

بررسی فرونشست دشت خانمیرزا بر اساس داده‌های ژئومورفیک و تکنیک تداخل سنجی راداری در بازه زمانی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰

خدیجه مرادی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان.
محمدحسین رامشت* - استاد ژئومورفولوژی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.
قاسم خسروی - استادیار گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور، واحد لنگران، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان.
کوروش شیرانی - استادیار مهندسی خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

چکیده

امروزه فرونشست به عنوان عامل مهمی در از بین رفتن منابع آب و خاک هم از لحاظ کمی و هم از لحاظ کیفی به شمار می‌رود. پیشتر این رویداد در مناطق خشک و نیمه خشک به علت برداشت آب زیرزمینی و تغذیه ناکافی منابع زیرسطحی، امری عادی بود. اما در حال حاضر این رویداد در دشت‌های مناطق معتدل، با ورودی آب تغذیه‌ای مناسب اتفاق می‌افتد. دشت خانمیرزا از جمله دشت‌های مناطق سرد و معتدل ایران است که با میانگین بارش ۵۰۰ میلی‌متر در سال و تغذیه کافی از لحاظ وجود منابع سطحی، رویداد فرونشست هم اکنون در آن با روند سریعی در حال اتفاق است. قرارگیری دشت خانمیرزا از نظر زمین‌ساختاری در زون زاگرس چین‌خورده در جنوب گسل دنا و وجود بیژومترهای بیرون‌زده از خاک و همین‌طور وجود چشمه و ... از نشانه‌های تحرک پوسته‌ای در سطح این دشت است. بدین منظور با هدف ارزیابی فعالیت تکتونیکی منطقه در ایجاد پدیده فرونشست از برخی شاخص‌های ژئومورفیک مانند شاخص شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص انتگرال هیپسومتری (H) فرونشست منطقه از لحاظ تکتونیکی مورد مطالعه قرار گرفت. همین‌طور با استفاده از تداخل‌سنجی راداری نرخ فرونشست مشخص شد. بررسی این شاخص‌ها نشان داد که شاخص‌های، شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، بیانگر تکتونیک فعال در منطقه است. فعالیت‌های زمین‌ساخت باعث کشیدگی دشت و نامتقارن شدن دو طرف رود اصلی شده است. همین‌طور نتایج مربوط به تداخل‌سنجی راداری در بازه هشت ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۰) بیانگر این است که به موازات فرونشست (با نرخ ۳۳ سانتیمتر) در بخش‌هایی از دشت، بخش‌های دیگر با بالآمدگی (با نرخ ۵۹ سانتیمتر) مواجه است.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، دشت خانمیرزا، زمین‌ساخت فعال، شاخص ژئومورفیک، فرونشست.

مقدمه

فروریزش و فرونشست می‌تواند در اثر پدیده های طبیعی زمین‌شناسی مانند زمین لرزه، انحلال سنگ های آهکی، گچی و نمکی، آب شدن یخ ها و تراکم نهشته ها، حرکت های آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت های انسانی مانند معدن کاری، برداشت سیالات زیرزمینی مانند آب های زیرزمینی، نفت و یا گاز ایجاد شود (گالوی و باربی، ۲۰۱۱: ۱۴۵۹). (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی میزان از دست دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژوا کوبین کالیفرنیا پرداختند و نتیجه گرفتند اگر برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها صورت گیرد توانایی خاک خصوصا در مناطق رسی برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود. شناسایی و رصد پدیده فرونشست یکی از مسائل مهم و امر حیاتی برای حفظ پایداری این مناطق است. به این منظور، پژوهشگران برای مطالعه و رصد این پدیده از روش های گوناگونی استفاده می‌کنند که آنها را براساس موقعیت ابزارهای مورد استفاده، به سه دسته روش های زیرسطحی، روش های زمین پایه و روش های سنجش از دور تقسیم می‌نمایند (گوتیرز، ۲۰۱۹).

تداخل سنجی راداری از اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی بصورت گسترده مورد استفاده محققان عوم زمین واقع گردید (شیرانی و همکاران: ۲۰۱۳). این تکنیک می‌تواند برای اندازه‌گیری جابجایی‌های حاصل از پدیده‌های متعدد مانند زمین لرزه، روراندگی و فرونشست قرار گیرد. در کشورهای پیشرفته به‌ویژه در ایالات متحده و ژاپن بیشترین مطالعات بر روی پدیده فرونشست و نیز استفاده از تداخل سنجی راداری صورت گرفته که نتیجه اجرای عملی آن پژوهش‌ها کنترل شدید مصرف آب، تغییر الگوی مصرف و توقف فرونشست‌ها در بسیاری از مواقع بوده است. (حقیقت مهر، ۱۳۸۹: ۳۴). تحلیل سری زمانی و تعیین آهنگ فرونشست به کمک الگوریتم خط ممای کوتاه (SBAS) انجام شده است که به برآورد فاز تجمعی در زمان‌های تصویربرداری می‌پردازد (برادینو، ۲۰۰۲).

عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۶: ۶۶۱) طی تحقیقی میزان سالیانه فرونشست دشت مهیار را با روش تداخل سنجی راداری برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان فرونشست در مناطق تحت کشت و در نتیجه استحصال بیش از حد آب و فرونشست سطح سفره آب‌های زیرزمینی رخ داده است. نصیری خانقاه و همکاران (۱۳۹۳) به مقایسه رفتار سنجی پدیده فرونشست اصفهان با شبکه GPS و تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند و نتیجه گرفتند که باید روشی مناسب‌تر را برای مطالعه فرونشست ارائه نمایند. راسپینی و همکاران (۲۰۱۴)، پدیده فرونشست را در دلتای شمال یونان با استفاده از مدل‌سازی ژئوتکنیک و تداخل سنجی با استفاده از ۴۲ تصویر راداری در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۰۱ مورد ارزیابی قرار دادند و نرخ فرونشست را براساس اطلاعات PSI به مقدار ۴/۵ سانتیمتر در سال بدست آوردند. کاتن و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به محاسبه فرونشست زمین در مناطق ساحلی استان تیانبجیان در چین پرداختند، که اندازه‌گیری تغییر شکل‌های زمینی در بازه زمانی چندین ماهه با دقت زیر ۱ سانتیمتر را فراهم آورد. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، با کمک تداخل سنجی راداری در بازه پنج ساله مقدار فرونشست و افت آب زیرزمینی را برای دشت ماهیدشت محاسبه کردند که علت ایجاد فرونشست در این دشت همین افت سطح آب زیرزمینی می‌باشد

مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی با عنوان تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری برای بازه سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ در منطقه ۱۸ تهران به این نتیجه رسیدند که بخش شرقی منطقه بیشترین تآثر را از پدیده فرونشست می‌پذیرد. و نتایج مطالعات چاه‌های ژئوتکنیکی نشان داده که در محدوده‌هایی که بافت خاک ریزدانه می‌باشد با میزان فرونشست ارتباط دارد.

