

## مدل سازی پویای فرونشست دشت تهران

سعید انگورانی<sup>۱\*</sup>، حسین معماریان<sup>۲</sup>، مسعود شریعت پناهی<sup>۳</sup> و محمد جواد بلورچی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۳

### چکیده

فرونشست یک پدیده زیست محیطی، به معنی نشست تدریجی و یا پایین رفتن ناگهانی سطح زمین به دلیل تراکم مواد زیر سطحی است. برداشت بیش از حد از آب های زیرزمینی، که ناشی از نیاز روزافزون به منابع آب است، یکی از دلایل اصلی رخداد این پدیده به شمار می آید. پدیده فرونشست در مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی می تواند آثار تخریبی فاجعه باری به دنبال داشته باشد. نمونه آشکار این پدیده در دشت تهران به چشم می خورد. اگر چه همبستگی بالای موجود میان فرونشست زمین از یک سو و کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و تغییر در ویژگی های مکانیکی لایه های زیرسطحی از سوی دیگر تا حد زیادی شناخته شده و تلاش های چندی برای شناخت کامل این پدیده صورت گرفته است، ولی تاکنون مدل جامع و دقیقی از پیش بینی فرونشست ارائه نشده است. مدل سازی پدیده فرونشست که یکی از پیچیده ترین مسائل در حوزه علوم زمین است می تواند به درک بهتر این پدیده و جلوگیری احتمالی از خسارات ناشی از آن بیانجامد. روش های عددی متداولی که برای مدل سازی این پدیده به کار می روند، بیشتر بر پایه فرضیات ساده کننده ای بنا شده اند که سبب می شوند نتایج حاصل از این مدل ها دقت کمی داشته باشند. در این پژوهش رهیافت جدیدی برای پیش بینی میزان فرونشست زمین با استفاده از روش های هوشمند، مانند شبکه های عصبی مصنوعی، پیشنهاد شده و کارایی رهیافت پیشنهادی در یک منطقه مورد مطالعه (دشت جنوب تهران) مورد بررسی قرار گرفته است. در جریان این پژوهش، تأخیر زمانی میان برداشت آب زیرزمینی و فرونشست، با مقایسه معادلات حاکم بر هیدروگراف ها و داده های سامانه های موقعیت یاب جهانی موجود در ایستگاه های نظارتی و به کمک الگوریتم های ژنتیک معادل ۲۷ ماه به دست آمد. متغیرهای ورودی مدل شامل تغییرات سطح آب زیرزمینی، بسامد طبیعی خاک، ستبرای رسوبات، مختصات نقاط و زمان و کمیت خروجی مدل، تغییرات فرونشست برآورد شده با استفاده از روش تداخل سنجی امواج راداری بوده است. مدل یاد شده در ۱۵ بازه زمانی ساخته و در ساخت آن از مجموعه داده های آزمون که با داده های استفاده شده در ساخت مدل، فاصله ای ۴ ماهه داشته اند، استفاده شد. مقایسه مقدار پیش بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی فرونشست، نشانگر تطابق خوب دو دسته نتایج و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی است.

**کلیدواژه ها:** فرونشست زمین، آب های زیرزمینی، مدل سازی فرونشست، شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم های ژنتیک، دشت تهران.

E-mail: angorani@alumni.ut.ac.ir

\*نویسنده مسئول: سعید انگورانی

### ۱- پیش نوشتار

فرونشست (Subsidence) عبارت است از حرکت قائم یا نشست تدریجی و یا فرو رفتن ناگهانی سطح زمین به دلیل تراکم مواد زیر سطحی، که به علت های گوناگونی رخ می دهد. یکی از علل رایج این پدیده برداشت بی رویه از آبخوان هاست (حافظی مقدس و غفوری، ۱۳۸۸). فرونشست از جمله مهم ترین مخاطرات زمین شناسی است که به علت تلفات کم انسانی در مقایسه با دیگر پدیده های طبیعی ناگهانی مانند زمین لرزه، زمین لغزش و سیل تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پدیده به طور معمول با مخاطرات فراوانی همراه است. از جمله این مخاطرات تغییر در توپوگرافی سطح زمین است که در بیشتر مواقع برگشت ناپذیر است. فرونشست یک مسئله جهانی به شمار می آید و در ایران هم در بیشتر دشت ها دیده شده است. در امریکا ۴۵ ایالت تحت تأثیر فرونشست قرار دارد. تراکم پیدا کردن خاک های آلی دلیل اصلی فرونشست است. دشت تهران یکی از مناطقی است که در حال حاضر با این پدیده روبروست. در محدوده جنوب باختری تهران بزرگ، در مناطق ۱۸ و ۱۹ شهرداری، اندازه گیری های سازمان نقشه برداری کشور نشستی به میزان حدود یک و نیم متر را در ۹ سال گذشته نشان می دهد. در همین راستا سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور نیز مطالعاتی را به انجام رسانده است (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷). با توجه به خسارات ناشی از فرونشست به تأسیسات زیربنایی، ساختمان ها و زمین های کشاورزی و غیره، شناخت این پدیده و عوامل مؤثر در ایجاد آن دارای اهمیت است و می تواند نقش مؤثری در پیش بینی این پدیده و پیشگیری از خسارات ناشی از آن، داشته باشد.

### ۲- معرفی منطقه مورد مطالعه (دشت تهران)

فرونشست تهران در پهنه ای بالغ بر ۷۱۵/۶۴ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی ۲۱° ۳۱' ۳۵" تا ۳۶° ۴۱' ۳۵" عرض شمالی و ۴۱° ۵۸' ۵۰" تا ۲۲° ۳۳' ۵۱" طول خاوری در جنوب باختری شهر تهران روی داده است. محیط این پهنه حدود ۹۷/۱۷ کیلومتر است. میزان فرونشست در بخش های مختلف متفاوت و دارای الگوی "۷" شکل است. بیشینه نرخ فرونشست حدود ۱۶ سانتی متر در سال به دست آمده است (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴). در این راستا بررسی های انجام شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، مشخص کرد که کاهش تراز سطح زمین در رابطه با رخداد پدیده فرونشست در امتداد جاده کمربندی تهران (بزرگراه آزادگان) و همچنین حدفاصل سه راه آذری تا تقاطع بزرگراه آزادگان با آیت... سعیدی (جاده قدیم ساوه) روی داده است. بررسی های صورت گرفته افت سطح آب زیرزمینی در منطقه را عامل اصلی این پدیده اعلام کرده است. موقعیت محدوده مورد مطالعه توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، در جنوب باختر تهران روی تصویر ماهواره ای در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده استفاده شده در مدل سازی بخشی از منطقه تعیین شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور است که با توجه به موقعیت چاه های مشاهده ای موجود، تغییر پذیری میزان فرونشست در محدوده تصاویر ماهواره ای با شکل هندسی منظم انتخاب شده است. این محدوده، با مساحت حدود ۶۲۱ کیلومتر مربع، در موقعیت جغرافیایی با مختصات رئوس نشان داده شده در جدول ۱ در جنوب باختری شهر تهران قرار دارد.

## ۲-۱. زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی دشت تهران

دشت تهران روی نهشته‌های آبرفتی قرار گرفته است. این دشت از دو بخش تشکیل شده است:

- بخش کوهپایه‌ای در شمال که به وسیله روران‌دگی شمال تهران از چین‌های کناری البرز جدا می‌شود.

- گودی شمالی ایران مرکزی یا دشت تهران-ری در جنوب.

گستره مورد مطالعه بخشی از دشت تهران-ری است. توپوگرافی این منطقه به طور نسبی هموار است؛ بیشینه اختلاف ارتفاع آن به ۵۰ متر می‌رسد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷). دشت تهران-ری در برگیرنده بخش‌های مرکزی و جنوبی شهر تهران، شهرری و جنوب شهرری بوده که متشکل از نهشته‌های آبرفتی جوان و کمی دیرین‌تر است (شکل ۲).

