

## تاثیر تغییرات چگالی بر الگوی فرورانش (مطالعه‌ی موردی: فرورانش نئوتتیس به زیر اوراسیا در ائوسن)

رضا دوستی<sup>۱</sup>، فرهاد ثبوتی<sup>۲</sup>، لاتیتیا لوپوریه<sup>۳</sup> و فیلیپ آگار<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه زنجان *r\_dousti@znu.ac.ir*

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان *farhads@iasbs.ac.ir*

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه سوربن، پاریس، فرانسه *laetitia.le\_pourhiet@sorbonne-universite.fr*

<sup>۴</sup> استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه سوربن، پاریس، فرانسه *philippe.agard@sorbonne-universite.fr*

### چکیده

یکی از مواردی که در یک محیط فرورانشی بر الگوی فرورانش تاثیر می‌گذارد، مقدار تباین چگالی بین ورق فرورونده و استنوسفر زیر آن است. افزایش چگالی ورق اقیانوسی باعث افزایش نیروی شناوری شده و به تبع آن الگوی فرورانش تغییر خواهد کرد. در این مطالعه تاثیر این مولفه با روش عددی شبیه‌سازی شده و برای ساختمان مدل از ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئودینامیکی فرورانش نئوتتیس به زیر اوراسیا در ائوسن استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از این است که در چنین محیط فرورانشی تباین چگالی ۸ کیلوگرم بر متر مکعب، تباین بحرانی بوده و رفتار فرورانش در تباین‌های کمتر و بیشتر از آن تفاوت چشمگیر دارد. همچنین با توجه به کشش توزیع یافته در ائوسن ایران، به نظر می‌رسد اسلب نئوتتیس نسبت به استنوسفر زیر آن سنگینی قابل توجهی داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، فرورانش، تباین چگالی، اسلب اقیانوسی، پسروری درازگودال

## The effect of density contrast on the subduction pattern (Insight into the Eocene Neothetys subduction in Iran)

Reza Dousti<sup>1</sup>, Farhad Sobouti<sup>2</sup>, Laetitia Le Pourhiet<sup>3</sup>, Philippe Agard<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, University of Zanjan, *r\_dousti@znu.ac.ir*

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran, *farhads@iasbs.ac.ir*

<sup>3</sup> Professor, ITeParis, Sorbonne Université, Paris, France, *laetitia.le\_pourhiet@sorbonne-universite.fr*

<sup>4</sup> Professor, ITeParis, Sorbonne Université, Paris, France, *philippe.agard@sorbonne-universite.fr*

### Abstract

The density contrast between the subducting slab and the asthenosphere is one of the factors that affects the subduction pattern. Its increase will result in increase of the buoyancy force and accordingly the subduction pattern will change. In this study, the effect of this parameter is simulated by numerical method and for model setup the geological and geodynamic features of Neo-Tethys subduction beneath Eurasia in Eocene have been used. The simulation results indicate that in such a subduction setting, a density contrast of 8 kg/m<sup>3</sup> is a critical value and the pattern of subduction in lower and higher than it significantly changes. Also, according to the distributed extension in the Eocene of Iran, it seems that the Neo-Tethys slab was significantly denser than the surrounding asthenosphere (at least 8 kg/m<sup>3</sup>).

**Keywords:** numerical simulation, subduction, density contrast, oceanic slab, trench retreat

### ۱ مقدمه

در یک محیط فرورانشی، عوامل مختلفی بر الگوی فرورانش تاثیرگذار هستند. نمونه‌ای از این عوامل که تاثیر آن‌ها به صورت عددی نیز شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است عبارتند از تغییرات نیروی شناوری در فرورانش (رویدن و هاسون، ۲۰۰۹)، فعل و انفعالات ورق فرورونده در اعماق و کف گوشته‌ی بالایی (هولت و همکاران، ۲۰۱۵)، اثر ساختار دمایی ورق سوار (رودریگز - گونزالز و همکاران، ۲۰۱۲)، اثر جریان‌های جانبی استنوسفری در مدل‌های سه‌بعدی (یاماتو و همکاران، ۲۰۰۹). معمولاً در میان این عوامل، تغییرات نیروی کشش اسلب که عمدتاً معلول تغییر چگالی می‌باشد،

