

## بررسی پتانسیل فرونشست دشت ورامین با روش وزن‌دهی ساده و بهینه‌سازی وزن‌دهی عوامل موثر در فرونشست با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی

مرضیه سادات هل‌آثائی<sup>۱</sup>، ماشاله خامه‌چیان\*<sup>۲</sup>، معصومه آمیغ‌پی<sup>۳</sup>، علی منافی آذر<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

### چکیده

در پژوهش حاضر پتانسیل فرونشست زمین در دشت ورامین با به کارگیری روش‌های وزن‌دهی ساده و تحلیل سلسله مراتبی بررسی شده است. به این منظور هفت پارامتر موثر، جنس آبخوان، کاربری زمین، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت و از تلفیق این پارامترها در محیط ArcGIS نقشه پتانسیل فرونشست دشت با شاخص بین ۷۹ تا ۱۷۹ به دست آمد. سپس، به منظور بهینه‌سازی و تطابق بیشتر، وزن هفت لایه موثر بر فرونشست با استفاده از روش AHP بهینه‌سازی شد و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست (شاخص بین ۸۵/۴ تا ۱۹۱/۲) تهیه شد. میزان پتانسیل فرونشست دشت ورامین با تلفیق لایه‌ها در محیط ArcGIS طی سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰) به دست آمد و برای صحت‌سنجی این روش از نقشه ماهواره‌ای InSAR استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد همبستگی روش AHP نسبت به روش وزن‌دهی ساده بالاتر است. همبستگی بین پتانسیل فرونشست و فرونشست حاصل از نقشه ماهواره‌ای برای روش‌های وزن‌دهی ساده و AHP به ترتیب برابر ۰/۵۳ و ۰/۶۵ است. بر اساس این روش، نواحی شمال‌غربی، جنوب و جنوب‌غربی دشت در معرض فرونشست بیشتری قرار دارند و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل فرونشست و مدیریت منابع آب زیرزمینی در این نواحی اعمال شود.

**کلید واژه‌ها:** پتانسیل فرونشست، دشت ورامین، مدل وزن‌دهی، تصاویر ماهواره‌ای InSAR

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران [m.halataei@modares.ac.ir](mailto:m.halataei@modares.ac.ir)

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران [khamechm@modares.ac.ir](mailto:khamechm@modares.ac.ir)

۳. رییس اداره ترازیابی دقیق و تداخل‌سنجی راداری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران

۴- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران [ali.manafiazar@modares.ac.ir](mailto:ali.manafiazar@modares.ac.ir)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست ناگهانی یا تدریجی رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند با اندکی جابجایی افقی همراه باشد (Bates and Jackson, 1980). فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی و انسانی باشد. عوامل طبیعی شامل انحلال تشکیلات زیرسطحی، ذوب یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته زمین است. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری و برداشت آب زیرزمینی یا نفت نیز می‌توانند به این پدیده منجر شوند (Wang et al., 2009). به‌طور کلی، عوامل مختلفی بر فرونشست زمین تأثیر می‌گذارند، اما در بسیاری از مناطق، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی عامل اصلی فرونشست زمین به شمار می‌رود (Galloway et al., 1999).

فرونشست زمین در دهه‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (Bagheri-Gavkosh et al., 2021). این پدیده در طی سال‌های اخیر در کشور ایران به علت برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، خشکسالی، رشد سریع جمعیت، افزایش سطح زیر کشت آبی و افزایش تعداد چاه‌های بهره‌وری پدیدار شده و سبب آسیب‌های جدی به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، جاده‌ها و دیگر سازندها و بروز خسارت‌های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی شده است (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵؛ قهرودی تالی و همکاران، ۱۴۰۲).

روش‌های متعددی برای ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین وجود دارد. یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین این روش‌ها روش وزن‌دهی ساده است. روش وزن‌دهی ساده یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد (Hwang and Yoon, 1981). روش وزن‌دهی ساده را می‌توان ساده‌ترین و مستقیم‌ترین روش مواجهه با مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره در نظر گرفت. در این روش جهت تصمیم‌گیری، تنها به ماتریس تصمیم‌گیری و بردار وزن شاخص‌های ارزیابی نیاز می‌باشد (Hidayat et al., 2017; Muslihudin and Gurmanti, 2017; )

(Muslihudin et al., 2017). مطالعات متعددی در زمینه روش‌های وزن‌دهی ساده و ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین انجام شده است که می‌توان به مقدم و همکاران (۱۳۹۹)، منافی آذر و همکاران (۱۳۹۷) و ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) اشاره کرد.

در سال‌های اخیر رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنجی (InSAR) به ابزاری مهم برای تشخیص تغییر شکل‌های سطحی تبدیل شده است. این توانایی نقشه برداری دقیق فرونشست زمین با وضوح زمانی و مکانی بالا در یک منطقه وسیع را فراهم می‌کند و از نظر محاسباتی نسبت به روش‌های سنتی مانند سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و ترازیبی کارآمدتر است (Luo et al., 2014). یکی از روش‌های پرکاربرد InSAR توانایی خوبی در اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین در مناطق بزرگ دارد، تداخل‌سنجی دیفرانسیل SAR (رادار دیافراگم مصنوعی) (D-InSAR) است (Tomás et al., 2014). در بسیاری از دشت‌های ایران پدیده فرونشست رخ داده است که از جمله این مناطق، دشت ورامین در جنوب‌شرق استان تهران می‌باشد. دشت ورامین یکی از جنوبی‌ترین دشت‌های استان تهران محسوب می‌شود که با کویر مرکزی همجوار است (Athari et al., 2022). مطالعات اخیر در مورد فرونشست دشت ورامین با مدل آمار رگرسیون معادلات نشان می‌دهد که سالانه بالغ بر ۲۶/۷۴ سانتی‌متر فرونشست (Athari et al., 2021) و میزان فرونشست برای سال ۱۴۰۱ نیز حدود ۲۴ سانتی‌متر بر سال پیش‌بینی شده است (سازمان نقشه برداری کشور، ۱۴۰۱).

در این پژوهش، پتانسیل فرونشست دشت ورامین با روش‌های وزن‌دهی ساده که شامل ۷ لایه موثر بر فرونشست می‌باشد بررسی شد و با استفاده از فرونشست تصاویر راداری همبستگی روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد روش AHP نسبت به روش وزن‌دهی ساده همبستگی بیشتری با فرونشست تصاویر راداری دارد.

## ۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

دشت ورامین دارای وسعتی معادل ۱۷۲۰ کیلومتر مربع دارد که در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (Athari et al., 2022). محدوده مورد مطالعه شامل ۱۶۳۹/۸ کیلومترمربع از دشت ورامین است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۱. زمین‌شناسی

از دیدگاه زمین‌شناسی، حوضه آبریز دشت ورامین در بخش جنوبی منطقه البرز مرکزی واقع شده است. قدیمی‌ترین سازند این منطقه، سازند سلطانیه (متعلق به پرکامبرین-کامبرین زیرین) و جدیدترین سازند آن، سازند آبرفتی دوران حاضر است. سازندهای آبرفتی موجود، به‌ویژه سازند آبرفتی تهران، بستر مناسبی برای تشکیل سفره آب زیرزمینی فراهم کرده‌اند. سنگ کف این آبخوان را سنگ‌ها و رسوبات سازند قرمز فوقانی تشکیل می‌دهد. سازند یاد شده، سازند قم را که عمدتاً از آهک و آهک مارنی تشکیل شده است، می‌پوشاند. هر سه بخش سازند قرمز آتش‌فشانی به همراه سازند قم در تپه پیشوارخنمون دارند (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۳).

ارتفاعات شمال شرقی حوضه عمدتاً از سازندهای قرمز فوقانی، هزاردره و کهریزک تشکیل یافته است. بنابراین، بین قسمت یاد شده و آبخوان دشت ارتباط هیدرولیکی برقرار می‌باشد. در قسمت‌های شمالی تپه پیشوا نیز سازندهای آبرفتی کهریزک و هزاردره رخنمون دارند. ارتفاعات شمال و شمال غرب حوضه بطور عمده از سازندهای نفوذناپذیر تا سازندهای با نفوذپذیری بسیار کم نظیر سازند کرج تشکیل یافته‌اند. لذا ارتباط هیدرولیکی این مناطق با آبخوان دشت بسیار ضعیف است. دو ناودیس وسیع و عمیق در شمال و جنوب دشت جایگاه مناسبی را برای تجمع رسوبات آبرفتی فراهم نموده‌اند. بدین ترتیب، دو حوضه بزرگ زیرزمینی شامل الف) حوضه شمالی با عمق بیشتر، حاوی رسوبات آبرفتی دانه درشت می‌باشد و ب) حوضه جنوبی با عمق کمتر، حاوی رسوبات دانه‌ریز است، در

دشت ورامین شناسایی می‌شود (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۳).

