

مجله

جغرافیا و مخاطرات محیطی



ویژه نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

(نشریه علمی)

سال یازدهم، شماره ۴۴، زمستان ۱۴۰۱، شاپا: ۱۶۸۲-۲۳۲۲

• فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم سنجی)
سعید نصیری زارع، امیر کرم

• پایش پدیده فرونشست دشت ها بر مبنای الگوریتم خود کار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی ...
شهرام روستایی، سمیرا نجف وند

• ارزیابی و پهنه بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP ...
موسی عابدینی، لیلا آقایی، صیاد اصغری سراسکانرود

• ارزیابی کارایی مدل های دو متغیره در تعیین حساسیت پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان
نرگس سقازاده، هدی قاسمیه، ابراهیم امیدوار، یاسر مقصودی

• تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری ...
سیدرضا حسین زاده، ابراهیم اکبری، مهدی جوانشیری، زینت محمدپور سنگانی

• پهنه بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم گیری چند معیار ...
شبثم مهرنور، مریم رباطی، میرمسعود خیرخواه زرکش، فروغ فرساد، شهرام بیکپور

• پهنه بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره گیری از الگوریتم های تحلیل چند معیاره ...
صیاد اصغری سراسکانرود، الناز پیروزی، لیلا آقایی

• بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی ...
زهرا آزر، حمید مهربانی، سعید نادی

• ارزیابی آسیب پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه ای ...
امین رضایی شهابی، علیرضا عرب، حسن احمدی، امیر پیشوا، محمد اقبال شهبخش موسی زهی

• تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره ای
حمید گنجائیان، معصومه اسدی، فاطمه منبری، عطربین ابراهیمی





فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی (نشریه علمی)

سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱

ویژه نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

شاپا الکترونیکی: ۳۰۷۶-۲۳۸۳

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۱۶۸۲

- فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم-سنجی)
سعید نصیری زارع، امیر کرم
- پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی ...
شهرام روستایی، سمیرا نجف‌وند
- ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP ...
موسی عابدینی، لیلا آقایی، صیاد اصغری سراسکانرود
- ارزیابی کارایی مدل‌های دو متغیره در تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان
نرگس سقازاده، هدی قاسمیه، ابراهیم امیدوار، یاسر مقصودی
- تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری ...
سیدرضا حسین زاده، ابراهیم اکبری، مهدی جوانشیری، زینت محمدپور سنگانی
- پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار ...
شبنم مهرنور، مریم رباطی، میرمسعود خیرخواه زرکش، فروغ فرساد، شهرام بیک‌پور
- پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره ...
صیاد اصغری سراسکانرود، الناز پیروزی، لیلا آقایی
- بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی ...
زهرا آزر، حمید مهربانی، سعید نادری
- ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ...
امین رضایی شهابی، علیرضا عرب، حسن احمدی، امیر پیشوا، محمدآقبال شهبخش موسی‌زهی
- تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای
حمید گنجائیان، معصومه اسدی، فاطمه منبری، عطرن ابراهیمی



دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد
مدیر مسئول: دکتر سیدرضا حسین زاده
سرمدیر: دکتر محمد رحیم رهنما
هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

شعبان شتایی جویباری - دانشیار دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (دکترای علوم جنگل - سنجش از دور)
بخیار فیضی زاده - دانشیار دانشگاه تبریز (دکتری جغرافیا - سنجش از دور و GIS)
منیژه قهرودی تالی - استاد دانشگاه شهید بهشتی تهران (دکترای جغرافیا - ژئومورفولوژی)
ابوالفضل مسعودیان - استاد دانشگاه اصفهان (دکترای جغرافیا - اقلیم شناسی)
مسعود مینائی - دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد (دکتری جغرافیا - سنجش از دور GIS)
حسین نگارش - دانشیار دانشگاه سیستان و بلوچستان (دکترای جغرافیا - ژئومورفولوژی)
احمد نوحه گر - استاد دانشگاه تهران (گروه برنامه ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست)
سعدالله ولایتی - استاد دانشگاه فردوسی مشهد (دکترای زمین شناسی)
مجتبی یمانی - استاد دانشگاه تهران (دکترای جغرافیا - ژئومورفولوژی)

Prof. Victor R. Baker (Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona)
Prof. Ziyadin Çakir (Department of Geology, Istanbul Technical University)
Prof. Gao-Lin Wu (Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences)

جعفر جوان - استاد دانشگاه فردوسی مشهد (دکترای جغرافیا - روستایی)
زهرا بیگم حجازی زاده - استاد دانشگاه خوارزمی تهران (دکترای جغرافیا - اقلیم شناسی)
سید رضا حسین زاده - دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد (دکترای جغرافیا - ژئومورفولوژی)
بهروز ساری صراف - استاد دانشگاه تبریز (دکترای جغرافیا - اقلیم شناسی)

مقالات نمودار آرای نویسندگان است و به ترتیب وصول و تصویب درج می شود.

بر اساس آئین نامه کمیسیون نشریات وزارت علوم تحقیقات و فناوری از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی و انجمن کواترنری ایران است
مدیر داخلی: دکتر ندا محسنی کارشناس اجرایی: سید محمد علی موسوی ویراستاری انگلیسی: مرکز ویراستاری ادبیات و علوم انسانی (عبداله نوروزی)
ویراستاری ادبی: دکتر جواد میزبان حروف نگاری و صفحه آرایی: الهه تجویدی طراحی جلد: امیراسفندیار عامل محرابی

بر اساس سیاست دانشگاه فردوسی مشهد این نشریه به صورت الکترونیکی چاپ می شود و هیچ نسخه کاغذی ندارد

نشانی: مشهد دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، کد پستی ۹۱۷۹۴۸۸۳

نشانی اینترنتی: <http://geoeh.um.ac.ir> E-mail: geo.eh@um.ac.ir

شماره پروانه: ۳/۲۷۱۱۶- این مجله در نشست کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور مورخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۰، رتبه علمی- پژوهشی دریافت کرده است.

این مجله در پایگاه های زیر نمایه می شود:

- پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)
- پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)
- پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)
- DOAJ (Directory of Open Access Journals)
- EBSCO Information Services

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱

شاپا چاپی : ۱۶۸۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی : ۲۳۸۳-۳۰۷۶

راهنمای تدوین و نحوه ارسال مقاله برای چاپ در فصلنامه علمی – پژوهشی

جغرافیا و مخاطرات محیطی

۱-مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی به دلیل تخصصی بودن فقط در موضوعات مرتبط با مخاطرات محیطی (طبیعی و انسانی) پذیرای مقالات می باشد.

۲-مقاله باید حاصل کار پژوهشی نویسنده (یا نویسندگان) باشد، قبلاً در نشریه دیگری اعم از داخلی و خارجی و یا مجموعه مقالات همایش‌ها به چاپ نرسیده باشد و همچنین به طور همزمان برای مجله دیگری ارسال نشده باشد.

تبصره: مقاله‌های ارایه شده در همایش‌ها و مجامع علمی مشروط به اینکه با تغییرات قابل توجه و افزودن مطالب جدید همراه باشد، قابل بررسی خواهد بود.

۳-مقاله‌های مروری که پیشرفت‌های جدید در موضوعات مجله را در بر می‌گیرد، از نویسندگان مجرب و دارای مقالات پژوهشی در زمینه مورد نظر پذیرفته می‌شود.

۴-ساختار مقاله باید مشتمل بر عنوان، اسامی نویسنده (یا نویسندگان) چکیده فارسی، واژگان کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها (شامل زیر بخش‌های: منطقه مورد مطالعه، مطالعات میدانی، آنالیزهای آزمایشگاهی و روش‌های استفاده شده)، نتایج و بحث، جمع‌بندی، قدردانی و تشکر، فهرست منابع و ضمائم و چکیده مبسوط انگلیسی باشد.

نکته: لطفاً دقت شود که همه بخش‌ها و زیر بخش‌ها به استثنای تیتیر "چکیده" شماره‌گذاری شوند. همچنین زیر بخش‌های مربوط به "مواد و روش‌ها" بر حسب ماهیت کار قابل تغییر است.

۵- علاوه بر شماره صفحه، تمامی خطوط بطور پیوسته باید شماره گذاری شوند (Line Numbers).

۶-چکیده مبسوط انگلیسی حداقل ۲ و حداکثر ۳ صفحه و اجزاء آن شامل: Introduction, Materials and methods, Result and discussion, Conclusion, Key words باشد

۷-حجم مقاله شامل تمام اجزاء آن با رعایت استانداردهای حروفچینی مجله باید حداکثر ۱۸ صفحه باشد. مقالات با حجم بیش از ۱۸ صفحه قابل بررسی نخواهد بود.

۸- حروفچینی مقاله باید در برنامه Word 2007 و بالاتر بر روی کاغذ A4 با فواصل ۳,۵ سانتی‌متر از بالا، ۳,۵ سانتی‌متر از پایین، ۳ سانتی‌متر از چپ و ۳ سانتی‌متر از راست صورت گیرد. Header: ۲,۷۵ و Footer: ۳ عنوان مقاله با قلم ۱۳ پرنرنگ B Lotus. اسم، فامیل- مرتبه علمی با قلم ۱۱ پرنرنگ B Lotus، نویسنده مسؤول، شماره تلفن و ایمیل نویسنده به صورت پاورقی و با قلم ۱۱ B Lotus باشد. چکیده ۱۲ پرنرنگ B Lotus، متن چکیده ۱۲ B Lotus. (چکیده و متن آن با فواصل ۲ سانتی‌متر از سمت چپ و ۲ سانتی‌متر از سمت راست از متن اصلی باشد). تیتیرهای اصلی متن ۱۲ پرنرنگ B Lotus با فاصله ۱۲ pt از پاراگراف قبل و ۸ pt از پاراگراف بعد. کل متن با ۱۳ B Lotus.

۹- شماره و عنوان جداول در بالا و با قلم ۱۲ پرنرنگ B Lotus نوشته شود.

۱۰- تمام نقشه‌ها، نمودارها، شکل‌ها و عکس‌ها به طور یکنواخت با عنوان شکل شماره گذاری و شماره و عنوان اشکال در زیر آن با قلم ۱۲ پرنرنگ B Lotus درج گردد.

۱۱- شیوه ارجاع انواع منابع در انتهای مقاله باید بر اساس حروف الفبا و بصورت زیر باشد. در ابتدا منابع فارسی (B Lotus 12) و در ادامه منابع انگلیسی (Times New Roman 11) ذکر شوند:

Johnson RM, Warburton J. 2002. Flooding and geomorphic impacts in a mountain torrent: Raise Beck, central Lake District, England. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 945-969.

کتاب انگلیسی:

Bull WB. 1991. *Geomorphic Responses to Climate Change*. University Press, Oxford.

Amoroso GG, Fassina V. 1983. *Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection*. Elsevier Science Publishers: Amsterdam

مقالات فارسی:

حجازی زاده، زهرا. (۱۳۷۶). نقش پرفشار جنب حاره در تغییر فصل ایران. چاپ در مجموعه مقالات کنگره جغرافیدان ایران. تبریز، صص ۱۸۵-۱۷۴.

بحری، معصومه؛ دستورانی، محمدتقی. (۱۳۹۶). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز اسکندری. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره ۲۲، ۳۷-۵۷.

کتاب فارسی:

مخدوم، مجید. (۱۳۸۱). *شالوده آمایش سرزمین*. انتشارات دانشگاه تهران.

تبصره ۱: در صورتی که صاحب اثر شخصیت حقوقی یعنی سازمان یا نهاد دولتی باشد به جای نام خانوادگی و نام نویسنده عنوان سازمان و یا نهاد مربوطه ذکر می شود.

تبصره ۲: در صورت استفاده از پایان نامه و رساله های تحصیلات تکمیلی، ذکر نام استاد راهنما، عنوان رشته و نام دانشگاه الزامی است.

- نحوه ارجاع داخل متن بر اساس نام نویسنده و سال انتشار طبق نمونه های زیر با قلم ۱۲ B Lotus برای مقالات فارسی و قلم Times New Roman برای مقالات انگلیسی:

(محمودی، ۱۳۶۸)، (بحری و دستورانی، ۱۳۹۶)، (محمودی و همکاران، ۱۳۶۸)

(Johnson & Warburton, 2002)، (Baker et al., 1988)، (Knox, 2000)

۱۳- مقاله در دو قالب، یک فایل Word و یک فایل Pdf آماده و با ثبت نام در سامانه مجله به آدرس: <http://Geoeh.um.ac.ir> ارسال گردد. مکاتبات بعدی می تواند از طریق پست الکترونیک مجله به آدرس Geo.eh@um.ac.ir انجام گیرد.

۱۴- مسئولیت صحت مطالب مقاله از نظر حقوقی به عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود.

۱۵- مجله حق رد یا قبول و نیز ویراستاری مقالات را برای خود محفوظ داشته و مقالات دریافتی عودت داده نخواهد شد.

۱۶- مقاله های ارسال شده به نویسنده جهت انجام اصلاحات در صورت عدم دریافت پاسخ در تاریخ تعیین شده، به منزله انصراف از چاپ تلقی می گردد.

داوران این شماره به ترتیب حروف الفبا

۱. عبدالمجید احمدی (استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای دانشگاه بزرگمهر قائنات)
۲. ام البنین بذرافشان (دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان)
۳. علیرضا بنی واهب (استادیار گروه جغرافیای دانشگاه آزاد اسلامی تربت حیدریه)
۴. شهرام بهرامی (دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی)
۵. ابوالفضل بهنیاfer (دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد)
۶. مریم بیاتی خطیب (استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز)
۷. اصغر تیموری (گروه جغرافیای انسانی و آمایش، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی)
۸. محمد صادق دهقانپان (استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس)
۹. محسن رضائی عارفی (دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری-مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد)
۱۰. احمدعلی زارع (استادیار مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان یزد)
۱۱. بهجتیار فیضی زاده (دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS دانشگاه تبریز)
۱۲. ندا محسنی (دانشیار جغرافیای طبیعی - ژئومورفولوژی گروه جغرافیا دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۳. اسماعیل نجفی (استادیار گروه جغرافیای دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان)
۱۴. روح الله ندری (استادیار مخاطرات ژئومورفیک-هیدرولوژیک دانشگاه پیام نور قم)
۱۵. علی اکبر نظری سامانی (دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تهران)

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
۱	● فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم سنجی) سعید نصیری زارع، امیر کرم
۲۱	● پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی ... شهرام روستایی، سمیرا نجف وند
۴۳	● ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP ... موسی عابدینی، لیلا آقایی، صیاد اصغری سراسکانرود
۶۹	● ارزیابی کارایی مدل‌های دو متغیره در تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان نرگس سقازاده، هدی قاسمیه، ابراهیم امیدوار، یاسر مقصودی
۹۹	● تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری ... سیدرضا حسین زاده، ابراهیم اکبری، مهدی جوانشیری، زینت محمدپور سنگانی
۱۲۷	● پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار ... شبنم مهرنور، مریم رباطی، میرمسعود خیرخواه زرکش، فروغ فرساد، شهرام بیک‌پور
۱۴۹	● پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره ... صیاد اصغری سراسکانرود، الناز پیروزی، لیلا آقایی
۱۷۳	● بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی ... زهرا آزر، حمید مهرابی، سعید نادری
۱۹۳	● ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ... امین رضایی شهابی، علیرضا عرب، حسن احمدی، امیر پیشوا، محمدآقبال شه‌بخش موسی‌زهی
۲۲۱	● تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای حمید گنجائیان، معصومه اسدی، فاطمه منبری، عطربین ابراهیمی



بسمه تعالی

توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه فی مابین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن کواترنری ایران و به منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه علمی با عنوان جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می گردد.

ماده ۱- نشریه به صورت فصلنامه و هر سال چهار شماره به زبان فارسی منتشر می شود. صاحب امتیاز نشریه دانشگاه فردوسی مشهد بوده و اهداف آن عبارت اند از: گسترش و ارتقاء پژوهش در سطح کشور، کمک به ایجاد ارتباط و همکاری علمی بین محققین این زمینه در ایران، انتشار نتایج پژوهش های علمی.

ماده ۲- امور علمی نشریه را هیأت تحریریه که حداقل یک چهارم اعضای آن از اعضای انجمن هستند انجام خواهند داد.

تبصره ۱: انجمن متعهد می شود که حداقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای هیأت علمی دانشگاه ها انتخاب نماید.

تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی مشهد با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهد شد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

ماده ۳- دفتر نشریه در موسسه متقاضی نشریه خواهد بود و با مسئولیت مدیر مسئول اداره خواهد شد.

ماده ۴- روی جلد نشریه علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن کواترنری ایران با اندازه یکسان چاپ خواهد شد.

ماده ۵- در صفحه حقوقی تمامی شماره های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن کواترنری ایران است».

ماده ۶- کلیه هزینه های آماده سازی نشریه اعم از هزینه های داور، حق الزحمه ویراستار مجری، امور دفتری، پست و مخابرات، تایپ،... بر عهده دانشگاه فردوسی مشهد خواهد بود.

ماده ۷- هزینه های لیتوگرافی و چاپ نشریه (فیلم و زینگ، کاغذ، چاپ نشریه و جلد، صحافی) به صورت مشترک و با سهم مساوی توسط انجمن و موسسه متقاضی پرداخت خواهد شد.

ماده ۸- هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد بایستی تصمیم خود را حداقل شش ماه زودتر کتباً به اطلاع طرف مقابل برساند. در صورت توافق طرفین به فسخ توافقنامه، نتیجه توسط دبیر انجمن یا مدیر مسئول به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور اعلام شود. موسسه متقاضی حداکثر به مدت شش ماه از تاریخ فسخ توافقنامه فرصت دارد تا با تکمیل مدارک و ارسال سه شماره آخر از نشریه به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور، تقاضای اعتبار مستقل نماید تا مراحل ارزیابی نشریه صورت گیرد.

۹- این قرارداد در ۸ ماده و دو تبصره در دو نسخه به مدت ۴ سال تنظیم گردید و در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ توسط دکتر احمد رضا بهرامی به نمایندگی از دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر فریبرز قریب (رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران) به امضاء رسید.

دکتر احمد رضا بهرامی

معاون پژوهشی و فن آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری



انجمن کواترنری ایران

دکتر فریبرز قریب

رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران

انجمن کواترنری ایران



بسمه تعالی



توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه بین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی و به منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه (علمی پژوهشی) با عنوان جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می‌گردد.

ماده ۱: نشریه به صورت فصلنامه و هر سال چهار شماره به زبان فارسی منتشر می‌شود. صاحب امتیاز نشریه دانشگاه فردوسی مشهد بوده و اهداف آن عبارتند از: گسترش و ارتقاء پژوهش در سطح کشور، کمک به ایجاد ارتباط و همکاری علمی بین محققین این زمینه در ایران، انتشار نتایج نوآورانه پژوهشهای علمی.

ماده ۲: امور علمی نشریه را هیأت تحریریه، که حداقل یک چهارم اعضای آن از بین اعضای انجمن هستند، انجام خواهند داد. تبصره ۱: انجمن متعهد می‌شود که لااقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای فعال هیأت علمی دانشگاهها انتخاب نماید. تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهد شد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین‌نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

ماده ۳: دفتر نشریه در موسسه متقاضی نشریه و با مسئولیت مدیر مسئول اداره خواهد شد.

ماده ۴: روی جلد مجله علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن ایرانی ژئومورفولوژی با اندازه یکسان نیز چاپ خواهد شد.

ماده ۵: در صفحه حقوقی تمامی شماره‌های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی است».

ماده ۶: کلیه هزینه‌های آماده سازی نشریه تا قبل از لیتوگرافی اعم از هزینه‌های داوری، حق الزحمه ویراستار، مجری، امور دفتری، پست و مخابرات، تایپ،... برعهده دانشگاه فردوسی مشهد خواهد بود.

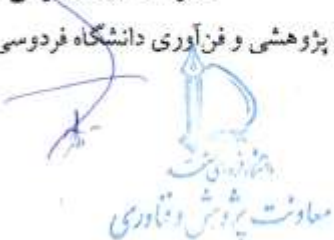
ماده ۷: هزینه‌های لیتوگرافی و چاپ نشریه (فیلم و زینگ، کاغذ، چاپ نشریه و جلد، صحافی) به صورت مشترک و با سهم مساوی توسط انجمن و موسسه متقاضی پرداخت خواهد شد.

ماده ۸: هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد باید تصمیم خود را حداقل شش ماه زودتر کتباً به اطلاع طرف مقابل برساند. در صورت توافق طرفین به فسخ توافقنامه، نتیجه توسط دبیر انجمن یا مدیر مسئول به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور اعلام شود. موسسه متقاضی حداکثر به مدت شش ماه از تاریخ فسخ توافقنامه فرصت دارد تا با تکمیل مدارک و ارسال سه شماره آخر از نشریه به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور، تقاضای اعتبار مستقل نماید تا مراحل ارزیابی نشریه صورت گیرد.

۹- این قرارداد در ۸ ماده و دو تبصره در دو نسخه به مدت ۴ سال تنظیم گردید و در تاریخ ۱۳۹۸/۸/۲ توسط دکتر احمد رضا بهرامی به نمایندگی از دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر مجتبی یمانی (رییس هیأت مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی) به امضاء رسید.

دکتر احمد رضا بهرامی

معاون پژوهشی و فن آوری دانشگاه فردوسی مشهد



دکتر مجتبی یمانی

رییس هیأت مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی



معاونت پژوهش و فن آوری

به نام خداوند جان و خرد

سخن سر دیر

انتشار این ویژه‌نامه، که مصادف با دهمین سال انتشار مجله *جغرافیا و مخاطرات محیطی* است و با تشریک مساعی نویسندگان محترم به سرانجام رسیده است، امیدواریم به‌عنوان آخرین هشدار جدی به مدیران و سیاستمداران کشور در توجه بیشتر به «مخاطره فرونشست زمین» تلقی گردد. سال‌هاست که متخصصین و کارشناسان علوم زمین درباره علل، روندها و پیامدهای فرونشست زمین در دشت‌های داخلی ایران می‌نگارند، اخطار می‌دهند و به ارائه راهکار می‌پردازند؛ اما متأسفانه نه‌تنها تغییری در رویکردهای موجود حاصل نمی‌شود، بلکه با روش‌های مخرب‌تر در مواجهه با محیط طبیعی ایران رفتار می‌شود. ایران به دلیل قرار گرفتن در مرزهای انتقال تکنیکی و اقلیمی، جزو مناطق حساس کره زمین با درجه خطرپذیری جغرافیایی بالا به‌شمار می‌رود. چنین مناطقی واکنش‌های بزرگ به تغییرات کوچک نشان می‌دهند و زمانی که تغییرات بزرگی تحمیل می‌شود، واکنش‌ها فاجعه‌آمیز خواهد بود. بدون شک تغییرات بزرگ در کشور ما ناشی از دخالت‌های آتروپوژنیک در قالب بهره‌برداری‌های بیش از توان محیط و یا تغییرات کاربری گسترده به وقوع پیوسته و ادامه این روند مشکلات عظیم‌تری را در پی خواهد داشت.

مطالعات نشان می‌دهد که پدیده فرونشست به‌عنوان یکی از این رخداد‌های رو به گسترش حاصل مدیریت نابخردانه منابع آب در کشور است. برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی از یک‌طرف و انسداد جریان‌های سطحی در قالب سدسازی‌های بی‌رویه از طرف دیگر، پدیده فرونشست تشدید یافته را موجب گردیده و دشت‌های داخلی ایران را با بحران‌های جدی مواجه کرده است. تأثیر اولیه مخاطره فرونشست متراکم شدن رسوبات منفصل و از دست رفتن پتانسیل نگهداشت آب آن‌ها و همچنین غیرقابل نفوذ شدن سطح دشت‌هاست که هر دو منجر به از دست رفتن بیشتر رواناب‌های سطحی و عدم تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. اثرات پیشرفته‌تر پدیده فرونشست شامل تغییرات توپوگرافی و شیب سطح دشت‌ها، شکل‌گیری چاله‌های محلی، تغییر شبکه زهکشی، شکست زمین، حفره‌های ریزشی، توسعه رودخانه‌های زیرزمینی و سپس حمله به تأسیسات و زیربنای انسان‌ساخت است. تقریباً تمام این تغییرات در دشت‌های داخلی ایران شناسایی، تحلیل و معرفی شده است.

اندازه‌گیری‌های حاصل از ایستگاه‌های GPS و شواهد میدانی، میزان فرونشست زمین در ایران را چندین برابر متوسط جهانی نشان می‌دهد و در حال حاضر، وظیفه محققان و مجریان باید به سمت بازسازی و تعادل بخشی شرایط نابسامان فعلی گرایش یابد. گرچه ارائه روش‌های مناسب بازسازی بسیار دشوار و هزینه‌های این بازسازی بسیار سنگین خواهد بود اما چاره‌ای جز شروع این مسیر دشوار وجود ندارد. لازم است در قالب طرح‌های جامع احیای ژئومورفیک - اکولوژیک دشت‌های کشور، پروژه‌های اجرایی کوتاه‌مدت و بلندمدت با پشتوانه قانونی و مالی مناسب ارائه و تا حصول نتیجه مورد پیگیری دست‌اندرکاران مربوطه قرار گیرد. مجله *جغرافیا و مخاطرات محیطی* بر اساس رسالتی که بر عهده دارد، تلاش خواهد کرد هر سال یک ویژه‌نامه را به یکی از مخاطرات محیطی ایران، اعم از مخاطرات طبیعی یا انسانی، اختصاص دهد. مراتب تقدیر و تشکر خود را از نویسندگان محترم که این دعوت را می‌پذیرند، صمیمانه ابراز می‌نمایم.



RESEARCH ARTICLE

DOI:10.22067/geoh.2022.75885.1202

Open access

A Meta-Method for Identifying the Subject of Scientific Research on Land Subsidence using Scientometric Approach

Saeid Nasire Zare^{a*}, Amir Karam^b

^a PhD Candidate, Department of Geography and Rural Planning, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

^b Associate Professor, Department of Natural Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 17 March 2022

Revised: 30 April 2022

Accepted: 7 May 2022

Abstract

One of the dangers in many areas in recent years is subsidence. Landslides are less harmful than other hazards and its adverse consequences will directly affect human, industrial, agricultural, and civil development. The importance of paying attention to this issue is that the most harmful side effects are irreparable. Scientometric research have provided a comprehensive understanding of global research on the subject. Data were obtained from the Scopus Scientific Database (1965-2022). Most of the scientific research on land subsidence has been on the United States and China. The most important aggravating factors for the occurrence of hazards include the exploitation of groundwater and mineral extraction, which has been emphasized in most studies. On the other hand, the use of scientific technologies over the past years has become more widespread in landslide research. Now it is used more to predict the risk. Most research on the risk of land subsidence has focused on the use of methods and models, but its impacts on different aspects of human life have not been considered. The results of this research can help reduce and manage the negative consequences of land subsidence.

Keywords: Science Study, Scientometrics, Natural Hazards, Land Subsidence

*. Corresponding author: Saeid Nasire Zare E-mail: std_nasire_saeid@khu.ac.ir Tel: + 989194660676

How to cite this Article: Nasire Zare, S., Karam, A. (2023). A Meta-Method for Identifying the Subject of Scientific Research on Land Subsidence using Scientometric Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 1-19.

DOI:10.22067/geoh.2022.75885.1202



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>



<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75885.1202>



جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۹-۱

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم‌سنجی)

سعید نصیری زارع^۱ - دانشجوی دکتری گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
امیر کرم - دانشیار گروه ژئومورفولوژی طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۰ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۲/۱۷

چکیده

یکی از مخاطراتی که در سال‌های اخیر در بسیاری از مناطق رخ داده، مخاطرات ناشی از فرونشست است. فرونشست زمین در مقایسه با دیگر مخاطرات، خسارات جانی کمتری دارد و پیامدهای سوء برجای مانده از آن به‌طور مستقیم بر توسعه انسانی، صنعتی، کشاورزی و عمرانی تأثیرگذار خواهد بود. اهمیت نگرش به این مسأله با دانستن این نکته که بیشترین عوارض زیان‌بار ناشی از آن جبران‌ناپذیر است، مشخص می‌گردد. این تحقیق، علی‌رغم تحقیقات فرونشست زمین در کشورمان، رویکردی متفاوت نسبت به موضوع مورد نظر داشته، در چارچوب تحقیقات علم‌سنجی به ارائه شناخت جامع از تحقیقات جهانی در موضوع مورد نظر پرداخته است. جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت اسنادی و از پایگاه علمی اسکوپوس (۲۰۲۲-۱۹۶۵) به دست آمد. بیشترین تحقیقات علمی در موضوع فرونشست زمین برای کشورهای آمریکا و چین بوده و کشورمان نیز تحقیقات قابل توجهی انجام داده است. مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده برای وقوع مخاطره شامل بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و برداشت مواد معدنی بوده که در بیشتر تحقیقات بدان تأکید شده است. در سوی دیگر پیدایش فناوری‌های علمی نیز در طول سال‌های گذشته، ابعاد گسترده‌تری در تحقیقات فرونشست زمین پیدا کرده که اکنون استفاده از آن بیشتر برای پیش‌بینی مخاطره بوده است. به‌طورکلی تمرکز بیشتر تحقیقات در مخاطره فرونشست زمین بر روی استفاده از

Email: std_nasire_saeid@khu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۹۴۶۶۰۶۷۶

نحوه ارجاع به این مقاله:

نصیری زارع، سعید؛ کرم، امیر؛ ۱۴۰۱. فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین یک تحقیق با رویکرد علم‌سنجی. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۱۹-۱

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75885.1202>

روش‌ها و مدل‌ها بوده و در تحقیقات تأثیر و پیامدهای آن بر جنبه‌های زندگی انسان‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. تردیدی نیست انجام این تحقیقات می‌تواند به کاهش و مدیریت پیامدهای منفی فرونشست زمین کمک نماید.

کلیدواژه‌ها: بررسی علم، علم‌سنجی، مخاطرات طبیعی، فرونشست زمین.

۱- مقدمه

فرونشست زمین (پایین آمدن سطح زمین)، یک خطر بالقوه مخرب است که می‌تواند توسط عوامل بسیاری از محرک‌های طبیعی یا انسانی ایجاد شود که عمدتاً ناشی از حرکت جامد یا سیال در زیر زمین است (هررا گارکیا و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ زوکاراتو و همکاران^۲، ۲۰۱۸). وقوع این پدیده به‌طور دائم ظرفیت ذخیره‌سازی سیستم آبخوان را کاهش، باعث ایجاد شکاف در زمین، آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی و همچنین حساسیت و خطر سیل را افزایش می‌دهد (فمیگلیتی^۳، ۲۰۱۴). فرونشست زمین یک مشکل جهانی (هررا گارکیا و همکاران، ۲۰۲۱؛ کوک و کاستا^۴، ۲۰۲۱؛ گالووی و همکاران^۵، ۲۰۱۶)، برای جوامع انسانی و محیط‌زیست بوده (تئاتینی و همکاران^۶، ۲۰۱۸؛ یو و پرینگس^۷، ۲۰۱۷) و این در حالی است که در طول سال‌های آینده نیز به دلیل رشد جمعیت جهانی، اقتصادی و بالطبع افزایش تقاضای استفاده و کاهش آب‌های زیرزمینی، موجب تشدید وقوع این مخاطره خواهد شد (فمیگلیتی، ۲۰۱۴).

فرونشست زمین در مقایسه با دیگر مخاطرات زمین‌شناختی مانند زمین‌لرزه، سیل و زمین‌لغزش، خسارات جانی کمتری دارد. از سوی دیگر پیامدهای سوء برجای مانده از آن به حدی است که به‌طور مستقیم بر توسعه انسانی، صنعتی، کشاورزی و عمرانی تأثیرگذار خواهد بود. اهمیت نگرش به این مسأله با دانستن این نکته که بیشترین عوارض زیان‌بار ناشی از بروز این پدیده جبران‌ناپذیر است، مشخص می‌گردد (رکنی، ۱۳۹۷: ۴). به‌این ترتیب، شناسایی پیامدهای مخرب پدیده و تعیین کمیت آن‌ها از نظر اثرات فیزیکی مختلف و هزینه‌های اقتصادی آن، اولین گام برای تهیه سیاست‌ها و برنامه‌ریزی برای آن بوده (دینار و همکاران^۸، ۲۰۲۱) و تردیدی نیست که موضوع مورد نظر نیز در مطالعات بسیاری مورد توجه قرار گرفته است.

1 Herrera-García et al

2 Zoccarato et al

3 Famiglietti

4 Kok and Costa

5 Galloway et al

6 Teatini et al

7 Yoo and Perrings

8 Dinar et al

اما در ارتباط با موضوع فرونشست زمین؛ بیشتر مناطق مختلف کشورمان به دلیل حاکمیت شرایط اقلیمی و عوامل دخیل انسانی (شریفی کیا، ۱۳۹۰)؛ وقوع این پدیده و پیامدهای مخرب آن بسیار محتمل است. تحقیقات متفاوتی نیز در موضوع مورد نظر از سوی محققان در کشورمان انجام شده ولی آنچه که می تواند بسیار مهم باشد، تحلیل علمی تحقیقات جهانی و مطالعات مرتبط به آن است. اکنون حرکت به سوی جامعه ای مبتنی بر دانش مقوله ای است که امروزه بیشتر مورد بحث قرار گرفته و آگاهی از تحقیقاتی که در موضوع فرونشست زمین انجام شده، می تواند شناخت مناسب تری را پیش روی محققان در کشورمان قرار دهد. دستیابی به هدف مورد نظر می تواند در جهت گیری های آینده تحقیقات و ترغیب محققان در کشورمان به انجام این تحقیقات مناسب گردد؛ اما برای دست یافتن به اهداف مورد نظر، روش های علم سنجی روشی مناسب برای آن هستند.

علم سنجی مطالعه کمی علم، ارتباطات در علم و سیاست علمی است (هس^۱، ۱۹۹۷). علم سنجی یکی از متداول ترین روش های ارزیابی فعالیت های علمی و مدیریت پژوهش است. در این دانش، ارتباطات علمی و شیوه های تولید، اشاعه و بهره گیری از اطلاعات علمی به روش غیرمستقیم و یا بررسی منابع و مأخذ آنها انجام می شود (عصاره و همکاران، ۱۳۸۷). برخی از مضامین اصلی آن شامل روش های سنجش کیفیت و تأثیر تحقیق، درک فرآیندهای استنادی، نقشه برداری از زمینه های علمی و استفاده از شاخص ها در سیاست تحقیق و مدیریت است (یانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۰؛ مینگرس و لیدسدورف^۳، ۲۰۱۵). روش های علم سنجی به ارزشیابی کمی فعالیت های پژوهشی، بررسی و کشف نظام و ساختار یک حوزه علمی و مقایسه بیرونی و درونی فعالیت های علمی می پردازند که می تواند به بهره گیری کارآمدتر از منابع علمی برای بهینه سازی ساختارهای اقتصادی- اجتماعی کمک کند (بگالکوتی و حوسامانی^۴، ۲۰۱۴؛ دجالالینیا و همکاران^۵، ۲۰۱۲؛ سنگیو پتا^۶، ۱۹۹۲). این روش ها به طور فزاینده ای برای ارزیابی و مقایسه عملکرد تحقیقات در مناطق جغرافیایی استفاده (لیو و همکاران^۷، ۲۰۱۸) و مورد علاقه بسیاری از محققین در زمینه های مختلف علمی هستند (مرگیو و یانگ^۸، ۲۰۱۷). استفاده از این روش ها می تواند به درک وضعیت علمی و مسیرهای تحقیقاتی، کمک (مائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۴) و از همه مهم تر، این روش ها به شناسایی شکاف های تحقیقاتی کمک خواهند کرد (گال و همکاران^۹، ۲۰۱۵)، که برای هدایت مطالعات

1 Hess

2 Yang

3 Mingers and Leydesdorff

4 Bagalkoti and Hosamani

5 Djalalinia et al

6 Sengupta

7 Liu et al

8 Merigó and Yang

9 Gall et al

آینده نیز ضروری خواهد بود (بافو^۱، ۲۰۲۰). متخصصان علم‌سنجی با استفاده از روش‌ها، فنون و ابزارهای مختلف علم‌سنجی به مطالعه ساختار فکری حاکم بر حوزه‌های متنوع علمی می‌پردازند. تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود در این فنون و شیوه‌ها باعث می‌شود که اطلاعات جدید و متفاوتی درباره حوزه‌های موردپژوهش به دست آید (چانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ کیو و همکاران^۳، ۲۰۱۴؛ سرنکو^۴، ۲۰۱۳). از دیگر سو تنوع داده‌های علم‌سنجی که از تنوع موضوعی و مسئله هر پژوهش نشأت می‌گیرد، موجب ظهور مسیرها و فنونی متفاوت برای تحلیل و پردازش داده‌ها شده است. در حال حاضر پایگاه‌های اطلاعات علمی با یکپارچه‌سازی، تحلیل و مدل‌سازی برای مجموعه داده‌های علمی، امکان مطالعه ساختارها و تحولات علم در مقیاس جهانی را در سطوح ساده تا پیشرفته فراهم می‌آورند. نتایج جستجو در قالب جدول‌ها، گراف‌ها و نقشه‌های متنوع ارائه می‌شوند و یا بر اساس شاخص‌هایی چون نویسندگان، مجلات و موضوع دسته‌بندی شده و از طریق آن، آخرین پیشرفت‌ها در حوزه‌های مختلف علمی قابل‌کشف و تعیین مسیر می‌شوند. این خدمات در تعدادی از این پایگاه‌ها تا استخراج شبکه‌های هم‌نویسندگی، استنادی و سایر شاخص‌های علم‌سنجی گسترش یافته‌اند (لاروو و همکاران^۵، ۲۰۰۹).

در کشورمان ایران نیز، بحث تولید علم و انتشار مقالات بین‌المللی برای نخستین بار در کشور در سال ۱۳۶۵ در دانشگاه تهران مطرح شد. این نخستین گام برای اقدام جدی در زمینه تولید علم بود (موسوی موحدی، ۱۳۸۲). از سال ۱۳۷۹ به بعد نیز موضوع تولید علم در پی تأکید و اصرار مستمر مقام معظم رهبری در حوزه پژوهشی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در قالب نو مطرح و اکنون نیز به دلیل انتشار روزافزون منابع و تحقیقات در حوزه‌های مختلف علمی، بررسی رشد تولیدات و بهره‌گیری از ابزارهای علم‌سنجی به‌طور مستمر مورد استفاده قرار گرفته است. همکاری‌های علمی، ترسیم نقشه علم با استفاده از برنامه‌های علم‌سنجی و مانند آن بیانگر گسترش و استفاده از روش‌های متفاوت در این دانش است. بنابراین بر اساس آنچه که بیان گردید؛ تحقیق ماهیتی متفاوت نسبت به تحقیقات کمی که در موضوع فرونشست زمین در کشورمان انجام شده دارد. تحقیق سعی می‌کند تصویری روشن از تحقیقات جهانی که در ارتباط با موضوع فرونشست زمین انجام شده ارائه دهد.

۱-۱- بررسی پیشینه تحقیق

در ارتباط با فرونشست زمین و همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان گردید، این موضوع در تحقیقات بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس یافته‌های پیشینه، این مخاطره برای اولین بار در چین و شهر شانگهای در سال ۱۹۲۱

1 Baffoe

2 Chang et al

3 Qiu et al

4 Serenko

5 LaRowe et al

مشاهده شد (بی و همکاران^۱، ۲۰۱۶؛ چی و همکاران^۲، ۲۰۱۴). در این شهر با افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین به تهدیدی برای زیرساخت‌هایی همچون پایه ساختمان‌های بلند و تونل‌های مترو شهری بدل شد (لیو و همکاران^۳، ۲۰۲۰). در ایران نیز برای اولین بار در دشت رفسنجان (سال ۱۳۴۶)، نشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی گزارش گردید (عباس نژاد، ۱۳۷۷)، که پس از آن، مطالعات مرتبط نیز انجام گردید. تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع مخاطره (قهرودی تالی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رهنما و میراثی، ۱۳۹۵)؛ شناسایی مناطق برای وقوع فرونشست زمین (رنجبر باروق و فتح‌الله زاده، ۱۴۰۱؛ فرزین کیا و همکاران، ۱۴۰۰؛ مختاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸) و بررسی تغییرات آن بر چشم‌اندازها و تغییرات ژئومورفولوژی (رکنی و همکاران، ۱۳۹۵)، از موضوعات مورد توجه از سوی محققان در کشورمان بوده که اغلب این تحقیقات نیز متکی بر مدل‌ها و روش‌های آماری بوده است؛ اما باین‌حال مهم‌ترین بخش در بررسی پیشنهادی بررسی تحقیقاتی است که در چارچوب تحقیق انجام شده باشد.

تحقیق باقری گاو کش و همکاران (۲۰۲۱) ارتباط بیشتری با موضوع موردبررسی دارد. آنان در مطالعه‌ای مروری به بررسی تحقیقات جهانی در موضوع فرونشست زمین می‌پردازند. بر اساس نتایجی که آنان به دست می‌آورند، دشت‌های ساحلی و نواحی دلتای رودخانه‌ها از نواحی هستند که فرونشست زمین بیشتر اتفاق افتاده است. در میان روش‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده در تحقیقات نیز استفاده از تحلیل‌های فضایی در مقایسه با روش‌های زمینی مانند نقشه‌برداری زمینی پهنه‌بندی، GPS و مدل‌سازی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین بررسی عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین، بررسی رابطه میان وقوع پدیده با عوامل اقلیمی، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی - ویژگی‌های آبخوان و عوامل ناشی از انسان؛ از بررسی‌هایی بوده که در تحقیقات بررسی گردیده است. تحقیق مورد نظر تنها تحقیق مرتبط با موضوع تحقیق است؛ اما بر اساس آنچه که بیان گردید، روش‌های علم‌سنجی یکی از رویکردهای مناسب برای ارزیابی تکامل دانش و حوزه‌های علمی خاص بوده که این بررسی‌ها به‌طور مناسب‌تری نیز در تحلیل تحقیقات مرتبط با مخاطرات به کار رفته است (لیو و همکاران^۴، ۲۰۲۰). در یکی از تحقیقات مورد نظر، دوستان (۱۳۹۸)، به بررسی و تعیین دستاورد تحقیقات خشکسالی در کشورمان می‌پردازد. او در مطالعه خود ۳۸۴ مقاله را از مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) مورد توجه قرار می‌دهد. او بیان می‌کند که پیامدهای خشکسالی به‌صورت آرام و خزشی، موجب بحران بی‌آبی، خشک شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها، شور شدن منابع آب زیرزمینی، خالی شدن روستاها و آسیب‌های اقتصادی - اجتماعی و ... بوده است. همچنین با توجه به کاهش تحقیقات خشکسالی در سال‌های اخیر که حاکی از کفایت ارزیابی صرف خشکسالی است؛ محیط طبیعی ایران نیاز به راه‌حل

1 Ye et al

2 Chai et al

3 Lyu et al

4 Liu et al

عملی و تولید تکنولوژی با توجه به دانش بومی برای کاهش آسیب‌های محیطی دارد که این امر جز با جمع شدن متخصصان حوزه‌های مختلف و پژوهش‌های گروهی مرتبط با بحران‌های محیطی امکان‌پذیر نیست. همچنین در تحقیق دیگر بدری و همکاران (۱۴۰۰)، مطالعات تاب‌آوری و مخاطرات را در کشورمان با رویکرد علم‌سنجی بررسی می‌کنند. مطالعه آنان اگرچه در موضوع مورد مطالعه نبوده اما از آنجاکه در ماهیت تحقیقات علم‌سنجی بوده و به بررسی مخاطرات می‌پردازند، ارتباط نزدیکی با مطالعه حاضر دارد. آنان اطلاعات تحقیق خود را از جستجوی عبارت‌های مرتبط با تاب‌آوری و مخاطرات از بانک اطلاعات: مگیران، مجلات تخصصی نور، مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی و پرتال جامع علوم انسانی به دست می‌آورند. آنان در نتایج تحقیق خود بیان می‌دارند که بررسی تاب‌آوری بلایا از موضوعاتی مانند ارزیابی تاب‌آوری و مفاهیم کلی به‌سوی تاب‌آوری اجتماعی، سرمایه اجتماعی و مدیریت بلایا حرکت کرده است. همچنین آنان در موضوع مورد مطالعه خود به موضوعاتی که کمتر مورد توجه قرار گرفته نیز می‌پردازند. نادیده گرفتن بعد ذهنی تاب‌آوری، تمرکز بیش‌ازاندازه بر روش‌های کمی گرایانه، فقدان شواهد کافی از میزان تاب‌آوری گروه‌های سنی در برابر بلایا، نابرابری جنسیتی و همچنین مناطق کمتر توسعه‌یافته از جمله موضوعات هستند؛ اما در سوی دیگر در مقایسه با تحقیقات داخلی؛ بررسی تحقیقات علمی در خصوص مخاطرات در مطالعات خارجی به‌طور مناسب مورد توجه قرار گرفته است. بررسی پیشینه در ارتباط با مطالعات خارجی، بیانگر تنوع بسیاری در موضوع مخاطرات است.

سویله^۱ (۲۰۱۹)، موضوع سلامت در مخاطرات طبیعی را بررسی می‌کند. او اطلاعات تحقیق خود را از پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس ۲۰۱۷-۱۹۹۰ جمع‌آوری می‌کند. در میان موضوعات مورد توجه، زلزله، درمان در مخاطرات، برنامه‌ریزی مخاطرات، سونامی، سلامت روان، آمادگی در برابر مخاطرات از جمله مهم‌ترین موضوعات هستند. نویسندگان کشور آمریکا، ژاپن و سپس چین بیشترین مشارکت علمی را داشتند. او همچنین در تحقیق خود مهم‌ترین مراکز علمی و مجلات علمی را نیز مشخص می‌کند. باین‌حال او همکاری تحقیقاتی در موضوع مورد بررسی خود را نامناسب می‌داند که تردیدی نیست باید همکاری علمی برای بهبود واکنش جهانی به مخاطرات طبیعی تقویت شود (سویله، ۲۰۱۹). لیو و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۲ تحقیق مناسبی در موضوع زلزله انجام می‌دهند. آنان اطلاعات تحقیق خود را از پایگاه‌های اطلاعاتی SCI و SSCI برای سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۰۰ جمع‌آوری می‌کنند. بیشترین کلمات کلیدی در موضوع مورد بررسی: تکامل، کالیفرنیا، تغییر شکل، مدل، وارونگی، لرزه‌خیزی، تکنونیک، ساختار پوسته، گسل، منطقه، لیتوسفر بوده است. آنان همچنین در تحقیق خود عملکرد تحقیقات را برای نویسندگان، مؤسسات و کشورها بررسی می‌کنند. آنان پیشرفت قابل توجه در تحقیقات زلزله از نظر افزایش تولید علمی و همکاری تحقیقاتی را در میان نویسندگان و کشورها را پیشنهاد می‌کنند (لیو و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در تحقیق دیگر چيو و هو^۲

1 Sweileh

2 Chiu and Ho

(۲۰۰۹)، مخاطره سونامی را در تحقیق خود بر اساس تولیدات علمی که در پایگاه اطلاعاتی SCI موجود است را بررسی می کنند. انگلیسی زبانان انتشار بیشتر تحقیقات و آمریکا و ژاپن بخش بیشتری از تحقیقات مورد نظر را انجام داده اند. همچنین آنان بر اساس روند انتشار تحقیقات علمی، وقوع سونامی در سال ۲۰۰۴ در ویتنام را مهم می دانند که تحقیقات مرتبط با سونامی پس از وقوع این مخاطره در این کشور افزایش پیدا کرده است (چیو و هو، ۲۰۰۷). به طور کلی مرور تحقیقات انجام شده نشان می دهد، موضوع علم سنجی، از زمان شروع این علم مورد توجه تمام علوم در زمینه های مختلف قرار گرفته است. اخیراً استفاده از این علم در موضوعات خاص مانند مخاطرات طبیعی نیز مورد توجه قرار گرفته است. تردیدی نیست که نتایج حاصل از تحلیل این گونه مطالعات می تواند به عنوان ابزاری مناسب در اختیار محققان و برنامه ریزان حوزه علمی مربوطه قرار گیرد. بدین ترتیب تحقیق علی رغم ماهیت تحقیقات فرونشست زمین در کشورمان که اغلب به صورت مطالعات کمی بوده، رویکردی متفاوت نسبت به موضوع مورد نظر دارد.

۲- مواد و روش تحقیق

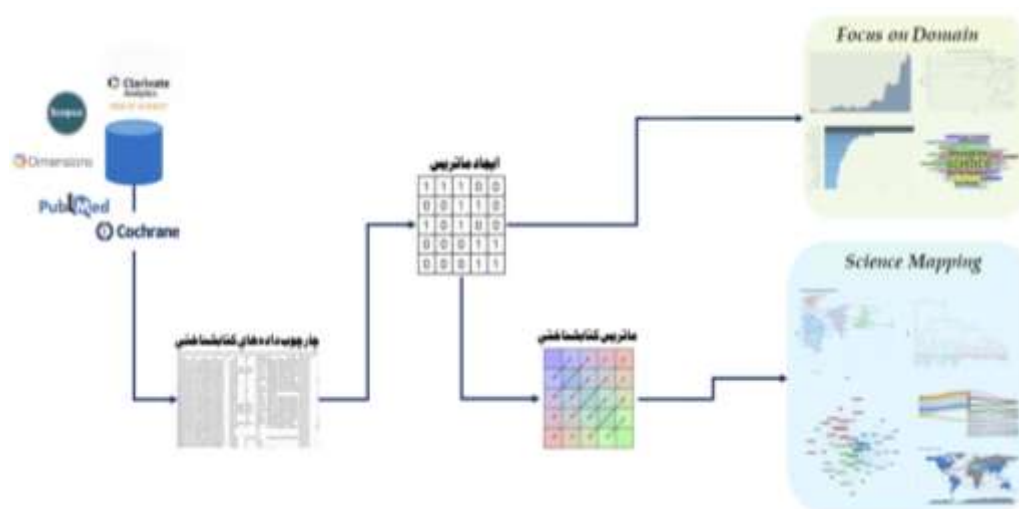
تحقیق حاضر به لحاظ روش در کلیت شیوه فراتحلیل قرار دارد. در این روش، محقق با ثبت ویژگی ها و یافته های توده ای از تحقیقات در قالب مفاهیم کمی، آن ها را آماده استفاده از روش های نیرومند آماری می کند؛ اما در سوی دیگر به لحاظ هدف در زمره مطالعات کاربردی که به روش تحقیقات علم سنجی و کتاب شناسختی انجام می گیرد. در این تحقیق از روش های مطالعات کتابخانه ای به منظور مطالعه ادبیات نظری و جمع آوری اطلاعات تحقیق استفاده شده است. در تحقیق تمام تحقیقات و اسناد مرتبط با فرونشست زمین در پایگاه علمی "Scopus" مورد توجه قرار می گیرد. دلیل انتخاب این پایگاه نیز به دلیل جامعیت و سازماندهی مناسب اطلاعات بوده است. در این پایگاه از جستجوی عبارت های و کلمات کلیدی مرتبط با فرونشست زمین برای جستجو استفاده شده است. نتایج جستجوی این عبارت، ۱۵۹۳ اسناد بود که بیشتر آن به صورت مقالات علمی و زبان این اسناد نیز انگلیسی بوده است (جدول ۱).

جدول ۱- اطلاعات اسناد بازیابی شده در تحقیق

اسناد بازیابی شده	فراوانی	درصد	زبان نوشتار	فراوانی	درصد
مقالات علمی	۹۵۲	۵۹/۸٪	انگلیسی	۱۴۳۹	۹۰/۳٪
مقالات کنفرانسی	۵۷۲	۳۵/۹٪	چینی	۱۲۶	۷/۹٪
فصل کتاب	۲۴	۱/۵٪	فرانسوی	۶	۰/۳۸٪
مقالات مروری	۱۴	۰/۹٪	اسپانیایی	۶	۰/۳۸٪
کنفرانس مروری	۴	۰/۲۵٪	ژاپنی	۳	۰/۱۹٪
سر مقاله	۶	۰/۳۸٪	لهستانی	۲	۰/۱۳٪

درصد	فراوانی	زبان نوشتار	درصد	فراوانی	اسناد بازیابی شده
٪ ۰/۱۳	۲	روسی	٪ ۰/۱۳	۲	کتاب
٪ ۰/۰۶	۱	چکی	٪ ۰/۰۶	۱	گزارش
٪ ۰/۰۶	۱	آلمانی	٪ ۰/۲۵	۴	یادداشت
٪ ۰/۰۶	۱	ایتالیایی	٪ ۰/۵۶	۹	مشخص نشده
٪ ۰/۳۸	۶	نامشخص	٪ ۰/۳۱	۵	سایر
٪ ۱۰۰	۱۵۹۳	مجموع	٪ ۱۰۰	۱۵۹۳	مجموع

اما هدف مطالعه به طور خاص بررسی مقالات علمی در ارتباط با فرونشست زمین بوده و در میان اسناد بازیابی شده این گروه از اسناد مورد توجه قرار گرفتند. دلیل انتخاب این گروه از اسناد، نخست به دلیل اهمیت داشتن این تحقیقات در پیشبرد دانش در موضوعی خاص و سپس برای کاستن از حجم اطلاعات بوده است. برای تحلیل و تفسیر نتایج تحقیق نیز، تعداد بسیاری از برنامه‌ها در علم‌سنجی برای تجسم اطلاعات مانند HistCite, BibExcel, VOSviewer, CiteSpace وجود دارد (کوبو و همکاران، ۲۰۱۱). لذا در تحقیق با تکیه بر توانمندی‌های این برنامه‌ها و نوع اطلاعات، از کتابخانه بیبلیومتریکس در محیط برنامه‌نویسی R و از برنامه Vosviewer استفاده گردید.



شکل ۱- روش‌شناسی تحقیق

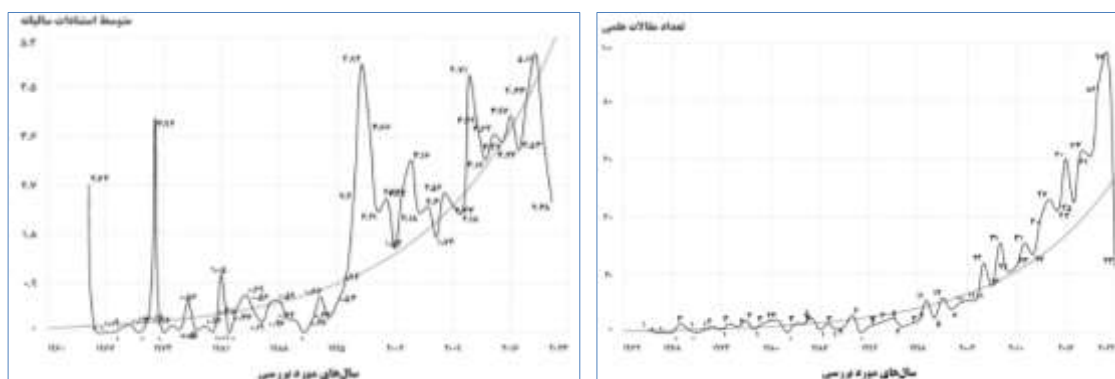
۳- نتایج و بحث

تحقیقات علمی مهم ترین ابزار اشاعه یافته های علمی هستند که به ارائه جدیدترین یافته های علمی در موضوع خاص می پردازند. در تحقیق ۸۸۰ تحقیق علمی در ارتباط با فرونشست زمین مورد توجه قرار گرفت. نخستین تحقیق علمی در سال ۱۹۵۲ منتشر گردیده و بیشترین تعداد مقالات نیز برای سال ۲۰۲۰ بوده است. مقالات مذکور توسط ۲۲۲۱ نویسنده انجام شده که متوسط تعداد همکاری نویسندگان در این مقالات ۲/۶۶ نفر بوده است (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصات توصیفی مقالات علمی فرونشست زمین

معیار	سال	تعداد مقالات	درصد	تعداد استنادات	متوسط استنادات
دوره زمانی موردبررسی	۱۹۶۵ - ۲۰۲۲	۱۹۶۵ - ۱۹۷۰	۵	۰/۶٪	۱۶۲
تعداد مقالات علمی	۸۸۰	۱۹۷۰ - ۱۹۸۰	۲۱	۲/۴٪	۴۱۴
تعداد نویسندگان مقاله	۲۲۲۱	۱۹۸۰ - ۱۹۹۰	۲۷	۳/۱٪	۳۲۵
تعداد منابع مورد استفاده	۲۷۶۹۱	۱۹۹۰ - ۲۰۰۰	۳۹	۴/۴٪	۲۳۴
میانگین استناد برای هر مقاله	۲۳/۲۸	۲۰۰۰ - ۲۰۱۰	۱۶۷	۱۹٪	۱۶۵
تعداد مقالات برای هر نویسنده	۰/۳۹۷	۲۰۱۰ - ۲۰۲۰	۵۰۱	۵۶/۹٪	۶۵
متوسط تعداد نویسندگان در مقالات	۲/۵۲	۲۰۲۰ - ۲۰۲۲	۱۲۰	۱۳/۶٪	۱
شاخص همکاری	۲/۶۶	مجموع	۸۸۰	۱۰۰٪	۱۳۶۶

در شکل (۲)، نیز پراکندگی و توزیع تعداد تحقیقات و استنادات مورد نظر نیز مشخص شده است.



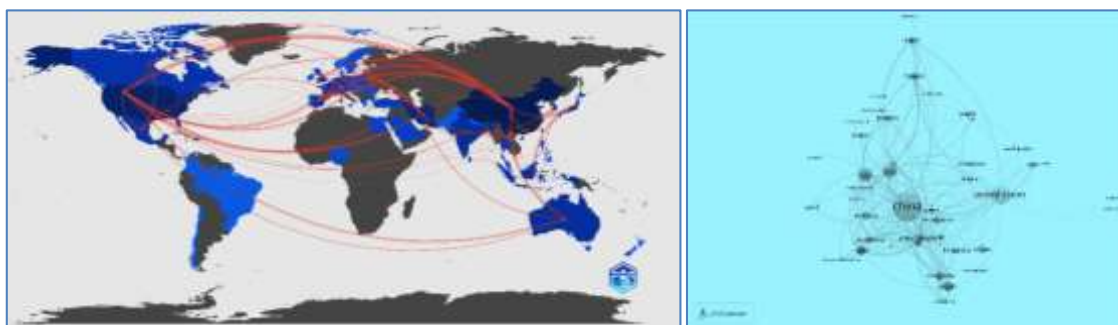
شکل ۲- تعداد مقالات علمی و تعداد استنادات سالیانه برای تحقیقات فرونشست زمین (۱۹۶۵ - ۲۰۲۰)

تحقیقات انجام شده در یک موضوع خاص در هر کشوری، نخست بیانگر توجه و اهمیت یافتن آن موضوع در جامعه و در سوی دیگر مشخص کننده سرآمد بودن کشورها در دانش و موضوعی خاص است. در موضوع فرونشست زمین و تحقیقاتی که در ارتباط با موضوع مورد مطالعه انجام شده، بیشترین تحقیقات علمی برای کشورهای چین و آمریکا بوده که این کشورها به دلیل حجم بیشتر تولیدات علمی، استنادات بیشتری نیز داشته‌اند. کشورمان ایران نیز در میان کشورهای مهم در انجام تحقیقات فرونشست زمین قرار دارد، این موضوع توجه بیشتر نویسندگان کشورمان به موضوع فرونشست و مدیریت آن است.

جدول ۳- رتبه‌بندی کشورها برحسب بیشترین تعداد مقالات، استنادات و همکاری‌های علمی

مقالات	همکاری علمی کشورها	رتبه	استنادات	کشورها	رتبه	معیار	مقالات	کشورها	رتبه	معیار
۳۲	چین - آمریکا	۱	۶۵۷۱	چین	۱	بیشترین استنادها	۳۴۱	چین	۱	بیشترین تولیدات علمی
۱۶	چین - هنگ کنگ	۲	۳۹۷۴	آمریکا	۲		۷۸	آمریکا	۲	
۱۴	چین - استرالیا	۳	۱۹۳۲	ایتالیا	۳		۶۶	ایران	۳	
۱۰	ایتالیا - اسپانیا	۴	۸۶۳	ایران	۴		۵۳	ایتالیا	۴	
۱۰	ژاپن - اندونزی	۵	۵۳۹	ژاپن	۵		۲۸	ژاپن	۵	
۱۰	آمریکا - ایران	۶	۴۴۳	اندونزی	۶		۲۶	هند	۶	
۹	چین - ژاپن	۷	۴۳۶	مکزیک	۷		۱۶	اندونزی	۷	
۹	چین - انگلستان	۸	۴۳۳	آلمان	۸		۱۲	استرالیا	۸	
۸	مکزیک - کانادا	۹	۴۱۷	تایلند	۹		۱۲	مکزیک	۹	
۸	آمریکا - مکزیک	۱۰	۳۵۱	استرالیا	۱۰		۱۱	هلند	۱۰	

در سوی دیگر بررسی همکاری علمی میان محققان کشورها نیز می‌تواند نتایج مناسبی را مشخص نماید. همکاری‌های علمی، شکل گسترده‌ای از ارتباطات علمی میان نویسندگان بوده که نتایج مطالعات انجام شده در این حیطه، بر اهمیت و مزایای آن تأکید دارد. بیشترین تعداد همکاری‌های علمی برای موضوع تحقیقات فرونشست زمین برای دو کشور چین و آمریکا بوده و نویسندگان کشورمان ایران نیز بیشترین همکاری خود را با نویسندگان کشور آمریکا داشته است.



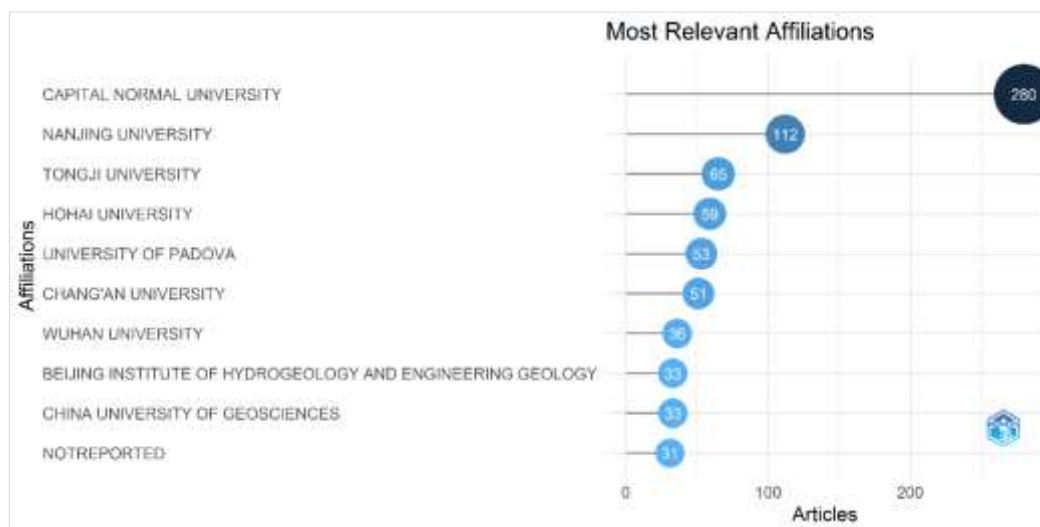
شکل ۳- همکاری علمی میان کشورها در موضوع تحقیقات فرونشست زمین

اما در این بخش به بررسی مهم‌ترین نویسندگان و مراکز علمی که بیشترین تحقیقات علمی در موضوع فرونشست زمین را انجام داده‌اند؛ پرداخته می‌شود. برای این بررسی شاخص‌های متفاوتی برای شناسایی مهم‌ترین نویسندگان ارائه شده است. شاخص h_Index در سال ۲۰۰۵ توسط هیرش برای بررسی برونداد علمی- پژوهشی محققان به صورت انفرادی ارائه شد (هیرش، ۲۰۰۵). این شاخص بیانگر این است که هریک از محققان به تنهایی چه نقشی در پیشبرد و گسترش مرزهای علوم در حوزه‌های مختلف دانش دارند که طبیعتاً بالاتر بودن این شاخص بیانگر توان علمی و تأثیرگذاری محققان بر پیشرفت علمی در آن موضوع است.

جدول ۴- نویسندگان و مراکز علمی مهم در تحقیقات فرونشست زمین بر اساس شاخص اچ اندیکس

مراکز علمی				نویسندگان			
کشور	مقالات	مهم‌ترین مراکز علمی	رتبه	شروع تحقیق علمی	h_Index	نویسنده	رتبه
چین	۲۸۰	دانشگاه کاپیتال پکن	۱	۱۹۹۹	۲۱	تئاتینی (TEATINI)	۱
چین	۱۱۲	دانشگاه نانجینگ	۲	۲۰۱۱	۱۹	گونگ (GONG)	۲
چین	۶۵	دانشگاه تونگجی	۳	۲۰۱۱	۱۸	لی (LI)	۳
چین	۵۹	دانشگاه هوهای	۴	۲۰۰۵	۱۸	ژانگ (ZHANG)	۴
ایتالیا	۵۳	دانشگاه پادووا	۵	۲۰۱۰	۱۵	چن (CHEN)	۵
...	...	...	...	۲۰۱۵	۱۴	ژویو (ZHOU)	۶
ایران	۲۴	دانشگاه تهران	۱۳	۲۰۰۵	۱۳	یو (YU)	۷
ایران	۱۸	دانشگاه شیراز	۲۱	۱۹۷۵	۱۲	گامبولات (GAMBOLATI)	۸
ایران	۱۶	دانشگاه آزاد	۲۶	۲۰۱۵	۱۲	گائو (GAO)	۹
ایران	۱۰	دانشگاه تبریز	۶۱	۲۰۰۱	۱۲	توسی (TOSI)	۱۰
ایران	۸	دانشگاه فردوسی مشهد	۷۸	-			

نویسندگان تئاتینی، گونگ و لی سه نویسنده برتر در تحقیقات فرونشست زمین هستند. مراکز علمی مهم که تحقیقات بیشتری در موضوع مورد مطالعه انجام داده‌اند نیز به دست آمد. بر اساس این بررسی مراکز علمی و دانشگاهی کشور چین در موضوع مورد مطالعه تحقیقات بیشتری داشته‌اند. در کشورمان ایران نیز دانشگاه تهران، دانشگاه شیراز و همچنین دانشگاه آزاد در زمره مهم‌ترین دانشگاه‌ها بودند.



شکل ۲- مهم‌ترین مراکز علمی در انجام تحقیقات فرونشست زمین

۳-۱- بررسی ماهیت تحقیقات علمی در فرونشست زمین

تمام موضوعات علمی در گذر زمان و پس از دوره‌ای از بررسی‌های محققان تحول پیدا می‌کنند و این ماهیت تمام علوم است. فرونشست زمین نیز از جمله موضوعات علمی بوده که پس از وقوع نخستین این رخداد، تحقیقات علمی مرتبط به آن نیز انجام گردید. تردیدی نیست که پرداختن به تحول موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین می‌تواند موجب آگاهی از دستاوردها و حوزه‌های اولویت‌دار که آن نیز موجبات رشد کمی و کیفی تحقیقات و ترغیب محققان برای پرداختن به مهم‌ترین موضوعات در مدیریت آن گردد. برای بررسی این موضوع نخستین بررسی، مشخص نمودن مهم‌ترین تحقیقاتی است که بیشتر توسط نویسندگان مورد توجه قرار گرفته و به عبارتی نویسندگان دیگر، تحقیقات مورد نظر را بیشتر به عنوان یک منبع علمی در تحقیق خود بدان استناد کرده‌اند، **جدول (۵)**. بر اساس نتایجی که به دست آمد، کنترل ساختاری فرونشست زمین و تغییر شکل سیستم آبخوان، بررسی فرونشست زمین همراه با استخراج آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در مخازن متراکم نفت و گاز؛ مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در موضوع مورد نظر هستند.

جدول ۱- تحقیقات دارای بیشترین استناد در موضوع تحقیقات فرونشست زمین

رتبه	عنوان مقاله	نویسندگان	سال	استناد
۱	فرونشست زمین لاس وگاس: کنترل ساختاری فرونشست و تغییر شکل سیستم آبخوان	Amelung F, Galloway D L, Bell JW, Zebker HA, Lacznia RJ	۱۹۹۹	۴۸۴
۲	بررسی فرونشست زمین منطقه‌ای همراه با استخراج آب‌های زیرزمینی	Galloway DL, Burbey TJ	۲۰۱۱	۴۱۰
۳	فرونشست زمین در مخازن متراکم نفت و گاز	Geertsma J	۱۹۷۳	۳۷۱
۴	تشخیص تراکم آبخوان و فرونشست زمین با استفاده از رادار دهانه مصنوعی تداخل سنجی	Galloway DL, Hudnut KW, Ingebritsen SE, Phillips SP, Peltzer G, Rogez F, Rosen, PA	۱۹۹۸	۳۳۷
۵	فرونشست زمین در بانکوک تایلند	Phien-wej N, Giao PH, Nutalaya P	۲۰۰۶	۳۱۶
۶	فرونشست زمین در مرکز مکزیک به روش سری زمانی	Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, Amelung F	۲۰۱۴	۲۸۸
۷	ارزیابی عددی فرونشست زمین ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی	Shen SL, Xu YS	۲۰۱۱	۲۷۴
۸	استخراج آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین و افزایش سطح دریا	Erbat LE, Gorelick SM, Zebker HA	۲۰۱۴	۲۰۲
۹	بررسی وضعیت فعلی و مسائل چالش‌برانگیز فرونشست زمین	Hu RL, Yue ZQ, Wang LU, Wang, SJ	۲۰۰۴	۱۹۶
۱۰	فرونشست زمین به دلیل کاهش آب‌های زیرزمینی	Chai JC, Shen SL, Zhu HH, Zhang XL	۲۰۰۴	۱۷۷

کلمات کلیدی مشخص شده توسط نویسندگان نمایه‌ای از موضوع اصلی تحقیق بوده است. در این بخش کلمات

کلیدی مشخص شده توسط محققان در تحقیقات فرونشست زمین بررسی می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- فراوانی مهم‌ترین کلمات کلیدی مشخص شده در تحقیقات فرونشست زمین

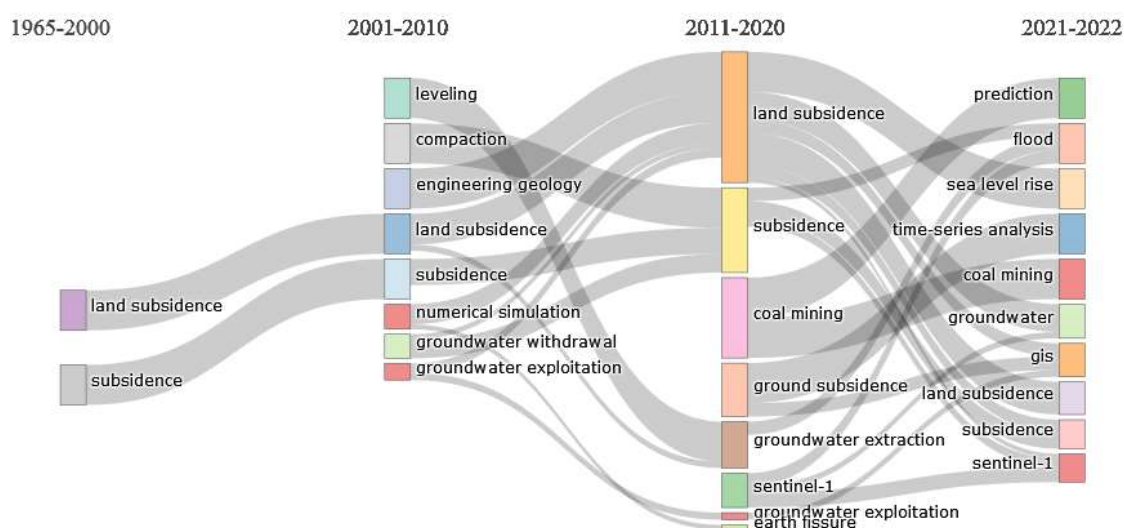
رتبه	کلمه کلیدی	فراوانی (تکرار)	رتبه	کلمه کلیدی	فراوانی (تکرار)
۱	فرونشست زمین	۴۶۲	۱۱	فناوری سنجش‌ازدور (RS)	۱۲
۲	فرونشست	۱۰۹	۱۲	نظارت	۱۱
۳	آب‌های زیرزمینی	۷۵	۱۳	شکاف زمین	۱۰
۴	شبیه‌سازی عددی	۳۱	۱۴	سطح آب‌های زیرزمینی	۱۰
۵	سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)	۲۴	۱۵	تداخل سنجی راداری	۱۰
۶	جی‌پی‌اس (GPS)	۲۲	۱۶	کاهش آب‌های زیرزمینی	۹
۷	تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-1)	۲۲	۱۷	جریان آب زیرزمینی	۹
۸	برداشت آب‌های زیرزمینی	۱۶	۱۸	مدل‌سازی عددی	۹
۹	بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی	۱۴	۱۹	تغییرات آب و هوایی	۸
۱۰	استخراج آب‌های زیرزمینی	۱۴	۲۰	استخراج از معادن زغال‌سنگ	۸

فرونشست زمین، آب‌های زیرزمینی (برداشت- بهره‌برداری- استخراج) و همچنین فناوری و روش‌های (شبیه‌سازی عددی- سیستم اطلاعات جغرافیایی- جی‌پی‌اس- فناوری سنجش‌ازدور- تصاویر ماهواره‌ای- مدل‌سازی عددی) مهم‌ترین کلمات کلیدی مشخص شده توسط نویسندگان بوده‌اند (شکل ۵).



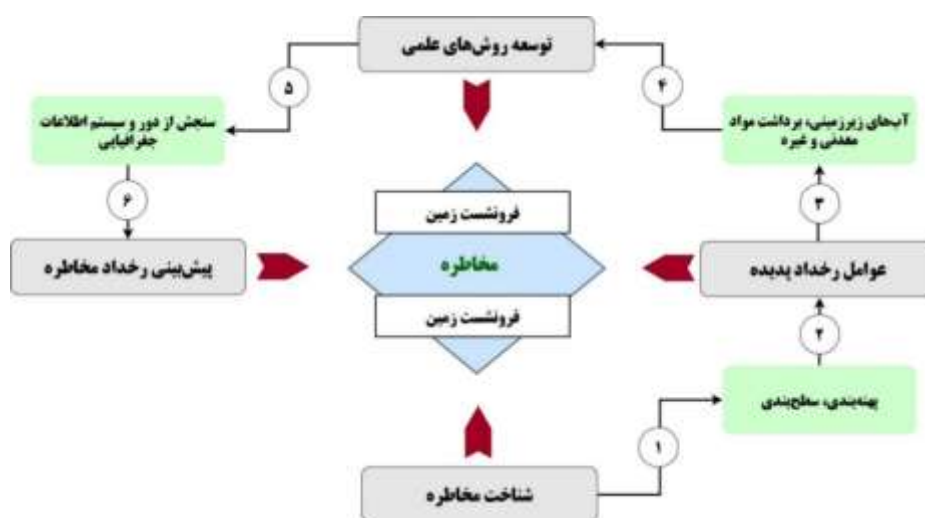
شکل ۳- مهم‌ترین کلمات کلیدی مشخص شده توسط نویسندگان در تحقیقات فرونشست زمین

اما پس از بررسی کلمات مهم در تحقیق، به بررسی و تحول موضوع تحقیقات در فرونشست زمین پرداخته شد. برای این بررسی ۴ دوره تحول مورد توجه قرار گرفت (شکل ۶).



شکل ۴- کلمات کلیدی مهم در تحقیقات فرونشست زمین

در بررسی‌های نخست، پهنه‌بندی (سطح‌بندی) رخداد پدیده در مناطق؛ مهم‌ترین موضوع بود که بیشتر در تحقیقات مورد توجه قرار می‌گرفت؛ اما در ادامه تحقیقات مرتبط با فرونشست زمین به دلیل پیامدهای منفی و گسترش آن در بسیاری از مناطق، بالطبع مطالعات آن نیز گسترش بیشتری پیدا می‌کند. در این بررسی‌ها موضوع بررسی بیشتر شناسایی عوامل رخداد پدیده بوده که بیشترین عوامل برای برداشت آب‌های زیرزمینی و مواد معدنی در مناطق است که محققان بیشتر بدان پرداخته‌اند. به‌طور کلی مشخصه‌های این دوره، بررسی مخاطره پس از وقوع آن بوده است (شکل ۷).



شکل ۵- تحول موضوع تحقیقات در موضوع فرونشست زمین

اما مهم‌ترین تحولی که در موضوع تحقیقات فرونشست زمین شکل می‌گیرد، توسعه روش‌های علمی برای شناسایی و شناخت این پدیده بوده که در این میان پیش‌بینی وقوع این مخاطره مهم‌ترین تحول است. این موضوع بیانگر پیامدهای منفی این مخاطره بوده که محققان را ترغیب به توسعه روش‌های علمی کرده که استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی بیشتر برای هدف مورد نظر استفاده می‌گردد. البته روش‌های مورد نظر در تحقیقات دوره‌های پیشین نیز مورد توجه بوده ولی ماهیت و هدف استفاده از این روش‌ها اکنون بیشتر برای پیش‌بینی پدیده فرونشست زمین استفاده می‌گردد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

آگاهی از روندهای مطالعاتی، تهیه نقشه موضوعی و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی برای هر موضوع علمی می‌تواند بسیار مهم باشد. این بررسی به‌خصوص برای فرونشست زمین و استفاده از روش‌های علمی برای مقابله با

آن اهمیت اساسی دارد. تحقیق ماهیتی متفاوت نسبت به موضوع تحقیقات فرونشست زمین در کشورمان داشت و سعی کرد از رویکرد علم‌سنجی به موضوع مورد نظر بپردازد. شناخت جامع و آگاهی محققان در کشورمان از تحقیقات مرتبط به آن، مهم‌ترین موضوع موردبررسی در تحقیق بود. نخستین بررسی برای مخاطره فرونشست زمین در سال ۱۹۶۵ بوده است. بیشترین تحقیقات برای کشورهای آمریکا، چین و کشورمان بوده و این موضوع بیانگر توجه بیشتر نویسندگان در این کشورها به پدیده فرونشست زمین است. بر اساس یافته‌های تحقیق مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده برای وقوع مخاطره شامل بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و برداشت مواد معدنی بوده است. در سوی دیگر مهم‌ترین نتایجی که برای موضوع موردبررسی به دست آمد، تحول موضوعی در تحقیقات مرتبط به آن بود. ظهور و بروز فناوری‌های علمی موجب توسعه روش‌ها و تکنیک‌هایی گشته که نمود بارز آن در تحقیقات فرونشست زمین پس از اولین بررسی توسعه پیدا کرده است. اکنون استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به دلیل گسترش شناخت پدیده و توان تفکیک مکانی بالا، ابعاد گسترده‌تری در مطالعه فرونشست زمین پیدا کرده است. جهت‌گیری بیشتر تحقیقات نیز در ارتباط با این موضوع بوده که هدف استفاده از این روش‌ها نیز اکنون بیشتر برای پیش‌بینی پدیده فرونشست زمین است. بااین‌حال آنچه که روشن است که تمرکز بیشتر تحقیقات بر روی روش‌ها و مدل‌ها بوده و از آنجاکه وقوع مخاطره فرونشست زمین به جنبه‌های بسیاری از زندگی انسان‌ها تأثیر می‌گذارد؛ لذا این موضوع در تحقیقات مورد توجه قرار نگرفته که تردیدی نیست انجام این تحقیقات می‌تواند به تقویت تحقیقات آینده در زمینه فرونشست زمین و مدیریت مناسب آن کمک نماید. موضوع مذکور باید در تحقیقات کشورمان نیز مورد توجه قرار گیرد؛ لذا تنها در این صورت می‌توان پیامدهای منفی فرونشست زمین را مدیریت و رفع کرد.

کتابنامه

بدری، سید علی؛ طهماسبی، سیامک؛ هاجری، بهرام؛ ۱۴۰۰. رویکرد علم‌سنجی به مطالعات تاب‌آوری در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. دوره ۸، شماره ۳. صص ۵۲-۳۳.

<http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3210-fa.html>

دوستان، رضا؛ ۱۳۹۸. تحلیلی بر تحقیقات خشکسالی در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. دوره ۶، شماره ۴. صص ۹۴-۵۳.

<http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2819-fa.html>

رکنی، جعفر؛ حسین‌زاده، سیدرضا، لشکری‌پور، غلامرضا؛ ولایتی، سعدالله؛ ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمین چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی مطالعه موردی: دشت نیشابور. مجله جغرافیایی مناطق خشک. دوره ۶، شماره ۲۴. صص ۳۸-۲۱.

<http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-929-fa.html>

رکنی، جعفر؛ ۱۳۹۷. تجزیه و تحلیل ویژگی های مورفولوژیکی و توزیع فضایی مخاطره فرونشست زمین در دشت نیشابور، رساله دکتری. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. گروه ژئومورفولوژی دانشگاه فردوسی مشهد.

<http://geographydept.um.ac.ir>

رنجرباروق، زهرا؛ فتح الله زاده، محمد؛ ۱۴۰۱. بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب های زیرزمین (مطالعه موردی: کلان شهر کرج). مجله ژئومورفولوژی کمی. سال ۱۰.

شماره ۴. صص ۱۵۵ - ۱۳۸. Doi:

10.22034/gmpj.2022.313426.1313.

رهنما، حسین؛ میراثی، سهراب؛ ۱۳۹۵. تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر فرونشست زمین. مجله عمران مدرس. دوره

۱۶. شماره ۱. صص ۵۳ - ۴۵. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-8483-fa.html>

شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۰. بررسی پیامد ناشی از پدیده فرونشست زمین در اراضی و دشت های مسکون کشور.

زمین شناسی مهندسی. دوره ۳. شماره ۴-۳. صص ۵۸ - ۳۴. https://www.jiraeg.ir/article_68238.html.

عباس نژاد، احمد؛ ۱۳۷۷. بررسی شرایط و مسائل زمین شناسی محیط زیست دشت رفسنجان. مجموعه مقالات دومین

همایش انجمن زمین شناسی ایران. صص ۳۱۰ - ۳۰۳. <https://civilica.com/doc/14087>.

عصاره، فریده؛ حیدری، غلامرضا؛ زارع فرشبندی، فیروزه؛ حاجی زین العابدینی، محسن؛ ۱۳۹۲. کتاب / از کتاب سنجی تا

وب سنجی: تحلیلی بر مبانی، دیدگاه ها، قواعد و شاخص ها. تهران: انتشارات کتابدار. صص ۲۱۶ - ۱.

<https://www.gisoom.com/book/1634889>

فرزین کیا، ربابه؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی، محمد علی و زندی، رحمان، ۱۴۰۰. پهنه بندی خطر فرونشست

زمین در دشت جویین با استفاده از مدل تحلیل شبکه ای - فازی. مجله فضای جغرافیایی. شماره ۷۴. صص ۷۱ - ۵۱.

<http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3420-fa.html>

قهرودی تالی، منیژه؛ علی نوری، خدیجه؛ ریوندی، هما؛ ۱۴۰۰. تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت سیزوار.

مجله اطلاعات جغرافیایی (سپهر). دوره ۳۰. شماره ۱۱۷. صص ۱۸۰ - ۱۶۵.

Doi:10.22131/sepehr.2021.244457.

مختاری، داوود؛ ابراهیمی، حمید؛ سلمانس، سعید؛ ۱۳۹۸. مدل سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم

جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج)، مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع

طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی). دوره ۹. شماره ۳. صص ۱۰۵ - ۹۵.

<https://dorl.net/dor/http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1398.10.3.6.7>

منظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست زمین با به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در

پهنه استان های تهران و البرز. مجله دانش پیشگیری و مدیریت بحران. دوره ۹. شماره ۱. صص ۴۷ - ۳۵.

<http://dpmk.ir/article-1-238-fa.html>

موسوی موحدی، علی اکبر؛ ۱۳۸۲. تولید علم معیار توسعه کشورها. رهیافت. پیاپی ۳۱.

<http://dpmk.ir/article-1-238-fa.html>

- Baffoe G., 2020. Rural-urban studies: A macro analyses of the scholarship terrain. *Habitat International*, 98, 102156. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102156>.
- Bagalkoti VT, & Hosamani SC., 2014. Mapping of the Indian Research Productivity of Biochemistry and Molecular Biology: A Scientometric Analysis. *Journal of Advances in Library and Information Science*, 3 (3), 249–256. <https://www.researchgate.net>.
- 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>.
- Chai JC, Shen SL, Zhu HH, & Zhang XL., 2004. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. *Geotechnique*, 54 (2), 143–147. <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.2.143>.
- Chang Y-W, Huang M-H, & Lin C-W., 2015. Evolution of research subjects in library and information science based on keyword, bibliographical coupling, and co-citation analyses. *Scientometrics*, 105 (3), 2071–2087. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1762-8>.
- Chiu, W-T, & Ho Y-S., 2007. Bibliometric analysis of tsunami research. *Scientometrics*, 73 (1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s11192-005-1523-1>.
- Cobo MJ, López-Herrera AG, Herrera-Viedma E, & Herrera F., 2011. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62 (7), 1382–1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>.
- Dinar A, Encarna E, Elena C, Gerardo H, Pietro T, Roberto T, Yang L, Pablo E, & Jose A., 2021. We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of the Total Environment* 786: 147415. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147415>.
- Djalalinia, SHP, Owlia A, Setareh Forouzan E, Habibi M, Dejman M, Baradaran Eftekhari M, Ghanei HOSSEIN, Malekafzali, & N. Peykari., 2012. Health research evaluation and its role on knowledge production. *Iranian journal of public health* 41, no. 2: 39. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3481679/>.
- Famiglietti JS., 2014. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4 (11), 945–948. <https://www.nature.com/articles/nclimate2425>.
- Gall M, Nguyen KH, & Cutter SL., 2015. Integrated research on disaster risk: Is it really integrated?. *International journal of disaster risk reduction*, 12, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.010>.
- Galloway DL, Erkens G, Kuniansky EL, & Rowland JC., 2016. Preface: Land subsidence processes. *Hydrogeology Journal*, 24 (3), 547–550. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1386-y>.
- Herrera-García G, Ezquerro P, Tomás R, Béjar-Pizarro M, López-Vinielles J, Rossi M, Mateos RM, Carreón-Freyre D, Lambert J, Teatini P, & Cabral-Cano E., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371 (6524), 34–36. DOI: 10.1126/science.abb8549.
- Hess DJ., 1997. *Science studies: An advanced introduction*. NYU press. <https://books.google.com/books>.
- Hirsch JE., 2005. An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102 (46), 16569–16572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>.
- Kok S & Costa AL., 2021. Framework for economic cost assessment of land subsidence'. *Natural Hazards*, 106 (3), 1931–1949. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04520-3>.
- LaRowe G, Ambre S, Burgoon J, Ke W, & Börner K., 2009. The Scholarly Database and its utility for scientometrics research. *Scientometrics*, 79 (2), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0414-2>.

- Liu J, Li J & Fan C., 2020. A bibliometric study of pool fire related publications', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 104030. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104030>.
- Liu W, Hu G, & Tang L., 2018. Missing author address information in Web of Science—An explorative study. *Journal of Informetrics*, 12 (3), 985–997. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2018.07.008>.
- Liu X, Zhan FB, Hong S, Niu B, & Liu Y., 2012. A bibliometric study of earthquake research: 1900–2010. *Scientometrics*, 92 (3), 747–765. <https://doi.org/10.1007/s11192-011-0599-z>.
- Lyu HM, Shen SL, Zhou A, & Yang J., 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717, 135310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135310>.
- Mao G, Huang N, Chen L, & Wang H., 2018. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. *Science of the Total Environment*, 635, 1081–1090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.173>.
- Merigó JM, & Yang J-B., 2017. A bibliometric analysis of operations research and management science, *Omega*, 73, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.004>.
- Mingers J, & Leydesdorff L., 2015. A review of theory and practice in scientometrics. *European journal of operational research*, 246 (1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.002>.
- Qiu J-P, Dong K, & Yu H-Q., 2014. Comparative study on structure and correlation among author co-occurrence networks in bibliometrics. *Scientometrics*, 101 (2), 1345–1360. <https://doi.org/10.1007/s11192-014-1315-6>.
- Sengupta IN., 1992. Bibliometrics, informetrics, scientometrics and librametrics: an overview, *Libri*, 42 (2), 75. <https://doi.org/10.1515/libr.1992.42.2.75>.
- Serenko A., 2013. Meta-analysis of scientometric research of knowledge management: discovering the identity of the discipline. *Journal of Knowledge Management*, 17 (5), 773–812. <https://doi.org/10.1108/JKM-05-2013-0166>.
- Sweileh WM., 2019. A bibliometric analysis of health-related literature on natural disasters from 1900 to 2017. *Health research policy and systems*, 17 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12961-019-0418-1>.
- Teatini P, Carreón-Freyre D, Ochoa-González G, Ye S, Galloway D, & Hernández-Marin M., 2018. Ground ruptures attributed to groundwater overexploitation damaging Jocotepec city in Jalisco, Mexico: 2016 field excursion of IGCP-641. *Episodes*, 41 (1), 69–73. <https://www.episodes.org>.
- Wang B, Pan SY, Ke RY, Wang K, & Wei YM., 2014. An overview of climate change vulnerability: a bibliometric analysis based on Web of Science database. *Natural hazards*, 74 (3), 1649–1666. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1260-y>.
- Yang S, Yuan Q, & Dong J., 2020. Are Scientometrics, Informetrics, and Bibliometrics Different?. *Data Science and Informetrics*, 1 (01), 50. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- Ye S, Xue Y, Wu J, Yan X, & Yu J., 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24 (3), 685–693. <https://autherrorpage>.
- Yoo J, & Perrings C., 2017. An externality of groundwater depletion: land subsidence and residential property prices in Phoenix, Arizona. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 6 (2), 121–133. <https://doi.org/10.1080/21606544.2016.1226198>.
- Zoccarato C, Minderhoud PSJ, & Teatini P., 2018. The role of sedimentation and natural compaction in a prograding delta: insights from the mega Mekong delta. *Vietnam. Scientific reports*, 8 (1), 1–12. <https://link.springer.com>.



Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)

Shahram Roostaei^a, Samira Najafvand^{b*} 

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 24 January 2022

Revised: 15 February 2022

Accepted: 15 March 2022

Abstract

Global climate changes and population growth have increased the need to exploit underground water resources. The phenomenon of land subsidence as a result of groundwater extraction and water depletion is one of the environmental hazards that threatens societies all over the world. In this research, for the first time, Sentinel-1 radar satellite images were used by the SNAP2StaMPS to automate the process of processing and analyzing the subsidence in Marand Plain. In recent years, the uneven development of agricultural lands and the excessive extraction of underground water in the Marand plain in East Azerbaijan province have caused landslides on the surface of this plain. In this study, an automatic interferometric processing algorithm between SNAP and StaMPS was used to determine the displacement rate in the direction of the satellite line of sight. The results of the PSI interferometry technique were performed on 133 images of the Sentinel-1 satellite in the descending orbit of the Sentinel-1 satellite. Based on the obtained results, the annual land displacement rate for Marand plain in 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020 was -13.7, -12, -2.15, -12.3 and -13.1 cm respectively. In order to validate the results, the amount of subsidence resulting from the interferometric processing was compared with the amount of groundwater level drop in the study area, using the unit hydrograph analysis method. The results showed that the amount of water level drop and the results of hydrograph analysis of observation wells in the region are consistent with the results of time series maps obtained from interferometry. Therefore, the automatic method presented in this study can be used for monitoring land subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Radar Interferometry (PSI), Marand Plain, Snap2stamps Automated Algorithm

*. Corresponding author: Samira Najafvand E-mail: samira.najafvand@tabrizu.ac.ir Tel: + 989387607669

How to cite this Article: Roostaei, S., & Najafvand, S. (2023) Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 21-42.

DOI:10.22067/geoh.2022.74932.1161



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۴۲-۲۱

مقاله پژوهشی

ویژه نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند)

شهرام روستایی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

سمیرا نجف‌وند^۱ - دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی گرایش برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

در این تحقیق برای اولین بار به منظور خودکار سازی فرایند پردازش و تحلیل فرونشست دشت مرند از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ توسط پکیج SNAP2StaMPS استفاده شده است. در سال‌های اخیر توسعه ناهمگون اراضی کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی دشت مرند در استان آذربایجان شرقی موجب بروز پدیده فرونشست زمین در سطح این دشت شده است. لوله زایی میله چاه‌های منطقه، شکاف‌های افقی در سطح این دشت، حکایت از رخداد فرونشست سطح زمین دارد. در این تحقیق برای تعیین نرخ جابجایی در جهت خط دید ماهواره، از الگوریتم پردازشی تداخل سنجی خودکار بین نرم‌افزار SNAP و StaMPS استفاده شد. نتایج فن تداخل سنجی PSI بروی ۱۳۳ تصویر سنتینل-۱ در مدار Descending ماهواره Sentinel-1، حاکی از نرخ جابجایی سالانه زمین برای دشت مرند از سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۳/۷-، ۱۲-، ۱۵/۲-، ۱۲/۳- و ۱۳/۱- سانتی‌متر دارد. جهت صحت سنجی نتایج، مقایسه میزان فرونشست حاصل از پردازش تداخل سنجی با میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی از طریق روش تحلیل هیدروگراف واحد انجام

Email: Samira.najafvand@tabrizu.ac.ir

^۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۸۷۶۰۷۶۶۹

نحوه ارجاع به این مقاله:

روستایی، شهرام؛ نجف‌وند، سمیرا؛ ۱۴۰۱. پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS

به روش تداخل سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴)، صص ۴۲-۲۱

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161>

شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان افت سطح آب و نتایج حاصل از تحلیل هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای منطقه، با نتایج حاصل نقشه‌های سری زمانی حاصل از تداخل سنجی تطابق دارند؛ بنابراین، از روش خودکار ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان جهت پایش فرونشست زمین استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، روش تداخل سنجی راداری (PSI)، دشت مرند، الگوریتم خودکار snap2stamps.

۱- مقدمه

مخاطره فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است. این پدیده به یکی از مسائل و مشکلات اساسی جوامع بشری به دلیل خسارات جبران‌ناپذیر نسبت به دیگر مخاطرات تبدیل شده است. شکل‌گیری این پدیده به‌صورت آرام در طی مدت‌زمان طولانی اتفاق می‌افتد و فاقد برگشت‌پذیری است. فرونشست به‌طور کلی ناشی از دلایلی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، بارگذاری، زهکشی و یا ارتعاش، تراکم هیدرولیکی، ناپایداری خاک‌ها در سطوح شیب‌دار، انقباض خاک‌های رسی، ذوب یخ لایه‌های منجمد در اعماق زمین و ... پدیدار می‌شود. فرورفتگی کیفی شکل زمین، پس‌روی آب دریا، ریزش سطح و جابجایی پوسته‌ای زمین از علائم آن است. علاوه بر این، فرونشست زمین در مناطق شهری می‌تواند باعث فروریختن فونداسیون، تخریب خط لوله زیرزمینی و آسیب جاده شود. این مخاطره، موجب تغییرات توپوگرافیکی سطح زمین نیز می‌شود که در اکثر اوقات آسیب‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد.

علل وقوع فرونشست زمین در نقاط مختلف دنیا به دلایل مختلفی رخ می‌دهد، از جمله، احیای مناطق ساحلی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وسازهای شهری در مناطق دلتایی و استخراج بی‌حد آب‌های زیرزمینی در جلگه‌ها، که جابجایی سطح زمین را به دنبال دارد. در سراسر جهان، دشت‌های ساحلی و مناطق دلتایی رودخانه‌ای بیشترین فرونشست زمین را دارند (هررا گارسیا^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

محرکان اصلی فرونشست به دو عامل انسانی و طبیعی تقسیم می‌شوند، عوامل ناشی از فعالیت‌های انسانی شامل استخراج سیالات از لایه‌های زیرسطحی (مانند آب، نفت و گاز)، تغییر کاربری زمین (به‌عنوان مثال بارگذاری ناشی از ساختمان‌های ساخت بشر)، ساخت تأسیسات زیرزمینی و معدنکاری و فعالیت‌های طبیعی شامل گسل، حرکات زمین ساختی، تثبیت و فشردگی رسوبات، فروریزش لس، افزایش سطح آب دریا، اکسیداسیون و زهکشی خاک‌های آلی، فرسایش کارستی و فروافتادگی ناشی از پرمافروست هستند (کروستو^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). در این میان، عامل انسانی با ۷۶/۹۲ درصد از کل علل فرونشست در سراسر جهان و استخراج آب‌های زیرزمینی ۵۹/۷۵ درصد از دلایل

1 Herrera-García

2 Crosetto

اصلی فرونشست در سراسر جهان به شمار می‌روند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). تقاضای روزافزون منابع آب زیرزمینی، به دلیل توسعه شهری و کشاورزی، محرک‌های اصلی فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (باقری گاو کش^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

امروزه فرونشست زمین یک مخاطره جهانی ناشی از عامل انسانی و طبیعی است و بیشترین مقدار میانگین فرونشست سالانه (LSavg) در شرق چین، دشت مرنده در شمال غرب ایران، ساحل خلیج تگزاس در جنوب ایالات متحده، جاکارتای شمالی در اندونزی، منطقه شهری مکزیکوسیتی در مرکز مکزیک مشاهده شده است؛ بنابراین پیش‌بینی، تشخیص و کاهش فرونشست زمین در دشت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (هرا گارسیا و همکاران، ۲۰۲۱).

در مطالعه حاضر جهت پایش فرونشست زمین در دشت مرنده در استان آذربایجان شرقی از روش پراکنش گره‌های دائمی (PSI) که برای اولین بار توسط فرتی^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۱ مطرح شد، استفاده شده است (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱). این تکنیک مزایای زیادی دارد، مانند پوشش مکانی وسیع، حساسیت زیاد به تغییر شکل‌های کوچک و عملکرد در روز و شب و تمام شرایط آب و هوایی را ارائه می‌دهد، که این مزایا پایش دقیق فرونشست زمین را تضمین می‌کند. دقت بالای روش تداخل سنجی راداری PSI، سبب شده است تا در بسیاری از تحقیقات از این روش به‌منظور برآورد میزان فرونشست استفاده شود.

در ایران نیز بحث فرونشست زمین به یک بحران ملی تبدیل شده که در بیشتر موارد ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی است. در این خصوص پژوهشگران مختلفی میزان فرونشست زمین را در مناطق مختلف ایران انجام شده است.

خرمی (۱۳۹۶)، در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ۶۹ تصویر راداری مدارهای بالا گذر و پایین‌گذر ماهواره سنتینل-۱، بیش‌ترین مقدار فرونشست را در شمال غرب مشهد و در حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال به دست آورده است. مؤمنی (۱۳۹۷)، نرخ فرونشست را در دشت کبودآهنگ-فامنین همدان را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، با روش پراکنش گره‌های دائمی، به ترتیب ۹۲- و ۹۸- میلی‌متر در سال محاسبه کرده است. فروغ‌نیا و همکاران (۱۳۹۷)، با به‌کارگیری تصاویر سنجنده‌های انویست و سنتینل-۱ نرخ فرونشست را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. شرافت و همکاران (۱۳۹۸)، در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از ۱۲ تصاویر ماهواره‌ای Envisat، متوسط سرعت فرونشست در دشت ابرکوه یزد را ۲ تا ۳ سانتی‌متر و در منطقه مهردشت ۵ سانتی‌متر به دست آورده‌اند.

1 Bagheri-Gavkosh

2 Ferretti

احمدی و همکاران (۱۳۹۹)، نرخ فرونشست دشت اسدآباد همدان را ۲۲۶-۲۶۶ میلی‌متر در سال به دست آورده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیق نرخ فرونشست از مناطق شهری به سمت دشت‌های اطراف سعودی بوده است. **پاپی و همکاران (۱۳۹۹)**، به تحلیل سری زمانی فرونشست در غرب تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر پیوستگی رخداد فرونشست در زمین‌های کشاورزی با نرخ متوسط ۹۰- سانتی‌متر و حداکثر ۲۳- سانتی‌متر در سال در منطقه دشتی نشان می‌دهد، که افت ۰/۵ تا ۱/۵ متری سطح آب در آبخوان علت آن است. **خوش‌لهجه آذر (۱۳۹۹)**، میزان جابجایی بخشی از دشت‌های کبودرآهنگ- فامنین و همچنین رفتار زمین قبل از رخداد فرو چاله در کردآباد همدان را با دو روش PSI و SBAS به ترتیب ۵/۷۱ سانتی‌متر و ۲۴/۶ سانتی‌متر در سال به دست آورده است. **قره چلو و همکاران (۱۴۰۰)**، با استفاده از تصاویر راداری آلوس (ALOS) و سنتینل-۱ میزان فرونشست سالانه را در دشت مشهد بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری برای ماهواره آلوس در این تحقیق، بیانگر مقدار فرونشست ۲/۵ تا ۸/۳ سانتی‌متر برای تصاویر ALOS و برای ماهواره سنتینل-۱ بین ۱/۱۶ تا ۴/۱۷ سانتی‌متر و ۳/۲۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بوده است که نشان‌دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در منطقه بوده است.

ماتئوس^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، فرونشست زمین در آبخوانی در اسپانیا را با استفاده از داده‌های راداری انویست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، و ماهواره (COSMO-SkyMed)، بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ و تصاویر سنجنده سنتینل-۱ بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶. مقدار فرونشست را ۵۵ میلی‌متر به دست آورده‌اند. آن‌ها بیش‌ترین میزان فرونشست زمین مربوط به یک دوره طولانی و خشک در منطقه بوده که بر روی زمین‌های رسی رخ داده است. **سان^۲ و همکاران (۲۰۱۷)**، طی پژوهشی فرونشست زمین در بخش‌های جنوبی پایین‌دست دشت لیائوهه^۳ چین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنده ساز دائمی (PSI) پرداخته‌اند. تصاویر مورد پردازش در این تحقیق، تصاویر راداری مربوط به ماهواره L باند آلوس پالسار بوده که از طریق نرم‌افزار استمپس (StaMPS) مورد پردازش قرار گرفته‌اند؛ و فرونشست سالانه زمین را در این دشت به دست آورده‌اند و نقشه‌های سری زمانی برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ ایجاد کرده‌اند. در کل، بر اساس نتایج روش پراکنده سازهای دائمی، سه ناحیه فرونشست در زیرزمین کشف شد، و این مناطق در مناطق نفتی، مناطق استخراج نمک و مناطق ساحلی قرار داشتند. میزان فرونشست زمین از ۵۰ میلی‌متر در سال به ۲۳۶ میلی‌متر در سال رسیده است، **مقصودی و همکاران (۲۰۱۸)**، نرخ فرونشست جاوا در غرب اندونزی را در دو بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ را طبق داده‌های سنتینل-۱ و آلوس به ترتیب ۴/۶

1 Rosa María Mateos

2 Sun

3 Liaohé Plain

و ۲/۸ میلی‌متر در سال برای این منطقه گزارش کرده است. **لیوسی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)**، فرونشست در نواحی روستایی الویگان^۲ امارات را بین سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ به ترتیب برای داده‌های آلوس و سنتینل-۱ حدود ۱۸ سانتی‌متر و حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال به دست آوردند. **دالیو^۳ و همکاران (۲۰۱۸)**، فرونشست زمین را در باتلاق‌های نمکی لاگونی و نیز با استفاده تداخل سنجی راداری و تحقیقات زمینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققین از تکنیک پراکنده ساز دائمی (PSI)، داده‌های راداری در یک دوره ۵ ساله مربوط به منطقه مورد مطالعه استفاده کرده‌اند. نرخ فرونشست را بیش از ۲۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند. عامل اصلی فرونشست، عامل انسانی بوده است. **میلر^۴ و همکار (۲۰۱۹)**، در مقاله‌ای به بررسی فرونشست زمین در هوستون و ارتباط آن با سیل حاصل از طوفان هاروی پرداخته‌اند. این محققین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر سنجنده سنتینل-۱، سری B، نقشه پهنه‌های خطر سیلاب را مشخص کرده‌اند. نقشه فرونشست زمین را نیز قبل از وقوع طوفان را با استفاده از پردازش داده‌های چند زمانه SAR ماهواره‌ای پیشرفته (ALOS) و ماهواره‌های سنتینل-۱، سری B، به دست آورده‌اند. آن‌ها دریافتند که مقدار فرونشست بالای ۴۹ میلی‌متر در سال و ۳۴ میلی‌متر در طی بازه زمانی پردازش تصاویر آلوس (ژوئیه ۲۰۰۷-ژانویه ۲۰۱۱) و سنتینل-۱ سری B، (دسامبر ۲۰۱۵ تا اوت ۲۰۱۷) بوده است، و نتیجه گرفتند که ۸۵ درصد از منطقه سیل‌زده با نرخ کمتر از ۵ میلی‌متر در سال فرومی‌نشیند. آن‌ها از طریق آزمون کای اسکوتر مستقل^۵ بیان نمودند که فرونشست زمین از طریق تغییر پایه ارتفاع سیلاب^۶ و گرادیان‌های شیب‌بر روی شدت سیل تأثیرگذار بوده است. **حقیقی و معنق (۲۰۱۹)**، فرونشست دشت تهران و ورامین را مطالعه کردند. آن‌ها مطالعه جامعی را برای بررسی دقیق پدیده فرونشست به کمک روش InSAR و پردازش ۳۹ تصویر ماهواره انویست و ۱۰ تصویر ماهواره آلوس پالسار (ALOS-PALSAR) و ۴۸ تصویر ماهواره تراسار-ایکس (TerrASAR-X) و ۶۴ تصویر ماهواره سنتینل-۱ برای یک بازه زمانی ۱۴ ساله به کمک ۴۰۰ ایتر فروگرام انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که دشت تهران با ماکزیمم نرخ فرونشست ۲۵ سانتی‌متر در حال فرونشست است و فرودگاه بین‌المللی تهران سالانه ۵ سانتی‌متر فرومی‌نشیند. **ژئو^۷ و همکاران (۲۰۱۹)**، در مقاله‌ای به ارزیابی سری‌های زمانی الگوهای فرونشست زمین در دشت پکن شرقی، چین پرداخته‌اند. این محققین نخست، به روش تداخل سنجی پراکنش گر دائمی (PSI)، و با به‌کارگیری داده‌های سنجنده انویست و رادارست (Radarsat-2) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، برای جابجایی‌های درازمدت این دشت استفاده گردیده است. نتایج این تحقیقی ماکزیمم نرخ فرونشست را، ۱/۱۸۴ میلی‌متر در سال تا

1 Nikolaos Liosis

2 Al Wagan

3 Cristina Da Lio

4 Miller

5 The Chi-square Test of Independence

6 Base Flood Elevations

7 Junjie Zuo

سال ۲۰۱۵ به دست آوردند. دلیل عمده الگوهای تکاملی سری زمانی فرونشست، تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی بوده است.

سیان^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، فرونشست زمین در شهرهای ساحلی بانجول^۲ (گامبیا) و لاگوس^۳ (نیجریه) در آفریقا را با استفاده از تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI) و تصاویر سستینل-۱، و تصاویر (TerraSAR-X) و تصاویر (COSMO-SkyMed) با بهره‌گیری از پکیج خودکار (SNAP2STAMPS)، را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این روش خودکار برای مناطق با جابجایی زیاد زمین، اطلاعات مفید برای توسعه شهری، مدیریت خطر بلایا و برنامه‌ریزی سازگاری با آب‌وهوا را ارائه می‌دهد. **فیا سچی^۴ و همکاران (۲۰۱۹)**، جابجایی زمین را با استفاده از روش پراکنش گرهای دائمی (PSI)، در مناطق معتدل اقیانوسی با به‌کارگیری داده‌های راداری سستینل-۱، در جمهوری ایرلند مطالعه کرده‌اند. بازه زمانی این مطالعه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ بوده است. بیشترین مقدار جابجایی زمین حاصل از فرونشست را ۱۷- میلی‌متر در سال در مناطق شهری و محیط‌های طبیعی رخ داده است. **ال کمالی^۵ و همکاران (۲۰۲۱)**، فرونشست و جابجایی زمین را در منطقه ریماه، امارات متحده عربی به‌عنوان یک منطقه با آب‌وهوای خشک و بیابانی بررسی کرده‌اند. سرعت فرونشست در این محدوده را ۴۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند که به علت افت ۱۲ متری سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه بوده است. در این تحقیق، از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای پایدار (PS-InSAR) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS برای برآورد فرونشست در دشت مرند استفاده شد.

دشت مرند، یکی از دشت‌های مهم استان آذربایجان شرقی است که به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین نیازهای آبی منطقه خصوصاً کشاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی و خشک‌سالی‌های اخیر دچار فرونشست شده است. سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷، به‌طور متوسط تا ۳ متر در سال برآورد شده است، که زمین‌های کشاورزی حاشیه کوشک سرای و یامچی بالاترین نرخ افت سطح ایستابی را داشته‌اند (**داداشی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۲**). لذا با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر با استفاده از ۱۳۴ تصویر ماهواره سستینل-۱ (Sentinel-1A) برای به دست آوردن نرخ فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ انجام گرفته است که نتایج آن می‌تواند در مدیریت آبخوان این دشت مؤثر واقع شود.

1 Cian

2 Banjul

3 Lagos

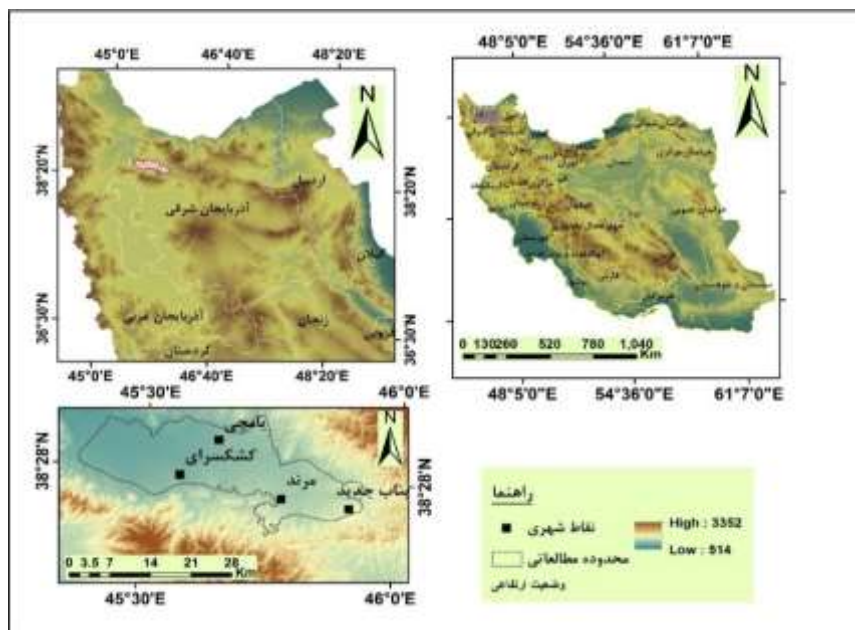
4 Simone Fiaschi

5 Muhagir El Kamali

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

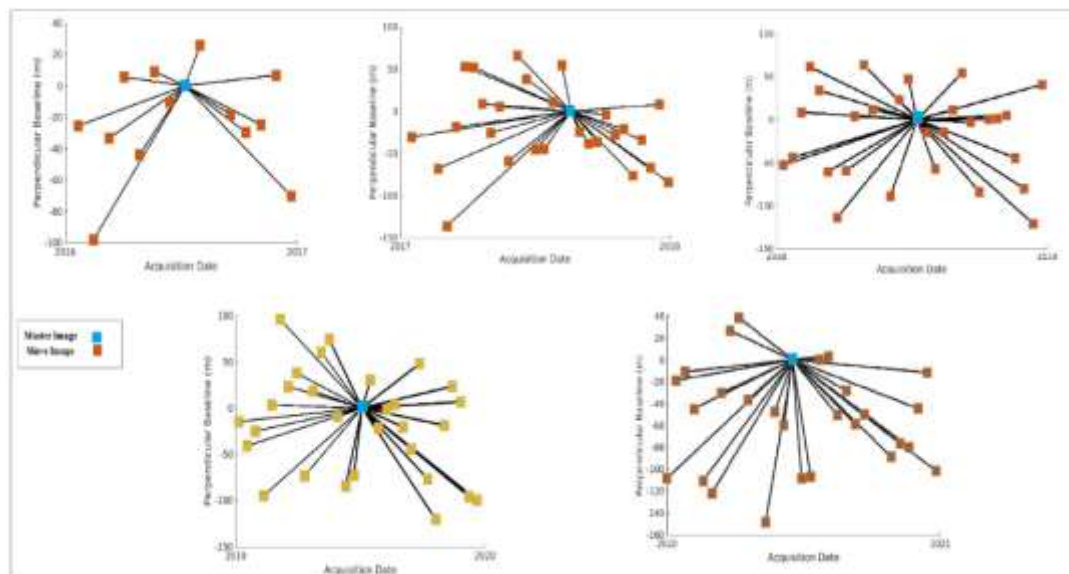
دشت مرنده به عنوان بخشی از حوضه آبریز رودخانه ارس در شمال غرب ایران واقع شده است و از نظر زمین ساختی به صورت یک گرابن - در حدفاصل رشته‌های کوهستانی قره داغ در شمال و میشو داغ در جنوب - فروافتاده است. گسل‌های متعددی به ویژه گسل شمالی میشو در شکل‌گیری این دشت نقش داشته‌اند. این دشت با روند شرقی-غربی، به صورت یک چاله ساختمانی نئوژن-کواترنری در شمال غرب ایران و حدفاصل دو رشته‌کوه عمده منطقه یعنی قره داغ و میشو داغ واقع شده است. این چاله انباشته از نهشته‌های آبرفتی دوران کواترنری است که در قالب مخروط افکنه‌هایی در امتداد جبهه کوهستانی مشرف به دشت ردیف شده‌اند (مختاری کشکی، ۱۳۸۶). قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی منطقه، متعلق به پرکامبرین است که در جنوب دشت در مجاورت توده‌های نفوذی گرانیت شیل و گرانیت قوشچی از گسترش محدودی برخوردار است. دو رودخانه اصلی این زیر حوضه؛ زیلبر چای و زنوز چای است که پس از اتصال به رودخانه قطور چای و سپس ارس، به حوضه آبریز دریای خزر می‌ریزند. سلسله جبال جنوبی شامل ارتفاعات میشو و مورو هستند که حد بین حوضه‌های آبریز دشت مرنده یکی از دشت‌های با توان بالا در زمینه تولید محصولات باغی است. این دشت بهره‌مندی مناسبی از منابع آبی داشته و این امر، به رونق کشاورزی آن کمک نموده است، اما با توجه به مشکلاتی نظیر کم‌آبی و نیاز به افزایش تولید با توجه به افزایش جمعیت، مکانیزه شدن سیستم آبیاری، کاشت و برداشت محصولات در دشت مرنده، در سال‌های اخیر دچار فرونشست شده است. برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی طی سنوات گذشته موجب کاهش ذخایر آبی و ایجاد مشکلات جدی از جمله کاهش آبدهی چاه‌ها، خشک شدن قنوات و چشمه‌ها، شور شدن آب‌های زیرزمینی در بخش‌های زیادی از دشت مرنده شده است. برداشت بیش از حد آب و افت سطح آب زیرزمینی موجب ایجاد فروچاله و یا فرونشست زمین در این دشت شده است. فرونشست رخ داده در دشت مرنده باعث شده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، دشت مرند

۲-۲- روش انجام پژوهش

در تکنیک پراکنش گره‌های دائمی (PsInSAR) ایده اصلی شناسایی نقاط همبسته با رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از سیگنال استخراج شده از داده‌های راداری است. درواقع بر روی هر پراکنش گر دائمی اطلاعاتی از قبیل نرخ سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل ارتفاعی رقومی زمین برآورد می‌شود روند کلی تکنیک پراکنش گره‌های دائمی در شکل ۳ ارائه شده است. در مطالعه حاضر به منظور بررسی رفتار فرونشست در منطقه مطالعاتی، از پکیج StaMPS-PSI استفاده شده است (هوپر، ۲۰۱۸). تغییرات و افت سطح آب در طول ۱۸ سال، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ با استفاده از داده‌های چاه‌های پیزومتری، از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت و در سطح دشت بررسی و سطح آب در ۲۳ گمانه که داده‌های کامل و مشترک داشته‌اند در یک فایل اکسل تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS روش درونیابی (IDW) انجام شد. از روش پراکنده ساز دائمی (PSI) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS به منظور پایش فرونشست منطقه استفاده شده است. جهت پردازش از تصاویر ماهواره سستینل-۱ مربوط به بازه زمانی ۵ ساله از تاریخ ۲۳ ژانویه ۲۰۱۶ تا ۲۲ دسامبر ۲۰۲۰ استفاده شده است. تعداد این تصاویر ۱۳۳ تصویر سستینل-۱، از نوع SLC با قطبش (VV) و حالت (IW) و پایین گذر (مسیر ۷۹) بوده است. بیس لاین زمانی هر تصویر، ۱۲ روز بوده است. به حداقل رساندن این بیس لاین به همدوسی داده‌ها می‌انجامد. شبکه گراف مربوط به تصاویر سستینل-۱ هر پنج پارت تحقیق ترسیم شده است، گراف مورد استفاده در این پردازش به روش ستاره‌ای است (شکل ۲).



شکل ۲- گراف ستاره‌ای اینترفروگرام‌های ایجادشده هر سال برای روش تداخل سنجی راداری (PSI)

در شکل ۲، نگاره‌های بیس لاین را برای هر پنج دوره مورد بررسی در تحقیق را نشان می‌دهد. تصویر پایه در مرکز و به رنگ قرمز که بیشینه مقدار همبستگی زمانی، مکانی و نرخ داپلر را با سایر تصاویر دارد، و موقعیت نسبی تصاویر پیرو را به رنگ آبی نشان داده است. هر خط مخفف یک جفت تصویر است که برای محاسبه اینترفروگرام مورد استفاده قرار می‌گیرد. پردازش‌های لازم در نرم‌افزار اسنپ (SNAP) و استمپس (STAMPS) انجام گرفته است و اینترفروگرام‌های لازم تهیه شده و در نهایت با استفاده از روش پراکنده ساز دائمی، میزان فرونشست به دست آمده است. مشخصات تصاویر انتخابی مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- مشخصات کلی تصاویر انتخابی مورد استفاده در تحقیق

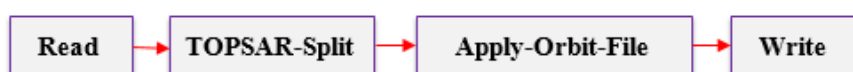
N-images	Fram	Orbit	Pass	Last image	First image	Satellite sensors
۱۴	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۶/۱۲/۲۳	۲۰۱۶/۰۱/۲۳	Sentinel-1A
۲۸	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۷/۱۲/۳۰	۲۰۱۷/۰۱/۱۶	Sentinel-1A
۳۰	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۸/۱۲/۲۵	۲۰۱۸/۰۱/۱۱	Sentinel-1A
۳۰	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۹/۱۲/۲۰	۲۰۱۹/۰۱/۰۶	Sentinel-1A
۳۱	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۲۰/۱۲/۲۵	۲۰۲۰/۰۱/۰۱	Sentinel-1A

پردازش داده‌ها به روش پراکنده ساز دائمی در این تحقیق به دو بخش زیر تقسیم شده است که عبارت‌اند از:

پردازش خودکار با استفاده از یک تصویر پایه با استفاده از اسکریپت‌های بسته متن باز پایتون نرم افزار

اسنپ^۱

پکیج منبع باز SNAP2STAMPS، توسط ژوزه مانوئل دلگادو بلاسکو^۲ و میسائیل فیوملس^۳ در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق آخرین ورژن این پکیج که توسط دلگادو بلاسکو در سال ۲۰۱۹ ارتقاء یافت استفاده شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). برنامه پردازش خودکار SNAP2STAMPS، طی چهار مرحله انجام می پذیرد. در این نوع پردازش، اسکریپت‌ها به طور سامانمند با استفاده از ابزار گراف، مجموعه‌ای از ایتترفروگرام را به حالت دسته‌ای^۴ ایجاد می کنند. قبل از آن تصاویر پایه هر دوره انتخاب می شوند، انتخاب تصویر Master به صورتی انجام می شود که در آن تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی - زمانی و اختلاف داپلر مرکزی به حداقل برسد. آماده سازی و مرتب کردن تصاویر ستینل-۱ بر اساس تاریخ اخذ تصاویر انجام خواهند شد. بعد از اینکه تصویر Master برای هر دوره انتخاب گردید، تمامی تصاویر Slave بر اساس مختصات محدوده مورد مطالعه برش داده شده و اطلاعات مداری آن‌ها به طور خودکار توسط SNAP بارگیری و به روزرسانی می شوند (شکل ۳).



شکل ۳- گراف مربوط به مرحله جداسازی تصاویر و دریافت اطلاعات مداری آن‌ها در بسته متن باز پایتون نرم افزار اسنپ

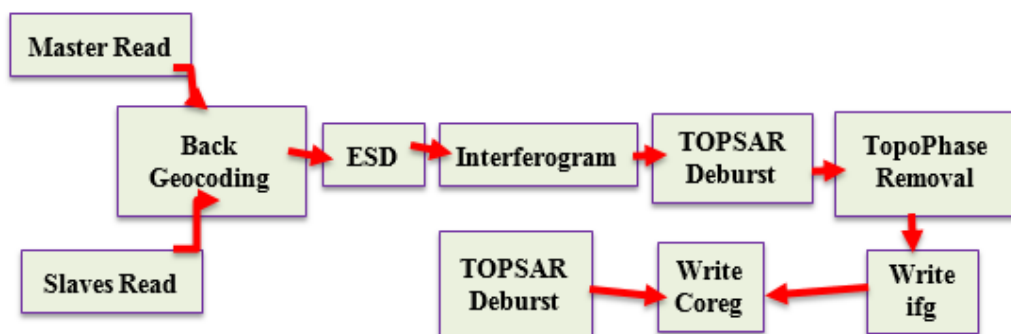
ثبت هندسی تصاویر لازمه تشکیل ایتترفروگرام در مرحله بعدی است که تضمین می کند هر تارگت زمینی مربوط به یک پیکسل مشابه با مختصات آزیموت و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو است. مرحله بعدی، ثبت هندسی داده‌ها و تولید ایتترفروگرام‌ها است که با استفاده از تنوع طبقی آن‌ها صورت می گیرد (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). این مرحله به لحاظ محاسباتی، دشوارترین مرحله پردازش در SNAP2STAMPS است، زیرا ثبت هندسی داده‌های تاپسار را انجام می دهد و همزمان با تولید ایتترفروگرام‌ها، مقدار سهم فایز نویز و فاز زمین مسطح نیز حذف شده و بخش‌های جدا شده تصاویر نیز به همدیگر متصل می شوند (شکل ۴).

1 SNAP2STAMPS

2 Delgado Blasco

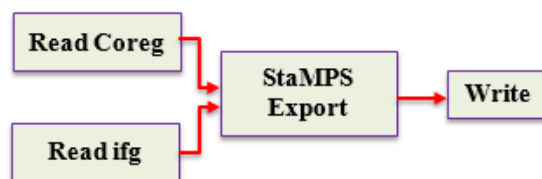
3 Michael Foumelis

4 Batch mode



شکل ۴- گراف مربوط مرحله ثبت هندسی و تولید اینترفروگرام‌ها در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

داده‌های تکمیلی موردنیاز استمپس از جمله؛ باند ارتفاعی و مختصات عرض و طول جغرافیایی داده‌ها نیز تولید می‌شوند. در نهایت خروجی‌های استمپس آماده‌سازی می‌شوند، که داده‌های پردازش‌شده مراحل قبلی را به فرمت رستری باینری و سازگار با استمپس تبدیل می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵- گراف مربوط مرحله خروجی گرفتن در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های شناسایی پیکسل‌های پراکنده ساز دائمی، شاخص پراکندگی دامنه هست که برای اولین بار توسط فرتی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. این شاخص پیکسل‌هایی را که نشان‌دهنده مقادیر دامنه پایدار هستند، مطابق رابطه [۱] شناسایی می‌کند. شاخص پراکندگی دامنه بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad [1]$$

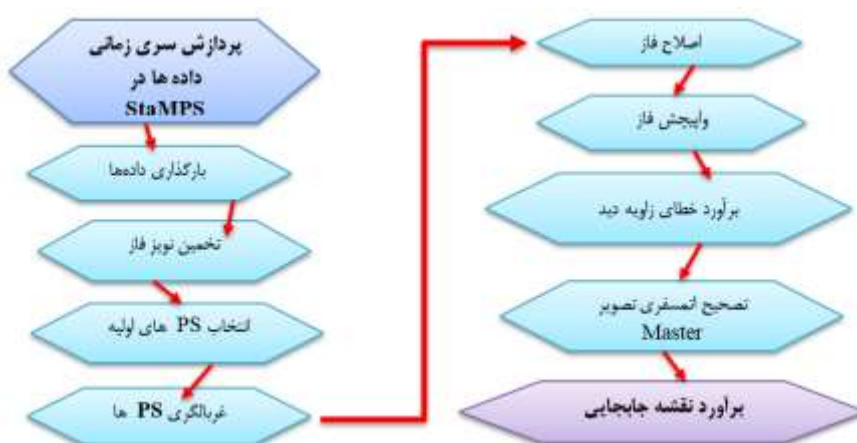
که در آن σ_A و m_A به ترتیب برابر با انحراف معیار و میانگین دامنه باز پراکنش هر پیکسل است. در این مرحله پراکنده سازهای کمتر ولی با قابلیت اطمینان بالا جهت برآورد اتمسفر انتخاب می‌شوند. مقدار بهینه این شاخص ۰/۴ پیشنهاد شده است. در این تحقیق مقدار شاخص پراکندگی دامنه (۰/۴۲) انتخاب شده است، تا تعداد پراکنده سازهای

دائمی) اولیه را در آغاز پردازش افزایش دهد، این دامنه به صورتی تعیین می‌شود که احتمال انتخاب پراکنش کننده‌های واقعی را افزایش داده و احتمال انتخاب پیکسل‌های با فاز تصادفی کاهش یابد. مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های استمپس، مربوط به وارد کردن داده‌های آماده‌شده در اسنپ به استمپس است. پس‌از آن، زنجیره پردازش پراکنده ساز استمپس (StaMPS-PSI) ایجاد می‌شود (هوپر^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

پردازش روش پراکنده ساز دائمی با استفاده از استمپس (StaMPS)

مجموعه‌ای از ایتترفروگرام‌ها با استفاده از روش‌های اجرایی متلب در استمپس پردازش شده است، که با تصحیحات تروپوسفریک مبتنی بر فاز خطی با استفاده از پکیج ترین (TRAIN) که تأخیر تروپوسفری را نسبت به توپوگرافی جبران می‌کند، تکمیل گردیده است (بکرت^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

مراحل پردازش تصاویر راداری سنتینل-۱ در پکیج استمپس (StaMPS) طبق شکل ۶، شرح داده شده است:



شکل ۶- مراحل پردازش استمپس (StaMPS)

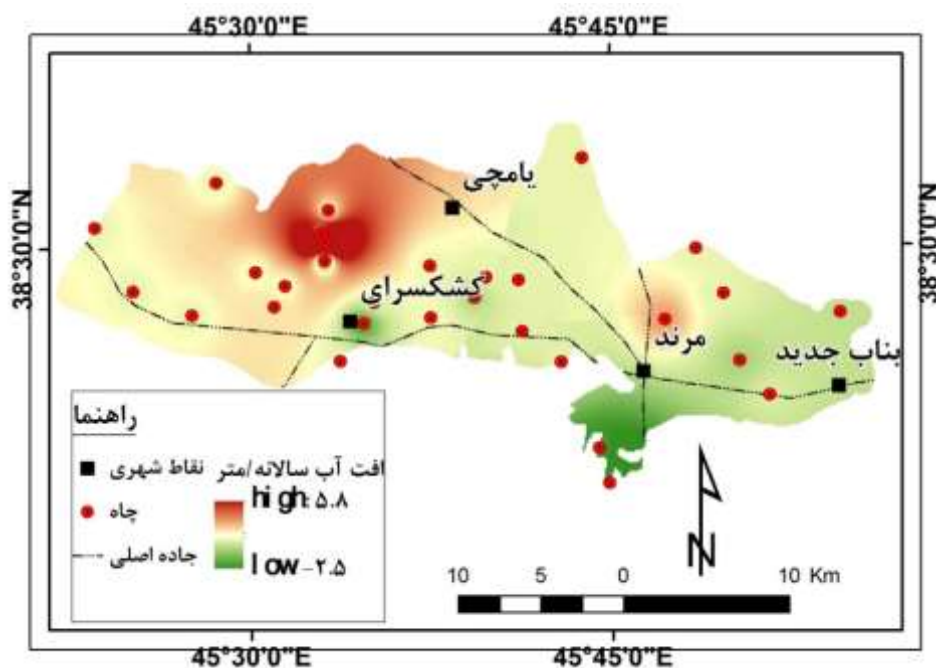
۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی در این محدوده، با استفاده از اطلاعات ثبت‌شده سطح آب زیرزمینی در ۳۰ چاه مشاهداتی که دارای داده‌های کامل بوده است، در بازه زمانی ۱۷ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷) نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی در محیط نرم‌افزار ARC-GIS و از طریق درون‌یابی به روش IDW ترسیم شده است (شکل ۷). بر اساس نتایج حاصله، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بین ۵/۸ و ۲/۵- متر طی دوره ۱۷ ساله بوده است که از نظر پراکنش مکانی، مناطق میانی دارای بالاترین میزان افت بوده‌اند. چاه‌های واقع

1 Hooper

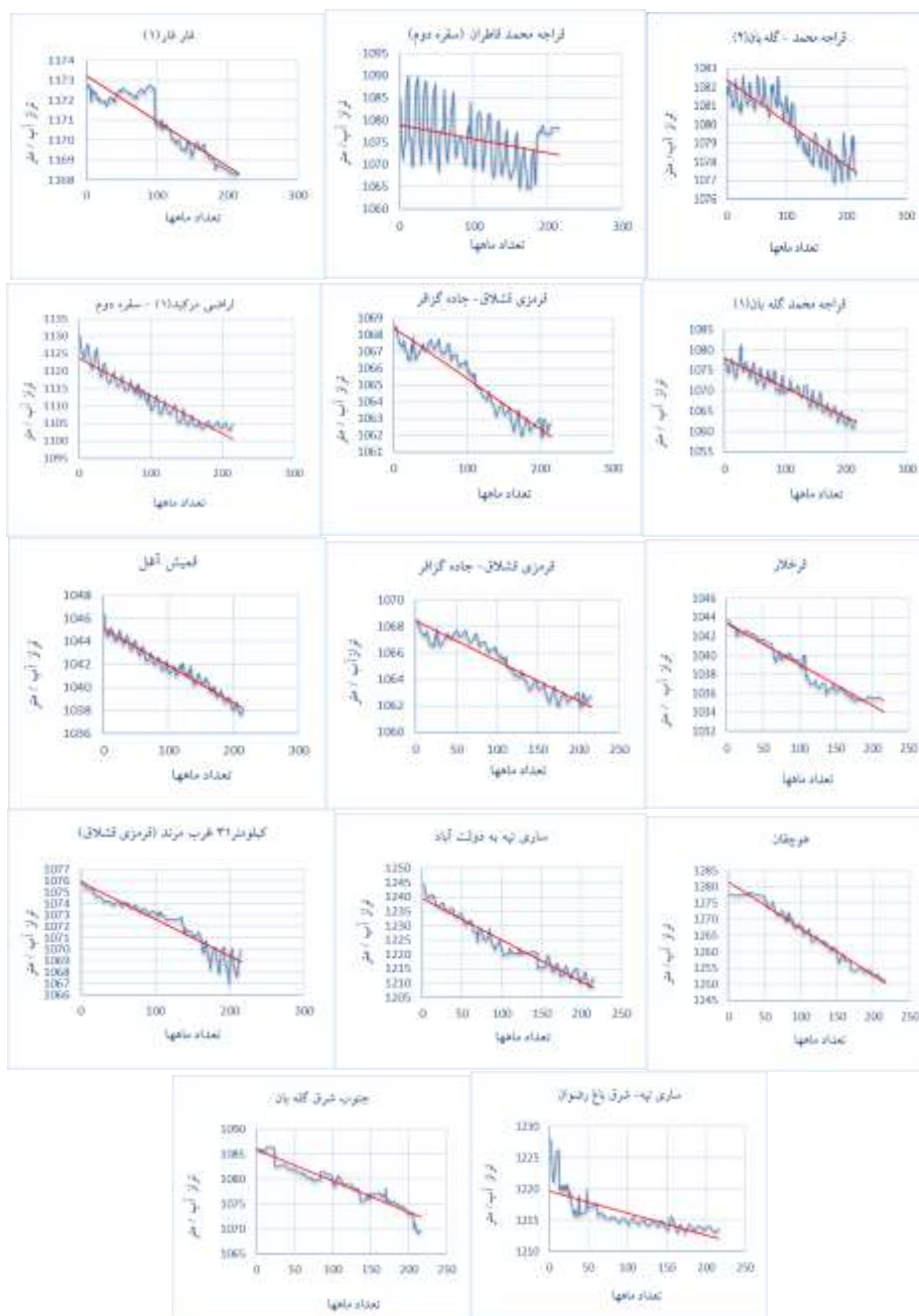
2 Bekert

در محدوده‌های شمال غرب و جنوب غرب کشک سرای و یامچی دارای بالاترین افت سالانه آب زیرزمینی را داشته است.



شکل ۷- نقشه افت منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

همچنین برای بررسی تغییرات زمانی نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۳۰ چاه مشاهده‌ای در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است. شکل ۸، هیدروگراف مربوط به تغییرات سری زمانی سطح آب در ۳۰ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت مرند را نشان می‌دهد. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرارگرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد. روند نزولی هیدروگراف‌ها نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. کاهش تغذیه ناشی از خشک‌سالی‌های اخیر به همراه افزایش برداشت بی‌رویه به عنوان عامل اصلی افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت مرند شده است.

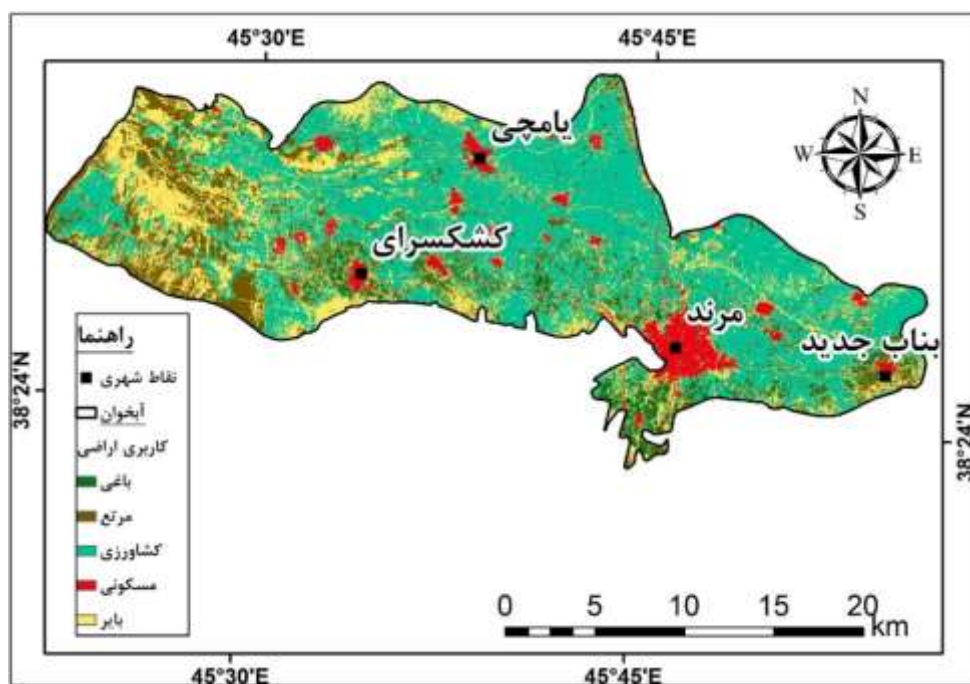


شکل ۸- نمودارهای سری زمانی چاه‌های مشاهداتی دارای افت آب و فرونشست در محدوده مطالعاتی

تحلیل نقشه کاربری و پوشش اراضی و ارتباط آن با فرونشست منطقه

نوع کاربری اراضی از عوامل انسانی مهم در تشدید وقوع فرونشست است. درواقع، بهره‌برداری‌های انسان یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست محسوب می‌شود، به‌طوری‌که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل

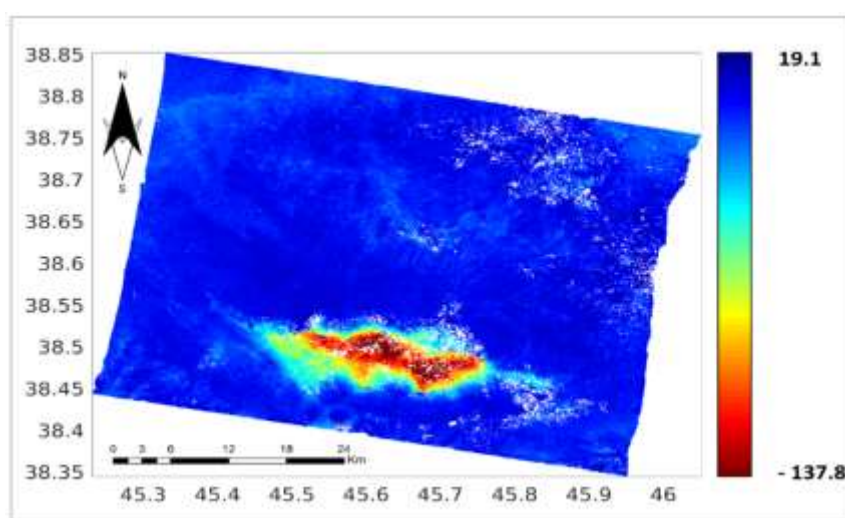
بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. در این تحقیق، نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از نقشه پوشش اراضی کل جهان که توسط سازمان فضایی اروپا که ۲۰۲۱ ماه اکتبر با رزولوشن ۱۰ متر که بر اساس داده‌های راداری Sentinel-1 و Sentinel-2، در ۱۱ کلاس پوشش زمین تهیه شده اخذ گردیده و محدوده مطالعاتی از نقشه کل برش داده شد. پس از اینکه محدوده را از نقشه سازمان ESA، جداسازی شد، نقشه کاربری را در محیط ARC-GIS از طریق ابزار Reclassify به ۵ طبقه، نواحی سکونتگاهی، کشاورزی - باغی، مراتع و اراضی بایر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹). بر اساس نقشه مذکور، مناطق جنوبی و جنوب غربی محدوده منطبق بر کوهستان میشو را کاربری مراتع و اراضی بایر و همچنین مناطق مرکزی محدوده را اراضی کشاورزی آبی و دیم دربرگرفته است. فرونشست رخ داده در این منطقه در کلاس مربوط به اراضی زراعی نزدیک به مناطق سکونتگاهی اتفاق افتاده است. با توجه به این تغییرات، میزان افت آب‌های زیرزمینی و یا میزان افزایش آن را مشخص سازد. مطالعات بیشتری در کل جهان و کاربری‌های مختلف تأثیرات بسیار زیادی بر روی سطح تراز آب‌های زیرزمینی دارند، به این دلیل که کاربری‌های مختلف باعث مصرف متفاوتی از آب‌های زیرزمینی می‌شود.



شکل ۹- نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

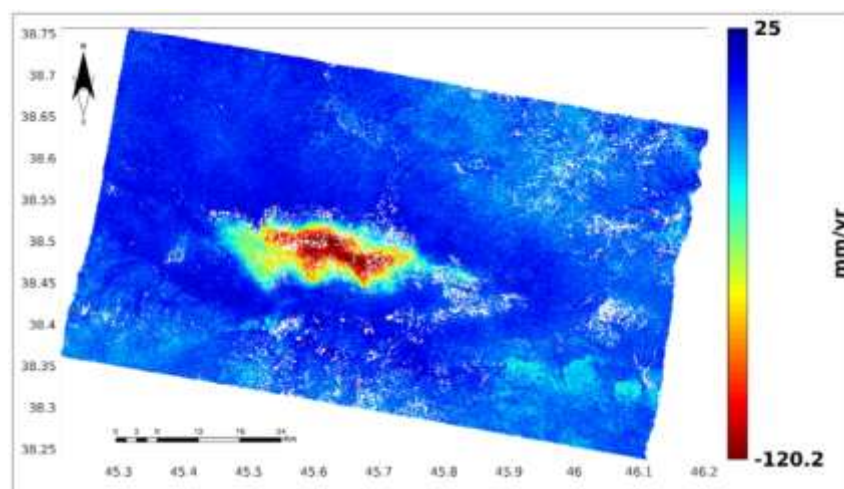
ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش گره‌ای دائمی (PSInSAR)

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۲ ژانویه سال ۲۰۱۶ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان فرونشست در قسمت میانی دشت مرنند، در قاعده مخروط افکنه‌های قدیمی و قسمت دشتی این محدوده، در محدوده روستاهای اربطان، فارفار، مرکید، یالقوزآغاج، گله بان و درویش محمد بوده است. حداکثر فرونشست در سال ۲۰۱۶ با فاصله زمانی ۱۲ روزه، $۱۳۷/۸$ میلی‌متر در سال برآورد شد. کمترین میزان جابجایی با مقدار $۱۹/۱$ میلی‌متر بالآمدگی در منطقه مورد مطالعه رخ داده است (شکل ۱۰).



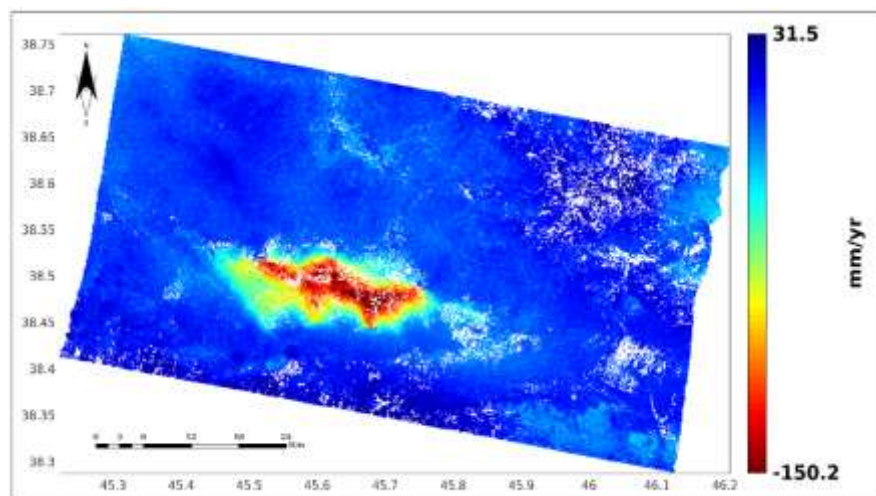
شکل ۱۰- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۶

نقشه فرونشست سال ۲۰۱۷ حاکی از افزایش نرخ فرونشست در محدوده مطالعاتی است (شکل ۱۱). حداکثر جابجایی زمین در سال ۲۰۱۷ در بازه زمانی ۱۲ روزه، $۱۲۰/۲$ میلی‌متر به صورت فرونشست و ۲۵ میلی‌متر به شکل بالآمدگی بوده است. تغییرات جابجایی زمین در این سال نسبت به سال قبل بدین صورت بوده است که نرخ فرونشست ۱۸ میلی‌متر کاهش و بالآمدگی منطقه ۶ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است.



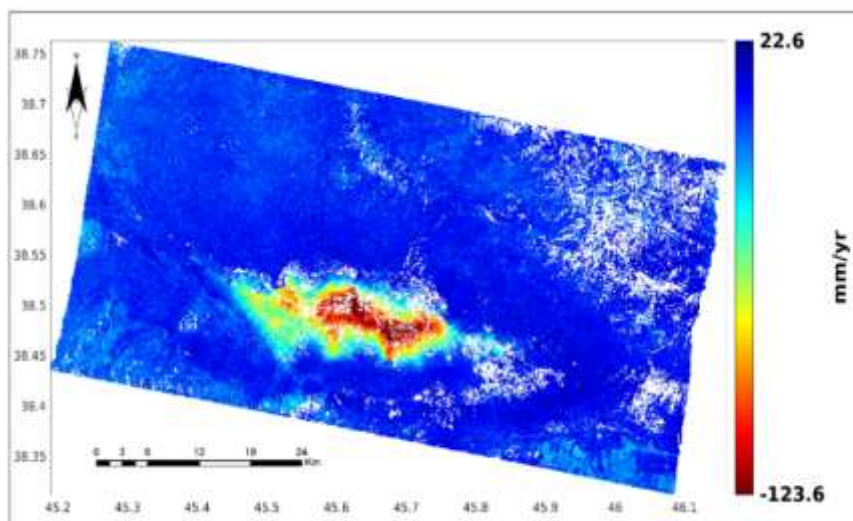
شکل ۱۱- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۷

تاریخ ۱۱ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۵ دسامبر ۲۰۱۸، میزان فرونشست منطقه ۳۲ میلی متر افزایش یافته و به نرخ حداکثری ۱۵۲/۲- میلی متر فرونشست و ۳۴/۲ میلی متر بالاآمدگی رسیده است (شکل ۱۲).



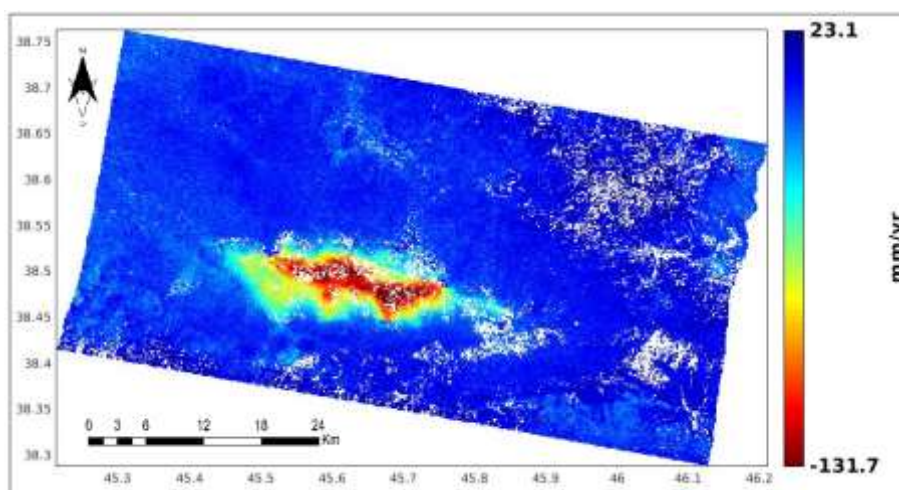
شکل ۱۲- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۸

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه از روز ۶ ژانویه سال ۲۰۱۹ تا ۲۰ دسامبر همین سال نشان می‌دهد که نرخ جابجایی به صورت ۱۲۳/۶- میلی متر فرونشست و ۲۲/۶ میلی متر بالاآمدگی به دست آمده است، وضعیت فرونشست زمین در این محدوده روند افزایشی ۱۲ میلی متر بالاآمدگی و ۲۹ میلی متر کاهش فرونشست زمین نسبت به سال قبل را نشان می‌دهد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۹

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی روز ۱ ژانویه سال ۲۰۲۰ تا دسامبر سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که این مقدار نسبت به سال قبل حدود ۹ میلی‌متر کاهش فرونشست و ۱ میلی‌متر بالا آمدگی افزایش پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۰، مقدار فرونشست و بالا آمدگی به ترتیب 131.7 - میلی‌متر و 23.1 میلی‌متر به دست آمده است (شکل ۱۴). بیش‌ترین میزان جابجایی رخ داده در محدوده مطالعاتی، در سال ۲۰۱۸ اتفاق افتاده است در مجموع مخروط افکنه‌ها خصوصاً قاعده مخروط افکنه‌ها و دشت انتهایی دارای بیش‌ترین مقادیر فرونشست هستند.



شکل ۱۴- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۲۰

۴- جمع‌بندی

روش سری زمانی تداخل سنجی با پراکنش گرهای دائمی (PSI)، کمک شایانی در جهت پایش فرونشست و جابجایی‌های سطح زمین کرده است. از جمله محدودیت‌های این روش وجود پیکسل‌های سفید زنگ در سطح نقشه جابجایی بود، این موضوع به دلیل ناهمبستگی زمانی که بر اثر تغییرات سریع پوشش منطقه و در نتیجه پایین بودن میزان همدوسی ایجاد می‌شود. همچنین اختلاف فاز ناشی از باز کردن فاز (phase unwrapping) که با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه قابل توجه نبوده است. در تحقیق حاضر، برای نخستین بار به پایش نرخ فرونشست زمین در دشت مرند استان آذربایجان شرقی، از فن تداخل سنجی راداری PSI با استفاده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پکیج خودکار SNAP2STAMPS استفاده شده است. همچنین در این تحقیق، پتانسیل بسته متن باز استمپس و نرم‌افزار اسنپ جهت پردازش تداخل سنجی راداری نشان داده شده است که از نتایج مهم استخراج شده از این الگوریتم پردازشی، ایجاد نقشه‌های متوسط جابجایی برای دشت مرند با مقادیر $13/7$ ، 12 ، $15/2$ ، $12/3$ - و $13/1$ سانتی‌متر در سال در راستای دید ماهواره در طول بازه زمانی مورد مطالعه (از سال ژانویه ۲۰۱۶ تا دسامبر ۲۰۲۰) بوده است. فرونشست‌های رخ داده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است. به لحاظ پراکنش مکانی، مناطق فرونشست یافته عمدتاً در مناطق میانی دشت مشاهده شده است؛ بنابراین مناطق میانی دشت بیشترین نرخ فرونشست نسبت به سایر نواحی دشت را دارا هستند. منطقه فرونشست در جنوب شهر یامچی و شمال و شمال غرب کشک سرای در حال اتفاق افتادن است و روستاهای زیادی از جمله اربطان، فارفار، مرکید ایلات یالقوز آغاج، درویش محمد در آن واقع شده در این کاسه فرونشست قرار دارد که منطبق بر کاربری اراضی کشاورزی و باغی است که به سمت مناطق شهری در حال پیشروی است. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرار گرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. فرونشست‌های رخ داده در دشت مرند بیشتر منطبق بر زمین‌های کشاورزی بوده و سرعت بالایی دارد.

کتابنامه

احمدی، سلمان؛ سودمند افشار، رضا؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی. محیط‌زیست و مهندسی آب. دوره ۶. شماره ۳. صص ۲۳۳-۲۱۹.

- پایی، رامین؛ عطارچی، سارا؛ سلیمانی، مسعود؛ ۱۳۹۹. تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری. *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*. دوره ۱۰. شماره ۳۳. صص ۱۲۸-۱۰۹.
- خرمی، محمد؛ ۱۳۹۶. تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی. دانشکده مهندسی. گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک. مشهد. صص ۱۴۰.
- خوش‌لهجه آذر، مهدی؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در مناطق مستعد فروچاله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی. دانشکده مهندسی نقشه‌برداری (ژئودزی و ژئوماتیک). صص ۱۲۰.
- داداشی، ثریا؛ صادق فام، سینا؛ ندیری، عطاالله؛ محبی، یوسف؛ ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرنده با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمین. *مهندسی عمران*. دوره ۲، ۳۶. شماره ۱، ۳. صص ۸۵-۹۶.
- شرافت، متین؛ انصاری، عبدالحمید؛ مجتهد زاده، سید حسین؛ قربانی، احمد؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای پایا. *خشک بوم*. دوره ۹. شماره ۲. صص ۱۲۱-۱۳۶.
- شمشکی، امیر؛ انتظام سلطانی، ایمان؛ بلورچی، محمدجواد؛ ۱۳۸۴. فرونشست زمین در دشت تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن. *سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور*. ص ۲۱.
- علی بخشی، حمید؛ ۱۳۹۵. بررسی میزان فرونشست دشت ورامین با استفاده از ابزارهای ژئودتیکی داده‌های ترازیابی دقیق InSAR و تصاویر راداری GPS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد شاهرود. دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران. گروه ژئودزی. ص ۱۳۱.
- فروغ‌نیا، فاطمه؛ نعمتی، صادق؛ مقصودی، یاسر؛ ۱۳۹۷. آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائم. با استفاده از تصاویر Sentinel-1A و ENVISAT-ASAR برای برآورد پدیده فرونشست شهر تهران. *سنجش‌ازدور و GIS/ایران*. سال ۱۰. شماره ۱. صص ۷۲-۵۵.
- قره‌چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلیان، سعید؛ گنجی، کامران؛ ۱۴۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد). *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۲. شماره ۳. صص ۶۱-۴۰.
- مختاری کشکی، داود؛ ۱۳۸۶. تحلیل‌های زمین‌ساخت - رسوبی چاله تکتونیکی و در حال گسترش مرنده. *پژوهش‌های جغرافیایی*. دوره ۳۹. شماره ۶۰. صص ۱۴۹-۱۲۹.
- مؤمنی، سحر؛ ۱۳۹۷. برآورد فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های سری زمانی (محدوده مورد مطالعه: دشت کبودرآهنگ - فامنین همدان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی. گروه سنجش‌ازدور. دانشگاه تبریز. ص ۷۱.

- Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 146193. [10.1016/j.scitotenv.2021.146193](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193)
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47. [10.1016/j.rse.2015.08.035](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035).
- Cian, F., Blasco, J. M. D., & Carrera, L., 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: a methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, 9(3), 124. [10.3390/geosciences9030124](https://doi.org/10.3390/geosciences9030124).
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89. [10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011).
- Da Lio, C., Teatini, P., Strozzi, T., & Tosi, L., 2018. Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. *Remote sensing of environment*, 205, 56-70. [10.1016/j.rse.2017.11.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.016).
- Delgado Blasco, J. M., Fomelis, M., Stewart, C., & Hooper, A., 2019. Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 11(2), 129. [10.3390/rs11020129](https://doi.org/10.3390/rs11020129).
- El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C., 2021. Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science of The Total Environment*, 776, 145946. [10.1016/j.scitotenv.2021.145946](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145946).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. [10.1109/36.898661](https://doi.org/10.1109/36.898661).
- Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M., & Floris, M., 2019. PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: a case study in the Republic of Ireland. *Remote Sensing*, 11(3), 348. [10.3390/rs11030348](https://doi.org/10.3390/rs11030348).
- Fomelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... & Wong, C., 2018. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE. <https://forum.step.esa.int>.
- Haghighi, M. H., & Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote sensing of environment*, 221, 534-550. [10.1016/j.rse.2018.11.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003).
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36. [10.1126/science.abb8549](https://doi.org/10.1126/science.abb8549).
- Hooper, A., Bekaert, D., Ekbal, H., & Spaans, K., 2018. StaMPS/MTI manual: Version 4.1 b. School of Earth and Environment, University of Leeds. Retrieved October, 15, 2019. <https://homepages.see.leeds.ac.uk>.
- Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B., 2018. Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288. [10.1016/j.rse.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.001).
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A., 2018. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 386-396. [10.1016/j.jag.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.001).

- Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., ... & Jiménez, J., 2017. Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions. *Journal of Hydrology*, 553, 71-87. [10.1016/j.jhydrol.2017.07.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.056).
- Miller, M. M., & Shirzaei, M., 2019. Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378. [10.1016/j.rse.2019.03.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.022).
- Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C., Yang, C., Sun, Q., & Chen, W., 2017. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote sensing of environment*, 188, 73-84. [10.1016/j.rse.2016.10.037](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.037).
- Zuo, J., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Zhou, C., & Ke, Y., 2019. Time-series evolution patterns of land subsidence in the eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, 11(5), 539. [10.3390/rs11050539](https://doi.org/10.3390/rs11050539).



Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)

Mousa Abedini^{a*}, Leila Aghayary^b, Sayyad Asghari Saraskanrood^c

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^b PhD in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^c Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 14 January 2022

Revised: 22 May 2022

Accepted: 25 June 2022

Abstract

One of the dangers facing Iran's plains is subsidence. Land subsidence due to various reasons, such as over-harvesting of underground water sources and climate changes, has caused many problems in agricultural lands, roads, and power and energy transmission lines. Therefore, it is important to deal with the causes and influencing factors to control the risks. Ardabil plain is also one of the areas prone to subsidence due to climate changes and the decrease of underground water in recent years. The aim of the present research is the zoning subsidence risk in this plain. First, the factors influencing subsidence in the Ardabil plain (slope, land use, lithology, distance from the fault, distance from the waterway, drop in water level, distance from the city and the village) were identified. Then the layers of data were applied in the geographic information system. In the next stage, the weighting of the investigated factors was done using ANP method and in the Super Decision software, and the final analysis and modeling were done using the MABAC method as one of the multi-criteria decision making methods. Finally, the resulting map was classified into five categories from very low risk to very high risk. The results showed that such factors as water level drop, distance from the river and lithology have the highest weighting factor. Moreover, 244.29 and 370.59 square kilometers, respectively, of the area of this plain, are in very dangerous and dangerous classes. Finally, due to the high potential of Ardabil plain in terms of subsidence, protective and management measures should be taken into consideration by relevant authorities and institutions.

Keywords: Hazards, Subsidence Phenomenon, MCDM, Ardabil Plain

*. Corresponding author: Mousa Abedini E-mail: abedini@uma.ac.ir Tel: + 989143555226

How to cite this Article: Abedini, M., Aghayary, L., & Asghari Saraskanrood, S., (2023). Evaluating and zoning subsidence risk using MABAC and ANP adaptive algorithm (Case study: Ardabil Plain), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 43-68.

DOI:10.22067/geoeh.2022.74202.1143



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>



<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74202.1143>



جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۶۸-۴۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP

(مطالعه موردی: دشت اردبیل)

موسی عابدینی^۱ - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
لیلا آقایی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
صیاد اصغری سراسکانرود - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۴

چکیده

یکی از مخاطرات پیشروی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست است. پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است؛ از این رو پرداختن به علل و عوامل تأثیرگذار جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. دشت اردبیل نیز به خاطر تغییرات اقلیمی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر یکی از مناطق مستعد جهت مخاطره فرونشست است. هدف تحقیق حاضر، پهنه‌بندی خطر فرونشست در این دشت است. در این مطالعه ابتدا، عوامل مؤثر جهت ایجاد فرونشست در دشت اردبیل (شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، افت سطح آب، فاصله از شهر و روستا)، شناسایی شدند و سپس نسبت به تهیه لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام گردید. در مرحله بعد وزن‌دهی عوامل موردبررسی، با استفاده از روش ANP و در محیط نرم‌افزار Super Decision انجام گردید و تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از

Email: abedini@uma.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۵۵۲۲۶

نحوه ارجاع به این مقاله:

عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی

MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۶۸-۴۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74202.1143>

روش MABAC به عنوان یکی از روش های تصمیم گیری چندمعیاره، انجام شد. در نهایت، نقشه حاصله در پنج رده با خطر بسیار کم تا خطر بسیار زیاد طبقه بندی گردید. با توجه به نتایج مطالعه، عوامل افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد؛ به ترتیب ۲۴۴/۲۹ و ۳۷۰/۵۹ کیلومترمربع از مساحت این دشت، در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند. در نهایت می توان اظهار داشت، نظر به توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست، بایستی اقدامات حفاظتی، مدیریتی در سطح دشت اردبیل مورد توجه مسئولان و دستگاه های ذیربط قرار گیرد.

کلیدواژه ها: مخاطرات، پدیده فرونشست، MCDM، دشت اردبیل.

۱- مقدمه

چشم انداز سطح زمین به عنوان سیستمی پیچیده حاصل تعامل فاکتورهایی نظیر فرآیندهای جغرافیایی، اقلیمی، زمانی و فعالیت های انسانی است. رشد کالبدی، بدون رعایت اصول برنامه ریزی شهری و ساخت وسازهایی بدون در نظر گرفتن پتانسیل مخاطرات موجود در پهنه های در معرض مخاطرات طبیعی، آسیب پذیری و خسارت ها در محدوده های مورد نظر را تشدید می کند. عواملی که با تغییر در چگونگی ساختار و کارکرد توپوگرافی طبیعی و ریز اقلیم، به ویژه در محیط های انسان ساخت، زمینه ساز ایجاد مخاطراتی نظیر زمین لغزش، سیلاب شهری، زمین لرزه و فرونشست می گردد (فنی و همکاران، ۱۳۹۶). براساس تعریف سازمان زمین شناسی ایالت متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست روبه پائین سطح زمین است که می تواند دارای حرکت قائم رو به پائین سطح زمین و کمی افقی باشد (عابدینی، ۱۳۹۶). پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین های کشاورزی، جاده ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی می شود (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). فرونشست از جمله مخاطرات زمین شناسی است که از لحاظ سرعت شکل گیری، به دو دسته سریع و تدریجی تقسیم می گردد. حالت تدریجی به دلیل تلفات انسانی کم آن در مقایسه با دیگر پدیده های طبیعی مانند زلزله، لغزش و سیلاب کمتر مورد توجه قرار می گیرد (مدنی و همکاران، ۱۳۹۶).

اما فرونشست در حالت سریع باعث آسیب به سازه ها و تلفات انسانی می گردد. فرونشست زمین در سال های اخیر به مشکلی جهانی تبدیل شده است. چراکه در اکثر کشورها در حال وقوع است. فرونشست سبب تخریب کانال های آبیاری، شکست خطوط لوله های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه ها و تشدید فرایند زمین لغزه و سیلاب ها می شود (محمودی و همکاران، ۱۳۹۲). فرایندهای طبیعی مانند حرکات تکتونیکی، فوران آتشفشان، انحلال سنگ ها و کارستی شدن، تراکم رسوبات و ذوب زمین های یخ بسته معمولاً سبب فرونشست زمین در ناحیه

وسیع می‌گردند (ژویی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور کلی فرونشست متأثر از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی و پارامترهای زمین‌شناسی است که در صورت عدم شناخت این پدیده سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی می‌گردد (گالوی^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهشگران رابطه بین توسعه شهری و فرونشست زمین را رابطه‌ای دو جانبه می‌دانند که هردو بر هم تأثیر گذاشته و تأثیر می‌پذیرند. به گفته آن‌ها تمدن شهرها به جهت رشد سریع در توسعه شهری در بخش‌های مختلف صنعت، تجارت و حمل‌ونقل اثرات زیست‌محیطی منفی از خود بر جا می‌گذارند؛ مانند: تغییر در کاربری اراضی کشاورزی به مسکونی، مصرف بی‌رویه منابع آب‌های زیرزمینی جهت گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت این اثرات منفی در نهایت منجر به بروز پدیده فرونشست می‌شود و همین پدیده می‌تواند برنامه و فرایند توسعه شهری را متأثر سازد (منتظریون و همکاران، ۱۳۹۸).

به‌منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش‌ازپیش در کشور و دشت اردبیل احساس می‌شود. اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است. با علم به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت تأثیر، نه تنها قادر خواهیم بود، میزان پیشرفت این پدیده را در یک منطقه شناسایی کنیم و از پیشرفت بیشتر آن جلوگیری نماییم. بلکه می‌توانیم اطلاعات بالارزشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و سفره آب زیرزمینی به دست آوریم.

امروزه؛ از یک سو، سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند (بوخیر^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) و در سال‌های اخیر، جهت مطالعه فرونشست مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود (آهر^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران^۵، ۲۰۱۵؛ عرب عامری و همکاران، ۲۰۱۸). لذا می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان انجام شده و توانایی تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست نشان داده است. تاکنون مطالعات فراوانی پیرامون پهنه‌بندی مخاطرات از جمله فرونشست در ایران و سایر کشورها انجام شده است که به برخی از آن‌ها

1 zhu et all

2 Galloway at all

3 Bukheir et all

4 Aher et all

5 Georgiou et all

اشاره می‌شود. استیفن^۱ (۲۰۱۶)، به بررسی علل فرونشست و عوامل تشدیدکننده و خسارات ناشی از فرونشست را بررسی کرده و مهم‌ترین علت فرونشست را تخلیه بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی و انحلال سنگ‌های کربناته اعلام کرد. کویی انجوی^۲ (۲۰۱۶)، در کتاب علل فرونشست زمین در شهر هوشی‌مین به مطالعه این پدیده پرداخته و توصیه‌های مناسبی در جهت مدیریت آن در سطح شهر بیان کرده است. گامبولاتی^۳ و همکاران (۲۰۰۶)، به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. هوانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۶)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم، و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد فرونشست دشت روانسرا-سنجابی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی کار کرده‌اند و نتایج نشان داده که ارتباط و همبستگی قوی میان عمق رسوبات ریز دانه چاه‌ها و احتمال فرونشست زیاد آبی وجود ندارد به‌طوری‌که حداکثر عمق رسوبات ریز دانه در نواحی مستعد فرونشینی با احتمال خطر بالا، حدود ۹۱۲ متر است این در حالی است که در برخی از نقاط آبخوان که استعداد کمتری برای فرونشست دارند عمق رسوبات ریز دانه بسیار بیشتر و حدود ۲۲۲۰ متر است.

شادفر و همکاران (۱۳۹۴)، در مقاله‌ای به پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش AHP پرداختند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که فاکتور برداشت بی‌رویه با ضریب ۴۸ درصد در درجه اول و عامل سنگ‌شناسی با ضریب ۲۴ درصد در درجه دوم اهمیت در ایجاد فرونشست منطقه است. همچنین نتایج نشان داد که ۵۵ درصد از مساحت منطقه، در پهنه‌بندی با خطر نسبتاً زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. شایان (۱۳۹۵)، به پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان پرداختند. جهت پهنه‌بندی از ۵ لایه ارتفاع، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی شبکه‌های زهکشی و شیب استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع فرونشست در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌تنهایی نقشی ندارند. فنی و همکاران (۱۳۹۶)، به پهنه‌بندی و تحلیل فضایی حساسیت مخاطرات چهارگانه

1 Stephen

2 coein enjoin

3 Gambolati

4 hoang at all

محیطی زمین‌لغزش، سیل، زلزله و فرونشست در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران پرداختند. روش مطالعه در این مقاله، روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP است و از نقشه‌های بارندگی، شکل شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و زمین‌شناسی استفاده کرده‌اند و نقشه حساسیت نهایی در قالب ۵ کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی و به صورت نقشه و جدول استخراج و ارائه شده‌اند. **عالی پور و همکاران (۱۳۹۶)**، به پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی دشت اردبیل پرداختند و اقدام به تهیه نقشه احتمال فرونشست زمین و تعیین مناطق دارای ریسک پرداختند. لایه‌های اطلاعاتی شامل ۵ لایه زمین‌شناسی، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، شیب و ضخامت آبرفت به عنوان معیارهای مؤثر مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج نشان داد که ۱۳ درصد منطقه دارای ریسک خیلی بالا است و حدود ۶۷/۵ درصد مناطق جنوبی در بخش ریسک‌های خیلی بالای فرونشست، به دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است. **بهیاری و همکاران (۱۳۹۶)**، به ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره پرداختند. در این مطالعه از روش AHP به منظور تجزیه و تحلیل خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه با استفاده از لایه‌های مطالعاتی ارتفاع، شیب، آبراهه‌ها و زمین‌شناسی، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست در منطقه تهیه گردید. این نقشه نشان می‌دهد که خطر فرونشست در بخش جنوبی منطقه نسبت به سایر مناطق بیشتر است. **کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۸)**، به پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل‌آباد با استفاده از تصاویر سستینل ۱ مربوط به سال‌های ۹۴ تا ۹۷ پرداختند. نتایج نشان داد، این منطقه در بیش‌ترین حالت ۱۷ سانتی‌متر در سال فرونشست دارد و بیشتر در حومه جنوب غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. **منتظریون و همکاران (۱۳۹۸)**، مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی خطر فرونشست زمین با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز با به‌کارگیری روش AHP تحلیل نمودند و نتایج نشان می‌دهد که مناطق وسیعی در استان تهران از جمله غرب و جنوب غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار و کرج از مناطق مستعد وقوع فرونشست است. **شفیعی و همکاران (۱۳۹۹)**، به بررسی فرونشست دشت آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند و جهت بررسی وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی از روش درون‌یابی IDW استفاده کرده‌اند و نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان می‌دهد که نرخ نشست در هر سال به‌طور میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله ۱۶ سانتی‌متر است. **ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)**، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند. نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری محدوده مطالعاتی در طی بازه زمانی یک‌ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. **شاه کرمی و همکاران (۱۳۹۹)**، مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب

زیرزمینی در دشت اراک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع هستند که نواحی مرزی و حاشیه‌ای دشت اراک در معرض افت بیش‌تر آب قرار دارند و تمرکز رسوبات ریزدانه رسی در قسمت‌های غربی به‌مراتب بیشتر از نواحی دیگر است. در نتیجه احتمال می‌رود این نواحی در معرض خطر فرونشست بیشتری باشند. **زارعی و همکاران (۱۳۹۹)**، به تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه سایت gps دشت سلماس پرداختند و نتایج نشان داد که به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی، ۰/۰۷۸ متر سطح زمین در دشت نشست می‌کند. **جواد (۱۴۰۰)**، در رساله خود به برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان- بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS در طی بازه زمانی ۵ ساله و میزان فرونشست این دشت را ۵۶ میلی‌متر به‌صورت سالانه برآورد کرده است و بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق دارای افت منابع آب زیرزمینی است. **فرزین‌کیا و همکاران (۱۴۰۰)**، به پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوبین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای فازی پرداختند در این تحقیق از روش ANP و فازی، فرونشست به‌صورت کلاس‌بندی برای نشان دادن ویژگی‌های مناطق بحرانی فرونشست و اولویت‌بندی مناطق مختلف از نظر استعداد برای وقوع پدیده فرونشست به دست آمد و نتایج بیانگر این است که ۵۶ درصد قسمت مرکزی دشت جوبین با خطر زیاد تا خیلی زیاد به‌حساب می‌آیند.

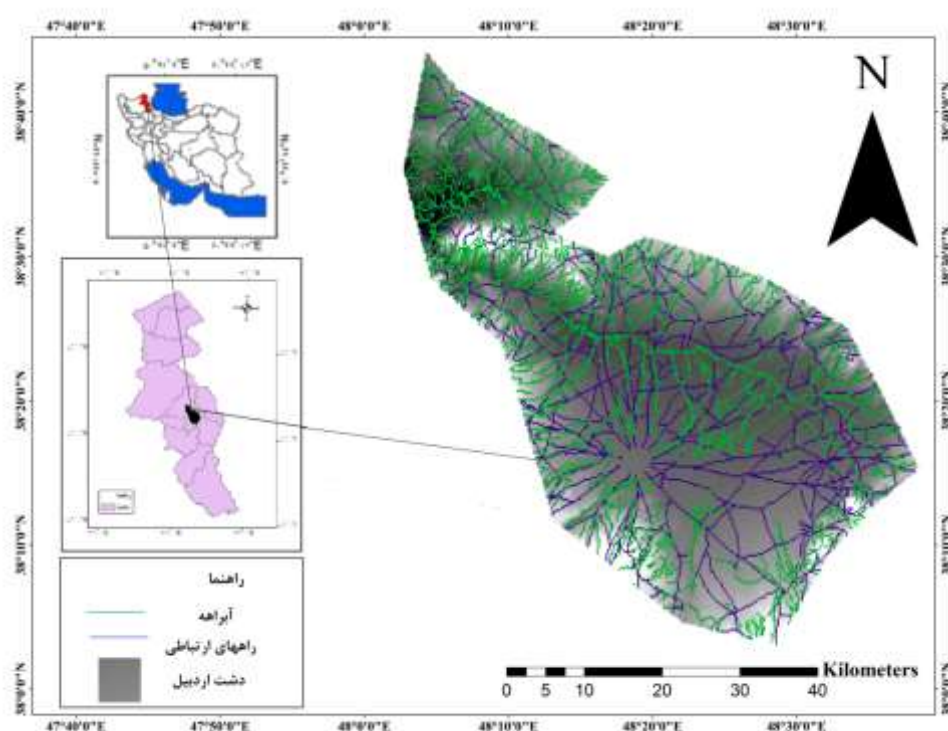
هرچند که تحقیقات معدودی در مورد دشت اردبیل انجام شده، ولی موضوع آن‌ها متفاوت بوده است. **عابدینی (۱۳۹۲)**، در مورد علل فرونشست دشت اردبیل کار کرده، و مهم‌ترین علل آن را برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های تکتونیک حاصل از گسل‌های حواشی دشت و سنگینی ناشی از انباشت آبرفت‌ها عنوان کرده است

با توجه به منابع بررسی شده محققان مختلف این تکنیک را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون فرونشست مطرح کرده است. روش MABAC، که براساس رویکرد برنامه‌ریزی مطلوب و بهینه‌سازی چندمعیاره پایه‌ریزی شده است، به‌عنوان روش تصمیم‌گیری چند معیاره، در تلفیق با فرایند تحلیل شبکه، به‌منظور پهنه‌بندی پتانسیل وقوع فرونشست دشت اردبیل استفاده شد. طبق بررسی منابع منتشر شده، تاکنون در دشت اردبیل با این روش و داده‌های ورودی، پژوهشی ارائه نشده است لذا جهت برآورد دقیق‌تر میزان فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن لزوم و خلأ انجام تحقیق با این روش کاملاً احساس می‌شود. لذا اهداف تحقیق حاضر، بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، پهنه‌بندی فرونشست، اندازه‌گیری معیارهای مؤثر بر فرونشست و بررسی مؤثرترین عوامل در فرونشست دشت اردبیل است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت اردبیل در شمال غرب ایران در قسمت شرقی فلات آذربایجان و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز استان اردبیل واقع شده است. در بررسی زمین‌شناسی، دشت اردبیل با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول خاوری و ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی قرار دارد. زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. ارتفاع متوسط اراضی کشاورزی حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. وسعت آن حدود ۸۲۰ کیلومترمربع است و جزئی از حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو به شمار می‌رود. دشت اردبیل متشکل از ۸۸ واحد روستایی ده واحد دهستان و ۲ واحد شهری اردبیل و آبی بیگلر است. شهر اردبیل مرکز استان اردبیل در غرب این دشت واقع شده است. در محدوده دشت اردبیل تعداد ۲۲۴۳ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ۲۰ دهنه چشمه و ۱۸ رشته قنات وجود دارد که به مصارف کشاورزی اختصاص دارند (رستم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۱- نقشه موقعیت دشت اردبیل

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

در راستای انجام این پژوهش از داده و تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای متعددی استفاده شده است که مشتمل بر موارد زیر خواهد بود:

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چندمعیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI، Ecognition، Excel، بهره‌گیری شده است. جهت بررسی خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، افت سطح آب و فاصله از شهر و روستا)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، داندود شده از سایت (USGS)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی اردبیل؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر سنجنده لندست هشت (سنجنده OLI)، به شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۴، تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۲۰، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است (جدول ۱).

تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال: تصویر ماهواره‌ای اپتیکال در این تحقیق به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ استفاده شد. مشخصات تصاویر لندست اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی از نرم‌افزار ENVI5.3 و به منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ARCGIS10.5 استفاده شد. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در نرم‌افزار ecognition developer64، استفاده شد. همچنین به منظور به دست آوردن صحت طبقه‌بندی از Google Earth، استفاده شد.

جدول ۱- اطلاعات تصاویر سنجنده لندست ۸

SCENE-CENTER-TIME	SUN-AZIMUTH	ROW	PATH	Sensor name	Year
۰۷:۲۶:۲۷	۱۴۵,۵۰۲۴۸۳۹۷	۳۴	۱۶۷	Landsat 8	۲۰۲۰

در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام

می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی طبقه‌بندی و براساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شی‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی‌زاده و هیلالی، ۱۳۸۹). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیا با ابعاد مختلف می‌باشند تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه‌بندی شده، دارای مقیاس ۴۵، شکل ۵/۰، ضریب فشردگی ۵/۰، انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد و کلاس‌های موردنظر، در طبقه‌بندی تعیین شی‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم‌افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه‌بندی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه و روش درخت تصمیم‌گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۰ با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است.

فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

روش (ANP) شکل توسعه یافته‌ای از روش (AHP)، است که قادر است همبستگی و بازخوردهای موجود بین عناصر در یک تصمیم‌گیری را مدل‌سازی نموده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را منظور و وارد محاسبات نماید. در مدل AHP، تنها معیارها با معیار بالایی خود ارتباط داشتند؛ یعنی معیارها به هدف‌ها، زیرمعیارها به معیارها و گزینه‌ها هم به زیرمعیارها وابسته بودند، حتی خود معیارها هم به همدیگر وابسته نبودند. ولی در مدل ANP، نه تنها خوشه‌ها بر عناصر و عناصر بر گزینه، گزینه بر عناصر تأثیر می‌گذارند، بلکه حتی عناصر بر خودشان و بر دیگر خوشه‌ها نیز اثرگذارند. به‌طورکلی، روش (ANP)، دارای مراحل نیز هست که شامل، ۱- تعیین معیارها و شاخص‌ها ۲- تعیین روابط و ارتباطات بین عناصر و خوشه‌ها: در این گام، مسأله تصمیم‌گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد. ۳- مقایسات زوجی بین عناصر و خوشه‌ها: ماتریس‌های مقایسات زوجی مشابه با روش (AHP) است و زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر خوشه به نسبت اهمیتشان در جهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایسه می‌شوند. ۴- تشکیل سوپرماتریس‌ها: الف- تشکیل سوپرماتریس اولیه یا غیر وزنی ب- تشکیل سوپرماتریس وزنی ج- تشکیل سوپرماتریس حدی: سوپرماتریس وزنی، به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. ۵- نتایج ماتریس خوشه‌ها. ۶- نتیجه نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و درنهایت، نتیجه نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص می‌گردد (فرجی سبک‌بار و همکاران، ۱۳۸۹).

گام‌های روش ماباک (MABAC)

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به‌صورت معیار-گزینه است؛ یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر

سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۳- در این مرحله نسبت به استانداردسازی و یا به عبارت دیگر بی‌مقیاس نمودن معیارها، اقدام می‌گردد. در این پژوهش، از روش فازی و تابع عضویت خطی (Linear) و سیگموئیدال (Sigmoidal)، به منظور استانداردسازی استفاده شده است. در مجموعه‌های فازی، مقدار یک به عنوان بیشترین ارزش به حداکثر عضویت و صفر به عنوان کمترین ارزش، به حداقل عضویت لحاظ می‌گردد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹).

۴- وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این گام با استفاده از رابطه زیر، ماتریس نرمال را وزن‌دار می‌کنیم (رابطه ۱). در مطالعه حاضر جهت وزن‌دهی معیارها از روش ANP استفاده شده است و نتایج حاصل از وزن‌دهی ANP، با توجه به رابطه زیر، به تک تک لایه‌های اطلاعاتی لحاظ گردیده است.

$$V_{ij} = W_j * (n_{ij} + 1) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن n_{ij} عناصر ماتریس نرمال شده (N) را نشان می‌دهد، w_i ضرایب وزنی معیار را نشان می‌دهد.

۵- تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس (g): در رابطه ۲، v_{ij} عناصر ماتریس وزنی (V) و m تعداد کل گزینه‌های جایگزین را نشان می‌دهد. پس از محاسبه مقدار g_i ماتریس محدوده‌های تقریبی مرزی با توجه به معیارهای G با فرمت $N*1$ شکل می‌گیرد و n تعداد کل معیارهایی را که گزینه‌های ارائه شده برای آن‌ها انتخاب می‌شود را نشان می‌دهد.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^n v_{ij} \right)^{1/m} \quad \text{رابطه ۲}$$

بنابراین اگر n معیار داشته باشید یک ماتریس $G1 \times n$ به صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۳):

$$[G = [g_1, g_2, \dots, g_n] \quad \text{رابطه ۳}$$

۶- محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از رابطه ۴، فاصله گزینه‌ها را تا ناحیه g به دست می‌آید. در واقع باید ماتریس وزن‌دار را از ماتریس g کم کرد.

$$Q = V - G \quad \text{رابطه ۴}$$

پس از مشخص شدن ماتریس Q ، می‌توان با استفاده از حد بالایی مساحت ($G+$) و حد پایینی مساحت ($G-$) وضعیت هر گزینه را مشخص کرد.

