

تأثیر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر روی فرونشست زمین با استفاده از GIS (مطالعه موردی: شهر تبریز)

رامین نبوره^۱، امیرحسین رضایی فرعی^{۲*}، بختیار فیضی‌زاده^۳

^۱ کارشناس ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
^۲ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
^۳ دانشیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۸/۱۰/۱۸، پذیرش: ۹۹/۳/۱۹، نشر آنلاین: ۹۹/۳/۱۹)

چکیده

چکیده فرونشست زمین در واقع حرکت رو به پایین سطح زمین می‌باشد که در صورت گسترش، احتمال آسیب جدی به زیرساخت‌ها، خطوط انتقال و سازه‌ها وجود دارد. با توجه به خطرات فرونشست زمین و همچنین با علم به این‌که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک معیارهای مؤثری در زمینه فرونشست زمین هستند، تحقیق حاضر به بررسی تأثیر این پارامترها بر روی فرونشست زمین در شهر تبریز پرداخته است. در ابتدا با استفاده از داده‌های راداری در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ و با روش InSAR نسبت به تهیه نقشه فرونشست در شهر تبریز اقدام گردیده است. براساس خروجی‌های حاصل، ۵ درصد از شهر با فرونشست بسیار زیاد، ۱۷ درصد با فرونشست زیاد، ۲۵ درصد با فرونشست متوسط، ۲۳ درصد با فرونشست کم و ۳۰ درصد با فرونشست بسیار کم مواجه شده است. همچنین با استفاده از مدل FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) در محیط GIS نقشه مربوط به مناطق مستعد وقوع فرونشست تهیه شده است. برای انجام مدل FAHP از ۵ معیار تأثیرگذار استفاده شده است که عبارت‌اند از: تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، ضریب تراکم‌پذیری حجمی، نتایج SPT (Standard Penetration Test)، نوع زمین و نوع لایه خاک. داده‌های موردنیاز از سازمان‌های مربوطه اخذ و پس از آماده‌سازی وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 گردیدند. پس از تهیه نقشه‌های درون‌یابی شده هر یک از معیارها و استانداردهای آن‌ها، نسبت به محاسبه وزن معیارها اقدام گردیده است و پس از تلفیق لایه‌های معیار و وزن معیارها با یکدیگر نقشه نهایی مناطق مستعد فرونشست در شهر تبریز به دست آمده است. بر اساس نتایج مدل FAHP مناطق غرب، جنوب‌غربی و قسمتی‌هایی از جنوب مستعدترین مناطق برای وقوع فرونشست در شهر تبریز می‌باشند، در مقابل مناطق شمالی و شمال‌غربی شهر از استعداد کمی برای وقوع فرونشست برخوردار می‌باشند. نتایج به دست آمده از روش InSAR نیز تأییدکننده نتایج به دست آمده از مدل FAHP با هم‌خوانی بیش از ۸۵ درصد می‌باشد. تفاوت دو نقشه به صورت جزئی و در مناطق با فرونشست کم و بسیار کم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، GIS، کاهش سطح آب زیرزمینی، پارامترهای ژئوتکنیکی، FAHP، InSAR.

۱- مقدمه

ارتباطی و راه‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و تهدید جدی برای نشست ساختمان‌های موجود شهری، خیابان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو در نظر گرفته می‌شود (واعظی و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به این موضوع که فرونشست زمین تأثیرات منفی زیادی با خود به همراه دارد و علی‌رغم این‌که این پدیده به صورت آهسته و به تدریج صورت گیرد به‌طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین، به دلیل روی دادن در وسعت زیاد ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند. مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی به‌طور ویژه آسیب‌پذیرتر بوده و سازه‌هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری

مخاطرات طبیعی سالانه موجب بروز خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در جهان می‌شوند. در میان این مخاطرات فرونشست زمین یکی از مخاطراتی است که در شهرها و به‌ویژه کلان‌شهرها به‌عنوان یکی از مشکلاتی که امروزه و با وقوع خشک‌سالی‌ها اخیر اهمیت فراوانی یافته، مطرح است. گزارش‌های متعددی از فرونشست زمین خصوصاً از نقاط خشک و کم باران در سراسر جهان گزارش گردیده است (Hu و همکاران، ۲۰۰۴). فرونشست زمین یک تهدید بالقوه زیست‌محیطی است که باعث تغییرات ناهمسان در ارتفاع و شیب آبراه‌ها و رودخانه‌ها، کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در مسیرهای

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۶۰۰

فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن در دشت سیدان فاروق مروذشت استان فارس پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که عوامل تراکم و فشردگی میان لایه‌های رسی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی مؤثرترین عوامل در این زمینه هستند. پهنه-بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان توسط شایان و همکاران (۱۳۹۵) انجام گردیده است. واعظی و همکاران (۱۳۹۵) خطر احتمالی فرونشست بر خط لوله اتیلن غرب در حدفاصل میاندوآب به پتروشیمی تبریز را بررسی و افت آب زیرزمینی را به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر فرونشست زمین معرفی نمودند.

در مطالعات خارجی نیز پژوهشگران با استفاده از داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای وقوع فرونشست را در مناطق مختلف بررسی کرده و تغییرات آن را در بازه‌های زمانی مختلف مورد مطالعه قرار داده‌اند. در چند نمونه از جدیدترین مطالعات انجام یافته در این زمینه، Gumilar و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی فرونشست در حوضه بندونگ^۲ اندونزی و فاکتورهای احتمالی مؤثر در آن نتیجه گرفتند عامل اصلی فرونشست در منطقه برداشت آب‌های زیرزمینی و در برخی مناطق فعالیت‌های تکنیکی زمین بوده است. با استفاده از روش‌های پردازش شیء‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای Minderhoud و همکاران (۲۰۱۸) ارتباط کاربری اراضی و فرونشست در دلتای مکونگ^۳ در کشور ویتنام را مطالعه نمودند. نتایج تحقیق نشان داد کاربری اراضی می‌تواند فرونشست-های ناشی از عوامل طبیعی و انسانی را تحت تأثیر قرار دهد.

Chen و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رادارست^۴، بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ میلادی به بررسی مکانی و زمانی میزان فرونشست در دشت پکن پرداختند. همچنین پیش‌بینی وقوع فرونشست زمین در خط متروی شهر هانوی پایتخت ویتنام توسط Giao و همکاران (۲۰۱۸) ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که تمرکز اکثر تحقیقات انجام‌شده در مورد فرونشست زمین، بررسی تأثیر عامل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بوده و به‌ندرت به بررسی تأثیر عوامل ژئوتکنیکی خاک بر پدیده فرونشست زمین پرداخته شده است در حالی که با جمع-بندی نتایج مطالعات انجام‌یافته پیشین محققین، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک نیز تأثیر قابل‌توجهی بر پدیده فرونشست زمین دارد. شهر تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرها و بزرگ‌ترین شهر شمال‌غرب ایران در سال‌های اخیر با مشکل فرونشست زمین در مناطق مختلف خود روبه‌رو بوده است که در بعضی موارد باعث خرابی زیرساخت‌ها، مشکلات تردد و ... گردیده است ولی تاکنون مطالعه جامعی در این خصوص انجام نگرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به نیاز موجود در این زمینه، پدیده فرونشست در

دارند آسیب‌پذیرترند. به‌عنوان نمونه خطوط راه‌آهن، سدهای خاکی، تصفیه‌خانه‌ها و کانال‌ها از آسیب‌پذیری زیادتری برخوردار هستند (رهنما و میراثی، ۱۳۹۲). عوامل متعددی در فرونشست زمین تأثیرگذار می‌باشند که به‌نظر می‌رسد در بین عوامل مؤثر در ایجاد این پدیده، برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی، ضخامت لایه رسوبی و ویژگی‌های مهندسی رسوبات، عوامل اصلی ایجاد فرونشست هستند (امیری، ۱۳۸۴). افزایش روزافزون برداشت از منابع آب زیرزمینی، علی‌الخصوص از حوضه‌های که با رسوبات تحکیم نیافته آبرفتی انباشته شده‌اند منجر به فرونشست سطح زمین و یا به عبارتی نشست عمومی زمین می‌گردد (حسین-زاده و نوحه‌گر، ۱۳۹۰). در سال‌های اخیر پدیده فرونشست منطقه‌ای زمین در بسیاری از دشت‌های کشور به علل مختلف رخ داده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به نشست دشت‌های سیرجان، زرد، کرمان، لردگان، اردکان یزد، ورامین، تهران، شهریار و دیگر دشت‌های ایران اشاره نمود (انگورانی و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به اهمیت موضوع پژوهشگران مختلفی در داخل کشور عمدتاً با بهره‌گیری از داده‌های خاک و سطح آب‌های زیرزمینی و با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به بررسی تغییرات فرونشست در مناطق و دشت‌های مختلف کشور پرداخته‌اند و در مواردی با استفاده از مدل‌سازی وقوع آن را در آینده پیش‌بینی کرده‌اند.

امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۲)، به تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS پرداختند. آن‌ها جهت بررسی تغییرات به‌وجود آمده در حجم آبی آبخوان و میزان افت آب‌های زیرزمینی در کل دشت از داده‌های آماری چاه‌های مشاهده‌ای استفاده کرده‌اند، و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های ایزوپیزومتری^۱ و پهنه افت در منطقه را ترسیم نمودند. براساس نقشه مدل‌سازی مشخص گردید بیش‌ترین احتمال فرونشست دشت اردبیل در آینده در قسمت جنوب‌شرق و غرب اتفاق خواهد افتاد. با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک DINSAR حشمی و المدرسی (۱۳۹۴) به مدل‌سازی فرونشست دشت نیشابور پرداختند. براساس نتایج حاصل مقدار جابه‌جایی با استفاده از داده‌های GPS در ایستگاه نیشابور با مقدار جابه‌جایی به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های ASAR دارای تطابق مناسبی می‌باشند. پارامترهای مؤثر در فرونشست و ارزیابی میزان تأثیر هر کدام از این پارامترها بر فرونشست زمین در استان فارس توسط رهنما و میراثی (۱۳۹۵) مورد بررسی قرار گرفت که مهم‌ترین معیارهای دخیل در فرونشست، افت سطح آب زیرزمینی، عمق زیاد آبرفت روی بستر سنگی و ضخامت زیاد لایه‌های ریزدانه رسی عنوان شده است. همچنین عیفی (۱۳۹۵)، به ارزیابی پتانسیل

3. Mekong
4. Radarsat-2

1. Iso-piezometric
2. Bandung

شهری (شکوهیان و همکاران، ۱۳۹۳)، سدسازی (حکیمزاده و همکاران، ۱۳۹۱) و همچنین ژئوتکنیک و مسائل محیط زیستی (مجتهدی و همکاران، ۱۳۹۷) گسترش داشته است.

تحلیل مکانی: تحلیل مکانی قلب سیستم اطلاعات جغرافیایی محسوب می‌شود. در واقع می‌توان گفت تحلیل مکانی فرآیندی است که طی آن داده‌های خام به اطلاعات مفید تبدیل می‌شوند (علی‌محمدی، ۱۳۹۳). به منظور انجام تحلیل‌های مکانی ابتدا داده‌های مربوطه باید آماده‌سازی شده و با تعیین فرمت و سیستم مختصات مناسب وارد محیط GIS شوند. برای این کار، داده‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و فرورانش از سازمان‌های مربوطه اخذ گردیده و پس از آماده‌سازی وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 گردیدند.

درون‌یابی: داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده جهت استفاده در روش‌های تحلیل در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) عبارت‌اند از داده‌های گسسته و داده‌های پیوسته. داده‌های گسسته عموماً داده‌های مطلق بوده و مرز این داده‌ها در طبیعت به‌طور دقیق قابل تعریف می‌باشد، اما داده‌های پیوسته در طبیعت از یکپارچگی برخوردارند و هر موقعیتی در سطح زمین اندازه‌ای از آن را داراست، مانند شیب، درجه حرارت و ... این داده‌ها به دلیل پیوستگی که دارند قابل اندازه‌گیری در تمام سطوح نیستند، لذا به‌طور نمونه‌ای برداشت می‌شوند. طبق تعریف برآورد میزان متغیر پیوسته را در مناطق نمونه‌گیری نشده در داخل ناحیه‌ای که مشاهدات نقطه‌ای پراکنده شده‌اند درون‌یابی^۷ می‌گویند. در واقع درون‌یابی، تغییرات فضایی متغیر پیوسته را نمایش می‌دهد. به عبارت دیگر، درون‌یابی روش برآورد ارزش پدیده‌ها در مکان‌های نمونه‌برداری نشده با استفاده از مقادیر معلوم در نقاط همسایه است (قهرودی تالی و بابایی، ۱۳۹۳).

