

Research Paper

مقاله پژوهشی

Investigation of the Relationship between Land Surface Changes due to Subsidence and Groundwater using Sentinel-1 Satellite Images and Statistical Models (Case study: Varamin plain)

بررسی رابطه بین میزان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و مدل‌های آماری (منطقه مورد مطالعه: دشت ورامین)

MohammadAli Athari¹, Hamid reza Azizi^{2*}, Seyed Shahab Hashemi³ and HamidReza Honari⁴

محمدعلی اطهری^۱، حمیدرضا عیسی^{۲*}، سیدشهاب هاشمی^۳، حمیدرضا هنری^۴

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

2- Ph.D., Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- Ph.D., Civil-Water Recourses Management, Ab Sanat Energy Co. Managing Director, Tehran, Iran

۳- دکتری مدیریت منابع آب، مدیرعامل شرکت آب صنعت انرژی، تهران، ایران

4- M.Sc., Retired Faculty Member of Tehran University, Tehran, Iran.

۴- کارشناس ارشد، عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه تهران، شرکت مهندسی مشاور آبران، تهران، ایران

*Corresponding Author, Email: Azizi.hamidr@gmail.com

*نویسنده مسئول، ایمیل: azizi.hamidr@gmail.com

Received: 14/12/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴

Revised: 15/10/2021

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

Accepted: 26/10/2021

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

One of the most important issues that has been considered by many researchers in recent years is the study of the phenomenon of land subsidence. The purpose of studying subsidence is to examine the risks and consequences that can result from it over many years. In their research, most researchers considered the occurrence of earthquakes and excessive abstraction of groundwater aquifers due to the drilling of a large number of illegal wells as the most important causes of subsidence. The aim of this study was to obtain a statistical relationship between groundwater level changes and the rate of vertical movement of the earth's surface using linear regression and grade 3 models and using InSAR radar interferometry technique in Varamin plain between 2014 and 2019. Most of the surface of Varamin plain is covered by agricultural lands and therefore it can be said that the uncontrolled abstraction of groundwater is considered as the main cause of vertical movements of the earth. In order to analyze the subsidence that occurred in this plain, Snap software was used and by applying the desired filters to eliminate the noise in the initial images, surface displacement maps were obtained in Varamin plain. The images used for the surface of the earth from 2014 to 2019 were obtained by Sentinel-1 satellite SAR sensor as ascending, and finally, by comparing the obtained statistical models from the fluctuation of the aquifer and the ground, it was found that the linear regression model has a better predictive power than the 3rd degree regression model.

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است، بررسی پدیده فرونشست زمین است. هدف از مطالعه فرونشست، بررسی خطرات و پیامدهایی است که می‌تواند در اثر آن در طی سالیان متمادی به وجود آید. اکثر پژوهشگران در تحقیق خود، وقوع زمین‌لرزه و برداشت بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی در اثر حفر تعداد زیادی از چاه‌های غیرمجاز را از جمله مهم‌ترین عوامل وقوع فرونشست در نظر گرفتند. هدف این تحقیق ارزیابی ارتباط آماری میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان حرکت عمودی سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و درجه ۳ و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری InSAR در دشت ورامین بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ است. با توجه به کاربری کشاورزی در بیشتر مناطق این دشت، می‌توان اظهار نمود که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی به عنوان عامل اصلی حرکات عمودی زمین در نظر گرفته شود. به منظور آنالیز فرونشست اتفاق افتاده در این دشت، از نرم‌افزار Snap استفاده شد و با اعمال فیلترهای موردنظر برای رفع نویزهای موجود در تصاویر اولیه، نقشه‌های جابه‌جایی سطح در دشت ورامین به دست آمد. تصاویر استفاده شده برای سطح زمین نیز از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ توسط سنجنده SAR ماهواره Sentinel-1 و به صورت Ascending دریافت شد. در نهایت با مقایسه مدل‌های آماری به دست آمده از نوسان سطح آبخوان و سطح زمین، مشخص شد که مدل رگرسیون خطی با وجود ضریب همبستگی پایین که متأثر از اثرگذاری سایر عوامل طبیعی است، دارای قدرت پیش‌بینی مطلوب‌تری نسبت به مدل رگرسیون درجه ۳ است.

Keywords: Land subsidence, Ground water level, InSAR, Snap, Sentinel-1

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، سطح آب زیرزمینی، InSAR، Snap، Sentinel-1

کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شوند مطرح شده و به صورت قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

یک سیستم SAR، امواج الکترومغناطیس را در طول موج‌های از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر و در هر شرایط آب‌وهوایی و در طول شب و روز گسیل می‌دارد و سیگنال بازتابی هم از نظر شدت و هم از نظر فاز بازتابیده شده از هر المان، در سلول تفکیکی زمینی به صورت آرایه‌هایی از مقادیر موهومی ثبت می‌شود. این مقادیر موهومی میزان بازتابندگی سطح زمین را نشان می‌دهند. هرگاه دو تصویر رادار از یک منطقه و در زمان‌های متفاوت موجود باشد به شرط موجود بودن مدل ارتفاعی منطقه مورد نظر، تصویر اینترفروگرام مربوطه می‌تواند هرگونه جابه‌جایی اتفاق افتاده در منطقه را شناسایی نماید (فتح الهی و همکاران، ۱۳۹۷).

Larson et al. (2001) در پژوهشی فرونشست زمین ناشی از استخراج بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در شهر سن ژواکین^۱ شمال کالیفرنیا را مطالعه نمودند. در این پژوهش از مدل‌های شبیه‌سازی فرونشست زمین ناشی از اضافه برداشت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با استفاده از داده‌های مشاهده شده از ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۸ استفاده کرده و پاسخگویی مدل به تغییرات پارامترهای فرونشست را از طریق آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین سناریوی احتمالی خشکسالی در آینده برای ارزیابی تأثیر فرونشست زمین را مطرح و پیشنهاد استفاده از سه گزینه انتقال آب، استفاده از آب‌های سطحی و کاهش برداشت در طی سی سال آینده را ارائه نمودند.

