

ارزیابی زمین‌ریختی الگوی رشد جانبی چین‌های فعال در کمان فارس، کمربند چین-راندگی زاگرس، ایران (مطالعه موردی: تاکدیس‌های هرنگ و کوه‌نمکی)

علی فقیه^۱، آرش جمشیدی^۲ و احمد نوحه‌گر^۳

^۱ استادیار، بخش علوم‌زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش علوم‌زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
^۳ استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۱۳

چکیده

وجود رشد جانبی در چین‌های بالای یک گسل معکوس پنهان، یک فرضیه بسیار مهم بوده و به‌طور کلی پذیرفته شده است. در این پژوهش، الگوی رشد چین‌های فعال (تاکدیس‌های هرنگ و کوه‌نمکی) کمان فارس واقع در زاگرس چین-راندگی از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی زمین‌ساختی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش کاربرد شاخص‌های زمین‌ریخت‌سنجی نظیر الگوی زهکشی، چگالی زهکشی، عدم تقارن حوضه‌های زهکشی و طول-گردایان زهکش‌ها برای تعیین جهت انتشار جانبی چین‌ها با تأکید بر فرایند پیوند تکه‌های مختلف چین است. مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی نشان می‌دهد که برخی چین‌ها در زاگرس حاصل یک چین جنبینی مجزا نبوده و در اثر پیوند جانبی تکه‌های متفاوت چین خورده گسترش یافته‌اند. نوع پیوند (خطی، مایل) تکه‌های مختلف یک چین در طی رشد جانبی به نحوه قرارگیری چین‌های جنبینی اولیه بستگی دارد. بررسی شاخص‌های زمین‌ریخت‌سنجی در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده این است که تاکدیس هرنگ حاصل رشد جانبی و اتصال مایل سه تاکدیس جنبینی مجزا است در حالی که تاکدیس کوه‌نمکی از رشد خطی یک تاکدیس جنبینی ایجاد شده است و نمی‌توان آن را حاصل پیوند چند قطعه مجزا دانست.

کلیدواژه‌ها: چین فعال، رشد چین، شاخص‌های زمین‌ریخت‌سنجی، کمربند چین-راندگی زاگرس.

*نویسنده مسئول: علی فقیه

E-mail: afaghhi@shirazu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

کوتاه‌شدگی ناشی از برخورد صفحات سنگ‌کره به یکدیگر، به‌طور عمده به صورت گسلش معکوس و چین‌خوردگی مرتبط با آن در کمربندهای چین-راندگی نمایان می‌شود (Elliot, 1976; Champel et al., 2002). گسل شکل گرفته در ابتدا دارای ابعاد کوچکی است ولی تداوم کوتاه‌شدگی و تمرکز تنش در انتهای گسل سبب افزایش طول و رشد جانبی آن می‌شود. تکرار این فرایند سبب افزایش میزان جابه‌جایی روی صفحه گسل و برپایی و رشد تاکدیس مرتبط با آن می‌شود (Peacock, 1991; Peacock & Sanderson, 1991; Dawers et al., 1993; Cartwright et al., 1995). برهم‌کنش چین در حال رشد با فرایندهای سطحی، زمین‌دیس‌های ویژه‌ای را پدید می‌آورد که شواهد رشد و تکامل چین‌های مرتبط با گسل را در خود ثبت کرده‌اند. در چنین شرایطی می‌توان از ویژگی‌های زمین‌ریختی چین‌های مرتبط با گسل به عنوان نشانگرهای جنبش‌شناختی برای شناخت الگو و سازوکار رشد، نحوه پیوند و انتشار گسل‌ها استفاده کرد (Keller et al., 1999; Ramsay et al., 2007; Champel et al., 2002; Delcailau et al., 2006). در کمربند چین-راندگی زاگرس به دلیل قابلیت نوردپذیری و ستبرای زیاد پوشش رسوبی، گسل‌ها به‌طور عمده به سطح نمی‌رسند (Stein & Yeats, 1989; Berberian, 1995). به همین دلیل بررسی سازوکار رشد چین‌ها می‌تواند تا حدی نشان‌دهنده وضعیت گسل‌های پنهان پدیدآورنده آنها باشد.

با توجه به اهمیت رشد گسل‌ها و چین‌های وابسته به آنها در ارزیابی ریسک لرزه‌خیزی و مطالعات اکتشافی مخازن هیدروکربنی، در این پژوهش سعی بر آن است با استفاده از نشانگرهای زمین‌ریختی حاصل از رشد گسل‌ها و چین‌های مرتبط با آنها، تکه‌بندی (segmentation)، انتشار جانبی (Lateral propagation) و نحوه پیوند (linkage) چین‌ها و عوامل کنترل‌کننده این فرایندها در کمربند چین-راندگی زاگرس مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- جایگاه زمین‌شناختی

کمربند چین-راندگی زاگرس بخشی از کوهزاد فعالی است که از گسل آناتولی خاوری در ترکیه تا گسل میناب در جنوب ایران گسترده شده است (شکل ۱). تشکیل آن ناشی از آغاز بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در کرتاسه (Talbot & Alavi, 1996) و برخورد صفحه آفرو-عربی به اوراسیا در میوسن است (Agard et al., 2005). دگرشکلی‌های اولیه در محل زمین‌درز متمرکز است (Gavilot et al., 2010; Khadivi et al., 2010) سپس به سوی جنوب باختر انتشار یافته است (Hessami et al., 2001; Mouthereau et al., 2006; Oveisi et al., 2009). دگرشکلی‌های کنونی نیز در بخش پیشانی زاگرس متمرکز است (Oveisi et al., 2009; Walpersdorf et al., 2006). بر اساس برش‌های ترازمند عرضی در ناحیه فارس، مقدار کوتاه‌شدگی ۴۵-۷۰ کیلومتر طی ۵-۱۰ میلیون برآورد شده است (Sherkati & Leouzey, 2004; Molinaro et al., 2005; Mouthereau et al., 2007). اندازه‌گیری‌های GPS نرخ همگرایی ۲۳-۱۹ mm/yr را برای سرتاسر ایران نشان می‌دهد که ۱۰-۷ mm/yr آن در زاگرس صرف گسلش و چین‌خوردگی فعال می‌شود (Vernant et al., 2004; Hessami et al., 2006).

چین‌خوردگی زاگرس در پوشش رسوبی ستبری رخ داده که تغییرات قابل توجهی از نظر ستبرا و ویژگی‌های رسوبی-رخساره‌ای در آن مشاهده می‌شود. این تغییرات تحت کنترل هندسه حوضه‌ای است که رسوب‌گذاری در آن صورت گرفته که خود نیز متأثر از پهنه‌های گسلی است (Alavi, 2004; Sephehr & Cosgrove, 2004). پوشش رسوبی زاگرس شامل توالی‌های کربناتی، ماسه‌سنگی، شیل، مارن و تبخیری است که در طی کامبرین پیشین تا پلیوسن نهشته شده‌اند (Stocklin, 1968; Colman-Sadd, 1978). پوشش رسوبی زاگرس شامل چندین افق جدایشی است که از میان آنها می‌توان به نمک هرمز، دشتک، کژدمی، گچساران و رازک اشاره کرد (Sephehr & Cosgrove, 2004). نمک

راست حوضه (A_p) به کل مساحت حوضه (A_t) $Asymmetry Factor = (A_p/A_t)100$. کاهش بالاآمدگی تاقدیس در سوی رشد سبب می‌شود تا حوضه‌های زهکشی نیز به این سو کج شده و حوضه‌های نامتقارنی را به وجود آورند. در نتیجه زهکش‌هایی که در سو رشد چین جریان دارند، گسترش بیشتری داشته و مساحت بیشتری به خود اختصاص می‌دهند (Ramsay et al., 2008; Delcailau et al., 2006).

۳-۴. شاخص طول-گرادیان

این شاخص عبارت است از شیب محلی بخشی از یک زهکش $(\Delta H/\Delta L)$ در فاصله نقطه اندازه‌گیری تا محل انشعاب (L) و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$SL = (\Delta H/\Delta L) L$$

به دلیل کاهش مقدار بالاآمدگی تاقدیس در سوی رشد و به موازات محور چین، مقدار شاخص طول-گرادیان زهکش‌ها (Hack, 1973) نیز در سوی رشد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با نزدیک‌تر شدن به محل تاقدیس جنینی، زهکش‌ها قدیمی‌تر بوده و دارای مقادیر بیشتری از بالاآمدگی نسبت به بخش‌های دیگر چین هستند. بر این اساس با اندازه‌گیری مقدار شاخص طول-گرادیان زهکش‌های جاری روی یال‌های تاقدیس مورد مطالعه و بررسی روند تغییرات آن، می‌توان به سوی رشد چین پی برد.

