

شناسایی و استخراج گسل‌ها بر پایه GIS & RS و شواهد ژئومورفیک فعالیت آن‌ها در پهنه گسلی قوشاداغ در شمال غرب ایران

احمد رنجبری^۱

موسی عابدینی^۲

داود مختاری^۳

خلیل ولیزاده کامران^۴

چکیده

تکتونیک فعال منطقه آذربایجان، همچون سایر نقاط ایران از همگرایی پوسته‌های قاره‌ای اوراسیا و عربی نشأت گرفته است. این پویایی منجر به گسلش بخش عمده‌ای از آن و در نتیجه وقوع زمین‌لرزه‌های ویرانگر شده است. شناسایی و استخراج این گسل‌ها تا حد زیادی می‌تواند به روشن شدن رفتار تکتونیکی منطقه کمک کند. از این طریق پراکنش فضایی مخاطرات ژئومورفیک شناسایی، پیش‌بینی و مدیریت می‌شود. در این راستا، شناسایی گسل‌های پهنه قوشاداغ و شواهد ژئومورفیک آن‌ها در شمال غرب ایران هدف کلی این پژوهش انتخاب گردید. این سامانه گسلی به دلیل فقر مطالعاتی تا حدودی ناشناخته مانده بود اما با آغاز فعالیت لرزه‌ای دوگانه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ مسبب تلفات جانی و مالی زیادی شد. برای استخراج گسل‌های منطقه، باند ۸ تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI با ردیف ۳۳ و گذر ۱۶۸، با باند پانکروماتیک آن (۱۵ متر) فیوژن شد. جهت مشاهده بهتر خطوطها از فن‌های PCA، RGB، فیلترهای جهت‌دار و نسبت بانندی استفاده گردید سپس خطوطها از تصاویر Pan Sharp شده در محیط نرم‌افزار ژئوماتیکا و با اعمال الگوریتم Lineament Extraction استخراج گردید. این فرایند در سه روش دستی، خودکار و نیمه‌خودکار و با استفاده از نرم‌افزارهای Envi5.1 و ArcGIS10.4.1 انجام شد. جهت حصول اطمینان از تصاویر سنتینل B2 و اسپات نیز به لحاظ برخی ویژگی‌ها استفاده شد و در نهایت گسل‌های استخراجی، با عملیات میدانی، پیمایش زمینی و مشاهدات پدیده‌های ژئومورفولوژیک مقایسه و تدقیق گردید. نتیجه پژوهش نشان از دقت بالای آن دارد به طوری که با ترکیب روش‌ها برای اولین بار برخی از گسل‌های جدید نیز شناسایی و عملکرد آن‌ها بررسی شدند.

واژگان کلیدی: RS & GIS، ژئومورفولوژی تکتونیکی، گسل قوشاداغ، زلزله ارسباران، شمال غرب ایران.

مقدمه

گسل‌ها از عناصر مهم تکتونیکی هستند که با قطعه قطعه کردن پوسته زمین و جابه‌جا نمودن عمودی و افقی قطعات پوسته، ضمن ایجاد زمین‌لرزه، به طور مستقیم در ایجاد انواع لندفرم‌های اولیه، شرکت دارند که اشکال ساختمانی اولیه برای عملکرد عوامل دینامیکی و ایجاد اشکال ثانویه هستند. از طرف دیگر، گسل‌ها در امتداد خود نقاط ضعیفی در پوسته زمین ایجاد می‌کنند و بدین ترتیب، شرایط لازم برای ماگماتیسم، دیابیریسم نمکی، چشمه‌های آبگرم و غیره را به وجود می‌آورند. گسل‌ها همچنین می‌توانند در ایجاد بعضی مئاندرها، تندآب‌ها، انحرافه، اسارت آبراهه‌ها و نیز تشکیل دریاچه‌ها و تالاب‌ها دخالت داشته باشند (رجبی و شیری، ۱۳۸۸).

^۱ دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم انسانی (نویسنده مسئول)

^۳ استاد گروه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز

^۴ دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۶۹). بررسی سیر تکاملی مکان وقوع مخاطره طبیعی، یکی از اساسی‌ترین بخش‌های مطالعات مخاطرات طبیعی است (Rosenfeld, 2004: 424) به نقل از مختاری، ۱۳۸۵: ۵۳). بدین منظور، خطوط گسلی بهترین مناطق برای شناخت وضعیت فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات هیدروژئومورفیک در هر منطقه است (عابدینی، ۱۳۹۵: ۷۵). تشخیص و تعریف گسل‌های یک منطقه نه تنها به آشکارسازی تاریخچه هر منطقه کمک می‌کند بلکه وضعیت حال و آینده ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی آن را نیز تا حد زیادی مشخص می‌نماید پژوهشگران برای شناسایی موقعیت، وضعیت و نوع گسل‌ها، از فناوری RS و تصاویر ماهواره‌ای بهره می‌گیرند استفاده از داده‌های RS با توجه به ارائه اطلاعات به‌روز، پوشش تکراری و کم‌هزینه بودن در ارزیابی منابع طبیعی از جایگاه خاصی برخوردار است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). پژوهش‌گران زیادی از این روش‌ها برای بررسی‌های مورفوتکتونیکی و تئوتکتونیکی استفاده کرده‌اند (Akman & Tufekci, 2005؛ Jain, 2006؛ Erini et al, 2011؛ Morales and Rosario, 2012؛ Kargel et al, 2016 و ...). تصاویر ماهواره‌ای به دلیل دارا بودن تفکیک زمانی، مکانی و طیفی بالا در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز و حرارتی امکان تجزیه و تحلیل مناسبی برای محققان فراهم آورده‌اند تا با تشخیص تغییرات در بافت و ساختار زمین و هندسه لبه‌های این تغییرات و تفسیر نهایی تغییرات ژئومورفولوژی سطح زمین، موقعیت گسل استخراج گردد و یا گسل‌های استخراج‌شده تدقیق و تصحیح شود سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز ابزاری مؤثر برای آنالیز داده‌های مکانی و غیرمکانی است (Zhang et al, 2013: 14). استخراج گسل‌ها با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و با سه روش بارزسازی دستی، خودکار و نیمه‌خودکار انجام می‌گیرد (افشاری و همکاران ۱۳۹۵: ۵۴). آن‌ها در مطالعه گسل‌های منطقه کپهداغ بر مناسب بودن روش نیمه‌خودکار تأکید نموده‌اند. برای تهیه نقشه شکستگی‌های ساختمانی می‌توان از فن‌های RS از جمله: RGB, PCI و استفاده از نسبت بانندی جهت بارزسازی گسل‌ها بهره برد. به‌عنوان نمونه، بررسی گسل‌های گستره کرج-قزوین بر اساس اعمال فیلترهای دورسنجی و به کمک نرم‌افزارهای ER Mapper7.0، Arcview GIS3.3 و PCI Geomatica، منتج به استخراج چندین خطواره جدید افزون بر گسل‌های پیشین نیز شد (حاج‌منوچهری و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱). محمودزاده و همکاران (۱۳۹۰)، ساختار گسل تبریز را با استفاده از داده‌های دورسنجی تحلیل نمودند عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از فن‌آوری RS و GIS به ارزیابی فعالیت گسل تبریز و تلفات ناشی از آن پرداختند. یانگ و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات فضایی-زمانی پس از زلزله ونچوان را مطالعه و بر نقش آن در کاهش خطرات زمینی تأکید نمودند.