## ۳- داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی

داده‌های موجود در منطقه شامل دو دسته ایستا و پویاست. داده‌های ایستا داده‌هایی هستند که در طول مطالعات تنها یک بار اندازه‌گیری شده‌اند؛ مانند داده‌های مایکروترموگرافی به صورت تک‌ایستگاهی و آرایه و همچنین ستبرای رسوبات که با روش ژئوالکتریک اندازه‌گیری شده است. داده‌های پویا داده‌هایی هستند که در طول یک بازه زمانی به طور متوالی اندازه‌گیری شده‌اند. این داده‌ها شامل بررسی‌های تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای و تداخل سنجی راداری هستند. باید اشاره کرد که بیشترین اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی است که در بازه زمانی ۱۵ سال آبی، از ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۸ است. بر این مبنای در این مطالعه برای آسانی بررسی‌ها تاریخ مهر ماه ۱۳۷۳ ماه شماره ۱ و تاریخ شهریور ۱۳۸۸ ماه شماره ۱۸۰ نامیده شده‌اند.

## ۳-۱. بررسی ریزلرزه‌ها (مایکروترموگرافی)

ریزلرزه‌ها، ارتعاشات خفیفی با دامنه ۱ تا ۱۰ میکرون هستند که همواره در زمین وجود دارند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶). منابع تولیدکننده ریزلرزه‌ها می‌تواند عوامل طبیعی چون باد، امواج دریاها یا عوامل مصنوعی مانند ترافیک و ارتعاشات ماشین‌های صنعتی باشند (مغرب، ۱۳۸۶). در روی سطح زمین و محلی خاص، یک دستگاه لرزه‌نگار که توان تقویت امواج تا حد ۱۰۰ برابر داشته باشد می‌تواند ارتعاشات خفیف زمین را به طور مستمر ثبت کند. ریزلرزه‌ها معمولاً برای بررسی واکنش‌های دینامیکی زمین به کار می‌روند (Angorani et al., 2010). کاربرد آنها به دلیل آسانی در استفاده و همچنین کم‌هزینه بودن نسبت به روش‌هایی با کارایی همانند مانند ثبت‌های زمین‌لرزه یا انفجار و گمانه‌های ژئوفیزیکی در سال‌های اخیر اهمیت فراوانی یافته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، ۱۳۸۶). شکل ۳ نشان‌دهنده نقشه بسامد طبیعی زمین در محدوده مورد مطالعه حاصل از روش برداشت ریزلرزه به روش تک‌ایستگاهی است.

## ۳-۲. اطلاعات آب‌های زیرزمینی و تحلیل آنها

در محدوده مورد بررسی حفر چاه مهم‌ترین روش بهره‌برداری از آبخوان است و قنات اهمیت کمی دارد و بیشتر قنات‌های موجود نیز به تدریج با افت سطح آب زیرزمینی خشک شده‌اند. تعداد چاه‌های بهره‌برداری این منطقه ۶۸۴۸ حلقه است که شامل ۴۰۶۴ حلقه چاه ژرف و ۲۷۸۴ حلقه چاه کم‌ژرفاست. از میان چاه‌های ژرف ۲۷ درصد مصرف آبشامیدن، ۳۶/۴ درصد مصرف کشاورزی، ۱۲/۸ درصد مصرف صنعت و ۲۳/۸ درصد دیگر مصارف را دارند. از میان چاه‌های کم‌ژرف نیز ۲۱/۲ درصد مصرف آبشامیدن، ۱۹/۴ درصد مصرف کشاورزی، ۲۶/۵ درصد مصرف صنعت و ۳۲/۹ درصد دیگر مصارف را دارند. در جدول ۲ حجم آب زیرزمینی که برای انواع مصارف توسط چاه‌های بهره‌برداری تخلیه می‌شوند ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که کشاورزی دارای سهم چشمگیری از تخلیه سفره آب‌زیرزمینی

در منطقه فرونشست به میزان ۴۵۶/۴ میلیون متر مکعب در سال است؛ که به این میزان، تخلیه توسط چاه‌هایی که افزون بر کشاورزی مصرف دیگری نیز دارند افزوده می‌شود و مصرف کشاورزی به ۴۸۰/۱۴ میلیون متر مکعب در سال می‌رسد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، ۱۳۸۷).

در این محدوده ۹۶ رشته قنات وجود دارد. که بیشتر آنها خشک شده‌اند و تنها ۶ رشته از آنها دایر هستند. همه این قنات‌ها مصرف کشاورزی دارند و مجموع تخلیه آب‌زیرزمینی توسط آنها برابر ۴/۰۷۳ میلیون متر مکعب در سال می‌شود.

در محدوده مدل‌سازی ۳۴ چاه مشاهده‌ای وجود دارد، نوسان‌های آب زیرزمینی به وسیله چاه‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری می‌شود. این نوسان‌ها نشان‌دهنده تغییرات سطح ایستابی در آبخوان هستند. شکل ۴ چگونگی توزیع این چاه‌ها در منطقه را نشان می‌دهد. تغییرات سطح ایستابی در چاه‌های مشاهده‌ای در یک دوره ۱۸۰ ماه بررسی شده است. این تغییرات بهترین داده‌های موجود برای تغییرات سطح ایستابی در منطقه هستند که در مدل‌سازی استفاده شده‌اند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، ۱۳۸۷). آب‌نگاشت (هیدروگراف) معرف منطقه نیز در شکل ۵ ارائه شده است.

## ۳-۲. پایش فرونشست در دشت تهران با روش تداخل سنجی امواج راداری

روش تداخل سنجی راداری یا (Interferometric Synthetic Aperture RadarInSAR) روشی برای ترکیب تصاویر SAR گرفته شده از سنجنده‌های راداری نصب شده روی ماهواره یا هواپیما به منظور تهیه نقشه‌های ارتفاعی، جابه‌جایی و تغییرات سطح زمین و نیز تعیین سرعت حرکت هدف است (علی‌پور، ۱۳۸۷). دو تصویر SAR پیش و پس از ایجاد جابه‌جایی از سطح زمین گرفته می‌شود. هرگونه جابه‌جایی در سطح زمین سبب تغییر در اندازه فاصله سنجنده می‌شود. در دشت تهران با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مقدار فرونشست در ۱۶ بازه زمانی میان ماه شماره ۱۰۷ و ماه‌های شماره ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۵، ۱۱۶، ۱۱۷، ۱۱۹، ۱۲۰، ۱۲۱، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۲۸ و ۱۳۲ به دست آمده است. شکل ۶ میزان فرونشست در میان ماه‌های ۱۰۷ (مرداد ۱۳۸۲) و ۱۳۲ (شهریور ۱۳۸۴) را نشان می‌دهد. همچنین باید اشاره داشت که تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست از ماه شماره ۱۵۲ تا ماه شماره ۱۷۳ به وسیله سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در دو نقطه از منطقه مورد نظر اندازه‌گیری شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، ۱۳۸۷).

## ۴- مدل‌سازی فرونشست

برداشت از آب‌های زیرزمینی سبب تغییر در وضعیت تنش‌های وارده بر خاک و در پی آن تغییر فرونشست می‌شود (صالح‌زاده، ۱۳۷۱). کمبود منابع آب شیرین و نیاز روزافزون به آن و در پی آن تأمین این نیاز از منابع آب زیرزمینی، سبب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن فرونشست زمین شده است. هدف از مدل‌سازی فرونشست طراحی یک مدل پویا برای این پدیده طبیعی و پیچیده است. برای نمونه، مدل باید توانایی داشته باشد با ورود داده‌های مربوط به گذشته و حال، تغییرات سطح زمین را در چند ماه بعد پیش‌بینی کند. برای طراحی چنین مدلی وجود داده‌هایی که در بازه زمانی منظم اندازه‌گیری شده باشد، مورد نیاز است. نمونه‌ای از این داده‌ها مربوط به تغییرات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای است.