با توجه به مطالبی که در بالا بیان شد اساس اندازه‌گیری شاخص‌های فوق، وجود شبکه زهکشی است. به همین دلیل ابتدا مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد. توسط ابزار ArcHydro در محیط نرم افزاری GIS سوی شیب‌ها شناسایی شده و سپس شبکه زهکشی و حوضه‌ها به صورت رستر استخراج شدند. در مرحله بعد، اندازه‌گیری شاخص‌های ریخت‌سنجی که در بالا شرح داده شد روی آنها صورت گرفته است.

۴-۴. یافته‌های پژوهش

به منظور مطالعه چگونگی رشد، تکه‌بندی، انتشار جانبی و نحوه پیوند چین‌ها به یکدیگر، دو تاقدیس به عنوان نمونه در بخش ساحلی کمر بند چین-راندگی زاگرس بررسی شد. البته باید بیان شود که زمین‌ریخت‌شناسی کنونی چین‌ها در این ناحیه تا حدودی ناشی از بالاآمدگی فرسایشی است اما با توجه به نرخ کنونی همگرایی بین صفحه آفری-عربی و اوراسیا (Vernant et al., 2004) و کج‌شدگی پادگانه‌های آبرفتی و دریایی (Oveisi et al., 2007) می‌توان چین‌خوردگی فعال را عامل اصلی شکل‌دهنده عوارض زمین‌ریختی ناحیه دانست. یافته‌های حاصل از بررسی کمی و کیفی نشانگرهای زمین‌ریختی رشد چین‌ها در ناحیه مورد مطالعه در ذیل تشریح می‌شود.

۴-۱. تاقدیس هرنگ

هرنگ تاقدیسی نامتقارن، نیمه‌استوانه‌ای و دارای یال‌هایی با شیب ملایم (به‌طور متوسط ۲۰ درجه) است و طول موج آن به موازات محور شدیداً متغیر است. طول آن به موازات محور حدود ۲۵ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. خمیدگی‌های واضحی در روند محور چین دیده می‌شود. از خاور توسط دیپایر غیر فعال هرنگ از تاقدیس بونه‌کوه و از جنوب توسط یک گسل راندگی از تاقدیس سفید جدا می‌شود. همچنین بر اساس مطالعه مقاطع لرزه‌ای بازتابی، از نوع چین‌های جدایشی تشخیص داده شده است (Trocmé et al., 2011). سازند تبخیری گچساران بخش مرکزی تاقدیس را می‌پوشاند و به سوی حاشیه تاقدیس به ترتیب سازندهای میشان و آغاچاری قرار دارند. سازند تبخیری نیز به صورت لایه‌های رشدی در پایین دست یال‌ها تجمع یافته است (شکل ۱).

الگوی غالب زهکش‌های جاری بر روی یال‌های تاقدیس هرنگ، الگوی چنگالی است (شکل ۳) که در سرتاسر تاقدیس وجود دارد. با این تفاوت که سوی این

هرمز با سبزی ۱ تا ۲ کیلومتر با نفوذ در پوشش رسوبی بالایی سبب تضعیف آن و سهولت شکل‌گیری چین‌ها و گسل‌ها پیرامون ساختارهای نمکی شده است (Callot et al., 2007; Jahani et al., 2009 & 2007). کمان فارس به عنوان ناحیه تمرکز این پژوهش از خاور توسط گسل میناب و از باختر توسط گسل کازرون احاطه شده است. این ناحیه شامل تاقدیس‌های جعبه‌ای شکل و پشت‌خوکی است که شدیداً تحت تأثیر دیپایرهای نمکی قرار گرفته‌اند (Jahani et al., 2009). نمک‌هرمز به همراه دیگر افق‌های جدایشی موجود در ستون چینه‌شناسی، سبب گسترش چین‌های جدایشی در این ناحیه شده است (Sepehr & Cosgrove, 2004; Yamato et al., 2011).

۳-۳. روش مطالعه

در هر بار افزایش طول (رشد) تاقدیس، بخش‌های جدیدتری به نواحی دماغه آن اضافه می‌شود. در این حالت، دماغه‌های چین، بالاآمدگی تجمعی کمتری را نسبت به دیگر نواحی تجربه می‌کنند. با در نظر گرفتن این ویژگی و نحوه تأثیر آن بر زمین‌دیس‌های مرتبط با چین، می‌توان به مطالعه رشد طولی چین‌ها پرداخت. در ادامه روش‌ها و شاخص‌های ریخت‌سنجی مورد نیاز برای بررسی شواهد زمین‌ریختی ویژگی یادشده در چین‌های در حال رشد تشریح می‌شود.

۳-۱. الگوی زهکشی

الگوی زهکشی یکی از عوارض زمین‌ریختی حساس به فعالیت‌های زمین‌ساختی است و تاکنون انواع مختلفی از آن شناسایی شده است. زهکش‌ها همواره در سوی حداکثر شیب توپوگرافی جریان می‌یابند به گونه‌ای که در بخش‌های میانی یک تاقدیس از سوی حداکثر شیب عمود بر محور و در ناحیه دماغه از جهت میل محور پیروی می‌نمایند. پس از انتشار جانبی یا رشد طولی چین، دماغه به سمت بیرون مهاجرت کرده و مقدار شیب برای زهکش‌های موجود در ناحیه دماغه پیشین، کاهش می‌یابد. بنابراین این زهکش‌ها مسیر خود را تغییر داده و عمود بر محور چین جریان می‌یابند. تکرار این فرایند و اتصال نسل‌های متوالی زهکش‌هایی که در ناحیه دماغه قرار داشته‌اند، الگوی چنگالی را به وجود می‌آورد (Ramsay et al., 2008). در این الگو، نوک چنگال از شاخه‌های فرعی تشکیل شده که از سوی هسته اولیه تاقدیس منشأ می‌گیرند و با زاویه کمتر از ۹۰ درجه به شاخه اصلی که دسته چنگال را می‌سازد متصل می‌شوند. هیچ‌گونه شاخه فرعی در سوی عکس رشد چین جریان ندارد و یا این که گسترش بسیار کمی دارند (شکل ۲-۲). در این الگو برخلاف الگوی زهکشی درختی، در همه جهات و با طول‌های تصادفی گسترش صورت نگرفته است و فقط در سوی رشد چین، زهکش گسترش می‌یابد. همچنین، زهکش‌های چنگالی برخلاف الگوهای داربستی (Trellis)، راست‌گوشه (Rectangular) و موازی (Parallel) به موازات شکستگی‌ها و لایه‌بندی سنگ‌ها جریان نمی‌یابند. الگوی چنگالی همانند الگوی شعاعی از یک نقطه مرکزی مرتفع منشأ نمی‌گیرد (شکل ۲-۲).

۳-۲. شاخص چگالی زهکشی

مقدار این شاخص از تقسیم مجموع طول زهکش‌ها (ΣL_p) به مساحت حوضه زهکشی شده (A_p) به دست می‌آید. $Drainage Density = \Sigma L_p/A_p$. پیشینه میزان چگالی زهکشی در هسته اولیه تاقدیس است و در سوی رشد چین از مقدار آن کاسته می‌شود. در سوی رشد چین، زهکش‌ها جوان‌تر است و فرصت کافی برای انشعاب و فرسایش یال‌های تاقدیس را نیافته‌اند (Keller et al., 1999; Seong et al., 2011).

