

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره نهم، شماره سی و پنجم، بهار ۱۳۹۸

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۳/۰۹

صص ۷۴-۸۸

ارزیابی درز و شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت کاشمر- بردسکن در شمال شرق ایران

حمید سعیدی، دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی-دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا لشکری‌پور*، استاد گروه زمین‌شناسی-دانشگاه فردوسی مشهد

محمد غفوری، استاد گروه زمین‌شناسی-دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در سال‌های اخیر افت سطح آب‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین در دشت کاشمر-بردسکن در استان خراسان رضوی شده است. این فرونشست باعث ایجاد و توسعه‌ی گسترده‌ی درز و شکاف‌های کششی در این دشت شده است. به‌منظور شناخت این مخاطره‌ی زمین‌شناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Envisat و Sentinel-1 در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ و ۲۰۱۷-۲۰۱۴ محدودده‌های فرونشست دشت و گسترش این شکاف‌ها بررسی گردید. برای مطالعه‌ی شرایط زیرسطحی و ارتباط آن با موقعیت شکاف‌ها با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای و نتایج مطالعات ژئوالکتریک، ضخامت و بافت رسوبات و توپوگرافی سنگ کف برای دشت ترسیم شده است. موقعیت درز و ترک‌ها در دشت تعیین و با مقادیر فرونشست و نوع رسوبات زیرسطحی و توپوگرافی سنگ بستر مقایسه شده است. نتایج تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که انطباق مکانی بالایی بین محل درز و شکاف‌ها با مناطق فرونشست دیده می‌شود و تفاوت در میزان فرونشست زمین مهم‌ترین علت تشکیل درز و شکاف‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه است. بیش‌ترین تعداد شکستگی‌ها در غرب این دشت مشاهده می‌شود. در این منطقه دو پروفیل در راستای مختلف ترسیم گردید. در این پروفیل‌ها تغییرات سطح آب زیرزمینی، جنس و ضخامت رسوبات و گسترش افقی و عمودی آن‌ها، مقدار فرونشست، توپوگرافی سنگ بستر و محل درز و شکاف‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ارتباط مستقیم میان فرونشست زمین با افت سطح آب زیرزمینی و جنس رسوبات وجود دارد. علاوه بر آن، انطباق درز و شکاف‌ها با نقاط افزایش شیب یا پرتگاه‌های سنگ بستر که در آنجا مقدار فرونشست و در نتیجه استرس کششی افقی به بیش‌ترین مقدار می‌رسد، هم‌خوانی دارد. راستای غالب درز و شکاف‌ها بر اساس نمودار گل‌سرخ، دارای روند شمال شرق-جنوب غرب است.

واژگان کلیدی: شکاف زمین، فرونشست زمین، تفاوت در مقدار فرونشست، تغییرات تراز آب زیرزمینی، رسوبات ریزدانه.

* Email: lashkaripour@um.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

این مقاله برگرفته از رساله‌ی دکتری حمید سعیدی با عنوان «بررسی مکانیزم و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی فرونشست زمین در دشت کاشمر - بردسکن» می‌باشد.

۱- مقدمه

شکاف‌های^۱ ناشی از افت سطح آب، ترک‌های کششی با جابه‌جایی عمودی ناچیز می‌باشند که در اثر برداشت بیش‌ازاندازه‌ی آب از رسوبات تحکیم‌نیافته ایجاد می‌شوند (Holzer, 1976: 423; Holzer and Pampeyan, 1981: 223). علل و مکانیزم تشکیل گسیختگی زمین توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Lofgren, 1978; Jachens and Holzer, 1982: 998; Helm, 1994: 293; Carpenter, 1980: 497, 1999: 65; Sheng et al., 2003: 351; Budhu, 2008: 281; Budhu and Adiyaman, 2012: 197; Ye et al., 2018: 2249; Xu et al., 2018: 862, 2019: 523).

در دهه‌های گذشته بیش‌تر درز شکاف‌ها در مناطق کشاورزی به علت برداشت بیش‌ازاندازه‌ی آب‌های زیرزمینی گزارش گردیده است. اخیراً مناطق شهری نیز درگیر این پدیده شده‌اند. این درز و ترک‌ها، سالیانه خسارات زیادی به تأسیسات سطح زمین مانند راه‌ها و پل‌ها، ساختمان‌ها و کانال‌های خطوط انتقال برق، لوله‌ی انتقال فرآورده‌های نفتی و لوله‌های گاز، لوله‌های انتقال آب و سیستم‌های فاضلاب، لوله‌ی جدار چاه‌های بهره‌برداری وارد می‌نمایند. علاوه بر آن، مسیری برای حرکت آلاینده‌های سطحی به منابع آب زیرزمینی فراهم می‌نمایند و با نفوذ به آبخوان‌ها باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شوند (Doty and Rush, 1985; Helm, 2000).

در ایران نیز افزایش جمعیت و نیاز به آب جهت مصارف کشاورزی، شرب، خدماتی و صنعتی موجب برداشت آب بیش‌تر از ظرفیت آبخوان‌ها شده است. این امر موجب افت زیاد سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین^۲ در بسیاری از دشت‌ها و سکونتگاه‌های شهری من‌جمله جنوب تهران و کلان‌شهر مشهد و تعدادی از شهرهای کشور شده است. فرونشست زمین در این دشت‌ها توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. دشت تهران که بیش‌تر مناطق مسکونی و صنعتی از جمله پایتخت کشور، کلان‌شهر تهران را دربر گرفته، در حال فرونشست است. بخش‌های وسیعی از نواحی جنوب و جنوب غربی تهران شامل شهرهای اسلام‌شهر، شهریار و تعدادی از شهرک‌های پرجمعیت غرب تهران در محدوده‌ی فرونشست قرار دارند. عوارض و خسارات ناشی از آن در این نواحی مشاهده می‌شود (شریفی‌کیا، ۱۳۸۹: ۴۳). دشت مشهد، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین دشت‌های خراسان رضوی است که کلان‌شهر مشهد و مراکز مهم صنعتی و کشاورزی شمال شرق کشور در آن واقع شده‌اند. به علت برداشت بیش‌ازاندازه‌ی آب از آبخوان دشت، سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۳ بیش از ۳۰ متر افت داشته است که این مقدار افت، باعث نشست زمین و ایجاد ترک و شکاف‌هایی در نواحی شمال غربی مشهد و تخریب ساختمان‌ها، لوله‌ی جدار چاه‌ها و زیرساخت‌ها شده است (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۳۲).

دشت نیشابور یکی دیگر از دشت‌های مهم استان خراسان رضوی است که به علت برداشت بی‌رویه‌ی آب، فرونشست زمین در آن رخ داده است. لشکری‌پور و همکاران فرونشست زمین و شکستگی‌های این دشت را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس یافته‌های ایشان، افت سطح آب زیرزمینی در یک دوره‌ی ۱۰ ساله ۸/۴ متر است. با حفاری ۳ حلقه چاه، شناسایی نوع خاک‌هایی را که در آن‌ها فرونشست و ترک‌خوردگی رخ داده، ML و CL تعیین نموده‌اند. شکاف اصلی ایجاد شده در دشت نیشابور دارای امتداد تقریباً شمالی-جنوبی است. محل تشکیل این شکاف از گسل قدیمی در پی سنگ تبعیت می‌کند (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۰۳۲). حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) نیز تغییرات ژئومورفولوژیکی حاصل از فرونشست در دشت نیشابور و ابعاد خسارت ناشی از آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. سطح آب زیرزمینی این دشت در یک دوره‌ی ۳۰ ساله ۴۳ متر افت داشته است که موجب فرونشست زمین و ایجاد شکاف‌هایی با اشکال و عمق متفاوت در شمال غرب، جنوب و جنوب شرق دشت شده است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۱).

