

مدل‌سازی الگوی تداخلی چین‌ها در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان با استفاده از نرم‌افزار متلب

محمد رضا شیخ‌الاسلامی^(*)

۱. دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

چکیده

مدل‌سازی ساختارهای زمین‌شناسی نقش مهمی در شناخت هندسه ساختارها و نیز درک روابط ساختارها با یکدیگر دارد. در سال‌های اخیر مدل‌سازی رقومی با استفاده از رایانه مورد اقبال و توجه مهندسان و پژوهشگران علوم پایه قرار گرفته است. "متلب" یکی از نرم‌افزارهایی است که با امکانات گسترده خود برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی در علوم مختلف از جمله زمین‌شناسی ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوشتار مدل‌های ممکن از الگوهای تداخلی سه نسل چین‌خوردگی در سنگ‌های دگرگون ناحیه گلپایگان با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب بازسازی شده‌اند. داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی الگوهای تداخلی شامل وضعیت محور چین میانگین و صفحه‌های محوری میانگین مربوط به سه نسل پیاپی از چین‌خوردگی در سنگ‌های دگرگون هستند و بر پایه اندازه‌گیری‌های صحرایی به دست آمده‌اند. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد، چین‌های نسل اول و دوم تا حدودی هم‌محور ولی چین‌های نسل سوم دارای روند محوری متفاوت با دو نسل چین‌خوردگی پیش از خود هستند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد شکل‌گیری چهار حالت کلاسیک از الگوی تداخلی چین‌ها در برش‌های افقی (دید نقشه‌ای) و عمودی سنگ‌های دگرگون گلپایگان امکان‌پذیر است. الگوهای تداخلی به دست آمده توسط این مدل‌سازی همخوانی نزدیکی با الگوهای تداخلی واقعی مشاهده شده در مقیاس رخنمون و مقیاس ناحیه‌ای دارند. با استفاده از مدل‌سازی صورت گرفته می‌توان تعیین کرد، الگوهای تداخلی متفاوت چین‌ها در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان مربوط به فرانهادگی کدام نسل‌های چین‌خوردگی هستند.

واژه‌های کلیدی: الگوی تداخلی، چین، گلپایگان، مدل‌سازی، نرم‌افزار متلب.

مقدمه

گرفته‌اند (Moosavi et al., 2014; Sheikholeslami et al., 2019). فرآیندهای دگرگونی دینامیکی و نفوذ توده‌های آذرین باعث تبلور کانی‌های مشخصی شده که نشان‌دهنده سه مرحله دگرگونی پیش‌رونده، پس‌رونده و مجاورتی هستند (Rachidnejad et al., 2002). تغییر شرایط زمین‌ساختی در زمان‌های مختلف در این ناحیه باعث ایجاد مرحله‌های دگرریختی متفاوتی شده‌اند که هر

سنگ‌های مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان بخشی از واحدهای دگرگون ایران مرکزی هستند که در لبه جنوبی آن در کنار پهنه سندانج-سیرجان واقع شده‌اند (شیخ‌الاسلامی و زمانی پدram، ۱۳۸۴). بررسی ویژگی‌های دگرگونی و ساختاری در این ناحیه نشان می‌دهد، سنگ‌های این مجموعه تحت اثر چندین مرحله دگرگونی و دگرریختی قرار

* نویسنده مرتبط: rezasheikholeslami@yahoo.com

روش مطالعه

در این مقاله بر پایه اندازه گیری محور و سطوح محوری چین ها در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان، هندسه چین ها تفکیک و به صورت استریوگرام های سه نسل چین خوردگی، با استفاده از نرم افزارهای استریونت و تکتونیک اف پی رسم شده اند. پس از تعیین محور و صفحه های محوری میانگین مربوط به هر یک از سه نسل چین خوردگی، الگوهای تداخلی ممکن، حاصل فرانهادگی نسل های مختلف چین خوردگی توسط نرم افزار متلب بازسازی شده اند. در مرحله بعد انطباق مدل های به دست آمده با الگوهای تداخلی واقعی چین ها در مقیاس رخنمون و در مقیاس ناحیه ای بررسی شده است.

معرفی مرحله های دگرریختی در مجموعه دگرگون گلپایگان

بررسی عناصر ساختاری شامل برگوارگی، خطوارگی و چین خوردگی ها در واحدهای مختلف دگرگونی و نیز زمان نسبی شکل گیری آن ها نشان می دهد که دست کم سه مرحله ی اصلی دگرریختی شکل پذیر این سنگ ها را تحت تاثیر قرار داده اند (Sheikholeslami et al., 2019). ایجاد دگرریختی ناحیه ای در این سنگ ها در ابتدا باعث شکل گیری چین ها و برگوارگی های اولیه در مجموعه های سنگی مختلف شده که طی مراحل بعدی هندسه آنها تغییر کرده است. طی مرحله اول دگرریختی شکل پذیر (D1)، سنگ های رسوبی و آذرین موجود در ناحیه دچار تغییرات ساختاری و بافتی شده اند. در این مرحله چین های نسل اول، برگوارگی نسل اول، خطواره ها و بودین های نسل اول شکل گرفته اند.

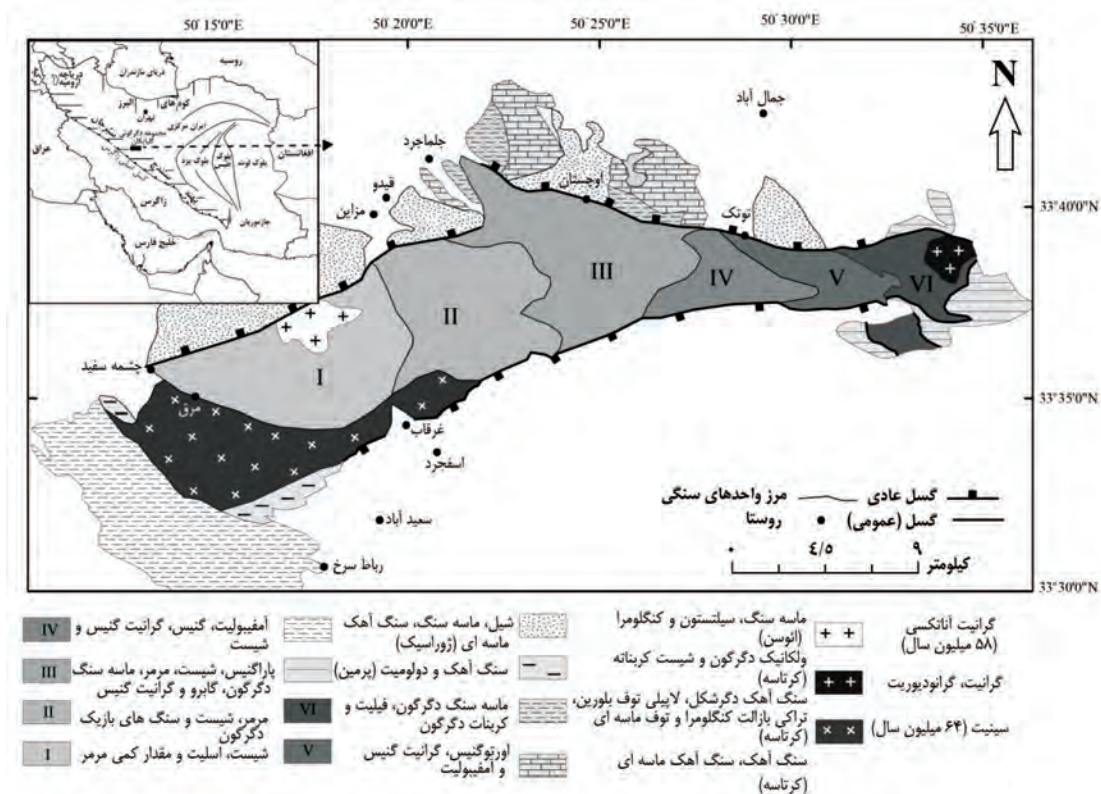
مرحله ی دوم دگرریختی در ادامه شرایط دگرریختی شکل پذیر روی داده و حاصل آن ایجاد ساختارهای میلونیتی در مقیاس گسترده است (Moosavi et al., 2014). چین های نسل دوم، برگوارگی میلونیتی و خطواره کشیدگی کانی در این مرحله از دگرریختی ایجاد شده اند. در اثر برش و جابجایی ایجاد

