

# تحلیل تاریخیچه برافرازش کوه‌های میشو با استفاده از دمازمان‌سنجی‌های دماپاین

مهدی بهیاری<sup>۱</sup>، محمد محجل<sup>۲</sup>، مهناز رضاییان<sup>۳</sup> و محسن مؤید<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی، زنجان، ایران

<sup>۴</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶

## چکیده

همتافت میشو در شمال باختر ایران برجستگی توپوگرافی شاخصی است که توسط گسل‌های شناخته شده‌ای همچون گسل شمال میشو و گسل جنوب میشو دربر گرفته شده و پی سنگ پرکامبرین دارای رخنمون وسیعی در این منطقه است. داده‌های ساختاری نشانگر این است که برافرازش کوه‌های میشو در ارتباط با گسل‌های پیرامون این گوه ساختاری است و گسل شمال میشو (NMF) و گسل جنوب میشو (SMF) به همراه گسل تسوج (TF) نقش چشمگیری در شکل‌گیری سیمای کنونی منطقه دارند. تلفیق داده‌های ساختاری با داده‌های دمازمان‌سنجی مشخص کرده که آغاز زمان برافرازش در بخش‌های مختلف این گوه ساختاری متفاوت است. نتایج تجزیه ۱۰ نمونه AFT (Apatite Fission Track) نشان می‌دهد که برش باختر میشو از اوایل پالئوسن  $72.7 \pm 10.6$  تا اواسط انوسن  $50.3 \pm 3.4$  بیشترین نرخ برافرازش را داشته است ولی در مناطق مرکزی و خاوری، بیشترین نرخ برافرازش زمین‌ساختی از اواسط میوسن  $22.5 \pm 1.6$  است. این تأخیر در برافرازش در مناطق مختلف میشو سبب عدم تطابق توپوگرافی و همچنین برونزد غیر یکنواخت پی سنگ بلورین در منطقه شده است. بررسی مقاطع همگن شده توپوگرافی کمینه و بیشینه نیز نشان می‌دهد که نرخ برافرازش در باختر منطقه بیشتر است. این اختلاف زمانی در نرخ برافرازش را می‌توان در ارتباط با عملکرد گسل‌های منطقه و چرخش بلوک‌ها درون پهنه‌های گسلی تفسیر کرد.

**کلیدواژه‌ها:** دمازمان‌سنجی، میشو، تحلیل تاریخیچه، گسل راندگی، آپاتیت Fission Track

\*نویسنده مسئول: محمد محجل

E-mail: mohajjel@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌نویس

ایران مرکزی دیده می‌شود. همچنین حرکت رو به باختر صفحه آاناتولی نسبت به اوراسیا این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع محدوده مورد مطالعه متأثر از زمین‌ساخت برخوردی میان صفحات عربی، اوراسیا و آاناتولی است. مرزهای کوه‌های میشو محدود به گسل‌های فعال و شناخته شده‌ای همچون گسل شمال میشو در بخش شمالی (NMF) و گسل جنوب میشو (SMF)، شبستر و تسوج (TF) در بخش جنوبی است (Stöcklin, 1968; Alavi, 1991).

جایگاه زمین‌ساختی این منطقه قابل مقایسه با ایران مرکزی و البرز نیست چرا که در هیچ یک از پهنه‌های یادشده بین نهشته‌های پیشرونده شروع سازندهای با سن پرمین و رسوبات پالئوزویک زیرین ناپوستگی زاویه‌دار مانند کوه‌های میشو و مورو دیده نمی‌شود و همچنین مجموعه مافیک و آلکالی‌گرانیت به سن فاز کوهزایی هرسنین که در کوه‌های مورو و میشو رخنمون دارند در هیچ یک از پهنه‌های یادشده شناخته نشده‌اند (مؤید و مؤذن، ۱۳۸۱). پی سنگ بلورین در این منطقه عمدتاً شامل سنگ‌ماسه‌ها با دگرگونی ضعیف، به همراه شیل‌ها و توف‌های دگرگون شده است که در مجموع سازند کهر خوانده می‌شود. تمامی واحدهای سازند کهر دگرگونی ضعیفی در حد رخساره شیبست سبز نشان می‌دهند. واحدهای مافیک و الترامافیک شامل گابرو، دونیت، پیروکسنیت درون واحد کهر تزریق شده‌اند. سن مجموعه گابرو با استفاده از تعیین سن زیرکن به روش اورانیم-سرب  $356/7 \pm 3/4$  میلیون سال همزمان با کوهزایی هرسنین تعیین شده است (Saccani et al., 2013). کل این مجموعه خود توسط دایک‌های دیابازی و یا توده‌های نفوذی گرانیتویدی قطع می‌شوند که متشکل از دو واحد مجزا هستند که یکی گرانیت‌های نوع S (گرانیت میشو) در بخش مرکزی منطقه و دیگری آلکالی‌گرانیت و سینیت در بخش خاوری منطقه است (شاهزیدی و همکاران، ۱۳۹۲). همه این مجموعه‌ها جایگاه چینه‌شناسی پیش از پرمین دارند.

برای ارزیابی اولیه برافرازش در محدوده مورد مطالعه نیمرخ‌های Swath یا مقاطع

در شمال باختر ایران در راستای گسل تبریز برجستگی توپوگرافی شاخصی وجود دارد که در زمین‌شناسی ایران با عنوان کوه‌های میشو شناخته می‌شود (افتخار نژاد و همکاران، ۱۳۷۰). با توجه به تنوع و پیچیدگی‌های سنگ‌شناسی این منطقه با عنوان همتافت میشو از این مجموعه یاد می‌شود. همچنین با عنایت به فعال بودن گسل‌های منطقه از دیرباز فرگشت ژئودینامیکی و ساختاری آن مورد توجه بوده است (Sengor et al., 1984; Saccani et al., 2013; Djamour et al., 2011; Siakhali Moradi et al., 2011; Kalvoda & Babek, 2010). برافرازش کوه‌های میشو در پهنه باریک با پهنای ۲۰ کیلومتری رخ داده است و ارتفاع از ۱۲۰۰ متر در دامنه به بیش از ۳۲۰۰ متر در خط‌الرأس کوه میشو می‌رسد. در نتیجه برافرازش و فرسایش مداوم، واحدهای سنگ‌چینه‌ای کهن از ژرفا حرکت می‌کنند و به سطح نزدیک تر می‌شوند. این واحدها در ژرفا در دمای بیشتری قرار داشته‌اند و با نزدیک شدن به سطح زمین از گرمای آنها کاسته می‌شود. بنابراین این کاهش دما که در نتیجه برافرازش زمین‌ساختی است، در واحدهای سنگ‌چینه‌ای ثبت می‌شود.

در این پژوهش تلاش بر این است که ابتدا با تحلیل ساختاری منطقه سازوکار برافرازش در این منطقه مشخص شود و سپس با استفاده از ترموکرونومترهای دما پاین تغییرات زمین‌ساختی نزدیک به سطح بررسی و برای اولین بار در این منطقه از تلفیق داده‌های ساختاری و داده‌های ترموکرونومتری برای تحلیل فرگشت زمانی و مکانی این منطقه استفاده شود.