تا چند سال پیش، منطقه ارسباران در نقشه‌های تحلیل خطر زلزله جزو مناطق کم‌خطر و یا با خطر متوسط نشان داده می‌شد و حتی در نقشه گسل‌های فعال ایران نیز که توسط پژوهشکده زمین‌لرزه‌شناسی تهیه شده (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) اشاره‌ای به فعال بودن گسل‌های مهم آن نشده است اما زمین‌لرزه‌های دوگانه ویرانگر در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱، بویایی و پیچیده بودن ساختارهای مورفوتکتونیکی منطقه را نشان داد و از طرفی، مطالعه بیشتر و دقیق‌تر ژئومورفولوژی منطقه به‌ویژه شکستگی‌های ساختمانی آن و اثرات مخاطره‌آمیز آن‌ها را ضروری و نظر پژوهشگران را بر این مهم معطوف نمود چراکه اگر گسل‌ها شناسایی نشوند منشأ زلزله‌ها نامعلوم و در نتیجه محل زلزله‌های آینده نامشخص خواهد بود و به‌تبع آن آسیب‌پذیری، تلفات و هدررفت منابع انسانی و مالی بیشتر خواهد شد. همچنین شناسایی خطواره‌ها در منطقه به لحاظ اینکه در کنترل بسیاری از مخاطرات ژئومورفیک از جمله؛ حرکات دامنه‌ای (لغزش‌ها، ...) نقش دارند از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا در بررسی حاضر، سعی شده است گسل‌های متعدد پهنه متأثر از زلزله ویرانگر سال ۱۳۹۱ ارسباران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، اعمال روش‌های بارزسازی تصویر و به کمک نرم‌افزارهای مربوطه استخراج و مقایسه شود و پس از پردازش در محیط نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS و تطبیق و تدقیق به‌وسیله مشاهدات میدانی به‌صورت یک نقشه نهایی ارائه شود تا در مطالعات لرزه‌ای و ارزیابی‌های مخاطرات ژئومورفولوژی که از نیازهای اساسی جامعه در معرض خطر ماست مورد استفاده قرار گیرد.

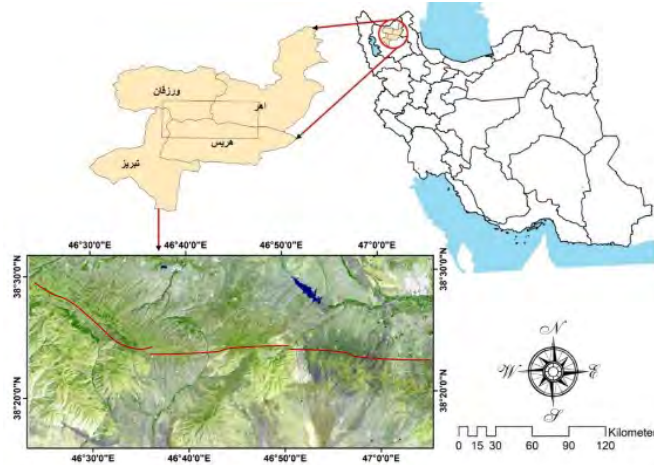
معرفی منطقه مورد مطالعه

پهنه گسلی قوشداغ در شمال غربی ایران و در نیمه شمالی استان آذربایجان، بخشی از نیمه جنوبی منطقه قره‌داغ (ارسباران) را در برمی‌گیرد (شکل ۱). گستره مورد بررسی در بلوک ساختمانی ارس (شمال باختری ایران) قرار گرفته است (Berberian & Yeats, 1999: 122). این منطقه، در پهنه برخوردی میان صفحه‌های ایران، عربی و قفقاز جای داشته و درگیر جنبش‌های ناشی از برهم‌کنش این سه پهنه هست و از این نظر از ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منحصر به فردی برخوردار است.

پهنه گسلی این منطقه بخشی از ریزپهنه ساختمانی البرز-آذربایجان هست که همراه با گسل‌های شمال تبریز، مراغه، ... ساختارهای بویایی هستند که هر کدام به‌طور بخشی در جبران همگرایی مورب میان پلیت عربی و خردقاره ایران سهیم هستند (فریدی و همکاران، ۱۳۹۵). این پهنه گسلی مسبب زمین‌لرزه‌های دوگانه



۲۱ مرداد سال ۱۳۹۱ منطقه جنوب قره‌داغ (ارسباران) با بزرگی ۶/۴ و ۶/۲ ریشتر است. هر دو رخداد تنها ۶ کیلومتر و ۱۱ دقیقه فاصله داشتند (Donner et al, 791: 2015) که باعث جان باختن ۳۰۶ نفر و ویرانی بیش از ۱۶۰ روستا و آسیب‌دیدگی اساسی ساختمان‌های شهرهای؛ ورزقان، اهر و هریس شد.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

- مواد و ابزار: در این پژوهش، علاوه بر استفاده از کتب و منابع نوشتاری، از داده‌های متنوع دیگری نیز استفاده شده است که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌گردد:
- تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI با ردیف ۳۳، گذر ۱۶۸ و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر (باند ۸ تصویر).
- تصاویر سنتینل-۲ و اسپات و همچنین تصاویر گوگل ارث جهت مقایسه و نتیجه بهتر.
- نرم‌افزارهای Envi5.1 جهت اعمال فن‌ها و پردازش تصاویر، PCA Geomatica برای استخراج خودکار خطواره‌ها و Arcmap10.4.1 به منظور ترسیم نقشه خروجی.
- نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ با هدف زمین مرجع کردن تصاویر ماهواره‌ای، DEM و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان، اهر، خوجا و تبریز.

- روش شناسی:

استخراج گسل‌های منطقه، هدف اصلی و گامی مهم در تحلیل وضعیت ژئومورفولوژی تکنونیک می‌باشد. جهت رسیدن به نتیجه بهتر، در کنار روش خودکار بعضی خطوط به روش دستی به مجموعه خطوط اضافه و این دو روش تلفیق گردید. از آنجاکه تصویری که از مشاهدات مستقیم به دست می‌آید نسبت به تصورات حاصل از مشاهدات غیرمستقیم معتبرترند (مقیبی و محمودی، ۱۳۸۳: ۱۲۸). جهت اعتبارسنجی و تدقیق بیشتر، از روش عملیات میدانی، پیمایش زمینی و اندازه‌گیری دستی جایجایی‌ها نیز استفاده شده است؛ بنابراین هدف از مطالعه حاضر، استخراج خطواره‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره لندست-۸ سنجنده OLI، GIS و شواهد ژئومورفیک و بررسی عملکرد آن‌هاست. روش کار و مراحل انجام تحقیق در روند نمای زیر نشان داده شده است (شکل ۲).



