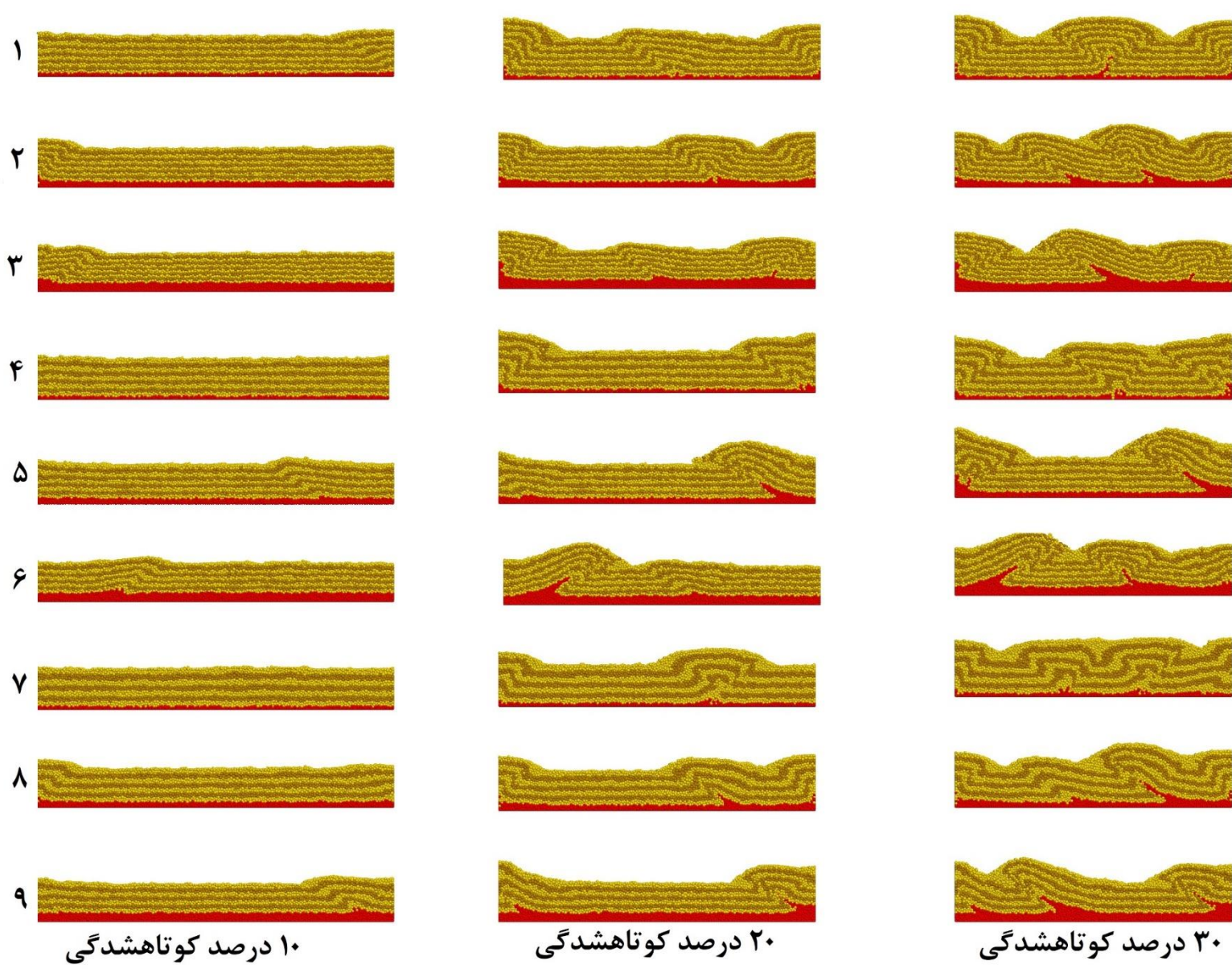
مواد و روش کار

رویکرد اتخاذ شده در این پژوهش مدلسازی عددی سه بعدی المان مجزا با استفاده از بسته نرم افزار سه بعدی Particle Flow Code از شرکت نرم افزاری Itasca Consulting Group میباشد که جهت شبیه سازی و مدلسازی بسیار قدرتمند و دارای امکانات کار آمدی از جمله تحلیل مکانیکی تعاملات مواد دانه ای و دارای انعطاف بسیار در مسیر مدلسازی میباشد و به نسبت سایر نرم افزارها در پردازش اطلاعات و ارائه مدل نهایی به عنوان خروجی فرایند مدلسازی دارای سرعت پردازش قابل توجهی است. در ابتدا یک بلوک مکعب مستطیل شش ضلعی به عنوان مدل اولیه متشکل از ۲۱۴۰۳ المان کره ای در ابعاد ۱۰ کیلومتر طول در ۱ کیلومتر ارتفاع و ۰.۵ کیلومتر عرض (X,Y,Z) تهیه شد. شعاع المان ها برابر ۲۵ الی ۴۱ متر برای لایه جدایشی و لایه های بالایی در نظر گرفته شد که همگی از توزیع گاوسی اندازه ذرات تبعیت میکنند. لایه های روبراه متشکل از تناوبی از لایه های مقاوم و کم مقاوم طراحی شد که توسط تفاوت در رنگ آمیزی المانها این تفاوت در مقاومت مشخص شده است. میزان چگالی برای تمامی قسمت های مدل بصورت میانگین برابر با ۳۰۰۰ kg/m³ و میزان مقاومت یا سختی ذرات که متناسب است با مدول یانگ برابر با (۱۰^{۱۰} × ۱۰^۱) برای لایه های بالایی با مقاومت بالا، (۱۰^{۰۱} × ۱۰^۵) برای لایه های بالایی با مقاومت کم و (۱۰^{۰۱} × ۱۰^۱) برای لایه جدایشی لحاظ شد. زاویه اصطکاک داخلی برای طبقات بالایی برابر 0.5 و برای لایه جدایشی صفر در نظر گرفته شده تا مقاومت پایین مدنظر حاصل گردد. به منظور در نظر گیری شرایط مرزی، دیواره های جانبی مدل به عنوان سطوح سخت تعریف شدند که تنش فشاری جانبی افقی از طریق دیواره سمت چپ به مدل اولیه اعمال گردید و قسمت بالایی مدل به صورت سطح آزاد لحاظ شد تا جابجکه کوتاهشدگی ۲۰.