

## مقایسه تطبیقی عملکرد الگوریتم‌های CODAS, MABAC در پهنه بندی خطر فرونشست زمین با بهره گیری از شاخص‌های زیست محیطی (مطالعه موردی: محدوده حریم شهرهای استان البرز)

صیاد اصغری سراسکانرود\* - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. فریبا اسفندیاری - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. مهدی فعال نذیری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. بتول زینالی - استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹      تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

### چکیده

یکی از مخاطراتی که طی سال‌های اخیر در بسیاری از مناطق رخ داده، مخاطرات ناشی از فرونشست است. محدوده شهری و مرکزی استان البرز نیز، در طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح آبهای زیرزمینی مواجه بوده که این عامل سبب گردیده تا این منطقه در معرض وقوع مخاطره فرونشست قرار گیرد. هدف این پژوهش بررسی و تحلیل مهمترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مرکزی و شهری استان البرز و مشخص کردن سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر فرونشست خواهند شد، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های چند معیاره CODAS و MABAC است. ضمناً در بحث پهنه بندی به نقش عوامل محیطی (آب‌های زیرزمینی، کاربری اراضی، افت آب، سطح آب، عمق آب ...) توجه ویژه‌ای صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه بندی خطر فرونشست؛ معیارهای عمق آب، کاربری اراضی و شیب و زمین‌شناسی با ضریب وزنی ۰/۱۵۱، ۰/۱۴۷، ۰/۴۳ و ۰/۱۳۶ مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه می‌باشند. با توجه به نقشه پهنه بندی فرونشست با تکنیک MABAC به ترتیب ۲۸۴/۱۸ و ۲۲۳/۱۴ کیلومتر مربع و تکنیک CODAS ۲۳۶/۰۹ و ۵۱۲/۳۴ کیلومتر مربع در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. نتایج اعتبارسنجی با استفاده از نمودار Roc نشان داده که الگوریتم MABAC، با سطح زیر منحنی ۰/۸۹۱، در برآورد حساسیت فرونشست محدوده مورد مطالعه نسبت به الگوریتم CODAS با سطح زیر منحنی ۰/۷۱۴، از صحت بیشتر و در نتیجه قابلیت بالاتری برخوردار است. در نهایت می‌توان گفت مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست در محدوده شهری استان البرز، بهره‌ی بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب است. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک، در زمینه حفاظت و مدیریت منابع آبی و مخاطرات طبیعی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.

واژگان کلیدی: وزن دهی، استان البرز، فرونشست، CODAS، MABAC.

## مقدمه

پوسته جامد زمین طی تاریخ زمین شناسی ثابت نبوده بلکه تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی به طور دائم در حال تغییر شکل است. این تغییرات ارتفاعی به صورت فرونشست و بالا آمدگی به میزان قابل توجهی باعث افزایش روند مخاطرات محیطی شده که اثر این مخاطرات باعث خسارات شدید به محیط طبیعی و عوارض انسانی می شود (زارع کمالی و همکاران، ۱۳۹۶). بر پایه تعریف انستیتو زمین شناسی ایالت متحده آمریکا<sup>۱</sup> پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش<sup>۲</sup> یا فرونشست رو به پایین سطح زمین است که می تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد و در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی و آنی رخ می دهد (سازمان زمین شناسی آمریکا، ۲۰۱۱). مهمترین علت فرونشست منطقه ای سطح زمین در حوضه های رسوبی مناطق خشک و نیمه خشک، متراکم شدن و فشردگی رسوبات در اثر برداشت بی رویه از منابع سفره های آب زیرزمینی است (ژو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). چنانچه لایه های رسی آبدار بین لایه های ماسه ای قرار گرفته باشند، این پدیده به صورت گسترده تر و حادثر مشاهده خواهد شد (لیو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). فرونشست زمین معمولاً با تأخیر زمانی پس از برداشت طولانی مدت منابع آب زیر زمینی رخ می دهد (اسکات<sup>۵</sup>، ۱۹۷۹). مقدار فرونشست به ضخامت و تراکم پذیری لایه ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش وارده بستگی دارد (سیگنا<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش موثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر زمان بر است؛ بنابراین به دنبال کاهش سطح آب پیژومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد (پیتیر<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). فرونشست ناشی از افت سطح سیال عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه های شن و ماسه قرار دارد صورت می گیرد (صالحی و همکاران، ۲۰۱۳). در چنین شرایطی تراکم غیرالاستیک ناشی از افزایش تنش مؤثر در خاک رخ می دهد و چینش دانه های خاک به هم خورده و ضخامت لایه های عمودی کم می شود (داودی جم و همکاران، ۲۰۱۵). در مناطقی که رسوبات ضخامت چندانی ندارد و برداشت آب زیرزمینی به صورت بی رویه ادامه دارد، خطواره ها و شکاف ها در سطح اراضی مخصوصاً اراضی کشاورزی مشاهده می شود که به نام پدیده شق شناخته شده است (ژانگ<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از فرونشست زمین ممکن است سبب ضرر اقتصادی چشمگیر و خسارت گستردهای در ساختمان ها، جاده ها و زیرساخت ها شود (علیپور، ۲۰۰۸، چاترجی، ۲۰۱۵). فرونشست زمین به عنوان پدیده ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است (شریفی کیا، ۱۳۹۰). در ایران فرونشست زمین بیش از ۳ دهه سابقه دارد. حاکمیت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره برداری های رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیرساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است (شریفی کیا، ۱۳۹۰). از حدود سه دهه قبل توسعه کشاورزی های تجاری و معادن، حفر بی رویه چاه های آب و برداشت بیش از ظرفیت قابل ترمیم دشت ها، روند فرونشست زمین در اراضی زراعی دشت های مرکزی ایران را شکل داد امروزه سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم های پشتیبانی تصمیم گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند. و همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه ها از نظر درگیری های

1. United States Geological Survey (USGS)

2. collapse

3. zuo

4. liu

5. oskat

6. signa

7. piter

8. zhang

عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود. (بوخیر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶) (اهر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو<sup>۳</sup> و همکاران ۲۰۱۵)، (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۱۴). لذا می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS پرداختند و نتیجه این پژوهش نشان داد بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، در پهنه استان‌های تهران و البرز به ارزیابی خطر فرونشست زمین با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش AHP پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، مناطق غرب و جنوب غربی تهران و همچنین دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز از جمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند و عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی عمده دلیل فرونشست در محدوده باشد. باروق و فتح اله زاده (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در کلان‌شهر کرج در بازه زمانی (۲۰۱۴ و ۲۰۲۱) پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد در کلان‌شهر کرج حداقل مقدار تغییرات سطح زمین بین ۱۴۵- تا ۱۵ میلی‌متر بوده است و بیشترین میزان فرونشست در بخش غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مهرشهر رخ داده است که مقدار آن ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست شهرستان نمین در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ با استفاده از تداخل سنجی راداری و تکنیک چندمعیاره آراس پرداختند نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، در بازه زمانی مورد بررسی ۰/۳۷ میلی‌متر فرونشست در شهرستان نمین ایجاد گردیده که بیشترین مقدار فرونشست در بخش مرکزی و شمال غرب و شمال شرق شهرستان متمرکز است. باروق و فتح اله زاده (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی ارتباط فرونشست زمین و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری در شهر مشهد در بازه زمانی ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ پرداختند که نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد بیشترین میزان جابه‌جایی زمین بین ۷۷- میلی‌متر تا ۸+ میلی‌متر بوده که مناطق دارای فرونشست در بخش‌های شمالی شهر مشهد قرار گرفته‌اند. گامبولاتی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. مین<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری در بازه سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل موثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS در بازه سال‌های ۲۰۱۴ الی ۲۰۱۶ پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری می‌باشد و این

1. Bu khiyr

2. ahar

3. jurjio

4. gambolati

5. min

6. huang

فرونشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب های زیرزمینی دارد. هیوسین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) در کراچی در بخش جنوبی پاکستان، در امتداد ساحل دریای عرب، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی SAR به پایش میزان فرونشست پرداختند که به این نتیجه دست یافتند که میزان فرونشست در محدوده بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی متر در سال بوده و استخراج آب های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی علت اصلی فرونشست در منطقه مورد مطالعه است. لیو و همکاران (۲۰۲۳). به ارزیابی فرونشست زمین در دلتای رودخانه مروارید غربی چین با استفاده از روش insar و تصاویر sentinel-1 بین سال های ۲۰۱۶-۲۰۲۱ پرداختند. نتایج نشان داد فرونشست زمین در نواحی با کاربری آبی پوری، کاربری شهری و کشاورزی رخ داده است. بخاری<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره ای sentinel-1 پرداختند. نتایج نشان داد میزان فرونشست در شهر گوادر و بلوچستان (پاکستان) در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ برابر با ۹۲ میلی متر در سال می باشد.

