



A Framework to Estimation of Aquifer Subsidence Potential Using Genetic Algorithm

A.A. Nadiri^{1*}, Z. Taheri², Gh. Bazegari³
and Kh. Didehban⁴

Abstract

Land subsidence is often triggered by over abstraction of groundwater due to increased agriculture, industry and domestic demands. This problem is investigated in Shabestar plain formulating a framework to estimate subsidence potentials and the outcome is compared with measured values with the lowest subsidence threshold value of 30 cm. The research put together seven hydrogeological and geological factors affecting land subsidence, which comprised groundwater level decline, aquifer media, recharge, groundwater withdrawal, land use, aquifer thickness, and distance to faults. The resulting maps for vulnerability to subsidence were then validated with results from satellite images. Although the primary results were also acceptable, the Genetic Algorithm (GA) was used to optimize weights and to improve the correlation between calculated indices and their corresponding measured subsidence values. Results confirmed the improvement and further showed that the southern and southeastern areas in Shabestar plain have the most subsidence potentials. As such management plans are essential to meet the local demands and yet to protect the land against subsidence and other adverse impacts.

Keywords: Subsidence Potential, Aquifer, Genetic Algorithm, Weight Optimization, Shabestar Plain.

Received: August 30, 2017

Accepted: December 6, 2017

ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک

عطاله ندیری^{۱*}، زینب طاهری^۲، قدرت برزگری^۳
و خلیل دیده‌بان^۴

چکیده

برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی، مصارف خانگی و غیره از عمده دلایل وقوع فرونشست می‌باشد، که بیشتر آبخوان‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. در این تحقیق یک چارچوب کلی برای بررسی پتانسیل فرونشست در آبخوان‌ها ارائه شده است و ارزیابی آن در دشت شبستر انجام شد که فرونشست‌هایی تا بیش از ۳۰ سانتی‌متر در آن گزارش شده است. در این پژوهش، هفت عامل هیدروژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست، شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته و تلفیق شدند و نقشه آسیب‌پذیری در برابر فرونشست حاصل شد. سپس نتایج حاصل با فرونشست به‌دست آمده از بررسی تصاویر ماهواره‌ای صحت‌سنجی شدند. با وجود قابل قبول بودن نتایج، برای بهبود نتایج حاصل و بهینه‌سازی وزن‌هایی که با نظر کارشناسی به هر یک از عوامل مؤثر بر فرونشست داده شده بود، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که این روش با افزایش ضریب همبستگی بین شاخص فرونشست و فرونشست‌های به‌دست آمده در دشت، توانایی بیشتری در ارزیابی پتانسیل فرونشست دارد. همچنین، مشخص شد که قسمت‌های جنوبی و مرکزی دشت بیشترین پتانسیل فرونشست را دارا هستند، بنابراین برنامه‌های مدیریتی لازم برای جلوگیری از ایجاد و افزایش فرونشست باید اعمال گردد.

کلمات کلیدی: پتانسیل فرونشست، آبخوان، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی وزن، دشت شبستر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۶/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۹/۱۵

1- Associated Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: Nadiri@tabrizu.ac.ir

2- M.Sc. Student in Environmental Geology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

4- M.Sc. Graduate, Department of Remote Sensing and GIS, Tabriz University, Tabriz, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زیست‌محیطی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

و خشک و کم‌باران، بخش عمده‌ای از رفع نیازهای آبی مربوط به بخش‌های صنعتی، کشاورزی، مصارف خانگی و ... متکی به برداشت آب‌های زیرزمینی است. ساز و کار فرونشست در ارتباط با برداشت آب‌های زیرزمینی، طبق رابطه‌ی ترزاقی (رابطه ۱) به خوبی قابل توجیه است. هنگامی که از سفره آب برداشت می‌شود، فشار هیدرولیکی (فشار آب بین حفره‌ای) کاهش و تنش مؤثر بین دانه‌های خاک افزایش می‌یابد و منجر به فرونشست می‌گردد که بسته به مقاومت و سختی دانه‌های خاک و میزان کرنشی که از خود نشان می‌دهند، مقدار نشست رخ داده متفاوت خواهد بود.

$$\sigma_e = \sigma_t - p \quad (1)$$

در این رابطه σ_e تنش مؤثر، σ_t تنش کل و p فشار هیدرولیکی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نزدیک به ششصد دشت در ایران وجود دارد که برآورد می‌شود بیش از نیمی از آن‌ها در معرض وقوع فرونشست هستند (Bijani et al., 2017). از جمله این دشت‌ها می‌توان دشت رفسنجان (Tabatabaee oghda and Mohseni nasab, 2015)، مشهد (Behniafar et al., 2010)، تهران (Ataee and Zamanirpour, 2016)، کبودر آهنگ همدان (Merikhpour et al., 2012) را نام برد. بیشتر تحقیقاتی که انجام شده عموماً به دنبال بدست آوردن مقدار فرونشست در محدوده‌های مطالعاتی است در حالی که فرونشست‌های ایجاد شده در بسیاری از موارد قابل بازگشت نیستند. فرونشست‌های ایجاد شده در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، در بسیاری از موارد غیرقابل برگشت به حالت اولیه بوده که همین امر، ضرورت بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست را در نقاط مختلف دشت، بمنظور جلوگیری از رخداد این پدیده یا کنترل و مدیریت آن، بیش از پیش یادآور می‌شود. بدین منظور، در این پژوهش روشی کاربردی برای بررسی پتانسیل فرونشست در آبخوان‌ها ارائه شده است، که علاوه بر استفاده از تمام پارامترهای مؤثر در فرونشست، از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و تصاویر راداری برای تصحیح وزن‌های این چارچوب عملی ارائه شده، استفاده شده است. دشت شبستر از جمله دشت‌های در معرض خطر فرونشست در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی است. برداشت آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین نیازهای کشاورزی از یک طرف، همچنین کاهش روند بارندگی در سال‌های اخیر و خشکسالی‌های ایجاد شده به‌دنبال آن از طرف دیگر، موجب کاهش سطح آب زیرزمینی تا بیش از ۲۰ متر در برخی نقاط دشت، طی دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴) شده است. این دشت که با بحران فرونشست زمین همراه است، برای بررسی عملکرد چارچوب عملی ارائه شده، انتخاب گردید. به‌طوری‌که با تلفیق هفت عامل هیدروژئولوژیکی و ژئولوژیکی تأثیرگذار بر فرونشست، نقشه پتانسیل فرونشست یا بعبارتی نقشه آسیب‌پذیری نسبت به فرونشست در دشت شبستر به‌دست آمد، سپس به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و بهینه‌سازی وزن‌هایی که با نظر کارشناسی