روش کریجینگ از مهم‌ترین و گسترده‌ترین مدل‌های درون‌یابی آماری می‌باشد. کریجینگ مدل درون‌یابی پیشرفته‌ای می‌باشد که با کم‌ترین واریانس تخمین درون‌یابی می‌کند. رابطه مربوط به این مدل به شرح زیر می‌باشد:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

که در آن $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i^{th} و λ_i وزن مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i^{th} می‌باشد. s_0 موقعیت پیش‌بینی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده یا معلوم می‌باشد. در این مدل وزن، تابع فاصله بین نقاط و ساختار فضایی نقاط می‌باشد. مدل FAHP: این مدل از متداول‌ترین فنون مورد استفاده در کار بر روی مسائل تصمیم‌گیری چند صفتی فضایی‌اند. این روش‌ها

شهر تبریز با تمرکز بر تأثیر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای انجام تحقیق در ابتدا نقشه فرورانش تبریز با استفاده از اختلاف ترازهای ارتفاعی نقاط مختلف این شهر مابین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای رادارست و تکنیک InSAR تهیه شده است تا بتوان مقادیر و الگوی واقعی فرورانش در نواحی مختلف شهر را تعیین کرد. در گام دوم داده‌های مورد نیاز از ارگان‌های مربوطه تهیه شده و با دریافت نظر کارشناسان صاحب‌نظر در این زمینه، معیارهای تأثیرگذار در پدیده فرورانش مشخص شده است. در ادامه پس از تهیه لایه‌های مربوط به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اقدام به درون‌یابی لایه‌های مربوط به روش کریجینگ^۵ گردیده و ارتباط این لایه‌ها بررسی شده است. سپس با استفاده از داده‌های زمینی سطح آب‌های زیرزمینی و مشخصات ژئوتکنیکی خاک، با استفاده از مدل FAHP در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۶ اقدام به مدل‌سازی پدیده فرورانش گردیده و نقشه نهایی مربوط به مناطق مستعد وقوع فرورانش تهیه شده است. با مقایسه نقشه مناطق مستعد فرورانش تهیه شده در گام دوم و مقادیر واقعی تعیین شده در گام اول دقت محاسبات مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین از طریق مقایسه هر یک از لایه‌ها با نقشه فرورانش واقعی، تأثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر روی فرورانش، مورد بررسی قرار گرفته است. از روی هم‌خوانی نقشه‌ها مشخص می‌شود که چه عواملی تأثیر بیشتری در فرورانش زمین داشته است. در ادامه به بیان مختصر مبانی روش‌های مورد استفاده و مطالعه موردی پرداخته شده و سپس نتایج حاصل ارائه شده است.

۲- مبانی و روش‌شناسی

با توجه به کاربرد روش‌های مختلف در انجام تحقیق در ادامه توضیح بسیار مختصری در مورد هر یک از این موارد و مفاهیم بنیادی مربوطه ارائه می‌شود:

سیستم اطلاعات جغرافیایی: سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با ظرفیت ذخیره‌سازی، سازمان‌دهی، آنالیز، بازیابی، نمایش و تهیه خروجی‌های مناسب، به عنوان یک ابزار مناسب می‌تواند محققین را در دستیابی به روش مناسب درون‌یابی و فهم شرایط محیطی کمک کند. تعاریف ارائه‌شده برای GIS را می‌توان به چهار دسته ابزار- مبنا، پایگاه داده، سیستم- مبنا و سازمان مبنا تقسیم کرد (Burrough و همکاران، ۲۰۱۵). کاربرد این مفهوم در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران از قبیل مباحث ترافیکی و مدیریت

7. Interpolation

5. Kriging

6. Geographical Information System

این ماتریس حاوی اعداد فازی زیر می‌باشد:

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \{1, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9} \text{ or } \tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1}\} & i \neq j \end{cases}$$

مرحله (۴) محاسبه اعداد فازی مثلثی (S_i) برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از رابطه زیر:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

در رابطه فوق، i بیان‌گر شماره سطر و j بیان‌گر شماره ستون ماتریس مقایسه زوجی می‌باشد، همچنین اعداد فازی مثلثی ماتریس‌های مقایسه زوجی می‌باشند. مقادیر $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ ، $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ و $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$ به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i) \quad (4)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5)$$

در روابط بالا l_i ، m_i و u_i به ترتیب مؤلفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

مرحله (۵) محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به همدیگر به‌طور کلی اگر $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند درجه بزرگی M_1 نسبت به M_2 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

مرحله (۶) محاسبه وزن معیارها در ماتریس‌های مقایسه زوجی بدین‌منظور از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$d(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k=1,2,\dots,n, \quad k \neq i \quad (6)$$

بردار وزن نرمال نشده به‌صورت زیر خواهد بود:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad A_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

مرحله (۷) محاسبه بردار وزن نهایی برای محاسبه بردار وزن نهایی، بردار وزن محاسبه‌شده در مرحله قبل نرمال می‌گردد، بنابراین:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (8)$$

بر پایه میانگین وزنی قرار دارند. تصمیم‌گیر به‌طور مستقیم وزن-هایی از اهمیت نسبی را به هر صفت اختصاص می‌دهد. سپس وزن اهمیت تخصیص‌یافته به هر صفت در نمره مقیاس‌بندی شده آن صفت در گزینه موردنظر ضرب شده و با جمع حاصل‌ضرب‌های مذکور در رابطه با تمامی صفات، امتیاز یا نمره کل در رابطه با هر گزینه به دست می‌آید. گزینه‌ای که دارای بالاترین امتیاز است انتخاب می‌گردد (مالچفسکی، ۱۳۹۲).

براساس این روش پس از تهیه پرسشنامه در مورد موضوع موردنظر و معیارهای مختلف آن و تهیه نمودار سلسله مراتبی از کارشناسان صاحب‌نظر درخواست می‌شود تا معیارهای هر سطح را با هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی معیارها را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند. درواقع نظریه مجموعه‌های فازی، یک نظریه ریاضی طراحی شده برای مدل کردن ابهام فرآیندهای وابسته به دانش انسان است (Lin و همکاران، ۲۰۰۷). این روش دارای کاربردهای مختلفی می‌باشد که در این تحقیق به‌منظور شناسایی مکان‌های مستعد فرونشست در شهر تبریز مورد استفاده قرار گرفته است. مراحل اجرای مدل FAHP به‌صورت زیر می‌باشد.

مرحله (۱) رسم نمودار سلسله مراتبی

مرحله (۲) تعریف اعداد فازی به‌منظور انجام مقایسه‌های زوجی. اعداد فازی استفاده‌شده از نوع اعداد فازی مثلثی می‌باشند، اعداد فازی مثلثی با سه عدد قطعی (m_1, m_2, m_3) بیان می‌شوند. m_1 کم‌ترین مقدار مورد انتظار، m_2 محتمل‌ترین حالت و m_3 بیش‌ترین مقدار مورد انتظار می‌باشد (عطایی، ۱۳۹۳). این مقادیر در جدول (۱) بیان شده است.

جدول ۱- متغیرهای زبانی و اعداد فازی متناظر آن‌ها

متغیر زبانی	عدد قطعی	مقیاس فازی مثلثی	دامنه
اهمیت مطلق	۹	(۷,۹,۹)	$7 \leq X \leq 9$
اهمیت خیلی قوی	۷	(۵,۷,۹)	$5 \leq X \leq 7$
اهمیت قوی	۵	(۳,۵,۷)	$3 \leq X \leq 5$
اهمیت ضعیف	۳	(۱,۳,۵)	$1 \leq X \leq 3$
اهمیت یکسان	۶	(۱,۱,۳)	$1 \leq X \leq 3$
دقیقا مساوی	۱	(۱,۱,۱)	-

مرحله (۳) تشکیل ماتریس مقایسه زوجی (A) با به‌کارگیری اعداد فازی که ماتریس مقایسه زوجی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

■ بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با پدیده فرونشست در سطح شهر تبریز.

■ تهیه نقشه معیارهای مربوط به فرونشست در محیط GIS

■ محاسبه وزن معیارها با استفاده از مدل FAHP

■ مدل‌سازی نقشه مناطق مستعد فرونشست شهر تبریز به روش FAHP

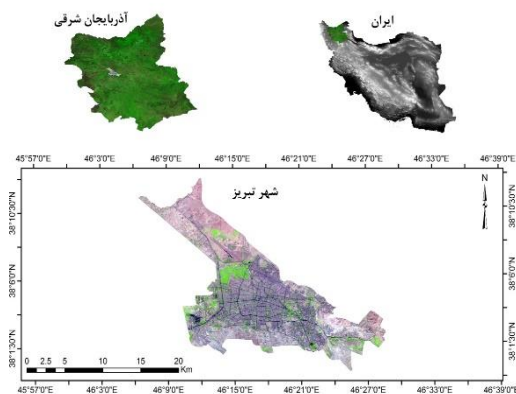
■ بررسی ارتباط بین نقشه تهیه شده با استفاده از مدل FAHP و نقشه تهیه شده با تکنیک InSAR

توابع در GIS ابزارهای اجرایی هستند که عملیات از پیش تعیین‌شده، را اجرا می‌نمایند. از جمله این توابع، تابع Overlay می‌باشد که به منظور بررسی ارتباط دو یا چند لایه با یکدیگر به کار می‌رود. تابع Overlay در دو حالت برداری و رستری قابل اجرا می‌باشد که حالت برداری خود به سه وضعیت نقطه، خط و پلیگون تقسیم می‌شود و در حالت رستری، روی هم‌گذاری براساس پیکسل-ها انجام می‌شود. در این تحقیق نیز به منظور بررسی ارتباط بین نقشه مناطق مستعد فرونشست تهیه شده با استفاده از مدل FAHP و نقشه فرونشست تهیه شده با استفاده از تکنیک InSAR از تابع Overlay استفاده گردیده است تا میزان هم‌خوانی دو نقشه تهیه شده بررسی گردد و میزان دقت مدل FAHP نیز ارزیابی گردد. همچنین بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با پدیده فرونشست نیز از تابع Overlay استفاده گردیده است.

۳- مطالعه موردی - فرونشست شهر تبریز

۳-۱- معرفی

کلان‌شهر تبریز به‌عنوان مرکز استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران قرار گرفته است. مختصات جغرافیایی شهر تبریز ۱' ۳۸° تا ۸' ۳۸° عرض شمالی و ۱۰' ۴۶° تا ۲۴' ۴۶° طول شرقی می‌باشد. (شکل (۱)). این شهر از سطح آب‌های آزاد با ارتفاع متوسطی حدود ۱۳۵۰ متر قرار دارد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر پس از وزن‌دهی به هر یک از پارامترها، در ادامه به منظور هم‌پوشانی لایه‌های استاندارد شده پارامترهای مورد بررسی، از روش هم‌پوشانی فازی و عملگر گاما (Bonham-Carter, ۱۹۹۴) در محیط GIS استفاده شده است، و نقشه نهایی مکان‌های مستعد فرونشست شهر تبریز تهیه گردیده است.

تکنیک InSAR: به‌کارگیری فناوری‌های نوین در شناسایی منابع زمینی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. فناوری‌هایی مانند سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی از آن جمله‌اند که برای شناسایی، پایش، پهنه‌بندی منابع طبیعی و آب‌و‌خاک به‌کرات به‌کار گرفته شده‌اند. از جمله داده‌های سنجش‌ازدور داده‌های راداری SAR می‌باشد.

تداخل‌سنجی تکنیک استفاده از تداخل امواج الکترومغناطیس به‌منظور استخراج اطلاعات است. تداخل‌سنجی راداری با استفاده از اختلاف فاز زوج تصویر راداری با حد تفکیک مکانی بالا به‌دنبال تولید مدل رقومی ارتفاعی منطقه و برآورد میزان تغییر شکل و جابه‌جایی پوسته زمین است. به تکنیک انجام تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های SAR تکنیک InSAR گفته می‌شود. این تکنیک اولین بار در سال ۱۹۸۶ برای تولید نقشه توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت و پس از آن به‌سرعت در کاربردهای مختلف مانند برآورد جابه‌جایی ناشی از زلزله، بررسی فرونشست و بالآمدگی ناشی از فعالیت گسل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی میزان فرونشست و تهیه نقشه فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری و تکنیک InSAR استفاده شده است. برای تهیه نقشه فرونشست از دو تصویر SAR مربوط به ماهواره RADARSAT استفاده شده است. تصویر اول مربوط به ۱۴ تیر ۱۳۸۵ و تصویر دوم مربوط به ۷ مرداد ۱۳۹۵ می‌باشد. ماهواره RADARSAT مربوط به سازمان فضایی کانادا می‌باشد که از تصاویر آن برای پایش محیط‌زیست و مدیریت منابع طبیعی استفاده می‌شود.