## ۲- جایگاه زمین‌شناسی و زمین‌ساختی

همتافت میشو کوه‌های بلند در شمال باختر ایران با راستای خاوری-باختری مرز دو حوضه آبریز ارس و دریاچه ارومیه را شکل می‌دهد. زمین‌ساخت کنونی ایران تحت تأثیر همگرایی صفحه عربی و صفحه اوراسیا قرار دارد، این همگرایی بیشتر به‌صورت کوتاه‌شدگی در پهنه زاگرس و دگربرختی‌ها و گسل‌های راستالغز در

مجموعه پرکامبرین در این منطقه که شامل واحدهای کهر و گرانتیت نفوذ کرده در آن هستند، توسط گسل شمال میشو N080E/70SE بریده و روی ماسه‌سنگ‌های سرخ و مارن‌های میوسن رانده می‌شوند. در بخش جنوبی نیز مجموعه گسل‌های جنوب میشو سبب راندگی واحدهای مزوزوییک روی نهشته‌های با سن سنوزوییک شده‌اند (شکل ۴).

برش 'CC با راستای شمالی- جنوبی توده‌های گابرویی و گرانتیت‌های آلکالن منطقه را قطع می‌کند. در این برش از گسترش واحدهای ماسه‌سنگی پرکامبرین کاسته شده است و آهک‌های پریمین ستبرای قابل ملاحظه‌ای دارند. در این برش در مرز گسل شمالی، ساختارهای مرتبط با گسل همچون چین‌های گسلی فراوان دیده می‌شوند (شکل ۵). گرایش چین‌های مرتبط با گسل به سوی جنوب و هماهنگ با گسل شمال میشو است.

#### ۴- نمونه برداری و روش کار

افرازش و فرسایش در منطقه سبب بروزند پی‌سنگ بلورین در مرکز کوه‌های میشو شده است. وضعیت مناسب سنگ‌چینه‌ای و توپوگرافی در این کوه‌ها این امکان را ایجاد می‌کند که با استفاده از ترموکرونومترهای مختلف، نرخ برافرازش را برآورد کرد. همچنین می‌توان ارتباط برافرازش با فعالیت‌های گسل‌های فعال منطقه و روند نرخ تغییرات برافرازش نسبت به زمان و مکان را تعیین کرد.

در اثر عبور سنگ از یک ایزوترم خاص، برخی از رادیوایزوتوپ‌های ناپایدار همچون اورانیوم موجود در سنگ دچار واپاشی و آثار آن به صورت رادیوایزوتوپ‌های نوزاد پایدار و یا به هم ریختگی در شبکه بلوری (Fission Track) ثبت می‌شود (Reiners, 2005). رادیوایزوتوپ‌های نوزاد یا به هم ریختگی که در شبکه بلوری کانی‌هایی همچون آپاتیت به وجود می‌آید، بسته به نوع کانی، از ایزوترم‌های خاص به بعد حفظ می‌شود (Gallagher et al., 1998; Tagami & O'Sullivan, 2005). این رو با تعیین زمان عبور نمونه از این ایزوترم‌ها می‌توان تاریخچه دمایی آن را به دست آورد. با توجه به افزایش دما از سطح به ژرفای زمین، می‌توان اطلاعات تاریخچه دمایی سنگ را تبدیل به تاریخچه ساختاری آن کرد. بدین ترتیب می‌توان زمان آمدن سنگ از ژرفا به سطح را تعیین کرد (Ehlers & Farley, 2003). در رابطه با پی‌سنگ‌های بلورین که کیلومترها از محل اولیه خود افرازش یافته و بالا آمده‌اند، ترموکرونولوژی روشی است که می‌تواند زمان حرکت سنگ از ژرفا به سمت سطح زمین را تعیین کند (Braun et al., 2006). سن نمونه به میزان تجمع محصولات ناشی از واپاشی و میزان محصولات ناشی از واپاشی نیز به تاریخچه دمایی وابسته است. تاریخچه دمایی نیز تحت تأثیر دو عامل تاریخچه حرکت سنگ از سطح به ژرفا (Exhumation) و ساختار دمایی سنگ کره وابسته است. به عبارتی دیگر هرچه روبرداری (Exhumation) سریع‌تر باشد، میزان تجمع محصولات ناشی از واپاشی کمتر است. این دو پدیده دمایی نیز با یکدیگر مرتبط هستند و همدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

به منظور تحلیل تاریخچه دمایی محدوده مورد مطالعه، ۲۱ نمونه برای جداسازی کانی‌های سنگین مورد استفاده قرار گرفت که در پایان ۱۰ نمونه برای تجزیه‌ها استفاده شد؛ زیرا در دیگر نمونه‌ها کانی‌های سنگین جدا شده یا بدون آپاتیت بودند یا کیفیت آپاتیت‌ها پایین بود و ترک‌ها در نمونه قابل شمارش نبودند. نمونه برداری در ۳ برش انجام شده است و هر نمونه در برش قائم ۱۰۰ متر با هم اختلاف ارتفاع دارند. برش اول که نمونه‌های باختر میشو (برش AA) را شامل می‌شود (شکل ۶) از فرودپواره گسل شمال میشو با نمونه mar916 آغاز شده و تا ارتفاع ۳۱۱۰ متر با نمونه 951 ادامه داشته است؛ این نمونه‌ها به غیر از 916 از پی‌سنگ بلورین پرکامبرین منطقه بوده و متعلق به ماسه‌سنگ‌های سازند کهر است. ماسه‌سنگ‌ها در این منطقه بیشتر ریزدانه است. کل نمونه‌های این برش ۵ نمونه است. برش دوم بخش مرکزی کوه

توپوگرافی همگن شده تهیه شد. زمانی که مقطع توپوگرافی به صورت عادی تهیه می‌شود این مقطع به صورت تصادفی نشانگر اطلاعات ارتفاعی است که خط مورد نظر عوارض ارتفاعی را قطع می‌کند، احتمال اینکه این خط نتواند نشانگر وضعیت واقعی توپوگرافی در منطقه باشد وجود دارد؛ اما زمانی که از نیمرخ‌های همگن شده استفاده شود ابتدا محدوده مور مطالعه همگن و سپس نیمرخ تهیه می‌شود. این نیمرخ‌ها به صورت گسترده در مطالعاتی که برافرازش فعال توپوگرافی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد استفاده و به صورت کمینه، بیشینه و میانگین تهیه می‌شود. هر چقدر اختلاف نیمرخ همگن کمینه و بیشینه در یک منطقه بیشتر شود نشانگر نرخ بالاتر برافرازش در منطقه است (Fielding et al., 1994; Montgomery, 2001; Mitchell & Montgomery, 2006).

در منطقه مورد مطالعه در مناطقی که نقشه‌های ساختاری تهیه شده نیمرخ‌های همگن در محدوده یک کیلومتری پیرامون نیمرخ‌های توپوگرافی استخراج شد بررسی نیمرخ‌های همگن در سه مقطع AA', BB', CC' (شکل‌های 2a, 2c, 2d) نشان می‌دهد که در نیمرخ AA' بیشترین اختلاف میان نیمرخ همگن کمینه و بیشینه وجود دارد، که این تفاوت می‌تواند به علت اختلاف نرخ برافرازش در این مقطع یا به تفاوت در سنگ‌شناسی مربوط باشد (Telbisz et al., 2013).