چندسالی است فرونشست با توجه به روند رو به رشد جمعیت و مهاجرت در استان البرز به مرز هشدار رسیده و این پدیده یکی از بحران های اصلی استان به شمار می رود؛ بحرانی که تا کنون جدی گرفته نشده است. مهم ترین دلیل فرونشست در استان البرز استفاده بیش از حد و نادرست از منابع آبی زیرزمینی و مرگ آبخوان هاست. دشت های کرج و ساوجبلاغ و نظرآباد و اشتهارد از جمله مناطق پرخطر استان البرز هستند. که طبق مطالعات سازمان نقشه برداری کشور سالانه بین ۲۴ تا ۳۰ سانتیمتر فرونشست دارند<sup>۳</sup>. حریم شهری استان البرز در ناحیه دشتی و کشاورزی ایران واقع شده و به سبب خشکی محیط و نبود منابع آب سطحی، حیات و فعالیت های اقتصادی آن به شدت به منابع آب زیر زمینی وابسته است. به این سبب، تمرکز بهره برداری های صنعتی- کشاورزی و آب شرب بر منابع آب دشت، بیابان منفی و افت تراز آب زیر زمین را به دنبال داشته است. افت تراز آبی در رسوبات آبرفتی دشت به زایش مسئله فرونشست زمین در استان البرز منجر شده است. همانطور که بررسی پیشینه پژوهشی نشان می دهد، از یکسو مطالعات انجام شده در محدوده حریم شهری استان البرز مطالعات (منتظربون و اصلانی، ۱۳۹۸) و (باروق و فتح اله زاده سال ۱۴۰۱)، با هدف برآورد نرخ فرونشست بر پایه بهره گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری و الگوریتم چند معیاره (AHP) استوار بوده است و تاکنون مطالعاتی به منظور پهنه بندی با الگوریتم های CODAS, MABAC در حریم شهری استان البرز از لحاظ پتانسیل رخداد فرونشست انجام نشده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه فرونشست، از جمله مخاطراتی است که دارای طیف وسیعی از گزینه ها از نظر درگیری های عینی و معیارهای چندگانه، هستند، یکی از روش های کاربردی و موردتوجه در طی سال های اخیر، استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره است؛ لذا هدف این مطالعه، شناخت و تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست محدوده شهری و مرکزی استان البرز و مشخص کردن سطوح مستعد فرونشست با ارائه نقشه پهنه بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم های تحلیل چند معیاره MOBAC و CODAS و مقایسه ای دو روش با بهره از سیستم های اطلاعات جغرافیایی است.

## داده ها و روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

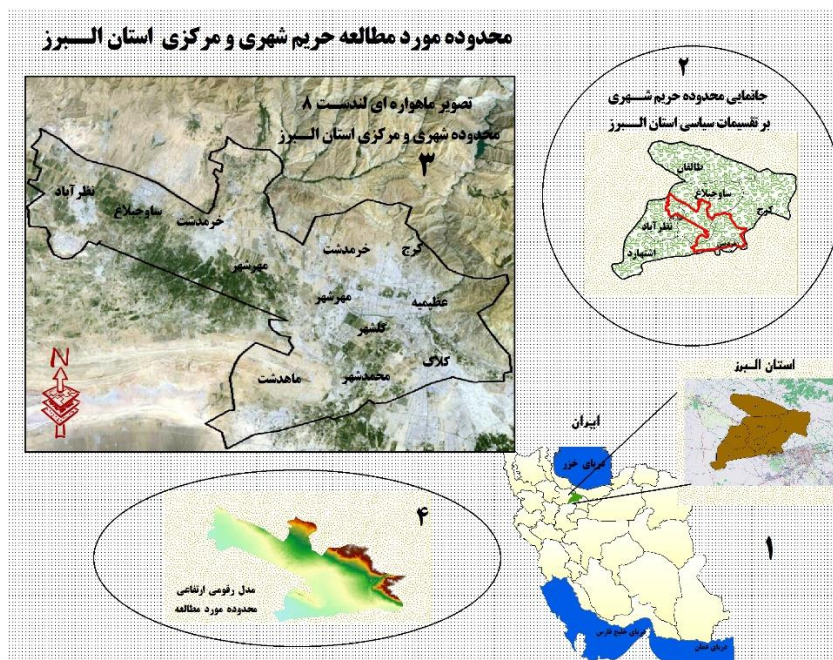
کرج یکی از کلانشهرهای ایران و همچنین مرکز استان البرز است محدوده و حریم شهرهای استان البرز (مصوب شورای عالی معماری و شهرسازی استان البرز)، از شمال به کوه های البرز، از جنوب به رشته کوه های مرکزی، از غرب به دشت هشتگرد و از شرق به دشت تهران محدود می باشد. که در دامنه های جنوبی البرز میانی و شمال غرب شهر تهران با

<sup>1</sup>. husin

<sup>2</sup>. bukhai

<sup>3</sup>. <https://en.ncc.gov.ir/>

وسعتی حدود ۶۵۶ کیلومتر مربع که از نظر ژئومورفولوژی به واحدهای کوهستان، تپه، دشت سر و مخروط افکنه تقسیم می‌شود. مساحت محدوده مورد مطالعه ۸۵۴/۲ کیلومتر مربع بوده و بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۰ درجه تا ۵۱ درجه و ۱۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۶۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۹۵ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). محدوده شهری و مرکزی استان البرز را می‌توان محل اجتماع رسوبات حوضه‌های دو رودخانه کرج و کن دانست و رسوبات مرکز دشت به صورت ضخیم و ریز دانه (رس و ماسه ریز) می‌باشد. واحد دشت سر نیز ادامه لایه سنگ اصلی کوهستان است که به شکل سطح مقعری در ارتفاعات ظاهر می‌شود و قسمت‌های عمده‌ای از مناطق شهری کرج بر روی لندفرم دشت سر گسترش یافته است (باروق و فتح اله زاده، ۱۴۰۱). از نظر آب وهوایی کرج تحت تأثیر ارتفاعات البرز و دره چالوس و رودخانه کرج قرار دارد که موجب خنک و مرطوب تر شدن این منطقه نسبت به تهران می‌گردد و این تمایز تقریباً در تمام طول سال مشاهده می‌شود. علت اختلاف دمای کرج نسبت به تهران بخصوص در شب‌ها به سبب نزدیکی کرج به ارتفاعات شمالی و سرد شدن شبانه این دامنه‌ها و وزش نسیم کوه به دشت می‌باشد. جمعیت استان البرز طبق اعلام مرکز ملی آمار ایران در سال ۱۳۹۵ برابر با ۵،۵۹۵،۴۹۲ نفر بوده است که از این جهت و علیرغم جدا شدن فردیس از مناطق دوازده گانه شهری کرج و معرفی آن به عنوان شهرستان مستقل کماکان پس از شهرهای تهران، مشهد به عنوان سومین شهر پرجمعیت ایران به شمار می‌رود. این شهر در میان کلان شهرهای ایران با رشد جمعیت سالانه ی ۱۴/۳ درصد بالاترین رشد جمعیت را دارد که از این جهت بررسی مخاطرات پیش روی این شهر بسیار حائز اهمیت است.

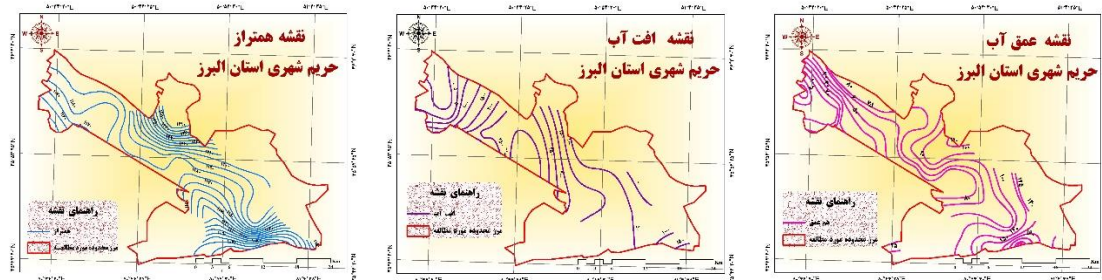


شکل ۱. نقشه موقعیت حریم شهری و مرکزی استان البرز

### داده های تحقیق

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چند معیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌های افزار GIS، Arc, Ecognition ENVI، Idrisi و Excel بهره‌گیری شده است. در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط فرونشست

منطقه مورد مطالعه و وضعیت منابع آب زیرزمینی اقدام به بررسی افت آب زیرزمینی گردید. بدین منظور اطلاعات مربوط به ۳۶ چاه از چاه های مشاهده ای سطح تراز پیزومتری محدوده شهری و مرکزی استان البرز از سازمان آب منطقه ای استان البرز تهیه شد، (شکل ۲) مربوط به نقشه هم عمق آب و هم تراز آب محدوده مورد مطالعه می باشد. پس از بررسی نوسان تراز سفره محدوده شهری استان البرز، در ۷ سال اخیر، مقدار افت سالانه آب زیرزمینی برآورد و استخراج گردید (شکل ۳)



شکل ۲. نقشه عمق آب و همتراز محدوده مرکزی و شهری استان البرز

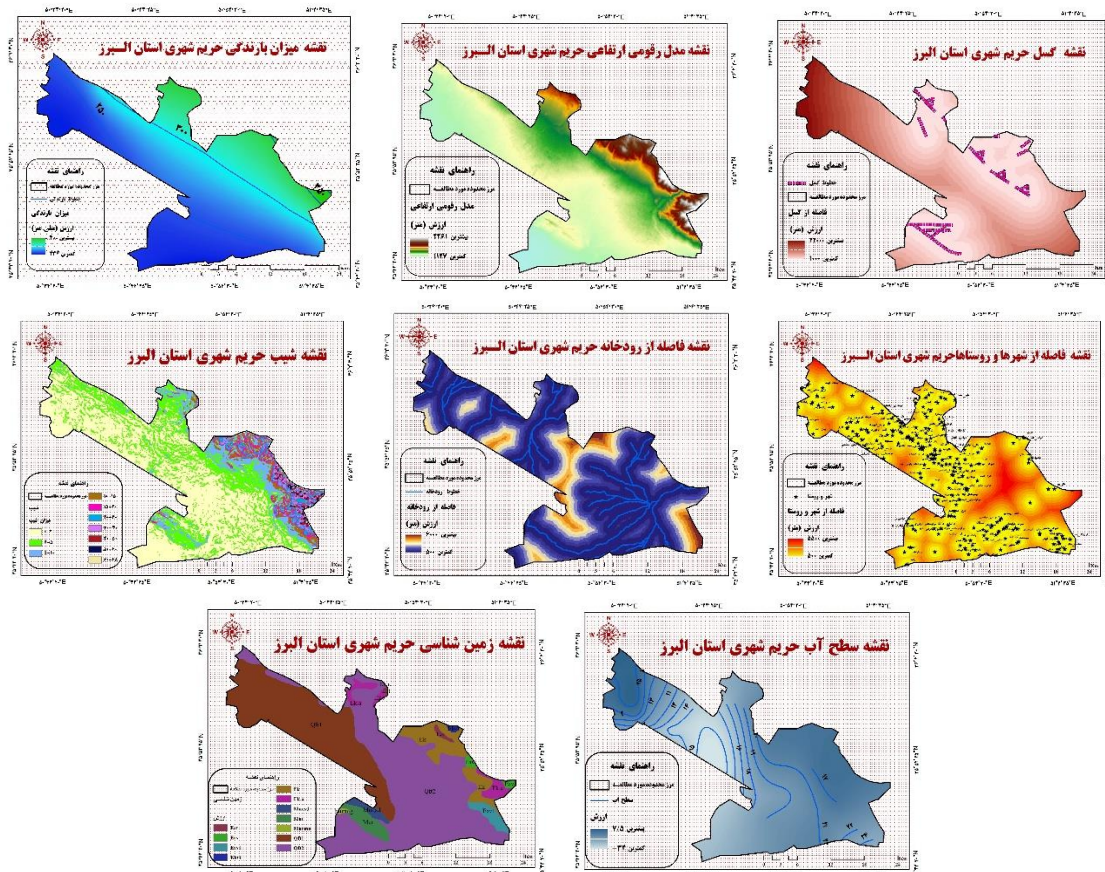
شکل ۳. تصویر میانی نقشه افت آب محدوده شهری استان البرز

