



ارتباط فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر آن در فرورنشست زمین در حوضه آبریز

دشت جوین

ربابه فرزین کیا^۱، محمدعلی زنگنه اسدی^{۲*}، ابوالقاسم امیراحمدی^۳، رحمان زندی^۴

۱- دانشجوی دکترا ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

۲- دانشیار دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

۳- استاد ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

۴- استادیار سنجش از دور دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۸/۱۸

وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

فرورنشست پدیده‌ای مورفولوژیکی است که تحت تأثیر حرکت فرورو زمین پدید می‌آید. علت رخداد این پدیده ممکن است متأثر از عوامل طبیعی و انسانی باشد. در این پژوهش سعی شده است، فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر آن در فرورنشست زمین در حوضه آبریز دشت جوین بررسی شود. جهت دستیابی به این امر از روش‌های کمی از جمله شاخص شکل حوضه ((BS، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی ((F شاخص تقارن توپوگرافی معکوس ((T، شاخص سینوسی جبهه کوهستان ((J، انتگرال هیپسومتری ((Hi، شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن ((VF، شاخص سینوسیته رودخانه ((S شاخص گرادیان طولی رودخانه ((SL استفاده گردید. همچنین با بهره از روش تداخل‌سنج راداری، سعی شد، ژئودوالیتی را در دشت جوین بیان کنیم. نتایج بدست آمده بر اساس شاخص‌ها AF, T, H, SMF, S, VF از لحاظ زمین‌ساختی فعال و شاخص SL در حالت نیمه فعال قرار دارد. فعالیت‌های تکتونیکی باعث کشیدگی دشت و نامتقارن شدن حوضه و عمیق شدن دره‌ها در محدوده مطالعاتی شده است. نتایج مربوط به تداخل‌سنج راداری نشان می‌دهد در بخش‌های که میزان بالآمدگی بیشتر است؛ به موازات آن در دشت با فرورنشست (با متوسط نرخ ۶/۴ سانتی‌متر در سال) همراه است. همچنین دامنه‌ی فرورنشست در راستای ارتفاعات به صورت شرقی-غربی می‌باشد و این دو را در ارتباط معناداری قرار داده است که تأییدی بر توسعه‌ی نظریه‌ی ژئودوالیتی در سطح حوضه می‌باشد. با توجه به مخاطرات ژئومورفیکی حوضه، لازم است در فعالیت‌های عمرانی و آمایش سرزمین، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر منطقه تهیه گردیده و بر مبنای آن اقدامات کنترلی، حفاظتی، پیشگیری و یا هشداردهندگی صورت پذیرد.

کلمات کلیدی: فرورنشست، دوالیته، مورفوتکتونیک، تداخل‌سنج راداری، دشت جوین.

۱- مقدمه

امروزه پدیده‌ی فرونشست زمین، یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در مقیاس جهانی است که خسارت‌های زیادی بر ساخت و سازهای شهری و روستایی، تأسیسات عمران و آبادی وارد می‌کند. بنابه تعریف یونسکو «فرونشست عبارت است از فروریزش یا نشست سطح زمین که به علت‌های متفاوتی در مقیاس بزرگ و کوچک رخ می‌دهد» (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲). فروریزش و فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناسی مانند زمین‌لرزه، انحلال سنگ‌های آهکی، گچی و نمکی، آب شدن یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکت‌های آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی مانند معدن کاری، برداشت سیالات زیرزمینی مانند آب‌های زیرزمینی، نفت و یا گاز ایجاد شود (گالوی و باربی^۱، ۲۰۱۱: ۱۴۵۹). فرونشست‌های ناشی از حرکت‌های تکتونیکی زمانی حادث می‌گردد که در محل وجود دو گسل، فرورفتگی (گرابن) و بالآمدگی (هورست) به وجود آید و حرکت نسبی قطعات باعث فرونشست زمین گردد (زندى و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۵). آثار مختلف بر جای مانده روی زمین بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی در نقاط مختلف جهان است. گسل‌ها، کوه‌ها، دره‌های ساختمانی و ... شواهدی بر تسلط فرم‌زایی تکتونیک در دوران‌های گذشته زمین‌شناسی می‌باشد. در طول چند سال اخیر محققان مختلف در کنار بررسی شاخص‌های مورفوتکتونیکی کیفی در مناطق دارای حرکات تکتونیکی فعال و جوان سعی در کمی نمودن رفتار حرکات تکتونیکی داشته‌اند. آنها برای این امر، شاخص‌های متعددی را تحت عنوان «شاخص‌های مورفومتریک» ارائه نموده‌اند. شاخص‌های ژئومورفیک به طور خاص برای مطالعات تکتونیک فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند (داگلاس و همکاران^۲، ۲۰۰۱). پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی ارزیابی فعالیت‌های نو زمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک در سطح جهان، ایران انجام گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شایان و همکاران (۱۳۹۰)، کرمی (۱۳۹۱)، رنجبرمنش و همکاران (۱۳۹۳)، عابدینی و شبرنگ (۱۳۹۳)،

