

تحلیل توزیع مکانی و سازوکار تشکیل شکاف‌های ناشی از فرونشست زمین در دشت نیشابور

جعفر رکنی^{۱*}، سیدرضا حسین زاده^{۲**}، غلامرضا لشکری پور^۳، سعداله ولایتی^۴

دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۰۷ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۲۴

چکیده

در بسیاری از دشت‌های ایران پدیده خطرناک فرونشست رخ داده است که از جمله این مناطق دشت نیشابور در شمال شرق ایران می‌باشد. این دشت بعد از دشت مشهد، از لحاظ برداشت آب زیرزمینی و نیز به لحاظ حاصلخیزی، مهم‌ترین دشت استان خراسان رضوی است. منبع عمده تأمین آب این دشت منابع آب زیرزمینی است. بر اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، نشست زمین رخ داده و ترک‌ها و شکاف‌های کششی در سطح زمین در نقاط مختلف این دشت ایجاد گردیده است. هدف اصلی این پژوهش تحلیل توزیع و سازوکار تشکیل شکاف‌های ناشی از فرونشست زمین می‌باشد. با استفاده از داده‌های راداری سنجنده سنتینل ۱ محدود فرونشستی دشت بررسی و با استفاده از داده‌های سنجنده کوئیک برد و سنجنده سنتینل ۲ که قدرت تفکیک مکانی بالایی دارد شکاف‌ها در زون فرونشستی مشخص گردید. سپس در بازدیدهای میدانی وجود و موقعیت این شکاف‌ها راستی آزمایی و به‌وسیله جی پی اس مختصات کامل شکاف‌ها شامل ۲۵/۵ کیلومتر شکاف ممتد و غیرممتد و به تعداد ۱۸۱ شکاف برداشت و نقشه‌های شکاف دشت تهیه شده است علاوه بر این‌ها شکاف‌های احتمالی و پوشیده نیز در مناطق مختلف دشت بررسی و در نقشه‌ها مشخص گردید. بررسی داده‌های ژئوالکتریک دشت و وضعیت سنگ‌بستر بر اساس مدل‌های مفهومی ایجاد شکاف‌ها تحلیل شده است. با توجه به بررسی‌های بعمل آمده و با در نظر گرفتن وضعیت و شکل هندسی دشت و پهنه فرونشستی این دشت می‌توان گفت: سازوکار مدل مبتنی بر مکانیک سازوکار مدل ناهمگنی مصالح آبخوان و هم‌چنین سازوکار کشیدگی‌های کششی از مهمترین سازوکارها در تشکیل شکاف‌های دشت نیشابور می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، سازوکار تشکیل شکاف، توزیع شکاف، دشت نیشابور

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه فردوسی مشهد ja.rokni@mail.um.ac.ir

۲. دکترای ژئومورفولوژی و دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

۳. دکترای زمین‌شناسی مهندسی و استاد دانشگاه فردوسی مشهد

۴. دکترای زمین‌شناسی و استاد دانشگاه فردوسی مشهد

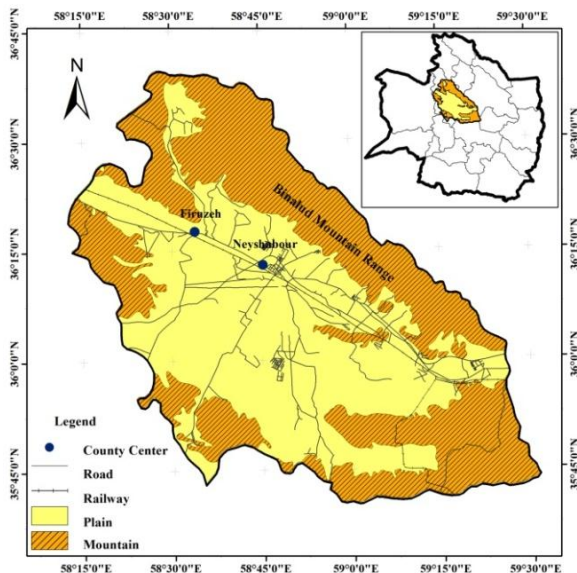
* مسئول مکاتبات

** نویسنده مسئول

۱. مقدمه

برای کل این ایالت تهیه و در دسترس عموم قرار داده شده است. مراحل مختلف و روش تهیه نقشه شکاف توسط شیپمن و دیاز (Shipman and Diaz, 2008)، ارائه گردیده است. بادهو و آدیامان (Budhu and Adiyaman, 2009)، مدل‌های شکاف زمین را در پنج گروه شامل: مدل بیم (Beam model) یا مکانیسم توسعه خمش بر بالای پشته، مدل تنش‌های کششی، مدل کشیدگی‌های کششی، مدل نفوذ افقی در آبخوان و مدل مبتنی بر مکانیک دسته‌بندی کردند در این طبقه‌بندی ارتباط شکاف‌ها با مکانیسم‌های احتمالی در راستای تنش‌ها و کنش‌های ناشی از کاهش آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

دشت نیشابور با طول حدود ۹۰ کیلومتر و عرض متوسط حدود ۳۶ کیلومتر در جهت جنوب شرق - شمال غرب گسترش دارد. در شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز و دشت نیشابور در بین سایر حوضه‌های آبریز استان خراسان رضوی نشان داده شده است. شکاف‌ها که پیامد فرونشست زمین می‌باشند در برخی نقاط دشت نیشابور نیز حادث شده است. در این پژوهش توزیع مکانی شکاف‌ها و سازوکار تشکیل آن‌ها با توجه به اطلاعات موجود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۱. حوضه آبریز دشت نیشابور در شمال شرق ایران

امروزه یکی از معضلات دامنگیر دشت‌های مناطق مختلف جهان که نتیجه بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد، پدیده نشست و ایجاد شکاف‌های کششی در سطح زمین است. این پدیده به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابد. فرونشست زمین را می‌توان پدیده‌ای مورفولوژیک دانست که طیف وسیعی از عوارض مورفولوژیک پیامد این پدیده در دشت‌ها به‌وقوع می‌پیوندد. پدیده فرونشست می‌تواند اثرات مورفولوژیک متعددی در سطح زمین ایجاد نماید اثراتی همچون بی‌نظمی‌های مورفولوژیک، خسارت به تأسیسات انسان ساخت (ساختمان‌ها، بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و معابر، چن و همکاران (Chen et al., 2010)، اختلال در الگوی جریان هیدرولوژیک بارندز و همکاران (Barends et al., 1995) تداخل آب شور و شیرین و تخریب مستحذات زیرسطحی (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱) را به دنبال داشته باشد. مطالعات در زمینه تأثیرات مورفولوژیک مخاطره فرونشست زمین در جهان و ایران کمتر انجام شده و در مطالعات مرتبط نیز به شکل گذرا به این مقوله پرداخته‌اند. شکاف‌ها معمولاً ده‌ها تا صدها متر طول دارند در سال ۲۰۰۲ شکافی به طول ۱۰۰۰ متر در غرب میاژونگ (Miaozhuang) چین ظاهر شده است ژو، جی و همکاران (Xu, J and et al., 2019). شکاف‌های زمین که یک اثر عمده مورفولوژیک حاصل خروج بیش از حد آب‌های زیرزمینی در دشت‌ها می‌باشد توسط تعدادی از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است (Biot 1941, Budhu 2008, Carpenter 1993 and 1999, Holzer 1984, Jachens and Holzer 1982, Lee and Shen 1969, Lofgren 1978, Sheng et al. 2003). اغلب سازوکارهای مطرح برای ایجاد شکاف‌ها به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی مبتنی بر مشاهدات صحرائی و مدل‌های مفهومی پس از بروز شکاف در سطح زمین است آدیامان (Adiyaman, 2012).

در سال‌های اخیر نقشه شکاف‌های زمین به عنوان یک پدیده ژئومورفولوژیک توسط سازمان زمین‌شناسی آریزونا



شکل ۲. شکاف زمین در محدوده بازوبندی شهر فیروزه

(شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۷)

در گستره دشت نیشابور عوارض بسیار متنوع از شکاف‌ها و فرورفتگی‌ها تا گودال‌های مدور و گالی‌ها که تنوعی از اشکال و پدیده‌های مورفولوژیک هستند در سطح زمین مشاهده می‌شوند. در مواردی تمایز آن‌ها از زهکش‌های طبیعی دشت دشوار می‌باشد. شیپمن و دیاز (۲۰۰۸) در پروتکل تهیه شده جهت برنامه تهیه نقشه‌های شکاف در سازمان زمین‌شناسی آریزونا این پدیده‌ها را در چهار گروه تقسیم‌بندی نموده‌اند. با تصاویر اخذ شده از شکاف‌های دشت نیشابور این شکاف‌ها در این گروه‌های چهارگانه به شرح زیر قرار داده شده‌اند:

۱. شکاف‌هایی که باریک هستند و لبه‌های تیز و شیب‌دار دارند و کف این شکاف‌ها دیده نمی‌شوند. (شکل ۳. A, B)
از رخداد این شکاف‌ها مدت زیادی نمی‌گذرد و احتمالاً پس از ایجاد ترک‌های ریز در سطح دشت و یک بارندگی شدید به وجود آمده است. این شکاف‌ها در بیشتر مناطق دشت نیشابور دیده می‌شود لیکن در محدوده روستای بشرو و جیلی بیش‌ترین تراکم این نوع شکاف را داریم.