#### ۳- تحلیل ساختاری محدوده مورد مطالعه

به منظور تحلیل ساختاری منطقه، ۶ برش ساختاری با راستاهای تقریبی شمالی- جنوبی رسم و استفاده شده است که از این ۶ برش، ۳ برش اصلی بوده و ۳ برش دیگر به صورت فرعی انتخاب شده است. هدف از رسم این برش‌ها انجام تحلیل‌های دقیق‌تر و رفع برخی ابهامات در برش‌های اصلی است. اولین برش (AA') در میشو باختری با راستای تقریبی شمال خاور- جنوب باختر قرار دارد؛ این برش شامل واحدهای رسوبی است. در این برش در دامنه شمالی مرز میان ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده کهر با ماسه‌سنگ‌های سرخ همراه با میان‌لایه‌های مارنی میوسن توسط گسل شمال میشو با راستای N055E/60 SE مشخص می‌شود. این پهنه گسلی همراه با افرازش گسلی ۱۰ متری دیده می‌شود (شکل ۲- a). درون سازند کهر در هسته کوه چندین گسل درون‌سازندی وجود دارد که در ستبرشدگی سازند کهر در منطقه نقش داشته‌اند. در این برش مرز میان واحدها همگی راندگی است و سبب رانده شدن واحد سنگی دیرین روی واحدهای سنگی جوان می‌شود. در دامنه جنوبی گسل‌های بسیاری وجود دارد که تراکم بیشتر نشان می‌دهند. شاخص‌ترین گسل در دامنه جنوبی، گسل جنوب میشو (SMF) است که سازوکار راندگی و شیب صفحه گسل 50NE دارد. این گسل در محل برش ساختاری (AA') سبب راندگی آهک‌های ستبرلایه پریمین روی واحدهای فیلیسی کرتاسه می‌شود (شکل ۲- b) و در برخی موارد ماسه‌سنگ‌های ریزدانه سازند باروت را روی کرتاسه رانده است. از دیگر ساختارها در این برش می‌توان به دگرگونی اشاره کرد که سبب توسعه برگوارگی ضعیفی هم‌راستا با جهت لایه‌بندی عمومی با مشخصات 30/180 در هسته بلورین پرکامبرین کهر شده است. توسعه این برگوارگی در بخش‌های شیلی مشخص‌تر است.

از دید زمانی این برش با واحدهای سنگ‌چینه‌ای پرکامبرین کهر آغاز می‌شود و تا کواترن ادامه می‌یابد. گفتنی است که واحدهای سنگ‌چینه‌ای در این برش به صورت پیوسته نیست و نبودهای چینه‌ای بزرگی در پالئوزوییک و مزوزوییک دیده می‌شود.

برش ساختاری BB' با راستای شمالی- جنوبی در بخش جنوبی دارای عناصر ساختاری مشابه برش AA' است. اما در بخش شمالی، نفوذ توده گرانتیتی میشو سبب تفاوت‌هایی در این بخش شده است. در مرز میان واحد گرانتیتی و ماسه‌سنگ‌های کهر، آثار دگرگونی ناشی از نفوذ این توده در سازند کهر به صورت هورنفلس‌های کوردپریت‌دار در دره‌هایی که این مجموعه را قطع می‌کند، دیده می‌شود. کل

## ۶- بحث و نتیجه گیری

تلفیق داده‌های ترموکرونومتری آپاتیت با داده‌های ساختاری برای اولین بار در منطقه میشو امکان تفسیر زمانی- مکانی تکامل زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه را به وجود آورد. برداشت‌های ساختاری انجام شده نشان داد که آرایش هندسی دو دسته گسل در شمال و جنوب میشو با سوی شیب عکس هم و تشکیل حوضه فشارشی سبب برافرازش منطقه شده است. همچنین گسلش، امتداد لایه‌بندی‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به سن‌های سرد شدگی به دست آمده به نظر می‌رسد تنش وارد از صفحه عربی که در اثر بسته شدن نوتتیس رخ داده و ادامه همگرایی آن با صفحه ایران در شکل‌گیری این حوضه فشارشی مؤثر بوده است. با توجه به اینکه گسل شمال میشو خود قطعه‌ای از گسل بنیادین شمال تبریز است. فرایش در میشو اهمیت زیادی دارد زیرا نشان‌دهنده نرخ جابه‌جایی بالا در گسل تبریز است که روی صفحات راندگی گسل شمال میشو منتقل می‌شود.

شواهد چینه‌نگاری، ترموکرونومتری و ژئومورفولوژیکی نشان می‌دهد نرخ برافرازش در همه طول هم‌تافت میشو یکنواخت نیست. از دید چینه‌نگاری در بخش مرکزی در هسته میشو سازندهای همچون سازندهای پرمین در اثر فرایش کاملاً حذف شده است. اما در بخش خاوری به صورت ناپیوسته آهک‌های پرمین (سازند روته)، سازند کهر با سن پرکامبرین را می‌پوشاند. همچنین گسترش سازند کهر نیز از باختر به خاور کم می‌شود. البته افزون بر شواهد چینه‌نگاری شواهد ساختاری نیز نشان از نرخ برافرازش بالا در بخش باختری منطقه دارد. برای نمونه افزایش گسلی که در راستای گسل شمال میشو در اثر جابه‌جایی این گسل شکل گرفته است، به صورت سیستماتیک از باختر به خاور کاسته می‌شود. در باختر محدوده در راستای این گسل آبشارهای مهمی چون آبشار پیربالا و عیش‌آباد شکل گرفته است که با حرکت به سوی خاور از ارتفاع آبشارها کاسته می‌شود. داده‌های ترموکرونومتری نیز هم جهت با داده‌های زمین‌شناختی است. در بخش باختری مهم‌ترین فاز فرایش از پالئوسن تا ائوسن است در حالی که با حرکت به خاور از سن سردشدگی کاسته می‌شود. بررسی‌های شاخص‌های جوان ژئومورفیک و منحنی‌های هیپوسومتری تکامل حوضه نشان می‌دهد در عهد حاضر نیز میزان افزایش و فرسایش در میشو باختری بیش از میشو خاوری است (Behyari et al., 2014). شواهد یادشده به همراه عدم تطابق توپوگرافی نشانگر فرایش نامتقارن هم‌تافت میشو است. با توجه به وسعت محدوده و یکسان بودن شرایط آب‌وهوایی احتمال ارتباط فرایش نامتقارن به فرایندهای فرسایشی کم است و به نظر می‌رسد فرایش نامتقارن در محدوده مورد مطالعه ریشه در ساختار منطقه و چرخش بلوک‌ها در پهنه گسلی دارد. در پایان می‌توان فرایش زمانی و مکانی هم‌تافت میشو و عوامل مؤثر بر آن را به‌صورت زیرجمع‌بندی کرد: گسل‌های شمال میشو و جنوب میشو به همراه گسل تسوج نقش بنیادین در برافرازش منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. آرایش این گسل‌ها سبب برافرازش کوه‌های میشو شده است. اگر چه در بیرون از گوه ساختاری میشو در بخش شمالی، شواهد روشنی از حرکات امتدادلغز مربوط به گسل شمال میشو دیده می‌شود ولی درون کوه‌های میشو و همچنین دامنه جنوبی سازوکار چیره جابه‌جایی گسل‌ها راندگی است. بررسی داده‌های ساختاری به همراه برش‌های عرضی، کمترین و بیشترین توپوگرافی در باختر، مرکز و خاور میشو را نشان می‌دهد که میزان برافرازش در برش‌های مختلف متفاوت با یکدیگر است. اختلاف زیاد نمودار کمترین توپوگرافی با نمودار بیشترین توپوگرافی همگن شده در برش باختری AA' نشان از نرخ بالای برافرازش در این منطقه دارد.

