

ارزیابی میزان دقت مدل هیبرید برنامه‌ریزی بیان ژن - منطق فازی در برآورد خطر رخداد فرونشست زمین و عوامل موثر بر آن (مطالعه موردی: آبخوان ورامین)

غزاله محبی تفرشی^۱، محمد نخعی^۲ و راضیه لک^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۳دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

چکیده

فرونشست زمین فرآیندی غیرخطی و پیچیده است که مدل‌های هوش محاسباتی داده‌منا قدر هستند بدون تقریب و ساده‌سازی به مدل‌سازی آن بپردازند. در این مطالعه میزان دقت و کارایی مدل هیبرید برنامه‌ریزی بیان ژن - منطق فازی در برآورد خطر رخداد فرونشست زمین و عوامل موثر بر آن در آبخوان ورامین مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور پس از انتخاب و جمع‌آوری اطلاعات ۱۵ فاکتور مؤثر بر رخداد فرونشست بر اساس سوابق تحقیق در محیط GIS، در مرحله اول توسط توابع عضویت فازی، استاندارد شدند و سپس جهت تلفیق لایه‌ها از روش برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده گردید. در نهایت با استفاده از ۷ سنجنده آماری مهم بر مبنای داده‌های تصاویر رادار به صحت سنجی مدل در ۴ سناریوی متفاوت در داده‌های ورودی و عملگرها پرداخته شد. نتایج نشان داد سناریوی ۱ با پارامترهای ورودی تراز سنگ بستر، دبی، افت آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی و عملگرهای $+$, $-$, $\times$, $\div$, Atan , $\sin$, $\cos$, $3Rt$, $\wedge^2$, $\wedge^3$, Ln , exp , sqr ، بهترین مدل در مرحله آموزش و آزمون می‌باشد. بر همین اساس پارامتر افت آب‌های زیرزمینی بیشترین تأثیر را بر میزان فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه داشته است.

کلیدواژه‌ها: آبخوان ورامین، فرونشست زمین، برنامه‌ریزی بیان ژن، منطق فازی، سیستم اطلاعات جغرافیایی.

E-mail: std_gh.mohebbi@khu.ac.ir

*نویسنده مسئول: غزاله محبی تفرشی

۱- پیش‌نوشتار

فرونشست زمین، پدیده زمین‌شناسی شهری خطرناکی است که در سال‌های اخیر، در بسیاری از شهرهای جهان رخ داده است (Chen et al., 2019). فرونشست زمین، مطابق با تعریف یونسکو، به عنوان نشست تدریجی یا فرو رفتن ناگهانی به سمت پایین سطح زمین که ممکن است بردار جابجایی افقی کمی داشته باشد، شناخته می‌شود (UNESCO, 2018). این پدیده باعث آسیب به محیط طبیعی و حتی خسارات اقتصادی می‌شود (Hu et al., 2004). فرونشست زمین یکی از پیامدهای استفاده بیش از حد و سوء مدیریت منابع آب است که به دلیل فشرده‌سازی خاک در اثر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد (Pacheco et al., 2006). بر این اساس، این خطر زمین‌شناختی شایع که معمولاً ناشی از پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، در بسیاری از مناطق از جمله رفسنجان (Mousavi et al., 2001)، شانگهای (Hu et al., 2004)، بانکوک (Phien-wej et al., 2006)، کاشمر (Motagh et al., 2007)، مشهد (Lashkaripour et al., 2006)، مکزیکوسیتی (Calderhead et al., 2011)، تیانجین (Lixin et al., 2011)، کالیفرنیا (Galloway and Burbey, 2011)، سوژی چانگ (Chen et al., 2013)، اراک (Rajabi and Ghorbani, 2016)، تهران (Mahmoudpour et al., 2013)، و تهران (Ranjbar and Ehteshami, 2019) به طور گسترده گزارش شده است. خسارت شدید از جمله از بین رفتن سطح زمین، ترک‌خوردگی ساختمان‌ها، شکستگی در خطوط زیرزمینی و حمل و نقل و افزایش خطر سیل ناشی از فرونشست زمین است. مطالعات بی‌شماری در سراسر جهان وجود دارد که بر پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن متمرکز شده‌اند. در مطالعات اخیر، احتمال رخداد فرونشست زمین با استفاده از نتایج تحقیقات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیک، روش‌های آماری، روش منطق فازی (Choi et al., 2010; Gu and Wang, 2010; Rafie and Samimi Namin, 2015; Yu et al., 2018; Chanapathi et al., 2019)، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) (Suh et al., 2013; Abdollahi et al., 2018; Tien Bui et al., 2018;)

(Park et al., 2012) از ترکیب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سیستم استنتاج عصبی- فازی در شهر سامچوک کره جنوبی استفاده نمودند. برای این کار از پنج عامل اصلی مؤثر در فرونشست از جمله عمق گسل، فاصله از گسل، شیب،

زمین‌شناسی و کاربری اراضی استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها حاکی از دقت قابل قبول روش مورد استفاده برای تهیه نقشه خطر فرونشست بود. (Rezaee (2016) از یک مدل فازی برای پیش‌بینی مکان‌های در معرض خطر فرونشست در دشت کرمانشاه استفاده نمود. بر این اساس، نتایج حاکی از آن بود که در خاور کرمانشاه و در جنوب و خاور روستای ده پلاتان که آب‌های زیرزمینی رسوبات زیاد و ریز دانه‌ای دارند، خطر فرونشست از سایر مناطق بیشتر است. (Shadfar et al. (2016) برای تعیین پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین، از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در منطقه بوین زهرا استفاده کردند. بر این اساس، آنها نتیجه گرفتند که عامل «پمپاژ بیش از حد آب زیرزمینی» که منجر به افت زیاد سطح آب‌های زیرزمینی شده با ضریب $0/4842$ در درجه اول و عامل «زمین‌شناسی» با ضریب $0/2445$ در درجه دوم، در ایجاد فرونشست مؤثر است. (Behyari et al. (2017) در تحقیق خود به ارزیابی ساختارهای تکتونیکی فعال مؤثر بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در مرزن آباد پرداختند. بر این اساس، آنها نتیجه گرفتند که عوامل زمین‌شناسی از جمله وجود درزه‌ها و گسل باعث ایجاد نقاط ضعف در خاک و بی ثباتی در منطقه شده و از طرف دیگر منجر به انتقال آب به واحدهای آهکی زیرسطحی شده و حفره‌های انحلال و فرونشست زمین ایجاد می‌نماید.

(Minderhoud et al. (2018) در تحقیق خود به رابطه بین کاربری اراضی و فرونشست در دلتای مکنونک ویتنام پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که شیوه‌های استفاده از اراضی می‌تواند بر روند فرونشست زمین، چه فرونشست طبیعی یا فرونشست در اثر فعالیت‌های انسانی تأثیر بگذارد. در این تحقیق آنها نتیجه گرفتند که کلاس‌های مختلف کاربری اراضی دارای میزان متفاوتی از فرونشست زمین هستند. بر این اساس، بیشترین میزان فرونشست زمین برای کلاس‌های کاربری اراضی مشاهده شد که در آنها شدت تغییرات طبیعی در اثر فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است.

همانطور که در مرور تحقیقات مشاهده می‌شود، در هیچ یک از تحقیقات انجام شده به ارزیابی هم‌زمان تمام پارامترهای مؤثر بر رخداد فرونشست زمین از جمله نوع خاک، بارندگی، دبی چاه‌های پمپاژ، فرسایش، کاربری اراضی، گسل، ضخامت رس، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان مانند آبدهی ویژه (Sy)، و قابلیت انتقال (T) پرداخته نشده است. در نتیجه، هدف اصلی از این مطالعه استفاده از یک روش تلفیقی از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و منطق فازی برای ارزیابی هم‌زمان این عوامل و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین و همچنین مشخص کردن میزان تأثیر هر عامل بر رخداد فرونشست در آبخوان ورامین و تعیین میزان صحت این روش با استفاده از داده‌های تکنیک تداخل سنجی راداری است.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

آبخوان مورد مطالعه در جنوب خاوری تهران واقع شده و بخشی از زیر حوضه ورامین است (شکل a-1). براساس سرشماری ملی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۰، ۹۹۰،۴۴۷ نفر در این منطقه زندگی می‌کنند (SCI, 2019). این منطقه در مسیر راه‌های ارتباطی مهمی از جمله راه آهن تهران- مشهد (شکل b-1) و جاده ترانزیتی خاور-باختر کشور قرار دارد. همچنین این منطقه در مسیر خطوط انتقال برق به جنوب ایران واقع شده است (شکل c-1). آبخوان ورامین دارای ارتفاع متوسط ۹۵۰ متر از سطح دریا است. بالاترین ارتفاع در قسمت شمالی ۱۱۴۸ متر (شکل k-3) و کمترین ارتفاع در جنوب و جنوب خاوری آبخوان ۸۱۰ متر است (Nejatijahromi et al., 2019). شیب توپوگرافی این منطقه از شمال خاوری به سمت جنوب خاوری آبخوان می‌باشد (شکل m-3). این منطقه دارای میانگین بارندگی سالانه $187/4$ میلی‌متر (شکل n-3) و میانگین دمای سالانه $16/4$ درجه سانتی‌گراد است (Nejatijahromi et al., 2019). بر همین اساس، آب و هوای آبخوان ورامین اغلب تحت تأثیر جبهه‌های مدیترانه‌ای از باختر و شمال باختری و جبهه‌های سیبری از شمال قرار گرفته است (Mokhtari and Espahbod, 2009). از دیدگاه زمین‌ساختی، آبخوان ورامین در زون ایران مرکزی واقع شده است