۲. مواد و روش‌ها

روش کار در این پژوهش به صورت تجربی، پیمایشی، تحلیلی و اسنادی بوده است. به طوری که ابتدا با گردآوری و بررسی مقاله‌ها و گزارش‌های مرتبط، هم‌چنین نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای، گزارشات ژئوفیزیک و اطلاعات آب‌های زیرزمینی وضعیت منطقه پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با انجام بازدیدها و برداشت‌های صحرائی در سرتاسر دشت کلیه عوارض و مشخصات شکاف‌ها با استفاده از GPS گارمین مدل 62S برداشت و نقشه شکاف‌ها در مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰ در ده محدوده مجزای دشت که در آن شکاف مشاهده شده ترسیم گردیده است. در ادامه با استفاده از اطلاعات موجود از ۴۶۴ سونداژ ژئوالکتریکی که در قالب ۳۱ پروفیل در سرتاسر دشت برداشت شده و در مواردی هم پروفیل‌ها از محدوده شکاف‌ها عبور کرده استفاده گردید. از این اطلاعات ژئوفیزیکی در راستای وضعیت سنگ بستر و رسوبات آن ناحیه استفاده شده و مکانیسم احتمالی شکاف‌ها تحلیل گردیده است.

۳. گردآوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

۳-۱. بررسی شکاف‌ها به عنوان عمده‌ترین اشکال

مورفولوژیکی فرونشست زمین

طبق گزارشات موجود اولین شکاف‌ها از سال ۱۳۸۲ در دشت نیشابور و در محدوده روستای بازوبندی (شکل ۲) در جنوب شهر فیروزه به وقوع پیوسته است (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۷). در سال‌های بعد نیز در سایر مناطق دشت شکاف‌ها گسترش فراوانی یافته است. برخی از شکاف‌ها گاهی از دید اهالی پنهان مانده و یا مورد توجه قرار نگرفته است.

۳. گالی‌ها به علت فرسایش دیواره‌های جانبی در امتداد شکاف‌ها و بر اثر رواناب‌های سطحی موجب تسخیر سطوح گردیده و توسعه پیدا کرده‌اند گالی‌هایی که بر اثر ترک‌های جدید شکل گرفته‌اند جوان هستند و دیواره‌هایی تیز و تند دارند در حالی‌که گالی‌هایی که حاصل ترک‌های قدیمی‌تر هستند کناره‌های گرد شده دارند و به وسیله فرسایش به تدریج شیب‌دار شده و موجب پهن شدگی حفره‌ها می‌شوند. (شکل ۵. A, B). گالی‌ها را می‌توان نوع سوم اشکال مورفولوژیکی حادث شده از فرونشست زمین دانست که بیشتر حاصل فرسایش شکاف‌های قدیمی‌تر می‌باشد. گالی‌ها بیشتر در محدوده‌های بازوبندی و کاریزک کنار کال مشاهده شده است.



شکل ۵. A: شکاف‌های نوع سوم در شمال روستای

کاریزک کنار کال B: شکاف‌های نوع سوم در جنوب

روستای فتح‌آباد و حوالی کاریزک (فروردین ۱۳۹۴)

۴. یک شکاف هم‌چنین ممکن است ترکیبی از موارد سه گانه فوق باشد که در این حالت می‌توانیم یک شکاف، گودشدگی دایره‌ای و گالی و شکاف تکرار شود. (شکل ۶. A, B) ترکیب سه گانه از انواع اشکال ذکر شده بیشتر در



شکل ۳. A: شکاف‌های نوع اول در شرق روستای بشرو

B: شکاف‌های نوع اول در شرق روستای جیلی اخذ شده

با پهباد (اردیبهشت ۱۳۹۷)

۲. گودال‌های دایره‌ای شکل که ممکن است شیب آرام داشته و کم‌عمق یا عمیق باشد و به صورت یک سری خطوطی ممتد یا غیرممتد وجود داشته باشد. (شکل ۴. A, B) این نوع شکاف با تنوع و تعداد کمتری در دشت نیشابور مشاهده شده و نمونه‌های آن بیشتر در حوالی روستای روح‌آباد و بخشی از اشکال مورفولوژیکی محدوده کاریزک کنار کال می‌باشد.



شکل ۴. A: شکاف‌های نوع دوم در شمال روستای کاریزک

کنار کال B: شکاف‌های نوع دوم در شمال روستای روح‌آباد

(فروردین ۱۳۹۴)



شکل ۷. A: شکاف‌های نوع چهارم در جنوب روستای

بشرو (فروردین ۹۵) B: شکاف‌های نوع چهارم در جنوب

روستای بشرو (اردیبهشت ۱۳۹۶)

می‌توان به‌وسیله اختلاف در رخنمون‌های سطحی، شکاف‌های زمین را از ترک‌های سطحی زمین متمایز نمود. ترک‌های سطحی معمولاً به صورت چندوجهی هستند در حالی که شکاف‌ها تمایل به حالت خطی دارند. همچنین شکاف‌ها عمیق‌تر از ترک‌های سطحی می‌باشند که محدود به نزدیک سطح زمین هستند. با وجود این تشخیص شکاف‌های زمین از ترک‌های سطحی گاهی در بازدیدهای صحرائی دشوار است و نیازمند تحقیق و بررسی بیشتری می‌باشد.

مناطق دیده می‌شود که استمرار وقوع شکاف در سال‌های متمادی وجود داشته است. محدوده کاریزک کنار کال و در محدوده توزنده جان شکاف‌هایی رخ داده که در حوالی یا در ادامه شکاف‌های قدیمی بوده و شکاف‌های قدیمی بر اثر فرسایش به گالی تغییر شکل داده است.



شکل ۶. A: شکاف‌های نوع چهارم در جنوب روستای

بشرو (اسفند ۱۳۹۴) B: شکاف‌های نوع چهارم در جنوب

روستای بشرو (اردیبهشت ۱۳۹۶)

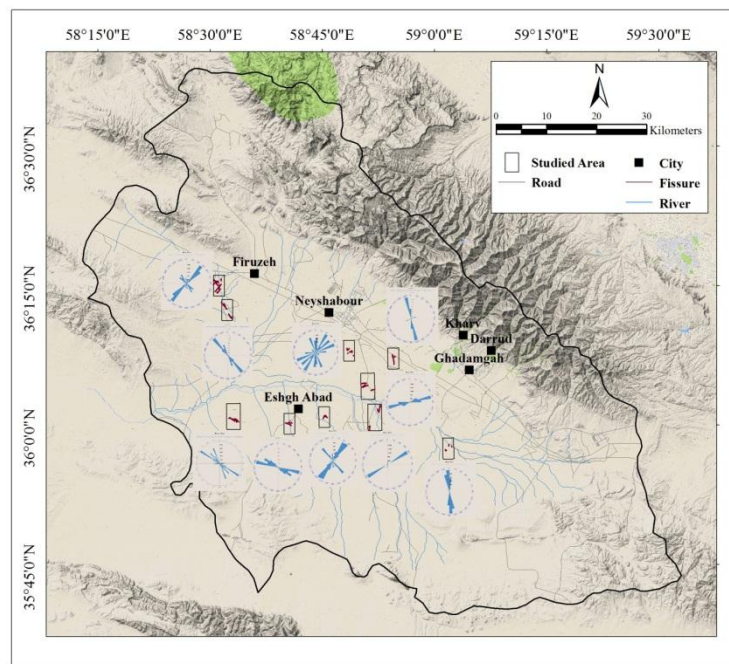
در ادامه می‌توان گفت تقسیم بندی شکاف‌ها فقط محدود به موارد فوق نمی‌شود و می‌توان در تقسیم بندی دیگری شکاف‌های سطح زمین را در بخش‌هایی از دشت بعضاً به صورت ممتد و دنباله‌دار و یا به صورت منقطع و در یک راستای خاص مشاهده کرد. ترک‌های منقطع ابتدایی هستند و احتمال دارد در اعماق زیر سطح شکل ممتدی از این شکاف‌ها وجود داشته باشد که در سطح با ترک‌های باریک و بعضاً پهن یا در مواردی به صورت افق‌های دایره‌ای شکل دیده می‌شوند. (شکل ۷. A, B)