شکل (۲).فلوچارت یا روند نمای روش تحقیق و ابزارهای مورد استفاده

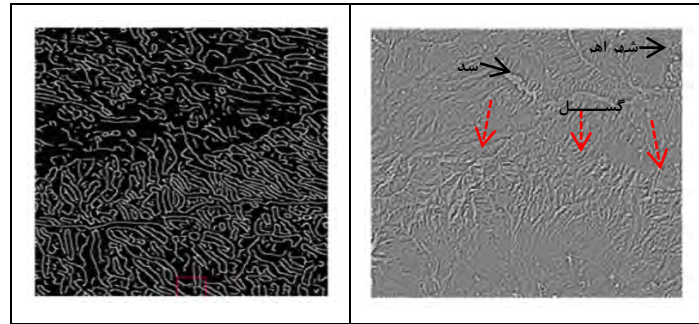
تجزیه و تحلیل داده‌ها

استخراج خودکار: در روند استخراج خودکار خطواره‌ها، ابتدا عوارض خطی از تصویر ماهواره لندست-۸ سنجنده OLI استخراج و قطعات خطی با پارامترهایی که در جدول شماره ۱ آورده شده است، به شکل برداری رکورد گردید. سپس مؤلفه اول جهت استخراج خطواره آماده شد و بقیه اقدامات در محیط نرم‌افزار PCA Geomatica و با فراخوانی تصویر PCI در آن تداوم یافت. مرحله بعد، استفاده از الگوریتم Lineament extraction در محیط Geomatica و استخراج خطواره‌ها بود که در ۳ مرحله؛ لبه یابی، آستانه گذاری و استخراج خطواره‌ها از لبه باینری شده و از طریق اعمال پارامترهایی پیگیری شده است. برای تعیین حدود آستانه پارامترها از مشخصات عمومی گسل در منطقه و با در نظر گرفتن طول، انحنای، قطعه‌بندی و گسستگی‌ها استفاده شده است. پارامترهای متوسط منطقه چنین به دست آمد:

جدول ۱. پارامترهای مورد نیاز برای استخراج رقومی خودکار خطواره‌ها

پارامترهای مازول خطی	ارزش‌های مؤلفه‌ها
FTHR	۵
RADI	۱۰
ATHR	۱۰
LTHR	۳۰
GTHR	۵۰
DTHR	۲۰

با انتخاب پارامترهای بالا در نرم‌افزار PCI، خطوط وکتوری به فرمت Shape تبدیل گردید تا در محیط ArcGIS برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. پس از وارد کردن باند تصویر مورد نظر، دو فایل خروجی که یکی تصویر باینری نتیجه عمل فیلتر Canny و دیگری فایل برداری که نتیجه استخراج خطواره‌های مورد انتظار است به دست آمد (شکل ۳).



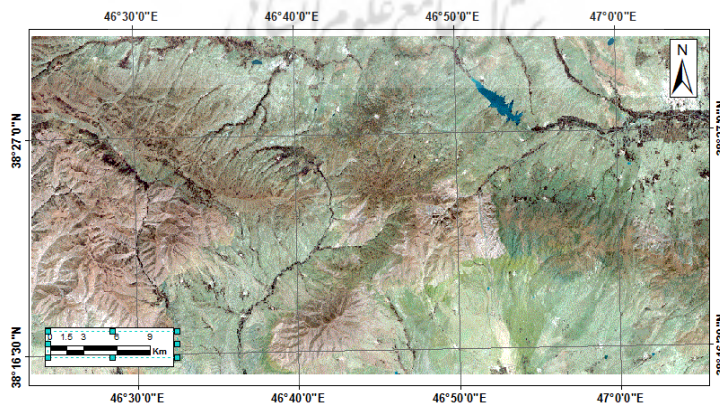
شکل (۳) تصویر سمت چپ فایل باینری نتیجه عمل فیلتر Canny راست حاصل فیلتر لندست-۸

استخراج دستی: فن‌های بازسازی تصویر جهت انجام عمل استخراج دستی خطوطها بسیارند، اما مهم‌ترین آن‌ها جهت آماده‌سازی تصویر برای تهیه نقشه خطوطه عبارت‌اند از: عملیات فیلتر کردن، تحلیل اجزای اصلی (PCA) و ترکیب رنگی.

الف- استفاده از تصاویر RGB: پس از آماده‌سازی داده‌ها، تصویر لندست-۸ سنجده OLI انتخاب و جهت بهبود قدرت تفکیک مکانی با باند پانکروماتیک ۱۵ متر فیوژن گردید و برای وضوح بیشتر به کمک فن-FFT، سیگنال‌های اضافی حذف شد سپس برای مشاهده بهتر قطع‌شدگی لیتولوژیکی و جابه‌جایی‌های رنگی ناشی از گسلش، از فن RGB کمک گرفته شد (شکل ۴). در این پژوهش از نرم‌افزار Envi5.1 جهت به دست آوردن بهترین ترکیب باندی استفاده‌شده است (جدول ۲).

جدول (۲). نتایج مربوط به ماتریس همبستگی باندهای ۲ تا ۷ تصویر لندست ۸

ماتریس همبستگی	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
باند ۲	۱	۰٫۹۷۵	۰٫۹۳۲	۰٫۲۴۹	۰٫۷۳۴	۰٫۸۴۲
باند ۳	۰٫۹۷۵	۱	۰٫۹۶۵	۰٫۳۳۰	۰٫۸۱۲	۰٫۸۹۶
باند ۴	۰٫۹۳۱	۰٫۹۶۵	۱	۰٫۲۵۱	۰٫۷۷۸	۰٫۸۸۳
باند ۵	۰٫۲۴۹	۰٫۳۳۰	۰٫۲۵۱	۱	۰٫۵۱۱	۰٫۳۳۱
باند ۶	۰٫۷۳۴	۰٫۸۱۲	۰٫۷۷۸	۰٫۵۱۱	۱	۰٫۹۵۰
باند ۷	۰٫۸۴۲	۰٫۸۹۶	۰٫۸۸۳	۰٫۳۳۱	۰٫۹۵۰	۱



شکل (۴). تصویر RGB=۲۳۶ پهنه گسلی قوشاداغ به انضمام باند پن سنجده سیتیل-۲؛ تغییر رنگ بیانگر نقش فعال گسل‌ها در تغییر لیتولوژی منطقه می‌باشد.