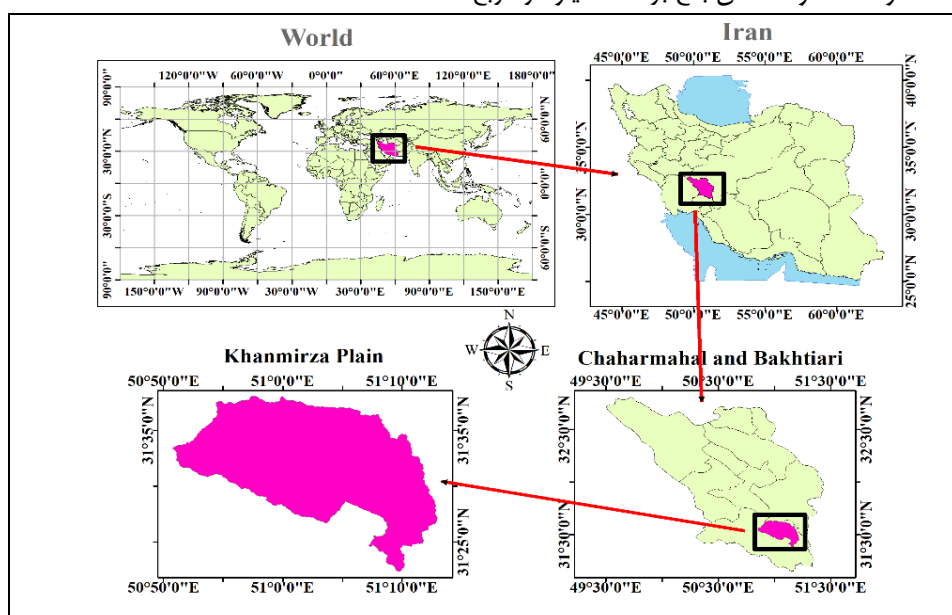
در ایران پژوهش‌هایی درباره ارزیابی تکتونیک با شاخصهای ژئومورفیک صورت گرفته است از نمونه کارهایی که می‌توان نام برد پژوهش‌های رنجبرمنش و همکاران (۱۳۹۳)، حبیب‌اللهیان و رامشت (۱۳۹۱) و جمال‌آبادی و

همکاران (۱۳۹۶)، شفیعی و همکاران (۱۳۹۸) همگی که حاکی از مطلوب بودن شاخص‌های ژئومورفیک را برای مناطق مختلف ایران در ارزیابی فعالیت‌های زمین ساختی است. به طور کلی، در ایران نزدیک به ششصد دشت وجود دارد که احتمال می‌رود بیش از نیمی از آنها در معرض سوبسیدانس باشند (شریفی کیا، ۱۳۹۰: ۵۸). امروزه مرسوم‌ترین دلایل برای این پدیده در کشوری مانند ایران که سرزمین خشک و نیمه خشکی است، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است که می‌تواند بعنوان تهدیدی برای ساکنان آن بشمار آید. دشت خانمیرزا بعنوان یکی از دشت‌های در معرض این مخاطره با میانگین بارش ۵۰۰ میلیمتر در سال با این مسئله درگیر می‌باشد. در این پژوهش سعی بر آن شد که علت فرونشست دشت خانمیرزا که با میانگین بارندگی بالای منطقه در تضاد است، در ارتباط با فعالیت تکتونیکی بررسی گردد بدین منظور از ۵ شاخص شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص انتگرال هیپسومتری (H) استفاده شده است. محاسبه نرخ فرونشست و بالآمدگی منطقه با استفاده از تکنیک تداخل سنجی هدف دیگر پژوهش است.

مواد و روشها

الف) معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده دشت خانمیرزا در شهرستان خانمیرزا در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است (شکل ۱). خانمیرزا با ارتفاع ۱۸۸۰ متر از سطح دریا در عرض ۳۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی قرار گرفته است. اقلیم حوضه آبریز خانمیرزا نیمه مرطوب سرد و اقلیم مدیترانه‌ای می‌باشد. میانگین بارندگی سالیانه ۵۰۰ میلی‌متر است. این دشت از شمال به شهرستان بروجن، از شرق به بخش فلارد، از جنوب به دهستان ریگ و از غرب به شهرستان اردل و بخش آرمند محدود است. وسعت آن بالغ بر ۱۳۷ کیلومتر مربع است.



شکل ۱: موقعیت دشت خانمیرزا

بیشترین وسعت واحد سنگی حوضه آبریز خانمیرزا مربوط به واحد آجاجاری متشکل از مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا است که غالباً در شمال، باختر و جنوب باختری رخنمون داشته و پی سنگ محدوده مطالعاتی را تشکیل می‌دهد. غالب واحدهای سنگ چینه‌ای موجود در شرق و شمال شرق حوضه آبریز خانمیرزا از نوع کربناته و آواری است. واحدهای ژئومورفیک کوهستان غالباً در شمال شرق و شرق و جنوب شرق رخنمون دارد. واحدهای ژئومورفیک تپه ماهور غالباً در شمال غرب، غرب و جنوب غرب رخنمون دارد، واحدهای ژئومورفیک نهشته‌های آبرفتی غالباً در مرکز دشت رخنمون دارد و بیشترین واحد ژئومورفیک در منطقه است. راندگی اصلی زاگرس که گسل اصلی معکوس زاگرس نیز نامیده می‌شود، یکی از گسل‌های بنیادین ایران و بخش اصلی گسل سراسری زاگرس است. راندگی اصلی زاگرس با راستای شمال باختری - جنوب خاوری و ساز و کار فشاری، بر زمین‌درز میان پهنه‌ی سنندج - سپرجان در شمال خاوری و زاگرس بلند در جنوب باختری منطبق است قرارگیری گسل دنا بعنوان یکی از گسل‌های اصلی زاگرس در محدوده مورد مطالعه با راستای شمال شمال باختری و شیب به سمت خاور شمال خاوری که بیش از یکصد کیلومتر طول دارد (وزارت نیرو: سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۸) موجب تحرکاتی در سطح دشت شده است. به منظور ارزیابی وضعیت منطقه از لحاظ تکتونیکی، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برای محاسبه شاخص شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص انتگرال هیپسومتری (H) از (DEM) ۳۰ متر و نقشه توپوگرافی استفاده شد، که در محیط GIS پردازش گردید. تصاویر راداری D-InSAR در بازه زمانی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده شده که پردازش آن در نرم افزار ENVI 5.3 انجام گرفت.