۲-۳. بررسی توزیع مکانی شکاف‌ها با تهیه نقشه‌های شکاف

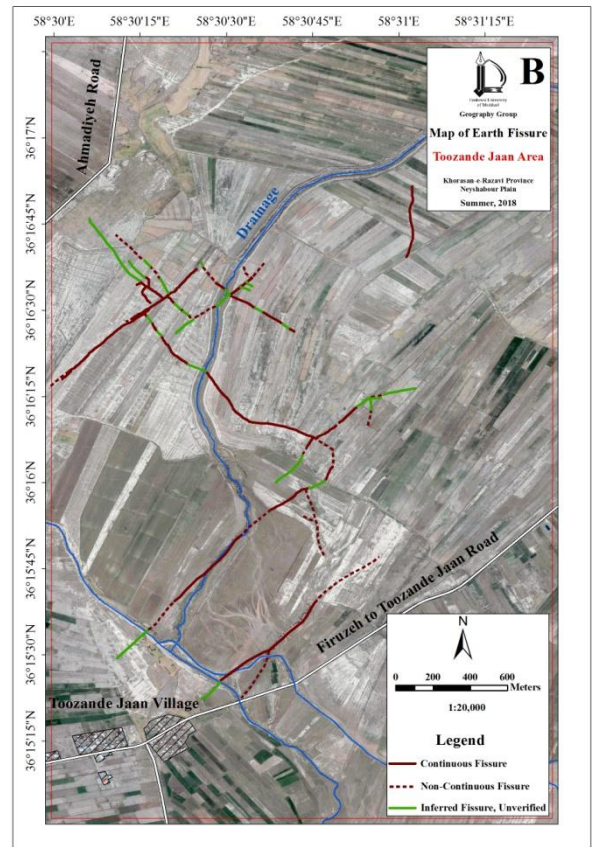
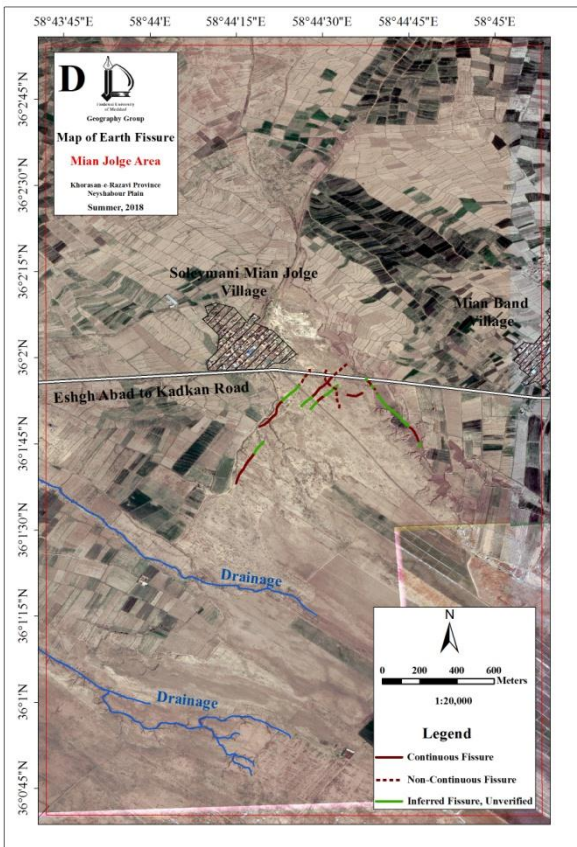
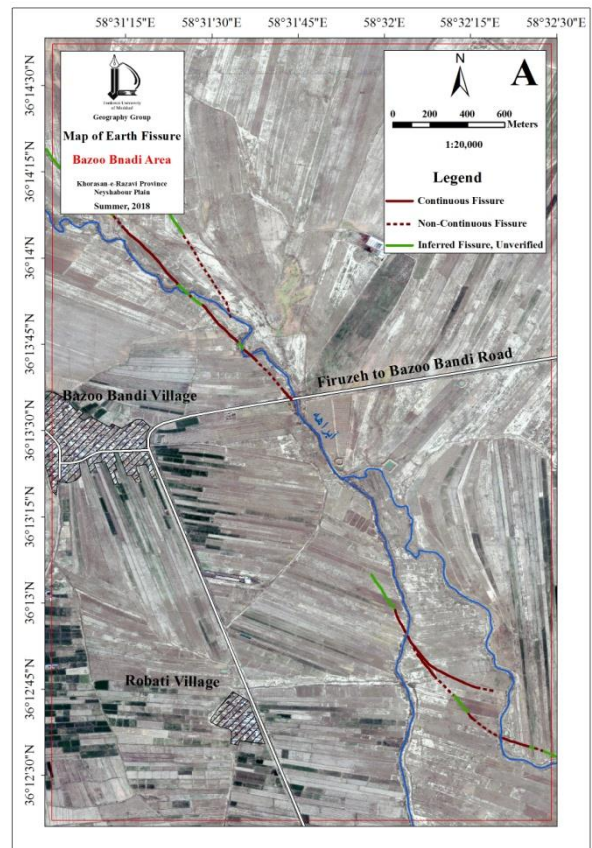
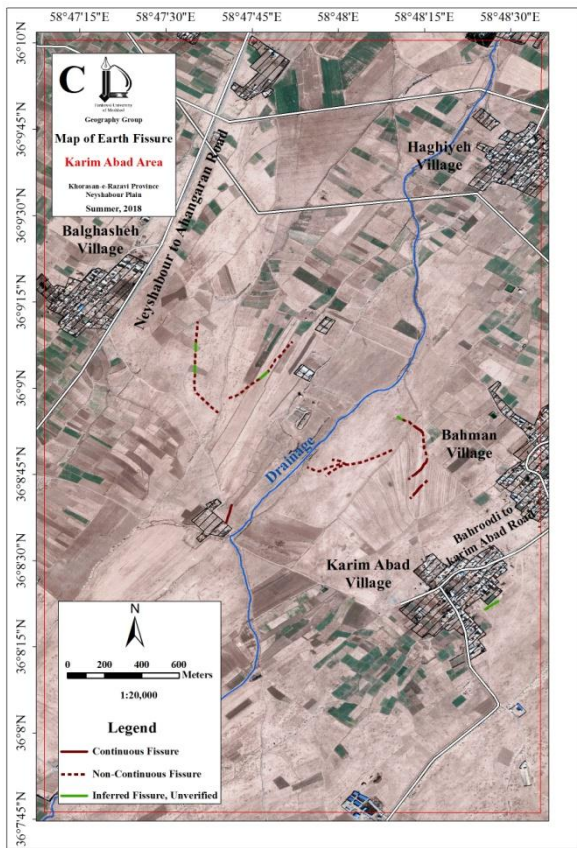
بخش عمده‌ای از مخاطرات محیطی از جمله فرونشست زمین به طور مستقیم یا غیرمستقیم با لندفرم‌ها و عوارض تشکیل‌دهنده سطح زمین که محل و بستر فعالیت‌های انسانی نیز می‌باشد و همچنین با فرایندهای ژئومورفولوژیکی در ارتباط هستند. نقشه‌های شکاف‌های زمین که در این پژوهش تهیه شده را شاید بتوان از موارد محدود انجام شده در زمینه توزیع مکانی شکاف‌ها در دشت‌های در حال فرونشینی دانست که در ایران انجام گرفته است.

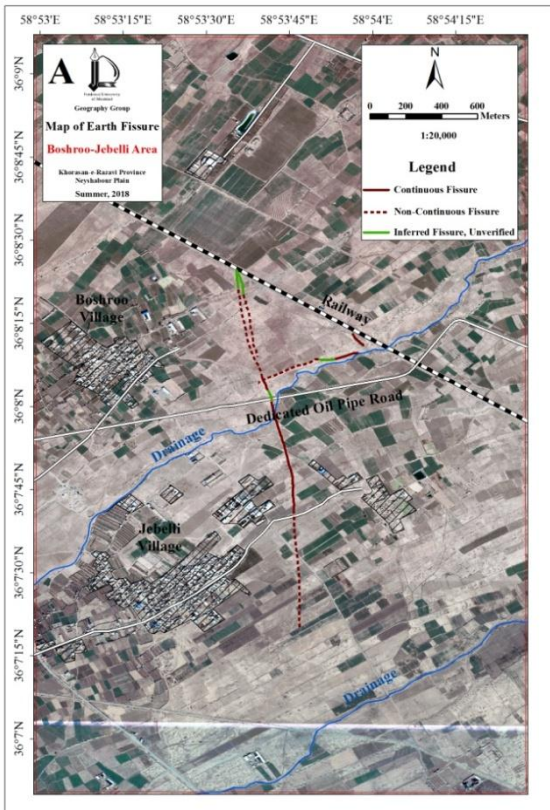
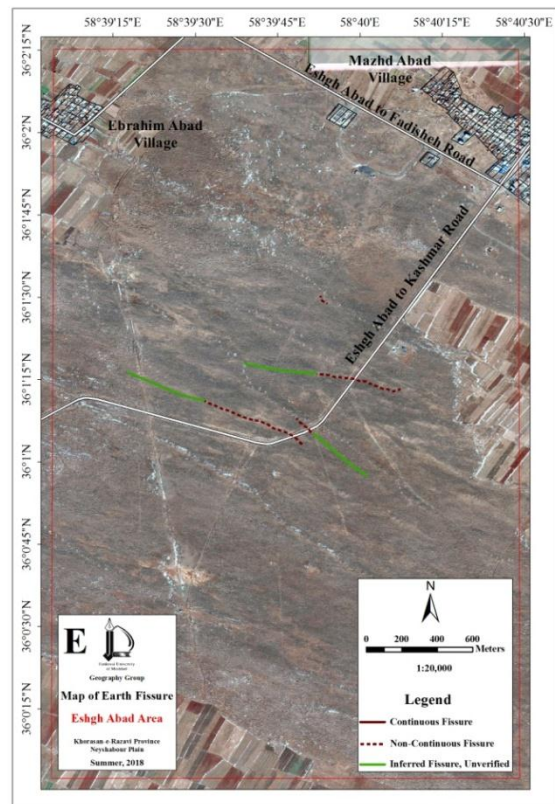
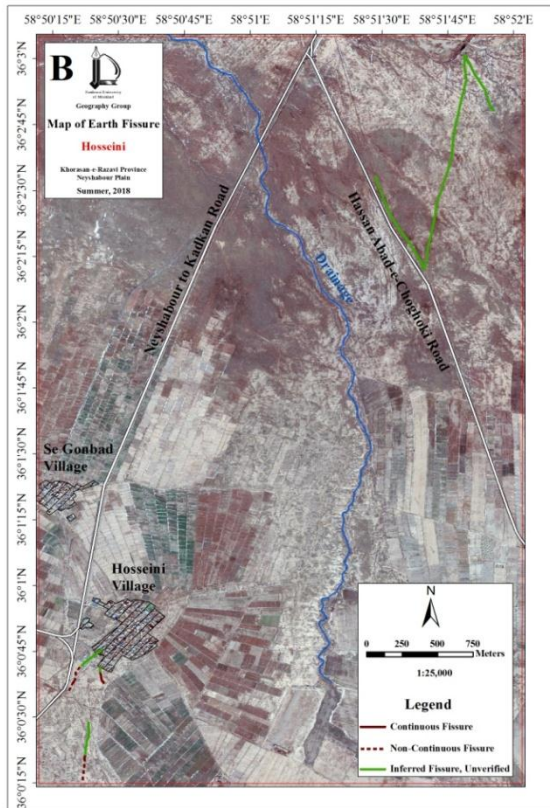
برای تهیه نقشه‌های شکاف زمین در دشت نیشابور و با توجه به گستردگی این دشت بررسی داده‌های ماهواره‌ای هم‌چنین پیمایش صحرایی در سرتاسر دشت نیشابور انجام شد و شکاف‌های موجود یا احتمالی در مناطق ده‌گانه دشت شناسایی و جزئیات این شکاف‌ها طی چندین عملیات