۲-۱- روش و گام‌های تحقیق

روش کلی تحقیق شامل مراحل زیر می‌باشد:

- جمع‌آوری داده از سازمان‌های مختلف
- تهیه نقشه فرونشست زمین بین سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ با استفاده از تکنیک InSAR
- درون‌یابی داده‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به‌روش کریجینگ.
- درون‌یابی داده‌های مربوط به پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به‌روش کریجینگ.

۳-۲- پارامترهای مورد بررسی

با توجه به مطالعات پیشین انجام شده یکی از اصلی ترین دلایل فرونشست زمین کاهش سطح آب های زیرزمینی می باشد به طوری که اکثریت غالب نتایج تحقیقات نشان دهنده تأثیر مستقیم این عامل بر پدیده فرونشست می باشد. مشخص است در مناطقی که کاهش سطح آب زیرزمینی رخ می دهد وقوع فرونشست زمین حتمی است ولی همان گونه که در واقعیت هم مشاهده می شود فرونشست زمین یک ناحیه با کاهش تراز آب یکسان، حتی در یک محدوده مشخص هم برای نقاط مختلف یکسان نیست. دلیل این تفاوت در میزان فرونشست زمین مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک می باشد که گاهی در یک محدوده مانند یک دشت و یا یک شهر از محلی به محل دیگر متفاوت می باشند. بنابراین در یک تحقیق جامع در این خصوص می بایست علاوه بر تغییرات سطح آب مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه نیز مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار در فرونشست شهر تبریز از ۵ معیار استفاده شده است که عبارتند از: تغییرات سطح آب های زیرزمینی، ضریب تراکم پذیری حجمی خاک، طبقه بندی نوع زمین، نتایج آزمایش SPT و نوع لایه خاک. پارامترهای فوق از بین پارامترهای مختلف مؤثر بر فرونشست زمین با استناد به پیشینه تحقیق، نظر کارشناسان و اساتید صاحب نظر در زمینه موضوع و اطلاعات در دسترس انتخاب شده است.

داده های مربوط به چاه های آب شهر با مساعدت شرکت آب منطقه ای استان جمع آوری شده و برای تهیه داده های ژئوتکنیکی با مراجعه به سازمان نظام مهندسی ساختمان استان و مطالعه دفترچه های ژئوتکنیک، در نهایت از میان دفترچه های حاوی اطلاعات کامل، ۶۰ نقطه که دربرگیرنده کلیه نواحی شهر باشد انتخاب و داده های مربوطه استخراج شده است. علاوه بر داده های میدانی، داده های راداری مربوط به ماهواره RADARSAT در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ جهت تهیه نقشه مناطق فرونشست کرده تهیه شده است.

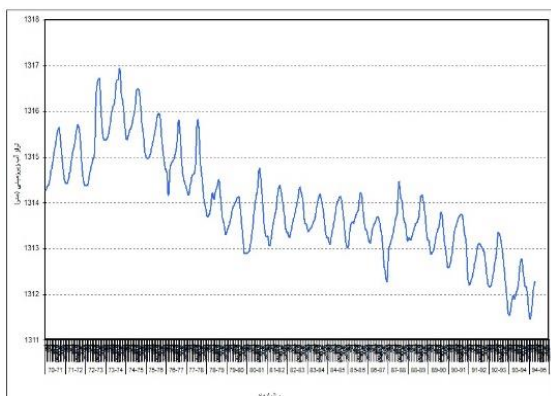
همچنین برای رسیدن به اهداف تحقیق از نرم افزارهای مختلفی استفاده گردیده است، بدین منظور از نرم افزار ArcGIS 10.5 برای انجام تحلیل های مکانی؛ از نرم افزار Expert Choice 11 برای محاسبه وزن معیارهای مدل FAHP و از نرم افزار ENVI برای پردازش تصاویر راداری استفاده شده است.

۳-۳- داده های میدانی

۳-۳-۱- سطح آب زیرزمینی

با توجه به تنش آبی به وجود آمده در منطقه و کشور و کمبود منابع آبی، در سال های اخیر شاهد کاهش شدید و محسوس سطح

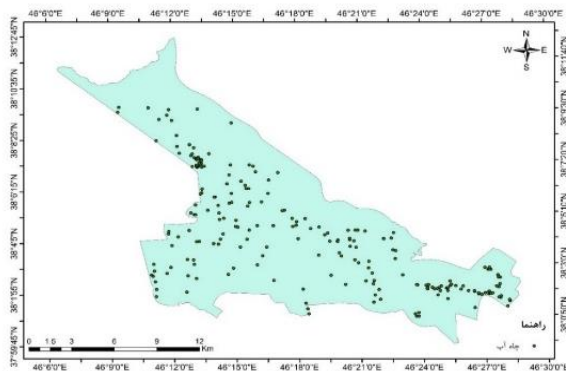
آب های زیرزمینی و کاهش منابع آبی در دشت تبریز بوده ایم (شکل ۲).



شکل ۲- تراز آب زیرزمینی دشت تبریز

در شهر تبریز وضعیت تراز آب زیرزمینی بسیار پیچیده بوده و در مناطق غربی شهر تبریز تراز آب زیرزمینی بالا و در مناطق شرقی تبریز تراز آب زیرزمینی بسیار پایین می باشد (شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی). داده های مربوط به تراز آب چاه های موجود در گستره کلان شهر تبریز از سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. تعداد ۲۲۸ حلقه چاه موجود از سازمان آب منطقه ای استان گردآوری شده و اختلاف سطح آب های زیرزمینی در یک دوره ۱۰ ساله بین سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ در منطقه مورد مطالعه تعیین شده است. موقعیت قرارگیری این چاه ها در شکل (۳) نمایش داده شده است.

بر اساس اطلاعات سطح آب زیرزمینی در چاه ها بین سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵، بیشترین و کمترین کاهش سطح آب مشاهده شده به ترتیب ۲۴ و ۳ متر می باشد که مختصات جغرافیایی چاه های مذکور در جدول (۲) ارائه شده است. بیشترین افت سطح آب های زیرزمینی طی این سال ها در مناطق غرب، جنوب غرب و قسمت هایی از شرق شهر تبریز اتفاق افتاده است و مناطق شمال- غربی شهر کم تر دچار افت سطح آب های زیرزمینی شده اند.

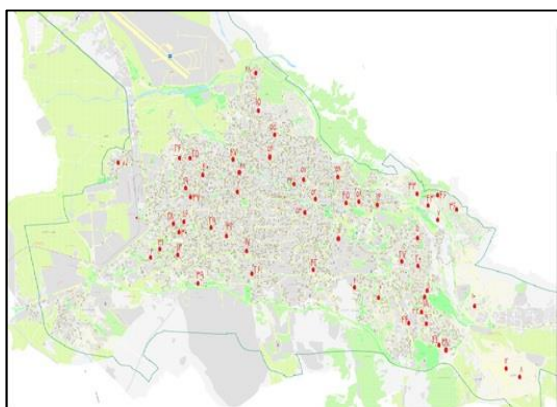


شکل ۳- موقعیت چاه های آب شهر تبریز

ارائه شده، طبقه‌بندی نوع زمین، نتایج SPT و میزان مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد.

از نظر طبقه‌بندی نوع زمین، تمامی زمین‌های موجود در منطقه مورد بررسی براساس نتایج آزمایشات ارائه شده در دفترچه ژئوتکنیک مربوطه در گروه زمین نوع ۲ و یا زمین نوع ۳ قرار دارند (براساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰). انتظار می‌رود زمین‌های نوع ۳ با توجه به نوع خاک و تراکم از استعداد بیشتری برای فرونشست برخوردار باشند. در مجموع از تعداد ۶۰ داده مورد بررسی، ۳۲ درصد از داده‌ها زمین نوع ۲ و ۶۸ درصد زمین نوع ۳ بوده است.

به‌عنوان پارامتر دیگر، نتیجه آزمون SPT از دفترچه‌های ژئوتکنیک پرونده‌های مورد مطالعه استخراج شد. آزمایش نفوذپذیری استاندارد جزو آزمایشات معمولی می‌باشد که در اکثر زمین‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر از این آزمایش به‌عنوان ملاکی برای تعیین سستی و متراکم بودن خاک‌های درشت‌دانه و نرمی و سفتی خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است. اعداد SPT در محدوده ۱۰ تا بزرگ‌تر از ۵۰ ثبت شده است.



شکل ۴- توزیع گمانه‌های داده‌های ژئوتکنیکی در شهر تبریز

با افزایش عمق، تراکم لایه‌های خاک و میزان مدول الاستیک خاک افزایش می‌یابد که این افزایش غیرخطی می‌باشد و بهتر است سعی شود برای محاسبه فرونشست زمین از ضریب تغییر حجم (Mv) به‌جای نشانه فشردگی که تقریباً ثابت است استفاده گردد. ضریب تراکم‌پذیری حجمی با میزان فرونشست خاک رابطه مستقیم دارد به‌طوری‌که در هر لایه از خاک که ضریب تراکم‌پذیری حجمی آن بیشتر باشد فرونشست خاک نیز بیشتر است (رهنمایی و میراثی، ۱۳۹۴). ضریب تراکم‌پذیری حجمی برای هر ۶۰ پرونده براساس مدول الاستیک و ضریب پواسون^۹ برداشت شده

جدول ۲- مختصات چاه‌های با بیش‌ترین و کم‌ترین افت تراز آب

شماره چاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	آب‌های زیرزمینی (متر)	اختلاف سطح
۱۲	۴۶,۲۱۶۲۱۲	۳۸,۱۲۹۵۲۶۴۸	۳	
۱۵	۴۶,۲۰۵۹۴۰۱۴	۳۸,۱۳۰۰۱۰۹	۳	
۱۶	۴۶,۱۵۷۸۴	۳۸,۱۶۲۶۳۲۵۱	۳	
۲۲	۴۶,۱۸۹۸۶۲۸۷	۳۸,۱۵۳۸۱۳۹۱	۳	
۵۷	۴۶,۲۱۹۹۱۱۵۷	۳۸,۱۲۰۱۰۶۴	۳	
۵۹	۴۶,۲۱۹۲۹۶۸۳	۳۸,۱۲۰۸۶۹۸۱	۳	
۷۶	۴۶,۲۱۷۷۰۶۷۸	۳۸,۱۲۶۷۸۹۳	۳	
۵۰	۴۶,۲۲۳۳۴۰۴۷	۳۸,۱۲۲۵۴۹۱	۳	
۳۶	۴۶,۱۸۲۴۰۲۴	۳۸,۰۴۵۰۶۵۹۲	۲۴	
۳۷	۴۶,۱۸۳۵۲۷۳۴	۳۸,۰۴۴۱۵۳۳۶	۲۴	
۷۳	۴۶,۲۱۸۸۶۳۳۹	۳۸,۰۶۸۰۰۸۳۷	۲۴	
۱۴۵	۴۶,۲۱۷۳۰۶۴۸	۳۸,۰۸۶۸۶۹۲	۲۴	

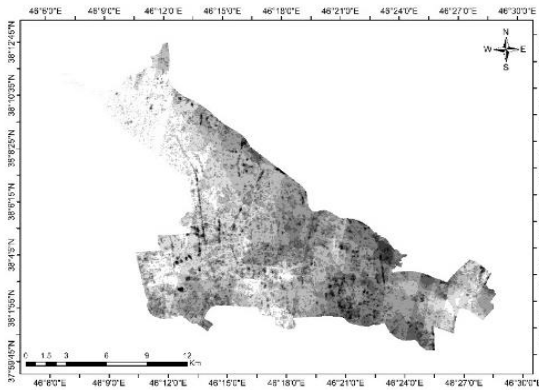
به‌طور کلی در ۳۳ درصد از چاه‌ها افت آب کم‌تر از ۱۰ متر، ۶۰ درصد افت آب بین ۱۰ و ۲۰ متر و ۷ درصد افت آب بیشتر از ۲۰ متر ثبت شده است. با برداشت بیش از حد آب سطح آب‌های زیرزمینی روزبه‌روز در حال کاهش می‌باشد. این کاهش سطح آب-های زیرزمینی باعث می‌شود تا آب موجود در بین قسمت جامد خاک خارج شده و خاک مانند اسفنجی که آب خود را از دست داده باشد به‌اصطلاح جمع شده و فرونشست در خاک ایجاد شود.