به عنوان عامل درجه اول در تغییرات الگوی فروانش در نظر گرفته شده و اثر آن یا از طریق در نظر گرفتن ورق پیر (اسلب سرد و سنگین) یا جوان (اسلب گرم و سبک) مورد بررسی قرار می‌گیرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین می‌توان مستقلاً با اعمال یک تباین چگالی مشخص به سنگ‌ها این اثر را مورد بررسی قرار داد (السف و همکاران، ۲۰۲۰). هدف این تحقیق بررسی اثر تباین چگالی بین ورق اقیانوسی و استنوسفر زیر آن در یک محیط فروانشی مسن که در آن لیتوسفر اقیانوسی به لحاظ دمایی و ضخامت به بلوغ و ثبات رسیده می‌باشد. فروانش نئوتتیس به زیر اوراسیا در ائوسن مثالی از چنین محیطی بوده (آگار و همکاران، ۲۰۱۱) و مقادیر کمی و کیفی پارامترهای هندسی و فیزیکی مورد استفاده در ساختمان مدل در شبیه‌سازی‌های عددی این تحقیق بر اساس اطلاعات زمین شناسی و ژئودینامیکی موجود از این فروانش انتخاب شده‌اند (دوستی و همکاران، ۱۴۰۰). در این تحقیق تعداد هفت مدل که بازه‌ی تباین چگالی آن‌ها از ۲ تا ۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند طراحی و شبیه سازی شدند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که تباین چگالی ۸ کیلوگرم بر متر مکعب، تباین بحرانی بوده و رفتار فروانش در تباین‌های کمتر و بیشتر از آن تفاوت چشمگیر دارد و در تباین‌های کمتر از ۸ کیلوگرم بر متر مکعب پسروری درازگودال بادوام و پایدار مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به اینکه ورق ایران در ائوسن کشش توزیع یافته‌ای را تجربه کرده است (وردل و همکاران، ۲۰۱۱؛ آگار و همکاران، ۲۰۱۱) و در مدل‌های این تحقیق شرط وقوع کشش در ورق سوار پسروری درازگودال می‌باشد (دوستی و همکاران، ۱۴۰۰)، نتایج شبیه‌سازی دلالت بر سنگینی قابل توجه اسلب نئوتتیس نسبت به استنوسفر زیرین آن دارد (حداقل ۸ کیلوگرم بر متر مکعب سنگین‌تر).

## ۲ روش تحقیق

### ۲-۱ روش مدل‌سازی و ساختمان مدل

در این تحقیق برای شبیه‌سازی از برنامه‌ی عددی pTatin2d (می و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شده است. این برنامه معادلات بقا را به روش المان محدود آمیخته برای یک سیال ویسکوپلاستیک در یک محیط دو بعدی حل می‌کند. با استفاده از برنامه‌ی مذکور هفت مدل طراحی شدند که همه‌ی آن‌ها در تمام ویژگی‌های هندسی و فیزیکی یکسان هستند و تنها تفاوت در چگالی ورق اقیانوسی است که از ۳۳۱۲ تا ۳۳۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر در نظر گرفته شده‌اند. چگالی استنوسفر و ورق قاره ای نیز در همه‌ی مدل‌ها ۳۳۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. سایر ویژگی‌ها در ادامه می‌آید.

#### الف- شکل هندسی مدل‌ها

شکل هندسی عمومی مدل‌ها یک مستطیل با ابعاد ۲۵۰۰ در ۶۷۰ کیلومتر متشکل از دو ورق لیتوسفری است که روی استنوسفر قرار گرفته‌اند (شکل ۱). ورق لیتوسفری سمت چپ اقیانوسی و ورق سمت راست قاره فرض شده و طول آن‌ها به ترتیب ۸۵۰ کیلومتر و ۱۶۵۰ کیلومتر می‌باشد. ضخامت ورق اقیانوسی ۹۰ کیلومتر که ۱۰ کیلومتر آن پوسته و ضخامت ورق سوار ۱۱۰ کیلومتر با پوسته‌ی ۳۰ کیلومتری در نظر گرفته شده است (فرانسوا و همکاران ۲۰۱۴). برای تسهیل حرکت نسبی دو ورق در امتداد مرز مشترک‌شان یک پهنه‌ی ضعیف به ضخامت ۳۰ کیلومتر و با شیب ۲۵ درجه قرار داده شده است. این پهنه می‌تواند نقش گسله‌ی فروانش را شبیه‌سازی کند.

#### ب- شرایط مرزی مکانیکی

در قسمت لیتوسفری دیواره‌ی عمودی چپ مدل، بردارهای سرعت درون سو با سرعت ۳ سانتی متر برسال و در قسمت استنوسفری آن بردارهای سرعت برون سو طوری در نظر گرفته شده‌اند که بقای جرم در عرض دیواره حاصل شود. بر روی دیواره‌ی سمت راست و در امتداد کف مدل شرط لغزش آزاد به کار برده شده است. برای سطح بالای مدل هم که نماینده سطح زمین است شرط مرزی سطح آزاد اعمال شده است.