مدل‌سازی پویا با استفاده از داده‌های ایستا و پویا امکان‌پذیر است. برای مدل‌سازی در محدوده مورد مطالعه ابتدا مجموعه‌ای از هر دو نوع داده (ایستا و پویا) گردآوری شده است. داده‌های ایستا شامل برداشت‌های ریزلرزه به روش تک‌ایستگاهی و آرایه است. با استفاده از برداشت‌های ریزلرزه به روش تک‌ایستگاهی مقدار بسامد طبیعی زمین در هر ایستگاه برداشت و با استفاده از روش آرایه مقدار سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری در ایستگاه‌های برداشت برای ژرفای مختلف به دست آمد. داده‌های پویا شامل تغییر سطح ایستابی در ۳۴ چاه مشاهده‌ای در مدت ۱۸۰ ماه

تأخیر زمانی میان کاهش تراز آب زیرزمینی و فرونشست را می‌توان با استفاده از مقایسه تغییرات شیب معادلات آب‌نگاشت‌ها و همچنین سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی به دست آورد. یکی از فرض‌های اولیه حل این مسئله عبارت است از اینکه تغییرات سطح آب زیرزمینی در یک ماه متناسب با تغییرات یک ماهه سطح زمین در اثر فرونشست است. با استفاده از این فرض، برای این کار روش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفت و در پایان مقایسه تغییرات نسبت شیب معادلات در دو ماه متوالی به عنوان راهکار اصلی در نظر گرفته شد. بر پایه این راهکار، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک چند هدف، بازه‌ای که تغییرات نسبت شیب دو ماه متوالی در معادلات سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی با نسبت شیب دو ماه در معادلات برازش شده آب‌نگاشت‌ها بیشینه همانندی را دارد، به عنوان تأخیر زمانی به دست آمد. مقدار تأخیر زمانی میان برداشت آب زیرزمینی و فرونشست ناشی از آن ۲۷ ماه به دست آمد.

#### ۵- مدل‌سازی فرونشست با استفاده از شبکه عصبی

یکی از ابزارهای مناسب برای مدل‌سازی فرونشست، شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند؛ شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی مدل‌سازی پویای پدیده پیچیده‌ای مانند فرونشست را دارند. شبکه‌های عصبی ابتدا باید به وسیله یک سری داده شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها آموزش داده شوند که با این کار توانایی یادگیری رابطه میان ورودی و خروجی را خواهند داشت و با این رابطه می‌توان مقدار خروجی را برای ورودی‌های جدید برآورد کرد (منهاج، ۱۳۸۱؛ Hagan et al., 2001). آزمایش کارکرد شبکه با استفاده از مجموعه داده‌هایی که در آموزش شبکه شرکت نداشته‌اند، صورت می‌گیرد؛ به این مجموعه، داده‌های آزمون گفته می‌شود. مقدار خروجی برآورد شده به وسیله شبکه با مقدار واقعی مقایسه می‌شود. در صورتی که خطای برآورد کم باشد، آموزش شبکه متوقف می‌شود. نمودار (فلوچارت) مراحل کار در شکل ۱۰ آمده است.

#### ۵-۱. گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها

برای مدل‌سازی فرونشست ابتدا باید ورودی‌ها و خروجی‌های مناسب انتخاب شوند. با توجه به مباحث پیشین، متغیر خروجی، تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست حاصل از روش تداخل‌سنجی امواج در بازه‌های زمانی مختلف است. متغیرهای ورودی شامل تغییرات سطح آب زیرزمینی متناسب با هر یک از تصاویر ماهواره‌ای، بسامد طبیعی خاک و ستبرای رسوبات در هر نقطه است. به غیر از ورودی‌های بیان شده مختصات نقاط و همچنین زمان (شماره ماه) مربوط تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست نیز جزو ورودی‌ها هستند. باید اشاره کرد که همه متغیرها در منطقه برای مرکز ۲۴۸۸ سلول، ۵۰۰ در ۵۰۰ متر، به دست آمده است. در پایان مجموعه داده‌ها در ۱۵ بازه زمانی شامل ورودی‌های شماره ماه، X و Y مرکز سلول‌ها، تغییرات سطح آب متناسب با شماره ماه (با احتساب تأخیر)، بسامد طبیعی، ستبرای رسوبات؛ و خروجی نیز تغییرات سطح زمین در ماه مربوط است. بازه‌های زمانی شامل ماه‌های شماره ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۵، ۱۱۶، ۱۱۷، ۱۱۹، ۱۲۰، ۱۲۱، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۲۸ هستند. مجموعه داده‌های مربوط به ماه شماره ۱۳۲ برای آزمون دوباره شبکه طراحی شده با استفاده از داده‌های ۱۵ بازه زمانی پیشین وارد محاسبات نشده‌اند. دلیل وارد نکردن داده‌های مربوط به این بازه زمانی این است که مقدار دقت شبکه طراحی شده برای پیش‌بینی فرونشست برآورد شود.

تعداد کل جفت داده‌ها ۳۷۲۷۶ هستند. مجموعه داده‌های آموزش و آزمون از میان ۳۷۲۷۶ جفت ورودی و خروجی به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی و ۲۰ درصد برای آزمون در نظر گرفته شده است. شبکه عصبی با استفاده از مجموعه داده‌های آموزش تربیت شده و درستی آن با استفاده از مجموعه اعتبارسنجی و مجموعه آزمون بررسی می‌شود. مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا

(دوره سال آبی ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۸) است، همچنین، داده‌های تغییر ارتفاع سطح زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در بازه ۲۵ ماهه در دسترس بوده است.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، فرونشست در اثر برداشت از آب زیرزمینی و در نتیجه تغییر تنش‌های وارد بر خاک پدید می‌آید و میزان نشست زمین در اثر این پدیده نیز بسته به جنس خاک، متفاوت است. متغیرهایی که از روش‌های ژئوفیزیکی به دست می‌آیند، نماینده تغییرات جنس خاک هستند. تغییرات پویا در سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای نیز نماینده تغییرات سطح ایستابی است (Domenico, 1972; Poland, 1981; Chiang & Kinzelbach, 1998 & 2001; Larson et al., 2001; Phien-wej et al., 2006). با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری نیز میزان فرونشست در هر نقطه در سطح زمین به دست می‌آید و تعیین می‌شود. حال با استفاده از متغیرهای بیان شده می‌توان یک مدل پویا برای فرونشست طراحی کرد.

#### ۴-۱. محاسبه بازه زمانی میان برداشت آب زیرزمینی و رخداد فرونشست با استفاده از الگوریتم ژنتیک

با کاهش تراز آب زیرزمینی افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی سبب ایجاد فرونشست می‌شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر زمان‌بر است و این زمان بر طبق نظر برخی از پژوهشگران از چند ماه تا چند سال متغیر است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶). در نتیجه، به دنبال کاهش تراز آب زیرزمینی فرونشست با یک تأخیر زمانی رخ خواهد داد. باید توجه داشت که در هر منطقه بسته به جنس لایه‌های زیرسطحی این مدت متفاوت خواهد بود. لازم به یادآوری است که در مدل‌سازی فرونشست شناخت مقدار تأخیر زمانی بسیار مهم و حیاتی است. در مدل‌سازی پویای یک پدیده در صورت ندانستن اینکه متغیرهای مؤثر در ایجاد این پدیده مربوط به چه زمانی هستند و چقدر زودتر از خود پدیده ایجاد شده‌اند، پیش‌بینی پدیده ممکن نخواهد بود. با توجه به این مطلب لزوم شناسایی درست مقدار تأخیر زمانی میان کاهش تراز آب زیرزمینی و تغییرات سطح زمین روشن می‌شود. در این پژوهش با استفاده از یکی از روش‌های هوشمند، این تأخیر زمانی به دست آمده است.

