**تحلیل دگرشکلی پیشرونده در شکل­گیری چین­های مرتبط با سیستم­های ترافشارشی با استفاده از مدل­سازی عددی و آنالوگ**

**◊◊◊◊◊◊◊**

حسین هرمزی مقدم1، چنور حسینی1، مهدی بهیاری2

1دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین­شناسی، دانشگاه ارومیه، ایران [st\_h.hormozi@urmia.ac.ir](mailto:st_h.hormozi@urmia.ac.ir)

2دکتری تکتونیک، استادیار گروه زمین­شناسی، دانشگاه ارومیه، ایرانm.behyari@urmia.ac.ir

**◊◊◊◊◊◊◊**

**چكيده :**

همگرایی مایل صفحه عربی و اوراسیا، باعث شکل­گیری سامانه ترافشارشی در برخی از مناطق کمربند چین­خوردگی- راندگی زاگرس شده، که زاویه این همگرایی در قسمت­های مختلف، متفاوت است. در این مطالعه با استفاده از مدل­سازی آنالوگ و عددی تأثیر زاویه همگرایی بر نوع چین­خوردگی و انحنای محور چین، با دو زاویه 15 و 30 درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از هر دو مدل آنالوگ و عددی نشان دهنده این موضوع می­باشد که نخستین تغییرشکل و چین­خوردگی در پیشانی جهبه برخورد به وجود می­آید، که نشان از انطباق قابل قبول مدل عددی و آنالوگ با یکدیگر دارد. مقایسه نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در دو مدل عددی نشان می­دهد که اختلاف زمان جابه­جایی قائم بین دماغه شمالی و جنوبی، در همگرایی 30 درجه بیشتر از همگرایی 15 درجه می­باشد. به عبارتی می­توان نتیجه گرفت که هرچه زاویه همگرایی بیشتر باشد، زمان انتقال دگرشکلی از دماغه شمالی به سمت دماغه جنوبی بیشتر بوده و انحنای محور چین نیز بیشتر خواهد بود.

**كليدواژه‌ها:** سامانه ترافشارشی، کمربند چین­خوردگی- راندگی زاگرس، مدل­سازی آنالوگ وعددی.

**◊◊◊◊◊◊◊**

**Analysis of progressive deformation in folds propagate in the transpressional setting insight to: Analogue and numerical modeling**

**◊◊◊◊◊◊◊**

Hossein Hormozi Moghadam1, Chnoor Hosseini1, Mahdi Behyari2

1Msc student in Tectonics, Geosciences Department, Urmia University, Iran. [st\_h.hormozi@urmia.ac.ir](mailto:st_h.hormozi@urmia.ac.ir)

2Ph.D in Tectonics, Assistant Professor of Geosciences Department, Urmia University, Iran. m.behyari@urmia.ac.ir

**◊◊◊◊◊◊◊**

**Abstract:**

Oblique convergence of the Arabian plate to the Eurasia has caused propagation of a transpression system in the Zagros fold-thrust belt. In this study, we performed two analogue and numerical models with different angular oblique convergences in 15 and 30 degrees to reveal the influence of different angular oblique convergence to the fold axis rotation and the type of folding. The results reveal the first deformation appears in the northern segment (further part of backstop) of both 15 and 30 degrees analogue and numerical models. Displacement-Time curves reveals transportation of deformation and uplift, along the fold axis, is not equal in 15 and 30 degrees models. Time of this transportation in 30 degrees model is more than 15 degrees. In fact, it can be concluded, increasing in angle of convergence is caused of increasing in the fold axis rotation and transportation of deformation.