داده‌های ترموکرونومتری آپاتیت نشان می‌دهد که شروع پالس زمین‌ساختی برش باختری از اوایل پالئوسن تا اواسط ائوسن در حدود  $50.3 \pm 3.4$  و در برش مرکزی تا اواسط میوسن  $22.5 \pm 1.6$  بوده است. بنابراین آغاز زمان برافرازش در باختر از دید زمانی دیرین‌تر است.

میشو را قطع می‌کند (برش BB'). نمونه‌ها در این برش از گرانیت میشو برداشته شده است. اختلاف ارتفاع قائم میان نمونه‌ها در این برش نیز  $100$  متر است و در مجموع  $3$  نمونه از این برش در تجزیه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. سومین برش (برش CC') در خاور میشو قرار دارد و از گرانیت‌های آلکالی صورتی رنگ عبور می‌کند. نمونه‌های این برش در بسیاری موارد بدون آپاتیت و بیشتر کانی‌های سنگین آنها شامل زیرکن‌های ریز بودند. در پایان  $2$  نمونه از این برش قابل شمارش و تعیین سن بود. برای همه نمونه‌ها با استفاده از آسیاب فکی و آسیاب دیسکی خردایش اولیه در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس انجام شد و ادامه روند جداسازی کانی‌های سنگین با استفاده از میز آب، جدایش مغناطیسی توسط فرانتز و جدایش شیمیایی در دو مرحله توسط SPT و DI طبق دستورالعمل استاندارد در دانشگاه پوتسدام در کشور آلمان صورت گرفت.

## ۵- نتایج ترموکرونومتری

پس از شمارش ترک‌ها در نمونه‌های گردآوری شده از  $3$  برش باختر، مرکز و خاور میشو، نتایج روی نمودار سن- ارتفاع پیاده شد. ابتدا همه داده‌های  $3$  برش روی یک نمودار جانمایی شد. شکل نمودار پیچیده بود و روند خاصی برای برافرازش در منطقه را پیشنهاد نمی‌کرد. بنابراین این فرضیه که در این سه برش نرخ برافرازش متفاوت از یکدیگر باشند، تقویت شد. در مرحله بعد داده‌های هر برش به‌صورت جداگانه روی نمودار سن- ارتفاع رسم شد. نکته بعدی در مورد آزمون مربع  $k$  است که تقریباً نصف نمونه‌ها این آزمون را رد نکردند؛ یعنی نتایج نمونه‌ها به‌صورت همگرا نیست. بنابراین برای بررسی بیشتر این موضوع، فاکتور اندازه دهانه ترک روی آپاتیت (Dpar) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج این تجزیه نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که این آزمون را نداشته‌اند این فاکتور به‌صورت خوشه‌های پراکنده است که به دلیل رسوبی بودن نمونه‌های اولیه و این ناشی از تفاوت در منشأ آپاتیت در سنگ رسوبی است. سنی که در جدول برای هر نمونه ارائه شده سن مرکزی هر نمونه است. برای بررسی پراکندگی سنی، بلور نمونه‌ها رسم شده است (نمودارهای شکل ۳). بررسی این نمودارها نشان می‌دهد همانگونه که اندازه دهانه ترک‌ها به‌صورت پراکنده است، این پراکندگی در سن بلورها دیده می‌شود. البته این پراکندگی با توجه به رسوبی بودن برخی از نمونه‌ها دور از انتظار نیست.

– **برش باختری میشو:** نمونه mar916 با سن  $19.7 \pm 2.2$  جوان‌ترین نمونه این برش است و تحلیل فاکتور Dpar، گستره وسیعی را نشان می‌دهد و نشان از منشأ مختلف دانه‌های آپاتیت در این نمونه دارد. نمونه 951 آخرین نمونه این برش بوده و دارای سن  $72.7 \pm 10.6$  است. در این برش پالس زمین‌ساختی از اوایل پالئوسن تا اواسط ائوسن در حدود  $50.3 \pm 3.4$  دیده می‌شود و پس از آن از فعالیت زمین‌ساختی در این برش کاسته می‌شود.

– **برش مرکزی میشو:** در این برش نمونه‌ها از دو نوع گرانیت متفاوت تیره S type و روشن I type هستند. کانی سنگین در این نمونه‌ها بیشتر زیرکن است و با توجه به اینکه آپاتیت‌ها در این گرانیت‌ها به‌صورت بلورهای سوزنی طویل هستند، بیشتر آپاتیت‌ها به هنگام آسیاب کردن نمونه‌ها خرد شدند. و در برخی از موارد با توجه به فراوانی زیرکن در مقاطع، نمونه‌ها قابل شمارش نبودند.

بررسی داده‌ها در این برش نشان می‌دهد که از اواسط میوسن  $22.5 \pm 1.6$  نرخ برافرازش در منطقه بالا بوده است و پالس زمین‌ساختی نشان می‌دهد.