۳-۳. شاخص عدم تقارن

این شاخص نشان‌دهنده کج‌شدگی حوضه بوده و عبارت است از مساحت سمت

بیشترین مقدار است و در سوی رشد جانبی چین از مقدار آن کاسته می‌شود. همچنین مقدار شاخص طول-گردایان زهکش در نزدیکی تاق‌دیس‌های جنینی بیشتر از دیگر بخش‌های تاق‌دیس است. زیرا این بخش‌ها بیشترین مقدار بالاآمدگی را نسبت به دیگر بخش‌ها تجربه کرده‌اند. با توجه به وجود سه نقطه اوج در نمودار تراکم زهکش نسبت به فاصله در طول محور تاق‌دیس هرنگ می‌توان گفت که این تاق‌دیس باید از سه تاق‌دیس جنینی تشکیل شده باشد. نمودار مقادیر طول-گردایان نسبت به فاصله در طول محور تاق‌دیس نیز این مطلب را تأیید می‌کند. شاخص عدم تقارن برای حوضه‌های یال شمالی (شکل ۴) در صورتی که کج‌شدگی و سوی انتشار به سوی باختر باشد بیشتر از ۵۰ و اگر به سوی خاور باشد کمتر از ۵۰ خواهد بود. این روند برای یال جنوبی دقیقاً عکس این حالت خواهد بود زیرا سوی حوضه‌ها نیز تغییر می‌کند. در یال شمالی تاق‌دیس هرنگ حوضه‌های دماغه خاوری مقدار AF بیشتر از پنجاه و در یال جنوبی مقدار کمتر از پنجاه دارند. در هر دو حالت سوی انتشار به سوی خاور است. با حرکت به سوی باختر در قطعه میانی سوی کج‌شدگی حوضه‌ها تغییر می‌کند و کج‌شدگی به سوی خاور را نشان می‌دهد. این تغییر سو در قطعه میانی و دماغه خاوری نیز اتفاق می‌افتد.

۲- تاق‌دیس کوه نمکی: با توجه به الگوی زهکشی گسترش‌یافته در دماغه خاوری و باختری تاق‌دیس کوه نمکی و در پیرامون دیاپیر نمکی موجود در این تاق‌دیس رشد به سوی خاور و باختر از محل این دیاپیر مشهود است. کاهش میزان چگالی زهکش و مقدار شاخص طول-گردایان زهکش از محل دیاپیر به سوی دماغه‌های خاوری و باختری تاق‌دیس کوه نمکی نشان‌دهنده انطباق محل تاق‌دیس جنینی با دیاپیر نمکی است. همچنین با توجه به شاخص عدم تقارن حوضه‌های آبریز و تغییر سوی عدم تقارن حوضه‌ها در دو سوی دیاپیر سوی رشد به سوی خاور و باختر از محل این دیاپیر مشخص می‌شود. مجموع این شواهد همگی بر منشأ گرفتن تاق‌دیس از دیاپیر کوه نمکی و رشد خطی آن از یک تاق‌دیس مجزا حکایت دارد که رشد به سوی باختر مقدم بر رشد به سوی خاور است و نمی‌توان آنها را حاصل پیوند و تداخل چند قطعه مجزا دانست.

۵-۲. الگوی پیوند چین‌ها

در رابطه با مطالعه پیوند چین‌ها و ویکرهای گوناگونی وجود دارد. برخی از پژوهشگران پیوند چین‌ها را در آزمایشگاه‌ها مورد بررسی قرار داده و برخی دیگر باروش‌های کمی آنها را مدل‌سازی کرده‌اند. اما به دلیل ماهیت فرایندهای زمین‌شناختی تاکنون روشی که بر مطالعات صحرایی استوار باشد ارائه نشده است. به طور کلی با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی به روش اجزاء محدود، چهار حالت مختلف با توجه به فاصله و نحوه قرارگیری بی‌نظمی‌های اولیه برای پیوند چین‌های در حال رشد پیشنهاد شده است (Grasemann & Schmalholz, 2012).

۱- پیوند خطی که حاصل آن یک چین نیمه استوانه‌ای به همراه ساختار زین اسبی در محل پیوند چین‌ها است.

۲- پیوند مایل که سبب ایجاد چین‌های تداخلی نوع دوم می‌شود (خمیدگی روند چین در محل پیوند).

۳ و ۴- فاقد پیوند در دو حالت مایل و خطی به دلیل فاصله زیاد هسته‌های اولیه، پیوندی صورت نمی‌گیرد (شکل ۸).

بر اساس پارامترهای موجود در مدل‌های یادشده، تاق‌دیس‌های منطقه مورد مطالعه را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- ۱- پیوند مایل: تاق‌دیس هرنگ حاصل پیوند مایل تکه‌های جنینی اولیه است. خمش مشاهده شده در روند آن نیز ناشی از نحوه پیوند تکه‌های جنینی اولیه است.
- ۲- عدم پیوند: تاق‌دیس کوه نمکی حاصل انتشار خطی یک تکه مجزا است. هیچ‌گونه شاهد زمین‌ریختی مبنی بر پیوند تکه‌های مجزا در این تاق‌دیس وجود ندارد. بی‌نظمی‌های اولیه موجود در پیکره تحت دگرشکلی، محل تشکیل چین‌های

زهکش‌ها در طول تاق‌دیس در بخش‌های مختلف چین، متغیر است. در دماغه باختری تاق‌دیس، زهکش‌ها از سوی خاور منشأ می‌گیرند و به سوی باختر منحرف می‌شوند. با حرکت به موازات محور چین سوی انحراف زهکش‌ها نیز برعکس می‌شود. این تغییر در الگوی زهکش‌ها دوبار دیگر نیز در این تاق‌دیس تکرار می‌شود. در دماغه خاوری، زهکش‌ها از دیاپیر هرنگ جریان می‌یابند.

افزون بر الگوی زهکش‌ها، میزان چگالی زهکش‌ها (شکل ۳)، شاخص SL (شکل ۴) و شاخص عدم تقارن (شکل ۵) نیز برای هر حوضه محاسبه شده است. نمودار تغییرات چگالی زهکش‌ها به موازات ستیغ تاق‌دیس رسم شده است. همچنین مقادیر SL محاسبه شده برای زهکش‌های جاری روی تاق‌دیس هرنگ (شکل ۴) با نمادگذاری رنگی به هشت دسته تقسیم شده و تغییرات آن به موازات محور در نمودار جداگانه‌ای نشان داده شده است.

۴-۲. تاق‌دیس کوه نمکی

کوه نمکی تاق‌دیس نسبتاً طولی با طول حدود ۴۸ کیلومتر و روند خاوری-باختری است. طول موج آن ۱۰ کیلومتر و به موازات روند تاق‌دیس ثابت است. هیچ‌گونه خمیدگی واضحی در روند تاق‌دیس مشاهده نمی‌شود. دیاپیر فعال کوه نمک در بخش میانی این تاق‌دیس برونزد دارد. میزان فرسایش در دو سوی دیاپیر یکسان نیست و از باختر به خاور کاهش می‌یابد. زهکش‌ها و حوضه‌های آبریز سوی باختر گسترده‌تر و ژرف‌تر هستند که می‌توان آن را دلیلی بر قدیمی‌تر بودن این بخش دانست. سازندها نیز در دو سوی دیاپیر یکسان نیستند. در سوی باختر تاق‌دیس، سازندهای پابده-گورپی و آسماری و در سوی خاور، سازند گچساران برونزد یافته است. در حاشیه تاق‌دیس نیز سازندهای میشان، آغاجاری و کنگلومرای بختیاری با گستردگی کمتری حضور دارند (شکل ۱).

زهکش‌های دماغه خاوری از الگوی چنگالی پیروی می‌کنند. این وضعیت زهکش‌ها تا محل دیاپیر نمکی حفظ می‌شود. در سوی باختر دیاپیر، زهکش‌ها نسبت به محور چین تقریباً عمودند و بستر خود را بیشتر حفر کرده‌اند. با حرکت به سوی دماغه باختری تاق‌دیس میزان حفر بستر کمتر و الگوی چنگالی دوباره ظاهر می‌شود. نتایج حاصل از بررسی چگالی زهکش‌ها (شکل ۶) نشان دهنده بیشترین مقدار چگالی در مجاور دیاپیر است و به سوی دماغه‌های تاق‌دیس از مقدار آن کاسته می‌شود. بر اساس نمودار تغییرات SL (شکل ۷) بیشترین مقدار این پارامتر در دیاپیر نمکی وجود دارد و در دو سوی آن شروع به کاهش می‌کند. بررسی عدم تقارن حوضه‌های زهکشی (شکل ۸) به وضوح نشان‌دهنده تغییر سوی حوضه‌ها در دو سوی دیاپیر است. حوضه‌های بخش باختری دیاپیر به سوی باختر و حوضه‌های بخش خاور دیاپیر به سوی خاور کج شده‌اند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱. تکه‌بندی و سوی انتشار چین