چون فرونشست زمین تابعی از تغییرات تراز آب زیرزمینی است، پس با یک تأخیر زمانی تغییرات سطح زمین متناسب با تغییرات تراز آب زیرزمینی است. برای بررسی این مطلب می‌توان از دو ایستگاه نظارتی موجود در منطقه که شامل یک سامانه موقعیت‌یاب جهانی مستقر و همچنین یک چاه‌های مشاهده‌ای در مجاور آن در منطقه است استفاده کرد. شکل ۷ موقعیت ایستگاه‌های نظارتی را نشان می‌دهد. شکل ۸ تغییرات ثبت شده به وسیله سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی را نمایش می‌دهد. با استفاده از چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه ۴ آب‌نگاشت معرف تهیه می‌شود که نشانگر روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در منطقه هستند. آب‌نگاشت اول مربوط ایستگاه نظارتی A و چاه‌های مشاهده‌ای پیرامون و آب‌نگاشت دوم مربوط به ایستگاه نظارتی B و چاه‌های مشاهده‌ای پیرامون آن است. آب‌نگاشت سوم با استفاده از هر دو ایستگاه نظارتی A و B و چاه‌های مشاهده‌ای پیرامون این دو ایستگاه رسم شده است. آب‌نگاشت چهارم، معرف دشت تهران است. آب‌نگاشت‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. حال با استفاده از روش‌های برازش نمودار بهترین معادله متناسب با این تغییرات روی این نمودارها برازش شد. معادله برازش شده بر سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی از نوع گوسین درجه ۴ و معادله آب‌نگاشت‌ها از نوع گوسین درجه ۸ است. معادله بهینه طوری انتخاب شد که دارای کمترین خطای میانگین مربعات خطا و همچنین مجذور میانگین مربعات خطا نسبت به دیگر معادلات باشد. معادلات به دست آمده نشان‌دهنده تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه است.

## ۶- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی پدیده فرونشست زمین که بیشتر ناشی از برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است می‌تواند به درک بهتر این پدیده خطرناک و جلوگیری از خسارات و مشکلات ناشی از آن بیانجامد. در این پژوهش رهیافت جدیدی برای مدل‌سازی پدیده فرونشست با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی تکاملی ارائه شد که امکان پیش‌بینی میزان فرونشست را با دقت قابل قبولی فراهم می‌کند.

در رهیافت جدید، افزون بر بررسی چگونگی تغییرات سطح آب زیرزمینی نسبت به تغییرات سطح زمین، یک مدل عصبی-ژنتیک برای بیان ارتباط این دو کمیت ارائه می‌شود. برای این منظور با توجه به همسو نبودن تغییرات سطح زمین با تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر بازه زمانی مشخص و نیز تأخیر زمانی فرونشست نسبت به افت تراز آب زیرزمینی، ابتدا این تأخیر با مقایسه معادلات حاکم بر آب‌نگاشت‌ها و همچنین سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی موجود در ایستگاه‌های نظارتی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به دست می‌آید. در این محاسبه لازم است افزون بر تغییرات در سطح آب زیرزمینی، متغیرهای دیگری نیز که نماینده تغییرات جنس لایه‌های زیرسطحی باشند (مانند بسامد طبیعی زمین و ستبرای رسوبات) به کار گرفته شود. در مرحله بعد، مجموعه‌ای از داده‌های گردآوری شده، شامل داده‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی، بسامد طبیعی خاک، ستبرای رسوبات، مختصات نقاط اندازه‌گیری شده، شماره ماه‌ها و نیز داده‌های تصاویر ماهواره‌ای متناظر با داده‌های بالا برای تربیت یک شبکه عصبی به کار می‌رود که خواهد توانست میزان فرونشست زمین را برای یک منطقه خاص و به‌ازای تاریخچه مشخصی از برداشت آب زیرزمینی با دقت خوبی پیش‌بینی کند.

برای نشان دادن کارایی رهیافت پیشنهادی، این روش در مورد ناحیه‌ای در دشت جنوب تهران به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان از دقت ۹۷ درصدی شبیه‌سازی‌ها و نیز همانندی قابل توجه الگوهای شبیه‌سازی شده با الگوی واقعی برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای است.

به‌طور خلاصه، از میان نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان نکات زیر را مورد تأکید قرار داد:

با توجه به انعطاف‌پذیری و قدرت تعمیم شبکه‌های عصبی، این روش ابزار مناسبی برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده و به‌ویژه پویا در حوزه علوم زمین، مانند پدیده فرونشست، به شمار می‌آیند. در مورد اخیر با استفاده از داده‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی، بسامد طبیعی خاک، ستبرای رسوبات و مختصات نقاط و شماره ماه‌ها به‌عنوان ورودی‌ها و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان خروجی، الگوی مناسبی از تغییرات فرونشست به دست می‌آید.

در مواردی که پیچیدگی بیش از حد پدیده مورد بررسی در قالب یک شبکه عصبی قابل ارائه نیست، می‌توان در نقاطی که خواص مشترک دارند و یا در یک بازه قرار می‌گیرند، از چند شبکه عصبی برای مدل‌سازی استفاده کرد.

از نوع با ناظر است. تعداد نرون‌ها در لایه ورودی برابر با بعد ورودی یعنی ۶ عدد است. تعداد نرون‌ها در لایه خروجی نیز برابر با بعد خروجی یعنی ۱ است. شبکه‌ای با تعداد سه لایه پنهان با ۶، ۳ و ۹ نرون در این لایه‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Levenberg- Marquardt برای آموزش شبکه به خطای مطلوب رسید است. جدول ۳ مقدار خطای به دست آمده روی مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون و همچنین کل داده‌ها را نمایش می‌دهد.

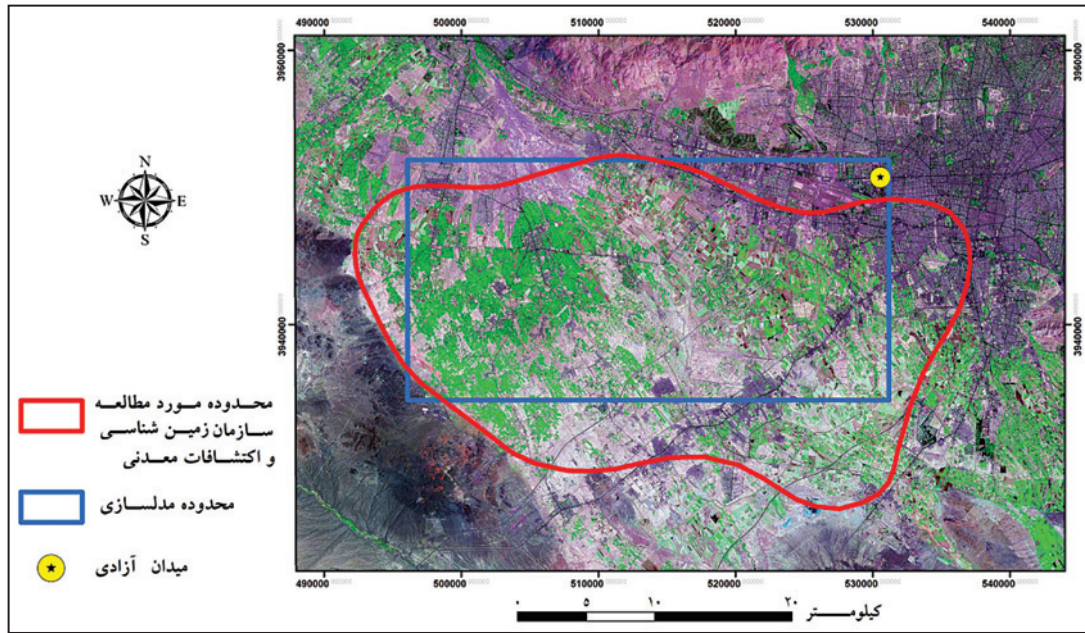
همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار میانگین مربعات خطا پایین است و مقدار جذر میانگین مربعات خطای کل داده‌ها نشان می‌دهند که متوسط شبکه به‌طور متوسط در هر نقطه از برآورد ۱/۴۰۱۶ سانتی‌متر خطا دارد. میانگین خطا نیز نزدیک به صفر است که نشان‌دهنده این است که مقدار بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی در نقاط مختلف برابر است. ضرایب رگرسیون روی همه مجموعه‌های داده‌ها بیشتر از ۰/۹۸ است که نشان از عملکرد قوی شبکه در درون‌یابی دارد.