ب) روش کار و نتایج یافته‌های تحقیق

در این مقاله برای محاسبه فرونشست دشت خانمیرزا از داده‌های ژئومورفیک و تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد تصاویر ماهواره‌ای Envisat و نرم‌افزارهای مختلف مانند SPSS، ARC MAP، Envi ۵.۳ بهره‌گیری شده است.

الف) محاسبه داده‌های ژئومورفیک:

با هدف ارزیابی فعالیت تکتونیکی منطقه در ایجاد پدیده فرونشست از برخی شاخص‌های ژئومورفیک مانند شاخص شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، شاخص انتگرال هیپسومتری (H)، مورد مطالعه قرار گرفت.

نحوه محاسبه شاخص گرادیان طولی رودخانه SL

شاخص گرادیان طولی رودخانه از رابطه زیر محاسبه می‌شود (محمدنژاد و خدمت زاده، ۱۳۹۹):

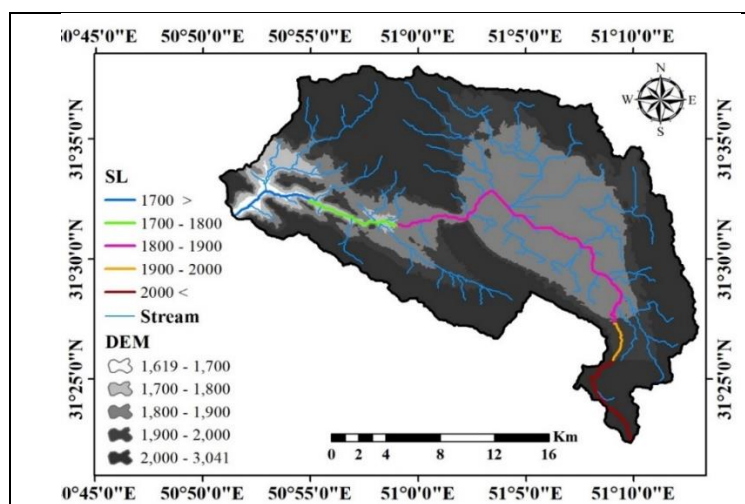
$$SL = (\Delta H / \Delta L) Ltc$$

در این معادله ΔH اختلاف ارتفاع بین دو منحنی میزان، در امتداد رودخانه که در اینجا به عنوان بخش (Segment)، نامیده می‌شود، ΔL طول همان بخش و Ltc طول کانال رودخانه از خط تقسیم آب تا نقطه‌ی میانی بخش یا همان نقطه‌ی میانی بین دو منحنی میزان است. بخش اول این معادله یعنی $(\Delta H / \Delta L)$ ، در واقع شیب بخش مورد نظر است. همچنین شاخص SL برای نقطه میانی بین دو منحنی میزان محاسبه می‌شود. نکته‌ی مهم در ارتباط با شاخص مذکور این است که با استفاده از آن می‌توان به طور مستقیم رودخانه‌های کوچک با نیمرخ تند را با رودهای بزرگ دارای نیمرخ ملایم مقایسه و ارزیابی کرد.

آستانه‌های این شاخص در سه کلاس طبقه‌بندی می‌شود: مقادیر بیشتر از ۵۰۰ زمین‌ساخت فعال، مقادیر بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ با فعالیت متوسط و مقادیر کمتر از ۳۰۰ مناطق غیر فعال است. نتایج این شاخص بیانگر وضعیت فعال در ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰، وضعیت غیرفعال در ارتفاع ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ و وضعیت نیمه فعال در ارتفاع ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ می‌باشد (جدول شماره ۱) (شکل شماره ۲).

جدول ۱: شاخص گرادیان رودخانه (SL)

مسیر	Da(km)	Dd(km)	T	وضعیت
۱	۱/۳۴	۷/۹	۰/۱۷	تکتونیک فعال و فرسایش کم
۲	۷/۴۳	۸/۵۴	۰/۸۷	تکتونیک فعال و فرسایش بیشتر
۳	۱/۱۹	۱/۲۶	۰/۹۴	تکتونیک فعال و فرسایش بیشتر



شکل ۲: شاخص گرادیان طولی آبراهه (SL) در حوضه خانمیرزا

شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T)

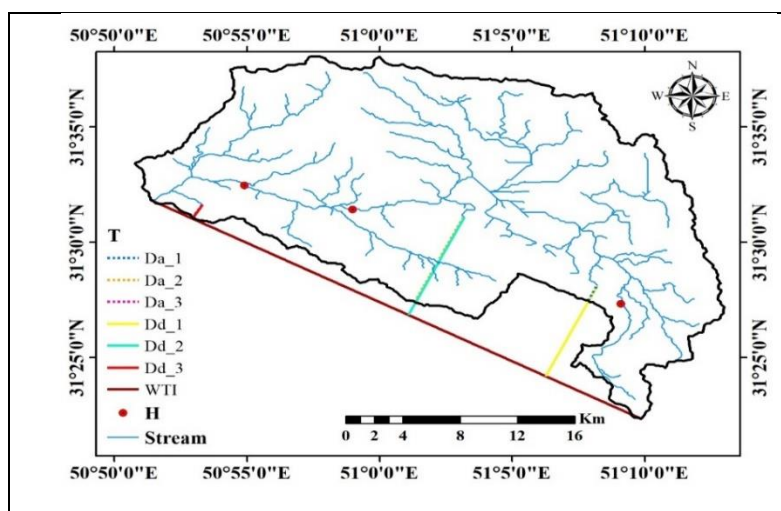
این شاخص هم می‌تواند وضعیت تقارن و در نتیجه فعال یا غیرفعال بودن منطقه را مشخص نماید. این شاخص با این رابطه محاسبه می‌شود (نگهبان و درتاج، ۱۳۹۸):

$$T = Da / Dd$$

فاصله نوار مائندری فعال از خط میانی حوضه آبی، Dd فاصله خط میانی حوضه آبی از خط مرز حوضه در حوضه‌های کاملاً متقارن مقدار عددی این شاخص صفر است. اما با کاهش تقارن حوضه، میزان شاخص افزایش یافته و به عدد یک نزدیک می‌شود. برای محاسبه این شاخص در حوضه خانمیرزا، در هر زیر حوضه یک مقطع ایجاد گردید (شکل ۳) و مقدار آن محاسبه شد (جدول ۲). با توجه به این جدول مقدار شاخص در هر سه مقطع کمتر از یک است و نشانه عدم تقارن و تکتونیک فعال در کل حوضه خانمیرزا است.