### ۲-۲. آب زمین‌شناسی

دشت ورامین دارای سه نوع آبخوان آزاد، تحت فشار و معلق می‌باشد. آبخوان شمال دشت از نوع آزاد و آبخوان مرکز و جنوب دشت از نوع تحت فشار است؛ همچنین، سفره‌های معلق بسیاری نیز در بخش شمالی به‌طور پراکنده وجود دارد. در سال‌های اخیر، به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و افت سطح پیرومتری، آبخوان در بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت از حالت تحت فشار به صورت آزاد تغییر یافته است (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۳).

یک لایه رسی با نفوذپذیری کم و ضخامت متغیر از مرکز دشت به سمت جنوب وجود دارد که باعث ایجاد دو آبخوان عمیق و سطحی جدا از یکدیگر شده است. این تغییرات در وضعیت آبخوان‌ها، به ویژه در شرایط هیدرولیکی منطقه تأثیرگذار بوده و می‌تواند به مشکلاتی در تأمین آب دشت منجر شود (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۳).

بیشترین ضخامت آبخوان در شمال شرقی برابر ۲۸۰ متر و کمترین ضخامت آبخوان در جنوب غربی برابر با ۱۵۰ متر است. سنگ بستر آبخوان اصلی از رسوبات مارنی، رسی، کنگلومرای میوسن و میوپلیوسن با نفوذپذیری کم تشکیل شده است (Nejatijahromi, 2019). منبع اصلی تغذیه دشت ورامین شامل بارندگی، آبراهه‌های اصلی، پساب تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران و تغذیه زیرسطحی می‌شود. جهت جریان آب‌های زیرزمینی در منطقه دشت ورامین، از شمال غرب به سمت جنوب شرق است (نجاتی‌جهرمی و همکاران، ۱۳۹۶).

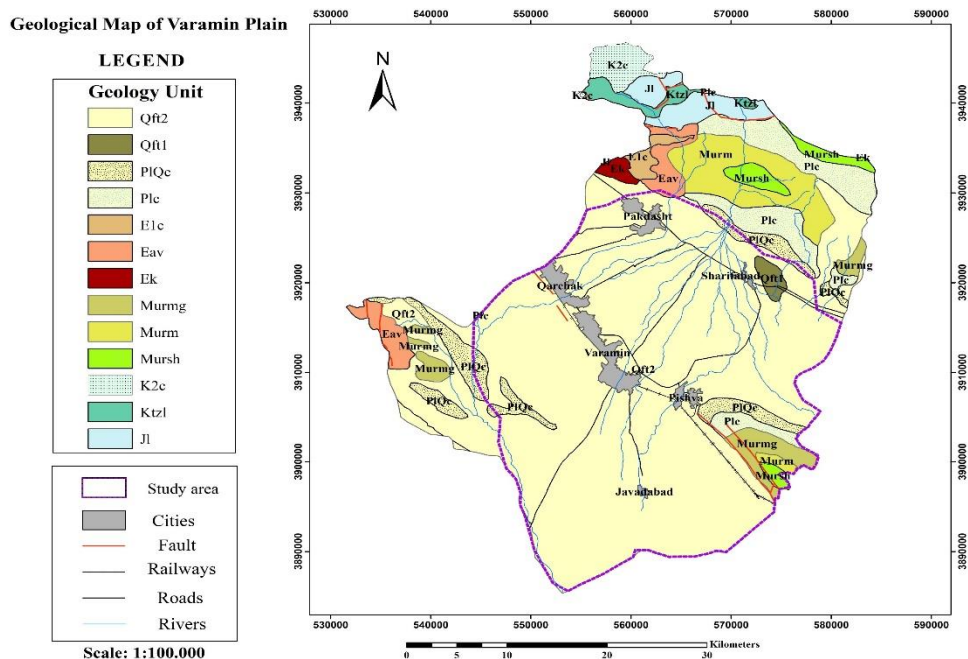
### ۲-۳. تکنونیک

در بین گسل‌های موجود در منطقه، گسل‌های پیشوا، دره جاجرود و غرب ورامین از لحاظ تأثیر بر وضعیت آبخوان دارای اهمیت بیشتری هستند. گسل‌های دره جاجرود و غرب ورامین گسل‌هایی عادی، قدیمی و پرشیب می‌باشند. عملکرد همزمان آن‌ها در سنگ کف آبخوان سبب ایجاد یک فرونشست

دانه درشت قسمت‌های شمالی و نیز با زهکشی نمودن نواحی مجاور خود، سبب ازدیاد ناگهانی گرادیان هیدرولیک شده‌است. این گسل یکی از عوامل مهم افزایش ناگهانی عمق آب زیرزمینی در پایین دست معبر زیرزمینی ورامین - پیشوا می‌باشد. از دیدگاه زمین‌شناسی، گسل پیشوا از خصوصیات یک گسل فعال برخوردار بوده، مورفولوژی آن همانند گسل زمین لرزه طبس است (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۳).

(Graben) درحد فاصل شهرستان پیشوا تا غرب ورامین شده‌است. گسل پیشوا گسلی معکوس و جوان است که درحد فاصل بین دو بخش شمالی و جنوبی به مثابه یک زهکش عمل نموده، آب‌های زیرزمینی اطراف خود را به سمت شوره‌زار موجود در جنوب شرقی حوضه هدایت می‌کند.

وجود گسل معکوس پیشوا در راستای جنوب تپه پیشوا تا جنوب ورامین به موازات خطوط ایزوپیز منطقه، با قراردادن ناگهانی رسوبات دانه‌ریز در مجاورت رسوبات دانه متوسط تا



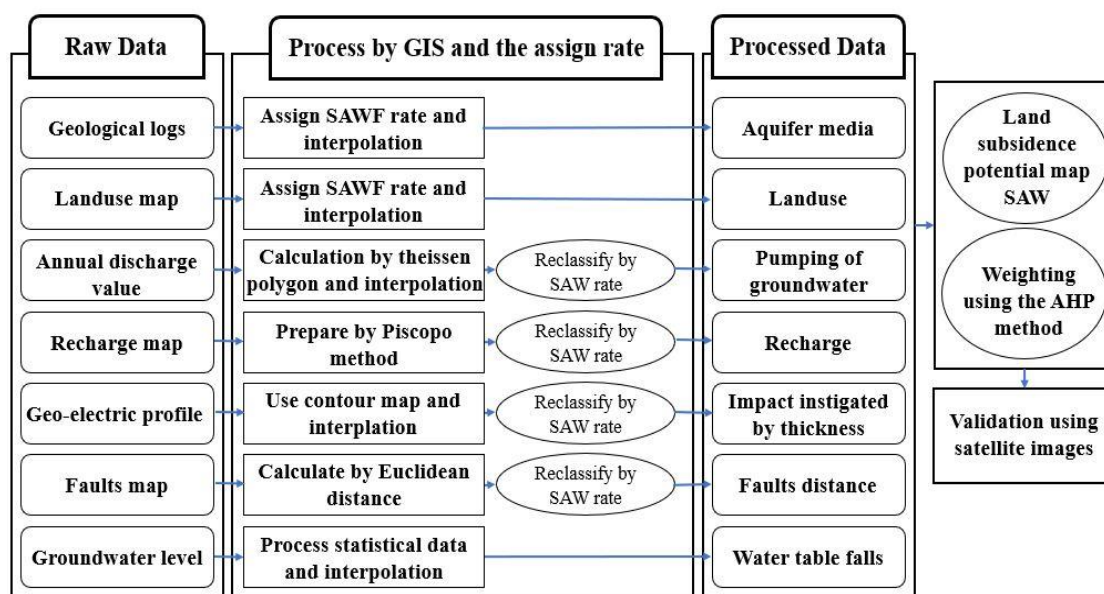
Unit	Description	Unit	Description
Eav	Andesitic volcanic, Eocene	Mursh	Varigated shale, and gypsiferous marl with sandstone, Miocene
Jl	Light grey, thin, bedded to massive limestone, Jurassic Cretaceous	Plc	Polymictic conglomerate and sandstone, Pliocene
K2c	Conglomerate and sandstone, late Cretaceous	PlQc	Fluvial conglomerate, Piedmont conglomerate and sandstone, Pliocene - Quaternary
Ktzi	Tick bedded to massive, white to pinkish orbitolina bearing limestone, Early Cretaceous	Qft1	High level piedmont fan and vally terrace deposits, Quaternary
Murm	Light red to brown marl gypsiferous marl with sandstone intercalations, Miocene	Qft2	Low level piedmont fan and vally terrace deposits, Quaternary
Murmg	Gypsiferous marl, Miocene		

شکل ۱. نقشه زمین شناسی دشت ورامین (اقتباس از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۴۰۱)

### ۳. مواد و روش‌ها

روش ارائه شده برای بررسی پتانسیل فرونشست زمین در محدوده دشت ورامین با استفاده از مدل سیستم امتیازدهی نقطه‌ای (PCSM) است. ابتدا با استفاده از روش وزن‌دهی ساده که شامل ۷ لایه موثر بر فرونشست می‌باشد استفاده شد. لایه‌های موثر بر فرونشست بر اساس رتبه‌های این مدل، تهیه و وزن‌دهی شده و سپس با تلفیق و برهم نهی لایه‌ها در محیط

ArcGIS، نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین تهران حاصل گردید. سپس با استفاده از مدل AHP وزن لایه‌های موثر بر فرونشست دوباره وزن‌دهی و بهینه‌سازی شده و نقشه پتانسیل فرونشست زمین حاصل گردید. به منظور صحت‌سنجی نتایج نیز، ضریب همبستگی بین نقشه پتانسیل حاصل از روش‌های وزن‌دهی ساده و AHP با نقشه فرونشست حاصل از تداخل-سنجی راداری (D-InSAR) به دست آمد و بهترین مدل برای پتانسیل دشت ارائه شد.



