

## مقایسه آسیب پذیری فرونشست آبخوان دشت جنوب غربی تهران با مدل وزن دهی ساده (مدل ALPRIFT) و الگوریتم ژنتیک

علی منافی آذر، ماشاله خامه چیان\*؛ دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم

عطاله ندیری، دانشگاه تبریز

پذیرش ۹۷/۰۴/۲۵

دریافت ۹۶/۱۰/۱۲

### چکیده

فرونشست سطح زمین در اثر استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، یکی از رویدادهایی است که در ایران به‌وفور مشاهده شده است. این پدیده در صورت نبود مدیریت صحیح، می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را برای مناطق دچار این پدیده، ایجاد کند. هم‌چنین رشد جمعیت و فناوری زراعی، استفاده بیش از ظرفیت منابع آب زیرزمینی برخی از نقاط ایران را به‌دنبال داشته است. نرخ فرونشست زمین ناشی از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی در دشت تهران در طی سال‌های اخیر افزایش یافته است. در چنین شرایطی آثار زیان‌بار آن بر زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌ها، شریان‌های حیاتی و دگرشکلی‌های سطح زمین به‌صورت فروچاله‌ها، ترک‌ها و شکاف‌های زمین در حال گسترش هستند. در این پژوهش با استفاده از مدل ALPRIFT که یک مدل وزن‌دهی ساده است و شامل ۷ لایه مؤثر بر فرونشست (جنس لایه‌های زیرین، کاربری زمین، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی) است میزان آسیب‌پذیری فرونشست دشت با تلفیق لایه‌ها در محیط Arc GIS برای فاصله زمانی یک سال (۱۳۹۵-۱۳۹۴) به‌دست آمد و برای صحت‌سنجی این مدل از نقشه ماهواره‌ای InSAR استفاده شد. با وجود قابل قبول بودن نتایج، برای بهبود نتایج حاصل و بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده به‌وسیله الگوریتم ژنتیک، با افزایش ضریب هم‌بستگی از ۰/۶۴ به ۰/۷۵، بین شاخص فرونشست و فرونشست‌های به‌دست آمده در دشت، توانایی بیش‌تری در ارزیابی فرونشست دارد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل فرونشست، آبخوان، بهینه‌سازی وزن، مدل ALPRIFT، الگوریتم ژنتیک، نقشه ماهواره‌ای InSAR

### مقدمه

فرونشست زمین<sup>۱</sup> فروریزش یا پایین رفتن سطح زمین به‌صورت تغییرات قائم با جابه‌جایی‌های اندک افقی است. فرونشست زمین در اثر فرآیندهای طبیعی<sup>۲</sup> مانند آب شدگی یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته زمین و خروج گدازه و یا فعالیت‌های انسان‌زاد<sup>۳</sup> مانند برداشت سیالات زیرسطحی (آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز) و معدنکاری ایجاد می‌شود [۱]. فرونشست ناشی از عوامل طبیعی اغلب به‌صورت تدریجی و در مدت زمان طولانی رخ می‌دهد که اثرات ناشی از آن چندان خطر جدی محسوب نمی‌شوند، اما فرونشست ایجاد شده تحت تأثیر عوامل انسانی معمولاً به‌صورت

نویسنده مسئول khamechm@modares.ac.ir

1. Land subsidence
2. Natural processes
3. Anthropogenic

ناگهانی رخ داده و در مدت زمان کم‌تر، اثرات زیانباری از خود به جا می‌گذارد [۲]. امروزه فرونشست زمین بر اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی، معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین‌المللی تهدید می‌کند. براساس برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده قرار دارند [۳].

فرونشست زمین در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، موجب تغییر در توزیع تنش شده و باعث افزایش تنش مؤثر در خاک می‌شود. بار ژئواستاتیکی وارده بر مخزن آبخوان در اثر افت سطح ایستابی که همراه با خالی شدن فضاهای موجود در مصالح خاک ناشی از برداشت آب و افزایش خلل و فرج موجود در آن است، موجب فشردگی و تراکم لایه‌های خاک خواهد شد و با برداشت آب زیرزمینی، میزان تنش‌های مؤثر قائم و افقی افزایش خواهند یافت [۴]. فرونشست به‌عنوان مخاطره‌ای زیست‌محیطی، به دلیل عملکرد آرام و زمان‌بر، تا زمانی که تحت تأثیر نیروهای انسان‌زاد ایجاد نشده باشد، چندان قابل تشخیص نیست و اغلب به صورت تغییرات سطحی یا ترک در تأسیسات و ساختمان‌ها دیده می‌شود. همراه شدن روند طبیعی فرونشست زمین، با عوامل غیرطبیعی محرک آن، باعث تشدید فعالیت فرونشست شده، به طوری که علاوه بر خسارات مورفولوژیکی سطحی، خسارات مالی و جانی را نیز برای انسان به همراه دارد [۵].

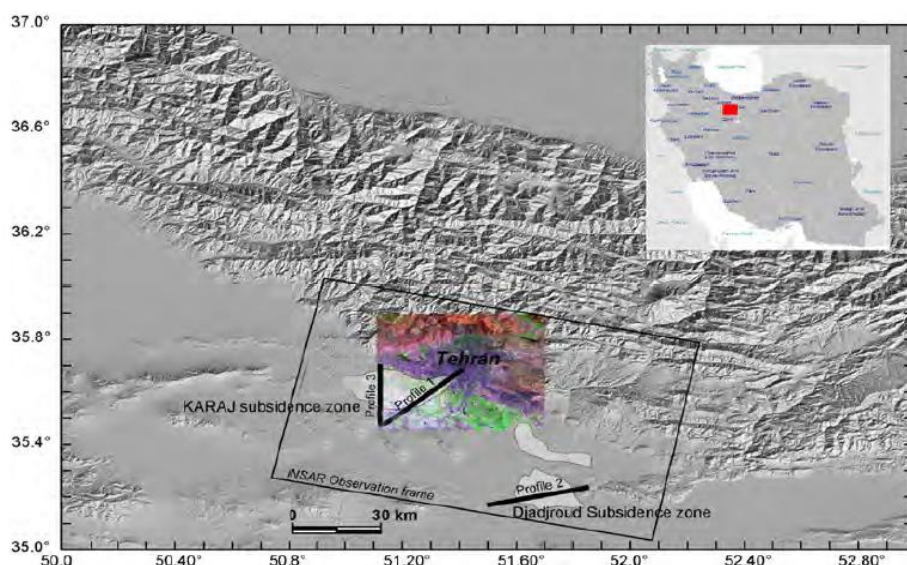
با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی ایران، متوسط سالانه نزولات جوی در سطح کمی قرار دارد. رشد سریع جمعیت در سال‌های اخیر و به دنبال آن توسعه روزافزون فعالیت‌های اجتماعی، اقتصادی و صنعتی سبب شده است تا میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بیش از ظرفیت و توان بالقوه آن افزایش یابد. مشاهده افت شدید سطح آب زیرزمینی یکی از شاخص‌های برداشت بیش از توان آبخوان‌ها است. ادامه این وضعیت موجب تهی شدن مخازن آب زیرزمینی و ایجاد فرونشست‌های غیرقابل بازگشت می‌شود که نمونه‌های آن در مناطق خشک و نیمه خشک قابل مشاهده است [۶].

