

## ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره

مهدی بهیاری

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه

اکرم علیزاده

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه

شهاب محمودیان

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۴

m.behyari@urmia.ac.ir

### چکیده

محدوده مورد مطالعه در شمال باختر مرزن آباد، دارای گسل‌های شاخصی می‌باشد. با توجه به نقش گسل‌ها در رخداد زمین لغزش و شکل‌گیری فرونشست‌ها و به تبع آن، وارد آمدن خسارت به سازه‌های سطحی همچون واحدهای صنعتی و شبکه توزیع برق در این منطقه، پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست و ارزیابی تأثیر ساختارهای تکتونیکی بر میزان فرونشست، مورد بررسی قرار گرفت. پس از تعیین روند و نوع گسل‌های موجود در منطقه (گسل‌های F1 تا F9)، مشخص گردید که گسل‌های F1 تا F5 دارای روند یکسان بوده و خردشدگی در پهنه‌های گسلی سبب به وجود آمدن مناطق تراوا شده است. گسل‌های F6 و F7 بین واحدهای آهکی ضخیم لایه در دامنه‌های شمالی و جنوبی منطقه شکل گرفته‌اند. گسل F8 نیز با راستای شمال خاوری-جنوب باختری، دارای برش‌های گسلی در پهنه گسلی می‌باشد که سبب ناپایداری و لغزش در محل کف جاده در محدوده مورد مطالعه گشته است. گسل F9 از جمله گسل‌های با پهنه گسلی عریض می‌باشد که خود، متشکل از چندین گسل بوده و موجب ناپایداری ساختمان در دکل‌های خطوط انتقال نیرو و تخریب واحدهای صنعتی در منطقه می‌گردد. با مطالعه به روش AHP به منظور تجزیه و تحلیل خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه، چنین نتیجه می‌شود که عوامل زمین شناسی از جمله: وجود درزه‌ها و شکستگی‌های گسلی سبب ایجاد سطوح ضعف در خاک و ناپایداری در منطقه گشته‌اند و از طرف دیگر سبب انتقال آب به واحدهای آهکی زیر سطحی شده و حفرات انحلالی را پدید آورده است. پس از برداشت‌های صحرایی، تهیه نقشه DEM، نقشه شیب و جهت شیب، آبراه‌ها و در نهایت، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست در منطقه تهیه گردید، این نقشه نشان می‌دهد که خطر فرونشست در بخش‌های جنوبی منطقه نسبت به سایر مناطق، بیشتر می‌باشد و سازه‌های حساس که در این مناطق قرار گرفته‌اند نیازمند جابه‌جایی به مناطق امن دارند. با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره و تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز می‌توان در جانمایی سازه‌های صنعتی در مناطقی که با خطر فرونشست و زمین لغزه مواجه هستند از احداث سازه‌ها در مناطق پر خطر اجتناب نمود. تهیه نقشه‌های پتانسیل فرونشست می‌تواند به عنوان سندی برای چشم‌انداز توسعه مناطق مختلف استفاده شود و در بحث آمایش زمین مورد استفاده قرار گیرد و از خسارت‌های جبران ناپذیر احتمالی جلوگیری نماید.

**کلمات کلیدی:** فرونشست، زمین لغزش، گسل، کارست، مرزن آباد، AHP

### مقدمه

می‌گردند (Waltham, 2008; Zhu et al., 2015). به طور کلی فرونشست متأثر از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی رویه آب از سفره‌های آب زیر زمینی و پارامترهای زمین‌شناسی می‌باشد که در صورت عدم شناخت از این پدیده، سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی می‌گردد (Galloway and Burbey, 2011).

یکی از انواع سازوکارهایی که سبب شکل‌گیری فرونشست در سطح زمین می‌شود، ریزش حفرات کارستی در زیر سطح می‌باشد. معمولاً شکستگی‌ها باعث شکل‌گیری پهنه‌های نفوذپذیر در سازندهای سخت از جمله سازندهای کربناته می‌گردد. گسل‌ها، درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی محل مناسبی هستند که پتانسیل تبدیل شدن به مجاری انحلالی را دارا بوده و از بهم پیوستن این مجاری انحلالی امکان شکل‌گیری مناطق مستعد برای فرونشست در سطح زمین شکل می‌گیرد (Galve et al., 2009; Perrin et al., 2015). شکستگی‌های برشی و کششی،

فرونشست از جمله مخاطرات زمین‌شناسی می‌باشد که از لحاظ سرعت شکل‌گیری، به دو دسته: سریع و تدریجی تقسیم می‌گردد. حالت تدریجی، به دلیل تلفات انسانی کم آن در مقایسه با دیگر پدیده‌های طبیعی مانند: زلزله، لغزش و سیلاب، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد (Modoni et al., 2013) اما فرونشست در حالت سریع، باعث آسیب به سازه‌ها و تلفات انسانی می‌گردد. فرونشست زمین در سال‌های اخیر، به مشکلی جهانی تبدیل شده است چرا که در اکثر کشورها به وقوع می‌پیوندد. فرونشست، سبب تخریب کانال‌های آبیاری، شکست خطوط لوله‌های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه‌ها و تشدید فرآیند زمین‌لغزه و سیلاب‌ها می‌شود (Abidin et al., 2013; Zeitoun and Wakshal, 2013 و محمودی دهستان و همکاران، ۱۳۹۵). فرآیندهای طبیعی مانند: حرکات تکتونیکی، فوران آتشفشان، انحلال سنگ‌ها و کارستی شدن، تراکم رسوبات و ذوب زمین‌های یخ بسته، معمولاً سبب فرونشست زمین در ناحیه وسیع