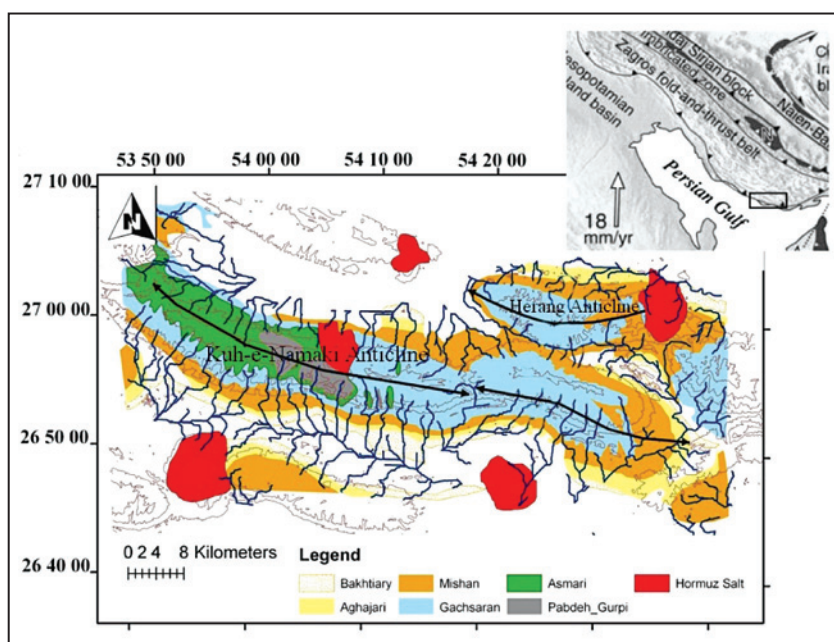
۲- تاق‌دیس هرنگ: در الگوی زهکشی چنگالی که در طی رشد جانبی چین‌ها ایجاد می‌شود، نوک چنگال‌ها نشان‌دهنده محل تاق‌دیس جنینی (جایی که رشد و ایجاد تاق‌دیس از آنجا شروع می‌شود) و دسته آن سوی رشد چین را نشان می‌دهد (Ramsay et al., 2008). تغییر جهت در الگوی زهکش‌های چنگالی در طول تاق‌دیس نشان‌دهنده موقعیت تاق‌دیس جنینی است. با توجه به الگوی چنگالی موجود در دماغه باختری تاق‌دیس هرنگ، سوی انتشار جانبی (رشد جانبی) به سوی باختر است. از طرفی با حرکت به موازات محور چین سوی انحراف زهکش نیز تغییر می‌کند. این تغییر الگو سه بار در طول این تاق‌دیس مشاهده می‌شود. بر اساس تغییرات حاصل در سوی الگوی چنگالی زهکش در این تاق‌دیس می‌توان گفت که این تاق‌دیس حاصل رشد جانبی و اتصال سه تاق‌دیس جنینی مجزا است که در طی انتشار جانبی به یکدیگر پیوسته‌اند. در محل تاق‌دیس جنینی چنگالی زهکش دارای

انتشار تاقدیس‌ها در تمامی موارد به سوی دیاپیرهای مجاور است. به عبارت دیگر تاقدیس‌ها از دیاپیرها منشأ می‌گیرند و به سوی دیاپیرهای مجاور رشد می‌کنند (Hudec & Jackson, 2007). افزون بر این، نحوه قرارگیری (مایل یا خطی) ساختارهای نمکی از پیش موجود (بی‌نظمی اولیه) و فاصله آنها از یکدیگر تعیین‌کننده نوع پیوند در تاقدیس‌ها است.

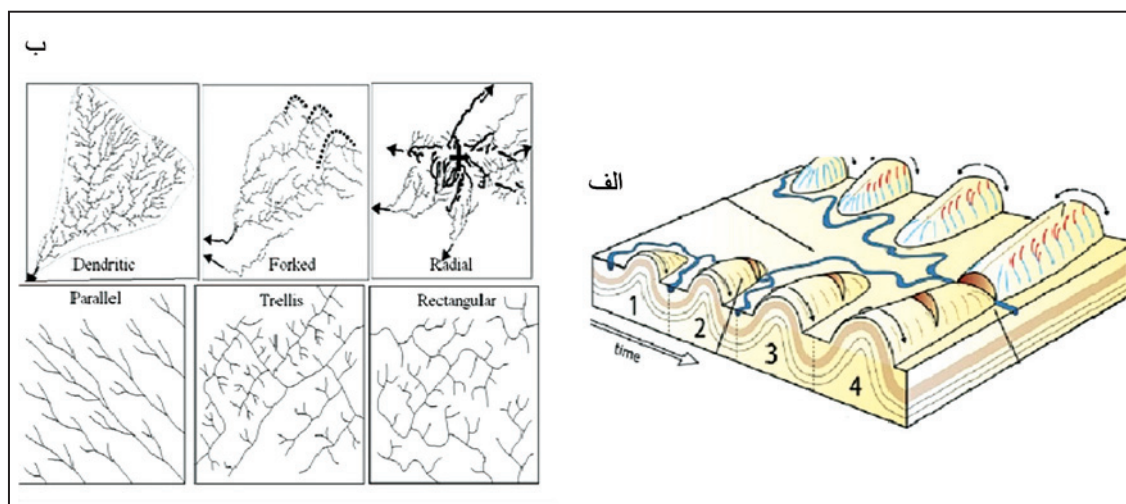
سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز به‌خاطر پشتیبانی و حمایت‌های مادی و معنوی از این کار، قدردانی می‌شود. همچنین از نظرات ارزشمند و مفید سردبیر و داوران محترم فصلنامه علوم‌زمین که نقش سازنده‌ای در بهبود کیفیت مقاله داشت، سپاسگزاری می‌شود.

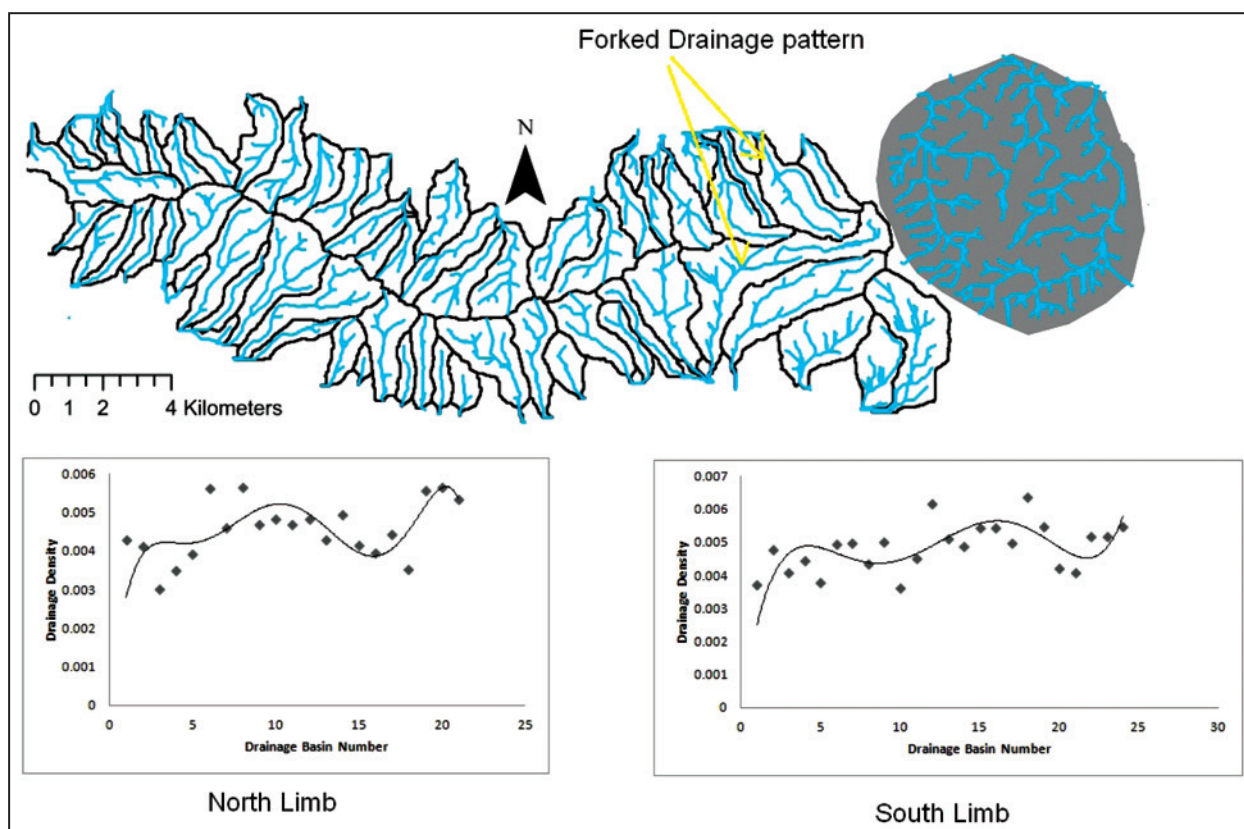
اولیه هستند (Grasemann & Schmalholz, 2012). همچنین فاصله آنها از یکدیگر (Grasemann & Schmalholz, 2012) و شکل آنها کنترل‌کننده مراحل بعدی گسترش یک چین است (Letouzey et al., 1995; Callot et al., 2007). در منطقه مورد مطالعه، هسته اولیه تاقدیس کوه‌نمکی و تکه خاوری تاقدیس هرنگ منطبق بر محل دیاپیرهای نمکی است. بنابراین می‌توان ساختارهای نمکی از پیش موجود را بی‌نظمی‌های لازم برای تشکیل چین‌ها در منطقه دانست. این موضوع با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های آنالوگ نیز قابل تأیید است (Letouzey et al., 1995; Nilsen et al., 1995; Vendeville & Nilsen, 1995; Callot et al., 2007; Hudec & Jackson, 2007). در مورد دیگر تکه‌ها ساختار نمکی وجود ندارد اما با توجه به شواهد فوق می‌توان استنباط کرد که ممکن است شکل‌گیری آنها با پشته‌های نمکی در حال صعود که هنوز به سطح نرسیده‌اند مرتبط باشد.