در حال حاضر فرونشست زمین در دشت تهران با به‌طور گسترده پیش می‌رود. توسعه خطوط لوله نفت، گاز و راه-آهن در مناطقی از دشت و گسترش ترک‌ها و شکاف‌ها در ساختمان‌ها و سازه‌ها در این منطقه، نشان‌دهنده حساسیت آسیب‌پذیری این ناحیه است. این در حالی است که نخستین بررسی‌های رادار دشت تهران (سپتامبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۰۶ میلادی) نشان‌دهنده بیشینه نرخ فرونشست ۱۶/۵ سانتی‌متر در سال است [۷]. آخرین بررسی‌های انجام گرفته در رابطه با فرونشست دشت جنوب‌غربی تهران، نشان‌دهنده بیشینه نرخ فرونشست حدود ۱۷ سانتی‌متر در سال با مدل PMWIN گزارش شده است [۸].

در این پژوهش، پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب‌غربی تهران با مدل ALPRIFT که شامل ۷ لایه مؤثر بر فرونشست است برای یک بازه یک‌ساله بررسی شد. با این‌که نتایج این مدل قابل قبول بود اما برای افزایش صحت مدل الگوریتم ژنتیک استفاده شد. لازم به ذکر است که به دلیل کمبود اطلاعات طولانی مدت و کوتاه بودن بازه بررسی، ارزیابی فرونشست حاصل برای دشت مورد نظر نیز مقطعی است.

### منطقه بررسی شده

دشت جنوب‌غربی تهران با مساحتی برابر با ۴۱۵/۶۴ کیلومترمربع، در حد فاصل ۵۰ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و در منطقه‌ای خشک تا نیمه خشک واقع شده است (شکل ۱).



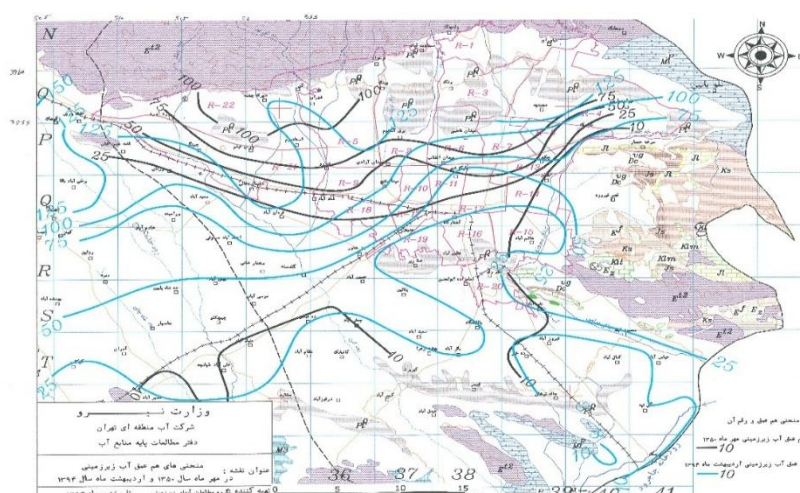
شکل ۱. محدوده مورد بررسی و پهنه فرونشست زمین در دشت تهران

نهشته‌های آبرفتی تهران دربرگیرنده چهار واحد چینه‌شناسی [۹]: واحد A (سازند هزاردره)، واحد B (سازند کهریزک)، واحد C (آبرفت تهران) و واحد D (آبرفت عهد حاضر) است. در محدوده فرونشست، از آبرفت‌های سیلتی-رسی واحدهای B و C پوشیده شده است. سازند کهریزک که به‌وسیله مخروط افکنه‌های بزرگ سازند آبرفتی تهران پوشیده می‌شود، سازندی قدیمی‌تر از آن محسوب می‌شود. آبرفت C که بخش عمده دشت تهران را پوشانده است، قدرت ذخیره‌سازی، انتقال و قابلیت نفوذ بسیاری خوبی دارد. به‌طوری‌که آبخوان اصلی دشت تهران در این آبرفت قرار دارد. در مجموع قسمت بالایی واحد A و واحدهای B و C و دارای نفوذپذیری خوب تا بسیار خوب هستند. آبخوان تهران از نوع آبخوان آبرفتی<sup>۱</sup> است. بر پایه نقشه هم‌تراز سطح ایستابی آبخوان مذکور در طی ۴۴ سال (مهر ۱۳۵۰ تا اردیبهشت ۱۳۹۴) سطح آب زیرزمینی افتی برابر با ۱۵ متر در جنوب دشت و بیش از ۵۰ متر در شمال دشت داشته است (شکل ۲) [۱۰]. همچنین محاسبات بیلان آب زیرزمینی دشت مذکور در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۳-۱۳۷۳) نشان می‌دهد که کسری حجم مخزنی برابر با ۱۶/۳ میلیون متر مکعب داشته است [۱۱]. ضخامت آبرفت دشت تهران در بخش‌های شمالی به بیش از ۴۰۰ متر و در بخش‌های شمال‌غربی به حدود ۳۰۰ متر می‌رسد. در بخش‌هایی از شمال، شرق، جنوب شرق و جنوب غرب دشت، به دلیل بالا آمدگی سنگ کف<sup>۲</sup>، ضخامت آبرفت به کم‌تر از ۲۵ متر نیز می‌رسد [۷].

### روش تحقیق

روش ارائه شده برای بررسی پتانسیل فرونشست در آبخوان‌ها بر اساس روش PCSM<sup>۳</sup> است، در این پژوهش از مدل وزن‌دهی ساده با مدل ALPRIFT استفاده شده است. لایه‌های مؤثر بر فرونشست بر اساس رتبه‌های این مدل، تهیه و وزن‌دهی شده و سپس با تلفیق و برهم نهی لایه‌ها در محیط Arc GIS، نقشه آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب‌غربی

1. Alluvial aquifer
2. Bedrock
3. Point Count System Models



شکل ۲. مقایسه سطح ایستابی دشت تهران. سال ۱۳۵۰-۱۳۹۴ [۱۱]

تهران حاصل شد. مهم ترین پارامتر در این روش تعیین وزن بهینه است که در این تحقیق با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، وزن اعمال شده به هر یک از لایه های حاصل از مدل ALPRIFT بهینه و در نهایت ضریب هم بستگی، بین نقشه آسیب پذیری حاصل از مدل های ALPRIFT و الگوریتم ژنتیک با نقشه ماهواره ای سنتینل ۱ (InSAR) به دست می آید و بهترین مدل برای آسیب پذیری دشت ارائه شد.