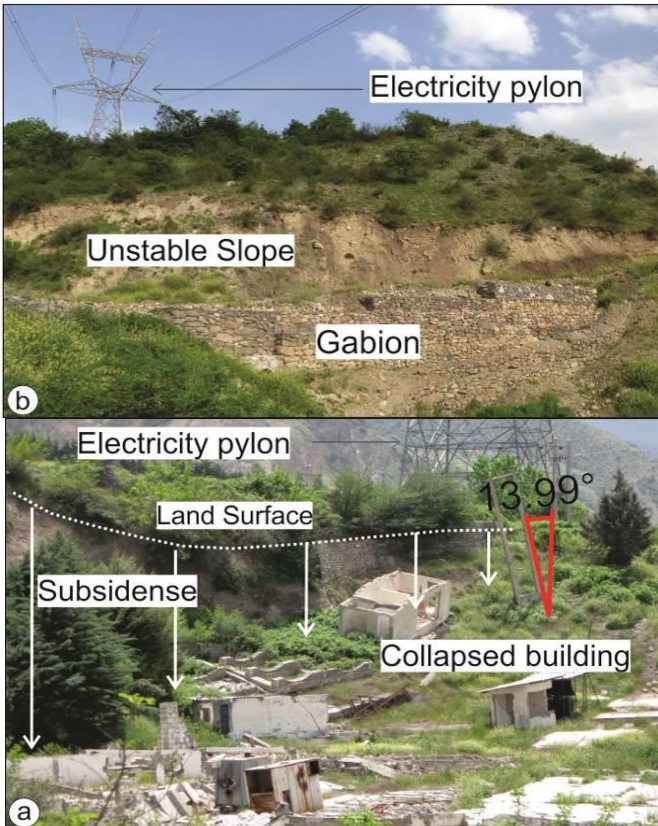
پذیری، سبب توسعه حفرات زیرزمینی می‌گردد. انباشته‌های کواترنری منطقه مورد بررسی، به نسبت، گسترش کمتری دارند و شامل نهشته‌های دریاچه‌های قدیمی می‌شوند که به وسیله تجمع آب رودخانه‌های منطقه در برابر آخرین فاز چین‌خوردگی تشکیل شده‌اند. رسوبات کواترنری منطقه دارای چین‌بندی متقاطع نیز هستند که نشان از واریزه‌های دلتائی - دریاچه‌ای دارند، این رسوبات دریاچه-ای در اثر زمین‌لغزه‌های قدیمی و بسته شدن مسیر رودخانه‌ها شکل گرفته است (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹).

که باز شدگی سطح درزه‌ها در آنها بیشتر است، نقش مهمتری در فرآیند کارستی شدن دارند. شکستگی‌های کششی در بخش فوقانی تاقدیس‌ها و در بخش انتهایی و عمیق ناودیس‌ها مشاهده می‌گردد. شکستگی‌ها، آب‌های سطحی را زهکشی نموده و به بخش‌های پایین‌تر منتقل کرده و به این وسیله فرآیند انحلال را تشدید می‌کنند (Li et al., 2007). با توجه به نرخ انحلال پایین سنگ‌های آهکی و فرونشست ناشی از آن در طول عمر پروژه‌های مهندسی اهمیت ندارد بلکه فروریختگی کارست‌های قدیمی یا فرار آب از شبکه‌ی کارست موجود، از جمله معضلات احداث سازه‌های مهندسی در نواحی کارستی است. کارست‌های آهکی از نظر شکل و اندازه متغیر می‌باشند، در برخی از شرایط شکاف‌های باریک در امتداد سیستم شکستگی‌های توده سنگ شکل می‌گیرد و در شرایط خاصی شبکه‌ای از مجاری بزرگ کارستی تشکیل می‌گردد. سقف کارست‌ها ممکن است به صورت کمائی، پایه‌دار یا مسطح باشند (Stokes et al., 2010). سقف‌های کمائی و پایه-دار معمولاً مقاوم‌تر هستند و کارست‌های با سقف مسطح به خصوص در آهک‌های نازک لایه ناپایدار بوده و هر از چند گاهی سقف کارست ریزش می‌کند و به صورت فرونشست‌های ناگهانی در سطح زمین نمایان می‌شود. عوامل زمین‌شناسی نظیر لایه‌بندی، میان لایه‌های شیلی و مارنی، درزه‌ها و گسل‌ها در تشکیل کارست‌ها مؤثر می‌باشند و تعیین دقیق محل کارست‌ها بسیار دشوار است اما احتمال وجود کارست در مجاورت رخنمون‌های نفوذپذیر در امتداد گسل‌ها و برخی از لایه‌های آهکی با تخلخل بالا که محل تمرکز جریان آب می‌باشد و انحلال‌پذیری افزایش می‌یابد، بیشتر است (Cahalan, 2015).

محدوده مورد مطالعه، از لحاظ ساختاری در شمال باختر مرزن آباد و در نزدیکی روستای حیرت در پهنه ساختاری البرز مرکزی قرار گرفته است. ساختارهای غالب موجود در منطقه به دلیل برخورد ورقه ایران مرکزی با خزر جنوبی به وجود آمده‌اند. در این منطقه گسل‌ها و ساختارهای شاخصی وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به گسل مرزن آباد اشاره نمود که یکی از اصلی‌ترین ساختارها در محدوده مورد مطالعه می‌باشد (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹). شکل‌گیری فرونشست‌ها در منطقه مورد مطالعه سبب وارد آمدن خسارت به سازه‌های سطحی همچون واحدهای صنعتی، شبکه توزیع برق و جاده‌ها شده است (شکل ۱). همچنین این فرونشست‌ها سبب ناپایداری در دامنه‌ها و ایجاد لغزش‌های ثانویه شده و سبب بروز مشکلات فراوانی در پایداری منطقه گردیده است. هدف از این مطالعه شناسایی عوامل مؤثر در شکل‌گیری فرونشست‌ها در این محدوده می‌باشد. بدین منظور هر یک از این عوامل، تبدیل به یک لایه اطلاعاتی شده و در نهایت با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغییره مناطق مستعد برای فرونشست شناسایی شده و نتیجه به صورت یک نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست ارائه می‌گردد. در این نقشه تأثیر ساختارهای زمین‌ساختی بر پتانسیل ایجاد فرونشست در منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین سازه‌های سطحی مانند دکل‌های انتقال نیرو و یا واحدهای صنعتی که در معرض خطر بالا قرار دارد شناسایی می‌شود.

### زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

منطقه مرزن آباد از لحاظ چین‌شناسی، شامل سازه‌های آهکی و کربناتی کرتاسه و رسوبات کواترنری می‌باشد (شکل ۲). واحدهای کربناته در منطقه مورد مطالعه در برگرنده سنگ آهک‌های اریپتولینادار، سنگ آهک‌های اولیتی، شیل‌های ماسه‌ای است (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹). وجود واحدهای مارنی سبب تسهیل در لغزش و ناپایداری دامنه‌ها می‌شود. واحدهای آهکی نیز به علت انحلال



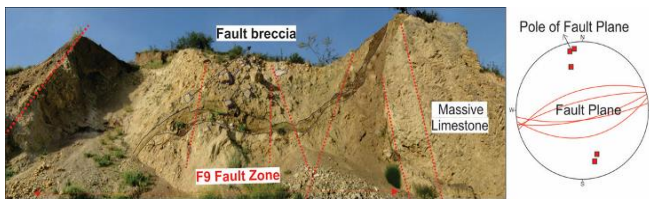
شکل ۱. (a) فرونشست منطقه‌ای همراه با ناپایداری دامنه در محدوده مورد مطالعه و تخریب واحدهای صنعتی؛ (b) ناپایداری دکل‌های انتقال نیرو و احداث گاو‌بندی به منظور پایدارسازی دامنه‌ها.

گسل‌ها، با توجه به ایجاد پهنه‌های خرد شده و همچنین شکل‌گیری مجاری انتقال آب، از اهمیت فراوانی در توسعه مورفولوژی کارستی و شکل‌گیری فرونشست‌ها در منطقه دارند. روند عمومی گسل‌های منطقه شمال خاور-جنوب باختر و یا خاوری-باختری می‌باشد که توسط گسل‌های اصلی با راستای شمال باختر- جنوب خاور قطع می‌شوند (شکل ۲). پهنه خرد شده این گسل‌ها به علت دگرشکلی ناشی از فروافتادگی یا لغزش در پهنه گسلی توسعه زیادی یافته است. در ادامه، به بررسی گسل‌های اصلی منطقه که در شکل‌گیری سیمای مورفولوژیکی منطقه مؤثر بوده‌اند، پرداخته می‌شود همچنین خطواره‌های منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده و طول و جهت‌گیری فضایی آنها مورد بررسی قرار گرفت.



لغزش و ناپایداری در کف جاده نیز به طور کامل مشخص می‌باشد. این گسل یکی از عوامل مؤثر در نشست و تخریب واحدهای صنعتی در منطقه می‌باشد و سازه‌های که بر روی این گسل واقع شده‌اند به طور کامل تخریب گردیده است.

گسل F9 از لحاظ ویژگی‌های هندسی، مشابه گسل F8 بوده و دارای روند شمال‌خاوری - جنوب باختری می‌باشد. این گسل دارای پهنه گسلی با عرض بیش از ۳۰ متر است. شاید بتوان گفت که این گسل مهمترین گسل از مجموعه گسل‌های است که در این راستا قرار دارد. گسل F9 به صورت یک گسل منفرد نیست بلکه متشکل از چندین گسل است که در پهنه گسلی در کنار هم مشاهده می‌شود (شکل ۵). شدت دگرشکلی و هوازگی به حدی است که شناسایی سازوکار دارای سازوکار لغز با مؤلفه نرمال باشد. برش گسلی در پهنه خرد شده دارای جورشدگی بسیار ضعیف می‌باشد. ادامه گسل F9 که یکی از مهمترین گسل‌های منطقه می‌باشد دقیقاً از زیر دکل شبکه توزیع برق رد می‌شود و از مخاطرات بالقوه ای است که پایداری این دکل‌ها را تهدید می‌کند.

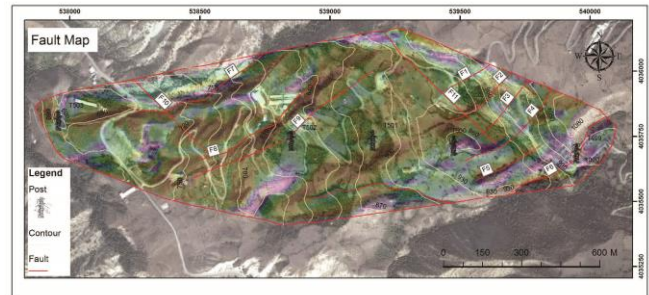


شکل ۵. پهنه برشی گسل F9 و شاخه‌های فرعی این گسل که باعث خرد شدگی شدید در پهنه گسلی شده است به همراه استریوپلات آن.

