

بررسی فعالیت تکتونیکی در حوضه دشت اشتهارد با استفاده از تداخل نگار راداری

فرین نایب‌زاده - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
عقیل مددی* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
قاسم عزیزی - دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

وصول: ۱۳۹۶/۰۷/۱۱

چکیده

فعالیت‌های تکتونیکی و زمین‌ساختی، همواره نقش مهمی در تغییرات ژئومورفولوژیکی داشته‌اند و شناسایی ماهیت و چگونگی حرکات زمین‌ساخت جدید، در درک و تفسیر زمین‌ریخت‌ها بسیار مورد توجه است. در این پژوهش، حرکات زمین‌ساختی در حوضه دشت اشتهارد و قزوین که در غرب و جنوب غرب تهران و در دامنه‌های جنوبی البرز قرار دارد، با استفاده از تکنیک تداخل نگار راداری انجام شده و شواهد این تغییرات با استفاده از نقشه ژئومورفولوژی حوضه، مورد بررسی قرار گرفته است. این تکنیک، با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ که در محدوده باند C راداری، با طول موج متوسط ۵/۶ گیگاهرتز قرار دارد، انجام گرفته است؛ همچنین، نقشه ژئومورفولوژی منطقه با استفاده از تصاویر گوگل ارث، مدل رقومی ارتفاع، مدل هیل شید، نقشه زمین‌شناسی، بازدید میدانی و نمونه برداری از عوارض، در نرم‌افزار آرک مپ ترسیم شد. تصاویر راداری سنتینل ۱ از سایت ماهواره اروپا گرفته شده و در نرم‌افزار اسنپ اقدام به پایش تغییرات شده است. بر این اساس، با توجه به نتایج تداخل نگار راداری، از تاریخ ۲۰۱۵/۱۰/۳ تا ۲۰۱۷/۱۰/۲ کل حوضه مورد مطالعه با بالا آمدگی ناشی از تکتونیک روبه‌رو بوده است؛ اما میزان بالا آمدگی تکتونیکی در قسمت‌های غربی و شمال غربی حوضه دشت قزوین و اشتهارد بیشتر از قسمت‌های شرقی و جنوبی است. بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی از قبیل مخروط افکنه‌های متوالی، بدلندها، انحراف مخروط افکنه‌ها و بقایای پادگانه‌های دریاچه‌ای نیز کاملاً با نتایج به دست آمده از تداخل نگار راداری هماهنگی نشان می‌دهد و از سرعت برخاستگی تکتونیکی زیاد در شمال غرب حوضه، یعنی اطراف شهرهای قزوین و تاکستان در مقایسه با جنوب و جنوب شرق حکایت دارد.

واژگان کلیدی: تداخل نگار راداری، سنتینل یک، نقشه ژئومورفولوژی، دشت اشتهارد.

مقدمه

فعالیت‌های نئوتکتونیک، فرم‌های جدید سطح زمین را به وجود آورده و شکل و موقعیت آنها را کنترل می‌کند (نویکو و پوسیوا^۱، ۲۰۱۷)؛ از این رو، در مناطقی که در محدوده فعالیت‌های تکتونیک قرار دارند، بیشتر شکل‌هایی وجود دارد که تحت تأثیر این فعالیت‌ها شکل گرفته‌اند و در بسیاری از مناطق، با بررسی همین اشکال، می‌توان به فعالیت‌های تکتونیک در یک منطقه پی برد. با این حال، استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی برای بررسی فعالیت‌های تکتونیک در همه‌جا کارایی ندارد. به‌ویژه در مناطقی که فرسایش و یا هر عامل دیگری بتواند تأثیر تکتونیک بر ژئومورفولوژی را کاهش دهد. در چنین مناطقی، استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی، یا امکان‌پذیر نبوده و یا بسیار دشوار است و نتایج به‌دست‌آمده با تردیدهای فراوان همراه خواهد بود. یکی از راه‌هایی که امروزه برای محاسبه جابه‌جایی رخدادها در سطح زمین استفاده می‌شود؛ فناوری تداخل‌سنجی راداری است که شامل قابلیت‌های منحصربه‌فردی در ابعاد، هزینه، زمان و دقت، نسبت به دیگر تکنیک‌های سنجش است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ به همین دلیل، در پژوهش حاضر، سعی بر آن است تا به ارزیابی میزان جابه‌جایی‌ها در حوضه دشت قزوین و اشتهارد در طی سال‌های اخیر و شواهد آن پرداخته شود.

یکی از مناطق فعال از نظر تکتونیک در ایران، حوضه دشت قزوین و اشتهارد است که به‌دلیل قرارگیری در دامنه‌های جنوبی البرز، از نظر تکتونیک فعال است (شمائلیان و همکاران، ۱۳۹۵). گسل‌های فعال البرز مرکزی از نوع گسل‌های معکوس و امتدادلغز بوده و این ناهم‌واری، بسیار پیچیده است (زانچی^۲ و همکاران، ۲۰۰۶)؛ از این رو، حرکات گسل‌های این ناحیه از البرز، در حوضه مخروط‌افکنه‌ها که در مناطق کوهستانی قرار دارند، تأثیر می‌گذارد و در مرحله بعد، تأثیر این حرکات در ویژگی‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها نمود می‌یابد (آزادبخت، ۱۳۸۹)؛ از این رو، می‌تواند باعث تغییر در نرخ رسوب‌گذاری و اندازه ذرات رسوب شود (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ لذا بررسی فعالیت‌های تکتونیک به‌طور عمده از راه شواهد ژئومورفولوژیکی که از این فعالیت‌ها حاصل شده، مطالعه می‌شود. این بررسی‌ها، می‌تواند به‌منظور شناسایی مناطق گسلی فعال و نیازمند نظارت لرزه‌ای باشد (دپانجان^۳ و همکاران، ۲۰۱۶).

شواهد حرکات تکتونیک در برخی مناطق به‌خوبی می‌تواند بازگوکننده روند تکامل چشم‌انداز ژئومورفولوژی منطقه باشد. به‌طوری که هم‌پوشانی ویژگی‌های ژئومورفولوژی پادگانه گانسردورف^۴ در حوضه مرکزی وین اتریش با فرایندهای نئوتکتونیک (ویسل^۵ و همکاران، ۲۰۱۷)، روند تکامل کانیون‌های ماویبوغاز^۶ و سوگلا^۷ در جنوب غرب آنتالیا در ترکیه (دگن و کوچیگیت^۸، ۲۰۱۸) و تأثیر گسل‌های اشتهارد و ایپک بر مخروط‌افکنه حاجی عرب در جنوب حوضه دشت قزوین (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱)، نقش شواهد ژئومورفولوژی در بررسی فعالیت‌های تکتونیک را به‌خوبی آشکار می‌سازد. با این حال، در مناطقی که این شواهد کم‌رنگ هستند و یا ممکن است اشکال به‌وجودآمده حاصل فرایندهای دیگر باشند، بررسی حرکات