**Keywords:** transpressional system, Zagros fold-thrust belt, analogue and numerical modeling.

**◊◊◊◊◊◊◊**

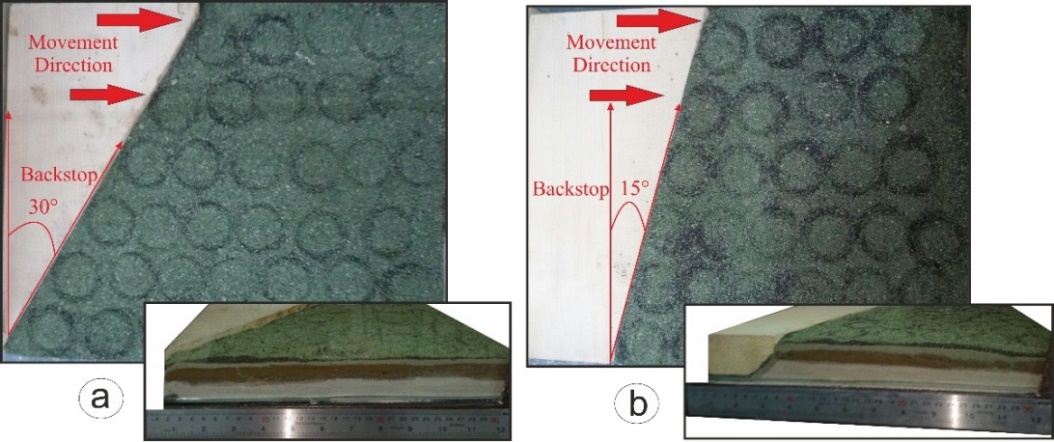
**مقدمه :**

شناخت سازوکار دگرشکلی در توده­های سنگ در عمق زمین، تحلیل مکانیسم دگرشکلی و تحلیل فراوانی و پراکندگی آثار دگرشکلی، ازجمله شکستگی گسل­خوردگی و چین­خوردگی در بسیاری از فعالیت­های صنعتی ازجمله تولید نفت و گاز، تزریق و ذخیره­سازی گاز دی­اکسیدکربن و تحلیل خصوصیات مخازن آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می­باشد (Aydin 2000, Ferrill, Sims et al. 2004, Annunziatellis, Beaubien et al. 2008). از روش­های معمول و مورد استفاده در دستیابی به تحلیل کرنش و پیشگویی روند چین­خوردگی و چین­های مرتبط با گسل­خوردگی استفاده از مدل­های کینماتیکی- ژئودینامیکی است (Jamison 1987, Mitra 1990). سیستم ترافشارش ترکیبی از دو سیستم امتداد لغز و فشارشی است که به طور همزمان و عمود برهم عمل می­کنند (Harland 1971)، همچنین، کوهزاد زاگرس به عنوان قسمتی از کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا و نتیجه همگرایی مایل بین صفحه عربی و خرد قاره ایران مرکزی درطی بسته­شدن اقیانوس نئوتتیس، باعث ایجاد سیستم ترافشارش شده است (Alavi 1994, Agard, Omrani et al. 2005, Mohajjel and Behyari 2010, Mohajjel and Rasouli 2014). این همگرایی امروزه با سرعت تقریبی 22 میلیمتر در سال و دارای روند تقریبی شمالی-جنوبی درحال پیشروی می­باشد (Agard, Omrani et al. 2011). در این مطالعه به منظور ارائه الگویی مناسب، جهت نحوه رشد و تکامل چین­های مرتبط با سیستم­های ترافشارشی و نمایش تأثیر زاویه همگرایی در مناطق ترافشارشی بر روی تکامل چین­خوردگی، اقدام به تهیه مدل آنالوگ و عددی شده است.