شکل ۲. مراحل روش تحقیق با استفاده از مدل وزن‌دهی ساده و AHP

### ۱-۳. روش وزن‌دهی ساده

مدل ALPRIFT برای ارزیابی فرونشست زمین توسط نادیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) ارائه شده است. برای این مدل از داده‌های مختلفی از جمله اطلاعات زمین‌شناسی، داده‌های پیژومتری، نتایج پمپاژ و نقشه کاربری اراضی استفاده شده است. در این مدل، هفت عامل مؤثر بر فرونشست زمین وجود دارد که عبارتند از: محیط آبخوان (A)، کاربری اراضی (L)، پمپاژ (P)، تغذیه (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F)، میزان افت آب زیرزمینی (T). به هر پارامتر وزنی با توجه به اهمیت آن اختصاص داده شده است. این وزن‌ها از ۱ تا ۵ متغیر هستند، به طوری که بیشترین تأثیر، وزن ۵ و کمترین تأثیر، وزن ۱ دارد. همچنین، هر پارامتر با توجه به اهمیت آن

در وقوع فرونشست، به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شود که در آن‌ها میزان تأثیر هر پارامتر رتبه‌بندی می‌شود. هر چه رتبه کمتر باشد، تأثیر کمتری بر وقوع فرونشست دارد. در نهایت، با جمع‌آوری وزن‌ها و رتبه‌های هر عامل، میزان فرونشست در آن نقطه محاسبه می‌شود. همچنین، هر پارامتر با توجه به اهمیتی که در وقوع فرونشست دارد، به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شود که در آن‌ها میزان تأثیر هر پارامتر رتبه‌بندی می‌شود. این رتبه‌ها از ۱ تا ۱۰ تعیین می‌شوند (جدول ۱). هر چه این رتبه کمتر باشد، تأثیر آن بر میزان وقوع فرونشست کمتر است. در نهایت، با جمع‌آوری وزن‌ها و رتبه‌های هر عامل، میزان فرونشست در آن نقطه محاسبه می‌شود.

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

شاخص پتانسیل فرونشست (SVI) در این رابطه به عنوان حاصل ضرب رتبه (r) و وزن (w) هر لایه تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، r و w به ترتیب نمایانگر رتبه و وزن لایه‌های مختلف هستند.

جدول ۱. محدوده و کلاس لایه‌های ALPRIFT (Nadiri et al., 2018)

Aquifer media (A)		Land use (L)		Pumping of groundwater (P)		Recharge (R)		Impact instigated by thickness (T)		Faults distance (F)		Decline of water table (T)		Subsidence vulnerability indices (SVI)	
Range	Rate	Range	Rate	Range (cm/year)	Rate	Range (r) (cm/year)	Rate	Range (m)	Rate	Range (km)	Rate	Range (m/year)	Rate	Band (b)	SVIs level
Clay	8-10	Mining/resources extraction	9-10	b0.0001	1	0 ≤ r b 4	10	0 ≤ r b 25	1	0 ≤ r b 1	10	0 ≤ r b 0.2	1	24 ≤ b b 78	Band 1 (Low)
Silt	8-9	Irrigated farming	7-9	0.0001 ≤ r b 0.005	2	4 ≤ r b 9	9	25 ≤ r b 55	2	1 ≤ r b 2	8	0.2 ≤ r b 0.5	2	78 ≤ b b 132	Band 2 (Moderate)
Karstic Sediments	6-8	Dam construction	6-9	0.005 ≤ r b 0.01	3	9 ≤ r b 14	7	55 ≤ r b 90	3	2 ≤ r b 3	6	0.5 ≤ r b 0.9	3	132 ≤ b b 186	Band 3 (High)
Sand	3-5	Built-up (residential etc.)	4-8	0.01 ≤ r b 0.5	4	14 ≤ r b 19	5	90 ≤ r b 130	4	3 ≤ r b 4	4	0.9 ≤ r b 1.4	4	186 ≤ b b 240	Band 4 (Very high)
Gravel	2-3	Transportation	3-4	0.5 ≤ r b 1	5	19 ≤ r b 24	3	130 ≤ r b 175	5	4 ≤ r b 5	2	1.4 ≤ r b 2	5		
Rock types e.g. (Sedimentary, etc.)	1-3	Dry farming/grassland	1-2	1 ≤ r b 5	6	N24	1	175 ≤ r b 225	6	N5	1	2 ≤ r b 2.7	6		
Oxidised Organic soil	8-10	Barren land	1	5 ≤ r b 20	7			225 ≤ r b 280	7			2.7 ≤ r b 3.5	7		
				20 ≤ r b 40	8			280 ≤ r b 340	8			3.5 ≤ r b 4.4	8		
				40 ≤ r b 65	9			340 ≤ r b 405	9			4.4 ≤ r b 5.4	9		
				N65	10			N405	10			N5.4	10		

Note 1: if each data layer scores a rate of 1, the minimum ALPRIFT SVI value is 24 (=1 × 5 + 4 × 1 + 4 × 1 + 3 × 1 + 2 × 1 + 1 × 1 + 5 × 1).

Note 2: if each data layer scores a rate of 10, the maximum ALPRIFT SVI value is 240 (=5 × 10 + 4 × 10 + 4 × 10 + 3 × 10 + 2 × 10 + 1 × 10 + 5 × 10).

فرونشست دارند. بعنوان 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.

پمپاژ (P): پمپاژ بی‌رویه باعث افت سطح آب زیرزمینی می‌شود که با کاهش فشار هیدرولیکی، فضای بین دانه‌ای نیز کاهش یافته و در نتیجه فرونشست رخ می‌دهد. به عبارتی، هر چه میزان پمپاژ در منطقه‌ای بیشتر باشد، پتانسیل فرونشست بیشتر خواهد

محیط آبخوان (A): شامل جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک است که تأثیر زیادی بر افزایش پتانسیل فرونشست دارد. رسوبات دانه‌ریز مانند سیلت و رس به دلیل نفوذپذیری کم، عدم حالت الاستیسیته و ضریب تحکیم بالا، پس از برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی دچار تحکیم برگشت‌ناپذیر شده و موجب فرونشست زمین می‌شوند.

کاربری اراضی (L): چگونگی و نحوه‌ی استفاده از زمین و فعالیت‌های استقرار یافته در هر بخش آن کاربری اراضی نامیده می‌شود. کاربری‌های مختلف تأثیرات مختلفی بر وقوع

زمین دارد. روش AHP در دهه ۱۹۷۰ توسط توماس ساعتی ابداع شد. این روش به کاربران این امکان را می‌دهد که مسائل را به شکل یک ساختار سلسله مراتبی بیان کنند و همچنین قادر به لحاظ کردن عوامل کمی و کیفی مختلف در حل مسائل است (Saaty, 1980). و بعدها به وسیله سایر محققین در برنامه‌ریزی‌ها و ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار گرفت (کرم و محمدی، ۱۳۸۸).

روش تحلیل سلسله مراتبی با انجام مراحل: ۱) ساخت سلسله مراتبی، ۲) مقایسه کردن زوجی و نرمال‌سازی آن‌ها، ۳) تعیین وزن‌ها، ۴) محاسبه نرخ ناسازگاری آن‌ها، منجر به انتخاب بهترین گزینه و یا اولویت‌بندی گزینه‌ها خواهد شد (Saaty, 1980).

از مزیت‌های استفاده از AHP به عنوان روش تخصصی در تجزیه و تحلیل مخاطرات زمین از جمله فرونشست، به صورت ذیل خلاصه می‌گردد: ۱. روند بحث شامل تمام اطلاعات مربوط به فرونشست می‌شود. ۲. در تحلیل ساختارها امکان در نظر گرفتن تمام اطلاعات را دارد. ۳. از دانش و تجربیات کارشناسان استفاده می‌شود. ۴. وزن هر عامل مرتبط، به صورت خودکار به وسیله ماتریس مقایسه توسط بردار مشخص به دست می‌آید (بهیاری و همکاران، ۱۳۹۵).