جهت پهنه بندی، خطر فرونشست، در مرحله جمع آوری داده ها، ابتدا باید مؤلفه های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن ها داده ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از شهر و روستا، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی)، با بررسی نمونه مطالعات انجام شده در رابطه با خطر فرونشست که توسط دیگر پژوهشگران صورت پذیرفته و عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست را بیان داشته اند مانند (کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، گرچ و همکاران (۲۰۲۲)، باروق و همکاران (۱۴۰۲) با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی شد (شکل ۴). سپس در مرحله بعد لایه های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط ARC GIS تهیه گردید. لایه های اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه رودخانه های استان البرز، استخراج شد. لایه های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، داندود شده از سایت<sup>۱</sup>، تهیه و لایه های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ ها) و گسل ها، با رقومی سازی از روی نقشه زمین شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه بارش محدوده نیز، با استفاده از نقشه هم بارش استان البرز، ترسیم و سپس با اجرای مراحل تکنیک های MOBAC، CODAS نسبت به تهیه نقشه پهنه بندی خطر فرونشست اقدام گردید. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت<sup>۲</sup> استفاده گردید. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری و رادیومتیکی بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم افزار Envi انجام شد و به منظور استخراج نقشه های مربوطه از نرم افزار ۱۰٫۵ ARCGIS استفاده شد. برای طبقه بندی کاربری اراضی از روش طبقه بندی شیء گرا در نرم افزار ۶۴ developer ecognition استفاده گردید. همچنین به منظور برآورد داده های واقعی با استفاده از روش های آماری از Google Earth جهت مقایسه داده ها بهره گرفته شد. در روش طبقه بندی شیء گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردید و پیکسل ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه بندی شده و طبقه بندی تصویر براساس این قطعه ها انجام گردید. در قطعه بندی پیکسل ها توسط الگوریتم های مختلف، با نسبت های مختلف طیفی و شکلی طبقه بندی و براساس ویژگی های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته بندی

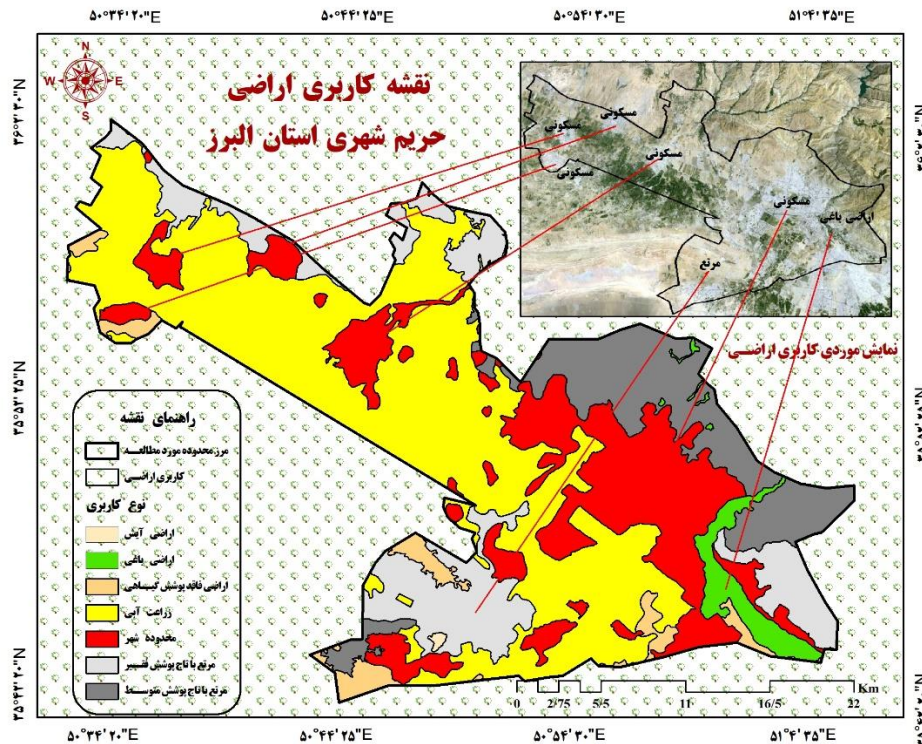
<sup>۱</sup> vertex.daac.asf.alaska.edu

<sup>۲</sup> earthexplorer.usgs.gov

شدند. طی این فرآیند شی‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی زاده و همکاران ۲۰۱۰). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان دهنده اشیا با ابعاد مختلف می باشند، تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه بندی شده دارای مقیاس ۴۵٪، شکل ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵ انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد کلاس‌های موردنظر در طبقه بندی تعیین شی‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه بندی با استفاده از نزدیک ترین همسایه و روش درخت تصمیم گیری صورت پذیرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه بندی در سال ۲۰۲۳ با صحت کلی ۹۲ درصدو ضریب کاپا ۰/۸۹ صورت پذیرفت (شکل ۵) . در ادامه توضیحاتی مختصر در خصوص تکنیک های CODAS, MABAC و ارزیابی کارایی مدل های منحنی ROC ارائه می گردد.



شکل ۴. نقشه های معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه پوشش اراضی محدوده و حریم شهرهای استان البرز

## روش تحقیق

### استاندارد سازی فازی لایه‌ها

در پیاده سازی تمامی الگوریتم های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه بندی مکانی خطر فرونشست در حریم شهری استان البرز، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد نمودن داده ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق میگیرد (مالچفسکی، ۱۳۸۵). در تحقیق حاضر با استفاده از امکاناتی که در تابع Fuzzy از نرم افزار IDRISI Klimanjarو وجود دارد برای استانداردسازی نقشه‌هایی که به صورت نقشه‌های معیار تهیه شده‌اند به تناسب، از توابع عضویت Sigmoidal و Linear استفاده شده و قالب‌هایی چون عضویت افزایشی به صورت یکنواخت، کاهششی به صورت یکنواخت و سایمتریک مورد نظر بوده است. در رابطه با هر معیار، دامنه‌ای از مقادیر در نظر گرفته شده است که اگر مقادیر اندازه‌گیری شده از معیار در پیکسل‌ها بیشتر یا کمتر از مقادیر تعیین شده در دامنه باشد به منزله‌ی درجه‌ی عضویت صفر در دامنه‌ی تعیین شده، تلقی گردیده و در نتیجه میزان مطلوبیت برابر با صفر می‌شود. از سوی دیگر، اگر مقادیر اندازه‌گیری شده از معیار در پیکسل‌ها با درجه‌ی کامل عضویت در دامنه‌ی تعیین شده، منطبق باشد به معنای مطلوبیت حداکثر در آن معیار است. سایر سطوح مطلوبیت نیز در حد فاصل درجه‌ی عضویت صفر و درجه‌ی عضویت حداکثر قرار دارد. تغییرات درجه‌ی عضویت می‌تواند در دامنه‌ی  $(0 \leq D\mu(X) \leq 1)$  و دامنه‌ی  $(0 \leq D\mu(X) \leq 255)$  نشان داده شود. از حالت دوم در تهیه‌ی نقشه‌های استاندارد شده‌ی فازی، به کار گرفته شده است. نقشه‌ی مبتنی بر درجه‌ی عضویت در دامنه‌ی عدد فازی، یک نقشه‌ی استاندارد شده و در عین حال یک نقشه‌ی ارزش‌گذاری شده است که در آن درجات بالای عضویت، نشان‌گر مطلوبیت بیشتر پیکسل است (شهابی و نیازی، ۱۳۸۸).

جدول ۱. توابع فازی سازی لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با کاهش مقدار شیب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور از شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور خطوط گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
بارش	با کاهش مقدار بارش، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با کاهش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی

### وزن دهی کرتیک<sup>۱</sup>

در تحقیق حاضر به منظور تعیین وزن معیارهای مطرح در پهنه‌بندی پتانسیل وقوع فرونشست از روش کرتیک، استفاده شده است. بر همین اساس مفروضات پایه‌ای این روش، در تعیین وزن هر یک از معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش، لحاظ گردید (دیاکولاک<sup>۲</sup>، ۱۹۹۵، علی‌نژاد و خلیلی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹). در این روش، داده‌ها براساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در راستای انجام مراحل وزندهی کرتیک ابتدا در محیط ادیسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل، با استفاده از تابع ریجرس<sup>۴</sup>، به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل، اقدام گردید.