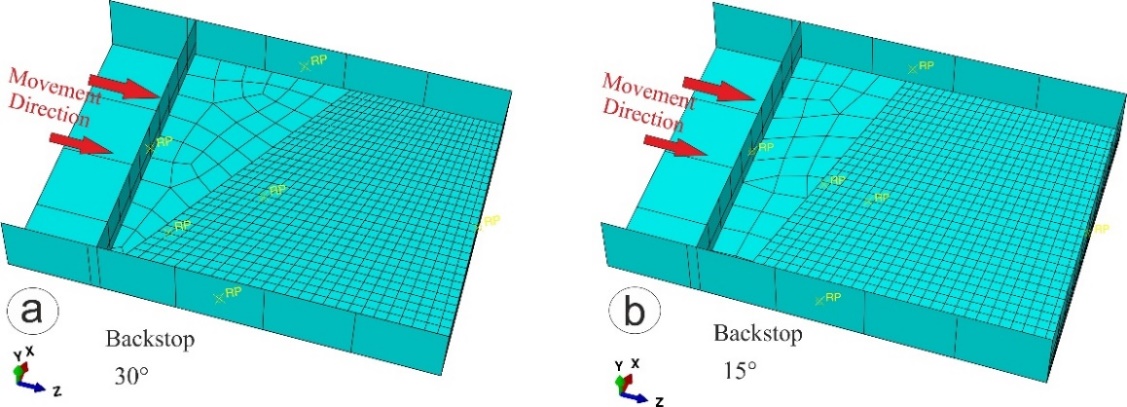
**◊◊◊◊◊◊◊**

**روش تحقیق:**

به­منظور دستیابی به اهداف مطالعه، دو مدل آنالوگ و دو مدل عددی به ابعاد21×31 سانتی­متر و با زوایای همگرایی 15 و 30 درجه طراحی و اجرا شده است. مواد مورد استفاده در هر دو مدل آنالوگ ، یکسان بوده و از پایین به بالا شامل ماسه آندزیتی به ضخامت 1.5cm، گل رس به ضخامت 1cm، ماسه بادی به ضخامت 0.5cm، بلور پیروکسن به ضخامت 0.5cm و یک لایه ماسه سبز رنگ برای مشاهده تغییرات سطحی، که به ضخامت ناچیز برروی سطح مدل پاشیده شده است، می­باشد (شکل 1). مدل عددی نیز برپایه مدل آنالوگ و با مقیاس مشابه، طراحی و اجرا شده است (شکل 2). به منظور ساده­سازی صورت مساله و تحلیل، 2 لایه به ضخامت 1cm، طراحی شده و در دستگاه Sand Box قرار داده شده است. به­منظورشبیه­ سازی مواد مورد استفاده در مدل آنالوگ، از مواد با خاصیت الاستیک و پلاستیک مشخص، که تابع قانون موهر-کلمب می­باشد (Smart, Ferrill et al. 2012)، استفاده شده است که در یک تحلیل دینامیک-اکسپلیسیت اجرا می­شود.



شکل 1. مدل­های اولیه آنالوگ بدون اعمال دگرشکلی، دید از بالا و روبه­رو.a. همگرایی 30 درجه. b. همگرایی15 درجه.



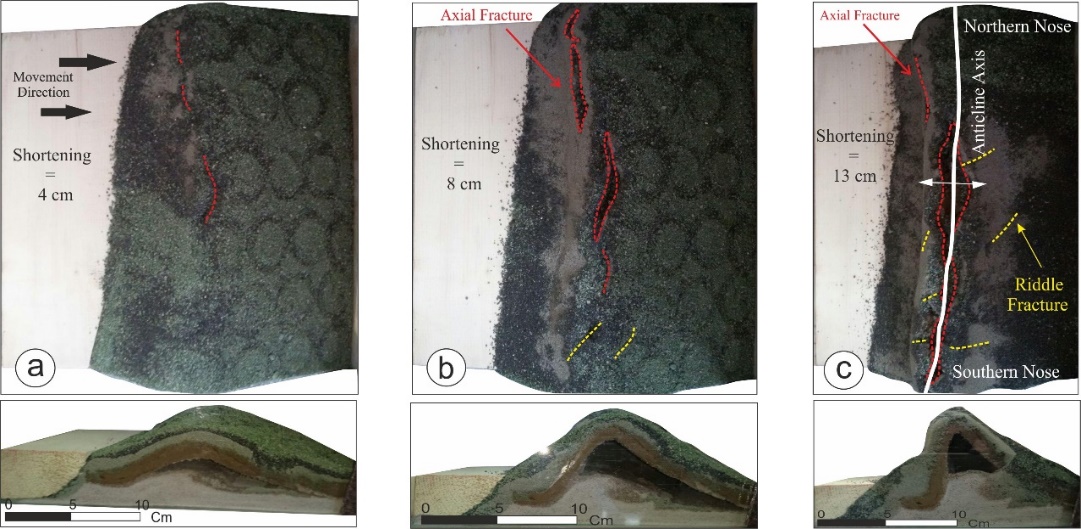
شکل 2. مدل­های اولیه عددی طراحی شده براساس مدل­های آنالوگ به همراه نوع المان­بندی.a. همگرایی 30 درجه. b. همگرایی15 درجه.