### ۳-۳. پردازش تصاویر ماهواره‌ای

اصطلاح "تداخل‌سنجی" به معنای همپوشانی دو موج بر روی سطح زمین است. در روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، از تصاویر متوالی و از زاویه دید خاصی که بر روی ماهواره قرار دارد، استفاده می‌شود تا تغییرات قائم سطح زمین را تخمین زده شود. این روش با محاسبه تفاضل فاز بین دو تصویر راداری با دقت بالا که از یک ناحیه مشخص گرفته شده، به ما کمک می‌کند تا جابجایی‌های قائم را شناسایی کنیم (Galloway and Hoffmann, 2007; Raucoules et al., 2007).

تصاویر راداری ممکن است از زوایای مختلف و در زمان‌های متفاوتی گرفته شوند. بنابراین، برای محاسبه اختلاف فاز، پیکسل‌های هم‌معنا در دو تصویر راداری با فاصله زمانی مشخص شناسایی و معادلات مرتبط با آن‌ها به صورت مختلط

بود و هر چه مقدار پمپاژ کمتر باشد، پتانسیل فرونشست کمتر خواهد بود.

تغذیه (R): 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 موثر کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست کمتر می‌شود.

ضخامت آبخوان (I): 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.

فاصله از گسل (F): یکی از عوامل طبیعی موثر بر وقوع فرونشست حرکات تکتونیکی از جمله گسل می‌باشد. گسل‌ها با جابجایی مواد ریزدانه و درشت دانه در محل شکاف‌ها باعث تشدید پدیده‌ی فرونشست می‌شوند. هرچه محدوده‌ای به محل گسلش نزدیکتر باشد امکان وقوع فرونشست در آن بیشتر خواهد بود و بالعکس.

میزان افت آب زیرزمینی (T): کاهش سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت آب، تبخیر، خشکسالی موجب کاهش فشار هیدرولیکی، افزایش تنش موثر وارد بر رسوبات و فرونشست می‌شود.

روش وزن‌دهی ساده ALPRIFT توسط محققان مختلفی برای دشت‌های مختلف ایران جهت بررسی پتانسیل فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان از این مطالعات به داداشی و همکاران (۱۳۹۹)؛ طاهری زنگی و واعظی هیر (۱۳۹۹)؛ نوری سنگراب و همکاران (۱۴۰۲)؛ Sadeghfam et al. (2020 and 2022)؛ Nadiri et al. (2020 and 2022) اشاره کرد.

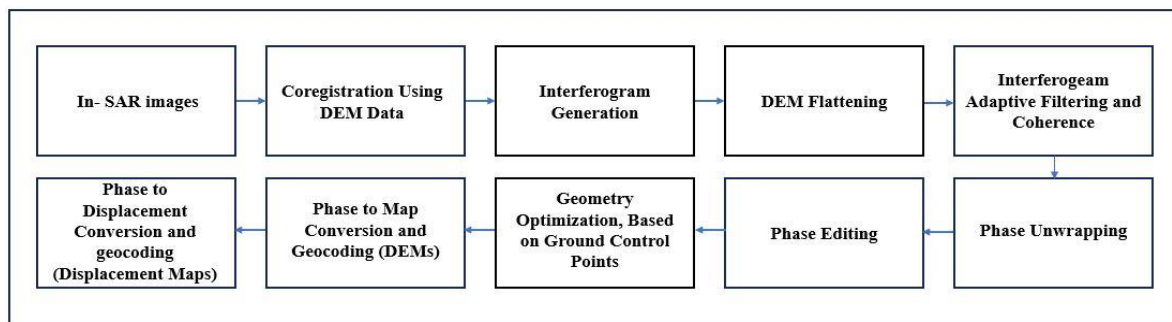
### ۳-۲. روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

یکی از روش‌های ارزیابی و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاری است که کاربرد بسیاری در برنامه‌ریزی فضا و محیط و علوم

کیلومتر تا ۴۰۰ کیلومتر بسته به حالت تصویربرداری متفاوت است. جهت انجام تداخل سنجی راداری دیفرانسیلی (D-InSAR) از نرم افزار Sarscape استفاده شد که مراحل پردازش آن شامل؛ ۱- دانلود تصاویر از سایت آژانس فضایی اروپا (<https://search.asf.alaska.edu>)؛ ۲- تهیه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) برای محدوده مورد مطالعه؛ ۳- تشکیل اینترفروگرام برای جفت تصاویر؛ ۴- ابهام زدایی فاز (Filtering and Unwrapping)؛ ۵- کنترل فاز تشکیل شده با مناطق فرونشست زمین؛ ۶- تبدیل فاز استخراج شده به فرونشست. شکل ۳ مراحل انجام تداخل سنجی راداری دیفرانسیلی را نشان می دهد.

در هم ضرب می شوند. اختلاف فاز به دست آمده از پیکسل های هم معنا در دو تصویر، یک اینترفروگرام را تشکیل می دهد. این تصویر، پس از انجام عملیات فیلتر، تصحیح فاز و سایر اصلاحات (مانند اثرات باقی مانده توپوگرافی)، می تواند به خوبی نواحی تحت فرونشست را نشان دهد. برای محاسبه نرخ فرونشست، لازم است تغییر فاز به جابجایی تبدیل شود (اکبری، ۱۳۹۱).

در این پژوهش از دو تصویر ماهواره سنتینل ۱ با اختلاف بازه زمانی یکساله (۱۳۹۹-۱۴۰۰) استفاده شده است. این ماهواره هر ۱۲ روز یک تصویر کامل از زمین تهیه می کند و مدار آن در ارتفاع ۶۹۳ کیلومتری از سطح زمین قرار گرفته و قدرت تفکیک تصویر آن از ۵ متر تا ۴۰ متر و عرض تصویر از ۲۰



شکل ۳. مراحل پردازش تداخل سنجی راداری دیفرانسیلی

جنس لایه های زیرین: با استفاده از لاگ های زمین شناسی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نوع رسوبات تشکیل دهنده آبخوان شناسایی شد و هر یک طبق رابطه ۲ و جدول ۱ طبقه بندی گردید. ابتدا ضخامت لایه های مختلف در هر لاگ زمین شناسی در رتبه آن طبق جدول ۱ بدست آورده و سپس به ضخامت کل لاگ تقسیم شد. مقادیر به دست آمده با روش IDW درونیابی شد و لایه رستری جنس لایه های زیرین با استفاده از ArcGIS و با ترکیب سایر لایه ها ایجاد شد. نقشه کلاس بندی این لایه در شکل ۴- آ نمایش داده شده است.

#### ۴. پردازش اطلاعات

##### ۴-۱. لایه های روش وزن دهی ساده

برای به دست آوردن لایه های روش وزن دهی ساده، اطلاعات مربوط به هر لایه در بازه زمانی یک ساله (مهر ۱۳۹۹ تا مهر ۱۴۰۰) طبق جدول ۱ طبقه بندی شده و در محیط ArcGIS وارد شد. همچنین، ایجاد یک لایه رستری برای انجام عملیات ترکیب و تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست ضروری است. در این تحقیق، برای آماده سازی هر یک از لایه های مورد نظر، از منابع اطلاعاتی مختلفی استفاده شده است که در ادامه، منابع و روش های آماده سازی آن ها توضیح داده شده اند:

$$(۲) \quad \text{جنس لایه های زیرین} = \frac{\sum h_i (\text{رتبه} \times \text{ضخامت لایه})}{\text{ضخامت کل}}$$

ضخامت آبخوان: برای تهیه این لایه، از گزارش فرونشست سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۹) برای به دست آوردن سنگ کف منطقه استفاده شد. با در دست داشتن اطلاعات سطح ایستابی و سنگ کف، ضخامت زون اشباع آبخوان تهیه گردید. سپس این لایه با استفاده از جدول ۱ در ArcGIS طبقه‌بندی و لایه رستری آن به منظور تلفیق با سایر لایه‌ها ایجاد شد. نقشه رستری ضخامت آبخوان در شکل ۴-ج نمایش داده شده است.

