

## تحلیل عناصر ساختاری کوه کمر حاجی، شمال باختر بیرجند

احمد رشیدی<sup>۱</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۲</sup>، محمود رضا هیهات<sup>۳</sup>، سید مرتضی موسوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، گروه زمین‌شناسی، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشگاه بیرجند، گروه زمین‌شناسی، بیرجند، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشگاه بیرجند، گروه زمین‌شناسی، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۳۰

### چکیده

در منطقه کوه کمر حاجی در شمال باختر بیرجند، عناصر ساختاری مانند ساخت دوپشته (Duplex)، ساخت بالارنده (Pop-Up)، ساخت پهنه سه گوش (Triangle Zone)، ساخت گلواره (Flower structure)، چین و... وجود دارند. دوپشته‌های منطقه، به موازات سیستم گسل شکر آب، روند خاوری - باختری دارند. گسل شکر آب یک گسل معکوس با مؤلفه چپ‌گرد است که در جنوب منطقه مطالعاتی قرار دارد و جزو یکی از شاخه‌های انتهایی گسل نه‌پندان به شمار می‌آید. بر اساس تحلیل هندسی - جنبشی صورت گرفته، دوپشته‌های منطقه از نوع ساختارهای دم اسبی (Horsetile structure) هستند که این ساختارها از پهلو بر روی همدیگر قرار گرفته‌اند. در راستای عمود بر ساختارهای دم اسبی ساخت گلواره وجود دارد که باعث شده لایه‌های مرکزی دوپشته‌ها، مرتفع‌تر از لایه‌های کناری باشند. در منطقه، راندگی با جهت جابه‌جایی مخالف (Antithetic thrusts) حرکت راندگی اصلی دیده می‌شود. این راندگی، پس راندگی (Back Thrust) راندگی اصلی است. بلوک فرادیواره ۲ گسل، راندگی و پس راندگی آن، ساخت بالارنده موجود در منطقه می‌باشد. پس راندگی و راندگی جدیدتر نیز در منطقه مورد مطالعه تشکیل ساخت پهنه سه گوش را داده‌اند. در دوپشته‌های این منطقه پلکان‌ها (Ramp) دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌گرد همراه با مؤلفه راندگی (Thrust) هستند. سکوها (Flat) موجود در منطقه غیر افقی بوده و عمدتاً سازوکار راندگی با مؤلفه چپ‌گرد دارند. با توجه به سازوکار سکوها، جهت انتقال به سمت باختر است و از آنجا که جهت جوان شدن پلکان‌ها بر روی فرادیواره پلکان‌های پیشین است (به عبارتی جهت جوان شدن به سمت پس‌بوم (Hinterland) است)، تشکیل دوپشته‌ها از مدل break back پیروی می‌کند. از آنجا که مدل فیزیکی فهم بهتری از مدل تشکیل و ارتباط ساختارهای منطقه به ما نشان می‌دهد، از مدل‌سازی تجربی استفاده کرده‌ایم. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که یک ارتباط قوی بین هندسه سکو با هندسه ساختارهای موجود در منطقه وجود دارد. بر اساس تعیین فازهای تنش دیرین و روندهای کوتاه‌شدگی ناشی از فشردگی بر روی ساختارهای موجود در منطقه، مانند چین‌خوردگی‌ها و دوپشته‌ها مراحل دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس دو مرحله دگرشکلی به دست آمد. در مرحله اول، محور تنش بیشینه به کمک درزه‌های مزدوج N42,00، درزه‌های کششی N40,07 و سطح محوری چین‌ها N38,14 است. مقدار کوتاه‌شدگی به دست آمده در این مرحله از دگرشکلی محور تنش بیشینه به کمک درزه‌های مزدوج N83,02، درزه‌های کششی N84,00 و راستای راندگی‌های خاوری - باختری بر اساس تصاویر ماهواره‌ای N90E است. در این مرحله گسل‌های امتدادلغز گسترش بیشتری داشته‌اند. بر اساس بازگرداندن مقطع خاوری - باختری رسم شده بر روی دوپشته‌ها، مقدار کوتاه‌شدگی ۲۰/۳۰ درصد و مقدار لغزش در امتداد سکو، ۲۶۴۰ متر به دست آمد. بر اساس تحلیل هندسی جنبشی صورت گرفته دوپشته‌ها در مرحله دوم دگرشکلی که با دگرشکلی پیش‌رونده همراه بوده است به وجود آمده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** بیرجند، دوپشته، مدل تجربی، Break Back، Pop-Up

\*نویسنده مسئول: احمد رشیدی

E-mail: arashidi@birjand.ac.ir

### ۱- پیش‌گفتار

زمین‌ساخت تجربی در معرض آزمایش قرار دادیم و شرایط کمی و کیفی ساختارها را تحلیل نمودیم.

بر اساس مطالعاتی که در منطقه مورد مطالعه انجام شده است، مشخص شده که گسل‌های راستالغز راست‌گرد (اریب‌هایی از سیستم گسلی نه‌پندان) بیشترین نقش را در دگرشکلی گستره به عهده داشته‌اند و آشفتگی‌های مختلف سوی تنش، در بخش‌هایی که تغییرات رئولوژی و شدت شکستگی وجود دارد دیده می‌شود (هیئات، ۱۳۷۷). در منطقه مورد مطالعه گسل‌های راندگی متأثر از عملکرد گسل‌های امتدادلغز بوده و همچنین نهشته‌های رودخانه‌ای متحمل دگرشکلی گردیده‌اند (Walker and Khatib, 2006). تا کنون ساختارهای موجود در منطقه تحلیل نشده‌اند از این رو، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند کمک زیادی به شناخت تکامل ساختاری کوه‌های شمال بیرجند و نحوه تکوین پهنه زمین‌درز سیستان باشد.

از جمله مطالعاتی که پیرامون این موضوع در ایران و سایر مناطق جهان صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: توالی‌های راندگی موجود در جنوب پیرنه مرکزی (Verges & Munoz, 1990)، انجام یک سری آزمایش‌ها روی هندسه و حرکت کمر بند چین رانده بالای دکولمان (Decollement) با چسبندگی ضعیف (Costa & Vendevill, 2002)، تحلیل مکانیکی و مشاهده تشکیلات دوپشته

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی، در شمال باختر بیرجند قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه در جنوب روستای اشکفتوک، در محدوده کوه کمر حاجی با موقعیت جغرافیایی "۰۰'۰۰" ۵۹° تا "۲۵' ۸" ۵۹° طول خاوری و "۲۰' ۳۲" ۳۲° ۵۷' عرض شمالی، واقع شده است.

در منطقه کوه کمر حاجی، ساختارهای زمین‌شناسی مانند: دوپشته، ساخت بالارنده، ساخت پهنه سه گوش، ساخت گلواره، چین و... وجود دارند (شکل ۳). در این منطقه، جهت تنش بیشینه N38E اندازه‌گیری شده است (هیئات، ۱۳۷۷). از آنجا که راستای قرار گرفتن دوپشته‌ها بر روی یکدیگر از خاور به سمت باختر می‌باشد، راستای قرارگیری با جهت تنش ذکر شده همخوانی ندارد. چین‌ها نیز از ساختارهای موجود در منطقه هستند که در لایه‌های شکل‌پذیر منطقه با هندسه مختلف به وجود آمده‌اند. راستای اثر محوری این چین‌ها با همدیگر و با تنش ناحیه‌ای و چگونگی روی هم قرار گرفتن دوپشته‌ها سازگاری ندارد (رشیدی، ۱۳۹۰).

هدف از این مطالعه، بررسی ناهمخوانی جهت تنش ذکر شده با روند ساختارهای موجود در منطقه، برای تحلیل عناصر ساختاری موجود در منطقه می‌باشد. برای فهم چگونگی پیدایش ساختارها، جنبش‌ها، برهم‌کنش و اندرکنش‌های اجزای تشکیل‌دهنده سنگ کره و سست کره، تعدادی از این متغیرها را در آزمایشگاه

معدنی کشور، عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و ۱:۵۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور (برای رسم نقشه فتوزئولوژی) و به کمک مطالعه تصاویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک‌برد با تفکیک مکانی ۶۰ سانتی‌متر) و لندست RGB، در طی بازدیدهای صحرایی، نقشه دقیق زمین‌شناسی و نقشه دقیق ساختاری، برای پی‌بردن به سیستم‌های گسلی موجود در منطقه ترسیم شد.

برای پی‌بردن به وضعیت تنش، به مطالعه تنش دیرین در واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده منطقه از زمان ائوسن تا الیگومیوسن پرداخته شد. بررسی تنش دیرین به کمک: (۱) روندهای مختلف کوتاه‌شدگی بر روی ساختارهای موجود در منطقه مانند چین‌ها و راستای قرارگیری دپشته‌ها (۲) به کمک درزه‌های هم‌بوغ (۳) به کمک درزه‌های کششی انجام شد.

برای مدل‌سازی دپشته‌ها و ساختارهای در ارتباط با آن، از آزمایش جعبه ماسه کمک گرفته شد. از ماسه، گچ، پودر سنگ برای شبیه‌سازی دگرشکلی شکننده در گوه‌های راندگی استفاده شده است. نیرویی به موازات لایه‌بندی توسط اهرم بر توالی لایه‌بندی وارد شد و عوامل کنترل‌کننده ساختارها در طی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند.

#### ۴- تحلیل هندسی عناصر ساختاری

در منطقه، ساختارهای دپشته، چین، پهنه سه گوش، ساخت بالا رانده و... وجود دارند. این ساختارها در ارتباط با سیستم‌های راندگی هستند. بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۳)، پلکان‌ها، سکوها و سایر گسل‌ها که برای تحلیل هندسی - جنبشی ضروری به نظر می‌آیند، مشخص شده‌اند.

##### ۴-۱. گسل شکرآب (Shekarab Fault)

گسل شکرآب، اصلی‌ترین و جنوبی‌ترین گسل موجود در منطقه است (شکل ۴). موقعیت تقریبی آن N90E, 50N می‌باشد. سازوکار گسل از نوع معکوس همراه با مؤلفه چپ‌گرد است. در اثر عملکرد گسل، پادگانه‌های رودخانه‌ای چین‌خورده‌اند (Walker & Khatib, 2006) و سطح محوری آنها دارای موقعیت N85E, 65NW است (شکل ۴-پ). چین‌ها با موقعیت سطح محوری N5W, 76NE نیز در امتداد گسل وجود دارند (شکل ۴-الف).

##### ۴-۲. گسل F1

این گسل دارای موقعیت تقریبی EW, 70N است. خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن موقعیت N75, 40 دارد. درازای آن حدود ۲/۵ کیلومتر است. این گسل به عنوان سکو یا به عبارتی راندگی کف شناخته شد که در قسمت تحتانی واحدهای Eo ab, Mr, Et (در زیر ساخت دام‌اسبی شماره ۳- شکل ۶) قرار گرفته است. با توجه به موقعیت سکو و خش‌لغز اندازه‌گیری شده سازوکار سکو از نوع معکوس همراه با مؤلفه چپ‌گرد به دست آمد (شکل ۵).

##### ۴-۳. گسل F2

گسل F2 دارای موقعیت EW, 45N است. خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی سطح آن موقعیت N20, 40 دارد. درازای آن حدود ۳/۵ کیلومتر است. این گسل به عنوان سکو (راندگی کف) در قسمت تحتانی واحدهای Eo ab, Mr, Et, Eo br (در زیر ساخت دام‌اسبی شماره ۱ و ۲- شکل ۶) قرار دارد. با توجه به موقعیت سکو و خش‌لغز اندازه‌گیری شده، سازوکار این سکو از نوع راندگی همراه با کمی مؤلفه چپ‌گرد به دست آمد.

##### ۴-۴. ساختارهای دپشته

در کمربندهای چین و راندگی، گسله‌ها گاهی از سطح یک گسل کم‌شیب زیرین، که راندگی کف خوانده می‌شود، افشان می‌شوند (Splay off) و به سطح گسله‌ای کم‌شیب که در تراز بالاتری قرار گرفته و راندگی سقف (Roof thrust) خوانده می‌شود، متصل می‌گردند. اگر این فرایند چندین بار رخ دهد، کنده‌هایی از سنگ

در آزمایش‌های جعبه ماسه با نگاهی به کمپلکس افزایشی مدیترانه باختری (Nina et al., 2002)، دپشته‌های ترافشارش و ساختار گلواره در سیستم گسلی دنت (Dent Fault System) در شمال باختر انگلستان (Woodcock & Rickards, 2003)، نقش مواد دکولمان با مشخصات رئولوژی متفاوت در ساختار هم‌آغوشی (Imbricate) Aljibe Thrust توسط (Lujan et al., 2003)، تأثیر شیب دکولمان روی هندسه و حرکت مدل‌های دپشته (Koji & Vendevill, 2003)، مدل دپشته برای کمربند چین‌خورده کاپه (Cape Fold Belt) توسط (Booth, 2004)، زون‌های تخریب گسلی (Kim et al., 2004)، توسعه زون گسلی و پخش‌شدگی کرنش در یک دپشته امتدادلغز کششی از سیستم گسلی آتاکاما (Atacama) در شمال چیل (Chile) توسط (Cembrano et al., 2005)، مدل تکامل حرکتی برای رشد دپشته رانجیت (Rangit Duplex) توسط (Bhattacharyya & Mitra, 2009)، دپشته‌های ترافشارش راست‌گرد پان در آفریقا (Pan-African) و ساختارهای گلواره در بیابان خاوری مصر مرکزی (Abd El-Wahed & Kamh, 2010)، منشأ تغییرات در انواع ساختارهای موجود در بندرعباس و جنوب خاور زاگرس (Molinario et al., 2004)، هندسه پوسته کمربند چین رانده زاگرس و ایران (McQuarrie, 2004)، تطابق کوتاه‌شدگی سنوزویک در محدوده البرز و شمال ایران (Allen et al., 2003)، تطابق بین زمین‌ساخت آرکن و فانروزویک براساس نقشه‌برداری از ناحیه زون هم‌گرایی پلیت سنوزویک - مزوزویک در مکران (McCall, 2003) و...