با توجه به اهمیت رابطه میزان فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی، پژوهش در این زمینه ضروری است. پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه میزان تغییرات فرونشست و نوسان تراز آب زیرزمینی به‌واسطه استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و درجه ۳ و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری InSAR در یک مطالعه موردی در جنوب شرقی استان تهران انجام گرفته است. با توجه به موقعیت منطقه، برداشت‌های روزافزون برای مصرف آب کشاورزی موجب افت سطح آب در دشت شده است که با انجام این تحقیق و تعیین ارتباط میان میزان فرونشست و نوسان سطح آبخوان، می‌توان برنامه‌ریزی اصولی برای کنترل برداشت و طرح‌های توسعه آبخوان در منطقه ارائه داد.

فرونشست زمین یکی از مشکلات اصلی زمین‌شناسی در سراسر جهان است که باعث ایجاد خسارت‌های جدی به ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها و پل‌ها است و طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد (Brambati et al., 2003). علت اصلی این پدیده را می‌توان به فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و دلایل طبیعی نظیر زمین‌لرزه تقسیم‌بندی نمود (Du et al., 2016; Guo et al., 2016). نشست منطقه‌ای زمین، تغییرات قابل مشاهده قائم سطح زمین است که معمولاً به شکل صفحه‌ای یا بشقابی و به صورت جابجایی‌های رو به پایین دیده می‌شود. این حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نیست و تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد (نژادگرگی و معتقدی، ۱۳۹۸).

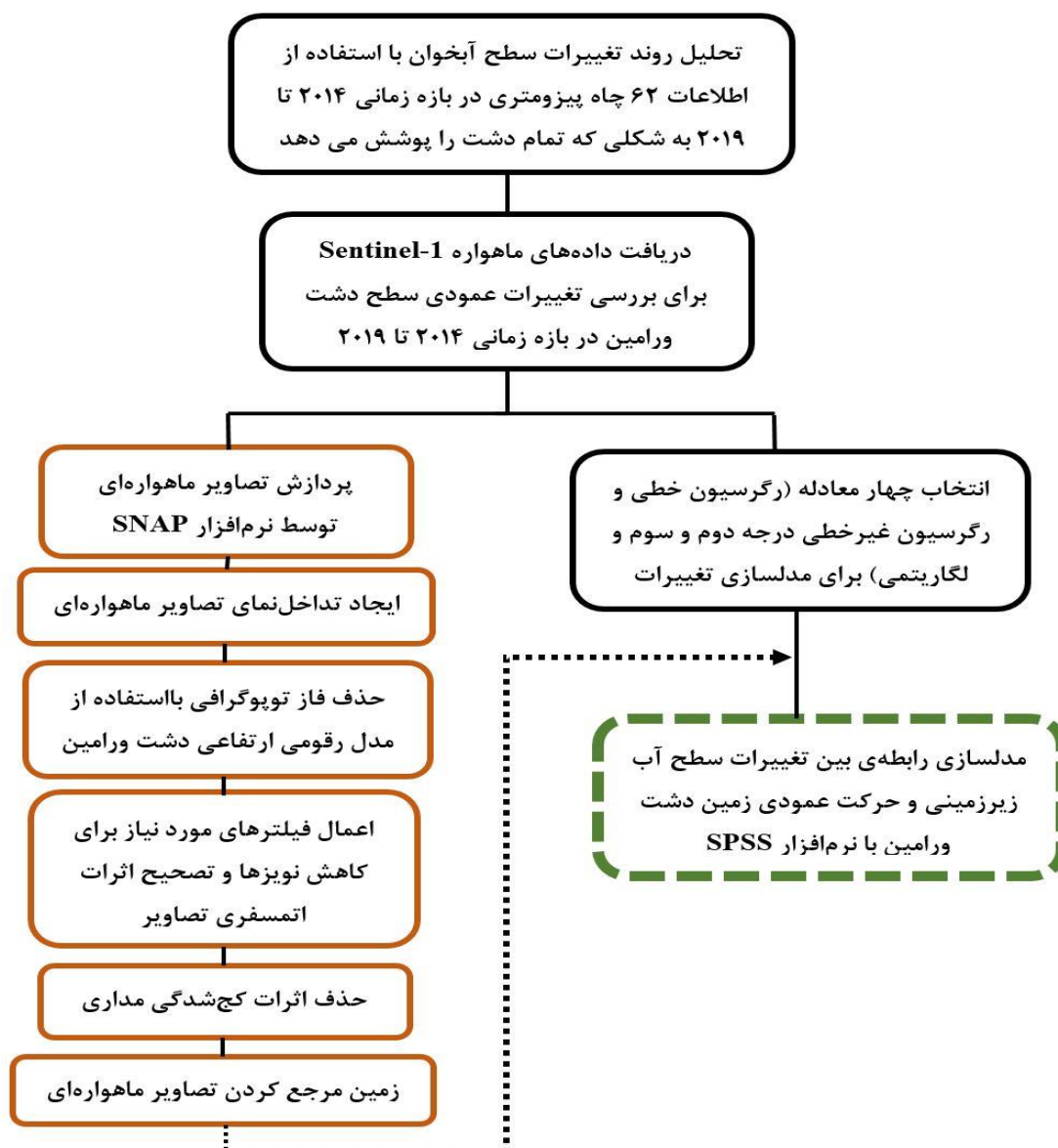
فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه، می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود. به‌عنوان مثال در این مناطق ممکن است سیلاب‌های عظیم و مخربی به‌وقوع بپیوندد، در حالی‌که قبل از ایجاد فرونشست از هیچ سابقه‌ای برخوردار نبوده است. از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت زمین آب‌شناختی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی و... نتیجه ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد (کوچکی و قربان زاده، ۱۳۹۸). در کشور ایران پس از زلزله، سیلاب و خشکسالی، پدیده فرونشست را می‌توان یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین مخاطرات به‌شمار آورد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸). وقوع فرونشست در مناطق مختلف دنیا منجر به بروز خسارت‌های جدی به ساختارهای انسان ساخت و طبیعی شده است (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). گزارش‌های متعددی از فرونشست زمین به ویژه در مناطق خشک و کم‌باران در سراسر جهان ارائه شده است که مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌های رسوبی این مناطق پمپاژ بی‌رویه منابع آب زیرزمینی است. (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین ارزیابی میزان فرونشست در دشت‌های کشور امری ضروری است. از اوایل دهه ۱۹۹۰ تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی (InSAR interferometry) به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند مطرح شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در دو دهه اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد و توانمند در مطالعه