1- Earth Fissure

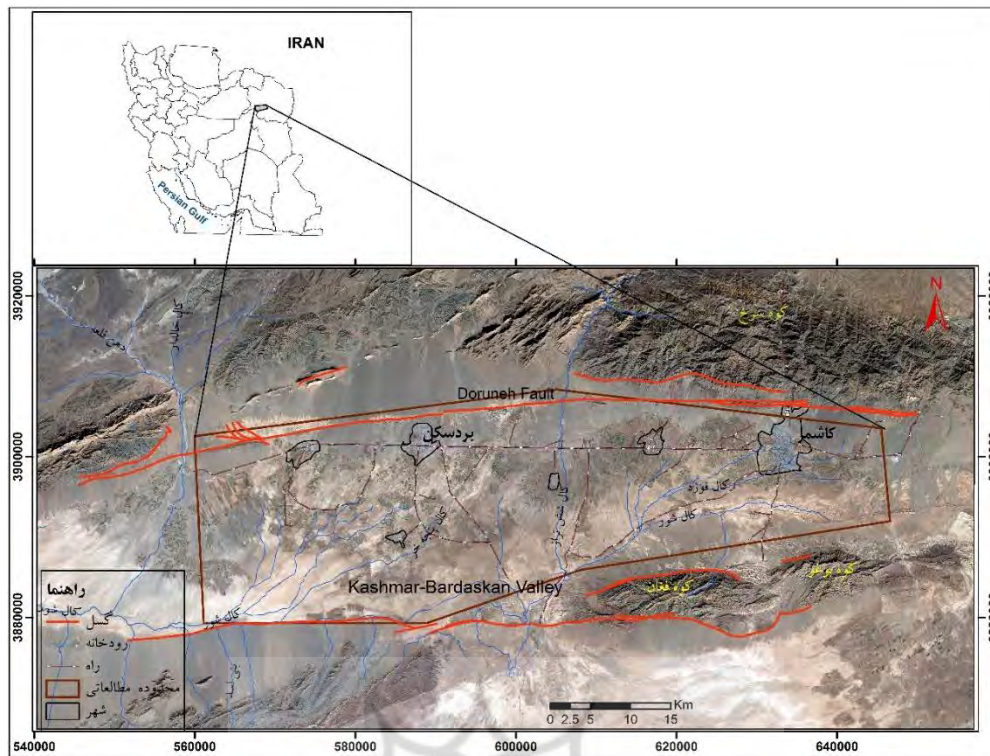
2- Land Subsidence

افت سطح آب زیرزمینی حدود ۱۵/۴ متر طی ۲۰ سال باعث فرونشست زمین به مقدار ۵۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر در دشت رستاق در جنوب میبد شده است. فرونشست زمین، موجب ایجاد ترک و شکاف‌هایی شده است که آنالیز آن‌ها نشان می‌دهد دو عامل نشست زمین و تکتونیک ناشی از فعالیت گسل‌های منطقه عامل ایجاد آن‌ها بوده‌اند (زارع مهرجردی، ۱۳۹۰: ۱۴۳). لشکری‌پور و همکاران (۱۳۸۷) فرونشست زمین و تشکیل شکاف‌ها را در غرب دشت کاشمر بررسی نمودند. بر اساس نتایج این تحقیق، در اثر برداشت ممتد و بیش‌ازاندازه‌ی آب، سطح آب زیرزمینی دشت کاشمر در یک دوره‌ی ۲۵ ساله تا سال ۱۳۸۵ حدود ۲۱/۵ متر افت داشته و کاهش حجم مخزن ۱۲۱/۴ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. افت آب باعث فرونشست زمین در خاک‌های ریزدانه و ایجاد شکاف‌ها و ترک‌های طولی کششی خصوصاً در غرب کاشمر شده است (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۷: ۹۵).

دشت کاشمر-بردسکن در شمال شرق ایران و جنوب غربی استان خراسان رضوی بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش یافته و دارای اقلیم خشک تا فراخشک است (اداره کل هواشناسی خراسان رضوی). همانند سایر دشت‌های ایران برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در این دشت انجام می‌شود. در این تحقیق با استفاده از تصاویر راداری، محدوده و مقدار فرونشست سالیانه برای نواحی مختلف دشت کاشمر-بردسکن مشخص شده است. گسترش جانبی و زیرسطحی آبرفت و جنس رسوبات با استفاده از لوگ چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای تعیین شده است. علاوه بر آن با استفاده از نتایج مطالعات ژئوالکتریک، ضخامت یا عمق سنگ بستر و توپوگرافی آن برای دشت ترسیم شده است. با استفاده از داده‌های برداشت ماهانه‌ی سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری شده توسط شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، نمودارهای تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ برای دشت رسم شده است. موقعیت درز و شکاف‌ها در دشت به روش‌های مختلف تعیین و توزیع و امتداد آن‌ها به صورت نمودار گل‌سرخ‌ی با استفاده از نرم‌افزار Rock works مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در نهایت با مقایسه‌ی نتایج فرونشست، نوع جنس و ضخامت رسوبات، تغییرات سطح آب زیرزمینی، تغییرات توپوگرافی سنگ بستر، موقعیت درز و شکاف‌ها در نقشه‌ها و پروفیل‌ها به تجزیه و تحلیل تأثیر هر یک از عوامل فوق‌الذکر بر تشکیل درز و شکاف‌ها در این دشت بررسی شده است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

دشت کاشمر-بردسکن در شمال شرقی ایران در جنوب غربی استان خراسان رضوی و ۲۴۰ کیلومتری شهر مشهد قرار دارد. این منطقه در محدوده‌ی جغرافیایی ۵۷°۳۴' الی ۵۸°۳۸' طول شرقی و ۳۵°۰۲' الی ۳۵°۱۸' عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). محدوده‌ی مورد مطالعه به شکل کشیدگی طویل با روند شرقی - غربی با طول حدود ۱۰۰ کیلومتر و عرض متوسط ۱۰ کیلومتر در شرق و ۲۵ کیلومتر در منتهی الیه غرب است. گسل درونه و رشته‌کوه کوه سرخ در شمال و کوه‌های بوغو، فغان و دلکن در جنوب این دشت قرار دارند. مساحت کل دشت ۱۸۰۰ کیلومترمربع و مساحت حوضه‌ی آب ریز با ارتفاعات مشرف بر دشت ۱۸۸۰ کیلومترمربع است. پیشینه‌ی ارتفاع در منطقه ۲۵۱۰ متر و کمینه‌ی آن ۸۰۷ متر است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی دشت کاشمر-بردسکن بر روی تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2

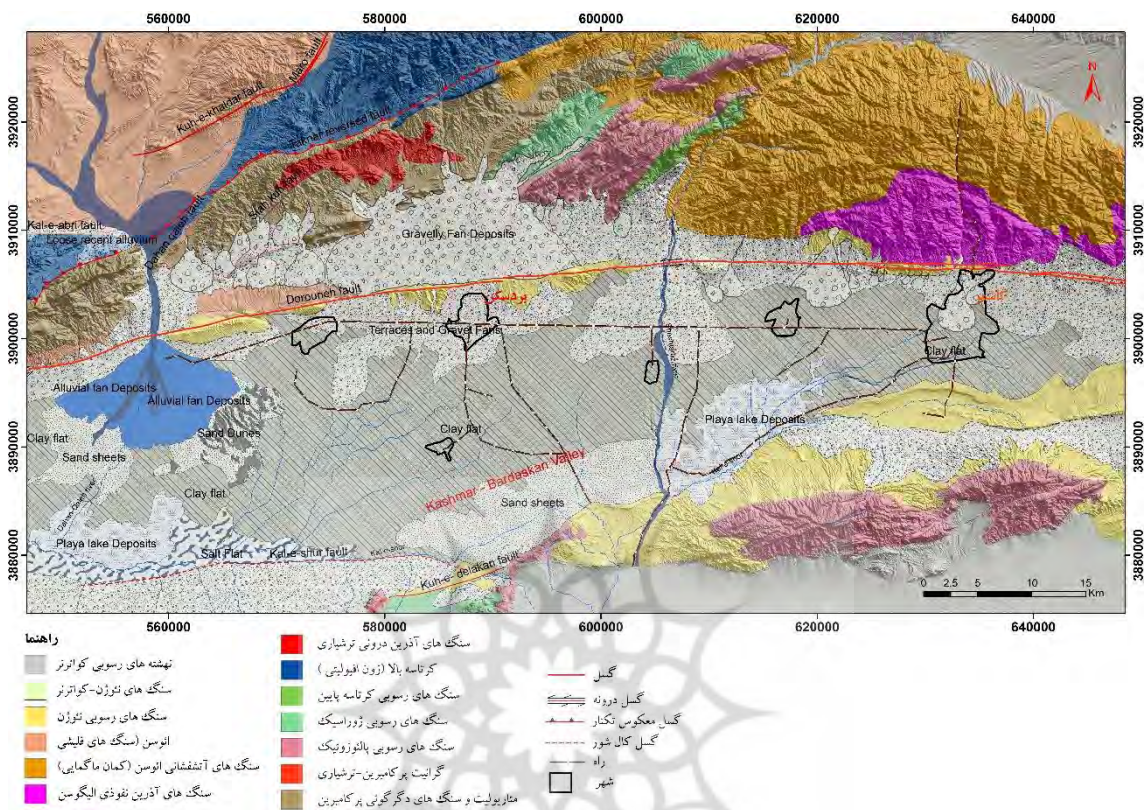
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- زمین‌شناسی