فرونشست شامل پایین رفتن تدریجی یا ناگهانی سطح زمین، در اثر برداشت مواد جامد و مایع زیرسطحی است که بدلیل فعالیت‌های طبیعی یا انسانی در ابعاد کوچک تا وسیع رخ می‌دهد (Galloway et al., 1999; Anumba and Scott, 2001). 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 ناگهانی رخ داده و در مدت زمان کمتر، اثرات زیانباری از خود به‌جا می‌گذارد (Darini et al., 2007). انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات تکنونیک و خروج گدازه از جمله عوامل طبیعی مؤثر بر فرونشست و ساخت و ساز، برداشت آب‌های زیرزمینی و استخراج منابع زیرزمینی مانند نفت و گاز و زغال‌سنگ از عوامل انسانی تأثیرگذار بر وقوع فرونشست می‌باشند. همانطور که گفته شد، عوامل انسانی اثرات سوء بیشتری نسبت به عوامل طبیعی در وقوع فرونشست دارند که در بین این عوامل، برداشت نفت و گاز می‌توانند به مراتب سهم بیشتری نسبت به برداشت آب زیرزمینی در رخداد این پدیده داشته باشد (Bouwer, 1978). فرونشست به‌عنوان یک مخاطره زیست‌محیطی، به‌دلیل عملکرد آرام و زمان‌بر، تا زمانی که تحت تأثیر نیروهای انسان‌زاد ایجاد نشده باشد، چندان قابل تشخیص نیست و اغلب به‌صورت 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، به‌طوری که علاوه بر خسارات مورفولوژیکی سطحی، خسارات مالی و جانی را نیز برای انسان به‌همراه خواهد داشت. تنش‌های کششی و فشاری در ساختمان‌ها، ایجاد سیلاب در مناطق پایین‌دست نواحی ساحلی، شکسته‌شدن تجهیزات چاه‌های آب در اثر فشرده‌شدن رسوبات، تغییر در طول و زاویه لوله‌ها و تجهیزات انتقال آب و ... از جمله عوارض ناشی از رخداد فرونشست می‌باشند (Poland, 1984). علاوه بر این، محل وقوع فرونشست نیز زمانی که در محل تحت تأثیر سایر مخاطرات زیست‌محیطی قرار گرفته باشد، می‌تواند اثرات فاجعه‌باری بدنبال داشته باشد. بعنوان مثال، رخداد فرونشست در محل دارای پتانسیل وقوع زمین‌لرزه می‌تواند سبب رخداد زمین‌لرزه فاجعه‌باری شود که تا قبل از آن چندان مخرب نبوده است. امروزه برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در بسیاری از شهرهای ایران و جهان بعنوان عامل اصلی ایجاد فرونشست شناخته می‌شود. به عبارتی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بویژه در مناطقی که با رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه‌تحکیم یافته آبرفتی پوشیده شده‌اند سبب بروز فرونشست می‌شود (Poland, 1984). به‌دلیل قرار گرفتن ایران در موقعیت جغرافیایی گرم

اعمال شده بود، از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نهایتاً برای صحت‌سنجی روش‌های مورد استفاده و به‌دست آوردن بهترین نتیجه ممکن، فرونشست‌های رخ داده در منطقه به‌دست آمد و با نتایج حاصل از روش‌های قبلی مقایسه شد.

۲- روش تحقیق

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان آذربایجان شرقی است که در شمال غرب تبریز واقع شده است. وسعت محدوده مطالعاتی حدود ۸۹۳ کیلومتر مربع می‌باشد که از شمال به مرند، از شرق به تبریز، از غرب به تسوج و از جنوب به پهنه‌های نمکی-رسی و دریاچه ارومیه می‌رسد. مرتفع‌ترین نقطه حوضه ۱۸۳۸ متر در قسمت شمالی و پست‌ترین نقطه آن، ۱۲۶۶ متر در قسمت‌های جنوبی دشت قرار دارد. میانگین بارش سالانه در ایستگاه بنیس-شانجان در طول دوره ۱۰ ساله اخیر (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴)، حدود ۳۷۸/۹۱ میلی‌متر و اقلیم منطقه طبق روش آمبرژه، از نوع نیمه‌خشک سرد می‌باشد. رودخانه‌های دریاچه‌های، دره‌چای، تیل‌چای، مشنق، هریس و صوفیان از مهم‌ترین رودخانه‌های دشت شبستر بوده که دارای امتداد شمال‌شرق-جنوب غرب می‌باشند. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوفیزیکی و داده‌های حاصل از حفر چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی، آبخوان دشت شبستر از نوع آبدار آزاد می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی، قدیمی‌ترین سازندهای قابل رؤیت در منطقه که در قسمت‌های شمالی دشت دیده می‌شوند، مربوط به سازند کهر می‌باشند که عموماً تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی کاملاً چین‌خورده و خردشده هستند و رسوبات جدیدتر قسمت‌های جنوبی دشت را پوشش می‌دهند. به‌طور کلی، رسوبات حاشیه شمالی دشت دانه‌درشت بوده و به سمت مرکز و جنوب ریزتر می‌شوند و در جنوب دشت به رسوبات رسی می‌رسند. شکل ۱ موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- ساختار چارچوب پیشنهادی

روش ارائه شده برای بررسی پتانسیل فرونشست در آبخوان‌ها بر اساس روش PCSM^۱ می‌باشد (Sadeghfam et al., 2016a,b; Baghapour et al., 2016; Nadiri et al., 2017a,b,c). عوامل مؤثر بر فرونشست بررسی و لایه‌های مربوطه در محیط ArcGIS تهیه شد که چگونگی آماده‌سازی این لایه‌ها در زیر، به‌طور کامل توضیح داده شده است. سپس نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در دشت شبستر با برهم‌نهی لایه‌ها حاصل گردید. مهم‌ترین پارامتر در این روش‌ها تعیین وزن بهینه می‌باشد که در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک، وزن‌های اعمال شده به هریک از لایه‌ها بهینه‌سازی

شده و در نهایت به‌منظور صحت‌سنجی روش‌ها و نتایج حاصل از آن‌ها، نقشه فرونشست‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های حاصل از تصاویر رادار تهیه گردید. بدین منظور، ابتدا هفت عامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر بر فرونشست شناسایی شدند. سپس به هریک از این پارامترها بر اساس میزان تأثیرشان در وقوع فرونشست بر اساس نظر کارشناسی وزن‌هایی از ۱ تا ۵ تعلق گرفت، به این معنی که مؤثرترین لایه وزن ۵ و کم اهمیت‌ترین لایه وزن ۱ را به خود اختصاص می‌دهد (جدول ۱). همچنین هر پارامتر به زیردسته‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود که به هر دسته بر اساس میزان تأثیرش در وقوع فرونشست رتبه‌ای از ۱ تا ۱۰ تعلق می‌گیرد (جدول ۲). به معنای کم‌اثرترین و ۱۰ مؤثرترین پارامتر در وقوع فرونشست است. در نهایت از مجموع حاصلضرب وزن هر لایه در رتبه‌های آن لایه، میزان شاخص پتانسیل فرونشست در هر نقطه از محدوده حاصل می‌شود.