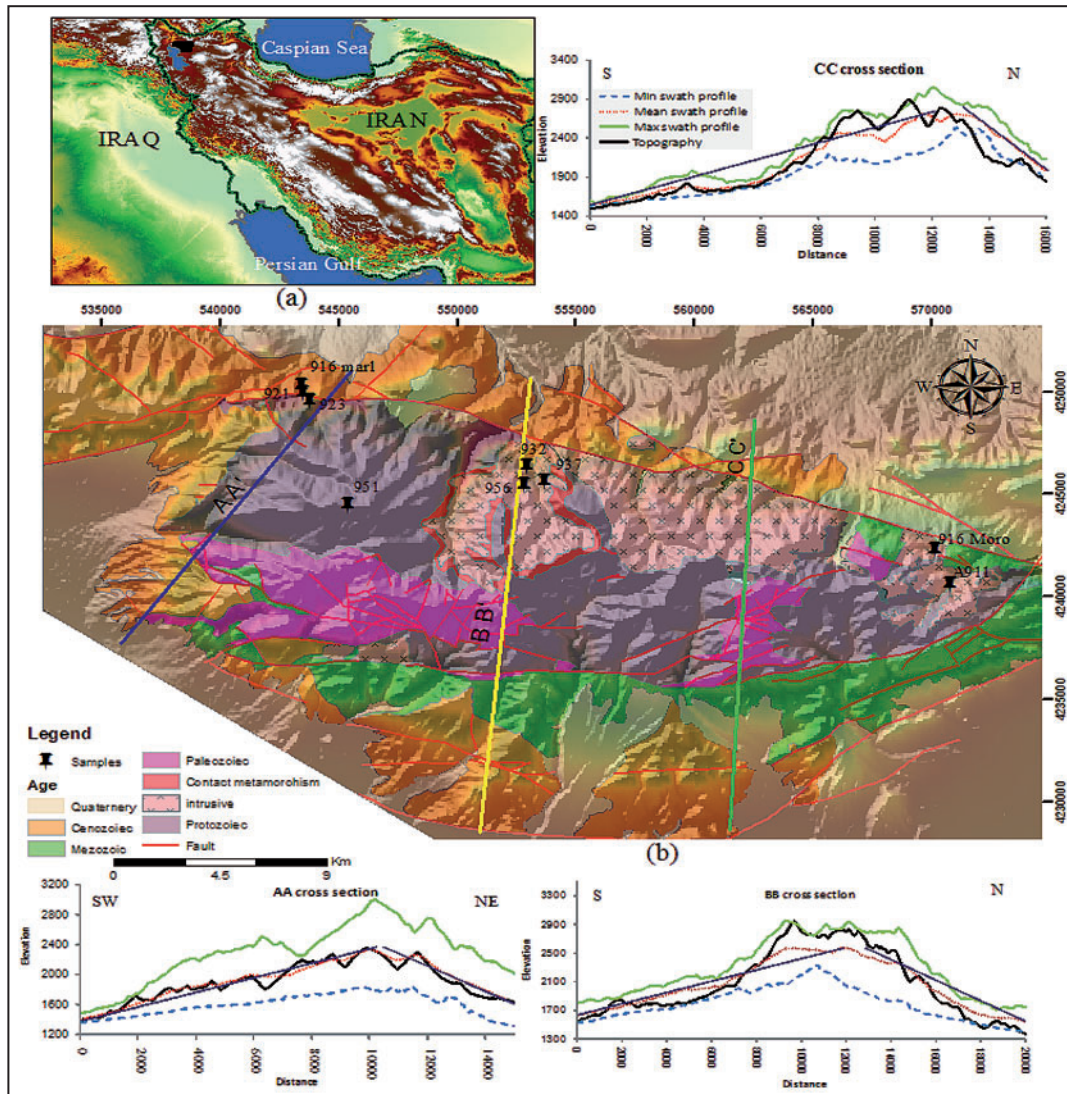
– **برش خاوری میشو:** در این برش نمونه‌های برداشت شده بیشتر بدون آپاتیت قابل شمارش بودند و تنها در دو نمونه امکان شمارش فراهم شد. تفسیر نمودار سن- ارتفاع با استفاده از دو نمونه دقت پایینی خواهد داشت. بالاترین نمونه تعیین سن شده این برش نمونه A911 است که سن  $88.2 \pm 10.2$  نشان می‌دهد و نمونه دیگر این برش 916 moro سن  $45.8 \pm 6.1$  را نشان می‌دهد.



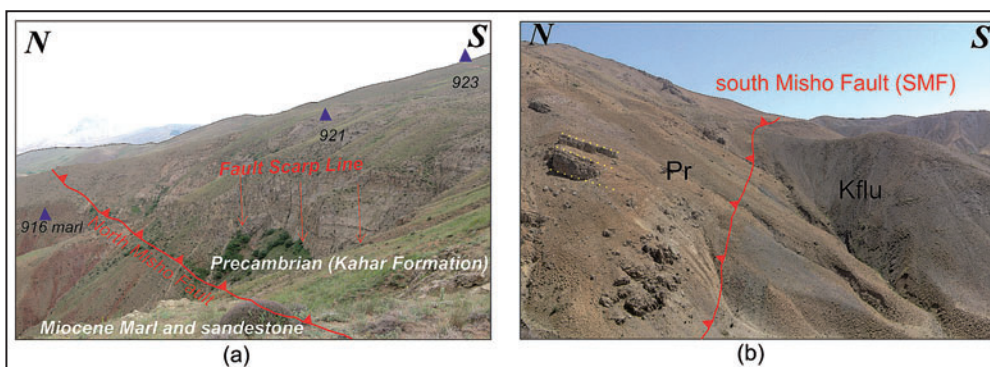
### سپاسگزاری

این پژوهش در راستای رساله دکتری در دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مسئولان دانشگاه تربیت مدرس و دانشگاه پوتسدام آلمان برای همیاری در مراحل انجام این پژوهش سپاسگزاری کنند. همچنین مراتب سپاس خود را از داوران محترم فصلنامه که با ارائه نظرات مفید و سازنده سبب غنای علمی بیشتر این مقاله شدند اعلام می‌دارند.

عدم تقارن توپوگرافی کوه‌های میشو و برونزد وسیع پی‌سنگ بلورین در برش باختری و کاهش رخنمون این واحد در بخش‌های مرکزی و خاوری در ارتباط با تفاوت زمانی برافرازش در بخش‌های مختلف کوه‌های میشو است. داده‌های ساختاری برداشت شده و آرایش گسل‌ها و بلوک‌های گسلی نشانگر این موضوع است که بلوک‌های گسلی در این محدوده چرخش داشته‌اند.