۷- انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک MABAC، با استفاده از رابطه ۵، امتیاز نهایی هر گزینه را مشخص کرده و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (q_{ij}); i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m \quad \text{رابطه ۵}$$

محاسبه مقادیر توابع معیار، توسط گزینه‌ها به عنوان مجموع فاصله‌های جایگزین از مناطق تقریبی مرزی q_i به دست می‌آید. با جمع کردن عناصر ماتریس Q در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها به دست می‌آید. در این رابطه n تعداد معیارها را نشان می‌دهد و m تعداد گزینه است (علیزاده و همکاران ۲۰۲۱).

جدول ۲- نوع توابع فازی‌سازی لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست دشت اردبیل

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از آبراهه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
افت سطح آب	با کاهش میزان سطح آب چاه‌ها، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی

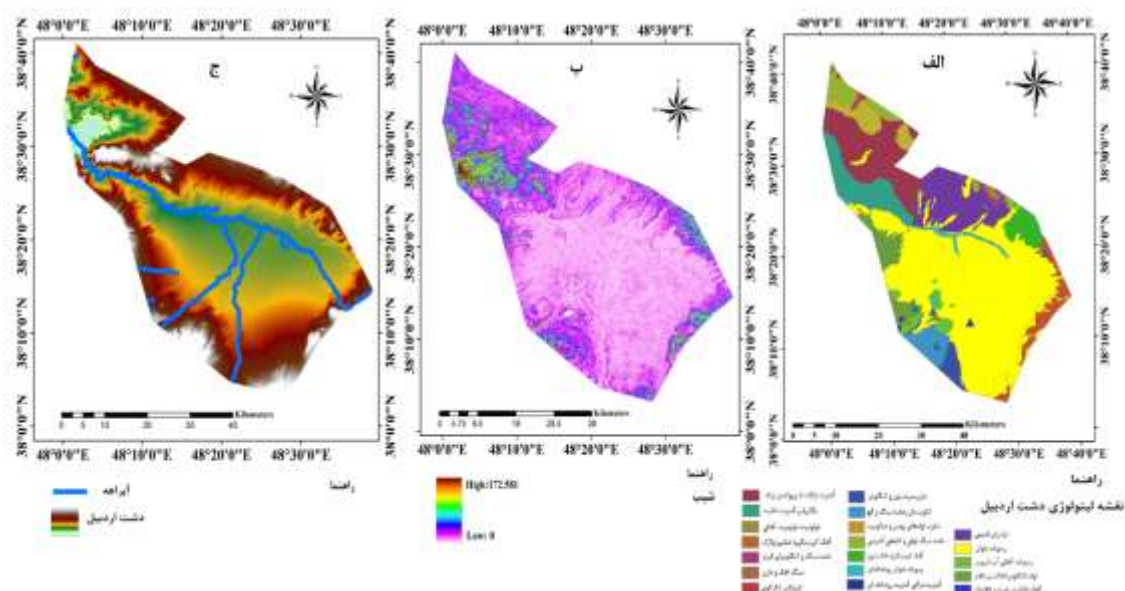
معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

لیتولوژی: قدیمی‌ترین سازندهای شناخته شده در دشت اردبیل دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک است. رخساره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه‌سنگ‌های توفی و توفی برشی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریستالیزه، آندزیت بازالت با پیروکسن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیشترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیشترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر از سایر بخش‌ها است (شکل ۲، الف).

شیب: دشت اردبیل در شمال غرب ایران و در قسمت شرقی فلات آذربایجان به صورت حوضه بسته‌ای است که از شمال و غرب منطقه به کوه سبلان و کوه‌های اطراف آن و از شرق و جنوب به رشته‌کوه‌های تالش منتهی می‌گردد؛ بنابراین زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. بررسی وضعیت ارتفاع نشان می‌دهد که در بخش مرکزی دشت کم‌ترین میزان ارتفاع وجود دارد. شواهد فرونشست نیز بیش‌تر در این طبقه ارتفاعی دیده می‌شود. در مورد لایه شیب، محدوده شیب ۵-۰ کمترین میزان شیب در محدوده منطقه می‌باشد که این شیب نقش

مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد، از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد (شکل ۲، ب).

فاصله از رودخانه: عامل نزدیک به رودخانه به‌عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرونشست شناسایی گردید (شایان و همکاران، ۱۳۹۵) و با فاصله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد (شکل ۲، ج).



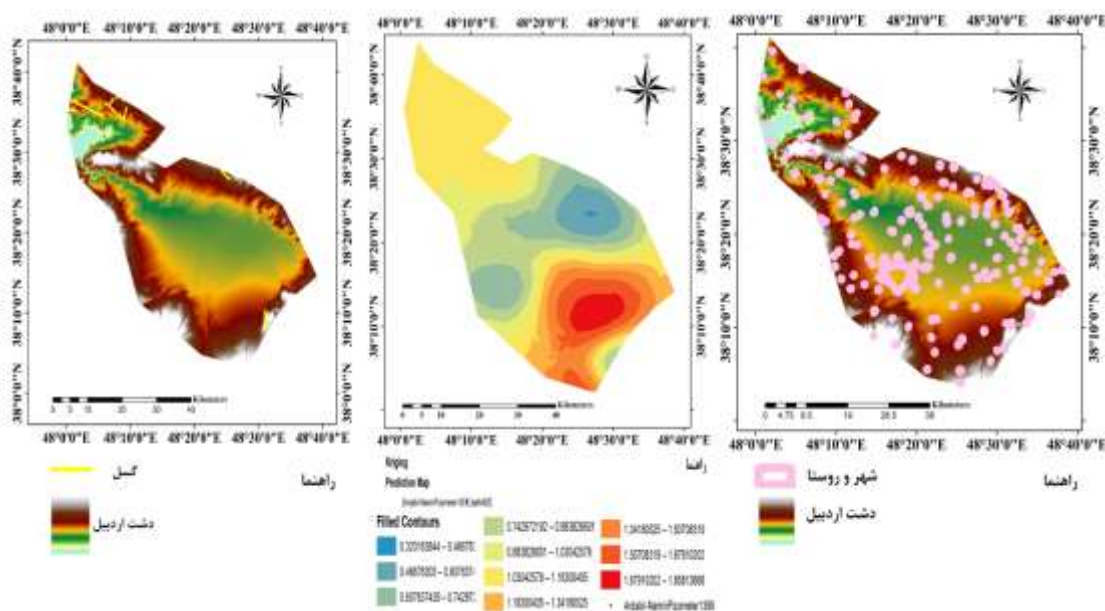
شکل ۲- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل: الف) نقشه لیتولوژی، ب) نقشه شیب، ج) نقشه آبراهه

فاصله از شهر و روستا: عوامل انسان‌ساخت مانند زمین‌های کشاورزی، ابنیه بزرگ و صنعتی، تأسیسات زیرزمینی مانند تونل، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری و معدن کاری، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین در اثر احداث ساختمان‌های بزرگ و تراکم زیرساخت‌ها میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند (شکل ۳، الف).

بررسی تراکم چاه‌ها و افت سطح آب: براساس نتایج ارائه شده از مطالعات محققان، به نظر می‌رسد که اعمال فشار بیش از حد بر آبخوان ممکن است موجب بروز پدیده فرونشست شود. از این رو به بررسی وضعیت سفره آب

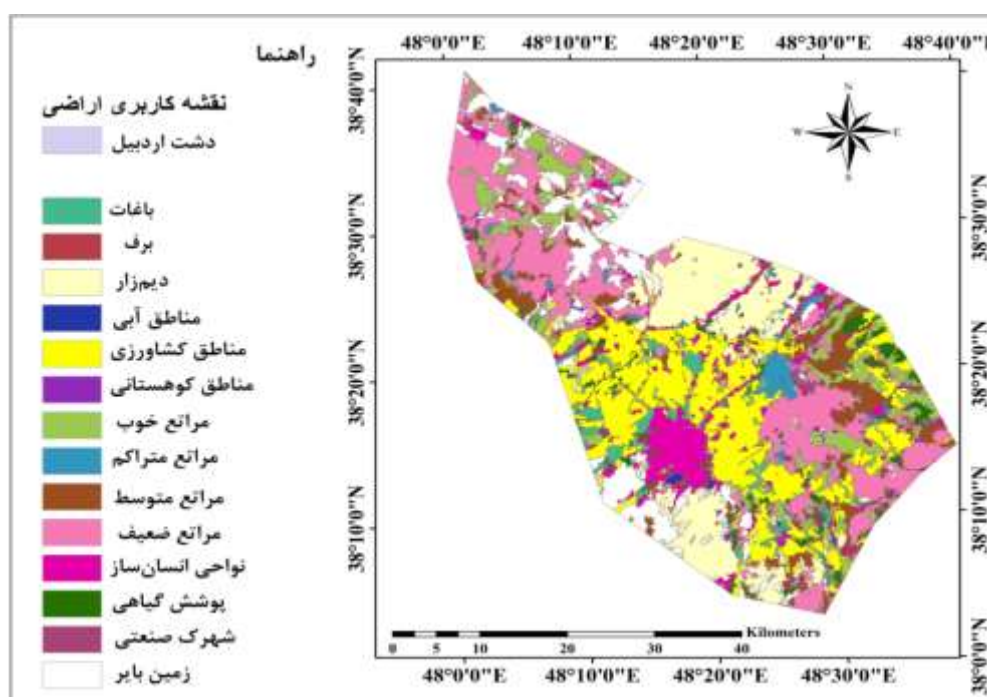
زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. به منظور بررسی و ارزیابی نوسانات سطح آب زیرزمینی، از آمار چاه‌های پیژومتری موجود در دشت، میزان افت سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۹ محاسبه شد. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص است که سطح آب دشت، رو به پایین رفتن است. به طوری که کمترین افت سطح آب ۱/۳ متر و بیشترین ۲۳ متر می‌باشد. علت این افت، برداشت‌های غیراصولی به دلیل افزایش حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق به صورت مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی در سال‌های اخیر و به تبع آن کاهش آب‌های سطحی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. براین اساس بیشترین افت در بخش‌های مرکزی و شرقی دشت مشاهده می‌شود که احتمال وقوع فرونشست در این قسمت از دشت افزایش می‌یابد (شکل ۳، ب).

فاصله از گسل: به دلیل اثر گذاشتن فعالیت گسل‌ها (نظیر زلزله)، بر روی فرونشست زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضرورت می‌یابد. گسل‌ها به نوبه خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. به گونه‌ای که هر چه میزان فاصله از خطوط گسل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرونشست بیش‌تر می‌شود. در دشت اردبیل نیز به علت وجود گسل‌های فراوانی نظیر اردبیل، بزغوش، آستارا و؛ که دارای روند شمال خاوری - جنوب باختری می‌باشد و به همین دلیل ضریب آسیب‌پذیری بالایی دارد (شکل ۳، ج).



شکل ۳- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ الف) نقشه شهر و روستا ب) نقشه افت آب ج) نقشه گسل

کاربری اراضی: انواع کاربری در دشت اردبیل به صورت نواحی انسان ساخت، مرتع خوب، مرتع متراکم، مرتع متوسط، مرتع ضعیف، پوشش برف دائمی، دیمزار، مناطق کشاورزی، زمین بایر، باغات و پوشش جنگلی، شهرک صنعتی، مناطق آبی و اراضی بایر می باشد. از آن جهت دشت اردبیل دارای توپوگرافی هموار می باشد و از آبرفت های جوان و تراس های قدیم و جدید در اثر ته نشست آبرفت های رودخانه ای با شیب کم تشکیل شده است محل مناسبی برای فعالیت های زراعی و باغات ایجاد کرده است. لذا اغلب اراضی کشاورزی و نیز باغات در این واحد گسترده شده است. بررسی معیار کاربری اراضی حاکی از این موضوع است که کاربری اراضی و مراتع و نواحی انسان ساز و شهرک صنعتی بیشترین درصد از مساحت مناطق پرخطر را به خود اختصاص داده است؛ که با مصرف بالای منابع آب زیرزمینی جهت مصارف روزانه و آبیاری احتمال وقوع فرونشست را افزایش می یابد.

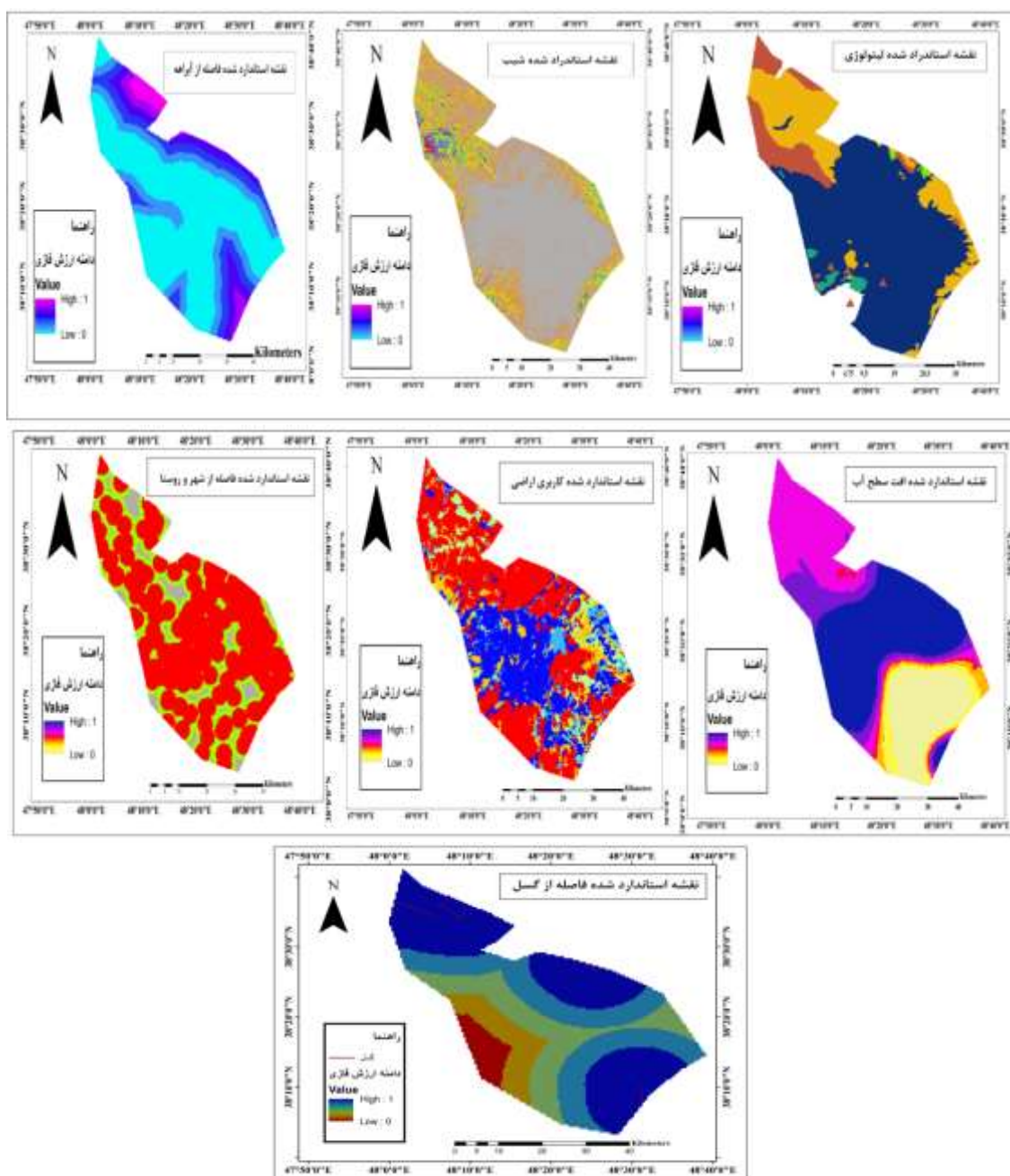


شکل ۴- نقشه معیارهای مطرح در پهنه بندی فرونشست دشت اردبیل؛ نقشه کاربری اراضی

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش در اندازه گیری معیارها برای بررسی و پهنه بندی فرونشست، دامنه متنوعی از مقیاس ها وجود دارد؛ از این رو، لازم است معیارها قبل از ترکیب با یکدیگر استاندارد شود. در این مطالعه، مرحله مربوط به ارزش گذاری و استانداردسازی به صورت توأم و بر مبنای ارزش عضویت در مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. در پژوهش

حاضر، ارزش عضویت بین مقادیر ۰ تا ۱ قرار دارد. نقشه‌های استاندارد شده مربوط به معیارهای مطرح در مطالعه حاضر در شکل ۵، نشان داده شده است.



شکل ۵- نقشه‌های استاندارد شده فازی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

برای پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل ابتدا وزن‌دهی معیارها انجام شد. پس از محاسبه سوپرماتریس غیروزی یا اولیه مربوط به مدل، سوپرماتریس غیروزی و سوپرماتریس حدی، آخرین مرحله برای تعیین ارزش و ضریب نهایی عناصر، محاسبه نتایج ماتریس خوشه‌ها و نرمال‌سازی ضریب عناصر در سوپرماتریس حدی توسط ضریب خوشه‌ها می‌باشد، نتیجه مقایسات زوجی بین گروه‌ها که جدول اوزان گروه‌ها نامیده می‌شود، در **جدول (۳)** آورده شده است.

جدول ۳- ماتریس اوزان گروه‌ها

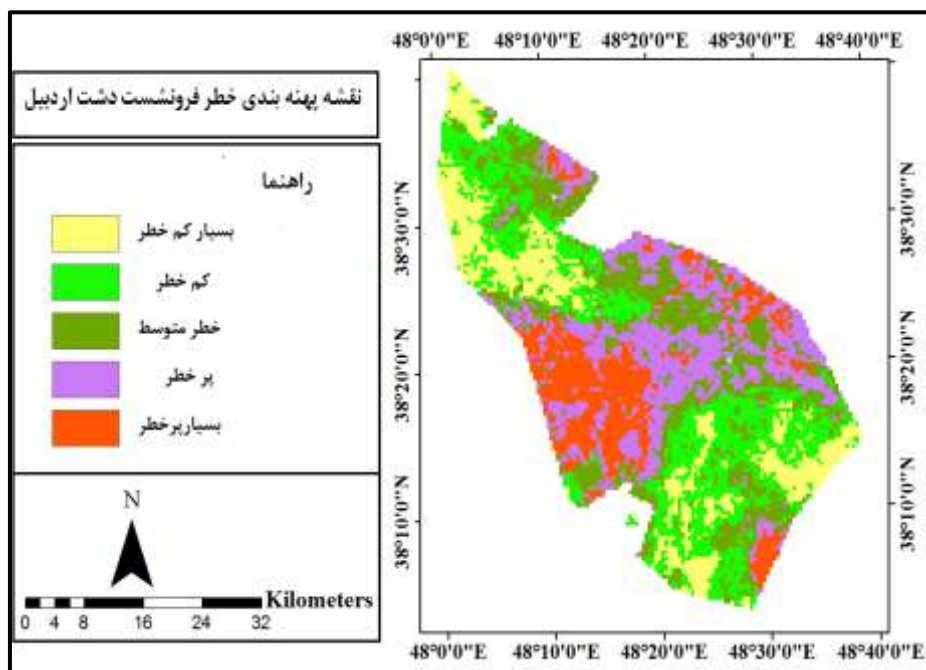
خوشه‌ها	انسانی	زمین‌ساختی	فیزیوگرافی	هیدرولوژی
انسانی	۰/۲۵۲	۰/۲۲۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲
زمین‌ساختی	۰/۰۹۹	۰/۳۸۸	۰/۳۳۳	۰/۲۹۱
فیزیوگرافی	۰/۸۸۴	۰/۸۸۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸۴
هیدرولوژی	۰/۵۶۰	۰/۳۰۵	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲

نتیجه نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و در نهایت، نتیجه نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص شد (**جدول ۴**)، که معیارهای افت سطح آب چاه‌های موجود در منطقه، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب بیشترین تأثیر را در فرونشست دشت اردبیل را داشته‌اند.

جدول ۴- وزن نهایی حاصل از روش ANP

معیار	فاصله از شهر و روستا	کاربری اراضی	فاصله از گسل	لیتولوژی	شیب	افت سطح آب	فاصله از رودخانه
وزن نهایی	۰/۱۲۷	۰/۱۴۷	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲	۰/۰۶۱	۰/۲۲۱	۰/۱۶۶

پس از اعمال کردن وزن‌های حاصل از روش ANP در هر یک از نقشه‌های استاندارد شده و پیاده‌سازی دیگر مراحل مدل MABAC، نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (**شکل ۶**). با توجه به نتایج به دست آمده، ۲۴۴/۲۹ کیلومتر مربع از مساحت شهرستان در طبقه بسیار پرخطر و ۳۷۰/۵۹ کیلومتر مربع، در طبقه پرخطر قرار دارد. همچنین ۳۸۲/۷۵ کیلومتر مربع از مساحت دشت، دارای خطر متوسط و به ترتیب ۴۴۱/۲۶ و ۲۸۶/۷۱ کیلومتر مربع دارای خطر بسیار کم و کم می‌باشند (**جدول ۵**).



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل

جدول ۵- مساحت مربوط به هر یک از طبقات خطر

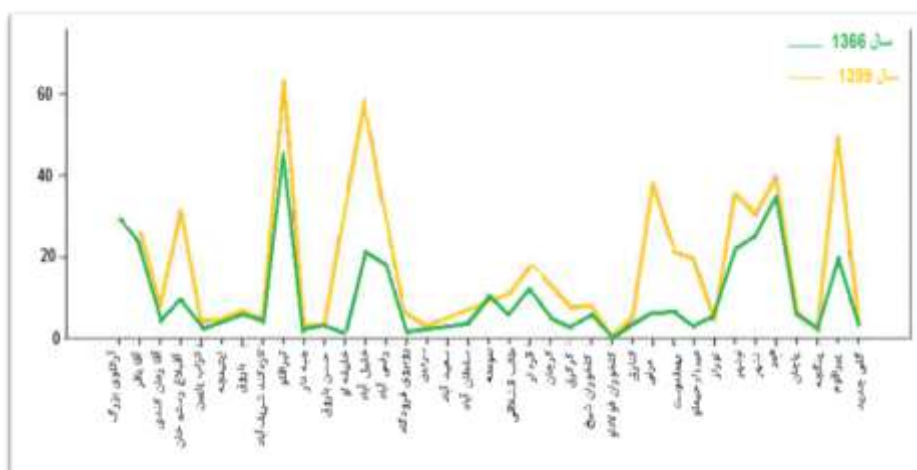
بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پر خطر	بسیار پر خطر	طبقه خطر
۲۸۶/۷۱	۴۴۱/۲۶	۳۸۲/۷۵	۳۷۰/۵۹	۲۴۴/۲۹	مساحت به کیلومتر مربع
۱۶/۶۳	۲۵/۵۷	۲۲/۱۸	۲۱/۴۷	۱۴/۰۸	مساحت به درصد

طبق بررسی‌های انجام شده و نتایج به دست آمده ۳۵/۵۵ درصد از منطقه مورد مطالعه در پهنه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با بررسی و محاسبه موردی معیارهای تأثیرگذار بر فرونشست و پراکنش آن‌ها در پهنه بسیار پرخطر می‌توان بیان کرد که فاصله از رودخانه که طبق **جدول (۴)**، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین معیار در فرونشست منطقه مورد مطالعه می‌باشد و هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم، نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌ها، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. لذا ۴۲/۳۲ کیلومتر از منطقه بسیار پرخطر در فاصله ۱۶۰۰۰ متری از رودخانه، ۷۶/۶۸ کیلومتر در فاصله ۱۴۰۰۰ متری و ۶۱/۷۶ کیلومتر مربع در فاصله ۱۲۰۰۰ متری از رودخانه قرار دارد. هر چه میزان فاصله به خطوط گسلی نزدیک‌تر باشد احتمال وقوع فرونشست افزایش می‌یابد و هر چه میزان فاصله از خطوط گسلی بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کم‌تری را برای احتمال فرونشست دارا می‌باشد.

۱۳۴/۷۱ کیلومتر از پهنه بسیار پرخطر در فاصله ۵۰۰۰ متری از گسل، ۸۰/۹۸ کیلومتر در فاصله ۱۰۰۰۰ متری، ۲۱/۳۵ کیلومتر در فاصله ۱۵۰۰۰ متری و ۰/۶۶ کیلومتر در فاصله ۲۰۰۰۰ متری از گسل قرار دارد. بیشترین احتمال وقوع فرونشست در محدوده شیب بین ۰ تا ۵ درصد اتفاق می‌افتد زیرا این شیب نقش مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. ۱۲۷ کیلومتر از منطقه بسیار پرخطر در محدوده شیب ۰ تا ۱۵ درصد، ۸۱/۹ کیلومتر در شیب ۱۵ تا ۳۰ درصد و ۳۵/۱ کیلومتر در محدوده شیب ۳۰ تا ۴۵ درصد قرار دارد. عوامل انسان‌ساخت مانند ابنیه‌های بزرگ و صنعتی، تأسیسات زیرزمینی، عملیات حفاری، شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی با تحمیل بار وارده بر زمین، میزان آسیب‌پذیری را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست می‌شود به همین دلیل بیش‌ترین میزان فرونشست در پهنه بسیار پرخطر در فاصله ۲۰۰۰۰ متری از شهر و روستا با ۱۳۴/۰۹ کیلومتر، در فاصله ۴۰۰۰۰ متری از ۸۰/۲۰ کیلومتر، در فاصله ۶۰۰۰۰ متری ۲۱ کیلومتر و در فاصله ۸۰۰۰۰ متری ۶۶ کیلومتر قرار دارد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیش‌ترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیش‌ترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کم‌تر از سایر بخش‌ها است. رسوبات جوان رودخانه‌ای و دشت با ۱۲۹/۶۰ کیلومتر، مارن، کنگلومرا، توف، خاکستر، لاهار و تراس‌های قدیمی ۷۶/۳۷ کیلومتر، رسوبات آهکی شیرین و تراورتن، تناوب توف‌ها، سنگ‌آهک و مارن و ماسه‌سنگ توفی ۳۲ کیلومتر از مساحت پهنه بسیار پرخطر را شامل می‌شوند.

بررسی معیار کاربری اراضی حاکی از این موضوع است که مناطق کشاورزی با ۲۷۸ کیلومتر، نواحی انسان‌ساز ۲۶۵/۹ کیلومتر، دیم‌زار ۸۸/۳ کیلومتر، مناطق آبی ۹۸/۸ کیلومتر، مراتع خوب ۱۵۵/۶ کیلومتر، مراتع متوسط ۱۷۸/۸ کیلومتر، مراتع ضعیف ۶۷/۲ کیلومتر، پوشش گیاهی ۱۹۷/۴، مراتع متراکم ۹۹/۵ کیلومتر، باغات ۱۶۹/۳ کیلومتر و شهرک صنعتی ۱۳۲/۹ کیلومتر مساحت مناطق بسیار پرخطر تا کم خطر را به خود اختصاص داده است. مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونت‌گاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها و وجود ابنیه‌های بزرگ و سنگین مستعد وقوع فرونشست هستند. با توجه به اینکه عمده محصولات کشاورزی زیر کشت دشت اردبیل گندم، جو و سیب‌زمینی می‌باشد که نیاز آبی بالایی برای رشد دارند و کاهش چشم‌گیر بارندگی و کمبود منابع آب‌های سطحی در سال‌های اخیر لزوم استفاده از منابع آب‌های زیرزمین را بالا برده و همین مساله سبب افت بیش‌تر منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است. نتایج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه و پراکنش فرونشست در این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل

رشد سریع جمعیت و توسعه صنعت و کشاورزی، تقاضای آب نیز بسیار زیاد می‌باشد. با این حال بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی به دلیل کمبود منابع آب‌های سطحی آشکار است که منجر به فرونشست زمین می‌شود و باعث آسیب به جاده‌ها، پل‌ها، لوله‌های آب زیرزمینی و سایر تأسیسات شهری می‌شود.



شکل ۷- تغییرات میانگین سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری دشت اردبیل

در دشت اردبیل قبل از دهه ۶۰ و ۷۰ تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در مقایسه با چاه‌های دستی یا نیمه عمیق انگشت‌شمار بود. در نتیجه برداشت از منابع آب زیرزمینی در حد محدود انجام می‌گرفته است. از سال ۶۸ به بعد استفاده از وسایل و دستگاه‌های حفاری، تعداد چاه‌های حفر شده در دشت اردبیل رو به افزایش نهاد و با رونق کشاورزی از دهه ۷۰ به بعد و به تبع آن افزایش بی‌رویه برداشت از سفره مذکور شروع به افت سطح آب زیرزمینی کرد. تداوم این وضعیت در سال‌های بعدی به‌خصوص از سال ۱۳۸۵ به بعد باعث بحرانی شدن وضعیت این دشت از بابت افت سطح آب و فرونشست شده است. کاهش آبدهی چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها و تغییر محل و کف‌شکنی چاه‌ها و در نتیجه تحمیل هزینه‌ای گزاف در این خصوص به صاحبان چاه‌ها، افت کیفی منابع آب و شور شدن تدریجی، ایجاد محدودیت در مصارف کشاورزی، صنعت و شرب، نشست‌زمین و کاهش ظرفیت حجم مخزن طبیعی از تبعات افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان گفت که قسمت شرقی و مرکزی دشت اردبیل بیش‌ترین تغییرات را به لحاظ افت سطح آب زیرزمینی داشته‌اند که به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا و تراکم چاه‌های عمیق حفر شده، برداشت از آب زیرزمینی در منطقه ذکر شده فراوان بوده و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی بالا می‌باشد. جهت بررسی وضعیت و تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان فرونشست

دشت اردبیل از اطلاعات ۳۹ چاه پیزومتری (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای اردبیل)، طی سال‌های ۶۶ تا ۹۹ (شکل ۷)، که نتایج تحلیل از کاهش ۴۸ درصدی سطح ایستابی را در سال ۹۹ نسبت به سال ۶۶ نشان می‌دهد. بیشینه سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری از ۴۵ متر به بیش از ۷۰ متر در سال ۹۹ رسیده است که حاکی از وخامت اوضاع آبخوان دشت اردبیل است.

بررسی‌های زمینی مؤید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در دشت اردبیل می‌باشد. از جمله می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل (شکل ۸) و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های شهر اردبیل اشاره کرد و ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی شکل گرفته سبب توسعه فرسایش شده است. به گونه‌ای که این درز و ترک‌ها باعث کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و از بین رفتن آن‌ها و آسیب به سیستم آبیاری شده است.



شکل ۸- ترک‌های شکل گرفته ناشی از فرونشست در دشت اردبیل

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش خطر فرونشست در دشت اردبیل، با استفاده از تلفیق روش‌های ANP و MABAC، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل افت سطح آب (جزو عوامل هیدرو اقلیمی)، فاصله از آبراهه (جزو خوشه عوامل هیدرو اقلیمی)، لیتولوژی (جزو خوشه زمین‌ساختی)، به ترتیب با مقدار ۰/۲۲۱، ۰/۱۶۶، ۰/۱۵۲، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. **فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)**، نیز در مطالعه‌ای که در آن به پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جویین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای - فازی پرداخته‌اند؛ سطح چاه‌های پیزومتری، تراکم چاه‌ها و فاصله از رودخانه را به عنوان مهم‌ترین عوامل بیان کرده‌اند. **شایان و همکاران (۱۳۹۵)**، در مطالعه‌ای با عنوان پهنه‌بندی خطر فرونشست در حوضه‌ای آبخیز قره‌چای همدان به این نتیجه رسیدند که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع

فرونشست در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌تنهایی نقش ندارند. با توجه به بررسی نقش و اهمیت هر یک از عوامل دخیل در شکل‌گیری فرونشست و نیز نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تحقیق و تجزیه و تحلیل نهایی با استفاده از روش ماباک، به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، به ترتیب ۲۹/۲۴۴ و ۵۹/۳۷۰ کیلومتر مربع از محدوده مطالعاتی در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی فرونشست، دشت اردبیل دارای احتمال خطر بالا، مناطق بسیار پرخطر، به‌طور عمده در شیب ۰ تا ۱۵ درصد، سازندهای نامقاوم و نیمه‌مقاوم، که عمدتاً سازندهای سست کواترنری (رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، لاهار، مارن)، کاربری‌های زراعی، انسان‌ساخت و مراتع، محدوده چاه‌های پیزومتری و عمیق، محدوده نزدیک گسل و در مناطق با فواصل دور از آبراهه‌ها قرار دارند. همچنین می‌توان گفت که نتایج حاصل از این مطالعه، حاکی از توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست می‌باشد. لذا قلمروهای پرخطر تعیین شده در این پژوهش اراضی هستند که نباید کارهای غیر اصولی از قبیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، کاشت محصولات با نیاز آبی بالا انجام گیرد. همچنین این امر نیازمند شناسایی عوامل تأثیرگذار، اقدامات کاهش‌دهنده و اقدامات تطبیق‌دهنده از جمله محدود یا ممنوعیت استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و اجرای مقررات سخت‌گیرانه جهت استخراج‌کنندگان منابع آب زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و پایش پیوسته شاخص‌های فرونشست است. به‌طور کلی ایجاد چنین شرایط و وضعیتی در رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه‌بار آن برای کشور، قبل از هر چیزی عزم ملی برای پذیرش و مقابله با این پدیده به‌عنوان یک معضل و مخاطره منتهی به یک فاجعه را طلب می‌نماید. موضوعی که درک آن از یک سو مستلزم افزایش مطالعات برای شناسایی کامل نواحی مستعد به‌صورت یک طرح ملی است. از طرفی لازم است زیرساخت لازم برای آگاهی‌رسانی و همگانی بودن اطلاع از نتایج و معضلات ناشی از این مسئله برای مردم در جهت مشارکت آن‌ها در جهت جلب مشارکت مردم و مسئولان و تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد؛ و نهایتاً برای پیشگیری و کاهش و تعدیل حجم دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره، دستگاه‌های ذی‌ربط تمامی مقررات و استانداردهای لازم ساخت‌وساز را برای نواحی در معرض فرونشست، موردبازنگری قرارداد و اساس را بر شرایط نوین تعریف نماید. درنهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه آن، در محدوده مورد مطالعه آسیب برساند، از این رو، بایستی راهکارهای بلندمدت به‌صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه‌مدت به‌صورت، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به‌منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، تهیه و نصب دستگاه‌های کتور

هوشمند، ایجاد تشکلهای آب‌بران و حمایت از این تشکلهای، ایجاد و استقرار بازار محلی آب و ساماندهی شرکت‌های حفاری، کنترل شدید مصرف آب، فرهنگ‌سازی مصرف و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

کتابنامه

- آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ ۱۳۸۸. بررسی فرونشست یزد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ترازابی دقیق. طرح پژوهشی سازمان نقشه‌برداری کشور. صص ۴۶-۱.
<https://sid.ir/paper/32299/fa>
- ابراهیمی، عطرن؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه جغرافیا و روابط انسانی. دوره ۲. شماره ۴. صص ۲۹-۴۱.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1>
- بهیاری، مهدی؛ علیزاده، اکرم؛ محمودیان، شهاب؛ ۱۳۹۶. ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. دوره ۷. شماره ۲. صص ۵۶-۴۹.
<https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229>
- جوادی، سید محمدرضا؛ ۱۴۰۰. برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان - بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS. رساله دکتری. دانشگاه تبریز. استاد راهنما دکتر معصومه رجبی. صص ۱۵۶-۱.
- حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۷. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری. مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. صص ۳۵۵-۳۵۲.
<https://sid.ir/paper/31521/fa>
- حسین‌آبادی، سعید؛ اکبری، ابراهیم؛ نقد بی‌شی، ابراهیم؛ ۱۳۹۹. ارزیابی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا و مدل زنجیره مارکوف (مورد مطالعه: شهر بیرجند و پیرامون آن). نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره سی و سوم. صص ۱۸۸-۱۶۹.
<https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81819>
- رستم زاده، هاشم؛ اسدی، اسماعیل؛ جعفرزاده، جعفر؛ ۱۳۹۴. بررسی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال دوم. شماره یک. صص ۴۲-۳۱.
<https://sid.ir/paper/264771/fa>
- زارعی، کیوان؛ رسول‌زاده، علی؛ صدیقی، مرتضی؛ احمدزاده، غلامرضا؛ رضائی مقدم، جواد؛ ۱۳۹۹. تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. سال یازدهم. شماره چهل و یکم. صص ۱-۱۵.
<https://www.magiran.com/paper/2180181>
- شادفر، صمد؛ نصیری، اسماعیل؛ چیتگر، سکینه؛ احمدی، علی؛ ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی: بوئین شهر. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. سال دوازدهم. شماره ۴۸. صص ۱۸-۱.

- شاه کرمی، نازنین؛ قاسمی، شبنم؛ ۱۳۹۹. مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی در دشت اراک. چهارمین مجمع توسعه فناوری و کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین عمران معماری و صنعت ساختمان ایران. صص ۱۳-۱. <https://civilica.com/doc/1031421>
- شایان، سیاوش؛ یمانی، مجتبی؛ یادگار، منیژه؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. هیدروژئومورفولوژی. شماره ۹. صص ۱۵۸-۱۳۹. <https://sid.ir/paper/520002/fa>
- شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنج راداری در دشت نوق- بهرامان. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دوره شانزده. شماره سوم. صص ۷۳-۵۵. <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-۵۰۷۶-۲۱fa.html>
- شفیعی، نجمه؛ گلی مختاری، لیلا؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. صص ۱۱۱-۹۳. <https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.106424>
- شمشکی، امیر؛ بلورچی، محمدجواد؛ انصاری، فرهاد؛ ۱۳۸۴. بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار. طرح پژوهشی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. شماره گزارش ۸۴-۰۶/۲۰. صص ۸۴-۱. <https://gsi.ir/fa>
- شمشکی، امیر؛ بلوری محمدجواد؛ انتظام سلطانی ایمان؛ ۱۳۹۴. فرونشست زمین در شهر تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین. صص ۱۲-۱. <https://civilica.com/doc/210280>
- عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلا؛ اصغری سکانرود؛ ۱۴۰۱. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال یازدهم. شماره ۱. تابستان ۱۴۰۱. صص ۱۳۲-۱۱۷. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.11.1.7.9>
- عابدینی، موسی؛ خان بیگی، علی؛ موس پور، توحید؛ حسین دانشور؛ ۱۳۹۵. تعیین مناطق احتمالی فرونشست دشت روانسر- سنجابی با استفاده از GIS و AHP. دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری. شرکت کیان تایر و جهاد دانشگاهی آذربایجان شرقی. <https://civilica.com/doc/526049>
- عابدینی، موسی؛ ۱۳۸۸. بررسی مسائل هیدروژئومورفولوژی و فرونشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل و راهکارها. دانشگاه محقق اردبیلی. مجموعه مقالات. <https://civilica.com/doc/335178>
- عابدینی، موسی؛ ۱۳۹۲. بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر. فصلنامه علمی- پژوهشی. جغرافیای طبیعی. شماره ۱۹. صص ۷۱-۸۴. <https://sid.ir/paper/184972/fa>
- عابدینی، موسی؛ پیروزی، الناز؛ شکرزاده، الهام؛ ۱۴۰۰. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه‌ی موردی: شهرستان نیر). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال دهم. شماره ۲. تابستان ۱۴۰۰. صص ۱۵۵-۱۳۶. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.215108.1214>

- عابدینی، موسی؛ ۱۳۹۶. مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی و مدیریت محیط). انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی. چاپ یکم. ۲۳۰ صفحه.
- عالی پور اردی، مهدی؛ ملک محمدی، بهرام؛ جعفری، حمیدرضا؛ ۱۳۹۶. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). نشریه علوم و مهندسی آب/بخیزداری/ایران. سال ۱۱. شماره ۳۸. صص ۳۴-۲۵.
<https://sid.ir/paper/134810/fa>
- فتح‌الله، نرگس؛ آخوندزاده؛ مهدی؛ بحرودی، عباس؛ ۱۳۹۷. بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۷. شماره ۱۰۵. صص ۳۴-۲۴
<https://civilica.com/doc/795768>
- فرزین کیا، ربابه؛ امیر احمدی، ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ زندی، رحمان؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جوبین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای - فازی. فصلنامه علمی فضایی جغرافیایی دانشگاه آزاد اهر. سال بیست و یکم. شماره ۷۳. صص ۷۱-۵۱.
<https://www.sid.ir/fileservers/jf/40014007404.pdf>
- فرجی سبکبار، حسنعلی؛ بدری، سید علی؛ مطیعی، سیدحسن؛ شرفی، حجت‌الله؛ ۱۳۸۹. سنجش میزان پایدار نواحی روستایی بر مبنای مدل تحلیل شبکه، با استفاده از تکنیک بردا مطالعه موردی: نواحی روستایی شهرستان فسا. پژوهش‌های جغرافیایی انسانی تابستان ۱۳۸۹ شماره ۷۲.
<http://ensani.ir/fa/article/260904>
- فنی، زهره؛ فشمی، سید محمدرضا؛ ۱۳۹۶. پهنه‌بندی و تحلیل فضایی مخاطرات چهارگانه محیطی زمین‌لغزش، سیل، زلزله و فرونشست موردپژوهشی: مناطق ۲۲ گانه شهر تهران. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۷ شماره ۱۰۸. صص ۱۴-۱.
[10.22131/sepehr.2019.34621](https://sepehr.2019.34621)
- فیض‌زاده، بختیار؛ هلالی، حسین؛ ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شیء‌گرا و پارامترهای تأثیرگذار در طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی استان آذربایجان غربی. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. سال چهل و دوم. شماره ۷۱. صص ۱۱۷-۱۰۷.
https://jphgr.ut.ac.ir/article_21550.html
- کوه بنانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمدرضا؛ حسینی، سید کیوان؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد). مدیریت بیابان. ۷ (۱۳). صص ۶۵-۷۶.
<https://sid.ir/paper/252819/fa>
- کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسی؛ غلامرضا احمدزاده؛ ۱۳۹۶. بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS. تهران. سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر. معماری و مدیریت شهری بین‌المللی.
<https://civilica.com/doc/688569>
- محمودی، پیمان؛ علیجانی، بهلول؛ ۱۳۹۲. مدل‌بندی رابطه بارش‌های سالان و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. سال ۱۳. شماره ۳۱. صص ۱۱۲-۹۳
<http://jgs.khu.ac.ir/article-۱۶۷۹-۱-fa.html>
- مدنی، حسن؛ شفیقی، سیروس؛ ۱۳۹۶. زمین‌شناسی عمومی. انتشارات دانشگاه امیرکبیر. ۴۸۲ ص.

منتظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*. دوره نهم. شماره اول. صص ۱۳-۱.

DOI:20.1001.1.23225955.1398.9.1.3.2

- Abdulaziz, Aljammaz, Sultan, Mohamed, Izadi, Moein, Abotalib Abotalib Z., 2021. Land Subsidence Induced by Rapid Urbanization in Arid Environment5455s: A Remote Sensing-Based Investigation, A Remote Sensing-Based Investigation, p1-24. [https:// doi.org/ 10.3390/ rs13061109](https://doi.org/10.3390/rs13061109)
- Aher, P. Adinarayana, J.; and Gorantiwar, SD., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J*, 15(1):11–18 <http://www.cigrjournal.org>
- Alizadeh, R; Izadi, H; Arasteh,M., (2021). Ranking of nature-based tourism capacity in mountainous areas, case study: Eastern region of Lorestan province. Planning and arranging space. 25 (1): 117-142. <https://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-46361-en.html>
- Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717325615>
- Bou kheir, R.; Cerdan, O.; and Abdelah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82: 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.012>
- Chaofan, Zhou, Huili, Gong, Beibei, Chen, Mingliang, Gao, Qun, Cao, Jin, Cao, Li Duan, Junjie, Zuo, Min, Shi, 2019. Land Subsidence Response to Di_ erent Land Use. Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China, *Remote Sens*, pp1-22. [10.3390/rs12030457](https://doi.org/10.3390/rs12030457)
- Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the ebro valley evaporate karst (NE Spain). *Geomorphology*, 111(3), 160-172 [https:// doi.org/ 10.1016/ j.geomorph.2009.04.017](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.017)
- Galve, j.p. Gutierrez, f., Remondo, j., Bonachea, J., Lucha, p., Cenrero, A. 2009.
- Gambolati, and Massimillano, F, Teatro. F., 2006. Anthropogenic Land Subsidence, GROUNDWATER. DOI: 10.1002, PP 2444-2457.
- Georgiou, D.; Mohammed, E.S.; and Rozakis, S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy*, 75: 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.036>
- Guoman Huang, Haitao Fan, Lijun Lu, Wenqing Yu., 2020. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-pp 1-6.
- Hoseini H., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, *Information Processing in Agriculture*, 6 (1): 11-19 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318302208>
- Hwang, c., Yang, y., kao, R., Han, j., Hung, W.C., Cheng s., Li, f., 2016. Time varying land subsidence detected by radar altimetry; California Taiwan and north china, scientific reports. 6: 28160 <https://doi.org/10.1038/srep28160>
- Qui T, Nguyen., 2016. Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering Conference The Main Causes of Land Subsidence in Ho Chi Minh City, *Procedia Engineering*, 142, pp 33. <https://cyberleninka.org/article/n/584825>

- Raucooules, D, Colesanti, C, Carnec Carnec, C., 2007. Use of SAR interferomet for detectingand assessing ground subsidence, C.R, Geoscience 339, 289-302 [https:// doi.org/ 10.1016/j.crte.2007.02.002](https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.002).
- Stephen, A, Nelson., 2016. Surface Subsidence and Collapse, Natural Disasters, on 03.PP1-10.



RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.22067/geoh.2022.75050.1168

Open access

Evaluating the Efficiency of Bivariate Models in Determining Subsidence Susceptibility of Kashan Plain Aquifer

Narges Saghazadeh^a, Hoda Ghasemieh^{b*}, Ebrahim Omidvar^b, Yaser Maghsoudi^c

^a PhD Graduated Students in Watershed Management Engineering and Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

^b Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

^c Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Received: 4 February 2022

Revised: 19 May 2022

Accepted: 29 May 2022

Abstract

Land subsidence is one of the most important environmental problems that affects agriculture and urban infrastructure. In order to plan for mitigating the damages caused by land subsidence, it is necessary to identify high-risk and prone areas for this phenomenon specially in different plains of Iran. The main purpose of this research was zoning the land subsidence in Kashan aquifer using Dempster-Schafer, Weight of Evidence, Shannon Entropy, and Frequency Ratio. To conduct this research, 14 factors affecting the occurrence of subsidence including elevation, slope, slope direction, surface curvature, distance from stream, distance from fault, distance from road, lithology, land use, longitudinal and transverse curvature, water table changes, distance from mining and well density in aquifer surface were used. Then, determining 108 subsidence positions and 108 non-subsidence positions at the aquifer level, these points were randomly classified as 30% and 70% as validation data and test data, respectively. To evaluate each of the models, the ROC curve was used. The results showed that among the used methods based on the ROC curve and the amount of AUC, the Frequency Ratio method (training: 0.84 and validation: 0.89) performed best and is introduced as the best method for predicting areas with subsidence sensitivity in studied area. Shannon Entropy, Dempster-Schafer and Weight of Evidence were also ranked next, respectively. The results of this study can be used by provincial managers to reduce the damage caused by land subsidence and to determine areas with subsidence sensitivity.

Keywords: Groundwater, Kashan plain, Bivariate approach, Subsidence, Machine learning

*. Corresponding author: Hoda Ghasemieh E-mail: h.ghasemieh@Kashanu.ac.ir Tel: + 989132613779

How to cite this Article: Saghazadeh, N., Ghasemieh, H., Omidvar, E., & Maghsoudi, Y., (2023). Evaluating the efficiency of bivariate models in determination of subsidence susceptibility of Kashan Plain Aquifer. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 69-98.

DOI: 10.22067/geoh.2022.75050.1168



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>
 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75050.1168> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۹۸-۶۹

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

ارزیابی کارایی مدل‌های دو متغیره در تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان

نرگس سقزاده- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
 هدی قاسمیه^۱- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
ابراهیم امیدوار- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
یاسر مقصودی- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲۹ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۸

چکیده

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی است که بر کشاورزی و زیرساخت‌های شهری تأثیر می‌گذارد. لذا به‌منظور برنامه‌ریزی برای کاهش خطرات ناشی از فرونشست، شناسایی مناطق پرخطر و مستعد وقوع این پدیده در دشت‌های مختلف ایران ضروری است. هدف اصلی این تحقیق، حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در آبخوان کاشان با استفاده از روش‌های دمپستر- شفر، وزن‌دهی شواهد، آنتروپی شانون و نسبت فراوانی است. برای انجام این تحقیق از ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع فرونشست شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنا، سطح، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، انحنا، طولی و عرضی، تغییرات سطح ایستابی، فاصله از معدن و تراکم چاه در سطح آبخوان استفاده شد. آنگاه پس از تعیین ۱۰۸ موقعیت فرونشست و نیز ۱۰۸ موقعیت عدم فرونشست در سطح آبخوان، این نقاط به‌صورت تصادفی و به نسبت ۳۰ و ۷۰ درصد به‌ترتیب به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های آزمون طبقه‌بندی شدند و برای ارزیابی هرکدام از مدل‌ها از منحنی تشخیص

Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۲۶۱۳۷۷۹

نحوه ارجاع به این مقاله:

سقزاده، نرگس، قاسمیه، هدی، امیدوار، ابراهیم، مقصودی، یاسر. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل‌های دو متغیره در تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴). صص ۹۸-۶۹

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75050.1168>

عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج نشان داد که از بین روش‌های مورد استفاده بر اساس منحنی ROC و میزان AUC، روش نسبت فراوانی (آموزش: ۰/۸۴ و اعتبارسنجی: ۰/۸۹) بهترین عملکرد را داشته است و به عنوان بهترین روش پیش‌بینی مناطق دارای حساسیت فرونشست در منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. روش‌های آنتروپی شانون، دمپستر-شفر و وزن‌دهی شواهد نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق برای کاهش خسارات ناشی از وقوع فرونشست زمین و تعیین مناطق بالقوه فرونشست، قابل استفاده برای مدیران استانی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، دشت کاشان، روش‌های دومتغیره، فرونشست، یادگیری ماشینی

۱- مقدمه

فرونشست زمین^۱ که باعث تغییر شکل سطح زمین می‌شود، پدیده خطرناکی است که می‌تواند خسارات بزرگی به زمین وارد کند (قربان‌زاده^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). این پدیده از جمله مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی است که موجب تغییر در توپوگرافی سطح زمین می‌شود و این موضوع ناشی از ضعف ساختاری لایه‌های زیرزمینی است و در بیشتر مواقع برگشت‌ناپذیر است (اشرف و کاوود^۳، ۲۰۱۵).

در دهه‌های اخیر، گزارش‌هایی اعلام شده که تخلیه آبخوان بر کاهش کیفیت آب، فرونشست زمین و ترک خوردن زمین تأثیر گذاشته است (ژو و لی^۴، ۲۰۱۱). فرونشست زمین یک پدیده جهانی است که از فرایندهای طبیعی مانند تراکم خودکار و فعالیت‌های زمین‌ساختی و همچنین فعالیت‌های انسانی که منجر به خروج و بهره‌برداری بی‌رویه از آب، نفت و سایر سیالات از درون زمین می‌شود، ناشی می‌شود و می‌تواند آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی بزند (گالوی^۵ و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیانگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۲).

به نظر می‌رسد که در بین عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی ایجاد فرونشست در بیشتر دشت‌های ایران باشد؛ به گونه‌ای که در بیست و یکمین کارگروه ملی فرونشست زمین و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، بیشتر دشت‌های کشور در معرض خطر فرونشست بر اثر برداشت بی‌رویه از ذخایر آب زیرزمینی تشخیص داده شدند (رنجبر و جعفری، ۱۳۸۸). طی پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققین، بهره‌برداری و استخراج آب‌های زیرزمینی در چندین کشور در سراسر زمین شامل مکزیک، ایتالیا، ایران، ویتنام و

1 Land Subsidence

2 Ghorbanzadeh

3 Ashraf & Cawood

4 Zhou & Li

5 Galloway

6 Liang

چین، نقش مهمی در ایجاد فرونشست زمین ایفا کرده است (یو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ تای^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ نوین^۴ و همکاران، ۲۰۲۲. اکبری، ۱۴۰۰؛ قره‌چلو و همکاران، ۱۴۰۰).

در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشینی^۵ و روش‌های دو متغیره^۶ همراه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در مقایسه با روش‌های سنتی در زمینه تعیین مناطق حساس به فرونشست که زمان‌بر هستند، دارای کارایی بالایی بوده‌اند و باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی و پتانسیل فرونشست شده‌اند. فاکتورهای مختلفی از طیف وسیعی از پارامترهای محیطی از قبیل فاکتورهای هیدرولوژیکی، فاکتورهای اقلیمی، فاکتورهای توپوگرافیک، فاکتورهای اکولوژیکی، فاکتورهای ژئولوژیکی و فاکتورهای انسانی بر میزان حساسیت فرونشست تأثیرگذار هستند. در این میان، روش‌های یادگیری ماشینی (مدل‌های جنگل تصادفی^۷، حداکثر آنتروپی^۸، شبکه عصبی مصنوعی^۹ و ماشین بردار پشتیبان^{۱۰}) و دو متغیره (مدل‌های نسبت فراوانی^{۱۱}، دمپستر-شفر^{۱۲}، وزن‌دهی شواهد^{۱۳} و رگرسیون خطی^{۱۴} و لجستیک^{۱۵}) وجود دارد که به محققان اجازه می‌دهد نقشه حساسیت فرونشست را تهیه کنند و با تعیین روابط آماری بین عوامل محیطی و توزیع مکانی فرونشست‌ها، احتمال مکانی وقوع فرونشست را ارزیابی و پیش‌بینی کنند. در سال‌های اخیر از تکنیک‌های رایج از جمله یادگیری ماشینی و روش‌های آماری و دو متغیره برای تخمین میزان فرونشست و بررسی علل این پدیده استفاده شده است. به عنوان مثال **پرادهان و ابوخریما^{۱۶} (۲۰۱۴)** در تحقیقی، میزان فرونشست زمین را در دره کیتاپراک مالزی با استفاده از GIS و روش‌های سنجش از دور برآورد نمودند. در این تحقیق، ۱۴ شاخص به عنوان عوامل مؤثر بر میزان فرونشست در نظر گرفته شد. آن‌ها به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست از دو روش تابع باور شهودی^{۱۷} و نسبت فراوانی استفاده کردند و ارزیابی مدل‌ها در این پژوهش با استفاده از سطح زیر منحنی ROC^{۱۸} (AUC)^{۱۹} اعتبارسنجی شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل

1 Yu

2 Zhu

3 Ty

4 Nguyen

5 Machine Learning

6 Bivariate

7 RF: Random Forest

8 MF: Maximum Entropy

9 ANN: Artificial Neural Network

10 SVM: Support Vector Machine

11 FR: Frequency Ratio

12 Dempster-Shafer

13 WOF: Weight Of Evidence

14 Linear regression

15 Logistic Regression

16 Pradhan & Abokharima

17 EBF: Evidential Belief Function

18 ROC: Relative Operating Curve

19 AUC: Area Under Curve

نسبت فراوانی قادر به ایجاد نرخ پیش‌بینی ۷۱/۱۶ درصد است، درحالی‌که مدل تابع باور شهودی پیش‌بینی بهتری را با نرخ ۷۳/۶۳ درصد نشان داد. **تین‌بویی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)** با استفاده از چهار مدل رگرسیون لجستیک بیزین^۲، ماشین بردار پشتیبان، درخت مدل لجستیک^۳ و درخت تصمیم متناوب^۴ و ۸ عامل مؤثر، حساسیت فرونشست زمین در کره جنوبی را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل رگرسیون لجستیک بیزین از دقت بالاتری برخوردار بوده است. همچنین برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را عامل فرونشست در منطقه مورد مطالعه بیان کردند. **رحمتی^۵ و همکاران (۲۰۱۹ا)** به بررسی خطر فرونشست در دشت همدان با استفاده از چهار مدل درخت تصمیم قانون محور^۶، درخت رگرسیون تقویت شده^۷، رگرسیون درختی و طبقه‌بندی^۸ و جنگل تصادفی پرداختند. آن‌ها برای انجام مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر فرونشست از شش عامل استفاده کردند. در نهایت بیان داشتند که روش جنگل تصادفی بهترین نتیجه را داشته و کاهش سطح آب زیرزمینی، لیتولوژی و فاصله از آبراهه‌ها مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست بوده‌اند.

فرونشست در دشت کاشان برای اولین بار در سال ۱۳۷۰ به صورت شکاف‌هایی در بخش‌هایی از دشت مشاهده گردید که باعث تخریب واحدهای مسکونی و زمین‌های کشاورزی گردید (**قاضی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۰**). علت این عوارض در آن زمان، استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی عنوان شد. اما به دلیل گسترش شکاف‌ها و پیشروی آن‌ها در بسیاری از نقاط دشت، بررسی جامع این پدیده به منظور شناخت کامل این عوارض، تعیین محدوده تأثیرپذیر، پیش‌بینی نحوه گسترش و در صورت امکان، جلوگیری از توسعه و تشدید آن‌ها، پیشنهاد گردید (**مصلحی بهارانچی و همکاران، ۱۳۹۰**). لذا در این تحقیق تلاش می‌شود با استفاده از مدل‌های دومتغیره، نقشه‌های حساسیت فرونشست در آبخوان دشت کاشان تهیه شود تا مناطق پرخطر شناسایی شوند. در نظر گرفتن ۱۴ عامل مؤثر و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های دو متغیره برای تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرونشست در آبخوان دشت کاشان، از نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌شود.

1 Tien Bui

2 BLR: Bayesian Logistic Regression

3 LMT: Logistic Model Tree

4 ADT: Alternate Decision Tree

5 Rahmati

6 RBDT: Rule-Based Decision Tree

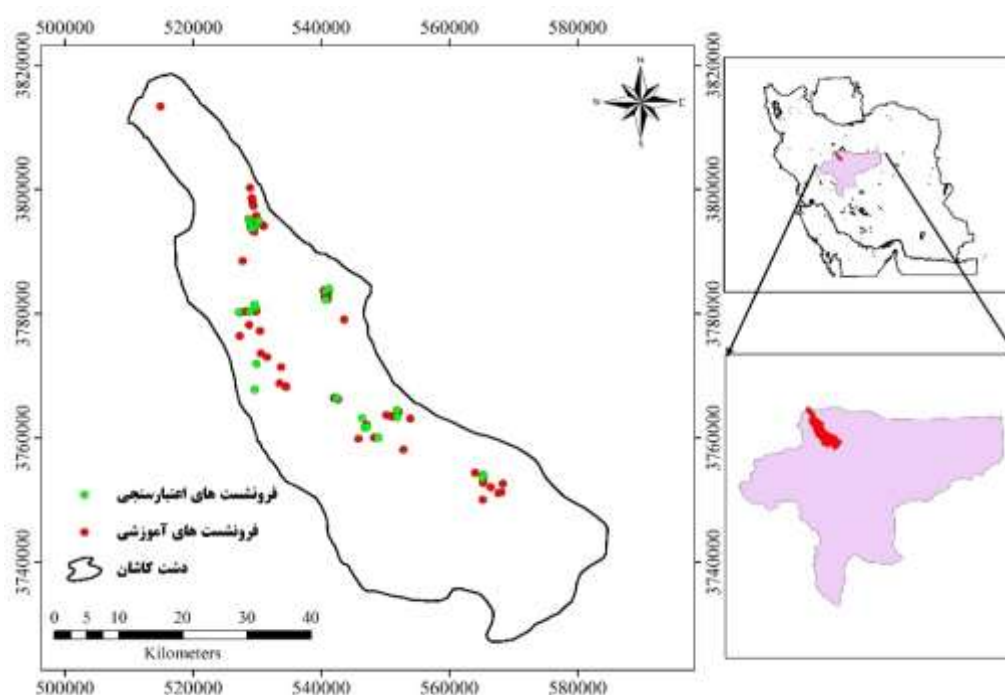
7 BRT: Boosted Regression Trees

8 CART: Classification And Regression Tree

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دشت کاشان، در جنوب حوزه آبخیز بزرگ دریاچه نمک بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی واقع شده است. این حوضه دارای وسعت ۶۹۵۰ کیلومترمربع است. دشت کاشان در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران در حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران و بین طول‌های جغرافیایی ۵۱ و ۵۲ درجه شرقی و عرض‌های ۳۳/۴۰ و ۳۴/۳۰ درجه شمالی درجه قرار دارد (شکل ۱). آبخوان دشت کاشان، دارای وسعت ۲۲۱۷۶۳/۴ هکتار است که البته بخش‌هایی از آن به دلیل شور بودن آب‌های زیرزمینی، قابل استفاده نیست. دشت کاشان، به صورت یک دره باریک دارای امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است. حداقل و حداکثر ارتفاع دشت کاشان از سطح دریا، به ترتیب ۸۰۰ و ۱۲۰۰ متر در قسمت حاشیه شرقی و غربی دشت کاشان است (میرزاوند و همکاران، ۱۳۹۷). دامنه تغییرات ارتفاعی منطقه مطالعاتی در این پژوهش نیز بین ۸۰۳ الی ۱۶۷۱ متر است و از شمال و شمال غربی منطقه مطالعاتی به سمت جنوب و جنوب غربی، ارتفاع از سطح دریا در حال افزایش است.

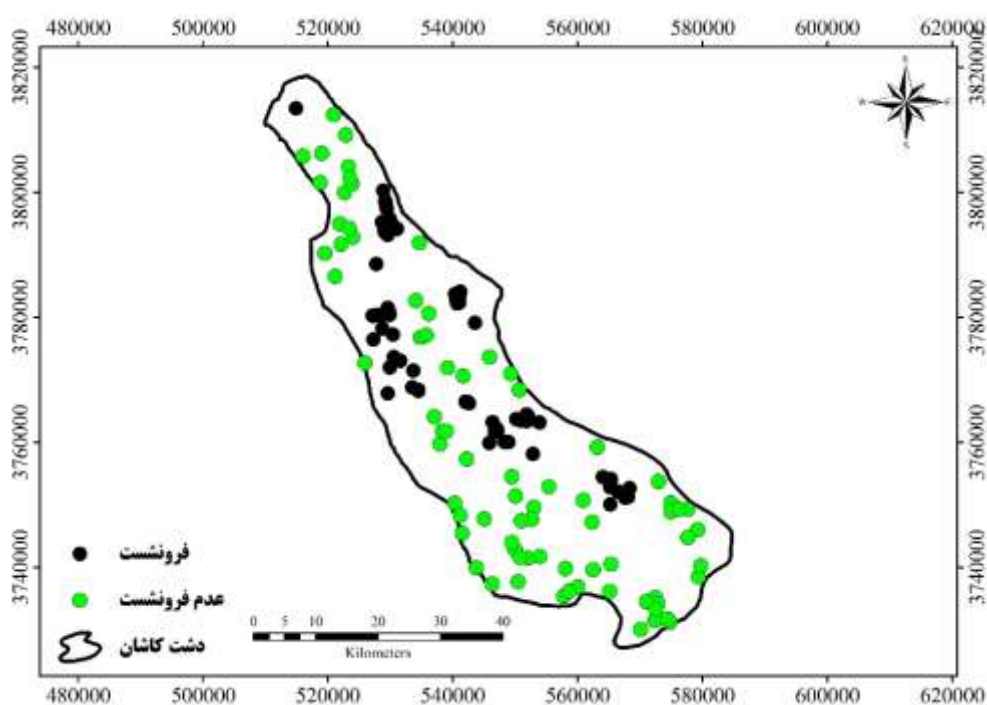


شکل ۱- موقعیت دشت کاشان در استان اصفهان و ایران

۲-۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۲-۱- تهیه نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست

ابتدا به‌منظور تهیه نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست، بازدیدهای میدانی از سطح دشت به‌ویژه در مناطقی که چاه‌های پی‌زومتری و بهره‌برداری وجود داشت، انجام گرفت و درنهایت تعداد ۱۰۸ مورد فرونشست مشخص شد که با استفاده از GPS موقعیت جغرافیایی این نقاط برداشت و ثبت شد. به‌منظور ارزیابی مدل‌های دو متغیره علاوه بر این ۱۰۸ مورد، تعداد ۱۰۸ نقطه فاقد فرونشست نیز طی عملیات صحرایی ثبت شد (شکل ۲). ذکر این نکته ضروری است که به‌منظور انتخاب اولیه این نقاط، ابتدا از نقشه میزان فرونشست دشت که در مطالعه‌ای موازی به روش تداخل‌سنجی راداری توسط نویسندگان تهیه شده استفاده گردید و مناطق فاقد فرونشست شناسایی شدند. سپس طی عملیات صحرایی نقاطی که فاقد هرگونه آثار فرونشست در اطراف خود بودند به‌عنوان نقاط عدم فرونشست ثبت شدند. لازم به ذکر است که بخش جنوب غربی آبخوان دشت کاشان همان منطقه تپه‌ماهوری و مخروط‌افکنه‌های اطراف شجاع‌آباد و احمدآباد (فاصله بین جاده قدیم بادرود و اتوبان اصلی) است که فرونشست در آن‌ها مشاهده نشد.



شکل ۲- نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست

۲-۲-۲- تهیه نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست

مطابق با سوابق پژوهشی (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمدی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ قربانزاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ رحمتی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹b) و بازدیدهای میدانی به منظور انجام مدل‌سازی میزان فرونشست در سطح آبخوان دشت کاشان، تعداد ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع فرونشست در چهار گروه کلی عوامل توپوگرافیک (شیب، جهت، ارتفاع از سطح دریا، انحنا طولی دامنه^۳، انحنا عرضی دامنه^۴ و انحنا ترکیبی دامنه^۵)، عوامل زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی و فاصله از گسل)، عوامل انسانی (کاربری اراضی، فاصله از جاده، تراکم چاه‌های بهره‌برداری و فاصله از معادن) و همچنین عوامل هیدرولوژیک (تغییرات سطح ایستابی و فاصله از آبراهه) در نظر گرفته شدند.

- عوامل توپوگرافیک

به منظور تهیه نقشه عوامل توپوگرافیک از نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع آبخوان دشت کاشان با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شد. این نقشه‌ها مستخرج از داده‌های سنجش از دور ماهواره ALOS^۶ بوده و از پایگاه <https://vertex.daacc.asf.alaska.edu> دانلود شد. یکی از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست، عامل ارتفاع از سطح دریا است. تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه بر میزان هوازدهی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار است (تیموری و اسدی نیلوان، ۱۳۹۸؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹a). این نقشه با استفاده از دستور Reclassify روی نقشه مدل رقومی ارتفاع در پنج طبقه ارتفاعی به دست آمد. عامل شیب نیز یکی از متغیرهای پستس و بلندی خیلی مهم در وقوع فرونشست زمین است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹a). جهت شیب نیز بر میزان دریافت و نفوذ بارندگی، تبخیر و تعرق و میزان رطوبت اثرگذار است و بر همین اساس، نوع پوشش گیاهی و توزیع آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شفابور تهرانی^۷ و همکاران، ۲۰۱۷). لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی مورد اشاره و به ترتیب از توابع Slope و Aspect در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شدند. نقشه‌های انحنا عرضی، انحنا طولی و انحنا عمومی از مدل رقومی ارتفاعی دشت و با استفاده از دستورهای مربوطه در محیط Arc GIS تهیه شدند. در این مطالعه برای طبقه‌بندی نقشه‌های این عوامل از روش شکست طبیعی^۸ استفاده شد. این شاخص‌ها در حقیقت انحنا مورفولوژیک و توپوگرافیک منطقه را نشان می‌دهند (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷) و در شیب‌های مقعر

1 Mohammady

2 Rahmati

3 Profile Curvature

4 Plan Curvature

5 Curvature

6 Advanced Land Observation Satellite

7 Shafapour Tehrany

8 Natural break

باعث تجمع آب و در شیب‌های محدب باعث افزایش رواناب می‌شوند (نقیبی و همکاران^۱، ۲۰۱۴؛ تیموری و اسدی نیلوان، ۱۳۹۸). این شاخص‌ها بر روی هم‌گرایی و واگرایی جریان در شیب‌های مقعر و محدب تأثیرگذار هستند (ال-آبادی و همکاران^۲، ۲۰۱۶؛ عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹).

– عوامل زمین‌شناسی

نوع سنگ و سازندهای موجود در یک منطقه، عامل بسیار مهمی در وقوع فرونشست محسوب می‌شوند و واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع فرونشست زمین هستند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ a؛ کیتانتزیان^۳ و همکاران، ۲۰۱۴؛ زمانی‌راد^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر، لایه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های زمین‌شناسی شیت‌های کاشان، آران و کهرک با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده، استخراج گردید. وجود گسل نیز تأثیر زیادی در فرونشست زمین دارد (قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ b، مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). بدین منظور از عامل فاصله از گسل استفاده شد. با توجه به این که برخی از گسل‌ها در فاصله نزدیکی خارج از منطقه مورد قرار دارند و می‌توانند تأثیر خود را در نواحی حاشیه‌ای بگذارند؛ لذا در این پژوهش، گسل‌های اطراف منطقه نیز مورد بررسی و توجه قرار گرفتند. همچنین در روش‌های دو متغیره مورد استفاده در این تحقیق، محاسبات بر اساس طبقه‌بندی عوامل مؤثر انجام گردید. از این رو، این متغیر نیز به صورت طبقات مختلف فاصله از گسل ارائه گردید و در نهایت، نقشه فاصله از گسل با توجه به محل گسل‌های اصلی و فرعی داخل و اطراف دشت و با استفاده از دستور Multi ring buffer با فواصل ۵۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

– عوامل انسانی

از جمله عوامل انسانی مؤثر در وقوع فرونشست، کاربری اراضی است. این عامل روی رواناب سطحی و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع فرونشست تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دشت دارد (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ b). در این تحقیق برای عامل کاربری اراضی از نقشه تهیه شده برای مطالعات جامع حوضه کاشان که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اصفهان در سال ۱۳۹۳ تهیه شده بود، استفاده گردید. همچنین در این مطالعه، قبل از به‌کارگیری، نقشه مذکور به فرمت kml تبدیل و طی هم‌پوشانی با تصویر متناظر گوگل ارث منطقه، به صورت بصری از دقت و صحت نسبی آن اطمینان حاصل گردیده است.

1 Naghibi et al.

2 Al-Abadi

3 Kaitantzian

4 Zamanirad

فاصله از جاده نیز یکی دیگر از شاخص‌های انسانی است که اثرات آن روی تغییرات سطح زمین می‌تواند منجر به فرونشست شود. در این مطالعه، نقشه شبکه جاده‌های داخل و خارج از دشت نیز از تصاویر Google Earth تهیه و همانند نقشه‌های فاصله از آبراهه‌ها و گسل‌ها با استفاده از ابزار Multi ring buffer به نقشه فاصله از جاده با فواصل ۲۰۰ متری تبدیل شدند.

تعداد بیشتر چاه نیز باعث افزایش تراکم چاه و در نتیجه برداشت بیشتر از آبخوان، به کاهش سطح آب زیرزمینی آبخوان منجر خواهد شد (قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸). در این راستا، لایه تراکم چاه‌ها بر اساس چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه و با استفاده از تابع Point Density برحسب تعداد در کیلومتر مربع در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

دیگر عامل انسانی، احداث معدن است که از طریق لرزش‌های ناشی از انفجارات معدن‌کاوی، می‌تواند روی فرونشست دشت تأثیرگذار باشد و منجر به از دست رفتن مواد مغذی خاک و کاهش حاصلخیزی خاک شود (سان^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). در این تحقیق، این عامل به صورت لایه فاصله از معدن در نظر گرفته شده و نقشه آن با استفاده از موقعیت نقاط معادن داخل و خارج از محدوده دشت و با استفاده از دستور Multi ring buffer، با فواصل مساوی ۴۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

– عوامل هیدرولوژیک

تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست است. در هنگام افت سطح آب زیرزمینی، زهکشی آب سبب کاهش فشار هیدرواستاتیکی در لایه رس و تحکیم و فشردگی این لایه‌ها و نشست زمین می‌شود (کیانی، ۱۳۹۶). به منظور تهیه نقشه تغییرات سطح ایستابی، ابتدا آمار سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری واقع در منطقه برای یک دوره ۱۲ ساله (۹۶-۱۳۸۴) از مدیریت منابع آب کاشان اخذ و سپس در هر نقطه چاه با کسر رقوم سطح آب در سال ۹۶ از رقوم سطح آب در سال ۸۴، میزان تغییرات سطح ایستابی در هر چاه به دست آمد. در نهایت با استفاده از روش میان‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)^۲، نقشه تغییرات سطح ایستابی تهیه شد.

موقعیت آبراهه‌ها نیز به عنوان یک عامل هیدرولوژیک، نقش بسیار مهمی در فرونشست زمین ایفا می‌کنند (قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ b؛ مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). آبراهه‌ها می‌توانند نقش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را در مواقع سیلابی ایفا نمایند، از این رو مناطق نزدیک به آبراهه می‌توانند از این مزیت برخوردار شوند. در این راستا از عامل فاصله از آبراهه استفاده شد. برای تهیه نقشه فاصله از آبراهه ابتدا لازم بود نقشه شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه تهیه شود. بدین منظور از ابزار Arc Hydro استفاده و نقشه مذکور تهیه شد. در ادامه،

1 Sun

2 IDW: Inverse Distance Weighting

لایه‌های فاصله از آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها و با استفاده از دستور Multi ring buffer با فواصل ۲۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. لازم به ذکر است که با مرور منابع و سوابق تحقیقاتی مشخص گردید که با توجه به وسعت و تراکم عوارض خطی در هر منطقه، فواصل در مقالات مختلف متفاوت در نظر گرفته شده است. لذا در این پژوهش چندین و چند حالت برای فواصل در نظر گرفته شد و فواصل بافرهای عوارض خطی بر اساس یک فاصله بهینه انتخاب شد تا طبقات با فرونشست صفر حداقل ممکن شود. در نهایت این فواصل بر اساس واقعیت و شرایط منطقه انتخاب شدند.

۲-۳- تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست با استفاده از مدل‌های دو متغیره

در این مرحله از پژوهش، از مجموع ۱۰۸ موقعیت فرونشست ثبت شده، به صورت تصادفی ۷۶ نقطه فرونشست (۷۰ درصد) به عنوان داده‌های آموزش برای فرایند مدل‌سازی و وزن‌دهی لایه‌ها انتخاب شدند. همچنین تعداد ۳۲ نقطه فرونشست (۳۰ درصد) باقی‌مانده نیز برای اعتبارسنجی (آزمون) مدل‌ها در نظر گرفته شدند (شکل ۲). سپس به منظور وزن‌دهی به هر یک از طبقات عوامل مؤثر ۱۴ گانه، از مدل‌های دو متغیره دمپستر- شفر (تابع باور شهودی)، آنتروپی شانون، نسبت فراوانی و وزن شواهد استفاده شد که هر یک از آن‌ها در ذیل تشریح می‌شود:

۲-۳-۱- مدل دمپستر- شفر (تابع باور شهودی)

تئوری دمپستر- شفر به عنوان تعمیمی از تئوری بیزین است که مبتنی بر احتمالات است. این تئوری در سال ۱۹۶۷ توسط دمپستر به کار برده شد (دمپستر^۱، ۱۹۶۷؛ صابرچناری و همکاران، ۱۳۹۶) و در ادامه، ساختار ریاضی آن توسط شفر در سال ۱۹۷۶ تشریح گردید (شفر^۲، ۱۹۷۶). اگر فرض شود چندین عامل از داده‌های مکانی موجود در منطقه حساس به فرونشست است، هر لایه‌ای از داده‌های مکانی به صورت E_i ($i=1,2,\dots,l$) برای تابع هدف T_p در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب E_{ij} به دست می‌آید که در آن ویژگی کلاس یا طبقه‌ای از E_i و دارای توزیع فراوانی از موقعیت‌ها یا ویژگی‌های مثبت و منفی در بروز فرونشست‌هاست. نرخ مثبت با علامت $\lambda(T_p)_{E_{ij}}$ نشان داده می‌شود که از رابطه ۱ به دست می‌آید (پارک^۳، ۲۰۱۰):

$$\lambda(T_p)_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (1)$$

نرخ یا نمره منفی نیز با علامت $\lambda(\bar{T}_p)_{E_{ij}}$ نیز از رابطه ۲ به دست می‌آید:

1 Dempster

2 Shafer

3 Park

$$\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L) - N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (2)$$

که در آن T_P : عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، $\overline{T_P}$: عواملی است که بر روی فرونشست تأثیری ندارند، $N(L \cap E_{ij})$: مساحت فرونشست در هر طبقه، $N(L)$: مساحت کل فرونشست‌های منطقه، $N(E_{ij})$: مساحت فاقد فرونشست در هر طبقه و $N(A)$: مساحت فاقد فرونشست منطقه مطالعاتی است. به‌طور کلی مقدار نرخ‌های به‌دست آمده از رابطه‌های ۱ و ۲ در محدوده صفر تا بی‌نهایت متغیر است. لذا با استفاده از رابطه‌های ۳، ۴ و ۵ استانداردسازی صورت می‌گیرد:

$$m(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\lambda(T_P)_{E_{ij}}}{\sum \lambda(T_P)_{E_{ij}}} \quad (3)$$

$$m(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}}{\sum \lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}} \quad (4)$$

$$m(\Theta) = 1 - m(T_P)_{E_{ij}} - m(\overline{T_P})_{E_{ij}} \quad (5)$$

در این رابطه‌ها، $m(T_P)_{E_{ij}}$ میزان اعتقاد به وقوع فرونشست، $m(\overline{T_P})_{E_{ij}}$ میزان اعتقاد به عدم وقوع فرونشست و $m(\Theta)$ میزان نرخ نهایی هستند (پارک، ۲۰۱۰).

۲-۳-۲- روش آنتروپی شانون

روش آنتروپی شانون در سال ۱۹۴۸ توسط شانون ارائه شد. این روش به‌عنوان یکی از معروف‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن‌های معیارها و شاخص‌ها شناخته شده است. در این روش معمولاً به هر یک از شاخص‌ها یک وزن نسبت داده می‌شود، به‌طوری‌که مجموع وزن شاخص‌ها برابر ۱ باشد. در این روش هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. شانون نشان داد که وقایع با احتمال وقوع زیاد، اطلاعات کمتری در اختیار می‌گذارند و برعکس هرچقدر احتمال وقوع یک رخداد کمتر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیشتر است. با به‌دست آوردن اطلاعات جدید، در واقع عدم قطعیت‌ها کاهش یافته و ارزش اطلاعات جدید برابر با مقداری است که از عدم قطعیت کاسته شده است. در نتیجه، عدم قطعیت و اطلاعات پارامترهایی وابسته به هم هستند. در این پژوهش به‌منظور تعیین میزان حساسیت فرونشست و ترسیم نقشه با استفاده از مدل آنتروپی شانون از رابطه‌های زیر استفاده شد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲):

$$(P_{ij}) = P_{ij} / \sum_{j=1}^{S_j} P_{ij} \quad (6)$$

$$H_j = - \sum_{j=1}^{S_j} (P_{ij})(\log_2 P_{ij}). \quad j = 1 \dots n \quad (7)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \quad (۸)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad I = (0.1) \quad j = 1.2 \dots n \quad (۹)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (۱۰)$$

که در آن، P_{ij} تراکم یا نسبت فراوانی (FR) فرونشست در هر طبقه است که در رابطه ۱۰ نحوه محاسبه آن توضیح داده می‌شود. P_{ij} احتمال وجود فرونشست در هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و H_{max} مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات، S_j تعداد طبقه‌ها و W_j وزن نهایی هر عامل است. بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور، یعنی مقدارهای P_{ij} مربوط به هر عامل و کلاس‌های آن بر اساس تقسیم تعداد فرونشست بر تعداد فرونشست بر تعداد پیکس‌های کلاس‌های عوامل، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست تهیه شد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۳-۳- روش نسبت فراوانی (FR)

نسبت فراوانی یک روش آماری دو متغیره است که برای محاسبه رابطه احتمالی بین متغیرهای مستقل و وابسته در نقشه‌های با کلاس‌های متعدد استفاده می‌شود و می‌تواند روابط بین فرونشست‌ها و عوامل مختلف مؤثر در منطقه مورد مطالعه را آشکار نماید (ازدمیر و آلتورال^۱، ۲۰۱۳). در این پژوهش برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست، درصد پیکسل‌های دارای فرونشست و فاقد فرونشست منطقه مورد مطالعه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی تعیین گردید. سپس نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس مرتبط با آن محاسبه گردید (لی^۲، ۲۰۰۷؛ مجبی تفرشی و همکاران، ۱۳۹۹). محاسبه نسبت فراوانی برای هر یک از کلاس‌های عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست بر اساس رابطه (۱۱) است:

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (۱۱)$$

که در این رابطه، A: پهنه‌های فرونشست هر کلاس مربوط به هر عامل، B: مساحت کل فرونشست‌ها در منطقه مطالعاتی، C: مساحت هر کلاس مربوط به هر عامل و D: مساحت کل منطقه مورد مطالعه است. به عبارت دیگر، نسبت بین پهنه‌های دارای فرونشست به مساحت کل منطقه، بیان‌گر نسبت فراوانی است. از این رو $Fr < 1$ نشان‌دهنده همبستگی ضعیف بین فرونشست‌های رخ داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن و $Fr > 1$ نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین فرونشست‌های رخ داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن است. Fr نزدیک به یک نشان می‌دهد که همبستگی معنی‌داری

1 Ozdemir & Altural

2 Lee

بین فرونشست‌های رخ داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن وجود ندارد. به‌طور کلی، همبستگی مثبت نشان‌دهنده احتمال فرونشست بالاتر و همبستگی منفی نشان‌دهنده احتمال فرونشست پایین‌تر است (صابرچناری، ۱۳۹۶؛ پرادهان و لی، ۲۰۱۰).

۲-۳-۴- مدل وزنی شاهد (وزن شواهد)

این روش برای مدل‌سازی در یک منطقه برای هر عامل در صورت وجود یا عدم وجود فرونشست در محل، وزنی را محاسبه می‌کند. تعیین وزن برای هر عامل از طریق ترکیب هرکدام از لایه‌های عاملی با نقشه پراکنش فرونشست انجام می‌شود. در این مدل، مقادیر وزنی معمولاً دامنه‌ای بین اعداد مثبت و منفی دارند که بیان‌گر نقش بیشتر و کمتر متغیر در ایجاد فرونشست است. روش وزن‌دهی شواهد بر تئوری بیزین در احتمالات شرطی استوار است (توید^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ علیخانی و همکاران، ۱۴۰۰). وزن‌ها در این روش بر اساس وجود یا عدم وجود فرونشست در منطقه مورد مطالعه به‌صورت رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$W^+ = \ln\left(\frac{P\left(\frac{F}{S}\right)}{P\left(\frac{F}{S^*}\right)}\right) \quad (11)$$

$$W^- = \ln\left(\frac{P\left(\frac{F^*}{S}\right)}{P\left(\frac{F^*}{S^*}\right)}\right) \quad (12)$$

$$C = W^+ - W^- \quad (13)$$

که در آن P احتمال، F حضور یک فاکتور، F* عدم حضور یک فاکتور، S حضور فرونشست و S* عدم حضور فرونشست است. W⁺ و W⁻ به ترتیب بیان‌گر وزن شواهد وقتی یک فاکتور (مثلاً زمین‌شناسی)، حضور و عدم حضور داشته باشد. مقدار C در واقع کنتراست بین اوزان است. مقدار صفر آن بیان‌گر عدم وجود رابطه بین فاکتور مستقل با فاکتور وابسته (فرونشست) است. مقدار مثبت و بزرگ‌تر، نشان‌دهنده همبستگی مثبت و بیشتر بین فاکتور مربوطه با ظهور یا وقوع فرونشست است. در روش وزن‌دهی شواهد، بعد از محاسبه مقدار W⁺ در تمام طبقات فاکتورها، ابتدا مقدار مجموع وزن‌های مثبت برای هر سلول روی نقشه به‌دست آمده و سپس احتمال نهایی محاسبه شد که مقدار آن بین صفر تا ۱ است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مدل به کار گرفته و نقشه میزان حساسیت فرونشست استخراج شد (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۵).

1 Pradhan & Lee

2 Tweed

۳- ارزیابی کارایی مدل‌های مورد استفاده

ارزیابی دقت مدل‌ها در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی بر اساس روش منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) انجام شد. منحنی ROC به صورت نموداری ارائه می‌شود که در آن احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم حضور مقایسه می‌شود (فیلیپس^۱ و همکاران، ۲۰۰۶؛ الیت^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). سطح زیر نمودار (AUC) به دست آمده به عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور از عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد. سطح زیر نمودار (AUC) مدلی با قدرت پیشگویی بسیار کم، ۰/۵ است و مدلی کامل با قدرت پیشگویی بسیار زیاد، دارای AUC به میزان یک خواهد بود (فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۹).