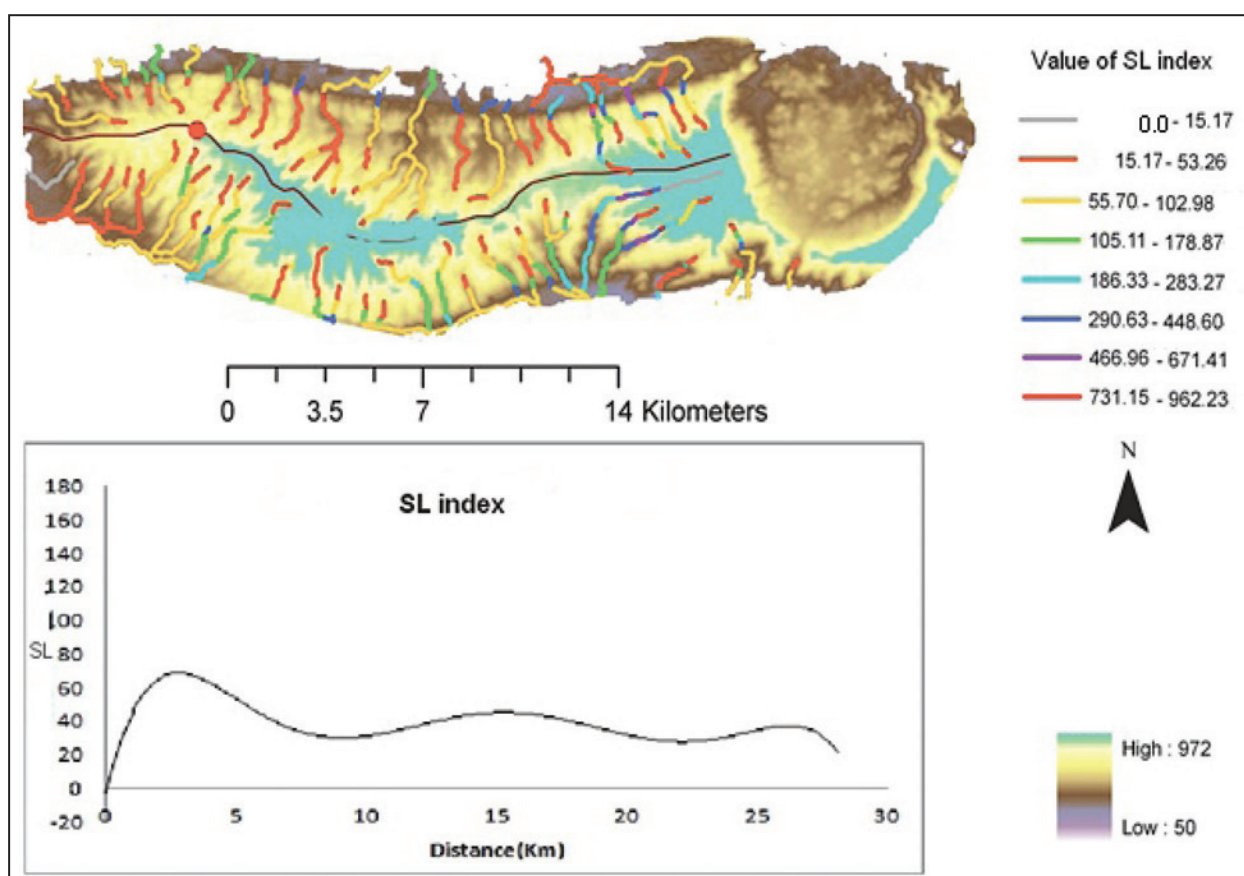
شکل ۱- موقعیت ساختاری و سازندهای منطقه مورد مطالعه.



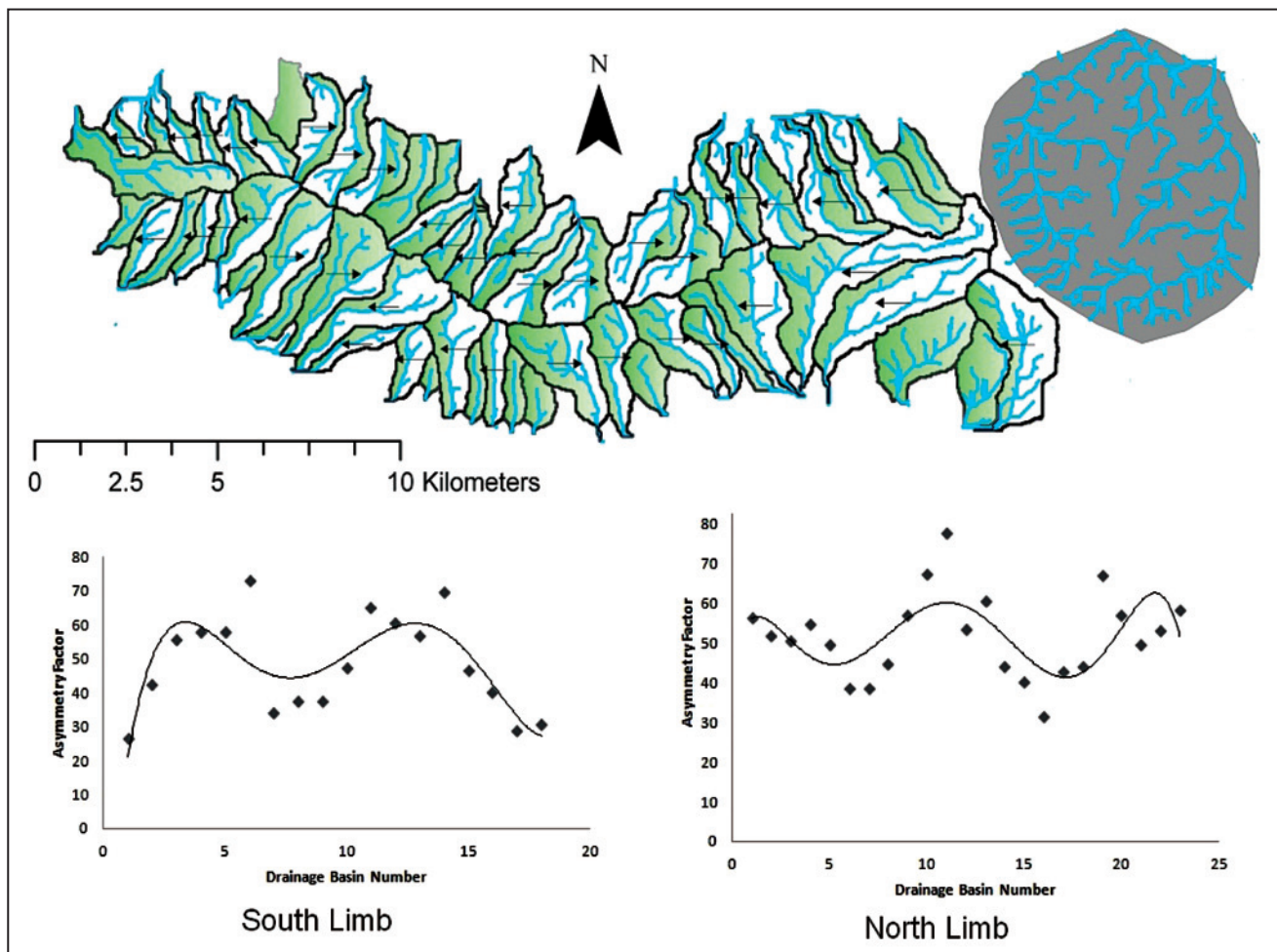
شکل ۲- (الف) مراحل شکل‌گیری الگوی زهکشی چنگالی؛ (ب) مقایسه آن با دیگر الگوها (Delcailau et al., 2006; Bretis et al., 2011).