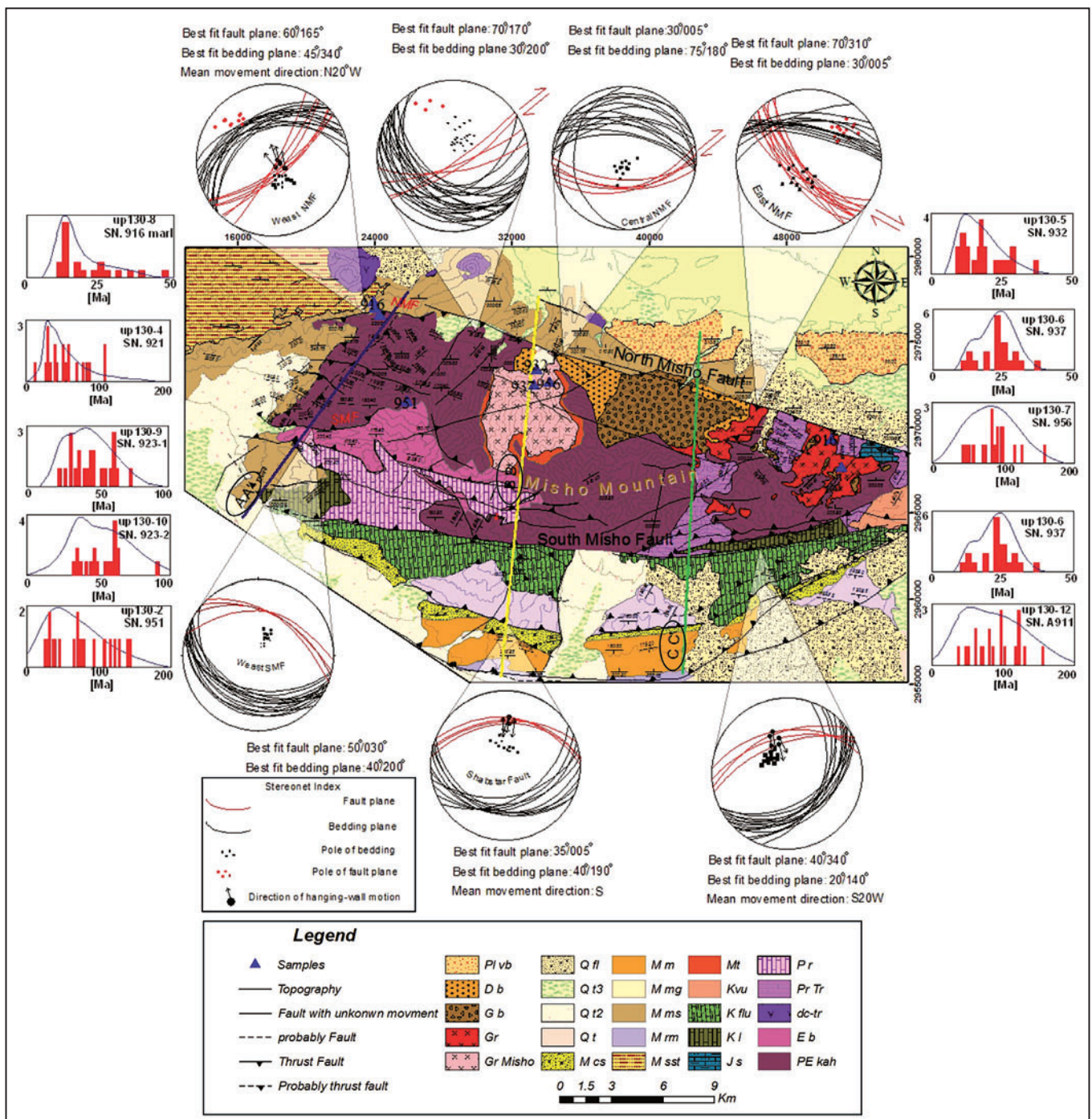


شکل ۱- (a) مربع سیاه رنگ موقعیت محدوده مورد مطالعه روی مدل ارتفاعی ناحیه؛ (b) نقشه تفکیک واحدهای سنگی (اسدیان و همکاران، ۱۳۷۲) به همراه موقعیت نمونه‌های تجزیه شده برای AFT و موقعیت مقاطع عرضی که برای بررسی‌های ساختاری و نیمرخ‌های توپوگرافی همگن استفاده شده است.



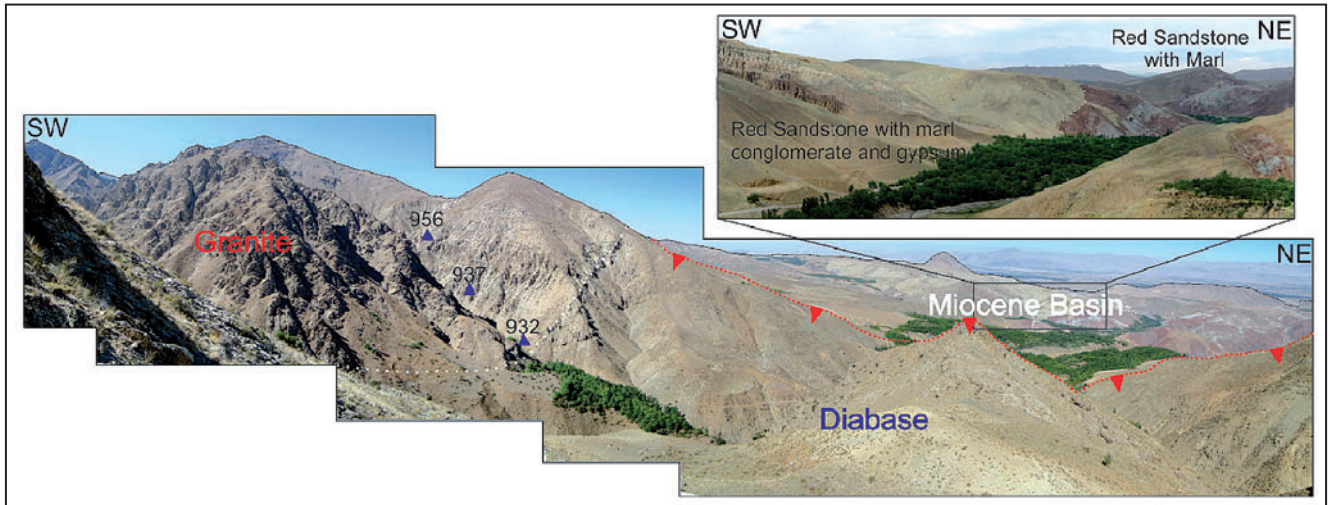
شکل ۲- (a) راندگی ماسه‌سنگ‌های پرکامبرین کهر روی ماسه‌سنگ‌های سرخ میوسن در راستای گسل شمال میشو برش AA'، موقعیت نمونه‌ها با مثلث‌های آبی راندگی مشخص شده است؛ (b) راندگی آهک‌های سترلایه پرمین روی واحد فیلیشی کرتاسه در بخش جنوبی منطقه.