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحقیق

روش انجام پژوهش از نوع توصیفی-تحلیلی است (نوری و فلاح پور، ۱۳۹۹). ابتدا برای تحلیل و بررسی تغییرات سطح آبخوان ورامین، اطلاعات مورد نیاز ۶۲ چاه مشاهده‌ای با پوشش حداکثری تمام سطح دشت از شرکت مدیریت منابع آب ایران در بازه مورد بررسی تهیه شده است. در بخش بعدی از تصاویر

ماهواره‌ای Sentinel-1 به‌منظور بررسی تغییرات رقوم ارتفاعی سطح دشت ورامین استفاده شد، به شکلی که برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم افزار SNAP از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) استفاده شده است (عبدالخالق و همکاران، ۱۳۹۸). درنهایت رابطه بین میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان تغییرات عمودی دشت ورامین بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ از دو معادله رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی درجه سوم با استفاده از نرم‌افزار SPSS استخراج شد (شکل ۱).



شکل ۱- رویکرد گام به گام پیشنهادی برای تعیین رابطه میان فرورانشست و تغییرات سطح آبخوان

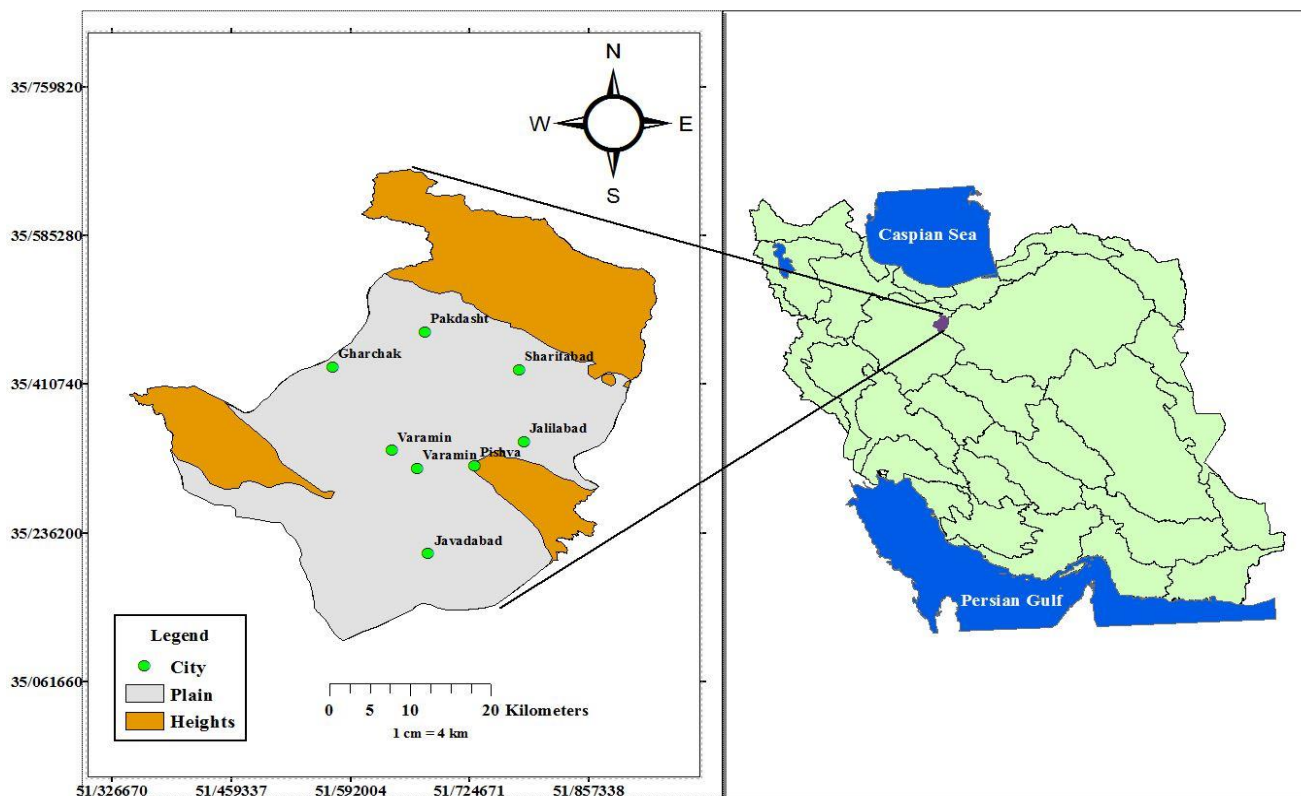
وسعتی معادل ۱۷۲۰ کیلومتر مربع از زیرحوضه‌های دریاچه نمک است که در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و

۲-۲- محدوده مورد مطالعه

دشت ورامین یکی از جنوبی‌ترین دشت‌های استان تهران در همسایگی کویر مرکزی قرار دارد. حوضه آبریز دشت ورامین با

لتیان یکی از عواملی است که در چرخه هیدرولوژیکی حوضه و همچنین توسعه کشاورزی پایین‌دست خود تأثیر زیادی دارد (شکل ۲).

۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. میانگین سالانه دما در این حوضه ۱۶/۹ درجه سانتیگراد بوده و میانگین بارش ۱۵۶ میلی‌متر در سال است. رودخانه‌های جاجرود، در حوضه آبریز مطالعاتی قرار گرفته که سد لتیان در بالادست آن احداث شده است. سد



شکل ۲- تصویر موقعیت جغرافیایی و شهرهای دشت ورامین

پژوهشگران در سراسر جهان، برای موارد مطالعاتی مختلف استفاده شده است. ساختار معادله رگرسیون خطی به صورت رابطه (۱) است (Hazra and Gogtay, 2016; Lin et al., 2017):

$$Y = a + bX \quad (1)$$

که Y : معرف تغییرات سطح آب آبخوان، X : میزان تغییرات عمودی سطح زمین، a : عدد ثابت در معادله و محل قطع شدن خط بر روی محور Y و b : معرف شیب خط معادله است که تحت عنوان ضریب رگرسیون نیز معرفی می‌شود.

۲-۱-۳-۲- معادله رگرسیون درجه سوم^۳

معادله دوم که برای تعیین رابطه بین تغییرات فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شده، رگرسیون غیرخطی درجه ۳ است که توسط بسیاری از پژوهشگران در کارهای تحقیقاتی استفاده شده و ساختار آن به صورت رابط (۲)

۳-۲- مفاهیم مورد استفاده

۲-۳-۱- معادلات رگرسیون انحنایی مورد استفاده

برای حصول رابطه میان میزان تغییرات فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی، دو معادله رگرسیون در نظر گرفته شده است. برای مقبولیت این روابط، شرط نخست، برقراری رابطه $|Sig| < 0/5$ است، بدین معنا که معادله، قادر به پیش‌بینی با قدرت بالا و عملکرد مطلوب‌تری است. در شرایطی که اولین شرط برقرار باشد، برای مقایسه این دو معادله (رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی درجه سوم)، هر کدام که دارای مقدار F بالاتری باشد، برتری بیشتری نسبت به دیگر روابط دارد. این دو رابطه به شرح زیر هستند:

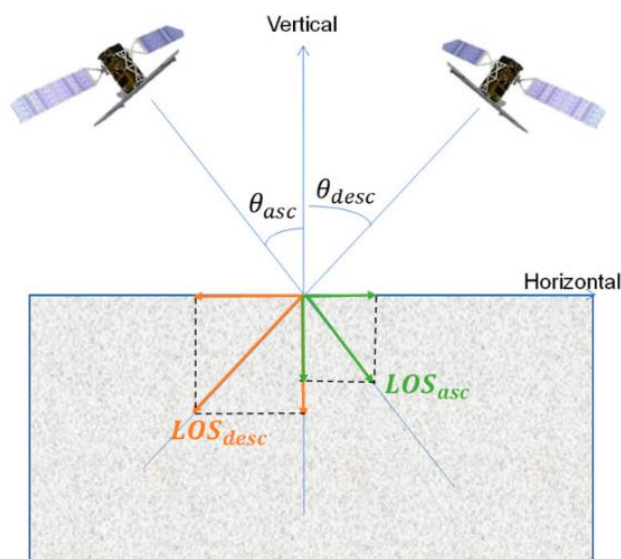
۲-۳-۱-۱- معادله رگرسیون خطی^۲

اولین معادله‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شد، معادله رگرسیون خطی است که توسط بسیاری از

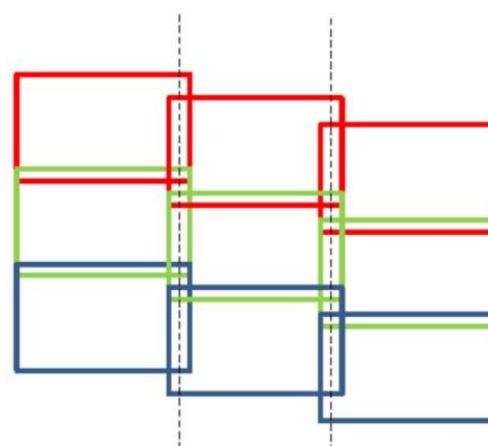
ذکر است به ردیف‌ها Burst و به ستون‌ها IW گفته می‌شود و براساس منطقه مورد مطالعه انتخاب خواهند شد. برای انجام آنالیز تصاویر ماهواره‌ای فرونشست زمین در دشت ورامین، از نرم‌افزار Snap استفاده شد. بدین صورت که تصاویر ماهواره‌ای در طی دوره ۲۰۱۴ الی ۲۰۱۹ توسط این نرم‌افزار تحلیل و نتایج آن نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. از بین دو حالت Ascending و descending، برای این تحقیق تنها به بررسی حالت Ascending پسندیده شده است. دو حالت در شکل ۳ قابل مشاهده هستند. تصاویر به‌دست آمده از ماهواره Sentinel-1 شامل نویز و خطاهای مختلف می‌شود که در قالب فازهای مختلف معرفی می‌شوند. اختلاف فاز دو تصویر SAR به‌دست آمده محاسبه می‌شود و در نتیجه تداخل‌نگار تولید می‌شود. مؤلفه‌های اصلی سهم در فاز تداخل‌نگار تولیدی عبارتند از (Zhou et al., 2018; Téllez-Quiñones, 2020):

$$\varphi_{int} = \varphi_{def} + \varphi_{topo} + \varphi_{flat} + \varepsilon_{error} \quad (3)$$