1- Novikov & Pospeeva

2- Zanchi

3- Dipanjan

4- Gaenserndorf

5- Weissl

6- Maviboğaz

7- Suğla

8- Doğan & Koçyiğit

گسل‌ها به‌ویژه در مورد چین‌های متفرق ناحیه قزوین نیز لزوماً نمی‌تواند تحلیل مشخصی از حرکات تکتونیکی در این ناحیه را به دست دهد (آرام و پورکرمانی، ۱۳۸۷)؛ در مقابل، استفاده از تصاویر راداری در بررسی‌های تکتونیکی، دارای مزیت‌های فراوانی است؛ از جمله اینکه می‌توان با استفاده از آن، فعالیت‌های کوتاه‌مدت و یا نرخ حرکات تکتونیکی را مشخص کرد؛ به‌عنوان نمونه، فعالیت تکتونیکی کوه اتنا^۱ در ایتالیا بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ به میزان ۴ تا ۶ میلی‌متر در سال، باعث بالا آمدن آن شده است (فروگر^۲ و همکاران، ۲۰۰۱) در حالی که منطقه کانسو^۳ چین در پی تنش بین گسل‌ها، سالانه به میزان ۴/۲-۸ میلی‌متر متر جابه‌جایی در عمق را داشته است (کواله^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج به‌دست‌آمده از این روش، معمولاً دارای دقت بسیار خوبی است به‌طوری که تغییر شکل‌های تکتونیک فعال در دره لانگیتودینال^۵ در شرق تایوان، با میزان جابه‌جایی ۰/۳۰ سانتی‌متر در سال با نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های جی.پی.اس^۶ مطابقت می‌کند (چامپینویس^۷ و همکاران، ۲۰۱۲).

اگرچه در مناطقی که دارای محدودیت‌های استفاده از تصاویر راداری هستند ممکن است نتوان به نرخ‌های جابه‌جایی به‌دست‌آمده اعتماد کرد؛ با این حال، می‌تواند در شناسایی مناطق فعال تکتونیکی به‌ویژه، مناطق جوان و در حالت بلوغ در یک منطقه مانند حوضه ماکویونی^۸ و بی‌ثباتی‌های تکتونیکی حوضه دریاچه مانیارا^۹ در شمال تانزانیا که عامل تکامل چشم‌انداز هستند مورد استفاده قرار گیرد (فلورس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵). حرکات تکتونیکی جدید در منطقه کاشی^{۱۱} چین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری نشانگر آن است که این منطقه، با سرعت ۱ تا ۲ میلی‌متر در سال، در حال بالا آمدن است (هی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۵). با استفاده از تصاویر رادار همچنین می‌توان تغییر شکل‌های سریع تکتونیکی که به‌طور کلی با رخداد زلزله‌های مهیب همراه هستند را اندازه‌گیری کرد؛ به‌عنوان نمونه، در زلزله ۱۶ سپتامبر سال ۲۰۱۵ در منطقه ایلاپل^{۱۳} در کشور شیلی که با بزرگی ۸/۳ در مقیاس ریشتر اتفاق افتاد و با تصاویر سنتینل^{۱۴} مطالعه شد؛ میزان بالا آمدگی زمین به ۱۳۳ سانتی‌متر می‌رسد (چانیان^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به این مطالب، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه دشت اشتهارد و قزوین با استفاده از تکنیک تداخل‌نگار راداری مورد ارزیابی قرار گیرد و نتایج به‌دست‌آمده، با شواهد ژئومورفولوژی تطابق داده شود. تاکنون بیشتر مطالعات تکتونیکی در ژئومورفولوژی منحصر به مطالعه شاخص‌های مورفوتکتونیک بوده است که در بعد زمان و تعیین مناطق مختلف از نظر شدت و ضعف حرکات تکتونیکی اطلاعات چندانی به دست نمی‌دهد؛ اما با این روش، علاوه بر تعیین زمان، می‌توان نقاط مختلف یک حوضه از نظر فعالیت‌های تکتونیکی را مشخص کرد.

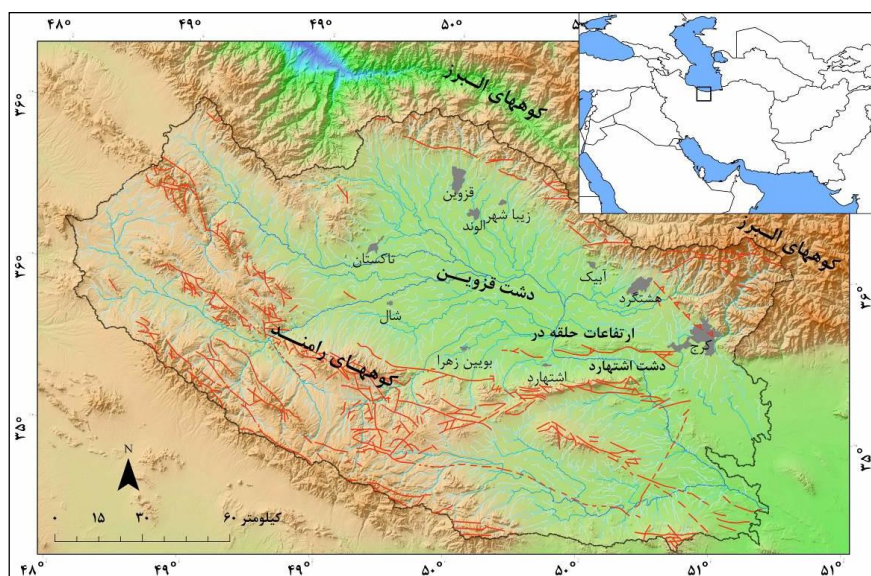
- 1- Mount Etna
- 2- Froger
- 3- Gansu
- 4- Cavalié
- 5- Longitudinal Valley
- 6- Global Positioning System (GPS)
- 7- Champenois
- 8- Makuyuni
- 9- Lake Manyara
- 10- Flores
- 11- Kashi
- 12- He
- 13- Illapel
- 14- Sentinel
- 15- Chunyan