پس از محاسبه‌ی انحراف معیار عوامل و معیارهای مورد بررسی، ماتریس مقارنی به ابعاد  $m \times m$  ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی<sup>۵</sup> بین بردارهای تشکیل شده می‌باشد. با تعیین پارامترهای فوق، تضاد موجود بین معیار  $j$  با معیارهای دیگر از روی (رابطه ۱)، محاسبه می‌شود:

$$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) C_{jk} = \text{رابطه ۱.}$$

که در آن  $C_{jk}$  معرف مجموع تضاد معیار  $j$  با معیارهای  $k$  است که از  $k=1$  شروع شده و تا  $k=m$  ادامه دارد و  $r_{jk}$  همبستگی بین دو معیار  $k$  و  $j$  را نشان می‌دهد. به طوری که قبلاً عنوان شد، در مسائل چند معیاره، اطلاعات در ارتباط با میزان تداخل و تضاد بیان می‌شود. بنابراین، میزان اطلاعات عامل  $j$  را با استفاده از (رابطه ۲)، می‌توان محاسبه نمود.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \text{رابطه ۲.}$$

1. CRITIC

2. Diakoulaki et al

3. Alinezhad and Khalili

4. REGRESS

5. Correlation Coefficient

که در آن  $C_j$ ، معرف میزان اطلاعات معیار  $j$  و  $\delta$  انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار  $j$  را نشان می‌دهد. با توجه به روابط فوق، معیارهایی که دارای  $C_j$  بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عاملی مانند  $j$  از (رابطه ۳)، تعیین می‌گردد.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۳.}$$

که در آن  $W_j$  معرف وزن معیار  $j$ ، و  $C_k$  معرف میزان اطلاعات مجموع معیارهای  $k$  است که از  $k=1$  شروع شده و تا  $k=m$  ادامه دارد (دیاکولاکی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵، علی‌نژاد و خلیلی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹).

### تکنیک ماباک<sup>۳</sup>

۱- تعیین معیارها و گزینه های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه های پژوهش است.  
 ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: دومین گام تشکیل ماتریس تصمیم است. ماتریس تصمیم در این روش به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است (رابطه ۴).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۴.}$$

۳- نرمال سازی ماتریس تصمیم: در این گام باید ماتریس تصمیم مرحله دوم را نرمال کرد. در این مطالعه ارزش گذاری و نرمال سازی با استفاده از تابع عضویت فازی انجام شد. درایه‌های ماتریس تصمیم با  $x_{ij}$  و درایه‌های ماتریس تصمیم نرمال با  $n_{ij}$  نمایش داده می‌شود (رابطه ۵).

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & & n_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۵.}$$

۴- وزن دار کردن ماتریس نرمال با روش کرتیک: در این گام با استفاده از (رابطه ۶)، ماتریس نرمال را وزن دار می‌کنیم. در رابطه ۶،  $W$  وزن معیارها است  $n_{ij}$  عناصر ماتریس نرمال شده ( $N$ ) را نشان می‌دهد،  $w_i$  ضرایب وزنی معیار را نشان می‌دهد.

$$V_{ij} = W_j * (n_{ij} + 1) \quad \text{رابطه ۶.}$$

۵- تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس ( $g$ ): در این بخش با استفاده از (رابطه ۷)، برای هر معیار یک مرز ناحیه شباهت مشخص می‌شود. در واقع باید از امتیازات هر معیار میانگین هندسی گرفته شود تا مرز ناحیه شباهت بدست آید.

$$g_i = \Pi(V_{ij}) \quad \text{رابطه ۷}$$

بنابراین اگر  $n$  معیار داشته باشید یک ماتریس  $G 1 \times n$  به صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۸):

$$G = [g_1. g_2. \dots. g_n] \quad \text{رابطه ۸.}$$

۶- محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از (رابطه ۹)، فاصله گزینه‌ها را تا ناحیه  $g$  بدست می‌آید. در واقع باید ماتریس وزن دار را از ماتریس  $g$  کم کرد.

$$Q = V - G \quad \text{رابطه ۹.}$$

1. Diakoulaki et al

2. Alinezhad and Khalili

3. MABAC

پس از مشخص شدن ماتریس  $Q$ ، می‌توان با استفاده از حد بالایی مساحت ( $G+$ ) و حد پایینی مساحت ( $G-$ ) وضعیت هر گزینه را مشخص کرد. بر این اساس گزینه  $A_i$  متعلق به اجتماع مجموعه مذکور است. حد بالایی مساحت ( $G+$ ) ناحیه‌ای است که گزینه ایده آل مثبت در آن قرار دارد و حد پایینی مساحت ( $G-$ ) ناحیه‌ای است که گزینه ضد ایده آل در آن قرار دارد. میزان تعلق گزینه  $A_i$  به اجتماع بالا بر اساس (رابطه ۱۰)، بدست می‌آید. برای انتخاب گزینه  $A_i$  به عنوان بهترین فرم از مجموعه، لازم است که حداکثر معیارهای ممکن به منطقه تقریبی فوقانی ( $G+$ ) تعلق داشته باشد. مقدار بالاتر  $q_i \in G+$  نشان می‌دهد که گزینه جایگزین به گزینه جایگزین ایده آل نزدیک‌تر است، در حالی که مقدار پایین‌تر  $q_i \in G-$  نشان می‌دهد که گزینه جایگزین، به گزینه جایگزین ضد ایده آل نزدیک‌تر است.

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۰.}$$

۷- انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک، با استفاده از (رابطه ۱۱)، امتیاز نهایی هر گزینه را مشخص کرده و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

$$S_i = \sum(q_{ij}); i = 1.2 \dots n; j = 1.2 \dots m \quad \text{رابطه ۱۱.}$$

محاسبه مقادیر توابع معیار، توسط گزینه‌ها به عنوان مجموع فاصله‌های جایگزین از مناطق تقریبی مرزی  $q_i$  بدست می‌آید. با جمع کردن عناصر ماتریس  $Q$  در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها بدست می‌آید. در این رابطه  $n$  تعداد معیارها را نشان می‌دهد و  $m$  تعداد گزینه است (علی‌نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹).

## تکنیک کوداس<sup>۲</sup>

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است.  
۲- دومین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است. در ماتریس تصمیم روش کوداس نیز معیارهای آن ستون‌ها و سطرهای آن گزینه‌های پژوهش هستند. حالت کلی ماتریس تصمیم به صورت (رابطه ۱۲)، می‌باشد.

$$X = [x_{IJ}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & & x_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۲.}$$

۳- سومین گام استانداردسازی ماتریس تصمیم می‌باشد که در این مطالعه استانداردسازی و ارزش‌گذاری به صورت توأم با استفاده از روش فازی انجام شده است.

۴- چهارمین گام روش کوداس تشکیل ماتریس نرمال وزن دار است. یعنی باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کرد. این وزن را می‌توان از روش‌هایی از جمله روش آنتروپی شانون، روش AHP، ANP و CRITIC بدست آورد.

۵- در این گام باید فواصل اقلیدسی<sup>۳</sup> و تاکسی<sup>۴</sup> از ایده آل منفی را محاسبه نمود. این فواصل از (روابط ۱۳ و ۱۴) و بدست می‌آیند. در این روابط  $ns_j$  ایده آل منفی معیارها است.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad \text{رابطه ۱۳.}$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad \text{رابطه ۱۴.}$$

1. Alinezhad and Khalili

2. CODAS

3. Euclidean distance

4. Taxicab distances

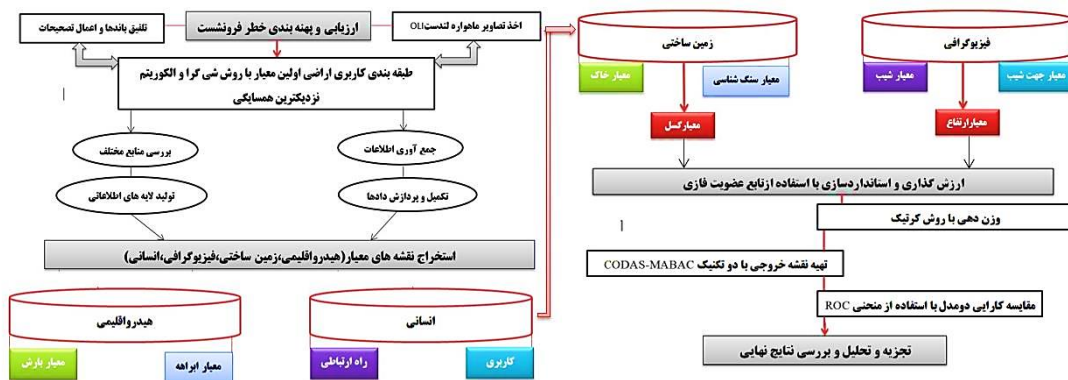
۶- در این گام باید ماتریس ارزیابی نسبی را با استفاده از رابطه ۱۲، ایجاد کنیم. که در این (رابطه ۱۵)،  $\Psi$  نشان دهنده یک تابع آستانه برای تشخیص برابری فاصله اقلیدسی دو گزینه است.

$$h_{iK} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad \text{رابطه ۱۵.}$$

۷- در این گام با جمع مقادیر  $h_{iK}$  گزینه ها، می توان آن ها را رتبه بندی نمود هر چه مقدار  $H_i$  بزرگتر باشد گزینه رتبه بهتری دارد (علی نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹).

### منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC<sup>۲</sup>)

منحنی تشخیص عملکرد نسبی، از مفیدترین و کارآمدترین روش ها در پیش بینی و تعیین دقت مدل سازی است (محمدی و پورقاسمی، ۱۳۹۶؛ محمدنیا و همکاران، ۱۳۹۷). منحنی ROC نموداری است که در آن نسبت پیکسل هایی که وقوع یا عدم وقوع خطر فرونشست به وسیله مدل به درستی پیش بینی شده روی محور افقی (مثبت درست<sup>۳</sup>) در برابر مقدار مکمل آن یعنی نسبت پیکسل هایی که نادرست پیش بینی شده اند (مثبت غلط<sup>۴</sup>) روی محور عمودی ترسیم می شود. در حقیقت منحنی ROC یک نمایش تصویری از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از نقاط برش (یا همان مقادیر مربوط به رده های خطر) است. مساحت زیر این منحنی AUC نام داشته و مدلی که بیشترین مقدار AUC را دارا باشد، دارای عملکرد نسبی بالاتری است (پونتیوس و اسچیندر، ۲۰۰۱). روند کلی پژوهش در شکل (۶) قابل مشاهده می باشد.