کدام با ساختارهای خاص خود قابل شناسایی هستند. بررسی مراحل دگرریختی بر پایه مطالعات ساختاری و ریزساختاری نشان می دهد، سنگ های موجود در این ناحیه تحت اثر پنج مرحله دگرریختی قرار گرفته اند. سه مرحله اول دگرریختی در شرایط دگرریختی شکل پذیر، مرحله چهارم دگرریختی در شرایط شکل پذیر-شکننده^۲ و آخرین مرحله دگرریختی در شرایط شکننده^۳ روی داده است (Moritz et al., 2006; Sheikholeslami et al., 2019). چین خوردگی ها از ساختارهایی هستند که طی سه نسل متوالی در جریان دگرریختی شکل پذیر پیش رونده به وجود آمده اند. در این پژوهش چین های شکل گرفته طی این سه نسل متوالی معرفی و الگوی تداخلی آن ها بازسازی شده اند. مدل سازی الگوهای تداخلی چین ها بر پایه کد نوشته شده در نرم افزار متلب توسط M.P.J Schöpfer (www.fault-analysis-group.ucd.ie) صورت گرفته است. در نهایت الگوهای به دست آمده توسط مدل سازی با الگوهای تداخلی واقعی مشاهده شده در صحرا مقایسه شده اند.

جایگاه زمین ساختی و زمین شناسی ناحیه ای

مجموعه دگرگونی گلپایگان در حاشیه جنوب غربی پهنه ایران مرکزی واقع شده است (شکل ۱). راندگی اصلی زاگرس این ناحیه را از کوه های زاگرس جدا می کند. مجموعه دگرگونی گلپایگان شامل بخش شرقی در شمال موته و بخش غربی، در شمال گلپایگان است (رضایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۶، Rachidnejad-Omran et al., 2002; Moosavi et al., 2014). این مجموعه دگرگونی از سنگ های مختلفی شامل شیست، مرمر، اسلیت، گنیس و آمفیبولیت به سن پرکامبرین تا کامبرین تشکیل شده است. سنگ های دگرگون در این مجموعه توسط سنگ های کربناته پرمین، رسوبات تخریبی ژوراسیک، سنگ های کربناته کرتاسه و رسوبات تخریبی ائوسن پوشیده شده اند. پهنه های برشی کششی و نیز گسل های جدایشی^۴ سنگ های دگرگون را از سنگ های دگرگون نشده و نیز سنگ نهشته های پرکننده حوضه های رسوبی جدا کرده اند (Moritz et al., 2006) (شکل ۱).

1. Ductile
2. Ductile-Brittle
3. Brittle
4. Detachment faults



شکل ۱. نقشه زمین شناسی ساده از مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان و جایگاه زمین ساختی آن در میان پهنه‌های ساختاری ایران (Sheikhholeslami et al., 2019).

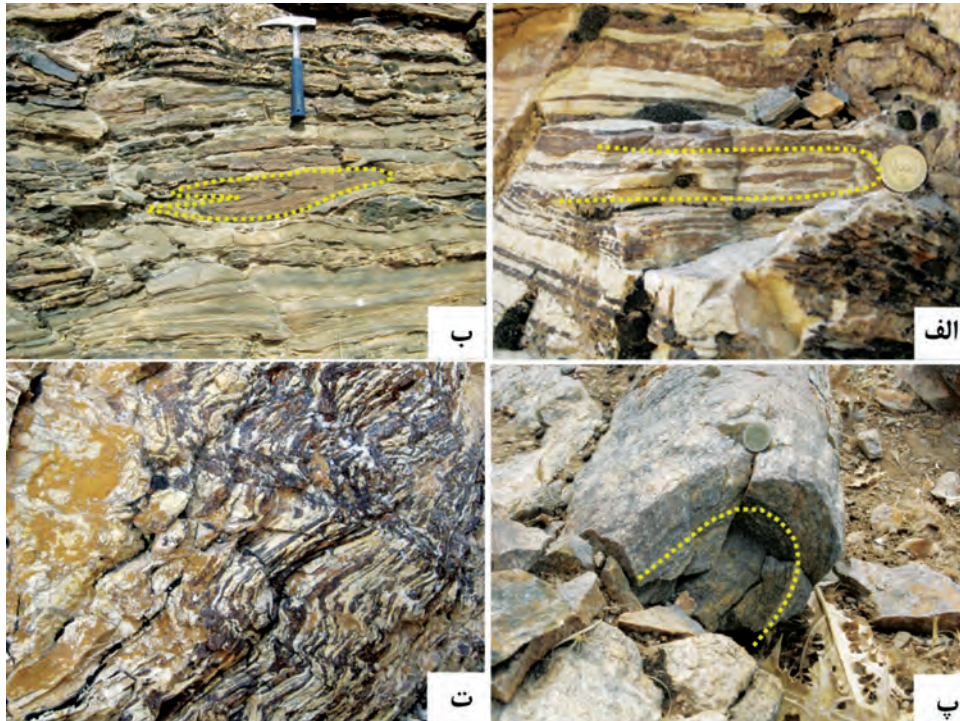
ایجاد فشردگی و کشیدگی در جریان اعمال دگرریختی‌های بعدی، یال‌های این دسته چین‌ها کشیده شده و ضخامت آنها در بخش لولا افزایش یافته است. در نتیجه این فرآیند، بیشتر این چین‌ها به حالت چین‌های مشابه^۲ و بدون ریشه درآمده‌اند (شکل ۲-ب). از ویژگی‌های شناسایی این چین‌ها در صحرا همراه نبودن آنها با ریزچین‌ها و یا چین‌های پارازیتی است. این دسته از چین‌ها در انواع سنگ‌ها و در مقیاس رخنمون دیده می‌شوند، ولی تمرکز آنها در مرمر و کالک شیست‌های منطقه بیشتر و در گنیس، شیست، اسلیت و کوارتزیت کمتر است. استریوگرام‌های شکل‌های ۳-الف و ب نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده محور و صفحه محوری چین‌های F1 در واحدهای دگرگونی مختلف می‌باشد. محور میانگین این دسته از چین‌ها دارای وضعیت ۱۴۶/۰۲ (میل/روند) و صفحه محوری میانگین ۰۹۲/۱۷ (شیب/جهت شیب) می‌باشد.

1. Isoclinal
2. Similar folds

شده طی این مرحله از دگرریختی، چین‌ها و بودین‌های شکل گرفته در مرحله اول و دوم به ترتیب به چین‌های جدا شده و بی‌ریشه و بودین‌های کشیده و نامتقارن تبدیل شده‌اند. مرحله سوم دگرریختی به نسبت مرحله‌های قبل، شدت کمتری داشته و در شرایط دگرگونی پایین‌تری روی داده است. با این حال دگرریختی هنوز در شرایط شکل‌پذیر بوده است. با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی هر کدام از واحدهای دگرگونی، ساختارهای مربوط به این مرحله در تمامی واحدها به صورت یکسان گسترش نداشته و در برخی واحدها گسترش کمتری دارد. این مرحله دگرریختی باعث ایجاد چین‌ها، برگوارگی‌ها و خطوارگی‌های نسل سوم شده است.