جدول ۲: شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)

مسیر	Da(km)	Dd(km)	T	وضعیت
۱	۱/۳۴	۷/۹	۰/۱۷	تکتونیک فعال و فرسایش کم
۲	۷/۴۳	۸/۵۴	۰/۸۷	تکتونیک فعال و فرسایش بیشتر
۳	۱/۱۹	۱/۲۶	۰/۹۴	تکتونیک فعال و فرسایش بیشتر



شکل ۳: شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T) در حوضه خانمیرزا

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)

شاخص عدم تقارن روشی برای ارزیابی وجود کج شدگی های ناشی از فعالیت های زمین ساختی در مقیاس حوضه‌ی زهکشی است.

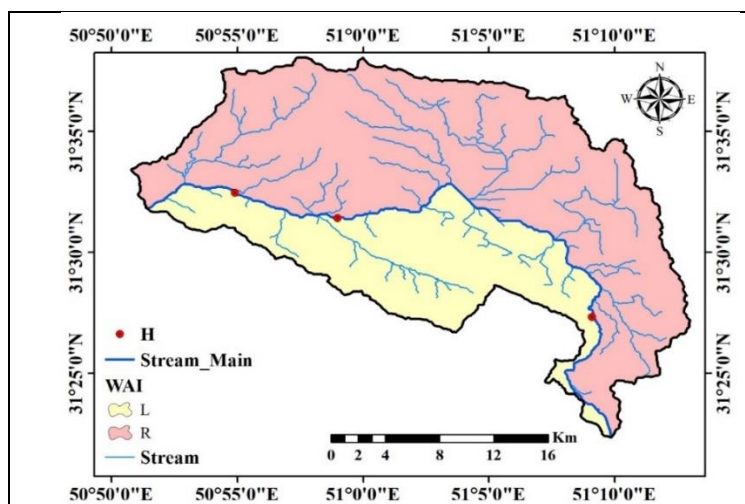
شکل هندسی شبکه رودها را می توان از نظر کیفی و کمی با روش های متعددی توصیف کرد. در مناطقی که شبکه زهکشی در حضور تغییر شکل های تکتونیکی توسعه پیدا می کند، شبکه زهکشی اغلب دارای شکل هندسی و الگوی متمایزی می باشد. عامل عدم تقارن، برای توصیف و درک ارتباط کج شدگی تکتونیکی در نواحی با مقیاس حوضه زهکشی و بزرگتر ارتباط داده شده است (گورابی و نوحه گر، ۱۳۸۶: ۱۸۲)

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی به کج شدگی زمین در اثر فعالیت های زمین ساختی دلالت داشته و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Af = 100 (Ar/At)$$

در این رابطه Af عدم تقارن حوضه، Ar مساحت بخش غرب حوضه نسبت به رود اصلی و At مساحت کل حوضه است. غربی و شرقی حوضه را می بایست در جهت جریان رود در نظر گرفت. اگر مقدار عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد، بیانگر وجود تقارن در دو سمت آبراهه های اصلی و در نتیجه عدم فعالیت تکتونیکی است. اگر مقدار عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد، نشان دهنده وجود تقارن در دو سمت آبراهه اصلی و در نتیجه عدم فعالیت نوزمین ساختی است. در صورتی که حوضه آبریز تحت تاثیر این نیروها قرار داشته باشد ممکن است که مقدار عددی به دست آمده Af کمتر یا بیشتر از ۵۰ باشد. اگر میزان این شاخص بزرگتر از ۵۰ باشد نشان دهنده

فرسایش در سمت راست آبراهه اصلی است و اگر میزان شاخص کوچکتر از ۵۰ باشد نشان دهنده فرسایش در سمت شرق آبراهه اصلی است (فرزین کیا و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۷۳). در این محاسبه عدد به دست آمده از حوضه خانمیرزا (۲/۲۲) نشان داد که مقدار شاخص کوچکتر از ۵۰ می‌باشد. بنابراین، در سمت چپ آبراهه اصلی فعالیت تکتونیکی داریم و در سمت راست با پدیده فرونشست مواجه هستیم (شکل شماره ۴).



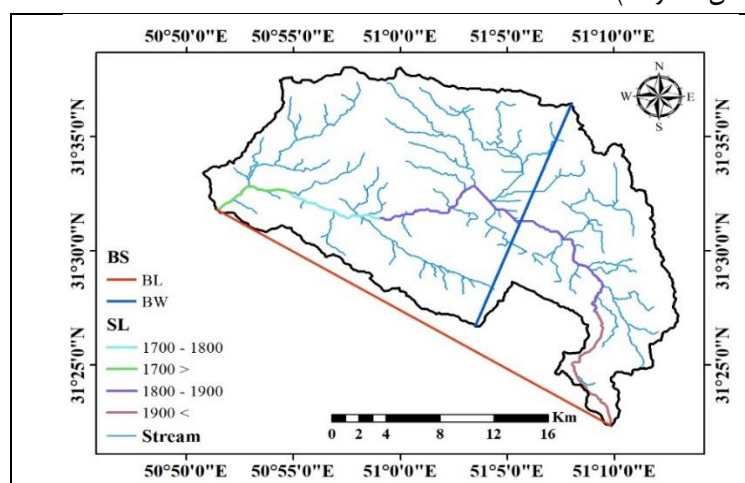
شکل ۴: شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF) در حوضه خانمیرزا

شاخص نسبت شکل حوضه (BS)

حوضه‌هایی که شکل کشیده‌ای دارند، از لحاظ تکتونیکی فعال هستند. و شکل حوضه‌هایی که از لحاظ تکتونیکی غیر فعال هستند به سمت گرد متمایل می‌شود. این شاخص از این رابطه محاسبه می‌شود (نگهبان و درتاج، ۱۳۹۸):

$$BS = BL / BW$$

BS شاخص شکل حوضه، BL اندازه طول رودخانه از انتهای ترین قسمت تا خروجی حوضه، BW پهناي حوضه در پهن ترین قسمت (شکل شماره ۵).