معرفی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه، شامل حوضه آبریز دشت قزوین و اشتهارد است. این منطقه، از شمال با رشته کوه البرز محدود شده و در جنوب به کوه‌های ایران مرکزی می‌رسد. مختصات حوضه بین 35° تا $36^{\circ} 30'$ عرض شمالی و $48^{\circ} 30'$ تا $51^{\circ} 30'$ طول شرقی قرار گرفته است. مهم‌ترین شهرهایی که در حوضه آن قرار دارند، شامل کرج و هشتگرد در شمال شرق و قزوین و تاکستان در شمال غرب است. از نظر ساختمانی، قسمت اعظمی از حوضه به صورت یک چاله است. این چاله، به وسیله یک شکاف که در طاق‌دیس جنوبی آن بانام ارتفاعات حلقه در وجود دارد به چاله مجاور شهر اشتهارد راه می‌یابد. رودخانه‌ای که در این چاله جریان دارد و باعث بریدگی ارتفاعات حلقه در شده است، با نام رودخانه شور بعد از گذر از جنوب مخروط افکنه ماهدشت به دریاچه قم می‌ریزد. دورتادور چاله، در پای کوه را مخروط افکنه‌ها فرا گرفته‌اند و حتی به نظر می‌رسد تا وسط دشت نیز پیشروی کرده‌اند؛ اما کف چاله از رسوبات رسی و تبخیری شور پوشیده شده است. سرتاسر مرز شمالی حوضه، توسط کوه‌های البرز که یک منطقه فعال کوه‌زایی با روند غربی-شرقی است محدود می‌شود؛ اما مرز جنوبی منطقه، توسط کوه‌های حاشیه ایران مرکزی که هم‌راستا با زاگرس دارای جهت شمال غربی - جنوب شرقی هستند مشخص می‌شود. معروف‌ترین گسل‌های منطقه عبارتند از گسل شمال قزوین که در مرز شمالی حوضه قرار دارد. گسل اشتهارد که از نزدیکی شهر اشتهارد عبور می‌کند و گسل ایپک که در جنوب حوضه است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی پویایی تکتونیکی در حوضه دشت قزوین و اشتهارد، از تصاویر سنتینل یک و نقشه ژئومورفولوژی منطقه، استفاده شده است. برای گرفتن تصاویر راداری مورد نظر، پس از ثبت نام در سایت و دانلود تصاویر راداری ماهواره اروپا^۱، تصاویر مناسب برای انجام عملیات تداخل نگار راداری اخذ شد. به منظور کسب نتایج بهتر از تصاویر با گذر صعودی^۲ استفاده شده است. تاریخ اولین تصویر، ۲۰۱۵/۱۰/۲ و دومین تصویر، ۲۰۱۷/۱۰/۳ یعنی با فاصله زمانی ۷۳۱ روز است.



شکل ۱. نقشه منطقه مورد بررسی

1- <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>

2- ASCENDING

برای آنکه اختلاف فاز ناشی از عوامل اتمسفری و اقلیمی به حداقل برسد، تصاویر گرفته‌شده هر دو مربوط به یک ماه و روزهای مشابه است. میزان خطّ پایه^۱، نسبت به تصویر اصلی ۴۷ متر و حدّ بحرانی آن ۱۵۸۸۲ متر است که نشان می‌دهد این میزان، برای انجام تداخل‌نگار راداری قابل قبول است. برای هر دو تصویر نیز از قطبش VV استفاده شده است که برای سنجش تغییرات سطحی مناسب است (جدول ۱).

مراحل تداخل‌نگار راداری با استفاده از این تصاویر، در نرم‌افزار اسنپ^۲ انجام شد. این نرم‌افزار، برای کار با داده‌های سنتینل طراحی شده است. برای تولید تداخل‌نگار در نرم‌افزار اسنپ، مراحل ذیل انجام شده است: ابتدا محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی، به خاطر سرعت در پردازش تصاویر جدا شده و سپس تصحیحات مربوط به مدار بر روی تصاویر انجام گرفت. در مرحله بعد تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاع مربوط به مختصات تصاویر برهم منطبق شد. پس از این مرحله، همبستگی بین تصاویر محاسبه شده و با استفاده از اختلاف فازها اینترفروگرام^۳ منطقه به دست آمد. با اتصال نوارهای تصویر به یکدیگر و حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام، می‌توان با اعمال فیلترهایی، کیفیت اینترفروگرام به دست آمده را افزایش داد؛ اما برای باز کردن فازها با استفاده از نرم‌افزار واسطه اسنپ فو^۴ اقدام به باز کردن فازها شد. در مرحله بعد، فازهای باز شده را به نرم‌افزار اسنپ وارد کرده و با استفاده از رابطه^۱، اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شد.

$$\text{Vert_Displ} = \frac{\Delta_{unw} \cdot \lambda}{-4\pi \cdot \cos\theta_{inc}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، جابه‌جایی عمودی با استفاده از فاز باز شده (Δ_{unw}) در طول موج متوسط تصویر به سانتی‌متر (λ)، تقسیم بر منفی چهار در عدد پی در کسینوس زاویه تابش تصویر به دست می‌آید.

جدول ۱. مشخصات تصاویر راداری برای انجام تداخل‌نگار راداری^۵

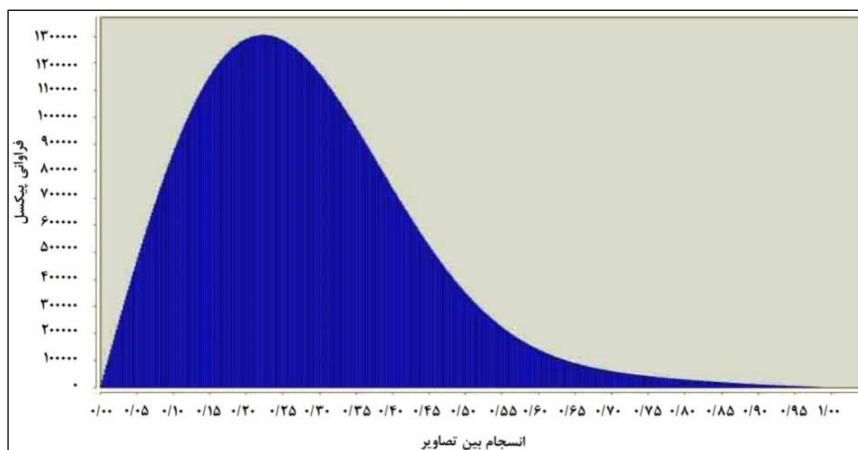
تصویر تابع	تصویر اصلی	
S1A_IW_SLC_1SSV_20151002 T143528_20151002T143555_007975_00B264_8E89	S1A_IW_SLC_1SDV_20171003 T143544_20171003T143612_018650_01F734_BA B9	مشخصات تصویر
۲۰۱۷/۱۰/۰۲	۲۰۱۷/۱۰/۰۳	تاریخ
۲۸	۲۸	گذر
-۴۷	.	خط مبنا (متر)
۱۱۳	۱۱۲	چهارچوب
۷۳۱	.	فاصله زمانی (روز)
صعودی	صعودی	جهت دید
VV+VH	VV	قطبش
SLC	SLC	نوع تصویر
IW	IW	پرتو
۱۵۸۸۲	۱۶۰۶۴	خط مبنا بحرانی (متر)

- 1- Baseline
- 2- Sentinel Application Platform
- 3- Interferogram
- 4- Snaphu
- 5- <http://baseline.asf.alaska.edu>