## ۵-۲. آزمایش مدل فرونشست

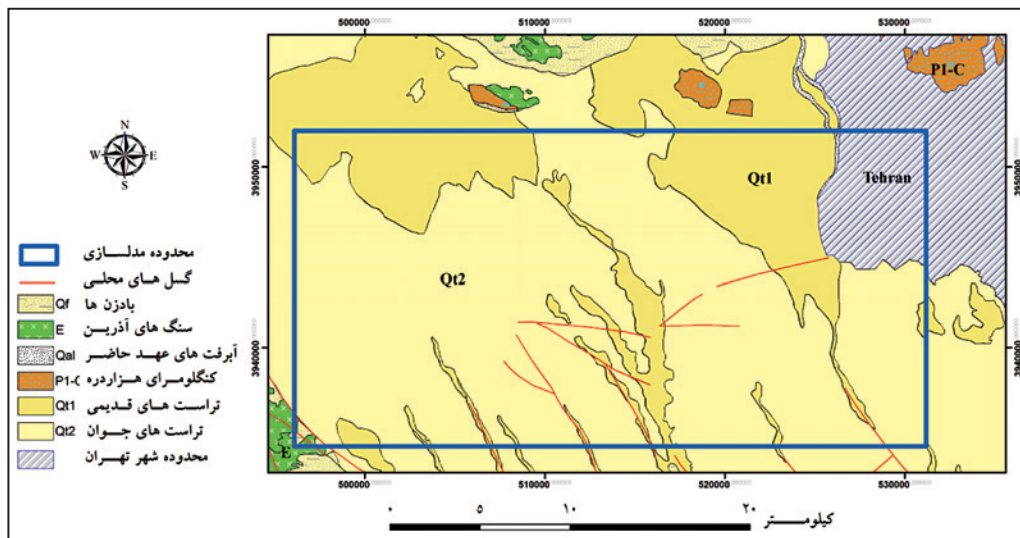
در بخش پیش بیان شد که با توجه به مقدار خطای به دست آمده، شبکه عصبی موجود عملکرد بالایی در درون‌یابی دارد (حسینی پاک، ۱۳۸۴). باید توجه داشت که پیش‌بینی فرونشست یک برون‌یابی است و عملکرد شبکه عصبی موجود زمانی ارزشمند خواهد بود که با استفاده از آن بتوان مقدار فرونشستی را که در آینده رخ خواهد داد را پیش‌بینی کرد. برای آزمون چگونگی عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی فرونشست، از مجموعه داده‌های سری ۱۶ که مربوط به فرونشست در ماه ۱۳۲ هستند استفاده می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد این مجموعه مربوط به ۴ ماه پس از زمان داده‌هایی است که شبکه عصبی به وسیله آن ساخته شده است. یعنی آخرین داده‌هایی که در آموزش شبکه عصبی شرکت داشته‌اند، مربوط به ماه شماره ۱۲۸ هستند و عملکرد شبکه عصبی با استفاده از داده‌های ۴ ماه بعد یعنی ماه ۱۳۲ سنجیده می‌شود.

در پایان با وارد کردن مجموعه داده‌های ورودی مقدار فرونشست در ماه ۱۳۲ پیش‌بینی شده است. جدول ۴ مقدار فرونشست پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در ماه ۱۳۲ را با مقدار واقعی فرونشست که در این ماه رخ داده است، مقایسه می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود با اینکه مقدار ضریب رگرسیون ۰/۹۷۹۳ است، ولی مدل موجود به‌طور متوسط مقدار فرونشست را در هر نقطه با ۳/۰۸۱۰ سانتی‌متر خطا برآورد می‌کند. شکل ۱۱ ضریب رگرسیون میان مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل را نمایش می‌دهد.

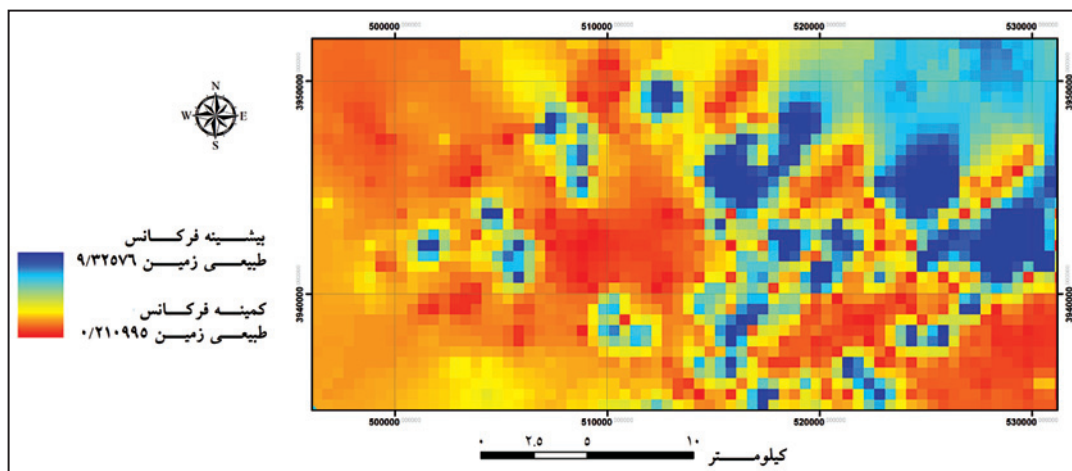
شکل ۱۲ مقایسه‌ای میان الگوی حاصل از فرونشست برآورد شده توسط مدل و الگوی واقعی در ماه ۱۳۲ را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، الگوی برآورد شده توسط مدل، همخوانی خوبی با الگوی واقعی فرونشست دارد ولی مقدار عددی برآورد شده توسط مدل برای هر نقطه با مقدار واقعی متفاوت است.



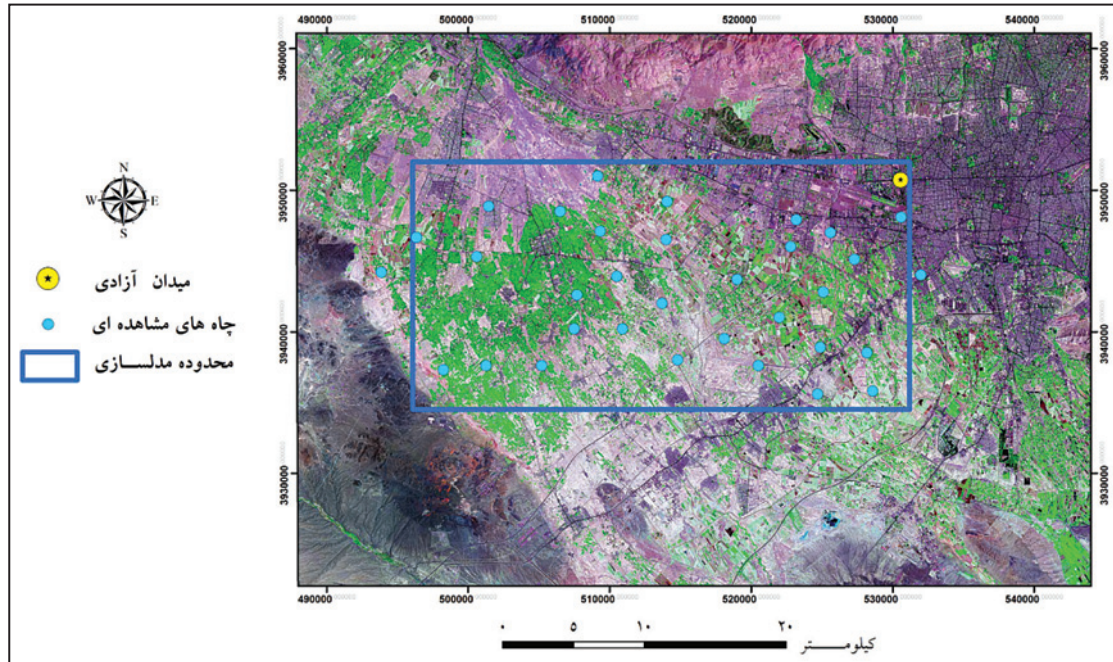
شکل ۱- محدوده فرونشست مورد مطالعه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور و محدوده مدلسازی (مستطیل) روی تصویر ماهواره‌ای.