که φ_{int} : میزان کل تصحیحات تداخل‌سنجی، مؤلفه‌ی فازی که φ_{def} : میزان تغییرشکل‌های سطحی زمین به خاطر پروسه‌های طبیعی یا فعالیت‌های انسانی، φ_{topo} : فاز ناشی از توپوگرافی، φ_{flat} : فاز ناشی از مسطح بودن زمین و ε_{error} : مؤلفه‌های فازی مزاحم از جمله فاز اتمسفری، باقی‌مانده فاز مربوط به نویزها و ... هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) ساختار تصاویر ماهواره Sentinel-1 (Sowter et al., 2016)؛ و ب) نحوه قرارگیری ماهواره Sentinel-1 که به دو صورت Ascending و descending با زاویه θ ، نسبت به خط عمودی از عوارض سطح زمین تصویربرداری می‌کند (Delgado Blasco et al., 2019)

تعریف می‌شود (Sabra et al., 2018; Velandari et al., 2020):

$$Y = a + (b_1X) + (b_2X^2) + (b_3X^3) \quad (2)$$

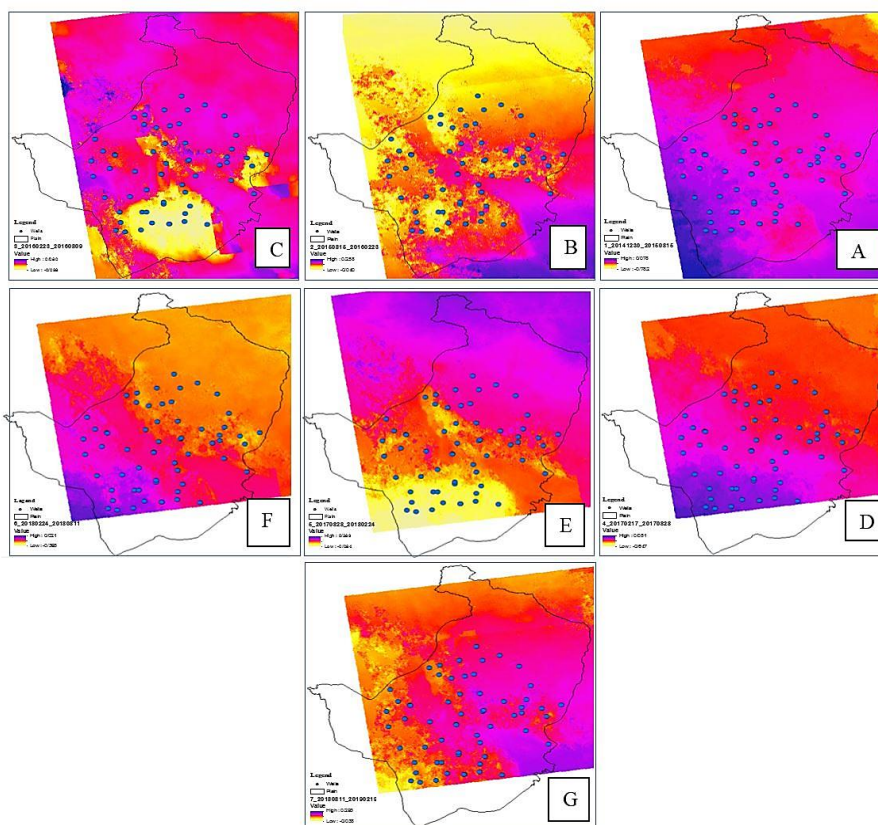
که b_1 ، b_2 و b_3 : ضرایب ثابت معادله رگرسیون غیرخطی درجه سوم هستند.

۲-۳-۲- نرم‌افزار SPSS

SPSS یک نرم‌افزار آماری بسیار پیشرفته و در عین حال بسیار ساده است که ابتدا به ساکن برای انجام تحقیقات علوم اجتماعی طراحی شد، ولی امروزه گستره استفاده از آن، تمام علوم را دربرگرفته است. بنابراین برای انجام این تحقیق از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای قوی برای تحقیقات آماری است. از جمله توانایی‌های این نرم‌افزار مدل‌سازی با روش‌های خطی و غیرخطی مدل‌های رگرسیونی است. از جمله مدل‌های مورد استفاده در این نرم‌افزار مدل رگرسیون لجستیک است.

۲-۳-۳- نرم‌افزار Snap

تصاویر به‌دست آمده از ماهواره Sentinel-1 به‌صورت موزائیکی و به‌هم پیوسته هستند و باید متناسب با منطقه مورد مطالعه، قسمت مناسبی از تصویر انتخاب و مورد آنالیز قرار گیرد. این موضوع در شکل ۳الف به وضوح قابل مشاهده است. لازم‌به

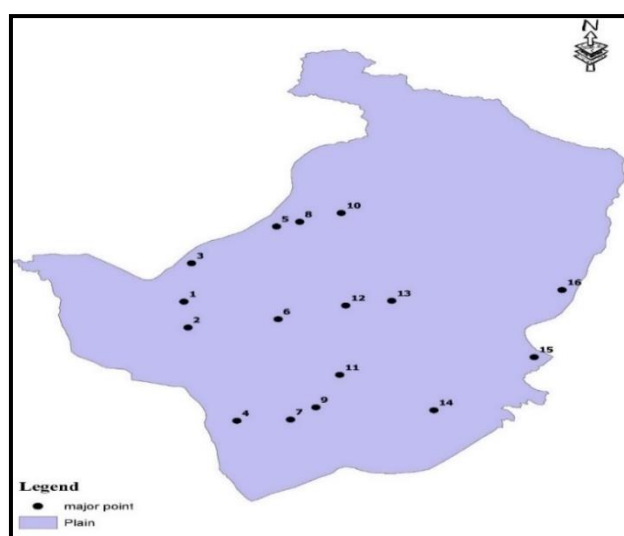


شکل ۴- تصاویر ماهواره‌ای خروجی از آنالیز نرم‌افزار Snap برای دشت ورامین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹
 تاریخ تصاویر: (A - 15/08/2015-30/12/2014 (B - 23/02/2016-15/08/2015 (C - 09/08/2016-23/02/2016
 (D - 28/08/2017-17/02/2017 (E - 4/02/2018-28/08/2017 (F - 19/02/2019-11/08/2018 (G - 11/08/2018-24/02/2018

۳- نتایج و بحث

بررسی با توجه به پوشش ۶۲ چاه پیزومتری برای بررسی هم‌زمان تغییرات سطح آبخوان با میزان فرورفتگی زمین در طی سال‌های ۲۰۱۴ الی ۲۰۱۹ در نظر گرفته شده است. تصاویر ماهواره‌ای خروجی از آنالیز نرم‌افزار Snap برای دشت ورامین در بازه زمانی موردنظر و نقاط انتخابی نشان داده شده است (شکل ۴).