شکل ۶. روند نمای پژوهش

### نتایج

پس از استخراج معیارها (شکل ۴) و کاربری اراضی (شکل ۵) و فازی نمودن نقشه های هر یک از معیارها (اشکال ۷) و اعمال کردن وزن های مربوطه حاصل از روش کرتیک (جدول ۲، ۳، ۴ و ۵) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک موباک و کوداس، نقشه های پهنه بندی خطر فرونشست در ۵ طبقه ی بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ۸).

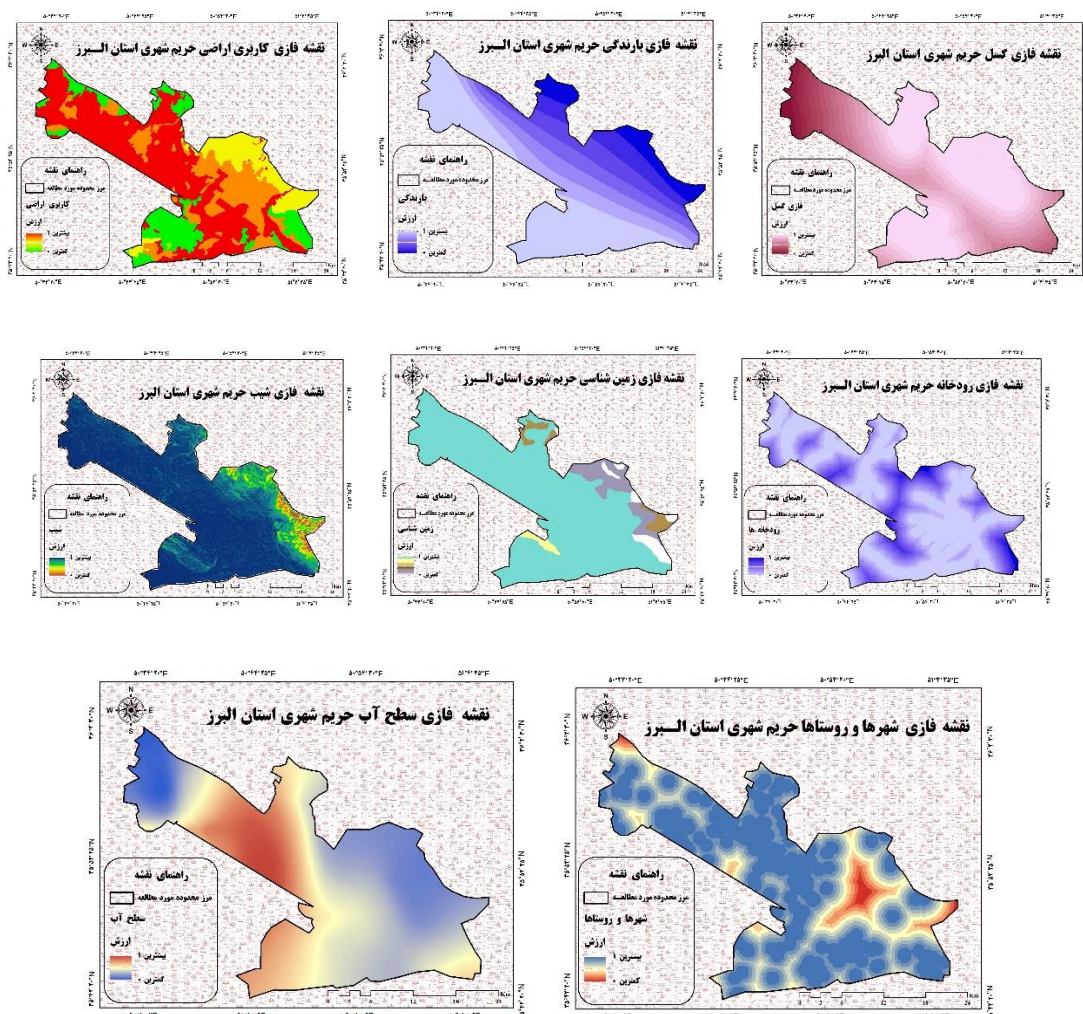
1. Alinezhad and Khalili

2. Receiver Operating Characteristic

3. Specificity

4. Sensitivity

5. Pontius & Schneider



اشکال ۷. نقشه فازی معیارهای محدوده خرم شهری و مرکزی استان البرز

با توجه به نتایج حاصله در جداول (۲، ۳، ۴ و ۵) به ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، بیشترین وزن و اهمیت را دریافت کردند و با توجه به اینکه در وزن‌دهی کرتیک، وزن معیارها، با توجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده، تعیین می‌گردد، استفاده از این روش، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسه زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> و فرایند تحلیل شبکه‌ای<sup>۲</sup> (که هدف اصلی در هر دو روش انتخاب بهترین گزینه براساس معیارهای مختلف از طریق مقایسه زوجی است) وجود دارد را برطرف نماید.

۱. AHP

۲. ANP

جدول ۲. ماتریس همبستگی معیارهای مطرح در پهنه بندی فروشست حریم شهری استان البرز

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
افت سطح آب	۱	۰/۲۷۴۱	۰/۳۲۵۴	۰/۳۱۲۳	۰/۳۸۸۷	۰/۴۲۵۴	۰/۳۹۶۵	۰/۳۹۸۶
زمین شناسی	۰/۲۷۴۱	۱	۰/۵۲۱۳	۰/۶۳۵۶	۰/۴۴۵۳	۰/۶۵۳۵	۰/۸۴۲۱	۰/۵۸۷۱
شیب	۰/۳۲۵۴	۰/۵۲۱۳	۱	۰/۵۷۸۱	۰/۴۸۷۶	۰/۷۹۸۴	۰/۷۰۱۲	۰/۸۷۷۶
کاربری اراضی	۰/۳۱۲۳	۰/۶۳۵۶	۰/۵۷۸۱	۱	۰/۵۶۷۴	۰/۴۸۶۵	۰/۷۵۵۳	۰/۵۱۵۶
فاصله از رودخانه	۰/۳۸۸۷	۰/۴۴۵۳	۰/۴۸۷۶	۰/۵۶۷۴	۱	۰/۶۱۰۳	۰/۶۲۴۳	۰/۶۸۷۳
فاصله از شهر و روستا	۰/۴۲۵۴	۰/۶۵۳۵	۰/۷۹۸۴	۰/۴۸۶۵	۰/۶۱۰۳	۱	۰/۶۹۸۶	۰/۸۸۷۴
بارش	۰/۳۹۶۵	۰/۸۴۲۱	۰/۷۰۱۲	۰/۷۵۵۳	۰/۶۲۴۳	۰/۶۹۸۶	۱	۰/۶۲۴۳
فاصله از گسل	۰/۳۹۸۶	۰/۵۸۷۱	۰/۸۷۷۶	۰/۵۱۵۶	۰/۶۸۷۳	۰/۸۸۷۴	۰/۶۲۴۳	۱

جدول ۳. ماتریس تضاد معیارهای مطرح در پهنه بندی فروشست حریم شهری استان البرز

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
افت سطح آب	۰	۰/۷۲۵۹	۰/۶۷۴۶	۰/۶۸۷۷	۰/۶۱۱۳	۰/۵۷۴۶	۰/۶۰۳۵	۰/۶۰۱۴
زمین شناسی	۰/۷۲۵۹	۰	۰/۴۷۸۷	۰/۳۶۴۴	۰/۵۵۴۷	۰/۳۴۶۵	۰/۱۵۷۹	۰/۴۱۲۹
شیب	۰/۶۷۴۶	۰/۴۷۸۷	۰	۰/۴۲۱۹	۰/۴۳۲۶	۰/۵۱۳۵	۰/۲۴۴۷	۰/۴۸۴۴
کاربری اراضی	۰/۶۸۷۷	۰/۳۶۴۴	۰/۴۲۱۹	۰	۰/۴۳۲۶	۰/۵۱۳۵	۰/۲۴۴۷	۰/۴۸۴۴
فاصله از رودخانه	۰/۶۱۱۳	۰/۵۵۴۷	۰/۵۱۲۴	۰/۴۳۲۶	۰	۰/۳۸۹۷	۰/۳۷۵۷	۰/۳۱۲۷
فاصله از شهر و روستا	۰/۵۷۴۶	۰/۳۴۶۵	۰/۲۰۱۶	۰/۵۱۳۵	۰/۳۸۹۷	۰	۰/۳۰۱۴	۰/۱۱۲۶
بارش	۰/۶۰۳۵	۰/۱۵۷۹	۰/۲۹۸۸	۰/۲۴۴۷	۰/۳۷۵۷	۰/۳۰۱۴	۰	۰/۳۷۵۷
فاصله از گسل	۰/۶۰۱۴	۰/۴۱۲۹	۰/۱۲۲۴	۰/۴۸۴۴	۰/۳۱۲۷	۰/۱۱۲۶	۰/۳۷۵۷	۰

مجموع تضاد	۴/۴۷۹	۳/۰۴۱	۲/۷۱۰۴	۳/۱۴۹۲	۳/۱۸۹۱	۲/۴۳۹۹	۲/۳۵۷۷	۲/۴۲۲۱
---------------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