### مدل ALPRIFT

مدل ALPRIFT به وسیله ندیری و همکاران [۱۲] ارائه شده، که نشان دهنده چارچوبی برای به دست آوردن پتانسیل آسیب پذیری فرونشست آبخوان است. این مدل شامل ۷ لایه مؤثر بر فرونشست ( $A$ ) = جنس لایه های زیرین،  $L$  = کاربری زمین،  $P$  = پمپاژ،  $R$  = تغذیه،  $I$  = ضخامت آبخوان،  $F$  = فاصله از غسل و  $T$  = میزان افت سطح آب زیرزمینی) است (جدول ۱). هر پارامتر مؤثر بر فرونشست نیز، به زیردسته هایی تقسیم می شود که به هر دسته بر اساس میزان تأثیرش در وقوع فرونشست رتبه ای از ۱ تا ۱۰ تعلق می گیرد (جدول ۲). یک به معنای کم ترین تأثیر و ده مؤثرترین پارامتر در وقوع فرونشست است. در نهایت از مجموع حاصل ضرب وزن هر لایه در رتبه های آن لایه (رابطه ۱)، میزان فرونشست در هر نقطه از محدوده به دست می آید.

$$Subsidence\ vulnerability\ index\ (SVI) = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

در رابطه (۱) شاخص آسیب پذیری فرونشست،  $A, L, P, R, I, F, T$  هفت عامل مؤثر بر فرونشست،  $r$  رتبه های تعلق گرفته به هر دسته و  $w$  وزن هر عامل را نشان می دهد.

### مدل الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک، برداشتی از علم ژنتیک و نظریه تکاملی داروین است که از آن به عنوان تابع بهینه کننده استفاده می شود که اولین بار به وسیله جان هالند در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. این الگوریتم نقش مهمی در بررسی سیستم های انطباقی پیچیده ایفا می کند [۱۳] به این صورت که روی جمعیتی از جواب های بالقوه عمل کرده و با به کارگیری بقای برتر، تقریب بهتری از حل مورد نظر را ارائه می دهد [۱۴]. در طبیعت انتقال خصوصیات از نسلی به نسل دیگر از طریق کروموزوم ها و ژن ها انجام می گیرد. مدل سازی الگوریتم ژنتیک بر این اساس است که در نهایت ژن ها و کروموزوم های

بهتر و قوی‌تر باقی‌مانده و ژن‌های ضعیف از بین می‌روند، یا همان قانون تکامل داروین که موجودات ضعیف‌تر از بین می‌روند و موجودات قوی‌تر (سازگارتر) باقی می‌مانند [۱۵]. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک، به‌منظور بهینه‌سازی وزن‌های اختصاص داده شده به عوامل مؤثر بر فرونشست، برای بهبود نتایج حاصل استفاده شده است. متغیرهای ورودی تصمیم مسئله شامل هفت وزن داده شده به هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست است که به‌عنوان جمعیت اولیه به مدل بهینه‌سازی وارد می‌شوند و تابع هدف، حداکثر سازی ضریب هم‌بستگی پیرسون بین فرونشست‌های اندازه‌گیری شده در محدوده بررسی شده و شاخص فرونشست حاصل از تلفیق لایه‌ها است. زمانی که توابع هدف در تکرار متوالی یک‌سان باشند، به این معنی است که تغییر و یا بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود، مدل بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

### پردازش اطلاعات

به‌منظور به‌دست آوردن لایه‌های مدل ALPRIFT، اطلاعات مربوط به هر لایه به فاصله زمانی یک سال (مهر ۹۴ تا مهر ۹۵) را طبق جدول ۲ کلاس‌بندی و در محیط Arc GIS وارد و یک لایه رستری ایجاد شد. تبدیل به لایه رستری

جدول ۱. شرح اطلاعات لایه‌های ALPRIFT و وزن آن‌ها [۱۲]

وزن	توضیحات	پارامتر
۵	نقش مهمی در تغییر شکل لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک بعد از برداشت آب زیرزمینی و فرونشست ناشی از آن دارد؛ وجود رسوبات ریزدانه مانند سیلت و رس، به دلیل تراوایی بسیار کم اجازه تغذیه مناسب به آبخوان را نمی‌دهند، هم‌چنین به دلیل عدم حالت الاستیسیته و ضریب تحکیم بالایی که دارند، بعد از برداشت آب زیرزمینی دچار تحکیم برگشت‌ناپذیر شده و باعث فرونشست زمین می‌شوند. از طرفی، رسوبات درشت‌دانه مانند ماسه و گراول بدلیل نفوذپذیری زیاد و وجود حالت الاستیسیته، تأثیر بسیار کم‌تری در مقایسه با رسوبات ریزدانه در وقوع فرونشست دارند.	<b>A</b> جنس لایه‌های زیرزمین
۳	چگونگی و نحوه استفاده از زمین و فعالیت‌های استقرار یافته در هر بخش آن کاربری اراضی نامیده می‌شود. کاربری‌های مختلف تأثیرات مختلفی بر وقوع فرونشست دارند. به‌عنوان مثال، در محلی با کاربری کشاورزی، برداشت آب‌های زیرزمینی سبب فرونشست می‌شود یا در محل سدها، وزن ناشی از این سازه‌ها سبب تراکم لایه‌های خاک و نشست سطح زمین می‌شود.	<b>L</b> کاربری زمین
۴	برداشت آب‌های زیرزمینی برای تأمین مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی، خانگی و ... پمپاژ نامیده می‌شود. میزان پمپاژ عکس میزان تغذیه در فرونشست تأثیر دارد، بدین‌صورت که هرچه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی کم‌تر و فضای بین دانه‌ها کاهش می‌یابد که در نتیجه تنش مؤثر افزایش می‌یابد و موجب تراکم لایه‌ها و افزایش احتمال وقوع فرونشست می‌شود.	<b>P</b> پمپاژ
۴	میزان تغذیه مقدار آبی است که از سطح زمین به محیط آبخوان وارد می‌شود. هرچه میزان تغذیه بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی بیشتر شده و فاصله بین دانه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه تنش مؤثر کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست کم‌تر می‌شود.	<b>R</b> تغذیه
۲	شامل فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است که رابطه مستقیم با فرونشست دارد. هرچه ضخامت آبخوان بیشتر باشد، امکان برداشت آب از آن و وزن وارده بر رسوبات و تغییر شکل آن‌ها در اثر برداشت آب بیشتر می‌شود و بالعکس، هرچه ضخامت آبخوان کم‌تر باشد امکان برداشت آب از آن کم‌تر خواهد بود.	<b>I</b> ضخامت آبخوان
۱	یکی از عوامل طبیعی مؤثر بر وقوع فرونشست حرکات تکتونیکی از جمله گسل است. گسل‌ها با جابه‌جایی مواد ریزدانه و درشت‌دانه در محل شکاف‌ها باعث تشدید پدیده فرونشست می‌شوند. هرچه محدوده‌ای به محل گسلش نزدیک‌تر باشد امکان وقوع فرونشست در آن بیشتر خواهد بود و بالعکس.	<b>F</b> فاصله از گسل
۵	کاهش سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت آب، تیخیر، خشک‌سالی و ... موجب کاهش فشار هیدرولیکی، افزایش تنش مؤثر وارد بر رسوبات و فرونشست می‌شود	<b>T</b> میزان افت سطح آب زیرزمینی