ب- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA): با اعمال این فن روی تصویر، با ترکیب رنگی ۳ جزو اول با دو باند دیگر تصویر آشکاری به دست آمد.

ج- فیلترگذاری: فیلترها جزو عملیات‌هایی به نام بارزسازی مکانی هستند که بر پایه ارزش سلول‌های مجاور صورت می‌پذیرند (Jenson, 1996 به نقل از بابااحمدی، ۱۳۸۸: ۴۰).

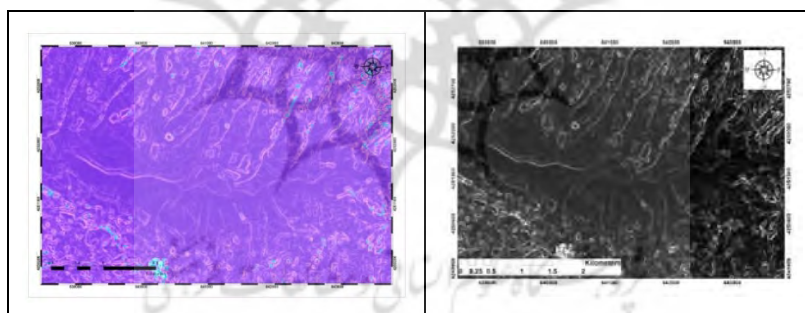
اعمال فیلترهای جهت‌دار: از فیلترهای جهت‌دار هم برای آشکارسازی عوارضی چون جاده‌ها، آبراهه‌ها، گسل‌ها و غیره استفاده شده است. در این پژوهش از باندست ۴ دست ۸ استفاده نیز گردید و بر روی آن فیلتر جهت‌دار اعمال شد (شکل ۵).

پ- فیلتر لبه یاب سوبل: با اعمال فیلتر سوبل خطواره‌ها آشکار می‌شوند (ولی زاده کامران، ۱۳۸۰: ۵۹). برای تشخیص لبه‌های تصویر، بر روی تصویر اعمال شد. سپس از تصویر پس از اعمال فن تحلیل مؤلفه‌های اصلی خروجی گرفته شد (شکل ۶). جهت اطمینان بیشتر، عمل فیلتر لبه یاب سوبل، بر روی باندهای ترکیبی ۱۲۳ اسپات نیز اعمال گردید (شکل ۷).

د- تولید نقشه نهایی: درنهایت، نقشه‌های خروجی هر فن به‌عنوان یک لایه در GIS وارد و نقشه‌ای مشتمل بر چندین لایه (چون خود فیلترها چندین لایه می‌سازند) تولید شد.



شکل (۵) راست تصویر لندست ۸ و چپ فیلتر جهت‌دار با کرنل 3×3 با زاویه عمود بر سمت تابش از همان منطقه

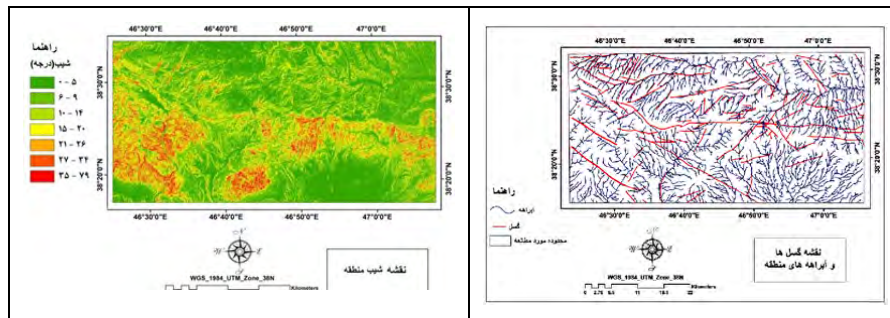


شکل (۶) تصویر لندست ۸- با اعمال فیلتر سوبل و چپ همان تصویر بعد از اعمال فن تحلیل مؤلفه اصلی

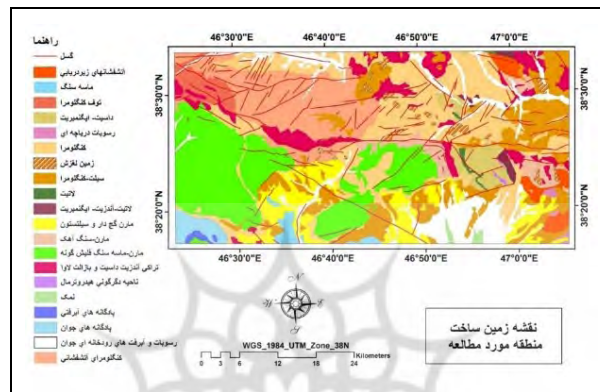


شکل (۷) اعمال فیلتر سوبل بر باندهای ترکیبی ۱۲۳ اسپات؛ سوگیری عمدتاً شمال غربی-جنوب شرقی خطواره‌ها

استخراج نیمه خودکار: با هم‌پوشانی نقشه استخراج‌شده در روش خودکار و تصویر بارز شده در روش دستی، با تکمیل خطوط جامانده و حذف خطوط اشتباهی، نقشه نظارت‌شده نهایی به دست آمد. برای به دست آوردن خطوط آبراهه‌ها، جهت انطباق خطواره‌ها از ابزار هیدرولوژی نرم‌افزار ArcGIS استفاده و نقشه آبراهه‌های اصلی ترسیم‌شده است. همچنین از DEM، نقشه شیب استخراج‌شده است (شکل ۸ و ۹). درنهایت با ترسیم نقشه زمین‌شناسی، مرزهای لیتولوژی با خطواره‌ها تطبیق و کنترل و سپس نقشه زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل ۱۰).



شکل (۸). نقشه آبراهه‌ها و گسل‌ها و شکل (۹). نقشه شیب منطقه مورد مطالعه



شکل (۱۰). نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با ساختارهای گسلی

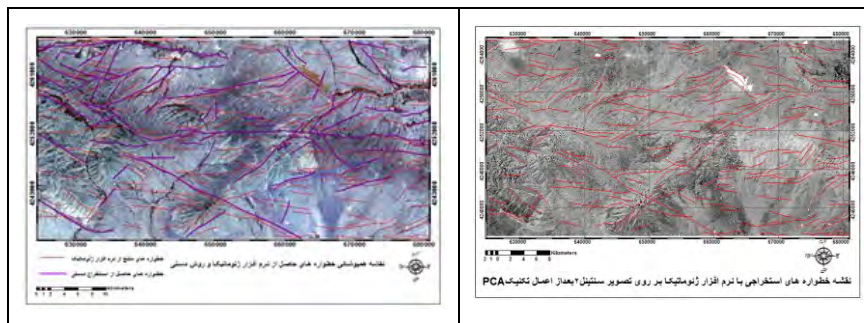
در این مرحله با همپوشانی لایه‌های تصویر لندست و نقشه آبراهه‌ها، شیب و زمین‌ساخت و با استفاده از تصویر زمینه به تفسیر آن‌ها پرداخته و با راهنمایی ژئومورفولوژیست‌ها و زمین‌شناسان آشنا به منطقه نقشه خطواره‌های نهایی ترسیم گردید.