$$\text{Subsidence Potential Index (SPI)} = \text{GrGw} + \text{ArAw} + \text{RrRw} + \text{PrPw} + \text{LrLw} + \text{TrTw} + \text{FrFw} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا، SPI شاخص پتانسیل فرونشست، G, A, R, P, L, T, F هفت عامل مؤثر بر فرونشست، r رتبه‌های تعلق گرفته به هر دسته و w وزن هر عامل را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱- آماده‌سازی داده‌ها

بمنظور پردازش داده‌ها در محیط ArcGIS، ایجاد لایه‌های رستری مربوط به هریک از هفت عامل مؤثر بر فرونشست برای انجام عملیات تلفیق و ایجاد نقشه آسیب‌پذیری فرونشست امری ضروری است. در این پژوهش، بمنظور آماده‌سازی هر یک از لایه‌های مورد نظر، از منابع اطلاعاتی گوناگونی استفاده شد که در زیر، منابع اطلاعاتی مورد استفاده و نحوه آماده‌سازی هر یک توضیح داده شده است:

افت سطح آب زیرزمینی: به‌منظور تهیه این لایه، اطلاعات مربوط

به پیزومترهای موجود در منطقه در دوره آماری ۱ ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶) از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ شد. اختلاف سطح آب در مهرماه سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به‌دست آمد و همراه با مختصات پیزومترها به صورت فایل اکسل درون محیط ArcGIS وارد شد. مقادیر داده‌ها برای کل منطقه به روش IDW درون‌یابی و سپس لایه رستری بمنظور تلفیق با سایر لایه‌ها ایجاد گردید. این لایه بر اساس جدول ۲ رتبه‌دهی شد و نهایتاً نقشه کلاس‌بندی شده‌ی افت سطح آب زیرزمینی به‌دست آمد (شکل ۲-۲).

میزان تغذیه: به منظور تهیه این لایه، از روش پیسکوپو (Piscopo, 2001) استفاده شد که از تلفیق ۳ لایه شیب، بارندگی و نفوذپذیری خاک میزان تغذیه حاصل شد و براساس جدول ۲ رتبه‌دهی و کلاس‌بندی شد (شکل ۲-۲c). در محدوده مطالعاتی، به علت در دسترس نبودن عوامل مربوط به بیلان منطقه مانند آب‌های نفوذی و خروجی از جریان زیرزمینی، آب برگشتی از کشاورزی و ... از روش پیسکوپو بمنظور محاسبه تغذیه استفاده شد که در صورت وجود اطلاعات کافی و در دست داشتن عوامل بیلان، بهتر است این عوامل در تعیین مقدار تغذیه به کار گرفته شوند.

محیط آبخوان: با استفاده از لاگ‌های زمین‌شناسی مربوط به پیژومترهای موجود در منطقه، نوع رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان شناسایی و به هر کدام رتبه‌هایی داده شد و پس از محاسبه میانگین رتبه‌ها، نوع خاک در هر پیژومتر به دست آمد. سپس این مقادیر برای کل محدوده به روش IDW درون‌یابی و لایه رستری حاصله از آن، طبق جدول ۲ رتبه‌دهی شد. رسوبات ریزدانه، به دلیل تغییر حجم بیشتر در زمان برداشت آب رتبه بیشتر و رسوبات درشت‌دانه، به دلیل تغییرات حجم کم‌تر رتبه کمتری را به خود اختصاص دادند (شکل ۲-۲b).

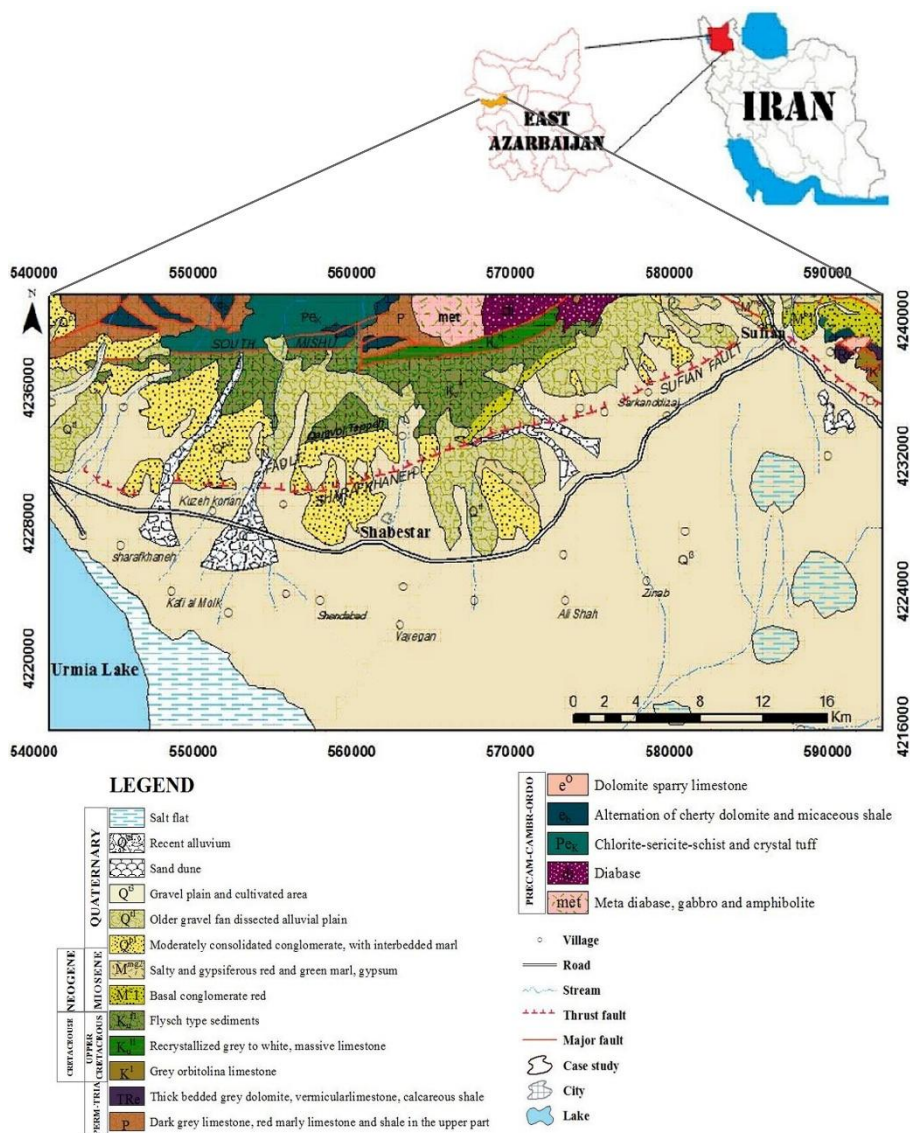


Fig. 1- Location and geological map of the study area (Eftekharijad et al., 2000)