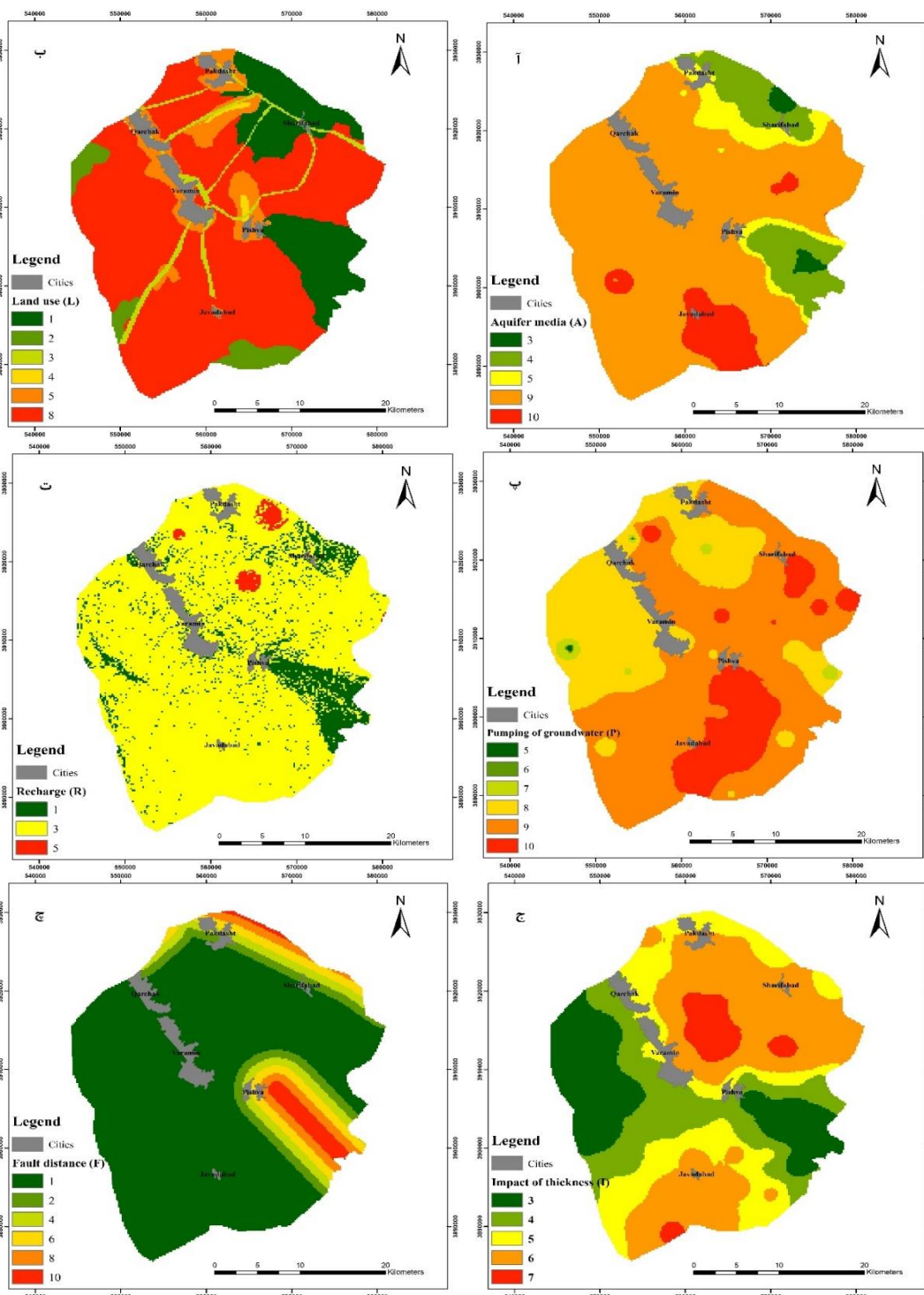
فاصله از گسل: برای به دست آوردن فاصله گسل از هر نقطه دشت، از دستور Euclidean distance استفاده شد و نقشه حاصل از آن بر اساس جدول ۱ کلاس بندی و تبدیل به لایه رستری شد. هر قدر نقاط از گسل فاصله بگیرند، تأثیری کمتری در فرونشست دارند. شکل ۴-چ لایه رستری فاصله از گسل را برای دشت بررسی شده نشان می‌دهد.

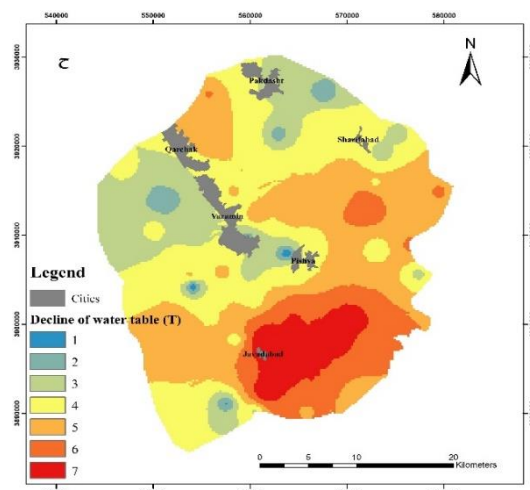
افت سطح آب زیرزمینی: برای به دست آوردن این لایه، از اطلاعات یک ساله (مهر ۱۳۹۹ تا مهر ۱۴۰۰) چاه‌های پیژومتری درونیاپی و سپس لایه رستری برای تلفیق با روش IDW در دشت استفاده شد. مقادیر داده‌ها برای کل منطقه تهیه و سپس با استفاده از جدول ۲، این لایه طبقه‌بندی شد. شکل ۴-ح لایه رستری افت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

کاربری زمین: کاربری‌های مختلف بر اساس تأثیر آن‌ها در وقوع فرونشست در جدول ۲ ارائه شده است. در دشت مورد بررسی، پنج نوع کاربری زمین شامل مناطق کشاورزی، مناطق مسکونی، مناطق حمل و نقل، مناطق خشک و زمین‌های بایر وجود دارد. زمین‌های کشاورزی به دلیل برداشت آب زیرزمینی، بیشترین تأثیر را بر فرونشست دارند، در حالی که زمین‌های بایر کمترین تأثیر را دارند. لایه کاربری زمین با استفاده از گوگل ارث دشت ورامین تهیه و طبق جدول ۱ طبقه‌بندی شد و در نهایت، لایه رستری این کاربری به دست آمد. نقشه رستری این لایه در شکل ۴-ب نمایش داده شده است.

پمپاژ: برای تهیه لایه پمپاژ، میزان برداشت سالانه آب از چاه‌های بهره‌برداری که از سازمان آب منطقه‌ای تهران دریافت شده بود، وارد شد. سپس با استفاده از روش پلیگون تیسن، مقدار تخلیه برای هر پیژومتر در ArcGIS مشخص گردید. این اطلاعات با مختصات چاه‌ها در کل منطقه درونیاپی و لایه رستری حاصل از آن ایجاد شد. نقشه رستری مربوط به لایه پمپاژ با استفاده از روش IDW در شکل ۴-پ نمایش داده شده است.

تغذیه: برای تهیه لایه تغذیه، از روش پیسکوپو استفاده شد. در این روش، ۳ لایه شامل شیب زمین، بارندگی و نفوذپذیری خاک به لایه رستری تبدیل و با ترکیب آن‌ها، لایه تغذیه به دست آمد و سپس طبق جدول ۱ طبقه‌بندی شد. نقشه رستری حاصل از لایه تغذیه در شکل ۴-ت نمایش داده شده است.





شکل ۴. لایه‌های رستری پردازش شده روش وزن‌دهی ساده. (آ) جنس آبخوان (ب) کاربری اراضی (پ) پمپاژ (ت) تغذیه (ج) ضخامت آبخوان (چ) فاصله از گسل (ح) سطح آب زیرزمینی

#### ۴-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی

برای ارزیابی مدل و بهینه‌سازی وزن‌های به‌کاررفته در آن، که هدفش ارزش‌گذاری پارامترهای تأثیرگذار بر پتانسیل فرونشست آبخوان است، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است. به منظور بدست آوردن وزن لایه-های موثر بر فرونشست زمین، از روش تشکیل ماتریس مقایسه‌ای برای تعیین وزن نسبی مشخصه‌ها استفاده شد. برای کاهش خطاهای شخصی، از آرای گروهی متخصصان استفاده می‌شود. در این تحقیق، پرسشنامه‌ای برای جمع‌آوری نظرات متخصصان طراحی شد در این راستا، برای وزن‌دهی به پارامترها، ابتدا آن‌ها بر اساس مقادیر ارزش‌گذاریشان از بزرگ به کوچک مرتب شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار Choice Expert و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مقایسه‌ای بین پارامترها

انجام شده و میزان تأثیر هر یک در فرونشست مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به ماتریس اولیه و سپس به ماتریس نرمال منتقل می‌شوند. وزن نسبی لایه‌ها با روش تقریبی و جمع ستونی محاسبه می‌شود (جدول ۲).

