

مقاله علمی-پژوهشی

## مطالعه اثر فرونشست زمین بر میزان آب برگشتی به آبخوان دشت قزوین

مهنوش جناب<sup>۱</sup>، هادی رضضانی اعتدالی<sup>۲\*</sup>، خشایار امیدی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲

### چکیده

افزایش بی‌رویه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به ویژه در حوضه‌ها و دشت‌های آبرفتی می‌تواند علاوه بر افت روزافزون سطح ایستابی منجر به فرونشست سطح زمین شود. این تغییرات، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان بویژه پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه و بعلاوه میزان آب برگشتی به آبخوان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افت شدید سطح ایستابی، سبب تحکیم و فرونشست می‌شود و خسارات جبران‌ناپذیر جانی، محیط‌زیستی و مالی ایجاد می‌نماید. افت سطح ایستابی و خصوصیات آبخوان تأثیر مستقیمی بر روی میزان فرونشست دارند. همچنین وقوع فرونشست سبب تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی سفره در نتیجه کاهش تغذیه آبخوان خواهد شد. در این مطالعه با استفاده از نسخه ۱۰ نرم افزار GMS در آبخوان قزوین پس از انجام آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای ضرایب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، این ضرایب در سه دوره آماربرداری سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ پس از واسنجی و صحت سنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار تعیین گردیدند. ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی در بخش فرونشست مدل، ۰/۰۵۲ متر و در مرحله صحت سنجی ۰/۰۷۲ بدست آمد. این مقادیر حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. بر اساس شبیه‌سازی فرونشست دشت قزوین در قسمت‌های شرقی و خروجی آبخوان در شهرستان‌های بوئین زهرا و آبیگ و همچنین در قسمت‌هایی از تاکستان میزان فرونشست رخ داده بیشتر از مابقی نقاط است. از طرفی در قسمت‌هایی از آبخوان که آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی کمتر است میزان فرونشست بیشتری رخ داده است. با افزایش فرونشست از میزان آب برگشتی به آبخوان کاسته می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان اثرپذیری و کاهش آب برگشتی از فرونشست از ۱۸/۸ تا ۹۰/۴ درصد در منطقه بیشینه فرونشست، متغیر است.

### واژه‌های کلیدی: فرونشست، مدل سازی آب زیرزمینی، آب برگشتی، دشت قزوین

### مقدمه

فرونشست زمین در ایران سابقه طولانی بیش از چند دهه دارد. بدون شک مناسب‌ترین راه برای شناخت سیستم سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین رفتارسنجی علل پیدایش فرونشست، انجام یک سری عملیات صحرایی است اما از آنجایی که این اطلاعات نقطه‌ای و گران قیمت است، امروز استفاده از تکنیک سنجش از دور برای دستیابی به داده‌های وسیع و ارزان قیمت، توسط محققان پیشنهاد می‌شود. همچنین در یک روند پویا، پارامترهای مختلف زمین‌شناسی و هیدرودینامیکی آبخوان سبب ایجاد و تشدید پدیده فرونشست می‌شود و از طرفی فرونشست سبب تغییرات زمین‌شناسی و هیدرودینامیکی خواهد شد که مطالعه در این زمینه به مدیریت در راستای کاهش این مخاطرات کمک خواهد کرد. بر این اساس در این پژوهش شناخت تغییرات زمانی-مکانی فرونشست بر اساس روش تداخل سنجی راداری بر اساس داده‌های ماهواره راداری سنتینل انجام شد و ارتباط آن با میزان آب برگشتی بررسی شد تا از نتایج برای مدیریت و کاهش صدمات پدیده فرونشست بهره‌برداری شود. فرونشست حرکات قائم

اتخاذ تصمیم بر مبنای اعداد غیرواقعی یکی از دلایل اصلی وضعیت بحرانی منابع آب کشور است. با توجه به اینکه در کشور ایران وابستگی به آب‌های زیرزمینی بیش از ۸۰ درصد می‌باشد، شناخت تقریباً دقیق از منابع آب زیرزمینی می‌تواند در مدیریت کلان و بلند مدت منابع آب در کشور کمک کند. یکی از پیامدهای وابستگی زیاد به آب‌های زیرزمینی و برداشت بیش از حد از آن، فرونشست می‌باشد که سبب مخاطرات زیادی در شهرها و محدوده آبخوان می‌شود. پدیده