به لحاظ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شمال خرد قاره‌ای ایران مرکزی قرار دارد. رخنمون‌های سنگی ارتفاعات شمالی شامل ۴ واحد عمده شامل: ۱- پنجره‌ی فرسایشی تکنار شامل سنگ‌های ریولیت و ریوداسیت‌های دگرگون شده و توده‌های گرانیتی و گرانیتوئیتی با سن پرکامبرین همراه با توده‌های گرانیتی نفوذی ائوسن - الیگوسن و سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک و مزوزوئیک (Muller and Walter, 1983: 165). ۲- کمپلکس افیولیتی شامل سنگ‌های آذرین مافیک و اولترا مافیک ولکانیک و آذرآواری و آهک‌های پلاژیک با سن کرتاسه فوقانی ۳- نهشته‌های حوضه‌ی فلیشی ائوسن با ضخامت بیش از ۶۰۰۰ متر در شمال غربی محدوده‌ی مورد مطالعه شامل رسوبات فلیشی، سنگ‌های ولکانیک، آذرآواری و اندزیتی ۴- کمان ماگمایی ترسیر شامل کمر بند سنگ‌های ولکانیک - پلوتونیک با عرض ۸۰-۱۵ کیلومتر در شمال شرق گسل درونه و شهر کاشمر است. در کوه‌های فغان، بوغو، دلکن در جنوب توالی ضخیمی از سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک و مزوزوئیک وجود دارد. رسوبات تریاس در منطقه‌ی مورد مطالعه وجود ندارد. فعالیت تکتونیکی گسل درونه در کوتاه‌ترین همراه با تغییرات شدید آب و هوایی باعث فرسایش شدید رخنمون‌های سنگی خصوصاً نهشته‌های فلیشی ارتفاعات شمالی و رسوب‌گذاری گسترده مخروط‌افکنه‌ها در جنوب گسل شده است. تکرار چرخه‌ی فعالیت تکتونیکی گسل درونه و فعالیت‌های شدید آب و هوایی موجب فرسایش مخروط‌افکنه‌ها و رسوب‌گذاری تراس‌های رودخانه‌ای و رسوبات ریزدانه با ضخامت زیاد در فرورفتگی کاشمر-بردسکن شده است (Giensser et al., 1984: 545). این رسوبات ریزدانه از جمله رسوبات تحکیم‌نیافته‌ی دشت هستند که استعداد نشست بر اثر برداشت آب‌های زیرزمینی را دارند.

رسوبات کوتاه‌تر در دشت کاشمر-بردسکن شامل کنگلومرای نیمه‌سخت و سست مخروط‌افکنه‌ها، تراس‌های رودخانه‌ای قدیم و جدید، رسوبات رودخانه‌ای، پهنه‌های رسی حاصل دشت سیلابی، رسوبات نواحی بیابانی شامل فلات‌ها و تپه‌های ماسه‌ای، پهنه‌های گلی-نمکی و رسوبات دریاچه‌ای است (شکل ۲).

گسل بزرگ کویر (درونه) در سرتاسر مرز شمالی فرورفتگی کاشمر-بردسکن با ارتفاعات شمالی قرار دارد. روند گسل درونه در محدوده‌ی مورد مطالعه شرقی-غربی است. گسل درونه در این قسمت، از نوع راستا لغز چپ‌گرد با مؤلفه‌ی شیب‌لغز معکوس است (Farbod et al., 2016: 386; Stocklin and Nabavi, 1973).



شکل ۲: نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده‌ی مطالعاتی (با تغییرات برگرفته از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی ایران)

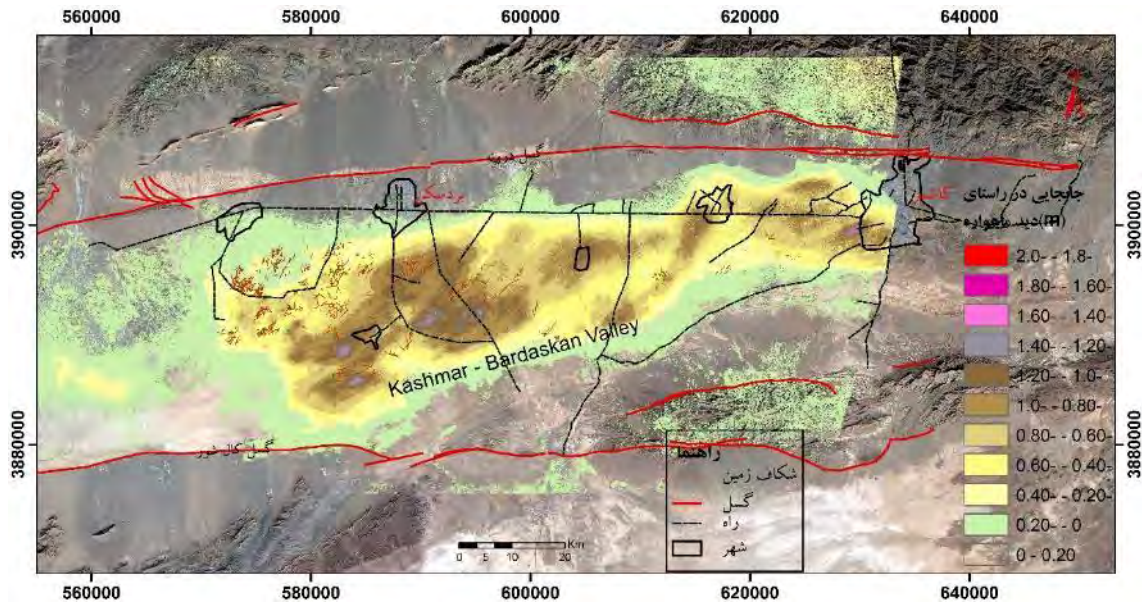
۲-۳- فرونشست زمین

در این مطالعه با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری^۳، اطلاعات فرونشست دشت کاشمر- بردسکن به دست آمده است. بر این اساس تعداد ۴۰ تصویر راداری مربوط به ماهواره‌ی Envisat ASAR در سطح Single Look Complex (SLC) مربوط 435 Descending Track در بازه‌ی زمانی March-2003 تا September-2010 از سازمان فضایی اروپا^۴ اخذ گردید. تصاویر به کمک روش SBAS (Small Baseline Subset) پردازش و محدوده و مقدار فرونشست تجمعی دشت برای سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ در راستای دید ماهواره^۵ تعیین گردید (شکل ۳).

3- Interferometric synthetic aperture radar (InSAR)

4- The European Space Agency (ESA)

5- Radar line-of-sight (LOS)

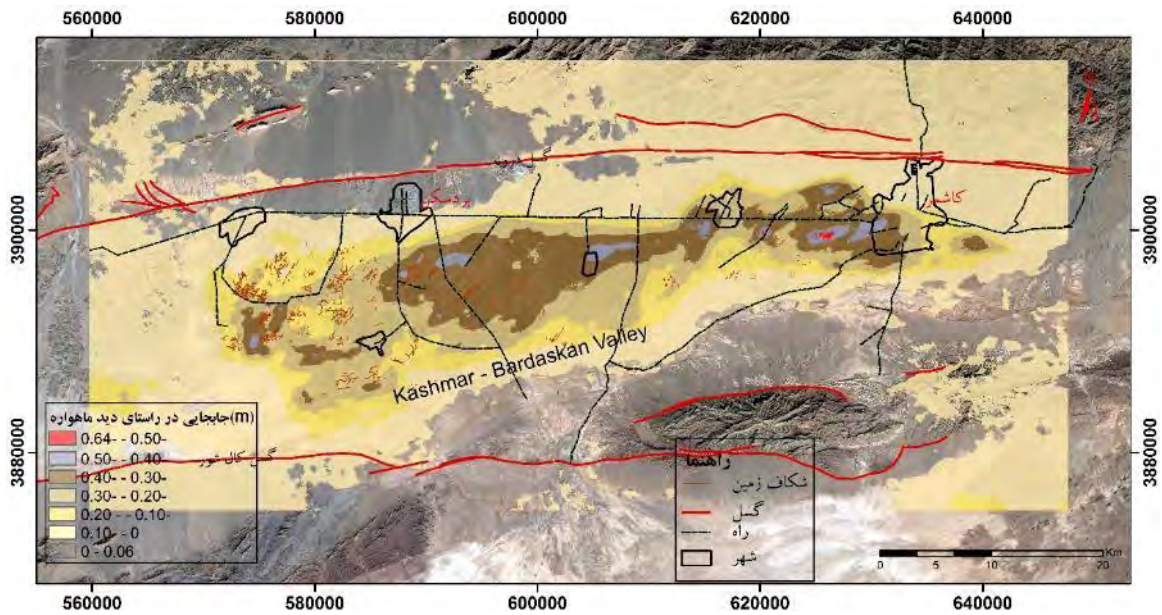


شکل ۳: فرونشست تجمعی در راستای دید ماهواره با استفاده از تصاویر Envisat در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۳ در دشت کاشمر-بردسکن

شکل ۳ فرونشست تجمعی دشت کاشمر-بردسکن با استفاده از تصاویر Envisat را نشان می‌دهد. مقادیر فرونشست با نرم‌افزار Arc map رده‌بندی شده است. در شکل مشاهده می‌شود که الگوی فرونشست در امتداد دشت است. بر مقدار فرونشست از شمال و جنوب به سمت مرکز دشت افزوده می‌شود. ناحیه‌ی غربی دشت خصوصاً جنوب بردسکن گسترده‌ترین مناطق به لحاظ فرونشست می‌باشند. در این نواحی بیش‌ترین میزان فرونشست تجمعی در طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ در راستای دید ماهواره ۱/۸ متر است. بر این اساس حداکثر مقدار نشست سالیانه طی دوره‌ی ۷ ساله، ۲۶ سانتی‌متر در سال بوده است.