۳-۳-۲- مشخصات ژئوتکنیکی

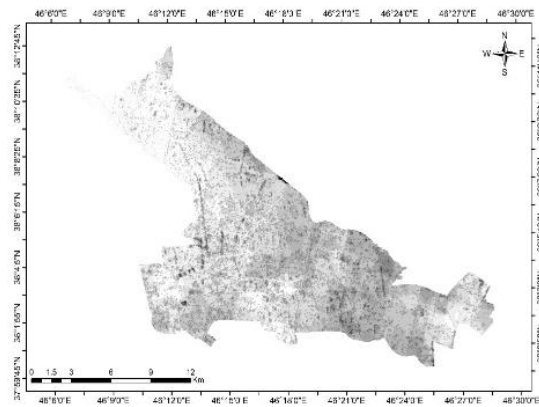
نتایج مطالعات پیشین نشان داده است که هرچقدر نوع خاک منطقه مورد مطالعه ریزدانه‌تر و نرم‌تر باشد امکان فرونشست در اثر پایین رفتن سطح آب زیرزمینی نیز بیشتر است. چنانچه قبلاً نیز اشاره شد، جهت تأمین داده‌های مربوط به خاک منطقه مورد مطالعه با مراجعه به سازمان نظام‌مهندسی ساختمان استان تعداد ۶۰ عدد از دفترچه‌های ژئوتکنیکی ساختمان‌های احداث‌شده در سطح شهر تبریز به‌دقت مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت، در چگونگی انتخاب این پرونده‌ها موضوع پراکندگی در کل سطح شهر به‌عنوان اولویت اول مدنظر بوده است به‌طوری‌که در شکل (۴) نیز مشهود است مکان احداث این ۶۰ پروژه شامل کلیه مناطق شهر تبریز می‌باشد. در انتخاب این پرونده‌ها سعی شد تا از دفترچه ساختمان‌های بیش از ۵ طبقه سازه‌ای استفاده شود، لوگ^۸ لوگ^۸ گمانه این ساختمان‌ها عمق بیشتری داشته و حاوی اطلاعات کامل‌تری می‌باشند. مهم‌ترین اطلاعات مورد استفاده شامل، نوع طبقه‌بندی خاک در تمام عمق چاه گمانه بر اساس لوگ گمانه

9. Poisson's ratio

8. Log



(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) تصویر RADARSAT تاریخ ۱۴ تیر ۱۳۸۵،
 ب) تصویر RADARSAT تاریخ ۷ مرداد ۱۳۹۵

۶- ایجاد نقشه فرونشست) در این مرحله با توجه به فاز بازایی شده نقشه فرونشست شهر تبریز تهیه گردید (شکل ۶)). با توجه به نقشه فرونشست حاصل از تکنیک InSAR، ۵ درصد از مناطق شهر تبریز با فرونشست بسیار زیاد مواجه شده‌اند عمده این مناطق در قسمت غربی شهر تبریز قرار دارد و یک قسمت کوچکی از مناطق با فرونشست خیلی زیاد در قسمت مرکزی شهر تبریز متمایل به جنوب شهر قرار دارد، ۱۷ درصد از مناطق شهر تبریز با فرونشست زیاد مواجه شده است که مناطق با فرونشست زیاد در قسمت جنوب غربی و نیمه جنوبی شهر واقع شده است. ۲۵ درصد از شهر با فرونشست متوسط مواجه بوده است که این نواحی بیشتر در جنوب و شرق می‌باشند. ۲۳ درصد از شهر نیز با فرونشست کم مواجه بوده است که این نواحی بیشتر در نقاط شمالی و مرکز متمایل به شمال شهر واقع شده‌اند. ۳۰ درصد از شهر با فرونشست بسیار کم مواجه بوده‌اند که نواحی نیز اکثر در شمال غربی شهر تبریز واقع شده‌اند.

نقشه حاصل از روش InSAR جهت مقایسه و تفسیر نتایج حاصل به صورت شبکه‌بندی شده در شکل (۷) ارائه شده است. برای نمونه همان‌گونه که در شکل زیر مشاهده می‌شود قسمتی از

از دفترچه‌های ژئوتکنیک و با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شده است.

$$\frac{1}{M_v} = \frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+\mu)} E \quad (9)$$

در رابطه فوق، E مدول الاستیک و μ ضریب پواسون می‌باشد. براساس نتایج حاصل، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر به‌دست‌آمده ضریب تراکم‌پذیری حجمی به‌ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۲ بوده است. از مجموع ۶۰ داده، مقدار ضریب تراکم‌پذیری حجمی در ۵۰ درصد مقادیر بیشتر از ۰/۰۰۳، ۳۸ درصد مابین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۲ و ۱۲ درصد کم‌تر از ۰/۰۰۲ داشته است.

۴- نتایج

۴-۱- تهیه نقشه فرونشست حاصل از تکنیک InSAR

نقشه‌های حاصل از InSAR مناطقی که در آن فرونشست مابین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. مراحل زیر برای انجام تکنیک InSAR انجام شد:

۱- تهیه تصاویر RADARSAT (شکل ۵)

۲- تولید تداخل نماها) تداخل نما از حاصل ضرب یک تصویر راداری در مختلط مزدوج تصویر دوم به‌دست می‌آید. فاز تداخل نما، اختلاف فاز زوج تصویر و دامنه آن، حاصل ضرب دامنه‌های زوج تصویر است.

۳- انتخاب تداخل نماها) این‌که کدام تداخل نماها می‌توانند دقت موردنظر را تأمین کنند توسط پارامتری به نام همدوسی تعیین می‌شود. درواقع همدوسی پارامتری مختلط است که مقدار دامنه آن معرف کیفیت تداخل نما بر اساس میزان همبستگی پیکسل‌های متناظر در دو تصویر و مقدار فاز آن همان اختلاف فاز دو تصویر یا فاز تداخل نما است.

۴- تصحیح فاز تداخل نما) در سیستم‌های تک گذر به‌دلیل اخذ هم‌زمان تصاویر، برخی از خطاها مانند خطاهای مداری، اتمسفری و... تا حد خوبی کاهش می‌یابد اما در سیستم‌های چند عبوری همچنان اثرات ناشی از این خطاها وجود دارد. فاز ناشی از توپوگرافی، زمانی که هدف از تداخل‌سنجی بررسی تغییرات ارتفاعی رخ داده در بازه زمانی موردنظر باشد (مثل بررسی فرونشست) به‌عنوان یک عامل مزاحم شناخته می‌شود و باید تصحیح شود.

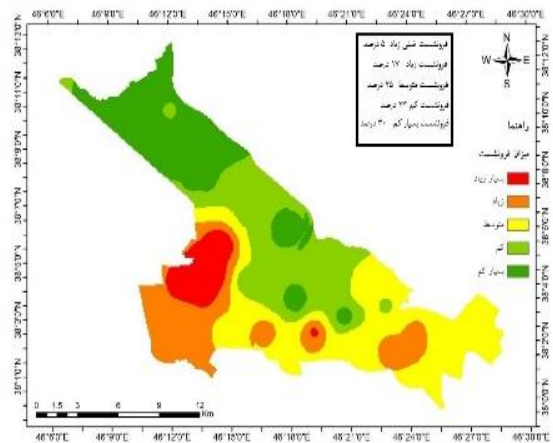
۵- محاسبه فاز تصاویر) برای به‌دست آوردن اختلاف فاز (و در نهایت اختلاف ارتفاع) در تصاویر باید تعداد سیکل‌های بین دو تصویر شمارش شود. این مرحله منجر به تبدیل فضای گسسته به فضای پیوسته می‌شود. در ادامه برای رسیدن به اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف تفاضل فاز بازایی شده محاسبه می‌شود.

۴-۲- نتایج درون‌یابی

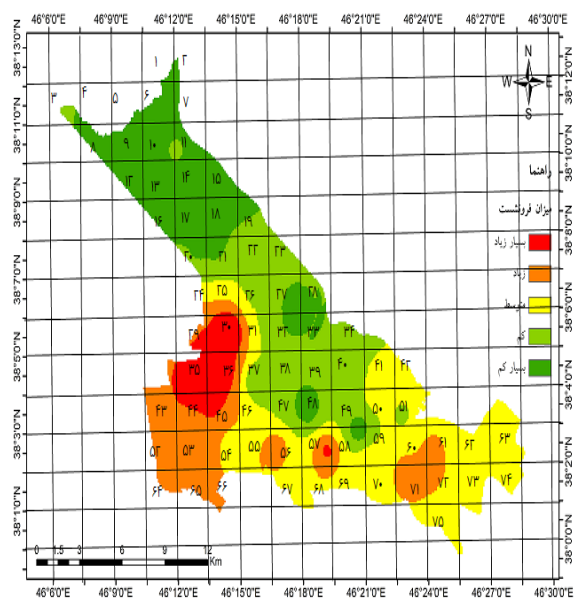
درون‌یابی روش برآورد ارزش پدیده‌ها در مکان‌های نمونه- برداری نشده با استفاده از مقادیر معلوم در نقاط همسایه است. در تحقیق حاضر به منظور درون‌یابی اختلاف سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک از روش کریجینگ استفاده شده و پس از ترسیم سمی‌واریوگرام^۱ مدل رگرسیونی مناسب به آن برازش شده است. برای این منظور با توجه به عملکرد مناسب در مطالعات زمین‌آماري پیشین (لشکری و همکاران، ۱۳۹۵)، از برازش مدل دایره‌ای استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های تعیین دقت و خطای روش‌های میان‌یابی ارزیابی متقابل می‌باشد که شامل حذف به‌نوبت نمونه‌ها و برآورد دوباره آن‌ها با استفاده از همه نمونه‌ها و مدل برازش شده بر تغییرنگار است. در نتیجه با در دست داشتن دو دسته داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده مدل‌های تخمین قابل ارزیابی می‌باشند. از متداول‌ترین آماره‌های مورد استفاده جهت آزمون دقت و خطا ریشه دوم مربع خطا (R^2) است. براساس نتایج حاصل در تحقیق حاضر کم‌ترین میزان $R^2=0.86$ مربوط به داده‌های ضریب تراکم‌پذیری حجمی بوده و سایر پارامترهای مورد بررسی دارای R^2 بالاتر از ۰/۹ می‌باشند. برای داده‌های سطح آب میزان $R^2=0.94$ است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب درون‌یابی می‌باشد.

نتایج حاصل از درون‌یابی داده‌های مربوط به افت سطح آب در چاه‌ها با تبدیل داده‌های گسسته مربوط به افت آب هر چاه به دست‌آمده است (شکل ۸). همان‌گونه که مشاهده می‌شود حاصل درون‌یابی یک مدل پیوسته می‌باشد بدین صورت که افت آب در هر نقطه داده مربوطه وجود ندارد با توجه به داده‌های موجود در نزدیک‌ترین همسایه داده‌ای درون‌یابی شده است. بر اساس داده‌های موجود مربوط به چاه‌ها، افت آب در این چاه‌ها از ۳ متر در کم‌ترین میزان افت سطح آب تا ۲۴ متر در بیش‌ترین میزان افت سطح آب متغیر بوده است، همچنین مشخص است که قسمت‌های جنوب و جنوب‌غربی دچار بیش‌ترین میزان افت سطح آب بوده‌اند. از مقایسه نقشه ارائه شده در شکل (۷) و شکل (۸) مشخص است که تمامی مناطقی که بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ با فرونشست زیاد مواجه شده‌اند، در معرض کاهش و افت شدید سطح آب زیرزمینی نیز قرار داشته‌اند و هیچ نقطه‌ای نیست که دچار فرونشست زیاد و خیلی زیاد شده باشد و در عین حال دچار افت شدید آب زیرزمینی نشده باشد. نتیجه قطعی حاصل از مقایسه دو شکل مذکور چنین بیان می‌شود، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی از شرایط لازم برای فرونشست اتفاق افتاده در سطح منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ می‌باشد که این موضوع با ادامه بررسی‌ها بیشتر نمود پیدا خواهد کرد چراکه تأثیر

غرب شهر تبریز که با فرونشست بسیار زیاد مواجه شده است بین طول جغرافیایی $46^{\circ}12'0''$ و $46^{\circ}15'0''$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ}3'20''$ و $38^{\circ}6'0''$ قرار دارد. برای سهولت کار در امر مقایسه تصاویر حاصل از مدل‌سازی، اعداد ۱ تا ۷۵ در داخل شبکه‌های شکل (۷) قرار داده شده است. در انتهای بخش نتایج و در شکل (۱۹) که مناطق مستعد فرونشست حاصل از GIS را نشان می‌دهد نیز همین شبکه‌بندی با اعداد اختصاص داده‌شده مشابه وجود دارد که مقایسه موردی را بین دو شکل راحت و ملموس می‌کند.