۳- مواد و روش‌ها

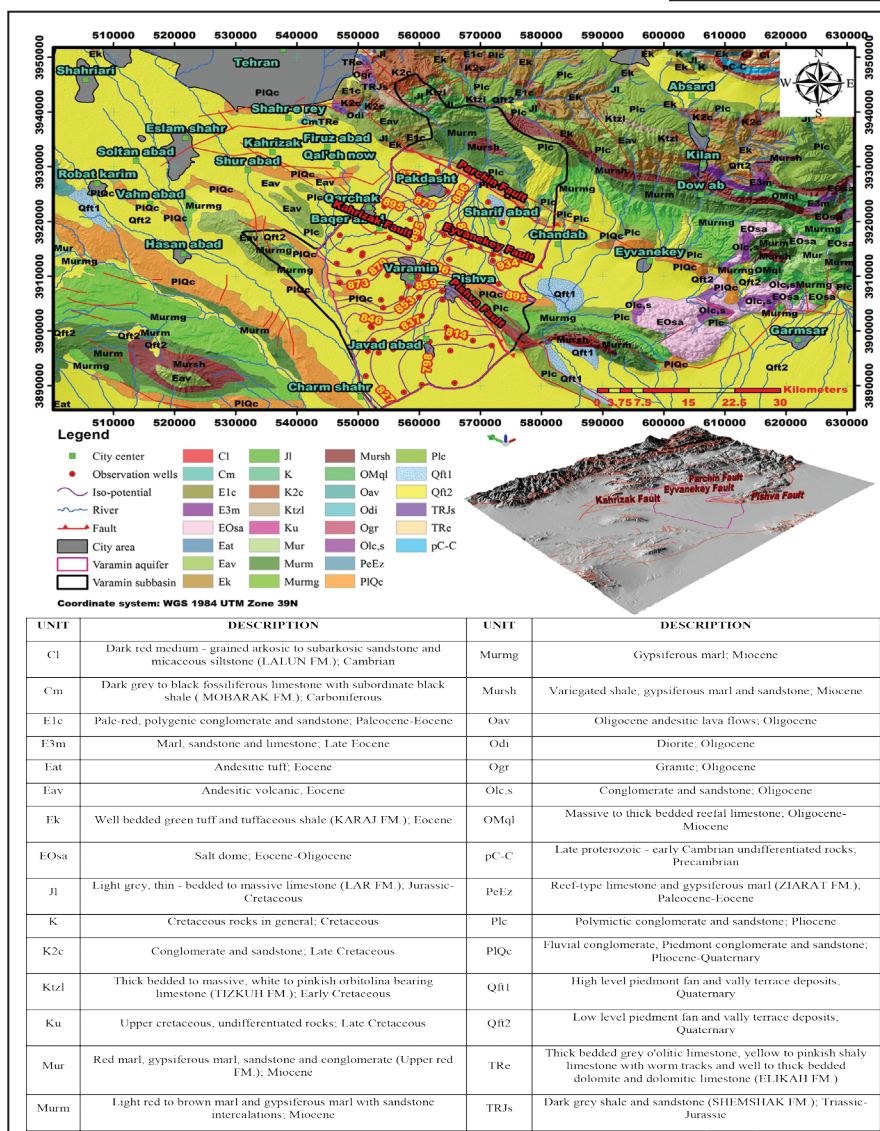
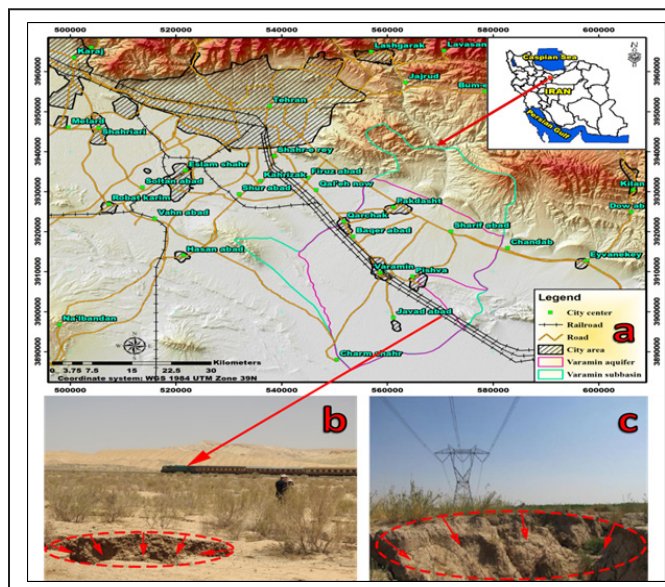
۳-۱. داده‌های ورودی

در این مطالعه ۱۷ نقشه ورودی (شکل ۳) از جمله مدل ارتفاعی رقومی (DEM) که در نرم افزار ArcGIS10.5 از یک نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تولید می‌شود (NGOI, 2008)، شیب، قابلیت انتقال (T) (TRWA, 2018)، آبدهی ویژه (Sy) (TRWA, 2018)، منطقه‌بندی دبی چاه‌های پمپاژ (TRWA, 2018) که در نرم‌افزار ArcGIS10.5 با روش چند ضلعی تیسین تولید می‌شود، ضخامت آبخوان (TRWA, 2018)، تراز سنگ بستر (TRWA, 2018)، ضخامت رس (TRWA, 2018)، نقشه فاصله از گسل‌ها که در نرم‌افزار ArcGIS10.5

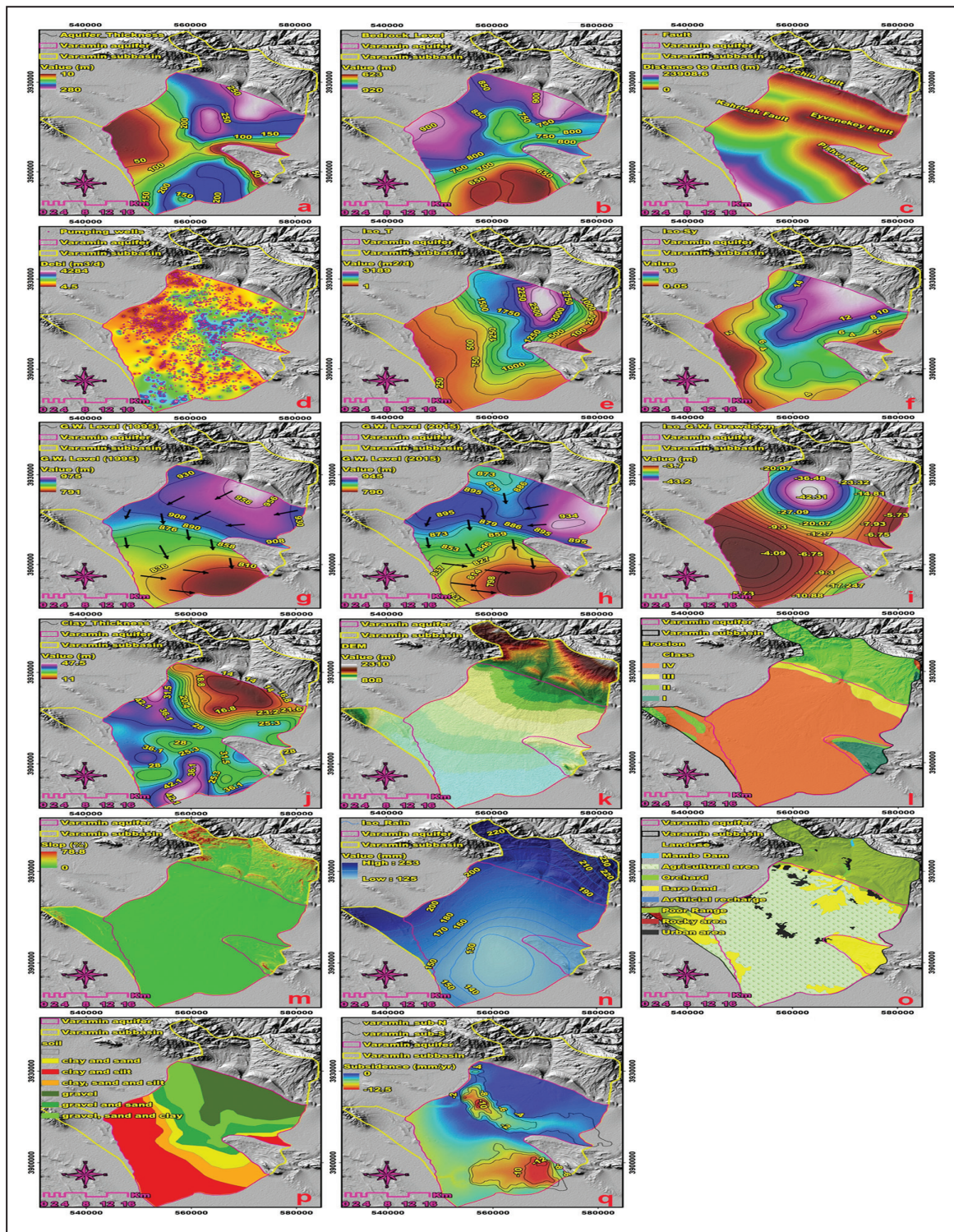
بارندگی سالانه، نقشه نوع خاک با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (SCWMRI, 2010)، ارزیابی و آماده شدند تا در محیط GIS تجزیه و تحلیل شوند و مورد استفاده قرار گیرند. برای صحت سنجی و مقایسه نتایج از اطلاعات نرخ فرونشست زمین (شکل ۳-ق) بر اساس تکنیک تداخل سنجی تصاویر رادار تا سال ۲۰۱۵ استفاده شده است (Sentinel-1, 2015).