هندسه چین‌ها

چین‌های نسل اول (F1): چین‌های نسل اول بیشتر به صورت چین‌های هم‌شیب^۱ دیده می‌شوند (شکل ۲-الف). یال‌های این چین‌ها موازی با برگوارگی اولیه (S1) بوده و تنها در بخش لولای چین با این برگوارگی زاویه می‌سازند. به دلیل



شکل ۲. نمونه‌هایی از چین‌های ایجاد شده در مرحله‌های مختلف دگرریختی، الف) چین نسل اول (F1) از نوع موازی با برگوارگی در توالی مرمر و کالک شیست، جنوب جلملجرد، ب) چین نسل اول بدون ریشه در مرمرهای جنوب شرقی مزاین که در اثر جابجایی و ایجاد برش شکل گرفته است، پ) چین نسل دوم با صفحه محوری پرشیب در گنیس‌های جنوب توتک، ت) چین نسل سوم از نوع ریزچین در شیست‌های جنوب غربی مزاین

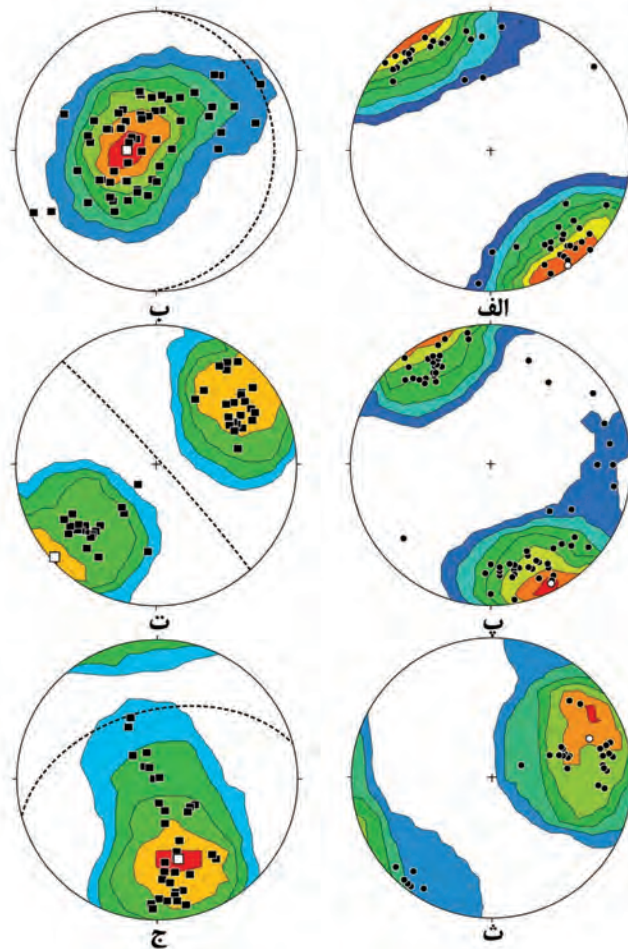
سوم دگرریختی ایجاد شده‌اند، بیشتر از نوع ریزچین^۱ و چین‌های میان مقیاس هستند. صفحه محوری آن‌ها با برگوارگی اولیه زاویه بزرگی می‌سازد (شکل ۲-ت). به دلایل سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی، حضور این چین‌ها در انواع شیست‌ها، به‌ویژه میکاشیست‌های ناحیه بیشتر است. ریزچین‌ها به دو گونه گسترش یافته‌اند. دسته‌ای از آن‌ها توسط برگوارگی ریزچین قطع شده و دسته‌ی دیگر شامل ریزچین‌های متشکل از لایه‌های غنی از کانی‌های مافیک و لایه‌های کوارتزفلدسپاتیک، بدون حضور برگوارگی ریزچین هستند. استریوگرام‌های شکل‌های ۳-ث و ج نشان‌دهنده‌ی وضعیت محور و صفحه‌های محوری این دسته از چین‌هاست. محور میانگین این چین‌ها دارای وضعیت ۰۶۸/۲۶ (میل/اروند) و صفحه محوری میانگین ۳۴۵/۴۹ (شیب/جهت شیب) می‌باشد.

چین‌های نسل دوم (F2): چین‌های نسل دوم بیشتر از نوع چین‌های ایستاده افقی تا مایل هستند و از مشخصه‌های شناسایی آن‌ها همراهی با چین‌های پارازیتی S، Z و M شکل است. این چین‌ها هم به‌صورت موازی و هم به‌صورت مشابه دیده می‌شوند. گسترش این چین‌ها در مرمر، کالک شیست و گنیس به نسبت واحدهای سنگی دیگر بیشتر است (شکل ۲-پ). این چین‌ها بیشتر در مقیاس رخنمون هستند اما انواع ناحیه‌ای آن‌ها نیز توسط موسوی و محجل (۱۳۹۳) گزارش شده‌اند.

استریوگرام‌های شکل ۳-پ و ت نشان‌دهنده وضعیت محور و صفحه‌های محوری این چین‌ها در واحدهای دگرگونی مختلف می‌باشند. محور میانگین این دسته از چین‌ها دارای وضعیت ۱۵۳/۰۶ (میل/اروند) و صفحه محوری میانگین ۰۴۸/۸۷ (شیب/جهت شیب) می‌باشد.

چین‌های نسل سوم (F3): این چین‌ها که طی مرحله

1. Crenulation



شکل ۳. استریوگرام‌های نمایش دهنده‌ی محور و صفحه‌های محوری اندازه‌گیری شده چین‌های نسل‌های مختلف در مجموعه دگرگونی شمال گلیپایگان، الف) استریوگرام محور چین‌های نسل اول (F1)، ب) استریوگرام صفحه محوری چین‌های نسل اول، پ) استریوگرام محور چین‌های نسل دوم (F2)، ت) استریوگرام صفحه محوری چین‌های نسل دوم، ث) استریوگرام محور چین‌های نسل سوم (F3)، ج) استریوگرام صفحه محوری چین‌های نسل سوم، (محور چین با دایره سیاه، قطب صفحه محوری چین با مربع سیاه، محور چین میانگین با دایره سفید، قطب صفحه محوری میانگین با مربع سفید و صفحه محوری میانگین با خط چین نمایش داده شده‌اند. استریوگرام‌ها بر پایه اندازه‌گیری مستقیم عناصر ساختاری در صحرا و داده‌های ساختاری ارائه شده توسط Moosavi et al., 2014 رسم شده‌اند)

چین‌های فرانهاده و الگوهای تداخلی چین‌ها

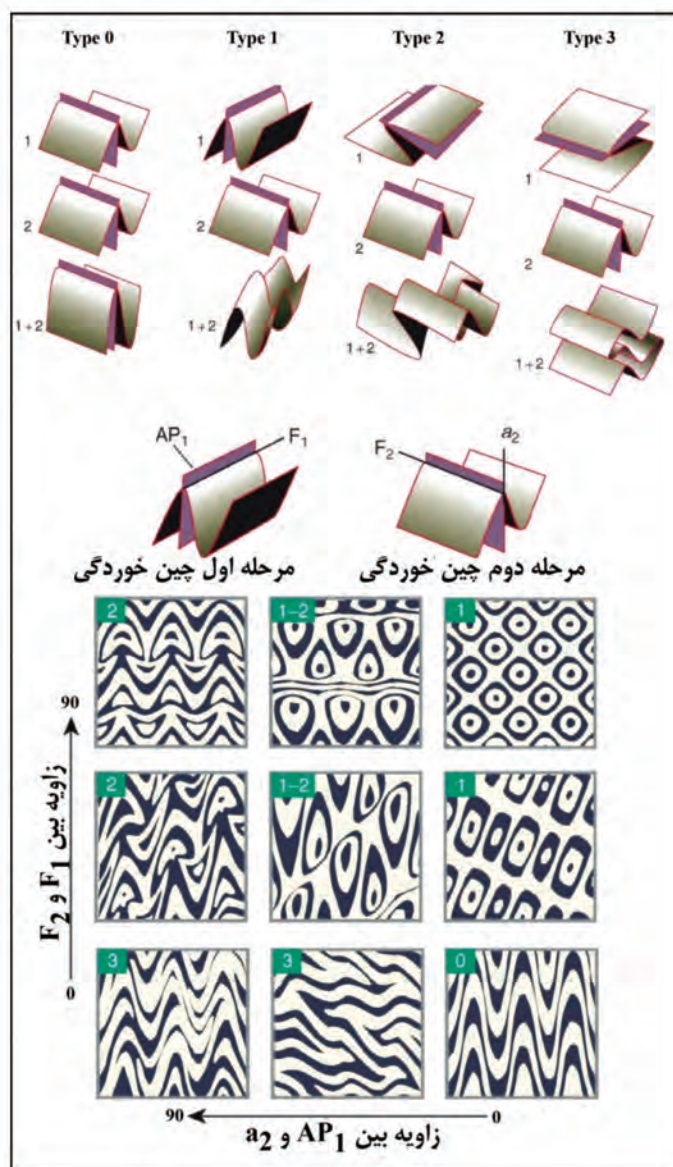
صورت ناهم‌محور خوانده می‌شوند. فرآیند چین خوردگی مجدد را بازچین خوردگی^۲ و الگوهای ناشی از بازچین خوردگی را الگوهای تداخلی چین^۳ می‌نامند. نوع الگوی تداخلی اطلاعاتی را در مورد جهت‌گیری و روابط زاویه‌ای دو نسل از چین ارائه می‌کند. بر پایه جهت‌گیری محور صفحات محوری چین‌های فرانهاده، چهار الگوی مشخص مطابق