شکل ۵: شاخص شکل حوضه (BS) در حوضه خانمیرزا

مقادیر BS بیشتر از ۴ بیانگر تکتونیک فعال در حوضه است. زمانی که مقدار بین ۳ تا ۴ باشد از لحاظ زمین ساخت نیمه فعال است و مقادیر BS کمتر از ۳ بیانگی غیر فعال بودن حوضه است. مقادیر شاخص نسبت شکل در حوضه خانمیرزا 1/75 است که بیانگر فعالیت های نو زمین ساختی است (جدول شماره ۳).
جدول ۳: مقادیر شاخص شکل حوضه (BS) در حوضه خانمیرزا

مقدار شاخص BS حوضه خانمیرزا	کلاس فعالیت
۱,۷۵	۳

شاخص انتگرال هیپسومتری

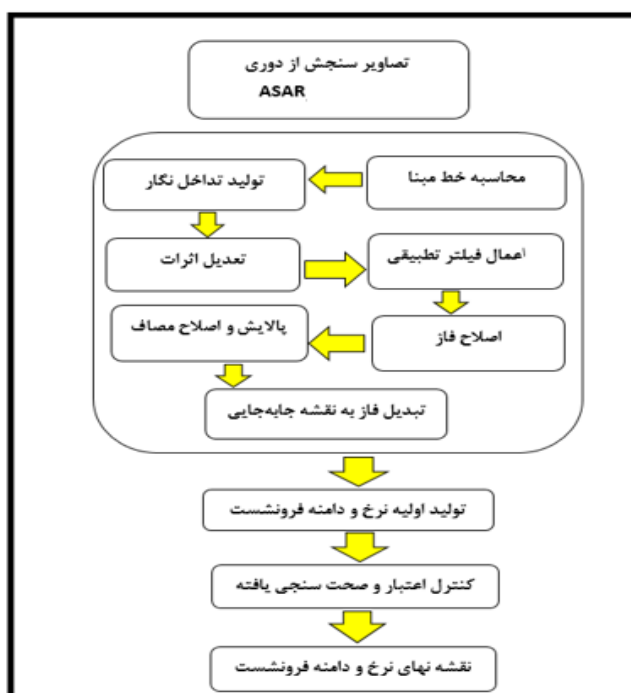
انتگرال هیپسومتری شاخصی است که به ارتفاع کل منطقه را نسبت به مساحت کل منطقه محاسبه می کند. مقادیر این شاخص مراحل تحول چشم انداز را در چرخه فرسایشی نشان می دهد. مقدار انتگرال بزرگتر از 0/5 با منحنی محدب به توپوگرافی جوان و بالای آمدگی منطقه و فعالیت جدید تکتونیک اشاره دارد. مقدار انتگرال 0/4-0/5 مرحله بلوغ ناهمواری را نشان می دهد و مقدار کمتر از 0/4 این شاخص با منحنی مقعر مرحله پیری و فعالیت کم تکتونیک حوضه زهکشی را نشان می دهد (رجبی و انصاری، ۱۳۹۶: ۲).

$$=0.32H = \frac{H_{mean}-H_{min}}{H_{max}-H_{min}} \quad H = \frac{452.43}{1422}$$

مقادیر به دست آمده از این شاخص بیانگر توپوگرافی پیر و فعالیت کم تکتونیک است.

تکنیک تداخل سنجی راداری

امروزه تداخل سنجی راداری به عنوان تکنیکی که جابه جایی سطح زمین را با دقت و توان تفکیک بالا برآورد می کند، ابزار متداولی برای بررسی تغییر شکل سطحی زمین در اثر عوامل مختلف از جمله فرانشست زمین است. در این تکنیک با استفاده از دو تصویر ماهواره ای می توان یک اینترفروگرام تهیه کرد. به طوری که با به کارگیری ابزار اینترفرومتری فازهای سیگنال برگشتی از زمین، در دو تصویر ماهواره ای دارای تاخیر زمانی از یک منطقه، برای استخراج تغییرات سطح زمین از هم کم می شود. تکنیک تداخل سنجی راداری جهت پیمایش تغییرات سطح زمین از نرم افزار Sarscape به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در رقوم سازی تصاویر ماهواره ای استفاده می کند. در این تحقیق ۱۸ تصویر ماهواره ای Envisat از آژانس فضایی اروپا تهیه برای اندازه گیری میزان فرانشست دشت خانمیرزا، از ۱۸ تصویر راداری ENVISAT ASAR از آژانس فضایی اروپا در سطح Single Look Complex (SLC) در بازه زمانی ۱ آوریل ۲۰۰۳ تا ۱۷ آگوست ۲۰۱۰ استفاده شد. (جدول شماره ۴) که برای تشکیل ۱۷ تداخل سنج نسبت به یک تصویر اصلی به کار رفته است. پردازش تصاویر در ۶ گام انجام گرفت (شکل شماره ۶).