## جدول ۲. محدوده و کلاس لایه‌های ALPRIFT [۱۲]

SVI		افت سطح ایستایی (T)		فاصله گسل (F)		ضخامت آبخوان (I)		تغذیه (R)		پمپاژ (P)		زمین کاربری (L)		جنس لایه‌های زیرین (A)	
		وزن=۵		وزن=۱		وزن=۲		وزن=۴		وزن=۴		وزن=۳		وزن=۵	
سطح آسیب پذیری	باند	رتبه	نرخ (m/year)	رتبه	محدوده (km)	رتبه	محدوده (m)	رتبه	نرخ (Cm/year)	رتبه	نرخ (Cm/year)	کلاس	نرخ (محدوده)	رتبه	نرخ (محدوده)
باند ۱ (پایین)	-۷۸ ۲۴	۱	۰-۰/۲	۱۰	۰-۱	۱	۰-۲۵	۱۰	۰-۴	۱	<۰/۰۰۰۱	۱-۰ ۹	معدن/ منابع استخراجی	۹-۱۰	رس
باند ۲ (متوسط)	۱۳۲ ۷۸-	۲	۰/۲-۰/۵	۸	۱-۲	۲	۲۵-۵۵	۹	۴-۹	۲	-۰/۰۰۰۵ ۰/۰۰۰۱	۷-۹	مناطق کشاورزی	۸-۹	سیلت
باند ۳ (زیاد)	۱۸۶ -	۳	۰/۵-۰/۹	۶	۲-۳	۳	۵۵-۹۰	۷	۹-۱۴	۳	۰/۰۰۵-۰/۰۱	۶-۹	ساختمان سد	۶-۸	رسوبات کارستی
باند ۴ (بسیار زیاد)	۲۴۰ -	۴	۰/۹-۱/۴	۴	۳-۴	۴	۹۰-۱۳۰	۵	۱۴-۱۹	۴	۰/۰۱-۰/۰۵	۴-۸	مناطق مسکونی	۳-۵	ماسه
		۵	۱/۴-۲	۲	۴-۵	۵	-۱۷۵ ۱۳۰	۳	۱۹-۲۴	۵	۰/۵-۱	۳-۴	مناطق حمل و نقل	۲-۳	شن
		۶	۲-۲/۷	۱	>۵	۶	-۲۲۵ ۱۷۵	۱	>۲۴	۶	۱-۵	۱=۳	مناطق خشک	۱-۲	سنگ
		۷	۲/۷-۳/۵			۷	-۲۸۰ ۲۲۵			۷	۵-۲۰	۱	زمین بایر	۸-۱۰	خاک آلی ارگانیک
		۸	۳/۵-۴/۴			۸	-۳۴۰ ۲۸۰			۸	۲۰-۴۰				
		۹	۴/۴-۵/۴			۹	-۴۰۵ ۳۴۰			۹	۴۰-۶۵				
		۱۰	>۵/۴			۱۰	>۴۰۵			۱۰	>۶۵				

• اگر تمام لایه‌ها در رتبه ۱ قرار داشته باشند شاخص آسیب‌پذیری فرونشست (SVI) برابر ۲۴ می‌شود.

$$SVI=1 \times 5 + 1 \times 3 + 1 \times 4 + 1 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 5$$

• اگر تمام لایه‌ها در رتبه ۱۰ قرار داشته باشند شاخص آسیب‌پذیری فرونشست (SVI) برابر با ۲۴۰ می‌شود.

$$SVI=10 \times 5 + 10 \times 3 + 10 \times 4 + 10 \times 4 + 10 \times 2 + 10 \times 5$$

برای انجام عملیات تلفیق و ایجاد نقشه آسیب‌پذیری فرونشست ضروری است. در این پژوهش، به منظور آماده‌سازی هر یک از لایه‌های مورد نظر، از منابع اطلاعاتی گوناگونی استفاده شد که در زیر، منابع اطلاعاتی استفاده شده و نحوه آماده‌سازی هر یک توضیح داده شده است:

**جنس لایه‌های زیرین:** با استفاده از لاگ‌های زمین‌شناسی سازمان آب منطقه‌ای تهران، نوع رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان شناسایی و هر کدام طبق جدول ۲ کلاس بندی و نوع خاک هر لاگ به دست آمد. سپس مقادیر در محیط ArcGIS وارد و مقادیر داده‌ها به کل منطقه با روش IDW درون‌یابی و لایه رستری جنس لایه‌های زیرین، به منظور تلفیق با سایر لایه‌ها ایجاد شد. نقشه کلاس‌بندی این لایه در شکل ۳ آ نشان داده شده است.

**کاربری زمین:** کاربری‌های مختلف بر اساس میزان تأثیر در وقوع فرونشست در جدول ۲ نشان داده شده است. در دشت بررسی شده سه نوع کاربری زمین، مناطق کشاورزی، مناطق مسکونی و زمین بایر وجود دارد. زمین‌های کشاورزی به علت برداشت آب زیرزمینی بیش‌ترین تأثیر در فرونشست و زمین‌های بایر کم‌ترین تأثیر را در فرونشست

دارند. لایه کاربری زمین با استفاده از نقشه کاربری زمین استان تهران تهیه و با استفاده از جدول ۲ کلاس‌بندی شد و لایه رستری لایه به‌دست آمد. نقشه رستری این لایه در شکل ۳ ب نشان داده شده است.

**پمپاژ:** برای تهیه لایه پمپاژ، میزان برداشت سالانه آب چاه‌های بهره‌برداری، که از سازمان آب منطقه ای تهران تهیه شده بود با مختصات چاه‌ها به محیط ArcGIS وارد شد و با روش پلیگون تیسس مقدار تخلیه برای هر پیزومتر مشخص و با روش IDW به کل منطقه درون‌یابی و لایه رستری حاصل از آن ایجاد شد. نقشه رستری حاصل از لایه پمپاژ در شکل ۳ ب نشان داده شده است.