در مناطقی که رویدادهای متعدد دگرریختی اثر کرده‌اند، افزون بر چین‌های اولیه، ساختارهای پیچیده‌تری به نام چین‌های فرانهاده^۱ شکل می‌گیرند. این ساختارها حاصل تکرار فرآیند چین خوردگی هستند. چین فرانهاده چینی است که محور یا صفحه محوری آن توسط یک چین جوان‌تر چین خورده باشد. چنانچه چین‌های فرانهاده دارای محورهای موازی با یکدیگر باشند، هم‌محور و در غیر این

1. Superimposed folds
2. Refolding
3. Fold interference patterns

تداخلی دو بعدی چین هایی که طی دو نسل متفاوت به وجود آمده اند، بر پایه زاویه بین محور چین نسل اول و دوم (F_1, F_2) و زاویه بین صفحه محوری چین اول (AP_1) و محور چین دوم (a_2) قابل نمایش است (شکل ۴).

شکل ۴ توسط Ramsay and Hubber (1987) معرفی شده است. الگوی شماره صفر به نام فرانهادگی افزونه، الگوی شماره یک به نام الگوی گنبد و حوضه، الگوی شماره دو به نام الگوی گنبد-هلال-قارچی^۲ و الگوی شماره سه به نام الگوی همگرا-واگرا^۳ شناخته می شوند. الگوی



شکل ۴. چهار دسته الگوی تداخلی چین خوردگی سه بعدی (بالا) و الگوهای تداخلی دو بعدی حاصل در صفحه افقی (پایین) (برگرفته از Ramsay and Hubber, 1987)

1. Redundant superposition
2. Dome and basin
3. Dome-crescent-mushroom
4. Convergent-divergent pattern

مدل سازی الگوهای تداخلی چین ها با استفاده از نرم افزار متلب

برای دستیابی به تمامی الگوهای تداخلی ممکن از چین ها در ناحیه مورد مطالعه به شیوه توضیح داده شده، ابتدا الگوی تداخلی چین نسل دوم بر روی چین نسل اول را به دست می آوریم. سپس الگوی تداخلی چین های نسل دوم بر چین نسل سوم و در نهایت الگوی تداخلی چین نسل سوم بر چین نسل اول را رسم می کنیم. از آنجا که نرم افزار، محور چین و صفحه محوری را به صورت صفحه و زاویه ریک می پذیرد، لازم است داده های مربوط به محور چین خوردگی و سطوح محوری نسل های مختلف چین خوردگی را به صورت سه صفحه مجزا با زاویه ریک مشخص به دست آوریم. با توجه به اینکه در استریوگرام های شکل ۳ محورهای میانگین به طور تقریبی بر روی صفحه های محوری مربوط قرار دارند، برای تصحیح از نرم افزار تکتونیک اف بی استفاده کرده و نقطه معرف محور چین میانگین هر نسل چین خوردگی را بر روی دایره بزرگ معرف صفحه محوری میانگین همان نسل منطبق می کنیم. جدول ۱ و شکل ۵ نشان دهنده مقادیر تصحیح شده محور (روند/میل و زاویه ریک) و صفحه های محوری (شیب و جهت شیب) میانگین مربوط به سه نسل چین خوردگی در ناحیه مورد مطالعه برای ورود به نرم افزار هستند.

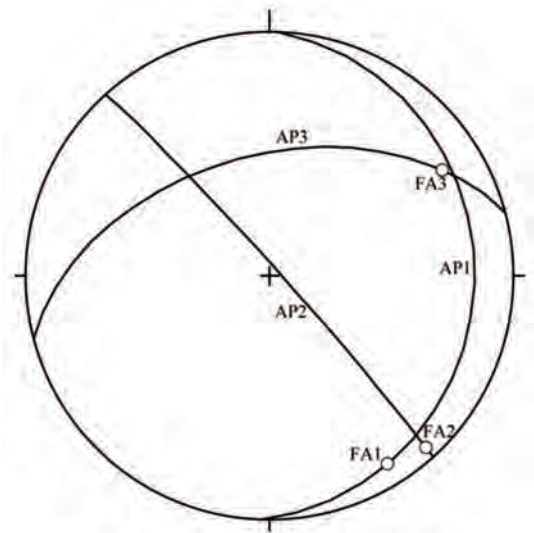
با وارد کردن اطلاعات جدول ۱ در نرم افزار متلب، حالت های مختلف الگوهای تداخلی چین های نسل های مختلف رسم می شوند. با مقایسه الگوهای رایانه ای به دست آمده و الگوهای تداخلی مشاهده شده در صحرا می توان فرانهادگی نسل های مختلف چین خوردگی را ارزیابی کرد.

با توجه به حضور نسل های مختلف چین خوردگی در مجموعه دگرگون شمال گلپایگان، الگوهای تداخلی متعددی از چین خوردگی ها حین برداشت های صحرایی شناسایی شده اند. به منظور تعیین الگوهای تداخلی امکان پذیر در ناحیه و انطباق آنها با الگوی تداخلی مشاهده شده از چین ها در مقیاس های رخنمون و تصویرهای ماهواره ای، از کد نگارش شده در نرم افزار متلب توسط M.P.J Schöpfer (www.fault-analysis-group.ucd.ie) استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که با بارگذاری و اجرای این کد در نرم افزار متلب، وضعیت محور و صفحه های محوری دو چین مشخص توسط نرم افزار خواسته می شود. این اطلاعات به صورت دایره بزرگ و زاویه ریک توسط کاربر وارد می شود. نرم افزار ابتدا استریونت مربوط به داده ها را نمایش می دهد. پس از تایید کاربر، الگوی تداخلی دو بعدی از این چین ها به صورت رنگی یا سیاه و سفید رسم می شود. الگوی تداخلی حاصل به صورت شش وجه یک مکعب مربع باز شده به نمایش در می آید که دو وجه آن دید نقشه ای و چهار وجه دیگر دید عمودی هستند. لازم به ذکر است اطلاعاتی در خصوص پارامترهای چین خوردگی نیز برای نرم افزار قابل تعریف است و برای سهولت کار می توان از پیش فرض تعیین شده در کد استفاده کرد. خروجی پس از چاپ و برش به صورت الگوی سه بعدی نیز قابل استفاده خواهد بود.