۴- نتایج

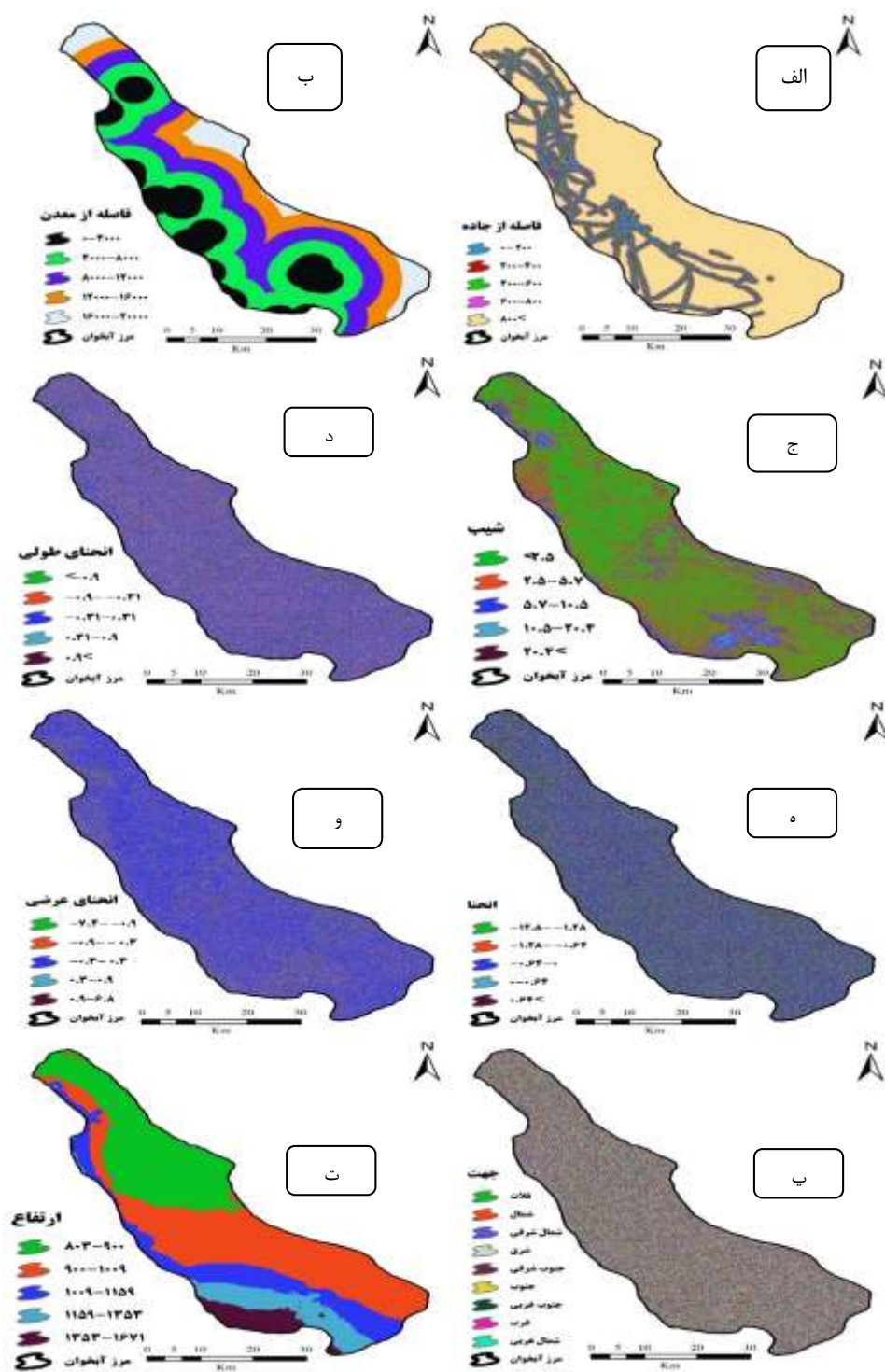
۴-۱- عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست

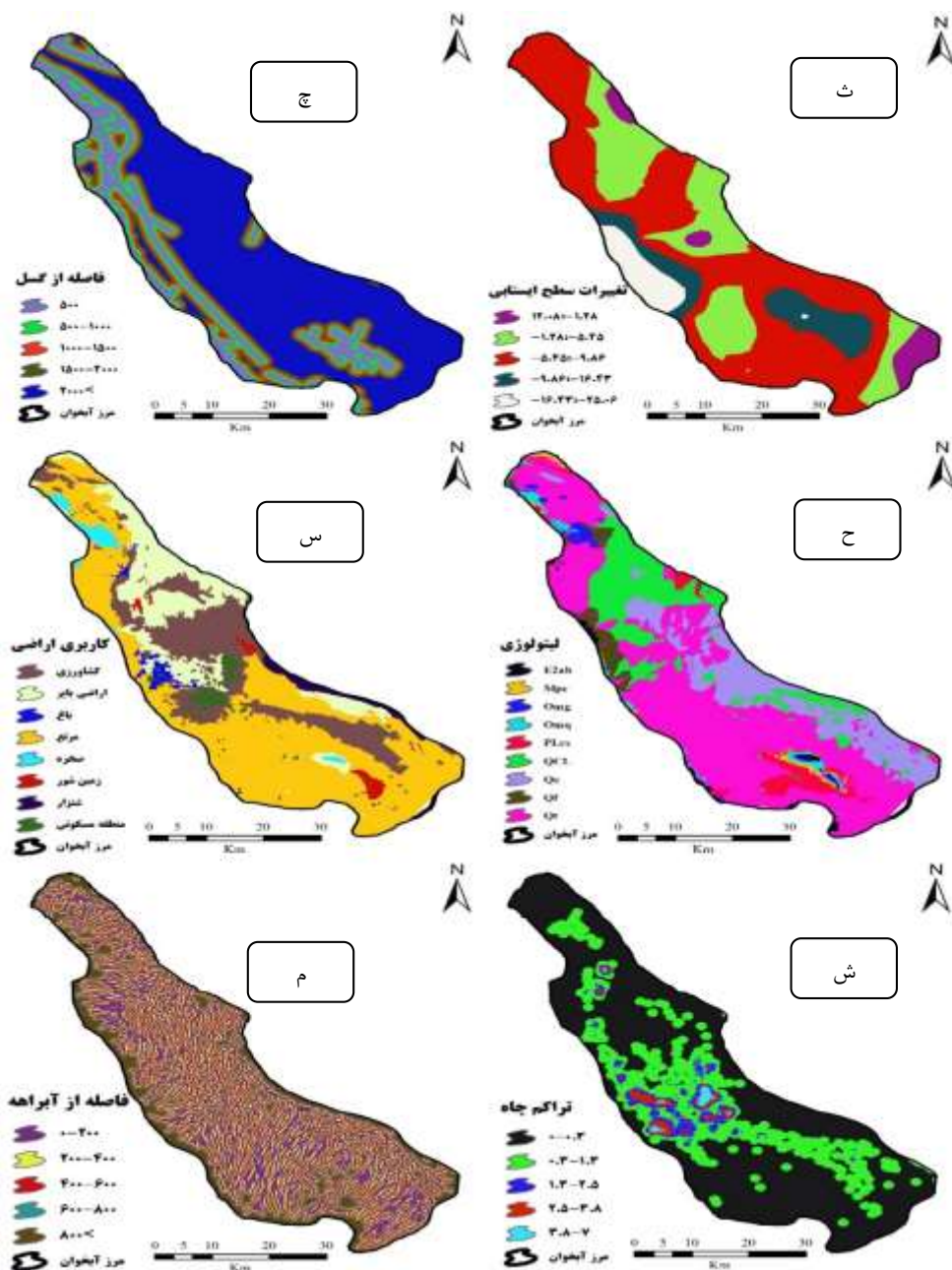
نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین آبخوان دشت کاشان در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نقشه عامل فاصله از جاده نشان می‌دهد که تغییرات فاصله از جاده بین ۲۰۰ تا بیشتر از ۸۰۰ متر است و جاده‌ها در قسمت‌های شمال غربی، غرب و جنوب غربی آبخوان پراکنش بیشتری دارند (شکل ۳-الف). فاصله از معدن نیز بین ۴ تا ۲۰ کیلومتر متغیر است. معادن نیز بیشتر در قسمت‌های شمال غربی، غرب و جنوب غربی آبخوان و نزدیک به جاده‌ها پراکنش دارند (شکل ۳-ب). میزان شیب در سطح دشت کمتر از ۲۱ درصد است و پراکندگی طبقات شیب در کل سطح آبخوان مشهود است. همچنین کمی بیش از ۸۶ درصد آبخوان دشت کاشان، شیب کمتر از ۶ درصد دارد (شکل ۳-ج). میزان دامنه تغییرات انحنای طولی بین ۰/۹- الی ۰/۹، انحنای عرضی بین ۷/۴- الی ۶/۸ و انحنای سطح نیز بین ۱۲/۸- الی ۰/۶۴ است و تغییرات نسبی این شاخص‌ها در کل سطح پراکنده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشتر سطح دشت در دامنه میانی قرار گرفته و در نتیجه، مسطح و بدون انحنای است (شکل‌های ۳-د، ۳-و، ۳-ه). دامنه تغییرات ارتفاع در منطقه مطالعاتی بین ۸۰۳ الی ۱۶۷۱ متر است و از شمال و شمال غربی منطقه مطالعاتی به سمت جنوب و جنوب غربی ارتفاع از سطح دریا در حال افزایش است. همچنین حدود ۷۰ درصد از وسعت آبخوان دشت کاشان در دامنه ارتفاعی ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متری قرار دارد (شکل ۳-ت). همچنین دامنه تغییرات سطح ایستابی در یک دوره ۱۲ ساله بین ۱۲/۰۸ تا ۲۵/۰۶ متر است و تغییرات مذکور در جنوب غرب منطقه مطالعاتی بیشتر از سایر مناطق است. بیشترین تغییرات یعنی ۲۵/۰۶ متر نیز در منطقه خزاق است (شکل ۳-ث). فاصله از گسل‌های منطقه از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر متغیر است و پراکندگی گسل‌ها در شمال غربی، غرب، جنوب غربی و قسمتی از جنوب دشت بیشتر است (شکل ۳-ج). تنوع کاربری اراضی و سنگ‌شناسی نیز در منطقه مطالعاتی بالا است، به طوری که منطقه

1 Phillips

2 Elith

مطالعاتی دارای ۸ نوع کاربری و ۹ نوع لیتولوژی است. کاربری‌های مرتع، کشاورزی و اراضی بایر، دارای بیشترین سطح کاربری‌ها هستند و در میان آن‌ها نیز، کاربری مرتع بیشترین وسعت منطقه را به میزان ۵۱/۷۲ درصد به خود اختصاص داده است. واحد Qt1 (تراس‌های قدیمی) در بخش لیتولوژی نیز دارای بیشترین وسعت (۵۳/۳۹ درصد) در منطقه مطالعاتی است. سایر یافته‌ها نیز نشان داد که حدود ۸۸ درصد منطقه مطالعاتی متشکل از تراس‌های قدیمی، ورق شن و ماسه و فلات رسی است (شکل‌های ۳-ح و ۳-س). تراکم چاه‌های بهره‌برداری نیز بین ۰/۳ تا ۷ تعداد در کیلومترمربع متغیر است و پراکندگی چاه‌ها در مرکز و جنوب شرقی دشت بیشتر از سایر مناطق است (شکل ۳-ش). فاصله از آبراهه‌ها بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ متر متغیر است و الگوی شبکه آبراهه‌ها در منطقه مطالعاتی به صورت شاخه درختی است و دامنه تغییرات پایین نشان از تعدد آبراهه‌ها در سطح دشت است (شکل ۳-م).





شکل ۳- عوامل مورد استفاده در تعیین مناطق دارای فرونشست

۴-۲- وزن‌دهی طبقات عوامل مؤثر با استفاده از مدل‌های دو متغیره

جدول ۱، وزن‌های نهایی محاسبه شده طبقات عوامل مؤثر بر فرونشست زمین بر اساس مدل‌های مورد استفاده در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. در این جدول همچنین مساحت هر طبقه برحسب هکتار و تعداد نقاط دارای فرونشست به تفکیک هر عامل نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین تعداد نقاط فرونشست

مشاهداتی مورد استفاده در مرحله آموزش، در جهات جغرافیایی جنوب و شمال غربی، فاصله بیشتر از ۲۰۰۰ متری گسل‌ها، شیب‌های کمتر از ۱۰/۵ درصد و همچنین ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند. همچنین کلیه فرونشست‌های ثبت شده در کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی، مرتع و تنها یک مورد در منطقه مسکونی مشاهده شده است. بر اساس نتایج انحنای عرضی، انحنای طولی و انحنای ترکیبی، بیشترین میزان پراکنش فرونشست‌ها در مناطق مقعر دشت مشاهده شده است. تغییرات سطح ایستابی نیز نشان می‌دهد که در کلیه طبقات تغییر سطح ایستابی، فرونشست مشاهده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، فرونشست‌ها بیشتر در مناطق دارای تراکم چاه کمتر رخ داده است. همچنین کلیه فرونشست‌های ثبت شده در واحدهای سنگ‌شناسی Q_{CL} ، Q_e و Q_t مشاهده شده است. سایر نتایج این قسمت نشان داد که در فاصله ۰-۲۰۰ و ۲۰۰-۴۰۰ متری از آبراهه‌ها و نیز در فاصله بیشتر از ۸۰۰ متری از جاده‌ها بیشترین فرونشست اتفاق افتاده است. همچنین در کلیه طبقات فاصله از معادن فرونشست رخ داده است.

جدول ۱- وزن‌های نهایی روش‌های دمپستر- شفر، وزن‌دهی شواهد، آنتروپی شانون و نسبت فراوانی

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر- شفر $m(\Theta)$	آنتروپی شانون W_{ij}	وزن شواهد C	نسبت فراوانی FR
جهت	مسطح (فلات)	۲۶۱۵/۳۴	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰
	شمال	۲۷۴۴۳/۷۷	۸	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۸۶
	شمال شرقی	۲۷۱۴۱/۱۴	۸	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۱۹	۰/۸۷
	شرق	۲۸۴۹۹/۶۷	۳	۰/۸۴	۰/۰۳	۱/۴۶	۰/۳۱
	جنوب شرقی	۲۷۳۶۳/۴۲	۱۰	۰/۷۶	۰/۰۹	-۰/۰۹	۱/۰۷
	جنوب	۲۷۴۲۳/۱۳	۱۴	۰/۷۱	۰/۱۳	-۰/۵۵	۱/۵۰
	جنوب غربی	۲۷۰۷۰/۱۱	۱۱	۰/۷۵	۰/۱۰	-۰/۲۴	۱/۱۹
	غرب	۲۸۳۷۵/۲۴	۹	۰/۷۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۹۳
	شمال غربی	۲۷۲۹۵/۶۷	۱۳	۰/۷۲	۰/۱۲	-۰/۴۵	۱/۴۰
فاصله از گسل (متر)	۵۰۰	۳۲۷۹۲/۴۸	۶	۰/۶۲	۱/۰۲	۰/۰۹۵	۰/۵۴
	۱۰۰۰-۵۰۰	۲۲۷۲۳/۷۹	۴	-۰/۲۸	۰/۹۸	۰/۰۹۷	۰/۵۲
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۱۸۵۲۰/۶۸	۱	-۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۱۶
	۲۰۰۰-۱۵۰۰	۱۵۹۵۰/۸۷	۶	-۰/۲۰	۲/۱۰	-۰/۰۱۵	۱/۱۰
	>۲۰۰۰	۱۳۳۳۳۹/۶۸	۵۹	۰/۳۳	۲/۱۰	-۰/۱۱۶	۱/۳۰
شیب (درصد)	<۲/۵	۱۱۱۳۶۱/۲۷	۴۵	۰/۴۵	۱/۹۹	-۱/۵۷	۱/۱۹
	۵/۷-۲/۵	۸۱۳۰۹/۰۵	۲۲	۰/۵۲	۱/۳۳	۱/۴۲	۰/۷۹
	۱۰/۵-۵/۷	۲۳۵۳۰/۰۸	۹	۰/۴۴	۱/۸۸	-۰/۵۵	۱/۱۲

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر- شفر $m(\Theta)$	آتروپی شانون W_{ij}	وزن شواهد C	نسبت فراوانی FR
	۲۰/۴-۱۰/۵	۶۰۷۴/۲۷	۰	۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰
	>۲۰/۴	۹۵۲/۸۳	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
	۹۰۰-۸۰۳	۶۵۶۴۱/۳	۴۷	۰/۲۰	۵/۶۹	-۱/۵۶	۲/۱۰
ارتفاع (متر)	۱۰۰۹-۹۰۰	۸۹۱۶۰/۷	۲۹	۰/۴۸	۲/۵۹	۰/۰۹	۰/۹۶
	۱۱۵۹-۱۰۰۹	۳۴۸۵۰/۳	۰	۰/۷۶	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۰۰
	۱۳۵۳-۱۱۵۹	۲۲۰۸۶/۲	۰	۰/۷۷	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰
	۱۶۷۱-۱۳۵۳	۱۱۴۸۹	۰	۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰
	کشاورزی	۴۹۷۹۳/۴۱	۱۸	۰/۶۹	۱/۵۹	-۰/۱۷	۱/۰۶
کاربری اراضی	اراضی فاقد پوشش	۳۸۹۱۴/۴۴	۴۷	۰/۲۹	۵/۳۳	-۰/۱۶	۳/۵۴
	باغ	۳۲۸۵/۳۰	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰
	مرتع	۱۱۵۴۵۱/۱۲	۱۰	۰/۷۴	۰/۳۸	۰/۱۳	۰/۲۶
	صخره	۴۲۰۳/۷۳	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰
	زمین‌های شور	۳۱۲۵/۳۸	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	-۰/۰۲	۰/۰۰
	ماسه‌زار (شن‌زار)	۳۳۱۶/۵۰	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	-۰/۱۰	۰/۰۰
	منطقه مسکونی	۵۱۳۷/۶۱	۱	۰/۷۷	۷/۳۱	۰/۰۰۲	۰/۵۷
	۷/۴- الی ۰/۹	۴۱۵۵/۷۸	۲۲	۰/۰۳	۲۰/۶۶	-۰/۲۷	۱۵/۵۵
انحنای عرضی	۰/۹- الی ۰/۳	۴۳۰۶۲/۸۰	۳۷	۰/۷۵	۳/۳۵	-۰/۸۱	۲/۵۲
	۰/۳- الی ۰/۳	۱۲۸۴۸۰/۱۳	۱۵	۰/۶۴	۰/۴۶	۰/۷۴	۰/۳۴
	۰/۳- الی ۰/۹	۴۳۱۸۹/۲۷	۲	۰/۷۷	۰/۱۸	۱/۰۶	۰/۱۴
	۰/۹- الی ۶/۸	۴۳۳۹/۵۲	۰	۰/۸۱	۰/۰۰	-۰/۰۴	۰/۰۰
	<۰/۰۹	۳۴۹۴/۴۷	۲۰	-۰/۰۳	۲۱/۵۶	۱/۶۵	۱۶/۸۱
انحنای طولی	۰/۰۹- الی ۰/۳۱	۶۲۰۰۲/۸۰	۳۳	۰/۷۷	۲/۰۱	۰/۵۴	۱/۵۶
	۰/۳۱- الی ۰/۳۱	۹۱۶۵۷/۴۷	۲۲	۰/۷۳	۰/۹۰	-۰/۰۰۴	۰/۷۰
	۰/۹- الی ۰/۳۱	۶۲۵۱۴/۰۶	۱	۰/۷۳	۰/۰۶	-۱/۶۰	۰/۰۵
	>۰/۹	۳۵۵۸/۷۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	۱۲/۸- الی ۱/۲۸	۳۵۵۰۲/۱۶	۱۵	۰/۵۶	۲/۴۶	-۰/۷۱	۱/۲۴
انحنای کلی دامنه	۱/۲۸- الی ۰/۶۴	۴۱۶۰۲/۰۸	۱۵	۰/۵۹	۲/۱۰	-۰/۱۹	۱/۰۶
	۰- الی ۰/۶۴	۶۹۱۰۲/۸۰	۲۳	۰/۶۱	۱/۹۴	۰/۰۹	۰/۹۸
	۰- الی ۰/۶۴	۴۱۶۴۹/۳۸	۹	۰/۶۶	۱/۲۶	۱/۴۶	۰/۶۴
	>۰/۶۴	۳۵۳۷۱/۰۸	۱۴	۰/۵۸	۲/۳۱	-۰/۴۹	۱/۱۶
	۱۲/۰۸- الی ۱/۲۸	۱۰۰۱۵/۲۷	۳	۰/۴۶	۱/۶۷	۰/۰۵	۰/۸۸
تغییرات سطح ایستایی (متر)	۱/۲۸- الی ۰/۴۵	۵۸۴۸۱/۰۲	۳۵	۰/۸۰	۳/۳۳	-۰/۳۰	۱/۷۶

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر- شفر	آتروپی شانون	وزن شواهد	نسبت فراوانی
				m(Θ)	Wij	C	FR
	۵/۴۵- الی ۹/۸۶	۱۱۷۴۷۴/۹۱	۳۲	۰/۷۵	۱/۵۲	۰/۱۴	۰/۸۰
	۹/۸۶- الی ۱۶/۴۳	۲۵۰۵۸/۴۱	۵	۰/۷۹	۱/۱۱	۰/۲۰	۰/۵۹
	۱۶/۴۳- الی ۲۵/۰۶	۱۲۱۹۷/۸۹	۱	۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۲۴
تراکم چاه (تعداد در کیلومتر مربع)	۰- ۰/۳	۱۴۴۳۴۸/۸۷	۴۴	۰/۵۴	۱/۶۵	۱/۰۹	۰/۸۹
	۰/۳- ۱/۳	۶۴۸۱۹/۴۰	۲۸	۰/۵۰	۲/۳۸	-۱/۳۴	۱/۲۹
	۱/۳- ۲/۵	۸۸۵۹/۳۰	۳	۰/۵۵	۱/۸۴	۰/۰۳	۰/۹۹
	۲/۵- ۳/۸	۳۸۰۱/۴۳	۱	۰/۶۱	۱/۴۳	۰/۹۵	۰/۷۷
لیتولوژی (سنگ شناسی)	۷- ۳/۸	۱۳۹۸/۵۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
	E2ab	۱۸۱۳/۰۴	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰
	Mpc	۲۲۵۰/۶۸	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰
	Omg	۳۲۰۶/۴۰	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰
	Omq	۳۶۷۲/۹۷	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰
	PLcs	۹۳۶۶/۵۳	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰
	QCL	۳۶۸۹۰/۹۸	۴۴	۰/۲۹	۴/۷۶	-۰/۷۱	۳/۵۰
	Qe	۴۰۲۳۰/۰۹	۲۱	۰/۶۲	۲/۰۸	-۰/۲۰	۱/۵۳
	Qf	۶۶۰۹/۱۲	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
فاصله از آبراهه (متر)	Qt	۱۱۹۱۸۷/۶۹	۱۱	۰/۷۵	۰/۳۷	۰/۷۰	۰/۲۷
	۲۰۰- ۰	۹۱۵۱۹/۱۲	۳۳	۰/۵۱	۱/۹۶	-۰/۱۷	۱/۰۶
	۴۰۰- ۲۰۰	۶۲۷۵۲/۴۰	۲۴	۰/۵۶	۲/۰۸	-۰/۲۸	۱/۱۲
	۶۰۰- ۴۰۰	۳۳۸۷۰/۴۲	۱۵	۰/۵۰	۲/۴۱	-۰/۵۴	۱/۳۰
	۸۰۰- ۶۰۰	۱۵۹۳۶/۷۷	۴	۰/۶۳	۱/۳۶	۰/۵۵	۰/۷۴
فاصله از جاده (متر)	>۸۰۰	۱۹۱۴۸/۸۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰
	۲۰۰- ۰	۲۴۴۳۱/۴۷	۹	۰/۶۳	۲/۱۲	-۰/۱۲	۱/۰۸
	۴۰۰- ۲۰۰	۲۰۳۵۸/۰۶	۱۲	۰/۵۳	۳/۳۹	-۰/۸۱	۱/۷۳
	۶۰۰- ۴۰۰	۱۶۰۷۶/۷۷	۹	۰/۵۴	۳/۲۲	-۰/۷۱	۱/۶۴
	۸۰۰- ۶۰۰	۱۳۲۰۰/۰۵	۳	۰/۶۹	۱/۳۱	۰/۵۵	۰/۶۷
فاصله از معدن (متر)	>۸۰۰	۱۴۹۱۶۱/۱۴	۴۳	۰/۶۱	۱/۶۶	۰/۵۶	۰/۸۵
	۴۰۰۰- ۰	۴۱۰۱۸/۷۰	۳	۰/۶۴	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۲۱
	۸۰۰۰- ۴۰۰۰	۶۸۰۱۶/۷۶	۴۳	۰/۱۸	۳/۴۵	-۰/۱۰	۱/۸۶
	۱۲۰۰۰- ۸۰۰۰	۵۴۴۵۷/۰۵	۱۲	۰/۷۴	۱/۲۰	۰/۰۵	۰/۶۵
	۱۶۰۰۰- ۱۲۰۰۰	۳۹۱۸۸/۰۹	۷	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۰۷	۰/۵۲
	۲۰۰۰۰- ۱۶۰۰۰	۲۰۵۴۶/۹۰	۱۱	۰/۶۷	۲/۹۲	۰/۰۵	۱/۵۷

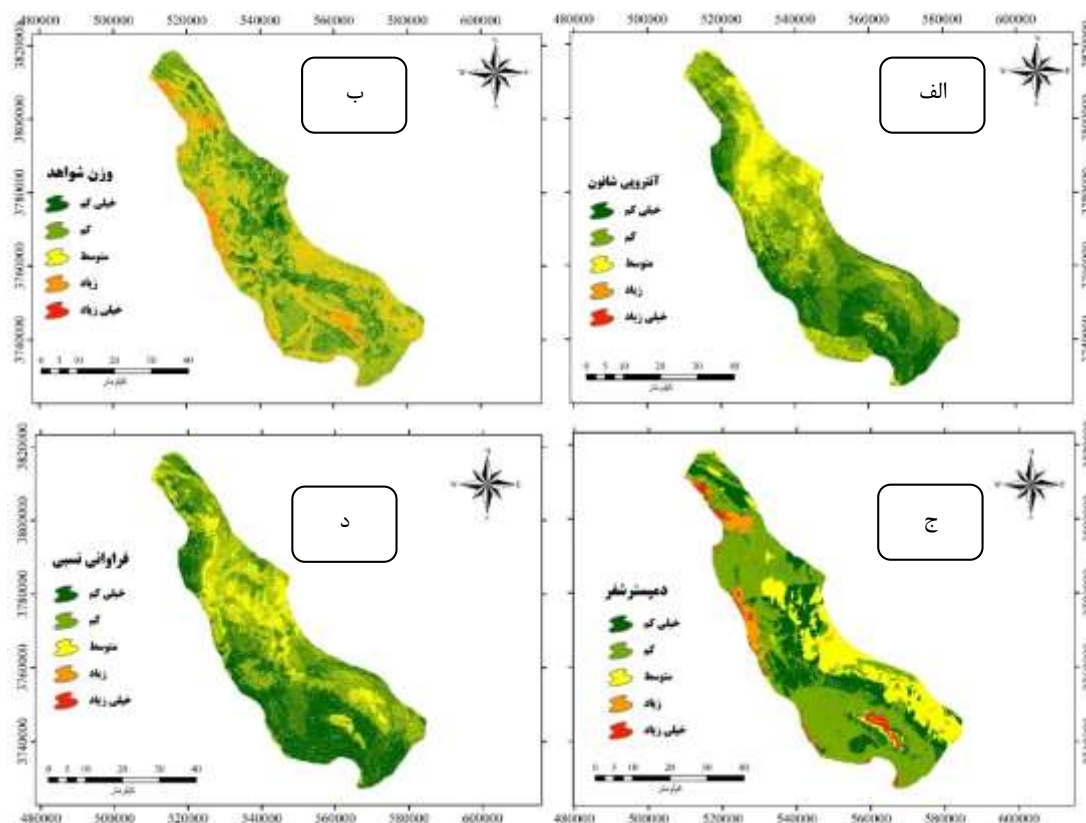
۴-۳- نقشه‌های حساسیت فرونشست حاصل از مدل‌های مختلف

نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست منطقه مطالعاتی بر اساس مدل‌های فوق‌الذکر در **شکل ۴** نشان داده شده است. در روش آنتروپی شانون، کلاس با حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در مناطق شمال و شمال شرق دشت متمرکز هستند (**شکل ۴-الف**). بر اساس نقشه حاصل از روش وزن شواهد، کلاس‌های حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد بیشتر در شمال غربی، غرب و جنوب شرقی دشت متمرکز هستند (**شکل ۴-ب**). همچنین نقشه حساسیت‌پذیری روش دمپستر- شفر نشان داد که بخش بسیار کمی از وسعت منطقه مطالعاتی دارای کلاس حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در شمال غربی، غرب و بخشی از جنوب و جنوب شرق دشت است (**شکل ۴-ج**). بر اساس روش نسبت فراوانی، کلاس‌های با حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در شمال شرقی و شرق منطقه مطالعاتی متمرکز هستند (**شکل ۴-د**).

جدول ۲ نیز مساحت (هکتار) و درصد هر یک از طبقات نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست (بر اساس مرز نهایی در نظر گرفته شده) را به تفکیک چهار روش مورد استفاده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، طبقه با خطر خیلی زیاد در همه روش‌ها کمترین میزان مساحت را به خود اختصاص داده است و دوطبقه خطر کم و متوسط بیشترین میزان مساحت را دارند.

جدول ۲- مساحت و درصد هرکدام از طبقات نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرونشست با استفاده از مدل‌های مورد

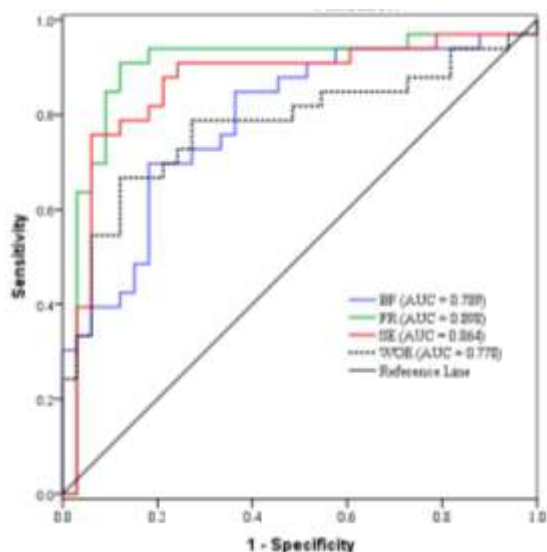
روش	خیلی کم		کم		متوسط		زیاد		خیلی زیاد	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
وزن شواهد	۲۵۵۸۷/۶	۱۱/۵۴	۶۲۰۶۵/۶	۲۷/۹۹	۷۰۹۴۸/۷	۳۱/۹۹	۴۷۷۶۲/۲	۲۱/۵۴	۱۵۳۹۸/۳	۶/۹۴
آنتروپی شانون	۴۷۸۶۳/۷	۲۱/۶	۷۲۹۶۱/۵	۳۲/۹	۶۴۶۸۱/۲	۲۹/۲	۳۰۱۵۲/۳	۱۳/۶	۶۱۰۴/۷	۲/۸
دمپستر-شفر	۵۳۰۵۳/۵	۲۳/۹	۱۱۱۲۳۶/۹	۵۰/۲	۴۲۲۶۸/۱	۱۹/۱	۹۴۶۷/۱	۴/۳	۵۷۳۷/۸	۲/۶
فراوانی نسبی	۶۰۴۸۲/۳	۲۷/۳	۶۴۳۴۰/۵	۲۹	۶۱۰۰۳/۴	۲۷/۵	۲۹۴۲۴/۹	۱۳/۳	۶۵۱۲/۳	۲/۹



شکل ۴- نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در سطح دشت کاشان

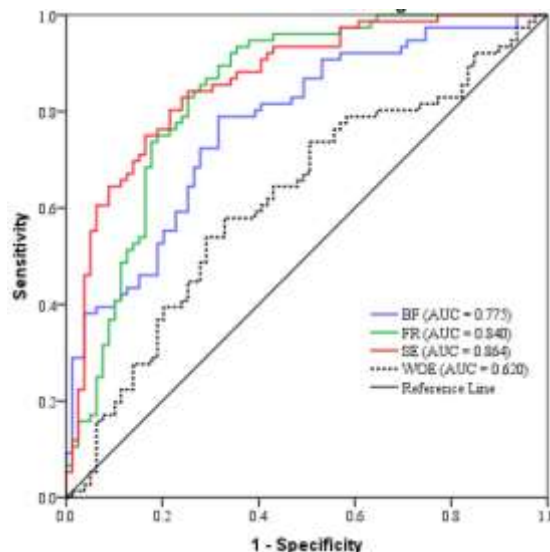
۴-۴- ارزیابی مدل‌ها

در این مطالعه، ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌های مختلف با استفاده از روش منحنی ROC برای مجموعه داده‌های مشاهداتی در دو مرحله مدل‌سازی و اعتبارسنجی انجام شد. **شکل‌های ۵ و ۶**، منحنی‌های ROC و مقادیر شاخص AUC را برای مدل‌های مورداستفاده در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد. بر اساس **شکل ۵** در مرحله آموزش، مدل آنتروپی شانون با میزان AUC برابر با $0/864$ بهترین عملکرد و مدل وزن‌دهی شواهد با مقدار AUC برابر با $0/620$ پایین‌ترین کارایی را نسبت به سایر روش‌ها داشته‌اند. دو مدل نسبت فراوانی و تابع باور شهودی (دمپستر- شفر) به ترتیب با مقادیر AUC برابر با $0/840$ و $0/775$ در اولویت‌های دوم و سوم قرار داشتند. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌ها بر اساس داده‌های اعتبارسنجی در **شکل ۶** نیز حاکی از آن بود که روش نسبت فراوانی با مقدار AUC برابر با $0/898$ دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. پس از آن، مدل‌های آنتروپی شانون ($AUC = 0/864$)، تابع باور شهودی ($AUC = 0/789$) و وزن‌دهی شواهد ($AUC = 0/778$) در رده‌های بعدی از نظر کارایی قرار گرفتند.



شکل ۶- مقادیر AUC در بخش اعتبارسنجی مدل‌های

مورد استفاده



شکل ۵- مقادیر AUC در بخش آموزش مدل‌های

مورد استفاده

۵- بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی مانند انحلال، تراکم نهشته‌ها و حرکات آرام پوسته و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدنکاری و برداشت آب‌های زیرزمینی ایجاد شود. در دهه‌های اخیر، فرونشست زمین همراه با صنعتی شدن، شهرنشینی و پمپاژ بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی مشاهده شده است. در هنگام افت سطح آب زیرزمینی، زهکشی آب سبب کاهش فشار هیدرواستاتیکی در لایه رس و تحکیم و فشردگی این لایه‌ها و نشست زمین می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان فرونشست‌ها در جهات جغرافیایی جنوب و شمال غربی واقع شده‌اند. در سایر جهات جغرافیایی نیز فرونشست در سطح منطقه مطالعاتی مشاهده شده است که اهمیت پایین جهت را در حساسیت فرونشست نشان می‌دهد. [مختاری و همکاران \(۱۳۹۸\)](#) و [محمدی و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) نیز به اهمیت پایین جهت جغرافیایی و تأثیر آن بر فرونشست اشاره کرده‌اند. بر اساس نقشه فاصله از گسل‌ها، بیشترین میزان فرونشست‌ها در فاصله بیش از ۲۰۰۰ متری واقع شده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر پایین این لایه بر روی وقوع فرونشست در آبخوان دشت کاشان است. [نادری و همکاران \(۱۳۹۷\)](#) طی تحقیقی در سلماس نیز به اهمیت پایین گسل بر روی فرونشست اشاره کرده‌اند. این در حالی است که [مختاری و همکاران \(۱۳۹۸\)](#) در تسوج، [محمدی و همکاران در دشت سمنان \(۲۰۱۹\)](#) و [تین‌بویی و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) در کره جنوبی به اثرات تشدیدکننده گسل روی فرونشست اذعان کرده‌اند. بر اساس نقشه شیب دشت کاشان، تعداد ۶۷ فرونشست در شیب کمتر از ۵/۷ درصد واقع شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده این است که در شیب‌های پایین‌تر، خطر وقوع فرونشست بیشتر است

که مختاری و همکاران (۱۳۹۸) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به این مورد اشاره کرده‌اند. دلیل این امر می‌تواند این باشد که در شیب‌های پایین، امکان تشکیل آبخوان بیشتر است و لذا بر اثر برداشت آب در این مناطق، احتمال وقوع فرونشست بیشتر است. لازم به ذکر است که تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) و رحمتی و همکاران (۲۰۱۹a) به اهمیت پایین‌تر شیب نسبت به سایر شاخص‌ها اشاره کرده‌اند. نتایج نشان داد که تعداد ۷۶ مورد فرونشست در ارتفاع بین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ متر واقع شده‌اند و در ارتفاعات بالاتر، میزان وقوع فرونشست صفر بوده است که در تحقیقات محمدی و همکاران (۲۰۱۹)، اهمیت این شاخص و اثرگذاری آن بر فرونشست بیان شده است. لایه کاربری اراضی نشان داد که تعداد ۶۵ مورد از فرونشست‌ها در اراضی بایر و کشاورزی واقع شده‌اند و این مورد نشان‌دهنده حساسیت این دو کاربری بر میزان وقوع فرونشست است که نادری و همکاران (۱۳۹۷)، تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) به این مهم اشاره کرده‌اند. یکی از علل این موضوع، برداشت منابع آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی برای زراعت است که در پژوهش قره‌چلو و همکاران (۱۴۰۰) به آن تأکید شده است. نتایج نشان داد که وقوع فرونشست در مناطقی رخ داده است که انحنای عرضی، طولی و انحنای ترکیبی دارای مقدار پایین‌تری بودند و این شاخص‌ها اثر معناداری روی فرونشست نداشته‌اند که محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به اهمیت پایین این شاخص‌ها اشاره کرده‌اند. بر اساس نقشه میزان تغییرات سطح ایستابی، تعداد فرونشست‌ها در مناطقی که میزان این تغییرات بین ۱ الی ۱۰ متر (کاهش) بوده؛ بیشترین مقدار بوده است. افت ۱۰ متری آب زیرزمینی همراه با تراکم چاه‌ها در مرکز، شمال شرق و جنوب شرق دشت باعث فرونشست بیشتر در این مناطق شده است. تغییرات سطح آب زیرزمینی یک از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار بر فرونشست منطقه مطالعاتی است که اهمیت این لایه در تحقیقات مختاری و همکاران (۱۳۹۸)، جانباز فوتمی و همکاران (۱۳۹۹)، قربان‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)، محمدی و همکاران (۲۰۱۹)، تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸)، رحمتی و همکاران (۲۰۱۹a)، کومار^۱ و همکاران (۲۰۲۲) و نگویان^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأیید شده است. بر اساس نقشه تراکم چاه‌ها، تعداد وقوع فرونشست بیشتر در مناطقی رخ داده است که تراکم چاه کمتر از ۱/۳ کیلومتر در کیلومتر مربع بوده است که این نتیجه بر خلاف انتظار بوده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند برداشت آب بیشتر از چاه‌هایی که در مناطق با تراکم کمتر چاه قرار گرفته‌اند، باشد. فرونشست‌های واقع در لایه لیتولوژی نشان داد که کل فرونشست‌های موجود در سطح آبخوان دشت در مناطق فلات رسی، ورقه‌های شن و ماسه و تراس‌های قدیمی مشاهده می‌شوند. این نتایج نشان‌دهنده اثرات واحدهای مختلف لیتولوژی و اهمیت این شاخص در بحث فرونشست زمین است که در راستای تحقیقات رحمتی و همکاران (۲۰۱۹a) و تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) به‌عنوان یک شاخص مهم و تأثیرگذار است. بر اساس لایه فاصله از آبراهه‌ها، تعداد ۶۵ فرونشست در فاصله ۰ تا ۶۰۰ متر مشاهده شد. در فواصل مختلف آبراهه،

1 Kumar

2 Nguyen

فرونشست‌هایی مشاهده شده است که نشان از اهمیت پایین این شاخص و تأثیرگذاری کم آن روی فرونشست است که با تحقیقات **مختاری و همکاران (۱۳۹۸)** و **رحمتی و همکاران (۲۰۱۹)** در یک راستاست. لایه فاصله از جاده‌ها نشان داد که بیشترین میزان وقوع فرونشست در فاصله بیشتر از ۸۰۰ متر رخ داده است و نشان‌دهنده اهمیت پایین این شاخص بر روی فرونشست زمین است که در تحقیقات **محمدی و همکاران (۲۰۱۹)** به آن تأکید شده است. لایه فاصله از معادن نشان داد که بیشترین میزان وقوع فرونشست در فاصله بین ۴۰۰۰ الی ۸۰۰۰ متر رخ داده است. لازم به ذکر است که در همه فاصله‌ها از معادن موجود، فرونشست‌هایی مشاهده شده است که نشان‌دهنده اثر پایین این شاخص در دشت کاشان است.

همچنین نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌های دو متغیره بر اساس داده‌های اعتبارسنجی در منطقه مطالعاتی نشان داد که روش نسبت فراوانی با مقدار AUC برابر با ۰/۸۹۸ دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. پس از آن، مدل‌های آنتروپی شانون، تابع باور شهودی و وزن‌دهی شواهد در رده‌های بعدی از نظر کارایی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در تحقیقات **پرادهان و ابوخریما (۲۰۱۴)**، مدل تابع باور شهودی نسبت به مدل نسبت فراوانی نتایج بهتری را ارائه کرده است.

سایر یافته‌ها نشان داد که مقادیر کارایی مدل‌های دو متغیره در مرحله آموزش مدل بیشتر از مرحله اعتبارسنجی است. برای تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری، نقاط فرونشست به دو دسته آموزش یا ساخت مدل و همچنین اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند. در مرحله آموزش، نقشه حساسیت‌پذیری تهیه شده بر اساس حضور نقاط فرونشست در طبقات عوامل به دست می‌آید، اما نقاط فرونشست مشاهداتی در مرحله اعتبارسنجی بدون هیچ دخل و تصرفی با نقشه نهایی حساسیت‌پذیری قطع داده می‌شوند. لذا این امر قابل انتظار است که دقت در مرحله آموزش بالاتر از مرحله اعتبارسنجی باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنمای مناسب برای برنامه‌ریزان و مدیران در طرح‌ریزی و اجرای برنامه‌های مختلف برای کاهش خطرات مرتبط با وقوع خطر فرونشست زمین استفاده شود.

کتابنامه

- اکبری، محمود؛ ۱۴۰۰. پایش فرونشست زمین تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب با روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: شهر اراک). نشریه حفاظت منابع آب و خاک. دوره ۱۰. شماره ۳. ۱۱۵-۱۳۱.
DOI: 20.1001.1.22517480.1400.10.3.8.7
- تیموری، مهدی، اسدی نیلوان، امید، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: استان لرستان). نشریه هیدروژئومورفولوژی. دوره ۶. شماره ۲۱. ۱۷۹-۱۵۵.
DOI: 20.1001.1.23833254.1398.6.21.8.3

جانباز فوتمی، مهدیه، خلقی، مجید، عبده کلاهچی، عبدالنبی، روستایی، مه آسا؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین. نشریه تحقیقات منابع آب/ایران. دوره ۱۶. شماره ۳. ۱۳۳-۱۴۷.

DOI: 20.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8

ذبیحی، محسن، پورقاسمی، حمیدرضا، بهزادفر، مرتضی، ۱۳۹۴. تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد. نشریه اکوهیدرولوژی. دوره ۲. شماره ۲. ۲۲۱-۲۳۲.

DOI: 10.22059/ije.2015.56242

رضوی ترمه، سیدوحید؛ شیرانی، کوروش؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و روش تصمیم‌گیری تاپسیس (مطالعه موردی: حوزه فهلان، فارس). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. سال ۹. شماره ۴. ۱۱۹-۱۳۸.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_663411.html

رنجبر، محسن؛ جعفری، نسرين؛ ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد. فصل‌نامه علمی جغرافیا. دوره ۶. شماره ۱۸ و ۱۹. ۱۵۶-۱۶۶.

https://mag.iga.ir/article_253531.html

صابرچناری، کاظم، بهره‌مند، عبدالرضا، بردی شیخ، واحد، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی خطر پتانسیل وقوع فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری (دمپستر-شفر، رگرسیون، نسبت فراوانی و فاکتور خطر) در حوزه آبخیز قرناوه استان گلستان. رساله دکتری تخصصی (ph.D). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/84f0a8feb4d54cc1ff0f4f7332ca73af>

عرفانیان، مهدی؛ فرج‌الهی، هانا؛ سوری، مهشید؛ شیرزادی، عطاالله؛ ۱۳۹۵. مقایسه کارایی روش‌های وزن‌دهی شواهد، رگرسیون لجستیک و نسبت فراوانی در تهیه نقشه پتانسیل چشمه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز چهل‌گری، استان کردستان. نشریه علوم آب و خاک. جلد ۲۰. شماره ۷۵. ۵۹-۷۲.

DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.75.59

علیخانی، حمید، شهابی، هیمن، محمدی، ایوب؛ ۱۴۰۰. شناسایی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های جاده کوهستانی سندج-مریوان با استفاده از داده‌های راداری و الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه کردستان.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/d98bbfa2068df583c65a9356461b0ed8>

فرامرزی، حسن، حسینی، سیدمحسن، پورقاسمی، حمیدرضا، فرنقی، مهدی، ۱۳۹۹. ارزیابی مخاطرات محیطی پارک ملی گلستان با استفاده از مدل‌های عامل مبنا و تکنیک‌های یادگیری ماشین. رساله دکتری تخصصی (ph.D). دانشگاه تربیت مدرس.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9a0a14ef1b472a2371e48267b3c99dc8>

قاضی‌فرد، اکبر؛ مصلحی، علی؛ صفایی، همایون؛ ۱۳۹۰. بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت کاشان و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. طرح پژوهشی دانشگاه اصفهان. کارفرما: شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان. ۲۸۳ ص.

<https://civilica.com/doc/1273992/>

قره‌چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلیان، سعید؛ گنجی، کامران؛ ۱۴۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد). نشریه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۱۲. شماره ۳ (پیاپی ۴۴). ۱۱-۱۴.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_680336.html

کیانی، فاطمه، عابدینی، موسی، احمدزاده، غلامرضا، ۱۳۹۶. بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS، سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر، معماری و مدیریت شهری، تهران.

<https://civilica.com/doc/688569>

محبی تفرشی، غزاله، نخعی، محمد، لک، راضیه، ۱۳۹۹. ارزیابی تأثیر خصوصیات هیدروژئولوژی دشت ورامین بر فرونشست با تکیه بر مدل‌های ریاضی. رساله دکتری تخصصی (Ph.D). دانشگاه خوارزمی.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/19268aee160b125f829a7e106b9ed95a>

محمودی‌دهشتران، سیماء؛ حجت، آزاده؛ رنجبر، حجت‌الله؛ کریمی نسب، سعید؛ ۱۳۹۵. تعیین محدوده‌های در معرض نشست حاصل از وجود قنات‌های پنهان در محدوده دانشگاه شهید باهنر کرمان با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز. دوره ۶. شماره ۱۹. ۷۵-۸۱.

DOI: 10.22055/aag.2016.12146

مختاری، داود؛ ابراهیمی، حمید؛ سلمان، سعید؛ ۱۳۹۸. مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج). مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. دوره ۱۰. شماره ۳. ۹۳-۱۰۵.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_668475.html

مرادی، آیدین؛ عمادالدین، حسین؛ آرخی، صالح؛ رضائی، خلیل؛ ۱۳۹۹. تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران). نشریه

DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.11

تحلیل فضایی و مخاطرات محیطی. دوره ۷. شماره ۱. ۱۵۳-۱۷۶.

مصلحی بهارانچی، علی؛ قاضی‌فرد، اکبر؛ روستایی، مه‌آسا؛ صفایی، همایون؛ ۱۳۹۰. بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت کاشان و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/f041a3827a466e058f615c3776591df9>

دانشگاه اصفهان. میرزاوند، محمد؛ قاسمیه، هدی؛ ساداتی‌نژاد، سیدجواد؛ باقری، رحیم؛ کلارک، ایان‌داگلاس؛ ۱۳۹۷. تعیین منشأ و مکانیسم شور شدن آب‌های زیرزمینی دشت کاشان با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی. رساله دکتری. رشته علوم و مهندسی آب‌خیزداری. دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین. دانشگاه

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/e777f2a890e83d0882316cfb1f1e1778>

کاشان. نادری، کیوان؛ ندیری، عطاالله؛ اصغری مقدم، اصغر؛ کرد، مهدی؛ ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست، مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس. فصلنامه اکوهیدرولوژی. دوره ۵. شماره ۱. ۸۵-

DOI: 10.22059/ije.2017.233252.601

- Abdollahi, S., Pourghasemi, H.R., Ghanbarian, G., Safaeian, R., 2019. 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(3): 4017–4034. DOI: 10.1007/s10064-018-1403-6.
- Al-Abadi, A., Al-Temmeme, A., Al-Ghanimy, A., 2016. A GIS-based combining of frequency ratio and index of entropy approaches for mapping groundwater availability zones at Badra–Al Al-Gharbi–Teeb areas, Iraq, *Sustain. Water Resources Management*, 2(3): 265–283. DOI:10.1007/s40899-016-0056-5.
- Ashraf, H., Cawood, F., 2015. Geospatial subsidence hazard modelling at Sterkfontein Caves. *South African Journal of Geomatics*. 4 (3): 273–284. DOI: 10.4314/sajg.v4i3.8.
- Dehghani, M., Rastegarfar, M., Ashrafi, R., Ghazipour, N., Khorramrooz, H., 2014. Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain. *American Journal of Environmental Engineering*. 4 (2): 32–40. DOI: 10.5923/j.ajee.20140402.03.
- Dempster, A.P., 1967. Upper and lower probabilities induced by a multi valued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*. 38: 325–339. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177698950>.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distribution*. 17(1): 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>.
- Galloway, D.L., Burbey, Th.J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>.
- Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Aryal, J., Gholaminia, K., 2018. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping. *Journal of Spatial Science*. 65 (3): 401–418. <https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1505564>.
- Kaitantzian, A., Loupasakis, C., Rozos, D.E., 2014. Assessment of geo-hazards triggered by both natural events and human activities in rapidly urbanized areas. *Engineering Geology for Society and Territory*, 5: 675–679. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_131.
- Kumar, H., HassanSyed, T., Amelung, F., Agrawal, R., Venkate, A.S., 2020. Space-time evolution of land subsidence in the National Capital Region of India using ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data: Evidence for groundwater overexploitation. *Journal of Hydrology*. 605: 127329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127329>.
- Lee, S., 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators' landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*. 52(4): 615–623. DOI: 10.1007/s00254-006-0491-y.
- Liang, Y., Gu, K., Shi, B., Liu, S., Wu, J., Lu, Y., Inyang, H., 2022. Estimation of land subsidence potential via distributed fiber optic sensing. *Engineering Geology*. 298: 106540. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106540>.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Amiri, M., 2019. Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm. *Environment Earth Science*. 78 (16): 503. DOI: 10.1007/s12665-019-8518-3.
- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., Rezaei, A., 2014. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Journal of Earth Sciences*. 8(1): 171–186. DOI: 10.1007/s12145-014-0145-7.
- Nguyen, M., Lin, Y.N., Tran, Q.C., Ni, Ch., Chan, Y., Tseng, K., Chang, Ch., 2022. Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam. *Engineering Geology*. 299: 106555. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106555.
- Ozdemir, A., Altural, T., 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW

- Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 64: 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014>.
- Park, N.W., 2010. Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis. *Environmental Earth Science*. 62(2): 367-376. DOI: 10.1007/s12665-010-0531-5
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*. 190(3-4): 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Pourghasemi, H.R., Mohammady, M., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*. 97: 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005>.
- Pradhan P, Abokharima, M.H. Jebur, M.N. Shafapour Tehrany, M. 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta valley (Malaysia) using the Evidential Belief Function Model in GIS. *Natural Hazards*, 73 (2): 1019-1042. DOI:10.1007/s11069-014-1128-1.
- Pradhan, B., Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*. 25(6): 747-759. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016>.
- Rahmati, O., Falah, F., Naghibi, S.A., Biggs, T., Soltani, M., Deo, R.C., Cerda, A., Mohammadi, F., Tien Bui, D., 2019a. Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*. 672: 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.496>.
- Rahmati, O., Golkarian, A., Biggs, T., Keesstra, S., Mohammadi, F., Daliakopoulos, I.N., 2019b. Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities. *Journal of Environmental Management*. 236: 466-480. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.020>.
- Shafapour Tehrany, M., Shabani, F., Neamah Jebur, M., Hong, H., Chen, W., Xie, X., 2017. GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 8 (2): 1538-1561. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1362038>.
- Shafer, G.A., 1976. *Mathematical theory of evidence*. Princeton University Press. ISBN 0-608-02508-9. p. 314. <https://www.jstor.org/stable/j.ctv10vm1qb>.
- Shi, X., Jiang, S., Xu, H., Jiang, F., He, Z., Wu, J., 2016. The effects of artificial recharge of groundwater on controlling land subsidence and its influence on groundwater quality and aquifer energy storage in Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*. 75(3): 1-18. DOI: 10.1007/s12665-015-5019-x.
- Sun, J., Guo, E., Yang, X., Kong, Y., Yang, L., Liu, H., Lin, X., 2023. Seasonal and spatial variations in soil biochemical properties in areas with different degrees of mining subsidence in Central China. *CATENA*. 224: 106984. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106984>.
- Tien Bui, D.T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., Khosravi, Kh., Panahi, M., Ahmad, B.B., Lee, S., 2018. Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using Machine Learning Algorithms. *Sensors*. 18(8): 2464. DOI: 10.3390/s18082464.
- Tweed, S.O., Leblanc, M., Webb, J.A., Lubczynski, M.W., 2007. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*. 15(1): 75-96. DOI:10.1007/s10040-006-0129-x.
- Ty, T.V., Minh, H.V.T., Ram Avtar, R., Kumar, P., Hiep, H.V., Kurasaki, M., 2021. Spatiotemporal variations in groundwater levels and the impact on land subsidence in CanTho, Vietnam. *Groundwater for Sustainable Development*. 15: 100680. <https://doi.org/10.1016/>

[j.gsd.2021.100680](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100680).

- Yu, H., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Gao, M., 2020. Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model. *Science of The Total Environment*. 738: 139405. [https:// doi.org/ 10.1016/ j.scitotenv. 2020.139405](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139405).
- Zamanirad, M., Sarraf, A., Sedghi, H., Saremi, A., Rezaee, P., 2020. Modeling the Influence of Groundwater Exploitation on Land Subsidence Susceptibility Using Machine Learning Algorithms. *Natural Resources Research*. 29(2): 1127-1141. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09490-9>.
- Zhou, Y., Li, W., 2011. A Review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*. 2(2): 205-214. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.03.003.
- Zhu, L., Zhua, L., Gonga, H., Chen, Y., Wang, Sh., Ke, Y., Guo, G., Li, X., Chen, B., Wang, H., Teatini, P., 2020. Effects of water diversion project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China. *Engineering Geology*. 276: 105763. DOI: 10.1016/ j.enggeo. 2020.105763.



Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City)

Seyed Reza Hosseinzadeh^{a*}, Ebrahim Akbari^b, Mahdi Javanshiri^c, Zinat Mohammadpour Sangani^d

^a Associate Professor in Geomorphology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b MA in Remote Sensing and Geographic Information System, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^c Postdoctoral Researcher in Geography and Rural Planning, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^d MA in Remote Sensing, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 5 February 2022 Revised: 15 June 2022 Accepted: 19 July 2022

Abstract

Land subsidence is one of the most important geomorphic hazards that has a slow motion but destructive effects in the long run. For the spatial analysis of the amount of displacement, the data on changes of the ground surface from Sentinel A1 for a period of 3 years (2017-2020) through the radar interferometric method and SNAP software were used. Field observations were also made to evaluate the research results. The results showed that the rate of land subsidence has increased from 2017 to 2020, from 2.6 cm in 2017 to 7.8 cm in 2020. Moreover, the groundwater hydrograph in the central plain of Ghaen has significantly decreased, so that the rate of water level drop in the plain level has been about 1.30 meters during 5 years (from 2014 to March 2020), i.e., about 26 cm per year. In addition, the analysis of spatial autocorrelation and Moran index (0.984) confirmed the clustering of subsidence event under the influence of water level changes in the study area. The correlation results also showed that there was a small correlation between the factor “changes in water level” and “land subsidence rate” ($p = -0.138$), which is an indirect relationship, i.e., the higher the groundwater abstraction (or the lower the water level), the higher the amount of subsidence. But due to the level of significance ($\text{sig} = 0.585$) this relationship is not significant.

Keywords: Geomorphic, Groundwater Level, Interferometry SNAP, Ghaen

*. Corresponding author: Seyed Reza Hosseinzadeh E-mail: srhosszadeh@um.ac.ir Tel: + 989153117325

How to cite this Article: Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 99-125.

DOI:10.22067/geoh.2022.75138.1169



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant
With open access mandates, by publishing its articles under Creative
Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>



<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169>



جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهارم و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۹۹-۱۲۵

مقاله پژوهشی

ویژه نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری

(مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین)

سیدرضا حسین زاده^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

ابراهیم اکبری - کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مهدی جوانشیری - پژوهشگر پساکتری جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

زینت محمدپور سنگانی - کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشگاه تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۲۸

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم ژئومورفیک است که دارای حرکتی کند بوده و در بلندمدت آثار مخربی برجای می‌گذارد. در این تحقیق به منظور تحلیل فضایی میزان جابجایی از داده‌های سنتینل A1 در بازه زمانی ۳ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۷) و روش تداخل سنجی راداری و نرم افزار (SNAP)، تغییرات سطح زمین را در بازه زمانی مذکور استخراج کرده‌ایم. همچنین مشاهدات میدانی برای صحت سنجی و بررسی نتایج تحقیق صورت گرفت. نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به طوری که از ۲٫۶ سانتی متر در سال ۲۰۱۷ به ۷٫۸ سانتی متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همچنین هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قاین نیز افت محسوسی داشته است؛ به طوری که میزان افت تراز آب در سطح دشت حدود ۱٫۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۲۰۱۴ تا مارس ۲۰۲۰) بوده است؛ یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم. ضمن اینکه

Email: srhosszadeh@um.ac.ir

انویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۱۱۷۳۲۵

نحوه ارجاع به این مقاله:

حسین زاده، سیدرضا؛ اکبری، ابراهیم؛ جوانشیری، مهدی؛ محمدپورسنگانی، زینت؛ ۱۴۰۱. تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری (مورد مطالعه دشت مرکزی شهرستان قاین). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۹۹-۱۲۵
<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169>

تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران (۰,۹۸۴)، خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. نتایج همبستگی نیز نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته ($p = -0.138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود؛ اما با توجه به سطح معناداری ($\text{sig} = 0.585$) این ارتباط معنادار نیست.

کلیدواژه‌ها: ژئومورفیک، سطح تراز آب زیرزمینی، تداخل سنجی، SNAP، قاین.

۱- مقدمه

فرونشست به عنوان یکی از وقایع ژئومورفیک، شامل نشست تدریجی و یا ناگهانی سطح زمین است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و همچنین به واسطه دخالت‌های انسانی روی می‌دهد. اثرات فرونشست به شکل شکاف‌هایی بر روی سطح زمین، فرو چاله‌ها، نشست منطقه‌ای و تشدید سیلاب شدگی نمایان می‌شود (مریخ پور و همکاران، ۱۳۹۱). فرونشست طبیعی به واسطه فعالیت‌های مختلفی نظیر معدنکاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا استخراج نفت، روندی تشدید شده به خود می‌گیرد تا جایی که به یکی از مخاطرات مهم ژئومورفولوژی تبدیل می‌شود. ایران به عنوان یکی از مهم‌ترین کشورهای مواجه با فرونشست تشدید یافته در آینده‌ای نه‌چندان دور با خسارات مستقیم و غیرمستقیم جبران‌ناپذیری مواجه خواهد شد. در این بین، مناطق شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت، ساخت‌وسازها و خطوط ارتباطی مهم، در برابر فرونشست بسیار آسیب‌پذیرتر می‌باشند (چترسیماب و همکاران، ۱۴۰۱). گرچه در کوتاه‌مدت ممکن است در مناطق در حال فرونشست، خرابی به میزان گسترده مشاهده نشود و حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به راحتی قابل تشخیص نباشد، اما باین وجود در درازمدت، به طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند؛ از این رو برای تشخیص میزان فرونشست، اندازه‌گیری و پایش تغییر شکل سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مطالعات مربوط به فرونشست مهم‌ترین مراحل عبارتند از: (۱) شناسایی پهنه‌های در حال فرونشینی و نرخ فرونشست در نقاط مختلف یک منطقه؛ (۲) شناسایی عوامل وقوع فرونشست؛ (۳) ارائه راهکارهای مناسب به منظور کاهش نرخ فرونشست و سپس مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از آن (افضلی و همکاران، ۱۳۹۲؛ اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۵).

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از داده‌های GPS^۱، ترازبایی دقیق و تکنیک‌های سنجش‌ازدور به خصوص تداخل سنجی راداری^۲ استفاده می‌شود. تداخل سنجی راداری با دریچه

1 GPS (Global Positioning System)

2 Radar Interferometry

مصنوعی^۱ یکی از روش‌هایی است که در دو دهه اخیر انقلاب بزرگی در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (قابریل^۲، ۱۹۸۹). گرچه تداخل سنجی راداری اغلب به‌عنوان یک تکنولوژی جدید برای پایش دگرریختی‌های سطح زمین شناخته شده، لیکن پتانسیل کامل کارایی‌های آن به‌وسیله مجامع علمی به‌طور دقیق مشخص نشده و نتایج حاصل از این روش متعدد و پیچیده است (فررتی^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). تکنیک تداخل سنجی راداری با داشتن ویژگی‌هایی همچون پوشش زمینی پیوسته و قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش‌ازدور در بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (روت و رقتل^۴، ۲۰۰۶). در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویری که در زمان‌های مختلف از یک منطقه برداشت شده‌اند، پیکسل به پیکسل مقایسه و سپس از هم کم می‌شود (فررتی و همکاران، ۲۰۰۷).

در حال حاضر این روش در میان سایر روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم، به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (محمدی منش^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین تا حد زیادی پی‌جویی فرونشست زمین در مناطق شهری را تسهیل کرده است (کاستلازی^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). ازجمله مزایای دیگر این روش می‌توان به پوشش وسیع، نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون‌به‌صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی و دسترسی به آن با دقتی معادل با دقت اندازه‌گیری‌های سیستم مکان‌یابی جهانی و ترازایی دقیق اشاره کرد. اولین تلاش‌ها برای نقشه‌برداری از فرونشست زمین در مساحت‌های بسیار بزرگ و در دوره‌های زمانی طولانی در چین صورت گرفته است (ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه که فرونشست زمین در منطقه پکن-تیانجین-هبی طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته سه مجموعه داده SAR از چهار ماهواره شامل تصاویر ERS-1/2 SAR از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰، تصاویر ASAR از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و تصاویر RADARSAT-2 از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت با بیش از ۱۲۰ اندازه‌گیری، سه نقشه از میزان فرونشست مربوط به سه دوره در منطقه مذکور تولید شد، که میزان فرونشست ۸٫۷ میلی‌متر در سال (طی دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۲)، ۴٫۷ میلی‌متر در سال (۲۰۱۰-۲۰۰۲) و ۵٫۴ میلی‌متر در سال (۲۰۱۲-۲۰۱۴) به دست آمد. فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی در منطقه شهری پکن با استفاده از تداخل سنجی راداری گ، مقدار فرونشست تا بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در سال را در مناطق شرقی این شهر تأیید می‌نماید (چن^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه، از تکنیک Small Baseline InSAR برای پردازش تصاویر

1 SAR Interferometry

2 Gabriel

3 Ferretti

4 Rott, and Nagler

5 Mohammadimanesh

6 Castellazzi

7 Zhang

8 Chen

Envisat ASAR به دست آمده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و تصاویر ماهواره‌ای TerraSAR-X جمع‌آوری شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ برای بررسی فرونشست زمین استفاده شده است. علاوه بر این، بین نقشه‌های نرخ فرونشست اینسار که از دو مجموعه داده مختلف (به عنوان مثال، Envisat و TerraSAR-X) حاصل می‌شود، همبستگی بالایی مشاهده شد.

شارما و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای بر جزیره شرمین واقع در دلتای ساکرامنتو - سان واکین که یک منطقه غیر شهری با تغییرات کم زمانی است، نتایج حاصل از کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری برای اندازه‌گیری فرونشست آن منطقه را با استفاده از اطلاعات باندها L با طول موج ۲۳٫۰۸ سانتی‌متر ماهواره UAVSAR انجام دادند. در این مطالعه از داده‌های جمع‌آوری‌شده از ژانویه ۲۰۰۹ تا اوت ۲۰۱۴ برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی فرونشست جزیره شرمین استفاده شد و نرخ فرونشست به صورت مقادیر متغیر بین ۰-۵ سانتی‌متر در سراسر محدوده به دست آورده شد. همچنین میانگین نرخ فرونشست منطقه تا حدود 0.2 ± 1.3 سانتی‌متر برآورد شد. نتایج این مطالعه نشان داد که چندین عامل از جمله نوع خاک، عمق آب زیرزمینی، نوع کاربری زمین‌ها و ارتفاع زمین بر فرونشست منطقه مؤثر است (شارما^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات در نواحی مختلف ایران نشان می‌دهد در بیشتر دشت‌ها پدیده فرونشست در چند دهه اخیر فزونی یافته است. نرخ فرونشست در دشت اردبیل حدود ۸۰ تا ۱۵۴ میلی‌متر در سال محاسبه شده است (خلیفی و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه دیگری با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، بیشینه دامنه فرونشست دشت قزوین حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال ذکر گردیده است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

احمدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به مطالعه فرونشست دشت خرمرده با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن پرداختند. برای این منظور از تصاویر ماهواره ENVISAT اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ و تصاویر Sentinel S ۱ اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۱۴ استفاده شد. میدان جابجایی، بیانگر پیشینه تغییر شکل برابر با ۳۵ میلی‌متر بر سال، در راستای دور شدن از ماهواره را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از فرونشست با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) با لایه‌های کاربری اراضی نیز چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده بالا بودن تراکم کاربری اراضی کشاورزی و نیز چاه‌های بهره‌برداری در منطقه است. همچنین با استفاده از تحلیل‌های مکانی، مخاطرات احتمالی فرونشست در منطقه مورد مطالعه نیز، بیانگر تأثیرپذیری قسمتی از مسیر خطوط راه‌آهن، راه‌های اصلی و بزرگراه از فرونشست است.

تورانی و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری دریافتند که در دوره زمانی بین بهمن ۱۳۸۵ تا آذر ۱۳۸۸ محدوده شمال گرگان متحمل فرونشست شده است. این محدوده تقریباً روند شرقی - غربی دارد و میزان فرونشست در آن چیزی حدود ۴/۸ سانتی‌متر محاسبه شد. نمودارهای تراز

سطح آب و میزان بارندگی گرگان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ علیرغم نوسانات فصلی روند نزولی نشان می‌دهند. پیامد این افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند منجر به فرونشست زمین در شهر گرگان شده باشد.

مهرابی (۱۳۹۷) در پژوهشی به شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار پرداخت. بدین منظور از تصاویر راداری ایسار (ASAR) مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ و سنتینل-۱ (Sentinel-1) مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ استفاده شد. جهت تعیین میزان تغییرات پوسته زمین ضمن انجام فرایند واپیچش فاز بر روی تصاویر، تداخل نگاشت هر یک از تصاویر استخراج شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل تصاویر ایسار نرخ رشد گنبد نمکی مذکور بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ به میزان ۱,۶ سانتی‌متر در سال بوده است. طبق تصاویر تداخل نگاشت به دست آمده از تصاویر سنتینل-۱ سرعت صعود این گنبد نمکی در بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ افزایش داشته است و به ۲,۹ سانتی‌متر در سال رسیده است. نتایج تحقیق نشان داد که گنبد نمکی احتمالی فعال است.

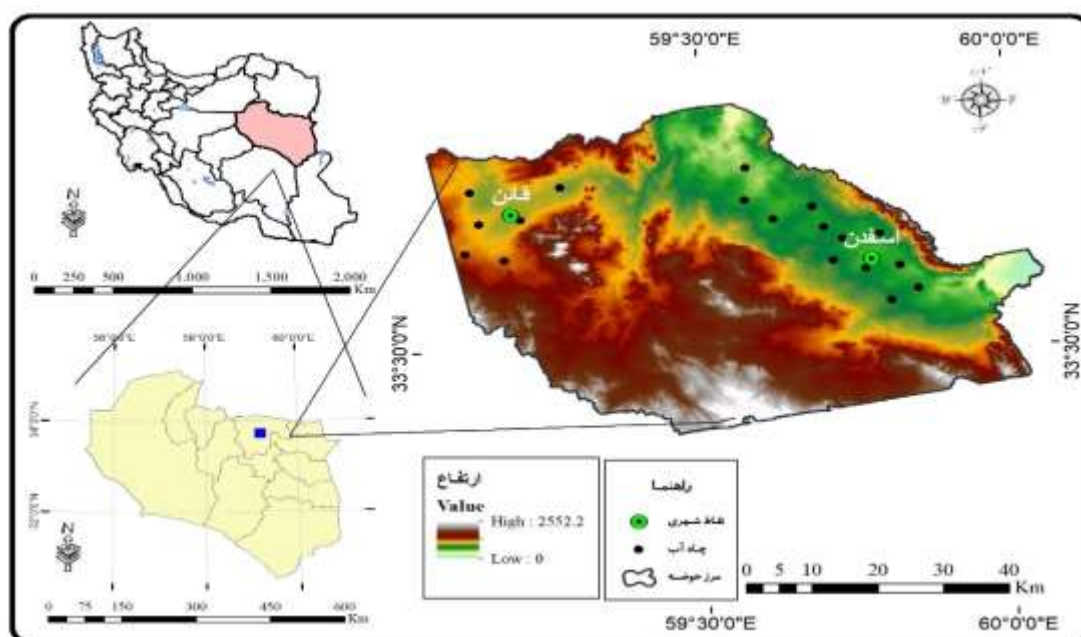
مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی پرداختند. در این مقاله یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفت. نتایج، جابجایی سالانه ۱۱ سانتی‌متری در جنوب منطقه مورد مطالعه را نشان داد، اما جابجایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. ارزیابی نسبی نتایج در منطقه اول با استفاده از داده‌های مسیر پایین‌گذر ۳۱ انجام گرفت که با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۷۹ و ۳۱، نواحی مذکور جابجایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد. همچنین، جابجایی قائم با استفاده از دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر برای منطقه مطالعاتی دوم برآورد گردید که با بهره‌گیری از داده‌های یک ایستگاه GPS صحت سنجی شد.

آروین و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری Sentinel-1 سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب پرداختند. نتایج پردازش‌های انجام‌شده بر روی این تصاویر نشان داد که در دوره مطالعاتی، حدود ۱۳ سانتی‌متر فرونشست داشته است. بعد از صحت‌سنجی پهنه‌بندی انجام‌شده با واقعیت‌های زمینی (شهریور ۱۳۹۷)، به‌منظور تشخیص رابطه فرونشست با میزان تغییرات و افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع سطح زمین و شیب، تحلیل‌های فضایی انجام و میزان همبستگی هر یک از فاکتورهای مذکور با تراکم رخداد فرونشست محاسبه گردید. به نظر می‌رسد از مجموع ۶۰۰ دشت کشور، بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست باشند. اگر زمانی این پدیده تنها در برخی استان‌ها مانند کرمان و یزد به وقوع می‌پیوست امروزه این پدیده در دشت‌ها و شهرهایی نظیر مشهد،

تهران، کاشمر، کاشان، خراسان جنوبی و ... روی داده است (شریفی کیا، ۱۳۹۰: ۵۸) این مطالعه سعی در تهیه نقشه پهنه‌بندی و بررسی نرخ فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در دشت مرکزی شهرستان قائنات دارد که برای انجام آن، از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنتینل A۱ در نرم‌افزار (SNAP) استفاده شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت مرکزی قائنات در یک حوضه آبریز بسته بین ۵۹ درجه و ۳ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). دشت قائنات یک دشت بسته آبرفتی بوده که توسط رسوبات دوران چهارم به صورت کامل پوشیده شده است. از نظر توپوگرافی سطح دشت نسبتاً ناهموار است که با یک شیب بسیار کم (۱٫۹ درصد تا ۳٫۳ درصد) به نواحی کم ارتفاع شرق دشت ختم می‌شود. حداکثر ارتفاع در کوهستان‌های منتهی به دشت ۲۵۵۲ متر در جنوب آن و حداقل آن ۸۹۰ متر در شرق دشت است. حوضه آبریز دشت مرکزی قاین در وسعتی معادل ۳۵۶۸ کیلومتر مربع دارد که از این مقدار حدود ۱۶۰۰ کیلومتر مربع مربوط به ارتفاعات و بقیه قلمرو دشت را در برمی‌گیرد. کمبود بارش سال‌های اخیر و تداوم خشکسالی در استان خراسان جنوبی به‌ویژه در شرق استان، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب شهر قاین و روستاهای محدوده مورد مطالعه را به دنبال داشته است. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، باعث افت ممتد سطح آب و در نتیجه موجب ایجاد و گسترش فرونشست در استان و به‌ویژه در منطقه مطالعاتی شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در تقسیمات سیاسی کشوری

۳- مواد و روش

۳-۱- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

روش کار در این تحقیق تحلیلی و میدانی است. در این تحقیق از داده‌های راداری که شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی یک ماه برای سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است و پس از محاسبه نرخ جابجایی سطح زمین برای منطقه مورد مطالعه به منظور بررسی بیشتر تأثیر افت تراز آب زیرزمینی بر فرونشست سعی شد که علاوه بر نوسانات تراز آب پیرومترها، پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری، میزان برداشت آب، نقشه پهنه‌بندی میزان تخلیه سالانه آب زیرزمینی نیز مورد بررسی قرار بگیرد مطالعات تداخل سنجی راداری در این تحقیق توسط ۲۴ تصویر سنتینل و به کمک نرم‌افزار SNAP انجام گرفته است. برای کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی ایتترفروگرام‌ها تا حد امکان سعی شده، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه (حدود ۹۰ روز) استفاده شود. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز می‌تواند جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی‌ها در جهات مختلف و با استفاده از ایتترفرومتری مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این تحقیق هدف پایش میزان جابجایی‌های سطح زمین است، تنها از داده‌های صعودی استفاده شده است؛ بنابراین اساس از تعداد ۲۴ تصویر مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت که در [جدول ۱](#) اطلاعات ثبت شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی تصاویر استفاده شده در تداخل سنجی راداری

Acquisition Date	Beam mode	path	Ascending/Descending	Polarization	Absolute Orbit	Frequency	Mission
2017/04/10	IW	86	Ascending	VV-HV	16083	C-Band	Sentinel-1
2017/06/09	IW	86	Ascending	VV-HV	16958	C-Band	Sentinel-1
2017/07/03	IW	86	Ascending	VV-HV	17308	C-Band	Sentinel-1
2017/09/25	IW	86	Ascending	VV-HV	18533	C-Band	Sentinel-1
2017/10/7	IW	86	Ascending	VV-HV	18708	C-Band	Sentinel-1
2017/12/30	IW	86	Ascending	VV-HV	19933	C-Band	Sentinel-1
2018/01/11	IW	86	Ascending	VV-HV	20108	C-Band	Sentinel-1
2018/03/24	IW	86	Ascending	VV-HV	21158	C-Band	Sentinel-1
2018/04/05	IW	86	Ascending	VV-HV	21333	C-Band	Sentinel-1
2018/06/28	IW	86	Ascending	VV-HV	22558	C-Band	Sentinel-1
2018/07/10	IW	86	Ascending	VV-HV	22733	C-Band	Sentinel-1
2018/09/20	IW	86	Ascending	VV-HV	23783	C-Band	Sentinel-1
2018/10/02	IW	86	Ascending	VV-HV	23958	C-Band	Sentinel-1
2018/12/25	IW	86	Ascending	VV-HV	25183	C-Band	Sentinel-1
2019/01/06	IW	86	Ascending	VV-HV	25358	C-Band	Sentinel-1
2019/03/31	IW	86	Ascending	VV-HV	26583	C-Band	Sentinel-1
2019/04/24	IW	86	Ascending	VV-HV	26933	C-Band	Sentinel-1
2019/06/23	IW	86	Ascending	VV-HV	27808	C-Band	Sentinel-1
2019/07/05	IW	86	Ascending	VV-HV	27983	C-Band	Sentinel-1
2019/09/27	IW	86	Ascending	VV-HV	29208	C-Band	Sentinel-1

Acquisition Date	Beam mode	path	Ascending/Descending	Polarization	Absolute Orbit	Frequency	Mission
2019/10/09	IW	86	Ascending	VV-HV	29383	C-Band	Sentinel-1
2019/12/20	IW	86	Ascending	VV-HV	30433	C-Band	Sentinel-1
2020/01/01	IW	86	Ascending	VV-HV	30608	C-Band	Sentinel-1
2020/01/06	IW	86	Ascending	VV-HV	31133	C-Band	Sentinel-1

۳-۲- روش تحقیق

برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار SNAP از روش تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری (In SAR) استفاده شده است. در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه گردید. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر اینترفروگرام تولید شد.

پس از تشکیل تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده شد. رابطه فاز اینترفرومتری طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} y_1 &= |y_1| \exp(i\varphi_1) \\ y_2 &= |y_2| \exp(i\varphi_2) \\ y_1 y_2 &= |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2)) \end{aligned}$$

در این رابطه؛ y_1 و y_2 سیگنال‌های دو پیکسل متناظر است که اولی تصویر اصلی (master) و دومی تصویر فرعی (slave) است. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست می‌آید که در این رابطه $|y_1| |y_2|$ دامنه $\varphi_1 - \varphi_2$ و برابر فاز اینترفروگرام است. در این رابطه، تغییر فاز به اندازه $\pi/2$ معادل جابجایی به اندازه نصف طول‌موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نشان‌دهنده یک فرینچ کامل در اینترفروگرام است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۹).

فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مؤلفه‌هایی نظیر مؤلفه مداری، توپوگرافی، جابجایی، اتمسفر و نویز است که هر یک از این پارامترها سبب تغییر فاز می‌شود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل سنجی راداری و مؤلفه‌های ذکر شده، به وسیله رابطه زیر تعیین می‌شود.

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} &+ \Delta\varphi_{\text{Deformation}} + \Delta\varphi_{\text{Atmosphere}} + \text{noise} \\ \Delta\varphi_2 &= \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{\text{Geometry}} + \Delta\varphi_{\text{Topography}} \end{aligned}$$

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می کند. این تغییرات ناشی از پدیده‌هایی نظیر فرونشست، زمین لرزه، زمین لغزش و یا حرکت گسل ها است. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می کند که از رابطه زیر تعیین می شود.

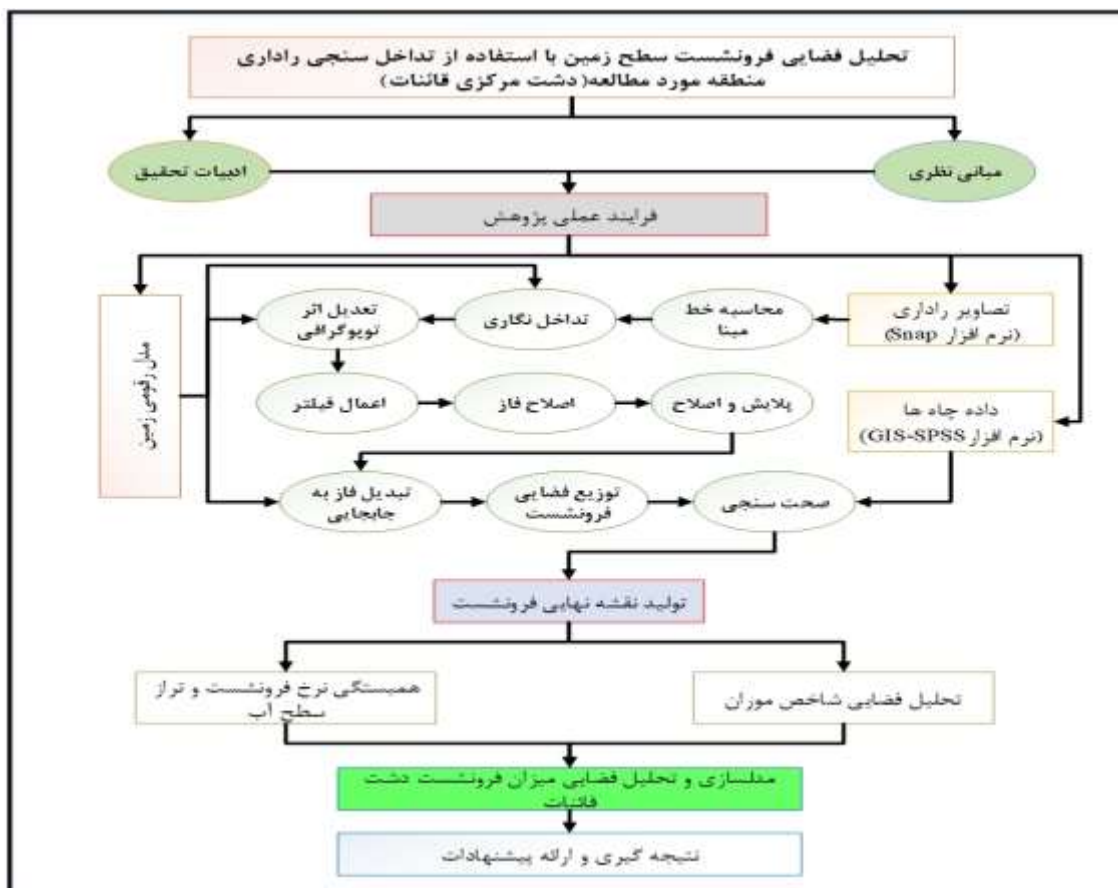
رابطه (۳)

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

در این رابطه؛ d تصویر جابجایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل است. پس از مسطح سازی ایتترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابجایی خواهد بود؛ بنابراین تداخل سنجی در این حالت مطابق رابطه زیر تعیین می شود (زندی و همکاران، ۱۳۹۹).

رابطه (۴)

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d$$



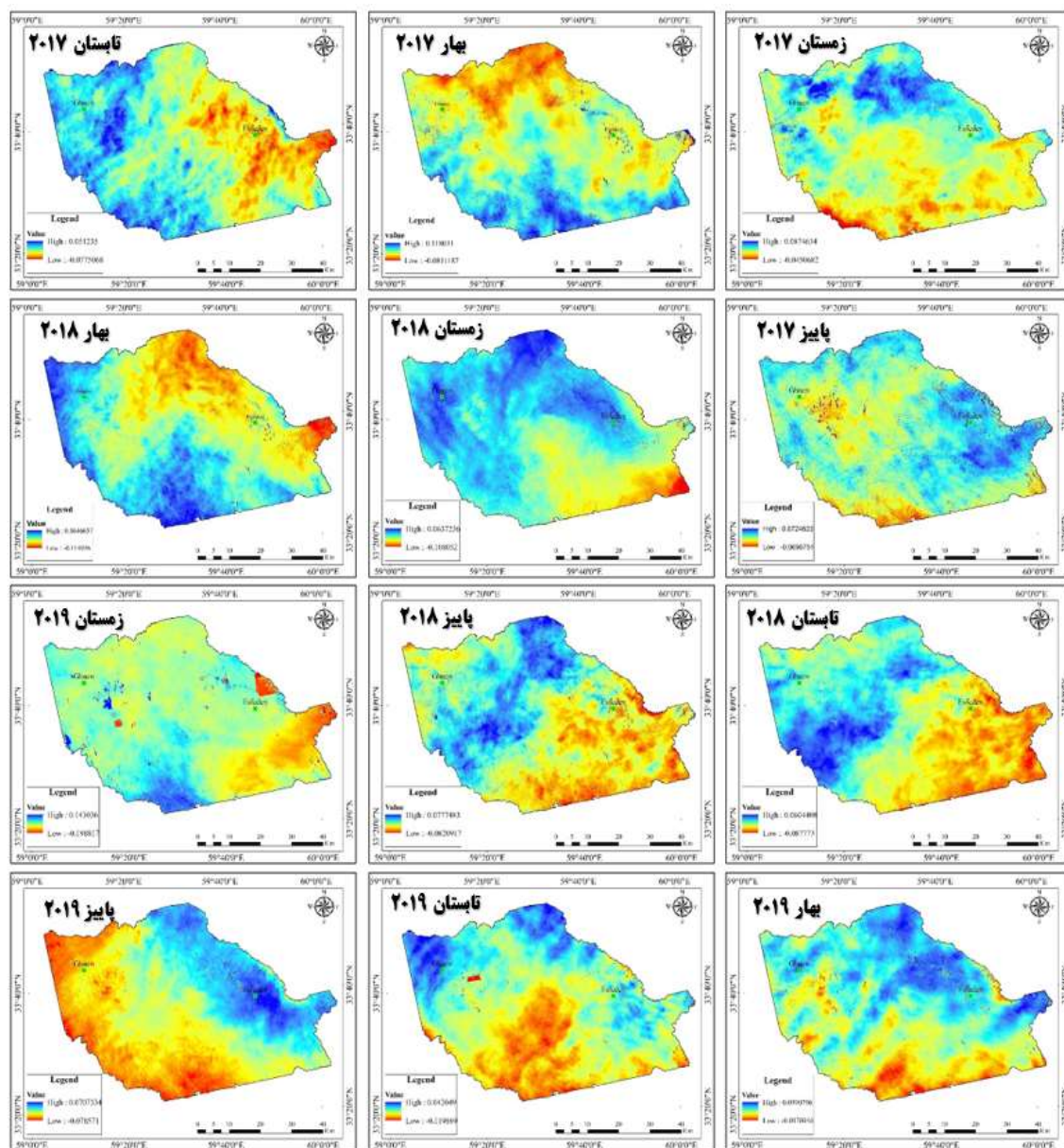
شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پایش فرونشست زمین

استخراج آب زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی به میزان فوق سبب کاهش فشار هیدرواستاتیک و خروج آب از خاک‌های سطح مخروطی دشت که مشتمل بر لایه‌های ریز و درشت است، منجر به تحکیم و کاهش حجم خاک و در نهایت رویداد نشست تدریجی زمین است؛ بنابراین علیرغم وجود علت‌های مختلف قابل مطالعه در ایجاد نشست؛ در تحلیل نمودار و نیز با تعیین افت سطح آب می‌توان صحت فرض این پژوهش را در دشت قائنات تأیید نمود. در این تحقیق با روش تداخل سنجی تفاضلی داده‌های راداری، میزان و دامنه جابجایی سطح زمین برای دشت مرکزی قائنات تبیین شده است. برای منظور تولید نقشه‌های نشان دهنده الگوی فضایی میزان و دامنه نشست از زوج تصویر سنجنده‌های راداری در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ (زمستان ۱۳۹۵ تا زمستان ۱۳۹۸) جهت انجام عملیات تداخل سنجی استفاده شده است.

بررسی الگوی فصلی فرونشست زمین در این بازه زمانی مشخص کرد که میزان فرونشست زمین در دشت مرکزی قائنات، در فصول مختلف سال و پهنه‌های مختلف، متفاوت بوده است. بر همین اساس در سال ۲۰۱۷، بیشترین میزان فرونشست (۰,۰۸۱۱ متر یا ۸ سانتی‌متر) مربوط به فصل بهار بوده که در نواحی شمالی دشت قائنات اتفاق افتاده است و کمترین میزان فرونشست مربوط به فصل زمستان است. در سال ۲۰۱۸ نیز بیشترین مقدار فرونشست در فصل بهار و برابر با ۱۱,۴ سانتی‌متر بوده که در نواحی شمالی دشت قائنات اتفاق افتاده است، اما در سایر فصول بیشترین فرونشست در نواحی جنوب غربی دشت اتفاق افتاده است. در سال ۲۰۱۹ نیز میزان فرونشست در حال افزایش است. در این سال نیز بیشترین میزان فرونشست زمستان اتفاق افتاده که برابر با ۰,۱۹۹ متر (۱۹,۹ سانتی‌متر) بوده که در نواحی جنوب شرقی دشت قائنات اتفاق افتاده است. میزان فرونشست فصل تابستان نیز بالا و برابر با ۱۱,۹ سانتی‌متر بوده که در نواحی جنوبی دشت مورد مطالعه اتفاق افتاده است.

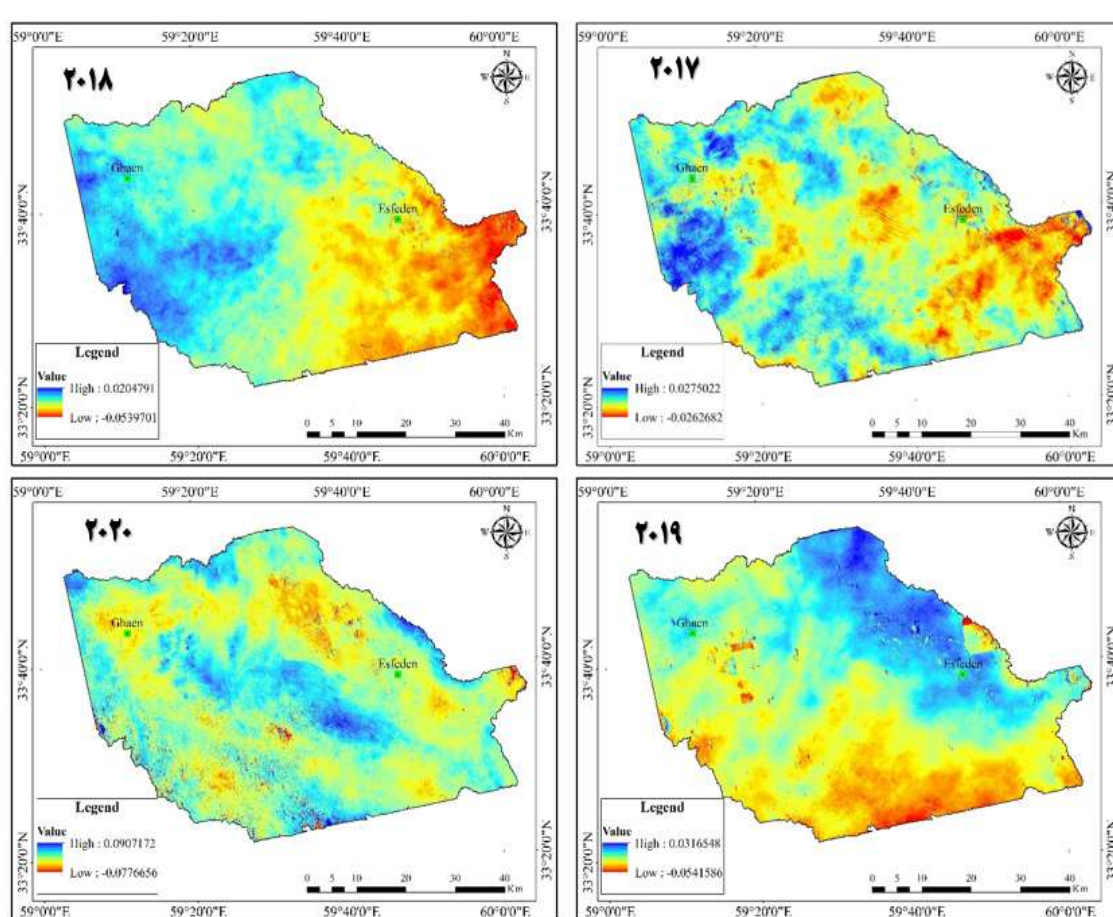


شکل ۳- الگوی فصلی فرونشست دشت مرکزی قائنات طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

در ادامه روند سالانه فرونشست دشت قائنات طی دوره مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل (۴) الگوی فرونشست برای منطقه مورد مطالعه در جهت شمال غربی-جنوب شرقی قرار دارد. طبق نقشه مورد نظر بیشترین نرخ فرونشست در بازه زمانی یک ساله برای سال ۱۳۹۷ حاصل از داده‌های Sentinel ۰,۰۰۲۶ متر (۰,۲۶)

سانتیمتر) و در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه است. همچنین میزان $0,0083$ متر ($0,83$ سانتیمتر) بالآمدگی سطح زمین در بازه زمانی مورد نظر در قسمت غرب و شمال غربی منطقه مورد مطالعه نیز برآورد شده است. مقدار فرونشست سالانه از 2017 تا 2020 در حال افزایش است که از $0,026$ متر در سال 2017 به $0,0539$ متر در سال 2018 ، $0,0542$ متر در سال 2019 و در سال 2020 به $0,078$ متر ($7,8$ سانتی متر در سال) می رسد. پهنه های در معرض فرونشست سالانه بیشتر منطبق بر نواحی جنوب شرقی دشت قائنات یعنی نهای پیرامونی شهر اسفدن است اما نواحی شمال غربی دشت و نواحی پیرامونی شهر قاین نیز با فرونشست همراه است.



شکل ۴- الگوی سالانه فرونشست دشت مرکزی قائنات در سال های 2017 تا 2020

۴-۲- شرایط هیدروژئولوژی منطقه

برای مشاهده ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه هیدروگراف های معرف آب زیرزمینی دشت مرکزی شهرستان قائنات ارائه شده است.

با توجه به وجود شواهدی مانند: (۱) بردارهای GPS و مشاهده میزان تغییر شکلی که این بردارها نمایش می‌دهند، (۲) حذف تصاویری نزدیک به تاریخ وقوع زمین‌لرزه که عامل اصلی جابه‌جایی در بازه زمانی خیلی کوتاه هستند و (۳) تطابق بیشترین نرخ فرونشست با محدوده آبخوان‌های آبرفتی، می‌توان گفت که عامل اصلی رخ دادن فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و افت شدید تراز آب است. نشست که تحت تأثیر پدیده تحکیم بر اثر خروج آب از لایه‌لای ذرات خاک‌های ریزدانه (رس و سیلت) حاصل می‌شود و وقوع آن تدریجی و تابع زمان است را نشست غیرالاستیک گویند (رحیمی، ۱۳۸۴)؛ یعنی در این حالت بر خلاف نشست الاستیک، تغییر شکل بلافاصله بعد از اعمال نیرو به وقوع نمی‌پیوندد، بلکه تدریجاً و با پیشرفت زمان رخ می‌دهد. واحدهای رسی و سیلتی به علت ریزدانه بودن، تخلخل بالا و ضریب نفوذپذیری قابل ملاحظه، نقش کلیدی در مناطق فرونشست بر عهده دارند؛ زیرا نشست حاصل از برداشت آب از این لایه‌ها غیرقابل بازگشت و دائمی خواهد بود (ون جی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳) و سبب کاهش ضریب ذخیره آبخوان و در موارد بحرانی سبب نابود شدن آبخوان برای همیشه می‌شود. چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مهم‌ترین عامل تخلیه آب از دشت‌ها هستند و از آنجاکه هر چاه، با تخلیه آب منفذی محدوده شعاعی اطراف خودش سبب کاهش فشار آب منفذی می‌شود، تعادل نیروها به هم می‌خورد و تنش مؤثر در محدوده اطراف چاه افزایش می‌یابد. برای جبران کاهش فشار آب منفذی آبخوان متراکم می‌شود و این امر به نشست غیرالاستیک در لایه‌های ریزدانه می‌انجامد. به منظور بررسی ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه، در این بخش هیدروگراف‌های معرف آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات به همراه تغییرات تراز بلندمدت آب زیرزمینی پیژومترهای مختلف ارائه خواهد شد، زیرا رفتار پیژومترها به خوبی بیانگر روند کاهش فشار آب منفذی در آبخوان است. اندازه‌گیری تراز آب، از سطح زمین تا سطح آب موجود در چاه صورت می‌گیرد و بنابراین، هرچه میزان بیشتر باشد، در حقیقت افت سطح آب چاه را نشان می‌دهد. در **شکل ۵** مشاهده می‌شود که هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قائنات افت محسوسی در طی چندین سال اخیر داشته، به طوری که عمق آب‌های زیرزمینی به میزان ۱,۳۰ متر افزایش یافته است. این مسئله بیانگر این است که میزان افت تراز آب در دشت حدود ۱,۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸) بوده است، یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم.