با روش فاصله اقلیدسی تولید می‌شود، سطح آب زیرزمینی در ۱۳۷۵ (TRWA, 2018)، سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۵ (TRWA, 2018)، افت آب‌های زیرزمینی در ۲۰ سال (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵)، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (Sadeghi et al., 2006)، نقشه کاربری اراضی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (SCWMRI, 2010)، نقشه فرسایش با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (SCWMRI, 2010)

شکل ۱-ا) موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ b و c) رخداد فرونشست در محدوده خطوط راه‌آهن و خطوط انتقال برق. خط چین، محل فرونشست زمین را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۳- (a) ضخامت آبخوان؛ (b) سطح بستر؛ (c) فاصله گسل ها؛ (d) پهنه بندی دبی چاه های پمپاژ؛ (e) قابلیت انتقال (f) آبدی ویژه (g) (Sy)؛ (h) سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۵؛ (i) افت آب های زیرزمینی طی ۲۰ سال (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵)؛ (j) ضخامت لایه های رسی؛ (k) مدل ارتفاعی رقومی (DEM)؛ (l) فرسایش؛ (m) شیب؛ (n) بارندگی سالانه؛ (o) کاربری اراضی؛ (p) نوع خاک؛ (q) نرخ فرونشست زمین بر اساس تکنیک تداخل سنجی تصاویر رادار تا سال ۲۰۱۵.

۲-۳. فاکتورهای مؤثر بر فرونشست زمین

در مطالعه حاضر، ۱۵ فاکتور تأثیرگذار بر رخداد فرونشست از جمله ضخامت آبخوان، تراز سنگ بستر، ضخامت رس، منطقه بندی دبی چاه های پمپاژ، قابلیت انتقال (T)، آبدی ویژه (Sy)، افت آب های زیرزمینی در ۲۰ سال، نوع خاک، شیب، ارتفاع مبتنی بر DEM، فرسایش، بارندگی سالانه فاصله از گسل، واحدهای سنگ شناسی و کاربری اراضی برای مدل سازی فرونشست زمین، بر مبنای بررسی

سوابق تحقیق مورد استفاده قرار گرفت (Ayalew et al., 2005; Karsli et al., 2009; Wang et al., 2009; Behyari et al., 2017; Minderhoud et al., 2018).

۳-۳. استاندارد سازی فاکتورهای مؤثر با استفاده از توابع عضویت فازی

منطق فازی که توسط Zadeh (1965) پیشنهاد شده، مبتنی بر تئوری مجموعه فازی است. یک مدل منطق فازی می تواند رویکردی فراهم کند که توصیف های

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{x - f_1}{f_2}} \quad (1)$$

Fuzzy Linear: این عملگر بین حداقل و حداکثر مقادیر تعریف شده توسط کاربر رابطه خطی ایجاد می‌کند (Raines et al., 2010). به مقادیری که کمتر از حداقل مقدار هستند، ارزش عددی صفر و مقادیر بیشتر از حداکثر مقدار، ارزش عددی یک تعلق می‌گیرد (شکل b-4).

$$\mu(x) = 0 \text{ if } x < \min, \mu(x) = 1 \text{ if } x > \max, \text{ otherwise } \mu(x) = \frac{(x - \min)}{(\max - \min)} \quad (2)$$

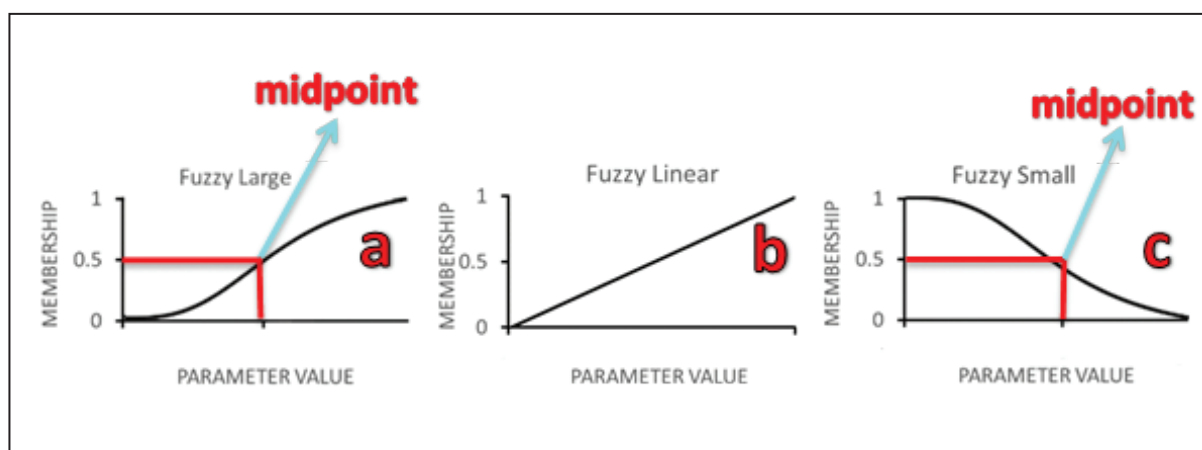
Fuzzy Small: این عملکرد هنگامی استفاده می‌شود که مقادیر ورودی کوچک اهمیت بیشتری داشته و در نتیجه مقدار عضویت بالاتری دارند (Mohebbi Tafreshi et al., 2018; Raines et al., 2010). ارزش عضویت کمتر از حد متوسط در این عملگر افزایش یافته و دارای تناسب بهتری و بالاتری می‌باشند (شکل c-4).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{x - f_1}{f_2}} \quad (3)$$

در معادلات بالا، f1 پارامتر مقدار پخش (spread) وارد شده توسط کاربر و f2 نقطه میانی (midpoint) است. min و max مقادیر حداقل و حداکثر هستند و توسط کاربر وارد می‌شوند.

کیفی متخصصان را به مدلی عددی- مکانی تبدیل کند تا بتواند مکان رویداد مورد نظر را پیش بینی کند (Raines et al., 2010). اولین قدم در مدل‌های فازی، استانداردسازی پارامتر با توابع عضویت فازی است. مقادیر فازی با تبدیل مقادیر ورودی خام به مقیاس عضویت از 0 تا 1 بر اساس توابع تبدیل فازی بدست می‌آیند. مقادیر نزدیک به 1 برای هدف مورد نظر مناسب‌تر هستند و مقادیری که به 0 نزدیک می‌شوند مناسب نیستند. چندین تابع عضویت فازی در زیر برنامه منطق فازی نرم‌افزار ArcGIS نسخه 10 وجود دارد و یک شکل سیگموئیدی از عضویت ایجاد می‌کند، که معمولاً در بسیاری از برنامه‌های منطق فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Raines et al., 2010). کاربرد و استفاده از هر یک از این توابع بر اساس تنظیم پارامترهای نقطه میانی (midpoint) و پخش (spread) انجام می‌شود. انتخاب و بکارگیری هر یک از توابع عضویت فازی به نوع، میزان اهمیت و ارتباط هر عامل با هدف اصلی بستگی دارد. در این تحقیق، برای استانداردسازی فاکتورها، سه عملگر عضویت فازی مورد استفاده قرار گرفت که در بخش زیر به شرح هر یک پرداخته می‌شود:

Fuzzy Large: این عملگر دقیقاً برعکس عملگر Small است و در مواقعی که مقادیر زیاد، اهمیت بیشتری دارند استفاده می‌شود (Mohebbi Tafreshi et al., 2018). مقادیر عضویتی که بیشتر از نقطه میانی هستند در این عملگر افزایش یافته و روندی با شیب نزولی می‌یابند (شکل a-4).



شکل ۴- نمودارهای تبدیل عملگرهای توابع عضویت فازی. (a. Fuzzy Large (b. Fuzzy Linear (c. Fuzzy Small

۳-۴. برنامه ریزی بیان ژن

برنامه‌نویسی بیان ژن یک الگوریتم ژنتیک تعمیم یافته است که برای اولین بار توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ (Ferreira, 2001) بر اساس نظریه تکامل داروین ارائه شد. اولین قدم در الگوریتم بیان ژن تولید جمعیت اولیه از راه حل‌ها است. این کار با یک فرآیند تصادفی یا با استفاده از برخی اطلاعات در مورد مسئله قابل انجام است. سپس کروموزوم‌ها به شکل یک عبارت درخت‌واره بیان می‌شود تا مطابق با یک تابع برازش ارزیابی شود و میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین شود. تابع برازش معمولاً با پردازش تعدادی نمونه از مسئله هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که به آن موارد برازش نیز گفته می‌شود. اگر کیفیت مطلوب از یک راه حل پیدا شود یا نسل به تعداد مشخصی برسد، تکامل متوقف و بهترین راه حل گزارش می‌شود. از طرف دیگر، در صورت عدم محقق شدن شرایط توقف، بهترین راه حل توسط نسل فعلی (به معنای نخه‌گزینی) نگه داشته می‌شود و بقیه راه حل به یک فرآیند انتخابی واگذار می‌شود. انتخاب یا گزینش، عملکرد بقای شایسته را دارد و بر همین اساس بهترین افراد شانس بهتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیشرفت نسل به جلو، انتظار می‌رود کیفیت جمعیت نیز به طور متوسط بهبود یابد (Ferreira, 2006). در این روش، پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها مدل‌سازی

می‌شوند. مجموعه توابع معمولاً شامل توابع اصلی حسابی $\{+, -, *, \div\}$ ، توابع مثلثاتی و سایر توابع ریاضی یا توابع تعریف شده توسط کاربر است که به عقیده او ممکن است برای تفسیر مدل مناسب باشد. مجموعه ترمینال‌ها برای تفسیر مدل مناسب باشد. مجموعه ترمینال‌ها از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسئله تشکیل شده‌اند (Ferreira, 2006). بر این مبنای روند مدل‌سازی در پنج گام به شرح زیر است:

گام اول، انتخاب تابع برازش مناسب که در این مطالعه تابع جذرمیانگین مربعات خطا به عنوان تابع برازش انتخاب گردید. گام دوم، انتخاب مجموعه متغیرهای ورودی و مجموعه توابع به منظور تولید کروموزوم‌ها می‌باشد. در این مطالعه، از چهار عملگر اصلی که شامل $\{+, -, *, \div\}$ و توابع ریاضی $\{\sin, \cos, \text{Atan}, \text{Ln}, \text{exp}, \text{sqr}, \text{Rt}, \text{Rt}^2, \text{Rt}^3\}$ استفاده شد. گام سوم، شامل انتخاب ساختار و معماری کروموزوم‌ها می‌باشد. گام چهارم انتخاب تابع پیوندی است که در این مطالعه عمل جمع برای ایجاد پیوند بین زیر شاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، در گام پنجم عملگرهای ژنتیک و نرخ هر یک از آنها انتخاب می‌شود.