1- Gallowey & Burbey

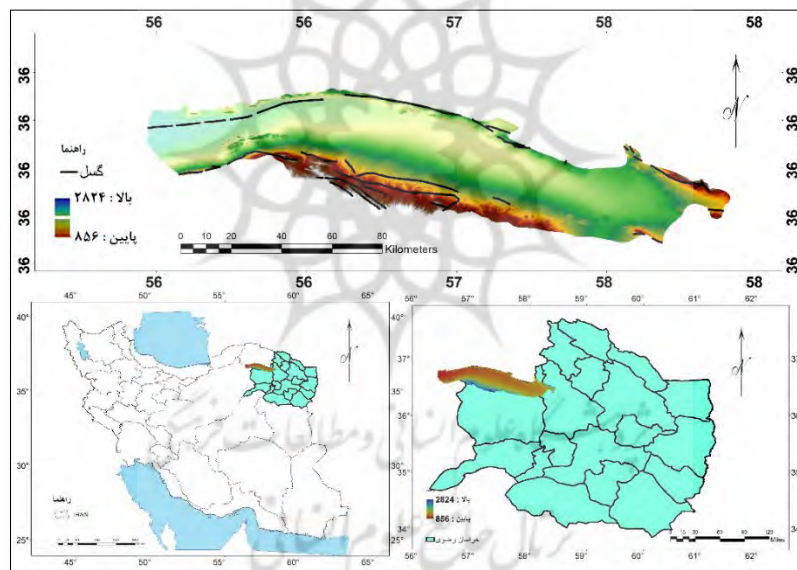
2- Duglas et al.,

جعفری (۱۳۹۴)، پاینده و همکاران (۱۳۹۵)، جمال‌آبادی و همکاران (۱۳۹۶)، شفیعی و همکاران (۱۳۹۸)، شاخص‌های ژئومورفیک را در مناطق مختلف ایران بکار گرفته و نتایج حاکی از کارایی مطلوب این شاخص‌ها در ارزیابی فعالیت‌های نوزمین ساختی می‌باشد. از جمله روش‌های دیگر برای مطالعه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شود، تکنیک تداخل‌سنجی راداری، به عنوان ابزاری کارآمد است که به صورت قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته از جمله معتق و همکاران (۲۰۱۷) فرورانشست زمین در دشت رفسنجان، احمدی و همکاران (۱۳۹۷) فرورانشست زمین در دشت خرمدره را با استفاده از این تکنیک انجام داده‌اند. پورخسروانی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از این تکنیک، پدیده‌ی فرورانشست در دشت‌های ایران را، معلول دوالیتی در تحرکات پوسته‌ای بین دشت‌ها و کوهستان‌های مجاور آنها عنوان کردند، بدون اینکه شاخص‌های تکتونیکی فعال در منطقه بررسی شود. در این پژوهش، با توجه به داده‌ها و اطلاعات موجود جهت تشخیص فعالیت تکتونیکی منطقه و تأثیر آن بر فرورانشست، از ۸ شاخص انتگرال هیپسومتری، شاخص عدم تقارن آبراهه‌ها، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی، شاخص گرادیان طول رودخانه، شاخص شکل حوضه، سینوزیته جبهه کوهستان، پهنای کف دره به عمق، شاخص سینوسه رودخانه استفاده شده است. همچنین بررسی فرورانشست زمین و بالآمدگی در منطقه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنج راداری از اهداف پژوهش حاضر است که به نوعی نوآوری در تحقیق حاضر می‌باشد. استفاده از چندین شاخص ژئومورفیک در بررسی فرورانشست در حوضه‌های زهکشی به ما اجازه می‌دهد تا بررسی مناسبی از این شاخص‌ها برای شناسایی ساختارهای فعال داشته باشیم و ضمن ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر می‌تواند مشخص‌کننده علت اصلی پدیده فرورانشست باشد. لذا از طریق مطالعات زمین‌ساخت می‌توان محل احتمالی وقایع آینده را پیش‌بینی کرد و نتایج حاصل از این مطالعات را در راستای شناخت مخاطرات طبیعی، برنامه‌ریزی‌های کاربری زمین و مدیریت مناطق مسکونی به کار برد.

۲- مواد و روش‌ها

- موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مورد مطالعه

دشت جوین با وسعتی حدود ۵۶۵۰ کیلومترمربع در شمال شهرستان سبزوار و غرب خراسان رضوی با $۵۶^{\circ}/۳۰'$ تا $۵۸^{\circ}/۳۰'$ طول شرقی و $۳۶^{\circ}/۱۵'$ تا $۳۶^{\circ}/۴۵'$ عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). اقلیم منطقه، از نوع خشک تا نیمه‌خشک است. منطقه‌ی مطالعاتی در بخش شمالی رشته کوه‌های جغتای با روند شرقی-غربی در محدوده‌ی شمال شرق زون ایران مرکزی می‌باشد.



شکل (۱) موقعیت حوضه‌ی آبریز دشت جوین به همراه گسل‌ها
Figure (1) Location of the Jovein Plain Basin with faults

مهم‌ترین گسل موجود در حوضه، گسل میامی است که با روند غربی-شرقی در جنوب منطقه (در امتداد رشته کوه جغتای) قرار دارد. چند گسل در شمال منطقه با تأثیر در رسوبات کنگلومرایی و مارن گچ‌دار در امتداد خط‌الرأس حوضه‌ی آبریز جوین، گسترش دارد (امیراحمدی ۱۳۷۶). رخساره‌های دوران دوم با گسترش زیادی در این محدوده دیده

می‌شود و شامل آهک اوربیتولین‌دار و آمیزه‌های رنگین (colored-melange) و سنگ‌های اولترابازیک مثل سرپانتینیت-پیروکسنیت و گابرو حاوی کرومیت می‌باشد. منابع مورد استفاده در این تحقیق مبتنی بر مطالعات و بررسی‌های کتابخانه‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر راداری و بازدید میدانی بوده است.

به منظور بررسی وضعیت فعالیت نو زمین‌ساخت منطقه، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر راداری سنتیل A-1، همچنین از آمار زلزله‌ها از سال ۱۹۲۳ تا ۲۰۱۸ مستخرج از سایت USGS آمریکا استفاده شده است. جهت استفاده از این نقشه‌ها (۱۴ نقشه‌ی توپوگرافی) به صورت یک نقشه‌ی کامل، عملیات موزائیک کردن آنها در محیط GIS انجام گرفت. برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر در محاسبه‌ی شاخص‌ها، از نقشه‌های توپوگرافی و مدل ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر استفاده شد. سپس شاخص‌های مورفومتریک نظیر شاخص (شکل حوضه Bs)، (گرادیان رودخانه SL)، (شاخص عدم تقارن آبراهه AF)، (تقارن توپوگرافی عرضی T)، (شاخص سینوسیته جبهه کوهستان smf)، (منحنی هیپسومتری Hi)، (شاخص سینوسه رودخانه S)، (پهنای کف رودخانه Vf) در وضعیت زمین‌ساختی حوضه‌ی مورد نظر در محیط GIS ارزیابی گشت. همچنین به منظور مطالعه و بررسی فرونشست منطقه‌ی جوین و عملیات تداخل‌سنجی از داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ مربوط به کشور کانادا و پردازش آن توسط نرم‌افزار SNAP استفاده گردید. روش تداخل‌سنج راداری، اندازه‌گیری‌های تغییرات سطح زمین را در امتداد خط دید ماهواره انجام می‌دهد. به دلیل اینکه عمده تغییرات سطح زمین در فرونشست به صورت تغییرات ارتفاعی است، می‌توان جابجایی‌های استخراج شده به روش تداخل‌سنج راداری را با صرف نظر کردن از تغییرات افقی سطح زمین به سادگی به تغییرات ارتفاعی تبدیل کرد. برای این کار، داده‌های راداری سنتیل مورد استفاده قرار گرفت. سپس داده‌های به دست آمده در نرم‌افزار SNAP که در واقع نرم‌افزاری است که برای داده‌های سنتینل ارائه شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پردازش تصاویر در ۶ گام ورود داده‌های خام به نرم‌افزار و تبدیل آنها به تصاویر مختلط