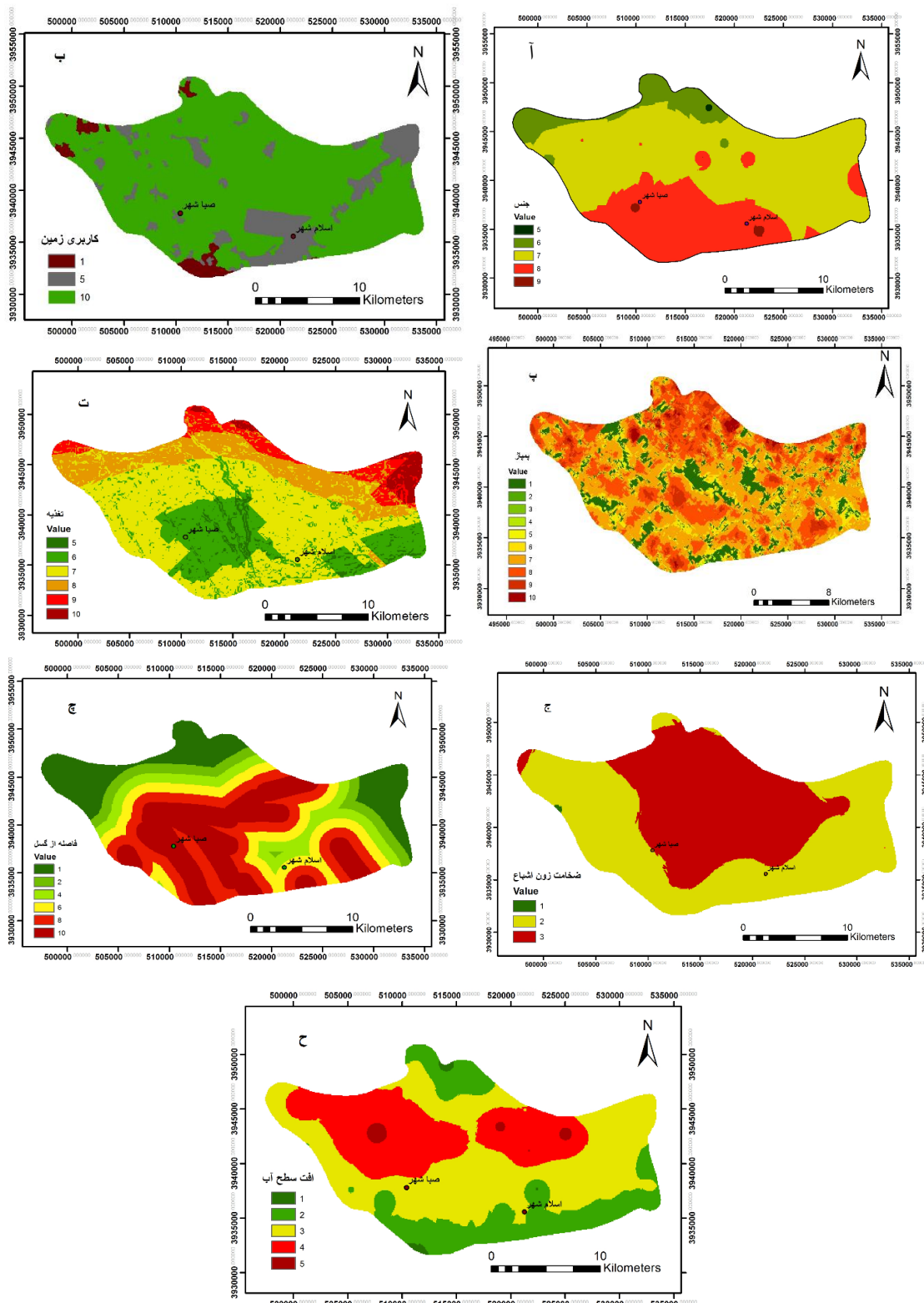
**تغذیه:** برای تهیه لایه تغذیه، از روش پیسکوپو [۱۶] استفاده شد. در روش پیسکوپو، ۳ لایه شیب زمین، بارندگی و نفوذپذیری خاک به لایه رستری تبدیل و با تلفیق روی هم، لایه تغذیه به‌دست آمد و با استفاده از جدول ۲ کلاس‌بندی شد. نقشه رستری حاصل از تغذیه در شکل ۳ ت نشان داده شده است.

**ضخامت آبخوان:** برای تهیه این لایه، از چاه‌های پیزومتری سازمان آب منطقه‌ای (۱۳۹۳) به‌منظور به‌دست آوردن سطح ایستابی و گزارش فرونشست سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۶) به‌منظور به‌دست آوردن سنگ کف منطقه استفاده شد. با در دست داشتن سطح ایستابی و سنگ کف، ضخامت زون اشباع آبخوان تهیه و با استفاده از جدول ۲ کلاس‌بندی شد و لایه رستری آن به‌منظور تلفیق با سایر لایه‌ها در محیط ArcGIS تهیه شد. نقشه رستری ضخامت آبخوان در شکل ۳ ج نشان داده شده است.

**فاصله از گسل:** برای به‌دست آوردن فاصله گسل از هر نقطه دشت، از دستور Euclidean distance استفاده شد و نقشه حاصل از آن بر اساس جدول ۲ کلاس‌بندی و تبدیل به لایه رستری شد. هر قدر نقاط از گسل فاصله بگیرند، تأثیری کم‌تری در فرونشست دارند. شکل ۳ چ لایه رستری فاصله از گسل را برای دشت بررسی شده نشان می‌دهد.

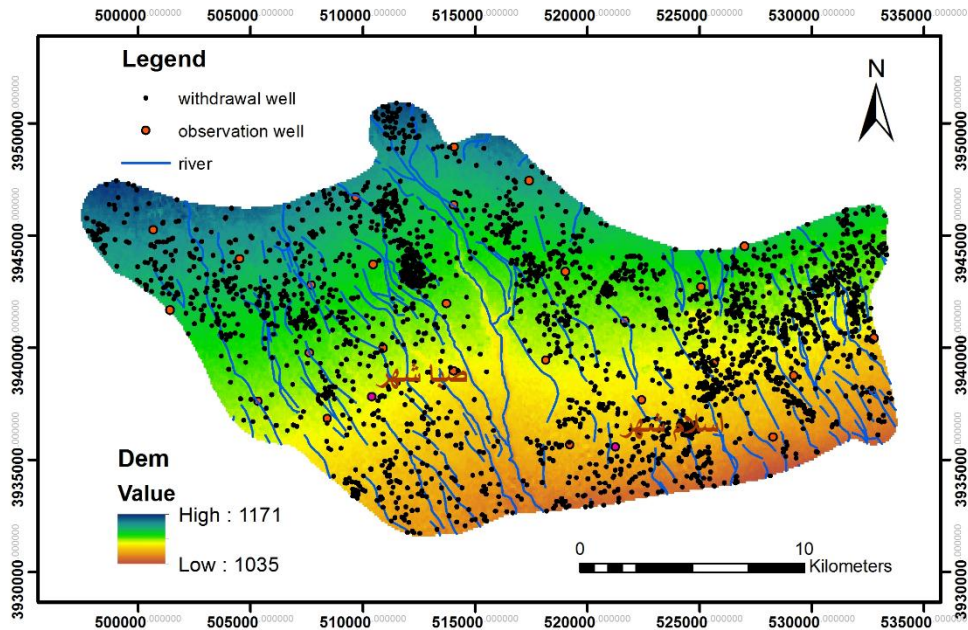
**افت سطح آب زیرزمینی:** برای به‌دست آوردن این لایه از اطلاعات یک ساله (مهر ۹۴ تا مهر ۹۵) چاه‌های پیزومتری موجود در دشت استفاده شد. مقادیر داده‌ها برای کل منطقه با روش IDW درون‌یابی و سپس لایه رستری برای تلفیق با سایر لایه‌ها تهیه شد. سپس با استفاده از جدول ۲، این لایه کلاس‌بندی شد. شکل ۳ ح لایه رستری افت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

شکل ۴، نقشه ارتفاعی دشت بررسی شده از سطح آب‌های آزاد بر حسب متر، موقعیت قرارگیری چاه‌های پیزومتری، چاه‌های بهره‌برداری و محل رودخانه‌های موجود در دشت را نشان می‌دهد.