### روش‌شناسی و بحث

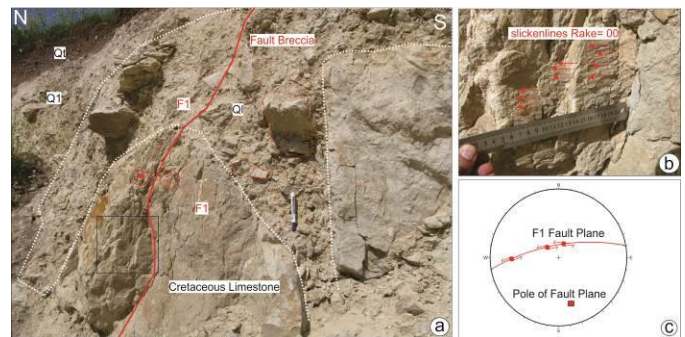
بررسی‌های صحرایی در منطقه حاکی از آن است که فرونشست‌های صورت گرفته به صورت منطقه‌ای صورت گرفته و این پدیده اختلاف ارتفاع ناگهانی و تغییر در توپوگرافی را به همراه دارد. این تغییر ناگهانی ارتفاع، ناپایداری در دامنه‌های ایجاد شده را به همراه دارد. از آنجا که این ناپایداری‌ها و فرونشست باهم در ارتباط هستند، شناسایی و پهنه بندی مناطق مستعد ناپایداری دامنه‌ای (زمین لغزه) کمک شایانی به شناسایی مناطق فرونشستی می‌کند. روند تحلیل سلسله مراتبی یا روش (Analytical Hierarchy Process) AHP، یک روش نیمه کمی است که در آن تصمیم‌گیری با استفاده از وزن دویبه‌دو گرفته شده است (Saaty, 1977). این روش شامل پنج مرحله است: الف: تجزیه یک مسئله تصمیم‌گیری به عوامل جزء، ب: ترکیب این عوامل در یک نظم سلسله مراتبی، ج: انتساب مقادیر عددی برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل با توجه به ارتباط ذهنی آنها (جدول ۱؛ Saaty, 1977)، د: راه‌اندازی یک ماتریس مقایسه، ه: محاسبه بردار مشخصه اصلی نرمال که وزن هر عامل را می‌دهد (Saaty and Vargas, 2000). مزایای استفاده از AHP به عنوان یک روش تخصصی در تجزیه و تحلیل مخاطرات زمین از جمله فرونشست، به صورت ذیل خلاصه می‌گردد: ۱. روند بحث شامل تمام اطلاعات مربوط به فرونشست است. ۲. تحلیل ساختارها به طوری که تمام اطلاعات در نظر گرفته شود صورت می‌پذیرد. ۳. قوانین بحث براساس دانش و تجربه کارشناسان است. ۴. وزن هر عامل مرتبط، به‌طور خودکار توسط ماتریس مقایسه توسط بردار مشخصه به‌دست می‌آید. نقطه ضعف اصلی این روش این است که اولویت ذهنی در رتبه‌بندی از عوامل جزء مسئله از یک متخصص به دیگری متفاوت باشد. محققان بسیاری از روش AHP برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و ارزیابی منابع آب زیر زمینی استفاده کرده‌اند به عنوان مثال:

ضخیم لایه در جنوب، با آهک و مارن در شمال منطقه مورد مطالعه می‌باشد. گسل F6 همچنین در شکل‌گیری دره جنوبی کنار محدوده مورد مطالعه مؤثر بوده است.



شکل ۳. نقشه گسل‌های اصلی منطقه و موقعیت سازه‌های سطحی

این احتمال وجود دارد که گسل‌های F1 تا F5 شاخه‌های منشعب شده از گسل اصلی باشد بنابراین با توجه به عمق و پهنه در برگیرنده این گسل می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در انتقال آب به عمق و ایجاد حفرات انحلالی باشد. در راستای این گسل بر روی دامنه‌های دره گسلی شواهدی مبنی بر لغزش و فرو افتادگی وجود دارد که در شکل‌گیری این فرونشست‌ها این گسل نقش مؤثری داشته است.



شکل ۴- (a) پهنه خرد شده گسل F1؛ (b) خش‌لغزهای گسلی با ریک صفر درجه و سازوکار امتدادلغز این گسل؛ (c) استریوپلات گسل F1 و خش‌لغزهای برداشت شده در این پهنه.

گسل F6 طول‌ترین گسل منطقه بوده و طول آن بر روی تصاویر ماهواره‌ای تا ۳ کیلومتر قابل پیگیری می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی گسل F6 نشان می‌دهد که روند کلی آن، شمال‌خاوری - جنوب‌باختری بوده و سازوکار این گسل نیز امتدادلغز می‌باشد.

گسل F7 از گسل‌های اصلی منطقه می‌باشد که واحد مارنی ضخیم لایه را در شمال، از واحد مارنی آهکی در جنوب محدوده مورد مطالعه جدا می‌کند. روند کلی این گسل نیز شمال‌خاوری - جنوب‌باختری می‌باشد و جزء گسل‌های طولی منطقه است. با توجه به اینکه شواهد کشش در اطراف این گسل مشاهده می‌شود، این احتمال وجود دارد که علاوه بر مؤلفه امتداد لغز راستگرد، مؤلفه شیب لغز آن نیز فعال باشد.

گسل F8 دارای راستای شمال‌خاوری - جنوب‌باختری می‌باشد و از لحاظ توسعه پهنه خرد شده و شدت دگرشکلی با گسل‌هایی که تا کنون معرفی شده است متفاوت می‌باشد. در مجاورت این گسل، ترک‌های کششی توسعه پیدا کرده است و شواهد روشنی مبنی بر جابه‌جایی در پهنه گسلی دیده می‌شود همچنین برش‌های گسلی توسعه قابل توجهی در این پهنه دارند. ترانشه‌های که به منظور احداث جاده در راستای این گسل حفر شده است کاملاً ناپایدار گشته و شواهد

نقشه‌های ذیل می‌توان دریافت، فاصله از مسیر آبراهه‌ها می‌باشد. این شاخص بدین منظور مورد توجه قرار می‌گیرد که آبراهه‌ها با ایجاد شیارها و گسستن لایه‌های به هم پیوسته خاک، باعث افزایش نفوذ آب‌های سطحی می‌گردد. همچنین باعث ناپایداری دامنه‌ها و تغییر شیب در منطقه می‌گردند که خود باعث ایجاد سطوح ضعف در دامنه‌ها است و سازه‌های اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

