# مدل‌سازی عددی نقش گسله‌های پی‌سنگی بر تکامل ساختاری کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس

فاطمه گمار[۱]، فرهاد ثبوتی[۲]، جوناس روه[۳]، مهدی نجفی[۴]،
[۱]دانشجوی دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم‌پایه زنجان، fatemehgomar@iasbs.ac.ir
[۲] دانشیار، تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، farhads@iasbs.ac.ir
[۳] استادیار، دانشگاه ای تی اچ زوریخ، Jonas.ruh@erdw.ethz.ch
[۴] استادیار، دانشگاه تربیت مدرس تهران، mahdinajafi@modares.ac.ir

**چکیده**

تکتونیک وارون زمانی رخ می‌دهد که گسله‌های نرمال موروثی که سبب تشکیل حوضه‌های کششی شده‌اند در اثر تغییر رژیم تکتونیکی دوباره به صورت معکوس فعال شده و سبب تشکیل ساختارهای برخوردی شوند. فعالیت مجدد گسله‌های پی‌سنگی نقش اصلی را در تکامل ساختاری و مکانیکی کمربندهای کوهزایی ایفا می‌کنند. کمربند چین‌خورده زاگرس که در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی واقع شده، در نتیجه باز و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس ایجاد شده است. مراحل اصلی تکامل کمربند چین خورده زاگرس شامل ۱) ریفت قاره‌ای پرمین – تریاس، ۲) رسوبگذاری ژوراسیک – ائوسن و ۳) برخورد قاره‌ای الیگوسن تا زمان حال است. در این پژوهش با استفاده از روش عددی دو بعدی تفاضل محدود با رئولوژی ویسکو-الاستو-شکنا/پلاستیک تکامل ساختاری کمربند چین‌خورده زاگرس در امتداد کمان فارس از کشش پرمو تریاس تا امروز بررسی می‌شود. در طول کشش ساختارهای نیمه‌گرابن در امتدادگسله‌های پی‌سنگی تشکیل و حوضه توسط رسوبات همزمان با ریفت پر می‌شود. در آزمایش‌های همگرایی، ساختارهای مربوط به حوضه‌های معکوس شده شامل پس‌راندگی‌ها و تاقدیس‌های هارپون مشاهده می‌شود. همچنین افق ضعیف نمک هرمز منجر به جدایش پی‌سنگ از کاور رسوبی و پیش‌روی دگرشکلی به سمت پیش‌بوم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کمربند چین‌خورده زاگرس، مدل‌سازی عددی، تکتونیک وارون، کمان فارس، روش تفاضل محدود

# The importance of basement inheritance for the structural evolution of the Zagros Fold-and-Thrust Belt: A numerical modelling approach

**Fatemeh Gomar [1], Farhad Sobouti [2], Jonas ruh [3], Mahdi Najafi [4]**
*[1] Ph.D. Student of Geophysics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS)*
*[2] Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS)*
*[3] Assistant Professor, Department of Earth Sciences, ETH Zurich*
*[4] Assistant Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University*

**Abstract**

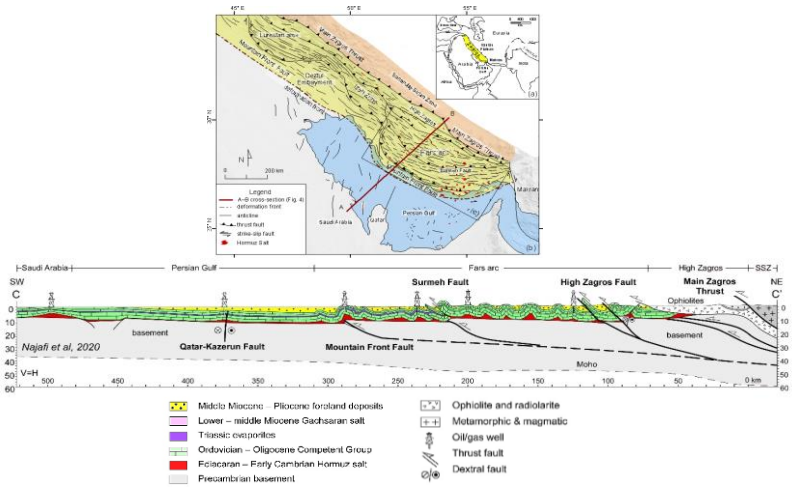
The tectonic inversion of rift basins denotes a change in the tectonic regime from extension to compression, during which extensional faults reactivate as compressional structures. The Zagros fold-thrust belt on the northeastern margin of the Arabian plate has resulted from the opening and closure of the Neo- Tethys Ocean and has evolved during three main stages of tectonic evolution including: The Permian–Triassic continental rifting, the Jurassic–Eocene passive margin setting, and the Oligocene–present continental collision. We present a set of two-dimensional finite difference models in crustal-scale with a visco-elasto-brittle/plastic rheology to investigate the formation of Zagros fold-and-thrust belt as a result of tectonic inversion, from intracontinental extension to compression. Extension localization along steep basement faults produces half-graben structures and the structure of basins are controlled by precursor basement faults and the basal salt layer. In the convergence stage, typical structures of inverted basins were developed,