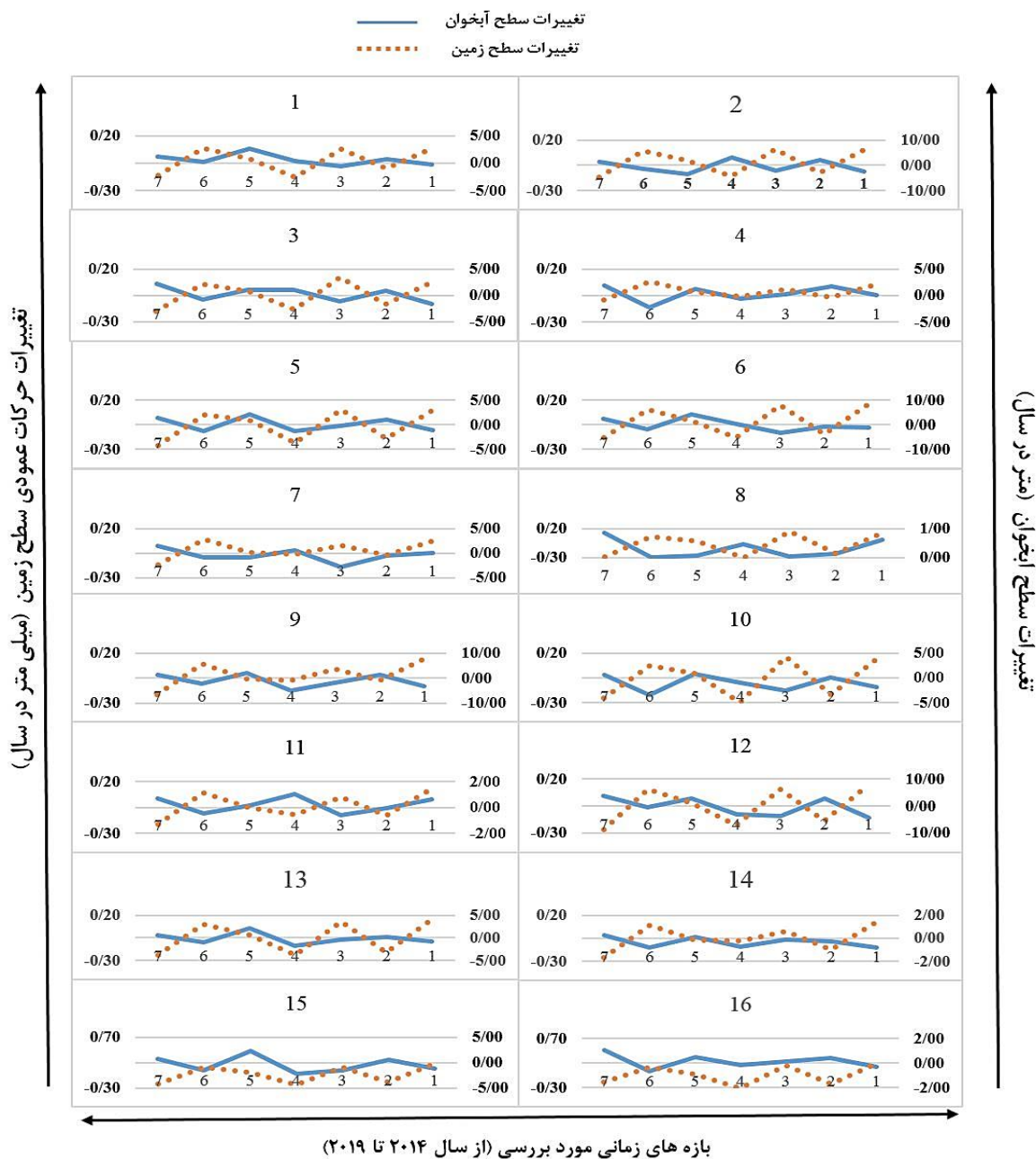
۳-۱- تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و نمودارهای فرورفتگی زمین - تغییرات سطح آبخوان
 در محدوده مورد بررسی، ۱۶ نقطه به‌عنوان ناحیه‌های مورد



شکل ۵- شانزده نقطه انتخابی برای بررسی رابطه بین فرورفتگی زمین و تغییرات سطح آب سفره زیرزمینی

بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های مجاز و غیر مجاز است. نمودار عمودی سمت راست معرف میزان تغییرات سطح آبخوان و نمودار عمودی سمت چپ معرف میزان تغییرات حرکات عمودی زمین است. همچنین بازه‌های زمانی مورد بررسی به ترتیب از ۱ تا ۷ شماره گذاری شده‌اند.