صحرایی برداشت گردید. این برداشت‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی ثبت شده و هم‌چنین در راستای اشراف کامل به اطلاعات پیرامون این شکاف‌ها ضمن اخذ داده‌های سنجنده کوئیک‌برد هم‌چنین داده‌های ماهواره سنتینل ۲ که دارای کیفیت مطلوبی می‌باشد، بررسی بیشتری صورت گرفت. سپس نقشه‌ای از کل شکاف‌های دشت با مقیاس $1/250000$ (شکل ۸) تهیه گردیده است. هم‌چنین در راستای درج جزئیات بیشتری از شکاف‌ها نقشه‌های این محدوده‌ها با مقیاس $1/20000$ و $1/25000$ با پس‌زمینه داده‌های سنجنده کوئیک‌برد ترسیم گردیده است که در (شکل ۹) و (شکل ۱۰) ارائه داده شده است. علاوه بر این رزدیگرام کل شکاف‌های دشت (شکل ۱۱. A) و رزدیگرام محدوده تونزنده جان که یکی از محدوده‌های $1/20000$ می‌باشد تهیه شده است. (شکل ۱۱. B)

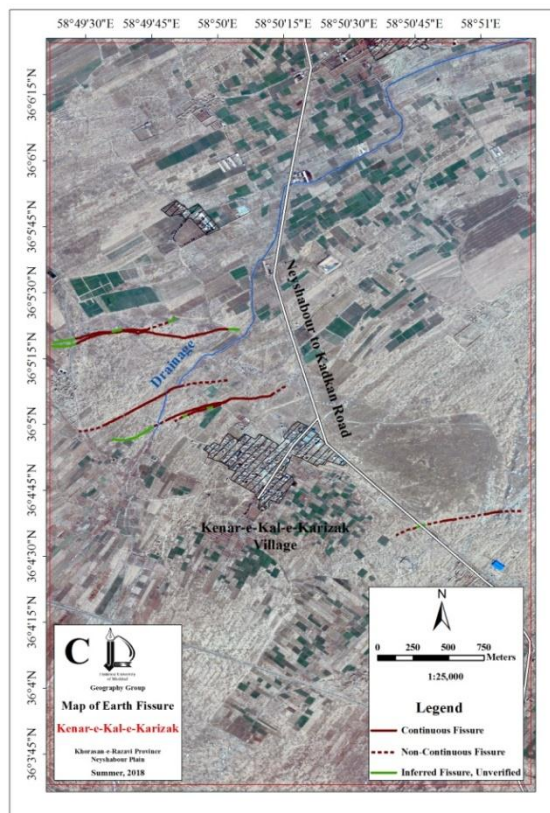
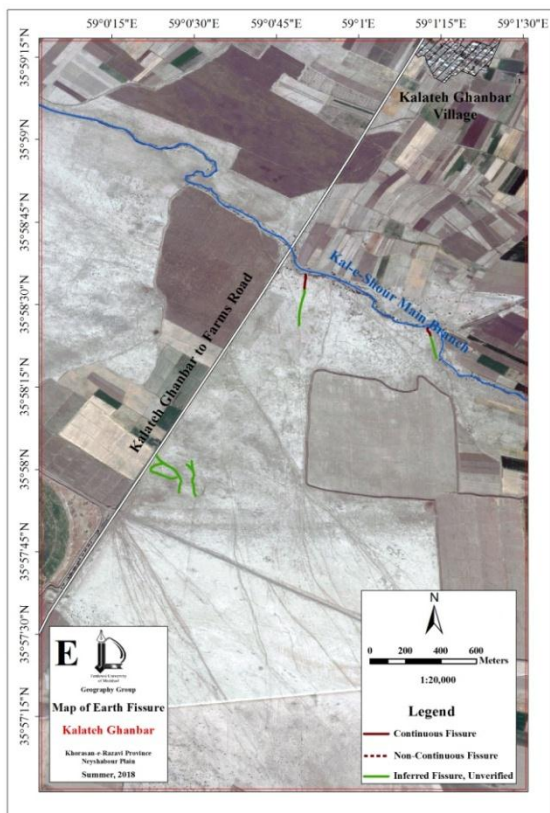


شکل ۸. تصویر کلی از محدوده‌های شکاف و رزدیگرام مرتبط با هر نقشه

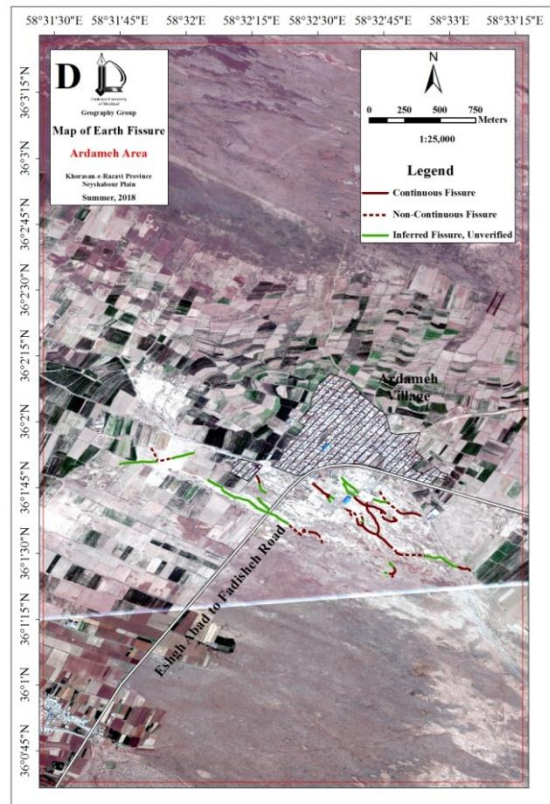
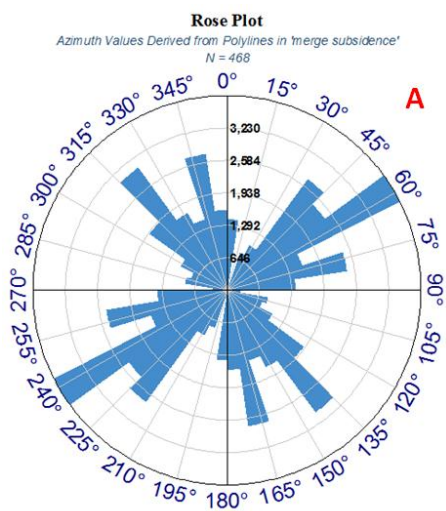




شکل ۹. نقشه‌های شکاف A: محدوده بازوبندی، B: محدوده تونزنده‌جان، C: محدوده کریم‌آباد، D: محدوده سلیمانی میان‌جلگه، E: محدوده عشق‌آباد



شکل ۱۰. نقشه‌های شکاف A: محدوده بشرو-جبلی، B: محدوده حسینی، C: محدوده کاریزک کنار کال، D: محدوده اردمه، E: محدوده کلاته قنبر

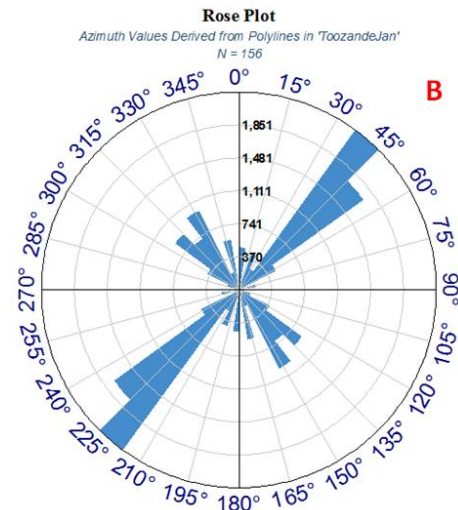


فعالیت‌های کشاورزی و عمرانی آبی این محدوده‌ها نیز مفید باشد.