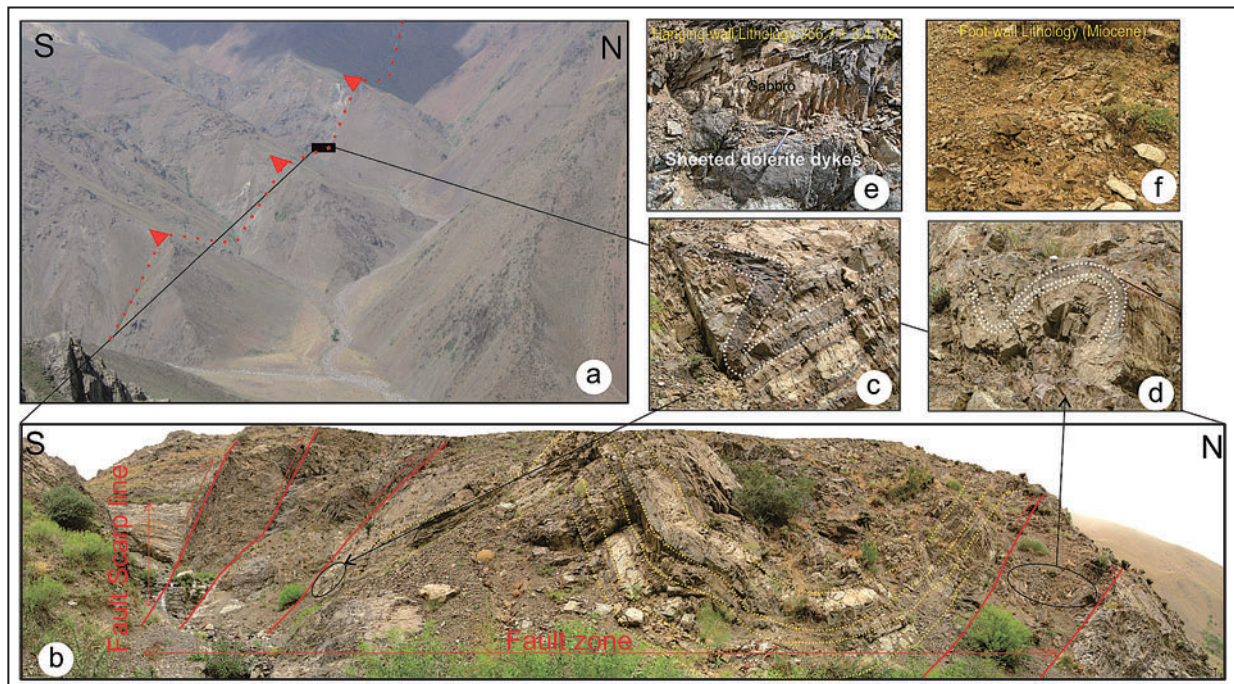


شکل ۳- نقشه ساختاری محدوده مورد مطالعه در کوه‌های میشو. PE kah ماسه‌سنگ شیل پر کامبرین سازند کهر، Pr آهک ستبرلایه پرمین معادل سازند روتو، Pr-Tr آهک‌های پرموتریاس، Js ماسه‌سنگ آهکی با میان‌لایه‌های شیلی معادل سازند شمشک، Kflu ماسه‌سنگ، مارن و سنگ آهک کرتاسه با رخساره فیلیسی، KI آهک‌های ستبرلایه کرتاسه، Kuv آندزیت، Mcs کنگلومرای ستبرلایه، Mm سیلت و مارن سبز رنگ به همراه ماسه‌سنگ‌های ستبرلایه، M mg مارن و ماسه‌سنگ، M ms تناوب ماسه‌سنگ و شیل به همراه مارن، M rm مارن سرخ رنگ به همراه ماسه‌سنگ، M sst مارن و ماسه‌سنگ همراه با میان‌لایه‌های آهک و کنگلومرا، Db دیاباز، Gb گابرو، Gr آلکالی گرانیت، Gr Misho گرانیت میشو، Mt هورنفلس دگرگونی همبری، Plvb پرش آتشفشانی و آندزیت، Dc-Tr گنبد‌های آتشفشانی تراکیتی و داسیتی. نمودارهای کنار نقشه پراکندگی سنی بلورهای تجزیه شده در هر نمونه را نشان می‌دهد.

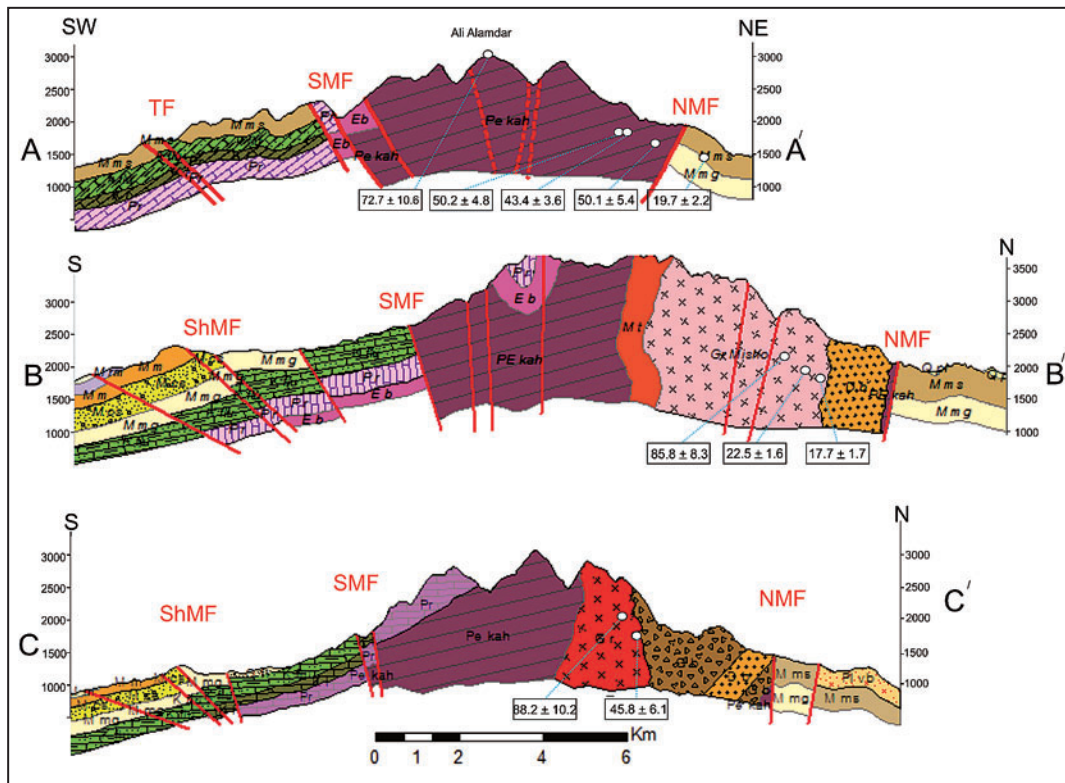




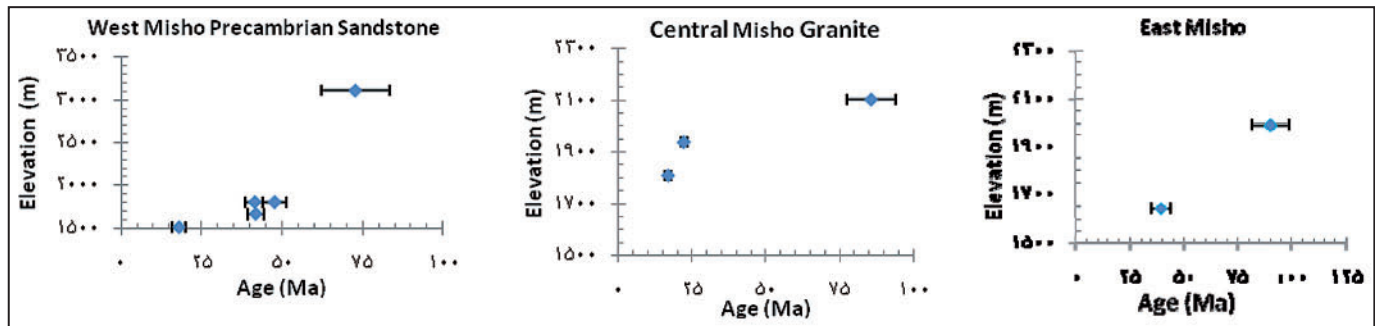
شکل ۴- مرز گسلی میان واحدهای سنگ‌چینه‌ای پرکامبرین با نهشته‌های با سن میوسن.



شکل ۵- پهنه گسل شمال میشو در برش 'CC'. شکل (a) گسل شمال میشو در نمایی از بالا؛ (b) پهنه گسل شمال میشو و چین‌ها و گسل‌های فرعی مرتبط با آن؛ (c) چین مرتبط با گسل در پهنه گسل شمال میشو؛ (d) چین مرتبط با گسل؛ (e) تداخل واحد گابرویی با دایک‌های دولریتی در فرا دیواره گسل؛ (f) واحدهای رسوبی میوسن در فرود دیواره گسل شمال میشو.



شکل ۶- برش های ساختاری اصلی به همراه موقعیت نمونه‌های مورد استفاده برای تحلیل های دمازمان‌سنجی.



شکل ۷- نمودار سن- ارتفاع در سه برش باختری مرکزی و خاوری میشو.

جدول ۱- جزئیات نمونه‌های مورد تحلیل آپاتیت کوه‌های میشو.