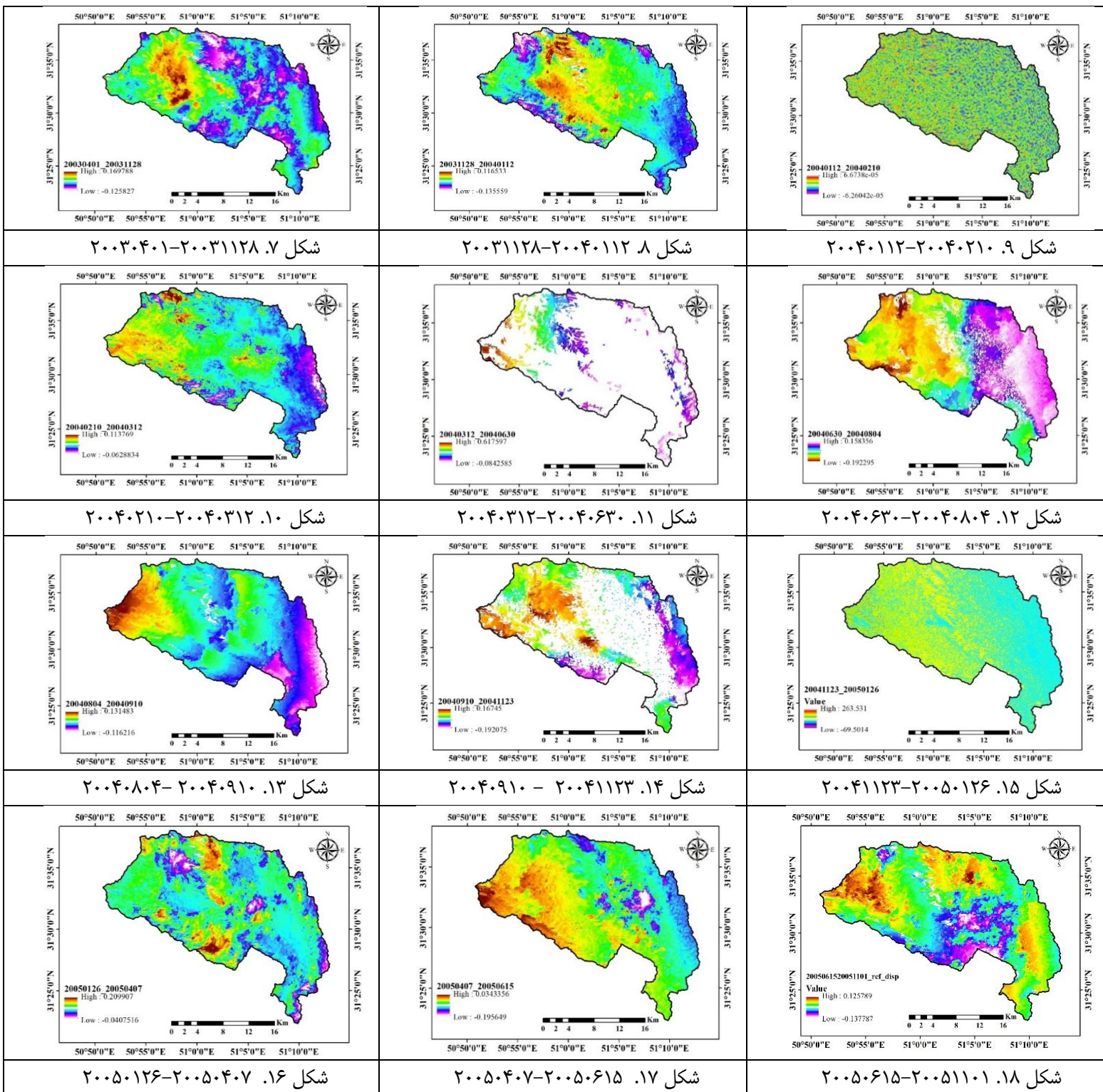


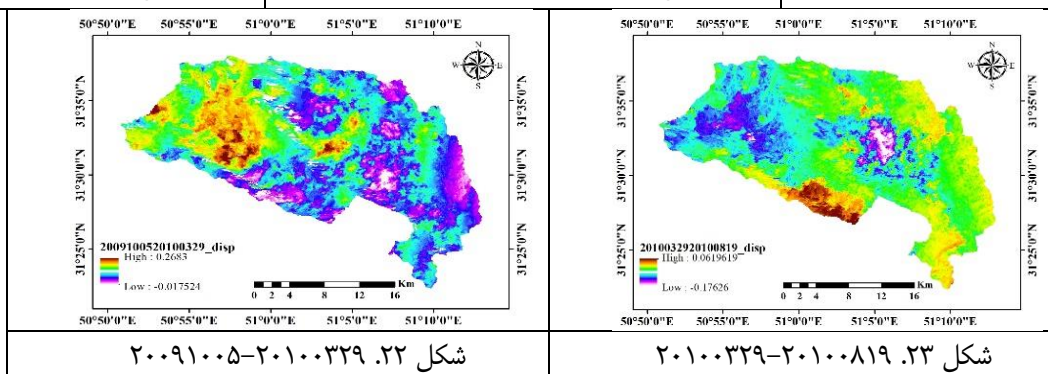
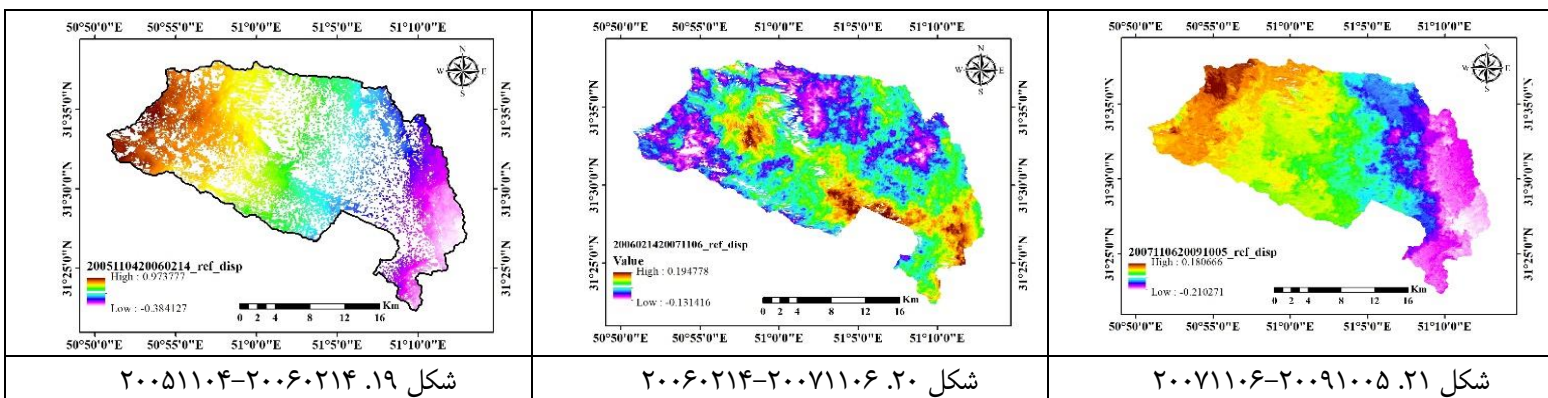
شکل ۶: مراحل پردازش تصاویر ماهواره‌ای
جدول ۴. تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش

تاریخ عکسهای ماهواره‌ای Envisat		
۲۰۰۳/۰۴/۰۱	۲۰۰۳/۱۲/۰۲	۲۰۰۴/۰۱/۰۶
۲۰۰۴/۰۲/۱۰	۲۰۰۴/۰۳/۱۶	۲۰۰۴/۰۶/۲۹
۲۰۰۴/۰۸/۰۳	۲۰۰۴/۰۹/۰۷	۲۰۰۴/۱۱/۱۶
۲۰۰۵/۰۱/۲۵	۲۰۰۵/۰۴/۰۵	۲۰۰۵/۰۶/۱۴
۲۰۰۵/۰۸/۲۳	۲۰۰۵/۱۱/۰۱	۲۰۰۶/۰۲/۱۴
۲۰۰۹/۱۰/۰۶	۲۰۱۰/۰۳/۳۰	۲۰۱۰/۰۸/۱۷