تهیه نقشه‌های شکاف در محدوده‌های ده‌گانه دشت نیشابور پس از شناسایی کلیه شکاف‌های دشت که حاصل یک کار مطالعاتی و میدانی وسیع بوده انجام گرفته است. اطلاعات برداشت شده از شکاف‌های دشت در جدول ۱ آمده است. نقشه‌ها حاصل مراحل مختلف کار بوده که در نهایت در محیط GIS یک پایگاه داده ایجاد شده تا هر زمان دیگری گزارشی از ایجاد شکاف در این دشت اعلام گردید بتوان نقشه‌ها را به روز کرد و اطلاعات شکاف در دشت را تکمیل و به روزرسانی نمود. با وجودی که تلاش مؤثری برای شناسایی تمام شکاف‌های زمین در محدوده مورد مطالعه این امکان نیز وجود دارد که بعضی از شکاف‌ها به وسیله ساخت و ساز یا فعالیت کشاورزی پوشیده شده و گزارش هم نشده باشد. یا این‌که شکاف اولیه ممکن است در زمان بررسی‌های ما فاقد نمود سطحی بوده باشد. هم‌چنین تسطیح زمین‌های کشاورزی و شخم‌زنی در آن‌ها به وسیله کشاورزان در زمان کشت ممکن است بخشی از شکاف‌های سطحی تازه یا قدیمی را از بین برده و اثرات آن را محو نموده باشد. اگرچه مناطق خالی از شکاف نیز در این نقشه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و شواهد سطحی از شکاف دیده نشده است، لیکن بخش خالی از شکاف در روی این نقشه‌ها تضمینی برای عدم وجود شکاف زمین نمی‌باشد. با این حال تاریخ تهیه نقشه حضور و یا عدم حضور شکاف را مشخص می‌کند و ممکن است نیاز به نقشه‌برداری مجدد یا تحلیل‌های مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی جدید باشد.

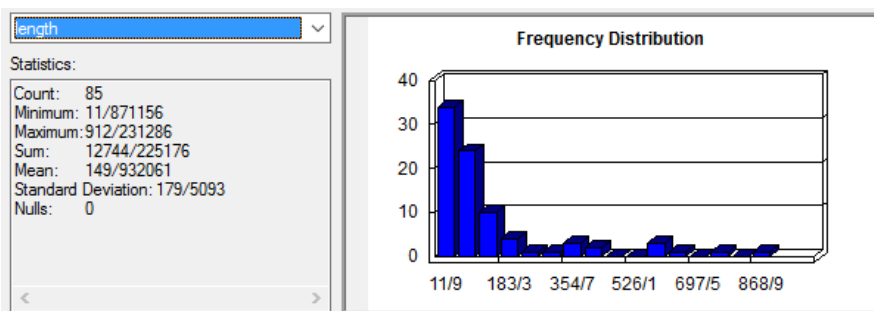
جدول ۱. انواع و تعداد شکاف‌های شناسایی شده در دشت نیشابور

Abbreviation on map	The total length of the fissures (Km)	Average length of fissures (m)	The longest fissure (m)	Number	Types of fissure
Con	12.74	149	912	85	Continuous fissures
Uncon	12.76	132	656	96	Non-Continuous fissures
Coverd	12.86	127	1673	101	Covered fissures or eventual
	38370 m	---	---	282	Total

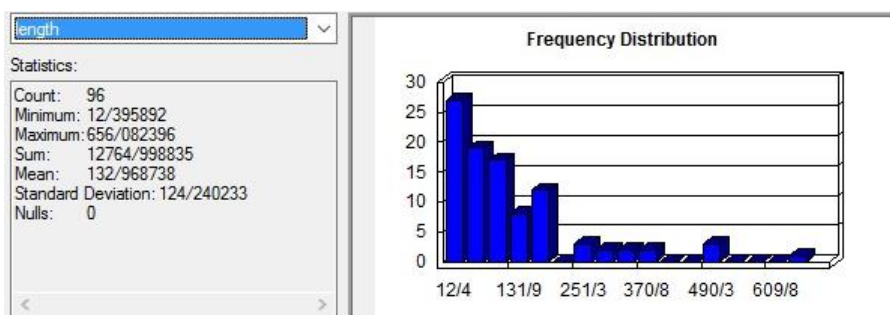


شکل ۱۱. A: رزدیگرام کل شکاف‌های محدوده‌های ده‌گانه B: رز دیگرام شکاف‌های محدوده توزنده جان

به طوری که در شکل (A .۱۱) ملاحظه می‌گردد، شکاف‌ها در کل پهنه دشت روند یکسانی ندارد و می‌توان پراکندگی روند شکاف‌ها را متأثر از کاسه فرونشستی دشت نیشابور، شکل نامتقارن این پهنه و هم‌چنین تغییرات گسترده در ضخامت آبرفت و وضعیت توپوگرافی سنگ‌بستر دانست. اما در محدوده توزنده‌جان (شکل ۱۱. B) روند تقریباً یکسانی از شکاف‌ها نمایش داده شده است که احتمالاً از روند یک گسل در پی سنگ به طول چندین کیلومتر تبعیت می‌کند (لشگری‌پور، ۱۳۸۷). این اشکال نشان می‌دهد که مکانیسم تشکیل شکاف‌ها احتمالاً در هر محدوده متفاوت می‌باشد. به‌علاوه با رسم رزدیگرام شکاف‌ها در هر محدوده روند کلی شکاف‌های آن محدوده نمایش داده شده است و این روند احتمال بروز شکاف‌های آبی در آن محدوده را مشخص می‌کند. این می‌تواند در صورت مطالعه برای برنامه‌ریزی

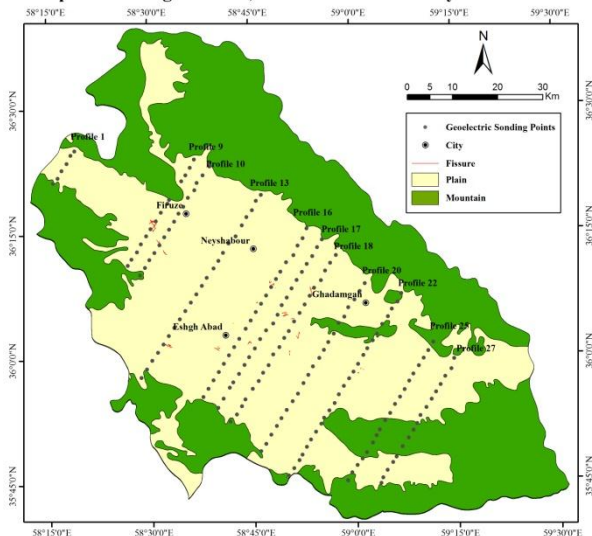


شکل ۱۲. نمودار تعداد تجمعی طول شکاف‌های ممتد در دشت نیشابور



شکل ۱۳. نمودار تجمعی طول شکاف‌های منقطع در دشت نیشابور

Map of Sounding Location, Geoelectric Point of Neyshabour Plain



شکل ۱۴. نقشه موقعیت شکاف‌های دشت نیشابور بر روی

پروفیل‌ها و سونداژهای ژئوالکتریک

جدول ۲. تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی برخی از

لایه‌ها در دشت نیشابور (شرکت آب منطقه‌ای خراسان

رضوی، ۱۳۹۴)

Row	Layers of the Earth	The amount of special resistance (ohms)
1	Sediments & Surface deposits with different granulation	4-550
2	Sediments & Alluvial terraces	40-400

۳-۳. بررسی ساز و کار ایجاد شکاف در دشت نیشابور

با توجه به مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده به روش ژئوالکتریک در سطح دشت نیشابور که با هدف بررسی‌های کمی و کیفی رسوبات و لایه‌های تشکیل دهنده زمین انجام شده است و از این اطلاعات می‌توان به منظور تعیین حدود تغییرات ویژه الکتریکی حقیقی لایه‌ها، تعیین گسل‌ها و شکستگی‌ها، تعیین ضخامت رسوبات آبرفتی، واریزه‌ای و بخش هوازده سنگ کف در حد امکانات و توانایی‌های روش ژئوالکتریک استفاده نمود همچنین می‌توان از اطلاعات موجود به اضافه بررسی‌های میدانی و تحلیل‌های فنی در راستای بررسی سنگ بستر در محدوده‌های دارای شکاف نیز استفاده و با انطباق این داده‌ها با مدل‌های مفهومی سازوکار ایجاد شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین که در منابع مختلف آمده است سازوکار احتمالی ایجاد شکاف هر محدوده را بیان داشت. لذا با تلفیق لایه شکاف‌های دشت و لایه پروفیل‌های برداشت اطلاعات ژئوالکتریک، محدوده‌های شکاف داری که پروفیل‌های برداشت‌های ژئوالکتریکی از آن‌ها عبور کرده مشخص و در نقشه (شکل ۱۴) نمایش داده شده است.