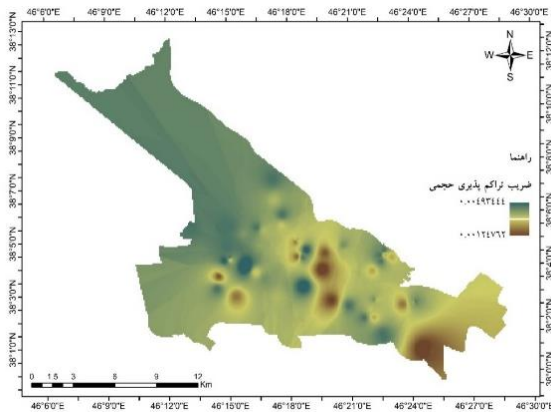


شکل ۶- نقشه وقوع فرونشست در شهر تبریز بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵

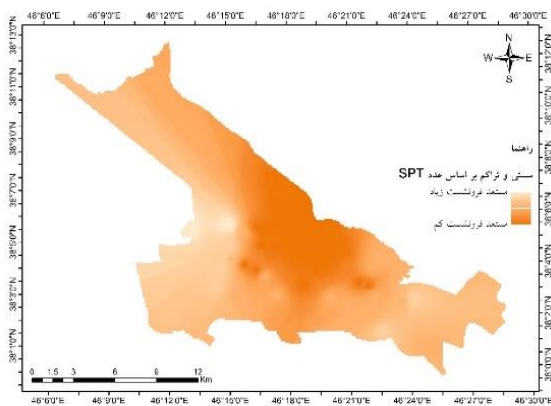


شکل ۷- شبکه‌بندی شده نقشه وقوع فرونشست

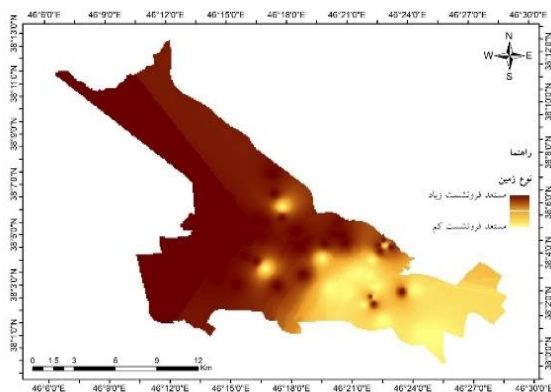
از درون یابی داده‌های مربوط به نوع زمین استخراج شده از دفترچه-های ژئوتکنیک، نیمه غربی بیشتر شامل نواحی با نوع زمین ۳ و نیمه شرقی تبریز بیشتر دارای زمین‌هایی از نوع زمین ۲ می‌باشند (شکل ۱۱)). بررسی بیشتر تأثیر این عامل بر روی وقوع فرونشست در سطح شهر تبریز براساس نقشه استانداردسازی شده این معیار انجام شده و در ادامه پژوهش ارائه شده است.



شکل ۹- نقشه درون‌یابی شده ضریب تراکم‌پذیری حجمی

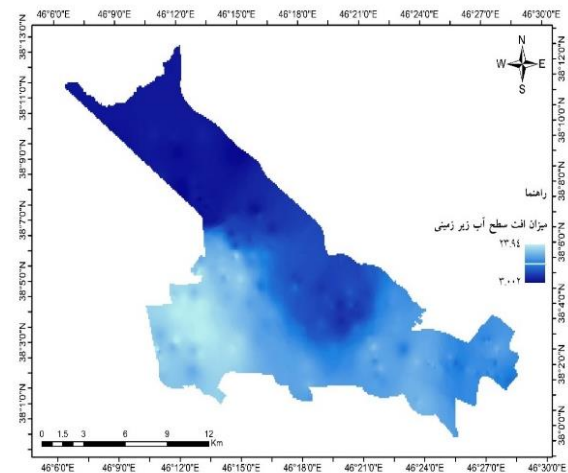


شکل ۱۰- نقشه درون‌یابی شده عدد SPT



شکل ۱۱- نقشه درون‌یابی شده نوع زمین

معیار کاهش آب‌های زیرزمینی جزو محدود معیارهایی می‌باشد که در تمامی مناطق فرونشست کرده تأثیرگذار بوده است و سایر معیارها مورد بررسی در برخی مناطقی که فرونشست زیاد و خیلی زیاد اتفاق افتاده الزاماً هم‌سو و هم‌جهت با فرونشست نبوده‌اند. با بررسی در مورد نقشه درون‌یابی کاهش سطح آب زیرزمینی مشاهده شد که در تمامی مناطقی که کاهش سطح آب زیرزمینی اتفاق افتاده است، فرونشست زمین به‌صورت فرونشست زیاد و خیلی زیاد رخ نداده است پس نتیجه دوم حاصل از بررسی تأثیر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه و در دوره زمانی مورد مطالعه تکمیل‌کننده نتیجه اول می‌باشد و چنین بیان می‌شود که معیار کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین شرط لازم برای اتفاق افتادن فرونشست می‌باشد ولی شرط کافی نمی‌باشد.

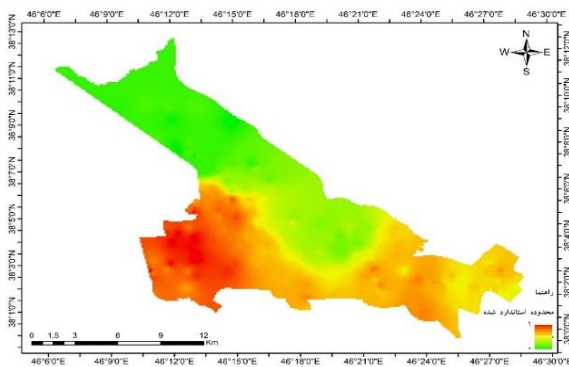


شکل ۸- نقشه درون‌یابی شده اختلاف سطح آب زیرزمینی

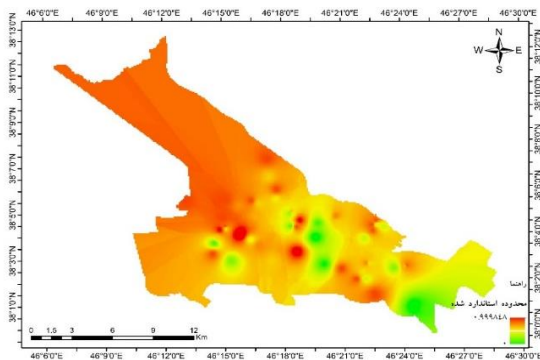
نتایج حاصل از درون‌یابی داده‌های مربوط به ضریب تراکم-پذیری حجمی در شکل (۹) ارائه شده است. با علم به این که ضریب تراکم‌پذیری حجمی با میزان فرونشست ایجاد شده رابطه مستقیم دارد لذا قسمت غربی و شمال غربی شهر براساس نتایج حاصل از درون‌یابی ضریب تراکم‌پذیری حجمی خاک از استعداد بیشتری برای فرونشست برخوردار می‌باشد. جنوب شرقی شهر و قسمتی از مرکز شهر متمایل به شرق، ضریب تراکم‌پذیری حجمی کم‌تری داشته و از نقطه نظر این پارامتر دارای خاک مرغوب‌تری هستند. نتایج حاصل از درون‌یابی داده‌های مربوط به آزمایش SPT ارائه شده در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که براساس نتایج آزمایش SPT، نواحی شمالی شهر تبریز از خاک متراکم‌تر و سفت‌تری نسبت به نواحی شرقی، شمال شرقی، و غربی تبریز برخوردار هستند. در مورد نوع زمین و طبقه‌بندی آن براساس نتایج حاصل

۴-۳- مدل FAHP

به منظور مدل سازی مناطق مستعد فرونشست در شهر تبریز از مدل FAHP استفاده گردیده است. بدین منظور ابتدا لایه برداری ۵ معیار وارد محیط GIS گردیده و در ادامه با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی Euclidean Distance لایه های وکتور تبدیل به فرمت رستر گردید. در ادامه لایه های رستری با استفاده از توابع فازی استانداردسازی شده (هر یک از لایه های نقشه معیار با استفاده از توابع عضویت فازی به بازه بین ۰ و ۱ تبدیل شدند) و پس از وزن دهی به معیارها با توجه به نظر کارشناسان مربوطه، معیارها و وزن های مربوط به آنها با یکدیگر ترکیب شده و نقشه نهایی مناطق مستعد فرونشست در شهر تبریز تهیه گردید (شکل ۱۸). در این قسمت به بررسی مورد به مورد تأثیر هر یک از پارامترهای مورد مطالعه بر روی وقوع پدیده فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه پرداخته می شود. این کار با مقایسه نقشه حاصل از تکنیک InSAR و نقشه های استانداردسازی شده هر یک از ۵ پارامتر مورد مطالعه انجام می شود (شکل های ۱۳) تا (۱۷).



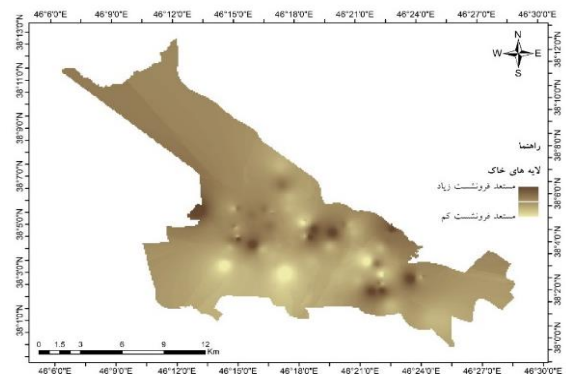
شکل ۱۳- لایه استاندارد شده اختلاف سطح آب های زیرزمینی



شکل ۱۴- لایه استاندارد شده ضریب تراکم پذیری حجمی

در شکل (۱۲) نقشه حاصل از درون یابی داده های مربوط به نوع لایه های خاک ارائه شده است. هیچ کدام از گمانه های حفر شده که جهت بررسی های ژئوتکنیکی در این ۶۰ نقطه مورد مطالعه به سنگ بستر نرسیده است. نوع و ضخامت لایه های زیرین از تنوع و گوناگونی زیادی برخوردار بودند. جهت درون یابی داده های مربوط به نوع لایه خاک در هر مورد که خاک زیرین ساختمان احداث شده بدون در نظر گرفتن ضخامت خاک دستی از بیش از یک نوع خاک تشکیل شده بود برای در نظر گرفتن نوع خاک در آن نقطه از نوع خاک با ضخامت بیشتر استفاده شده است، البته اکثر ۶۰ نقطه مورد بررسی بعد از گذر از خاک دستی شامل یک نوع خاک تا تراز زیرین گمانه حفر شده بودند. با علم به این که خاک های ریزدانه مخصوصاً رس و سیلت با نفوذ پذیری کمی که دارند آب موجود را برای مدت ها در خود حفظ می کنند و با مرور زمان و از دست دادن آب موجود داخل خاک در اثر کاهش سطح آب زیرزمینی دچار فرونشست می شوند، لذا هر جا خاک مورد مطالعه خاک ریزدانه تر و سست تری بود در درون یابی حاصل در شکل (۱۲) بیشتر مستعد فرونشست لحاظ شده است.

در انتها با ارائه نقشه حاصل از درون یابی نوع لایه های خاک موجود در شهر تبریز در شکل (۱۲) درون یابی هر ۵ پارامتر مورد بررسی شامل درون یابی افت سطح آب زیرزمینی، داده های مربوط به ضریب تراکم پذیری حجمی، داده های مربوط به اعداد آزمایش SPT، داده های مربوط به نوع زمین و داده های مربوط به نوع لایه های خاک به اتمام می رسد. براساس نوع لایه های خاک زیرین قسمتهایی از مرکز شهر، جنوب شرق و غرب شهر تبریز بیشتر امکان فرونشست دارند. در یک نگاه اجمالی به نتایج حاصل از درون یابی این نکته مشخص می شود از میان پارامترهای مورد بررسی هم قسمتی از غرب تبریز در تمام معیارهای مورد بررسی جزو نقاط مستعد برای فرونشست می باشد. این منطقه که شامل نواحی قراملک و محله های اطراف می باشد در نقشه حاصل از تکنیک InSAR هم جزء نقاطی از شهر تبریز با فرونشست بسیار زیاد می باشد.