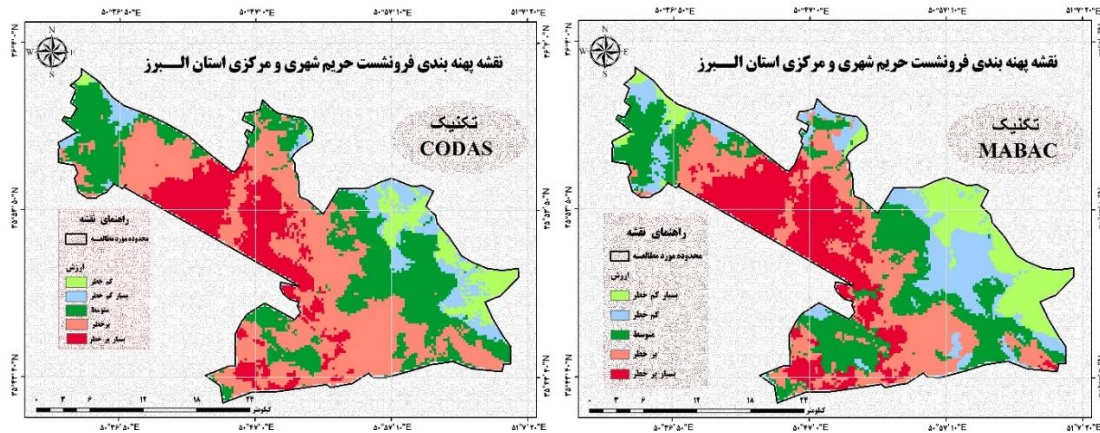
جدول ۴. انحراف معیار، میزان اطلاعات معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
انحراف معیار	۰/۲۶۷۱	۰/۳۱۳۴	۰/۳۵۶۲	۰/۳۳۴۲	۰/۲۴۶۵	۰/۳۸۷۵	۰/۲۸۲۲	۰/۳۵۲۶
میزان اطلاعات	۱/۱۹۶۳۴۱	۰/۹۵۳۰۴۹	۰/۹۶۵۴۴۴	۱/۰۵۲۴۶۳	۰/۷۸۶۱۱۳	۰/۹۴۵۴۶۱	۰/۶۶۵۳۴۳	۰/۸۵۴۰۳۲۴۶

جدول ۵. وزن نهایی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
وزن نهایی	۰/۱۲۱۲۷	۰/۱۱۸۴۷۴	۰/۱۳۰۱۴۵	۰/۱۲۱۸۷۵	۰/۱۰۵۹۷	۰/۱۱۷۴۵۱	۰/۰۸۹۶۹	۰/۱۱۵۱۲۵۹۱

با توجه به خروجی حاصل از به کارگیری تکنیک‌های ذکر شده و نهایتاً (شکل ۸) نقشه پهنه‌بندی فرونشست با تکنیک‌های کوداس و موباک، لذا می‌توان گفت در تکنیک موباک ۲۸۴/۱۸ کیلومتر مربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۲۲۳/۱۴ کیلومتر مربع در کلاس پرخطر قرار دارد و در تکنیک کوداس ۲۳۶/۰۹ کیلومتر مربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۵۱۲/۳۴ کیلومتر مربع در کلاس پرخطر قرار دارد (جدول ۷ و ۸). بخش اعظمی از کلاس بسیار پرخطر و پرخطر محدوده شهرستان‌های کرج و ساوجبلاغ و نظرآباد از لحاظ احتمال وقوع فرونشست در بخش شمال محدوده (شهرک افشاریه، حکیمیه، مزرعه حمیدیه و سهیلیه)، شمال غرب (لشکرآباد، قوهه و رامچین، محمدآباد افشار، سنقرآباد) و بخش مرکزی (مهرشهر، گلشهر، رجایی‌شهر و خرم‌دشت و کمال‌آباد (کمالشهر)) قرار گرفته است. به علاوه، با توجه به نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرونشست در قسمت جنوب و جنوب غربی محدوده در محدوده شهری ماهدشت راشته، سردارآباد، احمدآباد؛ مشکین‌آباد و عباس‌آباد، سردارآباد، شهرک بعثت و محمدآباد زیاد می‌باشد. بخشی از قسمت جنوب شرقی محدوده دشت کرج شامل امیرآباد، کوهک، شهرک ابوذر و گرمدره و بخش غربی نظرآباد نیز در طبقه با احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارند.



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست حریم شهری و مرکزی استان البرز

جدول ۶. اطلاعات طبقات خطر فرونشست الگوریتم MABAC

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	طبقه خطر
۶۵/۶۷	۸۰/۲۱	۲۰۱	۲۲۳/۱۴	۲۸۴/۱۸	مساحت به کیلومتر-مربع
۱۳%	۱۲%	۲۱%	۲۵%	۲۹%	مساحت به درصد

جدول ۸. اطلاعات طبقات خطر فرونشست الگوریتم CODAS

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	طبقه خطر
۲۵/۳۹	۲۷/۶۴	۲۳۹/۴۸	۳۹۳/۰۶	۱۶۸/۷۳	مساحت به کیلومتر-مربع
۳%	۴%	۳۰%	۳۹%	۲۴%	مساحت به درصد

بررسی نقاط بسیار پر خطر و پر خطر معرفی شده توسط الگوریتم موباک و کوداس نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی و کشاورزی و مناطق شهری، بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده‌اند. محدوده مطالعاتی به دلیل وضعیت توپوگرافی هموار مناسب، محدودیت کمی جهت توسعه فعالیت‌های کشاورزی دارد. در واقع نداشتن اختلاف ارتفاع، نداشتن شیب زیاد و وجود رسوبات آبرفتی مناسب در کنار عوامل اقتصادی منطقه سبب شده است تا فعالیت‌های کشاورزی این منطقه با گسترش زیادی همراه باشد، به طوری که بر اساس نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی بخش عمده‌ای از دشت به اراضی کشاورزی اختصاص داده شده است که همین عامل سبب بهره‌برداری بیش از حد از سفره آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های اخیر شده است. به علاوه بخش اعظمی از آب مورد نیاز جهت شرب نیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و این امر نیز به نوبه خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدوده مورد مطالعه دخیل می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹. نمایی از فرونشست دشت ساوجبلاغ و دشت نظرآباد و اشتهارد

از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، مناطق بسیارپرخطر در فاصله صفر تا ۴۵۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و لذا می‌توان گفت که عوامل انسان‌ساخت، مانند: زمین‌های کشاورزی، تاسیسات زیرزمینی مانند سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل و نقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. سمت راست فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۱/۰۳/۱۴ در ساعت ۱۱ صب در منطقه شهری میدان کرج-جنب سینما هجرت سمت چپ فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۲/۰۲/۰۶ در ساعت ۱۴ بعد از ظهر در منطقه خیابان شهید بهشتی-خیابان ادهم

از منظر لیتولوژیکی، به طور کلی شهرهای موجود در محدوده حریم شهری استان البرز، بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته‌اند و رسوبات آبرفتی گستره کرج حاصل فعالیت رودخانه کرج و همچنین رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشاء گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی است و مستعد برای ایجاد فرونشست، می‌باشند. به علاوه، رسوبات آبرفتی قدیمی هزاردره و نهشته‌های تبخیری نئوژن (رس و مارن) به دلیل پوکی و تخلخل زیاد مقدار نشست بیشتری دارند و با کاهش فشار آب منفذی و به نسبت افزایش تنش موثر، میزان فرونشستین افزایش می‌یابد. شیب نقش موثری در

جمع آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. از لحاظ معیار شیب، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های صفر تا ۵ درصد قرار دارند و به طور عمده بیشترین مقدار پیکسل‌های با احتمال خطر، دارای شیب کمتر از یک درصد هستند. گسل‌ها به نوبه خود نقش موثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. از دیدگاه زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه در مجاورت زون فعالی و تکتونیزه البرز قرار گرفته و از حرکات زمین‌ساختی این زون متاثر است. از مهم‌ترین گسل‌ها، در محدوده می‌توان به گسل ماهدشت-کرج (از نوع گسل فشاری همراه با مولفه راست لغز و درازای دست کم ۳۰ کیلومتر، راستای شرقی، شمال شرقی، غربی- جنوب غربی و شیب تند عمدتاً رو به جنوب- جنوب شرقی)، گسله کردان-کرج (گسل تراسی کوتاه‌تر)، اشاره نمود. با بررسی معیار فاصله از گسل نتایج مشخص شد که طبق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست، به طور عمده؛ نقاط پرخطر واقع در بخش شمال و شمال غربی محدوده در فاصله ۴۰۰ تا ۸۰۰ متری و مناطق دارای احتمال خطر بخش جنوب غربی، در فواصل ۵۰ تا ۵۰۰۰ فواصل متری، از گسل واقع شده‌اند. با افزایش فاصله از آبراهه‌ها نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. (شکل ۱۱).

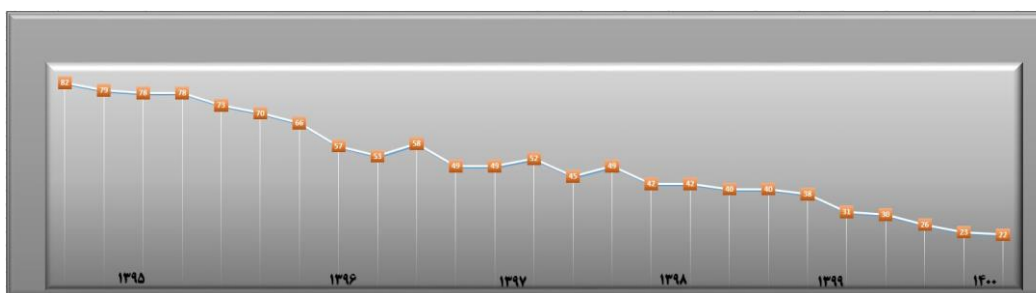


شکل ۱۱. تصویر سمت راست برداشت غیر مجاز آب‌های زیر زمینی در نظرآباد و ساوجبلاغ

تصویر سمت چپ انسداد و جلوگیری از برداشت غیر قانونی از آب‌های زیر زمینی در ساوجبلاغ-بخش شنده در سال ۱۴۰۲