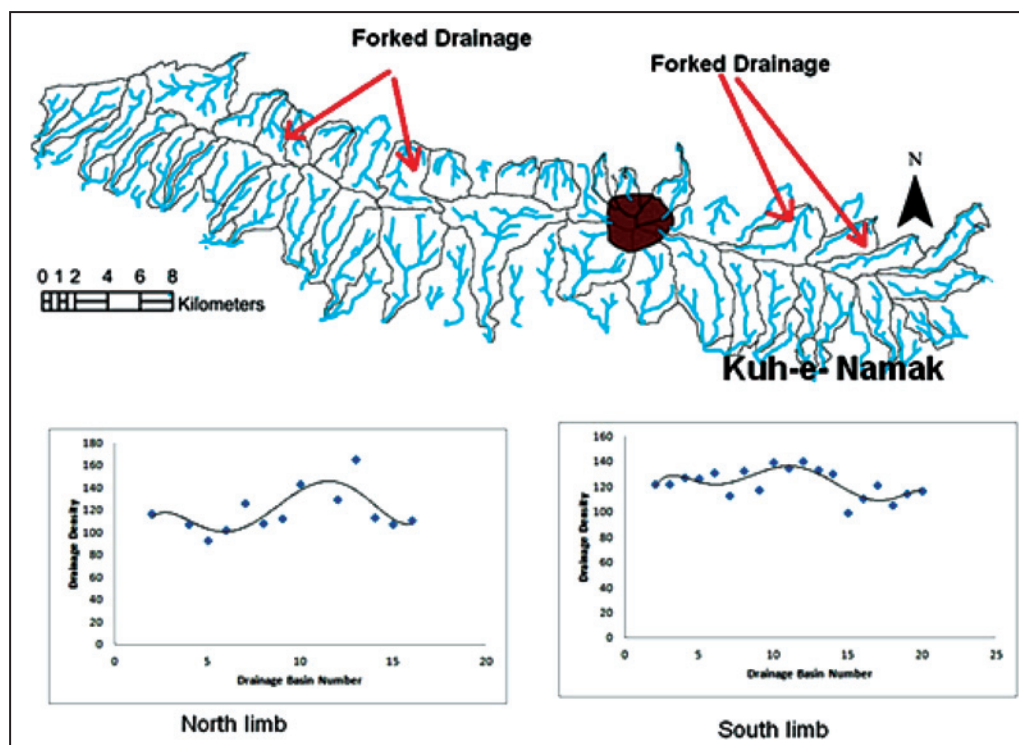
شکل ۳- شبکه زهکش‌ها، حوضه‌های آبریز و نمودار چگالی زهکشی در یال‌های شمالی و جنوبی تاقدیس هرنگ.



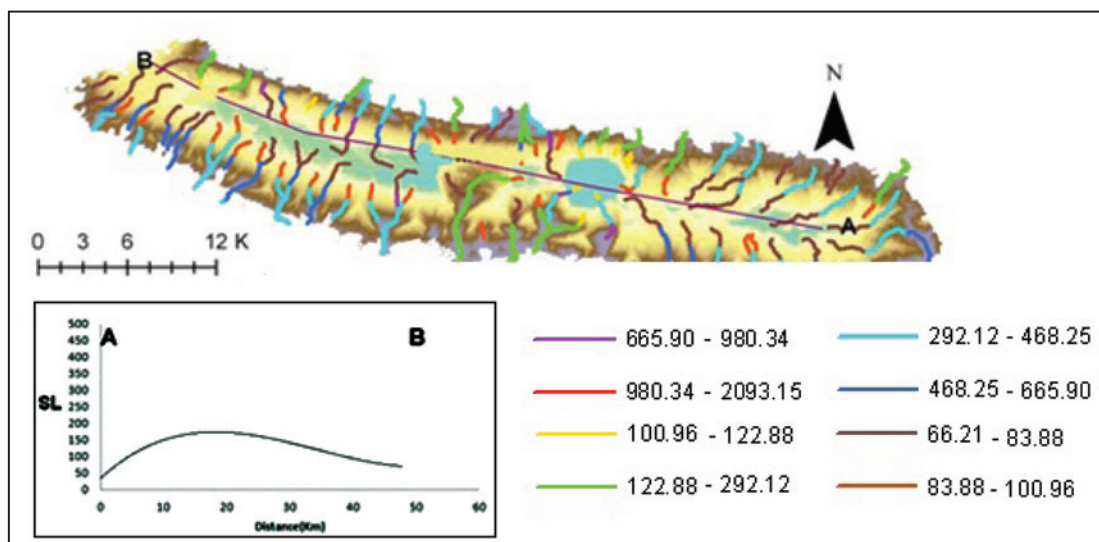
شکل ۴- مقادیر شاخص SL برای زهکش‌های جاری روی تاقدیس هرنگ، نمودار تغییرات مقادیر درونیابی شده SL به موازات محور در پایین رسم شده است.



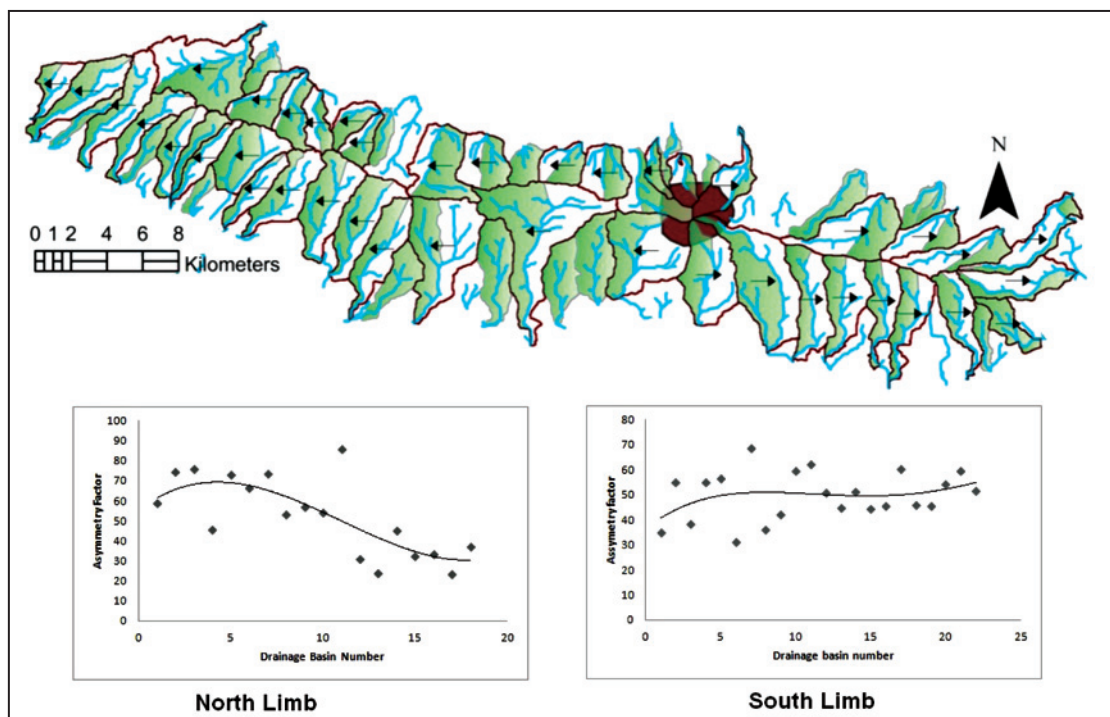
شکل ۵- حوضه‌های زهکشی و نمودار فاکتور عدم تقارن در تاق‌دیس هرنگ (سوی پیکان‌ها نشان‌دهنده سوی عدم تقارن حوضه‌های زهکشی است).