**◊◊◊◊◊◊◊**

**بحث:**

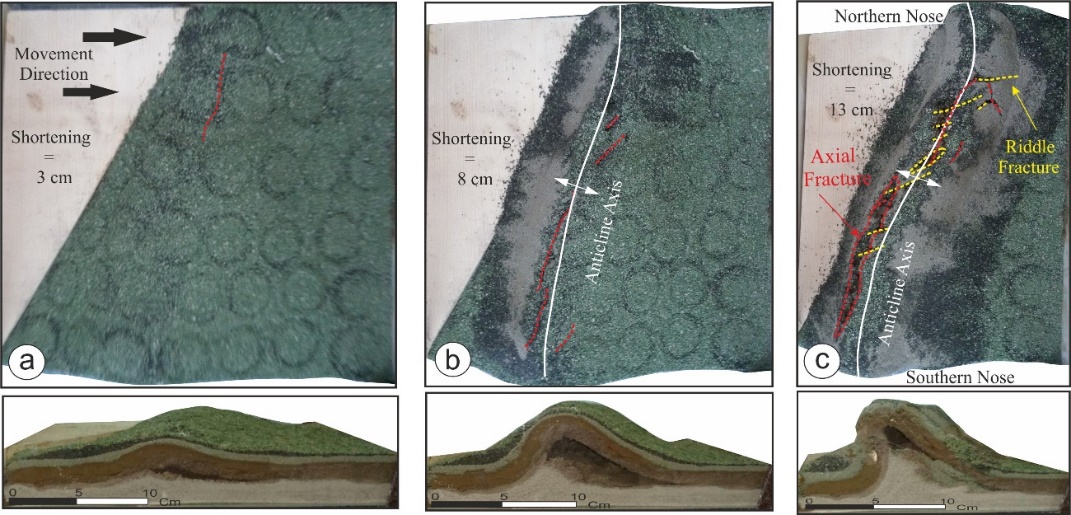
* **مدل­سازی آنالوگ**

در مدل آنالوگ اول، با زاویه همگرایی 15 درجه، اولین تغییرشکل جزئی در لایه­های مدل، در کوتاه­شدگی حدود 2cm و در پیشانی جبهه برخورد (دماغه شمالی) ، به وجود می­آید. با ادامه روند دگرشکلی، لایه­های زیرین برونزد پیدا کرده و اولین شکستگی­ها که به صورت موازی با محور چین هستند، تشکیل می­شوند (شکل3.a). با ادامه روند دگرشکلی و در کوتاه­شدگی حدود 8cm، شکستگی­های محوری بازتر شده و به دلیل ترافشارش بودن سیستم و جهت چرخش محور چین، حالت s شکل به خود می­گیرند (شکل3.b). در انتهای فرایند دگرشکلی، در کوتاه­شدگی حدود 13cm تکامل و رشد چین کامل شده و همچنین شکستگی­های برشی به دلیل سیستم ترافشارش و اختلاف در سرعت دگرشکلی در برخی نقاط چین که انحنا بیشتر است دیده می­شود (شکل3.c). لازم به ذکر است که چین­خوردگی حاصل در ابتدا متقارن بوده و با ادامه روند دگرشکلی، یال سمت دیواره متحرک، برگشته و تشکیل یک چین خوابیده با شیب یال­های نامساوی را می­دهد.



شکل 3. مدل آنالوگ با زاویه همگرایی 15 درجه. a. کوتاه­شدگی 4cm. b. کوتاه­شدگی 8cm. c. کوتاه­شدگی 13cm و تکامل چین­خوردگی به همراه شکستگی­های محوری و برشی و انحنای محور چین.