۳-۵. سنجنده‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد، از هفت سنجنده مهم آماری استفاده شد. شرح این معیارهای آماری در زیر آمده است:

می دهد. مقادیر کم این سنجنده که به صفر نزدیک تر است، عملکرد عالی مدل را بیان می کند (Hyndman and Koehler, 2006).

$$\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (7)$$

در معادلات بالا، A_t داده های واقعی (مقادیر نرخ فرونشست از تصاویر رادار)، F_t داده های برآورد شده توسط مدل و n تعداد داده ها است.

سه سنجنده آماری دیگر که نرم افزار GeneXpro Tools بطور اختصاصی از آنها در ارزیابی عملکرد مدل استفاده می نماید به ترتیب عبارتند از خطای مطلق نسبی (RAE) (فرمول ۸)، مربع خطای مطلق نسبی (RSE) (فرمول ۹) و ریشه مربعات خطای نسبی (RRSE) (فرمول ۱۰).

$$\frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{|A_t - \bar{A}|} \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{(A_t - \bar{A})^2} \quad (9)$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{(A_t - \bar{A})^2}} \quad (10)$$

در معادلات بالا، A_t داده های واقعی (فرونشست اندازه گیری شده از تصاویر رادار)، F_t داده های برآورد شده توسط مدل و $\bar{A}$ میانگین داده های واقعی است (شکل ۵).

ضریب همبستگی (R) نشان دهنده ارتباط بین نتایج برآورد شده از مدل و داده های واقعی (مقادیر نرخ فرونشست از تصاویر رادار) است. بدیهی است هرچه مقدار این سنجنده به یک نزدیک تر باشد، مشابهت مقادیر برآورد شده به مقادیر واقعی و دقت بیشتر مدل را نشان می دهد.

$$\frac{n \sum_{t=1}^n F_t A_t - (\sum_{t=1}^n F_t)(\sum_{t=1}^n A_t)}{\sqrt{(\sum_{t=1}^n F_t^2) - (\sum_{t=1}^n F_t)^2} \sqrt{(\sum_{t=1}^n A_t^2) - (\sum_{t=1}^n A_t)^2}} \quad (4)$$

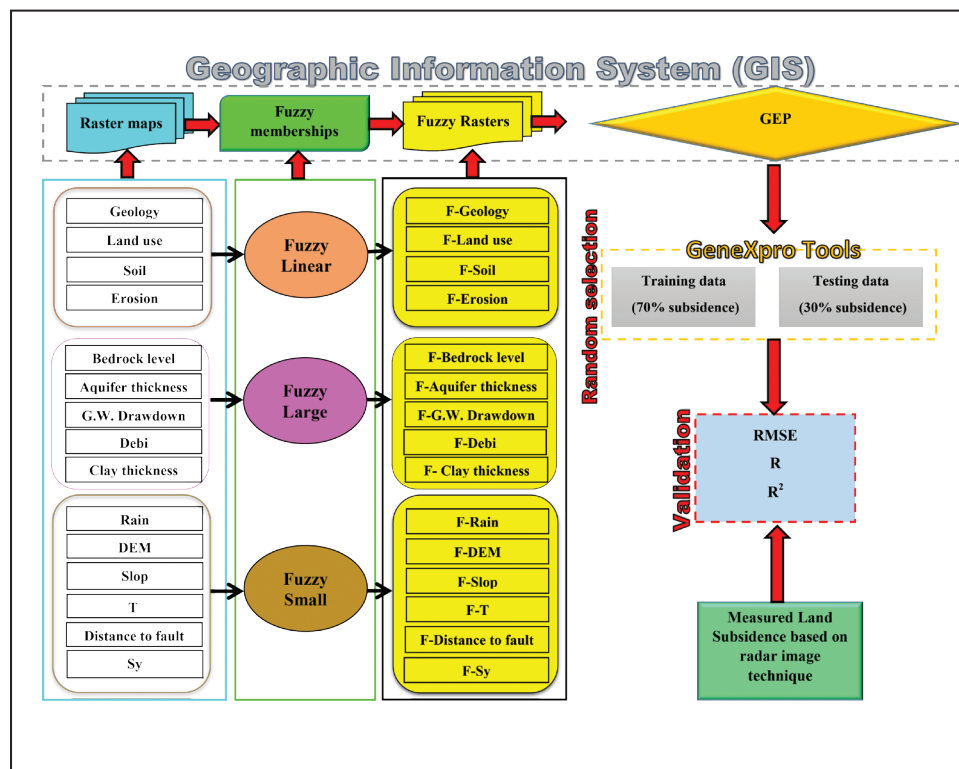
سنجنده دیگر، میانگین مربعات خطا (MSE) است که به عنوان میانگین توان دوم انحراف یک برآوردگر از مقدار واقعی آن تعریف می شود. این سنجنده از اهمیت ویژه ای در بین متخصصین آمار برخوردار است (Lehmann and Casella, 1998).

$$\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (5)$$

خطای مطلق متوسط (MAE) یک سنجنده قوی در محاسبه میزان پراکندگی داده است. این سنجنده نسبت به انحراف استاندارد در زمینه داده های پرت مقاوم تر عمل می کند.

$$\frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (6)$$

ریشه مربعات خطای میانگین (RMSE) تعداد انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر مشاهده شده را نشان می دهد. به عبارت دیگر، این سنجنده پراکندگی داده ها را نشان



شکل ۵- فلوچارت مراحل انجام تحقیق.

۴- بحث

۴-۱. استانداردسازی فاکتورهای مؤثر با استفاده از توابع عضویت فازی

با توجه به اینکه در فاکتورهای بارندگی سالانه، DEM، شیب، T، فاصله از گسل و Sy، مقادیر کمتر تأثیر بیشتری در فرونشست زمین دارد، از تابع «Small» برای استانداردسازی فازی استفاده شد. در شکل ۶ استانداردسازی فازی یکی از این نوع پارامترها با استفاده از عملگر «Small» فازی نشان داده شده است.

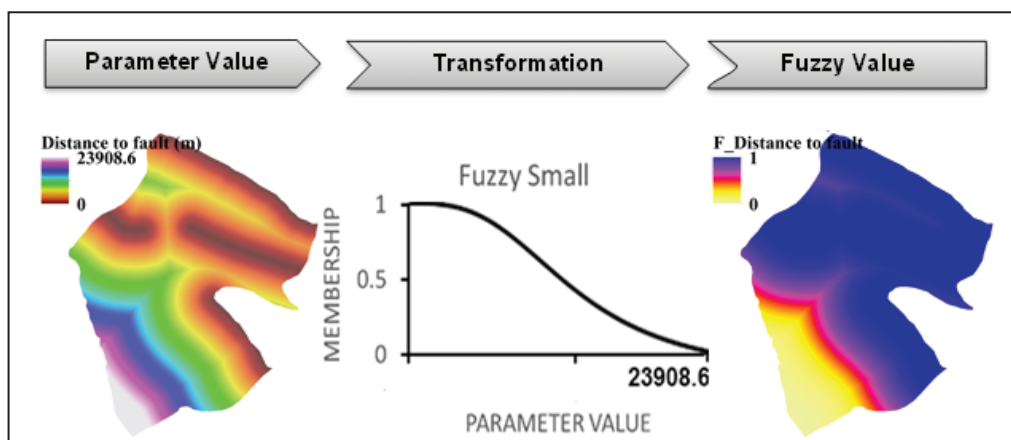
در آن دسته از پارامترهایی که افزایش مقدار آنها باعث افزایش در نرخ فرونشست زمین می شود، باید تابع عملگر «Large» فازی مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس،

پارامترهای تراز سنگ بستر، ضخامت آبخوان، دبی پمپاژ از چاه های بهره برداری و افت سطح آب های زیرزمینی با استفاده از این تابع عضویت، استاندارد فازی شدند. در شکل ۷ استانداردسازی فازی یکی از این نوع پارامترها با استفاده از عملگر «Large» فازی نشان داده شده است.