منفردنگر (SLC)، ثبت هندسی تصاویر، تهیه‌ی تداخل‌نما، حذف اثر توپوگرافی و فیلترگذاری، بازیابی فاز (با افزونه sarmint در سیستم عامل لینوکس) و زمین مرجع کردن انجام می‌شود (شکل ۲).



شکل (۲) فلوچارت مراحل تداخل‌سنجی
Figure (2) Flowchart of interferometry steps

- موقعیت زمین‌شناسی و وضعیت ساختاری منطقه

منطقه‌ی مطالعاتی در بخش شمالی رشته کوه‌های جغتای با روند شرقی-غربی در محدوده شمال شرق زون ایران مرکزی می‌باشد. از نظر ساختمانی، دشت جوین یک گرابن می‌باشد. مهم‌ترین گسل موجود در حوضه، گسل میامی است که با روند غربی-شرقی در جنوب منطقه (در امتداد رشته کوه جغتای) قرار دارد. چند گسل در شمال منطقه با تأثیر در رسوبات کنگلومرایی و مارن گچ‌دار در امتداد خط‌الرأس حوضه‌ی آبریز جوین، گسترش دارد. به لحاظ زمین‌شناسی، منطقه‌ی مورد مطالعه جزء ناهمواری‌های ایران مرکزی بوده که در محدوده‌ی مثلثی شکل داخل فلات ایران پراکنده می‌باشند که با توجه به گستردگی این واحد ژئومورفوزیکی بر اساس اختلافات ساختاری به واحدهای کوچک‌تر تقسیم شده‌اند. یکی از این واحدها رشته‌ی شمال شرقی جزء رشته‌های پراکنده حوضه‌ی دشت کویر می‌باشد که به رشته کوه جغتای معروف است. این رشته عامل جدایی چاله‌ی سبزووار از چاله جاجرم است (علایی طالقانی، ۱۳۸۲: ۲۵۹). از ویژگی‌های این واحد ساختمانی

وجود شکستگی‌ها، گسل‌ها و چین‌های وابسته به این گسل‌ها بوده که از طریق انفصال تکتونیکی در سنگ‌ها مشخص می‌گردند.

باتوجه به داده‌های آماری مربوط به زمین‌لرزه، تعداد ۲۶۲۹ مورد، زلزله تا شعاع ۲۰۰ کیلومتری از محدوده‌ی مورد مطالعه، ثبت شده است که از این تعداد، ۶ مورد بالای ۷ ریشتر، ۳۹ مورد بالای ۶ ریشتر، ۳۱۱ مورد بالای ۵ ریشتر، ۱۹۰۹ مورد بالای ۴ ریشتر و ۳۶۴ مورد بالای ۳ ریشتر بوده‌اند، بنابراین حدود ۷۳ درصد از زمین‌لرزه‌های رخ داده، بالاتر از ۴ ریشتر می‌باشند. بررسی آمار نشان می‌دهد زمین‌لرزه سال ۱۹۲۳ با بزرگای ۶/۴ MS در این منطقه رخ داده است. فعالیت لرزه‌ای آینده این گسل‌ها می‌تواند این منطقه را تحت تأثیر قرار دهد.

۳- بحث و نتایج

- شاخص‌های ژئومورفولوژیک

شاخص‌های مورد استفاده در تحقیق به شرح زیر تعریف می‌شود:

- شاخص گرادیان رودخانه (SL):

آستانه‌های این شاخص در سه کلاس طبقه‌بندی می‌گردد: مقادیر $SL > 500$ زمین‌ساخت فعال، $300 < SL < 500$ با فعالیت متوسط و $SL < 300$ مناطق غیرفعال است (ده‌بزرگی، ۲۰۱۰: ۳۳۳).

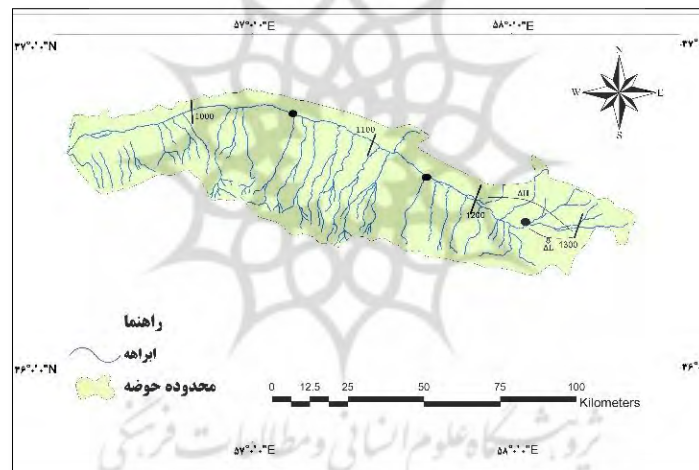
$$L \times SI = (\Delta H / \Delta L) \quad (1)$$

SI: شاخص گرادیان رودخانه، ΔH : اختلاف ارتفاع قطعه مورد نظر، ΔL : طول شاخه‌ی مورد نظر، L_{sc} : طول آبراهه از نقطه‌ای که شاخص محاسبه می‌شود تا مرتفع‌ترین نقطه‌ی آبراهه در بالادست، می‌باشد. در جدول (۱) شاخص گرادیان رودخانه برای هر یک از ۳

قسمت رودخانه حوضه‌ی مورد مطالعه ذکر شده است. SL برای کل مسیر رودخانه از خروجی تا سرچشمه اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