از آنجایی‌که با تصاویر ماهواره Envisat کل محدوده‌ی فرونشست برای دشت کاشمر-بردسکن مشخص نمی‌شود، از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 در بازه‌ی زمانی September-2014-september-2017 جهت تعیین محدوده‌ی کامل و روند تغییرات فرونشست دشت استفاده گردید. بر این اساس ۲۶ تصویر رادار پایین گذر^۶ تهیه و پردازش گردیدند. نتایج حاصل در شکل ۴ ارائه شده است.

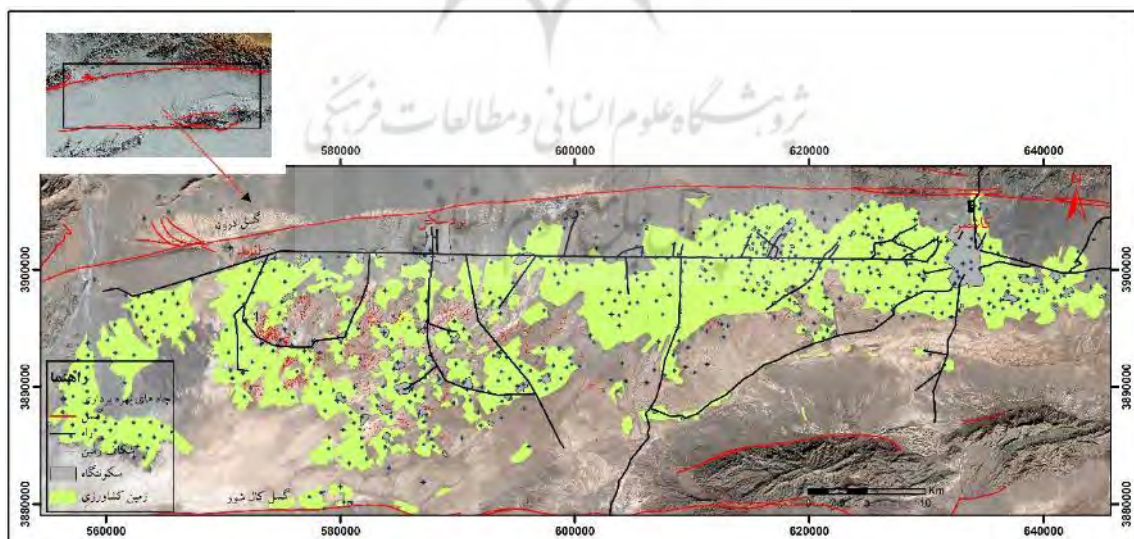
الگوی کامل فرونشست دشت کاشمر-بردسکن با پردازش تصاویر سنتینل-۱ مشخص می‌شود. روند شرقی-غربی آن همچنان برقرار است. در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۴ از میزان فرونشست نواحی غربی دشت به نحو چشم‌گیری کاسته شده و بر مقدار آن در مناطق مرکزی و شرقی افزوده شده است. منطقه‌ی حداکثر فرونشست در جنوب غربی شهر کاشمر به میان روستاهای مغان و کلاته شادی منتقل شده است. در این مکان، حداکثر فرونشست تجمعی در جهت دید ماهواره در ۳ سال ۵۸ سانتی‌متر است که متوسط سالیانه‌ی آن ۲۷ سانتی‌متر است.



شکل ۴: فرونشست جمعی در راستای دید ماهواره با استفاده از تصاویر Sentinel-1 در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۷ در دشت کاشمر-بردسکن

۳-۳- موقعیت و روند شکافها

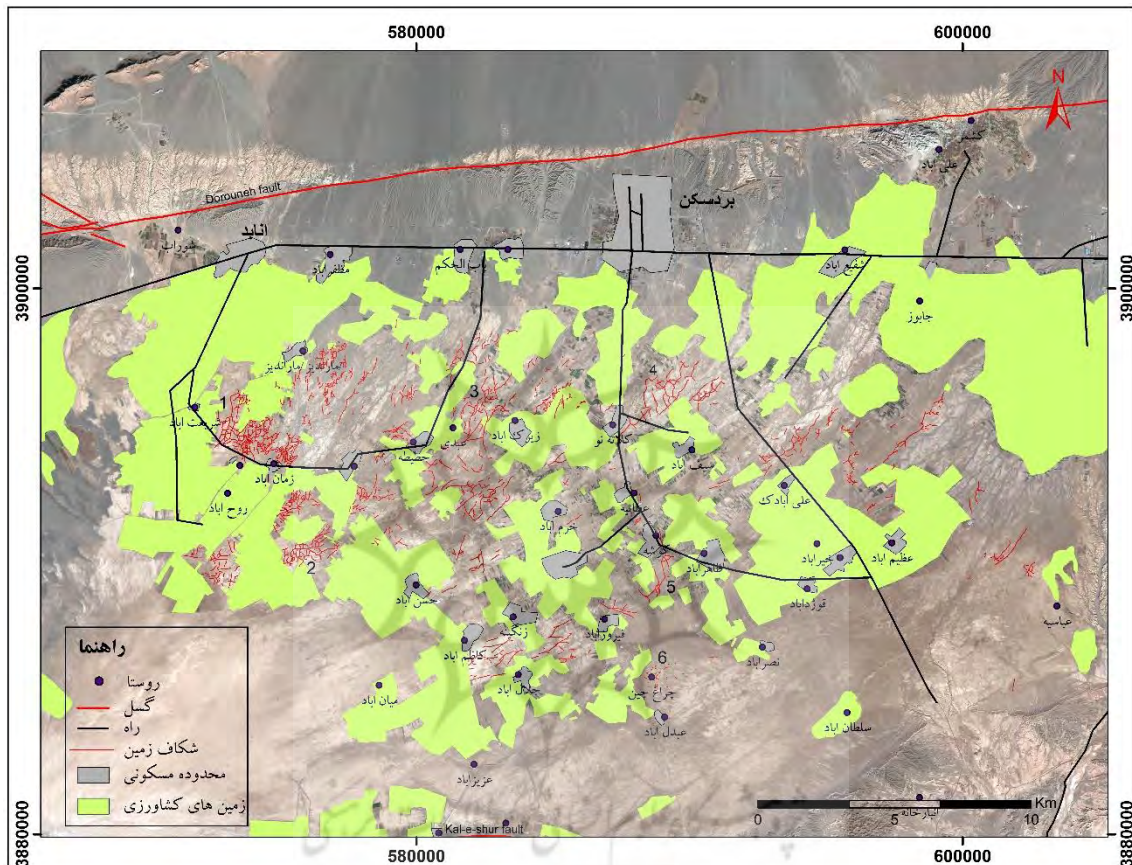
در شکل ۵ توزیع مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و باغات، چاه‌های بهره‌برداری و موقعیت درز و شکافها با استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و تصاویر گوگل ارث و بازدیدهای صحرایی نشان داده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود قسمت اعظم زمین‌های قابل کشت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نیاز روزافزون به آب جهت مصارف شرب، کشاورزی، صنعتی و خدماتی موجب توسعه‌ی چشم‌گیر حفر چاه‌های بهره‌برداری در فاصله‌ی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۶۷ به در سرتاسر دشت شده است. در نتیجه، سطح آب‌های زیرزمینی دشت بر اساس نتایج چاه‌های مشاهده‌ای به نحو محسوسی کاهش یافته و این امر باعث فرونشست زمین و ایجاد درز و شکافها در دشت شده است.