برای ترسیم نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه، در مرحله اول به منظور شناسایی اشکال ژئومورفولوژی با کمک گرفتن از نقشه زمین‌شناسی منطقه، هیل شید^۱، تصاویر ماهواره‌ای، تصاویر گوگل ارث^۲، عکس‌های هوایی و مدل ارتفاع رقومی، اطلاعات اولیه در مورد عوارض ژئومورفولوژی منطقه به دست آمده و نقشه اولیه‌ای از ژئومورفولوژی منطقه ترسیم شد. برای ترسیم نقشه اولیه ژئومورفولوژی، ابتدا واحدهای ژئومورفولوژی مانند کوهستان، دشت و دامنه ترسیم شد و در مرحله بعد، زمین‌ریخت‌ها^۳ در دل این واحدها شناسایی و مشخص شدند. پس از این مرحله، در یک بازدید میدانی از منطقه، عوارض ترسیم‌شده که روی نقشه پیاده شده بود با عوارض روی زمین تطبیق داده شده و مواردی که تشخیص آنها از روی تصاویر سخت بود، مشخص شدند. در مرحله بعد، نقشه تکمیلی ترسیم شد و در یک بازدید میدانی، ایرادهای نقشه رفع شد. پس از اتمام کار شناسایی و ترسیم زمین‌ریخت‌ها، به تهیه نقشه سنگ‌شناسی منطقه، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اقدام شد؛ در نهایت، با نمایش و کارتوگرافی اطلاعات زمین‌ریخت‌ها، سنگ‌شناسی و عوارض انسانی در نرم‌افزار جی.آی.اس^۴ نقشه ژئومورفولوژی ترسیم شد.

نتایج

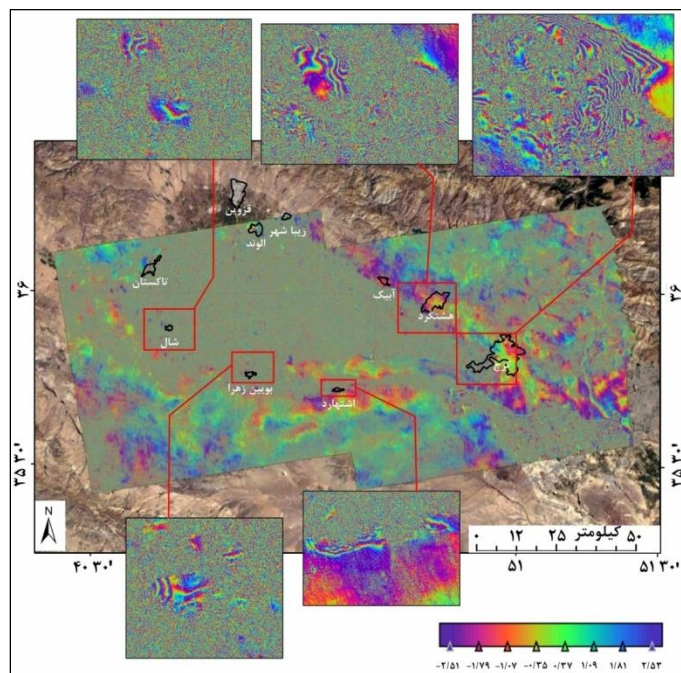
انسجام^۵ بین فازها در دو تصویر راداری با توجه به ویژگی‌های آماری انعکاس راداری برآورد می‌شود و میزان آن بین صفر و یک متغیر است. به طوری که انسجام کمتر نشان می‌دهد که سهم اختلال در فاز تصویر بیشتر است (لیو^۶ و همکاران، ۲۰۱۵). انسجام بین تصاویر مورد استفاده، بیشتر از ۰/۲ و در محدوده بین ۰/۲۳ تا ۰/۲۵ است (شکل ۳). اگرچه چولگی به سمت راست بوده و انسجام بین تصاویر پایین‌تر از حد میانگین است؛ اما در بیشتر نرم‌افزارهای راداری، به منظور تداخل‌نگار، میزان انسجام بالاتر از ۰/۲ می‌تواند مناسب باشد (فرتی^۷ و همکاران، ۲۰۰۷). فراوانی پیکسل‌هایی که بالاتر از ۰/۶ انسجام دارند، بسیار ناچیز بوده و در حدود ۱۰٪ از کل پیکسل‌ها را شامل می‌شوند. میانگین انسجام کل پیکسل‌ها، ۰/۲۸ و میانه ۰/۲۶ است. به‌طور کلی، ۹۰٪ از کل پیکسل‌ها زیر ۰/۴۸ انسجام دارند. با این حال، نتایج این نمودار بیانگر آن است که می‌توان تصاویر را در تداخل‌نگار راداری مورد استفاده قرار داد.



شکل ۳. هیستوگرام انسجام برای تصاویر مربوط به ۲ اکتبر ۲۰۱۵ و ۳ اکتبر ۲۰۱۷

- 1- Hillshade
- 2- Google Earth
- 3- Landforms
- 4- Geographic Information System (GIS)
- 5- Coherence
- 6- Liu
- 7- Ferretti

تداخل نگار راداری به نقشه اختلاف فاز بین پیکسل‌های دو تصویر راداری، اطلاق می‌شود که مربوط به یک محل بوده و در یک مدار تصویربرداری شده است (استراموندو^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). در اینجا، سعی می‌شود تا نقش عوامل مزاحم برای اختلاف فازها در تعیین میزان جابه‌جایی زمین به حداقل ممکن کاهش یابند. عواملی همچون تغییرات پیکسل زمین، شیب زمین، جهت دید سنجنده که به صعودی یا نزولی بودن مسیر حرکت سنجنده بستگی دارد؛ شکل مدار، فرکانس استفاده‌شده برای دو تصویر یا همان بانندی که تصاویر در آن محدوده تصویربرداری شده‌اند، فرایند پردازش تصویر که وابسته به الگوریتم‌هایی است که برای پردازش از آنها استفاده شده است، تفاوت توپوگرافی مشاهده‌شده از دو موقعیتی که سنجنده هر یک از تصاویر را در آن موقعیت برداشت کرده است که به تفاوت در خط مبنا معروف است، همه بر شکل‌گیری یک اینترفروگرام تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، برای دو تصویر که به‌منظور تولید اینترفروگرام استفاده می‌شود، پیکسل زمین باید پایدار باشد، به این معنا که تغییراتی که در پیکسل زمینی رخ می‌دهد حاصل جابه‌جایی زمین باشد و نه عوامل دیگری همچون خاک‌برداری و غیره. همچنین شیب زمین باید کم باشد و جهت دید سنجنده در برداشت هر دو تصویر، شکل مدار و روش تولید هر دو تصویر باید دقیقاً یکسان باشد (ژو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹)؛ به عبارت دیگر، نمی‌توان تصاویر سنجنده‌های متفاوت که دارای طول موج، شکل مدار و فرایند پردازش متفاوتی بوده‌اند را به‌منظور تولید راداری، با هم مورد استفاده قرار داد. مقدار اختلاف فازهای دو تصویر بین $\pi -$ و $\pi +$ است (برمند^۳، ۱۹۹۴). به این ترتیب، مقادیر اختلاف فاز به‌دست‌آمده برای پیکسل‌ها بین بازه $3/14$ تا $-3/14$ قرار دارد (شکل ۴). الگوی فرینچ‌ها^۴ که در مناطق محدودی در سطح دشت و کوهپایه وجود دارد؛ نشانگر آن است که حسب معمول، در مناطقی که منطبق بر شهرها و نقاط مسکونی هستند؛ بیشتر فعالیت‌های انسانی در تغییر شکل‌های زمین نقش دارد؛ اما الگوهای وسیع‌تر مربوط به فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه است که در مرز دشت و ارتفاعات به‌خوبی مشخص هستند (شکل ۴).