بررسی نقشه‌ی چگالی گسل‌های احتمالی منطقه و تأثیر آن‌ها بر سیستم‌های لغزش، نشان دهنده وجود محدوده‌ی خطر با ریسک بالا در شرق محدوده مورد مطالعه به دلیل وجود سیستم شکستگی‌های مترکم‌تر می‌باشد (شکل ۶- b). در بخش‌های غربی و یا جنوبی با توجه به فاصله از گسل‌های اصلی منطقه، میزان پتانسیل لغزش و یا فرونشست کمتر می‌باشد. باید توجه داشت که سیستم‌های گسلی فقط یکی از عوامل رخداد فرونشست در منطقه می‌باشند. از عوامل مهم دیگر تأثیرگذار در رخداد ناپایداری‌ها، شاخص جهت شیب می‌باشد. شاخص جهت شیب از دو جهت مورد بررسی قرار می‌گیرد: اول اینکه جهت شیب با مقدار تابش نور خورشید ارتباط دارد و در آزمون‌های موازی با تابش نور خورشید مقدار تبخیر بیشتر از دیگر مناطق بوده و در این مناطق رویش‌های گیاهی که منجر به افزایش نفوذپذیری خاک و همچنین افزایش وزن دامنه خواهند شد، کمتر از نواحی دیگر بوده و در نتیجه تأثیر کمتری در رخداد ناپایداری خواهند داشت. از این‌رو، در این نقشه آزمون‌های در حدود ۹۰ درجه و ۲۷۰ درجه که موازی با خط طلوع و غروب خورشید می‌باشد، دارای بیشترین زمان تابش در طول روز هستند که این خود سبب کم شدن خطر فرونشست در این نواحی می‌شود.

از طرفی دیگر در آزمون‌های تقریبی صفر، ۳۶۰ و ۱۸۰ درجه، میزان تابش در طول روز کمتر بوده و باعث می‌شود مقدار تبخیر کمتر و مقدار روناب بیشتری در سازه‌های سخت آهکی نفوذ کند. بنابراین، در محدوده مورد مطالعه و مناطقی که با رنگ بنفش (آزمون ۱۰۷-۷۱) و رنگ زرد (آزمون ۲۸۷-۲۵۱) مشخص شده‌اند (شکل ۶- c)، با لحاظ نمودن این اصل، خطر کمتری نسبت به نواحی دیگر دارا می‌باشند از طرفی دیگر نواحی که با رنگ قهوه‌ای تیره (آزمون ۳۶۰-۳۲۳) و نواحی سفیدرنگ (آزمون ۳۵-۱) بیشترین تأثیر این شاخص را نشان می‌دهد.

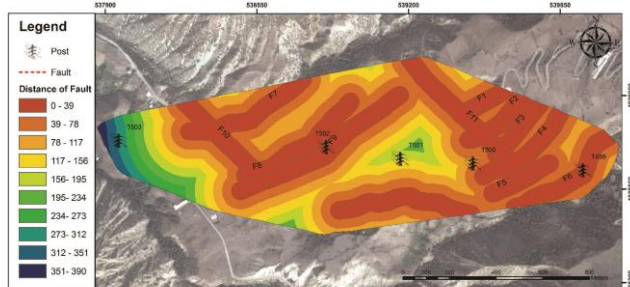
(Ayalew et al., 2005) در سادو ایسلند ژاپن، (Gorsevski et al., 2006) در آمریکا، (صابری و همکاران، ۱۳۹۱) در تاقدیس کمستان استان خوزستان و همچنین (Wu and Chen, 2009) مطالعاتی را در این خصوص انجام داده‌اند. برخی از محققان از AHP در تعیین وزن فاکتورها برای عوامل مسبب و عوامل مرتبط در طبقات مختلف استفاده کرده‌اند (Mezugh et al., 2012; Phukon et al., 2012; Yalcin et al., 2011) همانطور که در (جدول ۱) (Saaty, 1977) نشان داده شده است. در روش AHP، مقایسه عوامل با استفاده از یک مقیاس از ۱ تا ۹ ساخته شده است. اگر فاکتورها رابطه مستقیم با هم داشته باشند، از مقیاس ۱ تا ۹ و در صورتی که عوامل مؤثر رابطه معکوس داشته باشند از مقیاس ۱/۲ تا ۱/۹ نشان داده خواهند شد. در این روش، لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بر موضوع مورد پژوهش که شامل: فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شیب، جهت شیب و لیتولوژی می‌باشند تهیه گردید. سپس در نرم افزار Arc GIS با استفاده از Extension AHP ماتریس‌ها (جدول ۲) و جدول وزنی (جدول ۳)، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست منطقه مورد پژوهش استخراج گردید. همچنین در راستای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از سنجش از دور، مطالعات صحرایی نیز صورت گرفت. با توجه به اینکه از عمده دلایل شکل‌گیری و رخداد فرونشست و به تبع آن زمین‌لغزش، وجود درزه‌ها و شکستگی‌های گسلی است در همین راستا اقدام به استخراج نقشه گسل‌ها با استفاده از برداشت‌های صحرایی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER و LandsAT (شکل ۲) شده است. شاخص آبراهه‌های موجود در منطقه نیز از عوامل مهم در القاء ناپایداری در منطقه می‌باشد. آبراهه با افزایش فشار آب منفذی، سبب کاهش زاویه اصطکاک داخلی واحدهای سنگی شده و وقوع ناپایداری را تسهیل می‌کند و از طرفی با افزایش تراز آب زیر زمینی، سبب توسعه حفرات انحلالی در زیر سطح می‌گردد. آبراهه‌های محدوده با استفاده از روش‌های دورسنجی و استخراج لایه‌ی رقومی از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ منطقه به دست آمد (شکل ۶- a). همچنین در راستای مطالعات تکمیلی، لایه‌های فاصله از آبراهه و چگالی کلی آبراهه‌ها استخراج شدند. آبراهه‌های منطقه با توجه به همسو بودن با جهت لغزش، باعث نفوذ بیشتر نزولات جوی و سیالات به ترازهای پایین‌تر می‌گردند لذا این شاخص نیز مورد توجه قرار گرفته است. از نکات مهم که از

جدول ۱. مقیاس اولویت‌ها بین دو پارامتر در AHP (Saaty, 1977)