#### ۲- موقعیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه

منطقه مورد مطالعه در خاور ایران واقع شده است. این بخش از ایران در تقسیم‌بندی‌های زمین‌ساختی - رسوبی که توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده با نام‌های مختلفی معرفی شده است که از جمله آنها می‌توان به منطقه فلیش و آمیزه رنگین (اشتوکلین و همکاران، ۱۳۵۲)، زمین‌چاک سیستان (بربریان، ۱۳۶۲)، پهنه زمین‌درز سیستان (Tirrul et al., 1983) و... اشاره نمود (شکل ۲).

در جنوب منطقه مطالعاتی، سیستم گسلی شکرآب با موقعیت خاوری - باختری وجود دارد (شکل ۴). گسل شکرآب یک گسل معکوس با مؤلفه چپ‌گرد است که جزو یکی از شاخه‌های انتهایی گسل نهندان به شمار می‌آید. گسل نهندان دارای روندی، شیب به زیگموبیدال است. سازوکار گسل نهندان امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه جزئی معکوس است. در این ناحیه، چند گسل کم و بیش موازی با روند عمومی شمالی - جنوبی وجود دارد که چرخش پایانه شمالی به سمت باختر و پایانه جنوبی به سمت خاور می‌باشد. این هندسه تغییر روند سبب شده است تا نسل‌های مختلف راندگی بر روی این سیستم امتدادلغز سوار باشند (آقائاتی، ۱۳۸۳). از ویژگی‌های آشکار این سیستم گسلی قطعه - قطعه بودن (Segmented) آن به‌ویژه بر روی شاخه‌های پایانه‌ای است. از نظر سنی، کنگلومرای ائوسن قدیمی‌ترین واحد سنگی و پادگانه‌های امروزی جوان‌ترین واحد سنگی هستند (اوهانیان و همکاران، ۱۳۶۶). در شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه، که با دقت بالا تهیه شده، آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ساختارهای مختلف زمین‌شناسی از جمله دپشته‌ها، چین‌خوردگی‌ها، ساخت بالا رانده و... به خوبی بر روی نقشه نمایان شده‌اند.

#### ۳- روش انجام کار

برای پی‌بردن به سازوکار تشکیل دپشته‌ها، نیاز به تحلیل هندسی - جنبشی عناصر ساختاری موجود در منطقه بود. برداشت داده‌های لازم برای تحلیل عناصر ساختاری، در بازدیدهای صحرایی و مطالعه تصاویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک‌برد با تفکیک مکانی ۶۰ سانتی‌متر) و لندست RGB، صورت گرفت.

به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات

همراه پس‌راندگی پلکان R3، ساخت پهنه سه‌گوش در حاشیه خارجی کوهستان را تشکیل داده است (شکل ۱۰).

#### ۴-۱۰. پلکان R4

این پلکان دارای موقعیت N40W,40NE است. خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن موقعیت N85,35 دارد. درازای آن حدود ۱۸۰۰ متر است. این گسل واحدهای Et, Eo ab, Mr را قطع کرده است. با توجه به موقعیت پلکان و خش‌لغز اندازه‌گیری شده، سازوکار پلکان از نوع چپ‌گرد همراه با مؤلفه راندگی به دست آمد.

#### ۴-۱۱. گسل F4

این گسل موقعیت N80W,40SW دارد. موقعیت خط‌خش اندازه‌گیری شده بر روی آن N160,35 است. طول آن حدود ۳/۵ کیلومتر است. این گسل واحدهای Con-Mr, Eo br2, Et, Et2 را قطع کرده است. با توجه به موقعیت گسل و خط‌خش اندازه‌گیری شده، سازوکار گسل، از نوع راندگی همراه با مؤلفه چپ‌گرد به دست آمد (شکل ۱۱-الف).

#### ۴-۱۲. گسل F5

این گسل دارای موقعیت N75W,45NE است. خط‌خش اندازه‌گیری شده بر روی آن موقعیت N45,40 دارد. درازای آن حدود ۲/۴ کیلومتر است. این گسل واحدهای Qt2, Et, Tuff-Mr, Sh, Ss را قطع کرده است. با توجه به موقعیت گسل و خط‌خش اندازه‌گیری شده، سازوکار گسل از نوع راندگی همراه با مؤلفه چپ‌گرد به دست آمد (شکل ۱۱-ب).

#### ۴-۱۳. پهنه سه‌گوش موجود در حاشیه داخلی کوهستان

گسل F5 به همراه گسل F4 تشکیل ساخت پهنه سه‌گوش در حاشیه داخلی را داده‌اند. تشکیل این ساخت تأثیر مهمی به روند فرسایش و چگونگی رسوب‌گذاری در این قسمت از منطقه گذاشته است. به طوری که باعث ایجاد مورفولوژی پادگانه رودخانه‌ای مرتفع با حجم فرسایش و رسوب‌گذاری بالا در رودخانه‌های بخش باختری شده است (شکل ۱۱-ج). این نحوه فعالیت زمین‌ساختی، کانال‌های آبی منطقه را به سمت اشکال مآندری با بار بستری زیاد سوق داده است (شکل ۱۱-د). در شکل ۱۲ نقشه ساختاری منطقه همراه با استریوگرام گسل‌های مورد تحلیل آورده شده است.

#### ۵- تحلیل جنبشی عناصر ساختاری

برای پی بردن به سازوکار تشکیل دوشسته‌ها، مراحل جنبش به روش‌های زیر مورد بررسی قرار گرفت و محورهای جنبش در هر روش به دست آمد.

#### ۵-۱. روش تعیین موقعیت محور جنبش با استفاده از سطح محوری چین‌ها

چین‌ها با هندسه و روند محوری مختلف، به صورت پراکنده در قسمت‌های مختلف منطقه دیده می‌شوند. این مطالعه بر روی چین خوردگی مرکز منطقه مطالعاتی متمرکز شده است. چین خوردگی مرکز منطقه مطالعاتی دارای ۹ اثر محوری (T) متفاوت هستند (شکل ۱۳).

در این قسمت از منطقه واحدهای سنگی در پهنه فشارشی - برشی دچار چین‌خوردگی شده‌اند و تشکیل تاقدیس و ناودیس‌هایی را داده‌اند که دارای روند محوری متفاوت هستند.

یکی از روش‌های تعیین موقعیت محورهای جنبش، سطح محوری چین‌های موجود در منطقه است. خطی که عمود بر سطح محوری چین قرار می‌گیرد همان محور فشردگی (Z) به وجود آورنده چین است که برابر محور تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) می‌باشد. با توجه به اندازه‌گیری‌های به عمل آمده از وضعیت چین خوردگی مرکز منطقه (شکل ۱۳)، به کمک محور و صفحه محوری چین‌های T5-T1 مختصات محور تنش بیشینه (که عمود بر سطح محوری چین است) به دست آمد (جدول ۱). محور فشردگی به دست آمده از سطح محوری چین‌های T5-T1، تقریباً

خواهیم داشت که از تمام جهات به گسله‌ای ختم می‌شوند، به این مجموعه کنده‌ها که به ترتیب در کنار و یا بر روی هم تشکیل می‌شوند، دوشسته گفته می‌شود.

در منطقه مطالعاتی سه ساخت دم‌اسبی وجود دارد که این ساختارها از پهلو بر روی همدیگر قرار گرفته‌اند. آثاری از واحدهای Eo ab, Et مربوط به ساخت دم‌اسبی شماره ۲ بر روی ساخت دم‌اسبی شماره ۱ دیده می‌شود (شکل ۶ و ۳).

در اثر ایجاد پس‌راندگی پلکان شماره سه، ساخت Pop-Up ایجاد شده است. بعد از تشکیل ساخت Pop-Up در فرو دیواره پلکان شماره ۳ دیگر لغزشی نخواهیم داشت و تشکیل ساخت جدید به سمت خاور ادامه خواهد داشت (Butler, 1982) به طوری که ساخت شماره ۱ در شکل ۶ قدیمی‌ترین ساخت دم‌اسبی و ساخت شماره ۳ جوان‌ترین ساخت دم‌اسبی موجود در منطقه است.

در منطقه مورد بررسی چهار پلکان وجود دارد که از نظر هندسی، دارای آرایش پلکانی همسو (En echelon synthetic fault) هستند (شکل ۶). در زیر سازوکار هر پلکان و ساختارهای در ارتباط با آنها آورده شده است.

#### ۴-۵. پلکان R1

این گسل دارای موقعیت N70W,30NE است. خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن موقعیت N60,20 دارد. درازای آن حدود ۴۵۰ متر است. این گسل واحدهای Et, Eo ab, Mr, Et2 را قطع کرده است. با توجه به موقعیت پلکان و خش‌لغز اندازه‌گیری شده سازوکار پلکان از نوع چپ‌گرد همراه با مؤلفه راندگی به دست آمد.

#### ۴-۶. پلکان R2

این پلکان موقعیت N60W,30NE دارد. موقعیت خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن N70,25 است. طول آن حدود ۹۰۰ متر است. این گسل واحدهای Et, Eo ab, Mr را قطع کرده است. مقدار جابه‌جایی ظاهری امتدادلغز توسط این گسل ۳۶۰ متر اندازه‌گیری شد. با توجه به موقعیت پلکان و خش‌لغز اندازه‌گیری شده، سازوکار پلکان، از نوع چپ‌گرد همراه با مؤلفه راندگی به دست آمد (شکل ۷).

#### ۴-۷. پلکان R3

این پلکان دارای موقعیت N65W,40NE است. خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن موقعیت N85,25 دارد. درازای آن حدود ۱۴۰۰ متر است. این گسل واحدهای Et, Eo ab, Mr را قطع کرده است. میزان جابه‌جایی ظاهری امتدادلغز توسط این گسل ۹۳۰ متر اندازه‌گیری شد. با توجه به موقعیت پلکان و خش‌لغز اندازه‌گیری شده، سازوکار پلکان از نوع چپ‌گرد همراه با مؤلفه راندگی به دست آمد (شکل ۸).

#### ۴-۸. گسل F3

گسل F3 موقعیت N35E,42NW دارد. موقعیت خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن N255,30 است. درازای گسل حدود ۲۳۰۰ متر به دست آمد. این گسل واحدهای Et, Eo ab, Mr را قطع کرده است. مقدار جابه‌جایی ظاهری امتدادلغز توسط گسل ۲۴۰ متر اندازه‌گیری شد. با توجه به موقعیت گسل و خش‌لغز اندازه‌گیری شده بر روی آن، سازوکار گسل از نوع راست‌گرد همراه با مؤلفه راندگی است.

#### ۴-۹. ساخت بالارنده و پهنه سه‌گوش موجود در حاشیه خارجی کوهستان

معمولاً در مناطق کوهزایی، راندگی‌ها با جهت جابه‌جایی مخالف حرکت راندگی اصلی دیده می‌شوند. این راندگی‌ها را پس‌راندگی، می‌نامند. آنها معمولاً به دلیل فشارش اضافی موازی با لایه‌بندی که در نتیجه چگالی بر گه‌های بالا آمده توسط پلکان ایجاد شده است، به وجود می‌آیند. بلوک فرادیواره ۲ گسل، راندگی و پس‌راندگی آن را، اصطلاحاً Pop-Up می‌نامند (شکل ۹). در تعدادی مناطق نیز دیده شده که پس‌راندگی و راندگی جدید ساخت پهنه سه‌گوش را ایجاد می‌کنند (Butler, 1982).

در منطقه مطالعاتی گسل F3، پس‌راندگی پلکان R3 به شمار می‌آید. در اثر حرکت سکو این گسل به همراه پلکان R3، ساخت بالارنده را ایجاد کرده است. با پیشروی جهت انتقال به سمت باختر، پلکان جدید (R4) ایجاد شده است. این پلکان به

اوسن، دچار راندگی‌های شمال خاور - جنوب باختر و واحدهای شکل‌پذیرتر آن، دچار چین‌خوردگی شده‌اند به طوری که محورهای چین‌خوردگی تقریباً روند شمال باختر - جنوب خاور دارند (چین‌های T5-T1 در شکل ۱۳).

#### ۶-۲. مرحله دوم دگرشکلی (D2)

محور تنش بیشینه یا به عبارتی محور  $\lambda_3$  کرنش در این مرحله به کمک درزه‌های مزدوج N83,02، به کمک درزه‌های کششی N84,00 و به کمک راستای راندگی‌های خاوری - باختری، بر اساس تصاویر ماهواره‌ای N90E است. در این مرحله گسل‌های امتداد لغز توسعه بیشتری داشته‌اند به نحوی که محورهای چین‌خوردگی در این مرحله دچار چرخش شده‌اند و در قسمت‌های انتهایی روند خاوری - باختری به خود گرفته‌اند. در اثر خاوری - باختری شدن محور بیشینه تنش، کوتاه‌شدگی خاوری - باختری در نتیجه تشکیل ساخت دوپشته ایجاد شده است. بر اساس بازگرداندن مقطع خاوری - باختری رسم شده بر روی دوپشته‌ها، مقدار کوتاه‌شدگی  $20/30$  درصد و مقدار لغزش در امتداد سکو،  $2640$  متر به دست آمد. روند عمومی واحدهای رخنمون یافته، خمیدگی گسل‌ها، سازوکار گسل‌ها، چرخش محور چین‌ها و... بیانگر یک دگرشکلی پیش‌رونده در این مرحله از دگرشکلی می‌باشد.

#### ۴-۲. مدل‌سازی عناصر ساختاری منطقه مورد مطالعه بر اساس آزمایش زمین‌ساخت تجربی

از آنجا که مدل فیزیکی فهم بهتری از مدل تشکیل و ارتباط ساختارهای منطقه به ما نشان می‌دهد از مدل‌سازی تجربی استفاده شده است. برای مدل‌سازی دوپشته‌ها و ساختارهای در ارتباط با آن (ساخت بالارونده و ساخت پهنه سه گوش)، آزمایش‌هایی برای عوامل کنترل کننده نوع دگرشکلی رسوبات در اثر تنش اعمال شده به موازات لایه‌بندی انجام شد. پیش از شروع آزمایش عوامل کنترل کننده نوع دگرشکلی لایه‌ها در فشار به موازات لایه‌بندی (مقاومت برشی الاستیک، نسبت ستبرای لایه‌ها به ستبرای سطح دکولمان، نیروی جاذبه و گرانیوی سطح دکولمان) مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه، سکو غیر افقی است در آزمایشگاه نیز سکو غیر افقی در نظر گرفته شد. شکل ۱۹-الف تناوب لایه‌بندی را پیش از شروع آزمایش نشان می‌دهد. با توجه به سنگ‌شناسی ساختارهای موجود در منطقه، لایه‌های موجود در آزمایشگاه از پایین به بالا به ترتیب: ماسه مرطوب (۱cm)، گچ (۱cm)، ماسه خشک (۱/۵ cm) انتخاب شدند و برای سطح دکولمان مخلوط گچ با روغن با گرانیوی بالا و ستبرای ۳cm در نظر گرفته شد.