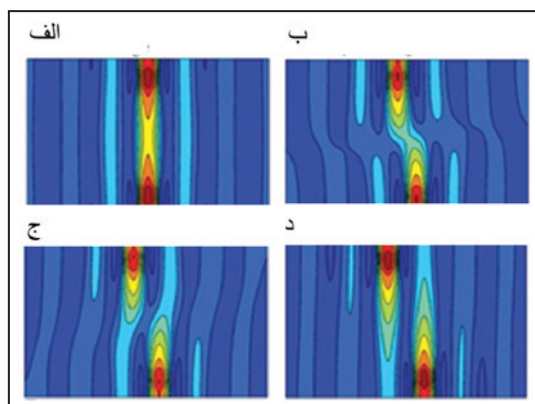
شکل ۶- شبکه زهکش‌ها، حوضه‌های آبریز و نمودار چگالی زهکشی در پال‌های شمالی و جنوبی تاق‌دیس کوه نمکی.



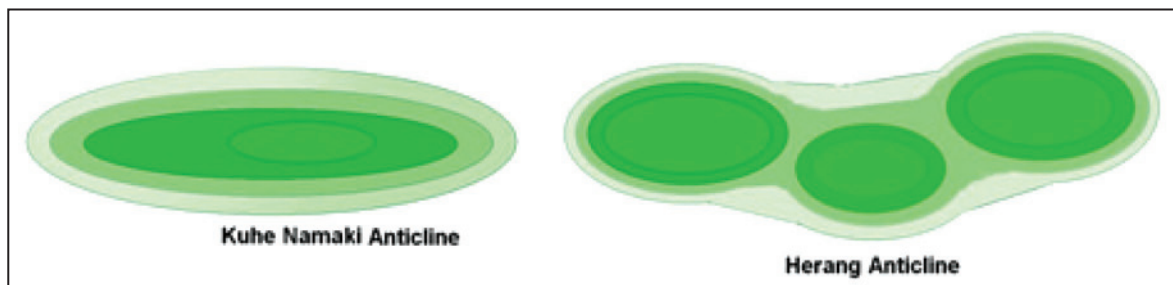
شکل ۷- مقادیر شاخص SL برای زهکش‌های تاقدیس‌های کوه نمکی و نمودار تغییرات مقادیر درون‌یابی شده شاخص SL به موازات محور .



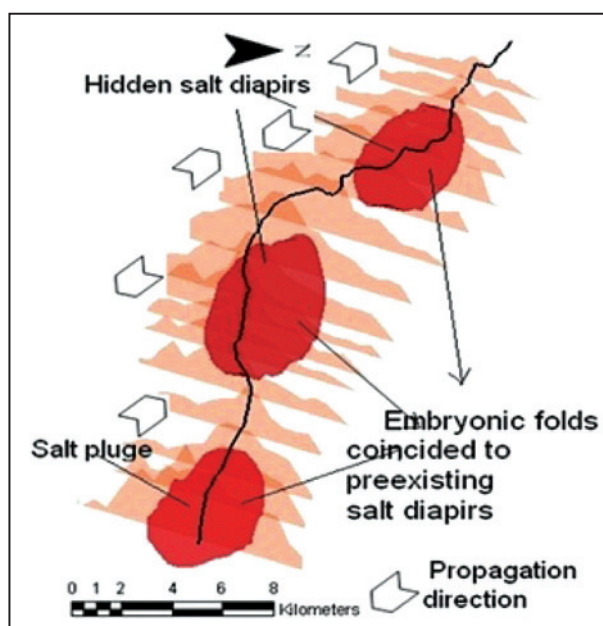
شکل ۸- حوضه‌های زهکشی و فاکتور عدم تقارن در تاقدیس کوه نمکی (سوی پیکان‌ها نشان‌دهنده سوی عدم تقارن حوضه‌های زهکشی است).



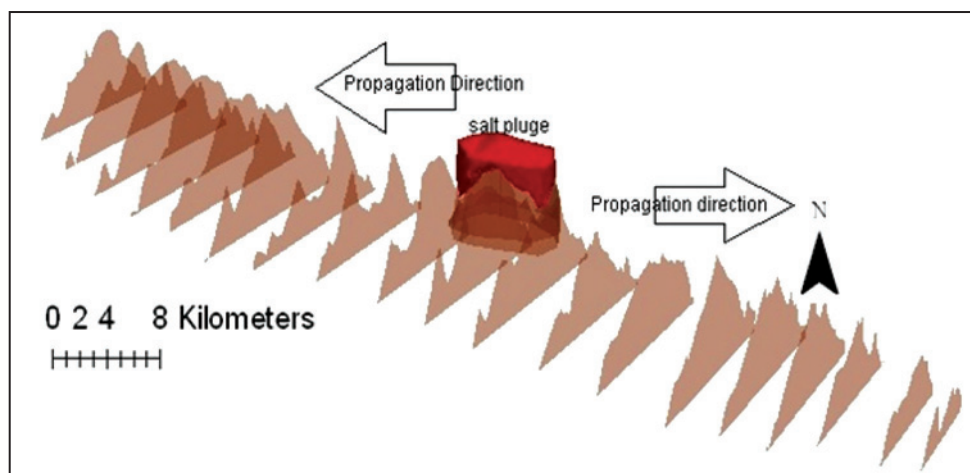
شکل ۹- نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی رشد چین‌الغ (الف) رشد واتصال مستقیم؛ (ب) رشد و اتصال مایل؛ (ج) رشد مایل بدون اتصال؛ (د) رشد مستقیم بدون اتصال (Grasemann & Schmalholz, 2012).



شکل ۱۰- مراحل رشد و پیوند تاقدیس‌ها در منطقه مورد مطالعه: پیوند مایل در تاقدیس هرنگ، رشد خطی و عدم پیوند در تاقدیس کوه نمکی.



شکل ۱۱- سوی انتشار و نحوه پیوند تکه‌های مختلف تاقدیس هرنگ.