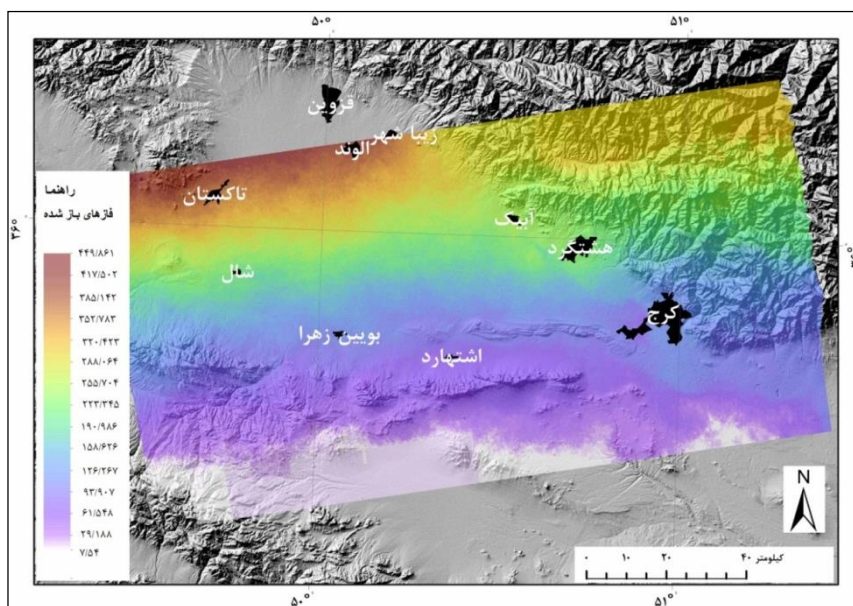
شکل ۴. اختلاف فاز دو تصویر راداری

- 1- Stramondo
- 2- Zhou
- 3- Brémand
- 4- Fringes

نقشه فازهای به دست آمده، به صورت پیچیده است و برای اینکه بتوان آنها را به صورت فازهای واقعی نشان داد، باید آنها را آنرپ^۱ کرد. باز کردن فاز از طریق تکرار پردازش، خطاهای مربوط به اتمسفر و سایر پارامترها را رفع می کند (گوا^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). نقشه فازهای باز شده، روند کلی تغییرات فاز را در منطقه نشان می دهد، هرچه از ارتفاعات جنوبی به سمت شمال، یعنی جایی که دشت قزوین به کوه های البرز می رسد، پیش می رویم، بر میزان فازهای باز شده افزوده می شود. اثر تغییر شکل های محلی که در شکل ۴ نشان داده شده است، در این نقشه نیز مشهود است، در جنوب کرج و هشتگرد، مقادیر کمتر فازهای باز شده در میان اعداد بزرگ تر، نشانگر همین مسئله است؛ همچنین، مقادیر تمام فازهای باز شده، مثبت هستند که با توجه به تصویر اصلی که تصویر سال ۲۰۱۷ در نظر گرفته شده، بیانگر این موضوع است که کل منطقه نسبت به سال ۲۰۱۵ بالا آمده است؛ اما بر میزان این بالا آمدگی از جنوب به طرف شمال افزوده می شود (شکل ۵).

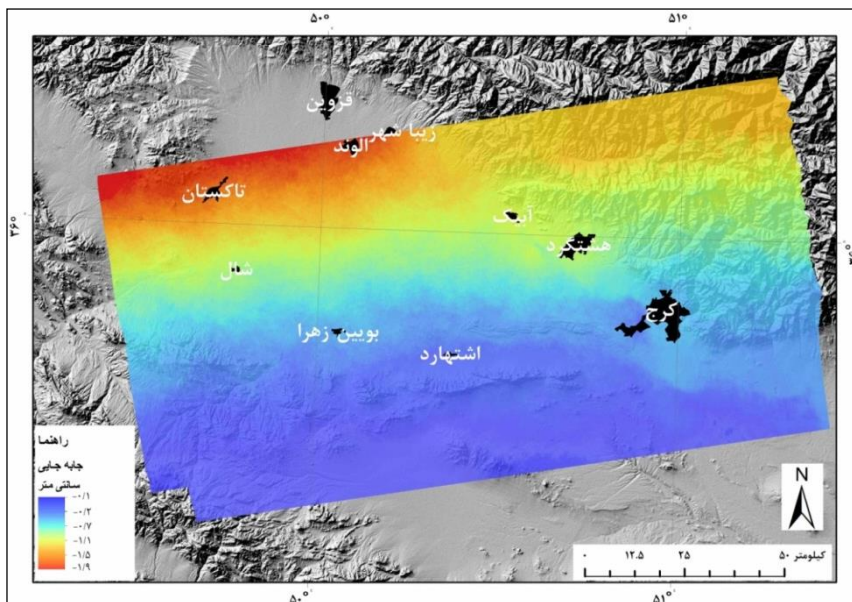
میزان جابه جایی به دست آمده برای منطقه مورد مطالعه در فاصله زمانی سوم اکتبر ۲۰۱۵ تا دوم اکتبر ۲۰۱۷ میلادی، بین ۱ میلی متر تا نزدیک به ۲ سانتی متر بوده است. کمترین میزان بالا آمدگی در قسمت های جنوب و جنوب شرق حوضه و بیشترین مقدار، در شمال غرب حوضه مورد مطالعه است (شکل ۶).

همان گونه که ذکر شد، فرایند محاسبه تغییرات فاز وابسته به شرایطی است که می تواند نتایج به دست آمده را با خطا مواجه سازد؛ به همین دلیل، به منظور بررسی شواهد تکتونیکی که در زمین ریختها منعکس می شود، نقشه ژئومورفولوژی منطقه (شکل ۷) نیز به کار گرفته شده است. از دیرباز زمین شناسان، تکتونیک را به عنوان عامل اصلی توالی مخروط افکنه ها معرفی می کنند (هاروی^۳ و همکاران، ۲۰۰۵). عمده توالی مخروط افکنه ها در منطقه مورد مطالعه، در شمال حوضه و در اطراف شهر قزوین و تاکستان دیده می شود. با این حال، در تمام دامنه های جنوبی البرز به طور محدودتر می توان توالی مخروط افکنه ها را دید و این در حالی است که در جنوب حوضه، توالی مخروط افکنه ها کمتر دیده می شود. در حد فاصل شهرهای قزوین و تاکستان، توالی سه مخروط افکنه جوان و یک مخروط افکنه قدیمی دیده می شود که نشان دهنده فعالیت تکتونیکی این منطقه است.