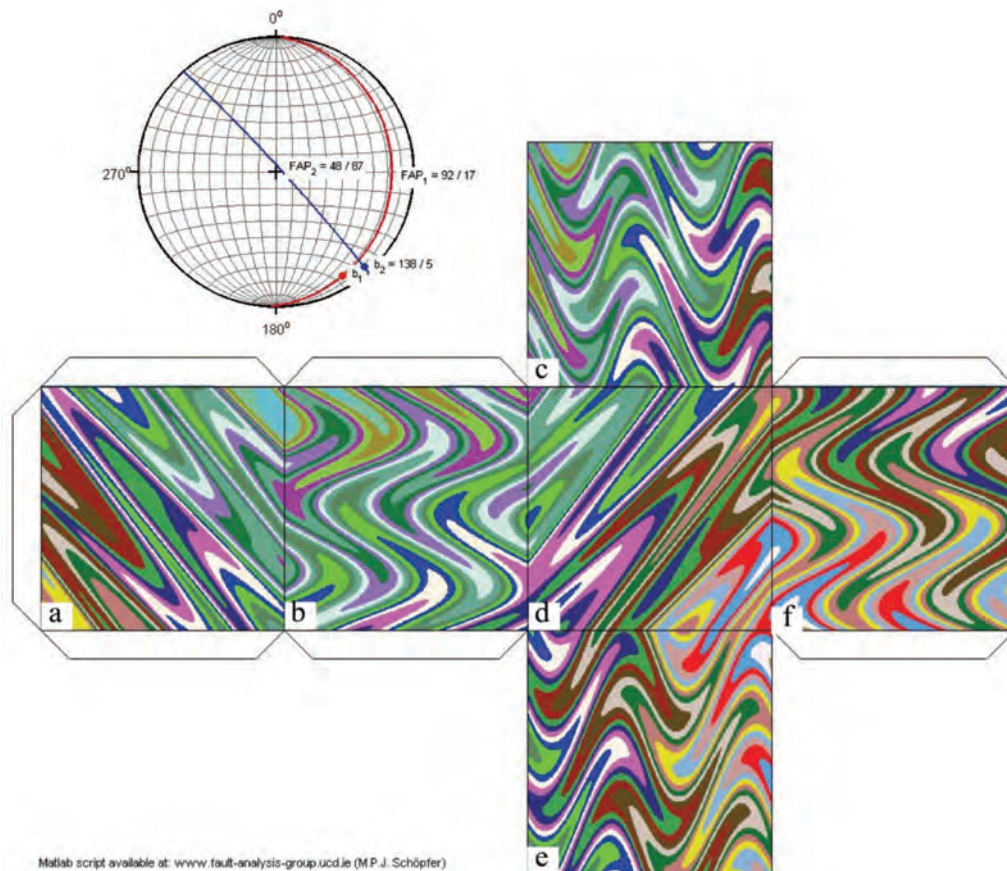
جدول ۱. مختصات محور و صفحه های محوری میانگین سه نسل چین خوردگی پس از تصحیح توسط نرم افزار تکتونیک اف بی، قطب صفحه محوری میانگین و محور a2 نیز توسط نرم افزار استریونت (Allmendinger et al., 2012; Cardozo and Allmendinger, 2013) محاسبه شده است.

نسل چین	صفحه محوری میانگین (شیب/جهت شیب)	قطب صفحه محوری میانگین (میل/روند)	محور میانگین (b2) (میل/روند)	محور a2 (میل/روند)	زاویه ریک محور روی صفحه محوری میانگین
F1	۹۲/۱۷	۲۷۲/۷۳	۱۴۸/۱۰	۲۴۵/۳۴	۳۵
F2	۴۸/۸۷	۲۲۲/۳	۱۳۸/۵	۲۶۴/۸۲	۵
F3	۳۴۵/۴۹	۱۶۵/۴۱	۵۹/۱۹	۲۳۹/۷۱	۲۴

الگوی تداخلی چین نسل دوم بر چین نسل اول: چین نسل دوم دارای میانگین سطح محوری با شیب ۸۷ درجه در جهت آزیموت ۴۸ درجه و محور با میل پنج درجه در راستای آزیموت ۱۳۸ درجه است و بر روی چین نسل اول با سطح محوری میانگین دارای شیب ۱۷ درجه در راستای آزیموت ۹۲ درجه و محور دارای میل ۱۰ درجه در راستای ۱۴۸ درجه فرا نهاده شده است. الگوی تداخلی این دو نسل توسط نرم افزار متلب به صورت شکل ۶ رسم شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده برای زاویه بین محور میانگین دو نسل چین خوردگی و زاویه بین قطب صفحه محوری میانگین با محور a_2 که به ترتیب ۱۱ و ۹ درجه هستند (شکل ۶ و جدول ۲)، الگوی تداخلی این دو نسل چین خوردگی در محدوده الگوی تداخلی شماره صفر و سه نمودار شکل ۴ قرار می گیرد. در الگوی رایانه ای شکل ۶



شکل ۵. استریوگرام مربوط به محور و صفحه های محوری میانگین سه نسل چین خوردگی (تصحیح شده توسط نرم افزار تکتونیک اف پی) (دایره های بزرگ نشان دهنده صفحه محوری و دایره های کوچک تو خالی نشان دهنده محور چین هستند)



شکل ۶. نمایش استریونت مربوط به صفحه های محوری و محور میانگین چین های نسل اول و دوم و مدل دو بعدی رایانه ای از الگوهای تداخلی ایجاد شده حاصل فرآیند چین نسل دوم بر روی چین نسل اول

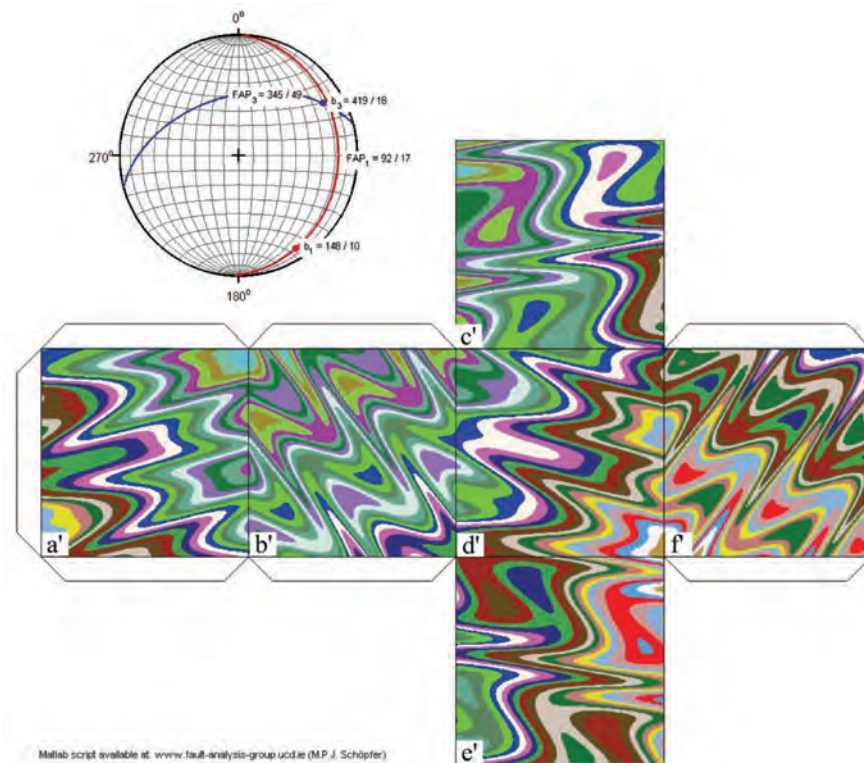
مشابهت بین وجه‌های d و a که معرف دید نقشه‌ای می‌باشند، b ، c ، e و f ، نشان دهنده الگوهای شکل گرفته در صفحات با الگوی تداخلی شماره صفر مشخص است. وجه‌های عمودی، با الگوی تداخلی شماره سه مطابقت دارند.