به منظور امتیازدهی به رتبه نخبگان از جدول رتبه بندی نرخ نخبگی رنجیس (Renjith et al., 2010) استفاده شد. جدول نخبگی رنجیس شامل میزان تحصیلات، تجربه، سن و سمت سازمانی می‌باشد. پرسشنامه‌های تهیه شده توسط نخبگان با ویژگی‌ها و شاخصه‌های متفاوت پر شده است که در جدول ۳ به طور کامل مشخص شده است. حداکثر و حداقل رتبه نخبگی بر حسب جدول رنجیس به ترتیب ۱۷ و ۴ بوده که برای نخبگان این پژوهش بین ۱۶ و ۶ بوده است. جهت رتبه-دهی به نخبه‌ها امتیاز هر نخبه به ماکزیمم رتبه نخبگی در این پژوهش تقسیم شده است.

جدول ۲. وزن‌های به دست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
<b>Wat</b>	0.17433414	0.174348916	0.17433414	0.174365805	0.175048029	0.174354425	0.175048029	0.170979141	0.17446129	0.174394946	0.174499179	0.17433414	0.172903533	0.254127126	0.174541016	0.161172882
<b>Aqu</b>	0.17433414	0.174348916	0.174159806	0.174365805	0.174873156	0.174528954	0.174873156	0.17115012	0.173937906	0.174394946	0.174324854	0.174159806	0.174475383	0.161145927	0.174192283	0.177113057
<b>Lan</b>	0.17433414	0.174348916	0.174508475	0.174540171	0.174873156	0.174354425	0.174873156	0.170979141	0.17446129	0.174220551	0.174324854	0.174508475	0.174650033	0.160984781	0.174192283	0.17729017
<b>Pum</b>	0.17433414	0.174348916	0.17433414	0.174191439	0.174873156	0.174354425	0.174873156	0.189957825	0.17446129	0.174220551	0.174324854	0.17433414	0.174650033	0.144064458	0.174366649	0.176935944
<b>Rec</b>	0.108958838	0.10907704	0.108958838	0.109087607	0.109186427	0.108971515	0.109186427	0.106861963	0.108929268	0.108996842	0.108735128	0.108958838	0.109265427	0.100716204	0.108870177	0.110695661
<b>Tic</b>	0.096949153	0.096666788	0.096949153	0.096676152	0.097054602	0.09696053	0.097054602	0.094988411	0.096826016	0.096886081	0.096847141	0.096949153	0.097027796	0.089525515	0.096967231	0.098396143
<b>Fau</b>	0.096755448	0.096860509	0.096755448	0.096773022	0.094091473	0.096475727	0.094091473	0.0950834	0.096922939	0.096886081	0.096943988	0.096755448	0.097027796	0.089435989	0.096870361	0.098396143

جدول ۳. شاخص و رتبه بندی امتیاز نخبگی رنجیس

	Classification	Score	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	15	P16
Educational qualification	Ph.D	5	✓		✓			✓		✓	✓		✓		✓			
	M.Sc	4		✓		✓						✓		✓	✓		✓	
	B.Sc	3					✓		✓									✓
	Associate Diploma	2																
Experience	Greater than 30	4						✓								✓		
	20-30	3										✓	✓					
	10-20	2								✓							✓	
	5-10	1	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓			✓
Age	Greater than 50	4						✓		✓			✓			✓		
	40-50	3										✓						
	30-40	2	✓	✓	✓	✓					✓			✓			✓	
	Less than 30	1					✓		✓						✓			✓
Title	CEO	4						✓					✓			✓		
	Chief supervisor	3											✓			✓		
	Expert	2		✓						✓		✓		✓			✓	
	Expert	1	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓			✓
Weighting score			9	9	9	8	6	16	6	13	10	11	15	9	7	16	10	6
Weighting factor			0.5625	0.5625	0.5625	0.5	0.375	1	0.375	0.8125	0.625	0.6875	0.9375	0.5625	0.4375	1	0.625	0.375

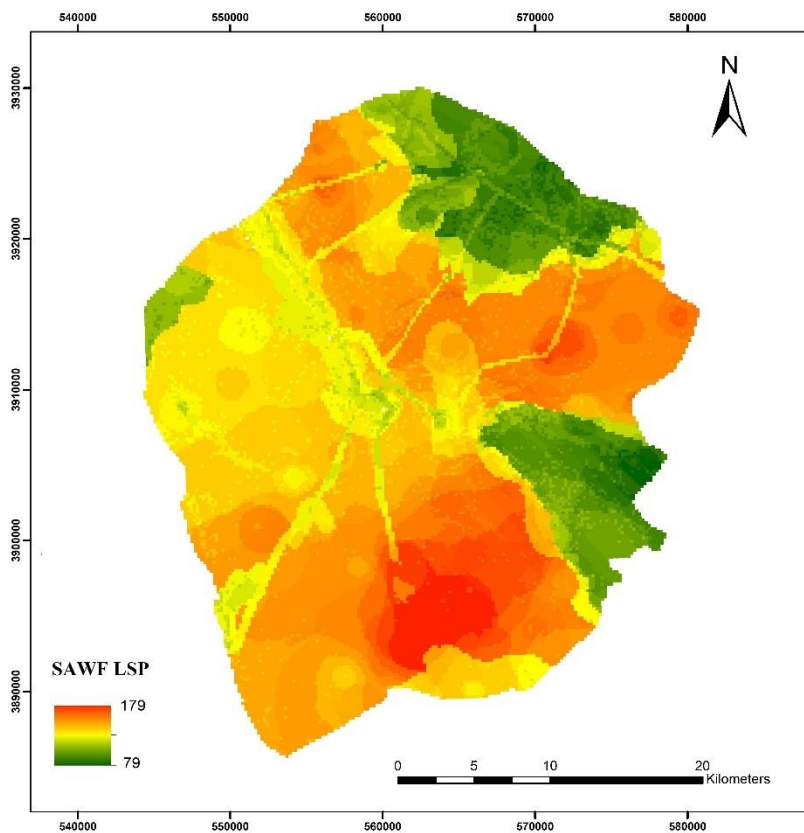
## ۵. بحث

هر لایه (جدول ۱) روی هم تلفیق شدند و نهایتاً نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین حاصل شد و شاخص پتانسیل فرونشست برای کل دشت بین ۷۹ تا ۱۷۹ برآورد شد (شکل ۵). مقادیر پتانسیل فرونشست با طیف رنگی قرمز تا سبز در شکل ۵ نشان داده شده است که طیف رنگی قرمز نشان دهنده مناطق دارای پتانسیل فرونشست زیاد و طیف رنگی سبز مناطق با پتانسیل فرونشست کم می‌باشد.

هدف از انجام پژوهش حاضر، تعیین پتانسیل فرونشست دشت ورامین که یکی از مهم‌ترین دشت‌های ایران که با فرونشست زیادی مواجه شده است با استفاده از روش وزن‌دهی ساده و AHP است.

### ۵-۱. نتایج روش وزن‌دهی ساده

پس از آماده سازی ۷ لایه موثر بر فرونشست و کلاس‌بندی آن‌ها طبق جدول ۱، این لایه‌ها بر اساس وزن تعیین شده برای



شکل ۵. نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین حاصل از تلفیق لایه‌های روش وزن‌دهی ساده

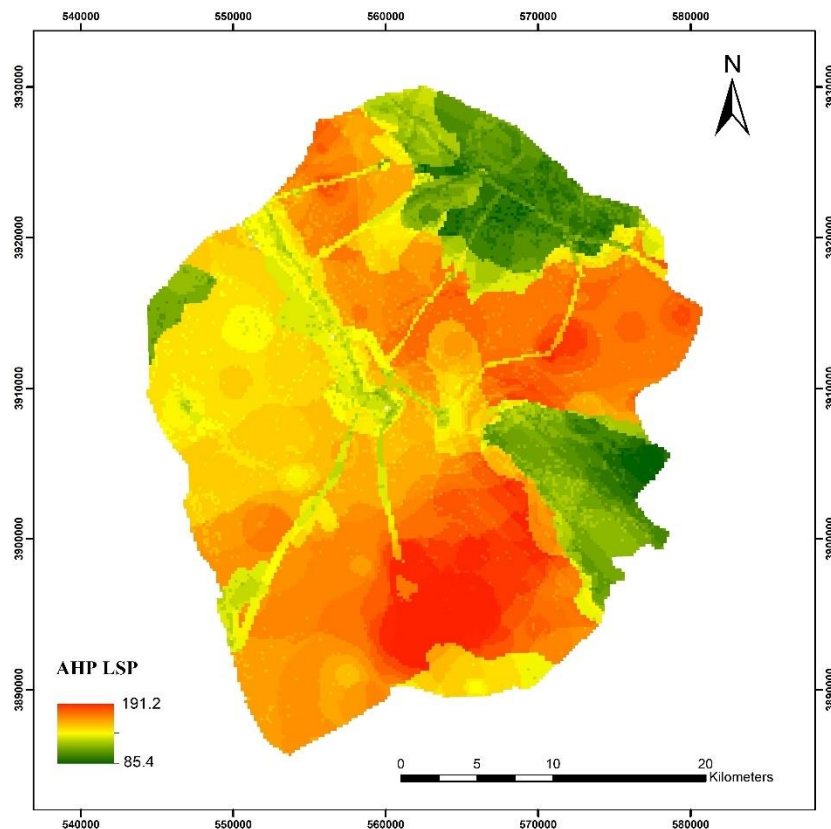
### ۵-۲. نتایج روش AHP

لایه‌ها بر حسب روش AHP در هر کدام از لایه‌ها ضرب و نقشه پتانسیل فرونشست زمین بین ۸۵/۴ و ۱۹۱/۲ برآورد شد. شکل ۶ نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین حاصل از تلفیق لایه‌ها بر حسب وزن AHP را نشان می‌دهد که طیف رنگی قرمز در نقشه، مناطق با پتانسیل فرونشست زیاد و طیف رنگی سبز مناطق با پتانسیل فرونشست کم نشان می‌دهد.