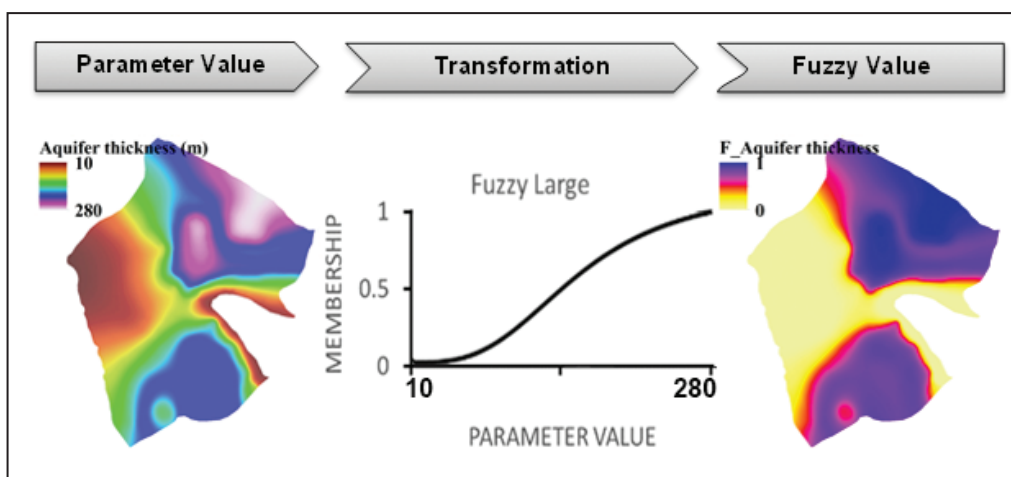
فاکتورهای زمین شناسی، نوع خاک، کاربری اراضی و فرسایش پارامترهای کیفی هستند و دارای طبقات کیفی هستند. از این رو برای استانداردسازی فازی این نوع پارامترها، تابع عضویت «Linear» فازی پس از اختصاص عدد به هر کلاس کیفی

پارامترها با استفاده از تابع عضویت «Linear» فازی نشان داده شده است. شکل ۹ همه استانداردسازی فاکتورها را با عملگرهای توابع عضویت فازی نشان می‌دهد.

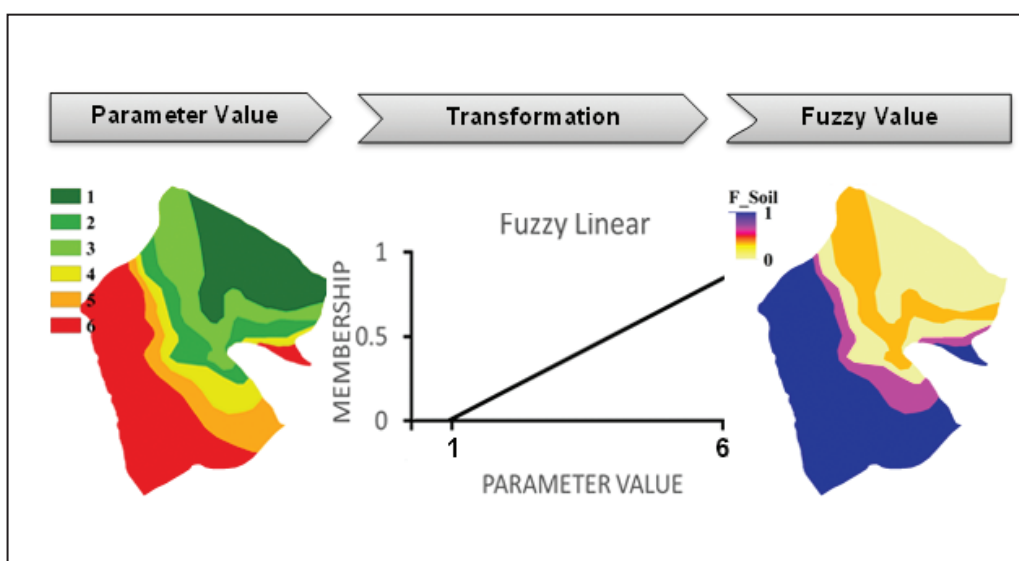
مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). بر این اساس، عدد کلاس بزرگ نشان دهنده تأثیر بالاتر در فرونشست زمین است. در شکل ۸ روش استاندارد سازی فازی یکی از این نوع



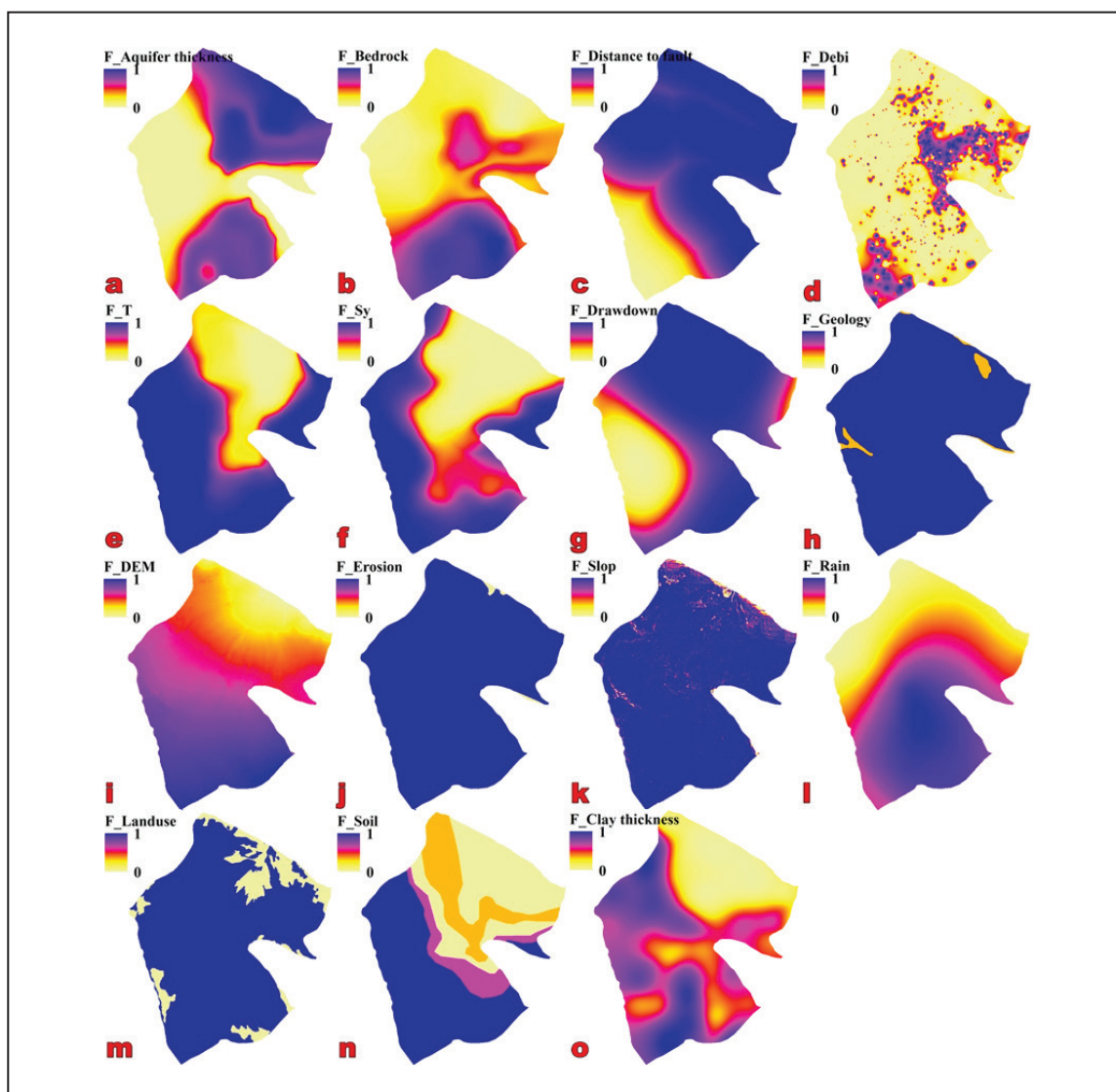
شکل ۶- استاندارد سازی فازی پارامتر "فاصله از گسل" با استفاده از تابع عضویت "Small" فازی. در این شکل، ارزش عددی یک (آبی)، بیشترین تأثیر و ارزش عددی صفر (زرد)، کمترین اثر را بر رخداد فرونشست دارند.



شکل ۷- استانداردسازی فازی پارامتر "ضخامت آبخوان" با استفاده از تابع عضویت "Large" فازی. در این شکل، ارزش عددی یک (آبی)، بیشترین تأثیر و ارزش عددی صفر (زرد)، کمترین اثر را بر رخداد فرونشست دارند.



شکل ۸- استانداردسازی فازی پارامتر "جنس خاک" با استفاده از تابع عضویت "Linear" فازی. در این شکل، ارزش عددی یک (آبی)، بیشترین تأثیر و ارزش عددی صفر (زرد)، کمترین اثر را بر رخداد فرونشست دارند.



شکل ۹- استانداردسازی فاکتورها با توجه به عضویت های فازی. (a) ضخامت آبخوان- فازی؛ (b) تراز سنگ بستر- فازی؛ (c) فاصله از گسل- فازی؛ (d) پهنه بندی دبی چاه های پمپاژ- فازی؛ (e) قابلیت انتقال- فازی؛ (f) آبدهی ویژه- فازی؛ (g) افت سطح آبهای زیرزمینی- فازی؛ (h) زمین شناسی- فازی؛ (i) مدل ارتفاعی رقمی- فازی؛ (j) فرسایش- فازی؛ (k) شیب- فازی؛ (l) بارندگی سالانه- فازی؛ m: کاربری اراضی- فازی؛ (n) جنس خاک- فازی؛ (o) ضخامت لایه های رسی- فازی.