جدول (۱) شاخص گرادیان رودخانه (SL)
 Table (1) River Gradient Index (SL)

وضعیت	SI	Lsc(m)	$\Delta L(m)$	$\Delta H(m)$	ارتفاع
کم	۲۱۷	۳۲۰۵۰	۱۴۷۶۹	۱۰۰	۱۳۰۰-۱۲۰۰
متوسط	۴۲۴	۶۷۱۷۰	۱۵۸۱۴	۱۰۰	۱۲۰۰-۱۱۰۰
متوسط	۴۱۲	۱۲۲۹۳۱	۲۹۷۹۸	۱۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰



شکل (۳) شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (ترسیم نگارندگان)
 Figure (3) Transverse topography symmetry index (authors' drawings)

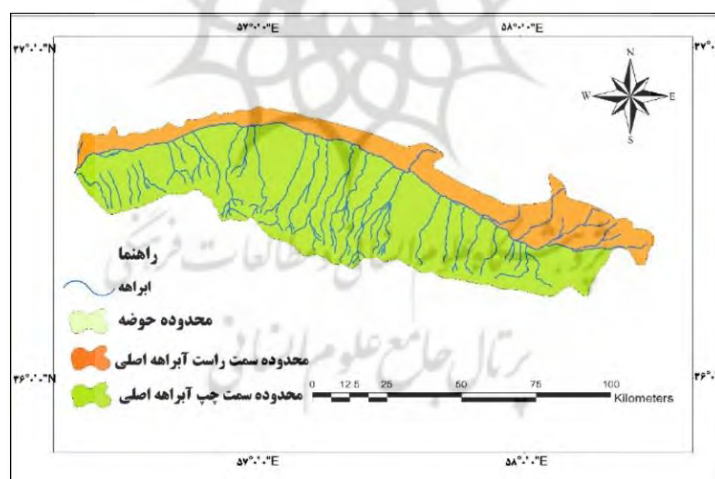
- شاخص عدم تقارن: (AF)

شاخص عدم تقارن روشی برای ارزیابی وجود کج‌شدگی‌های ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی در مقیاس حوضه‌ی زهکشی است. این روش برای نواحی نسبتاً وسیع بکار برده می‌شود.

$$33/7 = \frac{1428/3}{4226/4} * 100 = Af = 100 * \frac{Ar}{At} \quad (2)$$

AF: شاخص عدم تقارن رودخانه، At: مساحت حوضه در برگیرنده‌ی زهکشی‌های فرعی در سمت راست آبراهه اصلی (به طرف پایین رود) و At مساحت کل زیرحوضه زهکشی می‌باشد (همدونی^۱، ۲۰۰۸: ۱۳۵).

اگر مقدار عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد؛ بیانگر وجود تقارن در دو سمت آبراهه‌ی اصلی و در نتیجه عدم فعالیت تکتونیکی است. اگر میزان این شاخص بزرگ‌تر از ۵۰ باشد، بیانگر فرسایش در سمت راست آبراهه‌ی اصلی است و اگر میزان شاخص کوچک‌تر از ۵۰ باشد، بیانگر فرسایش در سمت چپ آبراهه‌ی اصلی است. در این محاسبه اعداد به‌دست آمده از حوضه (۳۳/۷) نشان داد که مقدار شاخص کوچک‌تر از ۵۰ می‌باشد. بنابراین، در سمت چپ آبراهه اصلی فعالیت تکتونیکی داریم و در سمت راست با پدیده‌ی فرورانشست مواجه هستیم (شکل ۴).



شکل (۴) محاسبه‌ی شاخص عدم تقارن آبراهه‌ها در حوضه‌ی آبریز (نگارندگان)

Figure (4) Calculation of water asymmetry index in catchments (authors)

- شاخص تقارن توپوگرافی معکوس: (T)

وجود عدم تقارن توپوگرافی در شبکه ی زهکشی حوضه های با ویژگی های سنگ شناسی تقریباً همسان، عملکرد زمین ساخت فعال را نشان می دهد (کلر و پینتر^۱ ۲۰۰۲: ۱۲۸).

$$T = Da / Dd \quad (3)$$

که در آن Da، فاصله ی خط میانی حوضه ی زهکشی تا کمر بند فعال مئاندری حوضه ی (رود اصلی) و Dd فاصله خط میانی حوضه تا آب پخش آن می باشد. مقدار عددی این شاخص برای حوضه های کاملاً متقارن برابر صفر می باشد، در حالی که با افزایش عدم تقارن توپوگرافی در یک حوضه، مقدار این شاخص نیز افزایش پیدا می کند و به عدد یک نزدیک می شود (راندل^۲، ۱۹۹۴: ۱۵۰). بنابراین شاخص T برداری است که مقادیر عددی نزدیک به یک بیانگر فرسایش در منطقه و در نتیجه تکتونیسیم فعال است. برای محاسبه ی این شاخص در حوضه ی جوین، در هر زیر حوضه یک مقطع ایجاد شده و مقدار آن محاسبه گردیده که با توجه به جدول (۲) مقدار شاخص در هر سه زیر حوضه کمتر از ۱ می باشد و نشانه عدم تقارن و تکتونیک فعال در کل حوضه است (شکل ۵).

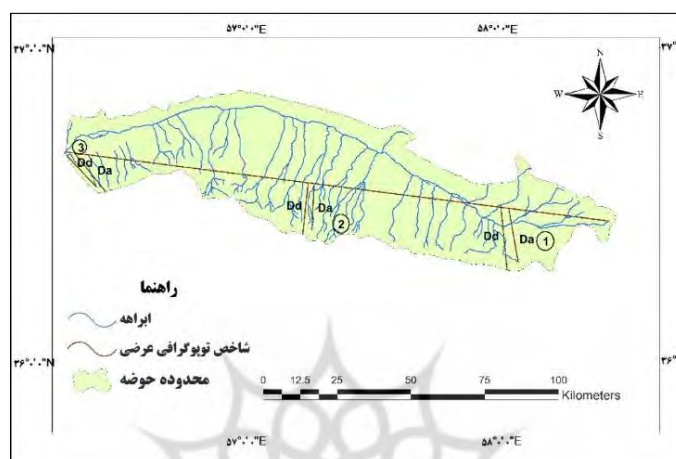
جدول (۲) شاخص تقارن توپوگرافی معکوس

Table (2) Reverse Topography Symmetry Index

مسیر	Da(km)	Dd(km)	T	وضعیت
۱	۱۸/۴۳	۲۱/۳۳	۰/۸۶	فعال
۲	۱۵/۳۸	۱۶/۹۱	۰/۹	فعال
۳	۱۴/۵۳	۱۶/۷۸	۰/۸۶	فعال