یافته‌ها و بحث

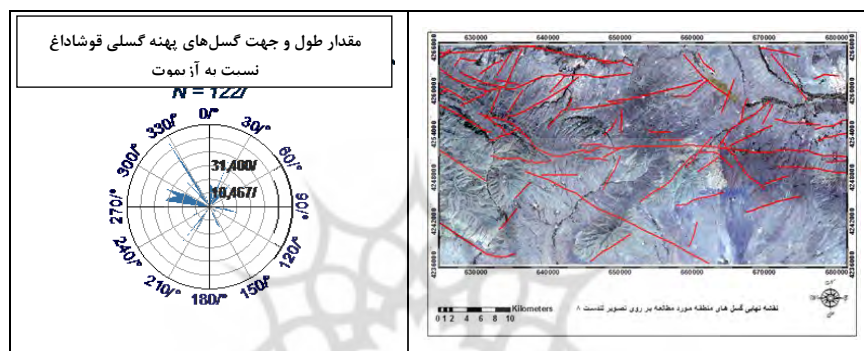
استخراج گسل‌ها فرایندی زمان‌بر با عملیات و مطالعه بیشتر امکان‌پذیر است. در این راستا یکی از موانع پیش روی پژوهش حاضر، تنوع لیتولوژیکی و وجود نهشته‌های رسوبی گسترده بوده است. هرچند زمین‌لرزه اخیر منجر به گسیختگی‌های چند سانی متری عمودی و افقی در امتداد گسل اصلی شده اما سکوت لرزه‌ای طولانی مدت و نیز غلبه نیروهای فرسایشی بر نیروهای تکتونیکی در برخی مکان‌ها، از تشکیل اسکارپمان مشخص و لبه‌های بارز جلوگیری کرده است. وجود تضاریس توپوگرافی شدید از جمله در قطعه شرقی از گویچه‌بئل تا راستای نصف‌النهاری شهر اهر، کار را تا حدی آسان نمود. با استفاده از تصاویر حاصل از فن‌های اعمال شده، خطواره‌های موجود در پهنه گسلی قوشاداغ استخراج شد.

به دلیل وجود نقص‌هایی در روش‌های خودکار و دستی، ترجیح داده شد در این پژوهش بیشتر بر روی روش نیمه‌خودکار تمرکز شود. در این راستا از طریق فیلتر خطواره در نرم‌افزار Envi5.1 و با فیوژن کردن تصاویر و پردازش آن‌ها در نرم‌افزار ژئوماتیکا، خطواره‌ها به صورت خودکار استخراج گردید (شکل ۱۱)؛ بنابراین پس از ارزیابی نتایج حاصل از روش خودکار، به اعمال خطواره‌ها به روش دستی همراه با کنترل‌های زمینی، نتیجه حاصل در یک نقشه همپوشانی (شکل ۱۲) نمایش داده شده است. سپس با بررسی خطواره‌های به دست آمده، حذف خطواره‌های تکراری و نامأنوس به روش نیمه‌خودکار و مشاوره با کارشناسان زمین‌ساخت و ژئومورفولوژیست آشنا به منطقه، خطوطی که احتمال گسل بودن آن‌ها بیش از ۸۰ درصد بود، به صورت نقشه نهایی گسل‌های منطقه ترسیم شد (شکل ۱۳). واضح است که استخراج گسل‌های قطعی منطقه، نیاز به مراجع مختلف دیگر RS نظیر داده‌های راداری، GPS، ماهواره‌های ثقل سنجی و ... دارد. همچنین داشتن اطلاعات میدانی نظیر مشاهدات مستقیم، برداشت‌های لرزه‌نگاری، برداشت‌های ثقل سنجی و یا راداری GPR در رسیدن به نقشه گسل نهایی کمک خواهد نمود (Mallast et al, 2011). جهت آگاهی از طول و راستای گسل‌ها، از نمودار گل‌سرخ استفاده شد. نتیجه این که امتداد گسل‌ها در ۱۰۰-۲۸۰ درجه و ۳۲۵-۱۴۵ درجه بیشتر بوده و در امتداد ۸۰ درجه گسلی قابل استخراج نبوده است؛ اگرچه می‌توان با

مشاهدات میدانی به این امتداد نیز برخورد نمود (شکل ۱۴).



شکل ۱۱: نقشه گسل‌های پردازش‌شده به وسیله نرم‌افزار ژئوماتیکا و شکل ۱۲: استخراج خطواره‌ها با تلفیق روش‌های خودکار و دستی

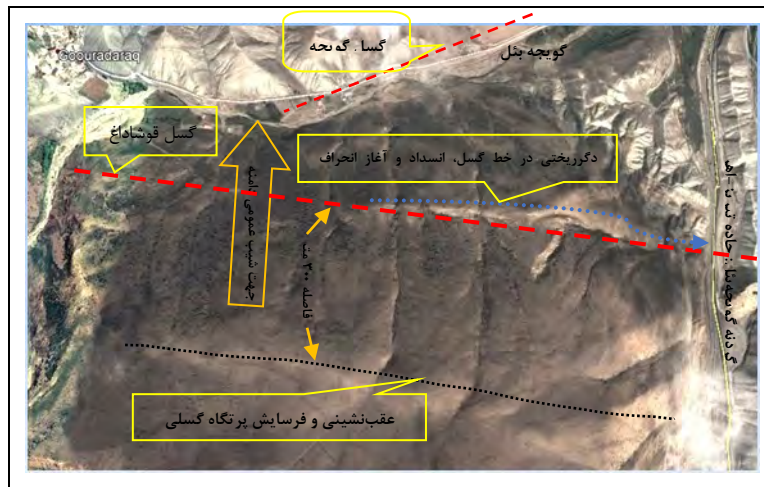


شکل ۱۳: نقشه نهایی گسل‌های منطقه مورد مطالعه به روش نیمه خودکار و شکل ۱۴: نمودار گل‌سرخ خطوط استخراج‌شده از تصویر ماهواره نشانگر طول و جهت امتداد گسل‌ها