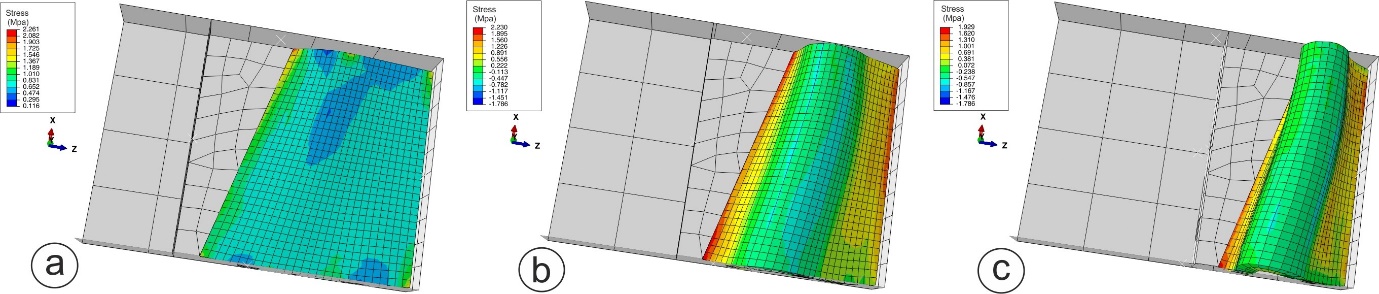
در مرحله بعد، در مدل آنالوگ با همگرایی 30 درجه نیز اولین تغییرشکل در لایه­های مدل، در کوتاه­شدگی حدود 1cm و درمحل پیشانی جبهه برخورد ظاهر می­شود. همانند مرحله قبل، اولین شکستگی­هایی که در سطح مدل ایجاد می­شوند، دارای روندی موازی با محور چین هستند که با ادامه روند دگرشکلی، شکستگی­ها بزرگتر می­شود (شکل 4). لازم به ذکراست که در این مدل، انحنای محور چین بیشتر از مدل قبل بوده و شکستگی­های برشی که در محل انحنای محور چین تشکیل شده­اند، دارای تعداد بیشتری هستند. روند تکامل چین­خوردگی با همگرایی 30 درجه در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 4. روند تکامل چین­خوردگی با همگرایی 30 درجه. a. کوتاه­شدگی حدود 3cm. b. کوتاه­شدگی حدود 8cm و شکل­گیری اولین شکستگی­های محوری. c. کوتاه­شدگی حدود 13cm و تکامل نهایی چین­خوردگی به همراه شکستگی­های محوری و برشی ناشی از انحنای محور چین.