با  $5/7$  درصد کوتاه‌شدگی، اولین راندگی ایجاد می‌شود. شیب این راندگی در خلاف جهت انتقال و به سمت پیش‌بوم است (شکل ۱۹-ب). با افزایش میزان کوتاه‌شدگی به اندازه  $11/42$  درصد راندگی دوم تشکیل می‌شود. جهت شیب این راندگی به سمت جهت انتقال و جهت پس‌بوم است. در این آزمایش چین مرتبط با نوک راندگی در مراحل اولیه رشد دچار شکست و جابه‌جایی شد. این راندگی به همراه راندگی شماره یک تشکیل ساخت پهنه سه گوش در حاشیه خارجی داده‌اند. در این مرحله پس‌راندگی، راندگی شماره دو، نیز هسته‌گذاری شد (شکل ۱۹-پ). با ادامه دگرشکلی (کوتاه‌شدگی  $22/85$  درصد) پس‌راندگی، راندگی شماره دو رشد بیشتری داشت به طوری که در اثر حرکت این دو گسل ساخت بالارونده ایجاد شد. در این مرحله راندگی دوم (گسل شماره ۴) همراه با چین مرتبط با نوک راندگی در فرادیواره و در پس‌بوم شکل گرفت. این راندگی به همراه پس‌راندگی، راندگی شماره دو تشکیل ساخت پهنه سه گوش در حاشیه داخلی را دادند (شکل ۱۹-ت). در این آزمایش مقدار کوتاه‌شدگی حدود  $23$  درصد و مقدار لغزش در امتداد سکو،  $2500$  متر به دست آمد.

همانطور که در طی انجام آزمایش مشاهده شد، راندگی شماره سه (گسل شماره ۴)، در فرادیواره راندگی شماره دو شکل گرفت. این هندسه از تشکیل

برابر با N38,14 است. در این راستا، مقاطع مختلف زمین‌شناسی رسم شد و مقدار کوتاه‌شدگی  $41/46$  درصد به دست آمد.

#### ۵-۲. روش تعیین موقعیت محور جنبش در راستای دوپشته‌ها

یکی دیگر از روش‌های تعیین محور جنبش می‌تواند، تعیین راستای قرار گیری ساختارهای دم اسبی بر روی همدیگر (یا به عبارتی راستای سکوها به وجود آورنده دوپشته‌ها) باشد. از روی تصاویر ماهواره‌ای راستای قرار گیری ساختارهای دم اسبی بر روی همدیگر N90E می‌باشد بنابراین راستای محور بیشینه تنش، N90E است. در این راستا، مقطع زمین‌شناسی تهیه کردیم (شکل ۱۴) که مقدار کوتاه‌شدگی  $20/30$  درصد و مقدار لغزش در امتداد سکو  $2640$  متر به دست آمد. محل برش بر روی نقشه زمین‌شناسی در شکل ۳ مشخص شده است.

#### ۵-۳. تعیین محورهای کرنش به کمک تعیین فازهای تنش دیرین (Paleostress)

برای دستیابی به بخشی از تاریخ گذشته زمین‌ساختی و آرایش تنش‌های دگرشکل‌کننده منطقه، روش‌های مختلفی برای تعیین فازهای تنش دیرین وجود دارد (مارشاک، ۱۳۸۱). از آنجا که در منطقه مطالعاتی درزه‌های سیستماتیک به فراوانی یافت می‌شود، بهترین و مناسب‌ترین فاکتور برای تعیین تنش دیرین، برداشت این درزه‌ها بود (شکل ۱۵).

برداشت این درزه‌ها در مناطقی انجام شد که آثاری از وجود خش‌لغز مشاهده شده است و بر این اساس، درزه‌های سیستماتیک در واحدهای مختلف سنی و در ایستگاه‌های نزدیک به هم (در حدود ۱۷۰ ایستگاه) اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۶). درزه‌های برداشت شده مربوط به واحدهای سنگی زمان اوسن، الیگومیوسن و واحدهای جوان‌تر می‌باشد. در ابتدا درزه‌های زمین‌ساختی از درزه‌های غیرزمین‌ساختی تفکیک شدند، سپس ارتباط درزاها با چین‌خوردگی‌ها و گسل‌خوردگی مشخص گردید و پس از آن، از روش تفریقی برای تحلیل مراحل تغییر تنش کمک گرفته شد.

**تعیین فازهای تنش دیرین به کمک درزه‌های هم‌بوغ:** چنانچه تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری رویدادهای مختلف به اندازه کافی باشد، مشاهده می‌شود که با جوان‌تر شدن سن واحد، تعداد رویدادهای زمین‌ساختی ثبت شده کاهش می‌یابد. در این صورت با حذف کردن رویدادهای جوان‌تر در واحد جوان از رویدادهای موجود در واحد آخر می‌توان به توالی سنی رویدادها دست یافت. در این مطالعه درزه‌های سیستماتیک زمان پس از اوسن به کمک روش تفریقی از واحدهای اوسن تفکیک شد و بعد به کمک نرم افزار T-Tecto به بررسی تغییرات جهت تنش و تأثیر آن بر مراحل مختلف دگرشکلی پرداخته شد. در جدول ۲ و شکل ۱۷، موقعیت محورهای تنش به کمک درزه‌های هم‌بوغ آورده شده است.

**تعیین فازهای تنش دیرین به کمک درزه‌های کششی:** در این مرحله نیز درزه‌های کششی در واحدهای اوسن از درزه‌های کششی در واحدهای الیگومیوسن، جدا شد. در جدول ۳ و شکل ۱۸ موقعیت محورهای تنش به کمک درزه‌های کششی آورده شده است.

#### ۶-۲. مراحل دگرشکلی

بر اساس مطالعه تغییرات تنش دیرین، وقوع دو مرحله دگرشکلی تشخیص داده شد. این دو مرحله دگرشکلی از یکدیگر تفکیک و با ساختارهای تحلیل شده در منطقه مورد بررسی قرار گرفتند.

#### ۶-۱. مرحله اول دگرشکلی (D1)

محور تنش بیشینه یا به عبارتی محور  $\lambda_3$  کرنش در این مرحله، به کمک درزه‌های مزدوج N42,00، به کمک درزه‌های کششی N40,07 و به کمک سطح محوری چین‌ها N38,14 به دست آمد. مقدار کوتاه‌شدگی به دست آمده در این مرحله از دگرشکلی حدود  $41/46$  درصد است. در این مرحله واحدهای سخت‌تر زمان



شبه پهنه سه گوش نوع (ب) در شکل ۲۴ است. همانطور که در قسمت ۴-۱۳ گفته شد، تشکیل این ساخت تأثیر مهمی بر روی روند فرسایش و نحوه رسوب گذاری در قسمت باختری منطقه گذاشته است.

• **پهنه سه گوش موجود در حاشیه خارجی کوهستان:** در اثر ایجاد راندگی جدید (گسل شماره چهار در شکل ۱۹-ت) بر روی پس بوم و فرادواره راندگی دوم چین مرتبط با نوک راندگی در حاشیه خارجی کوهستان شکل گرفت. در اثر سازوکار این راندگی با پس راندگی راندگی دوم، (گسل شماره ۳ در شکل ۱۹) پهنه سه گوش موجود در حاشیه خارجی کوهستان تشکیل شد (شکل ۲۵). همانطور که مشاهده می شود این پهنه سه گوش از نظر سازوکار تشکیل شبه پهنه سه گوش نوع (ب) در شکل ۲۴ است.

#### ۸- مدل تشکیل دویشته های منطقه

همانطور که ذکر شد دویشته های منطقه در اثر دگرشکلی پیشرونده در مرحله دوم دگرشکلی ایجاد شده اند. بر اساس مطالعه نقشه ساختاری به دست آمده، بررسی تصاویر ماهواره ای و مقطع خاوری - باختری رسم شده دویشته های منطقه دارای سه ساخت دم آسبی هستند.

در منطقه مطالعاتی، بر اساس تحلیل هندسی - جنبشی صورت گرفته و بر اساس سازوکار سکو جهت انتقال به سمت باختر به دست آمد. از آنجا که جهت جوان شدن پلکانها به سمت خاور و بر روی فرادواره پلکانهای قبلی است (به عبارتی جهت جوان شدن به سمت پس بوم است)، مدل تشکیل دویشته های منطقه از مدل Break Back پیروی می کند. گاهی اوقات در دویشته هایی که از مدل Break-Back پیروی می کنند، آثاری از توالی راندگی جدیدتر بر روی توالی راندگی قدیمی تر دیده شده است. در دویشته های این منطقه نیز آثاری از ساخت شماره ۲ بر روی ساخت دم آسبی شماره ۱ دیده می شود (شکل ۳ و ۶).

بر اساس مطالعات ساختاری و ترسیم مقاطع مختلف زمین شناسی، بلوک دیاگرام مربوط به دویشته های منطقه رسم شد (شکل ۲۶). همان طور که مشاهده می شود، در راستای عمود بر دویشته ها ساخت گلولاره دیده می شود که سبب بر خاستگی قسمت های داخلی تر ساخت دویشته نسبت به نواحی کناری شده است (شکل ۲۶). در راستای تقریبی شمال باختر - جنوب خاور چین خوردگی ساختارهای دویشته نشان داده شده است. چین ها از نوع چین های مرتبط با نوک راندگی (Fault propagation fold) هستند. نمونه ای از این چین خوردگی ها در منطقه مطالعاتی، در شکل ۲۷ آورده شده است.

#### ۹- نتیجه گیری

بررسی و تحلیل عناصر ساختاری در منطقه، بیانگر الگوی جنبشی از نوع سیستم فشاری همراه با برش چپ گرد است. از این رو، کلیه ساخت های مورد تحلیل در این ناحیه با ساختارهای به وجود آمده در یک سیستم فشاری با جابه جایی چپ گرد خاوری - باختری منطبق است.

گسل های (F2, F1) راندگی های کف مربوط به ساختارهای دم آسبی غیر افقی هستند. این هندسه از راندگی های کف، باعث متمایز بودن دویشته های این منطقه با سایر مناطق شده است. از این هندسه در آزمایش مدل Break-back، برای نشان دادن ساختارهای موجود در منطقه استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان می دهد که یک ارتباط قوی بین هندسه سکو با هندسه ساختارهای موجود در منطقه وجود دارد. بر اساس مدل سازی انجام گرفته، مهم ترین عوامل تشکیل دهنده این ساختارها عبارت اند از: هندسه سکو بر اساس زاویه ای که با سطح افق می سازد، کرنش صورت گرفته در یک پهنه فشاری - برشی به موازات گسل شکر آب، گرانروی لایه ها و و گرانروی سطح دکولمان.

راندگی ها به تبعیت از مدل دویشته های Break-back می باشد که جهت جوان شدن ساختارهای دم آسبی به سمت پس بوم است. در مناطقی که تشکیل ساختارها از مدل Break-back پیروی می کنند به هم ریختگی شدیدی را می توان مشاهده نمود. با دقت بر روی سطح لایه بالایی در این آزمایش، می توان این به هم ریختگی را مشاهده نمود.

#### ۷-۱. تطبیق دویشته ها و ساختارهای مرتبط با آن از جمله ساخت پهنه سه گوش و ساخت بالارنده با مدل آزمایشگاهی

##### - دویشته ها و ساخت بالارنده

بررسی و تحلیل عناصر ساختاری در منطقه مطالعاتی، بیانگر الگوی جنبشی از نوع یک سیستم فشاری همراه با برش چپ گرد است. از این رو، کلیه ساختارهای موجود در این منطقه با ساختارهای به وجود آمده در یک سیستم فشاری با جابه جایی چپ گرد خاوری - باختری منطبق است.

نکته قابل توجه در اینجا، این است که دویشته ها از پهلو و از سمت خاور به باختر بر روی همدیگر قرار گرفته اند. این نحوه قرار گرفتن دویشته ها به دلیل برش چپ گردی است که به موازات لایه ها اتفاق افتاده است. در برش چپ گرد به موازات لایه ها ابتدا یک سری چین خوردگی که اثر محوری آنها با صفحه برش زاویه ۴۵ درجه می سازند (مانند چین خوردگی های موجود در قسمت بالایی دویشته های منطقه) ایجاد می شوند (شکل ۲۰).

به مرور در اثر افزایش برش، چین های موجود در مرکز پهنه به دلیل همگرایی بیشتر، از محل سطح محوری (در نمای نقشه) می شکنند و بر روی هم قرار می گیرند. در شکل ۲۱ تغییرات محورها چین خوردگی در یک برش چپ گرد ساده به موازات لایه ها نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، با افزایش برش محورها چین خوردگی زاویه کمتری با صفحه برش می سازند و چین ها به هندسه برگشته و خوابیده نزدیک تر می شوند.

همان طور که گفته شد سه ساخت دم آسبی در منطقه مطالعاتی وجود دارد. ساخت دم آسبی شماره یک (ساخت دم آسبی باختر منطقه)، شماره دو و شماره سه توسط راندگی دوم موجود در قسمت (پ) آزمایش مدل سازی می شوند (شکل ۲۲).

بعد از اینکه ساخت دم آسبی تشکیل شد در اثر ایجاد پس راندگی (پس راندگی، راندگی شماره دو در آزمایش) ساخت بالارنده شکل گرفته است (شکل ۲۳).

##### - پهنه سه گوش

در این مبحث به معرفی ساختار پهنه های سه گوش می پردازیم که در آزمایش تشکیل شد و معادل پهنه های سه گوش موجود در منطقه مورد پژوهش می باشد.

• **پهنه سه گوش موجود در حاشیه داخلی کوهستان:** دو نوع پهنه سه گوش در کمربندهای راندگی وجود دارد. نوع اول، یک گوه محدود شده با راندگی است که به وسیله یک راندگی کف در قاعده و یک راندگی سقف غیر فعال (Passive Roof Thrust) در بالا محدود شده است. چنین پهنه های سه گوش در واقع گوه های راندگی داخل پوسته ای (Intercutaneous Thrust Wedge) هستند (شکل ۲۴- الف). نوع دوم پهنه سه گوش در حاشیه خارجی کمربندهای راندگی، اشاره به ترکیبی از دو راندگی با یک سطح جداپوش قاعده ای مشابه ولی با شیب و تمایل مخالف دارد (شکل ۲۴- ب).