شکل ۱- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

Table 1- Description of seven affective factors on subsidence and their weights**جدول ۱- تعریف هفت عامل مؤثر بر فرونشست و وزن آن‌ها**

Features	Description	Weight
Groundwater level decline	Reduced groundwater level, reduced fluid pressure, increased effective stress; subsidence occurs.	5
Aquifer media	In order to evaluate the aquifer elastic and non-elastic deformations in result of groundwater withdrawal. Clay and silt vary in their ability to volume change when wetted or dried; sand and gravel do not exhibit volumetric changes	5
Recharge	Downward movement of water from earth surface to depth increases the hydraulic pressure and prevents the subsidence.	4
Pumping of groundwater	Withdrawal of groundwater for domestic, industrial and agricultural uses eventually induces a soil strain and subsidence.	4
Land use	Different purposes can induce subsidence; for example, mining with removal of material from below the earth surface, farming with groundwater withdrawal, extraction from resources and etc.	3
Thickness of aquifer	Aquifer height from the surface up to bedrock; the more the thickness the higher the susceptibility to subsidence.	2
Distance to faults	One of the natural factors affecting the subsidence is tectonic movements. Faults with displacement of fine-grained and coarse-grained materials in gaps exacerbate the phenomenon of subsidence.	1

فاصله از گسل: به منظور بدست آوردن فاصله از گسل برای هر نقطه از دشت، دستور Euclidean distance استفاده شد و نقشه حاصل بر اساس جدول ۲ رتبه‌دهی شد. نقاط نزدیک به گسل رتبه بیشتر و نقاط دورتر رتبه کمتری را به خود اختصاص دادند (شکل ۲-۲g). پارامترهای استفاده شده در تعیین پتانسیل فرونشست در آبخوان آزاد شبستر مؤثر تشخیص داده شده است. ولی با توجه به ذات چارچوب‌های عملی که روشی تجربی است، در بررسی این معیارها در آبخوان‌های دیگر مانند آبخوان‌های تحت فشار و نشتی بایستی پارامترهای مؤثر ارزیابی شود و شاید برخی پارامترها به این چارچوب اضافه یا برخی حذف گردند.

۲-۳- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکاملی داروین است که بعنوان تابع بهینه‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد و اولین بار توسط جان هالند در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. این الگوریتم نقش مهمی در مطالعه سیستم‌های انطباقی پیچیده ایفا می‌کند (Holland, 1975)، به این صورت که بر روی جمعیتی از جواب‌های بالقوه عمل کرده و با بکارگیری بقای برتر، تقریب بهتری از حل مورد نظر را ارائه می‌دهد. این الگوریتم با جمعیتی از فرزندان اولیه بعنوان نسل اول، تولید نسل‌های جدید را از پیوند افراد نسل اول انجام می‌دهد. بدین منظور فرزندان اولیه که اکنون بعنوان والد شناخته می‌شوند، با روش‌هایی انتخاب می‌شوند تا از تلاقی آنها بوسیله اپراتور پیوند و جهش، فرزندان جدید تولید شوند. فرزندان تولیدشده بوسیله یکی از روش‌های موجود انتخاب می‌شوند تا نسل جدید را تولید کنند.

میزان پمپاژ: برای تهیه این لایه، میزان برداشت سالانه چاه‌های موجود در منطقه به همراه مختصات آن‌ها به صورت فایل اکسل درون محیط ArcGIS وارد شد. سپس با استفاده از روش پلیگون تیسس مقدار تخلیه برای هر چاه مشخص و برای کل منطقه درون‌یابی شد و لایه رستری حاصل از آن ایجاد گردید. لایه حاصله بر اساس جدول ۲ رتبه‌دهی شد. هرچا میزان پمپاژ بیشتر باشد رتبه بیشتری می‌گیرد و بالعکس (شکل ۲-۲d).

کاربری اراضی: کاربری‌های مختلف بر اساس میزان تأثیر در وقوع فرونشست بر اساس جدول ۲ رتبه‌های مختلفی گرفتند. کشاورزی به دلیل برداشت آب‌های زیرزمینی بمنظور آبیاری محصولات بیشترین رتبه را به خود اختصاص داد و مناطق شهری و مراتع به ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. سپس با تبدیل لایه رستری به پلی‌گون، نقشه کلاس‌بندی شده کاربری اراضی منطقه ایجاد شد (شکل ۲-۲e).

ضخامت آبخوان: برای تهیه این لایه، از ضخامت آبخوان در نقاط مختلف دشت که توسط موسوی در سال ۲۰۰۷ (Mousavi, 2007) با استفاده از مقاطع ژئوالکتریکی اندازه‌گیری شده بود، استفاده گردید. پس از درون‌یابی و به‌دست آوردن لایه رستری مربوطه، رتبه‌دهی بر اساس جدول ۲ صورت گرفت و نقشه نهایی ضخامت منطقه حاصل شد (شکل ۲-۲f).

Table 2- Rates of practical frameworks parameters

جدول ۲- رتبه‌های پارامترهای چارچوب عملی

Groundwater level decline (m/year)		Aquifer media		Recharge (cm/year)	
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate
0-0.2	1	Clay	10	0-4	10
0.2-0.5	2	Clay + Silt	9	4-9	9
0.5-0.9	3	Clay + Gravel	8	9-14	7
0.9-1.4	4	Silt + Sand	5		
1.4-2	5	Sand	4		
2-2.7	6	Gravel	3		
2.7-3.5	7	Rubble	2		
3.5-4.4	8				
4.4-5.4	9				
5.4<	10				
Pumping of groundwater (cm/year)		Land use		Thickness of aquifer (m)	
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate
0.01-0.5	4	Agriculture	9	0-25	1
0.5-1	5	Urban	5	25-55	2
1-5	6	Grassland	1	55-90	3
5-20	7			90-130	4
20-40	8			130-175	5
40<	9			175 <	6
Distance to faults (km)					
Range	Rate				
0-1	10				
1-2	8				
2-3	6				
3-4	4				
4-5	2				
5 <	1				

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

$$1 \leq w_i \leq 5 \quad (4)$$

در روابط بالا r تابع هدف مدل بهینه‌سازی، n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده، X_j شاخص آسیب‌پذیری مربوط به نقطه j ام، \bar{X} میانگین شاخص‌های آسیب‌پذیری، Y_j مقدار فرونشست در نقطه j ام، \bar{Y} میانگین مقدار فرونشست و w_i وزن‌های اعمال شده به هر پارامتر را نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک نیاز به تعیین مقدار بهینه چهار عملگر الگوریتم ژنتیک شامل برازندگی یا تناسب (Fitness)، انتخاب (Selection)، ترکیب یا ادغام (Crossover) و جهش (Mutation) می‌باشد که باید مقدار بهینه آنها تعیین شود (Nadiri et al., 2013; Tayfur et al., 2014; Nadiri, 2015; Habibi et al., 2016)