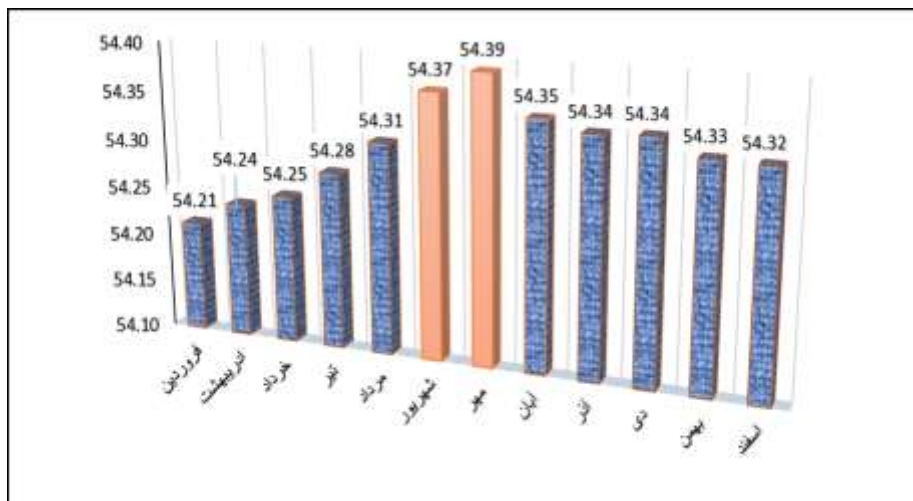
هیدروگراف واحد منطقه نیز که با استفاده از داده‌های مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای طی دوره مورد مطالعه ترسیم شده است، اگرچه چندین بالاآمدگی سطح تراز آب زیرزمینی را (از جمله در آذر ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۶) نشان می‌دهد اما روند سینوسی نمودار حکایت از کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی است. همان‌طور هم که در **شکل ۵** مشخص است روند افزایش سالانه برداشت آب تا ماه شهریور و مهر ادامه دارد و از مهرماه یا آبان که بارندگی‌ها

افزایش یافته، مجدد میزان برداشت آب با روند کاهشی روبه‌رو شده است که دلیل این امر هم می‌تواند کاهش نیاز آبی، شروع بارندگی‌های پاییز و زمستان و توقف روند برداشت آب از چاه باشد. بر اساس بررسی انجام شده طی دوره مورد مطالعه، سطح تراز آب زیرزمینی در حال افزایش است و سال ۱۳۹۸ بیشترین افزایش سطح تراز آب (افت سطح آب) را داشته است همچنین بیشترین شیب مشاهده شده مربوط به اسفند ۱۳۹۷ تا فروردین ۱۳۹۸ است.



شکل ۵- میزان برداشت آب از چاه‌های نمونه واقع در دشت مرکزی قائنات از فروردین ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸

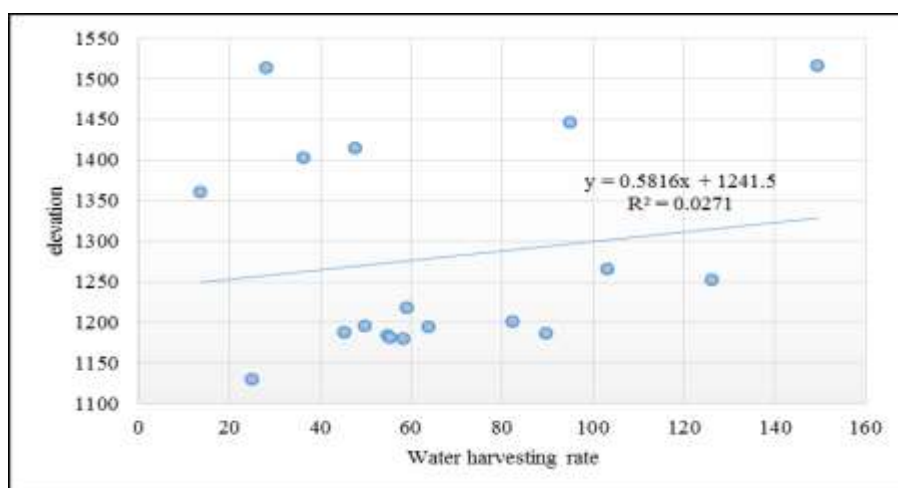
شکل ۶ روند افزایش عمق دسترسی به آب زیرزمینی برای هر ماه ارائه شده با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار روند کاهشی در ماه مهر و شهریور و کم‌ترین مقدار در ماه فروردین است. به‌طوری‌که از شکل نیز می‌توان استنباط کرد میانه شیب‌های خط روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در تمام ماه‌های سال منفی و ما بین ۰٫۲۱ تا ۰٫۳۹ متر در سال تغییر می‌کند؛ به عبارت دیگر سطح ایستابی آبخوان دشت قائنات به‌طور متوسط در طول ۶ سال بین ۰٫۲۱ در فروردین ماه و ۰٫۳۹ متر در آبان کاهش پیدا می‌کند؛ که یکی از عوامل افت سطح آب زیرزمینی را بهره‌برداری غیراصولی از چاه‌های حفر شده می‌توان معرفی کرد.



شکل ۶- روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

برای این که ملاحظه شود چه رابطه‌ای بین میزان برداشت آب و ارتفاع برقرار بوده، ضریب همبستگی بین متغیرهای مذکور مورد محاسبه قرار گرفته؛ به این ترتیب که ضریب همبستگی بین ارتفاع به عنوان متغیر مستقل و سطح برداشت آب در سطح دشت مورد مطالعه به عنوان متغیر وابسته محاسبه شده است (شکل ۷). ضریب به دست آمده بر این اساس برابر با $r=0.164$ بوده که همبستگی ضعیف و معنی داری را بین دو متغیر مذکور نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر در نواحی با ارتفاع بیشتر، افزایش سطح تراز آب زیر زمینی نیز به نسبت بیشتر بوده است.



شکل ۷- میزان همبستگی بین متغیرها (مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

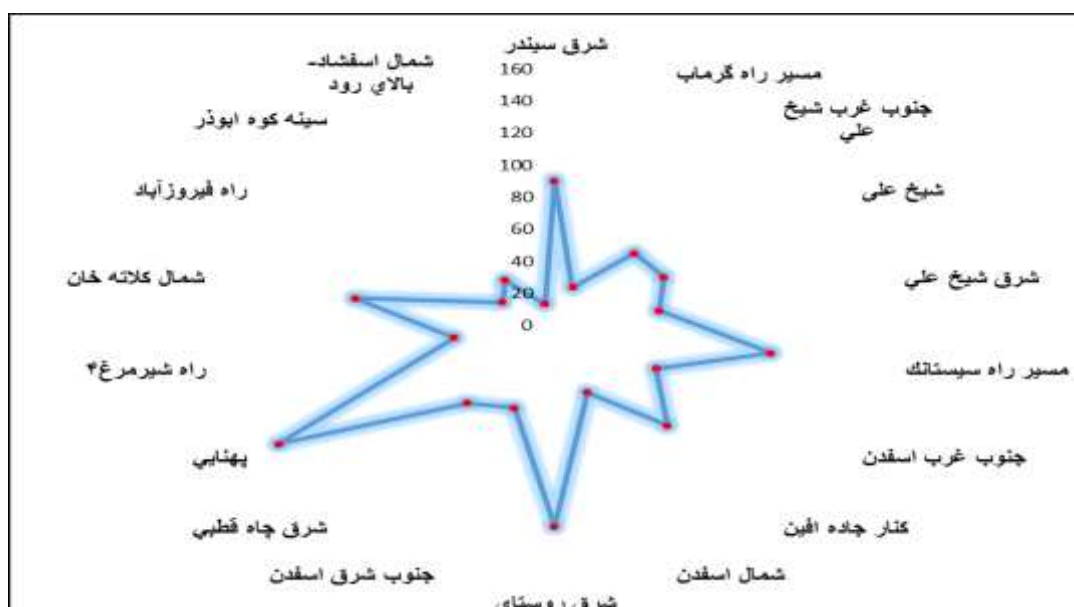
مشخصات آماری چاه‌های مورد مطالعه و میزان میانگین سالانه تراز آب در دوره آماری سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ برای چاه‌های مورد بررسی در **جدول ۲** درج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ایستگاه یا چاه پهنایی با میانگین افت سطح تراز ۱۴۹,۳۹ متر در طول دوره مورد مطالعه، شدیدترین روند منفی را داشته است که در غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده است.

جدول ۲- متوسط سطح تراز آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی چاه‌های نمونه در محدوده مورد مطالعه

چاه	۲۰۱۷				۲۰۱۸				۲۰۱۹				۲۰۲۰
	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
شرق سیندر	۸۹,۷	۸۹,۶	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷	۸۹,۷	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷	۸۹,۷	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷
مسیر راه گرماب	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹
جنوب غرب شیخ علی	۵۸	۵۸	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۳	۵۸,۲	۵۸,۲
شیخ علی	۵۸,۹	۵۸,۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹,۱	۵۹	۵۹	۵۹,۱	۵۹,۱	۵۹
شرق شیخ علی	۴۹,۵	۴۹,۶	۴۹,۶	۴۹,۷	۴۹,۷	۴۹,۸	۴۹,۸	۴۹,۹	۴۹,۹	۵۰	۵۰	۴۹,۹	۴۹,۹
مسیر راه سیستانک	۱۰۲,۷	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۹	۱۰۲,۹	۱۰۳	۱۰۳	۱۰۳,۱	۱۰۳,۲	۱۰۳,۲	۱۰۳,۳	۱۰۳,۱	۱۰۳,۲
جنوب غرب اسفدن	۵۴,۶	۵۴,۶	۵۴,۷	۵۴,۷	۵۴,۸	۵۴,۸	۵۴,۹	۵۵	۵۵	۵۵,۱	۵۵,۱	۵۵	۵۵
کنار جاده افین	۸۲	۸۲	۸۲,۱	۸۲,۲	۸۲,۲	۸۲,۳	۸۲,۴	۸۲,۴	۸۲,۴	۸۲,۵	۸۲,۶	۸۲,۵	۸۲,۴
شمال اسفدن	۴۴,۶	۴۴,۶	۴۴,۸	۴۵	۴۴,۹	۴۵	۴۵,۲	۴۵,۳	۴۵,۳	۴۵,۴	۴۵,۷	۴۵,۴	۴۵,۳
شرق روستای خطیبی	۱۲۵,۹	۱۲۵,۹	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱
جنوب شرق اسفدن	۵۴,۹	۵۴,۹	۵۵,۲	۵۵,۲	۵۵,۱	۵۵,۲	۵۵,۳	۵۵,۴	۵۵,۲	۵۵,۵	۵۵,۷	۵۵,۵	۵۵,۲
شرق چاه قطبی	۶۳,۴	۶۳,۴	۶۳,۶	۶۳,۷	۶۳,۷	۶۳,۷	۶۳,۸	۶۳,۹	۶۳,۹	۶۳,۹	۶۴,۱	۶۳,۹	۶۳,۹
پهنایی	۱۴۷,۳	۱۴۷,۶	۱۴۸,۴	۱۴۸,۹	۱۴۹	۱۴۹,۲	۱۴۹,۷	۱۵۰,۲	۱۴۹,۸	۱۵۰	۱۵۰,۸	۱۵۰,۳	۱۴۹,۸
راه شیر مرغ ۴	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۶	۴۷,۶	۴۷,۶	۴۷,۵	۴۷,۶	۴۷,۵	۴۷,۶	۴۷,۵
شمال کلاته خان	۹۴,۹	۹۴,۹	۹۴,۹	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵,۱	۹۵,۱	۹۵,۱	۹۵,۲	۹۵,۱	۹۵,۱
راه فیروزآباد	۲۸,۲	۲۷,۷	۲۸,۳	۲۸,۴	۲۸,۱	۲۸,۱	۲۸,۴	۲۸,۵	۲۷,۹	۲۷,۵	۲۷,۸	۲۸,۴	۲۷,۹
سینه کوه ابوذر	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۹	۳۴,۱	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۸	۳۳,۶	۳۹,۳	۳۹,۲	۳۹,۵	۳۹,۴
شمال اسفشاد	۱۴	۱۳,۵	۱۳,۸	۱۴	۱۳,۸	۱۳,۶	۱۳,۸	۱۴	۱۳,۶	۱۲,۹	۱۲,۹	۱۳,۸	۱۳,۶

مأخذ: سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی

همچنین نتایج آزمون همگنی روند تراز آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار X^2 محاسبه شده برای ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از X^2 متناظر جدول با درجه آزادی ۱۷ است؛ بنابراین، ایستگاه‌ها از نظر داشتن روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در سطح ۵٪ همگن نیست. نتایج به دست آمده در **شکل زیر** قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که چاه پهنایی، شرق روستای خطیبی و مسیر راه سیستانک بیشترین افت سطح تراز آب را داشته و چاه‌های شمال اسفند و مسیر راه گرماب کمترین میزان افت را در سطح تراز آب داشته است.



شکل ۸- مقایسه میزان افت سطح تراز آب در چاه‌های مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری نمونه‌هایی از شواهد صحرایی این فرونشست در **شکل ۹** ارائه شده است.



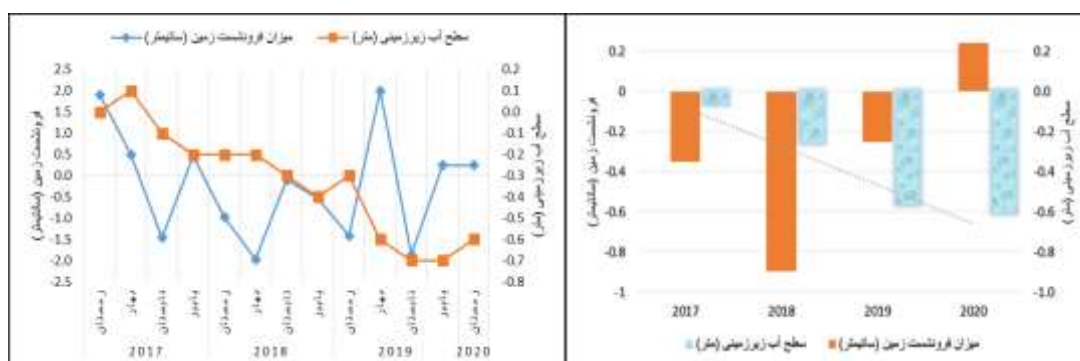
شکل ۹- مشاهدات میدانی نویسندگان از بررسی فرونشست دشت مرکزی قائنات

۴-۳- تأثیر هیدروژئولوژی منطقه بر روی فرونشست

به منظور درک بهتر تأثیر هیدروژئولوژی منطقه بر روی فرونشست، نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری به صورت نمودارهای سری زمانی ترسیم شد و با نمودارهای تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیژومترهایی که در همان نقاط قرار داشتند، مقایسه شد (شکل ۱۰). منحنی‌های آبی سطح آب زیرزمینی را بر حسب متر و منحنی‌های نارنجی نرخ میانگین فرونشست سالانه را بر حسب سانتی متر بر سال در کل منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. بر طبق این مقایسه مشاهده می‌شود که روند فرونشست، تطابق قابل ملاحظه‌ای با روند کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف داشته و در مناطقی که فرونشست بیشتری رخ داده است، بیشترین افت سطح آب زیرزمینی نیز مشاهده می‌شود؛ اما نکته قابل توجه این بوده که بیشترین میزان فرونشست در مناطقی رخ داده است که علاوه بر افت شدید تراز آب، لایه‌های ضخیم رس و سیلت با قابلیت فشردگی دائم بالا نیز وجود دارند. همچنین در برخی مناطق با وجود افت شدید تراز آب، هیچ نشست قابل ملاحظه‌ای رخ نداده است که بررسی اطلاعات دانه‌بندی لایه‌های زیرین نشان

می‌دهد در این مناطق لایه‌های ریزدانه ضخیم (رس و سیلت) وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که احتمال وقوع فرونشست در مکان‌هایی با لایه‌های ریزدانه بالاست.

نکته قابل توجه این است که از سال ۲۰۱۷ به بعد، تراز آب زیرزمینی افت شدیدی داشته که این امر با نرخ فرونشست بیشتر در منطقه همراه است. دلیل این امر به خشکسالی‌های شدید سال‌های اخیر مربوط می‌شود که منجر به افزایش تقاضا برای آب و اضافه برداشت شدید آب زیرزمینی در منطقه شده است.



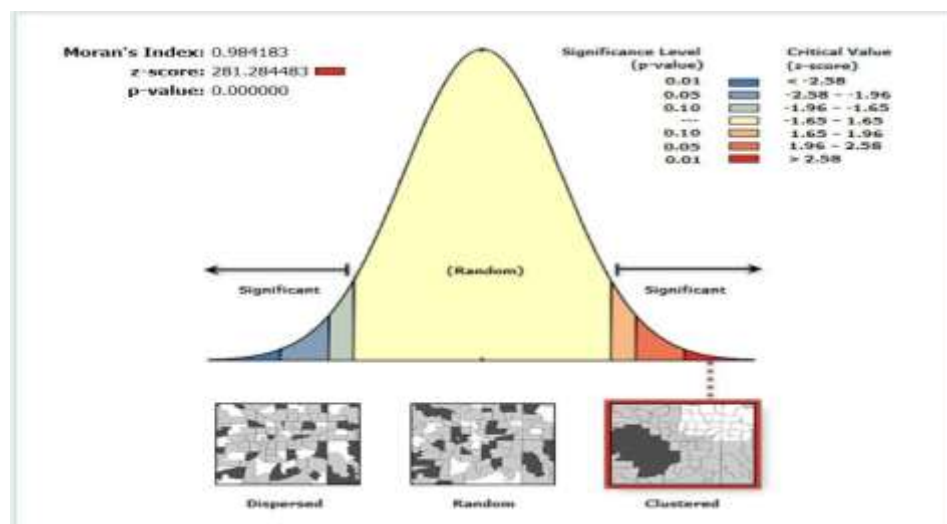
شکل ۱۰- روند سالانه و فصلی سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت قائنات (سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران نیز خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. خودهمبستگی به رابطه بین مقادیر باقیمانده در طول خط رگرسیون مربوط می‌شود و زمانی خودهمبستگی قوی رخ می‌دهد که مقادیر باقیمانده شدیداً باهم در ارتباط باشند، به عبارت دیگر تغییراتشان به صورت سیستماتیک رخ دهد. شاخص موران ابزاری در تحلیل خودهمبستگی فضایی است که به تحلیل الگوی توزیع عوارض در فضا با ملاحظه هم زمان موقعیت مکانی و مقدار خصیصه مورد نظر می‌پردازد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که آیا عوارض به صورت تصادفی، پراکنده یا خوشه‌ای در فضا توزیع شده‌اند. هر چه میزان شاخص موران به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده قوی‌تر بودن الگوی خوشه‌ای است (بلیانی و حکیم دوست، ۱۳۹۳؛ عسگری، ۱۳۹۰: ۱۴).

بر اساس این آزمون شاخص موران ۰٫۹۸۴۱۸۳ است و از آنجاکه مقدار آن مثبت، بالای صفر و نزدیک به یک است، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی فرونشست زمین در دشت مرکزی قائنات دارای خود همبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای است. با توجه به بالا بودن امتیاز استاندارد $Z(Z = 281,28)$ و مقدار P-Value صفر است،

می‌توان همبستگی و خوشه‌ای بودن الگوی داده‌ها یا شاخص فرونشست زمین را در منطقه‌ی مورد مطالعه تأیید نمود؛ که به معنی نامتوازن بودن سطح برداشت آب‌های زیر زمینی و ... است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- تحلیل الگوی نرخ فرونشست زمین با شاخص خودهمبستگی فضایی در منطقه مورد مطالعه

به‌منظور پیش‌بینی رخداد پدیده فرونشست در آینده، از پارامترهای تغییرات سطح آب، ارتفاع سطح زمین، شیب و ناهمواری‌ها استفاده شد. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه در **جدول ۳** نشان داده شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که، ناهمواری‌های محدوده مطالعاتی دامنه‌ای بین ۱ تا ۳۳ متر داشته و بیشینه شیب منطقه، حدود ۲۶ درجه است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته، تغییرات تراز آب زیرزمینی و میزان افت آن از ۰٫۶۲ متر تا بیش از ۳۰ متر در منطقه مشاهده می‌شود. میانگین این افت، حدود ۱۴ متر است. بیشترین تراکم مشاهده شده فرونشست زمین در منطقه نیز بود.

جدول ۳. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه

شاخص	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
نرخ فرونشست زمین	-۰٫۰۰۵۳	۰٫۰۰۱۵	-۰٫۰۰۱۳۹	۰٫۰۰۲۱
سطح برداشت آب زیرزمینی	۱۳٫۶۲	۱۴۹٫۳۹	۶۵٫۶۷	۳۵٫۷۷
ارتفاع	۱۱۳۰٫۳	۱۵۱۶٫۷۷	۱۲۷۹٫۶۷	۱۲۶٫۴۹
شیب	۱٫۴	۱۷٫۰۸	۶٫۶۲	۴٫۱۰۷

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

به منظور شناخت ارتباط بین این عوامل، ماتریس همبستگی محاسبه شد که نتایج آن در **جدول ۴** نشان داده شده است. یافته‌های همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته ($p = 0.138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود لازم به ذکر است که با توجه به سطح معناداری ($\text{sig} = 0.05$) این ارتباط معنادار نیست؛ اما بین نرخ فرونشست زمین و شیب و ارتفاع زمین همبستگی معناداری وجود دارد، که با توجه به مقدار آماریه پیرسون، همبستگی بین عوامل، معکوس بوده است؛ به عبارت دیگر هر چه میزان ارتفاع و شیب کمتر شده است، میزان فرونشست زمین بیشتر شده است.

جدول ۴- ماتریس همبستگی تراکم رخداد فرونشست (متغیر وابسته) با سایر پارامترهای مستقل

نتیجه	نرخ فرونشست زمین		متغیر وابسته
	Sig. (2-tailed)	Pearson Correlation	متغیر مستقل
عدم ارتباط معنادار	0.085	-0.138	سطح برداشت آب زیرزمینی
ارتباط معنادار	0.034	-0.445*	ارتفاع
ارتباط معنادار	0.047	-0.474*	شیب

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

۵- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری میزان و دامنه جابجایی سطح زمین از طریق اطلاعات ماهواره‌ای روشی نوین در پایش این پدیده است که طی دهه قبل مطرح شده است. تداخل سنجی راداری تا کنون یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های سنجش‌ازدور برای شناسایی و نمایش جابجایی به وجود آمده در سطح زمین است. همچنین این روش به واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن پایش این پدیده در مکان موردنظر با سهولت و کوتاه‌ترین زمان امکان اجرا دارد. این روش بررسی میزان جابجایی سطح زمین را در تمام محدوده موردبررسی امکان‌پذیر کرده است و امکان پایش آن را برای تمام نقاط برای دوره‌های زمانی مختلف فراهم نموده است. در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری برای تحلیل و اندازه‌گیری میزان جابجایی سطح زمین برای دشت مرکزی شهرستان قائنات استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که بیشترین فرونشست در بازه زمانی یک‌ساله و فصلی طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ برای منطقه مورد مطالعه موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به طوری که از ۰.۰۲۶ متر در سال ۲۰۱۷ به ۰.۰۵۳۹ متر در سال ۲۰۱۸، ۰.۰۵۴۲ متر در سال ۲۰۱۹ و در سال ۲۰۲۰ به ۰.۰۷۸ متر (۷.۸ سانتی‌متر در سال) می‌رسد. پهنه‌های در معرض

فرونشست سالانه بیشتر منطبق بر نواحی جنوب شرقی دشت قائنات یعنی نحای پیرامونی شهر اسفدن است؛ اما نواحی شمال غربی دشت و نواحی پیرامونی شهر قاین نیز با فرونشست همراه است.

پژوهش‌های پیشین، بر نقش و اهمیت استفاده از تصاویر راداری سنجنده‌های مختلف در شناسایی دقیق این پدیده تأکید داشته‌اند. تحقیق حاضر همانند مطالعات امام اوغلو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، بای لین^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، لیو^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، اوسمانو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) و کیو^۵ و همکاران (۲۰۱۴)، از سازگاری بسیار بالای نتایج تداخل سنجی راداری با مشاهدات زمینی را نشان می‌دهد و مناسب بودن این روش در اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین را تأیید می‌کند. منطقه مورد مطالعه در دهه‌های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی تجربه کرده است. بارش کم سال‌های اخیر و خشک‌سالی‌های متوالی، محدودیت منابع آب سطحی، روش‌های نادرست آبیاری در بخش کشاورزی در منطقه مطالعاتی، به همراه الگوی کشت نامناسب، موجب حفر بی‌رویه چاه‌های آب در منطقه شده است. برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها و منابع آب زیرزمینی، موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است.

به‌منظور بررسی ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه، اندازه‌گیری تراز آب، از سطح زمین تا سطح آب موجود در چاه انجام شد که هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قائنات افت محسوسی در طی چندین سال اخیر داشته، به‌طوری‌که عمق آب‌های زیرزمینی به میزان ۱,۳۰ متر افزایش یافته است. این مسئله بیانگر این است که میزان افت تراز آب در دشت حدود ۱,۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸) بوده است، یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم. نتایج حاصل از این بخش مطالعه، در راستای مطالعات از سوی سایر پژوهشگران از جمله نادریان فر و همکاران (۲۰۱۱) در دشت نیشابور، اکرامی و همکاران (۲۰۱۱) در منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان، مطالعه فلاح و همکاران (۲۰۱۲) بر روی منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس و بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه است. تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران نیز خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. با توجه به بالا بودن امتیاز استاندارد $Z = 281,28$ و مقدار P -Value صفر است، می‌توان همبستگی و خوشه‌ای بودن الگوی داده‌ها یا شاخص فرونشست زمین را در منطقه مورد مطالعه تأیید نمود؛ که به معنی نامتوازن بودن سطح برداشت آب‌های زیرزمینی و ... است. نتایج همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته

1 Imamoglu

2 Bai lin

3 Liu

4 Osmanoglu

5 Qu

($p = -0.138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود لازم به ذکر است که با توجه به سطح معناداری ($sig = 0.0585$) این ارتباط معنادار نیست که با یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش با دیدگاه افت سطح آب زیرزمینی که توسط پژوهشگران مختلف مانند گالوی^۱ و همکاران (۲۰۱۱)، متاگ^۲ و همکاران (۲۰۰۸)، فین^۳ و همکاران (۲۰۰۶) همسو نیست؛ اما نتایج به دست آمده با تحقیقاتی که توسط آروین و همکاران (۱۳۹۸)، حاجب و همکاران (۱۳۹۸)، دهقانی (۱۳۹۴)، جاداء^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، شوجون^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، توماس^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، وونگ^۷ و همکاران (۲۰۰۹)، انجام شد، مطابقت دارد. همچنین بر اساس نتایج پژوهش حاضر بین نرخ فرونشست زمین و شیب و ارتفاع زمین همبستگی معناداری وجود دارد، که با توجه به مقدار آماریه پیرسون، همبستگی بین عوامل، معکوس بوده است؛ به عبارت دیگر هر چه میزان ارتفاع و شیب کمتر شده است، میزان فرونشست زمین بیشتر شده است.

لازم به یادآوری است که کاهش بارندگی، بروز خشکسالی‌های پیوسته در چند سال اخیر و برداشت‌های بی‌رویه و غیرمجاز، در کاهش حجم ذخایر سفره و بروز روند منفی عمق دسترسی به آب زیرزمینی آبخوان دشت قائنات بی‌تأثیر نبوده است. همچنین در دهه‌های گذشته روند منفی برای تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف جهان و ایران گزارش شده است که با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک کشور که ایران را کشوری دارای تنش آبی زیاد معرفی کرده است.

در نتیجه، این محدوده نه تنها از نظر کمی در وضعیت نامناسبی قرار دارد، از نظر کیفی هم در معرض خطر خواهد بود. به همین دلیل، برای کنترل این پدیده و کاهش اثرات منفی آن، به مدیریت درست و برنامه‌ریزی مناسب‌تر نیاز خواهد بود؛ و اگر برداشت بی‌رویه آب به همین ترتیب ادامه یابد بدون شک در آینده عواقب نامطلوب در مورد منابع آب زیرزمینی دشت قائنات و به تبع آن بحران‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در منطقه اتفاق خواهد افتاد. تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات و تجدیدنظر در میزان بهره‌برداری از آبخوان مربوطه، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز، افزایش راندمان آبیاری، جلوگیری از کشت محصولات نیازمند به آب فراوان، پوشش انهار و صرفه‌جویی در مصرف آب و آموزش کشاورزان، می‌تواند تا حدودی از افت بی‌رویه سطح آب این دشت جلوگیری شود.

1 Galloway

2 Motagh

3 Phien

4 Jadda

5 Shujun

6 Tomas

7 Wang

کتابنامه

- احمدی، نعیمه؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. *سنجش/زدور و GIS/ایران*. دوره ۱۰. شماره ۳. صص ۵۲-۳۳.
https://gisj.sbu.ac.ir/article_96591.html
- آروین، عبدالخالق؛ وهابزاده کبریا، قربان؛ موسوی، سید رمضان؛ بختیاری کیا، مسعود؛ ۱۳۹۸. مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *سنجش/زدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۰ شماره ۳، صص ۱۹-۳۴.
https://girs.bushehr.iau.ir/article_668468.html
- اسدزاده، فرخ؛ کاکي، مهري؛ شكيبا، سينا؛ راعي، بيژن؛ ۱۳۹۵. تأثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت قروه چهاردولی. *تحقیقات منابع آب/ایران*. دوره ۱۲. شماره ۳۷. صص ۱۶۵-۱۵۳.
http://www.iwrr.ir/article_32629.html
- افضلی، عباسعلی؛ شریفی کیا، محمد؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت ها و سکونتگاه ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان. *دو فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی/ایران*. دوره ۱. شماره ۱، صص ۶۱-۷۳.
<https://civilica.com/doc/793719>
- اکبری، ابراهیم؛ جوانشیری، مهدی؛ محمدپور، زینت؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست سطح زمین در دشت اسفدن. *همایش محیط زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قائنات*.
- اکرامی، محمد؛ شریفی، ذبیح اله؛ ملکی نژاد، حسین؛ اختصاصی، محمدرضا؛ ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان در دهه ۸۸-۱۳۷۹. *طلوع بهار/دشت*. دوره ۱۰. شماره ۳ و ۳-۴. صص ۸۲-۹۱.
<https://tbj.ssu.ac.ir/article-1-1803-fa.html>
- بابایی، سید ساسان؛ موسوی، زهرا؛ روستایی، مه آسا؛ ۱۳۹۵. آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. *علوم و فنون نقشه برداری*. دوره ۵. شماره ۴. صص ۹۵-۱۱۱.
<http://jgst.issge.ir/article-1-417-fa.html>
- بهمنش، جواد؛ صمدی، رقیه؛ و رضایی، حسین؛ ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارومیه). *مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک*. دوره ۲۲. شماره ۴. صص ۶۷-۸۴.
https://jwsc.gau.ac.ir/article_2691.html
- تورانی، مرجان؛ آق آتابای، مریم؛ روستایی، مه آسا؛ ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*. دوره ۸. شماره ۲۷. صص ۱۱۷-۱۲۸.
http://gps.gu.ac.ir/article_65973.html
- چترسیماب، زهرا؛ آل شیخ، علی اصغر؛ وثوقی، بهزاد؛ مدیری، مهدی؛ پاکدامن، محمدصادق؛ ۱۴۰۱. بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری-آبخوان مرودشت. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. دوره ۱۴. شماره ۱. صص ۱۱۴-۱۲۵.

https://jwem.areeo.ac.ir/article_119561.html

حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۸. مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان. فصلنامه علمی علوم زمین. دوره ۲۹. شماره ۱۱۴. صص

https://www.gsjournal.ir/article_102902.html

۲۵۸-۲۵۱

حکیم دوست، سید یاسر؛ بلیانی، یدالله؛ ۱۳۹۳. اصول و مبانی پردازش داده‌های مکانی (فضایی) با استفاده از روش‌های تحلیل فضایی. انتشارات آزادپیما.

خلیفی، پری؛ اسفندیار نوین پور، عباس؛ ندیری، عطااله؛ قره خانی، مریم؛ ۱۳۹۶. بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از GIS. دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی/ایران، شهرکرد. <https://civilica.com/doc/661626>

دهقانی، مریم؛ ۱۳۹۴. ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. دوره ۲. شماره ۲. صص ۶۱-۷۳.

<https://jgit.kntu.ac.ir/article-1-135-fa.html>

زند، رحمان؛ شفیعی، نجمه (۱۳۹۹). بررسی فرونشست سطح زمین در دشت جوبین. همایش محیط‌زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قائنات

علی، عسگری؛ ۱۳۹۰. تحلیل آمار فضایی با Arc Gis. تهران: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران. فلاح، سیف اله؛ قبادی نیا، مهدی؛ شکرگزار دارابی، محسن؛ قربانی دشتکی، شجاع؛ ۱۳۹۱. بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب). دوره ۲۱. شماره ۲. صص

https://wra.areeo.ac.ir/article_118963.html

۱۷۲-۱۶۱

مریخ پور، محمدحسین؛ موسوی، مرتضی؛ صفری کمیل، مصطفی؛ ۱۳۹۱. بررسی پدیده فرونشست زمین و فرو چاله در اثر افت سطح آب زیرزمینی در دشت کبودرآهنگ همدان. همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان.

<https://civilica.com/doc/209139>

مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گره‌های دائمی. تحقیقات منابع آب/ایران. دوره ۱۵. شماره ۱. صص ۳۱۳-۲۹۹. http://www.iwrr.ir/article_80494.html

مهرابی، علی؛ ۱۳۹۷. شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۴.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_663409.html

شماره ۴. صص ۹۰-۱۰۱

نادریان فر، محمد؛ انصاری، حسین؛ ضیائی، علی نقی؛ داوری، کامران؛ ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات نوسانات سطح آب‌زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف. مهندسی آبیاری و آب/ایران. دوره ۱. شماره ۳.

<https://www.sid.ir/paper/247384/fa>

صص ۳۷-۲۲

- Bai, L., Jiang, L., Wang, H., & Sun, Q., 2016. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift (2009–2010) over wuhan in central china revealed by terrasar-X insar analysis. *Remote Sensing*, 8(4), 350. <https://doi.org/10.3390/rs8040350>
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J., & Rivera, A., 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting In SAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 47, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002>
- Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., ... & Gong, X., 2016. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*, 8(6), 468. <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/468>
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F., 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70034646>
- Imamoglu, M., Kahraman, F., & Abdikan, S., 2018, July. Preliminary results of temporal deformation analysis in Istanbul using multi-temporal InSAR with Sentinel-1 SAR data. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1352-1355). IEEE.
- Jadda, M., Shafri, H. Z., Mansor, S. B., Sharifikia, M., & Pirasteh, S., 2009. Landslide susceptibility evaluation and factor effect analysis using probabilistic-frequency ratio model. *European Journal of Scientific Research*, 33(4), 654-668.
- Liu, C., Ji, L., Zhu, L., & Zhao, C., 2018. InSAR-constrained interseismic deformation and potential seismogenic asperities on the Altyn Tagh fault at 91.5–95 E, Northern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(6), 943. <https://doi.org/10.3390/rs10060943>
- Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., Brisco, B., & Motagh, M., 2018. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(4), 247-262. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1477680>
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16). <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Phien-Wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in bangkok, Thailand. *Engineering geology*, 82(4), 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>
- Qu, F., Zhang, Q., Lu, Z., Zhao, C., Yang, C., & Zhang, J., 2014. Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 155, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.008>

- Rott, H., & Nagler, T., 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4), 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>
- Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., & Haghighi, M. H., 2016. Multi-sensor in SAR analysis of surface displacement over coastal urban city of Trondheim. *Procedia Computer Science*, 100, 1141-1146.
- Sharma, P., Jones, C. E., Dudas, J., Bawden, G. W., & Deverel, S., 2016. Monitoring of subsidence with UAVSAR on Sherman Island in California's Sacramento–San Joaquin Delta. *Remote sensing of environment*, 181, 218-236. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.012>
- Shujun, S., Xue, Y., Wu, J., Yan, X., & Yu, J., 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 685-693. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016HydJ...24..685Y/abstract>
- Tomas, R., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M., Vicente, F., Cuenca, A., & Mallorquí, J. J., 2010. Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology*, 115(1-2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.004>
- 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(1-2), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.001>
- Zhang, Y., Wu, H. A., Kang, Y., & Zhu, C., 2016. Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1992 to 2014 revealed by multiple sar stacks. *Remote Sensing*, 8(8), 675. <https://doi.org/10.3390/rs8080675>



Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM

Shabnam Mehrnoor ^a, Maryam Robati^{b*}, Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh^c, Forough Farsad^b, Shahram Baikpour^b

^a PhD Candidate in Environmental Science, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^c Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2 March 2022

Revised: 5 July 2022

Accepted: 9 July 2022

Abstract

The occurrence of land subsidence phenomenon and its potential hazards in the plains of Iran due to the water crisis and drought period has grown significantly in recent years. In this study, the zoning of land subsidence hazard in the Hashtgerd plain was discussed and 19 criteria were selected as factors that influence the subsidence. The mentioned layers were prepared in GIS, weighted based on the best-worst method (BWM) and integrated using the Weighted Overlay Index (WOI). The results of BWM method showed that groundwater abstraction (0.219), the type of geological formation (0.157), the decrease of groundwater level (0.079), and groundwater depth (0.078) are important factors on the potential of subsidence hazard in the study area. Moreover, in order to evaluate the results of this model, the ROC curve was used, which has an accuracy of 90%. The results showed that land subsidence hazard of 10.66% of the study area was in very low category, 38.51% in low category, 31.49% in medium category, 11.66% in high category and 7.69% is in the very high category. According to the results, there are areas with a high probability of subsidence in the central part of Hashtgerd Plain, which requires continuous evaluation, controlling, and monitoring of the criteria that affect the situation.

Keywords: Land Subsidence, Aquifer Recharge, Hashtgerd Plain, Bwm Model

*. Corresponding author: Maryam Robati E-mail: m.robati@srbiau.ac.ir Tel: + 989125038338

How to cite this Article: Mehrnoor, Sh., Robati, M., Kheirkhah Zarkesh, MM. Farsad, F., & Baikpour, Sh. (2022). Land subsidence hazard zoning in Hashtgerd Plain based on an integrated multi-criteria decision-making approach: WOI-BWM. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 127-148.

DOI:10.22067/geoh.2022.75445.1188



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۴۴ و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۴۸-۱۲۷

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار:

WOI-BWM

شبیم مهرنور - دانشجوی دکتری علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 مریم رباطی^۱ - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 میرمسعود خیرخواه زرکش - دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی.
 فروغ فرساد - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 شهرام بیک‌پور - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۱۸

چکیده

وقوع پدیده فرونشست زمین و خطرات احتمالی آن در دشت‌های ایران به علت بروز بحران آب و خشکسالی، طی سالیان اخیر رشد چشمگیری داشته است. در این مطالعه به پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد پرداخته و نوزده معیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، متوسط بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست منطقه انتخاب شدند. لایه‌های مذکور در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه، بر اساس مدل بهترین-بدترین (BWM) وزن دهی و با استفاده از شاخص هم‌پوشانی

Email: m.robati@srbiau.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۵۰۳۸۳۳۸

نحوه ارجاع به این مقاله:

مهرنور، شبیم؛ رباطی، مریم؛ خیرخواه زرکش، میرمسعود؛ فرساد، فروغ؛ بیک‌پور، شهرام؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد براساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیار: WOI-BWM. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴).

صص ۱۴۸-۱۲۷

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188>

وزین (WIO) ادغام شدند. نتایج روش BWM نشان داد عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه دارند. همچنین به منظور ارزیابی نتایج این مدل از منحنی (ROC) استفاده شد که دارای دقتی معادل ۹۰ درصد است. نتایج نشان داد که ۳۸/۵۱، ۱۰/۶۶، ۳۱/۴۹ و ۷/۶۹ درصد از مساحت دشت هشتگرد به ترتیب به طبقه خطر خیلی کم، کم، متوسط، پرخطر و خیلی پرخطر اختصاص یافته است که بر این اساس مناطقی با احتمال فرونشست زیاد در نیمه مرکزی دشت هشتگرد قرار دارند که مستلزم ارزیابی، نظارت و پایش مستمر عوامل مؤثر در وقوع پدیده فرونشست توسط مدیران و برنامه ریزان شهری است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، تغذیه آبخوان، دشت هشتگرد، مدل BWM.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، یک خطر زمین شناسی که در بسیاری از شهرهای جهان گسترش یافته است، مسأله فرونشست زمین است (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). فرونشست زمین، همان‌طور که توسط یونسکو تعریف شده است، شامل نشست یا نشست تدریجی سطح زمین به سمت پایین است که ممکن است با جابه‌جایی‌های عمودی با بردار اندک افقی نیز همراه باشد (یونسکو^۲، ۲۰۱۸). فرونشست زمین یکی از پیامدهای استفاده بی‌رویه و سوء مدیریت از منابع آبی است که به دلیل فشردگی خاک در اثر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد (پاچکو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) که باعث آسیب به محیط طبیعی و حتی خسارات اقتصادی می‌شود (هو^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). در فعالیت‌های انسانی، این پدیده متأثر از فعالیت‌هایی مانند برداشت بیش از حد آب از سفره‌های زیرزمینی (وانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ندیری^۶ و همکاران، ۲۰۱۸)؛ زهکشی خاک‌های آلی (توسی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳)؛ استخراج سوخت‌های فسیلی و استخراج زیرسطحی همچون معدنکاری (گالوی^۸، ۲۰۱۶)؛ افزایش حفاری چاه‌های بهره‌برداری (ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۹) و پدیده‌های طبیعی زمین شناسی همچون حرکات تکتونیکی گسل‌ها (سوپاتا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرادهان^{۱۱}

1 Chen

2 UNESCO

3 Pacheco

4 Hu

5 Wang

6 Nadiri

7 Tosi

8 Galloway

9 Zhang

10 Sopata

11 Pradhan

و همکاران، ۲۰۱۴) و کارستی شدن به دلیل انحلال سنگ آهک (دزیر^۱ و همکاران، ۲۰۱۸) است. فرونشست اگرچه پیامد فشردگی سطوح زیرین خاک است لیکن خود معرف حدوث و پیامد ناگوار زیست محیطی در افق آتی است. فشردگی سطوح زیرین و افت عمق ایستابی، کاهش حجم و فضای نگهداشت آب را به دنبال خواهد داشت. به بیان ساده تر کاهش مخزن آب زیرزمینی پیامد منطقی رخداد پدیده فرونشست است (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۴) که می تواند خسارت های شدیدی به تأسیسات انسان ساخت (ساختمان)، باند فرودگاه ها، پل ها، تونل ها، خیابان ها، خطوط حمل و نقل ریلی و جاده ای، کاهش حاصلخیزی زمین های کشاورزی (با فشرده شدن و از بین رفتن تخلخل موجود در خاک)، اختلال در الگوی جریان ها و تداخل آب شور و شیرین و تخریب مستحذات زیرسطحی (قنات ها، شبکه سوخت و آب رسانی، تونل های شهری و معادن) را به دنبال داشته باشد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸). از آنجایی که اولین گام در مطالعه این پدیده، شناخت گستره فضایی آن و اندازه گیری هر چه دقیق تر میزان فرونشست است؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و زمانی این پدیده، امکان ارائه و توسعه مدل منطقه ای این پدیده میسر شده (مهرابی و غضنفری پور، ۱۳۹۸) و از این طریق می توان زیرساخت مناسبی از منابع داده و اطلاعاتی را برای مدیران و دست اندرکاران در راستای تعدیل، کنترل و پیشگیری از فاجعه فراهم آورد (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات متعددی برای ارزیابی فرونشست با استفاده از سه رویکرد: الف) مدل های ریاضی با استفاده از مدل های جریان آب زیرزمینی و مدل های فرونشست برای بررسی اثرات کاهش سطح آب منجر به فرونشست؛ ب) تکنیک های سنجش از دور برای نظارت بر فرونشست زمین با قابلیت بررسی روابط احتمالی با رویکرد هیدروژئولوژیکی؛ ج) استفاده از تکنیک های GIS برای نقشه برداری مناطق آسیب پذیر در برابر فرونشست انجام شده است (صادق فام^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). در جدول (۱) سابقه ای از آن ارائه شده است.

جدول ۱- مرور منابعی از مطالعات مرتبط با پدیده فرونشست

طبقه	نویسندگان	داده های مورد استفاده	موقعیت	نتایج کلیدی
مدل های آماری و تجربی	مدنی ^۳ و همکاران (۲۰۱۳)	تغییر شکل زمین، خصوصیات خاک زیرین و رژیم آب های زیرزمینی	بلوگنا (ایتالیا)	همبستگی بین فرونشست زمین، برداشت آب زیرزمینی و خاک های زیرین شناسایی شد.
	فانت ^۴ و همکاران (۲۰۱۶)	جریان آب های سطحی، نقشه های کاربری زمین و داده های آب و هوا	کالیفرنیا (آمریکا)	ارزیابی استراتژی های مدیریتی برای کاهش اثرات نامطلوب فرونشست صورت گرفت.

1 Desir

2 Sadeghfam

3 Modoni

4 Faunt

طبقه	نویسندگان	داده‌های مورد استفاده	موقعیت	نتایج کلیدی
مدل‌هایی بر پایه InSAR	شرستها ^۱ و همکاران (۲۰۱۷)	خصوصیات فیزیکی، اقلیم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، تراکم‌پذیری و نوسان سطح آب‌های زیرزمینی	دره کاتماندو (نیپال)	پهنه‌بندی خطر فرونشست، مکان و سطوح بالقوه خطر را برای مدیریت پیشگیری از خطر برجسته می‌کند.
	آبیدین ^۲ و همکاران (۲۰۱۵)	تصاویر راداری InSAR و GPS	جاکارتا (اندونزی)	میزان فرونشست دارای تغییرات فضایی و زمانی است که ناشی از استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، بار سازه‌ها و فعالیت‌های زمین‌شناسی در منطقه است.
	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)	تصاویر سنتینل ۱	پاکدشت (ایران)	منطقه به دلیل نداشتن موانع ژئومورفولوژی، در طی سال‌های اخیر با روند توسعه ساخت‌وسازها، توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی مواجه شده و همین امر سبب افزایش بهره‌برداری و پدیده فرونشست شده است.
	پرادهان ^۳ و همکاران (۲۰۱۴)	ارتفاع، شیب، جهت، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، NDVI، خاک، قدرت جریان رودخانه، رطوبت، توپوگرافی	دره کیتا (مالزی)	نتایج نشان داد که مدل FR در پیش‌بینی نسبت به مدل تابع باور شواهد دقت کمتری دارد.
	رحمتی ^۴ و همکاران (۲۰۱۹)	فاصله از قنات، کاربری اراضی، فاصله از زمین‌های جنگلی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل‌ها، سطح آب زیرزمینی	کاشمر (ایران)	آن‌ها بیان کردند برداشت آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن سنگ‌شناسی و فاصله از رودخانه‌ها مهم‌ترین عوامل در فرونشست هستند.

در حال حاضر، این پدیده به همراه پیامدهای زیست‌محیطی آن در اکثر دشت‌های دنیا به چشم می‌خورد (رهنما و میراثی^۵، ۲۰۱۶). در ایران نیز فرونشست سابقه طولانی دارد. در واقع با توجه به وضعیت نیمه‌خشک بسیاری از مناطق ایران و نیاز به منابع آبی، میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بسیار بیشتر از میزان تغذیه آن‌ها است، به همین دلیل تحت تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی، بسیاری از دشت‌های ایران با فرونشست مواجه هستند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). در این میان، یکی از مناطقی که با مخاطره فرونشست مواجه است، دشت هشتگرد در غرب استان تهران است که با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق به ارزیابی میزان فرونشست آن پرداخته شده است. بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (۱۳۸۶) با استفاده از روش تداخل سنجی ماهواره‌ای

1 Shrestha

2 Abidin

3 Pradhan

4 Rahmati

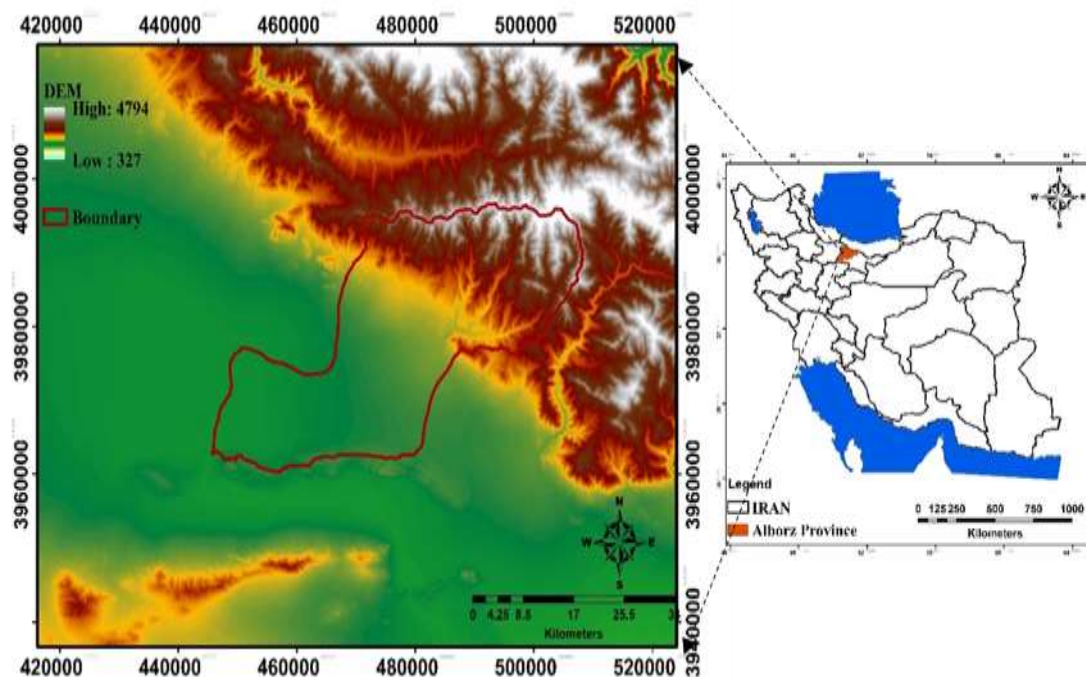
5 Rahnema & Mirassi

امواج رادار نشان داده است که در پهنه‌ای گسترده از این دشت، فرونشست زمین با نرخ بیشینه ۱۶ و نرخ میانگین ۸/۴ سانتی‌متر بر سال شکل گرفته است. این دشت در سال‌های اخیر به‌طور جدی با بحران خشکسالی و کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. همچنین گمان می‌رود که در آینده نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و با فرض ادامه یافتن شرایط موجود در برداشت از منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و بالطبع آن پدیده فرونشست با شدت و گستردگی بیشتری ادامه یابد. لذا تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی و کاهش خسارات ناشی از وقوع آن می‌تواند کمک شایانی به مردم محلی و مراکز ذی‌صلاح نماید. در این راستا، هدف از پژوهش حاضر شناسایی و طبقه‌بندی نواحی حساس بر اساس مدل شاخص همپوشانی وزین، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست با استفاده از روش وزن‌دهی BWM و ارزیابی صحت این مدل در دشت هشتگرد است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

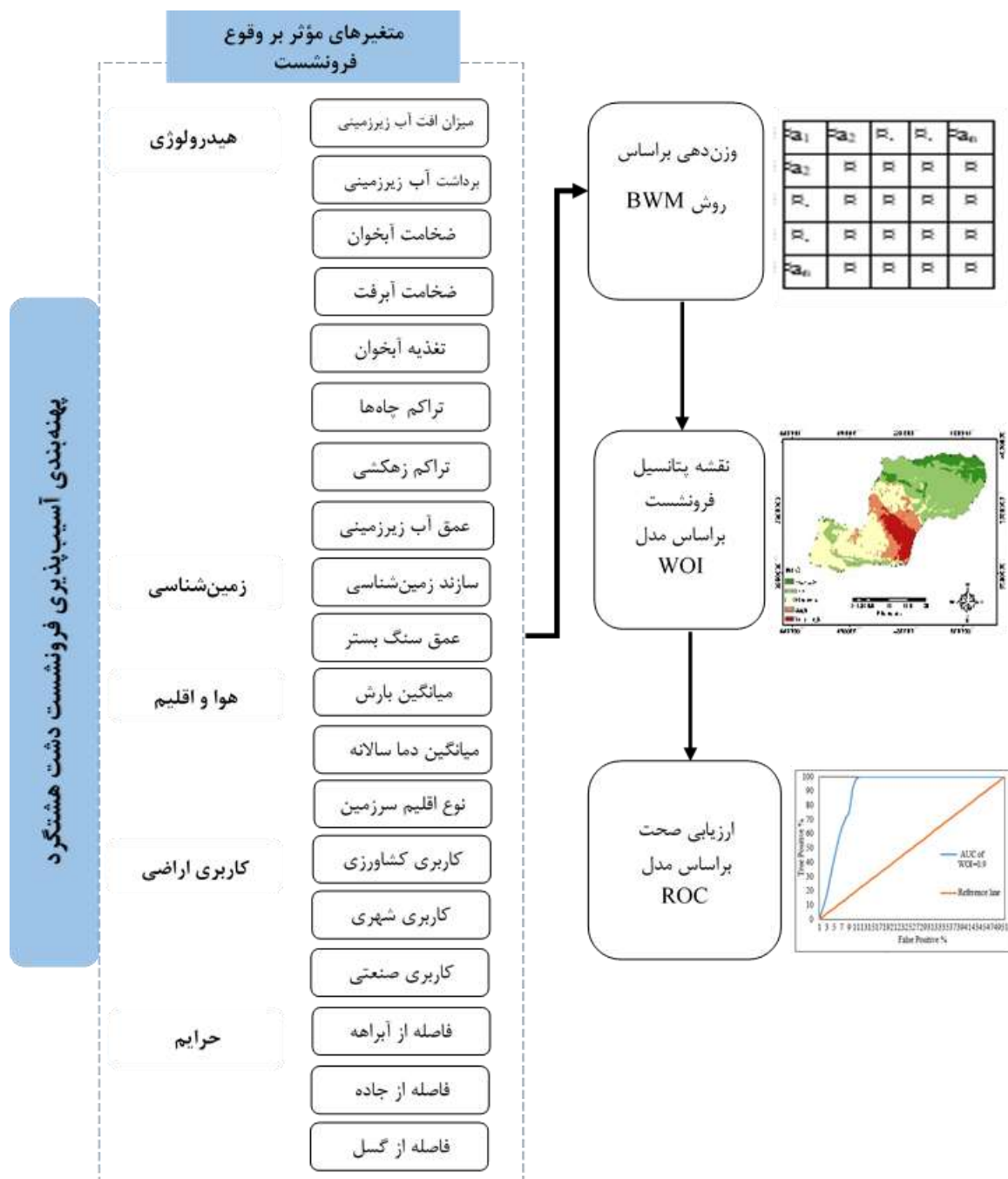
دشت هشتگرد از دیدگاه تقسیمات کشوری در استان البرز قرار دارد. مساحت این حوضه در حدود ۱۱۶۸/۸ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیایی $35^{\circ} 47' 45''$ تا $36^{\circ} 03' 05''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 29' 05''$ تا $50^{\circ} 54' 28''$ شرقی قرار دارد. آب‌وهوای منطقه در بخش‌های شمالی، نیمه مرطوب است و به تدریج به سوی جنوب دشت با کاهش ارتفاع به نیمه‌خشک تبدیل می‌شود (شکل ۱). بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه برای شناخت پدیده فرونشست ضروری است. به‌طور کلی از دیدگاه هدایت هیدرولیکی، سازندهای زمین‌شناسی این محدوده به ۴ گروه اصلی تقسیم می‌شوند: الف) سازندهایی با نفوذپذیری بسیار کم؛ ب) سازندهایی با نفوذپذیری کم؛ پ) سازندهایی با نفوذپذیری متوسط و ت) سازندهایی با نفوذپذیری زیاد تا خیلی زیاد. همچنین ساختار زمین‌ساختی ناحیه مورد مطالعه از فعالیت‌های زمین‌ساختی البرز تأثیر پذیرفته است. به همین دلیل، بیشتر چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها، روند خاوری-باختری دارند. از گسل‌های مهم این منطقه می‌توان گسل آبیگ، گسل جنوب طالقان و گسل ولیان را نام برد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۱۳۸۶).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر در پنج مرحله کلی به انجام رسیده است که شامل: (۱) شناسایی متغیرهای محیطی تأثیرگذار، (۲) آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع فرونشست زمین، (۳) بررسی اهمیت متغیرهای محیطی بر اساس روش بهترین-بدترین (BWM)، (۴) اجرای مدل شاخص همپوشانی وزین و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین و (۵) اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) است. مراحل کلی این پژوهش در شکل نمایش داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- مراحل انجام فرآیند پهنه‌بندی فرونشست در دشت هشتگرد

۲-۲-۱- تعیین معیارهای مؤثر بر فرونشست

در این پژوهش، با توجه به شرایط دشت هشتگرد، مرور منابع و همچنین نظر افراد خبره، معیارهای تأثیرگذار در پهنه‌بندی فرونشست زمین در ۲ بعد فیزیکی- شیمیایی و اقتصادی- اجتماعی، ۵ گروه معیارهای هیدرولوژی، زمین‌شناسی، هوا و اقلیم، کاربری اراضی و حرایم و ۱۹ زیرمعیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها تدوین شدند. **عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)** در پژوهشی بیان کردند که افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست زمین در دشت اردبیل است. **محمدی^۱ و همکاران (۲۰۱۹)** برداشت از آب‌های زیرزمینی، ساختار زمین‌شناسی، فاصله از گسل و درصد شیب را از عوامل مؤثر در فرونشست بیان کردند.

۲-۲-۲- آماده‌سازی معیارها

با تعیین مجموعه‌ای از معیارها، نیاز است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شوند. در ذیل به تشریح معیارها خواهیم پرداخت:

- فاصله از آبراهه‌ها: آبراهه‌ها با افزایش فشار آب منفذی یکی از عوامل مهم در القاء ناپایداری در منطقه است (**رنجگر^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ قربانزاده^۳ و همکاران، ۲۰۲۰**). لذا نقشه آبراهه‌ها از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از آبراهه تهیه گردید که مقادیر پیوسته آن بین صفر تا ۴۸۲۶ متر است.

فاصله از گسل: گسل‌ها نقش بسیار مهمی در شکستگی و خوردشدگی واحدهای زمین‌شناسی و حرکت‌های توده‌ای دارند (**نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰**). لرزش ناشی از ایجاد گسل می‌تواند باعث تشکیل یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک و ایجاد فرونشست شود (**گالوی^۴ و همکاران، ۱۹۹۹؛ ناوارو هرناندز^۵ و همکاران، ۲۰۲۰**). در این پژوهش، گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از گسل تهیه گردید.

میزان برداشت آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی: یکی از دلایل فرونشست زمین مربوط به عکس‌العمل طبیعی آن در مقابل بهره‌برداری بیش از اندازه و بالطبع آن افت سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل کاهش فشار هیدرولیکی و

1 Mohammadi

2 Ranjgar

3 Ghorbanzadeh

4 Galloway

5 Navarro-Hernández

افزایش تنش بر رسوبات است (هانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ هو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). در این پژوهش، به منظور تهیه نقشه میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی از اطلاعات تغییرات دوره ۱۵ ساله عمق آب از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) استفاده شده است و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسته میزان افت سطح آب زیرزمینی تهیه شد. همچنین، میزان برداشت آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های تخلیه چاه‌های بهره‌برداری تهیه گردید و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسته برداشت آب زیرزمینی تهیه شد. در نقشه پیوسته مقادیر آن بین ۷ تا ۱۷۵۶ مترمکعب است.

تغذیه: تغذیه یکی از عوامل هیدرولوژیکی مؤثر در فرونشست است. هرچه میزان تغذیه بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی بیشتر شده و فاصله بین دانه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه تنش مؤثر کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست کمتر می‌شود (صادق‌فام^۳ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش، جهت تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو (پیسکوپو^۵، ۲۰۰۱) استفاده شد. در روش پیسکوپو، لایه شیب زمین، بارندگی و نفوذپذیری سطحی خاک (عمق ۰/۵ تا ۲ متری خاک سطحی) به لایه رستری تبدیل و با وزن‌دهی و رویهم‌گذاری لایه‌ها، نقشه پیوسته تغذیه تهیه شد که مقادیر آن بین ۰/۳۹ تا یک است.

ضخامت آبرفت: این ضخامت شامل فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است. در حالت کلی مشاهده می‌شود که نشست بیشتر در لایه‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبرفت بیشتر باشد زیرا اگر ضخامت آبرفت منطقه بیشتر شود آب زیادی می‌توان استخراج کرد. برای تهیه این لایه از داده‌های ژئوفیزیک سطحی و چاه‌پیمایی که از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) اخذ شده بود، میزان ضخامت آبرفت در هر چاه منطقه محاسبه گردید و سپس این نقاط بر اساس روش IDW درون‌یابی شد و به فایل رستری تبدیل گردید و بدین ترتیب لایه پیوسته ضخامت آبخوان به‌دست آمد که مقادیر آن بین ۶۰ تا ۳۲۹ متر است.

پارامترهای اقلیمی: پارامترهای اقلیمی به‌خصوص دما و بارش به دلیل تأثیری که بر آب‌های زیرزمینی دارد؛ یکی از عوامل مؤثر در پدیده فرونشست است (ژنگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۷؛ تفرشی^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). لذا در این پژوهش، داده‌های جدولی همانند موقعیت و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مربوط به میانگین بارندگی سالیانه و میانگین دمای سالیانه منطقه مورد مطالعه به‌صورت نقطه به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد گردیده و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW به نقشه هم‌باران سالیانه و هم‌دمای سالیانه تبدیل گردید. مقادیر نقشه هم‌باران بین ۱۹۹ تا

1 Huang

2 Hu

3 Sadeghfam

4 Nadiri

5 Piscopo

6 Zheng

7 Tafreshi

۸۵۰ میلی متر در سال و مقادیر هم‌دما بین صفر تا ۱۴ درجه سانتی گراد است. همچنین، فرونشست معمولاً در اقلیم‌های خشک که هم برداشت از آب زیرزمینی بیشتر است و هم تغذیه سفره آب زیرزمینی ضعیف‌تر است اتفاق می‌افتد. نقشه نوع اقلیم در منطقه مورد مطالعه از سازمان هواشناسی استان البرز دریافت گردید که بر اساس آن اقلیم منطقه دارای ۶ کلاس است که کلاس اول معرف خشک‌ترین و کلاس ششم معرف مرطوب‌ترین کلاس اقلیمی است. سازندهای زمین‌شناسی: سنگ‌ها به واسطه تفاوت در جنس رسوبات تشکیل دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری، مقاومت‌های مختلفی را در مقابل نیروهای خارجی از خود نشان می‌دهند (کانفورتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مختاری و عابدیان، ۲۰۱۹). به همین منظور، نقشه رقومی سنگ‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی (۱۳۹۹) دریافت گردید و خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی استخراج گردید (جدول ۲). منطقه هشتگرد دارای ۱۹ کلاس سازند زمین‌شناسی است که سازندها بر اساس جنس مواد تشکیل دهنده رتبه‌بندی شدند.

جدول ۲- واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ردیف	واحد	سنگ‌شناسی	ردیف	واحد	سنگ‌شناسی
۱	Qft ₂	مخروط افکنده‌ها و تراس‌های آبرفتی کم ارتفاع جدید	۱۱	Mm,s,l	مارن، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ‌آهک، کنگلومرا
۲	TRJs	ماسه‌سنگ و شیل	۱۲	Ek	توف و شیل توفی
۳	Qft ₁	مخروط افکنده‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی	۱۳	Eksh	شیل آهکی، شیل سیلتی با میان لایه توف شیشه‌ای
۴	Qcf	کفه رسی	۱۴	PeEz	سنگ‌آهک ریفی و مارن ژیبسی
۵	Mur	مارن، مارن گچ‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۱۵	Ktzi	سنگ‌آهک اوریتولین‌دار
۶	Murmg	لایه‌های مارن گچ‌دار	۱۶	Pr	سنگ‌آهک
۷	Ebv	سنگ‌های بازالتی	۱۷	Ekgy	ژیبس
۸	pC-Cs	دولومیت و سنگ‌آهک ضخیم لایه با میان لایه‌های شیل	۱۸	COm	آهک تریلوبیت‌دار، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل
۹	Ek.a	شیل آهکی با میان لایه‌های توف	۱۹	pCk	شیل اسلیتی و ماسه‌سنگ کوارتزی
۱۰	Eat	توف آندزیتی			

کاربری اراضی: استفاده از زمین برای هدف‌های مختلف صورت می‌گیرد و تأثیر هر یک از این عوامل بر روی فرونشست می‌تواند متنوع باشد. کاربری‌های کشاورزی و شهری یکی از عوامل اصلی در افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و بروز فرونشست است. همچنین وزن ناشی از این سازه‌های صنعتی سبب تراکم لایه‌های خاک و نشست

1 Conforti

2 Mokhtari & Abedian

سطح زمین می شود (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری و همکاران، ۱۳۹۷). لذا نقشه کاربری اراضی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری ایران گرفته شد. همچنین کاربری کشاورزی، مناطق مسکونی و مناطق صنعتی از آن استخراج گردید.

عمق سنگ بستر: در منطقه ای که سنگ بستر در عمق کمی قرار دارد، به دلیل ضخامت کم آبرفت، حفر چاه امکان پذیر نیست. بر این اساس، آب های زیرزمینی به مناطقی منتقل می شوند که ضخامت بیشتری دارند که منجر به افزایش فرونشست و جابه جایی افقی لایه ها در آن منطقه می شود (پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). در این پژوهش، لایه عمیق سنگ بستر از نقشه جهانی عمیق سنگ بستر (<https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/f36117ea-9be5-4afd-bb7d-7a3e77bf392a>) تهیه گردید. مقادیر آن پیوسته و بین صفر تا ۲۳۱ متر است.

فاصله از جاده: محورهای ارتباطی با وجود عبور و مرورهای زیاد با ایجاد امواجی به طرفین و عمق زمین، به فروپاشی ذرات خاک در محل هایی که رطوبت کاهش پیدا کرده است ایجاد فرونشست زمین و فروچاله ها را تقویت می کند (عرب عامری^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ حکیم^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). نقشه جاده ها از نقشه توپوگرافی رقومی شده ۱:۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه استخراج و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم افزار ArcGIS، نقشه فاصله از جاده ها تهیه گردید.

تراکم چاه ها: میزان تراکم چاه ها و قنات ها با برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (جینه^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، موقعیت مکانی چاه ها به صورت x و y از شرکت آب منطقه ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و پس از ورود به نرم افزار ArcGIS، میزان تراکم چاه ها بر اساس تعداد حلقه چاه در کیلومتر مربع محاسبه گردید که مقادیر آن بین صفر تا ۲۲۳ حلقه چاه در کیلومتر مربع است.

تراکم زهکشی: میزان تراکم زهکشی با میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (حکیم و همکاران، ۲۰۲۰). تراکم زهکشی یا به عبارتی نسبت طول آبراه ها به مساحت حوضه با استفاده از نقشه رقومی، ارتفاع و اکستنشن Archydro در نرم افزار ArcGIS محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۰/۰۴ تا ۲/۱۴ کیلومتر در کیلومتر مربع است.

ضخامت آبخوان: از آنجایی که ضخامت آبرفت فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است و ضخامت آبخوان فاصله بین سطح ایستابی تا سنگ کف، لذا با کم کردن عمق سطح ایستابی از ضخامت آبرفت، ضخامت آبخوان را می توان برآورد نمود. به عبارتی، بخشی از ضخامت آبرفت را که اشباع از آب هست، می توان ضخامت آبخوان در

1 Zhou

2 Arabameri

3 Hakim

4 Jeanne

نظر گرفت. در این پژوهش، به دلیل موجود بودن نقشه نسبتاً دقیق ضخامت آبرفت و عمق سطح ایستابی، این روش مورد استفاده قرار گرفت. در نقشه پیوسته ضخامت آبخوان، مقادیر بین صفر تا ۲۸۵ متر است. عمق سطح آب زیرزمینی: میان عمق سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مستقیم وجود دارد. نقشه نقاط هم عمق پیزومترها از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و با استفاده از روش IDW، نقشه پیوسته عمق سطح آب زیرزمینی تهیه شد که مقادیر آن بین ۱۰ تا ۱۴۵ متر است.

۲-۲-۳- وزن‌دهی معیارها بر اساس روش BWM

روش بهترین-بدترین نخستین بار در سال ۲۰۱۵ توسط رضایی ارائه گردید. این روش بر مبنای مقایسات زوجی و بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی خطی استوار شده است. در این روش بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم گیرنده مشخص می‌شود و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص‌ها صورت می‌گیرد. همچنین در این روش، یک فرمول برای محاسبه نرخ ناسازگاری جهت بررسی اعتبار مقایسه‌ها در نظر گرفته شده است. مراحل این روش به شرح ذیل است (رضایی، ۲۰۱۶):

گام ۱: مجموعه زیرمعیارهای تصمیم‌گیری تعیین می‌شود.

گام ۲: بهترین و بدترین زیرمعیار با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود.

گام ۳: ارجحیت بهترین معیار نسبت به دیگر معیارها به صورت $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ مشخص می‌شود.

گام ۴: ارجحیت بدترین معیارها نسبت به دیگر معیارها به صورت $A_W = (a_{W1}, a_{W2}, \dots, a_{Wn})^T$ مشخص می‌شود.

می‌شود.

گام ۵: تشکیل بردار وزن بهینه به‌طوری که:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (1)$$

$$\sum_j^{\text{s.t.}} W_j = 1;$$

$$W_j \geq 0. \text{ for all } j$$

همچنین، مسئله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\min \xi$$

$$\text{s.t.}$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi. \text{ for all } j \quad (2)$$

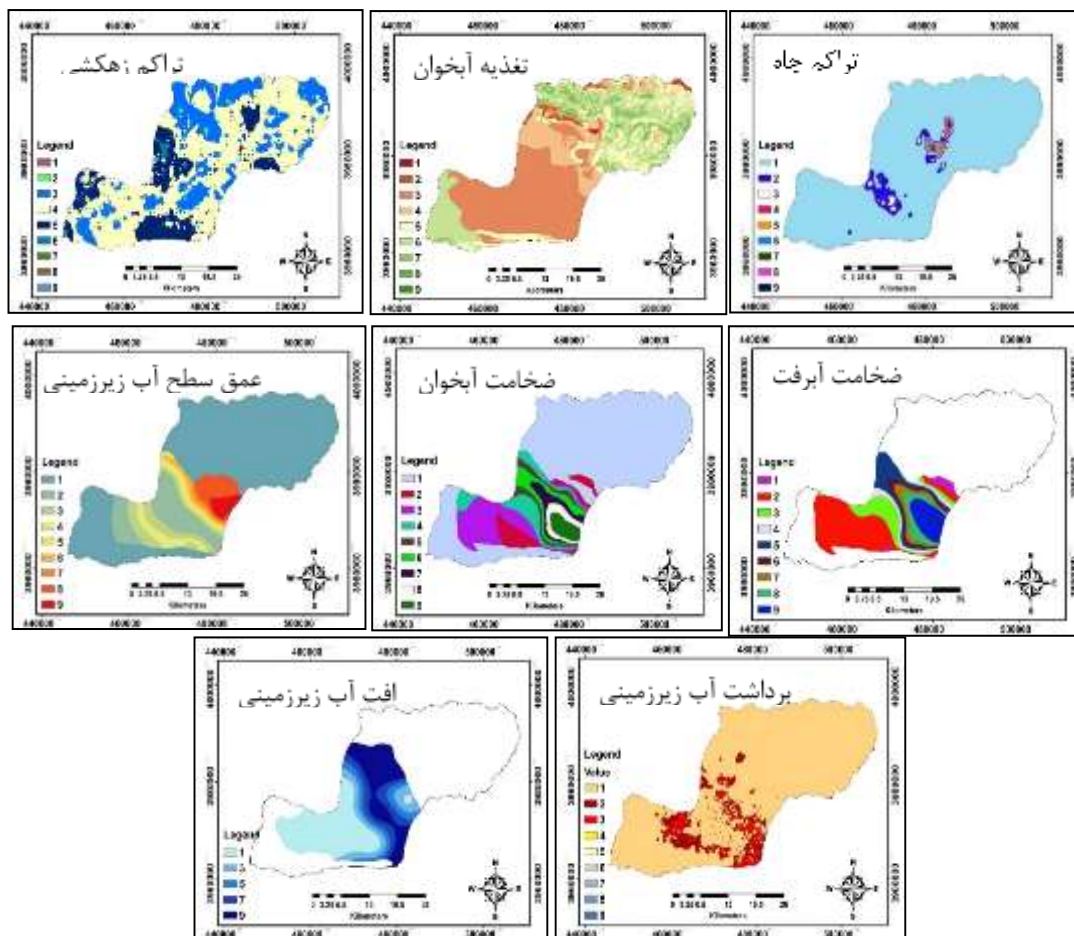
$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi. \text{ for all } j \quad \sum_j W_j = 1; W_j \geq 0. \text{ for all } j$$

۲-۲-۴- اعتبارسنجی مدل

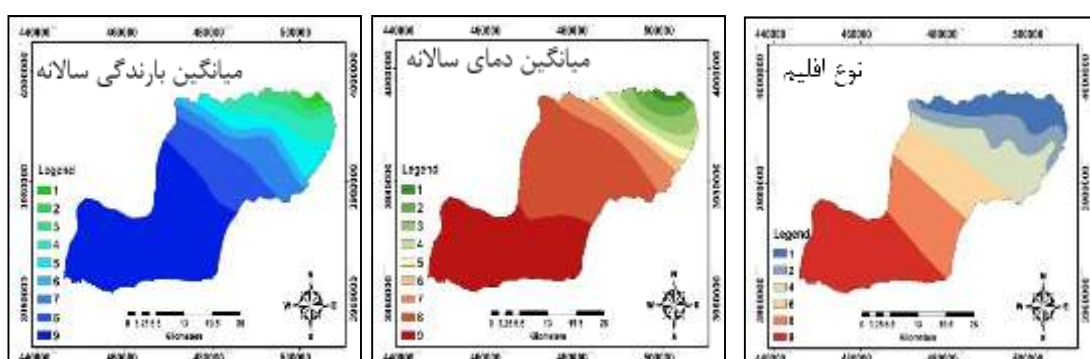
به منظور اعتبارسنجی از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و مساحت سطح زیر این منحنی (AUC) استفاده شد. محور عمودی منحنی نشان دهنده درصد Sensitivity یا حساسیت است و محور افقی آن نشان دهنده Specificity یا ویژگی. مقدار AUC نشان دهنده احتمال این موضوع است که یک پیکسل انتخاب شده به طور تصادفی دارای پیش بینی صحیح باشد. بر این اساس، هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه های پهنه بندی تهیه شده است (پرادهان^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

۳- بحث و نتایج

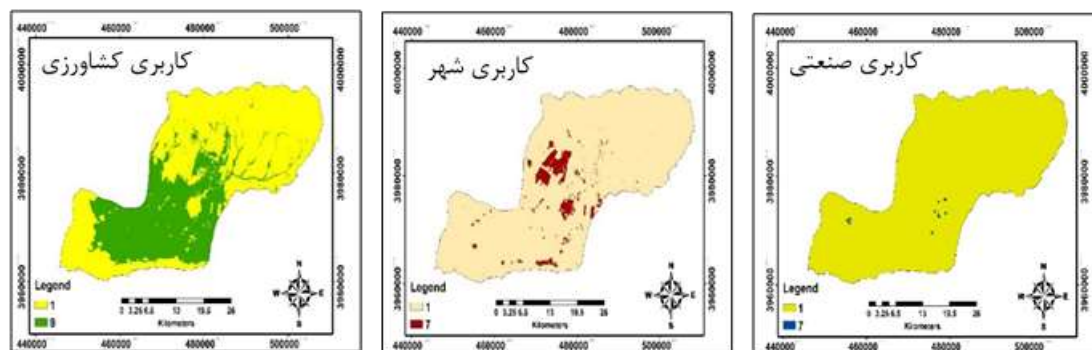
در این پژوهش، ۲ بعد فیزیکی - شیمیایی و اجتماعی - اقتصادی مشتمل بر ۵ معیار و ۱۹ زیرمعیار برای تعیین پهنه های مستعد فرونشست تدوین گردید و در ادامه بر اساس روش Z-Score استاندارد شدند. شکل های (۳) تا (۷) نقشه های هر یک از معیارها را در تعیین پهنه های مستعد فرونشست نشان می دهد.



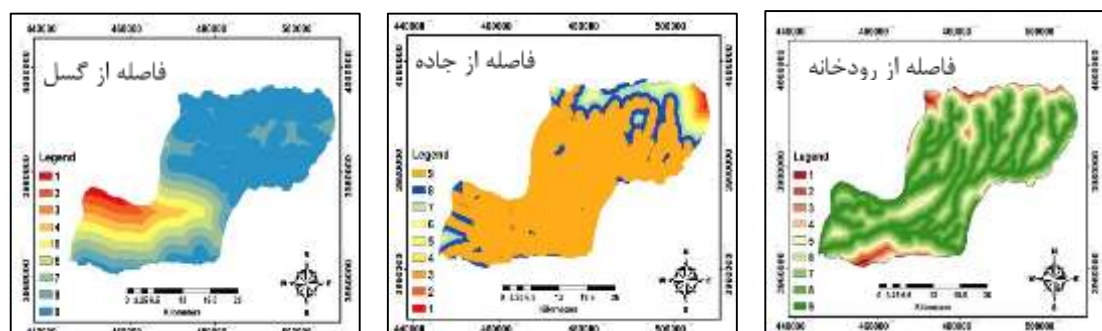
شکل ۳- طبقه‌بندی معیارهای هیدرولوژی در پهنه‌بندی فرونشست



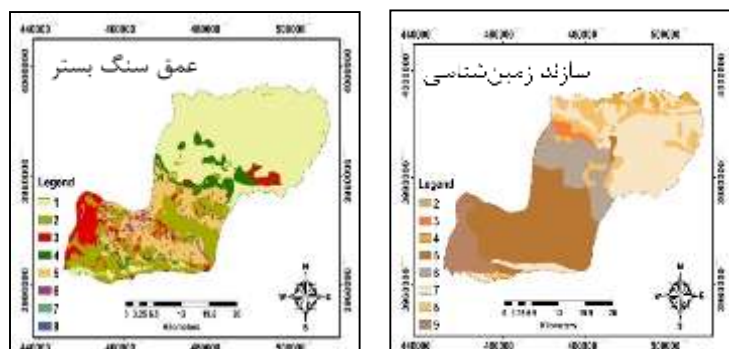
شکل ۴- طبقه‌بندی معیارهای هوا و اقلیم در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۵- طبقه بندی معیارهای کاربری اراضی در پهنه بندی فرونشست



شکل ۶- طبقه بندی معیارهای حرایم در پهنه بندی فرونشست



شکل ۷- طبقه بندی معیارهای زمین شناسی در پهنه بندی فرونشست

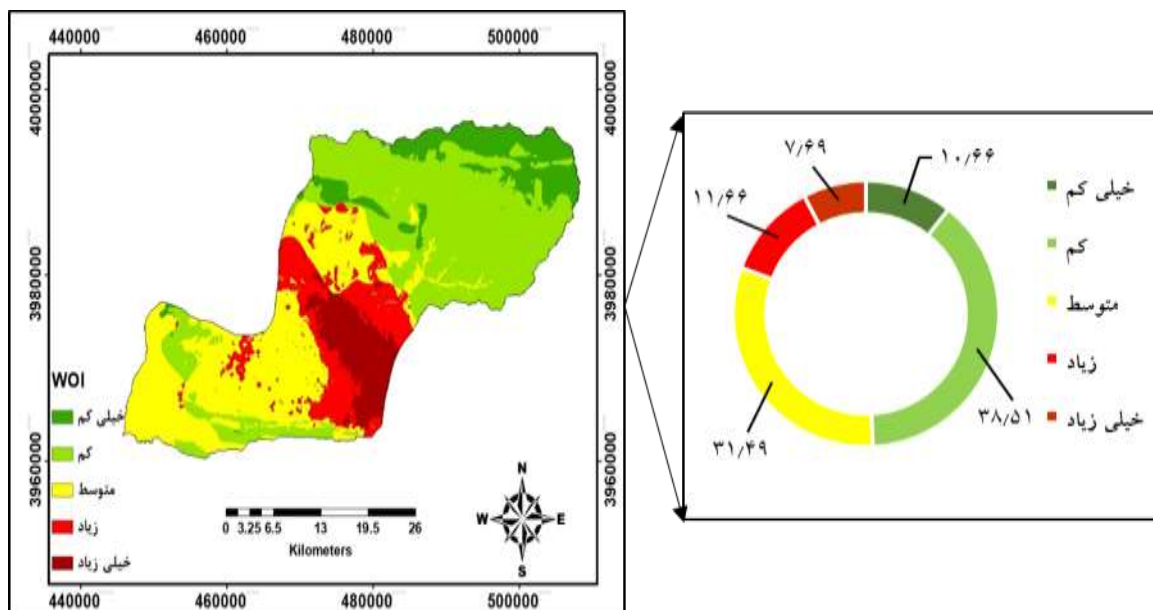
در ادامه، ۲۰ عدد پرسشنامه بین کارشناسان ژئومورفولوژی و زمین شناسی توزیع و با استفاده از مدل BWM وزن معیارها و زیرمعیارها محاسبه گردید. برای این کار، در ابتدا بر اساس نظر کارشناسان مهم ترین و کم اهمیت ترین زیرمعیار مشخص شد؛ در ادامه، پرسشنامه ها در دو بخش (بخش اول مقایسه بهترین زیرمعیار با سایر زیرمعیارها و بخش دوم مقایسه سایر زیرمعیارها با بدترین زیرمعیار) بین کارشناسان توزیع شدند تا بر اساس اصطلاحات زبانی آن

زیرمعیارها را با یکدیگر مقایسه کنند. در ادامه، پس از جمع‌آوری اطلاعات، اعداد مربوطه وارد نرم‌افزار LINGO شد تا بر اساس آن وزن زیرمعیارها محاسبه گردد. سپس با میانگین‌گیری از تمام خبرگان، ضریب اهمیت و یا وزن هر یک از معیارها مطابق **جدول (۳)** به‌دست آمد. از آنجایی که * Σ بیانگر میزان سازگاری یک مقایسه می‌باشد، این شاخص برای همه کارشناسان در این پژوهش نزدیک به صفر است که می‌توان نتیجه گرفت نتایج به‌دست آمده سازگاری بسیار خوب داشته است و قابل قبول بوده است.

جدول ۳- میزان اهمیت معیارهای مؤثر بر فرونشست دشت هشتگرد

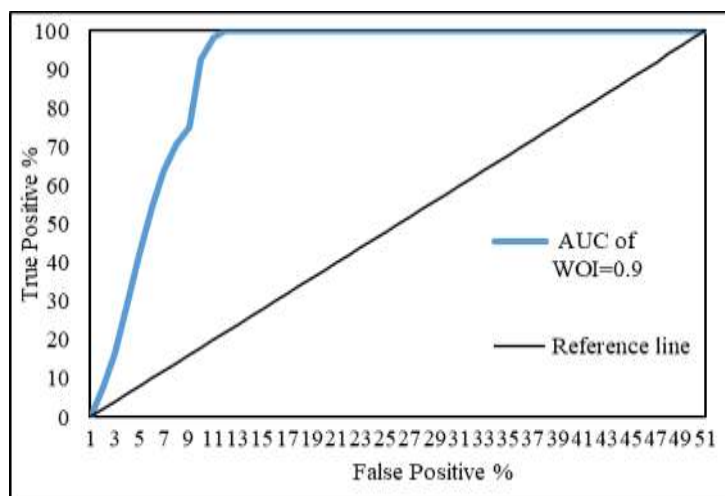
رتبه	وزن نهایی	وزن	زیرمعیار	معیار	بعد		
۳	۰/۰۷۹	۰/۱۳۶	افت سطح آب زیرزمینی	هیدرولوژی ۰/۶۸	فیزیکی - شیمیایی ۰/۸۵۸		
۱	۰/۲۱۹	۰/۳۷۵	برداشت آب زیرزمینی				
۸	۰/۰۴۸	۰/۰۸۲	ضخامت آبخوان				
۷	۰/۰۶	۰/۱۰۲	ضخامت آبرفت				
۱۰	۰/۰۳۴	۰/۰۵۸	تغذیه آبخوان				
۹	۰/۰۴	۰/۰۶۸	تراکم چاه‌ها				
۱۳	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳	تراکم زهکشی				
۴	۰/۰۷۸	۰/۱۳۶	عمق آب زیرزمینی	زمین‌شناسی ۰/۲۲			
۲	۰/۱۵۷	۰/۸۳۳	نوع سازند زمین‌شناسی				
۱۱	۰/۰۳۲	۰/۱۶۷	عمق سنگ‌بستر	اقلیم ۰/۱			
۶	۰/۰۶۴	۰/۷۴۳	میزان بارش سالانه				
۱۷	۰/۰۰۹	۰/۱	متوسط دمای سالانه				
۱۵	۰/۰۱۳	۰/۱۵۷	نوع اقلیم سرزمین	کاربری اراضی ۰/۸			
۱۲	۰/۰۲۶	۰/۲۳۳	کاربری کشاورزی				
۱۶	۰/۰۱۰	۰/۰۸۴	کاربری شهری				
۵	۰/۰۷۷	۰/۶۸۳	کاربری صنعتی	حرایم ۰/۲			
۱۸	۰/۰۰۶	۰/۲۲۵	فاصله از رودخانه‌ها				
۱۹	۰/۰۰۴	۰/۱۲۵	فاصله از جاده‌ها				
۱۴	۰/۰۱۸	۰/۶۵	فاصله از گسل‌ها				

بر اساس روش BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد دارند. در این مرحله، لایه‌ها با استفاده از شاخص همپوشانی وزین جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست ادغام شدند که در **شکل (۸)** نشان داده شده است.



شکل ۸- پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست بر اساس روش شاخص هم‌پوشانی وزنی در دشت هشتگرد

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۱۰/۶۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به طبقه خیلی کم‌خطر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/۴۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/۶۶ درصد به طبقه پرخطر و در نهایت ۷/۶۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بر طبق نقشه خروجی، نیمه مرکزی دشت هشتگرد حساسیت بیشتری برای فرونشست دارد و امکان وقوع این مخاطره در این بخش حوضه بسیار زیاد می‌باشد. هم‌پوشانی این نقشه با نقشه معیارها نشان داد که بیشتر مناطق آسیب‌پذیر به فرونشست در نزدیکی گسل‌ها، مناطقی با بیشترین برداشت آب زیرزمینی، اراضی کشاورزی و در مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی اتفاق افتاده است. در نهایت، به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل برای پهنه‌بندی خطر فرونشست، از منحنی ROC و سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. بدین منظور نقاط برداشت شده و مقادیر عددی متناظر با آن‌ها در نقشه نهایی پتانسیل فرونشست وارد محیط نرم‌افزار SPSS شد و منحنی ROC محاسبه شد. سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹ درصد است که عملکرد بسیار خوب مدل و کارایی آن برای پهنه‌بندی فرونشست را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمودار ارزیابی عملکرد مدل بر اساس منحنی‌های ROC

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای ارزیابی پتانسیل وقوع فرونشست در دشت هشتگرد از ۱۹ زیرمعیار تأثیرگذار در وقوع فرونشست، شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل استفاده و با مدل BWM وزن‌دهی شدند. بر اساس مدل BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل رخداد فرونشست در دشت هشتگرد دارند.

در نهایت، با تلفیق وزن معیارها و نقشه‌های استاندارد شده معیارها، نقشه نهایی پتانسیل مناطق مستعد وقوع فرونشست در دشت هشتگرد به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مناطق مرکزی دشت هشتگرد ریسک بالایی نسبت به رخداد فرونشست زمین دارند. همچنین، بررسی مساحت هر یک از کلاس‌ها نشان داد که ۱۰/۶۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به طبقه خیلی کم‌خطر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/۴۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/۶۶ درصد به طبقه پرخطر و در نهایت ۷/۶۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بنابراین، بر اساس نتایج نقشه حساسیت تهیه شده فرونشست‌ها و نیز با توجه به تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، نتایج این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در پیشگیری از این مخاطره محیطی و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و جلوگیری از برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی کمک شایانی نماید.

همچنین، نگارندگان بر این باورند که در تحقیقات آینده، استفاده از روش‌های دیگر همچون ماشین یادگیری و مقایسه نتایج آن با نتایج این پژوهش می‌تواند نقش مؤثری در افزایش دقت و کارایی نتایج داشته باشد. همچنین پایش و بررسی جامع وضعیت فرونشست منطقه با بهره‌گیری از آنالیز سری‌های زمانی تصاویر راداری می‌تواند کمک شایانی در طرح‌های آمایش سرزمین و طرح‌های آبخیزداری داشته باشد.