شکل ۳. لایه‌های رستری پردازش شده ALPRIFT. آ) جنس لایه‌های زیرین، ب) کاربری زمین، پ) پمپاژ، ت) تغذیه، ج) ضخامت آبخوان، چ) فاصله از گسل، ح) افت سطح آب زیرزمینی



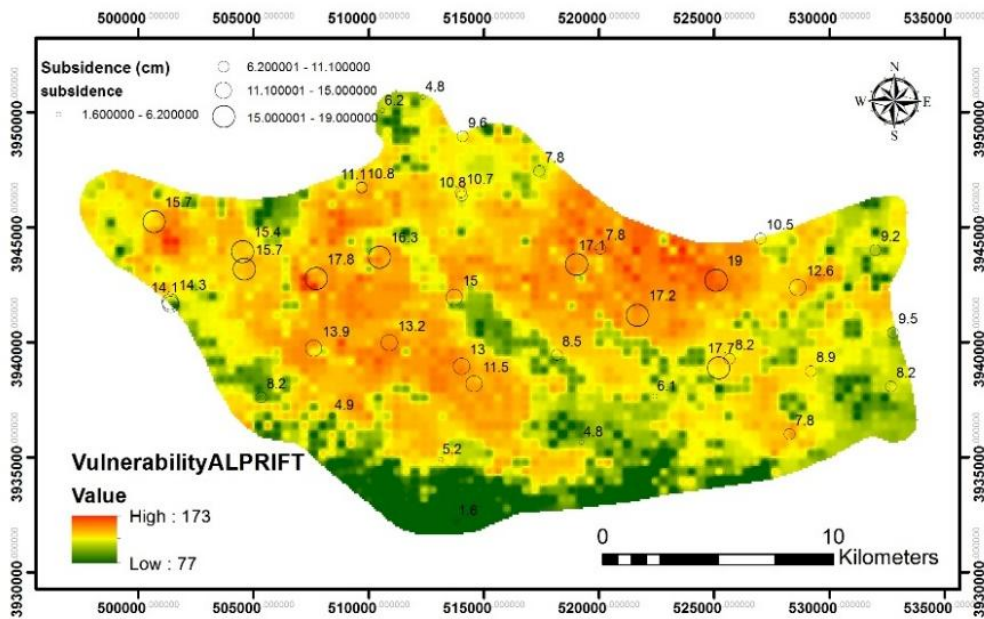


شکل ۴. موقعیت چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری در دشت بررسی شده

### بحث و نتایج

#### نتایج حاصل از مدل ALPRIFT

پس از آماده‌سازی ۷ لایه مؤثر بر فرونشست و کلاس‌بندی آن‌ها طبق جدول ۲، این لایه‌ها بر اساس وزن تعیین شده برای هر لایه (جدول ۱) روی هم تلفیق شدند و نهایتاً نقشه آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب‌غربی تهران حاصل شد و شاخص فرونشست برای کل دشت بین ۷۷ تا ۱۷۳ برآورد شد (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه آسیب‌پذیری دشت حاصل از تلفیق لایه‌های مدل ALPRIFT

## نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک (GA)

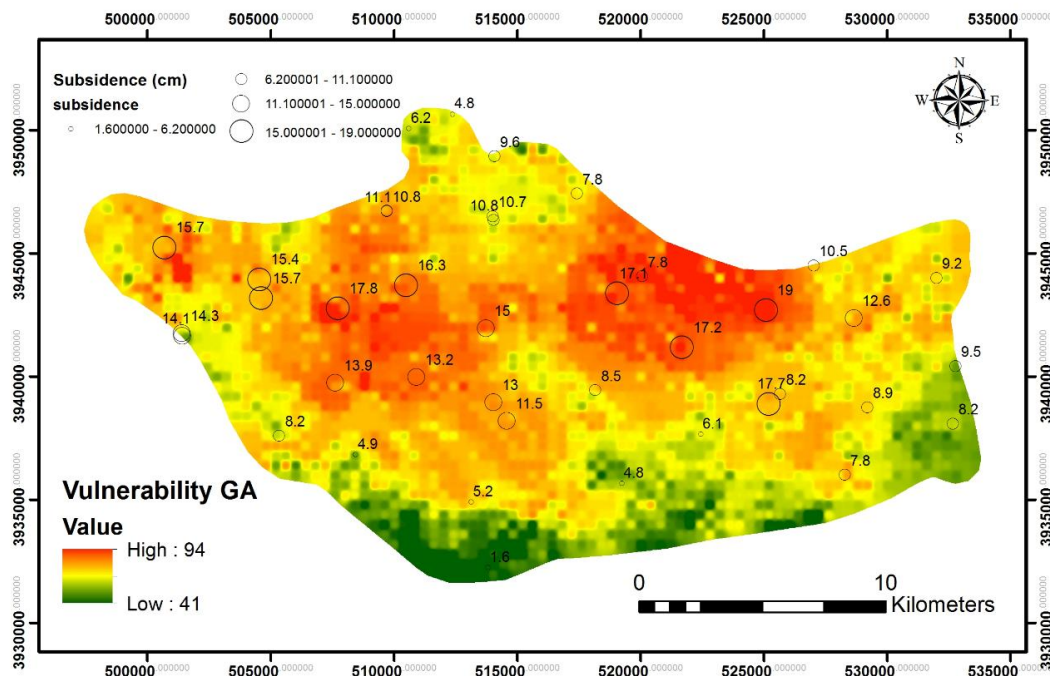
به منظور بهینه‌سازی و تدقیق وزن‌های استفاده شده در مدل ALPRIFT از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. از این الگوریتم بهینه‌سازی برای افزایش مقدار هم‌بستگی بین مقادیر فرونشست نرمال شده و مقادیر نرمال شده پتانسیل فرونشست با بهینه‌سازی وزن‌ها استفاده شد. هم‌بستگی پیرسون بین شاخص پتانسیل فرونشست (ALPRIFT) و فرونشست داده‌های راداری (InSAR) به عنوان تابع هدف انتخاب و اجرا شد. در این مرحله با استفاده از تابع هدف (رابطه ۲) و قید (رابطه ۳) مقادیر وزن‌های هر لایه بهینه شد.

شکل ۶ نقشه آسیب‌پذیری دشت جنوب‌غربی تهران با استفاده از مدل GA را نشان می‌دهد. جدول ۳ وزن‌های بهینه‌شده حاصل از روش الگوریتم ژنتیک و وزن‌های اعمال شده از مدل ALPRIFT را مقایسه می‌کند. چنان‌که نشان داده شده است، وزن‌های به دست آمده بین ۵ و ۱ است که بیش‌ترین وزن مربوط به افت سطح آب زیرزمینی است. شاخص آسیب‌پذیری فرونشست در مدل الگوریتم ژنتیک بین ۴۱ تا ۹۳ است.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad (2)$$

$$5 < w_i < 1 \quad (3)$$

$w_i$  وزن اعمال شده به هر پارامتر و  $r$  ضریب هم‌بستگی پیرسون را نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک نیاز به تعیین مقدار بهینه چهار عملگر الگوریتم ژنتیک شامل برازندگی یا تناسب<sup>۱</sup>، انتخاب<sup>۲</sup>، ترکیب یا ادغام<sup>۳</sup> و جهش<sup>۴</sup> است که باید مقدار بهینه آن‌ها تعیین شود [۱۷].