Sample Name	X	Y	Elevation	Unit	Stratigraphy age	P ( $\chi^2$ ) %	No	ROHD $\times$ ( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )	Ns	Ni	Nd	Age
916 Marl	543461	4250279	1505	Marlstone	Miocene	0.0	20	1.3608	389	5426	7854	19.7 $\pm$ 2.2
916 Moro	597537	4235531	1643	Granite	Pre-Permian	0.0	20	1.3971	435	2648	7854	45.8 $\pm$ 6.1
921	543520	4249902	1660	Sandstone	Precambrian	0.0	20	1.3898	678	5915	7854	50.1 $\pm$ 5.4
923-1	543819	4249491	1801	Sandstone	Precambrian	2.56	22	1.3536	349	2083	7854	43.4 $\pm$ 3.6
923-2	543819	4249491	1801	Sandstone	Precambrian	54.0	19	1.3463	214	1102	7854	50.2 $\pm$ 4.8
932	552970	4246338	1810	Granite	Pre-Permian	0.0	20	1.3826	379	5707	7854	17.7 $\pm$ 1.7
937	552847	4245400	1939	Granite	Pre-Permian	0.1	20	1.3753	710	8100	7854	22.5 $\pm$ 1.6
A911	570807	4240589	1993	Granite	Pre-Permian	40.4	20	1.3319	167	450	7854	88.2 $\pm$ 10.2
956	553724	4245571	2104	Granite	Pre-Permian	93.0	20	1.3681	159	462	7854	85.8 $\pm$ 8.3
951	545413	4244464	3110	Sandstone	Precambrian	40.5	20	1.4043	124	387	7854	72.7 $\pm$ 10.6

No, grains, number of analyzed grains Ns, spontaneous fission tracks; Ni, total number of induced tracks; P( $\chi^2$ ), probability obtaining Chi-square value ( $\chi^2$ ); Rho-D, effective fission-track densities for the fluence monitor; Nd, number of tracks counted on dosimeter; Age  $\pm 1\sigma$ , Central Age (pooled age)  $\pm 1$  standard error; Ages calculated using zeta of 396.5 $\pm$ 12.5.

## کتابنگاری

- اسدیان، ع.، محجل، م.، حاج علیلوی، ب. و میرزایی، ع. ر.، ۱۳۷۲- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مرنند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
 افتخارنژاد، ج.، قرشی، م.، مهرپرتو، م.، ارشادی، س. و زهره‌بخش، ا.، ۱۳۷۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران.  
 شاه‌زیدی، م.، مؤید، م. و موراتا، م.، ۱۳۹۲- ژئوشیمی و پترولوژی گرانیتوئیدهای جنوب غرب مرنند (جنوب روستاهای عیش‌آباد و پیربالا)، شمال غرب ایران، رساله دکتری.  
 مؤید، م. و مؤذن، م.، ۱۳۸۱- نگرشی نو بر موقعیت خط درز پالئوتتیس در ایران، ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۷۱۶-۷۱۷.

## References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. The Geological Society of America Bulletin 103, 983-992.
- Behyari, M., Mohajjel, M., Sobel, E., Moaied, M., Rezaiean, M. & Shirdel, N., 2014- Structural and geomorphic analysis for evaluating recent uplift in Misho active pop up, NW Iran. 32<sup>nd</sup> National & the 1<sup>st</sup> International Geosciences Congress, Geological Survey of Iran. proceeding.
- Braun, J., Van der beek, P. & Batt, G., 2006- Quantitive Thermochronology, University of Cambridge Press, Chapter 1, 1-19P, Chapter 2, 19-27p, Chapter 3, 48-53P, Chapter 11, 164-176P.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. & Tavakoli, F., 2011- NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network., Earth and Planetary Science Letters 307 27-34.
- Ehlers, T. A. & Farley, K. A., 2003- Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and application to problems in tectonic and surface processes. Earth and Planetary Science Letters 206, 1-14p.
- Fielding, E., Isacks, B., Barazangi, M. & Duncan, C., 1994- How flat is Tibet?, Geology, 22, 163-167.
- Gallagher, K., Brown, R. & Johnson, C., 1998- Fission track analysis and its applications to geological problems. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 26, 519-72p.
- Kalvoda, J. & Babek, O., 2010- The margins of Laurussia in central and southeast Europe and southwest Asia. Gondwana Research 17, 526-545.
- Mitchell, S. G. & Montgomery, D. R., 2006- Polygenetic topography of the Cascade Range, Washington State, USA, Am. J. Sci., 306, 736-768.
- Montgomery, D. R., 2001- Slope distributions, hillslope thresholds and steady-state topography, Am. J. Sci., 301, 432-454.
- Reiners, P. W., 2005- Zircon (U-Th)/He thermochronometry. In: Low-temperature thermochronology: The techniques, interpretations, and applications; eds: Reiners P.W., and Ehlers T.A.; Mineralogical society of America, Geochemical society, chapter 6; 151-179p.
- Saccani, E., Azimzadeh, Z., Dilek, Y. & Jahangiri, A., 2013- Geochronology and Petrology of the Early Carboniferous Misho Mafic Complex (NW Iran), and Implications for the Melt Evolution of Paleo-Tethyan Rifting in Western Cimmeria., LITHOS.
- Sengor, A. M. C., Yilmaz, Y. & Sungurlu, O., 1984- Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys.
- Siahkali Moradi, A., Hatzfeld, D. & Tatar, M., 2011- Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran)., Tectonophysics 506, 22-30.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: A review. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 52, 1229-1258.
- Tagami, T. & O'Sullivan, P. B., 2005- Fundamental of fission track thermochronology. In: Low temperature thermochronology: The techniques, interpretations, and applications, eds: Reiners P.W., and Ehlers T.A.; Mineralogical society of America, Geochemical society, chapter 2, Fundamental of fission track thermochronology, 19-47p.
- Telbisz, T., Kovacs, G., Szekely, B. & Szabo, J., 2013- Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. Zeitschrift für Geomorphologie, 57: 485-513.



## Analysis of Exhumation History Using Low-Temperature Thermochronometers: Misho Mountains, NW Iran

M. Behyari <sup>1</sup>, M. Mohajjel <sup>2\*</sup>, M. Rezaeian <sup>3</sup> & M. moayyed <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Advanced Science University, Zanjan, Iran

<sup>4</sup> Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 2014 June 01

Accepted: 2015 January 06

### Abstract

The Misho Complex in NW Iran has a remarkable unique high topography surrounded by well known faults, where Precambrian basement rocks have been uplifted and extensively exposed. Structural data indicate that exhumation of the Misho Complex was the result of displacements along the faults surrounding this structural wedge, where the North Misho, South Misho and Tasouj faults have played a significant role in its present configuration. Study of structural and thermochronometry data and combination of their results show that the onset of exhumation was not synchronous in different parts of this Complex. Analysis of 10 Apatite Fission Track (AFT) samples indicate that the western Misho Complex was exhumed with the greatest rate from early Palaeocene ( $72.7 \pm 10.6$  Ma) to middle Miocene ( $50.3 \pm 3.4$  Ma) time, while in the central and eastern parts of the Misho Complex the greatest exhumation rate started later in mid-Miocene ( $22.5 \pm 3.4$  Ma). The diachronous nature of the greatest exhumation in different parts of the Misho Complex has resulted in an asymmetric topography, as well as non-uniform exposure of the crystalline basement through the area. Interpretation of homogenised minimum and maximum topographic profiles also shows that the rate of exhumation was greater in the western part of the Misho Complex. It is interpreted that displacement variations along the surrounding faults and rotation of existing blocks resulted in variation of the uplifting and exhumation rate in the area.

**Keywords:** Thermochronometry, Misho, Exhumation history analysis, Thrust fault, AFT.

For Persian Version see pages 65 to 72

\*Corresponding author: M. Mohajjel; E-mail: mohajjel@modares.ac.ir