کتابنامه

- ابراهیمی، عطرتین؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *جغرافیا و روابط انسانی*. دوره ۲، شماره ۴، صص ۴۱-۲۹.
https://www.gahr.ir/article_105079.html
- پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب؛ ۱۳۹۲. پیش‌بینی فرونشست ناشی از بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی ترکیبی و تکنیک تداخل‌سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری. مؤسسه تحقیقات آب.
<https://www.wri.ac.ir/research-institute-of-water-resources-studies-and-research/>
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۸۶. گزارش آب زمین‌شناسی دشت هشتگرد- طرح فرونشست زمین در محدوده استان تهران (جلد دوم). شرکت توسعه علوم زمین.
<https://www.ngdir.ir/down/443>
- شریفی‌کیا، محمد؛ افضلی، عباسعلی؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال چهارم، شماره ۲، صص ۷۴-۶۰.
http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77991.html
- شریفی‌کیا، محمد؛ مال‌امیری، نعمت؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. سنجش آسیب‌پذیری سکونت‌گاه‌ها و تأسیسات از منظره مورفولوژیکی فرونشست در بخشی از جنوب شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۲، شماره ۱، صص ۹۱-۱۰۶.
<https://doi.org/10.22067/geo.v2i1.21020>
- شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلا گلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۸. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال هشتم، شماره ۴، صص ۹۳-۱۱۱.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424>
- عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلا؛ اصغری، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۱۳۶-۱۵۵.
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.215108.1214>
- محرمی، میثم؛ ارگانی، میثم؛ ۱۳۹۹. پتانسیل‌یابی مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل FBWM (مطالعه موردی: شهر تبریز). *آمایش سرزمین*. دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۵۹۳-۵۷۱.
<https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.295295.670058>

مهرابی، علی؛ غضنفرپور، حسین؛ ۱۳۹۸. پایش روند تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شهر کرمان و تعیین مناطق پرخطر با استفاده از تصاویر راداری ASAR و SENTINEL 1. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۸، شماره ۲. صص ۱۸۲-۱۶۷. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.77132>

ندیری، عبدالله؛ طاهری، زینب؛ برزگری، قدرت؛ دیده‌بان، خلیل؛ ۱۳۹۷. ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره ۱۴، شماره ۲. صص ۱۹۴-۱۸۲. http://www.iwrr.ir/article_53792.html

نگهبان، سعید؛ پی سوزی، تینا؛ گنجائیان، حمید؛ نوروزی، میلاد؛ ۱۴۰۰. شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰، شماره ۳. صص ۱۸-۱.

<https://doi.org/10.22067/geoe.2021.71728.1094>

Abidin H.Z, Andreas H, Gumilar I, Sidiq T.P, Gamal M., 2015. Environmental impacts of land subsidence in urban areas of Indonesia. In FIG Working Week (pp. 1-12). Sofia, Bulgaria: TS 3-Positioning and Measurement. <https://www.oicrf.org/-/fig-working-week-2015-from-the-wisdom-of-the-ages-to-the-challenges-of-modern-world>

Arabameri A, Lee, S, Rezaie F, Chandra Pal S, Asadi Nalivan O, Saha A, Chowdhuri I, Moayed H., 2021. Performance evaluation of GIS-based novel ensemble approaches for land subsidence susceptibility mapping. *Frontiers in Earth Science*, 9, 307. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.663678>

Chen, B., Gong, H., Lei, K., Li, J., Zhou, C., Gao, & M., et al., 2019. Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.003>

Conforti M, Muto F, Rago V, Critelli S., 2014. Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy), *Maps*, 10(1), 90-102. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.852142>

Desir G, Gutiérrez F, Merino J, Carbonel D, Benito-Calvo A, Guerrero J, Fabregat I., 2018. Rapid subsidence in damaging sinkholes: measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution. *Geomorphology*, 503, 393-409. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.004>

Faunt C.C, Sneed M, Traum J, Brandt J.T., 2016. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology*, 24(3), 675-684. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>

Galloway D.L, Jones D.R, Ingebritsen S.E., 1999. Land subsidence in the United States (Vol. 1182). US Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/circ1182_intro.pdf

Galloway, D. L., 2013. Subsidence induced by underground extraction. *Encyclopedia of Natural Hazards*, Springer, 979-985. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_336

Ghorbanzadeh O, Blaschke T, Aryal J, Gholaminia K., 2020. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping. *Spatial Science*, 65(3), 401-418. <https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1505564>

Hakim W.L, Achmad A.R, Lee C.W., 2020. Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3627-3653. <https://doi.org/10.3390/rs12213627>

- Hu B, Zhou J, Wang J, Chen Z, Wang D, Xu S., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China, *Environmental Earth Sciences*. 59(2), 269-276. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6>
- Huang B, Shu L, Yang Y.S., 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modeling. *Water Resources Management*, 26(14), 4225-4239. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y>
- Jeanne P, Farr T.G, Rutqvist J, Vasco D.W., 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Hydrology*, 569, 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Modoni G, Darini G, Spacagna R.L, Saroli M, Russo G, Croce P., 2013. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 167, 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014>
- Mohammadi M, Pourghasemi H.R, Amiri M., 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): A comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. *Natural Hazards*, 99(2), 951-971. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03785-z>
- Mokhtari M, Abedian S., 2019. Spatial prediction of landslide susceptibility in Taleghan basin, Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(7), 1297-1325. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01696-w>
- Nadiri A.A, Taheri Z, Khatibi R, Barzegari G, Dideban K., 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of the Total Environment*, 628, 1043-1057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031>
- Navarro-Hernández M.I, Tomás R, Lopez-Sanchez J.M, Cárdenas-Tristán A, Mallorquí J.J., 2020. Spatial Analysis of Land Subsidence in the San Luis Potosi Valley Induced by Aquifer Overexploitation Using the Coherent Pixels Technique (CPT) and Sentinel-1 InSAR Observation. *Remote Sensing*, 12(22), 3822. <https://doi.org/10.3390/rs12223822>
- Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Quere ´taro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84(3), 143-160. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003>
- Piscopo G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory Notes-Castlereagh Catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Australia. http://www.water.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/549377/
- Pradhan B, Abokharima M.H, Jebur M.N, Tehrany M.S., 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*, 73(2), 1019-1042. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1128-1> [quality_groundwater_castlereagh_map_notes.pdf](https://doi.org/10.1007/s11069-014-1128-1_quality_groundwater_castlereagh_map_notes.pdf)
- Rahmati O, Falah F, Naghibi S.A, Biggs T, Soltani M, Deo R.C, Artemi C, Mohammadi F, Bui D.T., 2019. Land subsidence modeling using tree-based machine learning algorithms. *Science of The Total Environment*, 672, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.496>
- Rahnema H, Mirassi S., 2016. Study of land subsidence around the city of Shiraz, *Scientia Iranica*. *Scientia Iranica*, 23(3), 882-895. <https://doi.org/10.24200/sci.2016.2167>
- Ranjgar B, Razavi-Termeh S.V, Foroughnia F, Sadeghi-Niaraki A, Perissin D., 2021. Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7), 1326. <https://doi.org/10.3390/rs13071326>

- Rezaei J., 2016. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- Sadeghfam S, Khatibi R, Dadashi S, Nadiri A.A., 2020. 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>
- Shrestha P.K, Shakya N.M, Pandey V.P, Birkinshaw S.J, Shrestha S., 2017. Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal. *Geomatics Natural Hazards Risk*, 8(2), 974–996. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289985>
- Sopata P, Stoch T, Wójcik A, Mrocheń D., 2020. Land Surface Subsidence Due to Mining-Induced Tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland)-Case Study. *Remote Sensing*, 12(23), 3923. <https://doi.org/10.3390/rs12233923>
- Tafreshi G.M, Nakhaei M, Lak R., 2019. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *GeoJournal*, 86(38), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10129-8>
- Tosi L, Teatini P, Strozzi T., 2013. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific reports*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/srep02710>
- UNESCO., 2018. Proposal for the establishment of the land subsidence international initiative (LaSII), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://www.usgs.gov/media/files/proposal-creation-land-subsidence-international-initiative>
- Wang Y. Q, Wang Z. F, Cheng W. C., 2019. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2851-2863. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1278-6>
- Zhang H, Yu J, Du C, Xia J, Wang X., 2019. Assessing risks from groundwater exploitation and utilization: Case study of the Shanghai megacity, China. *Water*, 11(9), 1775. <https://doi.org/10.3390/w11091775>
- Zheng Y.Y, Chen Y.L, Lin H.R, Huang S.Y, Yeh T.C, Wen J.C., 2017. A Simple Model to Describe the Relationship among Rainfall, Groundwater and Land Subsidence under a Heterogeneous Aquifer. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, (Vol. 2017, pp. H34A-08). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.H34A..08Z/abstract>
- Zhou C, Gong H, Chen B, Gao M, Cao Q, Cao J, Duan L, Junjie J, Shi, M., 2020. Land subsidence response to different land use types and water resource utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Remote Sensing*, 12(3), 457-479. <https://doi.org/10.3390/rs12030457>



Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms

Sayyad Asghari Saraskanrood^{a*}, Elnaz Piroozi^b, Leila Aghayary^c

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

^b PhD in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

^c PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Received: 24 October 2022

Revised: 21 January 2023

Accepted: 7 February 2023

Abstract

Among the risks facing the plains in Iran is subsidence, which causes many problems in agricultural lands, roads, power, and energy transmission lines. In recent years, Sarab plain has faced a sharp drop in the level of underground water, which has caused this area to be exposed to the risk of subsidence. Therefore, the purpose of this research is to investigate and analyze the most important factors involved in creating the risk of subsidence in Sarab plain and to identify the susceptible surfaces that are likely to be involved in subsidence in the future, using the multi-criteria MARCOS and CODAS algorithms. According to the results of subsidence risk zoning, water depth, land use, and slope, respectively, with weight coefficients of 0.194, 0.171, and 0.159, are the most important factors involved in creating the risk of subsidence in the studied area. The output of the MARCOS method showed that, respectively, 167.50 and 276.09 square kilometers of the area of Sarab Plain, and results of applying the CODAS method, showed that 187.13 and 279.03 square kilometers of the area are in the high-risk and critical category. In addition, the map extracted from the MARCOS and CODAS algorithms with the depth of the water level of the wells, respectively, have correlation coefficient values of 0.77 and 0.81. A correlation can be seen between the output of both methods with the water level map. It seems that the results of this study can be of great help to organizational managers and land and soil resource planners for protecting and managing water resources and natural hazards and preventing land degradation.

Keywords: Subsidence, Zoning, Sarab Plain, Multi-Criteria Analysis Algorithms

*. Corresponding author: Sayyad Asghari Saraskanrood E-mail: s.asghari@uma.ac.ir Tel: + 989104020251

How to cite this Article: Asghari Saraskanrood, S., Piroozi, E., & Aghayary, L. (2023). Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 149-171.

DOI:10.22067/geoh.2023.79331.1291



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79331.1291> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۷۱-۱۴۹

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره

CODAS و MARCOS

صیاد اصغری سراسکانرود^۱ - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

الناز پیروزی - دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

لیلا آقاییاری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

چکیده

یکی از مخاطرات پیش روی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست است که سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی می‌گردد. دشت سراب نیز در طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده که این عامل سبب گردیده تا این منطقه در معرض وقوع مخاطره فرونشست قرار گیرد. هدف این پژوهش بررسی و تحلیل مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست دشت سراب و مشخص کردن سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر فرونشست خواهند شد، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های چند معیاره CODAS و MARCOS است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای عمق آب، کاربری اراضی و شیب؛ به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۹۴، ۰/۱۷۱ و ۰/۱۵۹، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می‌باشند. با توجه به خروجی حاصل از روش MARCOS، به ترتیب؛ ۱۶۷/۵۰ و ۲۷۶/۰۹ کیلومترمربع از مساحت دشت سراب و طبق نتایج حاصل از به‌کارگیری روش CODAS، ۱۸۷/۱۳ و ۲۷۹/۰۳ کیلومترمربع

Email: s.asghari@uma.ac.i

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۰۴۰۲۰۲۵۱

نحوه ارجاع به این مقاله:

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ پیروزی، الناز؛ آقاییاری، لیلا؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری

از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره CODAS و MARCOS. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۱۷۱-۱۴۹

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79331.1291>

از مساحت محدوده، در طبقه پرخطر و بحرانی قرار دارد. به علاوه، نقشه مستخرج از الگوریتم MARCOS و CODAS با عمق سطح آب چاه‌ها به ترتیب؛ دارای مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۱ و ۰/۷۷ می‌باشند و بین خروجی هر دو روش با نقشه سطح آب همبستگی دیده می‌شود. به نظر می‌رسد، نتایج حاصل از مطالعه حاضر، می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک، در زمینه حفاظت و مدیریت منابع آبی و مخاطرات طبیعی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، پهنه‌بندی، دشت سراب، الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره.

۱- مقدمه

فرونشست زمین به‌عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۴). فرونشست به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز روی می‌دهد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹). هرچند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱). فرونشست سبب تخریب کانال‌های آبیاری، شکست خطوط لوله‌های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه‌ها و تشدید فرایند زمین‌لغزه و سیلاب‌ها می‌شود و در صورت عدم شناخت این پدیده سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی می‌گردد (گامبولاتی و همکاران^۱، ۲۰۱۸). فرونشست زمین در ایران سابقه‌ای طولانی دارد، در گذشته تنها برخی از استان‌ها از جمله کرمان و یزد با این مسئله مواجه بودند ولی هم‌اکنون بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی سبب شده تا بسیاری از دشت‌های ایران با مسئله فرونشست مواجه باشند. بر اساس آمار اعلام شده در کشور ایران، اثرات سوء ناشی از رخداد فرونشست رقم پابینی نیست و به‌سرعت در حال ایجاد و گسترش در دشت‌های مختلف سراسر کشور است که عدم مدیریت و کنترل به‌موقع عوامل آن می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری برجای بگذارد (مستظریون و اصلانی، ۱۳۹۸).

باید توجه داشت که از یک‌سو، یکی از مهم‌ترین راهکارهای کنترل فرونشست در مناطق بر اساس تجارب جهانی، روش‌های غیر سازه‌ای کاهش‌دهنده و تطبیق‌دهنده است (آبیدین و همکاران^۲، ۲۰۱۵) و از سوی دیگر، اندازه‌گیری رخداد فرونشست در مقیاس وسیع به دلیل نرخ کند آن چالش‌برانگیز است و نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد. امروزه سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات

1 Gambolati et al

2 Abidin et al

مدیریت ریسک هستند (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶) و همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود (آهر و همکاران^۱، ۲۰۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ عرب عامری و همکاران^۳، ۲۰۱۸). لذا می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد.

با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به ارزیابی خطر فرونشست زمین در پهنه استان‌های تهران و البرز پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد، مناطق وسیعی در استان تهران از جمله غرب و جنوب غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز از جمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند و آنچه باعث ایجاد خطر فرونشست می‌گردد، عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی در سطح استان است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل سنجی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه، در طی بازه زمانی یک‌ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم‌افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)، پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوبین را با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای_ فازای مورد مطالعه قراردادند. با توجه به نتایج مطالعه حدود ۵۶ درصد از مساحت محدود و شامل قسمت مرکزی دشت دارای احتمال خطر زیاد تا خیلی زیاد است و تراکم بالای چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و افت بالای آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه، به عنوان دلیل اصلی استعداد بالای فرونشست محدوده مشخص شد. روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP، در دشت شبستر- صوفیان، مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج مطالعه، مناطق جنوبی و غربی دشت شبستر- صوفیان مستعد فرونشست زیاد تا خیلی زیاد بوده است و این مناطق منطبق بر کاربری‌های کشاورزی و مراتع می‌باشند. اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۱)، به برآورد و

1 Aher et al

2 Georgiou et al

3 Arab Ameri et al

پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چند معیاره ARAS پرداختند و نتایج مطالعه نشان داد، فرونشست در محدوده بین صفر تا ۳۰۰ میلی‌متر بوده و به ترتیب ۱۳۵/۵۵ و ۱۹۲/۲۸ کیلومترمربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد است. به‌علاوه مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش پتانسیل فرونشست محدوده، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب است. **گامبولاتی و همکاران^۱** (۲۰۱۸)، در پژوهشی به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. **مین و همکاران^۲** (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل مؤثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. **هوانگ و همکاران^۳** (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. **رنجبر و همکاران^۴** (۲۰۲۱)، به بررسی حساسیت فرونشست زمین، در شهرستان شهریار با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین‌پرداز پرداختند و به این نتیجه رسیدند، در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و برداشت بیشتر از آب‌های زیرزمینی؛ نرخ فرونشست افزایش یافته است. **گرج و همکاران^۵** (۲۰۲۲)، در پژوهشی، با استفاده از تکنیک InSAR، به مطالعه خطر فرونشست زمین در شهر دهلی هند، در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، پرداختند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، به‌طور تقریبی، ۱۰۰ کیلومترمربع از مساحت منطقه در معرض خطر فرونشست زمین قرار دارد و گسترش و برداشت بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان علت اصلی فرونشست زمین، در منطقه است.

دشت سراب، از دشت‌های حاصلخیز استان آذربایجان شرقی است که اقتصاد جوامع ساکن در آن به کشاورزی و دامداری وابسته است. در این دشت به دلیل شرایط خشک حاکم بر منطقه و بارش دریافتی کم، کشاورزان علاوه بر آب‌های سطحی، از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مکمل برای آبیاری مزارع و باغات استفاده می‌کنند (**اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷**). لذا، در سال‌های اخیر این دشت با مشکل برداشت بی‌رویه آب و در نتیجه فقر سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست زمین روبه‌رو شده است. به‌طوری‌که کمیته مخاطرات زمینی سازمان نقشه‌برداری کشور نیز، در راستای ایفای نقش خود در زمینه پایش تغییرات سطحی پوسته زمین در کشور، طی نامه‌ای نرخ و گستره فرونشست

1 Gambolati et al

2 Minh et al

3 Huang et al

4 Ranjgar et al

5 Garg et al

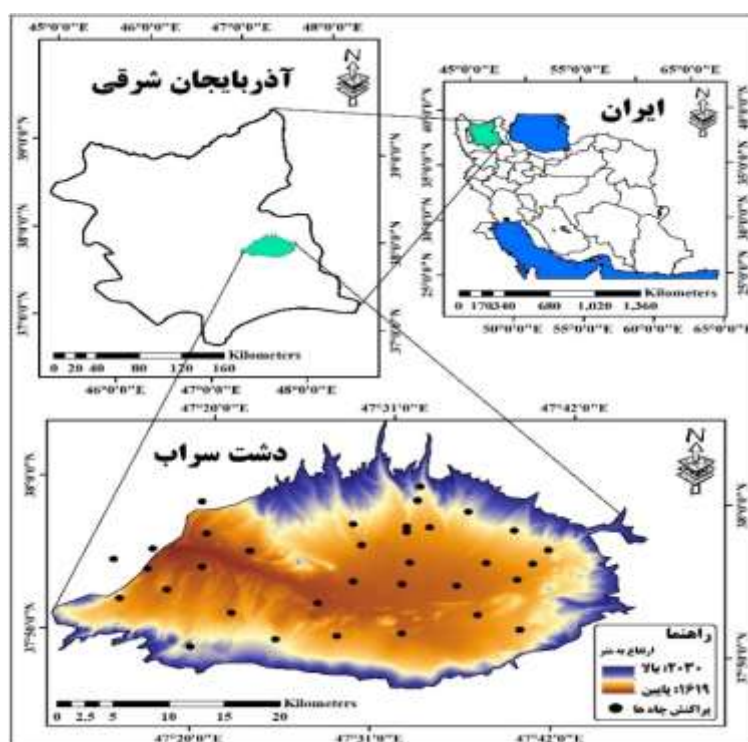
این منطقه را به وزارت جهاد کشاورزی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و فرمانداری شهرستان سراب اعلان نموده و نسبت به بروز مخاطرات این پدیده هشدار داده است (سایت سازمان نقشه‌برداری، ۱۴۰۰). با توجه به اهمیت موضوع، مطالعاتی نیز در راستای بررسی مسئله فرونشست در محدوده دشت سراب انجام شده است. به عنوان مثال؛ ناموری و صدری‌کیا (۱۳۹۹)، با استفاده از تصاویر راداری Sentinel و به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری نرخ فرونشست دشت سراب را ما بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد در دشت سراب فرونشست زمین با حداکثر نرخ سالانه حدود ۴ سانتیمتر وجود دارد و فرونشست در بخش‌های جنوبی شهر سراب نسبتاً قابل توجه است. صدری‌کیا (۱۴۰۱)، با استفاده از روش تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری، در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، به پایش فرونشست زمین در دشت سراب، پرداخته است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش در دشت سراب بیشینه فرونشستی حدود ۳۰/۵- میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره و حدود ۴۴/۸۵- میلی‌متر در سال در راستای قائم دیده می‌شود و در مناطق دارای فرونشست زیاد، کاهش سطح ایستابی وجود داشته و رابطه آماری بین سطح ایستابی و جابه‌جایی‌های سطح زمین معنی‌دار است و رابطه مستقیم بین دو متغیر وجود دارد. همان‌طور که بررسی پیشینه پژوهشی نشان می‌دهد، از یک سو مطالعات انجام شده در محدوده دشت سراب، صرفاً با هدف برآورد نرخ فرونشست بر پایه بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استوار بوده است و تاکنون مطالعه‌ای به منظور پهنه‌بندی سطح دشت سراب از لحاظ پتانسیل رخداد فرونشست انجام نشده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه فرونشست، از جمله مخاطراتی است که دارای طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، هستند، یکی از روش‌های کاربردی و موردتوجه در طی سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است؛ لذا هدف این مطالعه، شناخت و تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست دشت سراب و مشخص کردن سطوح مستعد فرونشست با ارائه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت سراب با مساحت ۹۱۸/۴۰ کیلومتر مربع، بین مدارهای ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه ۳ دقیقه و ۲۱ ثانیه شمالی و نصف‌النهارهای ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این دشت، در میان توده‌های عظیم آتشفشانی سبلان و رشته‌کوه‌های بزقوش واقع شده است و پیوستگی کوهستان سبلان و بزقوش، در شرق و شمال، این دشت را به صورت چاله بسته درآورده که فقط از گوشه شمال غربی باز است. دشت سراب شکل کشیده‌ای دارد و کشیدگی آن، در جهت شرقی - غربی می‌باشد. دشت سراب در محور رودخانه آجی‌چای و در امتداد شرقی - غربی واقع شده است و سفره آب‌های آزاد این دشت بیشتر از جریان آبی کوهستان‌های

سبلان و بزقوش، تأمین می‌شود. منابع آب سطحی دشت را بیوک‌چای، تاجیارچای، رازلیق‌چای، وانق‌چای تشکیل می‌دهند که از ارتفاعات اطراف سرچشمه می‌گیرند و بعد از روستای اندراب به هم پیوسته و با نام آجی‌چای از شرق به غرب جریان یافته و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزند (تلسچی امیرخیزی و همکاران، ۱۳۹۸). این دشت شش دره آبرفتی دارد که رسوبات آن‌ها در سمت پایین‌دست به هم ملحق می‌شوند و دشت سراب را به وجود می‌آورند. از نظر زمین‌ساختی، تشکیل دشت سویسیدانس سراب وابسته به فاز تکتونیکی میوپلیوسن است و این حوضه اغلب از رسوب‌های میوسن، پلیوسن کوتاه‌تر با ضخامت زیاد پوشیده شده است. گسل‌های متعددی در شکل‌گیری آن مؤثر بوده‌اند که در این میان گسل‌های دامنه شمالی بزقوش و دامنه جنوب سبلان، نقش اساسی در شکل‌گیری آن داشته‌اند. سازندهای زمین‌شناسی که در منطقه برونزد دارند، به ترتیب سنی از قدیم به جدید شامل؛ کنگلومرا و ماسه‌سنگ به سن پلیومیوسن Ngc، مارن ژیبسی ماسه‌سنگ دار به سن میوسن Mmg، ولکانیک‌های پلیوسن Plv، کنگلومرا و ولکانیک‌های پلیوکواترنر Plqv و PLqc و پادگانه‌های آبرفتی Qt به سن کوتاه‌تر است. نوع اقلیم دشت نیز، بر اساس روش آمبرژه، نیمه‌خشک سرد است.



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چند معیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای Arc GIS, ENVI, Idrisi, Excel بهره‌گیری شده است. جهت پهنه‌بندی، خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات موردنیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از شهر و روستا، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی)، با بررسی نمونه مطالعات انجام شده در رابطه با خطر فرونشست که توسط دیگر پژوهشگران صورت پذیرفته و عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست را بیان داشته‌اند ((مانند، کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)، اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۱)، روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، گامبولاتی و همکاران (۲۰۱۸)، تانگ مین و همکاران (۲۰۱۹)، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رنجبر و همکاران (۲۰۲۱) و گرج و همکاران (۲۰۲۲)) و با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه، شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه رودخانه‌های استان آذربایجان شرقی، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر لندست هشت، سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi، انجام شد. سپس طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها، چه از نظر تک‌تک کاربری‌ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولیدشده برخوردار می‌باشد. به منظور پایش سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات مربوط به ۳۴ چاه مشاهده‌ای سطح تراز پیزومتری دشت سراب (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی) استفاده گردید و سپس با توجه به اینکه تخمینگر کریجینگ بهترین تخمینگر خطی نأریب است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۷) و با نظر به مقادیر ضریب تعیین بالاتر، میزان خطا و واریانس تخمینی کمتر این روش در تهیه نقشه سطح آب نسبت به دیگر روش‌ها که (کماسی و همکاران، ۱۳۹۶)، (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷)، (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۱)، نیز در مطالعات خود بدان اشاره داشته‌اند، در نهایت با استفاده از روش کریجینگ،

نقشه عمق آب دشت سراب استخراج گردید. سپس با اجرای مراحل تکنیک مارکوس و کوداس نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست اقدام شد.

۲-۳- مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش مارکوس (MARCOS)

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش نیز به صورت معیار-گزینه است؛ یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۳- تعیین ایده آل و ضد ایده آل: در این بخش بر اساس روابط ۱ و ۲، مقادیر ایده آل (AI) و ضد ایده آل (AAI) مشخص می‌شود. در روابط زیر، عبارت B به معنی معیارهایی که جنبه سود و عبارت C به معنی معیارهای که جنبه هزینه دارند.

$$AI = \max x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \min x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۱}$$

$$AAI = \min x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \max x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۲}$$

۴- نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی: در پژوهش حاضر، جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین‌لغزش، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت. ۵- وزن دار کردن ماتریس نرمال: در این پژوهش، جهت وزندهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. ۶- محاسبه مطلوبیت هر گزینه: در این مرحله، بر اساس روابط ۳ و ۴، درجه مطلوبیت ایده -آل K^+ و ضد ایده آل K^- گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$K_{i+} = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$K_{i-} = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط فوق، $S_i (i=1,2,3,..m)$ جمع مقادیر هر سطر در ماتریس وزن دار می‌باشد که از رابطه ۵، به دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad \text{رابطه ۵}$$

۷- تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها: در این بخش با استفاده از رابطه ۶، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه می‌شود.

$$f(k_i) = \frac{k_i^+ + k_i^-}{1 + \frac{1-f(k_i^+)}{f(k_i^+)} + \frac{1-f(k_i^-)}{f(k_i^-)}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه فوق الذکر $f(k^-)$ عملکرد مطلوبیت ضد ایده-آل و $f(k^+)$ عملکرد مطلوب ایده آل برای هر گزینه است که از روابط ۷ و ۸، محاسبه می شود. سپس بر اساس اعداد به دست آمده از $f(k)$ ، هر گزینه رتبه بندی انجام می شود. هر کدام از گزینه ها مقدار $f(k)$ بزرگ تری داشت رتبه بهتری دارد (جهانگیری، ۱۳۹۹؛ جهانگیری، ۱۴۰۰).

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^+}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^-}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۸}$$

۲-۴- مراحل تهیه نقشه پهنه بندی خطر فرونشست با استفاده از روش کوداس (CODAS)

۱- تعیین معیارها و گزینه های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه های پژوهش است. ۲- دومین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است. در ماتریس تصمیم روش کوداس معیارهای آن ستون ها و سطرها آن گزینه های پژوهش هستند. ۳- سومین گام استانداردسازی ماتریس تصمیم می باشد که در این مطالعه، استانداردسازی و ارزش گذاری به صورت توأم با استفاده از روش فازی انجام شده است. ۴- تشکیل ماتریس نرمال وزن دار: باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کرد. در این پژوهش جهت وزن دار کردن ماتریس نرمال، از روش CRITIC استفاده شده است. ۵- محاسبه فواصل اقلیدسی (Euclidean distance) و تاکسی (Taxicab distances) از ایده آل منفی: این فواصل از روابط ۹ و ۱۰، به دست می آیند. در این روابط ns_j ایده آل منفی معیارها است.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad \text{رابطه ۱۰}$$

۶- ایجاد ماتریس ارزیابی نسبی: در این گام باید ماتریس ارزیابی نسبی را با استفاده از رابطه ۱۱، ایجاد شود که در این رابطه، Ψ نشان دهنده یک تابع آستانه برای تشخیص برابری فاصله اقلیدسی دو گزینه است.

$$h_{iK} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

۷- در این گام با جمع مقادیر h_{ik} گزینه‌ها، می‌توان آن‌ها را رتبه‌بندی نمود هر چه مقدار H_i بزرگ‌تر باشد گزینه رتبه بهتری دارد (متیو و ساهو^۱، ۲۰۱۸).

۲-۵- وزن‌دهی CRITIC^۲ (اهمیت معیارها، از طریق همبستگی بین معیارها)

در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، پس از محاسبه انحراف معیار معیارهای مورد بررسی، ماتریس مقارنی به ابعاد $m \times m$ ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار z با معیارهای دیگر از روی رابطه ۱۲، محاسبه می‌شود.

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن C_{jk} معرف مجموع تضاد معیار z با معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد و r_{jk} همبستگی بین دو معیار k و z را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل z را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۳، محاسبه نمود.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن C_j ، معرف میزان اطلاعات معیار z و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار z را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای C_j بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند z از رابطه ۱۴، تعیین می‌گردد.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن W_j معرف وزن معیار z و C_k نشانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها به دست می‌آید است (علی‌نژاد و خلیلی^۳، ۲۰۱۹). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کرتیک ابتدا در محیط ادریسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل، با استفاده از تابع REGRESS، به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل، اقدام گردید.

1 Mathew & Sahu

2 CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation

3 Alinezhad & Khalili

۲-۶- استانداردسازی فازی

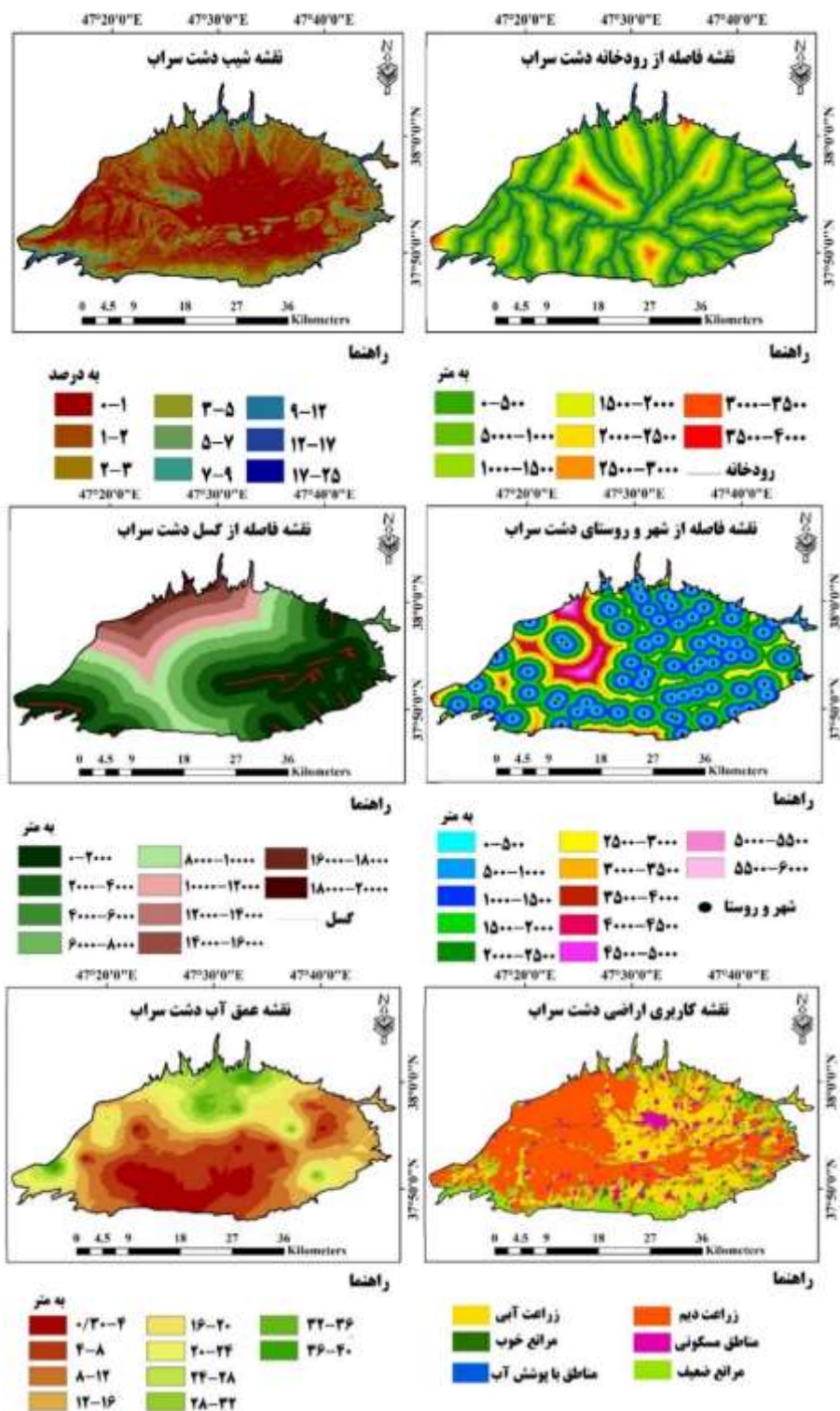
در پیاده سازی تمامی الگوریتم های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه بندی مکانی خطر فرونشست در دشت سراب، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد نمودن داده ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می گیرد (حسینی^۱، ۲۰۱۹).

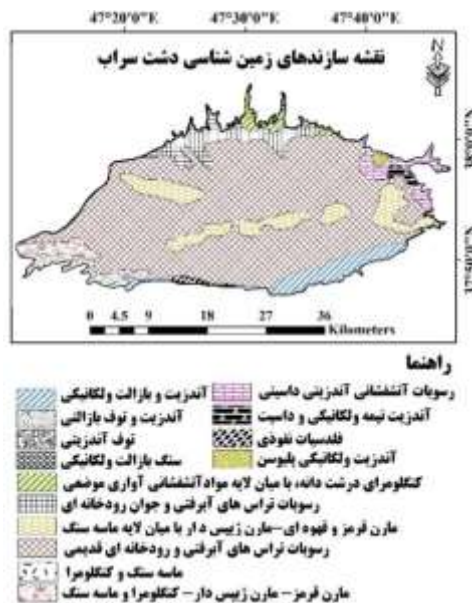
جدول ۱- نوع توابع فازی ساز لایه های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با کاهش مقدار شیب، خطر فرونشست افزایش می یابد.	تابع خطی کاهشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور از شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور خطوط گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با افزایش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می یابد.	تابع خطی افزایشی

۳- نتایج و بحث

پس از استخراج نقشه های هر یک از معیارها (شکل ۲) و اعمال کردن وزن های مربوطه حاصل از روش کرتیک (جدول ۲) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک های مارکوس و کوداس، نقشه های پهنه بندی خطر فرونشست در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (شکل ۳). با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، بیشترین وزن و اهمیت را دریافت کردند و با توجه به اینکه در وزندهی کرتیک، وزن معیارها، با توجه به نقشه های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه های اطلاعاتی مورد استفاده، تعیین می گردد، استفاده از این روش، در وزندهی معیارها در پژوهش حاضر می تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسه زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرایند تحلیل شبکه ای وجود دارد را برطرف نماید.



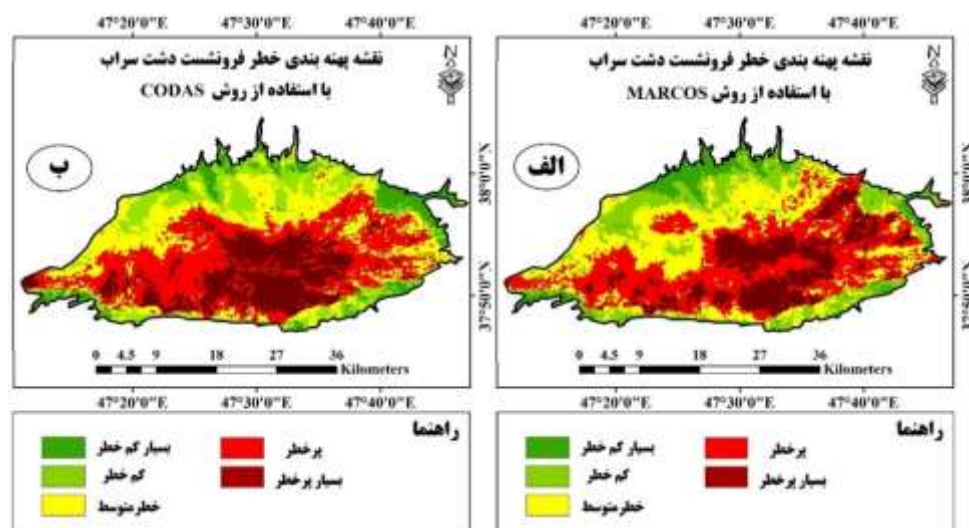


شکل ۲- نقشه معیارهای مطرح در پهنه بندی خطر فرونشست دشت سراب

جدول ۲- مجموع تضاد، انحراف معیار، میزان اطلاعات و وزن نهایی معیارهای مطرح

معیار	مجموع تضاد	انحراف معیار	میزان اطلاعات	وزن نهایی
زمین شناسی	۲/۹۱۴	۰/۲۵۳	۰/۷۳۷	۰/۱۲۳
کاربری اراضی	۲/۸۷۴	۰/۳۵۵	۱/۰۲۲	۰/۱۷۱
فاصله از گسل	۲/۲۳۷	۰/۳۱۵	۰/۷۰۶	۰/۱۱۸
شیب	۳/۱۴۸	۰/۳۰۳	۰/۹۵۴	۰/۱۵۹
فاصله از رودخانه	۲/۸۷۸	۰/۲۳۵	۰/۶۷۸	۰/۱۱۳
سطح آب	۳/۲۳۹	۰/۳۵۷	۱/۱۵۹	۰/۱۹۴
فاصله از شهر و روستا	۲/۸۷۳	۰/۲۴۸	۰/۷۱۴	۰/۱۱۹

با توجه به خروجی حاصل از به کارگیری روش مارکوس، ۱۶۷/۵۰ کیلومترمربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۲۷۶/۰۹ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد و طبق نتایج حاصل از به کارگیری روش کوداس، ۱۸۷/۱۳ و ۲۷۹/۰۳ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد (جدول ۳). به طور کلی؛ با توجه به نتایج هر دو روش مورد استفاده، بخش اعظمی از کلاس بسیار پرخطر و پرخطر از لحاظ احتمال وقوع فرونشست با راستای شرقی-غربی و در قسمت مرکزی دشت، قرار گرفته است.



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت سراب الف: با استفاده از الگوریتم MARCOS، ب: با استفاده از الگوریتم CODAS

جدول ۳- اطلاعات طبقات خطر فرونشست دشت سراب با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

MARCOS و CODAS

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	طبقه خطر	
۶۷/۷۵	۱۵۲/۳۸	۲۵۴/۶۸	۲۷۶/۰۹	۱۶۷/۵۰	مساحت به کیلومتر مربع	MARCOS
۷/۳۷	۱۶/۶۰	۲۷/۸۳	۳۰/۰۶	۱۸/۲۴	مساحت به درصد	
۷۹/۹۰	۱۴۳/۲۸	۲۲۹/۰۶	۲۷۹/۰۳	۱۸۷/۱۳	مساحت به کیلومتر مربع	CODAS
۸/۷۰	۱۵/۰۶	۲۴/۹۴	۳۰/۳۸	۲۰/۳۸	مساحت به درصد	

کاربری اراضی یکی از مؤلفه‌های اساسی در پژوهش و بررسی فرونشست و نیز پهنه‌بندی این خطر در یک منطقه می‌باشد و نوع کاربری زمین، خصوصیات سطحی زمین را تحت تأثیر خود قرار داده و موجب تغییر رفتار مواد آن در مقابل فرآیندهای زمین‌شناسی منطقه، می‌گردد. انواع کاربری در دشت سراب به‌صورت نواحی انسان‌ساخت (مسکونی)، مرتع خوب، مرتع ضعیف، پوشش برف دائمی، دیم‌زار، زراعت آبی و مناطق آبی می‌باشد. بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط هر دو الگوریتم مارکوس و کوداس، نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری‌های زراعی و مناطق شهری، بیشترین مقدار از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. دشت سراب، شهر سراب را احاطه کرده و دارای کشتزارها و مراتع وسیع است و به‌طور کلی؛ این دشت به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی مناسب، محدودیت کمی جهت توسعه فعالیت‌های کشاورزی دارد. در واقع نداشتن اختلاف ارتفاع، نداشتن شیب زیاد (دشت سراب دارای زمین‌های نسبتاً هموار کم

شیبی است که شیب آن به کمتر از ۵ درصد می‌رسد)، وجود رسوبات آبرفتی مناسب در کنار عوامل اقتصادی منطقه، سبب شده است تا فعالیت‌های کشاورزی این منطقه با گسترش زیادی همراه باشد (شکل ۴)، به طوری که بر اساس نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی، به ترتیب؛ ۲۷۵/۸۴ و ۴۴۲/۲۲ کیلومترمربع از مساحت دشت به اراضی زراعت آبی و دیم، اختصاص داده شده است و سراب را به یکی از قطب‌های کشاورزی و دامداری استان آذربایجان شرقی تبدیل کرده است و حتی زمین‌هایی که قبلاً در آن‌ها کشت صورت نگرفته بود با ورود ماشین‌آلات جدید کشاورزی به منطقه شخم زده شده است که همین عامل سبب بهره‌برداری بیش‌ازحد از سفره آب‌های زیرزمینی و افزایش پتانسیل رخداد خطر فرونشست، در طی سال‌های اخیر شده است.



شکل ۴- تصاویری از پراکنش اراضی کشاورزی واقع در دشت سراب

می‌توان بیان داشت که عوامل انسان‌ساخت مانند؛ زمین‌های کشاورزی، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین در اثر احداث ساختمان‌های بزرگ و تراکم زیرساخت‌ها میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست می‌شوند و در دشت سراب بخش اعظمی از آب موردنیاز جهت شرب نقاط شهری و روستایی، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و این امر نیز به نوبه خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدوده مورد مطالعه دخیل می‌باشد. به طور کلی، فاصله از مناطق شهری و روستایی در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۶۰۰۰ متر می‌باشد. از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، بر اساس خروجی حاصل از روش مارکوس، مناطق بسیار پرخطر در فاصله صفر تا ۲۵۰۰ متری و طبق نتایج حاصل از به‌کارگیری روش کوداس، در فاصله صفر تا ۳۰۰۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و در این مناطق به

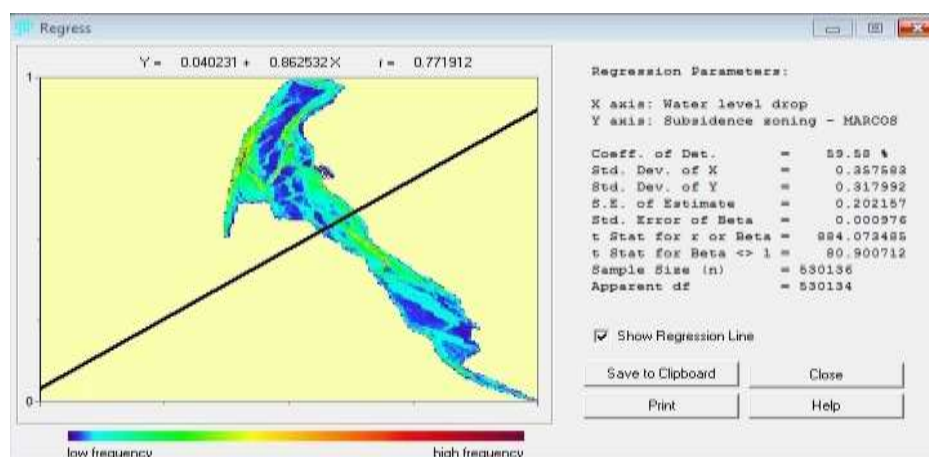
سبب تأمین نیازهای آبی جامعه سکونتگاهی و مناطق اطراف و همچنین تأمین نیازهای آبی بخش کشاورزی، دست‌اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب‌های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت نیز بالا بوده است. نمونه‌هایی از بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به صورت لوله‌کشی و پمپاژ آب چاه‌های حفر شده و تأمین نیازهای آبی اراضی کشاورزی واقع در دشت سراب، در شکل ۵، نمایش داده شده است.



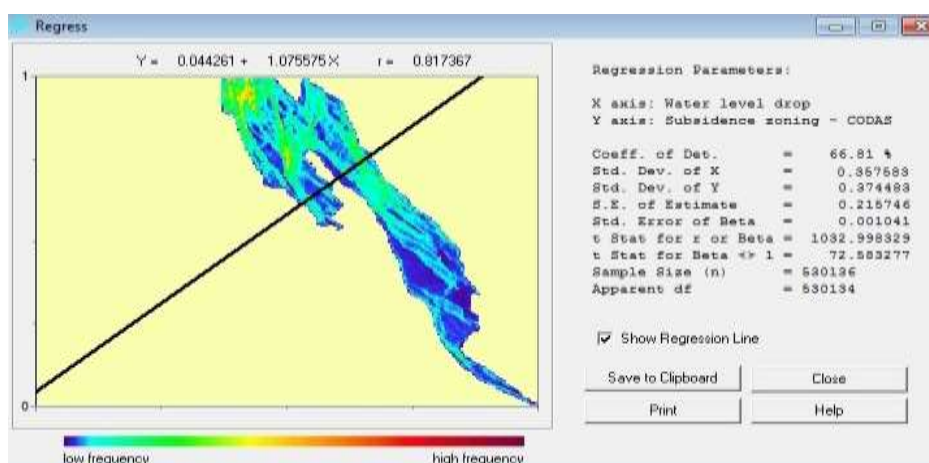
شکل ۵- نمونه‌هایی از استحصال آب‌های زیرزمینی و تأمین نیازهای آبی اراضی کشاورزی موجود در دشت سراب

اعمال فشار بیش‌ازحد بر آبخوان ممکن است موجب بروز پدیده فرونشست شود؛ از این رو به بررسی وضعیت سفره آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. با توجه به نقشه افت سطح آب مستخرج شده از داده‌های چاه‌های پیژومتری دشت سراب، بیشترین افت سطح آب در بخش میانی دشت (از عمق ۱۲ متر به ۰/۳۰ متر) مشاهده می‌شود که احتمال وقوع فرونشست نیز، در این قسمت از محدوده افزایش می‌یابد. ارتباط نقشه‌های نهایی حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشه معیار سطح آب محدوده مورد بررسی قرار گرفت و طبق نتایج حاصله، نقشه مستخرج از الگوریتم MARCOS، با عمق سطح آب چاه‌ها دارای مقدار ضریب همبستگی ۰/۷۷ می‌باشد (شکل ۶) و نقشه پهنه‌بندی فرونشست به دست آمده از الگوریتم CODAS، با نقشه عمق سطح آب چاه‌ها، ضریب همبستگی ۰/۸۱ را نشان می‌دهد (شکل ۷). می‌توان بیان داشت که بین خروجی هر دو روش با نقشه سطح آب همبستگی دیده می‌شود. **صدری‌کیا (۱۴۰۱)**، نیز در پژوهش خود؛ به این نتیجه دست یافته است که در دشت سراب، در مناطق دارای فرونشست زیاد، کاهش چندمتری سطح ایستابی وجود داشته و بین سطح ایستابی و جابه‌جایی‌های سطح زمین رابطه آماری معنی‌دار وجود دارد و رابطه بین دو متغیر مستقیم است. به علاوه ضریب تعیین روش CODAS، ۶۶/۸۱ درصد و ضریب تعیین روش MARCOS، ۵۹/۵۸ درصد می‌باشد؛ به عبارت دیگر طبق نتیجه حاصل از روش کوداس

۶۶/۸۱ درصد از علت وقوع فرونشست در دشت سراب، با نظر به مقایسه نقشه نهایی پهنه‌بندی حاصل از مدل با نقشه سطح آب، مربوط به معیار سطح آب است و ۳۳/۱۹ درصد از علت رخداد فرونشست دشت سراب به دیگر عوامل مربوط می‌باشد. همچنین؛ طبق مقایسه انجام شده بین نقشه نهایی پهنه‌بندی حاصل از روش مارکوس با نقشه سطح آب، معیار سطح آب، ۵۹/۵۸ درصد از علت وقوع فرونشست را نشان می‌دهد و ۴۰/۴۲ درصد از احتمال فرونشست محدوده با دیگر معیارها در ارتباط است. با نظر به نقش و اهمیت معیار افت سطح آب و با توجه به اینکه، معیار سطح آب بیش‌ترین وزن و اهمیت را در پتانسیل وقوع فرونشست در سطح دشت سراب دارد، می‌توان بیان کرد که میزان موفقیت روش CODAS، با توجه به مقایسه خروجی نهایی مدل با معیار سطح آب، از روش MARCOS، بیشتر است.



شکل ۶- رابطه همبستگی بین نقشه عمق سطح آب و خروجی حاصل از الگوریتم MARCOS



شکل ۷- رابطه همبستگی بین نقشه عمق سطح آب و خروجی حاصل از الگوریتم CODAS

ویژگی‌های سنگ‌شناسی به‌طور گسترده بر ویژگی‌های فیزیکی، مانند؛ استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسطحی و احتمال خطر فرونشست تأثیر می‌گذارد. از منظر سازندهای زمین‌شناسی، به‌طور کلی شهر سراب و روستاهای موجود در محدوده دشت سراب، بر روی رسوبات آبرفتی شکل گرفته‌اند و به‌طور عمده، بیشتر مساحت دشت سراب از واحدهای کواترنری (رسوبات پادگانه‌های آبرفتی و رودخانه‌ای قدیمی به مساحت ۶۳۰ کیلومتر مربع، رسوبات پادگانه‌های آبرفتی و رودخانه‌ای جدید به مساحت ۵۷/۰۸ کیلومتر) و آندزیت و بازالت آتشفشانی به مساحت ۴۷/۵۰ کیلومتر مربع و مارن قرمز و قهوه‌ای، مارن ژپس‌دار با میان لایه‌های ماسه سنگ به مساحت ۳۳/۴۷ کیلومتر مربع، است. بررسی مناطق بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط هر دو الگوریتم نیز نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار زمین‌شناسی، نقاط دارای احتمال خطر در رسوبات پادگانه‌های آبرفتی و رودخانه‌ای قدیمی و مارن قرمز و قهوه‌ای، مارن ژپس‌دار با میان لایه‌های ماسه سنگ قرار دارند و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب نسبی بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر است. مقدار شیب در محدوده مورد مطالعه، بین صفر تا ۲۵ درصد می‌باشد. محدوده شیب ۰-۲۰ کمترین میزان شیب در محدوده منطقه می‌باشد که این شیب نقش موثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد و هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی حاصل از هر دو الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش، از لحاظ معیار شیب، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های صفر تا ۵ درصد قرار دارند و به‌طور عمده بیشترین مقدار پیکسل‌های با احتمال خطر، دارای شیب کمتر از ۲ درصد، هستند.

به دلیل اثر گذاشتن فعالیت گسل‌ها (نظیر زلزله) بر روی فرونشست زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضرورت می‌یابد. گسل‌ها به‌نوبه خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. به‌گونه‌ای که هر چه میزان فاصله از خطوط گسل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرونشست بیش‌تر می‌شود. گسل‌های فراوانی در جهت مختلف در واحدهای سنگی اطراف دشت سراب دیده می‌شود. ولی مهم‌ترین آن‌ها، گسل میانی دشت سراب با جهت تقریبی شرقی-غربی است و تقریباً به موازات رودخانه آجی‌چای امتداد یافته است. این گسل از نوع فعال است و نشانه فعال بودن آن چین‌خوردگی و جابه‌جایی رسوبات نئوژن گاهی جوان‌تر است. در اثر فعالیت این گسل واحدهایی از کنگلومرا، مارن گچ‌دار ماسه سنگ خاکستری، مارن‌های با میان لایه آهکی و همچنین مارن خاکستری گچ‌دار و نمک‌دار در کنار هم قرار گرفته‌اند. با بررسی معیار فاصله از گسل به این نتیجه دست‌یافتیم که طبق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست به دست آمده از روش مارکوس، پهنه‌های با احتمال

خطر زیاد و بسیار زیاد در فاصله صفر تا ۸۰۰۰ متری، از گسل واقع شده‌اند و بر اساس نتایج حاصل از روش کوداس، مناطق پرخطر و بسیار پرخطر، در فاصله صفر تا ۱۲۰۰ متری، از گسل قرار دارند.

عامل نزدیکی به رودخانه به عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرونشست مطرح می‌باشد و با فاصله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. رودخانه‌های اصلی جاری در دشت سراب؛ بیوک‌چای، تاجیارچای، رازلیق‌چای، وانق‌چای می‌باشد و منابع تغذیه دشت عمدتاً آب‌های نفوذیافته از جریان‌های سطحی ارتفاعات حاشیه دشت و همچنین نفوذ آب حاصل از باران بر سطح دشت است. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. به طور کلی، فاصله از آبراهه‌ها در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۴۰۰۰ متر می‌باشد و با انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست حاصل از هر دو روش مورد استفاده در مطالعه حاضر، با نقشه معیار فاصله از رودخانه؛ می‌توان گفت که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله صفر تا ۲۰۰۰ متری از رودخانه قرار دارند.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره CODAS و MARCOS به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت سراب، پرداخته شده است. بررسی‌های انجام گرفته در این تحلیل نشان داد که به ترتیب؛ افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، در وقوع فرونشست محدوده مطالعاتی، بیشترین اهمیت را دادند و می‌توان گفت که مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست دشت سراب، بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی می‌باشد. در راستای تأیید نتیجه حاصله بایستی اشاره داشت که شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی نیز، اعلام کرده است که سالانه ۱۵ میلیون مترمکعب آب از چاه‌های مجاز سراب اضافه برداشت می‌شود و همچنین، **ناموری و صدری‌کیا (۱۳۹۹)**، **صدری‌کیا (۱۴۰۱)**، در پژوهشی که در رابطه با بررسی فرونشست دشت سراب انجام داده‌اند، به این نتیجه دست یافته بودند که عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی به افزایش میزان فرونشست در دشت سراب منجر شده است، لذا نتیجه پژوهش حاضر، با نتایج این مطالعات نیز، همخوانی دارد.

به علاوه، خروجی حاصل از هر دو روش MARCOS و CODAS، نشان‌دهنده توان بالای دشت سراب، از لحاظ خطر فرونشست می‌باشد و با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه آن، در محدوده

مورد مطالعه آسیب برساند، لازم است تا سازمان‌های متولی فرونشست زمین، مثل؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، شرکت آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، حفاظت از محیط‌زیست، منابع طبیعی و امور آبخیزداری و شهرداری‌ها، با انجام اقدامات مسئولانه و هم‌افزایی لازم، مانع کاهش ذخایر آبی و فرونشست‌های خطرآفرین برای حیات در منطقه انجام دهند. از این‌رو بایستی راهکارهای بلندمدت و کوتاه مدت، به‌صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، ساماندهی شرکت‌های حفاری، پایش مستمر مناطق مستعد فرونشست، ایجاد سدهای زیرزمینی به‌منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تزریق مصنوعی آب به سفره‌های زیرزمینی منطقه (طبق گفته رئیس اداره منابع آب شهرستان سراب که با توجه به آورده رودخانه‌های محلی، می‌توان سالانه حدود ۳ میلیون مترمکعب آب به این سفره‌ها تزریق کرد)، تهیه و نصب کتور هوشمند و کنترل برداشت آب، آموزش عمومی کشاورزان محلی، کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان ذی‌ربط و مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

در نهایت قابل ذکر است، همان‌گونه که می‌دانیم، هر یک از روش‌های مطالعه مخاطرات محیطی از جمله فرونشست، به‌نوبه خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. این امر که یک روش در یک منطقه تا چه حد از کارایی برخوردار است به شرایط طبیعی و انسانی محدوده بستگی دارد. انتظار می‌رود، نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی روش‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS، که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای با هدف پهنه‌بندی فرونشست مورد استفاده قرار نگرفته بوده‌اند، در امر انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر فرونشست، مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

کتابنامه

- ابراهیمی، عطرن؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *جغرافیا و روابط انسانی*. دوره دوم. شماره ۴. صص ۲۹-۴۱.
- 20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1
- اسفندیاری، فریبا؛ قراچورلو، مرتضی؛ عبادی، الهامه؛ ۱۳۹۷. ارزیابی و برآورد تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی در دشت سراب با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*. دوره شانزدهم. شماره ۵۱. صص ۸۰-۶۵.
- <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2018.3860>
- اصغری سراسکانرود، صیاد؛ فعال نذیری، مهدی؛ الناز، پیروزی؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چندمعیاره ARAS. *کوهپایه‌رولژی*. دوره نهم. شماره ۲. صص ۳۷۱-۳۵۳.
- <https://doi.org/10.22059/IJE.2022.336590.1596>

- تلسچی امیرخیزی، مهناز؛ دلیر حسن‌نیا، رضا؛ حقیقت جو، پرویز؛ مجنونی هریس، ابوالفضل؛ ۱۳۹۸. تعیین کیفیت آب چاه‌های کشاورزی دشت سراب جهت استفاده در سیستم‌های آبیاری تحت فشار. *دانش آب‌و خاک*. دوره بیست و نهم. شماره ۲. صص ۱۹۸-۱۸۵.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_9328.html
- جهانگیری، عباس؛ ۱۳۹۹. تحلیل روند آبرسانی به شهرها و روستاهای ایران و دفع فاضلاب از آن‌ها طی سال‌های ۹۱ تا ۹۷ با استفاده از رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*. دوره ۵. شماره ۲. صص ۲۴۸-۲۳۳.
<https://doi.org/10.22105/dmor.2020.239925.1184>
- جهانگیری، عباس؛ ۱۴۰۰. انتخاب بهترین فرآیند تصفیه فاضلاب در شهر فرمهین با استفاده از تصمیم‌گیری چند شاخصه. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*. دوره ششم. شماره ویژه. صص ۱۱-۱.
<https://doi.org/10.22105/dmor.2021.272429.1508>
- حبیب زاده، محمد صادق؛ سرکارگر اردکانی، علی؛ المدرسی، سید علی؛ ۱۳۹۲. بررسی فرونشست زمین در شهریار با استفاده از تکنیک *D-SAR*. استاد راهنما استاد سید علی المدرسی. پایان نامه عمران و محیط‌زیست. دانشگاه آزاد اسلامی یزد.
<https://ganj.irandoc.ac.ir/>
- روستایی، شهرام؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ یاراحمدی، جمشید؛ نجف‌وند، سمیرا؛ ۱۴۰۱. بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP (مطالعه موردی: دشت شبستر-صوفیان). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. انتشار آنلاین از ۱ خرداد ۱۴۰۱.
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2022.329254.1334>
- سایت سازمان نقشه‌برداری کشور؛ ۱۴۰۰. گزارش جامع بررسی مناطق فرونشست استان آذربایجان شرقی بر اساس پردازش‌های راداری و ژئودتیک
<https://ncc.gov.ir/>
- شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنج راداری در دشت نوق-بهرامان. *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. دوره شانزده. شماره ۳. صص ۷۳-۵۵.
<http://hsmmp.modares.ac.ir/article-۵۰۷۶-۲۱fa.html>
- شریفی کیا، محمد؛ افضلی، عباسعلی؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. دوره چهارم. شماره ۲. صص ۶۰-۷۴.
20.1001.1.22519424.1394.4.2.5.0
- شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلانگی؛ امیر احمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. دوره هشتم. شماره ۴. صص ۹۳-۱۱۱.
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.106424>
- شیرانی، کورش؛ پسندی، مهرداد؛ ابراهیمی، بابک؛ ۱۴۰۰. بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری. *مجله علوم آب‌و خاک*. جلد بیست و پنجم. شماره ۱. صص ۱۲۷-۱۰۵.
<https://doi.org/10.47176/jwss.25.1.147214>

صدری کیا، منصوره؛ ۱۴۰۱. پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش گره‌های دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی؛ (مطالعه موردی دشت سراب). *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره هیجده. شماره ۲. صص ۱۸-۱.

[20.1001.1.17352347.1401.18.2.1.1](https://doi.org/10.17352/347.1401.18.2.1.1)

فرزین کیا، ربابه؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ زندی، رحمان؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جویین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای_ فازی. *فضای جغرافیایی*. جلد بیست و یکم. شماره ۷۴. صص ۵۱-۷۱. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3420-fa.html>

قربانی، خلیل؛ سالاری جزی، میثم؛ فرنیاء، الناز؛ ۱۳۹۷. ارزیابی روش کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. دوره بیست و پنج. شماره ۱. صص ۱۸۲-۱۶۵.

<https://doi.org/10.22069/JWSC.2018.13571.2826>

کماسی، مهدی؛ گودرزی، حسام؛ بهنیا، امین؛ ۱۳۹۶. بررسی روند نوسانات مکانی-زمانی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی به روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) و کریجینگ (kriging) مطالعه موردی دشت سیلاخور. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. دوره بیست و چهار. شماره ۴. صص ۲۰۹-۱۹۵.

<https://doi.org/10.22069/JWSC.2017.11640.2611>

کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسی؛ احمدزاده، غلامرضا؛ ۱۳۹۷. بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS. *کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام*. تبریز. صص ۸-۱.

منتظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*. دوره نهم. شماره ۱. صص ۱۳-۱.

[20.1001.1.23225955.1398.9.1.3.2](https://doi.org/10.2322/5955.1398.9.1.3.2)

ناموری، محمد؛ صدری کیا، منصوره؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت سراب با استفاده از تحلیل سری زمانی مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری. *اولین کنفرانس بین‌المللی و دومین کنفرانس ملی فناوری‌ها و کاربردهای نوین*. صص ۱-۱۴. <https://civilica.com/doc/1249670>

Abidin HZ, Andreas H, Gumilar I, & Brinkman JJ., 2015. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta, Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities (HS01 – IUGG2015). Published by Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences. <https://doi.org/10.5194/piahs-370-15-2015>

Aher P, Adinarayana J, & Gorantiwar SD., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J*, 15(1):11–18. <http://www.cigrjournal.org>

Alinezhad A, & Khalili J., 2019. New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). *International Series in Operations Research & Management Science*, vol 277, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>

Arab Ameri A, Pourghasemi HR, & Cerda A., 2018. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS,

- VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, *Science of The Total Environment*, 613-614:1385-1400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.210>
- Bou kheir R, Cerdan O, & Abdellah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon, *Geomorphology*, 82: 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.012>
- Gambolati G, Massimiliano F, & Teatro F., 2018. Anthropogenic Land Subsidence, *GROUNDWATER*: 2444-2457. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa164b>
- Garg S, Motagh M, Jayaluxmi I, Karanam V, Selvakumaran S, & Marinoni A., 2022. Assessment of Land Subsidence Hazard, Vulnerability and Risk: A case study for National Capital Region in India, *EGU General Assembly 2022* (Vienna, Austria, Online 2022). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12646>
- Georgiou D, Mohammed E S, & Rozakis S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy* 75: 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.036>
- Hoseini Y., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, *Information Processing in Agriculture*, 6 (1): 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.09.003>
- Huang G, Fan H, Lu L, & Yu W., 2020. Land Subsidence Monitoring in Dezhou City Based on Sbas-Insar Technology the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3: 1-6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-299-2020>
- Mathew M, & Sahu S., 2018. Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection, *Management Science Letters*, Vol 8: 139-150. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2018.1.004>
- Minh DHT, Tran QC, Pham QN, Dang T, Nguyen DA, & El-Moussaw A., 2019. Measuring Ground Subsidence in Ha Noi Through the Radar Interferometry Technique Using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed Data, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, No. 10: 3874-3884. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2937398>
- Ranjgar B, Razavi V, Foroughnia T, Sadeghi-Niarak A, & Perissin D., 2021. Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms, *Remote Sensing*, VOL 13, No 7: 1326. <https://doi.org/10.3390/rs13071326>



RESEARCH ARTICLE

DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199

Open access

Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)

Zahra Azarm^a, Hamid Mehrabi^{b*}, Saied Nadi^c

^aMA Student in Remote Sensing, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^bAssistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of civil and transportation engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^cDepartment of Geomatics Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran; b Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada

Received: 4 April 2022

Revised: 22 May 2022

Accepted: 9 June 2022

Abstract

Land subsidence induced by soil consolidation is one of the natural hazards that occur gradually. This phenomenon has reached its critical state in most regions of Iran. Factors affecting subsidence are groundwater level depletion, land cover, soil type, elevation, slopes gradient, rock bed depth, etc. The causes of subsidence should be investigated so that decisions could be based on the real characteristics of the region. Decrease in groundwater level is one of the most important factors that influences subsidence but due to the complexity of the relationship between subsidence and other factors, a direct linear relationship between groundwater level and subsidence cannot be considered. The study aimed to investigate the relationship between subsidence and groundwater changes through relationship between the two parameters in the period 2014 to 2018 in Isfahan. In this regard, the time series of radar interferometry and the time series of water levels of piezometric wells in the Isfahan were studied. The results show that in 12% of the wells, no correlation exists, in 9%, poor positive ignorable correlation, in 12%, fair positive correlation, in 48%, significant positive correlation, in 6%, poor negative ignorable correlation, in 4% fair negative correlation and in 9% there is a strong and negative significant correlation between the subsidence rate and the groundwater level. Correlation values show the complexity of the relationship between subsidence and water level depletion. Therefore, the relationship between subsidence and its causative factors requires more detailed studies and comprehensive models.

Keywords: Subsidence, Radar Interferometry, Time Series Analysis, Groundwater Level, Piezometric Wells

*. Corresponding author: Hamid Mehrabi

Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

Tel: + 983137935297

How to cite this Article: Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173-191.

DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۴۴ و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۹۱-۱۷۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی

تداخل سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان)

زهرا آزمون- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه نقشه‌برداری، دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

حمید مهربانی^۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

سعید نادی- استادیار سابق گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان. محقق دانشکده مهندسی عمران و

محیط زیست، دانشگاه کارلتون، اوتاوا، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۹

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات طبیعی است که به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد، این پدیده در اکثر مناطق ایران به وضعیت بحرانی رسیده است. عوامل تأثیرگذار بر فرونشست شامل تغییرات سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، عمق بستر سنگی و ... است. برای جلوگیری از پیشروی فرونشست باید علل رخداد آن بررسی شود تا با توجه به ویژگی‌های هر منطقه تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر واقعیت باشد. افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم مؤثر بر فرونشست است ولی به دلیل پیچیدگی ارتباط فرونشست با عوامل تأثیرگذار دیگر، نمی‌توان به صورت عام یک رابطه خطی مستقیم بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست در نظر گرفت. این تحقیق با هدف بررسی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی به بررسی همبستگی بین دو پارامتر مذکور در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان پرداخته است. در این راستا سری زمانی تداخل سنجی راداری و سری زمانی سطح آب چاه‌های پیرومتری در منطقه اصفهان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، در ۱۲٪ از چاه‌ها، عدم همبستگی،

Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

نحوه ارجاع به این مقاله:

آزمون، زهرا؛ مهربانی، حمید؛ نادی، سعید؛ ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده

از آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری (منطقه مطالعاتی اصفهان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۴). صص ۱۹۱-۱۷۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199>

در ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت، در ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت، در ۴۸٪ همبستگی قوی و مثبت، در ۶٪ همبستگی ضعیف و منفی، در ۴٪ همبستگی متوسط و منفی و در ۹٪ همبستگی قوی و منفی بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی وجود دارد. مقادیر همبستگی پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و افت سطح آب را نشان می‌دهد. پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و عوامل ایجاد آن، نشان دهنده لزوم انجام بررسی‌های دقیق‌تر و ارائه مدل‌های جامع‌تر است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، تحلیل سری زمانی، سطح آب زیرزمینی، چاه‌های پی‌زومتری

۱-مقدمه

افت تدریجی ارتفاع سطح زمین که با جابه‌جایی‌های ناچیز افقی همراه است را فرونشست گویند. به دلیل تدریجی بودن آن و ایجاد خسارات غیرقابل جبران، این پدیده را زلزله خاموش می‌نامند. آب حاصل از بارندگی یا ذوب برف‌ها، در عمق خاک حرکت می‌کند تا به لایه‌های غیرقابل نفوذ می‌رسد، سپس تمام منافذ را پر می‌کند و منطقه اشباعی را به وجود می‌آورد که به آن آبخوان (لایه‌های آبدار یا آبخوانه) گفته می‌شود. برداشت آب زیرزمینی به علت افت سطح ایستابی و کاهش فشار سیال و افزایش فشار بین ذرات خاک، منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست می‌شود (علیزاده، ۱۳۶۷).

مشاهدات سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۱ و شبکه‌های ترازیبی دقیق دو روش ژئودتیکی برای پایش فرونشست است. هر دو این روش‌ها محدود به ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند و نیاز به حضور در منطقه، انجام مشاهدات میدانی، صرف وقت و هزینه زیاد دارند. از دیگر روش‌های ژئودتیکی پایش فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی راداری است، به دلیل تدریجی بودن پدیده فرونشست برای بررسی آن باید از روش‌های سری زمانی استفاده کرد، ازجمله این روش‌ها، تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری بر پراکنشگرهای دائمی (PSInSAR)^۲ و تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری بر مبنای طول خط مبنای کوتاه (SBAS)^۳ هستند. در این تحقیق برای محاسبه فرونشست از روش PSInSAR استفاده شده است، این روش به دلیل استفاده از نقاط پراکنشگر دائمی قادر است فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز را کاهش دهد. در تحقیقات متعددی نتایج این روش با مشاهدات GPS و ترازیبی دقیق مقایسه شده‌اند که نشان داده شده، دقت روش PSInSAR در حد میلی‌متر است (تامبورینی و همکاران، ۲۰۱۰)^۴، (روچی و همکاران، ۲۰۱۲)^۵. نتایج

1 Global Positioning System

2 Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

3 small baseline subset

4 Tamburini et al.

5 Rucci et al.

این روش همبستگی بالایی با مشاهدات GPS و ترازیابی دقیق دارد (بیسواس و همکاران، ۲۰۱۸)^۱، (چانگ و همکاران، ۲۰۱۰)^۲، (خرمی و همکاران ۲۰۱۹)^۳. تداخل سنجی راداری در دهه اخیر به طور گسترده در زمینه مطالعات فرونشست زمین مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در تحقیقی جابه جایی های پل هنگ کنگ-ژوهای-ماکائو^۴ با استفاده از روش PSInSAR، با ۸۶ تصویر سنتینل^۵ از ۶ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر با استفاده از ۲۰۲۰ محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست در این منطقه ۱۷ میلی متر است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱)^۶. در مقاله ای با استفاده از روش PS-InSAR و داده های Cosmo-skymed در بازه زمانی ۸ ژوئن ۲۰۱۱ تا ۱۵ نوامبر ۲۰۱۷، تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۱۸ دسامبر ۲۰۱۴ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۱۸ و تصاویر ALOS PALSAR در بازه زمانی ۱۹ ژانویه ۲۰۰۷ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۱۱ جهت محاسبه فرونشست منطقه دهلی^۷ استفاده شده است، در این مقاله میانگین جابه جایی های این منطقه را با داده Cosmo-skymed، ۱۵ میلی متر در سال، حداکثر جابه جایی محاسبه شده از تصاویر ALOS، ۱۰ تا ۱۸ میلی متر در سال و جابه جایی های حاصل از تصاویر سنتینل، ۲ تا ۱۶ میلی متر در سال آورده شده است (ملیک و همکاران، ۲۰۲۱)^۸. فرونشست شهر چانگچون جین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ محاسبه شده و نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست این منطقه، ۲۰/۴۵ میلی متر و میانگین نرخ سالانه فرونشست ۲/۹۸ میلی متر است، همچنین در این تحقیق همبستگی بین نتایج PSInSAR و داده های ترازیابی درجه ۲، ۰/۶۷ به دست آمده که این مقدار همبستگی به قابل اطمینان بودن نتایج PSInSAR اشاره دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱)^۹. در تحقیقی دیگر نقشه فرونشست در جینگهای^{۱۰} چین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر تراسار^{۱۱} تهیه شده است، بیشترین مقدار فرونشست در سال ۲۰۰۹ در قسمت شرق منطقه مطالعاتی اتفاق افتاده که این مقدار بین ۴۰ تا ۵۰ میلی متر، در بخش شمالی حدود ۲۲ تا ۳۲ میلی متر و در مناطق مسکونی وسیع مقدار فرونشست بین ۱۰ تا ۳۰ میلی متر گزارش شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۰)^{۱۲}. فرونشست منطقه اولسان^{۱۳} با روش PSInSAR و SBAS در بازه ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ بررسی کرده اند نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ فرونشست به دست آمده از روش SBAS، ۴/۴

1 Biswas et al.

2 Chang et al.

3 Khorrami et al.

4 Hong Kong-Zhuhai-Macao

5 Sentinel-1A

6 Xiong et al.

7 Dehli NCR

8 Malik et al.

9 Wang et al.

10 Jinghai

11 TerraSAR-X

12 Liu et al.

13 Ulsan

سانتی‌متر در سال و از روش PSInSAR، ۴ سانتی‌متر است (جو و همکاران، ۲۰۱۱)^۱. نرخ فرونشست در مکزیک در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ با داده‌های ماهواره انویست^۲ با استفاده از روش PSInSAR، ۸ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند، نتایج نشان داده که حداکثر فرونشست در اطراف چاه‌ها است (بکسی و همکاران، ۲۰۱۹)^۳. تحقیقات متفاوتی جهت بررسی روابط بین فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است، در بعضی از این تحقیقات تنها تأثیر عامل تغییرات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست بررسی و بدون توجه به تأثیرات سایر عوامل، بین مقادیر فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی رابطه خطی ارائه شده است. در تحقیقی نرخ فرونشست در بندر اینچئون^۴ واقع در بوسان^۵ کره را با JERS-1^۶ با استفاده از روش PSInSAR، ۳۰ میلی‌متر در سال و در منطقه ایستگاه راه‌آهن ژوئان^۷، ۱۵ میلی‌متر در سال تخمین زده‌اند، در نهایت در این مقاله دلیل اصلی فرونشست در این منطقه ساحلی را افزایش سطح آب دریا دانسته‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۰۷)^۸. در پژوهشی دیگر نقشه فرونشست دشت لیائوها^۹ در چین را با تصاویر ALOS/PALSAR با استفاده از روش PSInSAR در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ تهیه شده است، طبق نقشه ارائه شده در این مقاله حداکثر نرخ فرونشست در این منطقه ۲۳۶ میلی‌متر در سال و کل مقدار فرونشست در ۴ سال، ۷۹۹ میلی‌متر است. همچنین در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که بین فرونشست و مناطق استخراج نفت همبستگی وجود دارد و کشف شده که مقادیر بالای فرونشست اکثراً در مناطقی است که چاه‌های نفت وجود دارند (سان و همکاران، ۲۰۱۷)^{۱۰}. همچنین تحقیقی ارائه شده است که حداکثر نرخ فرونشست در شهر پیزا^{۱۱} ایتالیا را با دو مجموعه داده‌ی ERS 1/2^{۱۲} و انویست با استفاده از روش PSInSAR در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰، ۲۰ میلی‌متر در سال برای هر دو داده به دست آورده‌اند، مطالعاتی که روی بخش شرق این منطقه انجام داده‌اند نشان داده است که بین قدمت ساختمان‌ها و نرخ فرونشست همبستگی وجود دارد، به این صورت که در ساختمان‌های با قدمت کمتر نرخ فرونشست کمتری تخمین زده شده است (سولاری و همکاران، ۲۰۱۶)^{۱۳}. در تحقیقی دیگر فرونشست در دشت بیجینگ^{۱۴} چین در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش PSInSAR به دست آورده شده و سپس ارتباط بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ در چهار آبخوان بررسی کرده‌اند. حداکثر مقادیر

1 Jo et al.

2 Envisat SAR

3 Békési et al.

4 Incheon

5 Busan

6 Japanese Earth Resource Satellite-1

7 Juan

8 Kim et al.

9 Liaohé

10 Sun et al

11 Pisa

12 European Remote-Sensing Satellite

13 Solari et al.

14 Beijing

کرولیشن ارائه شده در این مقاله برای این چهار آبخوان، ۰/۳۵، ۰/۷۳، ۰/۸ و ۰/۵ است (چن و همکاران، ۲۰۲۰)^۱. در مقاله‌ای فرونشست تایوان با جی‌پی‌اس محاسبه و سپس رابطه خطی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ را به دست آورده‌اند، در این مقاله بر اساس نتایج، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را تأثیرگذارترین عامل در رخداد فرونشست این منطقه دانسته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۰). فرونشست سمارنگ^۲ را در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ را با استفاده از روش PSInSAR و تصاویر سنتینل محاسبه شده که حداکثر فرونشست در منطقه ۴/۵- سانتیمتر است، سپس همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را ۴۷/۵۸ درصد به دست آورده‌اند (فیرداوس و همکاران، ۲۰۱۸)^۳. در پژوهشی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را بررسی شده است، در این تحقیق ابتدا فرونشست را با استفاده از روش تداخل سنجی راداری محاسبه و سپس همبستگی بین نرخ فرونشست و نرخ افت سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ را محاسبه کرده‌اند (مقادیر همبستگی در این بازه زمانی بین ۰/۶ تا ۰/۹) و رابطه خطی بین این دو پارامتر را به دست آورده‌اند (زارعی و همکاران، ۱۳۹۹). بر خلاف مقالات ذکر شده که رابطه خطی و مستقیم بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ارائه داده‌اند، نتایج این تحقیق در مورد رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان نشان می‌دهد که در همه مناطق نمی‌توان رابطه خطی بین فرونشست و سطح آب زیرزمینی به دست آورد و مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به ویژگی‌های منطقه تغییر می‌کند. به دلیل اینکه فرونشست تحت تأثیر چندین عامل طبیعی و انسانی است نباید تنها اثر یک عامل بررسی شود.

۲- منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان در مرکز ایران واقع شده است، این استان با مساحتی حدود ۱۰۵۹۳۷ کیلومتر مربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، این استان دارای ۱۷ شهرستان، ۶۰ شهر، ۳۷ بخش و ۱۱۶ دهستان و مرکز آن اصفهان است. اصفهان منطقه‌ای خشک و کم باران است که مستعد وقوع فرونشست است که دو دلیل مهم تأثیرگذار عدم مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و عدم جریان دائمی زاینده‌رود باعث تشدید آن شده است. حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۹ درجه سانتی‌گراد است که تابستان‌هایی گرم و خشک را می‌سازد و در زمستان حداکثر به ۱۸- درجه می‌رسد. اصفهان یکی از کلان‌شهرهای ایران است و به دلیل بناهای تاریخی متعدد دارای شهرت جهانی است. برای حفظ و مراقبت از بناهای تاریخی و به دلیل اهمیت و وسعت و جمعیت این منطقه، بررسی و مطالعه‌ی فرونشست و جلوگیری از پیشروی آن در مناطق مسکونی حیاتی است. البته

1 Chen et al.

2 Semarang City, Indonesia

3 Firdaus et al.

در سال‌های اخیر مشاهداتی از وجود فرونشست در نزدیکی آثار تاریخی وجود دارد و در آینده آثار تاریخی در معرض خطر جدی فرونشست قرار خواهد گرفت. مساحت کل منطقه مورد مطالعه این تحقیق ۷۵۱۶ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

۳- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۷۳ تصویر راداری سنتینل با فرمت SLC در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در عبور بالاگذر^۱ در مسیر^۲ شماره ۲۸ ماهواره است، این تصاویر در باند C معادل طول موج ۵/۵۴ سانتی‌متر و فرکانس ۵/۴۰۵ گیگاهرتز، با زاویه فرود $39/5058^\circ$ با دو پلاریزاسیون VV, VH در مد IW^۳ و عرض تصویربرداری ۲۵۰ کیلومتر با قدرت تفکیک مکانی $3/67 \times 13/95$ متر اخذ شده‌اند. از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی سه ثانیه (۹۰ متر) در روند پردازش PSInSAR، برای محاسبه فرونشست استفاده شده است.

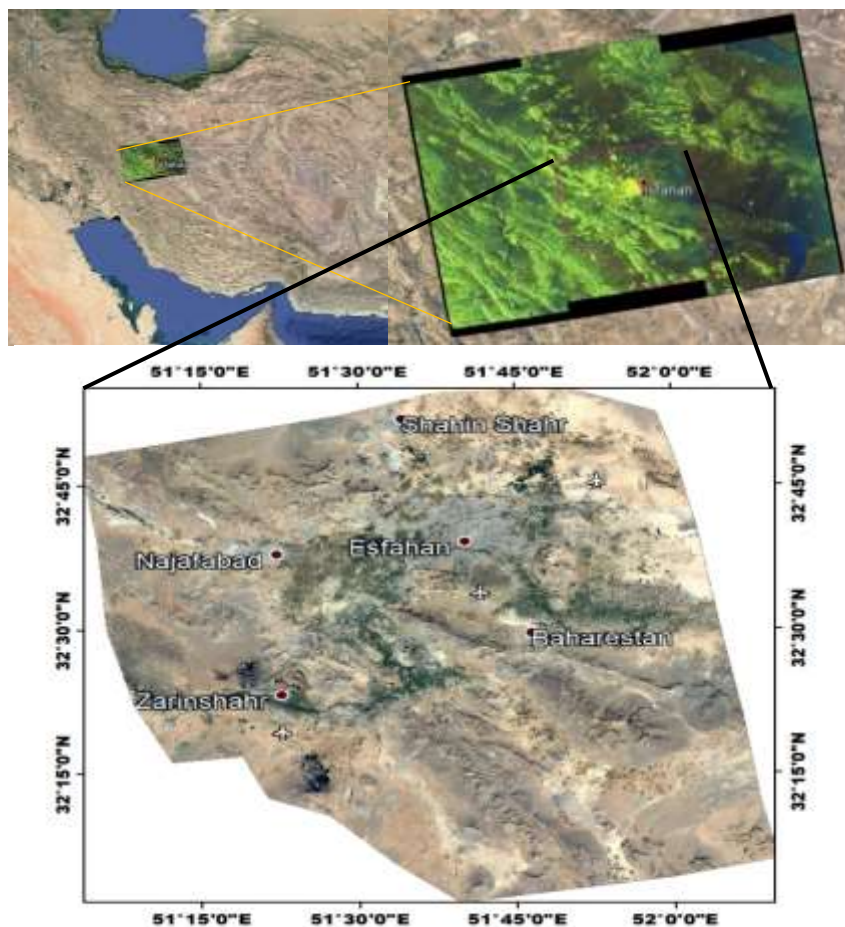
جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در پژوهش

داده	تعداد تصاویر	بازه زمانی تصاویر	فرمت داده	مدت تصویربرداری	شماره مسیر	جهت مدار	قدرت تفکیک در جهت آزمون (متر)	قدرت تفکیک در جهت رنج (متر)
سنتینل ۱	۷۳	۲۰۱۴-۲۰۲۰	SLC	IW	۲۸	بالا گذر	۱۳/۹۵	۳/۶۷

1 Ascending

2 Track

3 Interferometric Wide



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه پژوهش

برای حذف اثرات فصلی در همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان‌ها و فرونشست در ماه شهریور سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است. در شهریور ماه مقدار بارندگی منطقه مورد مطالعه و برداشت از آبخوان حداقل است، بنابراین این ماه بهترین ماه برای بررسی سطح آب زیرزمینی است. از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه اصفهان برای بررسی خصوصیات جنس خاک منطقه و تأثیر آن بر فرونشست استفاده شد. با توجه به این نقشه جنس خاک در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش آبرفت، شیل، تراس و سنگ آهک است. تمام چاه‌های پیزومتری مورد استفاده در این تحقیق در مناطق با جنس آبرفت و تراس واقع شده‌اند.

۴- تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری تکنیکی است که از تداخل امواج الکترومغناطیس جهت رسیدن به اطلاعات مفید مانند تهیه مدل رقومی ارتفاعی، میزان جابه‌جایی زمین و ... استفاده می‌کند. این تکنیک از اختلاف فاز زوج تصویر راداری استفاده می‌کند، بنابراین پارامتر فاز امواج نقش اساسی را در این تکنیک دارند. روش تداخل سنجی تفاضلی مرسوم^۱ و روش‌های تحلیل سری زمانی مانند طول خط مبنای کوتاه^۲ و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی از روش‌های تداخل سنجی تفاضلی است. با وجود اینکه روش تداخل سنجی تفاضلی مرسوم^۳ جابه‌جایی‌های زمین را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کند، نمی‌تواند نقاطی را که بازپراکنش آن‌ها با زمان تغییر می‌کند به دلیل عدم همبستگی‌های زمانی مورد بررسی قرار دهد. مناطق پوشیده از برف، زمین‌های با پوشش گیاهی و جنگل‌ها از جمله مناطق با مشکل عدم همبستگی هستند. با توجه به اینکه در روش‌های تحلیل سری زمانی از مجموعه‌ای از تداخل‌نماها در یک بازه زمانی استفاده می‌شود، عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثرات اتمسفر کاهش می‌یابد بنابراین این دسته از روش‌ها از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی مرسوم دقیق‌تر هستند.

۴-۱- تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم (PSInSAR)

از جمله محدودیت‌های روش تداخل سنجی راداری مرسوم، عدم همدوسی تصاویر مانع از تولید تداخل‌نماهای تفاضلی می‌شود، خطای توپوگرافی باقیمانده در تداخل‌نما (بزرگی این خطا به کیفیت DEM و خط مبنای قائم وابسته است) می‌باشد که این محدودیت‌ها سبب توسعه روش PSInSAR شده است. روش PSInSAR استاندارد را اولین بار **فرتی و همکاران (۲۰۰۱)** مطرح کردند، این روش با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی معمول (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر) با استفاده از نقاط همدوس در بازه زمانی آنالیز به دقت پایش میلی‌متری فرونشست می‌رسد. در صورتی که تراکم نقاط پراکنشگر کم باشد، تخمین فاز اتمسفر و حذف آن امکان‌پذیر نیست (**فرتی و همکاران، ۲۰۰۱**)^۴. روش PSInSAR به‌عنوان یک ابزار قوی برای تخمین جابه‌جایی‌های کوچک در مناطق شهری بزرگ مقیاس در طول بازه‌ی زمانی‌های بلندمدت یا کوتاه‌مدت شناخته شده است. پراکنشگرهای دائمی نقاطی است که در طول زمان فاز آن‌ها ثابت می‌ماند، با استفاده از این پراکنشگرهای دائمی فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز حذف می‌شود. اشکال این روش فقدان پیوستگی بین داده‌هاست، داده‌ها مجموعه‌ای از نقاط است که پراکندگی آن‌ها به شکل و کاربری منطقه بستگی دارد، این نقاط در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ فراوان ولی در مناطق با پوشش گیاهی اندک است، در نتیجه روش

1 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)

2 Small Baseline Subset (SBAS)

3 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)

4 Ferretti et al.

PSInSAR بهترین عملکرد را در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ دارد (اوستیر و همکاران، ۲۰۰۷)^۱. داده‌های مورد نیاز، $n+1$ تصویر راداری منطقه با فاصله زمانی‌های مناسب است که یک تصویر به‌عنوان تصویر پایه (master) و n تصویر به‌عنوان تصاویر پیرو (slave) در نظر گرفته می‌شوند. تصویر پایه بر این اساس انتخاب می‌شود که عدم همبستگی مکانی و زمانی تصاویر مینیمم شود به عبارت دیگر به ازای تداخل‌نماهای تشکیل شده بر مبنای آن، مقدار همدوسی جمع‌ی آن بیشینه شود. بعد از انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی در مجموعه تداخل‌نماها با یکی از سه روش پراکندگی دامنه بر مبنای شاخص پراکندگی دامنه، روش مبتنی بر پایداری فاز و روش مبتنی بر همبستگی، بین این نقاط شبکه‌ای با استفاده از روش مثلث‌بندی دلونی^۲ تشکیل می‌شود. این شبکه اساس تخمین فاز ناشی از اتمسفر و افزایش نقاط PS است، به علت مجاور بودن نقاط در شبکه و همبسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین دو پیکسل همسایه فاز اتمسفر حذف خواهد شد (هانسن^۳، ۲۰۰۱). در مثلث‌بندی بین نقاط اگر طول اتصالی از همبستگی اتمسفر بیشتر باشد آن اتصال حذف می‌شود تا افزونگی اتصالات کاهش یابد و دقت تخمین جابه‌جایی زمین افزایش یابد.

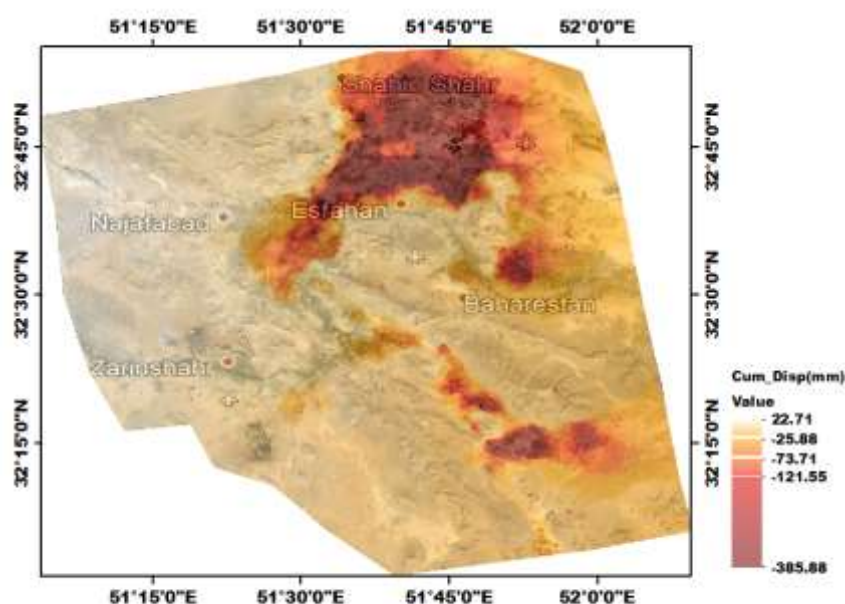
۵- نتایج تحقیق

به منظور بررسی جابه‌جایی‌های زمین در اصفهان و چند منطقه اطراف آن، نقشه جابه‌جایی با ۷۳ تصویر Sentinel-1A از روش PSInSAR تهیه شد. حداکثر مقدار جمع‌ی فرونشست منطقه اصفهان در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، تقریباً به ۴۰ سانتی‌متر رسیده است؛ با توجه به نقشه زمین‌شناسی و نقشه فرونشست جمع‌ی منطقه، مشخص است که فرونشست در مناطق با جنس آبرفت و تراس اتفاق افتاده است و در مناطق با جنس شیل و سنگ‌آهک فرونشست مشاهده نشده است (شکل ۲).