جدول ۲. مقادیر زاویه‌ای بین محور نسل‌های مختلف چین خوردگی و قطب صفحه محوری میانگین با محور a_2 که برای پیش‌بینی الگوهای تداخلی نمودار شکل ۴ به کار می‌آیند

نسل‌های چین	زاویه بین محور میانگین دو نسل چین	زاویه بین قطب صفحه محوری میانگین با محور a_2
F2-F1	11°	9°
F3-F1	86°	10°
F3-F2	78°	69°

میانگین با محور a_2 که به ترتیب برابر 86° و 10° درجه هستند (شکل ۷ و جدول ۲)، الگوی تداخلی این دو نسل چین خوردگی می‌تواند به شکل الگوی تداخلی صفر، یک و دو نمودار شکل ۴ ظاهر شود. در الگوی رایانه‌ای شکل ۷ مشابهت بین وجه‌های d' و a' (دید نقشه‌ای) با الگوی تداخلی شماره صفر و یک-دو مشخص است. همچنین وجه‌های b' و f' با الگوی صفر و دو و وجه‌های c' و e' با الگوی تداخلی شماره صفر و یک-دو مطابقت دارند.

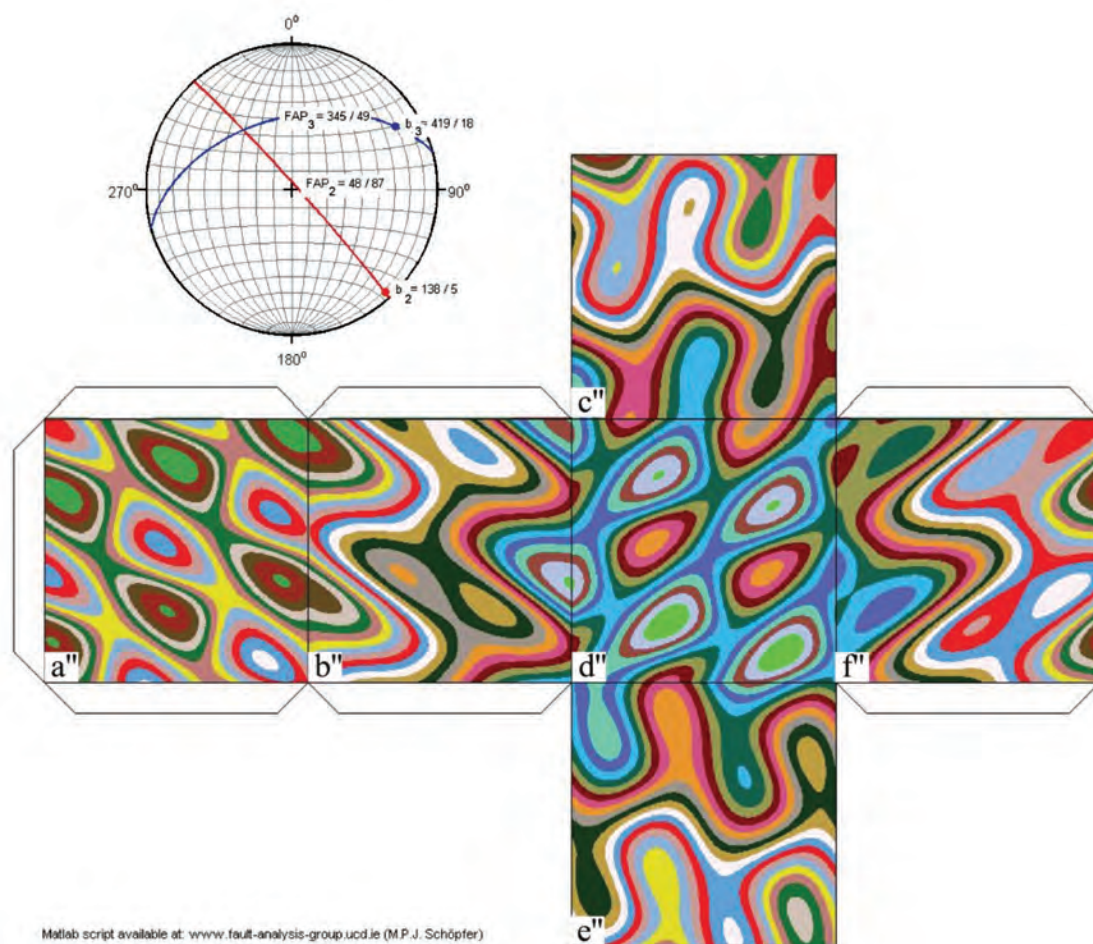
الگوی تداخلی چین نسل سوم بر چین نسل اول: چین نسل سوم دارای سطح محوری میانگین با شیب 49° درجه در جهت آزیموت 345° درجه و محور میانگین با میل 19° درجه در راستای آزیموت 59° درجه است که بر روی چین نسل اول فرا نهاده شده است (جدول ۱). الگوی تداخلی این دو نسل توسط نرم‌افزار متلب به صورت شکل ۷ رسم شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده برای زاویه بین محور دو نسل چین خوردگی و زاویه بین قطب صفحه محوری



شکل ۷. نمایش استریونوت مربوط به صفحه‌های محوری و محور میانگین چین‌های نسل اول و سوم و مدل دو بعدی رایانه‌ای از الگوهای تداخلی ایجاد شده حاصل فرآیند چین نسل سوم بر روی چین نسل اول

الگوی تداخلی این دو نسل چین خوردگی می تواند به شکل الگوی تداخلی شماره های یک و دو در نمودار شکل ۴ ظاهر شود. الگوی رایانه ای رسم شده توسط متلب به گونه مشخصی الگوی غالب گنبد و حوضه را نشان می دهد. این الگو در دید نقشه های (وجه های a'' و d'') نمود کامل تری دارد.

الگوی تداخلی چین نسل سوم بر چین نسل دوم: الگوی تداخلی این دو نسل توسط نرم افزار متلب به صورت شکل ۸ رسم شده است. با توجه به مقادیر زاویه بین محور دو نسل چین خوردگی و زاویه بین قطب صفحه محوری میانگین با محور a_2 که به ترتیب برابر ۷۸ و ۶۹ درجه هستند (جدول ۲)،



شکل ۸. نمایش استریونت مربوط به صفحه های محوری و محور چین های نسل سوم و دوم و مدل دو بعدی رایانه ای به دست آمده حاصل فرانهادگی آنها

بحث

است به دو محدودیت اصلی در بازسازی الگوهای تداخلی چین ها با استفاده از کد مورد استفاده در متلب اشاره کنیم. اولین محدودیت، نبود توانایی نرم افزار در تعیین الگوی تداخلی یک نسل از چین خوردگی بر روی یک الگوی تداخلی از پیش موجود است. دلیل این محدودیت آن است که نرم افزار، الگوهای چین خوردگی را نسل به نسل بازسازی می کند و قادر نخواهد بود الگوی تداخلی

برای بررسی صحت الگوهای تداخلی به دست آمده بر پایه مدل سازی به مقایسه و انطباق آنها با الگوهای تداخلی مشاهده شده صحرائی می پردازیم. مشابهت بین الگوهای مدل سازی شده با الگوهای تداخلی صحرائی تاییدی بر درستی این شیوه در تحلیل چین خوردگی های سنگ های شمال گلپایگان خواهد بود. پیش از این انطباق لازم

F3 بر روی F1 در دید نقشه‌ای (وجه 'd) و دید عمودی (وجه 'c) مطابقت نشان می‌دهند (شکل ۷). در شکل ۹-ث الگوی تداخلی گنبد و حوضه در متاکربنات‌های جنوب قیدو نمایش داده شده که مشابه با الگوی تداخلی رایانه‌ای به دست آمده از فرانهادگی چین F2 بر روی چین F1 در دید نقشه‌ای است (شکل ۸).