نسل‌های جدید تولید شده تطابق بیشتری داشته و این روند تا تکامل الگوریتم ژنتیک که بوسیله یک شرط توقف بررسی می‌شود، ادامه می‌یابد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک، بمنظور بهینه‌سازی وزن‌های اختصاص داده شده به عوامل مؤثر بر فرونشست، برای بهبود نتایج حاصل استفاده شده است. متغیرهای ورودی تصمیم مسأله شامل هفت وزن داده شده به هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست می‌باشد که به‌عنوان جمعیت اولیه به مدل بهینه‌سازی وارد می‌شوند و تابع هدف، حداکثرسازی ضریب همبستگی پیرسون (رابطه ۳) بین فرونشست‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه و شاخص پتانسیل فرونشست حاصل از تلفیق لایه‌ها می‌باشد. همچنین قیود استفاده شده در رابطه (۴) نشان داده شده است. زمانی که توابع هدف در تکرار متوالی یکسان باشند، به این معنی که تغییر و یا بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود، مدل بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

۲-۴- صحت‌سنجی نتایج با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق از پردازش تصاویر راداری (INSAR) ماهواره سنتینل ۱ برای زمان‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ استفاده شد که از مقایسه این دو تصویر با بازه یکساله، میزان فرونشست آبخوان شبستر به دست آمد تا بتوان به وسیله این داده‌ها، چارچوب کلی ارائه شده برای آبخوان دشت شبستر را ارزیابی کرد. ماهواره سنتینل ۱ به صورت شبانه‌روزی با استفاده از باندهای C به تصویربرداری از سیاره زمین می‌پردازد. این ماهواره به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند برای مطالعه پدیده‌های مختلف سطح زمین در بازه زمانی طولانی‌مدت مورد استفاده قرار بگیرد. ماهواره سنتینل ۱، نخستین ماهواره از سری ماهواره‌های پنج‌گانه کوپرنیکوس سازمان فضایی اروپا است که با ۴ حالت تصویربرداری از توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر برخوردار است. داده‌های این ماهواره به صورت دو قطبشی و با توان تفکیک زمانی بالا است. ماهواره سنتینل ۱ ادامه‌دهنده راه سایر ماهواره‌های راداری که در باندهای C تصویربرداری می‌نمایند (ERS-1, ERS-2, ENVISAT, RADARSAT-1, RADARSAT-2) است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج حاصل از هم‌پوشانی داده‌ها

پس از آماده‌سازی و پردازش داده‌ها درون ArcGIS، هفت لایه کلاس‌بندی شده مربوط به عوامل مؤثر بر فرونشست ایجاد شد (شکل ۲). این لایه‌ها بر اساس جدول ۱ وزن دهی و تلفیق شدند و نهایتاً نقشه مناطق مستعد فرونشست دشت شبستر حاصل گردید و شاخص فرونشست برای کل دشت بین ۸۱ و ۱۸۰ برآورد شد (شکل ۳). آسیب‌پذیری دشت به ۴ دسته خیلی کم (۱۰۵-۸۱)، کم (۱۰۵-۱۳۰)، متوسط (۱۳۰-۱۵۵) و زیاد (۱۵۵-۱۸۰) تقسیم‌بندی شد که ۴۵٪ از دشت در محدوده آسیب‌پذیری متوسط، ۳۲٪ در محدوده آسیب‌پذیری کم، ۱۹/۵۳٪ در محدوده زیاد و ۳/۴۷٪ در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل مشخص است، بخش‌های جنوبی و مرکزی دشت بیشترین پتانسیل فرونشست را دارا هستند.

۳-۲- نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک

به منظور تدقیق وزن‌های استفاده شده در چارچوب عملی ارائه شده، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. این الگوریتم بهینه‌سازی برای افزایش مقدار همبستگی بین مقادیر فرونشست نرمال‌شده و مقادیر نرمال‌شده پتانسیل فرونشست با بهینه‌سازی وزن‌ها استفاده شد. همبستگی پیرسون بین شاخص پتانسیل فرونشست و فرونشست داده‌های راداری بعنوان تابع هدف انتخاب و اجرا شد. در این مرحله با