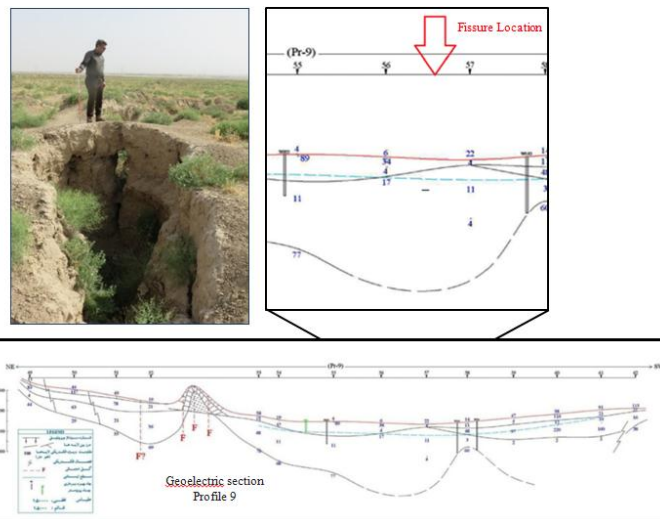
رخنمون یافته و اطلاعات زمین شناسی و چینه شناسی محدوده استفاده گردیده و با در نظر داشتن شرایط هیدروژئولوژیکی این منطقه اطلاعات در جدول ۲ آمده است.

مقطع پروفیل شماره ۹ در شکل ۱۵ به همراه تصویری از یکی از شکاف های این محدوده رسم گردیده است لایه های مشخص شده در طول این مقطع شامل یک قشر سطحی از رسوبات با مقاومت ویژه الکتریکی بین ۱۱ تا ۱۱۵ اهم متر تشکیل یافته که با توجه به جدول (۲) که بر اساس مجاورت برخی از سونداژها با چاه های بهره برداری و پیزومتری و سایر موارد برای دشت نیشابور به دست آمده نشان از وجود مواد دانه ریز تا درشت دانه می باشد. ضخامت قشر سطحی حداکثر ۳ متر برآورد شده است. با توجه به محاسبات انجام شده از روی داده های تراز آب در سال آبی ۷۵-۷۶ در محل شکاف تراز آب ۱۱۱۱ متر که در سال ۹۴-۹۵ تراز آب در این ناحیه به ۱۰۸۸ متر رسیده است.

Medium to coarse-grained

3	Fine grain, terraces & alluvial deposits	5-30
4	Sediments marl and PLQC	5-60
5	Marl and Eocene Gypseferous marl	2-20
6	Andezit with volcanic debris	30-250
7	Sediments sandstone and light green Marl	40-120
8	Sequence of filiet, Slit and crystalline Limestone of Permian	80-300
9	Crystallized dolomite of the Soltanieh formation	200-600

(شکل ۱۴) نقشه موقعیت پروفیل های برداشت های ژئوالکتریکی دشت و موقعیت شکاف های دشت را نشان می دهد به طوری که در این شکل دیده می شود پروفیل های شماره ۹ و ۱۰ و ۱۳ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ از محدوده های دارای شکاف عبور می کند لذا به بررسی سنگ بستر این محدوده ها با مقطع عرضی هر پروفیل می پردازیم. در ارزیابی تعیین حدود تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی لایه های تشکیل دهنده زمین ضمن بررسی کلیه سونداژهای برداشت شده از اطلاعات چاه های بهره برداری و پیزومتری هم چنین سنگ های



شکل ۱۵. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۹ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) همراه با

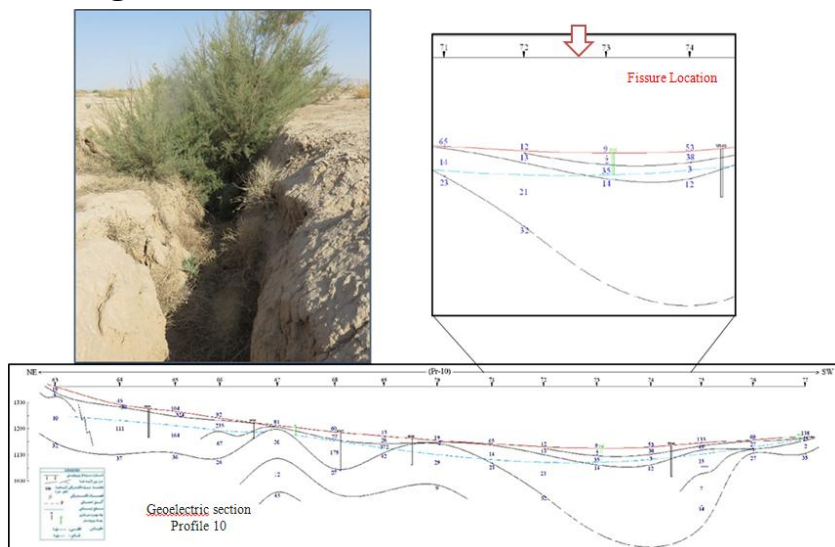
موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

تراکمی که بر روی سطوح عمودی ایجاد می شود شکل می گیرد. جنس سنگ بستر در این ناحیه با توجه به مقاومت ویژه الکتریکی ۳۸ تا ۷۷ اهم متری بوده و بیانگر سنگ های آندزیتی و کنگلومرا و ماسه سنگ ائوسن می باشد. این

شکاف ها در این پروفیل بین سونداژهای شماره ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ می باشد. در محل سونداژ شماره ۵۸ سنگ کف دارای بالآمدگی بوده و این می تواند احتمال مکانیسم شکاف با مدل مبتنی بر مکانیک را تقویت کند براساس این مدل در مراحل ابتدایی، شکاف در اثر ترکیب تنش های برشی ساده، خمشی و

تاق‌دیس مجاور کوهپایه واقع شده است.

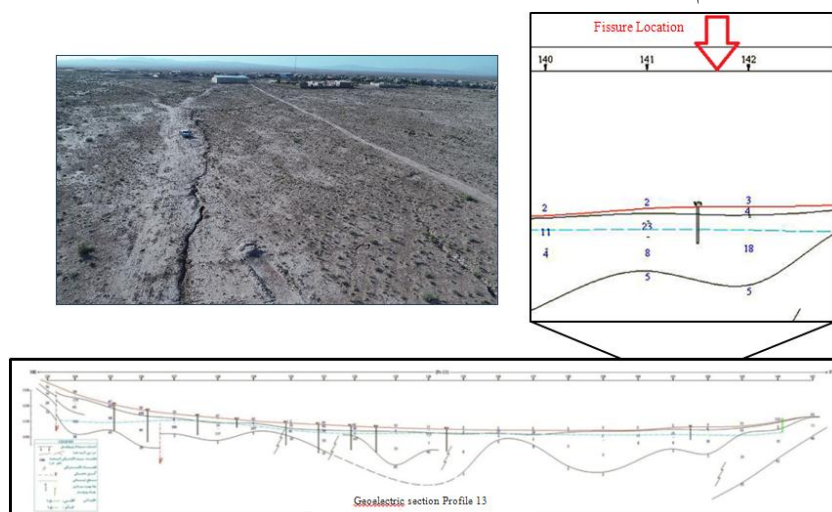
شکاف‌ها با فاصله زیادی از گسل‌های منطقه شمالی و حوالی



شکل ۱۶. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۰ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) همراه با موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

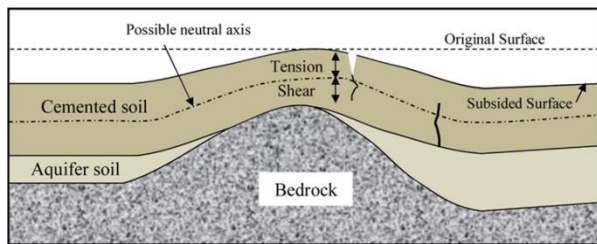
شکاف، جنس سنگ بستر کنگلومرا با میان لایه‌های مارن می‌باشد که در انتها شیل و ماسه سنگ نیز به این لایه‌ها اضافه می‌گردد. لذا تصورات قبلی مبنی بر احتمال هم راستایی شکاف‌ها در این محدوده و ارتباط آن با یک گسل مدفون با تردید مواجه می‌شود که راستی‌آزمایی آن نیاز به مطالعات ژئوتکنیکی کامل‌تری و با هدف بررسی گسل مدفون دارد. تغییرات تراز آب بین سال‌های ۷۵ تا ۹۵ در محل شکاف ۲۷ متر می‌باشد.