جدول ۱- اعداد اختصاص داده شده به هر کلاس کیفی.

Class n.	Geology	Soil type	Land use	Erosion
1	Eav, K2c	Gravel	Rocky area, Artificial recharge, Mamlo Dam	I
2	E1c, Ek, Jl, Ktzi, PIQc, Plc, Qft1	Gravel and Sand	Bare Land, Orchard, Poor Range	II
3	Qft2, Murm, Murmg, Mursh	Gravel, Sand and Clay	Urban area	III
4	-	Clay and Sand	Agricultural area	IV
5	-	Clay, Sand and Silt	-	-
6	-	Clay and Silt	-	-

۲-۴. ترکیب فاکتورهای استاندارد شده فازی با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

در این تحقیق داده‌های مورد استفاده به صورت تصادفی ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ برای تست در سناریوهای متفاوتی به مدل وارد شد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل از سنجنده‌های آماری بهترین برازش (Best fitness)، ضریب همبستگی (R)، ضریب تبیین (R²) و ریشه متوسط خطای مربعات (RMSE) استفاده شد. پارامترهای مورد استفاده و میزان آنها در مراحل مختلف استفاده از نرم افزار GeneXproTools برای برآورد فرونشست در جدول ۲ خلاصه شده است. جدول ۳ پارامترهای ارزیابی مدل در دو حالت آزمون و آموزش به ازای سناریوهای متفاوت را نشان می‌دهد. این سناریوها به منظور انتخاب بهینه‌ترین ترکیب لایه‌های مؤثر بر رخدادهای فرونشست و همچنین مناسب‌ترین عملگرهای ریاضی که سبب بهبود نتایج مدل‌سازی می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع هدف استفاده از

سناریوهای مختلف، رسیدن به بهترین نتایج مدل بر مبنای مقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده می‌باشد. بر این مبنای ۴ سناریوی مختلف بر اساس عملگرهای متفاوت و ترکیبات عوامل مختلف توسعه داده شد. سناریوی ۱ شامل ۴ پارامتر ورودی: تراز سنگ بستر، دبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی و عملگرهای $\text{sqrt}, \exp, \text{Ln}, ^2, ^3, 3\text{Rt}, \sin, \cos, \text{Atan}, +, -, \times, \div$ شامل ۸ پارامتر ورودی: ضخامت آبخوان، تراز سنگ بستر، دبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، بارندگی و قابلیت انتقال و عملگرهای $+, -, \times, \div$ شامل ۶ پارامتر ورودی: تراز سنگ بستر، فاصله از گسل، بارندگی، نوع خاک، افت سطح آب‌های زیرزمینی و زمین‌شناسی و عملگرهای $\text{sqrt}, \exp, \text{Ln}, ^2, ^3, 3\text{Rt}$ و سناریوی ۴ شامل ۵ پارامتر ورودی: ضخامت آبخوان، تراز سنگ بستر، دبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی و عملگرهای $\sin, \cos, \text{Atan}$ می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده و میزان آنها در مراحل مختلف استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools.

Parameters	Rate	Parameters	Rate/Type
Head size	7	Gene recombination rate	0.2
Chromosomes	30	IS recombination rate	0.1
Number of genes	3	RIS recombination rate	0.1
Mutation rate	0.033	Gene transposition rate	0.1
DC Mutation	0.1	Fitness function error type	RMSE, R, Best fitness
One-point recombination rate	0.2	Linking function	+
Two-point recombination rate	0.3	Function set	$\text{sqrt}, \exp, \text{Ln}, ^2, ^3, 3\text{Rt}, \sin, \cos, \text{Atan}, +, -, \times, \div$

جدول ۳- مقادیر سنجنده‌های آماری مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در دو حالت آموزش و آزمون به ازای سناریوهای متفاوت.

Scenario		R	R ²	RMSE	Best fitness	MSE	MAE	RAE	RSE	RRSE
1	Training	0.9894	0.9789	0.04682	955.26	0.00210	0.03330	0.1408	0.02869	0.04682
	Test	0.9920	0.9841	0.04190	959.78	0.001755	0.03151	0.1399	0.02442	0.1555
2	Training	0.9300	0.8700	0.0960	911.59	0.00940	0.07300	0.3086	0.12300	0.3508
	Test	0.9400	0.8900	0.0870	919.20	0.00770	0.07000	0.3111	0.10650	0.3263
3	Training	0.9680	0.9370	0.0790	926.77	0.00620	0.06690	0.2828	0.08160	0.2857
	Test	0.96700	0.9360	0.0760	929.11	0.00580	0.06400	0.2885	0.08000	0.2832
4	Training	0.98200	0.9643	0.0520	950.34	0.00270	0.04511	0.1906	0.03572	0.1890
	Test	0.9823	0.9649	0.0500	951.82	0.00250	0.04310	0.1914	0.03500	0.1879

ورودی‌ها و متغیر خروجی دارا می‌باشد، لذا در جدول ۴ رابطه ریاضی و ثابت عددی حاصل از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن بر مبنای سناریوی برتر (سناریو ۱) نشان داده شده است. ثابت‌های عددی به صورت تصادفی در هر یک از ژن‌های کروموزوم برازنده ایجاد و در ساده‌تر شدن معادله کمک می‌کنند. با توجه به اینکه پنج ژن در اینجا تشکیل شده، هریک از ژن‌ها یک زیردرخت و معادله مربوط به خود را دارد که در نهایت با توجه به تابع پیوند، معادله نهایی حاصل می‌شود. شکل ۱۳ ساختار مدل خروجی مطلوب را به صورت درختی نشان می‌دهد.

چون تابع پیوند، تابع جمع است باید ژن‌ها را برای بدست آوردن فرمول جواب با هم جمع نمود، که در پایان معادله نهایی به صورت زیر حاصل می‌شود:

(۱۰)

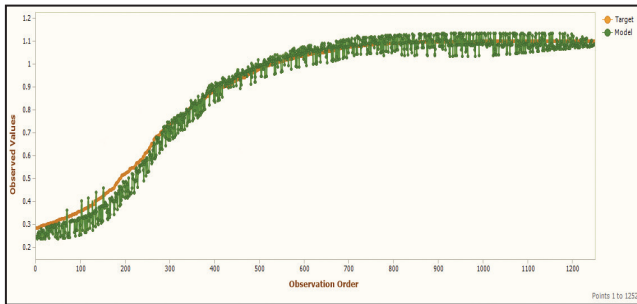
$$\text{Land subsidence} = \text{SUB}(\text{ET1}) + \text{SUB}(\text{ET2}) + \text{SUB}(\text{ET2}) + \text{SUB}(\text{ET4}) + \text{SUB}(\text{ET5})$$

در نهایت در شکل ۱۴، پهنه بندی خطر فرونشست بر اساس بهترین سناریو، ارائه گردید.

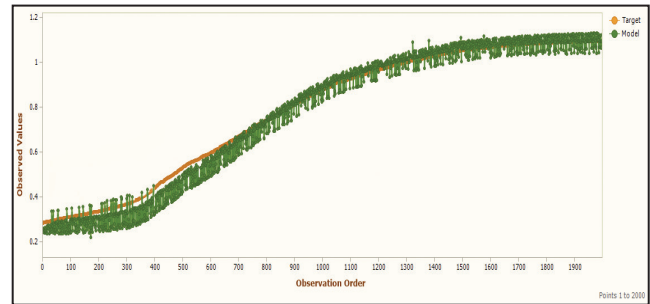
همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، سناریوی ۱ با پارامترهای ورودی تراز سنگ بستر، دبی، افت آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی و عملگرهای $\text{sqrt}, \exp, \text{Ln}, ^2, ^3, 3\text{Rt}, \sin, \cos, \text{Atan}, +, -, \times, \div$ بهترین مدل در مرحله آموزش و آزمون می‌باشد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). نتایج حاصل این مطلب را بیان می‌کند که استفاده از پارامترهای تراز سنگ بستر، دبی، افت آب‌های زیرزمینی و زمین‌شناسی و عملگرهای $\text{sqrt}, \exp, \text{Ln}, ^2, ^3, 3\text{Rt}, \sin, \cos, \text{Atan}, +, -, \times, \div$ منجر به بهبود عملکرد مدل و انطباق عالی نتایج مدل سازی با نتایج واقعی خواهد شد.

شکل ۱۲ میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها در سناریوی ۱ را نشان می‌دهد. بر این اساس پارامتر افت آب‌های زیرزمینی بیشترین تأثیر و پارامتر دبی کمترین تأثیر را بر میزان فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه داشته است. نتایج این تحقیق در زمینه تأثیرگذاری زیاد پارامتر افت آب‌های زیرزمینی بر رخدادهای فرونشست با نتایج تحقیقات Shadfar et al. (2016) و Shemshaki et al. (2006) همخوانی و مطابقت دارد.