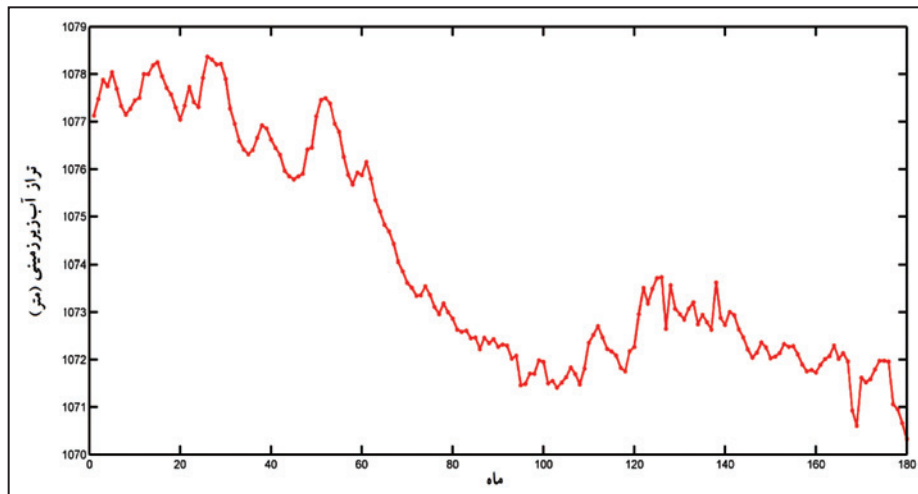
شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه.



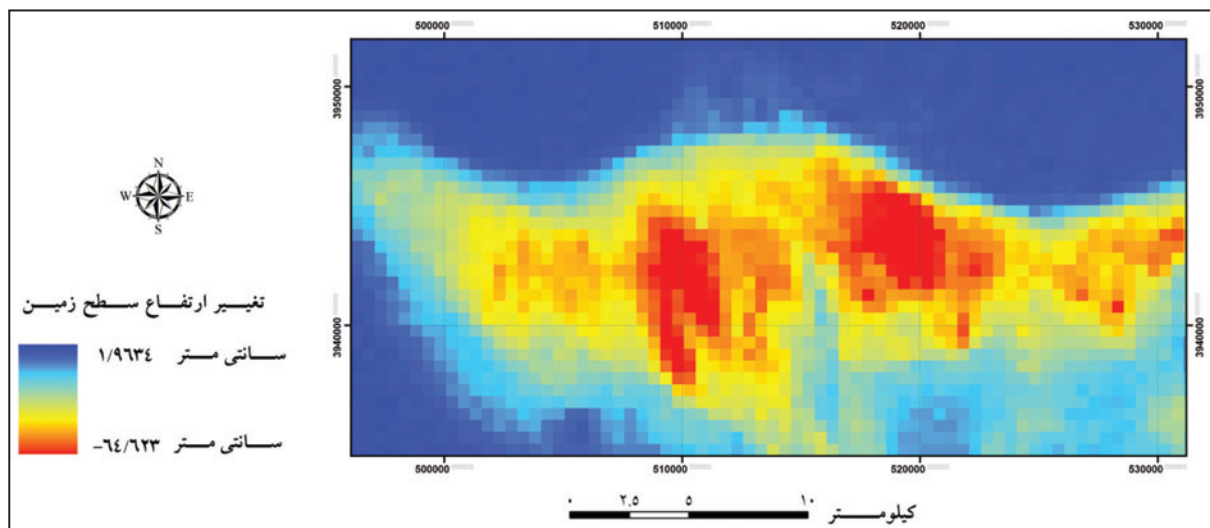
شکل ۳- بسامد طبیعی زمین در محدوده مورد مطالعه در تاریخ ۱۳۸۷/۱/۳۰.



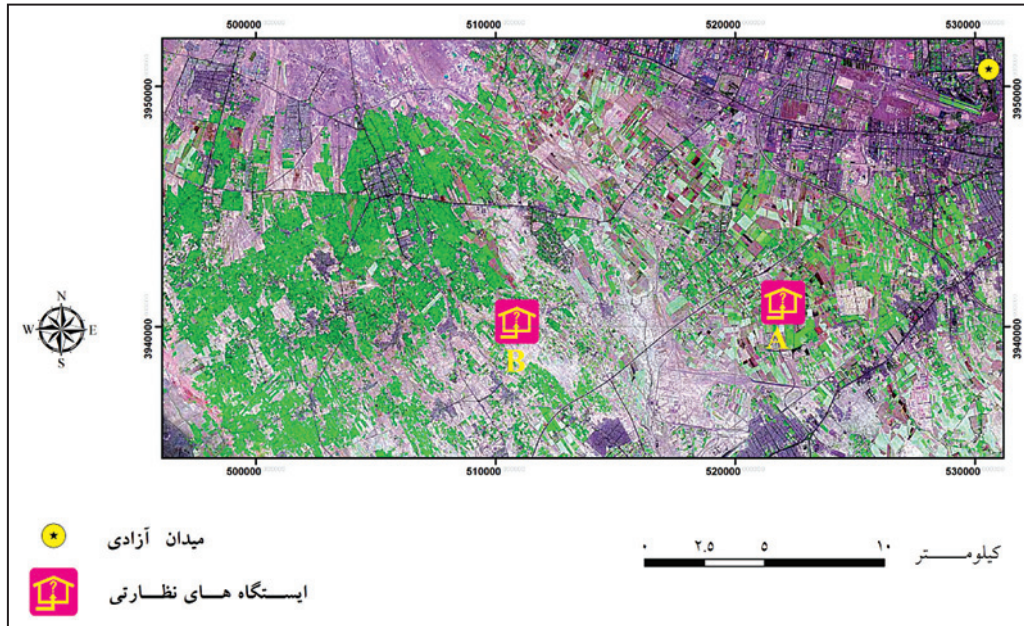
شکل ۴- چگونگی توزیع چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه.



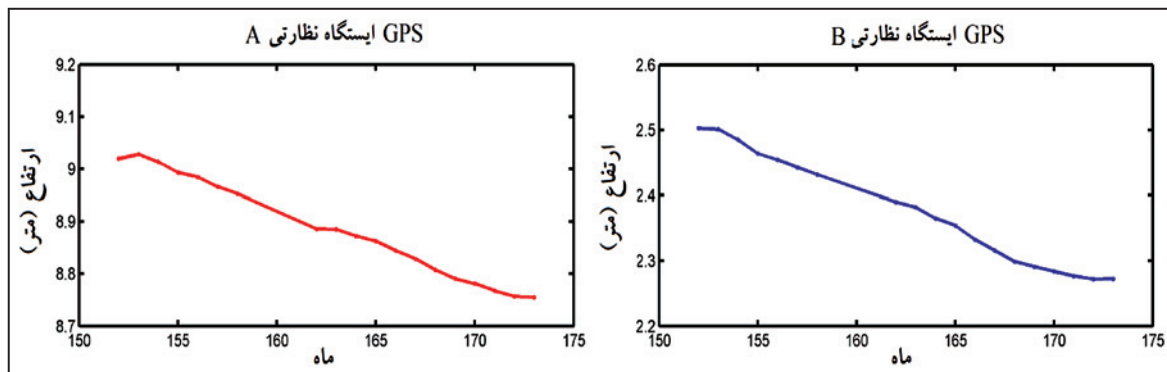
شکل ۵- آب‌نگاشت (هیدروگراف) معرف دشت تهران.