اما شکاف‌ها در محدوده بازوبندی در پروفیل شماره ۱۰ (شکل ۱۶) بین سونداژهای شماره ۷۲ و ۷۳ واقع شده است. در محل سونداژ شماره ۶۷ سنگ کف دارای بالآمدگی بوده و مقاومت ۱۲ متر دارد که از جنس آندزیت است این لایه تا سونداژ ۷۰ دنبال شده است (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) و در این محدوده نیز با توجه به بالآمدگی سنگ بستر می‌توان احتمال مکانیسم شکاف با مدل مبتنی بر مکانیک را برای آن در نظر گرفت هم‌چنین در زیر موقعیت



شکل ۱۷. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۳ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) همراه با موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

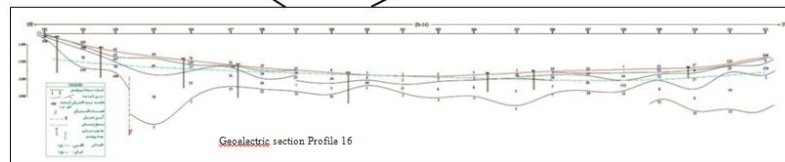
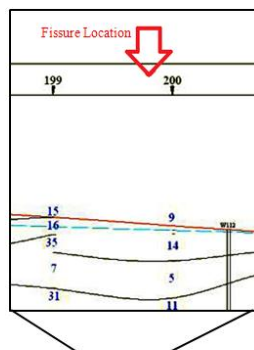
شمال محدوده می‌تواند احتمال مکانیسم مدل مبتنی بر مکانیک (شکل ۱۸) را در این محدوده نیز افزایش دهد. عمق چاه‌ها و دبی استحصال یکسان در حوالی این پروفیل تغییرات دانه‌بندی آبرفت را در این محدوده نشان می‌دهد. لذا مدل نهشته‌های ناهمگن آبخوان (شکل ۲۱) نیز دور از انتظار نیست. در این محدوده تراز آب زیرزمینی هم از ۱۰۹۳ متر در سال ۷۵ به ۱۰۷۶ متر در سال ۹۵ رسیده است.



شکل ۱۸. سازوکار شکل‌گیری شکاف بر پایه مدل مبتنی بر

مکانیک (آدیامان، ۲۰۱۲)

در مقطع پروفیل ۱۳ سونداژهای ژئوالکتریک ۲۳ سونداژ با شماره‌های ۱۲۳ تا ۱۴۵ و طول ۴۸/۵ کیلومتر می‌باشد. قشر سطحی با عناصری با مقاومت ویژه الکتریکی بین ۲ تا ۱۱۲ اهم متر تشکیل یافته است که نشان از وجود مواد ریز دانه تا درشت دانه بوده و ضخامت ۳ متر برای آن برآورد می‌شود (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) شکاف‌ها به طوری که در مقطع پروفیل در (شکل ۱۷) دیده می‌شود بین سونداژهای شماره ۱۴۱ و ۱۴۲ قرارداد سنگ بستر در این محدوده از نوع سنگ بستر آندزیتی می‌باشد شکاف‌های روستای اردمه در این محدوده واقع شده و شروع ایجاد شکاف از سال ۱۳۸۲ بوده و به نظر می‌رسد در این محدوده هم‌اکنون گسترش شکاف‌ها متوقف گردیده هرچند در نقاط وقوع شکاف، سنگ بستر تغییرات توپوگرافی چندانی ندارد لیکن ضخامت دو برابری رسوبات بالای سنگ بستر به طرف

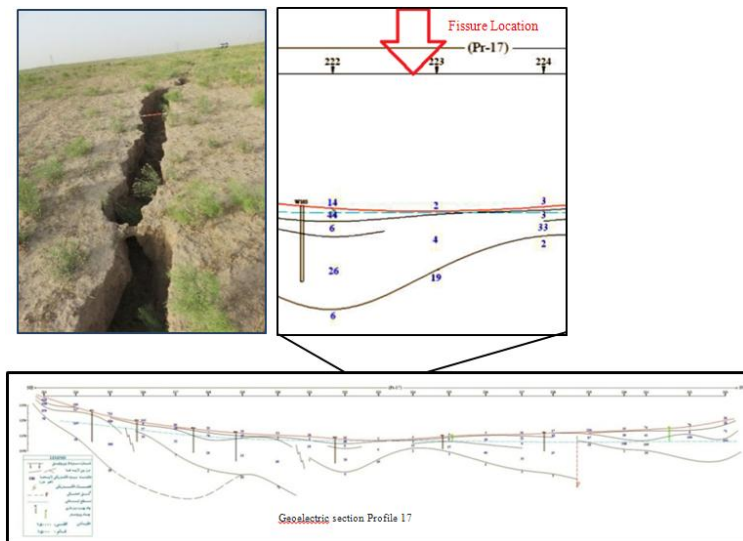


شکل ۱۹. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۶ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (با تغییراتی از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی،

۱۳۹۴) همراه با موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

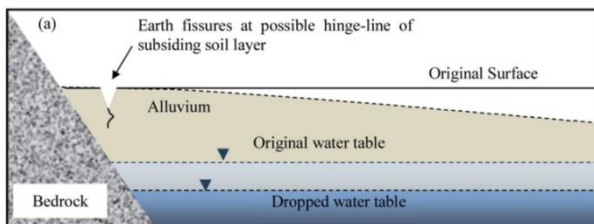
مدل نفوذ افقی در نهشته‌های ناهمگن آبخانه (شکل ۲۱) را تقویت می‌کند از طرفی تغییرات داده‌های هم مقاومت ویژه الکتریکی رسوبات روی سنگ بستر نیز دلیل دیگری بر تغییرات دانه‌بندی آبرفت این محدوده می‌باشد. تراز آب زیرزمینی در سال آبی ۷۵-۷۶ در محل رخداد شکاف زمین ۱۱۵۱ متر و در سال آبی ۹۴-۹۵ این تراز به ۱۱۳۰ متر رسیده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود شکاف‌های پروفیل ۱۶ بین سونداژهای ۱۹۹ تا ۲۰۰ قرار گرفته این پروفیل با ۲۱ سونداژ از شماره ۱۹۲ تا ۲۱۲ و به طول ۴۴ کیلومتر می‌باشد. شکل (۱۹) مقطع پروفیل مذکور و وضعیت سنگ بستر را در این محدوده نشان می‌دهد. به طوری که در این شکل دیده می‌شود سنگ بستر در این محدوده توپوگرافی یکسانی دارد لذا احتمال مدل مبتنی بر مکانیک به حداقل رسیده و وجود شکاف‌های کم عمق و کم عرض این محدوده احتمالاً حاصل



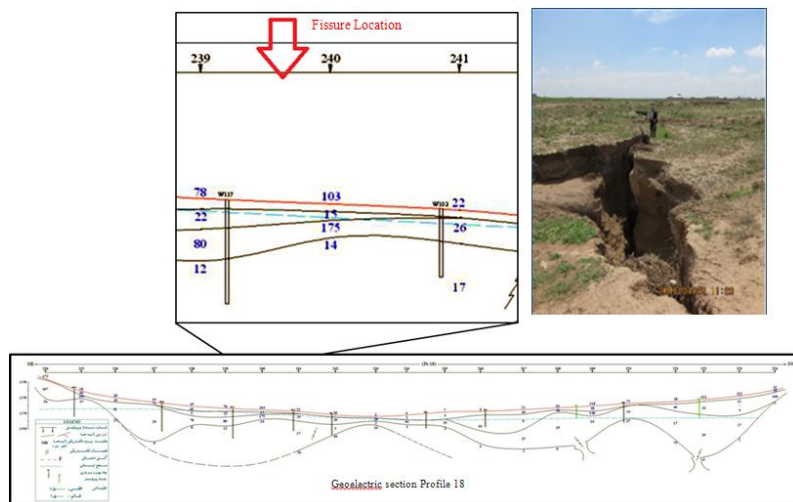
شکل ۲۰. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۷ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (با تغییراتی از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) همراه با موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

نزدیک‌تر دانست. سطح ایستایی در این محدوده با توجه به مجاورت با کال شور دشت نیشابور بالا می‌باشد و آب از کیفیت بسیار مناسبی در مجاورت سونداژهای ۲۲۲ برخوردار نیست. کاهش تراز آب هم در فاصله ۲۰ ساله ۲۲ متر در محل رخداد شکاف بوده است.