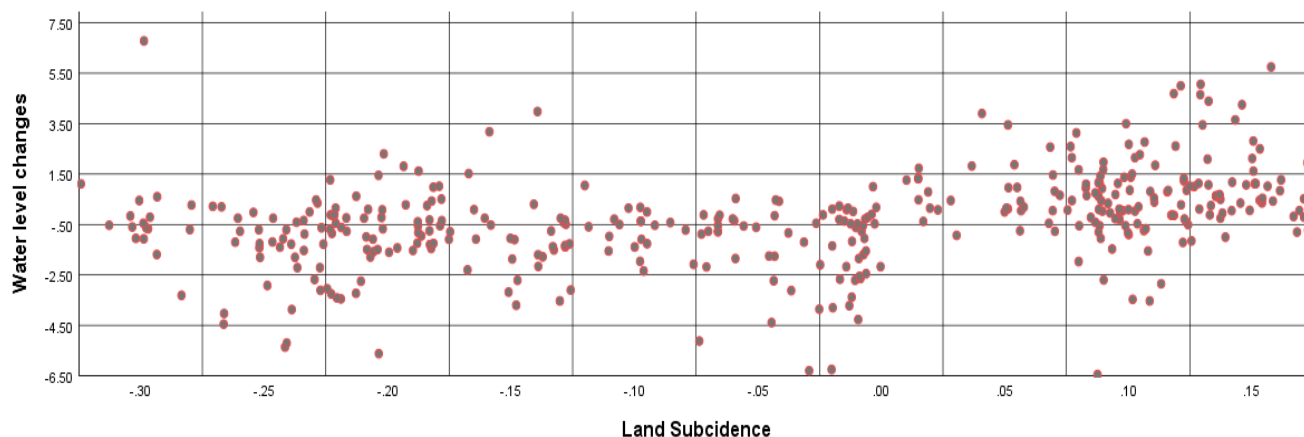
این ۱۶ نقطه شکل ۵ به صورتی انتخاب شده‌اند که تمامی سطح آبخوان و چاه‌های پیژومتری را پوشش داده و بتواند تغییرات سطح آب زیرزمینی نسبت به تغییرات عمودی سطح زمین را به خوبی نشان دهد. همان‌طور که در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد، فرونشست زمین در اکثر نقاط، پس از افت سطح آب زیرزمینی رخ داده است، که نشان از تأثیر مستقیم برداشت



شکل ۶- رابطه فرونشست زمین و تغییرات سطح آب سفره زیرزمینی برای ۱۶ نقطه انتخابی

کلیه اطلاعات به دست آمده در طی بازه بررسی (سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹) به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. در شکل ۷ این روابط، به وضوح نشان داده شده است.

۲-۳- نمایش رابطه تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در کل بازه مورد بررسی
برای به دست آوردن رابطه کلی میزان تغییرات حرکت عمودی زمین نسبت به تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت ورامین، باید



شکل ۷- پراکندگی تغییرات فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی کلیه چاه‌های دشت ورامین در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹

و انجام تحلیل‌های آماری رگرسیون، نتایج برای دو مدل مورد استفاده به‌دست آمد، که به شرح جدول ۱ است.

با وارد کردن اطلاعات تغییرات سطح آب زیرزمینی و همچنین تغییرات حرکت عمودی سطح زمین برای کلیه نقاط مورد بررسی در بازه زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ در نرم‌افزار SPSS

جدول ۱- خروجی داده‌های آماری رگرسیون خطی و رگرسیون درجه ۳ از نرم‌افزار SPSS

خلاصه مدل					پارامترهای محاسبه شده				معادله
R Square	F	df ₁	df ₂	Sig.	Constant	b ₁	b ₂	b ₃	
۰/۱۴۱	۶۴/۲۹۴	خطی	۳۹۱	۰	-۰/۱۱۹	۴/۶۷۳	-	-	خطی
۰/۱۹۷	۳۱/۷۷	درجه ۳	۳۹۸	۰	-۰/۵۵۲	۸/۰۱۹	۲۲/۲۰۳	۱۹/۹۵	درجه ۳

Y، برابر با میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی و X نیز برابر با میزان تغییرات عمودی سطح زمین در دشت ورامین در طی بازه سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ است.

۴- نتیجه‌گیری

پدیده فرونشست به یکی از مهم‌ترین موضوعات سراسر جهان تبدیل شده است، به‌صورتی که پژوهشگران متعددی از سراسر جهان به بررسی این موضوع می‌پردازند. عدم توجه به این پدیده خطرناک زمین‌شناسی می‌تواند در نهایت منجر به خسارت‌های زیادی از جمله آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی ارتباط تغییرات حرکت عمودی سطح زمین نسبت به تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت ورامین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ است که با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و درجه ۳ این کار انجام گرفت. در نهایت برتری معادله رگرسیون خطی نسبت به رگرسیون درجه ۳ حاصل شد. برای محاسبه میزان جابجایی زمین، از تصاویر ماهواره Sentinel-1 و با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری InSAR به‌همراه اعمال فیلترهای لازم برای از بین بردن کلیه نویزهای موجود در تصاویر ماهواره‌ای

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای مدل‌های رگرسیون انحنایی بالا، مشاهده می‌شود که کلیه مدل‌ها شرط نخست که همان برقراری رابطه ($Sig < 0/5$) را دربر می‌گیرند. در ادامه برای انتخاب مدل بهتر در بین این دو معادله، هرکدام که دارای آماره F بالاتری باشد، دارای قدرت پیش‌بینی بالاتری است که با توجه به نتایج به‌دست آمده، به ترتیب مدل‌های Linear و Cubic خواهند بود. همچنین باید در نظر داشت کم بودن ضریب همبستگی میان تغییرات سطح آب و فرونشست در مدل‌های آماری را می‌توان متأثر از سایر عوامل اثر گذار در پدیده فرونشست در سطح دشت همچون توپوگرافی، گسل‌ها و ضخامت آبخوان در نظر گرفت. معادلات به‌دست آمده (ارتباط تغییرات) با توجه به انجام تحلیل‌های ذکر شده به شرح زیر است.

$$Y = -0.119 + (4.673 \times X) \quad (۴)$$

$$Y = -0.522 + (8.019 \times X) + (22.203 \times X^2) - (19.950 \times X^3) \quad (۵)$$

بنابراین برای این تحقیق، مدل خطی را به‌عنوان مدل مطلوب‌تر برای تعیین رابطه بین میزان تغییرات فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده می‌کنیم که در این رابطه،

فرونشست زمین در شهرستان سرایان، سمپوزیوم ملی قنات بلده فردوس، بیرجند.