شکل ۱۲- نقشه درون یابی شده نوع لایه خاک

ژئوتکنیک درخواست گردید تا در خصوص میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر میزان فرونشست به صورت عددی مابین ۱ تا ۱۰ اعلام نظر نمایند که در مجموع ۴۸ فرم تکمیل گردید. برای محاسبه وزن معیارها از ماتریس‌های مقایسه زوجی استفاده شده است (جدول ۳)، درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی جامع که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) به کار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی می‌باشد که مؤلفه اول آن حداقل نظرسنجی‌ها، مؤلفه دوم آن میانگین نظرسنجی‌ها و مؤلفه سوم آن حداکثر نظرسنجی‌ها می‌باشد. به منظور رعایت اختصار در ماتریس مقایسه زوجی، به جای تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی از C1، به جای ضریب تراکم‌پذیری حجمی از C2، به جای ضریب توانایی فشرده شدن از C3، به جای نوع زمین از C4 و به جای لایه‌های خاک از C5 استفاده شده است. وزن معیارهای به دست آمده در جدول (۴) ارائه شده است.

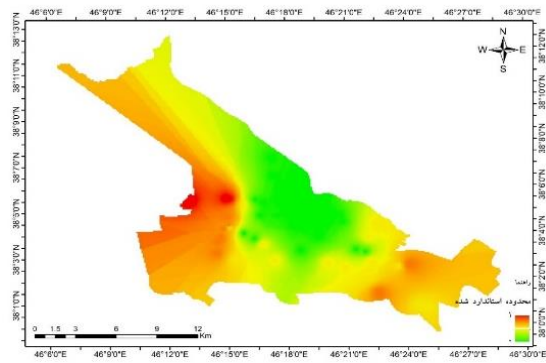
با توجه به شکل (۱۹) مناطق مستعد وقوع فرونشست در شهر تبریز مشخص گردیده است. بر این اساس ۴ درصد از مناطق شهر در منطقه با احتمال فرونشست بسیار زیاد قرار دارد، ۱۰ درصد از مناطق در نواحی با احتمال فرونشست زیاد، ۳۱ درصد از مناطق شهر در نواحی با احتمال فرونشست متوسط، ۲۸ درصد از مناطق شهر در نواحی با احتمال فرونشست کم و بالاخره ۲۷ درصد از مناطق شهر در نواحی با احتمال فرونشست بسیار کم قرار دارد. بر این اساس مناطقی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند بیشتر احتمال فرونشست در آن‌ها وجود دارد و مناطقی که با رنگ سبز مشخص شده‌اند مستعد وقوع فرونشست با میزان کم می‌باشند.

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی

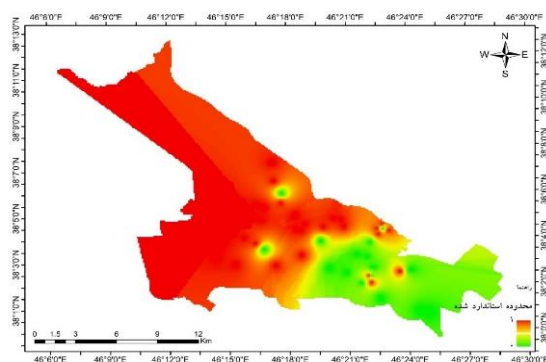
	C1	C2	C3	C4	C5
C1	(۱, ۱, ۱)	(۱, ۲/۱, ۹)	(۰/۱, ۰/۸, ۱/۴)	(۰/۷, ۱/۵, ۷)	(۰/۷, ۱/۷, ۹)
C2	(۰/۱, ۰/۶, ۱)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۱, ۰/۶, ۱)	(۰/۳, ۱/۴, ۷)	(۰/۳, ۱/۵, ۷)
C3	(۱, ۲/۱, ۹)	(۰/۱/۴, ۱, ۳)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۲, ۰/۸, ۱/۴)	(۰/۱, ۰/۶, ۱)
C4	(۰/۳, ۱/۵, ۷)	(۰/۳, ۰/۸, ۱/۴)	(۰/۷, ۱/۵, ۷)	(۱, ۱, ۱)	(۱, ۲/۱, ۹)
C5	(۰/۳, ۱/۴, ۷)	(۰/۴, ۰/۹, ۱/۸)	(۰/۳, ۱/۵, ۷)	(۰/۴, ۰/۹, ۱/۸)	(۱, ۱, ۱)

جدول ۴- وزن معیارها

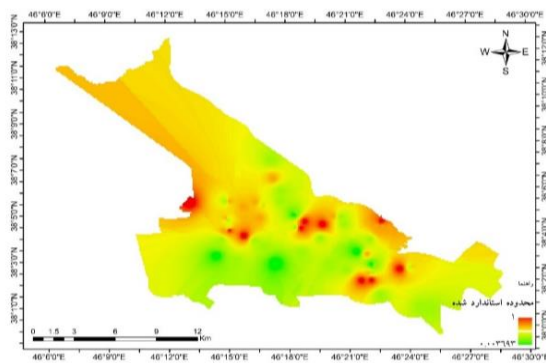
وزن	معیار
۰/۲۶	تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی
۰/۱۶	ضریب تراکم‌پذیری حجمی
۰/۱۹	نرمی و سفتی
۰/۱۵	نوع زمین
۰/۲۴	لایه خاک



شکل ۱۵- لایه استاندارد شده مربوط عدد SPT



شکل ۱۶- لایه استاندارد شده نوع زمین



شکل ۱۷- لایه استاندارد شده نوع لایه خاک

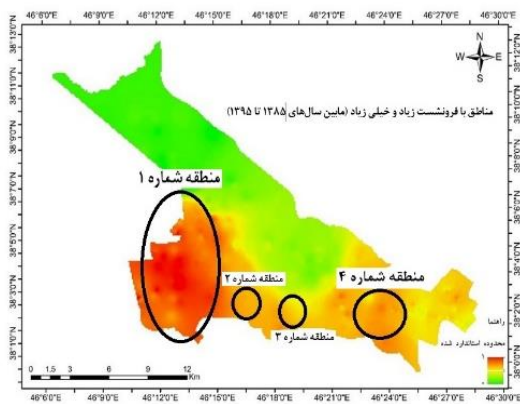
برای این منظور ۴ منطقه از مناطق کلان‌شهر تبریز که مابین سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ دچار فرونشست زیاد و خیلی زیاد شده‌اند بر روی لایه‌های استانداردسازی شده پارامترها مشخص شده و مورد به مورد بررسی می‌شود که در این نواحی مشخص شده کدام پارامتر همسو با فرونشست بوده است و اثر هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه وزن معیارها با استفاده از نظر کارشناسان، از ماتریس مقایسه زوجی با به کار گیری اعداد فازی استفاده گردید. برای این منظور برگه‌های نظرخواهی از صاحب‌نظران در این زمینه تهیه و از اساتید و مدیران آزمایشگاه‌های

کرده شهر تا سال ۱۳۹۵ مشاهده شد که مناطق فرونشست کرده زیرمجموعه‌ای از مناطقی می‌باشند که با افت زیاد و خیلی زیاد سطح آب زیرزمینی مواجه بوده‌اند. مناطق شمال غربی نیز با کم-ترین میزان افت آب‌های زیرزمینی مواجه شده‌اند که این مناطق نیز از کم‌ترین میزان فرونشست تا سال ۱۳۹۵ برخوردار بوده‌اند. لایه استاندارد شده افت آب زیرزمینی بیش‌ترین هم‌خوانی را با نقشه وقوع فرونشست در شهر تبریز دارد. نتیجه‌گیری می‌شود که افت سطح آب زیرزمینی تأثیر مستقیم در فرونشست زمین داشته و جزء شرایط لازم برای فرونشست زمین می‌باشد، اما مسئله و نتیجه جالب‌تر این است که تمامی نقاطی که با افت سطح آب زیرزمینی یکسان مواجه بوده‌اند، میزان نشست یکسان ندارد و حتی برخی از نقاط با وجود کاهش سطح آب زیرزمینی اصلاً دچار فرونشست زمین نشده‌اند که این امر نشان‌دهنده تأثیرپذیری فرونشست زمین از سایر پارامترهای موردبررسی می‌باشد. برای روشن‌تر شدن موضوع موارد زیر با توجه به شکل (۲۰) که در آن مناطق بحرانی فرونشست حاصل از تکنیک InSAR نیز مشخص شده است، به‌عنوان نتایج بررسی تأثیر کاهش سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه مشخص گردید.

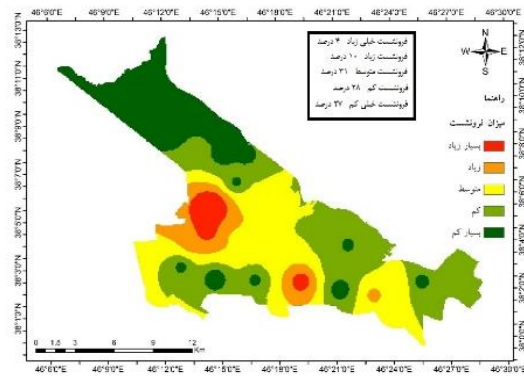
۱- کاهش یافتن سطح آب‌های زیرزمینی جزو شرایط لازم برای وقوع فرونشست زمین در شهر تبریز بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ می‌باشد.

۲- اتفاق افتادن کاهش سطح آب زیرزمینی شرایط کافی برای وقوع فرونشست زمین در شهر تبریز بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ نمی‌باشد.

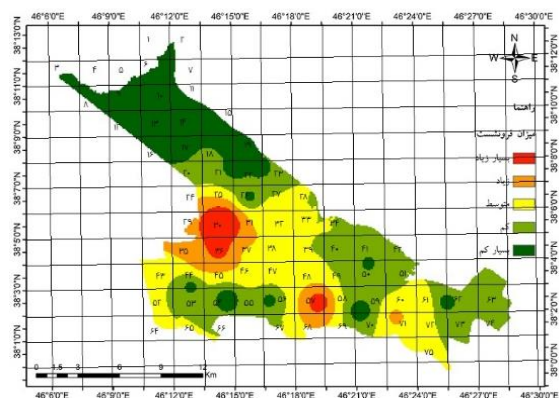
۳- در بین پارامترهای موردبررسی پارامتر کاهش سطح آب-های زیرزمینی تأثیرگذارترین پارامتر بر وقوع پدیده فرونشست می‌باشد.



شکل ۲۰- مناطق بحرانی فرونشست و لایه استانداردسازی شده کاهش سطح آب زیرزمینی



شکل ۱۸- نقشه نهایی مناطق مستعد فرونشست در شهر تبریز



شکل ۱۹- نقشه شبکه‌بندی شده مناطق مستعد فرونشست

بر اساس نتایج به‌دست آمده، قسمت‌هایی از جنوب و غرب تبریز با خطر فرونشست خیلی زیاد مواجه بوده و قسمت‌هایی از شرق و شمال غرب، شمال و همچنین قسمت‌هایی از جنوب غربی تبریز با کم‌ترین خطر مواجه می‌باشند. همچنین قسمت‌هایی از مرکز شهر نیز با خطر فرونشست متوسط مواجه می‌باشد. بر این اساس ۱۴ درصد از مناطق تبریز در ناحیه پرخطر، ۳۱ درصد در نواحی با خطر متوسط و ۵۵ درصد مناطق، در نواحی کم‌خطر از لحاظ احتمال وقوع فرونشست قرار گرفته‌اند.