1- Kellr & Pinter

2- Randel



شکل (۵) محاسبه‌ی شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (ترسیم نگارندگان)

Figure (5) Calculation of transverse topographic symmetry index (authors' drawings)

- منحنی هیپسومتریک و انتگرال هیپسومتریک

منحنی هیپسومتریک توزیع ارتفاعات در راستای عمود بر یک ناحیه از زمین مثلاً حوضه‌ی زهکشی را توصیف می‌کند. این منحنی با پیاده نمودن نسبت ارتفاع کل حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل نسبت مساحت کل حوضه (مساحت نسبی) ترسیم می‌گردد. در انتگرال هیپسومتری نتایج حاصل از مورفولوژی یک حوضه زهکشی به صورت خلاصه و با یک مقدار واحد، براساس شکل و میزان تحدب و تعقر منحنی هیپسومتری، به سه کلاس تقسیم می‌شود. مقادیر عددی بزرگ‌تر ($H_i > 0.5$) بیانگر توپوگرافی جوان، مقادیر عددی متوسط ($0.4 < H_i < 0.5$) بیانگر توپوگرافی بالغ و مقدار عددی کم ($H_i < 0.4$) بیانگر توپوگرافی پیر می‌باشد. بر این اساس مقدار عددی 0.5 در محدوده‌ی توپوگرافی جوان تا بالغ را داراست. انتگرال را به راحتی می‌توان از رابطه زیر به دست آورد (پیک و ویلسون^۱، ۱۹۹۳: ۱۰۸۰).

$$H = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} = \frac{1840 - 856}{2824 - 856} = 0.5 \quad (4)$$

1- Pike & Wilson

در این رابطه Hmean: ارتفاع متوسط حوضه؛ Hmax: بیشترین ارتفاع حوضه؛ Hmin: کمترین ارتفاع حوضه است.

- شاخص سینوسیت جبهه کوهستان: (Smf)

شاخص سینوزیته جبهه کوهستان توازن میان نیروی فرسایش که سعی در ایجاد فرسایش سطوح کوهستانی دارد و نیروی تکتونیکی که باعث ایجاد جبهه‌های صاف در طول گسل می‌شود را نشان می‌دهد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۴۵). شاخص Swf برای مناطق بسیار فعال تکتونیکی بین (۱ تا ۱/۶)، برای مناطق با فعالیت متوسط بین (۴ تا ۳) و برای جبهه‌ی کوهستان غیرفعال تکتونیکی از حدود ۱/۸ تا بیشتر از ۵ می‌باشد (جمال‌آبادی و همکاران ۱۳۹۶: ۷۶). این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls} \quad (5)$$

S: سینوزیته جبهه کوهستان یا پیچ و خم سرایشی تند کوهستان، Lmf: طول سرایشی تند کوهستان در مرز بین کوهستان و کوهپایه، Ls: طول خط مماس در امتداد سرایشی تند کوهستان. در جدول (۳) شاخص سینوسیت جبهه‌ی کوهستان از نظر فعالیت تکتونیکی برای ۴ قسمت ذکر شده است (شکل ۶).

جدول (۳) شاخص سینوسیت جبهه کوهستان (Smf)

Table (3) Mountain Front Sinusitis Index (Smf)

وضعیت تکتونیکی	S	LS	LMF	
نیمه فعال	۲/۱۸	۱۲/۳۴	۲۶/۹۴	۱
نیمه فعال	۳/۵	۱۱/۸۵	۴۱/۸۶	۲
فعال	۱/۷۶	۱۸/۷۲	۳۳/۰۵	۳
فعال	۱/۹۹	۲۳/۰۴	۴۶/۰۲	۴

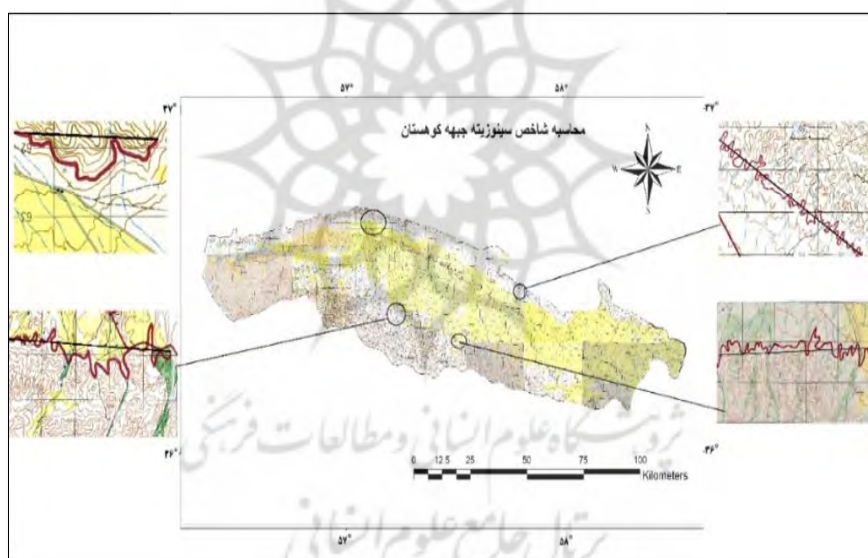
- شاخص سینوسیت رودخانه: (S)

تغییرات سینوسی در یک سامانه رودخانه‌ای، به طور معمول ناشی از بالاآمدگی و فرونشست‌هایی است که در بستر روی می‌دهد. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S = C / V$$

(۶)

C: طول مسیر رود؛ S: سینوزیته یا پیچ و خم رودخانه؛ و V: طول مستقیم دره در معادله فوق می‌باشد. مقادیر بالای این شاخص گویای آن است که رودخانه‌های دارای پیچ و خم زیاد به تعادل رسیده‌اند در حالی که مقادیر کمتر این شاخص نشان‌دهنده رودخانه‌های با مسیر مستقیم می‌باشند که برای رسیدن به تعادل عمل حفر بستر را انجام می‌دهند. طبق محاسبات انجام گرفته میزان شاخص پیچ و خم رودخانه‌ی اصلی کمتر از ۱ است که نمایانگر فعالیت‌های نو زمین ساخت در منطقه می‌باشد (جدول ۴).