محمدی، م.، امیری، م.، و پورقاسمی، ح.ر.، (۱۳۹۸)، "پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین در دشت سمنان با استفاده از مدل خطی تعمیم یافته"، دومین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی با محوریت آب، سیل و محیط زیست، گنبد کاووس.

مختاری، د.، ابراهیمی، ح.، و سلمان، س.، (۱۳۹۸)، "مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج)"، فصلنامه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰(۳)، ۱-۱۳.

منتظریون، م.، و اصلانی، ف.، (۱۳۹۸)، "ارزیابی خطر فرونشست زمین با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز"، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۹(۱)، ۳۵-۴۷.

نوری، م.، و فلاح پور، م.، (۱۳۹۹)، "بررسی علل و پیامدهای تشکیل فروچاله و فرونشست زمین در استان یزد"، دهمین همایش سراسری محیط زیست انرژی و منابع طبیعی پایدار، تهران.

Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., and Tosi, L., (2003), "The Lagoon of Venice: Geological setting, evolution and land subsidence", *Episodes*, 26(3), 264-268.

Delgado Blasco, J.M., Foumelis, M., Stewart, C., and 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.

Du, Z., Ge, L., Li, X., and Ng, A., (2016), "Subsidence monitoring over the Southern Coalfield", *Australia Using both L-Band and C-Band SAR Time Series Analysis*, 8(7), 543-556.

Guo, J., Zhou, L., Yao, C., and Hu, J., (2016), "Surface subsidence analysis by multi-temporal insar and grace: A case study in Beijing", *Sensors*, 16(9), 1495-1503.

Hazra, A., and Gogtay, N., (2016), "Biostatistics series module 6: correlation and linear regression", *Indian Journal of Dermatology*, 61(6), 593-601.

Larson, K.J., Basagaoglu, H., and Marino, M.A., (2001), "Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model", *Journal of Hydrology*, 242, 79-102.

Lin, H.L., Li, Z., Wang, D., and Zhao, Y., (2017), "Jackknife empirical likelihood for the error variance in linear models", *Journal of Nonparametric Statistics*, 29(2), 151-166.

استفاده شد. لازم به ذکر است این پژوهش می‌تواند مقدمه‌ای برای بررسی گسترده‌تر وضعیت حرکت عمودی پوسته زمین نسبت به تغییرات سطح آب آبخوان‌ها با معادلات بیشتر و در دوره‌های آماری وسیعتری با در نظر گرفتن عوامل دیگر طبیعی مؤثر بر پدیده فرونشست هم‌چون نوع دانه‌بندی و جنس خاک، تراز سنگ کف، گسل‌ها و سایر عوامل طبیعی باشد. بررسی این روابط آماری با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر بر فرونشست برای پیش‌تغییرات سطح زمین در اثر نوسان سطح آبخوان، امری اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو مدیریت منابع آب باید هرچه بیشتر مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرد تا همگام با توسعه پایدار کشاورزی بتوان از ادامه روند کنونی فرونشست زمین جلوگیری کرد.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- San Joaquin
- 2- Linear Regression
- 3- Cubic Regression

۶- مراجع

آروین، ع.، وهابزاده کبریا، ق.، موسوی، س.ر.، و بختیاری کیا، م.، (۱۳۹۸)، "مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی"، فصلنامه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰(۳)، ۱۹-۳۴.

ابراهیم نژادگرگی، ح.، و معتقدی، ح.، (۱۳۹۸)، "بررسی ژئوتکنیکی فرونشست زمین در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی (دشت بهشهر)"، چهارمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.

بابایی، س.س.، موسوی، ز.، و روستایی، م.، (۱۳۹۵)، "آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۵(۴)، ۹۵-۱۱۱.

فتح الهی، ن.، و آخوندزاده هنزایی، م.، و بحرودی، ع.، (۱۳۹۷)، "بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار"، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۷(۱۰۷)، ۲۳-۳۴.

کوچکی، ر.، و قربان زاده، م.م.، (۱۳۹۸)، "بررسی پدیده

- Sabra, W., Azzam, S.I., Song, M., Povolotskyi, M., Aly, A.H., and Kildishev, A.V., (2018), "Plasmonic metasurfaces for subtractive color filtering: optimized nonlinear regression models", *Optics Letters*, 43(19), 4815-4818.
- Sowter, A., Amat, M.B.C., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., and Alshammari, L., (2016), "Mexico City land subsidence in 2014-2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique", *International Journal of Applied Earth Observation and Geofomation*, 52, 230-242.
- Téllez-Quiñones, A., Salazar-Garibay, A., Valdiviezo-Navarro, J.C., Hernandez-Lopez, F.J., and Silván-Cárdenas, J.L., (2020), "DInSAR method applied to dual-pair interferograms with Sentinel-1 data: A study case on inconsistent unwrapping outputs", *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), 4664-4683.
- Vulandari, R.T., Widada, B., Susyanto, T., and Hermawan, D.D., (2020), "Application of cubic nonlinear regression on the effects of rainfall on rice harvest results", *International Journal of Trends in Mathematics Education Research*, 3(1), 43-47.
- Zhou, H., Wang, Y., Yan, S., Li, Y., Liu, X., and Zhang, F., (2018), "Monitoring of recent ground surface subsidence in the Cangzhou region by the use of the InSAR time-series technique with multi-orbit Sentinel-1 TOPS imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 39(22), 8113-8128.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.