1 Oštir et al.

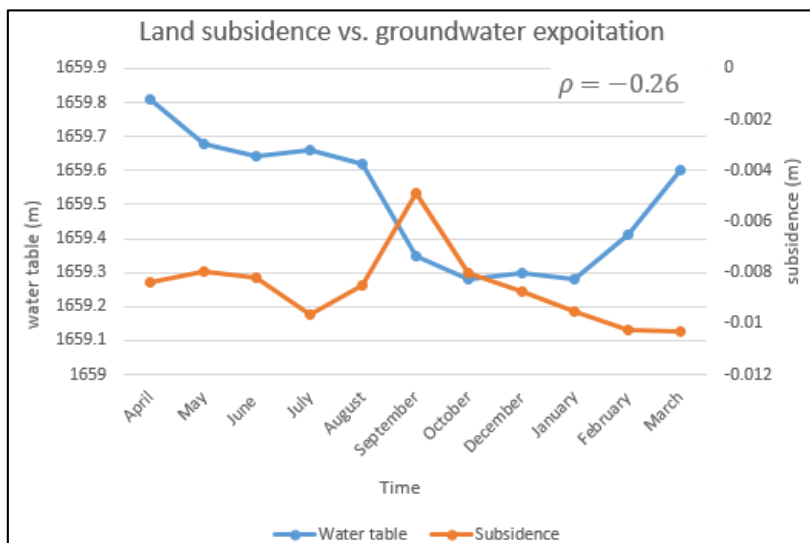
2 Delaunay triangulation

3 Hanssen

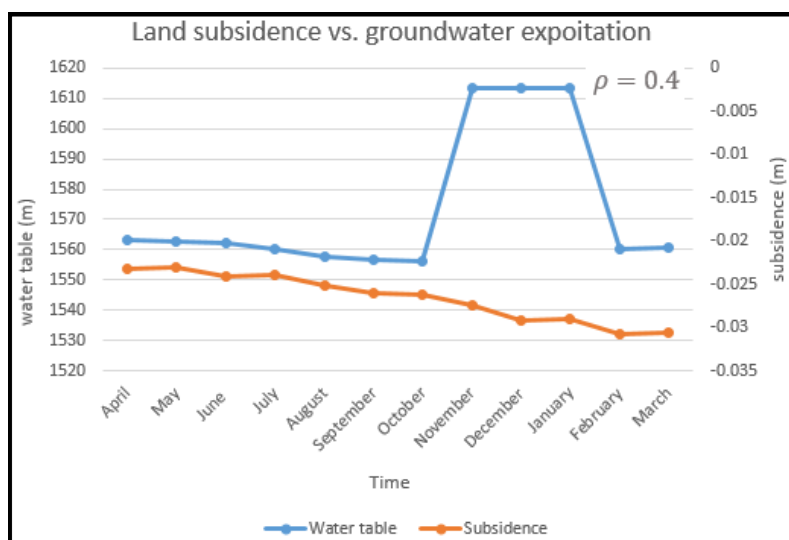


شکل ۲- مقادیر تجمعی فرونشست منطقه مورد مطالعه در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

سری زمانی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۷ در چاه جاده پرزان در دشت مهبیار جنوبی - دشت آسمان و کروچ و شرودان دشت فلاورجان رسم شده است (شکل ۳ و شکل ۴)، همبستگی این دو پارامتر در چاه جاده پرزان در طول یک سال ۰/۲۶- و در کروچ و شرودان ۰/۴ است که این نشان می‌دهد در این بازه یک ساله این دو پارامتر رفتار مستقلی دارند. به ازای افت سطح آب زیرزمینی در یک چاه، ممکن است فرونشست با تأخیر زمانی اتفاق بیفتد و دقیقاً همزمان با افت آب، فرونشست مشاهده نشود که البته در این مسئله جنس خاک منطقه در رخداد فرونشست تأثیرگذار است. نوسانات سطح آب در ماه‌های مختلف به دلیل برداشت‌ها و بارندگی نیز در این همبستگی تأثیرگذار است، بنابراین بازه زمانی یک سال برای بررسی رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی مناسب نیست.



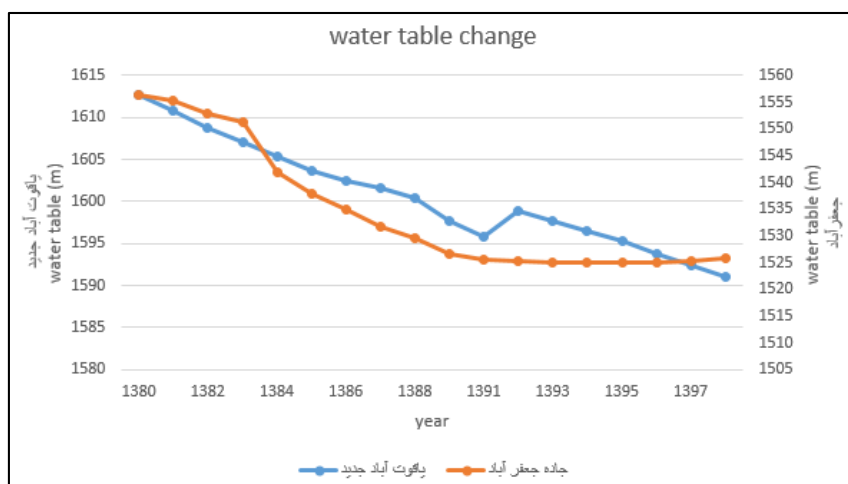
شکل ۳- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه پرزان در سال ۱۳۹۷



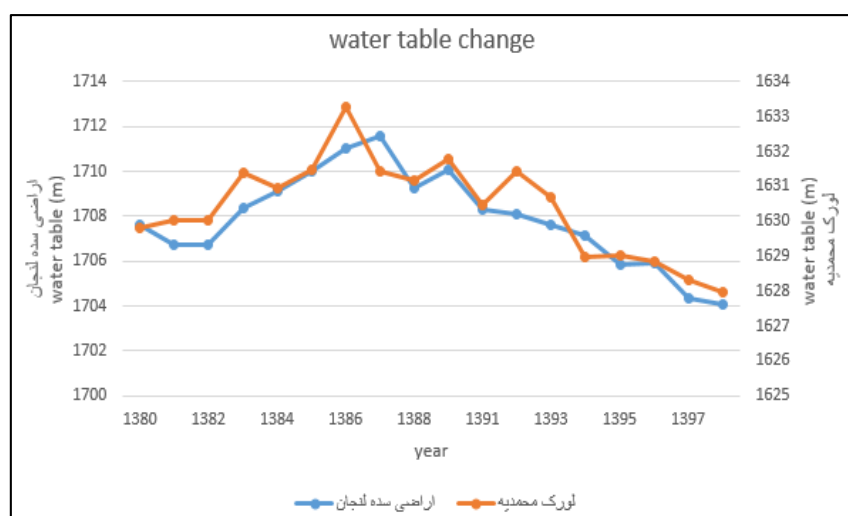
شکل ۴- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه کروچ و شرودان در سال ۱۳۹۷

برای بررسی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری، نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی چند نمونه چاه در دشت‌های منطقه مورد مطالعه رسم شد. نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه یاقوت آباد جدید و چاه جاده جعفرآباد در محدوده اصفهان-برخوار و چاه لورک محمدیه و اراضی سده لنجان در دشت لنجان در شکل ۵ و شکل ۶ آورده شده است، نمودارها بیانگر روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها است، مقدار

کاهش سطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد ۲۰/۳۶- متر و در یاقوت آباد جدید ۳۱/۱۱- متر، در لورک محمدیه ۱/۸۲- متر و در اراضی سده لنجان ۳/۵۵- متر در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ است.



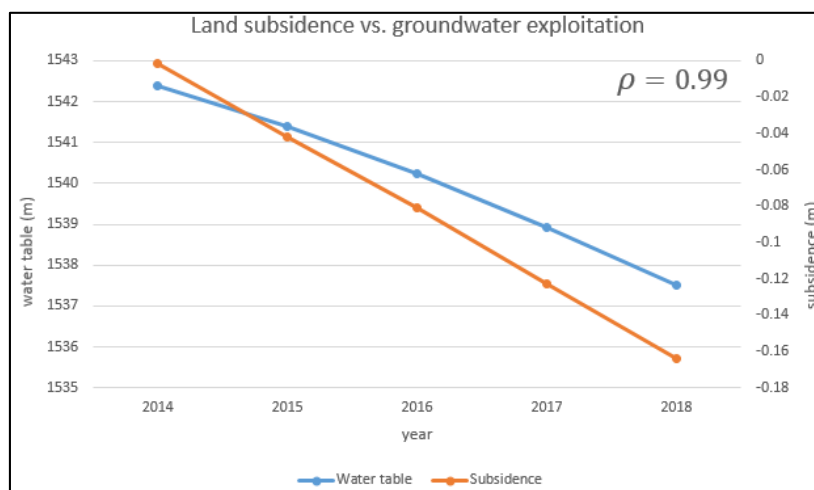
شکل ۵- تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد و یاقوت آباد جدید



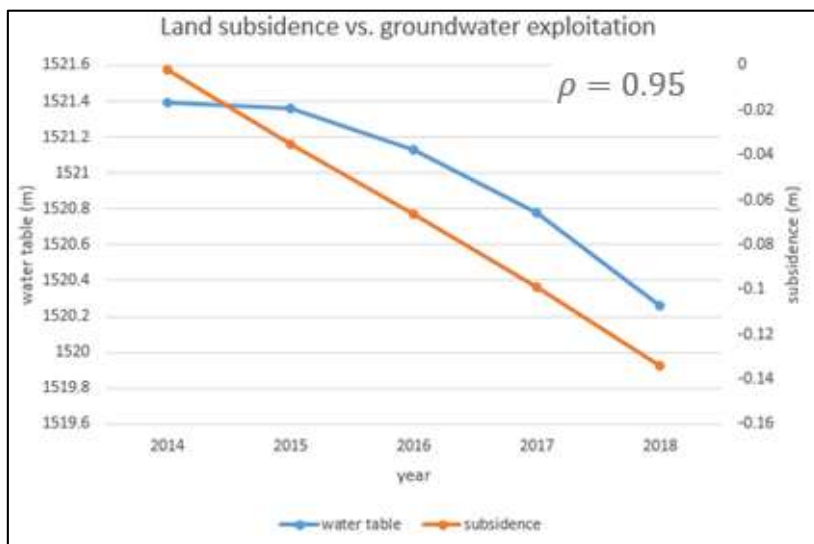
شکل ۶- تغییرات سطح آب زیرزمینی لورک محمدیه و اراضی سده لنجان در دشت لنجان

برای مقایسه روند تغییر سطح آب زیرزمینی و فرونشست برای نمونه در محدوده اصفهان-برخوار چاه یونارت و چاه سه راهی سهل آباد، رفتار افت سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۷ و شکل ۸ آورده شده است، نمودارها نشان می دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در یونارت به ازای ۴/۸۹ متر افت سطح آب

زیرزمینی ۱۶ سانتیمتر فرونشست و در سه راهی سهل آباد به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۱۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در یونارت ۰/۹۹ و در سه راهی سهل آباد ۰/۹۵ است.



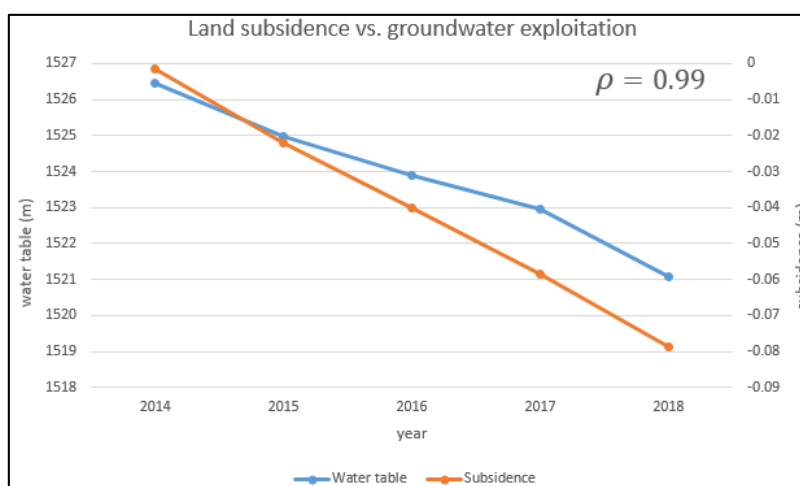
شکل ۷- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (یونارت)



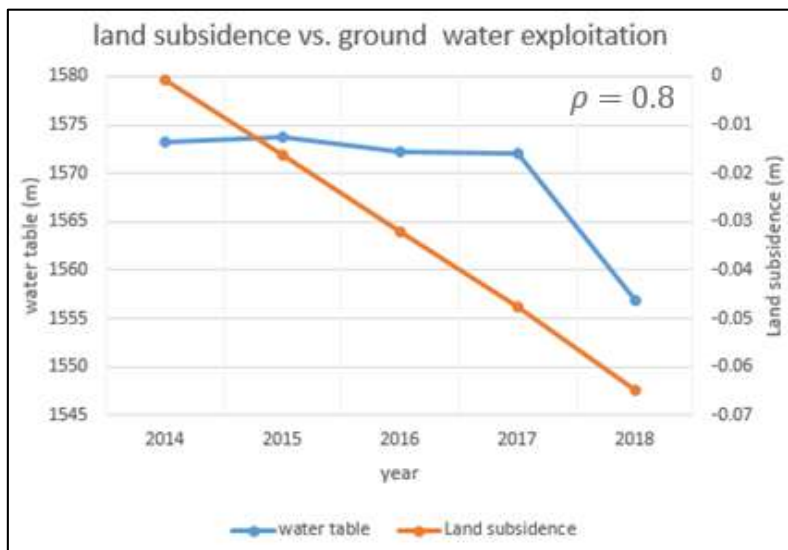
شکل ۸- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (سه راهی سهل آباد)

در محدوده اصفهان کوهپایه سگری (جوزدان) و محدوده فلاورجان (کروچ و شروان) رفتار تغییرات سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است، نمودارها نشان

می‌دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در جوزدان به ازای ۵/۳۹ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۸ سانتیمتر فرونشست، در کروچ و شروان به ازای ۱۶/۲۵ متر افت آب زیرزمینی، ۷ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ و در کروچ و شروان ۰/۸ است.



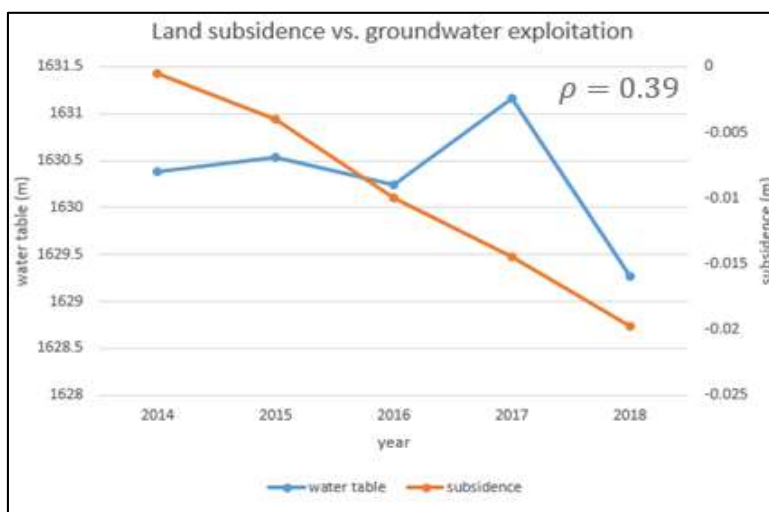
شکل ۹- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه کوهپایه سگزی (جوزدان)



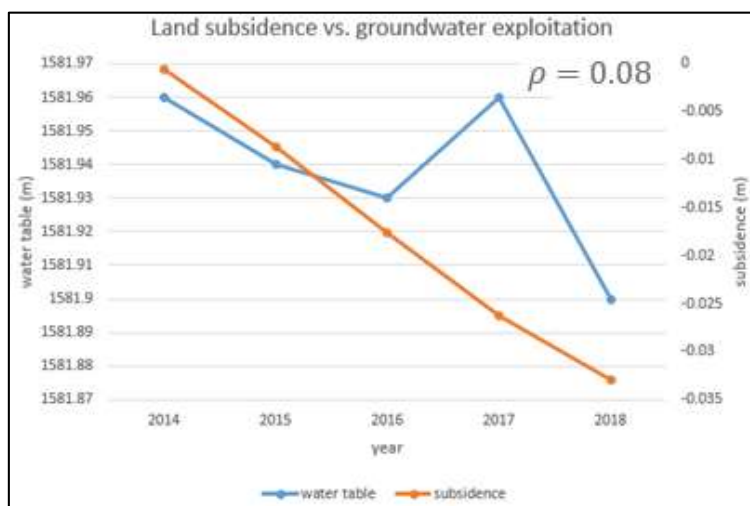
شکل ۱۰- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در کروچ و شروان

در محدوده مهیار جنوبی دشت آسمان (شمال آجر تاکی) و محدوده نجف‌آباد (غرب درچه) نمودار خطی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ رسم شده است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲). در شمال

آجر تاکی به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۲ سانتیمتر فرونشست و در غرب درچه به ازای ۶ سانتیمتر افت سطح آب زیرزمینی، ۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در منطقه شمال آجر تاکی ۰/۳۹ و در غرب درچه ۰/۰۸ است.



شکل ۱۱- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مهیار جنوبی-دشت آسمان (شمال آجر تاکی)

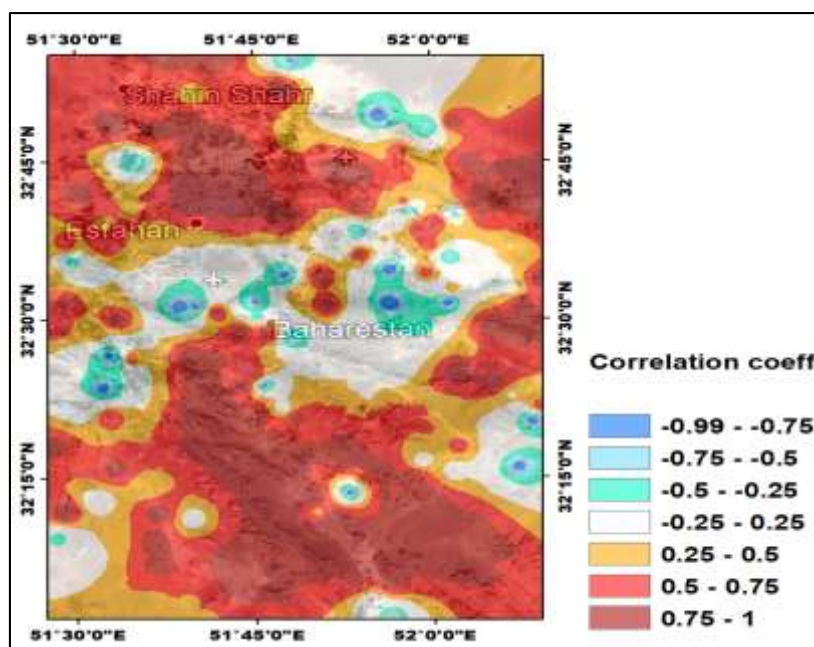


شکل ۱۲- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه نجف آباد (غرب درچه)

تمام پیزومترها در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در مناطق با خاک آبرفت و تراس هستند به همین دلیل افت سطح آب زیرزمینی باعث می شود، آب از بین ذرات خاک برداشته شده و تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک افزایش یافته

و خاک متراکم می‌شود در نتیجه فرونشست در مناطق با خاک آبرفتی و تراس مشاهده شده است ولی در مناطق با جنس شیل و سنگ آهک به دلیل تحکیم و تراکم‌پذیری پایین آن‌ها فرونشست در این مناطق مشاهده نشده است.

مقادیر همبستگی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۱۳ **شکل ۱۳** آورده شده است، طبق این نقشه ۱۲٪ همبستگی‌های بین ۰/۲۵- تا ۰/۲۵+ که در این بازه همبستگی بین دو پارامتر وجود ندارد، بنابراین در این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی عوامل دیگری مثل جنس خاک، شیب، جهت شیب گسل و ... در رخداد فرونشست تأثیرگذار هستند. ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت (همبستگی‌های بین ۰/۲۵+ تا ۰/۵+)، ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت (همبستگی بین ۰/۵+ تا ۰/۷۵+) و ۴۸٪ همبستگی قوی و مثبت (همبستگی بین ۰/۷۵+ تا ۱+)، ۶٪ همبستگی ضعیف و منفی (۰/۵- تا ۰/۲۵-)، ۴٪ همبستگی متوسط و منفی (۰/۷۵- تا ۰/۵-) و ۹٪ همبستگی قوی و منفی (۱- تا ۰/۷۵-) بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. محدوده‌ها با همبستگی قابل توجه مثبت (۰/۵+ تا ۱+) به این معنی است که در این مناطق به ازای افت سطح آب زیرزمینی فرونشست در منطقه اتفاق افتاده است و جنس خاک منطقه هم آبرفت و رس بوده است که باعث شده است با تخلیه آب از منافذ خاک، خاک متراکم شده و فرونشست اتفاق بیفتد. در صورتی که خاک منطقه از نوع کانی رس باشد بنابراین رس فعال است در صورت متراکم شدن غیرقابل نفوذ می‌شوند و آبخوان قابلیت احیا نخواهد داشت ولی در صورتی که از نظر دانه‌بندی، رس گفته شود، ممکن است خاک ریزدانه باشد ولی از نوع کانی رس نباشد و غیرفعال باشد در این صورت ممکن است قابلیت نفوذپذیری داشته باشد و دوباره آب در آن نفوذ کند.



شکل ۱۳- ضریب همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پی‌زومتری دشت‌های اصفهان-برخوار، لنجان‌ات، مهبیار جنوبی، فلاورجان، نجف‌آباد و کوهپایه سگزی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ و همچنین همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان آورده شد. مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر نشان می‌دهد که با توجه به اینکه عوامل مختلفی مثل جنس خاک منطقه، شیب، جهت شیب، ارتفاع و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و ... در رخداد پدیده فرونشست دخالت دارند، بررسی تنها یک عامل روش صحیحی برای پی بردن به علل به وجود آمدن فرونشست نیست. ارائه روابط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست ممکن است برای یک منطقه خاص قابل قبول باشد ولی در حالت کلی باید خصوصیات ویژه هر منطقه مثل جنس خاک، گسل، شیب و ... هم در کنار تغییرات سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شود، برای مثال در منطقه‌ای که جنس خاک، خاک ریزدانه باشد، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب فرونشست می‌شود و ممکن است همبستگی بین این دو پارامتر بالا و رابطه خطی به دست آید ولی در منطقه‌ای با جنس خاک درشت دانه، ممکن است در صورت افت زیاد سطح آب زیرزمینی فرونشست کمتری مشاهده شود. رابطه خطی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین فقط در حالت تئوری امکان‌پذیر است ولی در واقعیت رابطه فرونشست با چندین عامل مؤثر بر آن پیچیده‌تر از رابطه خطی است و عوامل مختلف مؤثر بر فرونشست باید همزمان بررسی شوند. تأخیر زمانی بین افت سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست هم در همبستگی بین این دو پارامتر مؤثر است، بنابراین رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی باید در بازه زمانی طولانی مدت بررسی شود. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، در مناطقی که همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ضعیف است یا همبستگی وجود ندارد، عوامل تأثیرگذار دیگر باید موردبررسی قرار گیرند تا با احتمال بیشتری بتوان دلیل فرونشست در این مناطق را شناسایی کرد. همان‌طور که در نتایج هم آورده شده است در بعضی از این مناطق با وجود افزایش سطح آب همچنان فرونشست زمین ادامه داشته است که این می‌تواند نشان‌دهنده‌ی عدم برگشت‌پذیر بودن منطقه نسبت به فرونشست باشد به عبارت دیگر حتی با احیای مجدد منابع آب زیرزمینی در این مناطق نمی‌توان شاهد بهبود وضعیت فرونشست بود. در این موارد باید دانه‌شناسی خاک و کانی‌شناسی انجام شود به‌طور مثال در صورتی که خاک منطقه از نظر کانی‌شناسی، رس باشد، این رس فعال است بنابراین در صورت برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی خاک متراکم شده و قابلیت جذب آب را نخواهد داشت و فرونشست رخ می‌دهد. در صورتی که از نظر دانه‌بندی، منطقه از رس باشد، این رس غیرفعال است و نسبت به خاک رس فعال، قابلیت جذب آب بیشتری دارد. در این تحقیق نشان داده شد که بررسی رابطه فرونشست و تنها یک عامل تأثیرگذار بر آن، صحیح نیست و در یافتن علت رخداد فرونشست کمکی نمی‌کند، زیرا پدیده فرونشست همزمان ممکن است تحت تأثیر چند عامل در منطقه موردنظر به وجود آید. پیشنهاد می‌شود برای

پی بردن به دلایل رخداد فرونشست از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بالاتر و اطلاعات مربوط به کانی‌شناسی و دانه‌بندی خاک منطقه استفاده و همچنین تأثیر عوامل دیگر مثل گسل و شیب، ارتفاع منطقه و ... همزمان بررسی شوند.

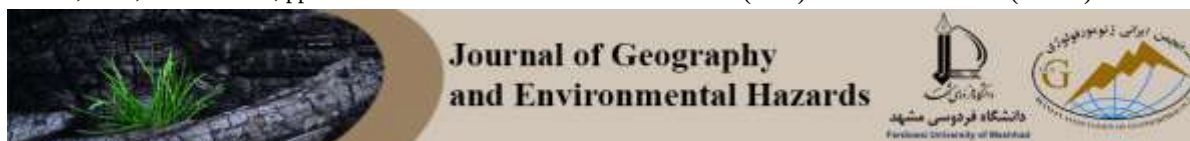
کتابنامه

زارعی، زاده رسول، صدیقی و همکاران؛ ۱۳۹۹. «تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب‌زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس)». نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، صص ۱۶۸-۱۸۲.

علیزاده، امین؛ ۱۳۶۷. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی، بنیاد فرهنگی رضوی.

- A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca., 2001. "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
- A. Rucci, A. Ferretti, A. M. Guarnieri, and F. Rocca., 2012. "Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements," *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 156-163, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030>.
- A. Tamburini, M. Bianchi, C. Giannico, and F. Novali., 2010. "Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, pp. 928-937.
- B. Chen, H. Gong, Y. Chen, X. Li, C. Zhou, K. Lei, L. Zhu, L. Duan, and X. Zhao., 2020. "Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China," *Science of the Total Environment*, vol. 735, pp. 139111.
- C. H. Chen, C.-H. Wang, Y.-J. Hsu, S.-B. Yu, and L.-C. Kuo., 2010. "Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan," *Engineering Geology*, vol. 115, no. 1-2, pp. 122-131.
- Chung-Pai Chang, Jiun-Yee Yen, Andrew Hooper, Fong-Min Chou, Yi-An Chen, Chin-Shyong Hou, Wei-Chia Hung, and Ming-Sheng Lin. 2010. "Monitoring of Surface Deformation in Northern Taiwan Using DInSAR and PSInSAR Techniques," *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, doi: 10.3319/TAO.2009.11.20.01(TH).
- E. Békési, P. A. Fokker, J. E. Martins, J. Limberger, D. Bonté, and J.-D. Van Wees., 2019. "Production-induced subsidence at the Los Humeros geothermal field inferred from PS-InSAR," *geofluids*.
- H. S. Firdaus, Y. Prasetyo, and D. Diyanah., 2018. "Spatial Correlation Analysis of Land Subsidence and The Water Table Changes in Unconfined Aquifers Using Sentinel 1-SAR Image and Geographic Information Systems (Case Study: Semarang City-Indonesia)." pp. 03022.
- H. Sun, Q. Zhang, C. Zhao, C. Yang, Q. Sun, and W. Chen., 2017. "Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique," *Remote sensing of environment*, vol. 188, pp. 73-84.
- H. Wang, J. Mao, S. Zhao, X. Ning, and Q. Wu., 2021. "PS-InSAR based surface subsidence analysis in Changchun metropolitan area," in *E3S Web of Conferences*.
- J.-s. Kim, D.-J. Kim, S.-W. Kim, J.-S. Won, and W. M. Moon., 2007. "Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR," *Geosciences Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 59.

- Jo, M.J., Won, J.S. and Kim, S.W., 2011, September. A time-series observation of ground subsidence at Ulsan area using SAR interferometry. In *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)* (pp. 1-3). IEEE.
- K. Biswas, D. Chakravarty, P. Mitra, and A. Misra., 2018. "Spatial Correlation Based Psinsar Technique to Estimate Ground Deformation in las Vegas Region, Us," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2251-225.
- K. Malik, D. Kumar, D. Perissin, and B. Pradhan., 2021. "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data," *Advances in Space Research*.
- K. Oštir, and M. Komac., 2007. "PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations a case of NW Slovenia," *Geologija*, vol. 50, no. 1, pp. 77-96.
- L. Solari, A. Ciampalini, F. Raspini, S. Bianchini, and S. Moretti., 2016. "PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 120.
- Liu, G., Jia, H., Zhang, R., Cen, M. and Zhang, T., 2010. Subsidence detection by PSInSAR based on high resolution TerraSAR-X images. *Progress In Electromagnetics Research*, 11.
- M. Khorrami, B. Alizadeh, E. Ghasemi Tousi, M. Shakerian, Y. Maghsoudi, and P. Rahgozar. 2019. "How groundwater level fluctuations and geotechnical properties lead to asymmetric subsidence: A PSInSAR analysis of land deformation over a transit corridor in the Los Angeles metropolitan area," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 377.
- R. F. Hanssen., 2001. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*: Springer Science & Business Media.
- S. Xiong, C. Wang, X. Qin, B. Zhang, and Q. Li., 2021. "Time-Series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, pp. 546.



RESEARCH ARTICLE

DOI:10.22067/geoh.2022.76899.1235

Open access

Evaluating the Vulnerability of the Urban Fabric of District 18 of Tehran under the Influence of Land Subsidence using ANP and GIS

Ramin Rezaei Shahabi^{a*}, Alireza Arab^b, Hassan Ahmadi^c, Amir Pishva^d, Mohammad Iqbal Shahbakhsh Musa Zehi^e

^a MA in Urban Planning, Isfahan University of Arts, Isfahan, Iran

^b MA in Geotechnics, Kharazmi University, Tehran, Iran

^c Associate Professor, Urban Planning Department, Faculty of Art and Architecture, Guilan University, Rasht, Iran

^d MA Student in Geographic Information System, Kharazmi University, Tehran, Iran

^e MA in Roads, Khajeh Nasir University, Tehran, Iran

Received: 26 May 2022

Revised: 28 August 2022

Accepted: 8 September 2022

Abstract

Due to the uncontrolled abstraction of groundwater resources in the last half century, the water level of groundwater aquifers in most plains of Iran has decreased sharply. Sharp drop in groundwater levels is the main cause of land subsidence in Iran. Land subsidence has the potential to cause a major human catastrophe, and if it happens, it will expose agricultural lands, urban fabric, vital arteries, and many other environmental aspects to extreme vulnerability. This study evaluated the vulnerability of urban fabric in District 18 of Tehran regarding the influence of land subsidence. The spatial study was carried out by implementing an analytical model in three steps. In the first step, the indicators of vulnerability of urban tissue affected by land subsidence were identified and classified based on three criteria of physical and demographic, access and proximity to high risk centers. In the second step, using a questionnaire and expert's ideas, the priorities of urban tissue vulnerability in relation to land subsidence were identified and based on the network analysis process, the weight of each criterion was determined. In the third step, the weight obtained from the ANP model was applied to the spatial layers of the region in ArcGIS software. The results of model implementation showed that a high percentage of District 18 have features such as worn texture, buildings with low structural strength, very low building quality, high population and construction density and are prone to high vulnerability. Moreover, Zone 1 with 96%, Zone 2 with 88.5%, Zone 3 with 90.4%, Zone 4 with 85%, and Zone 5 with 92.3% have high vulnerability. About 90% of the total buildings constructed in District 18 of Tehran are affected by land subsidence in a highly vulnerable area.

Keywords: Assessment, Vulnerability, Urban Texture, Subsidence, Analytic Network Process (ANP), District 18 of Tehran

*. Corresponding author: Ramin RezaeiShahabi

E-mail: r.r.shahabi@gmail.com

Tel: + 989010327735

How to cite this Article: RezaeiShahabi, R., Arab, A., Ahmadi, H., Pishva, A., & Shahbakhsh Musa Zehi, M. A. (2022). Evaluating the vulnerability of the urban fabric of District 18 of Tehran under the influence of land subsidence using ANP and GIS. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 193-219
DOI:10.22067/geoh.2022.76899.1235



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76899.1235> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۲۱۹-۱۹۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل

شبکه‌ای ANP و GIS

رامین رضایی‌شهابی^۱ - کارشناس ارشد شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

علیرضا عرب - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

حسن احمدی - دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

امیر پیشوا - دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

محمد اقبال شه‌بخش موسی‌زهی - کارشناس ارشد راه، دانشگاه خواجه نصیر، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۶/۱۷

چکیده

به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در نیم‌قرن اخیر تراز آب سفره‌های زیرزمینی در اغلب دشت‌های کشور به‌شدت کاهش پیدا کرده است. افت شدید تراز آب سفره‌های زیرزمینی عامل اصلی پدیده فرونشست زمین در ایران است. فرونشست زمین پتانسیل ایجاد یک فاجعه عظیم انسانی را دارد و در صورت وقوع آن، زمین‌های کشاورزی، بافت شهرها، شریان‌های حیاتی و بسیاری از جنبه‌های زیست‌محیطی را در معرض آسیب‌پذیری شدید قرار خواهد داد. درگیر شدن دشت جنوب غرب تهران با مسأله فرونشست زمین ایده اولیه پژوهش حاضر بوده است. در این پژوهش، آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ شهر تهران تحت تأثیر فرونشست زمین مورد ارزیابی قرار گرفته است که در قالب مطالعات فضایی — مکانی و با اجرای مدل تحلیلی در سه گام انجام شده است. در گام اول، شناسایی و دسته‌بندی

Email: r.r.shahabi@gmail.com

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۰۱۰۳۲۷۷۳۵

نحوه ارجاع به این مقاله:

رضایی‌شهابی، رامین؛ عرب، علیرضا؛ احمدی، حسن؛ پیشوا، امیر؛ شه‌بخش موسی‌زهی، محمد اقبال؛ ۱۴۰۱. ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ANP و GIS. جغرافیا و مخاطرات محیطی.

۱۱(۴). صص ۲۱۹-۱۹۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76899.1235>

شاخص‌های آسیب‌پذیری بافت شهری تحت تأثیر فرونشست زمین بر اساس سه معیار کالبدی و جمعیتی، دسترسی و همجواری با مراکز ریسک بالا صورت گرفت و در گام دوم، با استفاده از ابزار پرسشنامه و نظرسنجی کارشناسی، اولویت‌های آسیب‌پذیری بافت شهری در ارتباط با فرونشست زمین مشخص گردید و بر پایه فرآیند تحلیل شبکه‌ای، تعیین وزن هر یک از معیارها انجام گرفت. در نهایت، در گام سوم وزن حاصل از مدل ANP، در محیط نرم‌افزار ArcGIS بر لایه‌های مکانی منطقه اعمال شد. نتایج اجرای مدل نشان داد که درصد بالایی از اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ دارای ویژگی‌هایی نظیر بافت فرسوده، بناهایی با مقاومت سازه‌ای پایین، کیفیت ساخت بسیار پایین بناها، تراکم بالای جمعیتی و ساختمانی بوده و مستعد آسیب‌پذیری زیاد می‌باشند. همچنین ناحیه ۱ با ۹۶ درصد، ناحیه ۲ با ۸۸/۵ درصد، ناحیه ۳ با ۹۰/۴ درصد، ناحیه ۴ با ۸۵ درصد و ناحیه ۵ با ۹۲/۳ درصد اراضی ساخته شده در محدوده آسیب‌پذیری بالا قرار گرفته‌اند. در مجموع از کل اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ شهر تهران در حدود ۹۰ درصد بافت ساخته شده در محدوده آسیب‌پذیری زیاد تحت تأثیر فرونشست زمین قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی، آسیب‌پذیری، بافت شهری، فرونشست زمین، فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)، منطقه ۱۸ تهران.

۱- مقدمه

ساختارهای فیزیکی و اجتماعی شهرها در برابر بحران‌های انسانی و طبیعی بسیار آسیب‌پذیر است. اگر بخواهیم چرایی این مسأله را بیان کنیم می‌توان گفت که شهر مجموعه پیچیده‌ای است که درگیر فرآیندهای گسترده‌ای از قبیل تمرکز سرمایه، ثروت و جمعیت، موقعیت و رشد شتابان مراکز شهری، تغییر و تحولات ساختارهای شهری، توسعه سکونتگاه‌های آسیب‌پذیر و مهم‌تر از همه ناکامی برنامه‌ریزان و مدیران شهری در بهینه‌سازی استانداردهای ساخت‌وساز، هنجارهای اجتماعی و استراتژی‌های برنامه‌ریزی کاربری اراضی است. این فرآیندها هر یک به نحوی در شکل‌گیری بحران‌های مختلف تأثیرگذار می‌باشند. شواهد نشان می‌دهد که همزمان با رشد شهرها خطرآفرینی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد (واندرسون^۱، ۲۰۰۵). مفهوم آسیب‌پذیری سرمایه‌های فیزیکی و انسانی به هنگام وقوع بحران در شهرها یکی از مهم‌ترین مسائلی است که امروزه در بسیاری از بخش‌های مطالعاتی از قبیل جامعه‌شناسی، انسان‌شناسی اجتماعی، مدیریت بحران، علوم محیطی و پدافند غیرعامل مورد توجه قرار گرفته است (روستین^۲، ۱۹۶۵). آسیب‌پذیری برحسب مبانی متفاوتی مانند درجه زیان و آسیب حاصل از یک پدیده بالقوه آسیب‌رسان، شرایط و موقعیت اجتماعی — اقتصادی (کانون و همکاران^۳، ۲۰۰۳؛ بلیکی و همکاران^۴، ۲۰۰۴) و خصیصه‌ای از یک سیستم

1 Wanderson

2 Rustin

3 Cannon et al

4 Blaikie et al

زوجی انسانی — محیطی (ترنر و همکاران^۱، ۲۰۰۳) تعریف شده است. آسیب‌پذیری اغلب به ظرفیت برای خسارت (کاتر^۲، ۱۹۹۶)، درجه و میزان تخریب در عامل یا گروهی از عوامل که از وقوع هر پدیده حاصل می‌شود (لیتله و همکاران^۳، ۲۰۰۴) یا به ظرفیت نداشتن کافی جامعه برای رویارویی در برابر تهدیدها و مخاطرات تعریف می‌شود که بر پایه موقعیت افراد و گروه‌ها در دنیای فیزیکی و اجتماعی استوار است (کلارک و همکاران^۴، ۱۹۹۸). آسیب‌پذیری به‌عنوان عامل خطر درونی موضوع یا یک سیستم تعریف می‌شود که در معرض اتفاقی قرار دارد و طبق تمایل ذاتی‌اش تحت تأثیر قرار می‌گیرد یا مستعد خسارت است و بیانگر حساسیت فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی و یا تمایل جامعه به خلل در شرایط تهدیدهای طبیعی یا با منشأ انسانی است (کاردونا^۵، ۲۰۰۳؛ امریچ و کاتر^۶، ۲۰۱۱). این مفهوم در پژوهش‌های مختلف استفاده شده است، اما در مورد معنی و تعاریف آن توافقی وجود ندارد (هوفشمیت^۷، ۲۰۱۱) اما به زبان ساده، شاخصی از امکان خسارت در آینده است (وولف و همکاران^۸، ۲۰۱۳).

به‌طور کلی، انواع متفاوتی از آسیب‌پذیری وجود دارد که به چهار دسته اصلی فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی تقسیم می‌شوند (احسان و وارنر^۹، ۲۰۱۴؛ کیم و مارکویلر^{۱۰}، ۲۰۱۵). همچنین آسیب‌پذیری بر اساس منشأ حادثه، در دو طیف طبیعی و انسان‌ساخت طبقه‌بندی شده است (سنوالد و بایلی^{۱۱}، ۲۰۱۵). در این راستا موضوع فرونشست^{۱۲} زمین به‌عنوان یکی از عوامل مهم تهدیدکننده مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی در نیم‌قرن اخیر مطرح شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که فرونشست زمین بیش از ۱۲ میلیون کیلومتر مربع (۸۰ درصد) از سطح زمین را در جهان با احتمال بیشتر از ۵۰ درصد تهدید می‌کند و از ۷۳۴۳ شهر بزرگ دنیا در حدود ۱۵۹۶ شهر بزرگ (۲۲ درصد) در مناطق بالقوه فرونشست زمین قرار دارد و همچنین ۱۹ درصد از جمعیت جهان در معرض خطر ناشی از فرونشست قرار دارند (گارسیا و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۱). فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی زمین‌ساختی مانند زمین‌لرزه، فرسایش، انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته، فعالیت‌های تکتونیکی و خروج گدازه از پوسته جامد زمین باشد (طالب‌بیدختی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین فعالیت‌های انسانی

1 Turner et al

2 Cutter

3 Little et al

4 Clark et al

5 Cardona

6 Emrich and Cutter

7 Hufschmidt

8 Wolf et al

9 Ahsan and Warner

10 Kim and Marcouiller

11 Sennewald and Baillie

12 Subsidence

13 Garcia et al

از دیگر عوامل بسیار بااهمیت در وقوع فرونشست است (بورچرز و کارپنتر^۱، ۲۰۱۴) که ازجمله این فعالیت‌ها می‌توان به معدنکاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و نفت اشاره نمود. در این میان یکی از مهم‌ترین دلایل فرونشست زمین برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی است (اروجی و همکاران^۲، ۲۰۱۹). تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت باعث برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی شده و در پی آن بسیاری از دشت‌ها در کشورهای مختلف دنیا با بیلان منفی روبه‌رو شده‌اند که این امر باعث تراکم لایه‌های خاک گردیده و نهایتاً باعث مرگ یک آبخوان و از بین رفتن ظرفیت ذخیره آب در آن می‌گردد. هنگامی که تراز آب زیرزمینی در یک آبخوان کاهش می‌یابد به دلیل از بین رفتن نیروی شناوری آب، پدیده تحکیم لایه‌های رسی خاک شروع می‌شود و این اتفاق باعث فرونشست زمین می‌گردد (زانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۰). فرونشست زمین پیامدهای زیانباری بر مستحذات روی خاک و شریان‌های حیاتی مدفون در خاک دارد که در صورت ادامه روند برداشت آب از یک آبخوان این پدیده می‌تواند باعث از بین رفتن کارایی سازه‌ها و شریان‌های حیاتی (شامل خطوط اصلی انتقال آب، نفت، گاز و ...) گردد و نتیجه آن مواجهه با یک بحران در منطقه خواهد بود (گالووی و همکاران^۴، ۲۰۰۸).

به دلیل برداشت کنترل نشده آب‌های زیرزمینی، ایران در حال حاضر یکی از رکورددارترین کشورها در زمینه نرخ سالیانه فرونشست (۲۵ سانتی‌متر فرونشست در سال) است (گارسیا و همکاران، ۲۰۲۱). برداشت بیش‌ازحد آب از سفره‌های آب زیرزمینی در طول دهه‌ها برای مصارف کشاورزی و صنعتی باعث فرونشست شدید زمین در بسیاری از دشت‌های ایران مانند دشت قره‌بلاغ استان فارس (یمانی و همکاران، ۱۳۸۸)، رفسنجان (موتق و همکاران^۵، ۲۰۱۷)، مشهد (دهقانی و همکاران^۶، ۲۰۰۹)، تهران (آزادنژاد و همکاران^۷، ۲۰۱۹؛ آزادنژاد و همکاران، ۲۰۲۰)، قزوین (بابایی و همکاران^۸، ۲۰۲۰) و نیشابور (رضایی و همکاران^۹، ۲۰۲۰) شده است. در این میان دشت جنوب غرب تهران یکی از مناطقی است که با کاهش تراز آب‌های زیرزمینی مواجه بوده و به تبع آن آثار فرونشست در این منطقه دیده می‌شود (محمودپور و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۶). و این مسأله تهدیدی جدی برای بافت و کالبد شهری و صنعتی و همچنین اراضی کشاورزی این منطقه است. در این راستا منطقه ۱۸ شهرداری تهران یکی از مناطقی است که فرونشست زمین در آن به وقوع پیوسته (مرادی و همکاران، ۱۳۹۹) و در حال فرونشینی به نرخ ۱ الی ۲۵ سانتی‌متر است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲). احتمال همزمانی سانحه فرونشست با زمین‌لرزه به دلیل همجواری منطقه ۱۸ با گسل فعال ری (به‌عنوان عامل

1 Borchers and Carpenter

2 Oruji et al

3. Zhang et al

4 Galloway et al

5 Motagh et al

6 Dehghani et al

7 Azadnejad et al

8 Babaei et al

9 Rezaei et al

10 Mahmoudpour et al

ماشه‌ای برای رویداد سانحه فروریزش در اراضی)، تراکم زیاد جمعیتی و ساختمانی، وجود بافت فرسوده گسترده و وضعیت نامناسب استقرار عناصر کالبدی و کاربری‌های نامناسب شهری در منطقه ۱۸ این منطقه را مستعد بروز فاجعه‌ای شدید با تلفات انسانی بالا می‌کند. از این‌روی هدف این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ANP و GIS خواهد بود. در جدول ۱ به برخی از مطالعات که در رابطه با فرونشست زمین و تأثیرات آن بر سکونتگاه‌های شهری صورت گرفته است، اشاره شده است.

جدول ۱- مطالعات انجام یافته در رابطه با فرونشست زمین و تأثیر آن بر سکونتگاه‌های شهری

محققان	نتایج پژوهش
پرت و جانسون ^۱	در سال ۱۹۲۶ پرت و جانسون اولین مشاهده در مورد نشست زمین مرتبط با فرآیندهای زیرسطحی را انجام داده‌اند. آن‌ها اشاره کرده‌اند که «علت فرونشست را باید در استخراج گسترده سیال از زیر منطقه آسیب دیده یافت».
ترزاقی ^۲	اولین نقطه عطف در نظریه تحکیم آبخوان به دلیل پمپاژ آب زیرزمینی در سال ۱۹۲۳ توسط ترزاقی معرفی گردید که اصل «تنش مؤثر بین دانه‌های خاک» را معرفی کرد (گامبولاتی و همکاران ^۳ ، ۲۰۱۵).
گامبولاتی و فریز ^۴	در اوایل دهه ۱۹۷۰، گامبولاتی و فریز با ظهور فناوری کامپیوتری اولین مدل‌سازی ریاضی فرونشست را توسعه دادند (گامبولاتی و همکاران، ۲۰۱۵). از آن زمان، فهم، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی پدیده فرونشست به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.
پولند	در اواخر دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، مفاهیم مرتبط با فرونشست زمین و برداشت آب به لطف کمک‌های اساسی پولند — پیشگام در مطالعات فرونشست زمین بر اثر عوامل انسانی — پذیرفته شد (پولند، ۱۹۵۸، ۱۹۶۰، ۱۹۶۱؛ پولند و داویس، ۱۹۵۶، ۱۹۶۹؛ پولند و همکاران، ۱۹۵۹؛ پولند و گرین، ۱۹۶۲) ^۵ .
فت ^۶	«گسیختگی‌های زمین مرتبط با فرونشست زمین» برای اولین بار در سال ۱۹۴۹ در مرکز آریزونا توسط فت (۱۹۵۱) مشاهده شد و در پی آن، بیش از ۲۰ سال طول کشید تا سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده تحقیقات عمده‌ای را در مناطقی که دچار فرونشست شده‌اند (کالیفرنیا، آریزونا، تگزاس و نوادا) در جنوب غربی ایالات‌متحده — جایی که فیشرها زمین به‌صورت گسترده‌ای مشکل‌ساز شده‌اند — انجام دهد (هولزر و داویس، ۱۹۷۶؛ هولزر و همکاران، ۱۹۷۹) ^۷ .
هولزر و پامپیان ^۸	هولزر و پامپیان در سال ۱۹۸۱ تشخیص دادند که فیشرها ناشی از عوامل انسانی هستند (جاچنز و هولزر، ۱۹۷۹؛ هولزر و پامپیان، ۱۹۸۱؛ جاچنز و هولزر، ۱۹۸۲) ^۹ .
چائوسارد و همکاران ^{۱۰}	چائوسارد و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای با عنوان «شهرهای در معرض ایجاد فروچاله در اندونزی: فرونشست سریع ناشی از آب‌های زیرزمینی و استخراج گاز» به بررسی فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در شش شهر واقع در

1 Pratt and Johnson

2 Terzaghi K. V.

3 Gambolati et al

4 Gambolati and Freeze

5 Poland; Poland and Davis; Poland et al; Poland and Green

6. Feth

7 Holzer and Davis, 1976; Holzer et al., 1979

8 Holzer and Pampeyan

9 Jachens and Holzer; Holzer and Pampeyan; Jachens and Holzer

10 Chaussard et al

محققان	نتایج پژوهش
	غرب اندونزی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بارندگی شدید همراه با طوفان‌های موسمی و استوایی، فقدان دفاع ساحلی یا رودخانه‌ای و همچنین پتانسیل محدود تخلیه، آسیب‌پذیری شهرهای اندونزی را افزایش می‌دهد (چائوسارد و همکاران، ۲۰۱۳).
کاستلازی و همکاران ^۱	کاستلازی و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مقاله‌ای با عنوان «فرونشست زمین در شهرهای بزرگ مکزیک مرکزی: تحلیل نقشه فرونشست زمین برگرفته از InSAR با داده‌های هیدروژئولوژیکی» به بررسی تأثیر فرونشست بر مکزیک مرکزی پرداختند و یک همخوانی بین تغییرات اخیر نرخ فرونشست با داده‌های زمین‌شناسی و پیشنهادهایی برای کاهش آسیب‌های آتی به زیرساخت‌ها و کمک به مدیریت منابع آب زیرزمینی را ارائه دادند (کاستلازی و همکاران، ۲۰۱۶).
هررا لئون و همکاران ^۲	هررا لئون و همکاران در سال ۲۰۱۸ در مقاله‌ای با عنوان «فرونشست زمین و تأثیرات آن بر مناطق شهری در شهر تپیک ^۳ مکزیک» به بررسی فرونشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی رابطه بین عوامل طبیعی و عوامل انسانی به عنوان دلایل پیدایش فرونشست در منطقه تپیک پرداخته‌اند (هررا لئون و همکاران، ۲۰۱۸).

در تحقیقات ارائه شده، محققان تلاش کرده‌اند اهمیت فرونشست زمین و خطرات ناشی از وقوع آن را مورد تأکید قرار دهند. بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد که در هیچ‌کدام از مطالعات مربوط به فرونشست زمین، میزان آسیب‌پذیری بافت کالبدی و جمعیتی شهرها در صورت وقوع فرونشست بررسی و تحلیل نشده و همچنین از تحلیل شبکه‌ای (ANP) برای تعیین معیارها و شاخص‌های آسیب‌پذیری بافت شهری تحت تأثیر فرونشست زمین استفاده‌ای نشده است و این می‌تواند از نقاط قوت این تحقیق نیز باشد. فرونشست زمین می‌تواند خسارات جدی و پرهزینه‌ای از جمله تخریب سازه‌ها و ساختمان‌ها، شبکه راه‌ها و دسترسی‌ها و تأسیسات مخازن آب، نیروگاه‌ها، خطوط مخابراتی و برق را به همراه داشته باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که دشت جنوب غرب تهران درگیر پدیده فرونشست زمین شده است (محمودپور و همکاران، ۲۰۱۶) و در این پهنه، منطقه ۱۸ تهران یکی از مناطقی است که خطر فرونشست می‌تواند یک بحران جدی با تلفات انسانی در مقیاس بالا را ایجاد کند. نقشه الگوی توزیع فضایی نواحی مسکونی منطقه ۱۸ نشان دهنده استقرار بخش قابل توجهی از اراضی ساخته شده این منطقه در عرصه درگیر با پدیده فرونشست است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲). فروریزش ناگهانی زمین و تخریب و ریزش سازه‌های آسیب‌پذیر از سوانح محتمل ناشی از عوارض فرونشست است که در منطقه ۱۸ به دلیل تراکم زیاد جمعیت و بافت فرسوده آن می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی زیاد فاجعه‌آفرین باشد.

1 Castellazzi et al

2 Herrera Leon et al

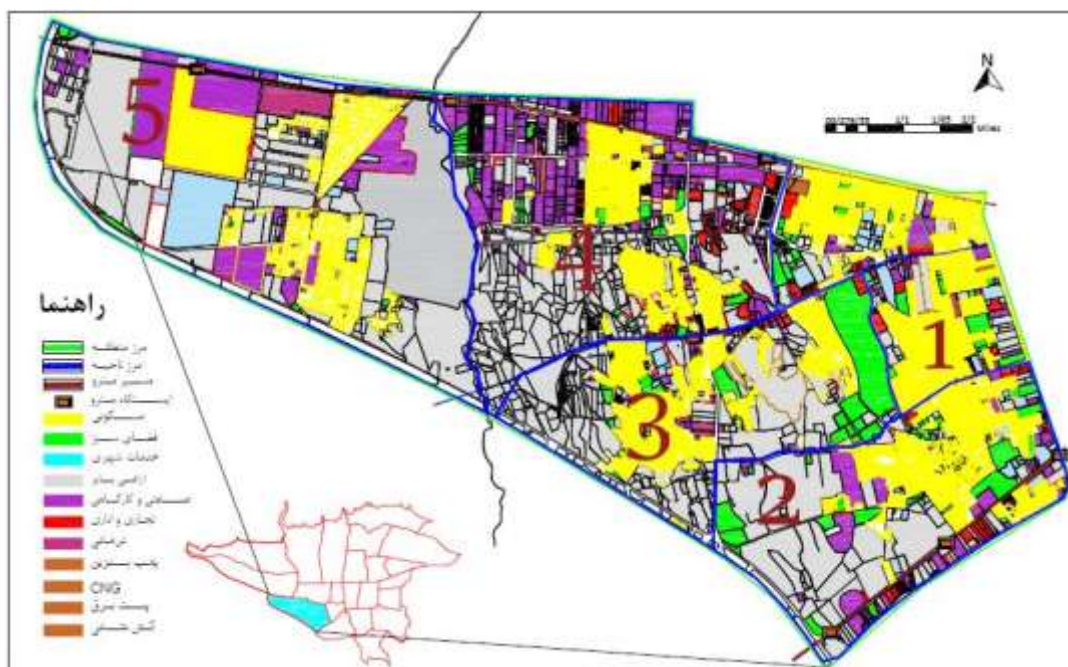
3 Tepic

4 Mahmoudpour et al

۲- مواد و روش

٢-١- منطقة مو، دمطالعہ

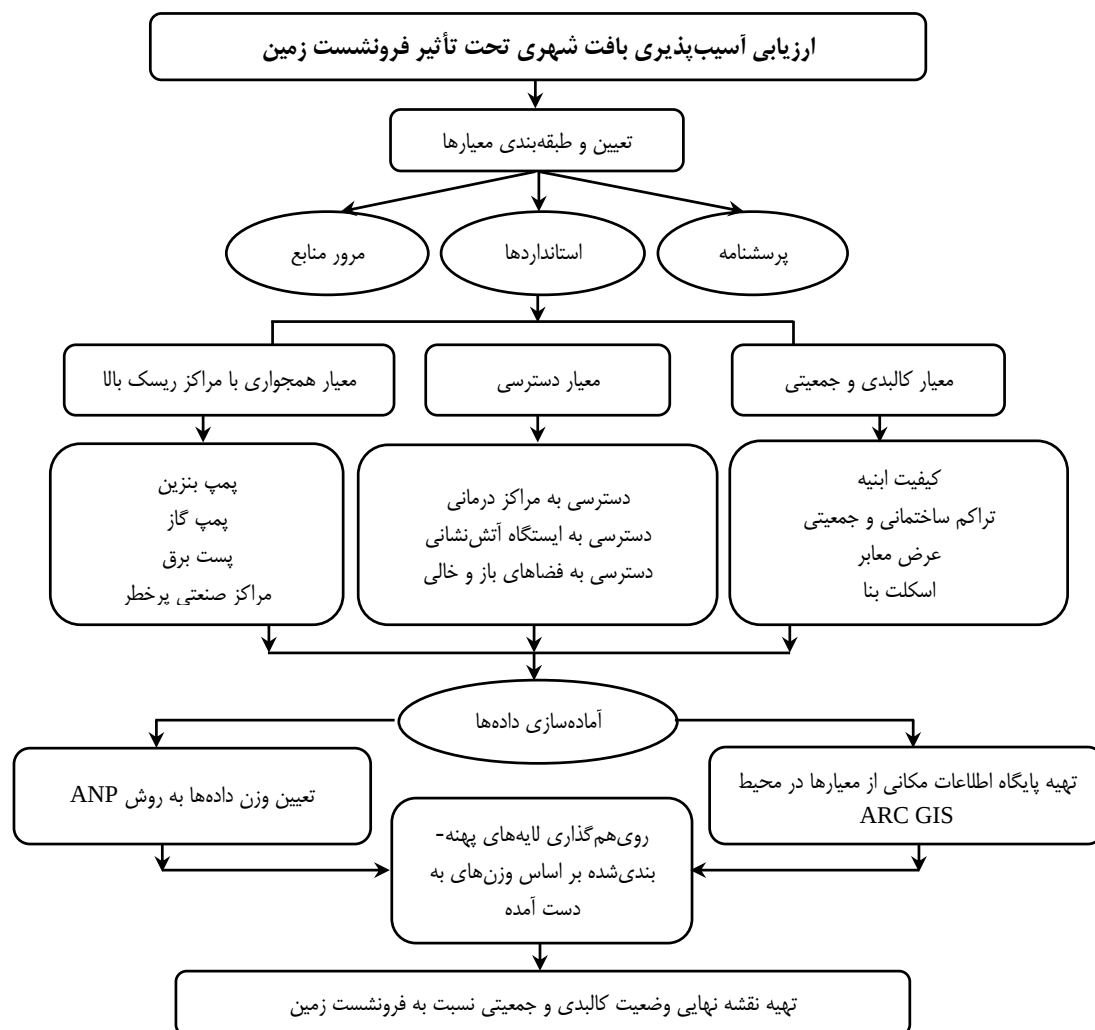
منطقه ۱۸ با ۳۷۸۸ هکتار مساحت (معادل ۸ درصد مساحت کل شهر تهران) یکی از بزرگ‌ترین مناطق شهر تهران است که دارای ۵ ناحیه و ۱۳ محله است. جمعیت منطقه حدود ۴۴۴/۸۸۶ هزار نفر و با تراکم خالص جمعیتی حدود ۷۶۰ نفر در هکتار است. این منطقه به لحاظ جغرافیایی از شمال به بزرگراه فتح و ۴۵ متری زرنند، از شرق به بزرگراه آیت‌الله سعیدی، از غرب به بزرگراه آزادگان و شهرستان قدس و شهریار و از جنوب به بزرگراه آیت‌الله سعیدی و بزرگراه آزادگان محدود می‌شود. منطقه ۱۸ در بخش جنوب‌غربی شهر تهران واقع و با مناطق ۹ و ۲۱ (شمال)، شهرستان شهریار (غرب)، اسلام‌شهر (جنوب) و ۱۷ و ۱۹ (شرق) همجوار است. این منطقه در سال ۱۳۵۹ به تهران بزرگ الحاق شده و هسته اولیه این منطقه روستای یافت‌آباد بوده که با گسترش مهاجرت توسعه و رشد یافته است. اغلب کاربری‌های این منطقه قبل از توسعه شهری و ساخت‌وساز کشاورزی بوده است. منطقه ۱۸ با داشتن ۱۰۰۰ هکتار اراضی با کاربری صنعتی (۳۰ درصد اراضی منطقه) رتبه نخست را از لحاظ مساحت در کل سطح تهران بزرگ را دارا است. بافت مسکونی بسیار پرتراکم و معابر کم‌عرض از ویژگی‌های بارز این منطقه به حساب می‌آید (شهرداری تهران، ۱۴۰۰).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه ۱۸ شهر تهران

۲-۲- روش‌شناسی پژوهش

هدف از این پژوهش، ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین است که در قالب مطالعات فضایی — مکانی با اجرای یک مدل تحلیلی در سه گام اول، اصول و مبانی آسیب‌پذیری با مطالعه سوابق و با مراجعه به منابع علمی و معتبر به دست آمد. در گام دوم، اولویت‌های آسیب‌پذیری بافت شهری در ارتباط با پدیده فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از ابزار پرسشنامه تعیین شد و توزیع پرسشنامه بین ۳۰ کارشناس ستاد حوادث غیرمترقبه، شهرداری، اداره‌های مسکن و شهرسازی و اساتید دانشگاه‌ها صورت گرفت. در گام سوم، مدل تحلیلی بر پایه روش ANP تعریف شد و وزن هر یک از زیرمعیارها و معیارها، با استفاده از نرم‌افزار Super Decision به دست آمد. اوزان اختصاصی حاصل از مدل‌سازی ANP روی لایه‌های مکانی منطقه اعمال شد. در گام بعد، این وزن‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به هر یک از لایه‌های مربوط به معیارها اعمال شدند و همراه با آن، تلفیق لایه‌ها نیز صورت گرفت. سپس نقشه نهایی به صورت رستری در سیستم اطلاعات جغرافیایی به دست آمد. در شکل ۲ مدل تحلیلی تدوین شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری تحت تأثیر فرونشست زمین ارائه شده است.



شکل ۲- مدل تحلیلی ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای ANP و GIS

۲-۳- مدل تحلیل شبکه (ANP)

فرآیند تحلیل شبکه یا ANP، یکی دیگر از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که شباهت زیادی به روش AHP دارد و به عبارت بهتر، شکل گسترش‌یافته فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی است. این فرآیند که آن را ساعتی^۱ در سال ۱۹۹۶ مطرح و معرفی کرد، در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. همچنین این فرآیند، نظریه‌ای

1 Saaty T.

جدید است که در آن، ساختار شبکه‌ای جانشین ساختار سلسله‌مراتبی شده است. این ویژگی سبب می‌شود که وابستگی‌ها و بازخوردهای بین معیارها و زیرمعیارها، به‌صورت نظام‌مند بررسی شود (چانگ و لی، ۲۰۰۵). روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) ارتباطات پیچیده میان عناصر تصمیم را از طریق جایگزینی ساختار سلسله‌مراتبی با ساختار شبکه‌ای در نظر می‌گیرد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر استفاده از ANP در اغلب زمینه‌ها افزایش یافته است (زبردست، ۱۳۹۰). روش ANP دارای گام‌هایی به شرح زیر است: گام اول، پایه‌ریزی مدل و ساختار مسئله، گام دوم ماتریس مقایسات زوجی و برآورد وزن نسبی، گام سوم تشکیل سوپر ماتریس اولیه، گام چهارم تشکیل سوپر ماتریس وزنی، گام پنجم محاسبه بردار وزنی عمومی، گام ششم محاسبه وزن نهایی معیارها و در گام هفتم با توجه به جدول وزن خوشه‌ها و سوپر ماتریس حد، وزن نهایی معیارها محاسبه می‌شود.

۲-۴- معرفی معیارها و شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری

در این پژوهش با بررسی آراء صاحب‌نظران معیارهای مربوط به آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین را می‌توان به شرح زیر دانست:

- ساختار کالبدی و جمعیتی؛

- قابلیت دسترسی؛

- همجواری با مراکز ریسک بالا.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری تحت تأثیر فرونشست زمین

معیارها	معیار کالبدی و جمعیتی	معیار دسترسی	معیار همجواری با مراکز ریسک بالا
شاخص‌ها	کیفیت ابنیه	دسترسی به مراکز درمانی	پمپ‌بنزین
	تراکم ساختمانی و جمعیتی	دسترسی به ایستگاه آتش‌نشانی	پمپ گاز
	عرض معابر	دسترسی به فضاهای باز و خالی	پست برق
	اسکلت بنا		مراکز صنعتی پرخطر

به‌منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری و در چارچوب معیارهای مطرح شده، شاخص‌های زیر تعیین گردید تا بتوان به‌صورت کمی در مورد میزان آسیب‌پذیری قضاوت کرد:

۲-۴-۱- کیفیت ابنیه: هرچه مقاومت بنا بیشتر باشد و از مصالح بادوام‌تری ساخته شده باشد، آسیب‌پذیری کمتری خواهد داشت (احدنژادروشنی و همکاران، ۱۳۹۴؛ توکلی و اکبرپور، ۱۳۸۹؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۳). بدیهی است احتمال مقاومت ساختمان‌های با کیفیت بالا (نوساز) نسبت به ساختمان‌های تخریبی بیشتر است. کیفیت ابنیه و ساخت آن‌ها از عوامل اثرگذار بر مقاومت ساختمان‌های شهری در برابر فشارهای وارده است. از این منظر

ساختمان‌های شهری به سه دسته نوساز، مرمتی و تخریبی قابل تفکیک است. شاخص کیفیت ابنیه رابطه مستقیمی با نوع مصالح، الگوی معماری و عمر بناها نیز دارد (محمدی ده‌چشمه، ۱۳۹۲؛ فرزام‌شاد و عراقی‌زاده، ۱۳۹۱؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۴-۲- تراکم ساختمانی: شاخص مهمی است که با بیشتر شدن آن احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. از میان رفتن فضای سبز و باغ‌ها و تبدیل آن‌ها به مجموعه‌های پرتراکم علاوه بر اینکه سبب افت کیفیت زیستی و نابودی منابع زیست‌محیطی می‌گردد، توزیع نامناسب فضاهای باز را نیز باعث می‌گردد و موجب می‌شود که برای استقرار آسیب‌دیدگان به‌صورت اسکان موقت، در برخی مناطق کمبودهای جدی به وجود آید و انتقال آسیب دیدگان به فواصل بسیار دور مشکل‌ساز شود. با تفکیک شهر به شبکه 250×250 متر، شبکه‌هایی که تعداد ساختمانی تا ۷۵ ساختمان باشد آسیب‌پذیری کم، ۷۵-۱۵۰ ساختمان در هر شبکه آسیب‌پذیری متوسط و ۱۵۰-۳۰۰ ساختمان آسیب‌پذیری زیاد خواهد بود (صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۴-۳- تراکم جمعیتی: یکی از معیارهای اصلی آسیب‌پذیری در یک شهر تراکم جمعیتی شهرها است که به‌واسطه تجمع و تمرکز جمعیت، ارتباط مستقیمی بین این بخش و آسیب‌پذیری‌های شهر وجود دارد. در سوانح اعم از طبیعی و غیرطبیعی، در همان ساعات اولیه بروز سانحه جمعیت مردمی از آسیب‌پذیرترین بخش‌ها است که آسیب‌پذیری شهر را بیشتر می‌کند. تراکم جمعیتی عموماً به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده آسیب‌پذیری بافت‌های شهری مطرح می‌شود (حبیبی و همکاران، ۱۳۸۷). بدیهی است که با افزایش تراکم جمعیت آسیب‌پذیری نیز افزایش می‌یابد (انارسون و مورو، ۱۹۹۸؛ پیاکوک و همکاران، ۱۹۹۷؛ تیرنی، ۲۰۰۶).

۲-۴-۴- عرض معابر: یکی دیگر از معیارهای مؤثر در آسیب‌پذیری بافت کالبدی و جمعیتی شهرها، عرض معابر است. عرض معبر هرچه کمتر باشد احتمال آسیب‌پذیری بیشتر خواهد بود زیرا با آوار شدن در خیابان، عملیات کمک‌رسانی به‌سختی صورت می‌گیرد. همچنین هرچه عرض معابر بیشتر باشد، امکان ایجاد ترافیک عبوری نیز کمتر خواهد شد (حبیبی و همکاران، ۱۳۸۷؛ عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۴-۵- اسکلت بنا: مقاومت انواع ساختمان‌ها به‌شدت بارهای وارده می‌تواند تعریف شود و آسیب‌پذیری ساختمان یکی از فاکتورهای اصلی مؤثر بر تلفات انسانی است؛ بنابراین تجزیه و تحلیل ایمنی ساختمان در برابر حوادث موضوع بسیار مهمی است (اوکادا و تاکای^۲، ۲۰۰۰). اسکلت‌های فلزی و بتن مسلح نسبت به سایر مصالح دارای آسیب‌پذیری کمتر، اسکلت‌های آجری و سنگی دارای آسیب‌پذیری متوسط و اسکلت‌های چوبی، بلوک سیمانی، خشت و گل دارای آسیب‌پذیری زیاد است (حاتمی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۸؛ فیروزی و همکاران، ۱۳۹۳؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳).

1 Enarson and Morrow; Peacock et al; Tierney

2 Okada and Takai

۲-۴-۶- دسترسی به مراکز درمانی: دسترسی به مراکز درمانی موجب سرعت بخشیدن به عملیات امداد و نجات و خدمات رسانی می شود. به این ترتیب با دور شدن از مراکز درمانی، احتمال آسیب پذیری بیشتر می شود. موضوع عدم دسترسی مناسب به مراکز حیاتی از قبیل بیمارستان ها یکی از مشکلاتی است که از عدم توجه به لزوم دسترسی سریع و آسان به چنین مراکزی در هنگام مکانیابی این مراکز در سطح شهر ناشی گردیده است. دسترسی مناسب به مراکز درمانی امکان رسیدگی به وضعیت مصدوم ها و مجروحان را مهیا می سازد (عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرزام شاد و عراقی زاده، ۱۳۹۱).

۲-۴-۷- دسترسی به ایستگاه آتش نشانی: دسترسی مناسب به مراکز امدادی می تواند از آسیب ناشی از فرونشست زمین بکاهد. ایستگاه های آتش نشانی با پوشش مناسب می تواند از شدت حوادث و خسارات مالی و جانی به شدت بکاهد (صیامی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۴-۸- دسترسی به فضاهای باز و خالی: پراکندگی مناسب مکان هایی که قابلیت اسکان موقت مردمی که خانه های آنان تخریب شده سبب کاهش آسیب در حین و بعد از وقوع حادثه می شود و از جمله این فضاها شامل فضای سبز، فضای باز و سالن های ورزشی سرپوشیده در سطح شهرها است (صیامی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۴-۹- همجواری با پمپ بنزین: آسیب دیدن برخی از تأسیسات شهری می تواند سبب افزایش خسارات شود؛ بنابراین حفظ حریم های مربوط به آن ها ضرورت دارد. به صورت عمده در سطح شهرها، این موارد شامل سه شاخص اصلی حریم جایگاه های سوخت رسانی (پمپ بنزین، جایگاه CNG و مخازن ذخیره سوخت)، حریم پست های برق و ایستگاه های S.B.T شبکه گازرسانی دانست. در سطح شهر، مخازن ذخیره سوخت، پمپ بنزین ها و مراکزی که پتانسیل آزاد کردن انرژی زیادی دارند را می توان به عنوان کاربری های آسیب رسان لحاظ کرد (عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۲). همجواری مراکز صنعتی پرخطر با کاربری های مسکونی نیز می تواند پتانسیل بالایی از خطر را در هنگام وقوع حادثه ایجاد نماید.

جدول ۳- معیارها و شاخص های ارزیابی آسیب پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین

معیار	شاخص	میزان آسیب پذیری			مأخذ
		کم	متوسط	زیاد	
کالبدی و جمعیتی	کیفیت ابنیه	نوساز	مرمتی	تخریبی	احدنژادروشنی و همکاران، ۱۳۹۴؛ توکلی و اکبرپور، ۱۳۸۹؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ محمدی ده چشمه، ۱۳۹۲؛ فرزام شاد و عراقی زاده، ۱۳۹۱؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳
	تراکم ساختمانی	۰-۷۵	۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳

معیار	شاخص	میزان آسیب‌پذیری			مأخذ
		کم	متوسط	زیاد	
	تراکم جمعیتی	کمتر از ۱۰۰ نفر در هکتار	۱۰۰-۲۰۰ نفر در هکتار	بیشتر از ۲۰۰ نفر در هکتار	حبیبی و همکاران، ۱۳۸۷؛ انارسون و مورو، ۱۹۹۸؛ پیاکوک و همکاران، ۱۹۹۷؛ تیرنی، ۲۰۰۶
	عرض معابر	بیشتر از ۱۴ متر	۹-۱۴ متر	بن‌بست، زیر ۶ متر، ۶-۹ متر	علیخانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ حبیبی و همکاران، ۱۳۸۷؛ عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳
	اسکلت بنا	بتنی	فلزی	سایر	حاتمی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۸؛ فیروزی و همکاران، ۱۳۹۳؛ ابراهیمیان قاجاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ اوکادا و تاکای، ۲۰۰۰
دسترسی	دسترسی به مراکز درمانی	کمتر از ۲۵۰ متر	۲۰۰-۵۰۰ متر	بیشتر از ۵۰۰ متر	عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرزام‌شاد و عراقی‌زاده، ۱۳۹۱
	دسترسی به آتش-نشانی	کمتر از ۷۵۰ متر	۷۵۰-۱۵۰۰ متر	بیشتر از ۱۵۰۰ متر	صیامی و همکاران، ۱۳۹۳
	دسترسی به فضاهای باز، خالی	کمتر از ۲۵۰ متر	۲۵۰-۵۰۰ متر	بیشتر از ۵۰۰ متر	صیامی و همکاران، ۱۳۹۳
همجواری با مراکز ریسک بالا	پمپ‌بنزین	بیشتر از ۱۵۰ متر	۷۵-۱۵۰ متر	کمتر از ۷۵ متر	عزیزی و برنافر، ۱۳۹۱؛ صیامی و همکاران، ۱۳۹۲
	جایگاه گاز	بیشتر از ۱۰۰ متر	۵۰-۱۰۰ متر	کمتر از ۵۰ متر	
	پست برق	بیشتر از ۱۰۰ متر	۵۰-۱۰۰ متر	کمتر از ۵۰ متر	
	مراکز صنعتی	بیشتر از ۴۰۰ متر	۲۰۰-۴۰۰ متر	کمتر از ۲۰۰ متر	پردازش‌های پژوهش

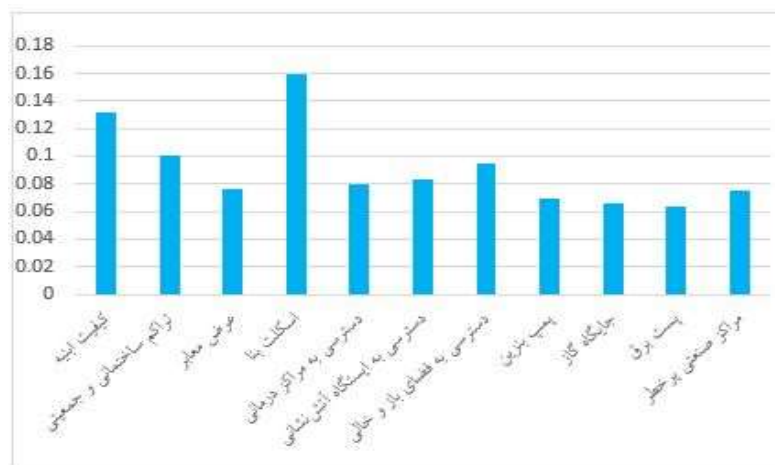
۲-۵- انجام تحلیل سلسله‌مراتبی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران تحت تأثیر فرونشست زمین، پس از تعیین معیارها به روش دلفی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی، روش ANP بر داده‌ها اعمال شد. سپس وزن هر یک از زیرمعیارها و معیارها مشخص و به نرم‌افزار Super Decision وارد شد.

معیارها	کالبدی و جمعیتی	دسترسی	همجواری با مراکز ریسک بالا	وزن نهایی
کالبدی و جمعیتی	۱	۵	۶	۰/۷۰۹
دسترسی	۱/۵	۱	۴	۰/۲۱۲
همجواری با مراکز ریسک بالا	۱/۶	۱/۴	۱	۰/۰۷۹

جدول ۵- سوپر ماتریس حدی محاسبه شده برای ارزیابی آسیب پذیری بافت شهری

[illegible]



شکل ۳- وزن نهایی خروجی مدل ANP

با بررسی مدل ارزیابی آسیب‌پذیری مشخص شد که معیارها و شاخص‌های آسیب‌پذیری از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند و در این میان معیار کالبدی و جمعیتی به دلیل گستردگی و اهمیت کالبدی آن با وزن ۰/۷۰۹ بالاترین ارزش در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری را داراست. همچنین از بین شاخص‌های موردبررسی، شاخص اسکلت بنا با وزن ۰/۱۵۹ و شاخص کیفیت آب با وزن ۰/۱۳۲ بالاترین ارزش در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری را به خود اختصاص داده است.

۳- نتایج و بحث

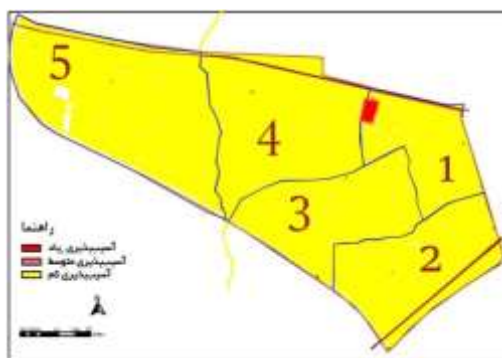
در این تحقیق تعداد ۱۱ شاخص برای بررسی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ شهر تهران انتخاب شد. با تقسیم محدوده مورد مطالعه به ۵ ناحیه و با کمک نرم‌افزار ArcGIS، میزان آسیب‌پذیری برحسب کم، متوسط و زیاد به دست آمد. با توجه به فرسوده بودن بافت شهری منطقه ۱۸ و وجود مراکز صنعتی زیاد، هر یک از نواحی این منطقه دارای ویژگی‌های متفاوتی است که در [جدول ۶](#) به آن‌ها اشاره شده است.

جدول ۶- خصوصیات هر یک از نواحی منطقه ۱۸ شهر تهران (مساحت به هکتار)

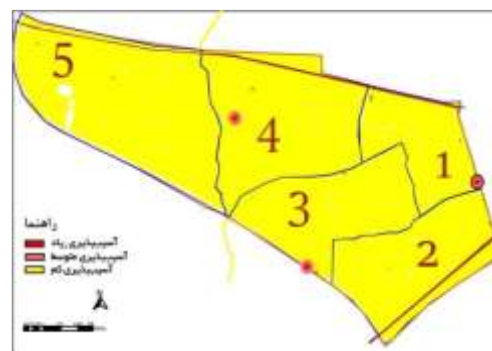
ویژگی‌ها	ناحیه ۱	درصد	ناحیه ۲	درصد	ناحیه ۳	درصد	ناحیه ۴	درصد	ناحیه ۵	درصد	منطقه ۱۸
مساحت	۴۶۸	۱۲/۳	۷۰۹	۱۸/۷	۶۸۰	۱۷/۹	۹۴۵	۲۴/۹	۱۲۴۸	۳۲/۹	۳۷۸۸
مساحت اراضی ساخته شده	۳۴۲	۱۹/۲	۳۰۳	۱۷	۲۶۱	۱۴/۶	۳۸۷	۲۱/۷	۴۸۳	۲۷/۱	۱۷۷۷
کاربری مسکونی	۲۵۹	۲۴	۲۰۲	۱۸/۸	۲۳۵	۲۱/۸	۱۶۱	۱۵	۲۵۳	۲۳/۵	۱۱۱۳
بافت فرسوده	۳۳۱	۹۶/۷	۲۷۲	۸۹/۷	۲۴۰	۹۲	۳۳۵	۸۶/۵	۴۵۱	۹۳/۳	۱۶۲۹
جمعیت	۱۰۴۴۴۰	۲۳/۴	۸۰۷۰۸	۱۸/۱	۹۴۳۷۹	۲۱/۲	۶۳۴۳۰	۱۴/۳	۱۰۱۹۲۵	۲۲/۹	۴۴۴۸۸۶

از نظر مساحت به ترتیب ناحیه ۵ (۳۲/۹ درصد) و ناحیه ۴ (۲۴/۹ درصد) بیشترین مساحت منطقه را دارا می‌باشند. از نظر جمعیت به ترتیب ناحیه ۱ (۲۳/۴ درصد) و ناحیه ۵ (۲۲/۹ درصد) بیشترین درصد جمعیت را دارا هستند. از نظر اراضی ساخته شده، ناحیه ۵ با ۲۷/۱ درصد بیشتر مساحت را داراست. ناحیه ۱ و ۵ بیشترین درصد کاربری مسکونی را دارا بوده و از نظر بافت فرسوده بیش از ۹۱/۶ درصد تمامی نواحی منطقه ۱۸ دارای بافتی فرسوده هستند.

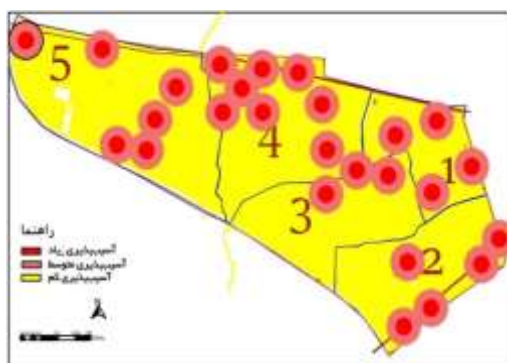
تعداد ۳ پمپ‌بنزین در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که با توجه به استاندارد موجود، بافت ساخته شده‌ای که در شعاع کمتر از ۷۵ متری پمپ‌بنزین قرار دارند، دارای آسیب‌پذیری زیاد بوده و بر این اساس حدود ۰/۲ درصد از مساحت کل اراضی ساخته شده منطقه در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. (شکل ۴) همچنین تعداد ۱ پست برق در محدوده مورد مطالعه موجود بوده که با توجه به استاندارد فاصله ۵۰ متری، حدود ۰/۷ درصد از کل مساحت اراضی ساخته شده منطقه در شعاع آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. (شکل ۵) تعداد ۲ ایستگاه CNG در محدوده مورد مطالعه وجود داشته و با توجه به استاندارد فاصله ۵۰ متری، حدود ۰/۰۸ درصد از اراضی ساخته شده در شعاع آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. (شکل ۶) ۲۶ مرکز صنعتی پرخطر در منطقه ۱۸ وجود دارد که با توجه به استانداردهای وزارت نیرو و صنعت، بافت ساخته شده‌ای که در شعاع کمتر از ۲۰۰ متری قرار دارند، دارای آسیب‌پذیری زیاد بوده و بر این اساس حدود ۱۱۳ هکتار (در حدود ۶/۳۵ درصد) از مساحت کل اراضی ساخته شده منطقه در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. (شکل ۷) در مجموع با تحلیل شاخص‌های معیار همجواری با مراکز ریسک بالا مشخص گردید که از کل مساحت اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ (۱۷۷۷ هکتار) در حدود ۷/۴ درصد (۱۳۲ هکتار) از اراضی ساخته شده در شعاع خطر با آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. همچنین ناحیه ۴ منطقه ۱۸ بالاترین میزان آسیب‌پذیری را از نظر معیار اراضی همجوار با مراکز ریسک بالا را به خود اختصاص داده است.



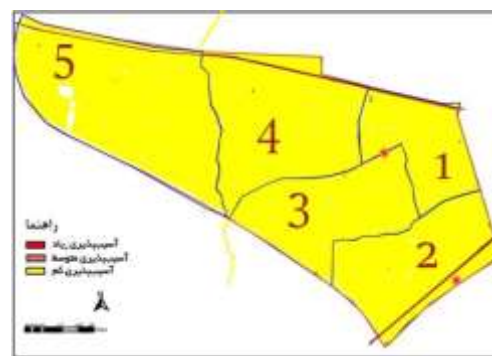
شکل ۵- نقشه آسیب‌پذیری ناشی از انفجار پست‌های برق



شکل ۴- نقشه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از پمپ بنزین

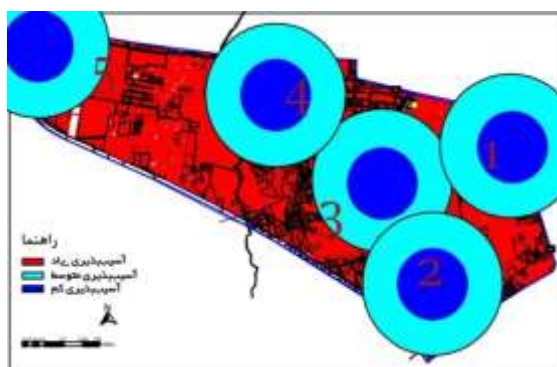


شکل ۷- نقشه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از مراکز صنعتی
پرخطر

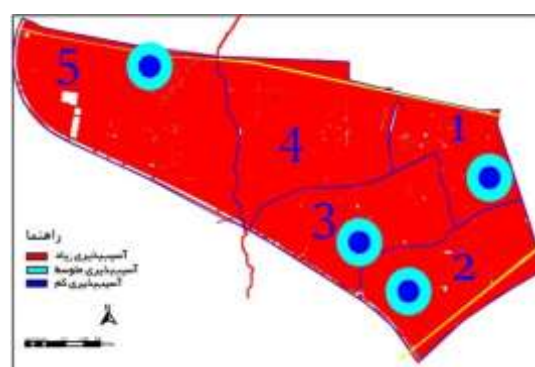


شکل ۶- نقشه آسیب‌پذیری برحسب انفجار ایستگاه‌های
CNG

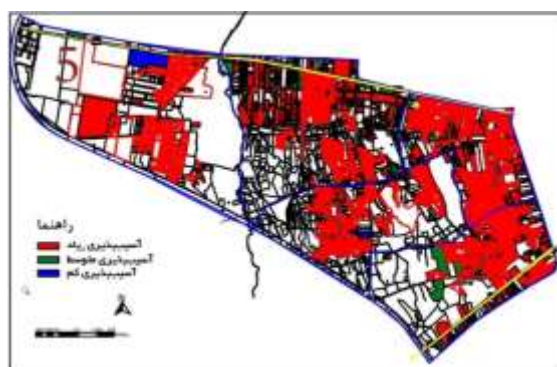
بر اساس شاخص دسترسی به مراکز درمانی، ناحیه ۴ آسیب‌پذیری زیادی نسبت به بقیه نواحی دارد. (شکل ۸) در مجموع در حدود ۲۱۷۱ هکتار (۵۷ درصد) از کل مساحت منطقه ۱۸ خارج از شعاع دسترسی مؤثر (دارای فاصله بیشتر از ۵۰۰ متر) از مراکز درمانی قرار دارند. تعداد ۵ ایستگاه آتش‌نشانی در سطح منطقه ۱۸ وجود داشته که در حدود ۳۴۴ هکتار (در حدود ۱۹/۳۵ درصد) از کل مساحت بافت ساخته شده منطقه ۱۸ خارج از شعاع دسترسی مؤثر (دارای فاصله بیشتر از ۱۵۰۰ متر) از ایستگاه آتش‌نشانی قرار دارند. (شکل ۹) دسترسی به مکان‌های باز و خالی یکی دیگر از شاخص‌هایی است که می‌تواند در کاهش صدمات انسانی در حین و پس از وقوع بحران مؤثر باشد. بررسی این شاخص در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که منطقه ۱۸ دارای فضاهای باز، سبز و بایر کافی بوده و تحلیل داده‌ها نشان داد که در حدود ۳۴۳ هکتار (۹ درصد) از کل محدوده خارج از شعاع دسترسی مؤثر (دارای فاصله بیشتر از ۵۰۰ متر) از فضاهای باز و خالی قرار دارند. (شکل ۱۰) در مجموع با تحلیل شاخص‌های معیار دسترسی مشخص گردید که نواحی ۴ و ۵ بیشترین درصد آسیب‌پذیری را دارا هستند.