اعتبارسنجی نتایج: در این پژوهش همانطور که از شواهد ژئومورفیک برای استخراج و معرفی گسل‌ها بهره برده شده از روی تصاویر نیز سیمای ژئومورفولوژیکی حاصل از برآیند جابجایی‌ها در طول خطواره‌ها آشکار شده است. بررسی تصاویر همراه با شواهد ژئومورفیک نشانگر عملکرد فعال گسل‌های امتدادناظر و حرکت افقی قطعات پوسته در منطقه مورد مطالعه به تبعیت از الگوی دگرریختی قاره‌ای شمال غرب ایران می‌باشد به طوری که اثرات هیدروژئومورفیک ناشی از همین فعالیت‌های تکتونیکی در مسیر گسل قوشاداغ، اشکال و پدیده‌های ژئومورفیک متعددی به وجود آورده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد: عملکرد گسل باعث شکل‌گیری پرتگاه گسلی به‌ویژه در دامنه شمالی گنجه‌قیران و یای قاری و ... شده (شکل ۱۵) و موجبات تشدید ناپایداری و در نتیجه وقوع زمین‌لغزهای متعدد (شمال گوموشاوا (شکل ۱۶)، یابجیلی، دامتاب و وارزه‌های دامنه‌های متعدد را فراهم آورده است. همچنین گسل‌های عرضی قوشاداغ (Baron et al, 2013) به‌ویژه گسل قوشاداغ با راستای (۰۲۰) و تقریباً عمود بر گسل اصلی قوشاداغ سبب انطباق شبکه آبراهه‌ای با گسل و همسویی و هدایت آبراهه گویجه‌تل چای با این گسل شده است (شکل ۱۷).

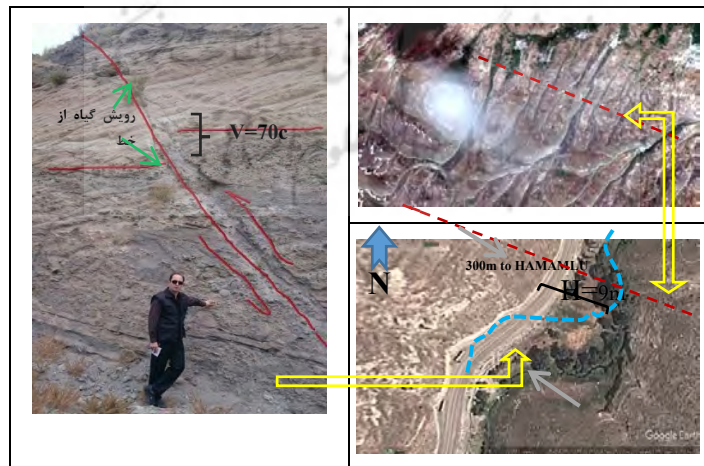


شکل (۱۵). نقشه سینوسیتی جبهه کوهستان در خط گسلی (راست) و شکل (۱۶). زمین‌لغزش شمال گوموشاوا در مجاورت گسل قوشاداغ پس از زلزله ۱۳۹۱ ارسباران



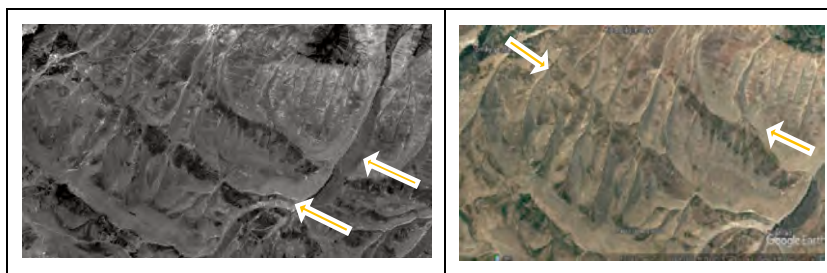
شکل (۱۷). اثرات هیدروژئومورفیک گسل قوشاداغ با دگرریختی خطی، انحراف آبراهه و تشدید سیستم مورفونز

در تحلیل مخاطرات محیطی منطقه علاوه بر در نظر گرفتن واقعیت‌های زمین‌شناسی باید از نتایج بررسی ژئومورفولوژیکی نیز بهره برد (رنجبری و مددی، ۱۳۹۶: ۵۰). جهت ارزیابی و تصحیح پراکنش گسل‌های استخراجی و اطمینان‌یابی از صحت فن‌های به‌کاربرده شده به مطالعات میدانی و مشاهدات مستقیم نیز اقدام شده است. تطبیق میدانی شواهد ژئومورفولوژیکی با نتایج حاصل از اعمال فن‌های RS، نشانگر مطابقت بسیار زیاد آن‌ها دارد. هرچند در مواردی اندک، اختلاف ناچیزی بین تصاویر و فرم‌های سطح زمین و همچنین برخی از پژوهش‌های قبلی انجام‌شده (Copley et al, 2013; Ghods et al, 2015: 536) مشاهده شده است. با وجود کوهستانی بودن منطقه مورب‌بررسی و پوشش جنگلی در برخی نقاط و محدودیت‌های موجود پیمایش زمینی در مسافت‌های ده‌ها کیلومتری صورت گرفته است. در بررسی‌های صحرایی، بارزترین نقطه قوت تحقیق حاضر، شناسایی برخی گسل‌های منطقه از جمله گسل شمال حماموچای اولین بار توسط نگارنده به کمک پیمایش‌های مکرر زمینی و تطبیق آن با تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث (روش ترکیبی) بوده که در هیچ‌یک از منابع قبلی معرفی نشده است. این گسل که به‌صورت یک زون معکوس عمل کرده است دارای مؤلفه امتدادی نیز بوده و به ایجاد زانو در تقاطع گسل با رود حماموچای منجر شده است. این گسل که به‌صورت یک زون معکوس عمل کرده است دارای مؤلفه امتدادی نیز بوده و به ایجاد زانو در تقاطع گسل با رود حماموچای و عرضتر شدن دره منجر شده است (شکل ۱۸).



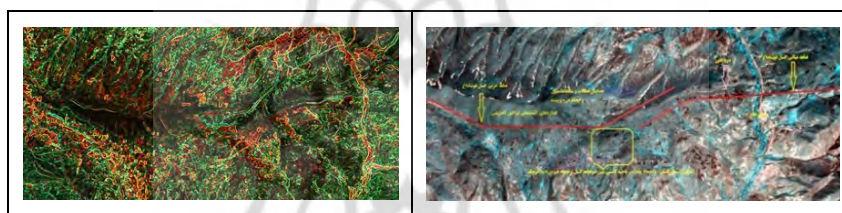
شکل (۱۸). گسل امتدادلغز همراه با مؤلفه معکوس شمال حماموچای در سه چشم‌انداز بزرگ، متوسط و کوچک مقیاس همراه با نرخ جابجایی‌ها

همچنین با بررسی تصاویر لندست ۸ و گوگل ارث در شمال غربی منطقه خطواره‌هایی مشاهده گردید که پس از پیمایش زمینی و تفسیر بصری، به‌عنوان بخشی از سامانه گسلی غالب تشخیص داده شد که بیشتر به شکل امتدادلغز همراه با مؤلفه معکوس با عوارض ژئومورفیک مشخص از جمله: انسداد و انحراف آبراهه و تشکیل پشته فشاری و ... نمود پیدا کرده است (شکل ۱۹).