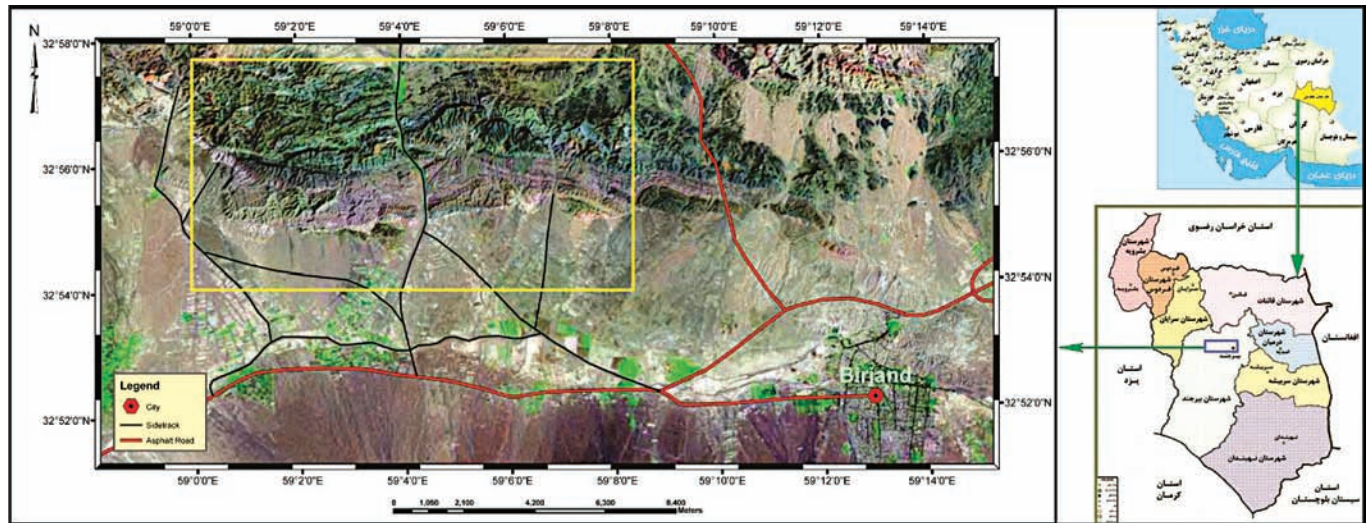
همان طور که در طی آزمایش ملاحظه می شود، در اثر اولین حرکت و انتقال فک ها، راندگی شماره (۱) که جهت شیب آن به سمت پیش بوم بود شکل گرفت. این راندگی معادل گسل شماره F5 در شکل ۳ است. با ادامه حرکت، راندگی شماره ۲ در مرحله (پ) آزمایش شکل گرفت. این راندگی معادل گسل شماره F5 در شکل ۳ است. در اثر سازوکار این دو گسل، پهنه سه گوش در حاشیه داخلی کوهستان شکل گرفته است (شکل ۲۴). این پهنه سه گوش از نظر هندسی - جنبشی

مرحله از دگرشکلی حدود ۴۱/۴۶ درصد است. در این مرحله واحدهای سخت تر ائوسن، دچار راندگی های شمال خاور - جنوب باختر و واحدهای شکل پذیرتر آن، دچار چین خوردگی شده اند به طوری که محور بیشتر چین ها تقریباً روند شمال باختر - جنوب خاور دارند.

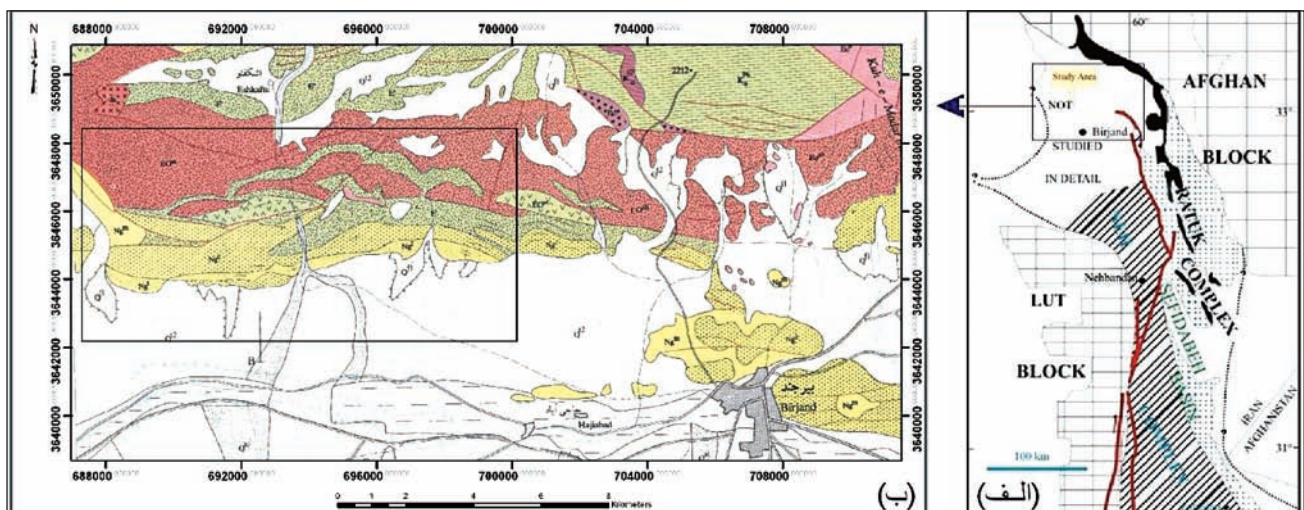
در مرحله دوم دگرشکلی محور تنش بیشینه یا به عبارتی محور  $\lambda_3$  کرنش به کمک درزه های مزدوج N83,02، به کمک درزه های کشتی N84,00 و به کمک راستای راندگی های خاوری - باختری، بر اساس تصاویر ماهواره ای N90E است. در این مرحله گسل های امتداد لغز توسعه بیشتری داشته اند، به نحوی که محور چین های موجود در مرکز منطقه، در این مرحله دچار چرخش شده اند و در قسمت های انتهایی روند خاوری - باختری به خود گرفته اند. در اثر خاوری - باختری شدن محور بیشینه تنش، کوتاه شدگی خاوری - باختری در نتیجه تشکیل دویشته ها ایجاد شده است. بر اساس بازگرداندن مقطع خاوری - باختری رسم شده بر روی دویشته ها، مقدار کوتاه شدگی ۲۰/۳۰ درصد و مقدار لغزش در امتداد سکو، ۲۶۴۰ متر به دست آمد. روند عمومی واحدهای رخنمون یافته، خمیدگی گسل ها، سازو کار گسل ها، چرخش محور چین ها و ... بیانگر یک دگرشکلی پیش رونده در این مرحله از دگرشکلی است.

بر اساس تحلیل هندسی - جنبشی صورت گرفته در منطقه، سکو ها عمدتاً دارای سازو کار راندگی همراه با مؤلفه چپ گرد هستند. بر اساس سازو کار سکو جهت انتقال در مرحله دوم دگرشکلی به سمت باختر است. سازو کار پلکان های موجود در منطقه چپ گرد همراه با مؤلفه راندگی است. آنها دارای آرایش پلکانی همسو هستند. ساختارهای دویشته موجود در منطقه از نوع ساختارهای دم اسبی هستند. در اثر برش چپ گرد که به موازات لایه ها اتفاق افتاده، جابه جایی در امتداد لایه ها با حرکات خمشی - لغزشی همراه بوده است به طوری که جهت جوان شدن ساختارهای دم اسبی به سمت خاور می باشد. با توجه به اینکه جهت انتقال به سمت باختر و جهت جوان شدن ساختارهای دم اسبی به سمت خاور است (ساختارهای دم اسبی و راندگی های جدید بر روی فرادیواره پلکان ها و ساختارهای دم اسبی قدیم تشکیل شده اند) مدل تشکیل دویشته های منطقه از مدل break-back پیروی می کند که با پیچیدگی ساختاری همراه است.

در مرحله اول دگرشکلی محور تنش بیشینه یا به عبارتی محور  $\lambda_3$  کرنش، به کمک درزه های مزدوج، N42,00، به کمک درزه های کشتی، N40,07 و به کمک سطح محوری چین ها N38,14 به دست آمد. مقدار کوتاه شدگی به دست آمده در این

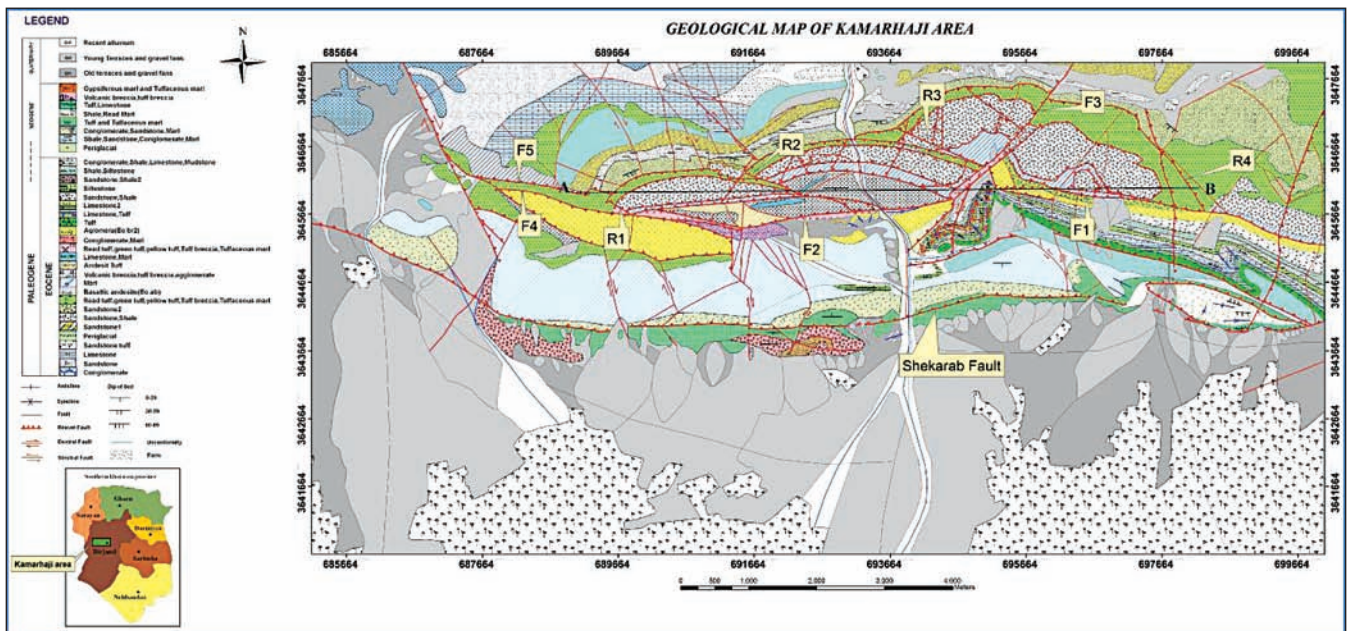


شکل ۱- تصویر ماهواره ای از منطقه مطالعاتی. کادر زرد رنگ موقعیت منطقه مطالعاتی را نسبت به شهر بیرجند نشان می دهد.

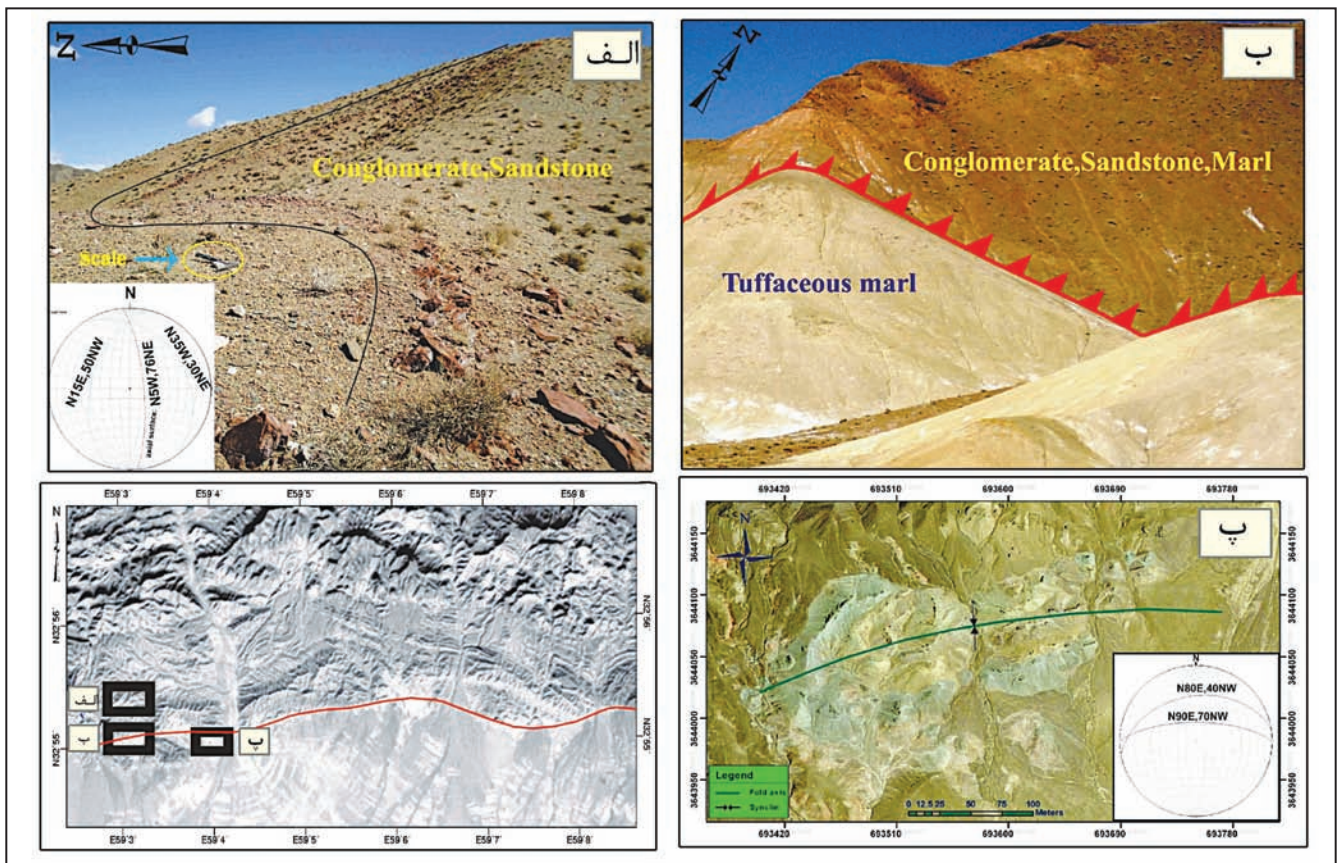


شکل ۲- الف) ساختار کلی بخشی از زون فلیش خاور ایران که درحد بین بلوک لوت و افغان به وجود آمده است (Tirrul et al., 1983). ب) قسمتی از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است (اوهانیان و همکاران، ۱۳۶۶).