انطباق الگوی رایانه‌ای با الگوهای تداخلی صحرائی در مقیاس تصاویر ماهواره‌ای

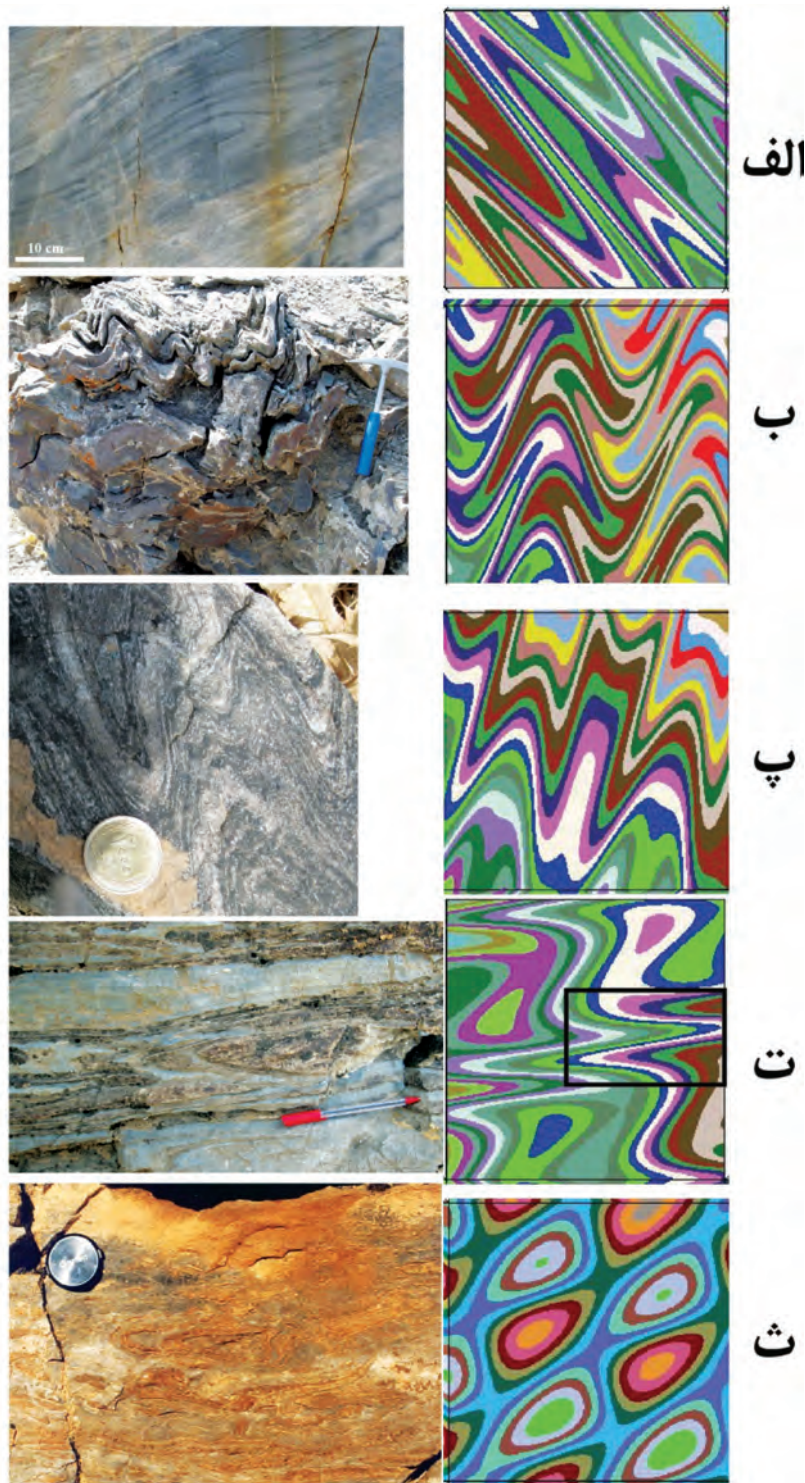
بررسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از Google Earth در ناحیه شمال گلپایگان نشان می‌دهد که الگوهای تداخلی چین‌ها در مقیاس ناحیه‌ای نیز قابل تشخیص هستند. در شکل ۱۰ چند نمونه از الگوهای تداخلی در مقیاس ناحیه‌ای نشان داده شده‌اند. این الگوها بیشتر در توالی مرمرو و شیست در واحدهای سنگی II و III (شکل ۱) قابل شناسایی هستند. شکل ۱۰-الف الگوی تداخلی چین‌خوردگی ناحیه‌ای در مرمروهای جنوب شرق قیدو را نشان می‌دهد. این الگوی تداخلی مطابق با وجه 'd الگوی رایانه‌ای شکل ۸ است و دلالت بر فرانهادگی چین F3 بر چین F2 دارد. الگوی تداخلی چین‌خوردگی ناحیه‌ای شکل ۱۰-ب در واحد شیست و مرمرو جنوب قیدو با وجه 'f الگوی رایانه‌ای شکل ۸ مطابقت دارد و آن هم می‌تواند مربوط به فرانهادگی چین F3 بر روی چین F2 باشد. الگوی تداخلی چین‌خوردگی شکل ۱۰-پ در واحدهای شیست، کالک شیست و مرمرو جنوب قیدو مطابق با وجه 'a الگوی رایانه‌ای شکل ۶ است و ناشی از فرانهادگی چین F2 بر F1 می‌باشد. الگوی تداخلی شکل ۱۰-ت مربوط به سنگ‌های متاکربناته چین‌خورده جنوب اوچستان نیز مطابق با وجه 'c الگوی رایانه‌ای ارائه شده در شکل ۷ و حاصل فرانهادگی چین نسل سوم بر روی چین نسل اول است.

یک نسل را بر روی الگوی تداخلی دو نسل پیش از خود تعیین نماید. در نتیجه بعضی از الگوهای تداخلی مشاهده شده در صحرا با مدل‌های به دست آمده متفاوت خواهند بود. دومین محدودیت، جهت یافتگی صفحاتی هستند که الگوی تداخلی چین‌ها بر روی آن‌ها تظاهر یافته است. در نرم‌افزار، الگوهای تداخلی در دید نقشه‌ای (افقی) و صفحه‌های عمودی به نمایش در می‌آیند، حال آنکه در طبیعت صفحاتی که الگوهای تداخلی بر آنها نمایان است می‌توانند جهت‌های گوناگونی داشته باشند. هرگونه انحراف از برش‌های مرجع می‌تواند تفاوت در شکل الگو را به دنبال داشته باشد.

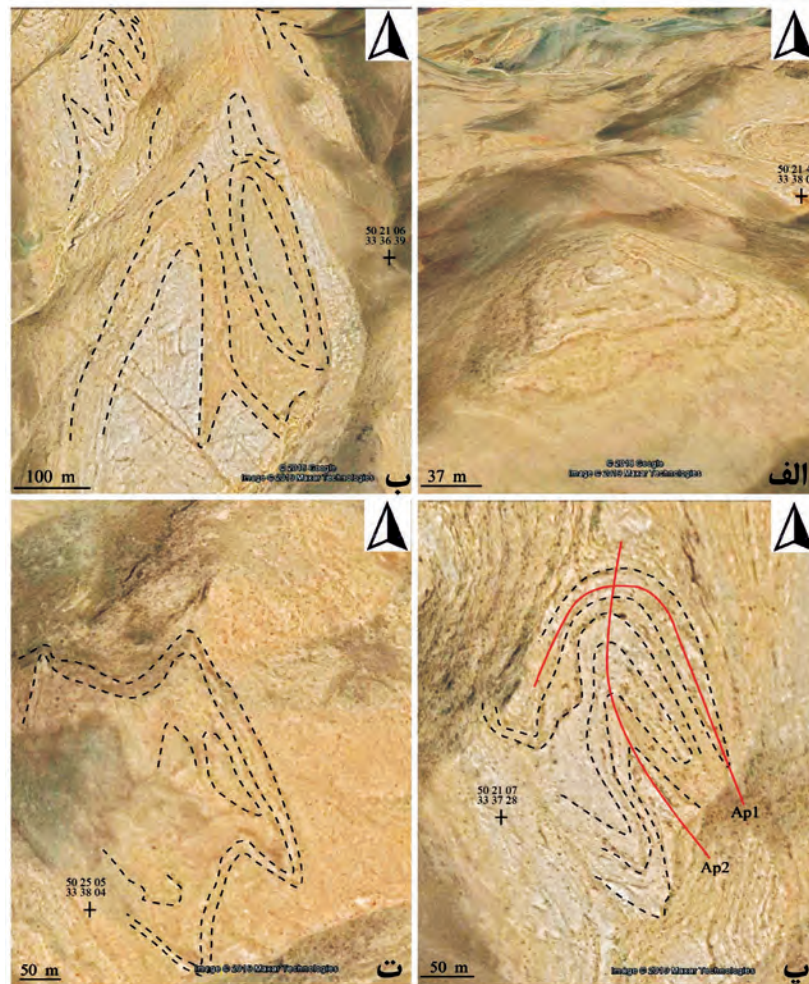
با در نظرگیری این محدودیت‌ها به ارائه شواهد صحرائی از الگوهای تداخلی و انطباق آنها با الگوهای رایانه‌ای به دست آمده می‌پردازیم. الگوهای تداخلی صحرائی در دو مقیاس رخنمون و مقیاس عکس ماهواره‌ای قابل شناسایی هستند.