شکل ۱۲- سوی انتشار در تاقدیس کوه نمکی.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. & Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94: 401–419.
- Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304: 1–20.
- Berberian, M., 1995- Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241:193-224.
- Bretis, B., Bartl, N. & Grasemann, B., 2011- Lateral fold growth and linkage in the Zagros fold and thrust belt (Kurdistan, NE Iraq). *Basin Research* 23, 615–630.
- Callot, J. P., Jahani, S. & Letouzey, J., 2007- The role of pre-existing diapirs in fold and thrust belt development. In: Lacombe, O., Lavé, J., F., M., Roure & Verges, J., *Thrust Belt and Foreland Basin: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*: 307–323 (Springer, Berlin).
- Cartwright, J. A., Trudgill, B. D. & Mansfield, C. S., 1995- Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology* 17: 1319–1326.
- Champel, B., Van der Beek, P., Mugnier, J. L. & Leturmy, P., 2002- Growth and lateral propagation of fault-related folds in the Siwaliks of western Nepal: rates, mechanisms, and geomorphic signature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107: 1-18.
- Colman-Sadd, S., 1978- Fold development in Zagros simply folded belt, Southwest Iran. *American Association Petroleum Geologists Bulletin* 62: 984–1003.
- Dawers, N. H., Anders, M. H. & Scholz, C. H., 1993- Growth of normal faults: displacement–length scaling. *Geology* 21: 1107–1110.
- Delcaillau, B., Carozza, J. M. & Laville, E., 2006- Recent fold growth and drainage development: the Janauri and Chandigarh Anticlines in the Siwalik Foothills, Northwest India. *Geomorphology* 76: 241256-.
- Elliott, D., 1976- The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets, *Philosophical Transaction, Royal Society of London* 283: 289–312.
- Gavillot, Y., Axen, G. J., Stockli, D. F., Horton, B. K. & Fakhari, M. D., 2010- Timing of thrust activity in the High Zagros fold-thrust belt, Iran, from (U–Th)/He thermochronometry. *Tectonics* 29: (TC4025).
- Grasemann, B. & Schmalholz, S., 2012- Lateral fold growth and fold linkage. *Geology* 40: 1039-1042.
- Hack, J. T., 1973- Stream profiles analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the United State Geological Survey* 1: 421–429.
- Hessami, K., Koyi, H. A., Talbot, C. J., Tabasi, H. & Shabanian, E., 2001- Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains. *Journal of the Geological Society* 158: 969–981.
- Hessami, K., Nilforoushan, F. & Talbot, C. J., 2006- Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements. *Journal of the Geological Society* 163 : 143–148.
- Hudec, M. R. & Jackson, M. P. A., 2007- Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth Science Review* 82: 1–28.
- Jahani, S., Callot, J. P., Frizon de Lamotte, V., Letouzey, J. & Leturmy, P., 2007- The salt diapirs of the eastern Fars province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present. In: Lacombe, O., Lavé, J., F., M., Roure & Verges, J., *Thrust Belt and Foreland Basin: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*: 287–306 (Springer, Berlin).
- Jahani, S., Callot, J. P., Letouzey, J. & Frizon de Lamotte, D., 2009- The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *Tectonics* 28: TC6004.
- Keller, E. A., Gurrola, L. & Tierney, T. E., 1999- Geomorphic criteria to determine direction of lateral propagation of reverse faulting and folding. *Geology* 27: 515518-.
- Khadivi, S., Mouthereau, F., Larrasoana, J. C., Vergés, J., Lacombe, O., Khademi, E., Beamud, E., Melinte-Dobrinescu, M. & Suc, J.-P., 2010- Magnetochronology of synorogenic Miocene foreland sediments in the Fars arc of the Zagros Folded Belt (SW Iran). *Basin Research* 22: 918–932.
- Letouzey, J., B. Colletta, R., Vially, J. & Chermette, C., 1995- Evolution of salt-related structures in compressional settings. In: M. P. A. Jackson, D. G. Roberts, & Snelson, S., *Salt tectonics: a global perspective*: AAPG Memoir 65:41-60.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J.-C., Frizon de Lamotte, D. & Eshraghi, S. A., 2005- The structure and kinematics of the south-eastern Zagros fold-thrust belt; Iran: from thin-skinned to thick-skinned tectonics. *Tectonics* 24: TC3007.
- Mouthereau, F., Lacombe, O. & Meyer, B., 2006- The Zagros Folded Belt (Fars, Iran): constraints from topography and critical wedge modeling. *Geophysical Journal International* 165: 336–356.
- Mouthereau, F., Lacombe, O., Tensi, J., Bellahsen, N., Kargar, S. & Amrouch, K., 2007- Mechanical constraints on the development of the Zagros Folded Belt (Fars). In: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F. & Vergés, J., *Thrust belts and foreland basins: from fold kinematics to hydrocarbon systems*: 245–264 (Springer-Berlin).
- Nilsen, K. T., Vendeville, B. C. & Johansen, J. T., 1995- Influence of regional tectonics on halokinesis in the Nordkapp Basin, Barents Sea. In: Jackson, M. P. A., Roberts, D. G. & Snelson, S., *Salt Tectonics: A Global Perspective*. AAPG Memoir 65: 413–436.

- Oveisi, B., Lave', J. & Van Der Beek, P., 2007- Rates and processes of active folding evidenced by Pleistocene terraces at the central Zagros front (Iran) . In: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F. & Vergés, J., Thrust belts and foreland basins: from fold kinematics to hydrocarbon systems: 245–264 (Springer-Berlin).
- Oveisi, B., Lavé, J., Van der Beek, P., Carcaillet, J., Benedetti, L. & Aubourg, C., 2009- Thick- and thin-skinned deformation rates in the central Zagros simple folded zone (Iran) indicated by displacement of geomorphic surfaces. *Geophysical Journal International* 176: 627–654.
- Peacock, D. C. P., 1991- Displacement and segment linkage in strike-slip fault zones. *Journal of Structural Geology* 13: 1025–1035.
- Peacock, D. C. P. & Sanderson, D. J., 1991- Displacement and segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journal of Structural Geology* 13: 721–733.
- Ramsey, L. A., Walker, R. T. & Jackson, J., 2008- Fold evolution and drainage development in the Zagros Mountains of Fars Province, SE Iran. *Basin Research* 20: 23–48.
- Ramsey, L. A., Walker, R. T. & Jackson, J., 2007- Geomorphic constraints on the active tectonics of southern Taiwan. *Basin Research* 16: 16–32.
- Seong, Y. B., Kang, H. C., Ree, J. H., Choi, H. J., Lai, Z., Long, H. & Yoon, H. O., 2011- Geomorphic constraints on active mountain growth by the lateral propagation of fault-related folding: A case study on Yumu Shan, NE Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 184–194.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J. W., 2004- Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology* 21: 829–843.
- Sherkati, S. & Letouzey, J., 2004- Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and Petroleum Geology* 21: 535–554.
- Stein, R. S. & Yeats, R. S., 1989- Hidden earthquakes. *Scientific American* 260: 48–57.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran; a review. *American Association Petroleum Geologists Bulletin* 52: 1229–1258.
- Talbot, C. J. & Alavi, M., 1996- The past of a future syntaxis across the Zagros, in Alsop. In: Alsop, G.I., Blundell, D.J. & Davison, I., Salt Tectonics. Geological Society, London, Special Publications 100: 89–109.
- Trocmé, V., Albouy, E., Callot, J. P., Letouzey, J., Rolland, N., Goodarzi, H. & Jahani, S., 2011- 3D structural modelling of the southern Zagros fold-and-thrust belt diapiric province. *Geological Magazine* 148: 879–900.
- Vendeville, B. C. & Nilsen, K. T., 1995- Episodic growth of salt diapirs driven by horizontal shortening. In: Travis, C.J., Harrison, H., Hudec, M.R., Vendeville, B.C., Peel, F.J. & Perkins, B.F., Salt, Sediment and Hydrocarbons. Gulf Coast Section Society of Exploration Paleontologists and Mineralogists Foundation 16th Annual Research Conference: 285–295.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chéry, J., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International* 157: 381–398.
- Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chery, J. & Masson, F., 2006- Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran). *Geophysical Journal International* 167: 1077–1088.
- Yamato, P., Kaus, B. J. P., Mouthereau, F. & Castelltort, S., 2011- Dynamic constraints on the crustal-scale rheology of the Zagros fold belt, Iran. *Geology* 39: 815–818.

Geomorphic Assessment of Lateral Growth of Active Folds in the Fars Arc, Zagros Fold-Thrust Belt, Iran (Case Study: Herang and Kuh-e-Namaki Anticlines)

A. Faghih^{1*}, A. Jamshidi² & A. Nohegar³

¹ Assistant Professor, Faculty of Science, Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

² M. Sc. Student, Faculty of Science, Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

³ Assistant Professor, Department of Range Land and Watershed Management, Hormozgan University, Bandarabbas, Iran

Received: 2013 June 16

Accepted: 2014 June 03

Abstract

The existence of lateral propagation of folds above blind reverse faults is an important hypothesis and is generally accepted. In this research, the growth pattern of active folds (e.g., Herang and Kuh-e-Namaki anticlines) in the Fars Arc located in the Zagros Fold-Thrust Belt is investigated from tectonic geomorphology point of view. The main goal of this research is to use geomorphometric indices such as drainage pattern, drainage density, drainage basin asymmetry factor and stream length-gradient to determine direction of lateral fold growth with a special focus on the process of linkage of several different fold segments. Geomorphological studies show that some folds in the Zagros did not develop from a single embryonic fold but by lateral linkage of several different fold segments. The linkage type (linear or en-echelon linkage) of different fold segments depends on the alignment of the initial embryonic folds. Investigation of geomorphometric indices in the study area shows that the Herang anticline resulted from lateral growth and en-echelon linkage of three embryonic folds while the Kuh-e-Namaki anticline resulted from linear growth of a single embryonic fold and cannot be considered as a result of linkage of several different segments.

Keywords: Active Fold, Fold Growth, Geomorphometric Indices, Zagros Fold-Thrust Belt.

For Persian Version see pages 133 to 142

*Corresponding author: A. Faghih; E-mail: afaghih@shirazu.ac.ir