شکل ۵: موقعیت مناطق مسکونی و کشاورزی و توزیع چاه‌های بهره‌برداری با درز و شکافها

۳-۴- هندسه درز و شکاف‌ها

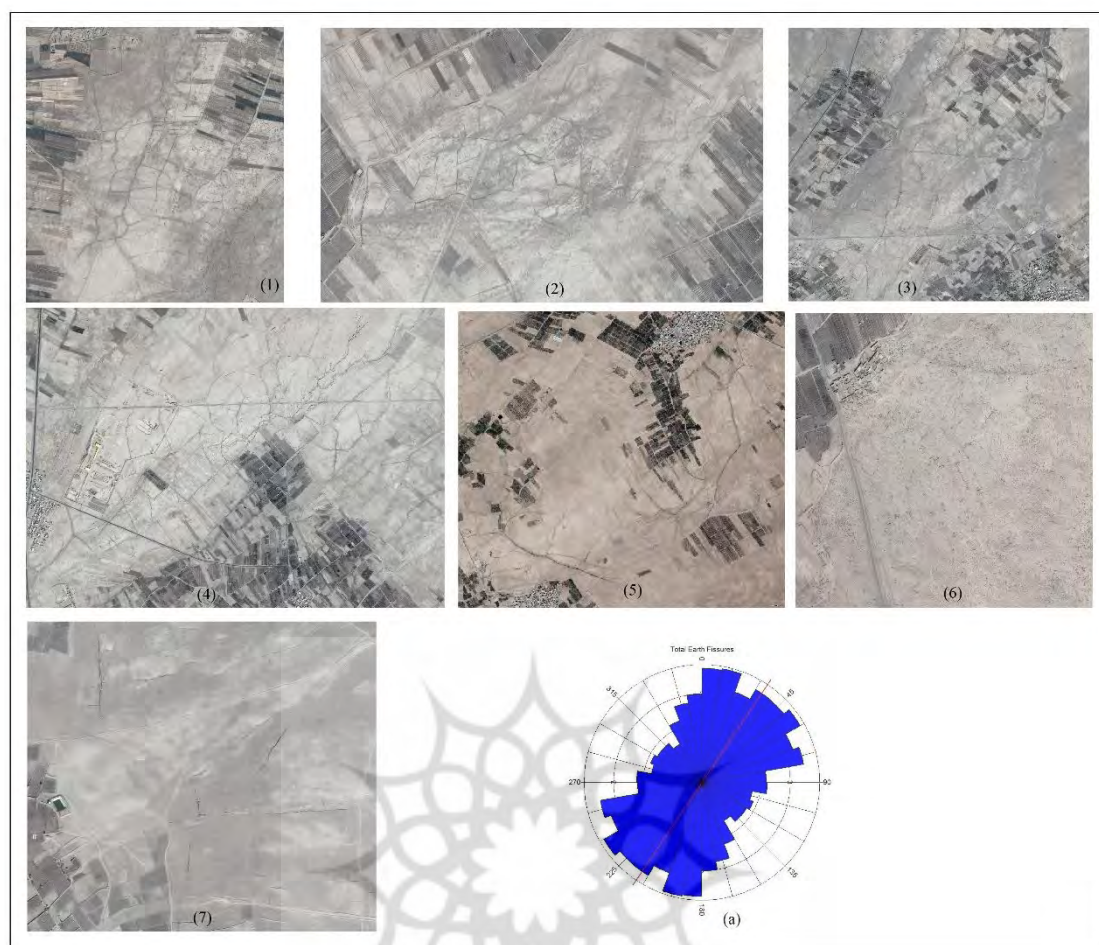
جهت تعیین خصوصیات هندسی درز و شکاف‌ها، قسمت غربی دشت در جنوب شهر بردسکن حوالی روستاهای کلاته نو، زیرک‌آباد، حطیبه، زمان‌آباد، شریعت‌آباد، کوشه تا رحمانیه مورد بازدید صحرایی قرار گرفتند. با استفاده از تصاویر گوگل ارث آرایش تمام درز و شکاف‌های مشاهده‌شده در قسمت غربی دشت در شکل ۶ نشان داده شده است. مناطق ۱ تا ۶ شماره‌گذاری شده در شکل ۶ انتخاب و شکل هندسی و آرایش درز و شکاف‌ها در آن مناطق مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۷).



شکل ۶: آرایش درز و شکاف‌ها در غرب دشت کاشمر-بردسکن

بررسی درز و شکاف‌ها در شکل ۷ حاکی از وجود دو الگوی درز و شکاف (۱) مستقیم تا خمیده (۲) چندضلعی^۸ است. جاجن و هولزر^۹ (۱۹۸۲) معتقدند که درز و شکاف‌های مستقیم تا خمیده در اثر کشیدگی^{۱۰} حاصل از خمش^{۱۱} لایه‌ها در ناحیه با میزان فرونشست متفاوت به وجود می‌آیند. درز و شکاف‌های دارای الگوی چندضلعی احتمالاً به علت کشش^{۱۲} حاصل از استرس موئینه در ناحیه‌ی بالای سطح افت آب تشکیل می‌شوند (Neal et al., 1968: 69).

- 7- Straight to arcuate
- 8- Polygonal Pattern
- 9- Jachen and Holzer
- 10- Stretching
- 11- Bending
- 12- Tensio



شکل ۷: الگوی درز و شکافها در روستاهای؛ (۱) شرق شریعت‌آباد (۲) جنوب زمان‌آباد (۳) شمال غرب زیرک‌آباد (۴) شمال شرق کلاته نو (۵) جنوب کوشه (۶) چراغ چین (۶) کلاته شادی (a) دیاگرام گل‌سرخ‌ی درز و شکافها در دشت کاشمر-بردسکن

نمودار گل‌سرخ‌ی تمام درز و شکاف‌های دشت در شکل ۷a نشان داده شده است. روند غالب درزه‌ها به سمت شمال شرق با بردار میانگین $33/9^{\circ}$ درجه است.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- ارتباط فرورانشست و درز و شکافها

فرآیندهای مختلفی می‌توانند باعث ایجاد درز و شکاف در زمین شوند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حرکات تکتونیکی، استرس افقی تراوشی در اثر جریان آب به سمت پمپ، اختلاف مقدار فرورانشست محلی ذکر نمود. از میان عوامل فوق، اختلاف در میزان فرورانشست در یک محل مهم‌ترین عامل ایجاد گسیختگی سطح زمین است. محققین در مورد مکانیزم تشکیل درز و شکافها توسط این عامل نظریات مختلفی ارائه نموده‌اند.

هولزر و پامپیان^{۱۴} (۱۹۸۱) معتقدند که در پروفیل فرورانشست منطقه در نزدیک شروع ماکزیمم فرورانشست استرس کششی افقی به بیش‌ترین مقدار می‌رسد. در چنین شرایطی درز و ترک‌ها تشکیل می‌شوند.

13- Mean Vector

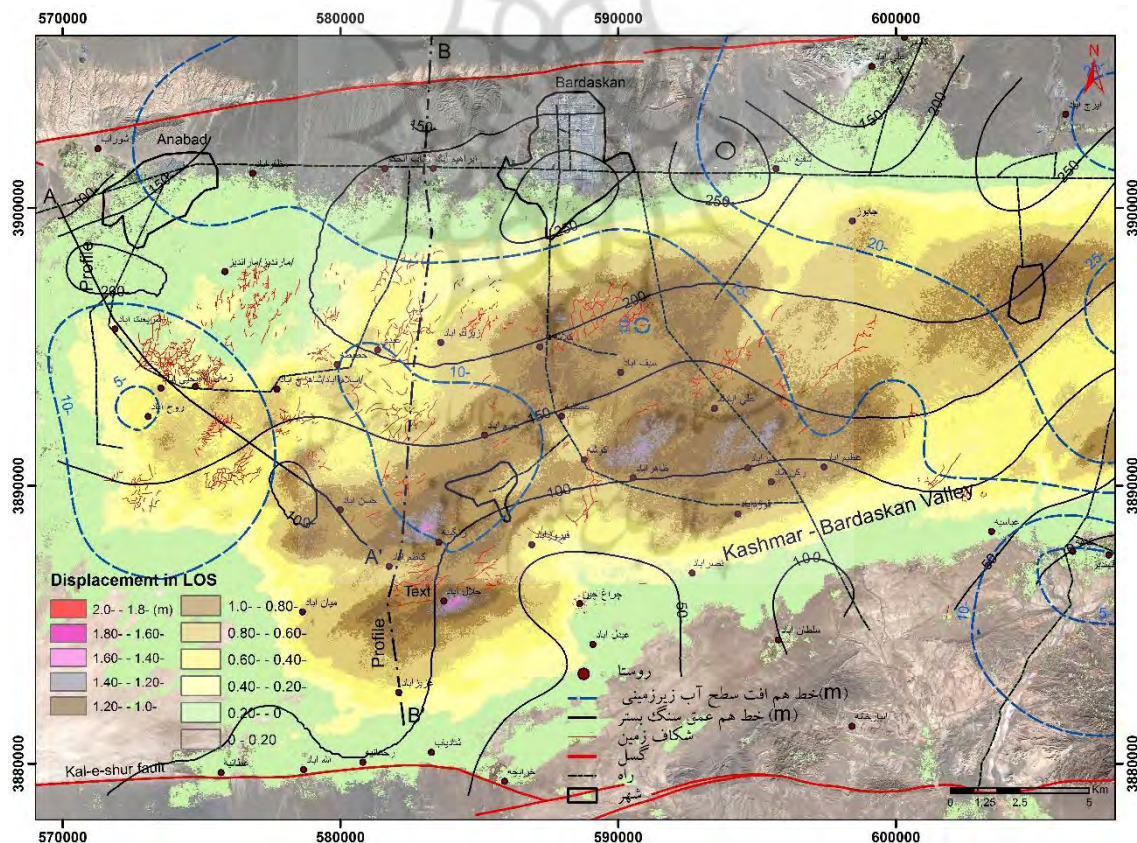
14- Holzer and Pampeyan

از آنجایی که بیشترین تعداد و تراکم درز و شکاف‌ها در مرکز و غرب دشت کاشمر-بردسکن دیده می‌شود، لذا ارتباط فرونشست زمین با شکستگی‌ها در این قسمت بررسی می‌گردد.