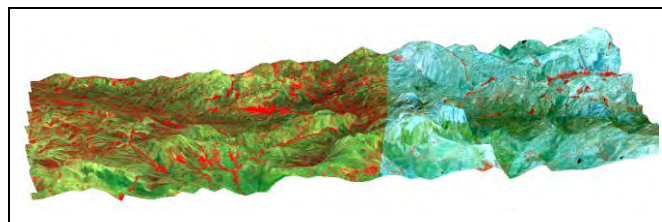
شکل ۱۹: سیستم گسلی جنوب الیرد و نقش آن‌ها در انسداده انحراف و شکل آبراهه‌ها از نگاه گوگل ارث (راست) و لندست ۸

در پیمایش زمینی دیگر، ضمن شناسایی بصری عوارض ژئومورفولوژی، به تشخیص، طبقه‌بندی و انطباق آن‌ها با خطواره‌های گسلی و جانمایی آن‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ پرداخته شد. سپس جهت اعتبارسنجی بیشتر، دگرریختی به وجود آمده و پیدایش اشکال ژئومورفیک خاص و چشم‌انداز آن از دید فیلتر سوبل در باند ترکیبی اسپات با تفکیک ۱۰ متر نیز استخراج شد (شکل ۲۰). به نظر می‌رسد سازوکار امتدادلغز گسل، منجر به سیگماتاسیون و قطعه‌قطعه شدن گسل اصلی قوشاداغ بین زیغانو (زغن‌آباد) در شمال و هفدران و سیرخاگو (سرخه‌گاو) در جنوب شده و به لحاظ تشکیل ناحیه تراکشی، چاله‌های کوچک موسوم به استخر گسلی را به وجود آورده است (پیدایش دو برکه کوچک نشان از این فعالیت می‌باشد). پیدایش این وضعیت و اشکال یادشده می‌تواند ناشی از چرخش اثر محوری چین‌های همراه با گسلش از راستای شرق جنوب شرقی-غرب شمال غربی به راستای شرقی-غربی تفسیر و توجیه شود.



شکل (۲۰) جدایش قطعات گسل قوشاداغ و دگرریختی و پیدایش اشکال ژئومورفیک خاص (سمت راست) و چشم‌انداز آن از دید فیلتر سوبل در باند ترکیبی اسپات با تفکیک ۱۰ متر

استفاده از DEM منطقه برای استخراج گسل‌ها نیز تابع برخی شرایط ساختاری از جمله نوع و مکانیسم گسل‌های هر منطقه است و نمی‌توان این روش را برای هر منطقه‌ای تعمیم داد چراکه در منطقه مورد پژوهش عکس‌تصویری که بیشتر خطواره‌ها در روش استخراج از DEM بر فرورفتگی‌ها و دره آبراهه‌ها (به دلیل تبعیت از زون تضعیف و خردشده گسلی) منطبق هستند، بیشتر گسل‌ها از جمله قطعه میانی گسل قوشاداغ بر خط‌الرأس ارتفاعات منطبق‌اند که می‌تواند ناشی از مؤلفه فشاری طرفین صفحه گسلی باشد. برای درک و تحلیل بهتر این سیمای مورفولوژیکی از روش وارون‌سازی اغراق‌آمیز ناهمواری‌های منطقه با استفاده از نرم‌افزار Envi5.1 روی تصویر RGB اسپات استفاده گردید و به شکل کاذب اما نسبتاً دقیق گسل‌ها به‌ویژه گسل اصلی قوشاداغ، عمدتاً با فرورفتگی‌ها منطبق شدند (شکل ۲۱).



شکل (۲۱) تصویر وارون شده سه‌بعدی RGB اسپات از منطقه مورد مطالعه



نتیجه گیری

همان گونه که تجربه زمین لرزه سال ۱۳۹۱ ارسباران نشان داد مناطقی در کشورمان وجود دارد که به دلیل بررسی اندک و سطحی، حقایق زمین ساختی و مخاطرات ژئومورفولوژی آن مکتوم و پوشیده مانده و در رخدادهایی مانند زلزله‌های دوگانه ۱۳۹۱ ارسباران، چهره ناپایدار و غیرمنتظره خود را آشکار می‌نماید و خسارات قابل توجهی نیز برجای می‌گذارد. استفاده از فن‌های دورسنجی هدفمند در کنار مطالعات میدانی می‌تواند نقش مهمی در شناسایی و ترسیم شکستگی‌های ساختاری که در حالت عادی به سختی قابل مشاهده هستند، ایفا نماید. در این راستا، به کمک تصاویر ماهواره‌ای، گسل‌های پهنه قوشاداغ با به‌کارگیری روش‌های خودکار، دستی و نیمه‌خودکار استخراج شد. مراحل و جزئیات انجام این روش‌ها در مقاله آورده شد. نتایج حاصله با پیمایش زمینی و حتی تطبیق با آثار و گسیختگی‌های باقیمانده از زلزله، مقایسه و حتی گسل‌های جدیدی (گسل شمال حاملو و ...) شناسایی شد. انسداد و انحراف آبراهه‌ها، پرتگاه گسل، پشته‌های کشتی و فشاری و ... مهم‌ترین شواهدی هستند که به استخراج خطواره‌های گسلی از روی تصویر ماهواره‌ای کمک شایانی نمودند. همچنین سیمای ساختاری منطقه نه به‌صورت خطواره گسلی منفرد بلکه به‌صورت سامانه گسلی نشان داده شد. از طریق نمودار گل سرخی، راستای غالب گسل‌ها هم خاوری-باختری تعیین شد. نتایج این پژوهش همچنین بیانگر آن است که استفاده از روش‌های خودکار و دستی به‌تنهایی کافی نیست و جهت نتیجه بهتر بایستی از روش تلفیق این دو بهره برد. واضح است که استخراج گسل‌های قطعی منطقه فقط با داشتن تصاویر اپتیک به دست نخواهد آمد و نیاز به مراجع مختلف دیگر RS نظیر داده‌های راداری، GPS، ماهواره‌های ثقل سنجی (البته با توان تفکیک مکانی بالا) و ... دارد. همچنین کنترل و پیمایش زمینی و بررسی اشکال ژئومورفیک (که نقطه قوت پژوهش حاضر هست)، هم باید جزو جدایی‌ناپذیر مطالعات این‌چنینی مدنظر قرار گیرد.