۱۰ و ۳۰ درصدی حاصل گردد. لازم به ذکر است که ضخامت لایه جدایشی به عنوان یکی از متغیرهای مورد بررسی به صورت ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ از ضخامت کل مدل (کسری از ضخامت کل مدل) در نظر گرفته شد.

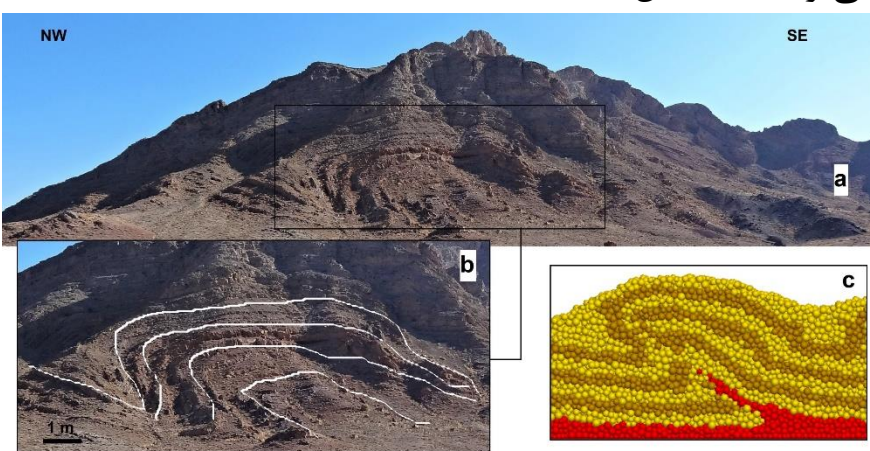
بحث

پس از طراحی مرحله اولیه مدل مکعب مستطیل شکل، جهت درک بهتر، یک شبه ماتریس سه در سه (شکل ۲) متشکل از ۹ مدل با تنظیمات اولیه طراحی شد و هر درایه این ماتریس یکی از مدل های اولیه حاصل از در نظرگیری جفت متغیر (ضخامت لایه جدایشی و تعداد لایه کم مقاومت بالایی) اعمال شده میباشد جدول (۱) و شکل (۲). این ۹ مدل نامگذاری شده و پس از اعمال تنش فشاری جانبی و ایجاد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کوتاهشدگی میتوان فرایند دگرشکلی پیش رونده را در شکل (۳) مشاهده نمود. مدل های حاصل ۱ و ۴ و ۷ که داری ضخامت لایه جدایشی یکسان و تعداد لایه های کم مقاومت بالایی رو به کاهش از مدل ۱ به سمت ۷ هستند، هندسه هایی را نشان میدهند که با ساختار چین جعبه ای و لیفت اف قابل مقایسه میباشد و همچنین مدل ۱ تا مدل ۳ هندسه چین جدا شده لیف آف (Detached lift off) در مدل ۱ و ساختار چین جعبه ای در مدل ۳ را به نمایش میگذارد و همچنین در مدل ۱ میتوان توسعه گسشن به عنوان گسشن جدایشی در چین جدایشی غیرمنتظران را مشاهده نمود. مدل ۲ به سادگی ترکیبی از چین جدایشی غیرهماهنگ و چین لیفت اف بوده که طی مراحل مختلف فرایند تکامل چین و بواسطه پیشرفت کوتاهشدگی ایجاد میشوند.