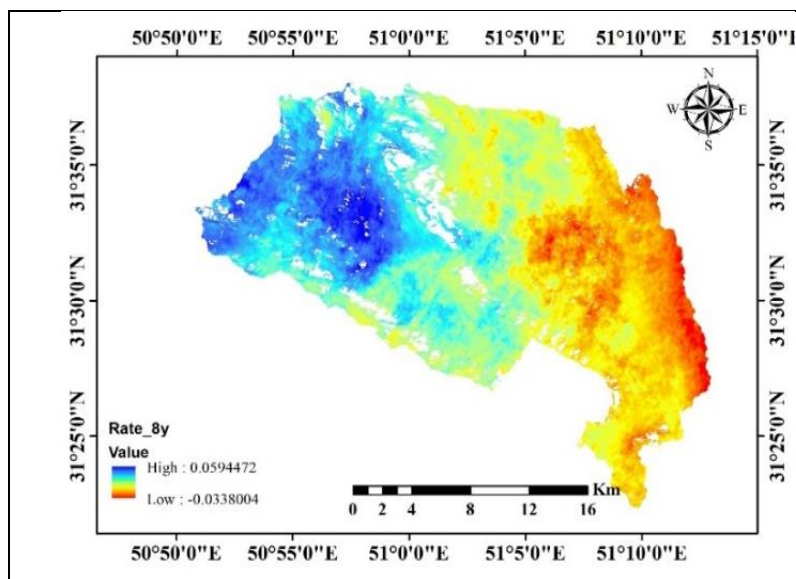
تصاویر ماهواره‌ای طی مراحل آمده در شکل (۶) دو به دو پردازش شدند و نتیجه کار در ا شکال شماره ۷ تا ۲۳ به تصویر آمده است.

شکل ۷-۲۳. تصویر ماهواره‌ای زوج شده منطقه مورد مطالعه بر اساس بازه زمانی ۲۰۰۳_۲۰۱۰





در ادامه فرایند پردازش از ۱۷ تصویر زوج شده ۱۶ تصویر قابل قبول مشخص شد که در محیط ARC GIS با پردازش تصاویر زوج شده نقشه نهایی فرورنشست و بالآمدگی در بازه زمانی دو ساله (۲۰۰۳_۲۰۱۰) برای حوضه خانمیرزا استخراج شد (شکل: ۲۴) در این نقشه رنگ آبی به معنای فرورنشست و رنگ قرمز به معنای بالآمدگی می‌باشد.



شکل ۲۴: نقشه نهایی نرخ فرورنشست و بالآمدگی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی ۲۰۰۳_۲۰۱۰

نتیجه گیری

در این پژوهش پدیده فرونشست در حوضه آبریز خانمیرزا با استفاده از شاخصهای ژئومورفیک و تکنیک تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شاخص های ژئومورفیک شکل حوضه (BS)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (T)، بیانگر تکنیک فعال در منطقه است. با تکنیک تداخل سنجی، ۱۸ تصویر اخذ شده از ماهواره ENVISAT، در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ توسط نرم افزار ENVI پردازش شد که برای ارزیابی نرخ فرونشست ۱۷ تصویر زوجی قابل قبول استخراج شد از طریق جابه جایی های به دست آمده در تصاویر ماهواره ای مقادیری به دست آمد که مقادیر منفی نشانگر جابه جایی در راستای دور شدن از ماهواره و مقادیر مثبت بیانگر جابه جایی در راستای نزدیک شدن به ماهواره است. با محاسبه مقادیر منفی نقشه نهایی نرخ فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ به دست آمد. علاوه بر محاسبه نرخ فرونشست، با محاسبه مقادیر مثبت، نرخ بالآمدگی اطراف نشست محاسبه شد. مقدار فرونشست محاسبه شده از ۱۷ تصویر زوجی افت ۳۳ سانتیمتری این دشت در قسمت شرق و جنوب که به رنگ قرمز مشخص شده است و بالآمدگی ۵۹ سانتیمتری کوه های سمت غرب نقشه که به رنگ آبی مشخص شده است. در مجموع می توان گفت میانگین تحرکات در این حوضه ۱۳ سانتیمتر بالآمدگی است.

مقادیر به دست آمده نشان می دهد که علاوه بر برداشت آب زیرزمینی به عنوان یکی از دلایل اصلی و مرسوم فرونشست، لحاظ کردن عامل تکنیک در مناطقی چون حوضه آبریز خانمیرزا با مقدار ورودی بارش بالا از دلایل عمده تشکیل آن به حساب می آید، همینطور با استفاده از این شاخصها و تکنیک تداخل سنجی می توان پهنه بندی مناسبی برای احتمال فرونشست و دیگر مخاطرات ژئومورفولوژی مناطق مختلف در آینده انجام داد و راهکارهای مناسب جهت اقدامات کنترلی، حفاظتی، پیشگیری و یا هشداردهندگی ارائه داد.

منابع

- احمدی، ن.، موسوی، ز.، معصومی، ز.، ۱۳۹۷. ارزیابی: مجله فارسی سنجش از دور و GIS ایران، مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، دوره ۱۰، شماره ۳، صص ۳۳-۵۲
- پورخسروانی، م.، رامشت، م. ح.، المدرسی، س. ع.، ۱۳۹۱. ارزیابی: مجله فارسی پژوهشهای جغرافیای طبیعی، دوالیتی در ژئومورفولوژی، سال ۴۴، ۷۲-۶۳
- حاجب، ز.، موسوی، ز.، معصومی، ز.، رضایی، ا.، ۱۳۹۸. ارزیابی: مجله فارسی علوم زمین، مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری و ویژگی های هیدروژئولوژیکی آبخوان، سال بیست و هشتم، شماره ۱۱۴، صفحه ۲۵۱ تا ۲۵۸
- حبیب اللهیان، م.، رامشت، م. ح.، ۱۳۹۱. ارزیابی: مجله فارسی جغرافیا و توسعه، کاربرد شاخص های ارزیابی تکنیک جنبا در برآورد وضعیت تکنیکی بخش علیای زاینده رود، دوره ۱۰ شماره پیاپی ۲۶، صص ۹۹-۱۱۲
- جمال آبادی، ج.، زنگنه اسدی، م. ع.، امیراحمدی، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی: مجله فارسی جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، روابط کمی بین حجم مخروط افکندها و ارتباط آن با تکنیک فعال (مطالعه موردی: مخروط افکندهای دامنه جنوبی ارتفاعات جغتای)، دوره ۲۹، شماره ۳، صص ۳۵-۵۶
- رجیبی، م.، انصاری، م.، ۱۳۹۶. ارزیابی: مجله فارسی فصلنامه جغرافیای طبیعی، نقش مطالعات هیپسومتریک در تحلیل وضعیت و فرسایش حوضه های آبریز جنوب و جنوب شرق شهرستان سراب، سال دهم، شماره ۳۶