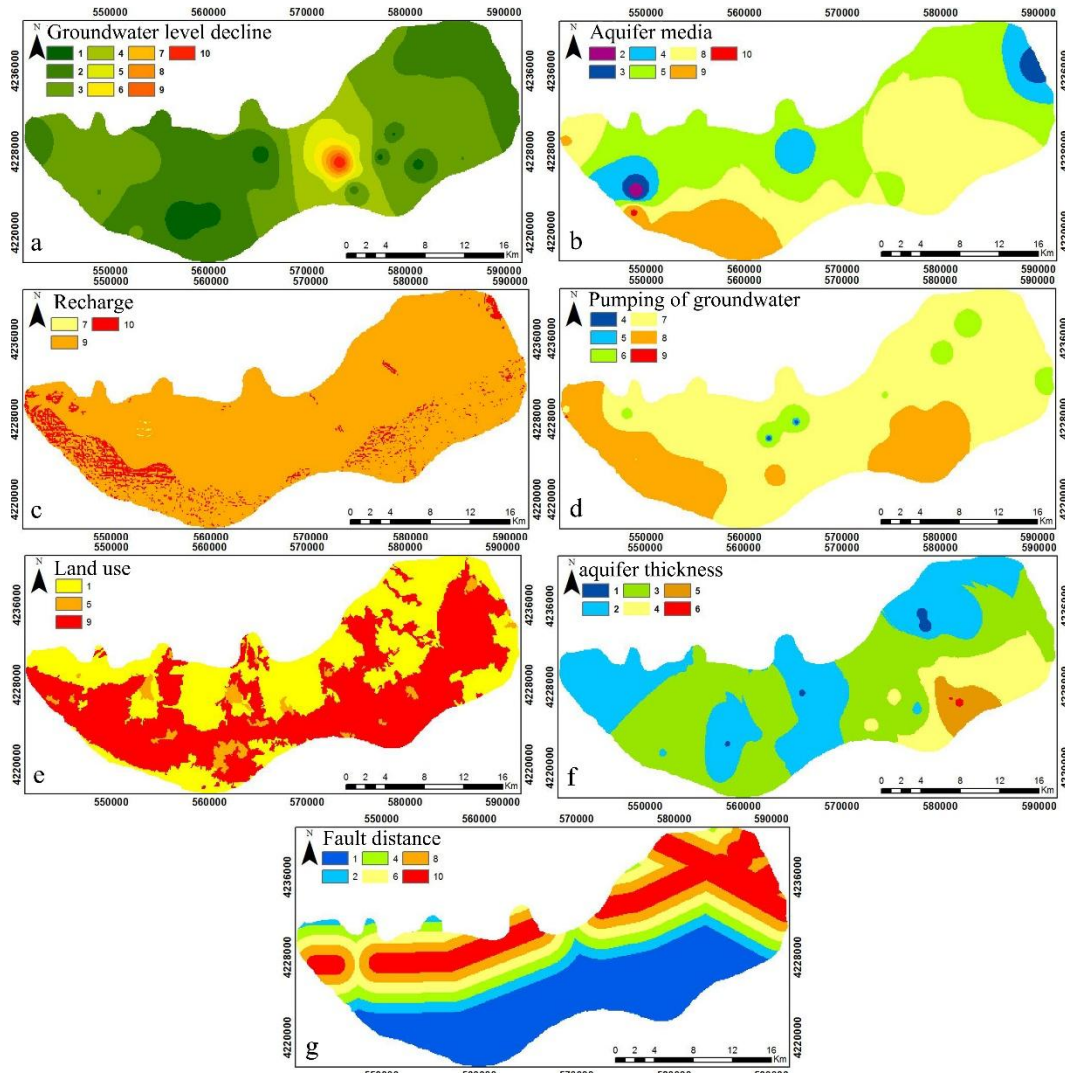
استفاده از تابع هدف (رابطه ۳) و قید (رابطه ۴) مقادیر وزن‌های هر لایه بهینه شدند. پارامترهای بهینه برای این الگوریتم برای انجام بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB با استفاده از آزمون و خطا تعیین گردید به احتمال جهش ۰/۸ و جمعیت اولیه ۱۵۰ تعیین شد و تابع جهش گوسین و پارامتر کنترل آن ۱ در نظر گرفته شد. شکل ۴ نقشه آسیب‌پذیری دشت شبستر با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. جدول ۳ وزن‌های بهینه‌شده حاصل از روش الگوریتم ژنتیک و وزن‌های اولیه اعمال شده و همچنین ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص فرونشست و مقادیر فرونشست‌های رخ داده در محیط، قبل و بعد از بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، مقادیر وزن‌های بدست آمده از این روش بین ۱ تا ۵ می‌باشند. بیشترین وزن‌ها مربوط به میزان پمپاژ و میزان تغذیه می‌باشد که قبل از بهینه‌سازی وزن ۴ را به خود اختصاص داده بودند و پس از بهینه‌سازی وزن آن‌ها تا ۵ افزایش یافت. این موضوع نشان از اهمیت این دو پارامتر در میزان فرونشست دارد. همچنین ۴ پارامتر دیگر شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، کاربری اراضی و ضخامت آبخوان بعد از بهینه‌شدن، مقادیر وزن‌هایشان کاهش پیدا کرده است که نشان از اهمیت پایین‌تر آنها نسبت به مقدار پیش‌فرض قبلی است و وزن پارامتر فاصله از گسل نیز بعد از بهینه‌سازی بدون تغییر باقی مانده است. همانطور که مشخص است، پس از بهینه‌سازی ضریب همبستگی از ۰/۱۸ به ۰/۴ افزایش پیدا کرده است که این امر، دلیلی بر قابل قبول بودن روش ارائه شده می‌باشد. در این روش، شاخص آسیب‌پذیری فرونشست بین ۷۰ تا ۱۱۴ به دست آمد که به ۴ دسته خیلی کم (۷۰-۸۱)، کم (۸۱-۹۲)، متوسط (۹۲-۱۰۳) و زیاد (۱۰۳-۱۱۴) تقسیم‌بندی شد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بیشترین پتانسیل فرونشست در بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی دشت مشاهده می‌شود. در این روش، ۶۰ درصد از محدوده مطالعاتی در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرد.

۳-۳- نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری

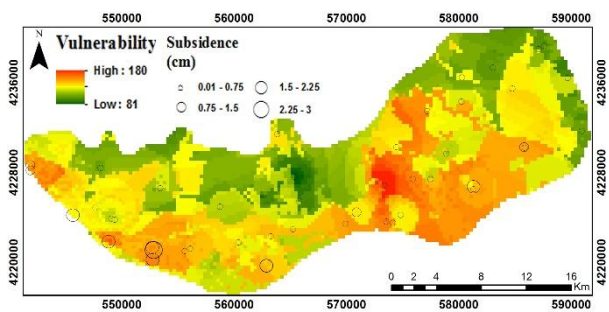
تصاویر راداری با توجه به محدوده طیفی دارای کاربردها و قابلیت‌هایی هستند که از توانایی تصاویر اپتیکال خارج می‌باشد. از جمله کاربردهای تصاویر راداری می‌توان به برآورد جابجایی سطح زمین در اثر زمین‌لرزه، فرونشینی زمین، زمین‌لغزش‌ها و غیره اشاره کرد. بدین منظور دو تصویر راداری سنتینل ۱ با بازه یکساله استفاده شد. ابتدا آماده‌سازی تصاویر (Coregistration) برای تولید تصاویر Slav و Master انجام شد و سپس عملیات Interferometry برای تولید تداخل‌سنجی فازها صورت گرفت و همچنین اثر توپوگرافی حذف گردید. در مرحله بعد اعمال فیلتر بر روی تصویر فازی صورت گرفت و تصاویر به محیط

تبدیل و تبدیل فازی به ارتفاع و جابجایی و تعریف سیستم مختصات انجام گرفت و شکل ۵ حاصل شد.

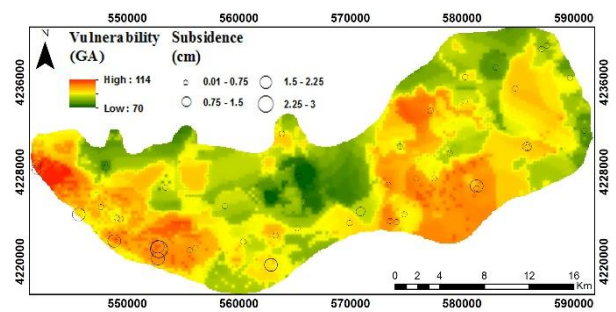
شبیه‌سازی سیستم عامل لینوکس معرفی شد. در نهایت تصویر حاصل در محیط لینوکس به تصویر قابل اجرا در محیط Sentinel Toolbox



شکل ۲- نقشه‌های کلاس‌بندی شده عوامل مؤثر بر فرونشست



شکل ۴- نقشه آسیب‌پذیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک



شکل ۳- نقشه آسیب‌پذیری دشت شبستر

Table 3- Weights of affecting factors on subsidence and the Pearson correlation coefficient