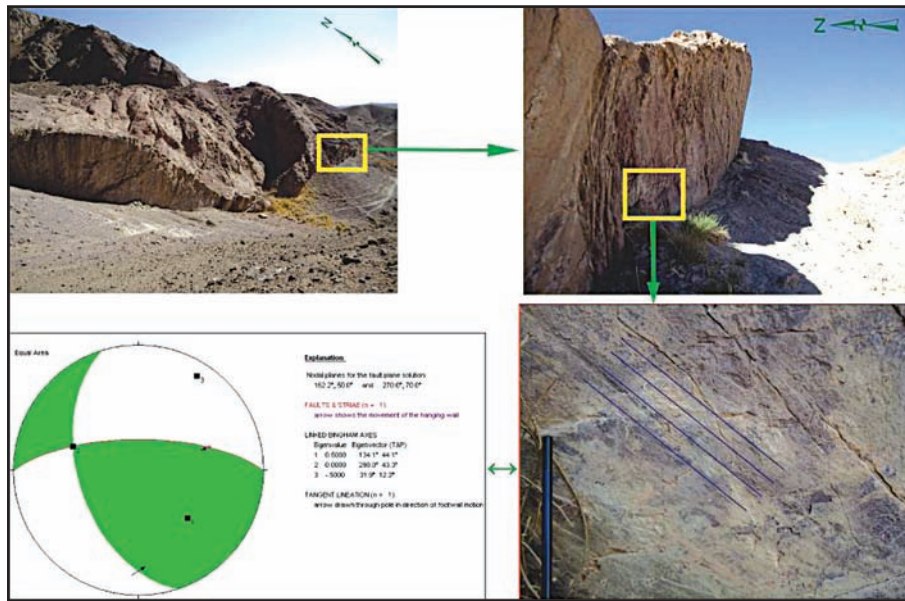


شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه. شماره‌ها مشخص‌کننده پلکان‌ها (R)، سکوها و سایر گسل‌هایی (F) هستند که برای تحلیل هندسی - جنبشی دویشته‌ها ضروری به نظر می‌آیند. واحدهای Eo ab Et، Mr. واحدهای تشکیل‌دهنده دویشته‌ها هستند. واحدهای شمالی‌تر و جنوبی‌تر این واحدها، متحمل چین‌خوردگی شده‌اند. خط AB مقطعی است که برش خاوری - باختری در امتداد آن تهیه شده است.

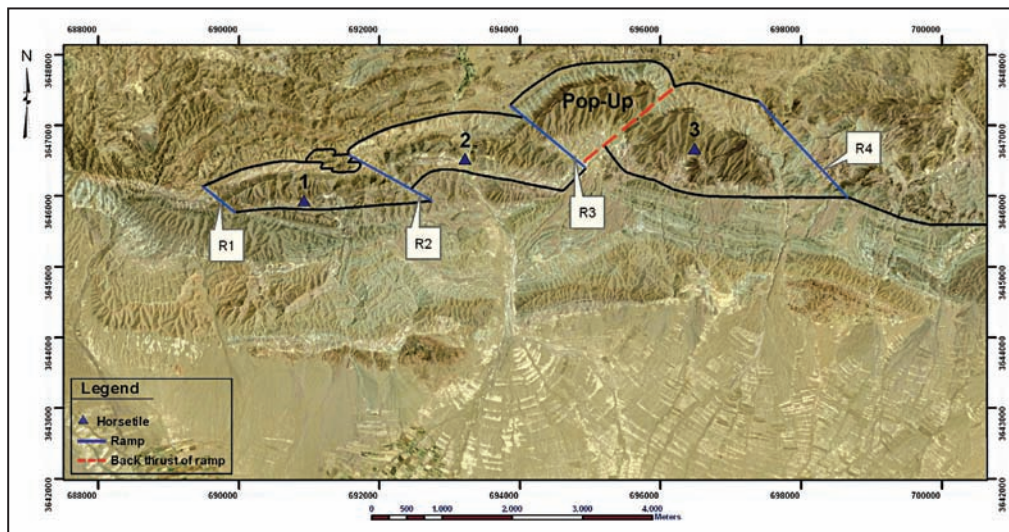


شکل ۴- الف) چین‌خوردگی با موقعیت سطح محوری N5W,76NE در امتداد گسل شکرآب. ب) گسل شکرآب در مرز بین واحد سفید (توف و مارن توفی) و قرمز (کنگولومرا، ماسه‌سنگ، مارن). پ) چین‌خوردگی با موقعیت سطح محوری N85W,55NE در امتداد گسل شکرآب (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).



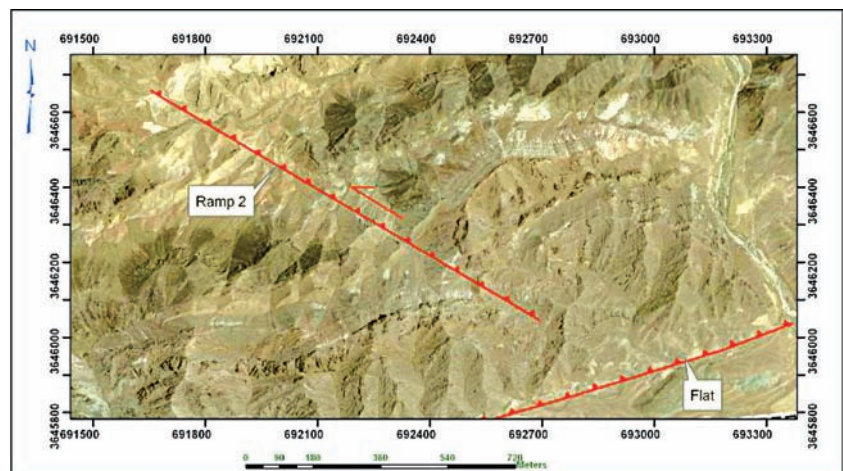


شکل ۵- راندگی کف مربوط به ساخت دم اسبی شماره (۳). از روی خشن لغزهای اندازه گیری شده، سازوکار سکوا، از نوع معکوس همراه با مؤلفه امتدادلغز چپ گرد است (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

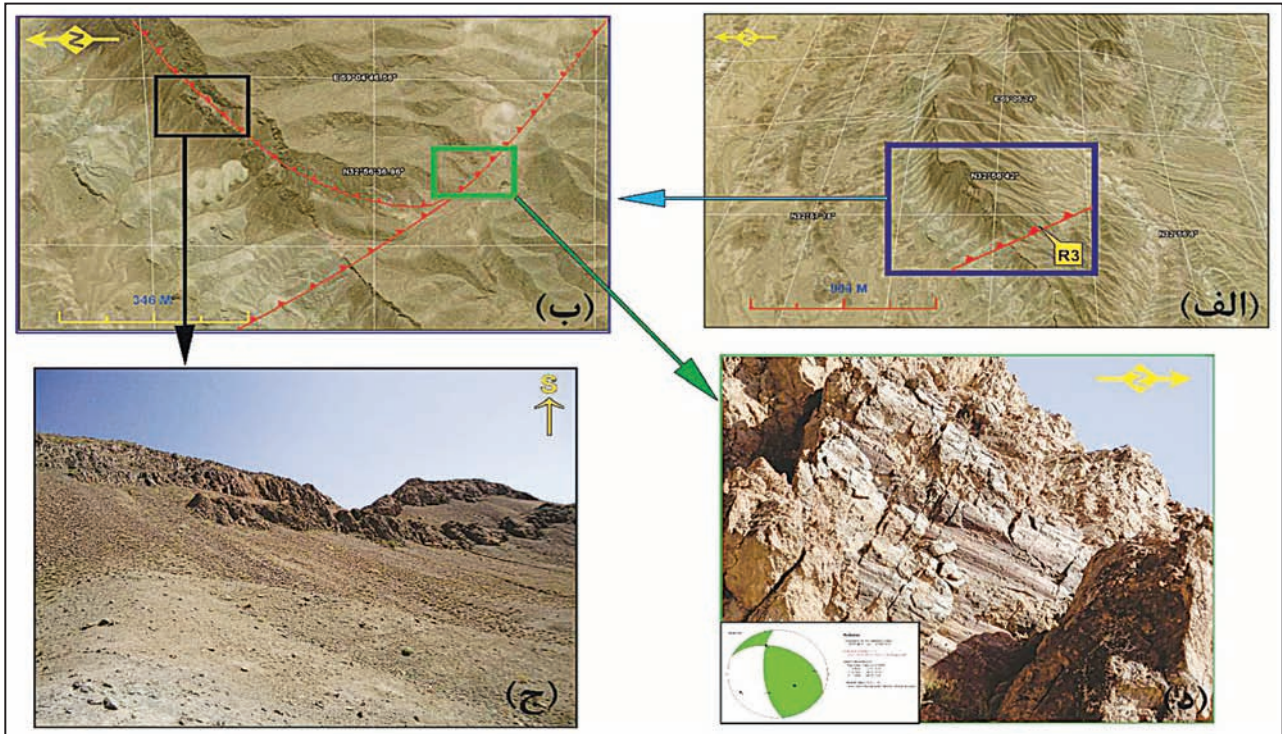


شکل ۶- تصاویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک‌برد با تفکیک مکانی ۶۰ سانتی‌متر) از ساختارهای دم اسبی موجود در منطقه. شماره‌ها، توالی تشکیل ساختارها را نشان می‌دهند (شماره ۱ قدیمی‌ترین ساخت و شماره ۳ جوان‌ترین ساخت دم‌اسبی است) (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

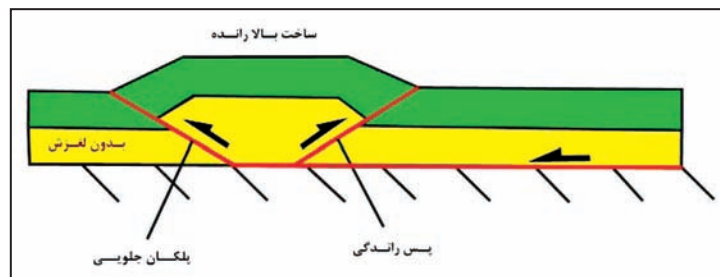
شکل ۷- تصاویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک‌برد با تفکیک مکانی ۶۰ سانتی‌متر) از پلکان R2. جابه‌جایی امتدادلغز بر روی تصویر ماهواره‌ای دیده می‌شود.



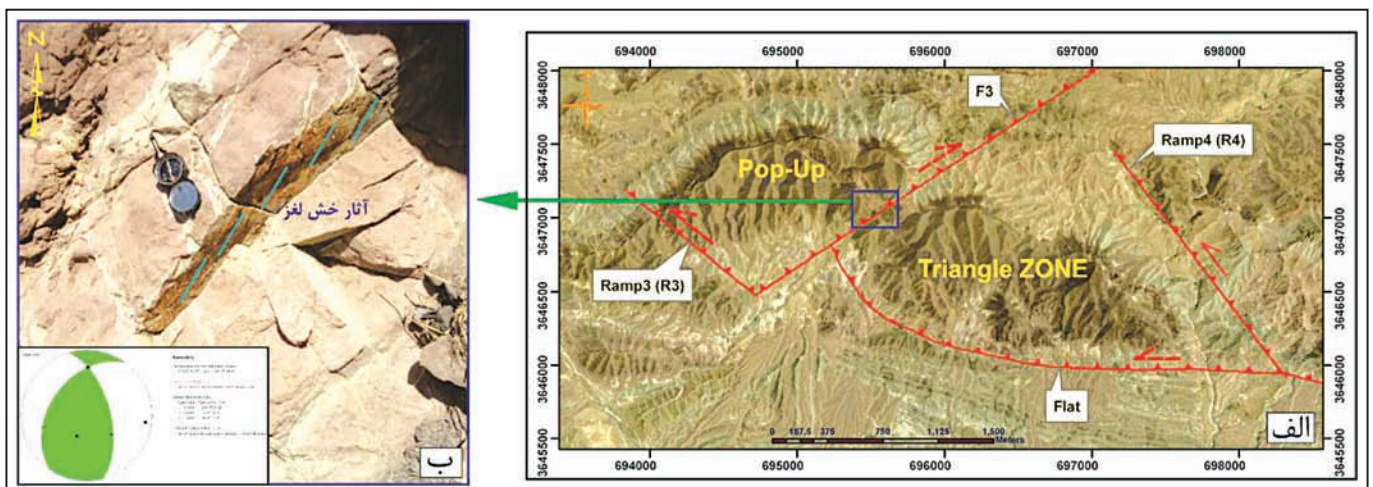




شکل ۸- الف) تصویر ماهواره‌ای گوگل از پلکان R3 ب) تصویر پلکان R3 از نمای نزدیک تر به همراه گسلی که در بخش بالایی واحد سنگی Eo قرار گرفته و باعث هر چه بیشتر رانده شدن این واحد سنگی بر روی واحدهای قدیمی تر شده است. د) تصویر خشن لغز مربوط به پلکان R3 (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