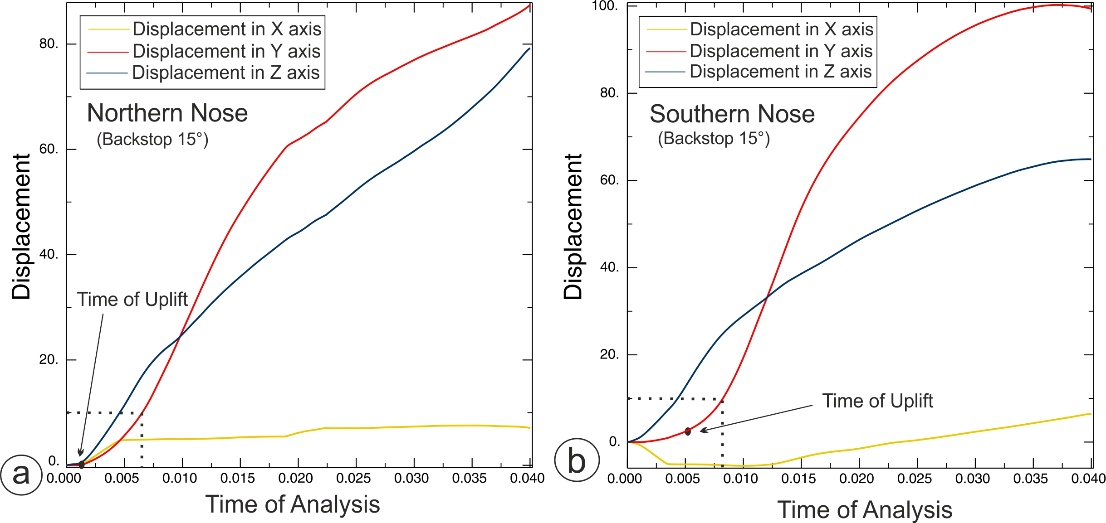
* **مدل­سازی عددی**

در این مطالعه مدل­های عددی نیز با زوایای همگرایی 15 و 30 درجه برپایه مدل­­های آنالوگ از نقطه نظر مقیاس و مواد مورد استفاده در مدل، طراحی و اجرا شده است که تطابق قابل قبولی را با مدل­های آنالوگ، از نظر مورفولوژی و نتایج، در پی داشته است. سعی شده است که مراحل و تصاویر انتخاب شده برای مدل­های عددی و آنالوگ، در مراحل یکسان از دگرشکلی و کوتاه­شدگی باشد تا مقایسه بین این دو راحت­تر صورت گیرد. شکل 5 روند تکامل چین­خوردگی را در مدل عددی، با زاویه همگرایی 15درجه نشان می­دهد. مقادیر مثبت نشان دهنده تنش فشارشی و مقادیر منفی نشان دهنده تنش کششی است. در ابتدای شروع دگرشکلی، ابتدا تمام سطح لایه تاحدی فشرده شده که این مرحله حد الاستیک نام دارد (شکل5.a). در مراحل بعد با رشد چین، قسمت لولایی چین متحمل کشش شده که با مرحله ایجاد ترک­ها و شکستگی­های محوری مدل­های آنالوگ همخوانی دارد (شکل5.b). مدل عددی نشان می­دهد که یال­های چین، بعد از کامل شدن مکانیسم چین­خوردگی همچنان تحت تنش فشارش می­باشد و مقدار این تنش در قسمت­های انحنایی چین و محور آن بیشتر از سایر نقاط است که بخشی از این تنش نیز در سیستم ترافشارشی به صورت تنش برشی ظهور پیدا می­کند (شکل5.c).



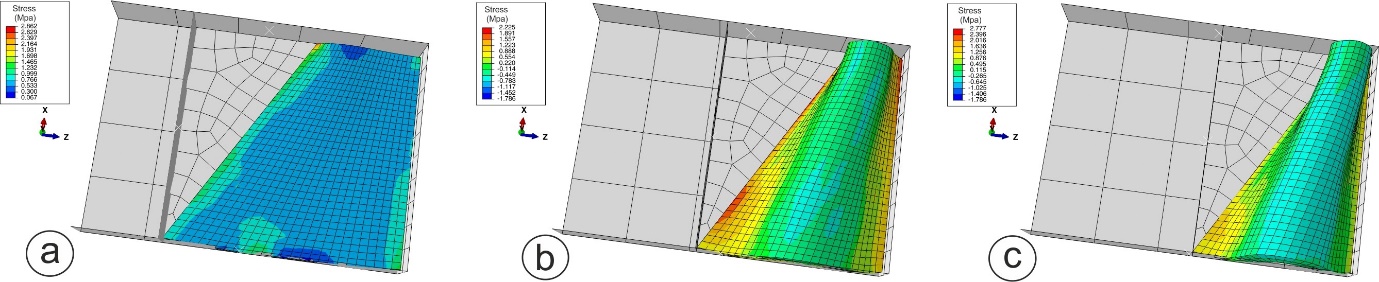
شکل5. روند تکاملی چین خوردگی و انحنای محور چین در مدل عددی با زاویه همگرایی 15 درجه.

پاسخ­های مدل عددی به صورت نمودارهای متنوعی قابل استخراج است که در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق، نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان استخراج شده است. شکل 6 ، نمودار جابه­جایی برحسب زمان در همگرایی 15 درجه را برای 2 دماغه شمالی و جنوبی چین نشان می­دهد. منحنی زرد رنگ، جابه­جایی در محور X و در راستای عرضی مدل را نشان می­دهد. منحنی قرمز رنگ، جابه­جایی در محور Y و در راستای قائم مدل را نشان می­دهد. منحنی آبی رنگ، جابه­جایی در محور Z و در راستای طولی مدل را نشان می­دهد. همانگونه که از نمودارها برمی­آید، در دماغه شمالی در زمان تحلیل 0.001 ثانیه وکمی بعد از شروع دگرشکلی، جابه­جایی در راستای قائم صورت می­گیرد (شکل6.a) ، این درحالی است که در دماغه جنوبی، زمان بیشتری لازم است تا جابه­جایی قائم و چین­خوردگی صورت گیرد واین زمان حدود 0.005ثانیه می­باشد (شکل6.b). همچنین با توجه به نمودارها، بیشترین جابه­جایی در واحد زمان، مربوط به حرکت قائم می­باشد، به گونه­ای که مقدار آن در پایان فرایند دگرشکلی در دماغه شمالی حدود 90 mm می­باشد، در این دماغه بیشینه جابه­جایی در راستای طولی مدل حدود 80 mm و در عرض مدل حدود 8 mm می­باشد. در دماغه جنوبی بیشینه جابه­جایی قائم حدود 100 mm و بیشینه جابه­جایی در راستای طولی مدل حدود 65 mm و بیشینه جابه­جایی در عرض مدل حدود 8 mm می­باشد.