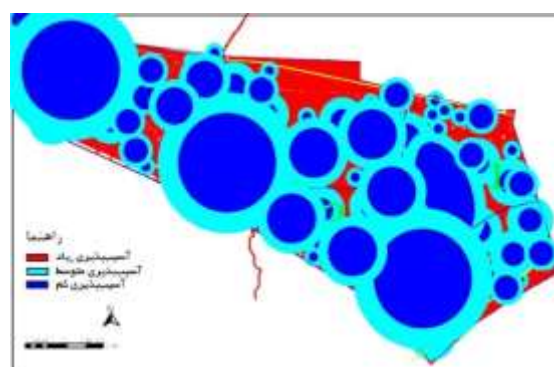
شکل ۹- نقشه آسیب پذیری برحسب دسترسی به ایستگاه آتش نشانی



شکل ۸- نقشه آسیب پذیری برحسب دسترسی به مراکز درمانی



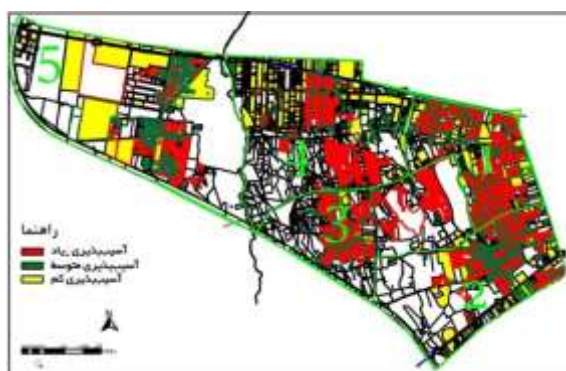
شکل ۱۱- نقشه آسیب پذیری برحسب کیفیت ابنیه



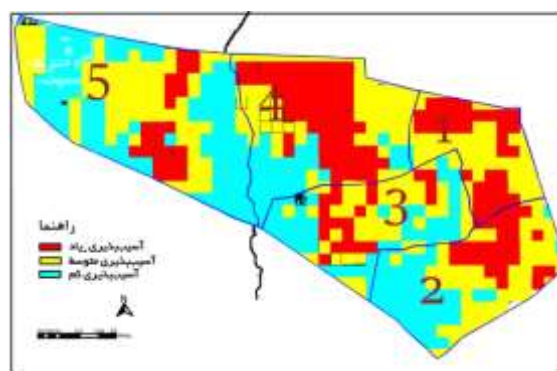
شکل ۱۰- نقشه آسیب پذیری برحسب دسترسی به فضاهای باز و خالی

با بررسی نقشه آسیب پذیری برحسب کیفیت ابنیه در منطقه ۱۸ مشخص گردید که از کل اراضی ساخته شده، ۳۲۹ هکتار (۱۸/۵ درصد) دارای بناهایی با کیفیت قابل نگهداری و ۱۲۳ هکتار (۷ درصد) دارای بناهایی با کیفیت مقاوم و نوساز بوده و ۱۳۲۵ هکتار (۷۴/۶ درصد) دارای بناهای فرسوده است. همچنین همه ۵ ناحیه محدوده مورد مطالعه درصد بالایی از بافت فرسوده را داراست. (شکل ۱۱) درصدهای فوق نشان می دهد که اکثریت قریب به اتفاق بناهای موجود در منطقه ۱۸ دارای بافتی فرسوده بوده و در صورت وقوع فرونشست زمین منطقه ۱۸ شاهد یک فاجعه انسانی خواهد بود. از نظر شاخص تراکم ساختمانی، تمام نواحی منطقه ۱۸ دارای تراکم بالای ساختمانی بوده و درصد آسیب پذیری زیادی را دارا می باشند. در این میان، ناحیه ۴ دارای بیشترین تراکم ساختمانی است. (شکل ۱۲) شاخص عرض معابر شاخص مهمی است که در صورت وقوع فاجعه در یک منطقه نقش بسیار مهمی را ایفاء خواهد کرد. بررسی ها نشان داد که از کل مساحت اراضی ساخته شده منطقه ۱۸، ۳۵۰ هکتار (۱۹/۷ درصد) دارای

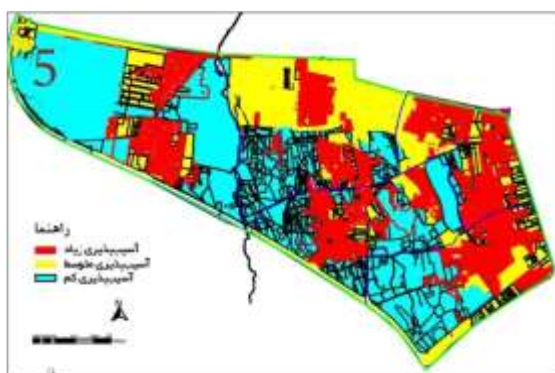
آسیب‌پذیری کم، ۱۴۵ هکتار (۸/۱ درصد) دارای آسیب‌پذیری متوسط و ۱۲۸۲ هکتار (۷۲/۱ درصد) دارای آسیب‌پذیری زیاد است. بررسی فوق نشان می‌دهد که بیشتر از ۷۰ درصد محدوده مورد مطالعه دارای معابری کم‌عرض و فاقد سلسله‌مراتب دسترسی بوده و در صورت وقوع بحران معضلات عدیده‌ای جهت فرار ساکنین از محدوده خطر ایجاد خواهد شد. همچنین از بین نواحی ۵ گانه محدوده مورد مطالعه، ناحیه ۴ وضعیت حادثری از حیث عرض معبر و دسترسی‌ها داشته و دارای آسیب‌پذیری زیادی است. (شکل ۱۳) اسکلت بنا یکی دیگر از شاخص‌هایی مهمی است که می‌تواند در کاهش صدمات انسانی در حین وقوع بحران مؤثر باشد. بررسی این شاخص در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که در حدود ۴۲ هکتار (۲/۴ درصد) از بناهای ساخته شده دارای اسکلت بتنی، ۱۱۸ هکتار (۶/۶ درصد) از بناهای ساخته شده دارای اسکلت آهنی و آجری و ۱۶۱۷ هکتار (۹۰/۱ درصد) از بناهای موجود، اسکلتی بی‌دوام و ضعیف دارد و دارای آسیب‌پذیری زیادی است. در مجموع هر ۵ ناحیه منطقه ۱۸ دارای بناهایی با اسکلت بی‌دوام بوده و در صورت وقوع بحران فرونشست زمین تلفات انسانی آن ناگزیر خواهد بود. (شکل ۱۴) تأثیرگذارترین شاخص ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری در برابر حوادث تراکم جمعیتی است. در محدوده مورد مطالعه بیشترین تراکم جمعیتی به میزان ۴۱۲ نفر در هکتار است. در این بین تمامی نواحی منطقه ۱۸ دارای تراکم جمعیتی بالاتر از سطح استاندارد (ناحیه ۱، ۴۰۳ نفر در هکتار؛ ناحیه ۲، ۳۹۹ نفر در هکتار، ناحیه ۳، ۴۰۱ نفر در هکتار، ناحیه ۴، ۳۹۳ نفر در هکتار و ناحیه ۵، ۴۰۲ نفر در هکتار) بوده و دارای آسیب‌پذیری زیاد است و در صورت بروز فاجعه فرونشست زمین بیشترین تلفات انسانی را به خود خواهد دید. (شکل ۱۵)



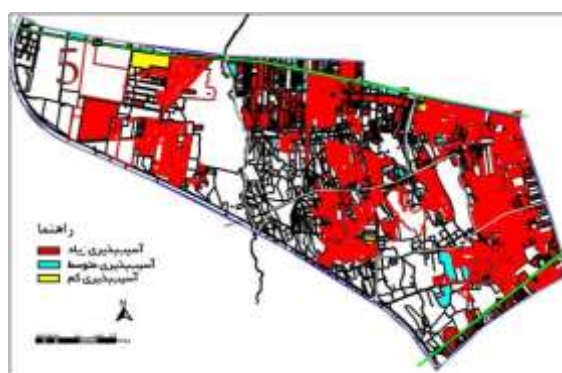
شکل ۱۳- نقشه آسیب پذیری برحسب عرض معابر



شکل ۱۲- نقشه آسیب پذیری برحسب تراکم ساختمان‌ها



شکل ۱۵- نقشه آسیب پذیری برحسب تراکم جمعیتی

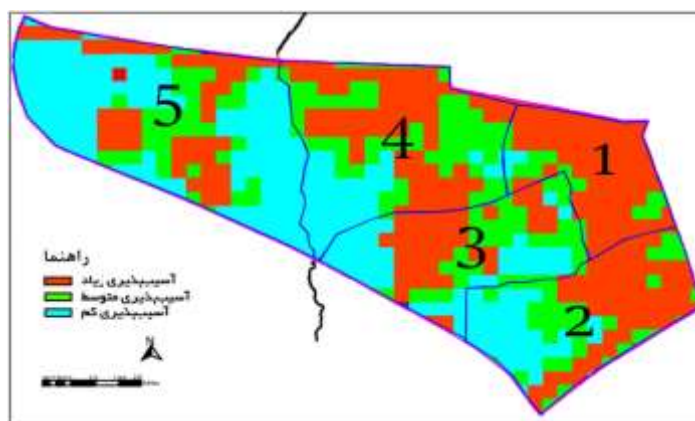


شکل ۱۴- نقشه آسیب پذیری برحسب نوع اسکلت بناها

۳-۱- تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی آسیب پذیری منطقه ۱۸ تهران

از طریق همپوشانی لایه‌های آسیب پذیری با نواحی منطقه ۱۸ تهران، وضعیت آسیب پذیری نواحی در سه سطح کم، متوسط و زیاد تعیین شد. بررسی‌های این تحقیق نشان داد که درصد بالایی از اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ دارای ویژگی‌هایی نظیر بافت فرسوده، بناهایی با مقاومت سازه‌ای پایین، کیفیت ساخت بسیار پایین بناها و تراکم بالای ساختمانی بوده و مستعد آسیب پذیری زیاد می‌باشند. بر این اساس از کل مساحت اراضی ساخته شده ناحیه ۱ (۳۴۲ هکتار)، در حدود ۳۲۸ هکتار (۹۶ درصد) در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار دارد و در بین تمام نواحی منطقه ۱۸، این ناحیه بیشترین میزان آسیب پذیری را دارا است. همچنین از کل مساحت اراضی ساخته شده ناحیه ۲ (۳۰۳ هکتار) در حدود ۲۶۸ هکتار آن (۸۸/۵ درصد)، از کل مساحت اراضی ساخته شده ناحیه ۳ (۲۶۱ هکتار) در حدود ۲۳۶ هکتار آن (۹۰/۴ درصد)، از کل مساحت اراضی ساخته شده ناحیه ۴ (۳۸۷ هکتار) در حدود ۳۲۹ هکتار آن (۸۵ درصد) و از کل مساحت اراضی ساخته شده ناحیه ۵ (۴۸۳ هکتار) در حدود ۴۴۶ هکتار آن (۹۲/۳ درصد) در محدوده

آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. (شکل ۱۶) در مجموع از کل اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ شهر تهران در حدود ۹۰ درصد بافت موجود در محدوده آسیب‌پذیری زیاد تحت تأثیر فرونشست زمین قرار دارد.



شکل ۱۶- نقشه نهایی آسیب‌پذیری برحسب نواحی منطقه ۱۸ شهر تهران

۴- جمع‌بندی

هرچند تعیین کمی و کیفی آسیب‌های احتمالی به بافت‌های شهری به صورت کامل ممکن نیست، پیش‌بینی و ارزیابی آسیب‌پذیری با هدف بررسی معیارها و شاخص‌های تأثیرگذار برای اشراف بر مسائل بعدی و احتمالی ناشی از بروز فرونشست زمین، این امکان را برای مدیران و مسئولان فراهم می‌کند که در صورت وقوع بحران، با آموزش نیروی انسانی و افزایش میزان مقاومت سازه‌ها برای کاهش زیان‌ها، تمهیدات لازم را برای پیش‌بینی، برخورد مناسب و برگشت سریع به وضع عادی اعمال کنند. بافت شهرها به عنوان یکی از ارکان مهم در برنامه‌ریزی کالبدی کشورها جهت رویارویی با حوادث طبیعی و انسان‌ساخت اهمیت زیادی دارد. مدیریت ساخت‌وساز و توجه به الزامات ایمنی سازه‌ها در بافت‌های شهری به دلیل تراکم جمعیتی، بسیار حائز اهمیت است. تحلیل مقر و موقعیت فضاهای مسکونی، صنعتی، درمانی، اداری و ... به عنوان اجزاء اصلی بافت هر شهری به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آن‌ها در مواجهه با پدیده فرونشست ایده اولیه این تحقیق به حساب می‌آید. تراکم بالای جمعیتی و ساختمانی، وجود بافتی فرسوده، بناهایی با مقاومت سازه‌ای پایین، کیفیت ساخت بسیار پایین بناها، همجواری اراضی ساخته شده با مراکز صنعتی پرخطر و درگیر شدن دشت جنوب غرب تهران با مسأله فرونشست زمین باعث شده تا ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تحت تأثیر فرونشست زمین از اهمیت خاصی برخوردار باشد و به عنوان محدوده مطالعاتی این تحقیق تعیین گردد. در این تحقیق، به روش دلفی و روش ANP، مؤثرترین معیارها و شاخص‌ها برای تعیین وضعیت آسیب‌پذیری بافت شهری تحت تأثیر فرونشست زمین معرفی شدند. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته در

نرم افزار ArcGIS، در خصوص محدوده مورد مطالعه، می توان موارد زیر را به عنوان اصلی ترین مسائل موجود در محدوده مطرح کرد:

- از نظر معیار همجواری با مراکز ریسک بالا، ناحیه ۴ بالاترین میزان آسیب پذیری را دارا است.
 - از نظر شاخص دسترسی به مراکز درمانی، ناحیه ۴ آسیب پذیری بالایی دارد.
 - هر ۵ ناحیه منطقه ۱۸ دارای درصد بالایی از بافت فرسوده می باشند.
 - هر ۵ ناحیه منطقه ۱۸ دارای تراکم بالای ساختمانی بوده و در این بین ناحیه ۴ نسبت به بقیه نواحی بیشترین تراکم ساختمانی را دارد.
 - بیشتر از ۵۰ درصد منطقه ۱۸ دارای معابری کم عرض و فاقد سلسله مراتب دسترسی است. همچنین از بین نواحی ۵ گانه منطقه ۱۸، ناحیه ۴ وضعیت حادثری از حیث عرض معبر و دسترسی ها دارد.
 - هر ۵ ناحیه منطقه ۱۸ دارای بناهایی با مقاومت سازه ای پایین است.
 - هر ۵ ناحیه منطقه ۱۸ دارای تراکم جمعیتی بالاتر از سطح استاندارد می باشند.
- از طریق همپوشانی لایه های آسیب پذیری با نواحی منطقه ۱۸ تهران، وضعیت آسیب پذیری نواحی در سه سطح کم، متوسط و زیاد تعیین شد. نتایج این تحقیق نشان داد که درصد بالایی از اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ دارای ویژگی هایی نظیر بافت فرسوده، بناهایی با مقاومت سازه ای پایین، کیفیت ساخت بسیار پایین بناها، تراکم بالای جمعیتی و ساختمانی بوده و مستعد آسیب پذیری زیاد می باشند. همچنین ناحیه ۱ با ۹۶ درصد، ناحیه ۲ با ۵۸٫۸ درصد، ناحیه ۳ با ۹۰٫۴ درصد، ناحیه ۴ با ۸۵ درصد و ناحیه ۵ با ۹۲٫۳ درصد اراضی ساخته شده در محدوده آسیب پذیری بالا قرار گرفته اند. در مجموع از کل اراضی ساخته شده منطقه ۱۸ شهر تهران در حدود ۹۰ درصد بافت ساخته شده در محدوده آسیب پذیری زیاد تحت تأثیر فرونشست زمین قرار دارد. درواقع، وضعیت نامناسب استقرار عناصر کالبدی و کاربری های نامناسب شهری، عرض کم معابر و شبکه ناکارآمد دسترسی ها، بافت فشرده و فرسوده شهری، تراکم بالای ساختمانی و جمعیتی و دسترسی نامناسب به مراکز درمانی نقشی اساسی در افزایش میزان آسیب های وارده به بافت شهری منطقه ۱۸ تهران در برابر وقوع فرونشست زمین خواهد داشت و احتمال بروز یک فاجعه انسانی در این منطقه بسیار بالا خواهد بود. با توجه به اهمیت موضوع فرونشست زمین و لزوم پرداختن مسئولین مدیریت بحران کشور به این مسأله، راهکارهای اجرایی — عملیاتی ذیل برای جلوگیری احتمال وقوع یک بحران پیشنهاد می گردد:

- تزریق دوغاب به محل های دارای فرونشست با استفاده از روش های جت گروتینگ یا میکروپایل؛
- استفاده از ژئوستتیک ها در زیر پی های سطحی به منظور کاهش تأثیر فرونشست بر سازه؛
- تزریق و پمپاژ آب در داخل زمین به منظور کاهش نرخ فرونشست؛

- استفاده از پی‌های انعطاف‌پذیر در زمان ساخت‌وسازهای جدید در مناطق مستعد فرونشست؛ و
- ممنوعیت ساخت‌وساز در مناطق دارای فرونشست شدید.

کتابنامه

- ابراهیمیان قاجاری، یاسر؛ آل‌شیخ، علی‌اصغر؛ مدیری، مهدی؛ حسینی، رضا؛ عباسی، مرتضی؛ ۱۳۹۳. مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری با استفاده از روش‌های دلفی و تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی سپهر. دوره ۲۳. شماره ۹۱. ۲۰-۵. <https://www.sid.ir/paper/253169/fa>
- احدنژادروشنی، محسن؛ روستایی، شهریور؛ کاملی‌فر، محمدجواد؛ ۱۳۹۴. ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری در برابر زلزله با رویکرد مدیریت بحران، مطالعه موردی: منطقه یک شهر تبریز. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی سپهر. دوره ۲۴. شماره ۹۵. <https://www.sid.ir/paper/253205/fa>
- توکلی، حمیدرضا؛ اکبرپور، سوده؛ ۱۳۸۹. ملاحظات بهسازی ساختمان‌ها در برابر اجزای پیش‌رونده. اولین کنفرانس پدافند غیرعامل و سازه‌های مقاوم. <https://civilica.com/doc/126066>
- حاتمی‌نژاد، حسین؛ فتحی، حمید؛ عشق‌آبادی، فرشید؛ ۱۳۸۸. ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای در شهر، نمونه مورد مطالعه: منطقه ۱۰ شهرداری تهران. پژوهش‌های جغرافیایی انسانی. شماره ۶۸. ۲۰-۱. <https://www.sid.ir/paper/139105/fa>
- حبیبی، کیومرث؛ پوراحمد، احمد؛ مشکینی، ابوالفضل؛ عسگری، علی؛ نظری‌عدلی، سعید؛ ۱۳۷۷. تعیین عوامل ساختمانی مؤثر در آسیب‌پذیری بافت کهن شهری زنجان با استفاده از GIS و FUZZY LOGIC. هنرهای زیبا. شماره ۳۳. ۳۲-۲۷. <https://www.sid.ir/paper/5630/fa>
- زبردست، اسفندیار؛ ۱۳۹۰. کاربرد فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای. نشریه هنرهای زیبا. دوره ۲. شماره ۴۱. ۹۶-۷۳. https://jfaup.ut.ac.ir/article_22270.html
- شهرداری تهران، معرفی منطقه‌ها. <https://www.mantagheha.com/article/233>
- صیامی، قدیر؛ لطیفی، غلامرضا؛ تقی‌نژاد، کاظم؛ زاهدی‌کلاکی، ابراهیم؛ ۱۳۹۳. آسیب‌شناسی پدافندی ساختار شهری با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و GIS؛ مطالعه موردی شهر گرگان. آمایش جغرافیایی فضا. دوره ۳. شماره ۱۰. ۴۲-۲۱. http://gps.gu.ac.ir/article_7382.html
- طالب‌بیدختی، ناصر؛ شیخعلی، محدثه؛ ۱۳۹۶. بررسی فرونشست، فروچاله و ترک‌های رخ داده در استان فارس. شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه محقق اردبیلی. ۱۲-۱. <https://civilica.com/doc/727282>
- عزیزی، محمدمهدی؛ برنافر، مهدی؛ ۱۳۹۱. فرآیند مطلوب برنامه‌ریزی شهری در حمله‌های هوایی از دیدگاه پدافند غیرعامل (مطالعه موردی: ناحیه یک منطقه ۱۱ تهران). فصلنامه مطالعات شهری. دوره ۱. شماره ۱. ۲۲-۱۰. <https://www.sid.ir/paper/468589/fa>

علیخانی، آرزو؛ برزگبرفروی، اکرم؛ نورالهی، حانیه؛ ۱۳۹۷. ارائه مدل ارزیابی جامع آسیب پذیری پهنه های شهری به تفکیک لایه های تشکیل دهنده شهر با رویکرد پدافند غیرعامل. *فصلنامه مدیریت بحران*. شماره ۱۶. ۳۳-۴۶.

<https://magiran.com/p2103514>

فرزادشاد، مصطفی؛ عراقی زاده، مجتبی؛ ۱۳۹۱. *مبانی برنامه ریزی و طراحی شهر امن از منظر پدافند غیرعامل*. انتشارات علم آفرین. تهران.

<https://www.gisoom.com/book/1936523/>

فیروزی، محمدعلی؛ محمدی ده چشمه، مصطفی؛ نظربوردزکی، رضا؛ شجاعیان، علی؛ ۱۳۹۳. سنجش میزان آسیب پذیری سازه های بیمارستان ها از منظر پدافند غیرعامل با مدل سلسله مراتب فازی. *فصلنامه برنامه ریزی و آمایش فضا*. دوره ۲۰. شماره ۱. ۱۷۷-۱۴۹.

<https://www.sid.ir/paper/515003/fa>

کریمی، مرتضی؛ قنبری، علی اصغر؛ امیری، شهرام؛ ۱۳۹۲. سنجش خطرپذیری سکونتگاه های شهری از پدیده فرونشست زمین مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهر تهران. *برنامه ریزی فضایی*. دوره ۳. شماره ۱. ۵۵-۳۷.

<https://www.sid.ir/paper/395139/fa>

محمدی ده چشمه، مصطفی؛ ۱۳۹۲. *ایمنی و پدافند غیرعامل شهری*. انتشارات دانشگاه شهید چمران. اهواز.

<https://www.gisoom.com/book/11022222/>

محمدی ده چشمه، مصطفی؛ ۱۳۹۲. شکل خوب شهر از منظر ملاحظات پدافند غیرعامل. *کنگره انجمن ژئوپلیتیک ایران*.

<https://civilica.com/doc/233879/>

مرادی، آیدین؛ عمادالدی، حسین؛ آرخ، صالح؛ رضایی، خلیل؛ ۱۳۹۹. تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه های ژئوتکنیکی و پیرومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. دوره ۷. شماره ۱. ۱۵۳-۱۷۶.

<https://www.sid.ir/paper/378951/fa>

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، گزارش مصور از فرونشست و فروریزش زمین در ایران. دکتر علی بیت اللهی. دبیر کارگروه ملی مخاطرات زلزله، لغزش لایه های زمین، ابنیه، ساختمان و شهرسازی.

یمانی، مجتبی؛ نجفی، اسماعیل؛ عابدینی، محمدحسین؛ ۱۳۸۸. ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب های زیرزمینی در دشت قره بلاغ استان فارس. *جغرافیا*. دوره ۳. شماره ۹-۸. ۲۷-۹.

<https://www.sid.ir/paper/208007/fa>

Ahsan MN, Warner J., 2014. The socioeconomic vulnerability index: A pragmatic approach for assessing climate change led risks-A case study in the south-western coastal Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 8: 32-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.009>

Azadnejad S, Maghsoudi Y, Perissin D., 2020. Evaluation of polar metric capabilities of dual polarized Sentinel-1 and TerraSAR-X data to improve the PSInSAR algorithm using amplitude dispersion index optimization. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 84: 101950. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101950>

Azadnejad S, Y. Maghsoudi., 2019. Investigating the effect of the physical scattering mechanism of the dual polarization sentinel1 data on the temporal coherence optimization results. *Int J Remote Sens* 1: 15-7047. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1597309>

- Babae S, Masoumi Z, Mousavi Z., 2020. Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *Int J Remote Sens* 41: 4780-4798. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1724345>
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, Wisner B., 2004. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203714775>
- Borchers J W, Carpenter M. 2014. Land subsidence from groundwater use in California. Full Report of Findings, California Water Foundation. <https://cawaterlibrary.net/document/land-subsidence-from-groundwater-use-in-california/>
- Cannon T, Twigg J., 2003. *Social vulnerability, Sustainable Livelihoods and Disasters*. London: Department for international development DFID; Government of the United Kingdom.
- Cardona OD., 2003. The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management, Mapping Vulnerability. *Disasters, Development and People*. ISBN: 9781849771924
- Castellazzi P, Arroyo-Domínguez N, Martel R, Calderhead A, C.L. Normand J, Gárfias J, Rivera A., 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 47: 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.002>
- Chaussard E, Amelung F, Abidin H, Hong S., 2013. Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment* 128: 150-161. ISSN0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- Chung SH, Lee WL., 2005. Analytic network process approach for mix planning. *International Journal of Production Economics* 18(96): 15-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.02.006>
- Clark GE, Moser S, Ratick S, Dow K, Meyer W, Emani S, Jin W, Kasperson J, Kasperson R & Schwarz H. 1998. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 3(1): 59-82. <https://doi.org/10.1023/A:1009609710795>
- Cutter SL., 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in human geography* 20(4): 529-539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- Dehghani M, DehghaniMohammad M, Valadan Zoej M, Entezam I, Saatchi S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophys J Int* 178(1): 47-56. . <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04135.x>
- Emrich CT, Cutter SL., 2011. Social vulnerability to climate sensitive hazards in the southern United States. *Weather, Climate, and Society* 3(3): 193-208. <https://doi.org/10.1175/2011WCAS1092.1>
- Enarson E, Morrow BH., 1998. *The Gendered Terrain of Disaster*. Westport, CT: Praeger. .
- Galloway DL, et al. 2008. Land Subsidence Hazards. In: Baum RL, Galloway DL, Harp, EL (Eds.), *Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2008-1164. .
- Gambolati G, Teatini P., 2015. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research* 51(6): 3922-3955. <https://doi.org/10.1002/2014WR016841>, 2015
- García GH, Ezquerro P, Tomás R, Pizarro MB, Vinielles JL, Rossi M, Mateos RM, Freyre DC, Lambert J, Teatini P, Cano EC, Erkens G, Galloway D, Hung WC, Kakar N, Sneed M, Tosi L, Wang H & Ye S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *SCIENCE* 371(6524): 34-36. DOI: 10.1126/science.abb8549
- Herrera Leon WH, Martínez J, Hernández Marin M, de la Luz Pérez-Rea M., 2018. Land subsidence and its effects on the urban area of TEPIC city Mexico. *WIT Transactions on The Built Environment* 179: 369-380. <https://doi.org/10.2495/UG180341>

- Holzer TL, Davis SN. 1976. Earth fissures associated with water-table declines. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs* 8(6): 923-924. .
- Holzer TL, Pampeyan EH., 1981. Earth fissures and localized differential subsidence. *Water Resour. Res* 17(1): 223-227. <https://doi.org/10.1029/WR017i001p00223>
- Holzer TL. 1979. Faulting caused by groundwater extraction in south central Arizona. *J. Geophys. Res* 84(B2): 603-612. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01065>
- Hufschmidt G., 2011. A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards* 58(2): 621-643. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9823-7>
- Jachens RC, Holzer TL., 1979. Geophysical investigations of ground failure related to groundwater withdrawal-Picacho Basin, Arizona. *Ground Water* 17(6): 574. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1979.TB03358.X>
- Jachens RC, Holzer TL., 1982. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *Bull. Geol. Soc. Am* 93(10): 998-1012. <https://doi.org/10.1130/0016-7606%281982%2993%3C998%3ADCMFEF%3E2.0.CO%3B2>
- Kim H, Marcouiller DW., 2015. Urban Vulnerability and Resiliency to Natural Disasters: An Integrative Tourism Planning Perspective. *Cities at Risk :Planning for and Recovering from Natural Disasters* 159. ISBN: 9781315572109.
- Little M, Paul K, Jordens c, Sayers E., 2004. Vulnerability in the narratives of patients and their careers: studies of colorectal cancer. *Health* 4(4): 495-510. . <https://doi.org/10.1177/136345930000400405>
- Mahmoudpour M, Khamsehchiyan M, Nikudel M, Ghassemi M., 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology* 201: 6-28. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004>
- Motagh M, Shamshiri R, Haghighi M, Wetzel H, Akbari B, Nahavandchi H, Roessner S, Arabi S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng Geol* 218:134-151. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011>
- Okada S, Takai N., 2000. Classification of structural types and damage patterns of building for earthquake field investigation, Twelfth World Conference on Earthquake Engineering. Balkema, Rotterdam. https://doi.org/10.3130/AIJS.64.65_5
- Oruji S, Ketabdar M, Gregorian K, Motamed R., 2019. Climate change resiliency of natural gas pipelines: Overview of land subsidence and associated issues in central California. *International Conference on Sustainable Infrastructure*. <https://doi.org/10.1061/9780784482650.001>
- Peacock WG, Hugh Gladwin, Betty Hearn Morrow., 1997. Hurricane Andrew: Ethnicity, Gender and the Sociology of Disaster. London: Routledge. ISBN: 9780203351628. <https://doi.org/10.4324/9780203351628>
- Poland JF, Davis GH., 1969. Land subsidence due to withdrawal of fluids. In: Varnes DJ, Kiersch G (Eds.). *Reviews in Engineering Geology* 2: 187-269. <https://doi.org/10.1061/9780784415702>
- Poland JF, Green JH., 1962. Subsidence in the Santa Clara Valley, California-A progress report. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap* 1619-C: 16. <https://books.google.com/books?id=Z3kuwQEACAAJ>
- Poland JF., 1958. Land subsidence due to ground-water development. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng* 84(IR3): 11. .
- Poland JF., 1959. Geology, hydrology, and chemical character of ground waters in the Torrance-Santa Monica area, California. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap* 1461: 142-146. <https://books.google.com/books?id=CekYzQEACAAJ>

- Poland JF., 1960. Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, and its effect on estimates of ground-water resources, comm. SubTerranean Waters Publ 52: 324-335. .
- Poland JF., 1961. The coefficient of storage in a region of major subsidence caused by compaction of an aquifer system. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap 424(B): 52-54. .
- Rezaei M, Yazdani Noori Z, Dashti Barmaki M., 2020. Land subsidence susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and Certain Factor (CF) models at Neyshabur plain, Iran. Geocarto Int 1-20. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1768596>
- Rustin B., 1965. From protest to politics: the future of civil Right movement commentary. Journal of social justice 29(28): 44-62. .
- Sennewald CA, Baillie C., 2015. Effective Security Management: Butterworth-Heinemann. ISBN-13 : 978-0128027745
- Tierney K., 2006. Social Inequality, Hazards, and Disasters In On Risk and Disaster: Lessons from Hurricane Katrina, edited by Daniels RJ, Kettl DF, Kunreuther H. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. <https://doi.org/10.9783/9780812205473>
- Turner BL, Turner II, B L and Kasperson, Roger and Matson, Pamela and Mccarthy, James and Corell, Robert and Christensen, Lindsey and Selin, Noelle and Kasperson, Jeanne and Luers, Amy and Martello, Marybeth and Polsky, Colin and Pulsipher, Alexander and Schiller, Andrew},. 2003. A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. PNAS 100(14). <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Wanderson J., 2005. An index of riot severity and some correlates. Journal of American Sociology 12(15): 23-35. <https://doi.org/10.1086/224683>
- Wolf S, Hinkel J, Hallier M, Klein R . 2013. Clarifying vulnerability definitions and assessments using formalization. International Journal of Climate Change Strategies and Management 5(1): 54-70. <https://doi.org/10.1108/17568691311299363>
- Zhang X, Li X, Sun Z, He Y, Xu W, Campbell H, Dunlop L, Timofeeva M, Theodoratou E., 2020. Physical activity and COVID-19: An observational and mendelian randomization study. J Glob Health 10: 020514. <https://doi.org/10.7189/jogh.10.020514>



Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images

Hamid Ganjaeian^{a*}, Maesom Asadi^b, Fatemeh Menbari^c, Atrin Ebrahimi^d

^a PhD in Geomorphology, Tehran University, Tehran, Iran

^b PhD in Geomorphology, Faculty Member of Payame Noor University, Tehran, Iran

^c PhD Candidate in Geomorphology, Razi University, Kermanshah, Iran

^d PhD Candidate in Geomorphology, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 23 April 2022

Revised: 7 June 2022

Accepted: 15 July 2022

Abstract

The risk of subsidence in recent years has posed serious challenges to many cities, including cities in arid and semi-arid regions of Iran. Hamedan is one of the cities that are exposed to this risk and for this reason, this study evaluated the subsidence in the city. The data included Sentinel 1 radar images, Landsat satellite images, 30 m SRTM digital model and groundwater data. Tools also included ArcGIS, GMT, and ENVI. In the first stage, land use maps of the region for the period 1991-2020 were prepared and analyzed. In the second stage, the situation of groundwater depletion in the study area was explored, and in the third stage, using radar images and SBAS time series method, the amount of subsidence in the area over a three-year period (2017 to 2020) was calculated. The results showed that the urban area and suburbs of Hamedan annually experience one meter drop in water resources and 0.7 Square kilometers of physical development. Moreover, the subsidence rate of this area during the three-year period was between 6 to 98 mm. According to the final map, the rate in western areas of Hamadan was between 60 to 98 mm, in central areas was between 30 to 60 mm, and in a big part the city subsidence is 6 to 30 mm from its eastern regions. Considering that the highest rate of physical development of Hamedan city in recent years has been in the western suburbs of the city, it can be said that the physical development along with the decline of groundwater resources are the main factors of subsidence in this city.

Keywords: Subsidence, Sentinel 1, SBAS, Hamedan

*. Corresponding author: Hamid Ganjaeian E-mail: h.ganjaeian@ut.ac.ir Tel: +9809186074070

How to cite this Article: Ganjaeian, H., Asadi, M., Menbari, F., & Ebrahimi, A. (2022). Analysis of subsidence status in Hamedan urban area using radar and satellite images. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 221-236.

DOI:10.22067/geoh.2022.76383.1217



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76383.1217>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۴۴ و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۲۳۶-۲۲۱

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای

حمید گنجائیان^۱ - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

معصومه اسدی - گروه علوم اجتماعی - دانشگاه پیام نور - تهران - ایران

فاطمه منبری - دانشجوی دکتری دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

عطربین ابراهیمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱۷ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۲۴

چکیده

مخاطره فرونشست در طی سال‌های اخیر، شهرهای زیادی از جمله شهرهای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران را با چالش جدی مواجه کرده است. شهر همدان از جمله شهرهایی است که در معرض این مخاطره قرار دارد و به همین دلیل در این پژوهش به ارزیابی میزان فرونشست در محدوده این شهر پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره لندست، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی بوده است. ابزارهای مهم نیز تحقیق شامل ArcGIS، GMT و ENVI بوده است. این تحقیق به‌طور کلی در سه مرحله انجام شده است که در مرحله اول، نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مربوط به سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰، تهیه و تحلیل شده است. در مرحله دوم وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی بررسی شده است و در مرحله سوم نیز با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی سه‌ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) محاسبه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، محدوده شهری و حاشیه شهری همدان سالانه با حدود ۱ متر افت منابع آب و ۷/ کیلومتر مربع توسعه فیزیکی مواجه شده

Email: h.ganjaian@ut.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۶۰۷۴۰۷۰

نحوه ارجاع به این مقاله:

اسدی، معصومه؛ گنجائیان، حمید؛ منبری، فاطمه؛ ابراهیمی، عطربین. (۱۴۰۱). تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۴). صص ۲۳۶-۲۲۱

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76383.1217>

است. همچنین میزان فرونشست این محدوده در طی دوره زمانی سه ساله، بین ۶ تا ۹۸ میلی متر بوده است که مطابق نقشه نهایی تهیه شده، مناطق غربی شهر همدان بین ۶۰ تا ۹۸ میلی متر، مناطق مرکزی بین ۳۰ تا ۶۰ میلی متر و بخش زیادی از مناطق شرقی آن بین ۶ تا ۳۰ میلی متر فرونشست داشته است. با توجه به اینکه بیشترین میزان توسعه فیزیکی شهر همدان در طی سالهای اخیر، در مناطق غربی و حاشیه‌ای این شهر بوده است؛ می‌توان گفت که توسعه فیزیکی شهر همدان به موازات افت منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی این فرونشست بوده است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، سنتینل ۱، SBAS، همدان.

۱-مقدمه

یکی از عوامل تهدیدکننده جوامع امروزی، مخاطرات طبیعی است. مخاطرات طبیعی می‌تواند به صورت محسوس و یا نامحسوس باشد. از جمله مخاطرات نامحسوس، فرونشست زمین است که در طی سالهای اخیر به عنوان یک چالش مهم در مناطق مختلف مطرح شده است (گنجائیان، ۱۳۹۹). به طور معمول فرونشست زمین به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود (آمبغی و همکاران، ۱۳۸۸). مخاطره فرونشست پدیده‌ای مورفولوژیکی و یک مسئله جهانی محسوب می‌شود که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی قرار دارد و می‌تواند به عنوان تهدیدی جدی برای جوامع انسانی باشد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به اینکه مخاطره فرونشست به صورت تدریجی و آهسته رخ می‌دهد؛ بنابراین بر خلاف سیل و زمین‌لرزه، یکباره آشکار نمی‌شود (جز در مواقعی که سبب ایجاد فروچاله می‌شود)، بلکه در طول زمان سبب تخریب زیرساخت‌های شهری، کشاورزی، صنعتی و غیره می‌شود (بوزانو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛ براس‌گیردل^۲ و همکاران، ۱۹۹۳). در واقع، مخاطره فرونشست در طی زمان سبب کج شدگی تأسیسات مرتفع، شکست و ترک ساختمان‌ها، آسیب دیدگی تأسیسات کشاورزی، ایجاد فروچاله‌ها، شکستگی و انهدام پل‌ها و راه‌ها و شبکه معابر شهری می‌شود (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱).

فرونشست زمین بر اثر برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن بر روی آن را در سطوح بین‌الملل تهدید می‌کند (چن و همکاران^۳، ۲۰۱۰). بر اساس برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده قرار دارند (هانین^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). در واقع، روند افزایشی جمعیت و توسعه ساخت‌وسازها و همچنین بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی سبب شده است تا مخاطرات فرونشست در طی سالهای اخیر، به عنوان یکی از مخاطرات مهم در بسیاری از کشورها از جمله ایران مطرح شود. با توجه به اینکه در ایران به منظور پیش‌گیری از روند فرونشست، اقدامات

1 Bozzano

2 Bracegirdle

3 Chen

4 Huanyin

خاصی صورت نگرفته است، مخاطره فرونشست به عنوان یکی از مهم ترین چالش های پیشروی شهرهای ایران خصوصاً شهرهای نواحی خشک و نیمه خشک از جمله شهر همدان محسوب می شود (گنجائیان، ۱۳۹۹). اهمیت مسئله فرونشست و پیشرفت های صورت گرفته در زمینه سنجش از دور سبب شده است تا طی در سال های اخیر، با استفاده از این روش های نوین، تحقیقات مختلفی در زمینه مخاطره فرونشست صورت گیرد، در این پژوهش نیز با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی SBAS، به ارزیابی وضعیت فرونشست در محدوده شهری همدان پرداخته شده است.

در مورد ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن ها می توان به دینهو^۱ و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی PS، میزان فرونشست شهر هو چی مین^۲ در ویتنام را حدود ۳ سانتی متر در سال برآورد کرده اند. ابیر^۳ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تصاویر راداری و روش SBAS، فرونشست زمین در فلات نمک کوهات (در شمال پاکستان) در طی سال های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را بین ۷ تا ۱۰ سانتی متر برآورد کرده اند. هو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش سری زمانی PS، میزان فرونشست سالانه زمین در هانوی^۵ ویتنام را حدود ۴۰ میلی متر در سال برآورد کرده اند. آیمائی^۶ و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی میزان فرونشست در شهر ساحلی اورایاسو^۷ در ژاپن پرداختند. در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری استفاده شده است و میزان فرونشست منطقه در طی سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ حدود ۱۸ میلی متر برآورد شده است. نگوین هاو و تاکهواکا^۸ (۲۰۱۹) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست زمین در ساحل نام دینه^۹ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق بیانگر این که میزان جابجایی منطقه بین ۲۱- تا ۲/۵+ بوده است. ژائو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، میزان فرونشست سالانه زمین در شانگهای چین را حدود ۳۰ میلی متر در سال برآورد کرده اند. در ایران نیز صفاری و جعفری (۱۳۹۵) با استفاده از تصاویر Envisat و روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست دشت شهریار را حداکثر ۱۳۶ میلی متر در سال محاسبه کرده اند. بابایی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از روش سری زمانی SBAS و PC به ارزیابی میزان فرونشست در شهر تهران پرداختند و میزان فرونشست در بخش جنوب غربی تهران را تا ۶۱ میلی متر در سال محاسبه کرده اند. خرمی (۱۳۹۶) بر مبنای اطلاعات به دست آمده از روش تداخل سنجی راداری، میزان فرونشست در شمال

1. Dinh Ho

2 Ho Chi Minh

3 Abir

4 Ho

5 Hanoi

6 Aimaiti

7 Urayasu

8 Nguyen Hao & Takewaka

9 Nam Dinh

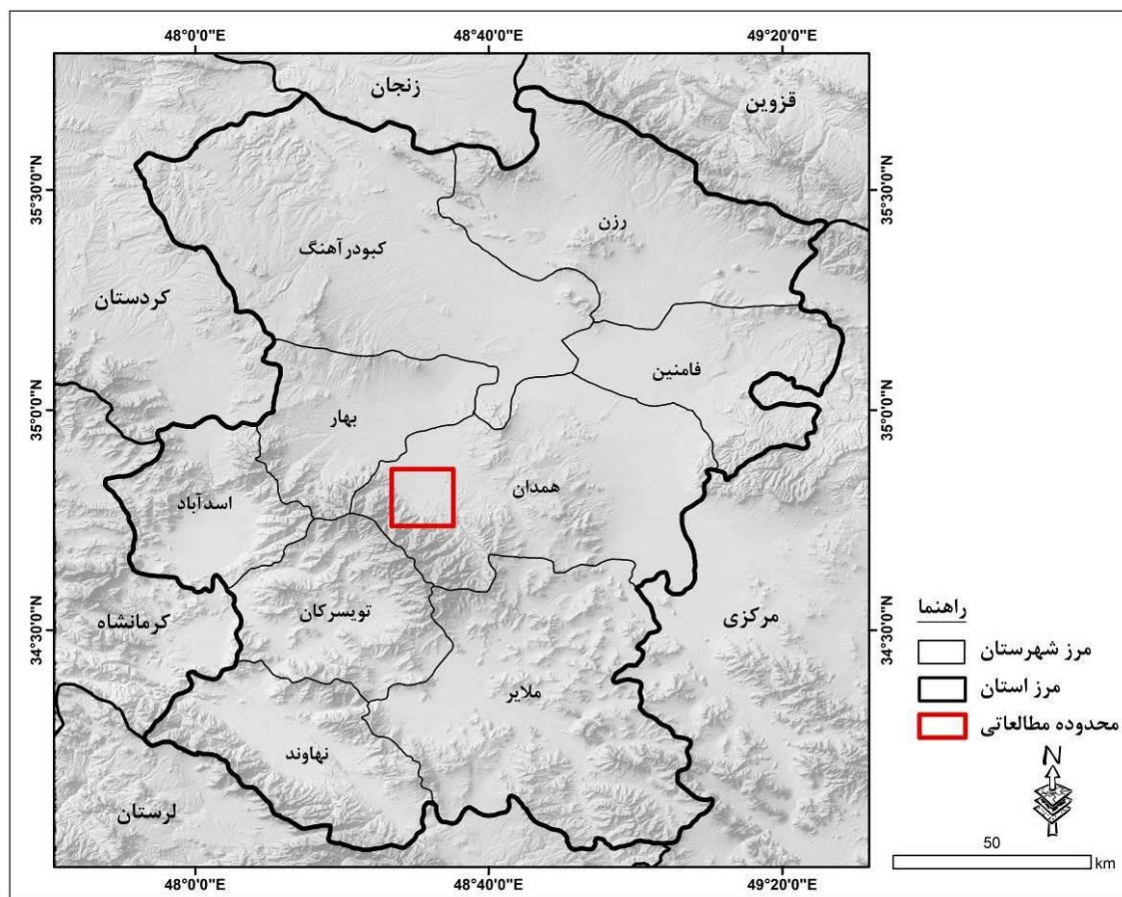
10 Zhao

غربی شهر مشهد را تا ۱۴ سانتی متر در سال برآورد کرده‌اند و **صالحی متعهد و همکاران (۱۳۹۸)** نیز نرخ فرونشست در دشت مشهد را تا ۲۰ سانتی متر در سال محاسبه کرده‌اند. **مقصودی و همکاران (۱۳۹۸)** با استفاده از تصاویر ستینیل ۱ به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غربی تهران پرداختند و میزان فرونشست این منطقه را تا ۱۵ سانتی متر در سال محاسبه کرده‌اند. **ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)** با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، میزان فرونشست سالانه محدوده شهری پاکدشت را بین ۱۵ تا ۸۵ میلی متر محاسبه کرده‌اند. **اسدی و همکاران (۱۴۰۰)** به ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS پرداختند و میزان فرونشست این منطقه در طی دوره زمانی ۳ ساله را بین حدود ۱ تا ۳۳ سانتی متر برآورد کرده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش محدوده شهری همدان به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. همدان از نظر تقسیمات سیاسی، مرکز شهرستان و استان همدان محسوب می‌شود. از نظر جمعیتی شهر همدان در طی سال‌های اخیر با روند افزایشی زیادی مواجه شده است؛ به طوری که جمعیت این شهر در سال ۱۳۹۰، حدود ۵۲۶ هزار نفر بوده است؛ در حالی که این میزان در سال ۱۳۹۵ به ۵۷۷ هزار نفر افزایش یافته است (**مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵**). محدوده شهری همدان از نظر ژئومورفولوژی در واحد دشت قرار گرفته و از سمت جنوب به واحد کوهستانی الوند منتهی می‌شود. از نظر اقلیمی نیز همدان جزء مناطق نیمه خشک و دارای میانگین بارش حدود ۳۰۰ میلی متر است (**سازمان هواشناسی استان همدان، ۱۳۹۹**).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM، تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره لندست و همچنین اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به عنوان داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در تحقیق شامل ArcGIS (به منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر)، GMT (تهیه نقشه فرونشست زمین بر اساس روش سری زمانی SBAS) و ENVI (تهیه نقشه‌های کاربری اراضی) بوده است. این تحقیق به‌طور کلی در سه مرحله انجام شده است که در مرحله اول، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مربوط به سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰، تهیه و تحلیل شده است. در مرحله دوم بر مبنای اطلاعات به دست آمده از چاه‌های پیرومتری منطقه، وضعیت لفت منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی تحلیل شده است. در مرحله سوم نیز با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی سه‌ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) محاسبه شده است. در ادامه به تشریح مراحل پژوهش پرداخته شده است:

مرحله اول (تهیه نقشه‌های کاربری اراضی): با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی در ایجاد فرونشست، نوع کاربری اراضی مناطق است، در این مرحله نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در طی سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰ تهیه شده است (جدول ۱). پس از تهیه تصاویر، قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل و پردازش، ابتدا به تصحیح اتمسفری تصاویر با استفاده روش FLASH پرداخته شده است و سپس داده‌ها از نظر وجود خطای هندسی و رادیومتری بررسی شده است. پس از پیش‌پردازش تصاویر، با استفاده از روش حداکثر احتمال، نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه تهیه شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده

نوع ماهواره	سنجنده	تاریخ
لندست ۵	TM	۱۹۹۱/۰۵/۲۹
لندست ۸	OLI	۲۰۲۰/۰۶/۱۶

مرحله دوم (بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی): در این مرحله به منظور بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات مربوط به چاه‌های پیزومتری منطقه استفاده شده است و تغییرات صورت گرفته در سطح آب زیرزمینی این چاه‌ها در طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۶ محاسبه شده است. پس از محاسبه وضعیت افت آب منطقه، ارتباط آن با میزان فرونشست و همچنین کاربری اراضی منطقه، تحلیل شده است.

مرحله سوم (محاسبه میزان فرونشست منطقه): یکی از روش‌های نوین جهت تهیه نقشه‌های فرونشست، استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی SBAS، است. در این پژوهش نیز با استفاده از این روش‌ها و همچنین تصاویر راداری سنتینل ۱، به محاسبه میزان فرونشست رخ داده در محدوده شهری همدان پرداخته شده است. به منظور اجرای مدل سری زمانی SBAS، ابتدا ۴۶ تصویر راداری مربوط به دوره زمانی ۳ ساله (از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴) تهیه شده است (جدول ۲). تصاویر تهیه شده دارای حالت مداری صعودی، نوع IW، فرمت SLC هستند.

جدول ۲- تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۱۷/۰۱/۰۵	۱۷	۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۳۲	۲۰۱۹/۰۲/۱۲
۲	۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۱۸	۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۳۳	۲۰۱۹/۰۳/۰۸
۳	۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۱۹	۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۳۴	۲۰۱۹/۰۴/۰۱
۴	۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۲۰	۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۳۵	۲۰۱۹/۰۴/۲۵
۵	۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۲۱	۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۳۶	۲۰۱۹/۰۵/۱۹

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۶	۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۲۲	۲۰۱۸/۰۶/۱۷	۳۷	۲۰۱۹/۰۶/۱۲
۷	۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۲۳	۲۰۱۸/۰۷/۱۱	۳۸	۲۰۱۹/۰۷/۰۶
۸	۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۲۴	۲۰۱۸/۰۸/۰۴	۳۹	۲۰۱۹/۰۷/۳۰
۹	۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۲۵	۲۰۱۸/۰۸/۲۸	۴۰	۲۰۱۹/۰۸/۲۳
۱۰	۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۲۶	۲۰۱۸/۰۹/۲۱	۴۱	۲۰۱۹/۰۹/۱۶
۱۱	۲۰۱۷/۰۹/۲۶	۲۷	۲۰۱۸/۱۰/۱۵	۴۲	۲۰۱۹/۱۰/۱۰
۱۲	۲۰۱۷/۱۰/۲۰	۲۸	۲۰۱۸/۱۱/۰۸	۴۳	۲۰۱۹/۱۱/۰۳
۱۳	۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۲۹	۲۰۱۸/۱۲/۰۲	۴۴	۲۰۱۹/۱۱/۲۷
۱۴	۲۰۱۷/۱۲/۰۷	۳۰	۲۰۱۸/۱۲/۲۶	۴۵	۲۰۱۹/۱۲/۲۱
۱۵	۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۳۱	۲۰۱۹/۰۱/۱۹	۴۶	۲۰۲۰/۰۱/۱۴
۱۶	۲۰۱۸/۰۱/۲۴				

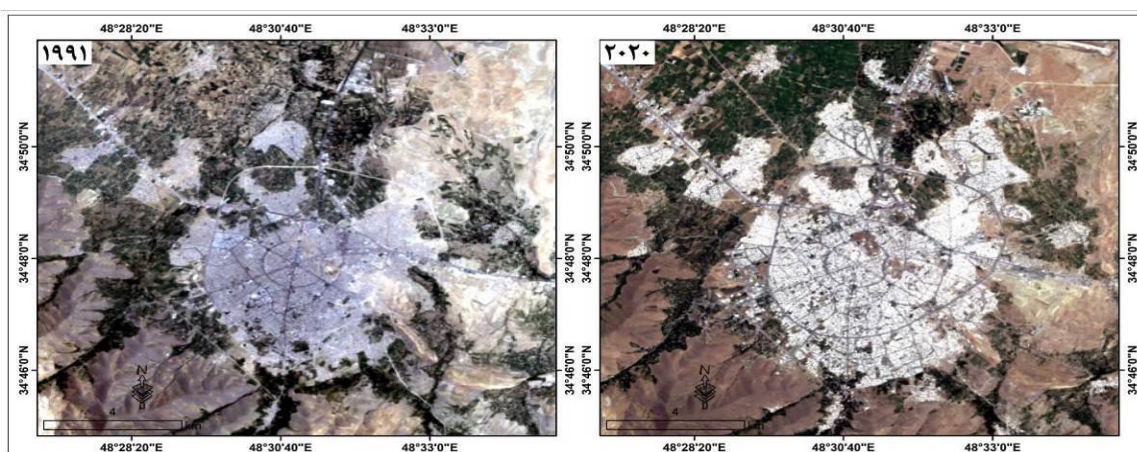
پس از اینکه تصاویر مورد نیاز تهیه شد، به منظور اجرای مدل سری زمانی SBAS، از نرم افزار GMTSAR استفاده شده است. روش انجام کار به این صورت بوده است که ابتدا پیش پردازش های لازم بر روی تصاویر شامل تصحیحات مداری، حذف خطای توپوگرافی و فیلتر تصاویر انجام شده است. پس از انجام پیش پردازش های لازم، بر مبنای بیس لاین زمانی تصاویر، نقشه های ایتترفروگرام منطقه تهیه شده است. پس از تهیه نقشه های ایتترفروگرام، به منظور تهیه نقشه نهایی فرونشست، از روش سری زمانی SBAS استفاده شده است. در واقع عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می شود تا تقریباً هر تداخل نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آن ها همبستگی پایین است و اندازه گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نیست و یا اصلاً قابل انجام نیست. این محدودیت ها سبب می شود تا روش تداخل سنجی، به تنهایی ابزاری کامل جهت نظارت و اندازه گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد؛ بنابراین از روش های سری زمانی از جمله SBAS به منظور رفع این مشکل استفاده می شود (نصیری و شریفیان عطار، ۱۳۹۸؛ ۶۲؛ هانسن^۱، ۲۰۰۱).

۳- بحث و نتایج

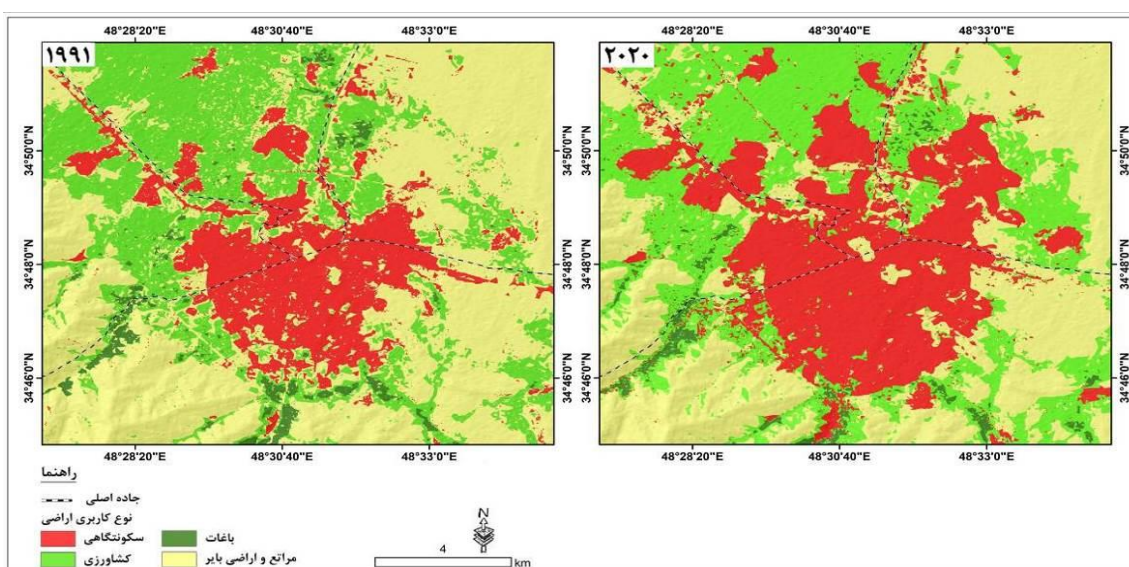
۳-۱- تهیه نقشه کاربری اراضی

یکی از عوامل اصلی در وقوع مخاطره فرونشست و یا تشدید آن، نوع کاربری اراضی است. همچنین نوع کاربری های اراضی هر منطقه، متأثر از شرایط اقلیمی و ژئومورفولوژی منطقه است. محدوده مطالعاتی در واحد دشت قرار دارد و با توجه به اینکه در دشت همدان، اختلاف ارتفاع، شیب زیاد، لندفرم های محدود کننده (مانند کوهستان،

دامنه‌های پرشیب، تیغه، دره، فروچاله، بدلند، اشکال فرسایشی و غیره) نداریم، در نتیجه دشت همدان بدون موانع ژئومورفولوژیکی است و همین مسئله سبب شده است تا توسعه اراضی کشاورزی و نواحی سکونتگاهی منطقه بدون محدودیت باشد. همچنین با توجه به اینکه بسیاری از کاربری‌ها، از جمله اراضی کشاورزی آبی و نواحی سکونتگاهی (خصوصاً سازه‌های سنگین)، نقش مهمی در ایجاد فرونشست دارند، بررسی وضعیت کاربری‌های اراضی هر منطقه بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، به منظور بررسی وضعیت کاربری اراضی محدوده مطالعاتی از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰ استفاده شده (شکل ۲) و نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی در طی این سال‌ها، تهیه شده است (شکل ۳).



شکل ۲- تصاویر ماهواره‌ای محدوده شهری همدان و اطراف آن در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی محدوده شهری همدان و اطراف آن در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰

بررسی وضعیت نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه نشان داده است که در طی دوره زمانی ۲۹ ساله، نوع کاربری اراضی منطقه با تغییرات زیادی مواجه شده است به‌طوری‌که نواحی سکونتگاهی در سال ۱۹۹۱، ۲۸/۷ کیلومترمربع وسعت داشته است که این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۴۷/۷ کیلومترمربع افزایش یافته است. اراضی کشاورزی، در سال ۱۹۹۱ حدود ۴۹/۹ کیلومترمربع وسعت داشته است که این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۵۶ کیلومترمربع افزایش یافته است. باغات در سال ۱۹۹۱ حدود ۴/۹ کیلومترمربع وسعت داشته است که این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۴/۲ کیلومترمربع کاهش یافته است و همچنین مراتع نیز در سال ۱۹۹۱ حدود ۱۰۹/۷ کیلومترمربع وسعت داشته است و این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۸۵/۳ کیلومترمربع کاهش یافته است. (جدول ۳). نتایج حاصله از تغییرات کاربری اراضی بیانگر این است که کاربری نواحی سکونتگاهی روند افزایشی زیادی داشته است که همین مسئله می‌تواند نقش مهمی در افزایش نرخ فرونشست منطقه داشته باشد. همچنین اراضی کشاورزی نیز بخش زیادی از وسعت منطقه را شامل می‌شوند و به‌علاوه روند افزایشی داشته است که این مسئله می‌تواند سبب تشدید فشار بر منابع آب زیرزمینی و فراهم آوردن شرایط برای فرونشست منطقه شود.

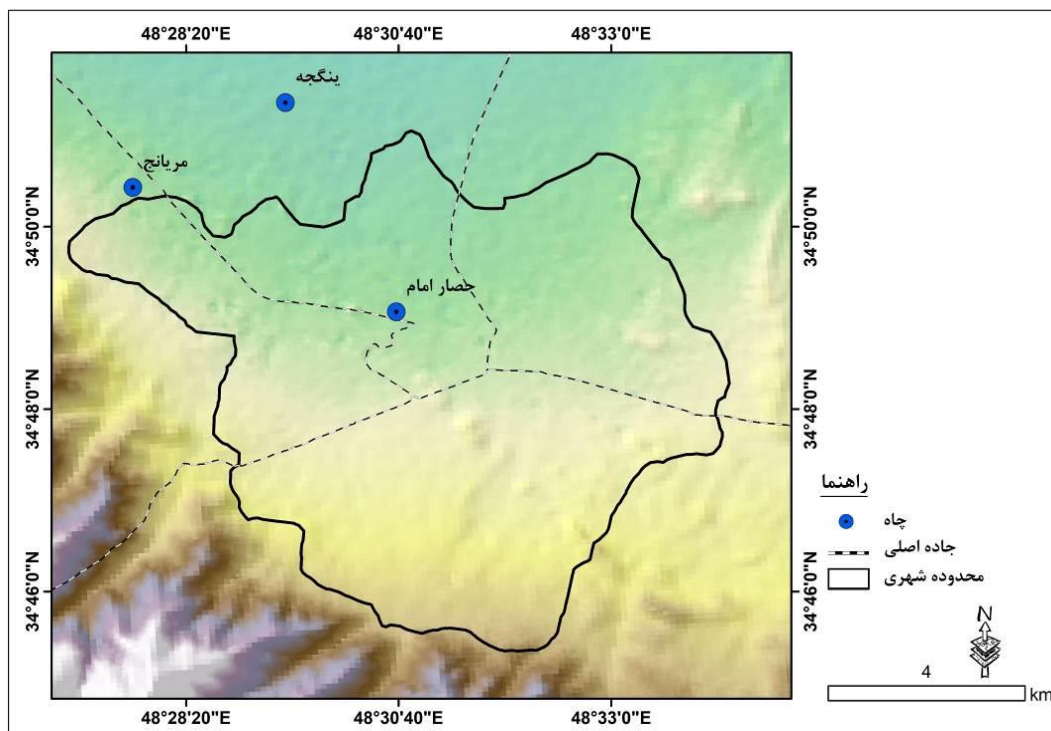
جدول ۳- مساحت کاربری‌های اراضی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰

کاربری اراضی	سکونتگاهی	کشاورزی	باغات	بایر و مراتع
۱۹۹۱	۲۸/۷	۴۹/۹	۴/۹	۱۰۹/۷
۲۰۲۰	۴۷/۷	۵۶	۴/۲	۸۵/۳

۲-۳- بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی

یکی از عوامل اصلی در وقوع فرونشست، افت منابع آب زیرزمینی است. محدوده مطالعاتی در منطقه نیمه‌خشک قرار دارد و همین مسئله سبب شده است تا با کمبود منابع آب مواجه باشد. در کنار وضعیت اقلیمی منطقه، نبود موانع ژئومورفولوژیکی سبب توسعه اراضی کشاورزی، خصوصاً اراضی کشاورزی آبی در منطقه شده است که عامل اصلی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی است. در واقع، کمبود منابع آب سطحی و توسعه اراضی کشاورزی در منطقه سبب بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی شده است که این مسئله باعث افت شدید منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی شده است. با توجه به موارد مذکور، در این پژوهش به‌منظور بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در منطقه، از اطلاعات مربوط به ۳ چاه پی‌زومتری استفاده شده (شکل ۴) و میزان افت سطح آب در طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۶ محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصله، در طی دوره زمانی ۲۵ ساله، چاه ینگچه با ۲۲/۱ متر (میانگین افت سالانه ۰/۹ متر)، چاه مریانج با ۷/۴ متر (میانگین افت سالانه ۰/۳ متر) و چاه حصار امام با ۱۰/۵ متر

(میانگین افت سالانه ۰/۴ متر) افت آب مواجه شده است (جدول ۴) که این مسئله بیانگر افت زیاد منابع آب در منطقه و در نتیجه فراهم آمدن شرایط برای ایجاد مخاطره فرونشست است.



شکل ۴- نقشه موقعیت چاه‌های پیزومتری منطقه

جدول ۴- محاسبه میزان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری منطقه (متر)

سال	یנגجه	مریانج	حصار امام
۱۳۷۱	۹/۲	۳/۹	۴/۳
۱۳۹۶	۳۱/۳	۱۱/۳	۱۴/۸
میزان افت سطح آب	۲۲/۱	۷/۴	۱۰/۵
میانگین افت سالانه (متر)	۰/۹	۰/۳	۰/۴

۳-۳- ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه

بررسی وضعیت ژئومورفولوژی و اقلیمی موقعیت محدوده مطالعاتی نشان داده است که این محدوده پتانسیل بالایی از نظر وقوع مخاطره فرونشست دارد. بر این اساس، در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و همچنین مدل سری زمانی SBAS، به ارزیابی میزان فرونشست محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی سه‌ساله (از

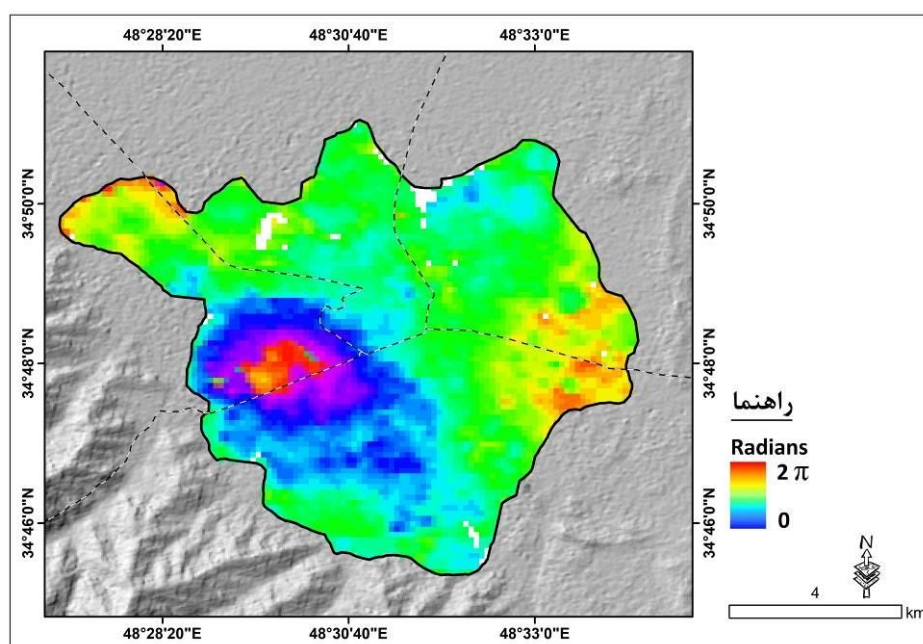
تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴) پرداخته شده است. به منظور تهیه نقشه فروشست منطقه، پس از تهیه تصاویر مورد نیاز، ابتدا زوج تصاویر مورد نظر جهت تهیه نقشه های ایترفروگرام انتخاب شده است (جدول ۵).

جدول ۵- زوج تصاویر انتخابی برای تشکیل ایترفروگرام

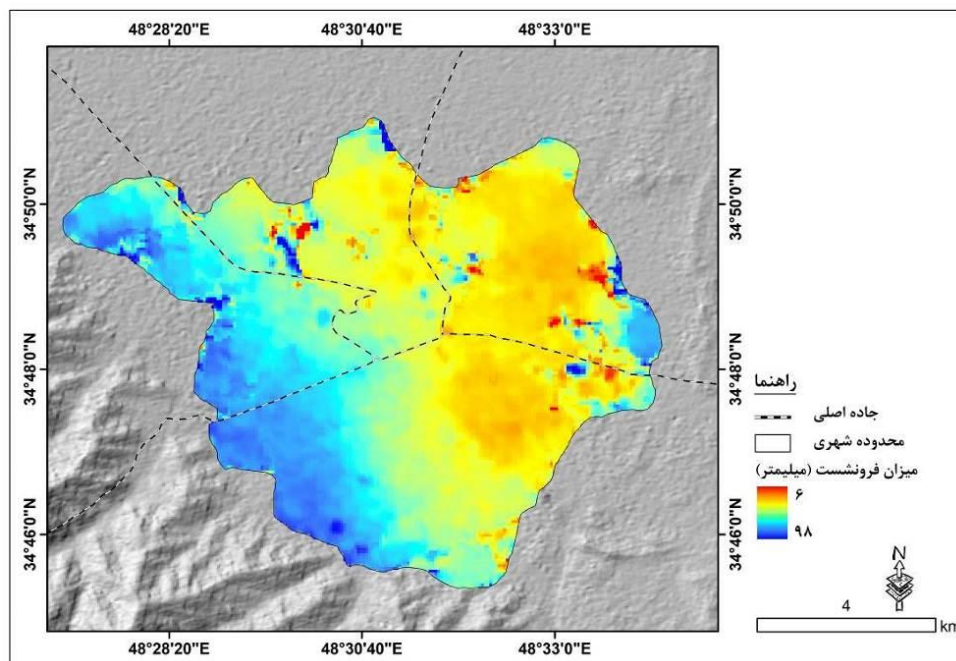
ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر
۱	۲۰۱۷/۰۱/۲۹ - ۲۰۱۷/۰۱/۰۵	۲۴	۲۰۱۸/۰۸/۲۸ - ۲۰۱۸/۰۸/۰۴
۲	۲۰۱۷/۰۲/۲۲ - ۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۲۵	۲۰۱۸/۰۹/۲۱ - ۲۰۱۸/۰۸/۲۸
۳	۲۰۱۷/۰۳/۱۸ - ۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۲۶	۲۰۱۸/۱۰/۱۵ - ۲۰۱۸/۰۹/۲۱
۴	۲۰۱۷/۰۴/۱۱ - ۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۲۷	۲۰۱۸/۱۱/۰۸ - ۲۰۱۸/۱۰/۱۵
۵	۲۰۱۷/۰۵/۰۵ - ۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۲۸	۲۰۱۸/۱۲/۰۲ - ۲۰۱۸/۱۱/۰۸
۶	۲۰۱۷/۰۵/۲۹ - ۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۲۹	۲۰۱۸/۱۲/۲۶ - ۲۰۱۸/۱۲/۰۲
۷	۲۰۱۷/۰۶/۲۲ - ۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۳۰	۲۰۱۹/۰۱/۱۹ - ۲۰۱۸/۱۲/۲۶
۸	۲۰۱۷/۰۸/۰۹ - ۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۳۱	۲۰۱۹/۰۲/۱۲ - ۲۰۱۹/۰۱/۱۹
۹	۲۰۱۷/۰۹/۰۲ - ۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۳۲	۲۰۱۹/۰۳/۰۸ - ۲۰۱۹/۰۲/۱۲
۱۰	۲۰۱۷/۰۹/۲۶ - ۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۳۳	۲۰۱۹/۰۴/۰۱ - ۲۰۱۹/۰۳/۰۸
۱۱	۲۰۱۷/۱۰/۲۰ - ۲۰۱۷/۰۹/۲۶	۳۴	۲۰۱۹/۰۴/۲۵ - ۲۰۱۹/۰۴/۰۱
۱۲	۲۰۱۷/۱۱/۱۳ - ۲۰۱۷/۱۰/۲۰	۳۵	۲۰۱۹/۰۵/۱۹ - ۲۰۱۹/۰۴/۲۵
۱۳	۲۰۱۷/۱۲/۰۷ - ۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۳۶	۲۰۱۹/۰۶/۱۲ - ۲۰۱۹/۰۵/۱۹
۱۴	۲۰۱۷/۱۲/۳۱ - ۲۰۱۷/۱۲/۰۷	۳۷	۲۰۱۹/۰۷/۰۶ - ۲۰۱۹/۰۶/۱۲
۱۵	۲۰۱۸/۰۱/۲۴ - ۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۳۸	۲۰۱۹/۰۷/۳۰ - ۲۰۱۹/۰۷/۰۶
۱۶	۲۰۱۸/۰۲/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	۳۹	۲۰۱۹/۰۸/۲۳ - ۲۰۱۹/۰۷/۳۰
۱۷	۲۰۱۸/۰۳/۱۳ - ۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۴۰	۲۰۱۹/۰۹/۱۶ - ۲۰۱۹/۰۸/۲۳
۱۸	۲۰۱۸/۰۴/۰۶ - ۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۴۱	۲۰۱۹/۰۹/۱۰ - ۲۰۱۹/۰۹/۱۶
۱۹	۲۰۱۸/۰۴/۳۰ - ۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۴۲	۲۰۱۹/۱۱/۰۳ - ۲۰۱۹/۱۰/۱۰
۲۰	۲۰۱۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۴۳	۲۰۱۹/۱۱/۲۷ - ۲۰۱۹/۱۱/۰۳
۲۱	۲۰۱۸/۰۶/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۴۴	۲۰۱۹/۱۲/۲۱ - ۲۰۱۹/۱۱/۲۷
۲۲	۲۰۱۸/۰۷/۱۱ - ۲۰۱۸/۰۶/۱۷	۴۵	۲۰۲۰/۰۱/۱۴ - ۲۰۱۹/۱۲/۲۱
۲۳	۲۰۱۸/۰۸/۰۴ - ۲۰۱۸/۰۷/۱۱		

پس از انتخاب زوج تصاویر مورد نظر، نقشه های ایترفروگرام منطقه شده است (شکل ۵). پس از تهیه ایترفروگرام های مورد نظر، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان فروشست محدوده مطالعاتی تهیه

شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه تهیه شده، محدوده شهری همدان در طی دوره زمانی سه‌ساله (از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، بین ۶ تا ۹۸ میلی‌متر فرونشست داشته است. بررسی وضعیت پراکنش میزان فرونشست بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق غربی و سپس حاشیه شرقی و شمالی این شهر بوده است. با توجه به نتایج حاصله از نقشه‌های کاربری اراضی، افت منابع آب زیرزمینی و همچنین نقشه فرونشست منطقه، می‌تواند گفت که در طی سال‌های اخیر، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی سبب افت شدید منابع آب زیرزمینی و فراهم آمدن شرایط برای ایجاد مخاطره فرونشست شده است. همچنین بر اساس نقشه‌های کاربری اراضی و اطلاعات جمعیتی سال‌های اخیر، شهر همدان با توسعه فیزیکی زیادی مواجه شده است که این مسئله سبب فشار سازه‌های انسانی بر زمین و در نتیجه تشدید میزان فرونشست شده است. با توجه به اینکه بیش‌ترین میزان توسعه فیزیکی شهر همدان در مناطق غربی این شهر بوده است و همچنین بیش‌ترین میزان فرونشست نیز مربوط به مناطق غربی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که در کنار افت منابع آب زیرزمینی، توسعه فیزیکی شهر همدان نیز نقش مهمی در این میزان فرونشست داشته است.



شکل ۵- نمونه‌ای از اینترفروگرام‌های تهیه شده (زوج تصاویر ۲۰۱۷/۱۲/۳۱-۲۰۱۸/۰۱/۲۴)



شکل ۶- نقشه میزان فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴

۴-جمع بندی

مخاطره فرونشست در طی سال‌های اخیر، شهرهای زیادی از جمله شهرهای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران را با چالش جدی مواجه کرده است. شهر همدان از جمله شهرهایی است که تحت تأثیر شرایط هیدرواقليمی و ژئومورفولوژیکی با این مخاطره مواجه شده است. نتایج بررسی وضعیت طبیعی شهر همدان نشان داده است که این شهر به دلیل میانگین بارش کم و توزیع نامناسب آن، با کمبود بارش و منابع آب سطحی مواجه است. از طرف دیگر، به دلیل قرار گرفتن در واحد دشت و همچنین نبود موانع ژئومورفولوژیکی، شرایط مناسبی جهت توسعه اراضی کشاورزی و توسعه فیزیکی نواحی سکونتگاهی دارد و همین مسئله سبب توسعه این کاربری‌ها (کاربری نواحی سکونتگاهی در طی دوره زمانی ۲۹ ساله حدود ۱۹ کیلومترمربع افزایش داشته است و کاربری اراضی کشاورزی حدود ۶ کیلومترمربع) در طی سال‌های اخیر شده است. در واقع، توسعه اراضی کشاورزی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی سبب شده است تا میزان افت منابع آب زیرزمینی در محدوده شهری و حاشیه شهری همدان در حدود ۱ متر در سال باشد که این روند در بلندمدت سبب افت بیش‌ازحد منابع آبی در منطقه خواهد شد. با توجه به موارد مذکور، وقوع مخاطره فرونشست در شهر همدان قابل پیش‌بینی است و نتایج به دست آمده از محاسبه فرونشست محدوده شهری همدان در طی دوره زمانی سه‌ساله (از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، صحت این ادعا را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج حاصله، محدوده شهری همدان، در طی دوره زمانی مورد مطالعه، بین ۶ تا ۹۸

میلی متر فرونشست داشته است که بیشترین میزان آن مربوط به مناطق غربی و سپس حاشیه شرقی و شمالی این شهر بوده است. با توجه به اینکه بیشترین میزان توسعه فیزیکی شهر همدان در طی سالهای اخیر، در مناطق غربی و حاشیه‌ای این شهر بوده است؛ بنابراین می‌توان گفت که توسعه فیزیکی شهر همدان به موازات افت منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی فرونشست رخ داده بوده است. با توجه به موارد مذکور، لازم است تا اقدامات لازم جهت استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و کنترل روند افت این منابع صورت گیرد.

کتابنامه

- ابراهیمی، عطرتین؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *مجله جغرافیا و روابط انسانی*. دوره ۲. شماره ۴. صص ۴۱-۲۹.
- <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1>
- اسدی، معصومه؛ گنجائیان، حمید؛ جاودانی، مهناز؛ قادری‌حسب، مهدیه؛ ۱۴۰۰. ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر راداری. *مجله هیدروژئولوژی*. سال ۶. شماره ۱. صص ۲۲-۱۳.
- <https://doi.org/10.22034/HYDRO.2021.13016>
- امیغی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ طالبی، علی؛ ۱۳۸۸. بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازبایی دقیق. *مجله علوم زمین*. سال ۲۰. شماره ۷۷. صص ۱۶۴-۱۵۷.
- <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.55368>
- بابایی، سیدساسان؛ خزایی، صفا؛ قاصر مبارکه، فروزان؛ ۱۳۹۶. پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران. *نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری*. دوره ۷. شماره ۱. صص ۶۷-۵۵.
- <http://jgst.issge.ir/article-1-482-fa.html>
- خرمی، محمد؛ ۱۳۹۶. تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. دانشگاه فردوسی. دانشکده مهندسی.
- سازمان هواشناسی استان همدان؛ ۱۳۹۹. اطلاعات آماری مربوط به عناصر اقلیمی ایستگاه سینوپتیک همدان.
- <http://www.sinamet.ir/indexdesktop.asp>
- شریفی‌کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان. *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. دوره ۱۶. شماره ۳. صص ۷۷-۵۵.
- <https://www.sid.ir/paper/171911/fa>
- صالحی متعهد، فهیمه؛ حافظی مقدس، ناصر؛ لشکری پور، غلامرضا؛ دهقانی، مریم؛ ۱۳۹۸. ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعه دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. *نشریه زمین‌شناسی مهندسی*. سال ۱۳. شماره ۳. صص ۴۳۵-۴۶۲.
- https://jeg.khu.ac.ir/browse.php?a_id=2686&sid=1&slc_lang=fa&ftxt=0

- صفاری، امیر؛ جعفری، فرهاد؛ ۱۳۹۵. سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار). *فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران*. سال ۴. شماره ۴۸. صص ۱۷۵-۱۸۸. <https://www.sid.ir/paper/150233/fa>
- گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. مخاطرات ژئومورفولوژیک مناطق شهری. روش‌های مطالعه و راهکارهای کنترل آن. *انتشارات انتخاب*. ۱۴۴ صفحه. <https://www.gisoom.com/book/11628118>
- مرکز آمار کشور؛ ۱۳۹۵. گزارش اطلاعات جمعیتی استان همدان. <https://www.amar.org.ir/>
- مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال ۱۵. شماره ۱. صص ۲۹۹-۳۱۳. http://www.iwrr.ir/article_80494.html
- نصیری، علیرضا؛ شریفیان عطار، رضا؛ ۱۳۹۸. کاربرد تداخل سنجی رادار در مطالعه فرونشست، *انتشارات مهر جالبینوس*، ۲۹۴ صفحه. <https://ketab.ir/book/e8eab4a3-5f96-476b-93d7-2d88644ba992>
- Abir, I. A., Khan, S.D., Ghulam, A., Tariq, S., Shah, M.T. 2015. Active tectonics of western Potwar Plateau-Salt Range, northern Pakistan from InSAR observations and seismic imaging. *Remote Sensing of Environment*, 168: 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.011>
- Aimaiti, Y.; Yamazaki, F.; Liu, W. 2018. Multi-Sensor InSAR Analysis of Progressive Land Subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan. *Remote Sens*, 10 (8). <https://doi.org/10.3390/rs10081304>
- Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., Rocca, A. 2015. Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study. *Remote Sensing of Environment*. 168: 219-238. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.010>
- Bracegirdle, A., Mair, R., Hand Talor. N. 1993. Sub surface settlement profiles above Tunnels in clay, *Geo technique journal*, 43 (2): 315-320. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.315>
- Chen.C., Wang.C., Chen Kuo. L. 2010. Correlation between groundwater level and variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. Taiwan. *Engineering Geology*, 115 (2): 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>
- Dinh Ho. T. M., Le. V. T., Thuy. L. T. 2015. Mapping Ground Subsidence Phenomena in Ho Chi Minh City through the Radar Interferometry Technique Using ALOS PALSAR Data, *Remote Sensing*, 7 (7): 8543-8562. <https://doi.org/10.3390/rs70708543>
- Hanssen, R. F. 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht. *Kluwer Academic Publishers*. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- Ho, D. T. D., Tran, C. Q., Nguyen, A. D. and Le, T. T. 2016. Measuring ground subsidence in Hanoi city by radar interferometry. *Science and Technology Development Journal*, 19 (2): 122-129. <https://doi.org/10.32508/stdj.v19i2.676>
- Huanyin, Y., Hanssen, R., Leijen, F. 2005. Marinkovicand, Land Subsidence Monitoring in City Area by Time Series Interferometric SAR Data, *National Natural Science Foundation of China*. KGW Project Report. <https://www.academia.edu/15197645>
- Nguyen Hao, Q., Takewaka, S. 2019. Detection of Land Subsidence in Nam Dinh Coast by Dinsar Analyses, *International Conference on Asian and Pacific Coasts*, pp: 1287-1294. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0291-0_175

- Zhao, Q., Ma. G., Wang. Q., Yang. T., Liu, M., Gao, W., Falabella, F., Mastro, P., Pepe, A. 2019. Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: The case study of the Shanghai coastal area, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, V 154: 10-27 [https:// doi.org/ 10.1016/ j. isprsjprs. 2019.05.005](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005)



CONTENTS

- **A Meta-Method for Identifying the Subject of Scientific Research on Land Subsidence using Scientometric Approach** 1
Saeid Nasire Zare, Amir Karam
- **Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)** 2
Shahram Roostaei, Samira Najafvand
- **Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)** 3
Mousa Abedini, Leila Aghayary, Sayyad Asghari Saraskanrood
- **Evaluating the Efficiency of Bivariate Models in Determining Subsidence Susceptibility of Kashan Plain Aquifer** 4
Narges Saghazadeh, Hoda Ghasemieh, Ebrahim Omidvar, Yaser Maghsoudi
- **Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City)** 5
Seyed Reza Hosseinzadeh, Ebrahim Akbari, Mahdi Javanshiri, Zinat Mohammadpour Sangani
- **Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM** 6
Shabnam Mehrnoor, Maryam Robati, Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh, Forough Farsad, Shahram Baikpour
- **Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms** 7
Sayyad Asghari Saraskanrood, Elnaz Piroozi, Leila Aghayary
- **Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)** 8
Zahra Azarm, Hamid Mehrabi, Saied Nadi
- **Evaluating the Vulnerability of the Urban Fabric of District 18 of Tehran under the Influence of Land Subsidence using ANP and GIS** 9
Ramin Rezaei Shahabi, Alireza Arab, Hassan Ahmadi, Amir Pishva, Mohammad Iqbal Shabbakhsh Musa Zehi
- **Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images** 10
Hamid Ganjaeian, Maesom Asadi, Fatemeh Menbari, Atrin Ebrahimi

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Editor – in – Chief:
Professor M. R. Rahnama
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad
Mashhad, Iran.

Executive Coordinator :
Sayyed Mohammad Ali Moosavi

English Language Editor:
Abdullah Nowruzy

Director:
Dr. S. R. Hosseinzadeh
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad
Mashhad, Iran.

Managing Editor:
Dr.Neda Mohseni

Editorial Board:

Prof. Victor R. Baker
Department of Hydrology and Water Resource,
University of Arizona, USA

Prof. Ziyadin Çakir
Department of Geology, Istanbul Technical University,
Turkey

Prof. Gao-Lin Wu
Institute of Water and Soil Conservation, Chinese
Academy of Sciences

Dr.B Feizizadeh
Department of Geography, Letters and Humanities
University of Tabriz

Professor Z. B. Hejazizadeh
Department of Geoghrapy,
University of Alkharazmi, Tehran, Iran.

Dr. S. R. Hoseinzadeh
Department of Geography,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Proffesor M. Ghahroudi Tali
Department of Geography,
University of Alkharazmi, Tehran, Iran.

Professor J. Javan
Department of Geography,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Professor A. Masudian
Department of Physical Geography,
University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Dr. M. Minaei
Department of Geography,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Dr. H. Negaresh
Department of Physical Geography,
University of Sistan, Zahedan, Iran.

Professor A. Nohegar
Department of Planning,
management, and education of
environment, University of Tehran,
Tehran, Iran.

Professor B. Sari Sarraf
Department of Physical
Geography University of Tabriz,
Tabriz, Iran.

Dr. Sh. Shataee Joybari
Department of forest sciences
University of Gorgan, Gorgan,
Iran.

Professor S. Velayati
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran.

Professor M. Yamani
Department of Physical Geography,
University of Tehran, Tehran, Iran.

Geography and Environmental Hazards (ISSN:2322-1682) is published four times a year in June, September, December and March by Ferdowsi University of Mashhad, Postal Code 9177948883, mashhad-Iran, tel: +98(0) 5138805273

Fax: +98(0) 51 38794144 E-mail: geo.eh@um.ac.ir Website : <http://geoeh.um.ac.ir>

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Notes For Contributors

AIMS AND SCOPE

Geography and environmental Hazards is an Iranian Interdisciplinary research journal devoted to the publication of original scientific and technical papers in natural and technological hazards. The subjects include of full rang of Hazardous events from extreme Geological, Geomorphological, Hydrological, Atmospheric and Biological events such as earthquakes, subsidence, floods, debris flows, landslids, storms, desertification, air pollution and epidemics to technological Impacts and Human malifunction such as industrial explosions, fires, nuclear and toxic waste releases. With an approach to Geography this journal highlightes issues of Geographically risk degree of regions, human exposure, vulnerability, awareness, respons to disasters and planning.

The role of hazards in affecting development process particularly in under development countries and issues of efficiency, social justice and sustainability are also discussed in the journal.

NOTES FOR CONTRIBUTORS

Geography and Environmental Hazards is a bilingual Journal in Persian and English languages. Persian authors with papers in their own language must submit an extended abstract in English. authors with English papers must submit the initial electronic manuscript to one of the following Addresses:

Journal website: <http://geoeh.um.ac.ir>

Journal Email: geo.eh@um.ac.ir

The initial manuscript must be sent in two separate files, **word** and **pdf** form.

Manuscript Style

All submissions must be printed on A4 paper size, be double- line spaced and have a margin of 3.5 cm all round.

Illustrations and tables must be printed on separate sheets and not be incorporated into the text.

Title Page must list full title, short title, names and affiliations of author(s), and full address of each author. The precise mailing address, Telephon, Fax, and Email address of the corresponding author.

Supply an abstract of up to 300 words and a keyword list up to 6 words below the abstract. The abstract should precise the paper, giving a clear indication of Its conclusions. It should contain no citation to other published works.

Reference Style

References should be presented in the text as name of author and year within brackets and listeted at the end of the paper alphabetically. All references in the reference list should appear in the text.

Where reference is made to more than one work by the same author published in the same year, identify each citation in the text as follows: (Baker, 1987 a), (Baker 1987b). Where three or more outhors are listed in the reference list, cite in the text as (Baker et al 1998) References should be listed in the following style:

- **Journals:** Baker, V.R., 1994. Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology* 10, 139–156.
- **Books:** Huggett, R., 1989. *Cataclysms and Earth history: the Development of Diluvialism*. Clarendon Press, Oxford, 220 pp.
- **Proceedings:** Baker, V.R., Webb, R.H., House, P.K., 2002. The scientific and societal value of paleoflood Hydrology. In: House, P.K., Webb, R.H., Baker, V.R., Lavish, D.R. (Eds.), *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*. Water Science and Application, vol. 5. American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 1–19.

Illustrations must relate clearly to the section in which appear and sholud be referred to in the text as **figure 1. figure 2**, etc. Illustrations should be supplied as **JPEG** or **TIFF** files, the filename must include the corresponding author, Surname and figure number. This journal is only greyscale so All figures (**Maps, graphs and pictures**) must be comprehensible in black and white, please use patterns to differentiate sections.

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Contents (Abstracts)

VOLUME 11, NO 44, Winter 2023

Pages

- **A Meta-Method for Identifying the Subject of Scientific Research on Land Subsidence using Scientometric Approach** 1
Saeid Nasire Zare, Amir Karam
- **Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)** 2
Shahram Roostaei, Samira Najafvand
- **Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)** 3
Mousa Abedini, Leila Aghayary, Sayyad Asghari Saraskanrood
- **Evaluating the Efficiency of Bivariate Models in Determining Subsidence Susceptibility of Kashan Plain Aquifer** 4
Narges Saghzadeh, Hoda Ghasemieh, Ebrahim Omidvar, Yaser Maghsoudi
- **Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City)** 5
Seyed Reza Hosseinzadeh, Ebrahim Akbari, Mahdi Javanshiri, Zinat Mohammadpour Sangani
- **Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM** 6
Shabnam Mehrnoor, Maryam Robati, Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh, Forough Farsad, Shahram Baikpour
- **Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms** 7
Sayyad Asghari Saraskanrood, Elnaz Piroozi, Leila Aghayary
- **Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)** 8
Zahra Azarm, Hamid Mehrabi, Saied Nadi
- **Evaluating the Vulnerability of the Urban Fabric of District 18 of Tehran under the Influence of Land Subsidence using ANP and GIS** 9
Ramin Rezaei Shahabi, Alireza Arab, Hassan Ahmadi, Amir Pishva, Mohammad Iqbal Shahbakhsh Musa Zehi
- **Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images** 10
Hamid Ganjaeian, Maesom Asadi, Fatemeh Menbari, Atrin Ebrahimi



JOURNAL OF GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS



Subsidence as a global challenge: Crisis management or management crisis

Research Journal

Volume. 11, No. 44, Winter 2023

- **A Meta-Method for Identifying the Subject of Scientific Research on Land Subsidence using Scientometric Approach**
Saeid Nasire Zare, Amir Karam
- **Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)**
Shahram Roostaei, Samira Najafvand
- **Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)**
Mousa Abedini, Leila Aghayary, Sayyad Asghari Saraskanrood
- **Evaluating the Efficiency of Bivariate Models in Determining Subsidence Susceptibility of Kashan Plain Aquifer**
Narges Saghazadeh, Hoda Ghasemieh, Ebrahim Omidvar, Yaser Maghsoudi
- **Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City)**
Seyed Reza Hosseinzadeh, Ebrahim Akbari, Mahdi Javanshiri, Zinat Mohammadpour Sangani
- **Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM**
Shabnam Mehrnoor, Maryam Robati, Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh, Forough Farsad, Shahram Baikpour
- **Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms**
Sayyad Asghari Saraskanrood, Elnaz Piroozi, Leila Aghayary
- **Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)**
Zahra Azarm, Hamid Mehrabi, Saied Nadi
- **Evaluating the Vulnerability of the Urban Fabric of District 18 of Tehran under the Influence of Land Subsidence using ANP and GIS**
Ramin Rezaei Shahabi, Alireza Arab, Hassan Ahmadi, Amir Pishva, Mohammad Iqbal Shahbakhsh Musa Zehi
- **Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images**
Hamid Ganjaeian, Maesom Asadi, Fatemeh Menbari, Atrin Ebrahimi



دانشگاه فردوسی مشهد



دانشگاه علوم کشاورزی و علوم طبیعی کرمان



دانشگاه سیستان و بلوچستان



دانشگاه خوارزمی تهران



دانشگاه تبریز



دانشگاه اصفهان

ISSN:2322-1682

Published by

Ferdowsi University of Mashhad