including hanging wall by-pass thrusts, footwall shortcut thrusts, back-thrusts, and harpoon structures. While, weak basal detachment decoupled the sedimentary cover from underlying basement and accelerated the propagation of deformation front.

**Keywords:** numerical modeling, Fars Arc, tectonic inversion, finite difference method, Zagros fold-and-thrust belt.

## ۱ مقدمه

تکتونیک وارون تغییر رژیم تکونیکی از کششی به فشاری است. بالا آمدن فرادیواره مرتبط با فعالیت مجدد گسله‌های نرمال از قبل موجود، ویژگی اصلی تکتونیک وارون است (کوپر و همکاران ۱۹۸۹ و ویلیامز و همکاران ۱۹۸۹). در ابتدا در اثر کشش میان‌قاره‌ای گسله‌های نرمال و بدنبال آن نیمه‌گرابن‌ها تشکیل و توسط رسوبات همزمان با ریفت پر می‌شود. تغییر رژیم تکتونیکی و فعالیت مجدد گسله‌های موروثی منجر به جابه‌جایی مراکز رسوب‌گذاری و تشکیل ساختارهای هارپون و چین‌خوردگی می‌شود. تکامل مکانیکی یک حوضه معکوس شده متاثر از پارامترهایی از قبیل هندسه گسله‌های پی‌سنگی و منطقه، مقاومت لیتوسفر، فرآیندهای سطحی شامل فرسایش و رسوب‌گذاری، فشار مایع میان منفذی، رئولوژی کاور رسوبی و پی‌سنگ، ساختار دمایی و توزیع لایه‌های ضعیف در سری چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه است (پفینر ۲۰۱۶). مدل‌سازی عددی ابزاری مهم برای درک تکامل سیستم‌های پیچیده زمین‌شناسی در طولانی مدت است. به منظور درک بهتر از تکامل ساختاری و مکانیکی کمان فارس که واقع در جنوب شرقی زاگرس است (شکل ۱)، از مدل‌سازی عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود با رئولوژی ویسکو-الاستو-شکنا/پلاستیک استفاده شده است (روه و همکاران ۲۰۱۸). مطالعات لرزه‌ای، حاکی از نقش مستقیم گسله‌های پی‌سنگی بر تکامل ساختاری کمربند زاگرس است (بربریان ۱۹۹۵، طالبیان و جکسون ۲۰۰۴). در پژوهشی دیگر شرکتی و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که گسله‌های پی‌سنگی، فرآیندهای سطحی را در مرحله آخر تکتونیکی تحت تاثیر قرار می‌دهند. علی رغم مطالعات بسیار زیاد انجام شده در کمربند چین‌خورده زاگرس، مطالعات کمی با استفاده از مدلسازی عددی انجام شده است (یاماتو و همکاران ۲۰۱۱، قاضیان و بویتر ۲۰۱۴). بنابراین نقش گسله‌های پی‌سنگی بر تکامل ساختاری مبهم است و به خوبی روشن نشده است. نمک به دلیل ضعف ذاتی خود منجر به ایجاد جریان نسبتاً سریع در پاسخ به بار می‌شود. با توجه به حضور لایه نمک در ستون چینه شناسی کمان فارس و نبود اطلاعات کافی در رابطه با عملکرد نمک و رئولوژی‌های مختلف آن، تاثیر نمک بر استایل چین‌خوردگی‌ها به خوبی روشن نشده است. در این پژوهش با درنظر گرفتن پارامترهای موثر بر استایل درگرشکلی که در بالا به آن اشاره شد، تاثیر حضور گسله‌های پی‌سنگی و لایه ضعیف نمک (نمک هرمز) در طول وارونگی تکتونیک در امتداد کمان فارس مورد بررسی قرار گرفته است.