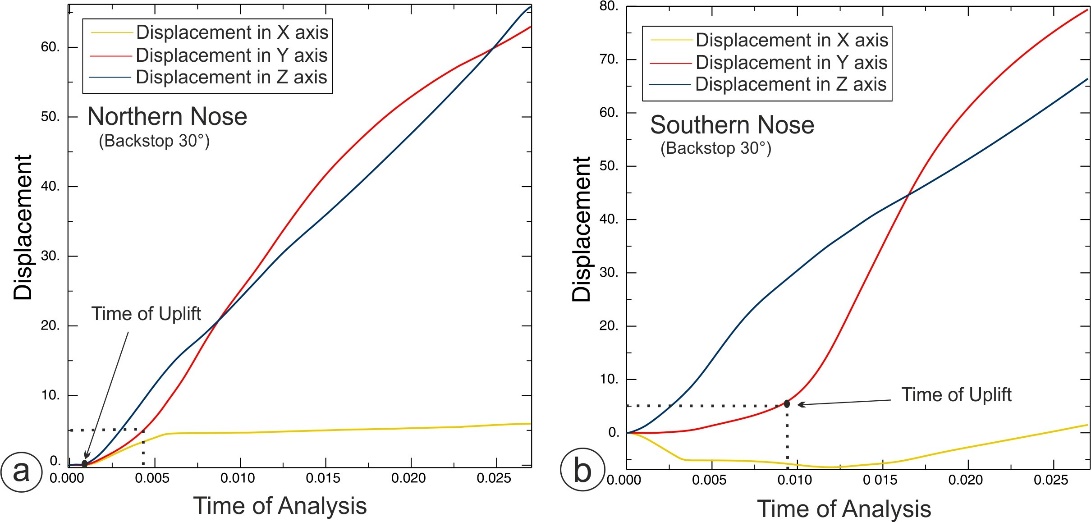
شکل 6.نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در سه محور X,Y,Z در همگرایی 15درجه. a. دماغه شمالی(محدوده پیشانی جهبه برخورد و قسمتی که اولین تغییر شکل در آن ایجاد می­شود). b. نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در دماغه جنوبی.

شکل 7، نتایج مدل­سازی عددی را برای همگرایی 30 درجه نشان می­دهد. در این مدل نیز لایه­ها بعد از عبور از حد الاستیک، وارد چین­خوردگی شده و اولین تغییر شکل در پیشانی جبهه برخورد ظاهر می­شود. با ادامه روند تحلیل، فرایند چین­خوردگی کامل­تر شده و انحنای محور چین مشخص­تر می­شود (شکل7 .c).



شکل 7. روند تکاملی چین خوردگی و انحنای محور چین در مدل عددی با زاویه همگرایی 30 درجه.

نمودارهای بدست­آمده از این تحلیل نیز حاکی از اختلاف زمان شروع دگرشکلی و چین­خوردگی در دو سوی جبهه برخورد است. به­گونه­ای که زمان شروع چین­خوردگی در دماغه شمالی و پیشانی جبهه برخورد حدود 0.001 ثانیه بعد از شروع فرایند دگرشکلی می­باشد و در دماغه جنوبی این مقدار به حدود 0.009 ثانیه می­رسد (شکل 8). بیشینه جابه­جایی در دماغه شمالی و در راستای قائم حدود 62mm، در راستای طولی مدل حدود 65mm و در عرض مدل نیز حدود 6mm می­باشد، این درحالی است که در دماغه جنوبی، بیشینه جابه­جایی قائم در حدود 80mm، در راستای طولی مدل حدود 65mm و در عرض مدل حدود 1mm می­باشد.