دشت کاشمر-بردسکن در سال ۱۹۷۰ میلادی در قالب طرح مطالعات توسعه‌ی اقتصادی خراسان توسط مهندسی مشاور ست‌کوپ و پارتیا مورد مطالعات ژئوفیزیک به روش ژئوالکتریک قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها خطوط هم‌تراز سنگ کف در محدوده‌ی مورد مطالعه رسم گردیده است. ضخامت رسوبات یا عمق سنگ بستر از جنوب دشت به سمت شمال و در جنوب گسل درونه افزایش می‌یابد؛ به طوری که در شرق شهر بردسکن به ۳۰۰ متر می‌رسد. علاوه بر آن سنگ کف دارای توپوگرافی ناهموار است.

مقادیر فرونشست تجمعی در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ به دست آمده از تصاویر Envisat و موقعیت درز و شکاف‌ها نیز در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. تفاوت فرونشست در قسمت‌های مختلف دیده می‌شود. از شمال و جنوب به سمت مرکز دشت بر مقدار فرونشست افزوده می‌شود؛ به طوری که کاسه‌های فرونشست در مرکز و جنوب غربی دیده می‌شوند.

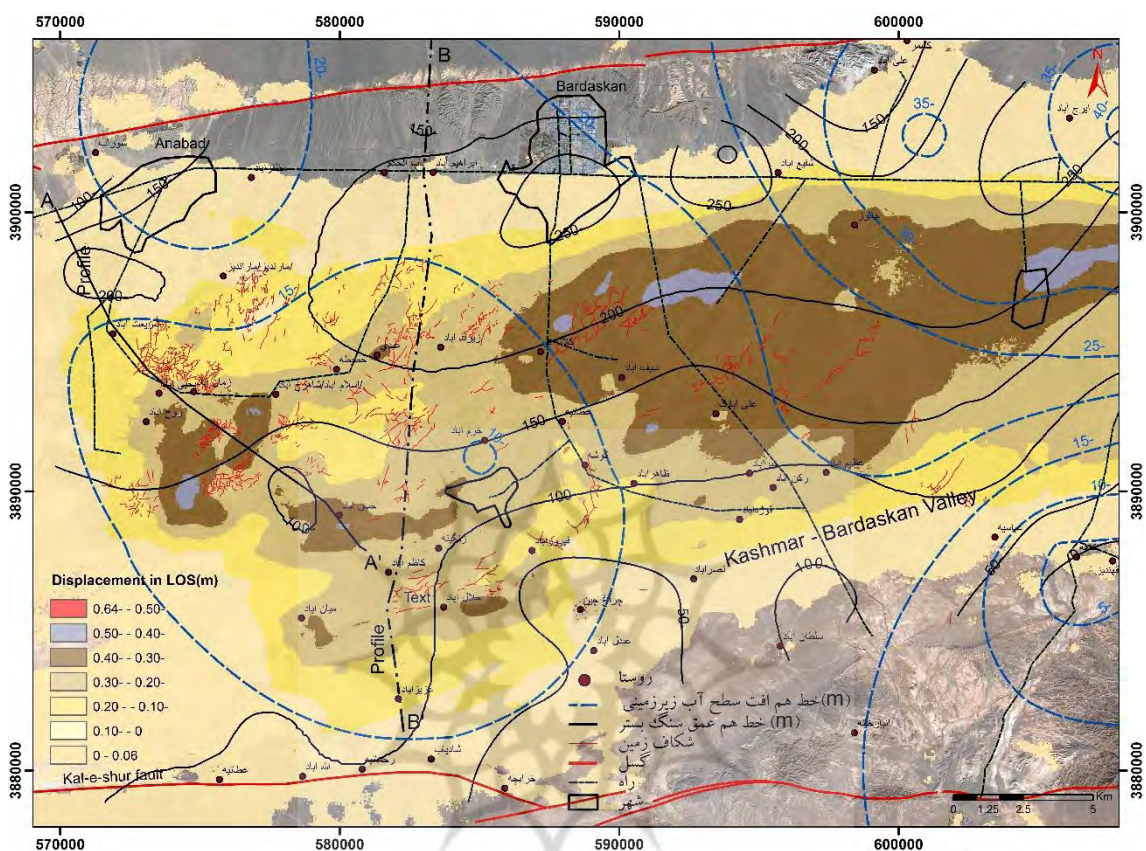
درز و شکاف‌ها در نواحی شمال غربی و غرب که ضخامت رسوبات ریزدانه زیاد است، گرداگرد کاسه‌های با بیشترین مقدار فرونشست تشکیل شده‌اند. علاوه بر آن تجمع درز و شکاف‌ها در اطراف خطوط هم عمق سنگ بستر مشاهده می‌شود. این بدان معنی است که تغییر عمق یا توپوگرافی سنگ بستر در منطقه به نحو آشکاری موقعیت تشکیل درز و شکاف‌های حاصل از فرونشست تفاضلی را کنترل کرده است.



شکل ۸: ارتباط درز و شکاف‌ها با فرونشست و عمق سنگ بستر در مرکز و غرب دشت کاشمر-بردسکن طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳

ارتباط فرونشست با درز و شکاف‌ها در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۴ در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود تغییر شکل یا فرونشست در قسمت‌های غربی دشت به صورت نقاط مجزا از هم درآمده‌اند و شکستگی‌ها در حاشیه‌ی

کاسه‌های فرونشست قرار دارند. باین وجود به نظر می‌رسد چندان ارتباطی با آن‌ها ندارند. این می‌تواند به این معنا باشد که بیش‌تر این شکستگی‌ها قبل ۲۰۱۴ به وجود آمده‌اند و در بازه‌ی زمانی بعد ۲۰۱۴ توسعه یافته‌اند. در قسمت‌های میانی تا شرقی مقدار فرونشست افزایش یافته و نواحی فرونشست یکپارچه شده‌اند. شکستگی‌های حاشیه‌ی جنوبی دشت در قسمت‌های شرقی و مرکزی دشت کاشمر-بردسکن ممکن است در رابطه با این زمان باشند.



شکل ۹: ارتباط درز و شکاف‌ها با فرونشست و عمق سنگ بستر در مرکز و غرب دشت کاشمر-بردسکن طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۷

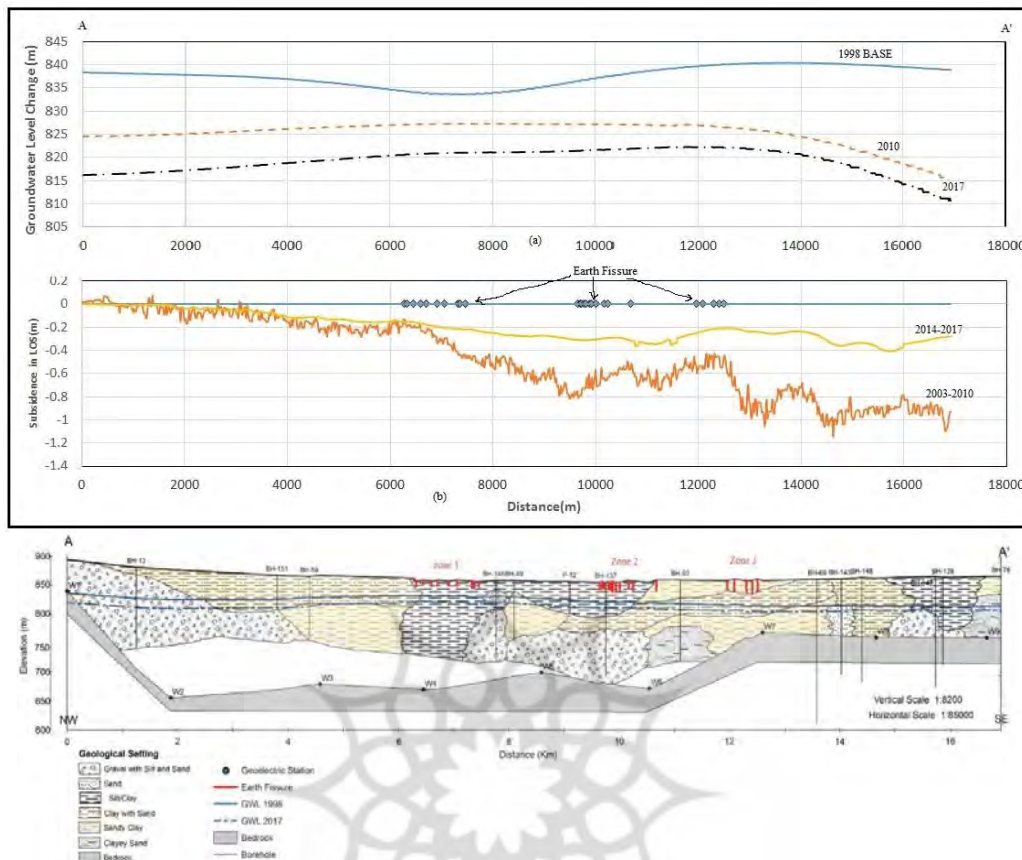
به‌منظور بررسی ارتباط درز و شکاف‌ها با فرونشست حاصل از افت سطح آب زیرزمینی و شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی از جمله لیتولوژی و توپوگرافی سنگ بستر دو پروفیل A-A' و B-B' در قسمت غربی دشت که شامل بیش‌ترین درز و شکاف‌ها می‌باشند، ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. این ۲ پروفیل در راستای پروفیل‌های ژئوالکتریکی می‌باشند. موقعیت این دو پروفیل در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