شکل (۶) محاسبه‌ی شاخص سینوزیته جبهه‌ی کوهستان (نگارندگان)
Figure (6): Calculation of Mountain Front Sine Index (Authors)

جدول (۴) شاخص سینوسی رودخانه

Table (4) River Sine Index

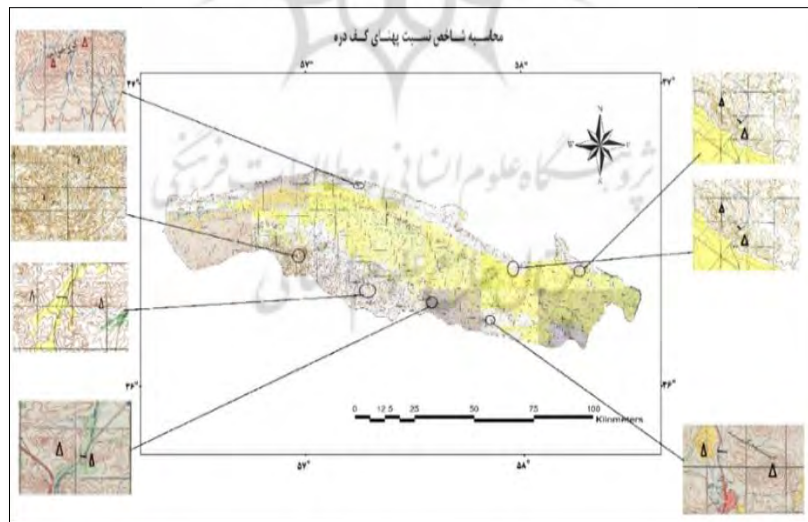
وضعیت تکتونیکی	S	v	C	حوضه
فعال	۰/۹	۲۰۴/۰۸	۱۸۵/۳	کال شور جوین

-شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن: (VF)

در بین شاخص‌های مورفوتکتونیک، شاخص VF بهترین شاخص برای ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های تکتونیک در شکل دره‌ها محسوب می‌شود این شاخص با معادله‌ی زیر بیان می‌گردد:

$$vf = \frac{2Vfw}{E_{fd} - E_{sc} + E_{rd} - E_{sc}} \quad (7)$$

با استفاده از این شاخص می‌توان فهمید که رود در چه وضعیتی می‌باشد؛ ممکن است رود در حال حفر بسترش و یا به فرسایش کناری مشغول باشد و یا اقدام به توسعه‌ی بستر خود کند. مقادیر کمتر از ۶ در این شاخص نشان‌دهنده‌ی مناطق در حال بالا آمدن می‌باشد. در مناطق غیرفعال از نظر بالآمدگی مقدار متوسط این شاخص معمولاً بالاتر از ۷ است (رنجبرمنش، ۱۳۹۲). در جدول (۵) شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن در ۷ نقطه از محدوده‌ی مورد مطالعه ذکر شده است (شکل ۷).



شکل (۷) محاسبه شاخص نسبت پهنای کف دره به عمق یا ارتفاع
Figure (7) Calculate the ratio of valley floor to depth or height ratio

جدول (۵) شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن (VF)

Table (5) VF floor height index (VF)

شماره	Esc	Erd	Eld	Vfw	Vf	وضعیت
شکل ۱	۱۶۰۴	۲۱۱۰	۲۰۵۷	۶۲۹	۱/۳	فعال
شکل ۲	۱۳۰۷	۱۴۹۸	۱۴۰۸	۱۲۷	۰/۸	فعال
شکل ۳	۱۳۰۱	۱۴۲۴	۱۳۵۴	۷۳	۰/۸	فعال
شکل ۴	۱۴۷۵	۱۶۸۴	۱۵۳۴	۲۲۰	۱/۶	فعال
شکل ۵	۱۴۲۱	۱۴۸۱	۱۵۰۵	۱۴۸	۲	فعال
شکل ۶	۱۴۳۷	۱۵۲۷	۱۵۴۵	۱۲۷	۱/۲	فعال
شکل ۷	۱۸۷۷	۲۱۱۵	۲۳۲۴	۸۷	۰/۲	فعال

-تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری، یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته‌ی زمین شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست زمین، زمین لغزش و... مطرح کرده است (زندگی و همکاران ۱۳۹۸: ۸۲). این روش با مقایسه‌ی فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه‌ی زمانی می‌باشد. در محدوده‌ی مطالعاتی، جهت استخراج نرخ و دامنه‌ی فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات تداخل‌سنجی راداری در این تحقیق، توسط ۴ تصویر راداری سنتینل سری A و به کمک نرم‌افزار SNAP انجام گرفته است. هر تصویر از سه (Wide Interferometric) IW ساخته شده که بسته به وسعت منطقه یکی از IW (حالت تصویربرداری) را انتخاب می‌کنیم. محدوده‌ی مطالعاتی به علت وسعت زیاد و کشیدگی به صورت غربی- شرقی از سه IW استفاده کردیم و عملیات تداخل‌سنجی را برای هر کدام انجام داده و در آخر نقشه‌ی نهایی را در محیط GIS موزاییک کردیم. جدول (۶) مشخصات اینترفروگرام‌های پردازش شده در منطقه‌ی مورد مطالعه را با توجه به خط مبنا نشان می‌دهد. به منظور کاهش نویز و افزایش همبستگی

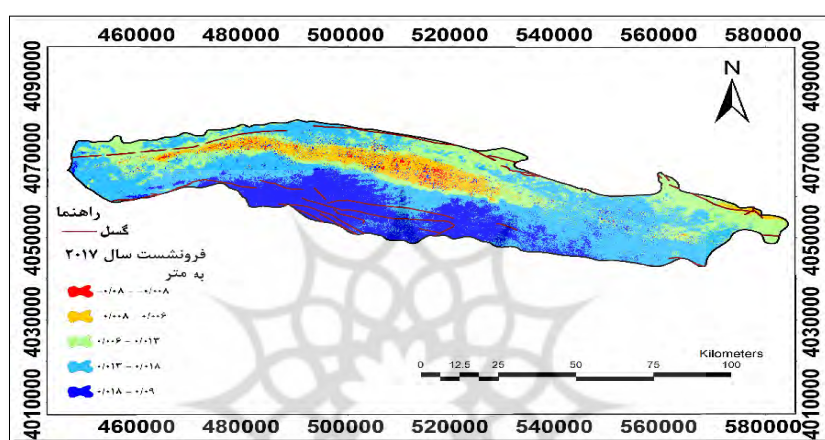
زمانی اینترفروگرامها حتی الامکان سعی شد، از زوج تصاویر راداری با بازه‌ی زمانی کوتاه (حدود ۴۵ روز) استفاده شود.