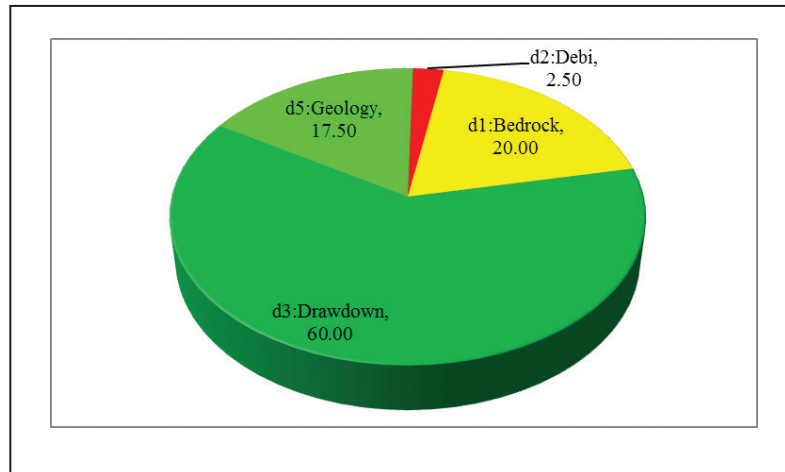
از آنجا که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی به دست آوردن رابطه ریاضی میان



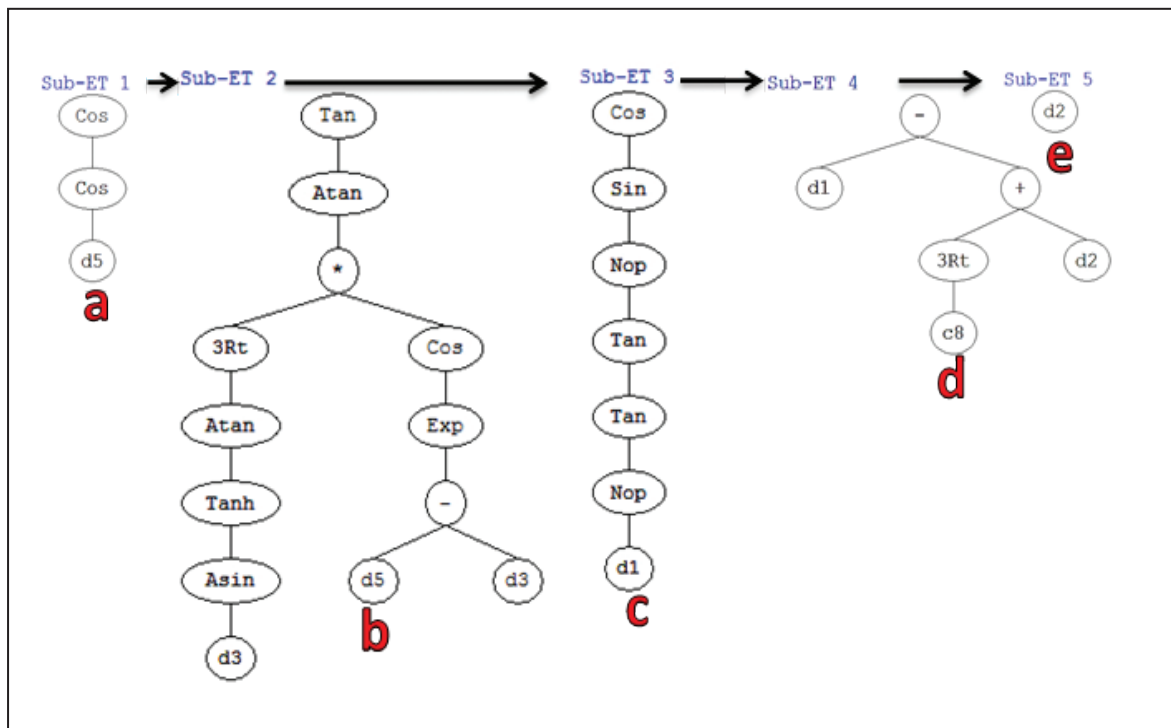
شکل ۱۱- نمودار برازش بهترین سناریو (سناریوی ۱)، مرحله آموزش.



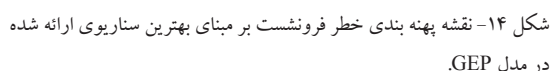
شکل ۱۰- نمودار برازش بهترین سناریو (سناریوی ۱)، مرحله آموزش.



شکل ۱۲- نمودار درصد تأثیر گذاری هر یک از پارامترها در سناریوی ۱.



شکل ۱۳- ساختار مدل خروجی مطلوب به صورت درختی. (a) زیردرخت مربوط به ژن اول. در این زیر درخت ورودی d5 بوجود آمده است و معادله این زیردرخت بصورت: $SUB(ET1) = \cos(\cos(d5))$ ایجاد می شود. (b) زیردرخت مربوط به ژن دوم. در زیردرخت مذکور ورودی های d5 و d3 بوجود آمده و معادله این زیردرخت بصورت: $SUB(ET2) = \tan(\tan(\cos(3Rt) \cdot \cos(\exp(\tanh(\operatorname{asin}(d3)) - d5))))$ ایجاد شده است. (c) زیردرخت مربوط به ژن سوم. در زیردرخت مذکور ورودی d1 بوجود آمده و معادله این زیردرخت بصورت: $SUB(ET3) = \cos(\sin(\operatorname{nop}(\tan(\tan(\operatorname{nop}(d1))))$ ایجاد شده است. (d) زیردرخت مربوط به ژن چهارم. در زیردرخت مذکور ورودی d1 و ثابت c8 بوجود آمده و معادله این زیردرخت بصورت: $SUB(ET4) = -d1 + 3Rt \cdot d2 \cdot c8$ ایجاد شده است. (e) زیردرخت مربوط به ژن پنجم. در زیردرخت مذکور ورودی d2 بوجود آمده و معادله این زیردرخت بصورت: $SUB(ET5) = d2$ ایجاد شده است.



Gene number	The mathematical relation obtained from the model
1	Cos.Cos.d5
2	$\text{Tan.Atan.*.3Rt.Cos.Atan.Exp.Tanh.-.Asin.d5.d3.d3}$
3	$\text{Cos.Sin.Nop.Tan.Tan.Nop.d1}$
4	$-.d1.+3Rt.d2.c8$
	$c8 = 3.78410809656056$
5	$d2$

در این مقاله سعی بر آن شد تا با استفاده از رویکردی جدید، برای اولین بار عملکرد مدل هیبرید برنامه ریزی بیان ژن- منطق فازی جهت برآورد خطر رخداد فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن در آبخوان ورامین با استفاده از داده‌های حاصل از تصاویر رادار مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که براساس مقدار سنجنده‌های آماری در هر دو فاز آموزش و آزمون، سناریوی ۱ با پارامترهای ورودی تراز سنگ بستر، دبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی و عملگرهای $\text{sqrt}, \exp, \ln, ^2, ^3, 3Rt, \sin, \cos, \text{Atan}, \div, \times, +, -$ دارای بالاترین در برآورد خطر رخداد فرونشست زمین بود. همچنین نتایج نشان داد که از بین پارامترهای مورد مطالعه، ۴ پارامتر تراز سنگ بستر، دبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی تأثیر بسزایی در رخداد فرونشست زمین آبخوان ورامین دارند که از میان آنها پارامتر افت سطح آب‌های زیرزمینی، دارای بیشترین تأثیر است. این نتیجه با تحقیقات قبلی انجام شده در این آبخوان در رابطه با تأثیر زیاد افت سطح آب زیرزمینی بر رخداد

References

- Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A. and Safaeian, R., 2018- Prioritization of effective factors in the occurrence of land subsidence and its susceptibility mapping using an SVM model and their different kernel functions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), 4017–4034. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1403-6>.
- Alimohammadi, A., 2009- Provision and preparation of provincial planning plan, Studies of natural and environmental resources, Analysis of the status of geology, mineral resources and soil, Deputy of Planning, Tehran Governorate, Iran.
- Atarzadeh, A. A., Tavana, B. and Abrazi, B., 2014- Quantitative and contamination studies of Varamin aquifer (Groundwater studies). Yekom Consulting Engineering.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. and Kanno, T., 2005- Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), 432-445. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.08.004>.
- Behyari, M., Alizadeh, A. and Mahmoodi, S., 2017- Evaluation of the effect active structures on land subsidence risk using multi-criteria decision models. *Journal of Advanced Applied Geology*, 7(24), 49-56. <https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229>.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Burbey, T. J., 2002- The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525–538. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>.
- Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R. and Garfias, J., 2011- Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34(1), 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>.
- Chanapathi, T., Thatikonda, S., Pandey, V. P. and Shrestha, S., 2019- Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities. *Sustainable Cities and Society*, 44, 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.027>.
- Chen, B., Gong, H., Lei, K., Li, J., Zhou, C., Gao, M., Guan, H. and Lv, W., 2019- Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.003>.
- Chen, Y., Shu, L. and Burbey, T. J., 2013- Composite Subsidence Vulnerability Assessment Based on an Index Model and Index Decomposition Method. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 19(3), 674-698. <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2012.691405>.
- Choi, J. K., Kim, K. D., Lee, S. and Won, J. S., 2010- Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea. *Environmental Earth Sciences*, 59(5), 1009–1022. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0093-6>.
- Ferreira, C., 2001- Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. arXiv preprint cs/0102027. <http://www.gene-expression-programming.com/webpapers/GEP.pdf>.
- Ferreira, C., 2006- Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence. *Studies in Computational Intelligence*, 21. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32849-1>.
- Galloway, D. L. and Burbey, T. J., 2011- Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>.
- Gu, T. and Wang, G., 2010- Application of fuzzy neural networks for predicting seismic subsidence coefficient of loess subgrade, 2010 Sixth International Conference on Natural Computation, pp. 1556-1559. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2010.5583718>.
- Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. C. and Wang, S. J., 2004- Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1), 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006>.
- Hyndman, R. J. and Koehler, A. B., 2006- Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679-688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.
- IIES, 2010- An analysis of source parameters of earthquakes in Tehran region. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. <http://www.iies.ac.ir/en/?s=varamin>.
- Karsli, F., Atasoy, M., Yalcin, A., Reis, S., Demir, O. and Gokceoglu, C., 2009- Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 156, 241. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0481-5>.