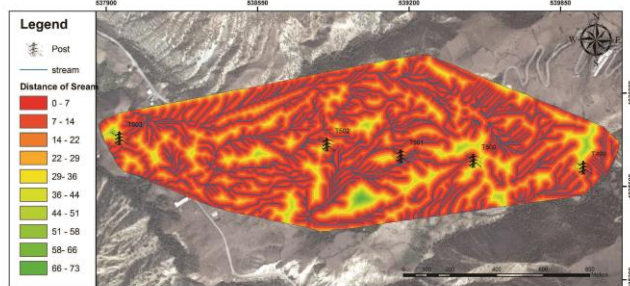
اولویت فاکتور	درجه اولویت	توضیحات
۱	برابر	دو عامل به همان اندازه به هدف کمک کنند
۳	ملازم	تجربه و قضاوت متوسط تا به سمت یک عامل دیگر
۵	شدید	تجربه و قضاوت متوسط تا به سمت یک عامل دیگر
۷	خیلی شدید	عاملی است که به شدت بر دیگری ارجحیت دارد
۹	خیلی خیلی شدید	بالاترین درجه ممکن در تاکید شواهد بر ارجحیت یکی از عوامل بر دیگری
۲،۴،۶،۸	حد واسط	برای نشان دادن مصالحه بین اولویت‌های ۱،۳،۵،۷،۹

کافی برای نفوذ آب‌های سطحی به عمق و ایجاد حفرات انحلالی در واحدهای کارستی وجود خواهد داشت. بنابراین، شیب کم در پدیده فرونشست‌های القایی ناشی از ریزش کارست‌ها عامل محرک و مثبت می‌باشد. در برخی مناطق در مرکز نقشه که تغییر شیب ناگهانی به صورت محلی دیده می‌شود نشانگر نقاطی هستند که فرونشست‌های جوان در آنها رخ داده است (شکل ۶-د).

برای شناسایی پهنه‌هایی که مستقیماً تحت تاثیر گسل نفوذپذیری آنها افزایش پیدا کرده است نقشه فاصله از گسل نیز تهیه شده است در این نقشه مناطق قرمز رنگ پهنه‌های گسلی با نفوذ پذیری بالا را نشان می‌دهند. برش‌های گسلی در این پهنه‌ها و شکستگی‌ها آبهای سطحی را به عمق انتقال می‌دهد لذا این مناطق به عنوان یکی از مناطقی که سبب افزایش فرونشست می‌شود در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در شرق محدوده مورد مطالعه با توجه به تراکم گسل‌ها به تبع پهنه‌های خردشدگی آنها نیز وسعت زیادی دارد (شکل ۷). نقشه فاصله از آبراهه نیز به عنوان یک لایه موثر تهیه شده است این مناطق محدوده‌های است که با توجه به شکل حوضه آبریز حجم رواناب به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد افزایش حجم آب در ارتباط مستقیم با افزایش نفوذپذیری دارد (شکل ۸).

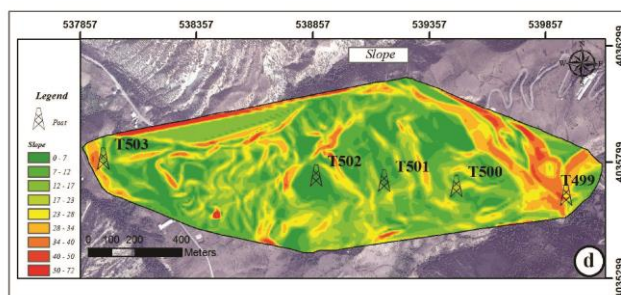
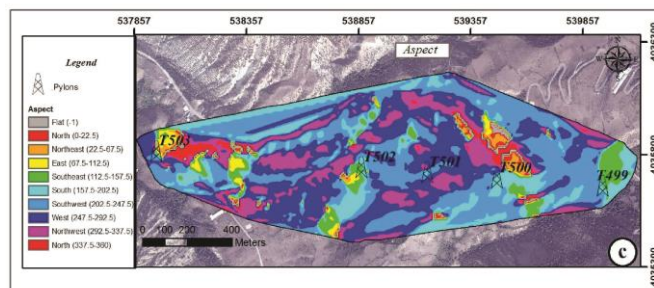
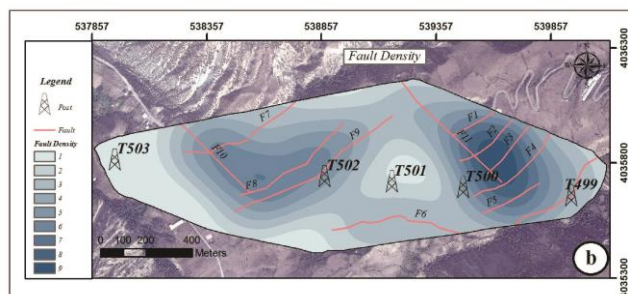
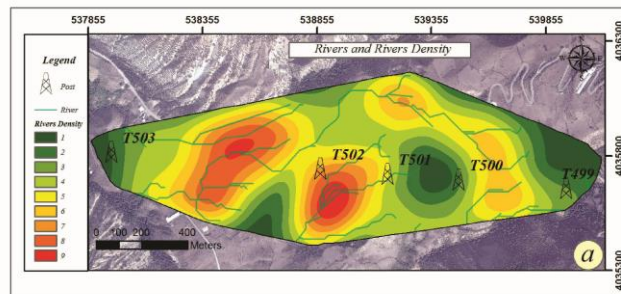


شکل ۷. نقشه فاصله از گسل، قسمت‌های قرمز رنگ مناطق را که در مجاورت گسل قرار دارد را مشخص می‌کند.



شکل ۸. نقشه فاصله از آبراهه‌ها مناطق با رنگ قرمز محدوده‌های در مجاورت آبراهه‌ها را نشان می‌دهد.