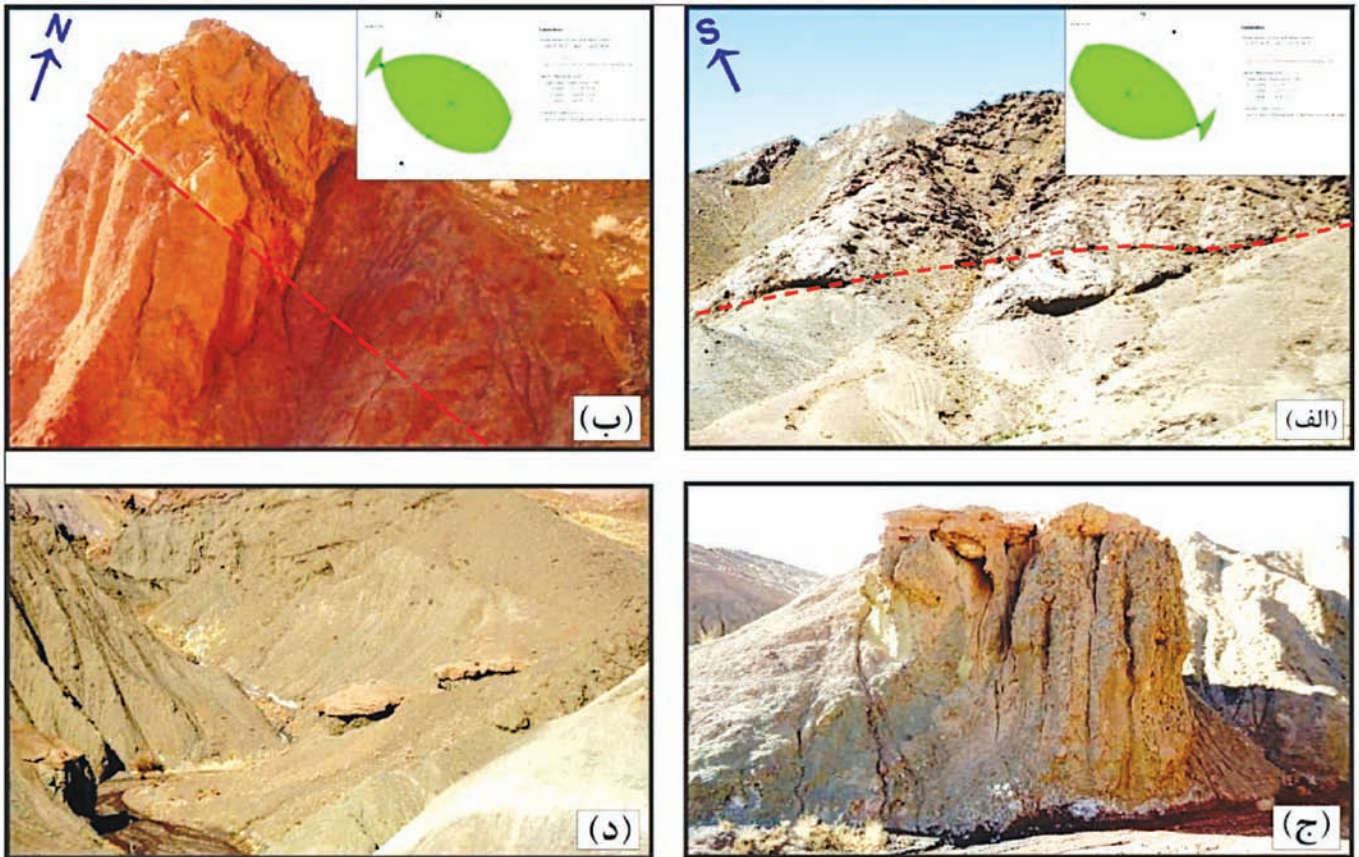


شکل ۹- ساخت بالا رانده در ارتباط با توسعه پلکان (Butler, 1982)

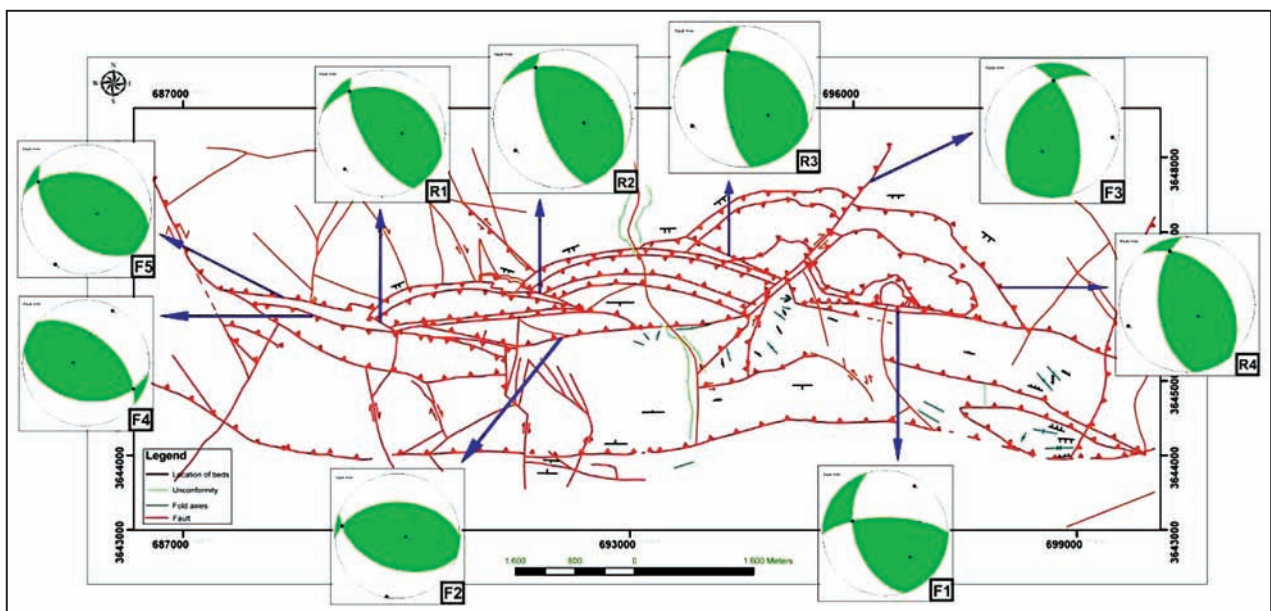


شکل ۱۰- الف) تصویر ماهواره‌ای گوگل از گسل F3 به همراه گسل‌های ایجاد کننده ساخت بالا رانده و ساخت پهنه سه گوش در حاشیه خارجی کوهستان ب) تصویر خشن لغز و استریوگرام مربوط به گسل F3 (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).



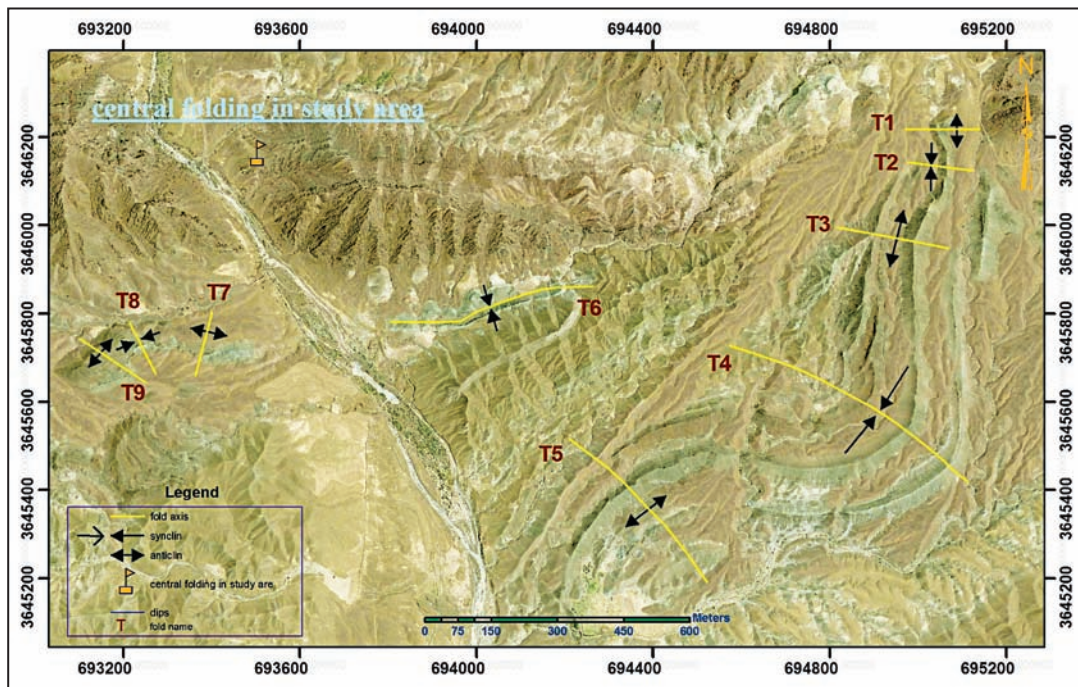


شکل ۱۱- الف) نمایی از گسل F4 به همراه استریوگرام مربوط به آن. ب) نمایی از گسل F5 به همراه استریوگرام. ج) پادگانه رودخانه‌ای در محدوده پهنه سه گوش منطقه. د) رودخانه‌های مآندری در بخش باختری منطقه.

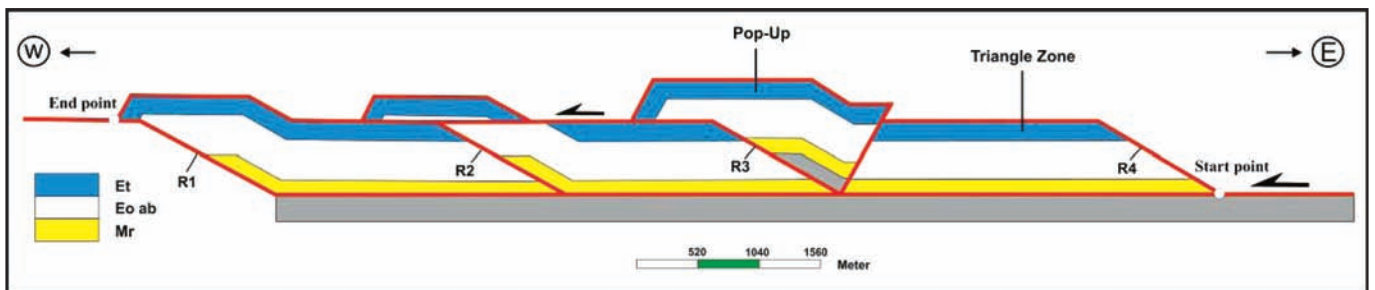


شکل ۱۲- نقشه ساختاری منطقه به همراه استریوگرام گسل‌های مورد بررسی

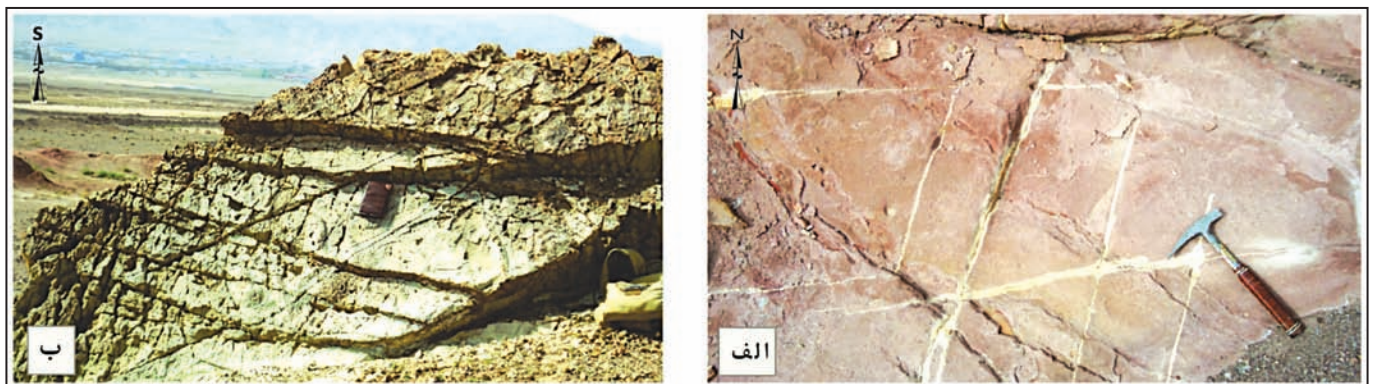




شکل ۱۳- تصویر ماهواره‌ای از چین خوردگی‌های مرکز منطقه مطالعاتی همراه با اثر محوری این چین‌ها (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

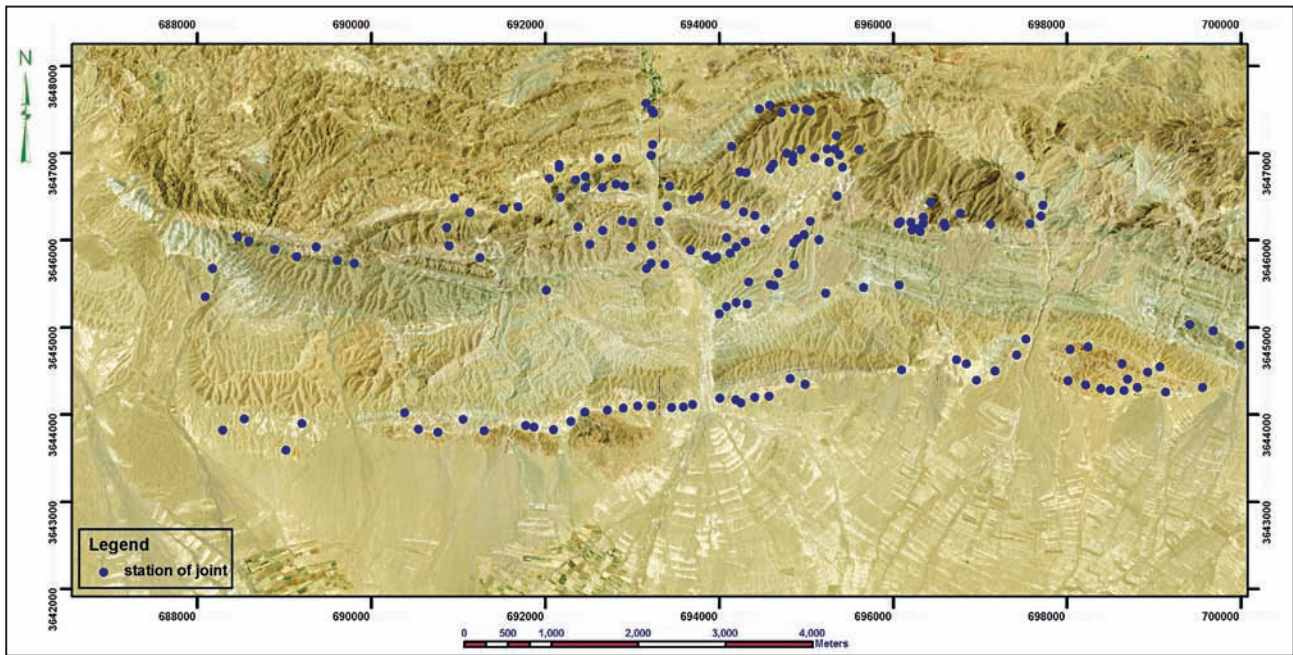


شکل ۱۴- مقطع خاوری - باختری بر روی دوپشته‌های منطقه

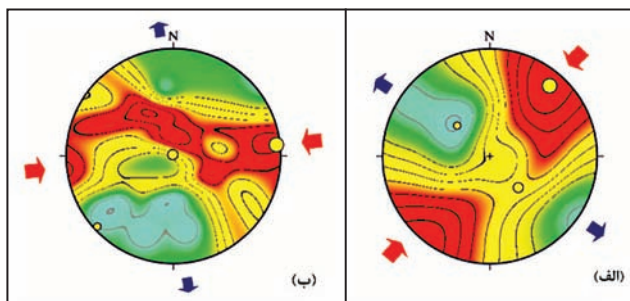


شکل ۱۵- نمونه‌ای از درزه‌های سیستماتیک در منطقه الف) درزه‌های سیستماتیک در واحد ائوسن. ب) درزه‌های سیستماتیک در واحد الیگومیوسن (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