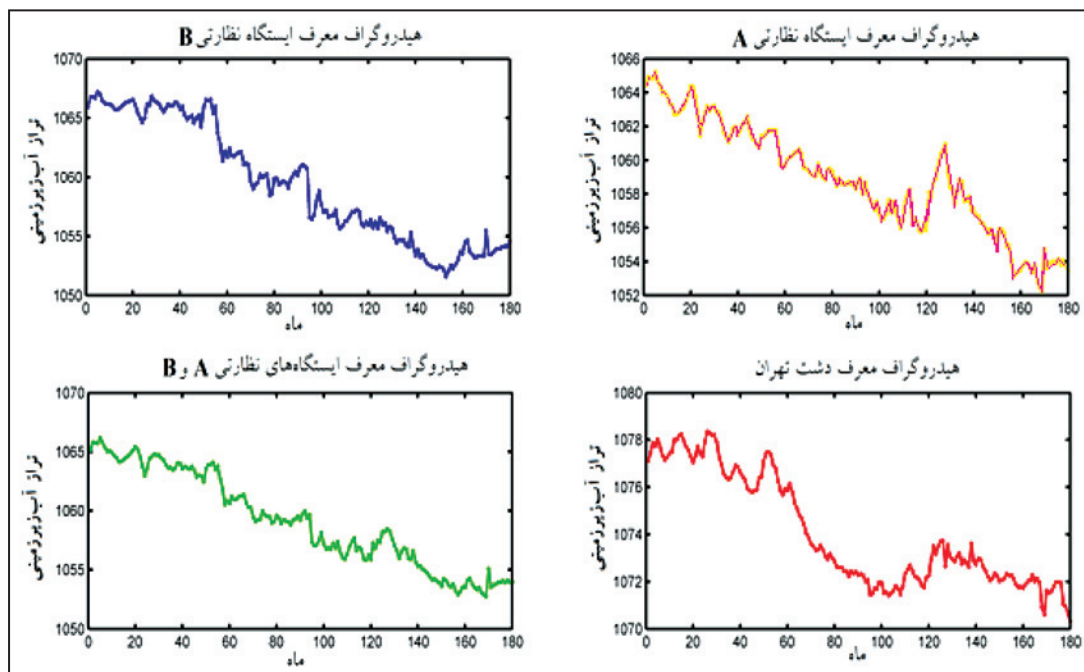
شکل ۶- میزان فرونشست در میان ماه‌های ۱۰۷ و ۱۳۲ با استفاده از روش تداخل سنجی امواج.



شکل ۷- موقعیت ایستگاه های نظارتی.



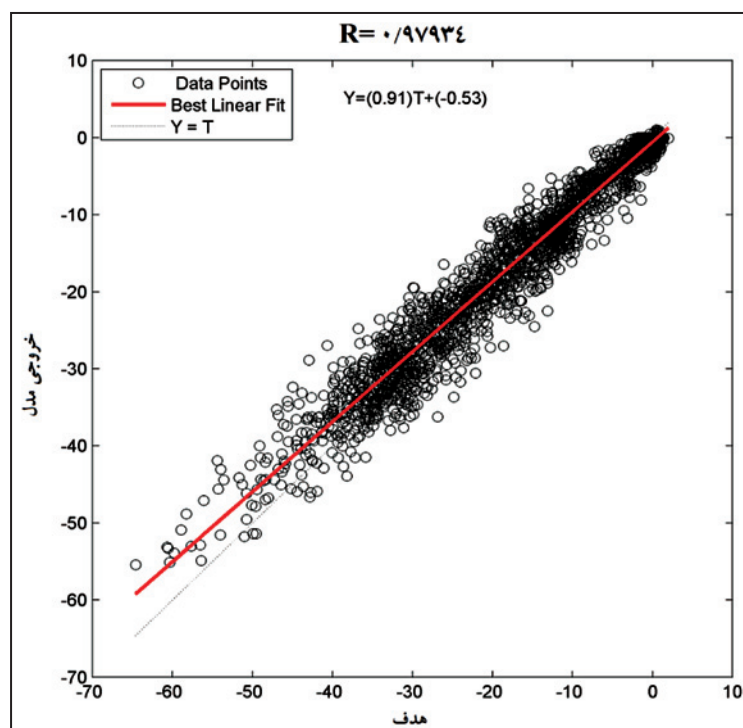
شکل ۸- تغییرات سطح زمین ثبت شده توسط سامانه های موقعیت یاب جهانی.



شکل ۹- آب‌نگاشت های معرف منطقه.

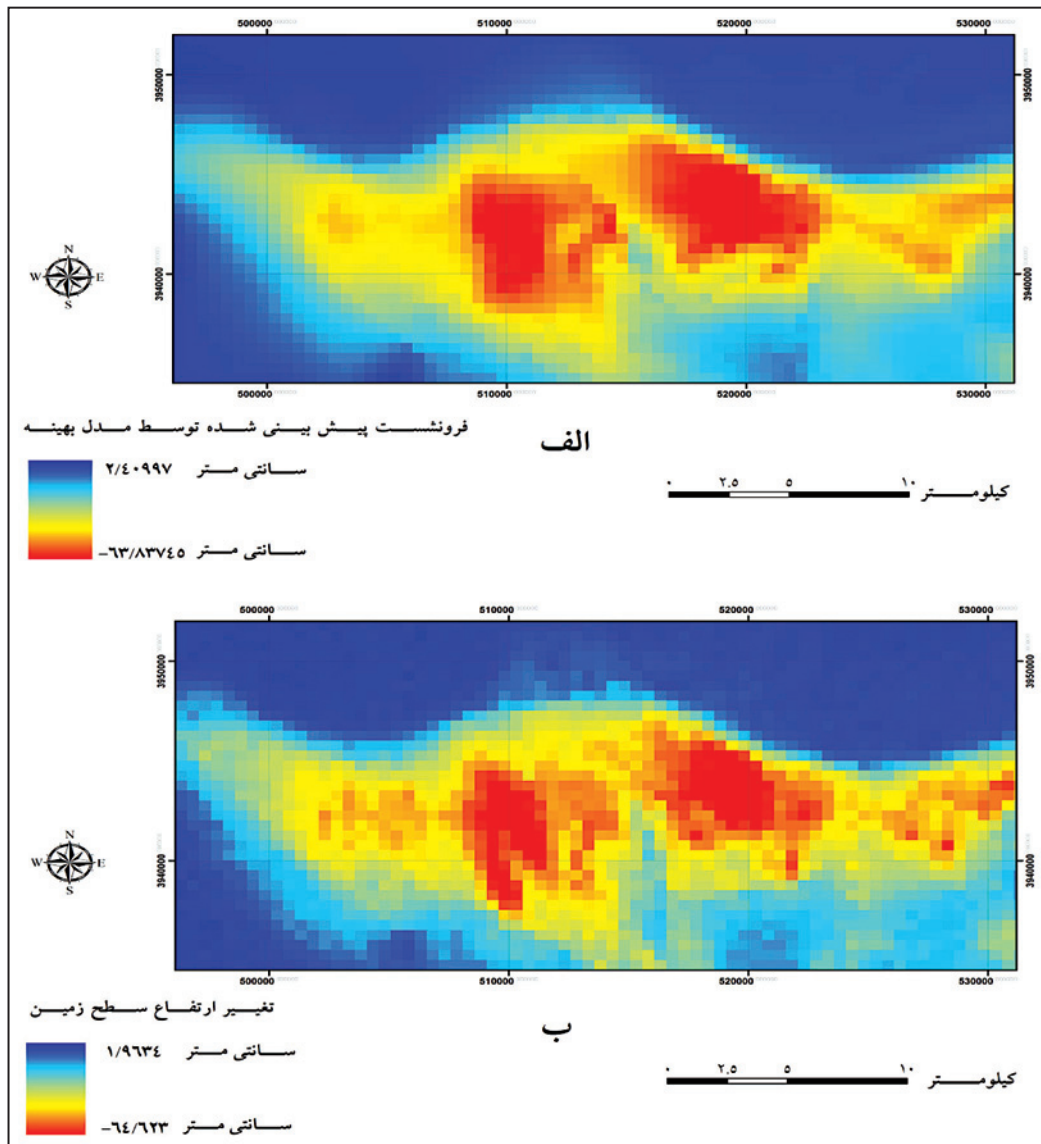


شکل ۱۰- فلوچارت مراحل مدل‌سازی.