جدول (۶) مشخصات تصاویر مورد استفاده
 Table (6) Specifications of the images used

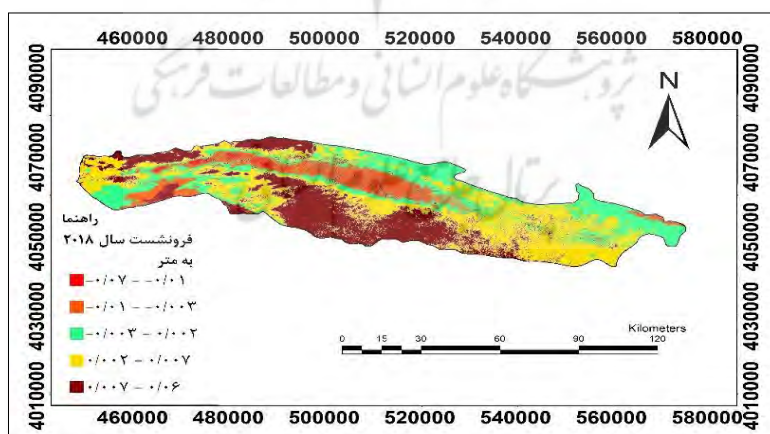
شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	خط مبنا(متر)
۱	۲۰۱۷/۷/۲۱	Slc	IW	نزولی	۱۳۸- تا ۱۴۹
۲	۲۰۱۷/۹/۱۹	Slc	IW	نزولی	۲۰۶- تا ۶۳
۳	۲۰۱۸/۷/۴	Slc	IW	نزولی	۶۱- تا ۱۹۸
۴	۲۰۱۸/۹/۲	Slc	IW	نزولی	۱۴۵- تا ۱۱۴

پس از تولید اینترفروگرامها، با اعمال ضریب تبدیل فاز به فاصله، نقشه‌های میزان جابجایی در بازه‌های زمانی جدول فوق تهیه گردید. بررسی نقشه‌های میزان جابجایی نشان می‌دهد، پدیده فرونشست از شرق منطقه مورد مطالعه شروع شده و در امتداد ارتفاعات جغتای به سمت غرب ادامه یافته است. کشیدگی سیگنال فرونشست در امتداد روند کشیدگی دشت ایجاد شده است. نقشه‌ی نهایی نرخ متوسط فرونشست حاصل از آنالیز سری زمانی برای کل منطقه فرونشست، در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این نقشه‌ی پیشینه نرخ فرونشست در منطقه‌ی مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ به ترتیب ۶/۴ سانتی‌متر و ۵/۶ را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه‌های بدست آمده بر روی این دشت با روش تداخل‌سنجی راداری، هر دو حکایت از فرونشست دشت (به رنگ قرمز و نارنجی) دارد. تحلیل فازهای موجی به غیر دشت، مناطق حاشیه‌ای آن را نیز در بر می‌گیرد. نتایج حاصل از گسترش تحلیل تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که در مقابل فرونشست دشت، بالآمدگی در حاشیه دشت وجود دارد و نرخ این بالآمدگی با نیل به قله افزایش می‌یابد (به رنگ آبی تیره در سال ۲۰۱۷ و زرشکی در سال ۲۰۱۸). آنالیز داده‌های راداری دشت نشان می‌دهد که بیشترین بالآمدگی در ارتفاعات جغتای در جنوب حوضه‌ی مطالعاتی، و بیشترین میزان فرونشست در جوار آن یعنی در کف دشت جوین به صورت

کشیدگی در مرکز اتفاق افتاده است. شکل (۸ و ۹) میزان فرونشست و بالاآمدگی را در دشت جوین نشان می‌دهند.



شکل (۸) میزان فرونشست و بالاآمدگی به همراه موقعیت گسل‌ها در دشت جوین در سال ۲۰۱۷ (نگارندگان)
Figure (8) Subsidence and uplift rates along with fault position in the Jovein Plain in 2017 (Authors)



شکل (۹) میزان فرونشست و بالاآمدگی در دشت جوین در سال ۲۰۱۸ (نگارندگان)
Figure (9) Subsidence and uplift rates in the Joveyn Plain in 2018 (authors)