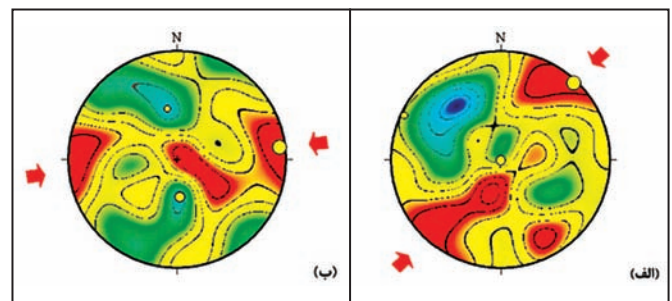




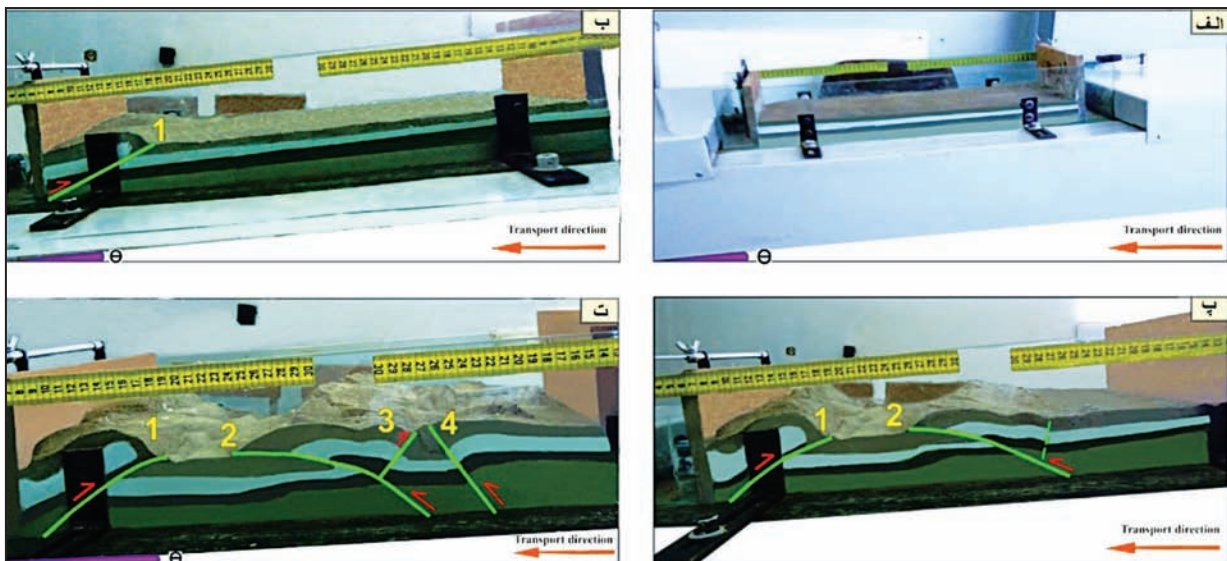
شکل ۱۶- موقعیت ایستگاه‌های برداشت درزه‌ها در واحدهای سنگی مختلف با سن متفاوت انجام گرفته است (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱۸- الف) محور تنش بیشینه (محور حداقل کرنش) در زمان اتوسن به کمک درزه‌های کششی (ب) محور تنش بیشینه (محور حداقل کرنش) در زمان الیگومیوسن به کمک درزه‌های کششی (با استفاده از نرم افزار T-Tecto).

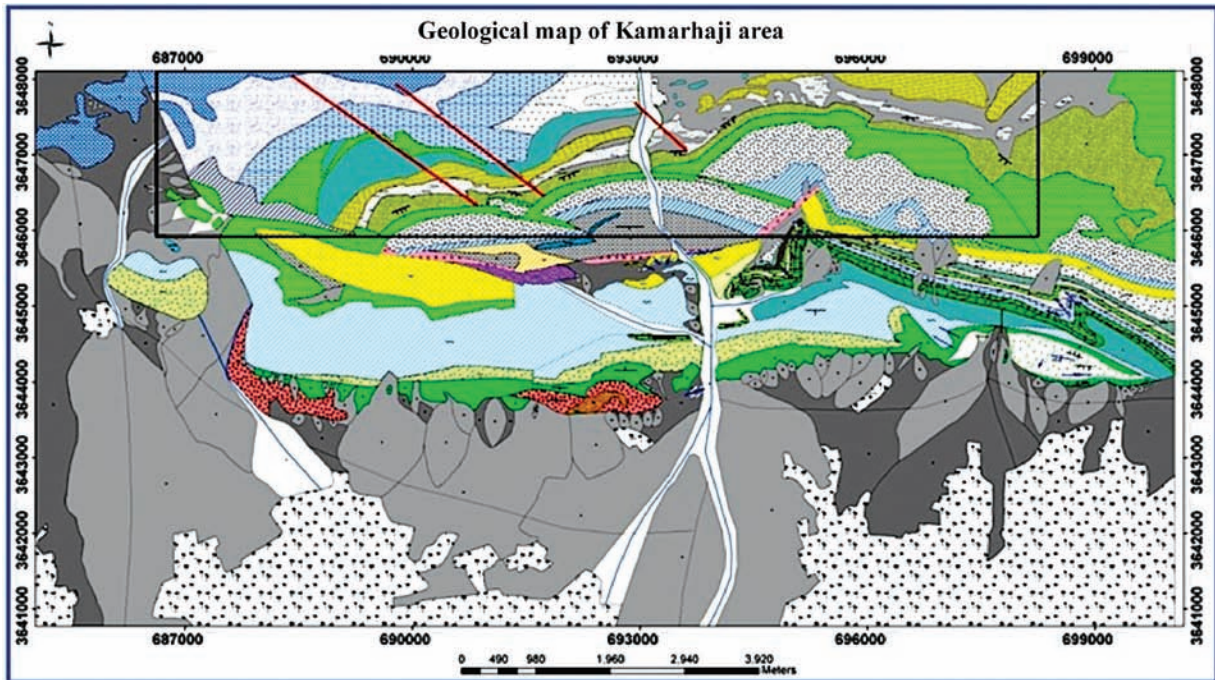


شکل ۱۷- الف) محور تنش بیشینه (محور حداقل کرنش) در زمان اتوسن به کمک درزه‌های هم‌یوغ (ب) محور تنش بیشینه (محور حداقل کرنش) در زمان الیگومیوسن به کمک درزه‌های هم‌یوغ (با استفاده از نرم افزار T-Tecto).

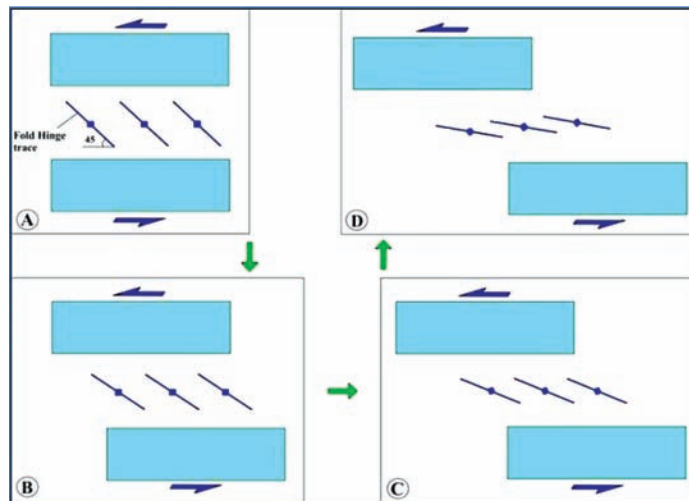


شکل ۱۹- مراحل انجام آزمایش. مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ است یعنی یک سانتی‌متر در مدل معادل ۲۰۰ متر روی زمین است. در آزمایش جهت انتقال یک‌طرفه در نظر گرفته شد. با حرکت ورقه متحرک با سرعت ثابت ۱۰ mm/min، توالی لایه‌ها بر روی سطح دکولمان توسط Under thrusting دگرشکل می‌شوند. توضیح مراحل انجام آزمایش در متن آورده شده است.

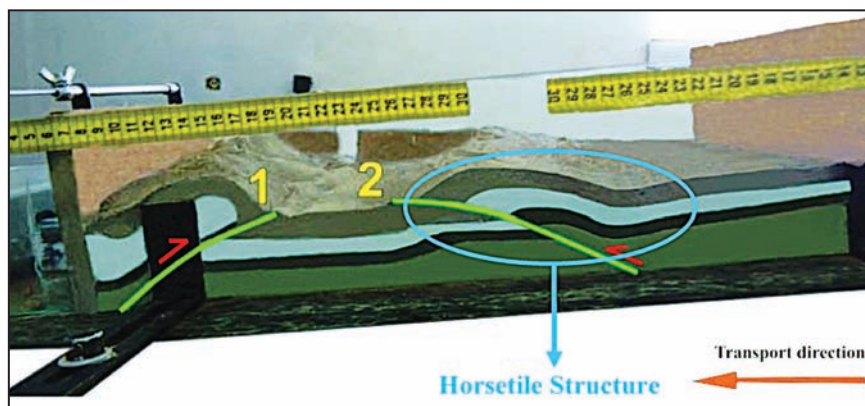




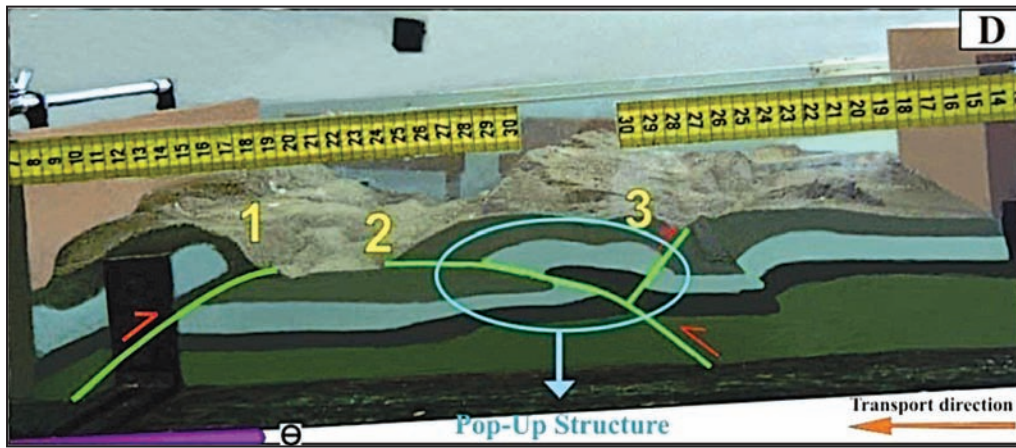
شکل ۲۰- کادر رسم شده بر روی نقشه، چین خوردگی‌های موجود در قسمت بالایی دوشسته‌ها را نشان می‌دهد. خطوط قرمز محورهای چین خوردگی می‌باشند.



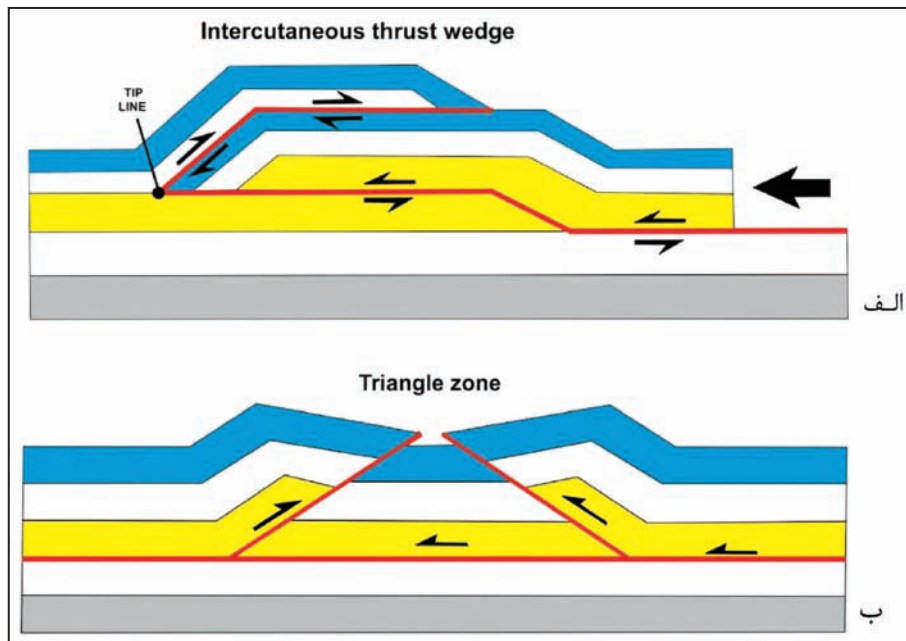
شکل ۲۱- تغییرات محورهای چین خوردگی در یک برش چپ گرد به موازات لایه‌ها (در نمای نقشه).