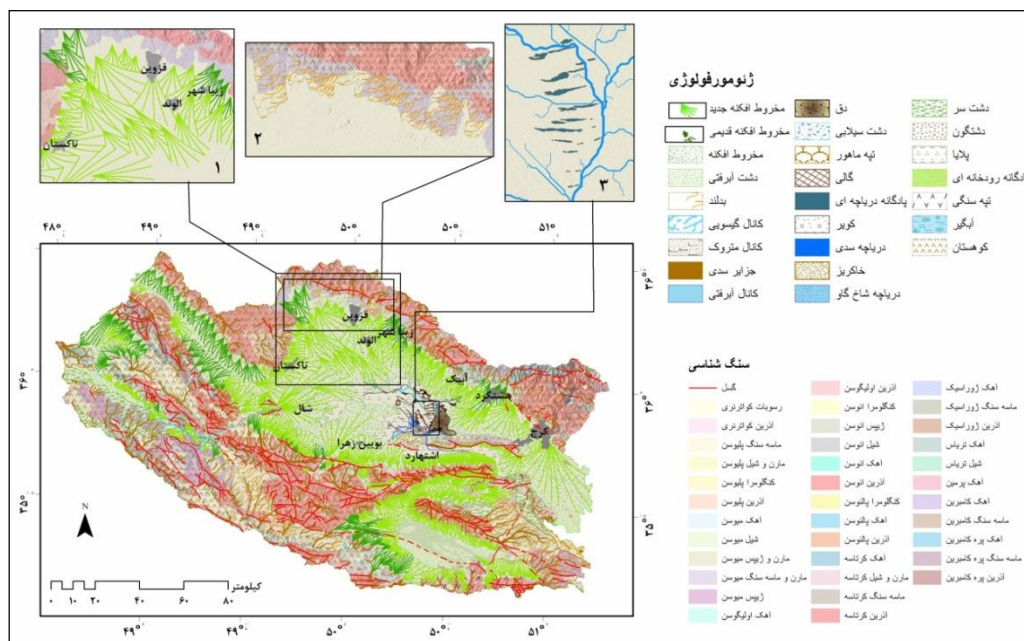


شکل ۵. نقشه فازهای باز شده مربوط به تصاویر دوم اکتبر ۲۰۱۷ و سوم اکتبر ۲۰۱۵

- 1- Unwrapping
- 2- Guo
- 3- Harvey



شکل ۶. میزان جابه‌جایی عمودی از تاریخ سوم اکتبر ۲۰۱۵ تا دوم اکتبر ۲۰۱۷



شکل ۷. نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

در بالادست مخروط‌افکنه‌های متوالی اطراف قزوین، بدلندها^۱ هستند که می‌توانند نتیجه تخریب شدید مخروط‌افکنه‌های قدیمی باشند. پهنه وسیعی از بدلندها در جنوب شرقی حوضه نیز دیده می‌شوند که نتیجه عمیق شدن بستر رودخانه شور و تغییر سطح اساس هستند. شاهد ژئومورفولوژیکی دیگری که نشان از تغییرات تکتونیکی در شمال حوضه دارد، تپه‌هایی هستند که در شمال دشت اشتهارد قرار گرفته‌اند (شکل ۷) در قسمت برجسته‌شده^۳. شکل ظاهری این تپه‌ها که قسمت پیشانی آنها بزرگ‌تر و عریض‌تر و قسمت‌های انتهایی آنها باریک است، به‌خوبی گویای تغییرپذیری سریع آنها در برابر فرایند سیالی مانند آب است؛ همچنین، نمونه‌گیری از این تپه‌ها و آزمایش هیدرومتری نشان داد که جنس آنها از رس است (شکل ۸).



شکل ۸. تپه‌های رسی شمال دشت اشتهارد

بحث

دشت اشتهارد به‌عنوان چالۀ محصور در میان رشته‌کوه البرز در شمال و کوه‌های رامند در جنوب، از فعالیت‌های نئوتکتونیک گسل قزوین در شمال (آلن^۱ و همکاران، ۲۰۰۳؛ بچمانو^۲ و همکاران، ۲۰۰۴؛ اشتري و همکاران، ۲۰۰۵) و گسل ایپک در جنوب تأثیر پذیرفته است (صحبتی و همکاران، ۱۳۹۰). اگرچه تأثیر این فعالیت‌ها را معمولاً می‌توان در حاشیۀ گسل‌ها به‌صورت شواهد ژئومورفولوژی دید؛ اما فعالیت تکتونیک در یک منطقه، تنها محدود به خطوط گسلی و شواهد مورفوتکتونیک نیست. با این حال، بیشتر روش‌های موجود، به‌طور کلی محدودۀ گسترش این فعالیت‌ها را در حواشی گسل‌ها و نزدیک به آن نمایان می‌کند. استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک نیز در تشخیص فعال بودن یک حوضه از نظر تکتونیک مفید است؛ اما این شاخص‌ها قادر نیستند فعالیت‌های تکتونیک که معمولاً آرام هستند را در کوتاه‌مدت نشان دهند؛ افزون بر این، نرخ جابه‌جایی حاصل از حرکات تکتونیک در طول زمان یکسان نبوده و ممکن است در یک منطقه دارای نوساناتی باشد؛ در هر صورت، در بیشتر موارد، شواهد این حرکات را می‌توان روی زمین مشاهده کرد.

در دشت قزوین که دورتادور آن توسط کوه‌ها و چین‌خوردگی‌ها احاطه شده است؛ شواهدی را می‌توان یافت که نشان از فعالیت نئوتکتونیک در منطقه دارد. یکی از این شواهد، مخروط‌افکنه‌ها است. از آنجا که مخروط‌افکنه‌ها، زمین‌ریخت‌های تراکمی دوران کواترن به شمار می‌آیند؛ لذا شناسایی آثار تکتونیک در آنها را می‌توان به حرکات نئوتکتونیک مربوط دانست. وجود توالی در مخروط‌افکنه‌ها که به‌طور عمده در غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند می‌تواند به دلیل بالآمدگی حوضۀ آنها، در این قسمت از منطقه باشد؛ همچنین وجود مخروط‌افکنه‌های قدیمی در بالادست مخروط‌های جدید، در شمال غرب منطقه که بر اثر افزایش انرژی آبراهه‌ها به‌صورت بدلندهایی ظاهر شده‌اند، نیز می‌تواند یکی از شواهد وجود حرکات نئوتکتونیک در منطقه باشد. به‌طوری که افزایش انرژی آبراهه به دلیل افزایش شیب و اختلاف ارتفاع می‌تواند در ارتباط با فعالیت‌های نئوتکتونیک اتفاق افتد. بر همین اساس، شواهد دال بر فعالیت‌های نئوتکتونیک در قسمت‌هایی از منطقه مورد مطالعه وجود دارد که می‌تواند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار

1- Allen

2- Bachmanov

گیرد.