۴- نتیجه‌گیری

هرچند بیشتر محققان، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی را عامل مهم در افت آب‌های زیرزمینی و نشست دشت‌های ایران می‌دانند، اما نقش عوامل تکتونیکی در تشدید این پدیده را نباید نادیده گرفت. در تحقیقی که پورخسروانی و همکاران در علل وقوع فرونشست انجام دادند، بدون بررسی شاخص‌های تکتونیکی تنها به بحث دوال از طریق تداخل‌سنج رادار، پرداخته شد. در این تحقیق، علاوه بر تداخل‌سنج راداری، وضعیت تکتونیکی حوضه نیز بررسی گردید. بدین منظور، شاخص‌های ژئومورفیک از جمله شکل حوضه، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس، شاخص سینوسی جبهه کوهستان، انتگرال هیپسومتری، شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن، شاخص سینوسی رودخانه، شاخص گرادیان طولی رودخانه، یک طبقه‌بندی نسبی از فعالیت‌های نوزمین ساختمانی منطقه ارائه می‌دهند. در بین شاخص‌های مورفوتکتونیکی که همگی نشان از فعالیت تکتونیکی در منطقه دارد، شاخص VF در منطقه کمتر از ۲ بدست آمد که بر اساس استانداردها مقادیر کمتر از ۶ در این شاخص نشان دهنده مناطق در حال بالآمدن می‌باشد. فرونشست‌های ناشی از حرکت‌های تکتونیکی زمانی حادث می‌گردد که در محل وجود دو گسل، فرورفتگی (گراین) و بالآمدگی (هورست) به وجود آید و حرکت نسبی قطعات باعث فرونشست زمین گردد. وضعیت گسل‌های منطقه در قسمت‌های جنوبی و شمالی، دشت را در موقعیت گرابنی قرار داده است. بررسی آمار نیز، نشان داد زمین‌لرزه سال ۱۹۲۳ با بزرگای ۶/۴ MS در این منطقه رخ داده است. فعالیت آینده این گسل‌ها می‌تواند این منطقه را تحت تاثیر قرار دهد. شرایط مورفوتکتونیک فعال حوضه، همچنین نتایج مربوط به تداخل‌سنج راداری نشان داد، در بخش‌های جنوبی که میزان بالآمدگی بیشتر است؛ به موازات آن در دشت با فرونشست همراه است. وجود این فرایش و نمود آن در نقشه تداخل‌سنج راداری، نشان از فعالیت تکتونیکی در رشته‌کوه‌های جغتای در جنوب محدوده‌ی مطالعاتی است. این نتایج وجود فرونشست‌ها را با بالآمدگی‌های حواشی جانبی آن در ارتباطی معنی‌دار نشان می‌دهد و این دو حرکت به صورت دوال مطرح می‌کند. با توجه به ادله فوق می‌توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل

تأثیرگذار بر فرورانشست زمین در دشت جوین، ناشی از حرکات پوسته‌ای نرم آن هم به صورت زوجی جهت رسیدن به تعادل است. با توجه به مخاطرات ژئومورفیکی حوضه، لازم است در فعالیت‌های عمرانی و آمایش سرزمین، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر منطقه تهیه گردیده و بر مبنای آن اقدامات کنترلی، حفاظتی، پیشگیری و یا هشداردهندگی صورت پذیرد.



۵- منابع

-Reference

- Ahmadi, N., Mousavi, Z., Masoumi, Z., (1397). Study of Subsidence of Khorramdareh Plain Using Radera Interferometer Technique and its Hazards Analysis: *Iranian Remote Sensing and GIS Journal*, 10(3), 33-52.
- Amir Ahmadi, A., Maali Ahari, N., Ahmadi, T., (2013). Determination of Possible Subsidence Areas of Ardebil Plain Using GIS: *Journal of Geography and Planning*, 17(46), 13-23.
- Pourkhosravani, M., Ramasht, M.H., Al-Modarresi, S.A., (2012). Duality in Geomorphology: *Natural Geography Research*, 44(3), 72-63.
- Ranjbarmanesh, N., Entezari, M., Ramesht, M.R (2013). Groundwater Crisis Due to Tectonic Activity in Mahidasht Plain: *Iranian Journal of Applied Geomorphology*, 2(1), 10.
- Zandi, R., Farzin Kia, R., Shafiei, N., (2019). *Earth Subsidence and Radar Interferometer*. Tehran, Satellite Publications.
- Payandeh, Z., Servati, M. R., Shafi'i, F., (2016). Evaluation of tectonic activities using geomorphic indices (Case study: northwest of Kabir Kuh anticline): *Quantitative Geomorphological Research*, 4(4), 104-118.
- Shafi'i, N., Zanganeh Asadi, M. A., Jamalabadi, J., mojjarrad Titankanloo, Z., (2019). Investigating the Groundwater Causes of Noorabad Plain of Mamasani with Emphasis on the Role of Tectonic Activities and Groundwater: *Exploitation Geographical Sciences*, 19(1), 254-235.
- Jafari, G.h., (2015). Spatial study of morphotectonic indices of valleys with respect to geological structure (Case study: Part of Roughness of Zanjan province): *Hydro-geomorphology*, 2(5), 41-61.
- Jamal Abadi, J., Zanganeh Asadi, M.A., Amir Ahmadi, A., (1396). Investigation of Factors Affecting the Development and Evolution of Alluvial Fans of Southern Slopes with Emphasis on Tectonic Role (West Sabzevar): *Geography and Development*, 47, 69-88.
- Alaei Taleghani, Mahmood., (2003). *Geomorphology of Iran*. Second Edition. Tehran, Ghooms Publications.
- Shayan, S., Yamani, M., Yadegari, M., (2016). Land subsidence zoning in Hamadan Gharechai watershed: *Hydrogeomorphology*, 9, 139-158.

- Karami, Fariba, Relative Assessment of Active Tectonics Using Morphometric Methods in the North and Eastern Basins of Sahand Mountain: *Journal of Geographical Space*, 12(37), 1-18.
- Abedini, M., Shenou Sh., (2014). Evaluation of Neonatal Construction Activities in the Meshkin Chai Watershed through Geomorphological Indices: *Geography and Development*, 35, 49-66.
- Duglas, W. Burbank, Robert, S. Anderson (2001). *Tectonic Geomorphology*, Blackwell Science, Ltd.
- Gallowey, D.L.; Burbey; T.J., (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction: *Hydrogeol, J*, 19, 1459-1486.
- Hamdouni. R.El.; C. Iriggaray, T. Fernandez, J. Chacon, and E.A. Keller. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain): *Geomorphology*, 96(1), 150-173.
- Keller, E. A, and N. Pinter,. (2002). *Active Tectonics–Earthquakes, Uplift and Landscape* (2nd edition). Prentice Hall. London.
- Keller, E.A. Pinter, N (1996), *Active tectonics*; Prentice Hall publisher, New Jersey.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H.,Wetzel, H.U., Akbari, B., avandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S., (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements: *Engineering Geology*, 218, 134-151.
- Pike, R.J.; Wilson, S.E., (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area- altitude analysis: *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079-1084.
- Randel, T., (1994). Analysis of drainage- basin symmetry as arpin techniques to areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment: *Geological society*, 106, 571-581.
- Vertex.daac.asf.alaska.edu, Canadian Space Agency.
- www.USGS.gov, EarthExplorer, (The United States Geological Survey).