- Kim, K., Lee, S. and Oh, H., 2009- Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. *Environmental Geology*, 58(1), 61-70. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1492-9>.
- Lashkaripour, G., Rostami barani, H., Kohandel, A. and Torshizi, H., 2006- Decline in groundwater levels and land subsidence in the kashmar plain, International Conference on Earth sciences, Tehran, Iran. <https://www.researchgate.net/publication/294688542> Decline in groundwater levels and land subsidence in the Kashmar plain
- Lehmann, E.L. and Casella, G., 1998- Theory of point estimation (2nd ed.), Springer-Verlag. New York <https://doi.org/10.1007/b98854>.
- Lixin, Y., Fang, Z., He, X., Shijie, C., Wei, W. and Qiang, Y., 2011- Land subsidence in Tianjin, China. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 62(6), 1151–1161. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0604-5>.
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M. and Gassemi, M., 2013- Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. *Geopersia*, 3(2), 49-62. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2013.36014>.
- Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erban, L. E., Middelkoop, H., Stouthamer, E. and Addink, E. A., 2018- The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. *Science of The Total Environment*, 634, 715-726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.372>.
- Mohebbi Tafreshi, A., Mohebbi Tafreshi, G. and Bijeh Keshavarzi, M. H., 2018- Qualitative zoning of groundwater to assessment suitable drinking water using fuzzy logic spatial modelling via GIS. *Water and Environment Journal*, 32(4), 607-620. <http://dx.doi.org/10.1111/wej.12358>.
- Mokhtari, H. and Espahbod, M., 2009- The Investigation of hydrodynamic parameters potentiality of the Varamin Plan regarding the variation of salinity gradient *Journal of the Earth*, 4(2), 27-47. <https://www.sid.ir/En/Journal/ViewPaper.aspx?ID=202038>.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T., Wetzel, H., Zschau, J. and Arabi, S., 2007- Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), 518-526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x>.
- Mousavi, S. M., Shamsai, A., Naggar, M. H. E. and Khamsehchian, M., 2001- A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 452-464. <https://doi.org/10.1139/101-013>.
- Nakhaei, M., Mohebbi Tafreshi, A. and Mohebbi Tafreshi, G., 2019- Modeling and predicting changes of TDS concentration in Varamin aquifer using GMS software. *Journal of Advanced Applied Geology*, 9(31), 25-37. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.27539>.
- Nejatijahromi, Z., Nassery, H., Hosono, T., Nakhaei, M., Alijani, F. and Okumura, A., 2019- Groundwater nitrate contamination in an area using urban wastewaters for agricultural irrigation under arid climate condition, southeast of Tehran, Iran. *Agricultural Water Management*, 221, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.015>.
- NGOI, 2008- Topography map (1:50000). National Geographic Organization of Iran. <http://www.ngo-org.ir/>
- Oh, H. J. and Lee, S., 2010- Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology*, 115(1), 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.015>.
- Oh, H. J., Syifa, M., Lee, C. W. and Lee, S., 2019- Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Bayesian, Functional, and Meta-Ensemble Machine Learning Models. *Applied Sciences*, 9(6), 1-17. <https://doi.org/10.3390/app9061248>.
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V. and Ochoa, G., 2006- Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 84(3), 143-160. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003>.
- Parhizkar, S., Ajdari, K., Kazemi, G.A. and Emamgholizadeh, S., 2015- Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damghan aquifer by combining GMS and GEP models. *Geopersia*, 5(1), 63-80. <https://doi.org/10.7508/geop.2015.01.007>.
- Park, I., Choi, J., Jin Lee, M. and Lee, S., 2012- Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences*, 48, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.005>.
- Phien-wej, N., Giao, P. H. and Nutalaya, P., 2006- Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4), 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>.
- Putra, D. P. E., Setianto, A., Keokhampui, K. and Fukuoka, H., 2011- Land Subsidence Risk Assessment in Karst Region, Case Study: Rongkop, Gunung Kidul, Yogyakarta-Indonesia *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie-Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.Prof. Dr. Rafiq Azzam.*, RWTH Aachen University, German, pp. 39-50. <https://repository.ugm.ac.id/id/eprint/134971>.
- Rafie, M. and Samimi Namin, F., 2015- Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 655-663. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.021>.

- Raines, G. L., Sawatzky, D. L. and Bonham-Carter, G. F., 2010- New fuzzy logic tools in ArcGIS 10, ArcGIS 10.1. <http://www.esri.com/news/arcuser/0410/files/fuzzylogic.pdf>.
- Rajabi, A. M. and Ghorbani, E., 2016- Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(738), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2753-7>.
- Ranjbar, A. and Ehteshami, M., 2019- Development of an Uncertainty Based Model to Predict Land Subsidence Caused by Groundwater Extraction (Case Study: Tehran Basin). *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 3205–3219. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00837-w>.
- Rezaee, P., 2016- Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. *The Journal of Spatial Planning*, 20(1), 235-251. <http://journals.modares.ac.ir/article-21-4935-en.html>.
- Sadeghi, A., Fonodi, M., Davari, M., Nourozi, M., Zakili, F. and Keihani, A., 2006- One hundred thousandth geology map of Varamin, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (in persian). <https://gsi.ir/fa/map/207/-/%D9%88%D8%B1%D8%A7%D9%85%DB%8C%D9%86>
- SCI, 2019- Population of the country in terms of gender in urban and rural areas. Statistical Center of Iran. <https://www.amar.org.ir/english>.
- SCWMRI, 2010- Erosion, land use and soil maps (1:250000). Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. <https://www.environmental-expert.com/companies/soil-conservation-and-watershed-management-research-institute-scwmi-24937>
- Sentinel-1, 2015- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- Shadfar, S., Nasiri, E., Chitgar, S. and Ahmadi, A., 2016- Hazard zonation of Land subsidence using Analytical Hierarchy Process (AHP) case study (city of Buin Zahra). *Territory*, 12(48), 101-116. http://sarzamin.srbiau.ac.ir/article_9656.html.
- Shemshaki, A., Boulourchi, M. J. and Entezam Soltani, I., 2006- The study of land subsidence in Tehran plain and its casual factors, The 24th Earth Sciences meeting, Geological survey and mineral explorations of Iran. https://www.civilica.com/Paper-GSI24-GSI24_071.html.
- Suh, J., Choi, Y. E., Park, H. D., Yoon, S. H. and Go, W. R., 2013- Subsidence Hazard Assessment at the Samcheok Coalfield, South Korea: A Case Study Using GIS. *Environmental and Engineering Geoscience*, 19(1), 69-83. <https://publons.com/journal/1048/geology>.
- Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., Khosravi, K., Panahi, M., Bin Ahmad, B. and Saro, L., 2018- Land Subsidence Susceptibility Mapping in South Korea Using Machine Learning Algorithms. *Sensors (Basel)*, 18(8), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s18082464>.
- TRWA, 2018- Report of Groundwater Resources Studies in Varamin Area (in Persian). Tehran Regional Water Authority.
- UNESCO, 2018-Proposal for the establishment of the land subsidence international initiative (LaSII). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Hydrological Programme, Paris. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwit4vSPqs3jAhUisaQKHe_NA-kQFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fen.unesco.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fic-xiii_ref_5_land_subsidence.pdf&usg=AOvVaw0_RGemY4ifoJiBQDz7dBnN.
- Wang, G., Qin, L., Li, G. and Chen, L., 2009- Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2414-2421. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.008>.
- Wang, H. W., Lin, C. W., Yang, C. Y., Ding, C. F., Hwang, H. H. and Hsiao, S. C., 2018- Assessment of Land Subsidence and Climate Change Impacts on Inundation Hazard in Southwestern Taiwan. *Irrigation and Drainage*, 67(S1), 26-37. <https://doi.org/10.1002/ird.2206>.
- Yu, H. M., Wu, Y. X., Shen, J. S. and Zhou, A. N., 2018- Assessment of Social-Economic Risk of Chinese Dual Land Use System Using Fuzzy AHP. *Sustainability*, 10(7): 2541. <https://doi.org/10.3390/su10072451>.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy Sets. *Inf. Control.*, 8(353), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Evaluation of Accuracy of Hybrid Model of Gene Expression Planning - Fuzzy Logic in Estimation of Land Subsidence Risk

Gh. Mohebbi Tafreshi^{1*}, M. Nakhaei² and R. Lak³

¹Ph.D. Student, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2019 September 01

Accepted: 2019 October 13

Abstract

Land subsidence is a nonlinear and complex process that data-driven computational intelligence models can model it. In this study, the accuracy and efficiency of hybrid fuzzy logic gene expression planning hybrid model in estimating land subsidence risk and its factors in Varamin aquifer standardized. For this purpose, after selecting and gathering information from 15 factors affecting the subsidence event based on research records in the GIS environment, they were first standardized by fuzzy membership functions and then gene expression programming method was used to integrate the layers. Finally, using seven important statistical benchmarks based on radar image data, the model was validated in 4 different scenarios in input data and operators. The results showed scenario 1 with input parameters of bedrock level, Debi of pumping wells, groundwater drawdown, geology and operators, +, - ×, ÷, sqr, exp, Ln, ^ 2, ^ 3, 3Rt, sin, cos, Atan, is the best model in training and testing. Accordingly, the groundwater drawdown parameter had the highest effect on land subsidence in the study area.

Keywords: Fuzzy logic, Gene Expression Programming (GEP), Geographical Information System (GIS), Land subsidence, Varamin aquifer.

For Persian Version see pages 163 to 176

*Corresponding author: Gh. Mohebbi Tafreshi; E-mail: std_gh.mohebbi@khu.ac.ir