شکل ۲۱. شکاف در مرز بین رسوبات درشت دانه و ریزدانه (با تغییراتی از اسلف ۱۹۹۳) (آدیامان، ۲۰۱۲)

مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۷ دارای ۲۱ سونداژ از شماره ۲۱۳ تا ۲۳۳ بوده و ۴۴ کیلومتر طول دارد. دامنه تغییرات در شکاف‌های محدوده پروفیل شماره ۱۷ و موقعیت سونداژهای ۲۲۲ تا ۲۲۳ بیشتر از مناطق دیگر بوده و در حالی که تعدادی از شکاف‌ها در این محدوده متوقف گردیده‌اند برخی دیگر در حوالی شکاف‌های قدیمی رشد و فعالیت خود را شروع کرده‌اند مقطع پروفیل ۱۷ در محدوده شکاف‌ها دارای تغییر ضخامت آبرفت ناشی از وضعیت توپوگرافی سنگ بستر می‌باشد و لذا می‌توان تصور مکانیسم شکاف‌ها با سازوکار خط لولا در مدل کشیدگی‌های کششی که در آن شکاف زمین در مرز منطقه فرونشستی و منطقه پایدار تشکیل شده و هم‌چنین مدل مبتنی بر مکانیک و اثر ترکیب تنش‌های برشی ساده، خمشی و تراکمی که بر روی سطوح عمودی به واقعیت



شکل ۲۲. مقطع ژئوالکتریک پروفیل ۱۸ مطالعات ژئوفیزیکی دشت نیشابور (با تغییراتی از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴) همراه با موقعیت شکاف در مسیر پروفیل و تصویری از شکاف

مورفولوژی متفاوت در بخش‌هایی از دشت به وجود آمده‌اند.

- از نتایج مطالعات ژئوالکتریک برای بررسی زیرسطحی استفاده گردید. در پروفیل‌های ژئوالکتریک همخوانی مناسبی بین محل عبور مقاطع عرضی ژئوالکتریک و محدوده شکاف‌ها مشاهده می‌شود. شکاف‌ها در محل تغییرات سنگ کف و یا تغییر و جابجایی لایه‌های ریزدانه (اکی تارد Aquitard) مشاهده می‌گردد.
- بررسی‌های قبلی مبنی بر این‌که شکاف طویل توزنده جان و بازوبند احتمالاً از یک گسل در پی سنگ تبعیت کرده با توجه به مقاطع ژئوالکتریک عبوری از این شکاف‌ها نیازمند بررسی‌های کامل‌تری شامل حفر گمانه‌های عمیق تا پی سنگ و انجام مطالعات ژئوتکنیکی و تعیین رفتار دقیق لایه‌های تحکیم پذیر در عمق آبرفت دارد.
- فرونشست زمین حاصل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و عملکرد نیروهای هیدرولیکی بر روی سطوح ناهمگن در عمق آبخوان بوده که با توجه به وضعیت نامتقارن و توپوگرافی نامنظم سنگ بستر و تغییرات جنس و ضخامت آبرفت، فرونشست نامتقارن حوضه را سبب می‌شود و موجب بروز

مقطع پروفیل ۱۸ سونداژهای ژئوالکتریک از شماره ۲۳۴ تا ۲۵۴ دارد که شکاف‌ها در این پروفیل بین سونداژهای ۲۳۹ تا ۲۴۰ واقع شده است. مقاومت ویژه الکتریکی بین ۴ تا ۲۲۲ اهم متر قشر سطحی این پروفیل حاکی از مواد دانه‌ریز تا درشت دانه در آبرفت سطحی به ضخامت ۳ متر می‌باشد. نیمرخ پروفیل انحنای سنگ بستر را در محدوده آبرفت‌های شکاف‌دار نشان می‌دهد که با مدل تغییرات در سنگ بستر همخوانی دارد. شکاف‌های این محدوده دارای طول زیاد و عمق زیاد بوده و هم‌اکنون نیز در حال گسترش می‌باشد. مدل مبتنی بر مکانیک سازوکار شکاف‌های این محدوده می‌باشد. با توجه به اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تراز آب در سال آبی ۷۵-۷۶ در محل وقوع شکاف ۱۱۸۱ متر که در سال آبی ۹۴-۹۵ این تراز به ۱۱۵۸ متر کاهش یافته است.

۴. نتیجه‌گیری

- در این تحقیق شکاف‌ها بعنوان یکی از فرم‌های ژئومورفولوژیکی حاصل از فرونشست زمین در دشت نیشابور بررسی گردید. یافته‌های این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:
- بررسی‌ها نشان می‌دهد شکاف‌های ایجاد شده در اثر افت سطح آب از فرم‌های مورفولوژیکی قابل توجه دشت می‌باشند این شکاف‌ها با اشکال و

دگرشکلی‌های سطح زمین می‌گردد. این دگرشکلی‌ها در مناطق مختلف دشت پراکنده بوده و اشکال یکسانی را به وجود نیاورده بلکه با توجه به شدت، نوع، عملکرد و زمان رخداد در هر محدوده از نظر شکل، نوع، امتداد و تعداد متفاوت بوده و نمی‌توان مکانیسم یکسان و تحلیل مشابهی را برای دشت پهناور نیشابور در نظر گرفت لذا به فراخور وضعیت اشکال در هر محدوده و به تبع سایر فاکتورهای تأثیرگذار به آن‌ها پرداخته شده است.

- با رسم مقاطع عرضی در مهم‌ترین مناطقی که محل عبور شکاف بود و با توجه به اطلاعات سنگ بستر و ضخامت آبرفت، سازوکار تشکیل شکاف‌ها با مدل مبتنی بر مکانیک، مدل نفوذ افقی در نهشته‌های ناهمگن آبخوان و مدل کشیدگی‌های کششی در محدوده‌های توزنده جان، بازبندی، کریم‌آباد، کاریزک کنار کال و بشرو انطباق بیشتری دارد.

منابع

- رکنی، جعفر، ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی مطالعه‌ی موردی: نیشابور، مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره ۲۴، صص ۳۸-۲۱.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی؛ ۱۳۸۷. گزارش نهایی بررسی نشست زمین در دشت نیشابور و ارتباط آن با افت سطح آب‌های زیرزمینی، کمیته تحقیقات، ۱۱۹ صفحه.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی؛ ۱۳۹۴. گزارش توجیهی ممنوعیت دشت نیشابور، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۹۹ صفحه.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی؛ ۱۳۹۴. گزارش مطالعات ژئوفیزیک محدوده دشت نیشابور، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۴۵ صفحه.
- شریفی‌کیا، محمد ۱۳۹۱ تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق- بهرمان- مجله مدرس- برنامه ریزی آمایش فضا، دوره ۱۶ شماره ۳ پائیز ۱۳۹۱.
- لشگری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، کاظمی‌گلیان، رمضان، دم شناس، مهدی؛ ۱۳۸۶. نشست زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، صص. ۱۰۹۰-۱۰۸۲.
- نامقی، هادی، حسینی، سیدمحمود، شریفی، محمدباقر؛ ۱۳۹۲. ارائه روش تحلیلی برای تخمین عوامل مؤثر بر نشست زمین با استفاده از داده‌های صحرائی و تصاویر InSAR در دشت نیشابور، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، بهار و تابستان، صص. ۵۰-۳۳.
- Adiyaman, I. B., 2012. Land Subsidence and Earth Fissures due to Groundwater Pumping. The University of Arizona.
- Barends F.B. J., Frits J. J., Brouwer, H., Frans. Schroder ., 1995., Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, held at The Hague, The Netherlands, No 234, pp, 16-20 October
- Bolt, G. H. (1976). "Soil physics terminology." International Society of Soil Science Bulletin 49, 16-22.
- Budhu, M. (2008). "Mechanics of earth fissures using the Mohr-Coulomb failure criterion." Environmental and Engineering Geoscience, 14(4), 281-295.
- Budhu, M. and Adiyaman, I. B. (2009), "An evaluation of engineering design methods to mitigate damages to transportation systems from earth fissures." prepared for Arizona Department of Transportation, Arizona Geohazards Research Center.
- Carpenter, M. C. (1993). "Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho Mountains, south-central Arizona, 1980. 84." U.S. Geological Survey Professional Paper 497-H, 49.
- Carpenter, M. C. (1999). "Earth fissures and subsidence complicate development of desert water resources." Land subsidence in the United States, D. Galloway, D. R. Jones, and S. E. Ingebritsen, eds., U.S. Geological Survey Circular 1182, 65-78.
- Chen, C. H., Wang, C. H., Hsu, Y. J., Yu, S. B., and Kuo, L. C. (2010). Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. Engineering Geology, 115(1-2), 122-131.
- Holzer, T. L. (1984). "Ground failure caused by groundwater withdrawal from unconsolidated sediments - United States." Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence, March 1984, A. I. Johnson, L. Carbognin, and L. Ubertini, eds., International Association of Scientific Hydrology Publication, Publ. no. 151, Venice, 747-756.

-
- Jachens, R. C., and Holzer, T. L. (1982). "Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona." *Geological Society of America Bulletin*, 93, 998-1012.
- Lee, K. L., and Shen, C. K. (1969). "Horizontal movements related to subsidence." *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, 95(SM1), 139-166.
- Machowski, R., Rzetala, M. A., Rzetala, M. and Solarski, M., 2016. Geomorphological and hydrological effects of subsidence and land use change in industrial and urban areas. *Land Degradation and Development*, 27(7), pp. 1740-1752.
- Mahmoudpour, M., Khamchian, M., Nikudel, M. R. and Ghassemi, M. R., 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201, pp. 6-28.
- Sheng, Z., Helm, D. C., and Li, J. (2003). "Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal." *Environmental and Engineering Geoscience*, 9(4), 351- 362.
- Shipman, T. C. and Diaz, M., 2008. Arizona's earth fissure mapping program: protocols, procedures and products.
- 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, 523-532.