• پروفیل A-A'

این پروفیل در راستای شمال غرب-جنوب شرق به طول حدود ۱۷ کیلومتر است. نمودار سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ جهت مشاهده و تعیین میزان افت سطح آب زیرزمینی در شکل ۱۰a ارائه شده است. مقادیر فرونشست زمین در طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ و ۲۰۱۷-۲۰۱۴ به همراه محل تشکیل درز و شکاف‌ها در نمودار ۱۰b نشان داده شده است.

از آنجایی‌که پروفیل‌ها در امتداد پروفیل‌های ژئوالکتریکی رسم شده‌اند، عمق سنگ بستر در هر پروفیل از نتایج ژئوفیزیکی استخراج شده است. ستون زمین‌شناسی چاه‌های آب و چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به هر پروفیل بر اساس

لوگ صحرائی آن‌ها تهیه و با انطباق لایه‌های زمین‌شناسی در چاه‌ها، نیمرخ زمین‌شناسی در امتداد هر پروفیل رسم گردید (شکل ۱۰c).



شکل ۱۰: پروفیل A-A' (a) تغییرات سطح آب زیرزمینی (b) تغییرات فرونشست زمین و محل تشکیل درز و شکاف‌ها (c) نیمرخ زمین‌شناسی در راستای پروفیل

با بررسی اطلاعات ارائه شده شکل ۱۰ نتایج زیر حاصل می‌شود:

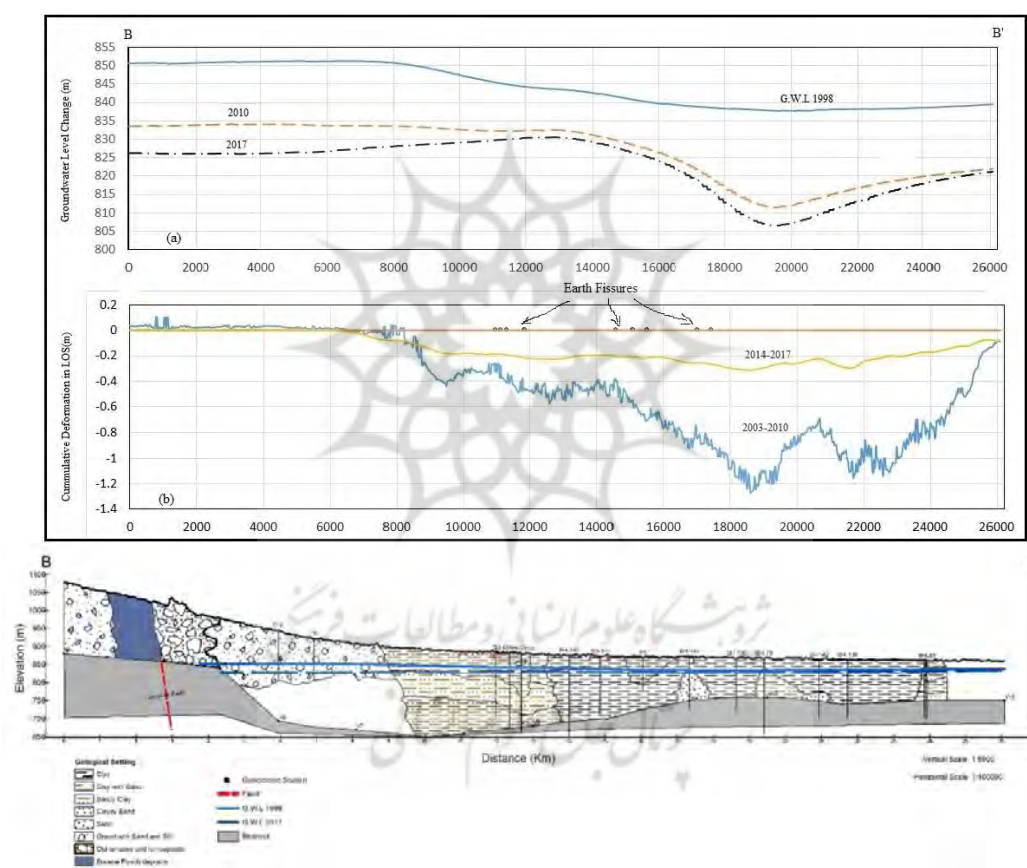
-فرونشست زمین رابطه مستقیم با تغییر تراز یا افت سطح آب زیرزمینی در طی سال‌های ذکر شده دارد.
 -تغییرات جنس رسوبات در امتداد پروفیل بر مقدار فرونشست زمین تأثیر مستقیم دارد. در نواحی شمال غرب، در ابتدای پروفیل (نقطه‌ی A) به علت وجود رسوبات درشت‌دانه مخروط‌افکنه‌ای حداقل میزان فرونشست مشاهده می‌شود. به سمت جنوب با افزایش ضخامت لایه‌های ریزدانه سیلت و رس بر مقدار فرونشست افزوده می‌شود. وجود لزه‌های درشت‌دانه و افزایش درصد ماسه در رسوبات ریزدانه سیلت و رس موجب تغییر میزان فرونشست شده است.
 -در راستای پروفیل A-A'، سه ناحیه‌ی درز و شکاف دار به ترتیب در جنوب شرق روستای شریعت‌آباد (Zone 1)، جنوب شرق روستای زمان‌آباد (Zone 2) و شمال غرب روستای حسن‌آباد (Zone 3) وجود دارد. با توجه به نمودار (b) می‌توان گفت که در نقاطی از نمودار که تفاوت در میزان فرونشست^{۱۵} رخ می‌دهد درز و شکاف‌ها دیده می‌شوند؛ اما از کیلومتر ۱۳ به بعد علی‌رغم بیش‌ترین مقدار فرونشست، درز و شکافی دیده نمی‌شود. علت آن را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که توپوگرافی سنگ بستر مهم‌ترین عامل زمین‌شناسی است که محل ایجاد درز و شکاف‌ها را کنترل می‌نماید (شکل c). زون‌های ۱ و ۲ بر روی شیب سنگ بستر جایی که به تدریج بر ضخامت رسوبات و در نتیجه‌ی

افزایش میزان تراکم رسوبات ریزدانه افزوده می‌شود، تشکیل شده‌اند. در زون ۱ تغییر رخساره‌ی رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه نیز می‌تواند بر شدت ایجاد درزه‌ها افزوده باشد.

درز و شکاف‌های زون ۳ در محل افزایش ناگهانی شیب سنگ بستر تشکیل شده‌اند. افزایش ضخامت رسوبات بعد پرتگاه و افت زیاد سطح آب زیرزمینی موجب افزایش تراکم و در نتیجه، فرونشست زیادتر و گسیختگی کششی در این ناحیه و تشکیل درز و شکاف‌ها در اطراف پرتگاه شده است.

• پروفیل B-B'

این پروفیل به طول ۲۶ کیلومتر با راستای شمال-جنوب در غرب شهر بردسکن قرار دارد (شکل ۱۲). حدود ۹ کیلومتر ابتدایی پروفیل شامل رسوبات درشت‌دانه شمال و جنوب گسل درونه است. برداشت بیش‌ازاندازه‌ی آب طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷، موجب بیش‌ترین افت سطح آب زیرزمینی در قسمت‌های شمالی و جنوبی دشت کاشمر-بردسکن شده است (شکل ۱۱ا).