۴-۴- نتایج بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با پدیده فرونشست در سطح شهر تبریز

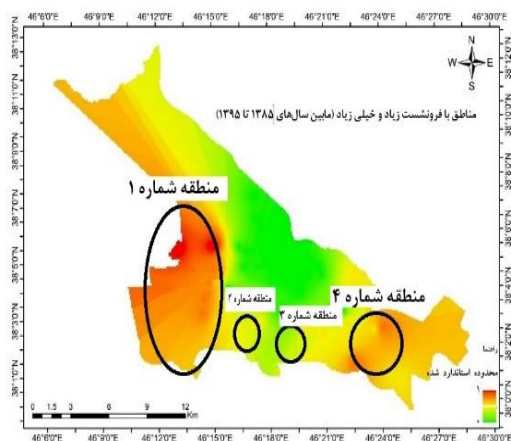
۴-۴-۱- تأثیر پارامتر کاهش سطح آب زیرزمینی بر فرونشست اتفاق افتاده در سطح شهر تبریز

طی دوره مورد مطالعه سطح آب‌های زیرزمینی براساس شکل (۲۰) که برپایه داده مربوط به چاه‌ها به‌دست‌آمده است در مناطق جنوب غرب، غرب و شرق تبریز افت نسبتاً زیادی نسبت به سایر مناطق داشته است، با مقایسه این مناطق با مناطق فرونشست

۲- بالا بودن پارامتر ضریب تراکم‌پذیری حجمی به‌تن‌های باع‌ث فرورنش‌س‌ت زم‌ین ن‌ش‌ده اس‌ت، هم‌ان‌گونه که در شکل (۲۱) نیز مشخص است قسمت‌هایی از خاک مرکز و شمال‌غربی تبریز دارای ضریب تراکم‌پذیری بالایی هستند ولی با فرونشست کم و متوسط زمین در این مناطق مواجه شده است.

۴-۴-۳- تأثیر پارامتر نتایج آزمایش SPT بر فرونشست اتفاق افتاده در سطح شهر تبریز

میزان نرمی و سفتی خاک براساس لایه استاندارد شده شکل (۲۲) در مناطق غرب و شرق دارای بیش‌ترین استعداد در فرونشست زمین می‌باشد. در قسمت‌های غربی منطبق با نقشه فرونشست می‌باشد ولی در شرق انطباق کم‌تری با نقشه ۷ دارد، که می‌تواند ناشی از تأثیر سایر عوامل دخیل در وقوع فرونشست باشد.



شکل ۲۲- مناطق بحرانی فرونشست و لایه استانداردسازی شده نتایج آزمایش SPT

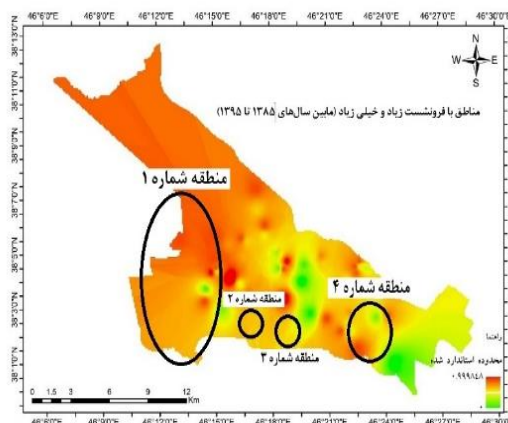
با توجه به شکل (۲۲) و پس از پیاده کردن مناطق بحرانی با فرونشست زیاد و خیلی‌زیاد مابین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ مشخص شد که در منطقه ۱ و منطقه ۴ مشخص شده بر روی شکل، تأثیر پارامتر مذکور هم‌سو با فرونشست اتفاق افتاده می‌باشد ولی در منطقه ۲ و منطقه ۳ باوجود این‌که زمین دارای خاک نسبتاً سفت و متراکمی بوده است ولی در اثر تأثیر سایر پارامترها، با فرونشست زیاد و خیلی زیاد مواجه شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- تأثیر پارامتر سفتی و سستی خاک زمین در قسمت جنوب شرقی و جنوب غربی شهر تبریز بر پدیده فرونشست کاملاً مشهود است.

۴-۴-۲- تأثیر پارامتر ضریب تراکم‌پذیری حجمی بر فرونشست اتفاق افتاده در سطح شهر تبریز

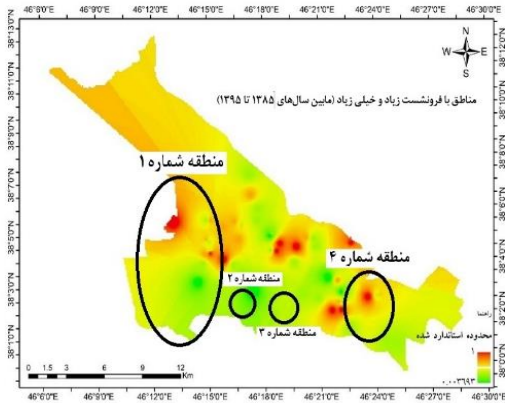
براساس نتایج حاصل از لایه استاندارد شده ضریب تراکم‌پذیری حجمی ارائه شده در شکل (۲۱)، ضریب تراکم‌پذیری حجمی در مناطق شمال‌غرب، غرب، قسمت‌هایی از شرق و جنوب تبریز دارای بیش‌ترین مقدار می‌باشد، هر قدر مقدار عددی این ضریب بیشتر باشد میزان فرونشست نیز زیاد می‌باشد، در قسمت‌های جنوب غربی، شرق و جنوب، این مناطق منطبق با مناطق فرونشست کرده می‌باشند ولی در سایر مناطق این انطباق وجود ندارد که می‌تواند ناشی از تأثیر سایر معیارهای تأثیرگذار در فرونشست باشد. با توجه به شکل (۲۱) مشخص شد که بالا بودن ضریب تراکم‌پذیری که قطعاً قبل از سال ۸۵ بیشتر از مقدار محاسبه شده کنونی بوده است باوجود این‌که در وقوع فرونشست زمین تأثیر خود را نشان داده است ولی شرط کافی نیست. به‌طور مثال برخی از مناطق مرکزی و شمالی تبریز باوجود دارا بودن استعداد فرونشست بر اساس معیار ضریب تراکم‌پذیری حجمی، در شکل ارائه شده برای فرونشست جزء مناطق با فرونشست کم می‌باشند که می‌تواند ناشی از افت کم سطح آب زیرزمینی و یا نوع خاک آن منطقه و یا تأثیر سایر پارامترها دانست. به‌طور خلاصه پس از بررسی‌های انجام شده و پیاده‌سازی مناطق بحرانی فرونشست بر روی لایه استانداردسازی شده در شکل (۲۱) موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج بررسی تأثیر پارامتر ضریب تراکم‌پذیری حجمی بر روی فرونشست زمین عنوان کرد.

۱- بالا بودن پارامتر ضریب تراکم‌پذیری حجمی جزو شرایط لازم بر وقوع فرونشست زمین در مورد شهر تبریز می‌باشد. به‌طوری‌که از شکل (۲۱) نیز پیداست ضریب تراکم‌پذیری حجمی در هر ۴ منطقه بحرانی که بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ دچار فرونشست زیاد و خیلی‌زیاد شده است عدد بالایی بود.



شکل ۲۱- مناطق بحرانی فرونشست و لایه استانداردسازی شده ضریب تراکم‌پذیری حجمی

معیارها در این مناطق بیشتر احساس می‌شود. منطقه شماره یک مشخص شده در شکل‌های (۲۰) تا (۲۴) با در نظر گرفتن اثر هر ۵ پارامتر مورد بررسی مستعد فرونشست می‌باشد که اتفاقاً براساس نتایج حاصل از تکنیک InSAR نیز دچار فرونشست با میزان زیاد و خیلی زیاد شده است.



شکل ۲۴- مناطق بحرانی فرونشست و لایه استانداردسازی شده نوع زمین

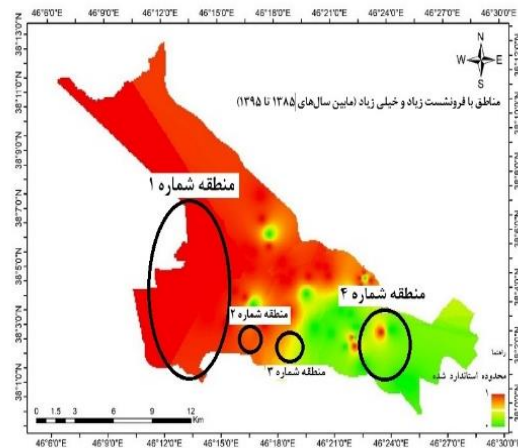
۴-۵- ارتباط بین نقشه فرونشست حاصل از مدل FAHP و نقشه فرونشست حاصل از InSAR

با مقایسه نقشه به‌دست‌آمده از مدل FAHP که برای پهنه-بندی مناطق مستعد فرونشست شهر تبریز در آینده ارائه شده در شکل (۱۹) و نقشه حاصل از InSAR به‌عنوان نقشه فرونشست به‌وجود آمده در بین سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ ارائه شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود که این دو نقشه در بیشتر مناطق با یکدیگر منطبق می‌باشند و در حالت کلی در هر دو نقشه مناطق جنوب-غرب، غرب، قسمت‌هایی از جنوب و شرق بیش‌ترین میزان فرونشست را تجربه کرده و مدل FAHP نیز نشانگر استعداد بالای این مناطق برای وقوع فرونشست می‌باشد. در مقابل مناطق شمال-غربی و شمالی شهر تبریز از کم‌ترین میزان فرونشست در هر دو نقشه برخوردار می‌باشند و قسمت‌هایی از شرق و مرکز شهر تبریز دارای فرونشست متوسط در طی دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشند. بیش‌ترین هم‌خوانی بین مدل‌سازی انجام شده و نقشه حاصل از تکنیک InSAR برای میزان و همچنین محل وقوع فرونشست با میزان بسیار زیاد می‌باشد که در هر دو نقشه محل وقوع این پدیده در مناطق مشترک می‌باشد و از نظر مساحت و دامنه وقوع در نقشه پیش‌بینی وقوع فرونشست براساس مدل‌سازی FAHP و InSAR به ترتیب برابر ۴ درصد و ۵ درصد از مناطق شهر می‌باشند. تفاوت دو نقشه به‌صورت جزئی و در مناطقی از شمال-شرق و مرکز شهر تبریز به‌چشم می‌خورد. براساس مقایسه مورد به‌مورد انجام شده بیش‌ترین تفاوت در مقایسه دو نقشه ۷ درصد

۲- در قسمت‌های جنوبی شهر تبریز که با فرونشست زیاد و خیلی‌زیاد مواجه شده است، تأثیر سایر پارامترها بیشتر از تأثیر پارامتر SPT می‌باشد.

۴-۴-۴- تأثیر پارامتر نوع زمین بر فرونشست اتفاق افتاده در سطح شهر تبریز

نوع زمین در نیمه غربی بیش‌ترین استعداد را برای وقوع فرونشست دارد که با توجه به شکل (۲۳) و پیاده‌سازی مناطق بحرانی فرونشست اتفاق افتاده در شهر تبریز بر روی لایه استاندارد-سازی شده پارامتر نوع زمین، مشخص شد که در مناطق ۱، ۲ و ۳ تأثیر این پارامتر همسو با فرونشست‌های روی‌داده است درحالی‌که در منطقه ۴ مشخص شده روی شکل، علی‌رغم زمین نوع ۲، به‌دلیل تأثیر سایر پارامترها زمین این منطقه با فرونشست قابل توجه مواجه بوده است.



شکل ۲۳- مناطق بحرانی فرونشست و لایه استانداردسازی شده نوع زمین

۴-۴-۵- تأثیر پارامتر نوع لایه‌های خاک بر فرونشست اتفاق افتاده در سطح شهر تبریز

با توجه به شکل (۲۴) و پیاده‌سازی مناطق بحرانی فرونشست کرده مشخص است که در برخی مناطق با نوع خاک مستعد فرونشست زمین دچار فرونشست زیاد و خیلی‌زیاد شده است ولی در برخی مناطق علی‌رغم این که نوع خاک مستعد فرونشست می‌باشد ولی زمین دچار فرونشست مشابه نشده است. نوع لایه خاک در مناطق غرب، شرق و شمال مستعد وقوع فرونشست می‌باشد این مناطق در قسمت‌های غربی و قسمت‌هایی از نواحی نزدیک به شرق شهر تبریز مانند بارنج، ولیعصر و ولیعصر جنوبی منطبق با مناطق وقوع فرونشست می‌باشد ولی در مناطق شمالی این انطباق به‌دلیل مساعد نبودن تأثیر سایر پارامترها، وجود ندارد و تأثیر سایر

۵- براساس مدل‌سازی انجام‌گرفته و تعیین مناطق مستعد فرونشست، ۱۴ درصد از مناطق تبریز در ناحیه پرخطر، ۳۱ درصد در نواحی با خطر متوسط و ۵۵ درصد مناطق، در نواحی کم‌خطر از لحاظ احتمال وقوع فرونشست قرار گرفته‌اند.