منابع

- افشاری، سمیه؛ آقا محمدی، حسین؛ نوری، محمدرضا (۱۳۹۵)، استخراج گسل‌های زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: منطقه کپه‌داغ)، اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۷.
- بابااحمدی، عباس (۱۳۸۸)، *کاربردهای سنجش‌ازدور در زمین‌شناسی*، چاپ دوم، تهران: انتشارات آوای قلم.
- حاج‌منوچهری، معصومه؛ آرین، مهران؛ سربی، علی (۱۳۸۹)، *بررسی گسل‌ها و خطواره‌های گسترده کرج- قزوین بر اساس دورسنجی*، زمین، دوره ۵، شماره ۴، صص ۲۱-۳۴.
- حسامی آذر، خالد؛ جمالی، فرشاد؛ طبسی، هادی (۱۳۸۲)، *نقشه گسل‌های فعال ایران، مقیاس: ۱:۲۵۰۰۰۰۰*، انتشارات پژوهشگاه زلزله‌شناسی.
- رجبی، معصومه؛ شیری طرزم، علی (۱۳۸۸)، نتوتکتونیک و آثار ژئومورفولوژیکی گسل اصلی تبریز و گسل‌های فرعی مرتبط با آن، *تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۹۴، صص ۶۸-۹۶.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ اندریانی، صغری؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ الماس‌پور، فرهاد (۱۳۹۵)، تعیین بهترین الگوریتم استخراج کاربری- پوشش اراضی و کشف تغییرات از تصاویر ماهواره‌ای لندست (مطالعه موردی: حوضه صوفی چای مراغه)، *فضای جغرافیایی*، سال شانزدهم، شماره ۵۵، صص ۶۵-۸۷.
- رنجبری، احد؛ مددی، عقیل (۱۳۹۶)، مطالعه گنبد آتش‌فشانی پهلول‌داغی و تأثیر آن بر مورفولوژی منطقه شمال تبریز، *مخاطرات محیط طبیعی*، سال ششم، شماره سیزدهم، پاییز ۱۳۹۶، صص ۴۹-۶۶.
- عابدینی، موسی (۱۳۹۵)، *ژئومورفولوژی تکنونیک*، جلد اول، چاپ اول، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.
- عابدینی، موسی؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ سرمستی، نادر (۱۳۹۵)، ارزیابی فعالیت و توان لرزه‌زایی گسل تبریز و برآورد تلفات انسانی کلان‌شهر تبریز با فن‌آوری سنجش‌ازدور و GIS، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، شماره ۵۷، صص ۱۹۹-۲۱۶.
- فریدی، محمد؛ اسماعیلی، سیروس؛ احمدزاده، الهه (۱۳۹۵)، سامانه‌های گسلی چپ‌گرد و نقش آن‌ها در تکامل ریخت‌زمین‌ساختی شمال باختری ایران، *سی‌وینچ مین‌گردهمایی علوم زمین*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.
- مختاری، داود (۱۳۸۵)، جایگاه ژئومورفولوژی در ارزیابی بلایای طبیعی و مقابله با آن‌ها در ایران، *فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین*، سال سوم، شماره ۹، صص ۵۱-۶۵.
- محمودزاده، مریم؛ الماسیان، محمود؛ پورکرمانی، محسن؛ سلطانی، ماهیار (۱۳۹۰)، تحلیل ساختاری گسل تبریز با استفاده از داده‌های دورسنجی، *فصل‌نامه علوم زمین*، سال ششم، شماره ۱۹، صص ۱۱۹-۱۳۱.
- مقیمی، ابراهیم؛ محمودی، فرج‌ا... (۱۳۸۳)، *روش تحقیق در جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)*، تهران، نشر قومس، ۲۷۷ صفحه.
- ولیزاده کامران، خلیل (۱۳۸۰)، *پهنه‌بندی خطر زلزله در شهرستان تبریز با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، فضای جغرافیایی*، شماره ۴، صص ۴۹-۶۶.
- وینست، رابرت‌کی، ۱۳۸۸، *مبانی دورسنجی زمین‌شناختی و زیست‌محیطی*، مجید هاشمی تنگستانی، چاپ اول، تهران، نشر دانشگاهی، ۴۷۲ صفحه.
- Akman, A. & Tufekci. K. 2005. Determination and characterisation of fault systems & geomorphological features by RS & GIS techniques in the WSW Part of Turkey. *Tectonophysiscs*, 284: 317-386

- Baroň, I., et al, 2013. Paleostress analysis of a gigantic gravitational mass movement in active tectonic setting: The Qoshadagh slope failure, Ahar, NW Iran. *Tectonophysics*.605-70–87.
- Berberian, M. & Yeats, R. S., 1999. Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 120–139.
- Copley, A., Faridi, M., Ghorashi, M., Hollingworth, J., Hackson, J., Nazari, H., Oveisi, B. & Talebian, M., 2013. The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish–Iranian Plateau, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggt379.
- Donner, S., Ghods, A., Krüger, F., Rößler, D., Landgraf, A., Balato, P., 2015, 11 August 2012: Regional Seismic Moment Tensors and a Seismotectonic Interpretation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105 (2A): 791-807.
- Eirini S., Stelios P., 2011. Identification of lineaments with possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in Western Crete Greece, *Earsele Proceeding*, Vol.10, pp.1-18.
- Geological Survey of Iran., 2002. Ahar, Khoja & varzghan, scale1:100,000.
- Ghods, A., Sabanian, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezaejad, G. & Aziz-Zanjani, A., 2015. The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet: implications for the geodynamics of northwest Iran, *Geophys. J. Int.* 203, 522–540.
- Jain, S, and Verma, PP. K., 2006. Mapping active tectonics intensity zones using remote sensing and GIS, *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 34(2), pp 131-142.
- Jenson, J.R., 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Kargel, J. & et al, 2016. Geomorphic and Geologic controls of Geohazards induced by Nepal’s 2015 Gorkha earthquake, *Science*, Vol. 351, Issue 6269, aac8353, DOI: 10.1126/science.aac8353.
- Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rodiger, T., Siebert, C., 2011. Semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data and the derivation of groundwater flow paths, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol.8, 1399-1433
- Morales A., Daniel J., Rosario M., 2012. Application of Remote Sensing techniques to identify major faults in the Island of Puerto Rico using SAR and ALSR images, *Geological Society of America Bulletin*. Vol.87, PP.1463-1469.
- Oleary, D., Freidman, J., & Pohn, H., 1976, Lineament, linear, lineation: Some proposed new definitions for old terms, *Geol. Soc.Am. Bull.*87, 1463–1469.
- Rosenfeld, C. L. 2004. *Geomorphological Hazard*, Encyclopedia of Geomorphology, Volume 1, Rowlledge press, P, 423-426.
- Yang, W., Qi, W., Wang, M., Zhang, J., Zhang, Y., 2017. Spatial and temporal analyses of post-seismic landslide changes near the epicentre of the Wenchuan earthquake, *Geomorphology* 276 8–15.
- Zhang W., Liu W., Yang J., Chen L., 2013. Remote sensing data analysis for structural information of active faults, *International Conference on Ecology, Waste Recycling and Environment Advances in Biomedical Engineering*, Vol.7, PP.13-18.