با انطباق نقشه پهنه بندی خطر فرونشست با نقشه معیار فاصله از رودخانه، می‌توان گفته که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله ۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. فرونشست‌ها با میزان بارندگی ارتباط دارند و هر چه میزان بارندگی کمتر باشد، فرونشست‌ها نیز بیشتر خواهد شد. می‌توان گفت که مناطق پرخطر و بسیار پرخطر از نظر عامل بارش، در محدوده‌هایی با مقدار متوسط بارش سالانه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر قرار دارند. اگر چه گروهی از عوامل در ایجاد خطر فرونشست موثر بوده اند، ولی مهم‌ترین آن‌ها در حریم شهری استان البرز، عامل برداشت‌های بی رویه از آب‌های زیرزمینی می‌باشد و مناطق دارای احتمال خطر زیاد در بخش‌هایی با افت سطح آب ۱۵ تا ۳۰ متر قرار دارند. بنابراین با توجه به نقش و اهمیت معیار افت سطح آب و نقشه نهایی حاصل از پهنه بندی خطر فرونشست با نقشه معیار افت سطح آب محدوده مورد بررسی قرار گرفت. در این مناطق به سبب تامین نیازهای آبی جامعه سکونت گاهی و مناطق اطراف و همچنین تامین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله کارخانه‌ها و فعالیت‌های کشاورزی، دست اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب‌های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت نیز بالا بوده است که این عوامل با دخالت اقلیم خشک این منطقه باعث استعداد بالای این مناطق در بحث فرونشست شده است. نهایتاً می‌توان نتیجه گرفت با بررسی و تحلیل نقشه کاربری اراضی (شکل ۵) و فرونشست و مطالعات صورت گرفته موید رخداد بیشینه عرصه

فرونشست به ترتیب در مناطق کشاورزی و محدوده شهری و روستایی می‌باشد. به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد و رابطه بین توسعه شهری و فرونشست زمین رابطه ای دوجانبه می باشد که هر دو بر هم تأثیر گذاشته و تأثیر می پذیرند. تراکم جمعیت و نیاز آبی و غذایی منجر به بهره برداری از منابع آب زیرزمینی می گردد و همچنین افزایش باغ‌ها و ویلاها در استان باعث شده تعدادچاه‌ها افزایش پیدا کنند. لذا افزایش بهره برداری از یک سو و توسعه مناطق شهری و عدم تغذیه به آبخوان از طرف دیگر منجر به ایجاد نشانه های فرونشست در بسیاری از نقاط دشت مرکزی استان البرز، شده است. نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده از طریق اطلاعات چاه‌های پیژومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بررسی وضعیت و تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان فرونشست به طور میانگین کاهش ۳۰ متری سطح ایستایی را در سال ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد (شکل ۱۲).



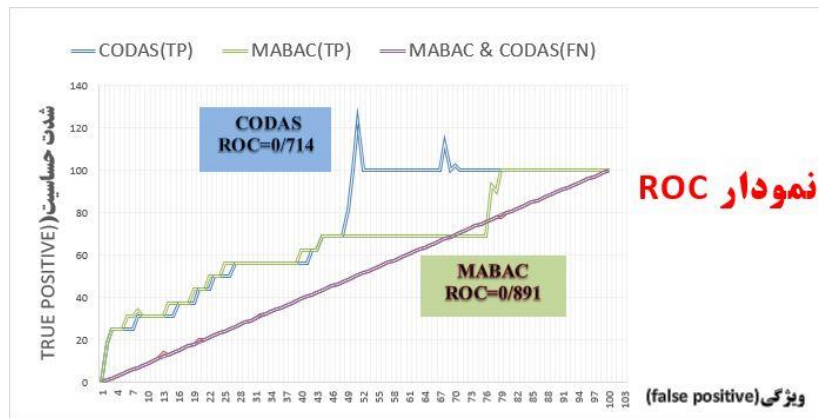
شکل ۱۲. نمودار مقایسه ای میانگین افت آب بازه زمانی سال های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ حریم شهری استان البرز

با بررسی وضعیت موقعیت مکانی چاه ها و میزان افت سطح آب در آن ها نیز، بیانگر این است که در یک روند کلی میزان افت سطح آب از جنوب محدوده به سمت شمال محدوده و همچنین از شرق به سمت غرب محدوده بیشتر می‌شود. به طور کلی، داده‌های مکانی چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه‌های خطوط هم افت و هم عمق (شکل ۳ و ۲)، در حریم شهری استان البرز با مناطق فرونشست حاصل از تکنیک های ارائه شده در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، مطابقت دارد و مناطق با فرونشست زیاد، در مناطقی با بیشترین مقدار افت آب (به طور عمده با ۱۵ تا ۳۰ متر افت آب در طی بازه زمانی مورد مطالعه) و در مناطقی با عمق کم آب (به طور عمده با عمق ۶۹ تا ۱۰۰ متر)، قرار دارد. به علاوه بیشترین میزان فرونشست زمین در مجاورت چاه‌های پیژومتری مشاهده می‌گردد. به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا در استان البرز، برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و همچنین به منظور تأمین بخش اعظمی از آب بخش شرب، بهره برداری از چاه‌های منطقه افزایش یافته، به طوری که این میزان از بهره‌برداری در بعضی موارد بیشتر از توان احیای چاه ها بوده است و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن مقدار فرونشست زمین، بالا می‌باشد.

### مقایسه و ارزیابی تکنیک های کوداس و موباک با استفاده از نمودار ROC

مهم‌ترین چالش موجود در زمینه‌ی پهنه‌بندی، چگونگی و دقت روش تهیه نقشه‌ی خطر فرونشست می‌باشد و روش‌های مختلفی برای ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست توسط محققین ارائه شده است. جهت مستندسازی بیشتر اعتبار نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرونشست به دست آمده از تحقیق سعی گردیده است، تا دقت هر یک از تکنیک‌های مورد استفاده با استفاده از منحنی ROC مورد ارزیابی قرار گیرد. در منحنی ROC، سطح زیر منحنی با عنوان AUC بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع خطر فرونشست) و

رخ نداده (عدم وقوع خطر فرونشست) است. نتایج ارزیابی نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی در مدل MABAC، ۰/۸۹۱ و در مدل CODAS، ۰/۷۱۴ می باشد. با توجه به طبقه بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی (۰/۹-عالی، ۰/۸-خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط، ۰/۵-۰/۶: ضعیف) (نویسنده<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲؛ یسیل ناکار<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵)، لذا دقت روش ماباک در این پژوهش در طبقه ی خیلی خوب و دقت روش کوداس در طبقه ی خوب قرار دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی نقشه های پهنه بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

نتایج مطالعه حاضر با تکنیک های ارائه شده، با نتایج پژوهش های افرادی چون؛ عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، باروق و همکاران (۱۴۰۱)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، مطابقت دارد؛ بدین صورت که آن ها نیز معتقدند که برای شناسایی مناطق دارای فرونشست، روش های تحلیل چند معیاره، از کارایی بالایی برخوردار هستند.

### نتیجه گیری

فرونشست زمین در طی سال های گذشته به دلایل مختلف از جمله رشد بی رویه جمعیت، برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی به همراه عوامل دیگر سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان به زمین های کشاورزی، ساختمان های مسکونی، جاده ها، خطوط انتقال نیرو و ... شده است. پایش میزان نرخ فرونشست و نیز پرداختن به علت یا علل تاثیر گذار آن جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. در این پژوهش به منظور تهیه نقشه فرونشست زمین در حریم شهری استان البرز از تکنیک کوداس و موباک چندمعیاره استفاده گردید و به منظور اجرای تکنیک های ذکر شده، بر اساس مطالب ارائه شده در بخش روش تحقیق، وزن دهی با روش کرتیک انجام شده است. نتایج ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی منطقه بیانگر این است که محدوده مطالعاتی در طی سال های اخیر با روند افزایشی افت سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. به طوری که میزان افت سطح آب در بعضی از چاه ها به ۳۰ متر در سال رسیده است و با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می شود. به طور کلی روند افزایشی افت سطح آب در محدوده مطالعاتی از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی محدوده بوده است. همچنین ارزیابی میزان فرونشست منطقه نیز بیانگر این است که بیشترین میزان فرونشست در مناطق شمالی محدوده بوده است و روند افزایش آن از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی محدوده مطالعاتی است. در واقع نتایج حاصله بیانگر انطباق روند افت سطح آب های زیرزمینی با میزان فرونشست است و در مناطقی که بیشترین افت سطح آب وجود داشته است، میزان فرونشست نیز بیشتر بوده است

<sup>۱</sup> - Negnevitsky

<sup>۲</sup> - Yesilnacar

و افت سطح آب زیرزمینی در منطقه ی مورد مطالعه، باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده است و بنابراین حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدد بالا آید، جبران این خسارات را نخواهد کرد. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۴۷، ۰/۱۴۳ و ۰/۱۳۶، مهم ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می باشند. هم چنین طبق نتایج به دست آمده، در تکنیک موباک به ترتیب ۲۹ و ۲۵ درصد از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر و در تکنیک کوداس به ترتیب ۲۴ و ۳۹ درصد از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در مناطق مرکزی و شمالی و غربی منطقه وجود دارد همچنین با بهره از منحنی تشخیص عملکرد نسبی نمودار ROC با مقایسه دو تکنیک مشاهده گردید دقت روش ماباک در این پژوهش در طبقه‌ی خیلی خوب و دقت روش کوداس در طبقه‌ی خوب قرار دارد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست محدوده مطالعاتی بهره برداری بی رویه از آب زیرزمینی و افت سطح آب می باشد و لذا، نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات انجام شده توسط؛ تورانی و همکاران (۱۳۹۷)، یزدانی و همکاران (۱۳۹۸)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، باروق و همکاران (۱۴۰۱)، بهاتارای (۲۰۱۷)، تانگ مین و همکاران (۲۰۱۹)، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رنجبر و همکاران (۲۰۲۱)، همخوانی دارد.