#### ج- ساختار گرمایی اولیه

در این مطالعه شرط مرزی دمایی صفر درجه سلسیوس برای سطح مدل و دمایی ۱۴۵۰ درجه برای کف مدل در نظر گرفته شده است. دیواره‌های چپ و راست عایق در نظر گرفته شده‌اند. به مدل یک میدان دمایی اولیه نیز اعمال شده است. در این میدان اولیه برای توزیع دما در درون دو ورق لیتوسفر از پروفیل دمایی رسانشی یک ورق با ضخامت محدود استفاده

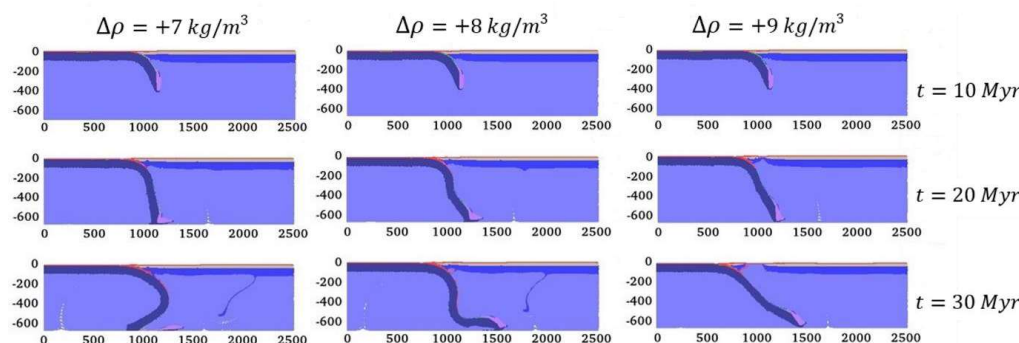
شده است. برای استنوسفر و گوشته‌ی عمیق‌تر از پروفیل دمای بی‌درو استفاده شده است.

د- رئولوژی مدل‌ها

در مدل‌های این تحقیق لیتوسفر اقیانوسی دارای رئولوژی قوی می‌باشد. برای بخش گوشته‌ای آن رئولوژی اولیوین خشک و برای پوسته‌ی آن رئولوژی دیاباز اعمال شده است. بر عکس لیتوسفر اقیانوسی، برای لیتوسفر قاره‌ای رئولوژی ضعیف در نظر گرفته شده است. بخش گوشته‌ای آن رئولوژی اولیوین تر و پوسته‌ی آن رئولوژی گرانیته‌ی دارد (فرانسوا و همکاران ۲۰۱۴).

## ۲-۲ نتایج مدل‌سازی

در جدول ۱ برخی اطلاعات هندسی نتایج شبیه‌سازی هفت مدل این تحقیق آمده است. شکل ۱ نیز تحولات زمانی سه مدل از هفت مدل را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. این تحولات در زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیون سال پس از اجرای مدل و برای مدل با تباین‌های ۷، ۸ و ۹ کیلوگرم بر متر مکعب ارائه شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها حاکی از این است که در تباین‌های بین ۲ تا ۷ کیلوگرم بر متر مکعب، با افزایش چگالی ورق اقیانوسی، شیب ورق نسبتاً کمتر شده و پس از رسیدن پیشانی اسلب به کف مدل، اسلب با انحنای بیشتری روی خود چرخیده و به سمت چپ بر می‌گردد. در بین مدل‌ها، مدل با تباین چگالی ۸ کیلوگرم بر مترمکعب دارای تباین بحرانی است. در این مقدار تباین الگوی فرورائش تغییر کرده و دیگر اسلب دچار چرخش به سمت چپ نمی‌شود. بلکه پس از رسیدن به کف مدل، به سمت راست می‌خزد. در تباین‌های بیشتر از ۸ کیلوگرم بر مترمکعب نیروی کشش اسلب در عمق‌های کمتری توانسته وارد عمل شود. در نتیجه در این مدل‌ها، ورق با شیب کمتری فرورائش کرده و هیچگونه چرخشی به سمت چپ اتفاق نیفتاده و اسلب به حرکت خود به سمت راست در درون استنوسفر ادامه داده است.