شکل ۱۱: پروفیل B-B' (a) تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات فرونشست زمین و محل تشکیل درز و شکاف‌ها (b) نیمرخ زمین‌شناسی در راستای پروفیل

مقدار فرونشست در هماهنگی کامل با افت سطح آب زیرزمینی است (شکل 11b). محل درز و شکاف‌ها در رسوبات ریزدانه سیلت و رسی واقع و کاملاً تابع تغییرات فرونشست است. موقعیت آن‌ها با نواحی تغییر شیب مقدار فرونشست زمین در نمودار (11b) مطابقت دارد.

با بررسی شکل (11c) مشاهده می‌شود توپوگرافی سنگ بستر کنترل‌کننده‌ی محل تشکیل درز و شکاف‌هاست. آن‌ها در ۱۸ کیلومتر در محل افزایش شیب سنگ بستر که متناسب با بیش‌ترین مقدار فرونشست می‌باشند، شروع

می‌شوند. با حرکت به سمت شمال علی‌رغم کاهش افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه‌ی آن کاهش مقدار فرونشست بر تعداد درز و شکاف‌ها افزوده می‌شود. علت آن، افزایش شیب سنگ بستر و افزایش ضخامت رسوبات ریزدانه و تراکم بیش‌تر رسوبات است (کیلومتر ۱۱ تا ۱۲). در این فاصله درز و شکاف‌ها در محل‌های تغییر مقدار فرونشست دیده می‌شوند. از کیلومتر ۲۱ به بعد علی‌رغم فرونشست زیاد چون تغییر شیب توپوگرافی خیلی ملایم است، درز و شکافی دیده نمی‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

برداشت بیش‌ازاندازه‌ی از منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر-بردسکن باعث افت سطح آب و فرونشست زمین در این دشت شده است. نشست زمین باعث ایجاد درز و شکاف‌های زیاد در سطح دشت شده است. موقعیت مکانی درز و شکاف‌ها نشان‌دهنده‌ی ارتباط تشکیل آن‌ها با فرونشست زمین است. بیش‌ترین درز و شکاف‌ها در مرکز و غرب دشت مشاهده می‌شود. علت آن می‌تواند به ضخامت و وسعت زیاد رسوبات ریزدانه سیلت و رس^{۱۶} در این محدوده باشد. در پروفیل‌های فرونشست تهیه‌شده مشاهده می‌شود که درز و شکاف‌ها در نواحی افزایش مقدار فرونشست تشکیل شده‌اند. این بدان معنی است که اختلاف در میزان فرونشست مهم‌ترین عامل تشکیل درز و شکاف‌ها در دشت کاشمر-بردسکن است. درز و شکاف‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه دارای دو نوع الگوی مستقیم تا خمیده و الگوی چندضلعی می‌باشند.

تجمع درز و شکاف‌ها در اطراف منحنی‌های هم ضخامت سنگ بستر نشان‌دهنده‌ی این امر است که توپوگرافی سنگ بستر یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده‌ی مکان تشکیل درز و شکاف‌ها در این دشت است. با افزایش شیب سنگ بستر ضخامت رسوبات ریزدانه افزایش می‌یابد، حال چنانچه سطح آب زیرزمینی کاهش یابد، تنش مؤثر افزایش یافته و رسوبات تحکیم‌نیافته متراکم‌تر می‌شوند و در نتیجه بر میزان فرونشست زمین افزوده می‌شود. تفاوت در میزان فرونشست زمین در طرفین پرتگاه سنگ بستر باعث خمش رسوبات و افزایش استرس کششی و تشکیل درز و شکاف‌ها می‌شود.

تجزیه‌ی تحلیل شکل و امتداد درز و شکاف‌ها و ترسیم نمودار گل‌سرخ‌ی آن‌ها نشان می‌دهد که روند غالب درز و شکاف‌ها به سمت شمال شرق با بردار میانگین ۳۳/۹ درجه است.

۶- منابع

- ۱- رکنی، جعفر، حسین‌زاده، رضا، لشکری‌پور غلامرضا، ولایتی سعدالله (۱۳۹۵). بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی (مطالعه‌ی موردی: دشت نیشابور، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک)، (۲۴) ۶، صص ۳۸-۲۱.
 - ۲- زارع مهرجردی، احمدعلی (۱۳۹۰). بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه‌ی رستاق جنوب میبد، مجله‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، (۳) ۱۴۳، صص ۱۶۶-۱۵۵.
 - ۳- شریفی‌کیا، محمد (۱۳۸۹). بررسی پیامدهای ناشی از پدیده‌ی فرونشست در اراضی و دشت‌های مسکونی ایران، مجله‌ی انجمن زمین‌شناسی ایران، جلد ۳ و ۴، صص ۵۸-۴۳.
 - ۴- لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، رستمی بارانی، حمیدرضا، (۱۳۸۷). بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر، مجله‌ی مطالعات زمین‌شناسی، جلد ۱، شماره‌ی ۱، صص ۹۵-۱۱۱.
 - ۵- لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، کاظمی گلپیان، رمضان، دمشناس، مهدی (۱۳۸۶). نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، صفحات ۱۰۹۲-۱۰۸۲.
- 6- Budhu, M. (2008). Mechanics of earth fissures using the Mohr-Coulomb failure criterion. Environmental and Engineering Geoscience, 14(4), pp.281-295.

- 7- Budhu, M. and Adiyaman, I. (2012). Earth fissure formation from groundwater pumping and the influence of a stiff upper cemented layer. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45(2), pp.197-205.
- 8- Carpenter, M. C. (1999). Earth Fissures and Land Subsidence Complicate Development of Desert Water Resources, in *Land Subsidence in the United States: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Circular 1182*, pp. 65–78.
- 9- Carpenter, M.C. (1980). Earth-fissure movements associated with fluctuations in groundwater levels near the Picacho Mountains. *South-Central Arizona*, 84, pp.497-11.
- 10- Doty, G.C. and Rush, F.E. (1985). Inflow to a Crack in Playa Deposits of Yucca Lake, Nevada Test Site, Nye County, Nevada. *US Geological Survey*.
- 11- Farbod, Y., Shabaniyan, E., Bellier, O., Abbassi, M.R., Braucher, R., Benedetti, L., Bourles, D. and Hessami, K. (2016). Spatial variations in late Quaternary slip rates along the Doruneh Fault System (Central Iran). *Tectonics*, 35(2), pp.386-406.
- 12- Giessner, K., Hagedorn, H. and Sarvati, M. (1984). Geomorphological studies in the Kashmar region (NE Iran). *N. Jb. Geol. Palaont. Abh*, 168, pp.545-557.
- 13- Helm, D.C. (1994). Hydraulic forces that play a role in generating fissures at depth. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(3), pp.293-304.
- 14- Helm, D.C., Looney, B.B. and Falta, R.W. (2000). Fissures in Yucca Flat dry lake bed, Nevada test site. *Vadose Zone, Science and Technology Solutions*. Battelle Press, Columbus, OH [CD-ROM.].
- 15- Holzer, T. L. (1976). Ground failure in areas of subsidence due to groundwater decline in the United States. *Land Subsidence Symposium, Int. Assoc. ScL HydroL Publ*, 121, pp423-433.
- 16- Holzer, T.L. and Pampeyan, E.H. (1981). Earth fissures and localized differential subsidence. *Water Resources Research*, 17(1), pp.223-227.
- 17- Jachens, R.C. and Holzer, T.L. (1982). Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 93(10), pp.998-1012.
- 18- Lofgren, B.E. (1978). Hydraulic stresses cause ground movement and fissures, Picacho, Arizona. In *Geological Society of America, Abstracts and Programs Vol. 113*.
- 19- Muller R., Walter R. (1983). *Geology of the Precambrian-Paleozoic Taknar inliers northwest of Kashmar, Khorasan province, NE Iran*, GSI. Rep. No. 51,165-183.
- 20- Neal, J.T., Langer, A.M. and Kerr, P.F. (1968). Giant desiccation polygons of Great Basin playas. *Geological Society of America Bulletin*, 79(1), pp.69-90.
- 21- Sheng, Z., Helm, D.C. and Li, J. (2003). Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(4), pp.351-362.
- 22- Stocklin, J., Nabavi, M.H. (1973). *Tectonic map of Iran*. Geological Survey of Iran.
- 23- Xu, J., Peng, J., An, H., Wang, F., Sun, H., Hu, H. and Yang, B. (2019). Paleochannel-controlled earth fissures in Daming, North China Plain and their implication for underground paleogeomorphology. *Geomorphology*, 327, pp.523-532.
- 24- Xu, J., Peng, J., Deng, Y., He, H., Meng, L. and Wang, F. (2018). Classification, grading criteria and quantitative expression of earth fissures: a case study in Daming Area, North China Plain. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), pp.862-880.
- 25- Ye, S., Franceschini, A., Zhang, Y., Janna, C., Gong, X., Yu, J. and Teatini, P. (2018). A novel approach to model earth fissure caused by extensive aquifer exploitation and its application to the Wuxi case, China. *Water Resources Research*, 54(3), pp.2249-2269.