Method	Groundwater level decline	Aquifer media	Recharge	Pumping of groundwater	Land use	Thickness of aquifer	Distance to fault	Correlation coefficient
Weights by expert judgment	5	5	4	4	3	2	1	0.18
Weights obtained from GA	1	2	5	5	1	1	1	0.4

صحت‌سنجی روش‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، از شاخص همبستگی (CI) بین روش‌های ذکر شده و مقدار فرونشست رخ داده در محیط استفاده شد. برای محاسبه CI ابتدا مقدار فرونشست رخ داده در محل پیژومترها استخراج و به چهار گروه فرونشست خیلی کم، کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی شد و سپس بر روی نقشه‌های حاصل از مدل‌های استفاده شده انطباق داده شد. تعداد پیژومترهایی که مقدار فرونشست در آن‌ها دارای ارزش یکسانی با گروه‌های نقشه‌های آسیب‌پذیری است در ۴ ضرب شدند. تعداد پیژومترهایی که مقدار فرونشست در آن‌ها با گروه‌های حاصل از نقشه‌ها دارای اختلاف ۱ هستند در ۳ و به همین ترتیب تعداد پیژومترهای دارای اختلاف ۲ و ۳ با نقشه‌های آسیب‌پذیری، به ترتیب در ۲ و ۱ ضرب شدند. در نهایت از جمع مقادیر حاصل مقدار CI بدست آمد که نشان‌دهنده میزان همبستگی بین مقدار فرونشست رخ داده در محیط و مدل‌های استفاده شده است. هرچه میزان CI بیشتر باشد، همبستگی بیشتری وجود دارد (Fijani et al., 2013). انطباق پیژومترها و گروه‌های آسیب‌پذیری حاصل از چارچوب پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این انطباق نشان می‌دهد که مدل GA با بهینه‌سازی وزن‌ها در مقایسه با مدل چارچوب پیشنهادی نتایج بهتری به دست می‌دهد و دارای CI بیشتری است.

بر اساس نتایج حاصل از روش‌های بکار گرفته شده در این تحقیق در برآورد میزان فرونشست، بیشترین فرونشست‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه در بخش‌های جنوبی و مرکزی دشت مشاهده می‌شوند. همانطور که گفته شد، افت سطح آب زیرزمینی از عمده عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست می‌باشد. براساس اطلاعات بدست‌آمده، بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در دهه گذشته در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی دشت رخ داده است که مقدار آن تا بیش از ۲۴ متر می‌رسد. در دشت شبستر هر چه از طرف شمال دشت به طرف بخش‌های جنوبی پیش می‌رویم اندازه رسوبات کاهش یافته و در نهایت به رسوبات رسی می‌رسیم که تأثیر بسزایی در وقوع فرونشست دارند.

برای اعتبارسنجی با استفاده از روش بولین ابتدا جابجایی حاصل از تصویر راداری را به دو بخش صفر و یک طبقه‌بندی کرده بطوریکه عدد یک مناطق دارای نشست و عدد صفر مناطق بدون نشست را نشان می‌دهد. سپس چاه‌های پیژومتری دارای نشست و بدون نشست، که مقدار نشست در آن‌ها با برداشت‌های صحرائی و بر حسب سانتی‌متر حاصل شده بود را با نقشه جابجایی انطباق داده که میزان انطباق هریک از چاه‌های بدون نشست و دارای نشست به ترتیب ۶۲ و ۵۹ درصد برآورد گردید. میزان انطباق به دست‌آمده به دلیل محدودیت‌های موجود از جمله عدم نصب GPS‌های دقیق برای برآورد میزان فرونشست در منطقه مطالعاتی و تقریبی بودن نقاط برداشت صحرائی، قابل قبول بود. به دلیل اینکه هدف این تحقیق، تعیین مقدار پتانسیل فرونشست به جای مقدار آن است، لذا پس از نرمال شدن فرونشست به دست‌آمده از تصاویر راداری این مقادیر برای تدقیق چارچوب استفاده شد.

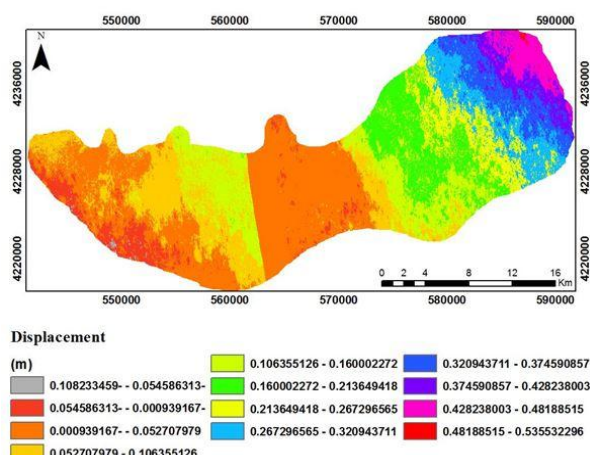


Fig. 5- Subsidence map obtained from InSAR
شکل ۵- نقشه فرونشست حاصل از تداخل‌سنجی راداری

۳-۴- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های استفاده شده برای بررسی پتانسیل فرونشست

پس از تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری با استفاده از چارچوب پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک، میزان فرونشست حاصل از تصاویر راداری برای

Table 4- Coincidence of piezometers with subsidence on vulnerability maps**جدول ۴- انطباق پیزومترهای دارای فرونشست با نقشه‌های آسیب‌پذیری**

	Subsidence			
	Very Low	Low	Moderate	High
GA (CI=123)				
Very Low	3	11	20	1
Low	0	0	4	0
Moderate	0	1	4	1
High	0	0	1	0
Suggested framework (CI=115)				
Very Low	1	10	21	3
Low	0	1	1	2
Moderate	0	0	3	3
High	0	0	0	1

زیرزمینی بمنظور تأمین نیازهای آبی، سطح زمین را در این منطقه در معرض خطر فرونشست قرار می‌دهد. بنابراین بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست در این دشت، بمنظور کاهش یا مدیریت اثرات آن امری ضروری است. هفت پارامتر افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، میزان تغذیه، میزان پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل، با نظر کارشناسی رتبه‌دهی و وزن‌دهی شدند و از تلفیق آنها در محیط ArcGIS نقشه آسیب‌پذیری دشت شبستر با شاخص بین ۸۱ تا ۱۸۰ حاصل شد. سپس روش الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده و رفع خطای ناشی از نظرات کارشناسی به‌کار گرفته شد. پس از آماده‌سازی نقشه‌های آسیب‌پذیری حاصل از هر دو روش مذکور، به‌منظور صحت‌سنجی و مقایسه این روش‌ها، مقدار فرونشست رخ داده در محدوده مورد مطالعه توسط تصاویر ماهواره‌ای حاصل شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که روش الگوریتم ژنتیک به‌دلیل افزایش مقدار همبستگی بین مقادیر فرونشست نرمال شده و مقادیر نرمال شده پتانسیل فرونشست، بهتر از روش تلفیق داده‌ها، آسیب‌پذیری منطقه را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل نواحی جنوبی و مرکزی دشت بیشتر در معرض خطر فرونشست قرار دارند و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل و حفاظت آنها اعمال شود. چارچوب ارائه شده در این پژوهش دارای عدم قطعیت در وزن‌های ارائه شده می‌باشد لذا برای تعیین رابطه منطقی و صحیح بین پارامترهای مؤثر بر فرونشست، توصیه می‌شود از روش‌های مختلف هوش مصنوعی نیز در تحقیقات آتی استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Point Count System Models