هندسه مدل ۵ با هندسه چین گسلسورده غیرمنتظران سازگار بوده و جریان مواد شکل پذیر از بخش پایینی به سمت قسمت های بالاتر به خوبی قابل مشاهده است. مدل شماره ۸ نشان دهنده چین با دامنه اندک است و مدل شماره ۹ به خوبی نماینده ای برای نمایش چین گسل خورده غیرمنتظران میباشد. مدل شماره ۳ به سادگی تعریف پایه چین های جدایشی را نشان میدهد که دارای مقدار مناسبی از مواد شکل پذیر مثل شیل یا نمک در لایه جدایشی است که به وضوح فضای ایجاد شده در بخش پایینی چین را پر کرده است. همچنین با در نظر گیری لایه هایی که ممکن است حین چین خوردگی نهشته شوند، نام چینه های جدایشی رشدی نیز برای این مدل پیشنهاد میشود. مدل شماره ۶ چین خوردگی جدایشی غیر هماهنگ را که دارای هندسه موازی در کمان خارجی نشان میدهد و در نهایت مدل ۹ نمونه خوبی از چین گسل خورده نامنتظران میباشد. مقایسه مدل های عددی حاصله با مدل های ارائه شده توسط Mitra2003 هماهنگی قابل ملاحظه ای را نشان میدهد.



اگر چه سعی شده تا شرایط حاکم بر مدلسازی تا جای ممکن به شرایط حاکم در طبیعت مشابه باشد، فرایند مدلسازی در تلاش برای شبیه سازی یک ساختار خاص موجود در طبیعت نبوده و تهیه یک سری از مدل های مفهومی در الویت این پژوهش قرار داشته است. با این حال، به منظور صحت سنجی مدل های حاصله، نتایج با ساختار چین جعبه ای مشاهده شده در بخش ایران مرکزی در فاصله ۶۰ کیلومتری شمال استان اصفهان واقع در موقعیت جغرافیایی 33°09'30"N و 51°46'30"E مورد مقایسه قرار گرفته است. در این منطقه لایه های بالایی متشکل از لایمستون و لایه های زیرین متشکل از شیل و شیل سیلتی هستند در نتیجه با توجه به مشابهت شرایط حاکم در منطقه با شرایط تشکیل ساختار چین خوردگی جدایشی انتظار می رود ساختارهای جالب توجهی همانند چین جعبه ای در این پهنه مشاهده شود. شکل ظاهری و خصوصیات مدل شماره ۷ از شبه ماتریس شرح داده شده به خوبی با ساختار مشاهده شده در طبیعت مشابهت و سازگاری دارد. تعداد لایه های کم مقاومت بالایی و همچنین ضخامت لایه جدایشی در مدل طبیعی و عددی قابل مقایسه میباشد.



نتیجه گیری

با توجه مدل های حاصله و هندسه های چین های جدایشی و با در نظر گیری ضخامت لایه جدایشی و تعداد لایه های کم مقاومت به عنوان متغیرهای مدلسازی کنترل کننده هندسه نهایی چین، میتوان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد لایه های بالایی، مدل ها هندسه و ساختارهای پیچیده تری را در طی مراحل دگرشکلی نشان داده و احتمال روی دادن گسشن در فرایند دگرشکلی محتمل است. این پژوهش نشان میدهد که در مدل های با تعداد لایه های بالایی کمتر و حداقل ضخامت لایه جدایشی هندسه محتمله چین ساده جعبه ای خواهد بود. همچنین با بررسی مدل های حاصله میتوان نتیجه گرفت که در کل هندسه نهایی حاصل از مدلسازی بیشتر تحت تاثیر ضخامت لایه جدایشی است تا تعداد لایه های بالایی در نتیجه با تغییر میزان ضخامت لایه جدایشی میتوان طیفی از اشکال ساختاری را مشاهده نمود. همچنین در مدل های با لایه جدایشی ضخیم میتوان با وضوح بیشتر جریان یافتن مواد شکل پذیر را از بخش پایینی به سمت قسمت های بالایی مشاهده نمود. با بررسی شبه ماتریس نهایی و با در نظر گرفتن اشکال ساختاری در مرحله سی درصد کوتاهشدگی و بیشینه دگرشکلی مدل های حاصله با مدل های کینماتیکی قبلی ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین سازگاری قابل توجهی نشان میدهد که تاییدی بر صحت فرایند مدلسازی است (به عنوان مثال Mitra 2003).