انطباق الگوی رایانه‌ای با الگوهای تداخلی صحرائی در مقیاس رخنمون

مثال‌هایی از الگوهای تداخلی مشاهده شده در صحرا و انطباق آن‌ها با مدل‌های رایانه‌ای به دست آمده توسط نرم‌افزار متلب در شکل ۹ به نمایش در آمده‌اند. در شکل ۹-الف الگوی تداخلی چین‌خوردگی در مرمروهای جنوب مزاین دیده می‌شود که مشابه با الگوی رایانه‌ای فرانهادگی چین F2 بر روی چین F1، آن‌گونه که در وجه 'a (دید افقی) تظاهر یافته می‌باشد (شکل ۶). شکل ۹-ب نشان‌دهنده الگوی تداخلی مشاهده شده در اسلیت‌های شمال غرب غرقاب است که با الگوی تداخلی رایانه‌ای چین F2 بر روی چین F1 در وجه 'e (دید عمودی) مطابقت دارد. شکل ۹-پ و ت به ترتیب نشان‌دهنده الگوی تداخلی مشاهده شده در گنیس و کالک شیست‌های جنوب اوچستان و جنوب جلماجرد هستند که با الگوی تداخلی رایانه‌ای چین



شکل ۹. مثال‌هایی از انطباق الگوهای تداخلی چین‌ها در مقیاس رخنمون با الگوهای یارانه‌ای به دست آمده توسط نرم‌افزار متلب، الف و ب) الگوهای تداخلی چین‌ها در مرمر و اسلیت جنوب مزاین و شمال غرب غرقاب که با الگوی تداخلی رایانه‌ای چین F2 بر روی F1 در دید افقی و عمودی مطابقت دارد، پ و ت) الگوهای تداخلی چین در گنیس و کالک شیست در جنوب اوچستان و جنوب جلماجرد که با الگوی تداخلی یارانه‌ای چین F3 بر روی چین F1 مشابهت دارند، ث) الگوی تداخلی گنبد و حوضه در متاکرینات‌های جنوب قیدو که مشابه با الگوی رایانه‌ای به دست آمده حاصل فرانهادگی چین F2 روی چین F1 در دید افقی است.



شکل ۱۰. مثالی از الگوهای تداخلی چین‌ها در مقیاس ناحیه‌ای (تصاویر ماهواره‌ای Google Earth)، الف) الگوی تداخلی چین در مرم‌های جنوب شرق قیدو، ب) الگوی تداخلی چین در توالی شیبست و مرم‌های جنوب جلماجر، پ) الگوی تداخلی چین مرم، شیبست و کالک شیبست‌های جنوب قیدو با اثر مشخص صفحه‌های محوری نسل اول و دوم، ت) الگوی تداخلی چین در سنگ‌های متاکربناته جنوب اوچستان

نتیجه‌گیری

واقعی صحرائی، در مقیاس رخنمون و در مقیاس ناحیه‌ای دارند. با وجود محدودیت‌هایی که این مدل‌سازی در انطباق با تمامی الگوهای تداخلی مشاهده شده از چین‌ها در سنگ‌های دگرگون شمال گلپایگان دارد، بهره‌گیری از آن به‌عنوان ابزاری در تحلیل هندسی چین‌خوردگی‌ها، درک رابطه زایشی نسل‌های مختلف چین‌خوردگی و نیز تعیین توالی‌های دگربرختی پیشنهاد می‌شود. این شیوه مدل‌سازی رایانه‌ای قابل استفاده در دیگر مناطق دگرگونی که واجد چین‌خوردگی طی رویدادهای متوالی دگربرختی هستند نیز می‌باشد.

در این نوشتار چگونگی تهیه الگوهای تداخلی رایانه‌ای از نسل‌های مختلف چین‌خوردگی در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان با استفاده از کد نوشته شده توسط M.P.J Schöpfer در نرم‌افزار متلب تشریح و مدل‌های مربوطه رسم شده‌اند. نتیجه این مدل‌سازی نشان می‌دهد که الگوهای تداخلی گوناگونی از چین‌ها در این مجموعه دگرگونی قابل تشکیل هستند. الگوهای تداخلی به دست آمده توسط نرم‌افزار متلب که بر پایه محور میانگین و صفحه محوری میانگین چین‌خوردگی نسل‌های مختلف تهیه شده‌اند، همخوانی قابل قبولی با الگوهای تداخلی

منابع

- 2006, Eocene gold ore formation at Muteh, Sanandaj-Sirjan Tectonic Zone, western Iran: A result of late-stage extension and exhumation of metamorphic basement rocks within the Zagros Orogen. *Economic Geology*, 101, 1497-1524.
- Rachidnejad-Omran N., Emami, M.H., Sabzehei, M., Rastad, E., Bellon, H. and Pique, A., 2002. Lithostratigraphie et histoire paléozoïque à paléocène des complexes métamorphiques de la région de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran méridional). *Comptes Rendus Geosciences*, 334, 1185-1191.
 - Ramsay, J. G. and Huber, M. H., 1987. *Modern Structural Geology, Folds and Fractures*. Academic Press, 2, 700.
 - Sheikholeslami, M.R., Ghassemi, M.R. and Hassanzadeh, J., 2019. Tectonic evolution of the hinterland of the Zagros orogen revealed from the deformation of the Golpaygan Metamorphic Complex, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 182, 103929.
 - Tectonics, F.P., Software for structural geology, written by Franz Reiter and Peter Acs.
 - Schöpfer, M.P.J., School of Earth Sciences at University College Dublin. www.fault-analysis-group.ucd.ie/
 - شیخ الاسلامی، م.ر. و زمانی پدram، م.، ۱۳۸۴. نقشه زمین شناسی یکصد هزارم محلات. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 - موسوی، ا. و مجل، م.، ۱۳۹۳. ساختار پهنه برشی و الگوهای تداخلی چین ها در شمال اسفجرد، پهنه سندیج-سیرجان. فصل نامه علوم زمین، ۹۱، ۱۳۰-۱۱۹.
 - رضایی نژاد، س. شیخ الاسلامی، م.ر. رشید نژاد عمران، ن. و پشتکوهی، م.، ۱۳۹۶. عناصر ساختاری مجموعه دگرگون جنوب محلات. فصلنامه زمین شناسی ایران، ۴۳، ۱۱۹-۱۳۲.
 - Allmendinger, R. W. Cardozo, N. and Fisher, D., 2012. *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology*: Cambridge University Press, 302.
 - Cardozo, N. and Allmendinger, R.W., 2013. Spherical projections with OSX Stereonet: *Computers and Geosciences*, 51, 193-205, doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021.
 - Moosavi, E., Mohajjel, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2014. Systematic changes in orientation of linear mylonitic fabrics: An example of strain partitioning during transpressional deformation in north Golpaygan, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94, 55-67.
 - Moritz, R., Ghazban, F. and Brad, S.,