از شکل خطوط توپوگرافی نیز می‌توان به اطلاعات مهمی دست‌یافت. از جمله اینکه در مناطقی که خطوط توپوگرافی به هم نزدیک بوده و فاصله کمی با همدیگر دارند، نمایانگر تغییرات ناگهانی شیب و سطوح لغزشی بوده و این شواهد در ناحیه شرقی محدوده دیده می‌شود. در شمال محدوده نیز این سطوح قابل مشاهده می‌باشد که همراه با سطحی که قبلاً ذکر شد می‌تواند سطوح لغزشی ناحیه‌ای (کلی) منطقه را نشان دهد. همچنین در غرب منطقه در برخی مناطق نیز، خطوط توپوگرافی با فاصله کمی از همدیگر قرار گرفته‌اند که نشان از وجود لغزش در جهت شرقی غربی دارد.



شکل ۶. نقشه چگالی آبراهه‌ها در محدوده مورد مطالعه. (b) چگالی گسل‌های منطقه (c) نقشه جهت شیب در محدوده مورد مطالعه (d) نقشه شیب محدوده مورد مطالعه مستخرج از DEM هزار متر منطقه مورد مطالعه

یکی دیگر از عوامل اصلی وقوع ناپایداری و فرونشست، شاخص شیب می‌باشد که تأثیر فراوانی در ایجاد و گسترش درز و شکاف در واحدهای سنگ‌چینه‌ای دارد. در محدوده مورد مطالعه این شاخص با استفاده از داده‌های DEM استخراج شده از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ منطقه به دست آمده است. بررسی این شاخص نشان می‌دهد که در شرق منطقه، شیب با درصد بالایی وجود دارد که می‌تواند خطر زمین‌لغزش و باز شدن درز و شکاف‌های سنگ را افزایش دهد اما در مناطق با درصد شیب کم، سرعت حرکت رواناب‌های سطحی کمتر بوده و زمان

### نتیجه گیری

گسل‌ها و شکستگی‌ها با تأثیراتی که بر روی واحدهای سنگی می‌گذرانند، علاوه بر فعالیت‌های لرزه‌ای سبب تحریک مخاطرات دیگری همچون زمین‌لغزه و فرونشست‌های ناگهانی می‌شود. از طرفی، سیمای‌های ریخت‌زمین‌ساختی ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی، سازه‌های سطحی را تحت تأثیر قرار داده و سبب ایجاد خسارت‌های مالی و جانی می‌گردد که شناسایی این مناطق و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آنها، دارای اهمیت فراوان می‌باشد. روستای حیرت واقع در شمال باختر مرزن آباد، از جمله مناطقی است که فرونشست و لغزش در دامنه‌های ناپایدار آن را تهدید می‌کند شناسایی عوامل زمین‌شناسی تأثیرگذار در شکل‌گیری این ناپایداری‌ها می‌تواند در انتخاب محل مناسب برای احداث سازه‌ها و کاهش تلفات ناشی از آن مؤثر باشد.

محدوده مورد مطالعه، اغلب شامل سازندهای آهکی و کربناتی کراتسه و نیز رسوبات کواترنری می‌باشد. وجود واحدهای مارنی به ویژه در دامنه‌های شمالی و جنوبی منطقه، سبب تسهیل در لغزش و ناپایداری دامنه‌ها می‌شود. از طرفی، واحدهای آهکی نیز به علت انحلال پذیری سبب توسعه حفرات زیرزمینی می‌گردد. انباشته‌های کواترنری منطقه مورد بررسی، نشان دهنده فرونشست‌های جوان در این منطقه می‌باشد که تبدیل به دریاچه‌های کوچک شده‌اند. با توجه به نقش گسل‌ها در سیمای ریخت‌شناختی منطقه از جمله ایجاد پهنه‌های خرد شده، گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

با توجه به روند و موقعیت گسل‌ها در منطقه، به دو دسته گسل‌های تقریباً خاوری‌باختری و گسل‌های شمال‌خاور- جنوب باختر تقسیم می‌شوند. وجود این گسل‌ها سبب تسهیل در نفوذ آب به ترازهای پایین‌تر گردیده و سبب افزایش پتانسیل شکل‌گیری حفرات انحلالی زیرزمینی گردیده و به عنوان یک عامل افزایش دهنده خطر فرونشست محسوب می‌گردد. عامل شیب منطقه، نقش دو گانه‌ای در این محدوده بازی می‌کند: افزایش شیب باعث ایجاد ناپایداری در دامنه‌ها گردیده و خطر زمین‌لغزه را تشدید می‌کند و کاهش شیب، سبب کم شدن سرعت حرکت رواناب‌های سطحی و نفوذ آنها به عمق می‌گردد. با دور شدن از مرز محدود و حرکت به سمت مرکز، منطقه تقریباً مسطح مشاهده می‌شود که توسط گسل‌ها خرد شده‌اند و فرصت کافی برای نفوذ آب و شکل‌گیری حفرات زیر زمینی و فرونشست وجود دارد.

با توجه به نقش عوامل مختلف در تحلیل و پهنه بندی مناطق مستعد زمین لغزش از جمله: فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شیب، جهت شیب و لیتولوژی، نقشه پهنه بندی پتانسیل فرونشست برای منطقه تهیه گردید. بدین منظور از روش AHP به منظور تحلیل عوامل مؤثر در فرونشست استفاده گردید. نتایج حاصل از برداشت‌های صحرایی و همچنین نقشه تهیه شده مناطقی به رنگ قرمز دیده می‌شود این مناطق جز مناطق پرخطر می‌باشد و پیشنهاد می‌شود دکل در این منطقه به ویژه در دو نقطه خطرناک که در نقشه شماره ۹ به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند، جا به جا گردند. در بحث آمایش زمین و برنامه‌ریزی برای توسعه یک منطقه عدم توجه به خصوصیات زمین در آینده خسارت‌های جبران ناپذیری به وجود می‌آورد. در منطقه مورد مطالعه عدم تهیه نقشه‌های مختلف ایندکس خطر از جمله نقشه پتانسیل فرونشست سبب احداث سازه‌ها در مناطق پر خطر و در نتیجه تخریب کلی آنها شده است.