منابع

Botter, C., Cardozo, N., Hardy, S., Lecomte, I., & Escalona, A. (2014). From mechanical modeling to seismic imaging of faults: A synthetic workflow to study the impact of faults on seismic. *Marine and Petroleum Geology*, 57, 187-207.

Burberry, C. M. (2015). Spatial and temporal variation in penetrative strain during compression: Insights from analog models. *Lithosphere*, 7(6), 611-624.

Derikvand, B., Alavi, S.A., Abdollahi Fard, I., Hajjalibeigi, H., 2018. Folding style of the Dezful Embayment of Zagros Belt: Signatures of detachment horizons, deep-rooted faulting and syn-deformation deposition. *Marine and Petroleum Geology* 91, 501-518.

Ghanadian, M., Faghih, A., Grasmann, B., Fard, I. A., & Maleki, M. (2017). Analogue modeling of the role of multi-level decollement layers on the geometry of orogenic wedge: an application to the Zagros Fold-Thrust Belt, SW Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 100(8), 2837-2853.

Hardy, S. (2019). Discrete element modelling of extensional, growth, fault-propagation folds. *Basin Research*, 31(3), 584-599.

Hardy, S., McClay, K., & Muñoz, J. A. (2009). Deformation and fault activity in space and time in high-resolution numerical models of doubly vergent thrust wedges. *Marine and Petroleum Geology*, 24(2), 232-248.

Meng, Q., & Hodgetts, D. (2019). Combined control of décollement layer thickness and cover rock cohesion on structural styles and evolution of fold belts: A discrete element modelling study. *Tectonophysics*, 757, 58-67.

Morley, C. K., King, R., Hillis, R., Tingay, M., & Backe, G. (2011). Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: A review. *Earth-Science Reviews*, 104(1-3), 41-91.

Morley, C. K., von Hagke, C., Hansberry, R. L., Collins, A. S., Kanitpanyacharoen, W., & King, R. (2017). Review of major shale-dominated detachment and thrust characteristics in the diagenetic zone: Part 1, meso-and macro-scope scale. *Marine and Petroleum Geology*, 173, 168-228.

Nabavi, S. T., Alavi, S. A., Diaz-Azpiroz, M., Mohammadi, S., Ghassemi, M. R., Fernández, C., Barcos, L., & Frehner, M. (2020). Deformation mechanics in inclined, brittle-ductile transpression zones: Insights from 3D finite element modelling. *Journal of Structural Geology*, 104082.

Nabavi, S. T., Alavi, S. A., Mohammadi, S., & Ghassemi, M. R. (2018). Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: insights from 3D elasto-plastic finite element models. *Journal of Structural Geology*, 106, 19-40.

Nabavi, S.T., Alavi, S.A., 2019. A meso-scale faulted multi-etchment fold, Khahr area, Kerman, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 108, 885-886.

Poblet, J., McClay, K.R., 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 80, 1085-1109.

Saein, A. F. (2017). Folding style controlled by intermediate decollement thickness change in the Lurestan region (NW of the Zagros fold-and-thrust belt), using analogue models. *International Journal of Earth Sciences*, 100(5), 1525-1537.

Sherkati, S., Molinaro, M., de Lamotte, D.F., Letouzey, J., 2005. Detachment folding in the Central and Eastern Zagros fold-belt (Iran): salt mobility, multiple detachments and late basement control. *Journal of Structural Geology* 27, 1680-1696.