شکل ۱. تحولات میدانی مدل‌ها با تباین چگالی ۷، ۸ و ۹ کیلوگرم بر متر مکعب. نمودارهایی که در یک ستون آمده مربوط به یک تباین مشخص و نمودارهایی که در یک سطر دیده می‌شود مربوط وضعیت مدل در زمان‌های ارائه شده می‌باشد.

نکته‌ی دیگری که در اینجا باید به آن پرداخت، میزان پسروی دراز گودال با افزایش تباین است (جدول ۱). میزان پسروی دراز گودال در تباین‌های بیش از ۸ کیلوگرم بر متر مکعب قابل توجه بوده و در اثر آن حوزه‌های کششی در ورق قاره‌ای در نزدیکی منطقه‌ی فرورائش شکل گرفته و در اثر مداومت این حرکت حوضه پشت کمان و سپس یک اقیانوس درون قاره‌ای ایجاد شده است.

جدول ۱. مقدار پسروی و اندازه شیب ورق در مدل‌های با تباین چگالی مختلف در لحظه رسیدن پیشانی اسلب به کف مدل‌ها

| مقدار تباین چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب) | ۲    | ۵  | ۷    | ۸  | ۹  | ۱۰   | ۱۲  |
|---|------|----|------|----|----|------|-----|
| لحظه تماس کف مدل (میلیون سال)           | ۱۸/۵ | ۱۷ | ۱۶/۵ | ۱۶ | ۱۶ | ۱۵/۵ | ۱۵  |
| مقدار پسروی (کیلومتر)                   | ۱۰   | ۲۵ | ۳۵   | ۴۰ | ۵۵ | ۷۵   | ۱۲۰ |
| شیب ورق (درجه)                          | ۷۷   | ۷۳ | ۷۲   | ۷۰ | ۶۶ | ۶۱   | ۵۵  |

### ۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق هفت مدل عددی برای بررسی تاثیر تباین چگالی در الگوی فروورانش در یک محیط فروورانشی مسن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی‌ها حاکی از این است که تغییرات الگوی فروورانش در تباین‌های کمتر و بیشتر از تباین چگالی ۸ کیلوگرم بر متر مکعب متفاوت می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه برای طراحی ساختمان مدل‌ها از ویژگی‌های فروورانش نئوتتیس به زیر اوراسیا در ائوسن استفاده شده است، می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی‌ها دلالت بر سنگینی قابل توجه اسلب نئوتتیس نسبت استنوسفر زیرین آن در آن دوره دارد (حداقل ۸ کیلوگرم بر متر مکعب در شرایط فیزیکی یکسان).

### منابع

- دوستی، ر، ثبوتی، ف، لوپوریه، ل، آگار، ف، ۱۴۰۰، شبیه‌سازی عدی تاثیر رئولوژی بر کشش در ورق قاره‌ای سوار در فروورانش اقیانوسی: با نگاه به فروورانش نئوتتیس در ائوسن: مجله ژئوفیزیک ایران، (مقاله پذیرفته شده)
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, **148**, 692-725.
- Alsaif, M., Garef, F., Gueydan, F., and Davies, R., 2020. Upper plate deformation and trench retreat modulated by subduction-driven shallow asthenospheric flows. *Earth and Planetary Science Letters*, **532**, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116013>.
- Francois, T., Burov, E., Agard, P., and Meyer, B, 2014. Buildup of a dynamically supported orogenic plateau: Numerical modeling of the Zagros/Central Iran case study. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **15**, 2632-2654.
- Holt, A.F., Becker, T.W., and Buffett, B.A., 2015. Trench migration and overriding plate stress in dynamic subduction models. *Geophysical Journal International*, **201**, 172-192.
- Liu, L., Gurnis, M., Seton, M., Saleeby, J., Müller, R.D., and Jackson, J.M., 2010. The role of oceanic plateau subduction in the Laramide orogeny. *Nature Geoscience*, **3**, 353-357.
- May, D.A., Brown, J., LePourhiet, L., 2015. A scalable, matrix-free multigrid preconditioner for finite element discretizations of heterogeneous Stokes flow. *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, **290**, 496-523.
- Rodríguez-González, J., Negredo, A.M., Billen, M.I., 2012. The role of the overriding plate thermal state on slab dip variability and on the occurrence of flat subduction. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **13**, 1-21.
- Royden, L.H., Husson, L., 2009. In: *Subduction Zone Geodynamics*, pp.35-45.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, **30**, <https://doi.org/10.1029/2010TC002809>.
- Yamato, P., Husson, L., Braun, J., Loiselet, C., and Thieulot, C., 2009. Influence of surrounding plates on 3D subduction dynamics. *Geophysical Research Letters*, **36**, 1-5.