شکل ۱۱- ضریب رگرسیون میان مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده.





شکل ۱۲- مقایسه الگوی فرونشست برآورد شده توسط مدل (الف)؛ مدل (ب) الگوی واقعی.

جدول ۱- مختصات رئوس محدود مدل‌سازی.

جنوب باختر	جنوب خاور	شمال باختر	شمال خاور	
۴۹۶۰۵۰	۵۳۱۲۱۷	۴۹۶۰۵۰	۵۳۱۲۱۷	X
۳۹۳۴۴۹۸	۳۹۳۴۴۹۸	۳۹۵۲۰۲۱	۳۹۵۲۰۲۱	Y

جدول ۲- تخلیه سالانه آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌بردار.

تخلیه سالانه (میلیون متر مکعب)	تعداد چاه‌های با تخلیه مداوم	تعداد کل چاه‌ها	نوع مصرف
۱۸۰/۰۳	۹۵۰	۱۶۸۹	آشامیدن
۴۵۶/۴۰	۱۵۲۲	۲۰۲۳	کشاورزی
۱۸/۶۲	۸۵۳	۱۲۵۸	صنعت
۶/۳۸	۱۷۲	۲۴۱	دامداری
۳/۲۱	۱۸۳	۲۸۰	بهداشت
۳۷/۰۱	۵۰۴	۶۱۷	آشامیدن- کشاورزی
۱۵/۳۹	۵۲۶	۶۱۲	آشامیدن- صنعت
۱۰/۴۸	۱۱۲	۱۲۵	کشاورزی- صنعت

جدول ۳- خطا محاسبه شده بر روی مجموعه داده‌های مختلف.

ضریب رگرسیون (R)	میانگین خطا	میانگین مربعات خطا (MSE)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	
۰/۹۸۳۱	۰/۰۰۵۱	۱/۹۹۰۰	۱/۴۱۰۷	مجموعه داده‌های آموزش
۰/۹۸۳۹	-۰/۰۰۶۵	۱/۹۰۷۶	۱/۳۸۱۲	مجموعه داده‌های اعتبارسنجی
۰/۹۸۲۸	-۰/۰۳۲۹	۱/۹۴۳۲	۰/۸۰۰۷	مجموعه داده‌های آزمون
۰/۹۸۳۲	-۰/۰۰۴۸	۱/۹۶۴۴	۱/۴۰۱۶	کل داده‌ها

جدول ۴- مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مقدار واقعی فرونشست.

ضریب رگرسیون (R)	خطای میانگین	میانگین مربعات خطا (MSE)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)
۰/۹۷۹۳	-۰/۹۰۳۴	۹/۴۹۲۸	۳/۰۸۱۰

## کتابنگاری

- حافظی مقدس، ن. و غفوری، م.، ۱۳۸۸- زمین‌شناسی زیست محیطی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- حسینی پاک، ع.، ۱۳۸۴- تحلیل داده‌های اکتشافی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- صالح‌زاده، ح.، ۱۳۷۱- مکانیک خاک، جلد اول، اصول مهندسی خاک، ترجمه از داس، ب. م.، ۱۹۹۰، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴- بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶الف- مطالعات ژئوالکترونیک در گستره دشت جنوب غرب تهران، گزارش بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در جنوب غرب استان تهران، شرکت توسعه علوم زمین.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶ب- مطالعات لرزه‌شناسی در گستره جنوب غربی تهران، تجزیه و تحلیل مایکروترمورها با روش آرایه، جلد اول و چهارم، شرکت توسعه علوم زمین.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷الف- بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست در استان تهران، آب‌زمین‌شناسی ناحیه فرونشست زمین جنوب غرب دشت تهران بیلان آب‌زیرزمینی.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷ب- پایش فرونشست در دشت‌های استان تهران به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷پ- مطالعات ژئوتکنیک در گستره دشت جنوب غربی تهران، گزارش بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در جنوب غرب استان تهران، شرکت توسعه علوم زمین.
- علی‌پور، س.، ۱۳۸۷- بررسی فرونشست دشت تهران با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه تهران.
- معرج، م.، ۱۳۸۶- پهنه‌بندی مناطق شهری جهت مقابله با بلایای طبیعی، مطالعه موردی شهر کرد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن دانشگاه تهران.
- منهاج، م. ب.، ۱۳۸۱- مبانی شبکه‌های عصبی، جلد اول، چاپ سوم، مرکز نشر دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

## References

- Angorani, S., Memarian, H. & Shariat Panahi, M., 2010- "Prediction of Standard Penetration Tests via Microtremor Array Using Artificial Neural Networks". 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT, June 27- 30.
- Chiang, W. H. & Kinzelbach, W., 1998- "Processing Modflow a simulation system for modeling groundwater flow and pollution". USGS.
- Chiang, W. H. & Kinzelbach, W., 2001- "3D groundwater modeling with PMWIN". Springer, 346.
- Domenico, P. A. , 1972-"Concepts and Models in Groundwater Hydrology". Mc-Graw Hill, New York, 405.
- Hagan, M. T., Dcmuth, H. B. & Beale, M., 2001- "Neural Network Design". PWS Publishing Company, 734.
- Larson, K. J., Bas agaoglu, H. & Marino, M. A., 2001- "Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model". Journal of Hydrology, 242, 79-102.
- Phien-wej, N., Giao, P. H. & Nutalaya, P., 2006- "Land subsidence in Bangkok, Thailand". Engineering Geology, 82, 187- 201.
- Poland, J. F., 1981- "Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal". Prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8. 4, UNESCO.

## Dynamic Modeling of Land Subsidence in Tehran Plain

S. Angorani <sup>1\*</sup>, H. Memarian <sup>2</sup>, M. Shariat Panahi <sup>3</sup> & M. J. Bolourchi <sup>4</sup>

<sup>1</sup> M. Sc., College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup> M. Sc., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2014 December 20

Accepted: 2015 June 13

### Abstract

Land subsidence is an environmental phenomenon that involves gradual or sudden settlement of the land surface because of compaction of underground material. Groundwater withdrawal, which occurs due to excessive use of water resources, is among the most important reasons for this phenomenon. Therefore, land subsidence can lead to destructive results in residential, industrial and agricultural areas. As a result, subsidence caused by excessive use of groundwater resources has occurred in many countries in the world. Tehran metropolitan plain in Iran is one of the most obvious examples, where land subsidence is happening. Although the relationship between land subsidence, groundwater level decline and changes in the physical properties of subsurface material is broadly understood, a comprehensive and precise model to predict land subsidence remains unconstrained. Land subsidence modeling is a complicated matter in geological engineering but can help to better understand subsidence and possibly prevent damages. The commonly used numerical methods for modeling land subsidence are generally based on simple assumptions, which make the model results to be associated with some errors. In this study, artificial intelligent methods such as Artificial Neural Networks (ANN) were used to propose a new method to predict land subsidence. The efficiency of this method was then tested in the South Tehran plain as a case study. We have used hydrological, geotechnical, remote sensing and ambient vibrations for site effect investigations. First, the collected data was studied statistically. Then, the delay between groundwater withdrawal and subsidence was computed by genetic algorithms using available hydrographs and GPS data in a period of 27 months. Model input parameters include changes in groundwater level, natural frequency of soil, alluvial thickness, defined geographic coordinates and time. The model output was an estimated subsidence measured by radar interferometry method. The model was built in 15 time steps using a set of data having 4 months of time difference with the data used to create the model. The comparison between the predicted (modeled) and real (measured by remote sensing) subsidence shows a good correlation, which makes the proposed model reliable.

**Keywords:** Land Subsidence, Ground waters, Subsidence Modeling, Artificial Neural Networks, Genetic algorithms, Tehran Plain.

For Persian Version see pages 211 to 220

\*Corresponding author: S. Angorani; E-mail: [angorani@alumni.ut.ac.ir](mailto:angorani@alumni.ut.ac.ir)