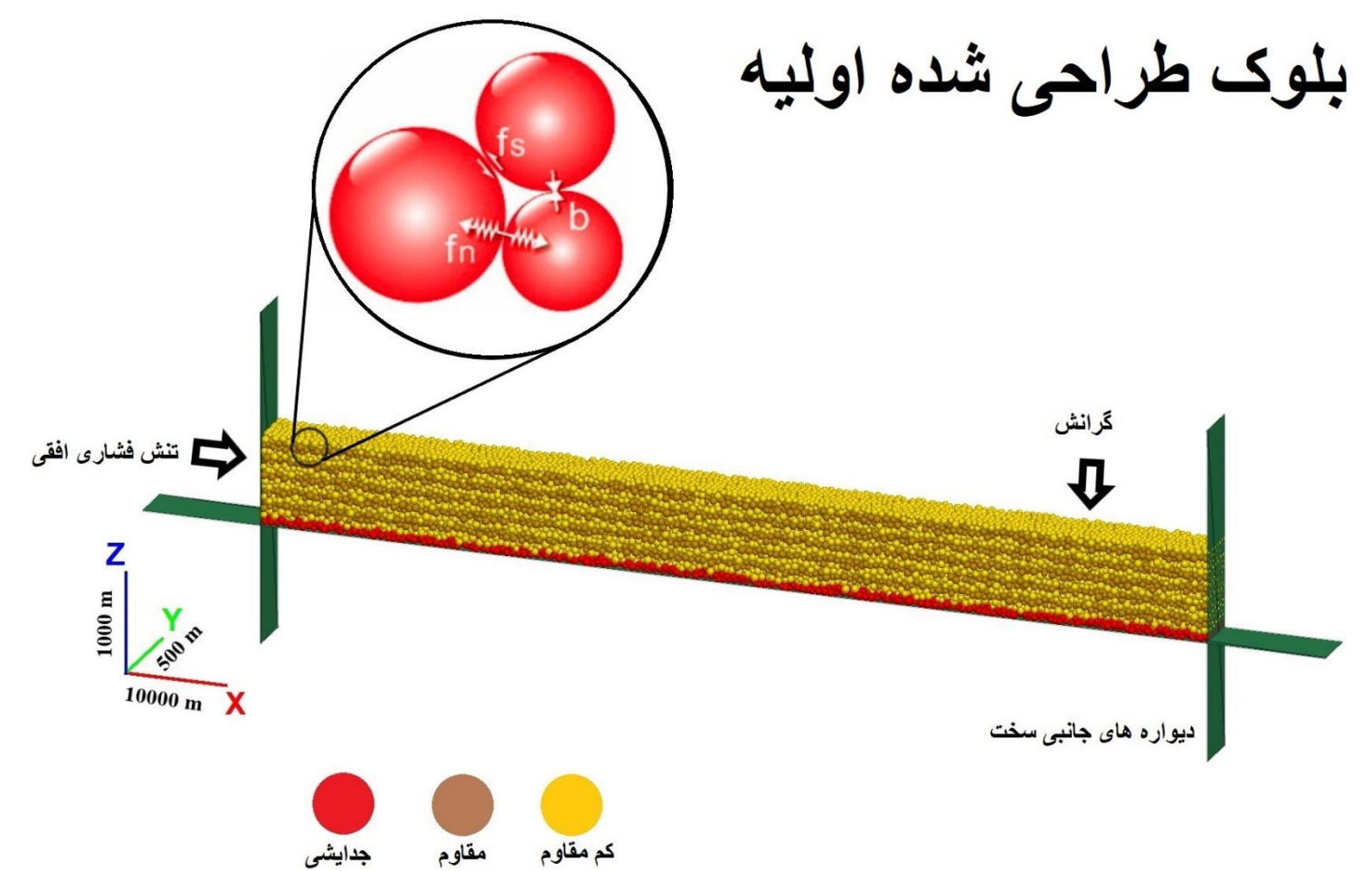
Smart, K. J., & Ferrill, D. A. (2018). Discrete element modeling of extensional fault-related monocline formation. *Journal of Structural Geology*, 115, 82-90.

Suppe, J. (2011). Mass Balance and Thrusting in Detachment Folds. *Thrust Fault-Related Folding: AAPG Memoir* 94, 94, 21.

Vergés, J., Goodarzi, M., Enami, H., Karquz, R., Efstathiou, J., Gillespie, P., 2011. Multiple detachment folding in Pusht-e Kuh arc, Zagros: role of mechanical stratigraphy. In: McClay, K.R., Shaw, J., Suppe, J. (Eds.), *Thrust Fault-related Folding*. The American Association of Petroleum Geologists Memoir 94, p. 69-94.

Wallace, W. K., and T. X. Homza, 2004. Detachment folds versus fault-propagation folds, and their truncation by thrust faults, in K. R. McClay, ed., *Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir* 82, p. 324–355.

بلوک طراحی شده اولیه



مشخصات اولیه مدلها		
شماره مدل	تعداد لایه کم مقاومت	ضخامت لایه جدایشی
1	5	0.1
2	5	0.2
3	5	0.3
4	4	0.1
5	4	0.2
6	4	0.3
7	3	0.1
8	3	0.2
9	3	0.3