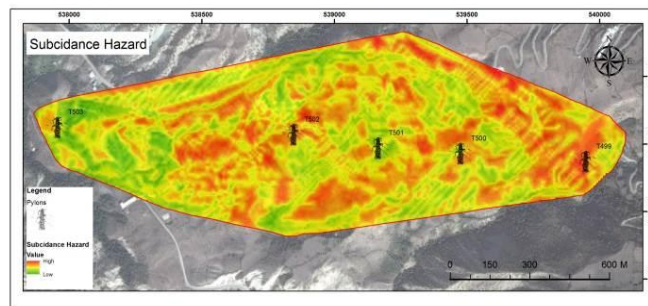
جدول ۲. ماتریس شاخص‌های تأثیر گذار بر زمین لغزش

فاصله از گسل	فاصله از جاده	فاصله از آبراهه	شیب	جهت شیب	حوضه	شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل
۶	۶	۶	۴	۲	۲	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵
۶	۶	۶	۴	۲	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
۶	۶	۶	۲	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
۳	۳	۳	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
۳	۳	۱	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶
۳	۳	۱	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶
۱/۵	۱	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶
۱	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶

با توجه به نقشه‌های تهیه شده و تلفیق آنها با متد وزنی، نقشه پتانسیل فرونشست برای منطقه به دست آمد. همان‌طور که از (شکل ۹) پیداست، مناطق با رنگ قرمز پرخطرترین و ناپایدارترین محدوده‌ها را نشان می‌دهند که اغلب در قسمت‌های جنوبی واقع هستند و مناطق با خطر کم، با رنگ زرد نشان داده شده‌اند. با توجه به نقشه به دست آمده، در محدوده بالا باید اقدامات لازم در جهت بهسازی و یا جابه‌جایی سازه‌های حساس که در این مناطق قرار دارد صورت پذیرد.

جدول ۳. مقادیر وزنی شاخص‌های تأثیرگذار بر اساس ماتریس جدول (۱)

شاخص‌ها	وزن شاخص‌ها
زمین شناسی	۰/۳۲۱
جهت شیب	۰/۲۶۳
حوضه	۰/۱۹۳
شیب	۰/۰۹۶
فاصله از آبراهه	۰/۰۵۷
فاصله از جاده	۰/۰۳۵
فاصله از گسل	۰/۰۳۲



شکل ۹. نقشه پهنه بندی پتانسیل فرونشست در منطقه مورد مطالعه. مناطقی که با رنگ قرمز مشخص شده است نشان دهنده نقاط با خطر ناپایداری بالا هستند و سازه‌های که در این مناطق قرار دارند با خطر تخریب مواجه هستند.

جلوگیری شود، از تغییرات شیب در سطح اجتناب گردد و از دفع فاضلاب واحدهای صنعتی به صورت چاه سپتیک جلوگیری به عمل آید.

با توجه به داده‌های این پژوهش مناطق امن معرفی گردید که از پایداری نسبی برخوردار است. همچنین پیشنهاد می شود در مناطقی که با خطر فرونشست مواجه هستند با اجرای سیستم‌های زهکشی مناسب از نفوذ آب به عمق

#### منابع

- وحدتی دانشمند، ف. ۱۳۷۹. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مرزن آباد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- صابری، عظیم، رنگرن، ک، مهجوری، ر، کشاورزی، مهر، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تاق‌دیس کمستان استان خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز، زمستان ۹۱، چاپ ۶، صفحه ۱۱-۲۰.
- محمودی دهشتران، س، حجت‌آ، رنجبر، ج، کریمی نسب، س، تعیین محدوده‌های در معرض نشست حاصل از وجود قنات‌های پنهان در محدوده دانشگاه شهید باهنر کرمان با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز، بهار ۹۵، شماره ۱۹، صفحه ۷۵-۸۱.
- Abidin, H. Z., Gumilar, I., Andreas, H., Murdohardono, D., & Fukuda, Y. (2013). On causes and impacts of land subsidence in Bandung Basin, Indonesia. *Environmental earth sciences*, 68(6), 1545-1553.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., & Kanno, T. (2005). Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), 432-445.
- Cahalan, M. D. (2015). Sinkhole Formation Dynamics and Geostatistical-based Prediction Analysis in a Mantled Karst Terrain (Doctoral dissertation, University of Georgia).
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.
- Galve, J. P., Gutierrez, F., Remondo, J., Bonachea, J., Lucha, P., & Cendrero, A. (2009). Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*, 111(3), 160-172.
- Gorsevski, P. V., Jankowski, P., & Gessler, P. E. (2006). Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics*, 35(1), 121.
- Li, S., Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Ding, W., Zhong, S., ... & Lin, Y. (2007). Forecast of Karst-fractured groundwater and defective geological conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2, 000.
- Mezoghi, T. H., Akhir, J. M., Rafek, A. G., & Abdullah, I. (2012). Analytical hierarchy process method for mapping landslide susceptibility to an area along the EW highway (Gerik-Jeli), Malaysia. *Asian Journal of Earth Sciences*, 5(1), 13.
- Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G., & Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering geology*, 167, 59-71.
- Phukon, P., Chetia, D., & Das, P. (2012). Landslide susceptibility assessment in the Guwahati city, Assam using analytic hierarchy process (AHP) and geographic information system (GIS). *Int J Comput Appl Eng Sci*, 2(1), 1-6.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process (Vol. 175). Springer Science & Business Media.
- Stokes, T., Griffiths, P., & Ramsey, C. (2010). Karst Geomorphology, Hydrology, and Management. *Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia. BC Min. For. Range*, 66, 373.
- Waltham, T. (2008). Sinkhole hazard case histories in karst terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41(3), 291-300.
- Wu, C. H., & Chen, S. C. (2009). Determining landslide susceptibility in Central Taiwan from rainfall and six site factors using the analytical hierarchy process method. *Geomorphology*, 112(3), 190-204.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.
- Zeitoun, D.G., Wakshal, E., 2013. Land subsidence analysis in urban areas: the Bangkok metropolitan area case study. Springer Science & Business Media.
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243-255.