شکل ۶. نقشه آسیب‌پذیری دشت حاصل از مدل الگوریتم ژنتیک (GA)

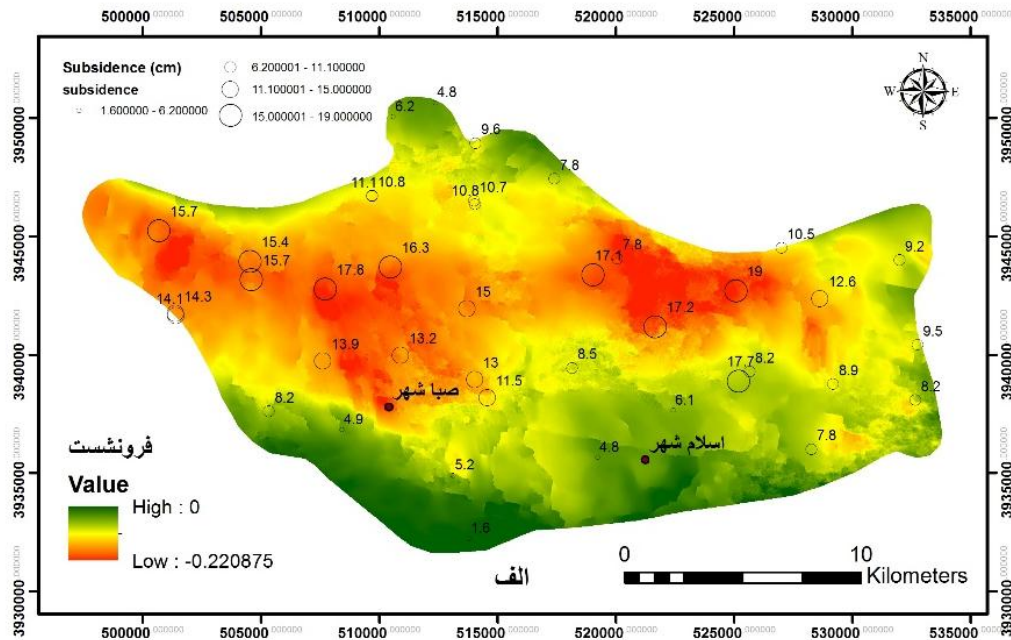
- 1 Fitness
- 2 Selection
- 3 Crossover
- 4 Mutation

جدول ۳. وزن پارامترهای مؤثر بر فرونشست

افت سطح آب زیرزمینی	فاصله از گسل	ضخامت آبخوان	تزریق	پمپاژ	کاربری زمین	جنس لایه‌های زیرین	
۵	۱	۲	۴	۴	۳	۵	ALPRIFT
۵	۱	۲/۶۰	۳/۲۴	۱/۰۴	۱/۰۳	۱	الگوریتم ژنتیک (GA)

### صحت‌سنجی نتایج

در این پژوهش از تصاویر راداری (InSAR) ماهواره سنتینل ۱ سال ۲۰۱۵ پردازش شده استفاده شد تا بتوان به‌وسیله این تصویر، چارچوب کلی ارائه شده برای آبخوان دشت جنوب‌غربی تهران را ارزیابی کرد. ماهواره سنتینل ۱ به‌صورت شبانه‌روزی با استفاده از باند C به تصویربرداری از سیاره زمین می‌پردازد. این ماهواره برای بررسی پدیده‌های مختلف سطح زمین در بازه زمانی طولانی مدت طراحی شده‌است. ماهواره سنتینل ۱ به‌عنوان نخستین ماهواره از سری ماهواره‌های پنج‌گانه کوپرنیکوس سازمان فضایی اروپا است. ماهواره سنتینل با ۴ حالت تصویربرداری توان تفکیک مکانی کم‌تر از ۱۰ متر را دارد. داده‌های ماهواره سنتینل به‌صورت دوقطبشی و با توان تفکیک زمانی زیاد است. ماهواره سنتینل ۱ ادامه‌دهنده راه سایر ماهواره‌های راداری است که در باند C تصویربرداری می‌کنند (مانند ERS-1، ERS-2، ENVISAT، RADARSAT-1 و RADARSAT-2). شکل ۷ تصویر ماهواره‌ای فرونشست از دشت بررسی شده را بر حسب سانتی‌متر برای مدت زمان یک سال (۲۰۱۵) را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نقشه ماهواره‌ای فرونشست دشت بررسی شده

## مقایسه مدل ALPRIFT و مدل الگوریتم ژنتیک (GA)

برای مقایسه دو مدل به دست آمده، از شاخص همبستگی (CI) بین شاخص آسیب پذیری فرونشست حاصل از نقشه ماهواره‌ای و شاخص آسیب پذیری دو مدل ALPRIFT و GA و ضریب پیرسون استفاده شد. شاخص همبستگی (CI) یک سیستم امتیازدهی است که محققان آن را به طور گسترده استفاده می‌کنند. از شاخص همبستگی به منظور بررسی دقیق تر شاخص آسیب پذیری فرونشست، استفاده می‌شود. به این منظور مقدار میزان فرونشست به ۴ دسته، بسیار کم، کم، متوسط و زیاد تقسیم شد. سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر فرونشست آن با نقشه‌های آسیب-پذیری ارزش یکسانی دارند و در یک گروه قرار دارند در ۴ ضرب می‌شوند و آن تعداد چاه‌هایی که میزان فرونشست و گروه آسیب پذیری آن به مقدار ۳، ۲ و ۱ اختلاف دارند به ترتیب به ۳، ۲ و ۱ ضرب می‌شوند. سپس مقادیر حاصل با هم جمع و شاخص همبستگی (CI) به دست می‌آید. در این پژوهش از ۴۰ چاه پیژومتری موجود در دشت برای به دست آوردن شاخص همبستگی استفاده شد جدول ۴ نتایج مقایسه دو مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه شاخص همبستگی بین دو مدل ALPRIFT و GA

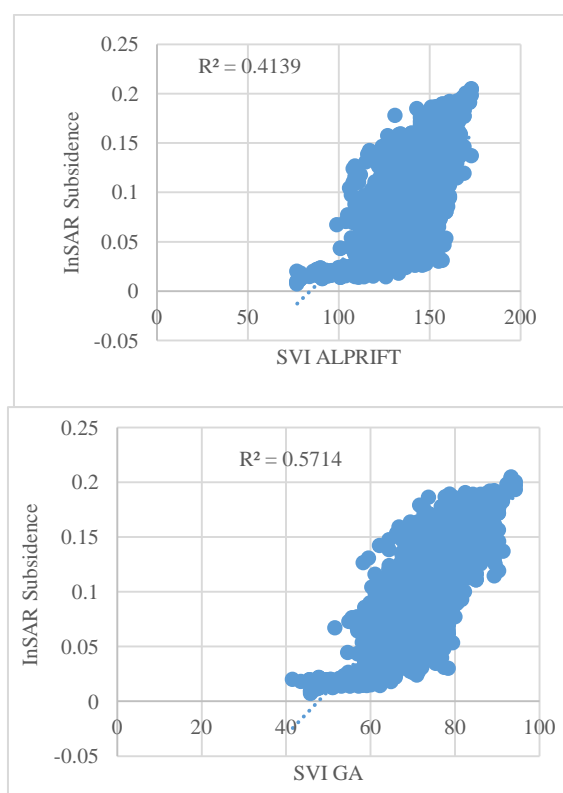
$R^2$	ضریب پیرسون (r)	CI حاصل از چاه‌های پیژومتری	شاخص آسیب پذیری ALPRIFT				شاخص آسیب پذیری GA
			باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	
۰/۴۱	۰/۶۴	۱۱۰	باند ۱	۰	۵	۱	۰
			باند ۲	۰	۱۳	۱	۰
			باند ۳	۰	۲	۷	۰
			باند ۴	۰	۳	۷	۰
۰/۵۷	۰/۷۵	۱۱۳	باند ۱	۰	۰	۰	۱۳
			باند ۲	۰	۰	۲	۷
			باند ۳	۰	۰	۱	۶
			باند ۴	۰	۰	۷	۳