مدیریت منابع زیر زمینی آب، قطعاً امری مهم در زمینه جلوگیری از بوجود آمدن چنین پدیده های طبیعی در سطح زمین میباشد چرا که در صورت عدم مدیریت منابع آبی، سازمان های ذیصلاح می بایست هزینه های بالاتری را جهت تامین خسارات بوجود آمده متحمل گردند. در نهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه ی آن، در حریم شهری استان البرز آسیب برساند، از این رو، بایستی راهکارهای بلندمدت به صورت اصلاح روش های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه مدت به صورت، جلوگیری از برداشت سفره های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح های تغذیه مصنوعی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، تهیه و نصب دستگاه‌های کنتور هوشمند، ایجاد تشکلهای آب‌بران و حمایت از این تشکلهای، ایجاد و استقرار بازار محلی آب و ساماندهی شرکت‌های حفاری، کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان ذی ربط و مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد. با توجه با موارد مطرح شده می بایست با مدیریت بهینه منبع آبی و جلوگیری از حفر چاه های غیر مجاز در منطقه با پدیده فرونشست مقابله کرد که قطعاً نیاز به همکاری دستگاه ها و نهاد های مختلف جهت حفظ و نگهداری از منابع آب لازم و ضروری می باشد.

### پیشنهادات

- شهرداری ها و وزارت راه و شهرسازی با اطلاع از مناطق دارای فرونشست و خطرهایی که این مناطق را تهدید می کنند، اقدام به حفاری و ایجاد تونل برای خطوط مترو و یا معابر شهری و همچنین احداث پل و تاسیسات رو گذر در مناطق دارای فرو نشست نمی کنند.
- یکی از ارگان های تاثیر گذار شرکت های آب منطقه ای هستند که با جلوگیری از ایجاد چاه آب جدید در مناطقی که به دلیل استخراج بی رویه آب دارای فرو نشست هستند مانع از افزایش نرخ فرونشست در منطقه می شوند.
- توقف روند رو به رشد مصرف و برداشت آب و دادن فرصت تجدیدشوندگی برای احیای آبخوان ها
- صرفه جویی در مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی
- تزریق آب‌های مازاد روی سطح زمین به سفره‌های زیرزمینی

- استفاده صحیح و کارآمد از منابع آبی
- ممنوعیت استفاده بیش از حد از حوضه های آب های زیرزمینی
- تصفیه آب های شهری و استفاده مجدد از آن در کارخانه ها
- احداث چاه جذبی

## منابع

- ابراهیمی، ع، قاسمی، الف، گنجائیان، ح، (۱۳۹۹). پایش فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، جغرافیا و روابط انسانی، دوره دوم، شماره ۴، صص ۲۹-۴۱.
- اصغری سراسکانرود، ص، و محمدزاده شیشه گران، مریم، (۱۴۰۰). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۱، صص ۴.
- اصغری سراسکانرود، ص، پیروزی، الف، و آقایی، ل، (۱۴۰۱). پهنه بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره گیری از الگوریتم های تحلیل چند معیاره *MARCOS* و *CODAS*، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴، صص ۱۴۹-۱۷۲.
- اصغری سراسکانرود، ص، فعال نذیری، م، پیروزی، الف، (۱۴۰۱). پهنه بندی گستره فرونشست خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چند معیاره *ARAS*، اکوهیدرولوژی، دوره نهم، شماره ۲، صص ۳۵۳-۳۷۱.
- تورانی، م، آقآبایی، م، روستایی، م، (۱۳۹۷). مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخلسنجی راداری، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۸، شماره ۲۷، صص ۱۱۷-۱۲۸.
- رنجبر باروق، ز، (۱۳۹۸). تبیین نقش ژئومورفولوژی در آمایش کالنشهر کرج، رساله دکتری دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی
- رنجبر باروق، ز، فتح اله زاده، م، (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان شهر کرج) پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم، شماره ۴، بهار ۱۴۰۱، صص ۱۳۸-۱۵۵.
- رنجبر باروق، ز، فتح اله زاده، م، (۱۴۰۲). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب های زیرزمینی (مطالعه موردی: شهر مشهد) پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دوازدهم، شماره ۲، پاییز ۱۴۰۲، صص ۲۱۴-۲۲۹.
- روستایی، ش، رضایی مقدم، م، یاراحمدی، ج، نجف وند، س، (۱۴۰۱). بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب های زیرزمینی با استفاده از روش *FUZZY-AHP* (مطالعه موردی: دشت شبستر- صوفیان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، صص ۲۴-۷۶.
- زارع کمالی، م، الحسینی المدرسی، ع، و نقدی، ک، (۱۳۹۶). مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم *SBAS* در باندهای راداری *X* و *C* (مطالعه موردی: اراضی تهران)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال هشتم، شماره ۳، صص ۱۰۴-۱۲۰.
- شریفی کیا، م، (۱۳۹۱). تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل سنجی راداری در دشت نوق و بهرمان، آمایش و فضا، دوره شانزدهم، شماره ۳، صص ۵۶-۷۷.
- شهبابی، ه؛ نیازی، چ، (۱۳۸۸). بررسی فاکتورهای مؤثر در مکان یابی ایستگاه های امداد و نجات جاده سقر- سنندج با استفاده از مدل ترکیب خطی وزنی، همایش ژئوماتیک ۸۸، تهران.
- عابدینی، م، آقایی، ل، پیروزی، ا، (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آراس، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دوازدهم، شماره ۲، صص ۴۰-۵۸.

- فیضی زاده، بختیار، ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های پیکسل پایه و شیء‌گرا در تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مرکز GIS دانشگاه تبریز ص ۹۷-۱۰۳
- کیانی، ف.، عابدینی، م، و احمدزاده، غ.ر.، (۱۳۹۷). بررسی ارتباط فرورانشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، صص ۸-۱۰
- مالچفسکی، یاچک. ۱۳۸۵. پرهیزگار، اکبر. غفاری، عطا. سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری، چاپ اول، انتشارات سمت، ۵۹۷ صفحه.
- محمدی، مجید؛ پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۶). الویت‌بندی عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه حساسیت آن با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: بخشی از استان گلستان)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸ (۱۵)، ۱۶۱-۱۷۰.
- منتظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته. (۱۳۹۸). ارزیابی خطر فرورانشست با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان-های تهران و البرز. فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره نهم، شماره اول، صص ۱۳-۱۰.
- Aher P, Adinarayana J, Gorantiwar SD (2013) Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J* 15(1):11-18.
- Alinezhad A., Khalili J. (2019) *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). International Series in Operations Research & Management Science, vol 277, Springer, Cham.*
- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A. & Walter, T. R. (2008). *InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. 2008 Second Workshop*
- Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), *Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, Science of The Total Environment, 613-614:1385 1400* .
- Bokhari, R., & et al. (2023). *Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. Heliyon, 9.*
- Bou kheir, R., Cerdan, O & Abdelah, C. (2006). *Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology, 82, 347-359.*
- Chatterjee R S, Shailaja Thapa K B, Singh G, Varunakumar E, Raju V R (2015) *Detecting, mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. Journal of Earth System Science* 124(6):1359-1376.
- Cigna, F., Bateson, L.B., Jordan, C.J., & Dashwood, C. (2014). *Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery. Remote Sensing of Environment, 152, 441-466.*
- Davoodijam, M., Motagh, M., & Momeni, M. (2015). *Land subsidence in Mahyar Plain, Central Iran, investigated using Envisat SAR Data. Proceedings the 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). Springer.*
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). *Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. Computers and Operations Research, 22 (7), 763-770.*
- Gambolati, G., Massimillano, F., & Teatro, F., 2018. *Anthropogenic Land Subsidence, GROUNDWATER, 2444-2457.*

- Garg S, Motagh M, Jayaluxmi I, Karanam V, Selvakumaran S, & Marinoni A., 2022. *Assessment of Land Subsidence Hazard, Vulnerability and Risk: A case study for National Capital Region in India*, EGU General Assembly 2022 (Vienna, Austria, Online 2022).
- Georgiou, D., Mohammed, E.S., Rozakis, S., (2015). *Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units*. *Renew. Energy* 75, 459–467.
- Huang, G., Fan, H., Lu, L., & Yu, W., 2020. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-1-6*.
- Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S., Khan, J., & Ying, Z., 2022. *Sentinella for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique.*, *Sci Rep*, 12, 5294.
- Liu, C.W., Lin, W.S., & Cheng, L.H. (2006). *Estimation of land subsidence caused by loss of smectiteinterlayer water in shallow aquifer systems*. *Hydrogeology*, 14(4), 508-525.
- Minh, D. H. T. Tran., Q, C. Pham, Q.N, Dang, T, Nguyen, D.A, El-Moussaw, A. 2019. "Measuring Ground Subsidence in Ha Noi Through the Radar Interferometry Technique Using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed Data," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 10, pp. 3874-3884.
- Minh, D. H. T., Tran., Q. C., Pham, Q.N., Dang, T., Nguyen, D.A., & El-Moussaw, A., 2019. *Measuring Ground Subsidence in Ha Noi Through the Radar Interferometry Technique Using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed Data*, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 3874-3884.
- Negnevitsky, M. (2002). *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison Wesley/Pearson Education, Harlow, England.
- Peter, H., Jaggi, A., Fernandez, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Femenias, P. (2017). *Sentinel-1A – First precise orbit determination results*. *Advances in Space Research*, 60(5), 879–892.
- Pontius, R.G. and L.C. Schneider. 2001. *Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1): 239-248.
- Ranjgar B, Razavi V, Foroughnia T, Sadeghi-Niarak A, & Perissin D., 2021. *Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms*, *Remote Sensing*, VOL 13, No 7: 1326.
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., & Dehghani, M. (2013). *Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry*. *Irrigation and Water Engineering*, 3(11), 47-57 (In Farsi)
- USGS (United States Geological Survey), *Research and Review Information Located, Assess on September 2011*: <http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>.
- Yesilnacar, E.K. (2005). *The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey*. PhD Thesis, Department of Geometrics the University of Melbourne.
- Zhang, Y., Wang, Z., Xue, Y., Wu, J., & Yu, J. (2016). *Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 745-760
- 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.