به منظور به دست آوردن وزن لایه‌های موثر بر فرونشست با روش AHP، رتبه هر نخبه در جدول نرمال سازی ماتریسی ضرب شده و وزن لایه‌های موثر بر فرونشست برای پرسشنامه هر نخبه بین ۰ و ۱ به دست آمد. (جدول ۲) با جمع این وزن‌ها، وزن نهایی لایه‌های موثر بر فرونشست طبق جدول ۳ به دست آمد. سپس وزن‌های به دست آمده برای هر لایه به اعداد بین ۰ تا ۵ تبدیل شد. (جدول ۴). وزن نهایی بدست آمده

جدول ۴. وزن نهایی لایه بر حسب امتیاز نخبگی و با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

Layers	Fault distance	Impact of aquifer thickness	Recharge	Pumping of groundwater	Landuse	Aquifer media	Water table falls
Weight	0.9578	0.9606	1.080	1.6547	1.7291	1.7287	1.8158
Final weight in AHP	2	2.6	3	4.5	4.7	4.7	5

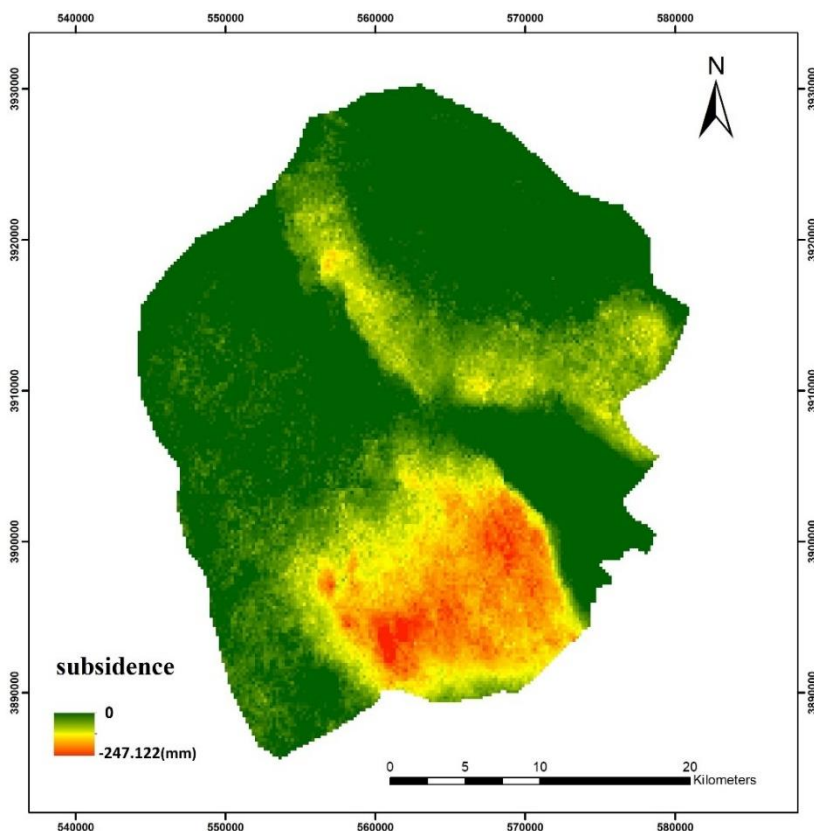


شکل ۶. نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین حاصل از تلفیق لایه‌های مدل AHP

### ۳-۵. صحت‌سنجی با تصاویر ماهواره‌ای INSAR

تصویر ماهواره‌ای فرونشست از دشت مورد مطالعه را بر حسب سانتی‌متر برای بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ را نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل فرونشست در دشت برابر ۲۴/۷ سانتی‌متر و صفر است (مقادیر منفی که با طیف رنگی قرمز در شکل ۷ مشخص شده است نشان‌دهنده مقادیر فرونشست زمین است).

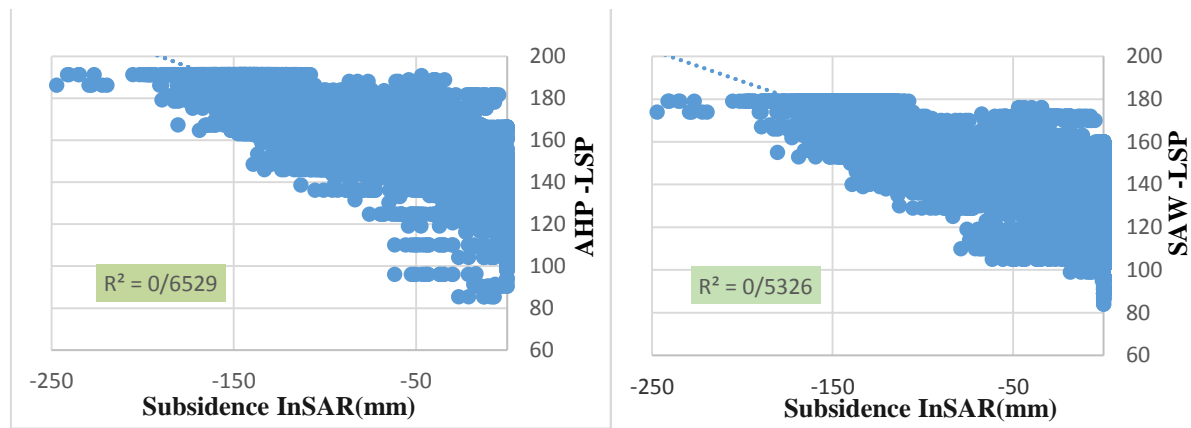
در این پژوهش از تصاویر راداری (InSAR) پردازش شده ماهواره سنتینل ۱ برای بازه زمانی مهر ۱۳۹۹ تا مهر ۱۴۰۰ استفاده گردید تا بتوان به وسیله‌ی این تصویر، روش‌های ارائه شده پتانسیل فرونشست (روش وزن‌دهی ساده و AHP) دشت ورامین را ارزیابی کرد. در بخش ۳-۳ مراحل انجام تداخل-سنجی راداری به طور کامل توضیح داده شده است. شکل ۷



شکل ۷. نقشه ماهواره‌ای فرونشست دشت ورامین

وکتوری، تمام پیکسل‌ها فایل اکسل تبدیل و ضریب همبستگی  $(R^2)$  روش وزن‌دهی ساده و AHP با میزان فرونشست حاصل از تصاویر راداری بدست آمد. همانطور که شکل ۸ نشان می‌دهد ضریب همبستگی روش وزن‌دهی ساده و AHP با فرونشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۶۵ می‌باشد.

به منظور صحت‌سنجی روش وزن‌دهی ساده و AHP از ضریب همبستگی حاصل از روش‌ها و فرونشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. بدین منظور ابتدا نقشه پتانسیل فرونشست حاصل از روش وزن‌دهی ساده و مدل AHP همراه با تصویر تداخل‌سنجی شده ماهواره، در محیط Arc GIS به فایل رستر با تعداد پیکسل‌های یکسان (۲۰۰×۲۰۰) تبدیل شد، بعد فایل رستری به فایل وکتور تبدیل شد. پس از تهیه نقشه



شکل ۸. نمودار همبستگی بین روش‌ها و میزان فرونشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای

## ۶. نتیجه‌گیری

پتانسیل دشت با شاخص بین ۷۹ تا ۱۷۹ حاصل شد. سپس به منظور بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده، روش AHP را با طراحی پرسشنامه‌های کارشناسان به کار گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق، نشان می‌دهد که وزن‌دهی با روش AHP به دلیل ایجاد همبستگی بالا بین شاخص فرونشست و فرونشست رخ داده در محدوده مورد مطالعه بهتر از روش وزن-دهی ساده، پتانسیل فرونشست زمین را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل نواحی شمال‌غربی، جنوب و جنوب‌غربی دشت در معرض فرونشست بیشتری قرار دارند و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل آن‌ها اعمال شود.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی پتانسیل فرونشست در دشت ورامین با به کارگیری روش وزن‌دهی ساده و روش AHP می‌باشد. دشت ورامین که یکی از دشت‌های مهم کشورمان با کاربری عمده کشاورزی است که برداشت از آب-های زیرزمینی به منظور تامین نیازهای آبی، سطح زمین را در این منطقه در معرض خطر فرونشست قرار می‌دهد. بنابراین بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست در این دشت، به منظور مدیریت اثرات آن امری ضروری است. در روش وزن‌دهی ساده 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 کلاس-بندی شد و از تلفیق این پارامترها در محیط ArcGIS نقشه