**شکل ۱. a)** خلاصه‌ای از کینماتیک اوراسیا و عربی **b)** ویژگی‌های اصلی زمین‌ساختی در کمربند چین‌خورده زاگرس. **c)** منطقه مورد مطالعه. **d)** مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

## ۲ روش تحقیق

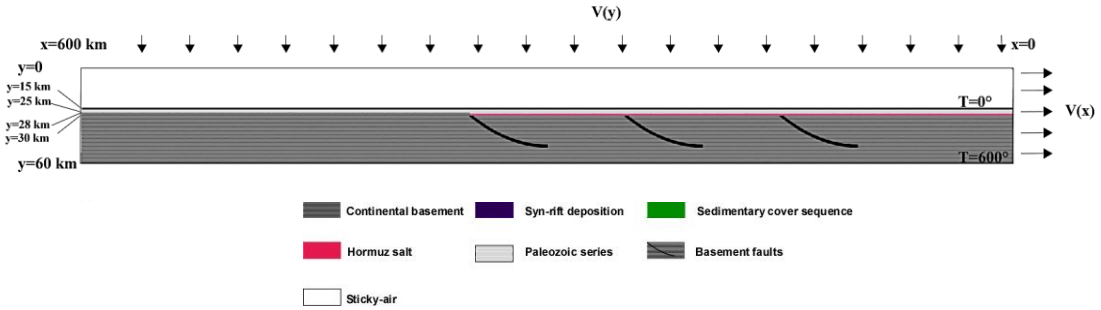
به منظور شبیه‌سازی عددی وارونگی تکتونیک در راستای کمان فارس، از روش دو بعدی تفاضل محدود با رئولوژی ویسکو-الاستو-شکنا/پلاستیک استفاده شده است. به منظور حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی از روش تفاضل محدود استفاده شده است. در تقسیم‌بندی شبکه‌ها ازروش ردیاب سلول که ترکیب دو روش لاگرانژی و اولری است، استفاده شده است (گریا ۲۰۱۹). معادلات حاکم بر مسئله به ترتیب شامل معادلات بقای جرم، بقای تکانه و بقای انرژی است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0\,, \quad -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \rho g_i, \quad \rho c_p \left(\frac{DT}{Dt}\right) = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + H \qquad (۱)$$

که $u_i$ و $x_i$ به ترتیب سرعت و مختصات اولری، $p$ فشار دینامیکی، $x_i$ و $x_j$ مختصات مکانی، $\tau_{ij}$ استرس انحرافی، $\rho$ چگالی و $g_i$ شتاب ثقل و $c_p$، $T$، $\kappa$ و $H$ به ترتیب ظرفیت گرمایی، دما، رسانندگی گرمایی و تولید گرمای اضافی در پوسته است. معادلات حاکم توسط نقاط اولری گسسته شده و برای مولفه‌های فشار و سرعت حل می‌شود. دما نیز به طور جداگانه در شبکه اولری حل می‌شود و معرفی خواص فیزیکی مانند چگالی و جنس ترکیبات شیمیایی از طریق مارکرها به مدل انجام می‌شود. همچنین به منظور مدلسازی فرآیندهای سطحی شامل فرسایش و رسوب‌گذاری از معادله پخش استفاده شده است:

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} \qquad (۲)$$

که $h_s$ توپوگرافی سطحی، $t$ زمان، $\kappa$ ثابت پخش و $x$ مختصات مکانی است. این معادله با استفاده از روش تفاضل محدود برای گره‌های بالایی مدل حل می‌شود. برای نشان دادن رابطه بین ویسکو الاستیک از رئولوژی مکسول استفاده شده و در صورت تجاوز تنش ویسکو الاستیک از تنش تسلیم با استفاده از معیار دراکر پراگر، تنش تسلیم محاسبه می‌شود. بر اساس مقاطع ساختاری منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) و مطالعات پیشین در رابطه با عمق لرزه‌خیزی و میزان کوتاه‌شدگی کمربند چین خورده تراستی زاگرس در طول همگرایی صفحه عربی و اوراسیا (نجفی و همکاران ۲۰۲۰، شرکتی و همکاران ۲۰۱۶، یاماتو و همکاران، ۲۰۱۱، کاراسوزن و همکاران ۲۰۱۹، تاتار و همکاران ۲۰۰۴)، ابعاد مدل به ترتیب دارای ۶۰۰ کیلومتر طول و ۶۰ کیلومتر ضخامت می‌باشد. بر اساس ستون چینه‌شناسی کمان فارس قبل از مرحله کشش، از پایین مدل به ترتیب شامل ۳۰ کیلومتر پی‌سنگ، ۲ کیلومتر نمک هرمز و ۳ کیلومتر رسوبات پالئوزوئیک است (شکل ۲). همچنین به منظور شبیه‌سازی و مشاهده تعامل و برهمکنش دینامیک داخلی و خارجی زمین، قسمت بالایی مدل شامل یک لایه ۱۵ کیلومتری هوا یا آب با چگالی و ویسکوزیته کم است تا سطح آزاد واقعی برآورد شود (کرامری و همکاران، ۲۰۱۲). پس از ۵ میلیون سال و ۲۵ کیلومتر کشش رسوبات مربوط به دوره آرامش تکتونیکی وارد مدل شده و سپس مرحله برخوردی آغاز می‌شود. همچنین بر اساس مقاطع زمین‌شناسی ارائه شده، محل گسله‌های پی‌سنگی در مدل اولیه مشخص و رئولوژی که برای گسله‌ها در نظر می‌گیریم ضعیف‌تر از رئولوژی پی‌سنگ می‌باشد. توزیع دمای اولیه بر اساس ژئوترم خطی است که در کف مدل ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و در بالای مدل صفر در نظر گرفته می‌شود (هستروک و چپمن، ۲۰۱۱). بر اساس آزمایشات آنالوگ و مطالعات عددی قبلی، شرایط مرزی سرعت تعیین می‌شود. به منظور شبیه‌سازی فاز کشش در سمت راست مدل، ماده با سرعت ۵ میلی‌متر بر سال بر از مدل خارج می‌شود و در سمت چپ مدل، سرعت صفر در نظر گرفته شده است. در فاز برخوردی از اینورژن تکتونیک شرایط مرزی معکوس می‌شود.




**شکل ۲.** شرایط مرزی اولیه مدل، از پایین به بالا شامل ۳۰ کیلومتر پی‌سنگ، ۲ کیلومتر نمک هرمز، ۳ کیلومتر لایه پالئوزوییک و ۱۵ کیلومتر لایه هوا