اگرچه داده‌های ماهواره‌ای، لزوماً اطلاعات خوبی در مورد تغییر شکل در مناطق کوهستانی که توپوگرافی پیچیده و پوشش گیاهی دارند و یا در امتداد یک گسل با جابه‌جایی بزرگ هستند، ارائه نمی‌کند (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۱۶)؛ با این حال، با استفاده از تصاویر راداری می‌توان جابه‌جایی‌های زمین را با دقت زیر سانتی‌متر به دست آورد (داریو^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). در کار با تصاویر راداری، علاوه بر پیچیده بودن فرایند تولید اینترفروگرام شرایط ویژه‌ای در مورد استفاده از داده‌ها باید در نظر گرفته شود؛ به‌عنوان مثال، میزان شیب، جهت دید سنجنده، فرکانس تصاویر، خط مبنا و غیره همه بر شکل‌گیری یک اینترفروگرام تأثیر می‌گذارند؛ از طرفی، نتایج حاصل از روش‌های سنجش از دور همواره نیازمند کالیبره شدن با داده‌های حاصل از مشاهده مستقیم و برداشت‌های میدانی است؛ از این رو، تأیید نتایج حاصل از تداخل‌نگار راداری با شواهد ژئومورفولوژیکی می‌تواند دید بهتری در درک فعالیت‌های تکتونیکی یک منطقه حاصل کند. در این پژوهش، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، داده‌های راداری به‌خوبی توانسته است وضعیت فعالیت‌های نئوتکتونیکی در منطقه را نمایان سازد، به‌طوری که با شواهد ژئومورفولوژی در منطقه هماهنگی نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، این امکان فراهم آمد تا میزان فعالیت تکتونیکی در مناطق هموار و مقایسه میزان فعالیت تکتونیکی در نقاط مختلف حوضه دشت قزوین، مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه به‌دلیل انسجام کم بین تصاویر، نمی‌توان نرخ جابه‌جایی به‌دست‌آمده را چندان مورد استناد قرار داد؛ اما نتایج به‌دست‌آمده در مورد اختلاف میزان بالآمدگی در مناطق مختلف حوضه، به‌طور کامل، با شواهد ژئومورفولوژی منطبق است. بر این اساس، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، به‌خوبی توانسته است نقاط فعال از نظر تکتونیک در حوضه دشت قزوین را مشخص نماید.

آنچه از پژوهش حاضر می‌توان دریافت، این است که میزان بالآمدگی تکتونیکی به‌طور کلی در حاشیه شمالی حوضه دشت قزوین و اشتهارد که جزو دامنه‌های جنوبی البرز محسوب می‌شود، بیش از قسمت‌های جنوبی حوضه است که جزو ارتفاعات ایران مرکزی به‌حساب می‌آید؛ با این حال، در کل، حاشیه شمالی حوضه نیز به یک اندازه نیست و در قسمت‌های شمال غرب و غرب بیش از شمال شرق و شرق است. نتایج تداخل‌نگار راداری نشان می‌دهد که اختلاف فازها به سمت شهرهای قزوین و تاکستان در بیشترین حد خود است و این در حالی است که به طرف جنوب، کمترین میزان را دارد. تداخل‌نگار راداری بیانگر آن است که طرح بالآمدگی تکتونیکی به‌صورت منحنی‌هایی موازی و کمابیش مستقیم است که با روند غربی - شرقی کشیده شده‌اند و تنها در محدوده‌های شهری دارای انحنایی هستند که آن را می‌توان به فرونشست‌های شهری و فعالیت‌های انسانی مرتبط دانست؛ به عبارت دیگر، دشت قزوین و اشتهارد در حوالی شهرهای قزوین و تاکستان، بیشترین بالآمدگی را داشته به‌طوری که باعث شکل‌گیری سه مخروط‌افکنه متوالی جدید و یک مخروط‌افکنه قدیمی شده است. نتایج به‌دست‌آمده، با کاری که آرام و پورکرمانی (۱۳۸۷) انجام داده‌اند مطابقت دارد. آنها افزون بر آنکه گسل شمال قزوین را گسل قدیمی معکوس با شیب رو به شمال و پر تنش معرفی کرده‌اند، همچنین بیان می‌دارند که گسل قزوین، به گسل شمال تهران وصل نیست و این می‌تواند

1- Zuo

2- Dario

علت کاسته شدن از میزان بالآمدگی، از غرب به شرق منطقه را توجیه کند. توالی مخروطافکنه‌ها در غرب حوضه نیز مشاهده می‌شود و در جنوب حوضه در شرق و شمال شهر بویین‌زهرها باعث انحراف مخروطافکنه به سمت شرق شده است. این انحراف و دخالت تکتونیک در به‌وجود آوردن آن نیز به‌وسیله مقصودی و همکاران (۱۳۹۱)، به اثبات رسیده است. در شمال دشت اشتهارد تپه‌های کم‌ارتفاع کشیده‌ای وجود دارد که ارتفاع آنها حدود ۵ متر بالاتر از اطراف است. این تپه‌ها، از جنوب به سمت شمال به‌موازات هم و با جهت غرب به شرق کشیده شده‌اند و از رس سخت‌نشده، بدون لایه‌بندی تشکیل شده‌اند که از وجود یک شرایط آرام و کم‌شیب نهشته‌گذاری در زمانی نه‌چندان دور حکایت می‌کند. حال فرسایش و جهت غرب به شرق این نهشته‌های رسی نشان از برخواستگی تکتونیک در غرب و شمال منطقه مورد مطالعه دارد.