- رنجبرمنش، ن.، انتظاری، م.، رامشت، م. ح.، ۱۳۹۳. ارزیابی: مجله فارسی ژئومورفولوژی کاربردی، بحران ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در اثر فعالیت تکتونیکی در دشت ماهیدشت، دوره ۱، شماره دوم
- شریفی کیا، م.، ۱۳۹۱. ارزیابی: مجله فارسی مدرس علوم انسانی - برنامه‌ریزی و آمایش فضا، تعیین میزان و دامنه‌ی فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (*D-InSAR*) در دشت نوق - بهرمان، دوره شانزدهم، شماره ۳، ۷۷-۵۵
- صفاری، ا.، جعفری، ف.، ۱۳۹۵. ارزیابی: مجله فارسی جغرافیا، سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری: مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار، شماره ۴۸،
- شفیع، ن.، زنگنه، م. ع.، جمال آبادی، ج.، مجرد تیتکانلو، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی: مجله فارسی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، بررسی علل افت آبهای زیرزمینی دشت نورآباد ممسنی با استفاده از شاخصهای ژئومورفیک و مبتنی بر نظریه ژئودوالیته، دوره ۱۹، شماره ۵۲، صص ۲۳۵-۲۵۴
- عابدینی، م.، عبادی، ا.، قلعه، ا.، ۱۴۰۱. ارزیابی: شریه جغرافیا و برنامه ریزی، بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پیاپی ۷۹ (بهار ۱۴۰۱)، صص ۲۰۷-۲۲۰
- عرب عامری، ع.، رفیعی، ع.، رضایی، خ.، شیرانی، ک.، محمدی ثابت، ن.، ۱۳۹۶. ارزیابی: مجله فارسی مهندسی و مدیریت آبخیز، برآورد میزان سالیانه فرونشست در دشت مهیار با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تحلیل پارامترهای موثر بر آن، جلد ۱۱، شماره ۳، صص ۶۶۱-۶۷۵
- فرزین کیا، ر.، زنگنه اسدی، م. ع.، امیراحمدی، ا.، زندی، ر.، ۱۳۹۸. ارزیابی: مجله فارسی هیدروژئومورفولوژی، ارتباط فعالیت‌های تکتونیکی و تاثیر آن در فرونشست زمین در حوضه‌ی آبریز دشت جوبین، شماره ۲۰، سال ۵، صص ۱۶۵-۱۸۵
- کرمی، ف.، ۱۳۸۸. ارزیابی: مجله فارسی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ارزیابی ژئومورفیک فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه زهکشی سعیدآبادچای، شماره ۶۹، صص ۸۲-۶۷
- گورابی، ا.، نوحه‌گر، ا.، ۱۳۸۶. ارزیابی: مجله فارسی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شواهد ژئومورفولوژیکی فعال حوضه آبخیز درکه، دوره ۳۹، شماره ۸
- محمدنژاد آروق، و.، خدمت زاده، ع.، ۱۳۹۹. ارزیابی: هیدروژئومورفولوژی، تهیه نقشه‌ی شاخص گرادیان طولی رودخانه میتنی بر *DEM* و *GIS* جهت ارزیابی تکتونیک فعال (مطالعه موردی: شمال دامغان)، شماره‌ی ۲۲، سال ششم، صص ۱۳۷-۱۵۷
- مرادی، آ.، عمادالدین، س.، آرخی، ص.، رضایی، خ.، ۱۳۹۹. ارزیابی: نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران)، سال هفتم، شماره ۱، صص ۱۵۳ تا ۱۷۶
- نصیری خانقاه، ع.، خسروی، ق.، غفوریان، ه.، اسلامی، ر.، ۱۳۹۳. ارزیابی: همایش ملی آب، انسان، زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، مقایسه رفتارسنجی پدیده فرونشست اصفهان با شبکه *GPS* و تکنیک تداخل‌سنجی رادار، دوره ۱
- نگهبان، س.، درتاج، د.، ۱۳۹۸. ارزیابی: نشریه هیدروژئومورفولوژی، ارزیابی تکتونیک فعال حوضه‌ی رودخانه سیروان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، شماره ۱۹، سال ۵، صص ۲۰۹-۱۸۷
- وزارت نیرو سازمان مدیریت منابع آب ایران (۱۳۸۸). مطالعات نیمه تفضیلی منابع آب زیرزمینی دشت خانمیرزا، جلد هفتم

- وزارت نیرو سازمان مدیریت منابع آب ایران (۱۳۸۸). مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی دشت خانمیرزا، جلد دوم زمین شناسی
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E., 2002- *A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40: 2375-2383.
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*, *Hydrogeology Journal*, 19: 1459-1486.
- Gutiérrez, F., Benito-Calvo, A., Carbonel, D., Desir, G., Sevil, J., Guerrero, J., Martínez-Fernández, A., Karamplaglidis, T., García-Arnay, Á., Fabregat, I. (2019), *Review on sinkhole monitoring and performance of remediation measures by high precision leveling and terrestrial laser scanner in the salt karst of the Ebro Valley, Spain*, *Engineering Geology*, 248: 283-308
- Raspinia, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adamc, N., Moretti, S., ۲۰۱۴. *Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent*
- *Scatterer Interferometry*, *ELSEVIER International Journal*, vol ۲۸, pp. ۷۸-۸۹
- Shirani, K., 2013. *Detection, monitoring and landslide risk assessment using RADAR satellite images, case study: Dena Mountains. PhD Thesis, University of Isfahan, 268 pages (in Persian).*
- Smith, R.G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J.A., Zeb ker, H.A., Farr T and Liu Z., 2017. *Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California*, *Water Resources Research journal*, vol 53, pp. 2133-2148.