۶- مراجع

امیراحمدی ا، معالی اهری ن، احمدی ط، "تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS"، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲، ۱۷ (۴۶)، ۲۳-۲۱.
 امیری م، "ارتباط بین فروچاله‌های دشت فامنین کیودرآهنگ قهاوند با سنگ کف منطقه"، مجله علوم زمین، ۱۳۸۴، ۱۵ (۵۸)، ۱۴۸-۱۳۴.

انگورانی س، معماریان ح، شریعت‌پناهی م، بلورچی م، "مدل‌سازی پویای فرونشست دشت تهران"، مجله علوم زمین، ۱۳۹۴، ۲۵ (۹۷)، ۲۲۰-۲۱۱.

حسین‌زاده م، نوحه‌گر ا، "بررسی تأثیر خشکسالی‌های دو دهه اخیر بر منابع آب زیرزمینی دشت میناب و وقوع پدیده فرونشینی"، علوم محیطی، ۱۳۹۰، ۹ (۱)، ۹۷-۷۵.

حشمتی ش، المدرسی ع، "مدل‌سازی فرونشست دشت نیشابور با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک INSAR"، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۱۳۹۴، ۲۱ (۱)، ۵۷-۶۵.

حکیم‌زاده ح، حافظی‌زاده س، الماس‌پور ف، محمدی مقدم ج، "شبیه‌سازی دوبعدی پیش‌بینی روند انتقال رسوب در مخازن سدها با استفاده از تلفیق مدل عددی و GIS (مطالعه موردی مخزن سد آیدوغموش)"، مجله مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۱، ۴۲ (۴)، ۵۹-۶۵.

رهنما ح، میراثی س، "بررسی جامع وضعیت پدیده فرونشست با در نظر گرفتن آسیب‌ها و عوامل رخداد آن و ارائه راهکارهای مناسب مطالعه موردی استان فارس و چهارمحال و بختیاری"، مجله بنا، ۱۳۹۲، ۹۲ (۵۵)، ۱۴-۱.

رهنما ح، میراثی س، "تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر فرونشست زمین"، عمران مدرس، ۱۳۹۵، ۱۶ (۱)، ۵۳-۴۵.
 سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، دفتر مطالعات آب و فاضلاب، اطلاعات مربوط به چاه‌های پی‌زومتری.

شایان س، یمانی م، یادگاری م، "پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان"، هیدروژئومورفولوژی، ۱۳۹۵، ۳ (۹)، ۱۵۸-۱۳۹.

شکوهیان م، شاد ر، قاضی‌نژاد م، "تأثیر تراکم طولی و عرضی در آلودگی ناشی از ترافیک در محیط GIS (مطالعه موردی: شهر مشهد)"، مجله مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۳، ۴۴ (۲)، ۶۹-۷۹.

اختلاف در مورد درصد مساحت قسمت‌هایی از شهر می‌باشد که با فرونشست زیاد مواجه بوده‌اند، که این درصد در نقشه پیش‌بینی حاصل از مدل‌سازی FAHP برابر ۱۰ درصد مناطق می‌شود و در نقشه حاصل از تکنیک InSAR برابر ۱۷ درصد می‌باشد. در مقابل مدل‌سازی ارائه شده پیش‌بینی ۶ درصد فرونشست با میزان متوسط بیشتری را برای مناطق مرکزی شهر دارد به‌طور کلی دو نقشه ارائه شده از مطابقتی بالای ۸۵ درصد برخوردار می‌باشند به‌خصوص در مورد نواحی شمال‌غرب، غرب و جنوب شهر علی-الخصوص در مورد مناطقی که با فرونشست زیاد و بسیار زیاد در دو نقشه مشخص شده‌اند.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با مقایسه خروجی‌های پژوهش به‌صورت لایه‌های استاندارد-سازی شده مربوط به ۵ پارامتر موردبررسی در پژوهش، نقشه مناطق فرونشست کرده شهر تبریز بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ و نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست در آینده، نتایج زیر حاصل شده است.

۱- فرونشست زمین در مناطقی اتفاق افتاده است که زمین در آن مناطق با کاهش و افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه بوده-است، به‌طوری‌که هیچ منطقه‌ای از شهر تبریز نبوده است که در آن فرونشستی اتفاق افتاده باشد و درعین‌حال کاهش سطح آب زیرزمینی آن منطقه کم باشد.

۲- کاهش سطح آب زیرزمینی شرط لازم برای وقوع فرونشست زمین می‌باشد ولی این عامل شرط کافی برای اتفاق افتادن فرونشست نیست.

۳- هر چهار پارامتر ژئوتکنیکی بررسی‌شده در تحقیق جزو پارامترها و عوامل تأثیرگذار در به‌وجود آمدن فرونشست خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشند، به‌طوری‌که با وجود کاهش سطح آب زیرزمینی در برخی از مناطق جنوب و شرق به‌دلیل هم‌سو نبودن پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با مسئله فرونشست، شاهد فرونشست به‌میزان کم یا متوسط در این مناطق بوده‌است.

۴- براساس انطباق بیش از ۸۵ درصدی مناطق فرونشست-کرده در نقشه حاصل از تکنیک InSAR با مناطق مستعد فرونشست در آینده براساس مدل FAHP که بر پایه نظر کارشناسان صاحب‌نظر، مدل‌سازی انجام گرفته بود، میزان تأثیر معیارهای مختلف برای وقوع فرونشست بسیار نزدیک به عددی استفاده شده در این پژوهش می‌باشد و با توجه به‌همین انطباق تأثیر پارامترها همانند جدول (۴) منطقی به‌نظر می‌رسد با یک تغییر کوچک که در مناطق مورد مطالعه تأثیر پارامتر ضریب تراکم‌پذیری حجمی بر فرونشست زمین بیشتر از تأثیر سایر پارامترهای ژئوتکنیکی مورد مطالعه می‌باشد.

Minderhoud PSJ, Coumou L, Erban LE, Middelkoop H, Stouthamer E, Addink EA, "The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta", *Science of the Total Environment*, 2018, 634, 715-726.

عطایی م، "تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۳۹۳.

عقیقی ع، "ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مرودشت)"، پژوهش-های ژئومورفولوژی، ۱۳۹۵، ۵ (۳)، ۱۲۱-۱۳۲.

علی محمدی ع، "مبانی علوم و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی"، چاپ پنجم، انتشارات سمت، تهران، ۱۳۹۱.

قهرودی تالی م، بابایی فیینی ا، "درآمدی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه پیام‌نور، تهران، ۱۳۹۳.

لشکری ح، متکان ع ا، عساکره ح، خسروی ی، "تحلیل مکانی فشار بخار آب در جنوب و جنوب غرب ایران با استفاده از زمین آمار"، *سنجش از راه دور و GIS ایران*، ۱۳۹۵، ۸ (۲)، ۳۵-۵۲.

مالچفسکی ی، "سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری"، ترجمه پرهیزکار، اکبر، غفاری گیلانده، عطا، چاپ سوم، انتشارات سمت، تهران، ۱۳۹۲.

مجتهدی ع، الماسی ر، داداش‌زاده م، "ارزیابی اثرگذاری عوامل انسان‌پدید بر بحران دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل مکانی"، *مجله مهندسی عمران و محیط زیست*، ۱۳۹۷، ۴۸ (۲)، ۵۹-۷۰.

واعظی ع، احمدزاده ز، حسنیپور صدقی م، فاتحی فرا، "بررسی خطر احتمالی فرونشست و کارست‌زایی بر خط لوله اتیلن غرب حدفاصل میان‌دوآب به پتروشیمی تبریز"، *مجله زمین-شناسی کاربردی پیشرفته*، ۱۳۹۵، ۶ (۲۲)، ۸۹-۹۹.

Burrough PA, McDonnell R, McDonnell RA, Lloyd CD, "Principles of geographical information systems", Oxford University Press, 2015.

Bonham-Carter GF, "Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS", 1st Ed. ISBN: 9780080424200, 1994.

Chen B, Gong H, Lei K, Li J, Zhou C, GAO M, Lv W, "Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 75, 54-67.

Giao PH, Hue VT, Han ND, Anh NH, Minh NN, "Land Subsidence prediction for a new urban mass rapid transit line in Hanoi", *Underground Space*, 2018, 5 (2), 93-104.

Gumilar I, Abidin HZ, Hutasoit LM, Hakim DM, Sidiq TP, Andreas H, "Land subsidence in Bandung basin and its possible caused factors", *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 12, 47-62.

Lin F, Ying H, MacArthur RD, Cohn JA, Barth-Jones D, Crane LR, "Decision making in fuzzy discrete event systems", *Information Sciences*, 2007, 177 (18), 3749-3763.

Hu RL, Yue ZQ, Wang LU, Wang SJ, "Review on current status and challenging issues of land subsidence in China", *Engineering Geology*, 2004, 76 (1-2), 65-77.

EXTENDED ABSTRACT

The Investigation of Groundwater Reducing and Geotechnical Parameters of Soil Impacts on Land-Subsidence by GIS (Case Study: Tabriz City)

Ramin Naboureh^a, Amir Hassan Rezaei Farei^{a,*}, Bakhtiyar Feyzizadeh^b

^a Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

^b Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 08 January 2020; Accepted: 08 June 2020

Keywords:

FAHP, Groundwater level reduction, GIS, land subsidence, Interpolation, InSAR, Tabriz's geotechnical data.

1. Introduction

Land subsidence can be counted as a vital concern for human beings due to its harmful effects. The impacts of land subsidence can be seen in several forms, such as cracks in buildings, damage of infrastructures (roads and bridges), tilting and damaged houses, and increases in flooding inundation areas (Gumilar et al., 2015). Overusing of water and soil resources, which can threaten nature and human life, is considered as one of the main reasons for some natural hazards like land subsidence.

2. Methodology

Regarding the land subsidence risk as well as the fact that the reduction of groundwater level and soil geotechnical parameters are the main factors of land subsidence occurrence, in the present study, the impact of underground water level reduction and soil geotechnical parameters on land subsidence in Tabriz city were analyzed using Geographic Information System (GIS). In this regard, Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) were used between 2006 and 2016. InSAR could be applied to derive land subsidence information with high spatial and temporal resolution and has been successfully applied to measure ground surface deformation in many countries such as the USA, Germany, Mexico, Italy and China (Chen et al., 2019). Five of the most important factors on land subsidence include underground water level fluctuations, volumetric density, SPT test results, land use type, and soil types applied in the FAHP model. First, land subsidence risk maps for Tabriz city for the years 2006 and 2016 were generated using radar data and the InSAR method. In the next stage, using reliable data, interpolation maps for every single factor were produced. After producing and standardizing all layers, Criteria weights were yielded and then the layers overlaid obtaining the final risk map of land subsidence.

3. Results and discussion

The findings of the present study illustrated that the West, South-west, and some parts of South and East of Tabriz had the higher risk whereas the North and North-west part of the city had the lower risk of land subsidence. The obtained result from the InSAR method also confirmed the FAHP's result and showed that the west, South-West, and some parts of East and South of the case study area had higher risk between 2006 and 2016. These two maps had some small differences in recognizing areas with low risk or very low risk in the

* Corresponding Author

E-mail addresses: nabore.ramin@gmail.com (Ramin Naboureh), rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Hassan Rezaei), www.SID.ir feyzizadeh@tabrizu.ac.ir (Bakhtiyar Feizizadeh).

North-west and Central parts. The results of this research are of great importance for regional authorities and decision-makers in strategic land subsidence issues.

4. Conclusions

The results revealed that between 2006 and 2016, 5% of the city had very high subsidence, 17% with high subsidence, 25% with moderate subsidence, 23% with low subsidence, and 30% with very low subsidence also results revealed that the underground water level has an undeniable role on the land subsidence. Furthermore, soil parameters and characteristics showed their significant effects on the final maps; for instance, despite the notable decrease of underground water level in some areas of South and East of the study area land subsidence did not occur while it happened in the same places with favorable geotechnical parameters. On the other hand, according to the final map, although there were some areas that were favorable for land subsidence in terms of geotechnical parameters in the North of Tabriz, land subsidence didn't happen because of having low groundwater reduction.

5. References

- Chen B, Gong H, Lei K, Li J, Zhou C, GAO M, Lv W, "Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 75, 54-67.
- Gumilar I, Abidin HZ, Hutasoit LM, Hakim DM, Sidiq TP, Andreas H, "Land subsidence in Bandung Basin and its possible caused factors", *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 12, 47-62.