منابع

- آرام، زهرا؛ پورکرمانی، محسن (۱۳۸۷) ساختار گسل شمال قزوین و گسل‌های بخش شمال خاوری قزوین، **زمین‌شناسی و محیط‌زیست**، ۲ (۱)، صص. ۲۸-۱۷.
- آزادبخت، بهرام (۱۳۸۹) نئوتکتونیک دامنه جنوبی البرز با تأکید بر مخروطافکنه‌ها، **دانشنامه**، ۳ (۷۷)، صص. ۱۸-۳.
- بابایی، سید ساسان؛ موسوی، زهرا؛ روستایی، مه‌آسا (۱۳۹۵) آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین، **علوم و فنون نقشه‌برداری**، ۵ (۴)، صص. ۱۱۱-۹۵.
- شمائلیان، علی؛ دهبزرگی، مریم؛ قرشی، منوچهر؛ نوزعیم، رضا (۱۳۹۵) تحلیل ریخت زمین‌ساختی دامنه‌های جنوبی البرز، **کواترنری ایران**، ۲ (۳)، صص. ۲۱۰-۱۹۷.
- صحبتی، رضا؛ فتاحی، مرتضی؛ فاضلی نشلی، حسن؛ کوئیگی، مارک؛ اشمیت، آرمین؛ عزیزی، قاسم؛ مقصودی، مهران (۱۳۹۰) راندگی پنهان چسکین و اثر احتمالی آن بر هزاره گمشده (دشت قزوین)، **فیزیک زمین و فضا**، ۳۷ (۲)، صص. ۳۱-۱۷.
- مقصودی، مهران؛ ابراهیم‌خانی، نرگس؛ یمانی، مجتبی (۱۳۹۱) تأثیر نئوتکتونیک بر مخروطافکنه رود حاجی عرب (دشت قزوین) با بررسی داده‌های مورفومتری و رسوب‌شناسی، **انجمن جغرافیای ایران**، ۱۰ (۳۳)، صص. ۸۷-۱۰۶.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., Qorashib, M. (2003) Accommodation of Late Cenozoic Oblique Shortening in the Alborz Range, Northern Iran, **Structural Geology**, 25 (5), pp. 659-672.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., Kamalian, N. (2005) Microseismicity in the Region of Tehran, **Tectonophysics**, 395 (3-4), pp. 193-208.
- Bachmanov, D. M., Trifonov, V. G., Hessami, Kh. T., Kozhurin, A. I., Ivanova, T. P., Rogozhin, E. A., Hademi, M. C., Jamali, F. H. (2004) Active faults in the Zagros and Central Iran, **Tectonophysics**, 380 (3-4), pp. 221-241.
- Brémand, F. (1994) A Phase Unwrapping Technique for Object Relief Determination, **Optics and Lasers in Engineering**, 21 (1-2), pp. 49-60.
- Cavalié, O., Lasserre, C., Doin, M.-P., Peltzer, G., Sun, J., Xu, X., Shen, Z. K. (2008) Measurement of Interseismic Strain Across the Haiyuan Fault (Gansu, China), by InSAR, **Earth and Planetary Science Letters**, 275 (3-4), pp. 246-257.
- Champenois, J., Fruneau, N. B., Pathier, E., Deffontaines, B., Lin, K. C., Hu, J. C. (2012) Monitoring of Active Tectonic Deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) Using Persistent Scatterer InSAR Method with ALOS PALSAR Data, **Earth and Planetary Science Letters**, 337-338, pp. 144-155.

- Dario, P., Cascini, L., Arena, L., Settimio Ferlisi, G., Reale, D. (2015) A General Framework and Related Procedures for Multiscale Analyses of DInSAR Data in Subsiding Urban Areas, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 105, pp. 186-210.
- Dipanjan, B., Vikrant, J., Anupam, Ch., Rabiul, H. B., Ashok, K. S. (2016) Geomorphic Evidences and Chronology of Multiple Neotectonic Events in a Cratonic Area: Results from the Gavilgarh Fault Zone, Central India, **Tectonophysics**, 677-678, pp. 199-217.
- Doğan, U., Koçyiğit., A.(2018) Morphotectonic Evolution of Maviboğaz Canyon and Suğlapolje, SW Central Anatolia, Turkey, **Geomorphology**, 306, pp. 13-27.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Informazione, D. E. (2007) **InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. The Netherlands**, Frascati, The Netherlands.
- Flores-Prieto, E., Quénéhervé, G., Bachofer, F., Faisal, S., Maerker, M. (2015) Morphotectonic Interpretation of the Makuyuni Catchment in Northern Tanzania Using DEM and SAR Data, **Geomorphology**, 248, pp. 427-439.
- Froger, J. L., Merle, O., Briole, P. (2001) Active Spreading and Regional Extension at Mount Etna Imaged by SAR Interferometry, **Earth and Planetary Science Letters**, 187 (3-4), pp. 245-258.
- Guo, J., Xu, S., Fan, H. (2017) Neotectonic Interpretations and PS-InSAR Monitoring of Crustal Deformations in the Fujian Area of China, **Open Geosci**, 9, pp. 126-132.
- Harvey, A. M., Mather, A. E., Stokes, M. (2005) Alluvial Fans: Geomorphology, Sedimentology, Dynamics -Introduction. A Review of Alluvial-Fan Research, **Geological Society, London, Special Publications**, 251, pp. 1-9.
- He, P., Wen, Y., Xu, C., Liu, Y., Fok, H. S. (2015) New Evidence for Active Tectonics at the Boundary of the Kashi Depression, China, from Time Series InSAR Observations, **Tectonophysics**, 653, pp. 140-148.
- Liu, L., Schaefer, K. M., Chen, A. C., Gusmeroli, A., Zebker, H. A., Zhang, T. (2015) Remote Sensing Measurements of Thermokarst Subsidence Using InSAR. *Geophys*, **Research Earth Surface**, 120, pp. 1935-1948.
- Novikov, I. S., Pospeeva, E. V. (2017) Neotectonics of Eastern Gorny Altai: Evidence from Magnetotelluric Data, **Russian Geology and Geophysics**, 58 (7), pp. 769-777.
- Qu, Ch., Zuo, R., Jian, X., Shan, X., Zhang, G., Zhang, Y., Song, X., Liu, Y. (2017) Coseismic and Post-Seismic Deformation fields Mapped Using Satellite Radar Interferometry and Fault Slip Inversion of the 2015 Mw8.3 Illapel Earthquake, Chile, **Geodynamics**, 104, pp. 36-48.
- Stramondo, S., Trasatti, E., Albano, M., Moro, M. Marco, Christian, Ch., Bignami, Polcari, M., Saroli, M. (2016) Uncovering Deformation Processes from Surface Displacements, **Geodynamics**, 102, pp. 58-82.
- Weissl, M., Hintersberger, E., Lomax, J., Lüthgens, C., Decker, K. (2017) Active Tectonics and Geomorphology of the Gaenserndorf Terrace in the Central Vienna Basin (Austria), **Quaternary International**, 451, pp. 209-222.
- Zanchi, A., Berra, F., Massimo, M., Ghassemi, M. R., Sabouri, J. (2006) Inversion Tectonics in Central Alborz, Iran, **Structural Geology**, 28 (11), pp. 2023-2037.
- Zhou, X., Chang, N., Li, S. (2009) Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research, **Sensors**, 9, pp.1876-1912.
- Zuo, R., Qu, Ch. Shan, X. Zhang, G. Song, X. (2016) Coseismic Deformation fields and a Fault Slip Model for the Mw7.8 Mainshock and Mw7.3 Aftershock of the Gorkha-Nepal 2015 Earthquake Derived from Sentinel-1A SAR Interferometry, **Tectonophysics**, 686, pp. 158-169.