همانطور که گفته شد، قسمت‌های شمالی دارای رسوبات درشت‌دانه هستند که تأثیر عمده‌ای در مقدار تغذیه و ورودی آب به آبخوان در این نواحی دارند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مناطق دارای مقدار تغذیه کم‌تر در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی دشت که اغلب شامل رسوبات ریزدانه هستند، قرار گرفته‌اند و منطبق بر نواحی دارای پتانسیل زیاد فرونشست در شکل ۳ می‌باشند. علاوه بر این، در نواحی شمالی مقدار پمپاژ نسبت به مقدار پمپاژ در نواحی جنوبی به مراتب کمتر بوده که همین امر را می‌توان یکی از دلایل رخداد فرونشست بیشتر در نواحی جنوبی و مقدار کمتر آن در نواحی شمالی دشت دانست. بخش عمده‌ی دشت مورد مطالعه تحت کاربری کشاورزی است که با برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین آب مورد نیاز محصولات، نقش بسزایی در وقوع فرونشست دارد و عمدتاً این کاربری در نواحی مرکزی و جنوبی دشت دیده می‌شود. بیشترین ضخامت آبخوان در جنوب‌شرقی دشت و در نواحی جنوبی وجود دارد که منطبق بر منطقه دارای پتانسیل زیاد فرونشست می‌باشد. از بین عوامل ذکر شده به‌عنوان عوامل مؤثر بر فرونشست، عامل فاصله از گسل طبق شکل ۳ کم‌ترین تأثیر را بر وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه داشته است.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

هدف از انجام این پژوهش، بررسی پتانسیل فرونشست در دشت شبستر با به‌کارگیری ۷ پارامتر هیدروژئولوژیکی و ژئولوژیکی مؤثر بر آن در قالب یک چارچوب پیشنهادی و سپس بهینه‌سازی وزن‌های داده شده به هر پارامتر با روش الگوریتم ژنتیک به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر بوده است. دشت شبستر از دشت‌های مهم استان آذربایجان شرقی با کاربری عمده کشاورزی است که برداشت از آب‌های

- Holland J (1975) Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. University of Michigan Press
- Merikhpour M, Mousavi M, Safarikomeil M (2012) Investigation of land subsidence and sinkholes due to groundwater level decline in Hamedan-Kaboodar Ahang Plain. National Conference on Water and Wastewater Engineering and Sciences, Graduate University of Advanced Technology, 26-27 February, Kerman, Iran (In Persian)
- Nadiri AA (2015) Application of Artificial Intelligence methods in geosciences and hydrology. OMICS GROUP Publication
- Nadiri AA, Fijani E, Tsai FTC, Moghaddam AA (2013) Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. Journal of Hydroinformatics 15(4):1474-1490
- Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Asghari Moghaddam A (2017c) Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. Environmental Science and Pollution Research 24(9):8562-8577
- Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Asghari Moghaddam A (2017a) Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). Science of the Total Environment 574:691-706
- Nadiri AA, Sedghi Z, Khatibi R, Gharekhani M (2017b) Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. Science of the Total Environment 593-594, 75-90
- Piscopo G (2001) Groundwater vulnerability map. Explanatory notes Castlereagh Catchment, NSW Centre for Natural Resources, NSW Department of Land and Water Conservation, Parramatta
- Poland JF (1984) Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, Studies and Reports in Hydrology 40:305
- Sadeghfam S, Hassanzadeh Y, Nadiri AA, Khatibi R (2016a) Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. Environmental Earth Sciences 75(7):545
- Sadeghfam S, Hassanzadeh Y, Nadiri AA, Zarghami M (2016b) Localization of groundwater vulnerability assessment using catastrophe theory. Water Resources Management 30(13):4585-4601
- Anumba CJ, Scot DT (2001) Performance evaluation of a knowledge-based system for subsidence management. Journal of Structural Survey 19(5):222-232
- Ataee H, Zamanipour F (2016) Investigation of Tehran plain land subsidence. 2nd National Congress on the Development and Promotion of Iranian Agricultural Engineering and Soil Science, Promotion of Science and Technology, 16 June, Tehran, Iran (In Persian)
- Baghapour MA, Nobandegani AF, Talebbeydokhti N, Bagherzadeh S, Nadiri AA, Gharakhnai M, Chitsazan N (2016) Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability. Journal of Environmental Health Science and Engineering 14(1):13
- Behniafar A, Ghanbarzadeh H, Eshraghi A (2010) Investigation of effective factors on erosion of Mashhad Plains and its consequences in its geomorphic. Journal of Chashmandaz-e-zagros Geographic Quarterly 5(2):131-146 (In Persian)
- Bijani M, Moridi A, Majdzadeh Tabatabaie, MR (2017) Investigation of well deepening effects on aquifer yield using numerical model. Iran-Water Resources Research 12(4):83-92 (In Persian)
- Bouwer H (1978) Groundwater hydrology. McGraw-Hill, 572p
- Darini G (2007) Land subsidence due to groundwater withdrawal: the case of Bologna. PhD Thesis, University of Cassino and Southern Lazio
- Eftekharnjad J, Gharashi M, Mehrparto M, Arshadi S, Zohrehbakhsh A (2000) Geological map of Tabriz-Poldasht (1:250000), Geological Survey & Mineral Exploration of Iran
- Fijani E, Nadiri AA, Asghari Moghaddam A, Tsai F, Dixon B (2013) Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. Journal of Hydrology 503:89-10
- Galloway D, Jones D, Ingebritsen SE (1999) Land subsidence in the United State. US Geological Survey, Circular 1182
- Habibi MH, Nadiri AA, Asghari Moghaddam, A (2016) Spatio-temporal groundwater level prediction using hybrid genetic-Kriging model (Case study: Hadishahr Plain). Iran-Water Resources Research 11(3):85-99 (In Persian)

Tayfur G, Nadiri AA, Moghaddam AA (2014) Supervised intelligent committee machine method for hydraulic conductivity estimation. Water Resources Management 28(4):1173-1184

Tabatabaee Oghda ST, Mohseni Nasab H (2015) Land subsidence in Rafsanjan plain due to groundwater level decline. 2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 14-15 October, Qom University of Technology, Iran (In Persian)