چنان که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، شاخص آسیب پذیری به ۴ باند که محدوده این باندها در جدول ۲ ارائه شده است، تقسیم بندی شده است. به دلیل این که شاخص آسیب پذیری مدل ALPRIFT بین ۷۷ تا ۱۷۳ است شامل باند ۲ و ۳ است و شاخص آسیب پذیری مدل GA بین ۴۱ تا ۹۴ است، شامل باند ۱ و ۲ است. میزان فرونشست حاصل از نقشه ماهواره‌ای نیز به ۴ باند کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم بندی شد و سپس تعداد چاه‌های قرار گرفته هر باند مدل‌های کار شده نسبت به نقشه ماهواره‌ای حساب شد. محاسبه CI هر مدل بدین صورت است:

$$CI \text{ از } ALPRIFT = 4(1 + 2) + 3(1 + 13 + 7 + 3) + 2(5 + 7) + 1(10) = 110$$

$$CI \text{ از } GA = 4(13 + 2) + 3(7 + 1) + 2(6 + 7) + 1(3) = 113$$

چنان که مشخص شد CI حاصل از مدل GA بیش تر از مدل ALPRIFT به دست آمد و این نشان دهنده زیاد بودن شاخص همبستگی مدل GA نسبت به مدل ALPRIFT است. از طرفی ضریب پیرسون حاصل از مدل الگوریتم ژنتیک بیش تر از مدل ALPRIFT است. شکل ۸ نمودار  $R^2$  دو مدل ALPRIFT و GA را نشان می‌دهد. دلیل همبستگی کم مدل ALPRIFT با میزان فرونشست واقعی مربوط به زمان تأخیر فرونشست است.



شکل ۸. نمودار هم‌بستگی بین مدل‌ها و میزان فرونشست

### نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، بررسی پتانسیل فرونشست در دشت جنوب‌غربی تهران با به‌کارگیری مدل ALPRIFT شامل ۷ لایه مؤثر بر فرونشست است. دشت تهران از دشت‌های مهم کشور با کاربری عمده کشاورزی است که برداشت آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین نیازهای آبی، سطح زمین را در این منطقه در معرض خطر فرونشست قرار می‌دهد. بنابراین بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست در این دشت، به‌منظور مدیریت اثرات آن امری ضروری است. در مدل ALPRIFT هفت پارامتر مؤثر، جنس لایه‌های زیرین، کاربری زمین، پمپاژ، تزریق، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی طبق نظر کارشناسی ارائه شده، رتبه‌بندی و کلاس‌بندی شد و از تلفیق این پارامترها در محیط ArcGIS نقشه آسیب‌پذیری دشت با شاخص بین ۷۷ تا ۱۷۳ حاصل شد. سپس به‌منظور بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده، روش الگوریتم ژنتیک تحت نرم‌افزار اکسل به‌کار گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق، نشان می‌دهد که روش الگوریتم ژنتیک به‌دلیل ایجاد هم‌بستگی زیاد بین شاخص فرونشست و فرونشست رخ داده در محدوده بررسی شده، بهتر از روش ALPRIFT، آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل نواحی مرکزی و شمال غربی در معرض فرونشست قرار دارند و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل آن‌ها اعمال شود.

### منابع

1. Waltham A. C., "Ground Subsidence", Chapman & Hall (1955) 202.

2. Darini G., "Land subsidence due to groundwater withdrawal: the case of Bologna", Ph. D. Thesis (2007).
3. Hu R. L., Z. Q. Yueb, L. C. Wanga, S. J. Wang, "Review on Current Status and Challenging Issues of land Subsidence in China", Elsevier Science – Engineering Biology, Vol. 76 (سال؟) 65-77.
4. Bell F. G, "Geological Hazards: Their assessment, avoidance and mitigation", Department of Geological and Applied Geology, University of Natal, Durban, South Africa, (1999) 625.
5. Poland J. F., ed., "Guidebook to studies of land subsidence due to ground water withdrawal", United Nations Educational. Scientific and Cultural Organization. Paris. Studies and reports in hydrology (2001) 40 (1984) 305.
۶. اسکندری شهرکی علی، ترویجی امید، مهدی‌زاده، "بررسی فرونشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی"، دومین کنگره سراسری فناوری‌های نوین ایران، مرکز راهکارهای دست‌یابی به توسعه پایدار (۱۳۹۴).
۷. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، "بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار"، (گزارش نخست) ۵۴ (۱۳۸۴).
۸. محمودپور مسعود، "نقش اندرکنش ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و برداشت آب‌های زیرزمینی در سازوکار و الگوی فرونشست زمین در گستره جنوب باختری تهران"، رسالهٔ دورهٔ دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۴).
9. Rieben E. H., "The geology of the Tehran plain", American Journal of Science, 253, 617-639
۱۰. سازمان آب منطقه‌ای تهران، "آمار تعداد و تخلیه چاه‌های مجاز استان تهران به تفکیک شهرستان و نوع مصرف"، (۱۳۹۳).
۱۱. شمشکی ا.، قاسمی ا.ر. "گزارش آب زمین‌شناسی ناحیه فرونشست زمین جنوب‌غربی دشت تهران (بیان آب زیرزمینی)"، ۲۴ (۱۳۸۷).
12. Nadiri A., Taheri Z., Khatibi R., Barzegari G., Dideban Kh., "Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT" Science of the Total Environment, 628-629 (2018) 1043-1057
13. Holland J., "Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. Information Located, Assess on September 2011 :<http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165> (1975).
14. Melanie M., "An Introduction to Genetic Algorithms", A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts-London, England, Fifth Printing (1999).
۱۵. موسویان س.م.، اسدزاده ا.، "پیش‌بینی تقاضای بنزین در ایران بر مبنای شاخص‌های اقتصادی: یک تحلیل مقایسه‌ای بین الگوریتم ژنتیک و PSO"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت، ۲-۳ خرداد ماه (۱۳۹۶).
16. Piscopo G., "Groundwater vulnerability map. Explanatory notes Castlereagh Catchment", NSW. Centre for Natural Resources. NSW Department of Land and Water Conservation, Parramatta.
۱۷. تبرداد کیوان، "الگوریتم ژنتیک-پرواز در فضای حالت مسئله"، ماهنامه شبکه، شماره ۷۱ (آذر-۱۳۸۵).