## منابع

- اکبری، ا.، ۱۳۹۱، بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت دامنه و ارائه راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، صفحه ۱۶۳.
- بهباری، م.، عزیززاده، ا.، و محمودیان، ش.، ۱۳۹۵، ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، تابستان ۹۶، شماره ۲۴. <https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229>
- داداشی، ث.، صادق‌فام، ص.، ندیری، ع.، محبی، ی.، ۱۳۹۹، تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، نشریه مهندسی عمران شریف، ۲ (۳۶)، ۸۵-۹۶. <https://doi.org/10.24200/j30.2019.53189.2538>
- رهنما، ح.، و میراثی، س.، ۱۳۹۵، تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر فرونشست زمین، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره ۱۶، شماره ۱. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-8483-fa.html>
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۴۰۱، نقشه ورامین با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۹، طرح بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در استان تهران (دشت ورامین).
- سازمان نقشه برداری کشور، ۱۴۰۱، نقشه و پهنه‌بندی فرونشست شهر ورامین-استان تهران.
- شمشکی، ا.، و انتظام سلطانی، ا.، ۱۳۸۳، سازوکار و علل تشکیل شکاف‌های زمین در منطقه معین‌آباد - ورامین، چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران.
- طاهری زنگی، ص و واعظی هیر، ع.، ۱۳۹۹، پتانسیل فرونشست دشت شازند ناشی از افت آب زیرزمینی با مدل وزن‌دهی و آنالیز صحت‌سنجی آن با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، مجله اکوهیدرولوژی، ۷ (۱)، ۱۸۳-۱۹۴. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.291695.1229>
- قهرودی تالی، م.، خدامرادی، ف.، و علینوری، خ.، ۱۴۰۲، تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرونشست زمین در دشت دهگالن، استان کردستان، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۱۰، شماره ۱. <https://doi.org/10.22059/JHSCI.2023.359130.777>

- کرم، ا.، محمدی، ا.، ۱۳۸۸، ارزیابی و پهنه‌بندی تناسب زمین برای توسعه فیزیکی شهر کرج و اراضی پیرامونی بر پایه فاکتورهای طبیعی و روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP). فصلنامه جغرافیای طبیعی. ۱ (۴). ۵۹-۷۴.
- مقدم، س.، احمدی، ح.، زینالزاده، ک.، و حصار، ب.، ۱۳۹۹، مکان‌یابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی تجدیدشونده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با تحلیل AHP و تکنیک فازی فضایی (مطالعه موردی: دشت ارومیه)، هیدروژئولوژی، سال پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۴۲-۱۵۳. <https://doi.org/10.22034/hydro.2020.11035>
- منافی آذر، ع.، خامه‌چیان، م.، و ندیری، ع.، ۱۳۹۷، مقایسه آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت جنوب‌غربی تهران با مدل وزن‌دهی ساده مدل (ALPRIFT) و الگوریتم ژنتیک، علوم زمین خوارزمی، جلد ۴، شماره ۲، صفحات ۲۱۲-۱۹۹. <http://dx.doi.org/10.29252/gnf.4.2.199>
- نجاتی جهرمی، ز.، ناصری، ح.، نخعی، م.، و علیجانی، ف.، ۱۳۹۶، ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین از نظر قابلیت شرب: آلودگی با فلزات سنگین، مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، دوره دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۵۵۹-۵۷۲. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5906-fa.html>
- نوری سنگراب، ث.، اصغری مقدم، ا.، جبرائیلی اندریان، ن.، ۱۴۰۲، بررسی پتانسیل فرونشست دشت عجب‌شیر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری، فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳ (۳)، ۷۱-۸۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.382187.2055>
- Athari, M., Azizi, H., Hashemi, S., & Honari, H., 2022, Investigation of the Relationship between Land Surface Changes due to Subsidence and Groundwater using Sentinel-1 Satellite Images and Statistical Models (Case study: Varamin plain). *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 7: 34-43. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2021.261650.1232>.
- Athari, M., Hashemi, S., & Azizi, H., 2021, Predicting land subsidence based on groundwater level changes and using radar interferometry (InSAR) technique and regression statistical equations (Case study: Varamin plain), *WASWAC\_YOPA\_062*.
- Bagheri-Gavkosh M., Hosseini, SM., Ataie-Ashtiani B., Sohani, Y., Ebrahimian H, Morovat, F., & Ashrafi, S., 2021, Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778: 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>.
- Bates, R.L., & Jackson, J.A., 1980, *Glossary of Geology*, 2nd Edition, American Geological Institute, Virginia.
- Galloway, D., & Hoffmann, J., 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15: 133-154.
- Galloway, D., Jones, D., & Ingebritsen, S., 1999, *Land Subsidence in the United States*, U.S. Geological Survey, Virginia USA.
- Hidayat, A., Muslihudin, M., & Utami, I., 2017, Sistem Pendukung Keputusan Menentukan Lokasi Cafe Baru Suncafe Sebagai Destinasi Wisata Kuliner Di Kabupaten Pringsewu Menggunakan Metode Simple Additive Weighting (SAW), *J. TAM (Technol. Accept. Model)*, 6: 71-79 .
- Hwang, C., & Yoon, K., 1981, *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Springer Book Archive. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y & Wang, W., 2014, Subsidence Monitoring of Tianjin Suburbs by TerraSAR-X Persistent Scatterers Interferometry, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7: 1642-1650. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2271501>.

- Muslihudin, M., & Gumanti, M., 2017, A System To Support Decision Makings In Selection Of Aid Receivers For Classroom Rehabilitation For Senior High Schools By Education Office Of Pringsewu District By, IJISCS, 1: 1–9. <https://doi.org/10.56327/ijiscs.v1i2.495>.
- Muslihudin, M., Kurniawan, D., & Widyaningrum, I., 2017, Implementasi Model Fuzzy SAW Dalam Penilaian Kinerja Penyuluh Agama, J. TAM (Technol. Accept. Model), 8: 39–44.
- Nadiri, A.A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., & Dideban, Kh., 2018, Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT" Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031>.
- Nadiri, A.A., Khatibi, R., Khalifi, P., Feizizadeh, B., 2020, A study of subsidence hotspots by mapping vulnerability indices through innovatory 'ALPRIFT' using artificial intelligence at two levels, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 3989–4003. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01781-3>.
- Nadiri, A.A., Habibi, I., Gharekhani, M. et al. 2022, Introducing dynamic land subsidence index based on the ALPRIFT framework using artificial intelligence techniques. Earth Sci Inform 15, 1007–1021. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00760-w>.
- Nejatijahromi, Z., 2019, Determination Sources of Nitrate Contamination in Varamin Plain Aquifer Using Isotopic Indicators and Simulation of Contaminant Transport. Ph.D. dissertation, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran .
- Raucoules, D., Colesanti, C., & Carnec, C., 2007, Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. C. R. Geoscience, 339: 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.002>.
- Renjith, V. R., Madhu, G., Nayagam, V. L. G., & Bhasi, A. B. 2010, Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. Journal of hazardous materials, 183, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.116>.
- Saaty, T., 1980, The Analytical Hierarchy Process, Pinning Priority, Resource Allocation, RWS Publication, USA, 287.
- Sadeghfam, S., Nourbakhsh Kiyabani, F., Khatibi, R., Daneshfaraz, R., 2020, A study of land subsidence problems by ALPRIFT for vulnerability indexing and risk indexing and treating subjectivity by strategy at two levels, Hydroinformatic journal, 22 (6), 1640-1662. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.247>.
- Sadeghfam, S., Khatibi, R., Dadashi, S., Nadiri, A.A., 2022, Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme, Environmental Impact Assessment Review, 82, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106352>.
- Tomás, R., Romero, R., Mulas, J., Marturià, J.J., Mallorquí, J. J., Lopez-Sanchez, J.M., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P. J., Fernández, J., Duque, S., Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco, D., & Blanco, P., 2014, Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain, Environmental Earth Science, 71: 163–181 <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2422-z>.
- Wang, G.Y., You, G., Shi, B., Yu, J., & Tuck, M., 2009, Long-term land subsidence and strata compression in changzhou, China. Engineering Geology, 104:109-118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.001>.