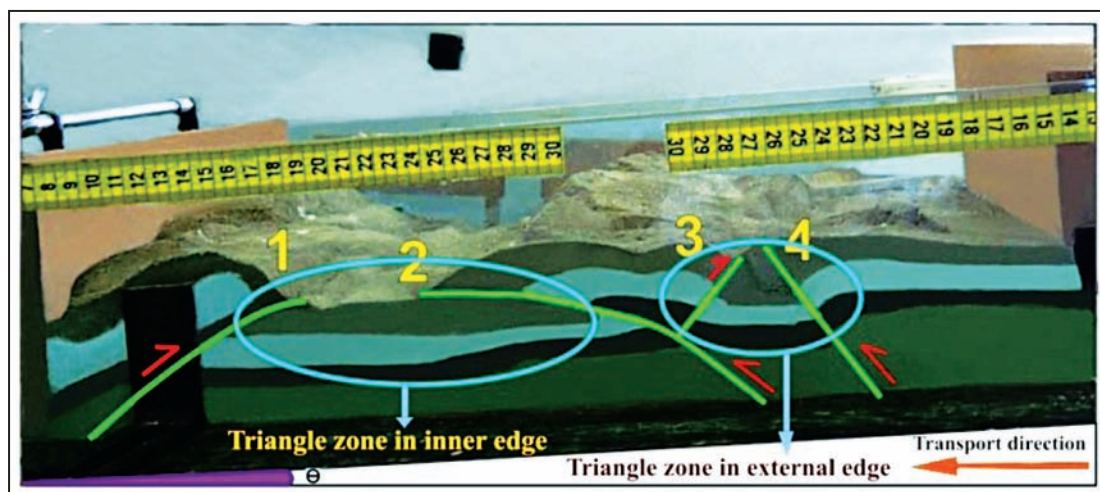
شکل ۲۲- مدل تشکیل ساخت دم‌اسبی شماره ۲، ۱ و ۳ منطقه مطالعاتی بر اساس سازوکار راندگی شماره دو، در قسمت (پ) آزمایش



شکل ۲۳- مدل تشکیل ساخت بالارانده موجود در منطقه بر اساس سازوکار راندگی شماره دو و پس راندگی آن (قسمت ت) آزمایش

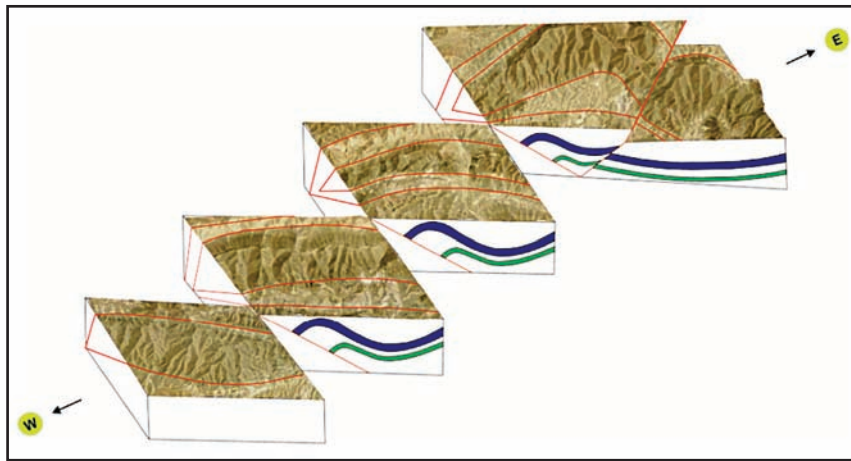


شکل ۲۴- انواع پهنه سه گوش (McClay, 1992).

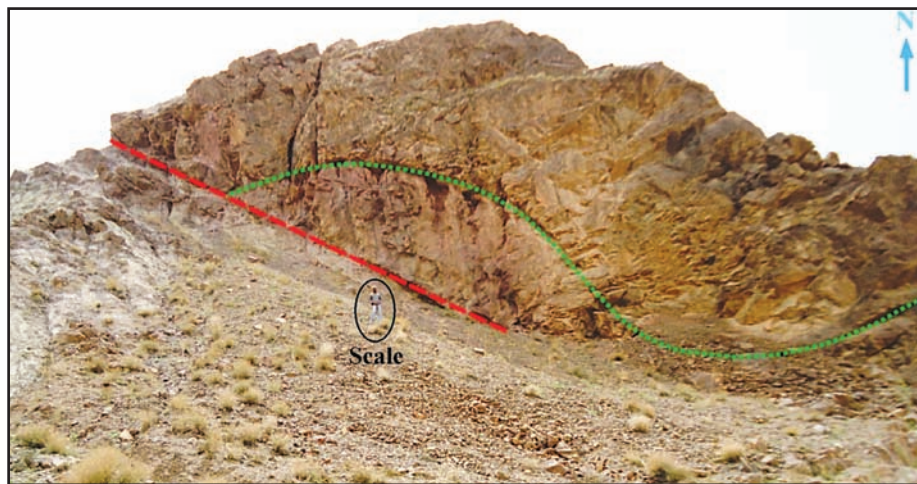


شکل ۲۵- پهنه سه گوش موجود در حاشیه داخلی و خارجی کوهستان





شکل ۲۶- بلوک دیاگرام ساختارهای دوپشته موجود در منطقه



شکل ۲۷- نمونه‌ای از چین خوردگی دوپشته‌های منطقه مطالعاتی در امتداد پلکان‌ها

جدول ۱- مختصات محور فشردگی به دست آمده بر اساس سطح محوری چین‌های T1-T5

نام چین	مختصات صفحه محوری چین		محور چین	مختصات محور فشردگی	
	Strike	Dip & Dip Direction		Trend	Plunge
T1	N90	89S	N270/40	N0	1
T2	N101	82SW	N276/35	N11	8
T3	N120	70S W	N281/42	N30	20
T4	N132	70SW	N300/31	N42	20
T5	N160	87NE	N158/25	N70	3

جدول ۳- جهت محورهای مختلف تنش در زمان‌های اوسن و الیگومیوسن بر اساس درزه‌های کششی

محورهای تنش در زمان الیگومیوسن	محورهای تنش در زمان اوسن
$\sigma_1=84/0$	$\sigma_1=40/7$
$\sigma_2=337/88$	$\sigma_2=138/46$
$\sigma_3=227/1$	$\sigma_3=313/14$

جدول ۲- جهت محورهای مختلف تنش در زمان‌های اوسن و الیگومیوسن به کمک درزه‌های هم‌یوغ

محورهای تنش در زمان الیگومیوسن	محورهای تنش در زمان اوسن
$\sigma_1=83/2$	$\sigma_1=42/0$
$\sigma_2=175/51$	$\sigma_2=157/89$
$\sigma_3=350/39$	$\sigma_3=295/1$

## کتابنگاری

- اشتوکلین، ی. و افتخارنژاد، ج. و هوشمندزاده، ع.، ۱۳۵۲- بررسی مقدماتی زمین شناسی درلوت مرکزی و شرق ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش شماره ۲۲، ۸۶ صفحه.
- اوهانیان، ت.، طاوسیان، ش. و افتخارنژاد، ج.، ۱۳۶۶- نقشه زمین شناسی ورقه بیرجند، مقیاس: ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران. آفانیاتی، س. ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ صفحه.
- بربریان، م.، ۱۳۶۲- دگرریختی قاره‌ای در فلات ایران زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، گزارش شماره ۵۲، ۳۰۷-۳۱۵.
- رشیدی، ا.، خطیب، م. م.، هیهات، م. و موسوی، م.، ۱۳۹۱- سازوکار تشکیل دوشسته های کوه کمر حاجی در شمال باختر بیرجند. فصلنامه زمین شناسی ایران، سال ششم، شماره ۲۲. ص ۳۱-۱۷.
- رشیدی، ا.، ۱۳۹۰- تحلیل هندسی - جنبشی عناصر ساختمانی کوه کمر حاجی (شمال غرب بیرجند - شرق ایران)، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه بیرجند، ۱۵۴ صفحه.
- اوشاک، ا. و میترا، گ.، ۱۳۸۱- روش های اساسی زمین شناسی ساختمانی، ترجمه پورکرمانی، م. و معتمدی، ح.، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۵۰۳ صفحه.
- هیهات، م. ر.، ۱۳۷۷- تحلیل ساختمانی کوه های شمال بیرجند، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۱۸ صفحه.

## References

- Abd El-Wahed, M.A. and Kamh, S.Z., 2010- Pan-African dextral transpressive duplex and flower structure in the Central Eastern Desert of Egypt. *Gondwana Research*, 474, 1-22.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrahi, M. and Qorashi, M., 2003- Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659-672.
- Bhattacharyya, K. and Mitra, G., 2009- A new kinematic evolutionary model for the growth of a duplex-an example from the Rangit duplex, Sikkim Himalaya, India. *Gondwana Research*, 16, 697-715.
- Booth, P.W.K., Brunson, G. and Shone, R.W., 2004- A duplex model for the Eastern Cape Fold Belt. *Gondwana Research*, 7, 211-222.
- Bulter, B. A., 1982- The terminology of structures in thrust belts. *Journal of Structural Geology*, 4, 239-245.
- Costa, E. and Vendevill, B.C., 2002- Experimental insights on the geometry and kinematics of fold and thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement. *Journal of structural geology*, 24, 1729-1739.
- Cembrano, J., Gonzalez, G., Arancibia, G., Ahumada, I., Olivares, V. and Herrera, V., 2005- Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex. *Tectonophysics*, 400, 105-124.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004- Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Koji, H.A. and Vendevill, B.C., 2003- The effect of décollement dip on geometry and kinematics of model accretionary wedges. *Journal of Structural Geology*, 25, 1445-1450.
- Lujan, M., Storti, F., Balanya, J.C., Crespo-Blanc, A. and Rossetti, F., 2003- Role of décollement material with different rheological properties in the structure of the Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach. *Journal of Structural Geology*, 25, 867-881.
- McQuarrie, N., 2004- Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 26, 519-535.
- McCall, G.J.H., 2003- A critique of the analogy between Archaean and Phanerozoic tectonics based on regional mapping of the Mesozoic-Cenozoic plate convergent zone in the Makran, Iran. *Precambrian Research*, 127, 5-17.
- McClay, K., 1992, "Thrust tectonics" pergamon press. 435p.
- Molinario, M., Guezou, J.C., Leturmy, P., Eshraghi, S.A. and Frizon de Lamotte, D., 2004- The origin of changes in structural style across the Bandar Abbas syntaxis, SE Zagros (Iran). *Marine and Petroleum Geology*, 21, 735-752.
- Nina, K., Serge, E.L., Jacques, M., Marc, A.G. and Timothy, J.R., 2002- Mechanical decoupling and basal duplex formation observed in sandbox experimental with application to the Western Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology*, 186, 29-42.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 134-156.
- Verges, J. and Munoz, J.A., 1990- Thrust sequences in the southern central Pyrenees. *Bull. Soc. Geol. France*, 2, 265-271.
- Walker, R.T. and Khatib, M. M., 2006- Active faulting in the Birjand region of eastern Iran. *Tectonics*, 25, 1-17.
- Woodcock, N.H. and Rickards, B., 2003- Transpressive duplex and flower structure: Dent Fault System, NW England. *Journal of structural geology*, 25, 1981-1992.



## Analysis of Structural Elements in Kamar Haji Mountain, NW Birjand

A. Rashidi<sup>1\*</sup>, M. M. Khatib<sup>2</sup>, M.R. Heyhat<sup>3</sup> & S. M. Moussavi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. Sc., Department of Geology, Birjand University, Birjand, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Geology, Birjand University, Birjand, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Birjand University, Birjand, Iran

Received: 2012 December 25

Accepted: 2013 May 20

### Abstract

In Kamarhaji Mountain, NW Birjand there are geological structures such as: duplex, pop-Up, triangle zone, flower structures, folding, etc. The duplexes in Kamarhaji Mountain have E-W trend. They are parallel to the Shekarab fault system. The Shekarab fault is a reverse fault with sinistral component located in the southern of the area; it is considered as one of the terminal branches of the Nehbandan fault. Based on the Geometric-Kinematic analysis, duplexes are of the horsetail structure type, which are set from the side view on each other. There are flower structures in the direction perpendicular to the horsetail structures, caused that the central layers of the duplex structures have the maximum height. Usually in the orogenic regions, the antithetic thrusts with motion opposite to the main thrust are observed. These thrusts are called back thrusts. The hanging wall blocks of two faults, thrust and its back thrust is called pop-Up structure. In addition, in some regions back thrust and new thrust created triangle zone. In duplexes of this Region, ramps have strike slip mechanism with Thrust component. The existing flats are non-horizontal and most of them have thrust mechanism with strike slip component. Due to the mechanism of flat, transfer direction is westward, and since the younger ramps are formed on the hanging wall of previous ramp (In other words, younger orientation is toward the hinterland) the formation of duplexes follows the break-back model. Since the physical model shows a better understanding of the formation model and the relationship between the structures, we have used of the experimental model. The results of experiments show a strong relationship between the geometry of the flat and the geometry of the structures of the area. Based on the paleostress studies and different trends of shortening of structures such as folding, duplexes, two deformational stages were identified. In the first stage, position of strain  $\lambda_3$  axis according to analysis of the conjugate joints, tension joints, and axial surface of folding is N42, 00, N40, 07, and is N38, 14 respectively. The amount of shortening in this stage of deformation is 41.46 %. Position of strain  $\lambda_3$  axis in the second stage of deformation according to analysis of the conjugate joints, tension joints, and E-W trend of thrusts is N83, 02, N84, 00, and N90E respectively. In this stage, strike-slip faults have been further developed. The shortening in this stage of deformation is 20.30 % and the amount of slip along the flats is 2640 meters. According to the geometric-kinematic analysis duplexes formed in the second stage of deformation, which was progressive.

**Keywords:** Birjand, Duplex, Experimental Model, Break Back, Pop-Up.

For Persian Version see pages 273 to 288

\*Corresponding author: A. Rashidi; E-mail: arashidi@birjand.ac.ir