## ۳ نتیجه‌گیری

در مجموع چهار سری آزمایش عددی انجام شده است که تاثیر حضور گسله پی‌سنگی و لایه نمک بر تکامل ساختاری کمان فارس بررسی شده است. نتایج مربوط به فاز کشش نشان می‌دهد که در طول ۵ میلیون سال، نیمه‌گرابن‌ها در امتداد گسله‌های نرمال تشکیل و حوزه توسط رسوبات پرمین-تریاس دشتک و دهرم پر می‌شود. گسله‌ها و لایه نمک مقاومت اصطکاکی کمتری نسبت به محیط اطراف دارند، بنابراین نرخ کرنش در این زون‌ها بیشتر است. زمانی که نمک از مدل حذف می‌شود، هندسه ساختارهای حوضه ریفت مشابه حالت اول است. بنابراین هندسه حوضه ریفتی توسط گسله‌های پی‌سنگی کنترل می‌شود. طبق تاریخچه تکتونیکی کمربند زاگرس پس از ریفت پرموتریاس رسوبات مربوط به دوران ژوراسیک-ائوسن در حوضه جای‌دهی و وارونگی تکتونیک آغاز می‌شود. فاز همگرایی ۱۵ میلیون سال طول کشیده است تا ۲۵ درصد کوتاه‌شدگی را حاصل کند. ساختارهای تشکیل شده شامل چین‌های واداشته (forced fold) و هارپون‌ها هستند. با توجه به روند رشد ساختارها و چین‌خوردگی‌ها می‌توان مشاهده کرد که دگریختی ستبرپوست نسبت به دگرشکلی نازک پوست از نظر زمانی مقدم است. در جایی که گسله‌های موروثی پی‌سنگی حضور دارند، دگرشکلی را متحمل می‌شوند و در جاهایی که گسله‌های پی‌سنگی حضور ندارند، به منظور جای‌دهی کوتاه‌شدگی تراست‌ها شکل گرفته‌اند. حضور افق جدایش نمک در پایه مدل منجر به جداشدگی و جابجایی جانبی گسلش در کاور رسوبی می‌شود ولی در صورتی که نمک در مدل وجود ندارد گسله‌های پی‌سنگی و کاور در یک راستا قرار می‌گیرد و دگریختی ستبرپوست غالب است. حضور نمک منجر به ایجاد ساختارهای پس‌راندگی (back thrusting) وچین جعبه‌ای (box fold) می‌شود که دگرشکلی نازک‌پوست را توسعه می‌دهد و باعث شکل‌گیری تاقدیس‌هایی با طول موج کوتاه می‌شود.

## منابع

Berberian, M. (1995). Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, *241*(3–4).

Cooper, M. A., Williams, G. D., de Graciansky, P. C., Murphy, R. W., Needham, T., de Paor, D., Stoneley, R., Todd, S. P., Turner, J. P., & Ziegler, P. A. (1989). Inversion tectonics - a discussion. *Geological Society Special Publication*, *44*, 335–347.

Crameri, F., Schmeling, H., Golabek, G. J., Duretz, T., Orendt, R., Buiter, S. J. H., ... & Tackley, P. J. (2012). A comparison of numerical surface topography calculations in geodynamic modelling: an evaluation of the ‘sticky air’method. *Geophysical Journal International*, *189*(1), 38-54.

Gerya, T. (2019). *Introduction to numerical geodynamic modelling*. Cambridge University Press

Ghazian, R. K., & Buiter, S. J. (2013). A numerical investigation of continental collision styles. *Geophysical Journal International*, *193*(3), 1133-1152.

Hasterok, D., & Chapman, D. S. (2011). Heat production and geotherms for the continental lithosphere.

*Earth and Planetary Science Letters*, *307*(1-2), 59-70.

Karasözen, E., Nissen, E., Bergman, E. A., & Ghods, A. (2019). Seismotectonics of the Zagros (Iran) from orogen-wide, calibrated earthquake relocations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *124*(8), 9109-9129.

Najafi, M., Beamud, E., Ruh, J., Mouthereau, F., Tahmasbi, A., Bernaola, G., ... & Vergés, J. (2020). Pliocene growth of the Dowlatabad syncline in Frontal Fars arc: Folding propagation across the Zagros Fold Belt, Iran. *GSA Bulletin*.

Pfiffner, O. A. (2016). Basement-involved thin-skinned and thick-skinned tectonics in the Alps. *Geological Magazine*, *153*(5-6), 1085-1109.

Ruh, J. B., & Vergés, J. (2018). Effects of reactivated extensional basement faults on structural evolution of fold-and-thrust belts: Insights from numerical modelling applied to the Kopet Dagh Mountains. *Tectonophysics*, *746*, 493-511.

Talebian, M., & Jackson, J. (2004). A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysical Journal International*, *156*(3), 506-526.

Williams, G. D., Powell, C. M., & Cooper, M. A. (1989). Geometry and kinematics of inversion tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, *44*(1), 3-15.

Yamato, P., Kaus, B. J., Mouthereau, F., & Castelltort, S. (2011). Dynamic constraints on the crustal-scale rheology of the Zagros fold belt, Iran. *Geology*, *39*(9), 815-818.