شکل 8. نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در سه محور X,Y,Z در همگرایی 30 درجه. a. دماغه شمالی(محدوده پیشانی جهبه برخورد و قسمتی که اولین تغییر شکل در آن ایجاد می­شود). b. نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در دماغه جنوبی.

مقایسه نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در دو مدل عددی نشان می­دهد که اختلاف زمان شروع جابه­جایی قائم در دو سوی جبهه برخورد، در همگرایی 30 درجه بیشتر از همگرایی 15 درجه می­باشد. این اختلاف در همگرایی 30 درجه معادل 0.008 ثانیه و در همگرایی 15درجه معادل 0.004 ثانیه می­باشد. به عبارتی می­توان نتیجه گرفت که هرچه زاویه همگرایی بیشتر باشد، زمان انتقال دگرشکلی از دماغه شمالی به سمت دماغه جنوبی بیشتر بوده و انحنای محور چین نیز بیشتر خواهد بود.

**◊◊◊◊◊◊◊**

**نتيجه گيري :**

نتایج بدست آمده از هر دو مدل آنالوگ و عددی نشان دهنده این موضوع می­باشد که اولین تغییرشکل و چین­خوردگی در پیشانی جهبه برخورد به وجود می­آید که نشان از انطباق قابل قبول مدل عددی و آنالوگ با یکدیگر دارد. مدل عددی نشان می­دهد، درحالی که قسمت لولای چین تحت تنش کششی می­باشد، یال­های چین، بعد از کامل شدن مکانیسم چین­خوردگی همچنان تحت تنش فشارش می­باشد و مقدار این تنش در قسمت­های انحنایی چین و محور آن بیشتر از سایر نقاط است که بخشی از این تنش نیز در سیستم ترافشارشی به صورت تنش برشی ظهور پیدا می­کند. مقایسه نمودارهای جابه­جایی برحسب زمان در دو مدل عددی نشان می­دهد که اختلاف زمان جابه­جایی قائم در همگرایی 30 درجه بیشتر از همگرایی 15 درجه می­باشد. این اختلاف در همگرایی 30 درجه معادل 0.008 ثانیه و در همگرایی 15درجه معادل 0.004 ثانیه می­باشد. به عبارتی می­توان نتیجه گرفت که هرچه زاویه همگرایی بیشتر باشد، زمان انتقال دگرشکلی از دماغه شمالی به سمت دماغه جنوبی بیشتر بوده و انحنای محور چین نیز بیشتر خواهد بود.

**◊◊◊◊◊◊◊**

**References:**

* Agard, P., et al. (2005). "Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation." International journal of earth sciences**94**(3): 401-419.
* Agard, P., et al. (2011). "Zagros orogeny: a subduction-dominated process." Geological magazine**148**(5-6): 692-725.
* Alavi, M. (1994). "Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations." Tectonophysics**229**(3-4): 211-238.
* Annunziatellis, A., et al. (2008). "Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): implications for CO2 geological storage." International Journal of Greenhouse Gas Control**2**(3): 353-372.
* Aydin, A. (2000). "Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow." Marine and petroleum geology**17**(7): 797-814.
* Ferrill, D. A., et al. (2004). "Structural framework of the Edwards Aquifer recharge zone in south-central Texas." Geological Society of America Bulletin**116**(3-4): 407-418.
* Harland, W. (1971). "Tectonic transpression in caledonian Spitsbergen." Geological magazine**108**(01): 27-41.
* Jamison, W. R. (1987). "Geometric analysis of fold development in overthrust terranes." Journal of Structural Geology**9**(2): 207-219.
* Mitra, S. (1990). "Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon Traps (1)." AAPG Bulletin**74**(6): 921-945.
* Mohajjel, M. and M. Behyari (2010). "Young transpressive positive flower structure along the Zagros collision zone, Nahavand area, west Iran." New England Orogen 20:243-252.
* Mohajjel, M. and A. Rasouli (2014). "Structural evidence for superposition of transtension on transpression in the Zagros collision zone: Main Recent Fault, Piranshahr area, NW Iran." Journal of Structural Geology**62**: 65-79.
* Smart, K. J., et al. (2012). "Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding." Tectonophysics**576**: 171-196.