۱- دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه

بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین

ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی

آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

\*- نویسنده مسئول: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

تصویر رادرای (DEM+) استفاده می‌شود. محاسبات فرونشست می‌تواند به صورت سری زمانی کوتاه مدت (ماهانه و فصلی) و بلند مدت (سالانه) با توزیع مکانی باشد (Calderhead et al., 2010). مطالعات بسیاری برای ارزیابی توانایی تصاویر ماهواره‌ای به ویژه محاسبه فرونشست انجام شده است. دو و همکاران به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با استفاده سنسورهای Sentinel-1 و ALOS-2 پرداختند که نتایج این دو ماهواره همدیگر را تأیید نمودند. در مطالعات آن‌ها مناطقی که فرونشست را تجربه می‌کنند ترکیب تعدادی از عوامل، مانند، فعالیت‌های مسکونی، صنعتی یا کشاورزی بوده است (Du et al., 2018). هلم و همکاران به پیش‌بینی و تخمین میزان فرونشست آبی با استفاده از رویکردهای تجربی، نیمه نظری و نظری پرداختند. آن‌ها میزان فرونشست زمین را به برداشت از سفره‌های زیرزمینی ارتباط دادند (Helm et al., 1984).

زیاو و همکاران بر اساس ابزارهای نرم افزار ArcGIS و داده‌های ۳۰ حلقه چاه مشاهده‌ای برای تخمین کاهش سطح آب زیرزمینی در پیمونت پکن استفاده کردند (Xiao et al., 2016).

هفت روش مختلف درون‌یابی (درون‌یابی با فاصله معکوس، درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی، درون‌یابی چند جمله‌ای محلی، درون‌یابی اسپیلاین کششی<sup>۱</sup>، درون‌یابی کریجینگ معمولی، درون‌یابی کریجینگ ساده و درون‌یابی کریجینگ جهانی) برای پی بردن به سطح آب ایستایی بین سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۳ استفاده شد و از خطای مطلق<sup>۲</sup> و ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>۳</sup> برای ارزیابی صحت روش‌های مختلف بهره‌برده شده است. نتایج نشان داد که روش کریجینگ ساده بهترین می‌باشد. در ایران در سال‌های نخستین، فرونشست بر اساس مشاهدات محلی و بریدگی لوله‌های جدار چاه گزارش می‌شده است. اولین بررسی‌های علمی فرونشست در دشت رفسنجان صورت گرفته که میزان فرونشست شدیدی داشته است. پس از آن در سایر دشت‌های ایران نظیر اردبیل، هشتگرد، تهران، اسلام شهر، یزد، اردکان، کاشمر، مشهد و... نیز مطالعات بررسی پدیده فرونشست انجام شده است. صفاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۶؛ منافی آذر و همکاران، ۱۳۹۷؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ نورانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ طاهری و همکاران، ۱۳۹۷؛ سعیدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کوهبانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمد خان و همکاران، ۱۳۹۸؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۸؛ عرب و همکاران، ۱۳۹۸؛ شفیع‌ی و همکاران، ۱۳۹۹؛ دهقانی و همکاران، ۲۰۱۴؛ قهرودی و همکاران، ۱۴۰۰). مهشادینیا (۱۳۸۴) به بررسی فرونشست در برخی از دشت‌های کشور از جمله در استان‌های تهران، خراسان رضوی، خراسان شمالی، قزوین، کرمان و... پرداخته است. او با بررسی رخدادهای فرونشست

رو به پایین سطح زمین بدون محدودیت در سرعت، بزرگی یا ناحیه وقوع پدیده است که با بردار اندک افقی نیز همراه است. فرونشست و شکاف‌های زمین به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابند و به همین علت تأثیر آن مانند خطرهای ناگهانی و فاجعه بار سیل و زلزله به چشم نمی‌آید در صورتی که معمولاً خسارت‌های ناشی از فرونشست و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و بسیار مخرب می‌باشند. (Becker et al., 2006).

فرونشست همان اصطلاح تراکم<sup>۱</sup> است که توسط زمین‌شناسان برای نشان دادن کاهش ضخامت رسوبات به دلیل افزایش تنش مؤثر عمودی استفاده می‌شود. از علل فرونشست زمین می‌توان به عواملی چون برداشت بی‌رویه و نامناسب از آب‌های زیرزمینی، نحوه پمپاژ، هدایت هیدرولیکی لایه‌ها، بارندگی، دما، ضخامت و جنس لایه‌های آبخوان، نوع سازند آبخوان، تغییر کاربری زمین، احداث، بهره‌برداری و یا بارگذاری سازه‌های مهندسی و زهکشی خاک‌های آلی، زلزله، زمین لغزش و احداث معدن اشاره نمود. همچنین شرایطی همچون فرآیندهای زمین‌ساختی رخ داده در منطقه، وجود عوارض توپوگرافی، نفوذ جریان آب و وجود لایه‌های نامقاوم در تشکیلات رسوبی زیرین از دیگر عوامل توسعه پدیده‌های فرونشستی هستند (Lien et al., 2008).

از این میان عمده‌ترین علت نشست زمین ناشی از برداشت زیاد آب‌های زیرزمینی بر اثر تحکیم رسوبات در اثر افزایش تنش مؤثر می‌باشد برای اندازه‌گیری فرونشست زمین روش‌های مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک مانند سیستم موقعیت یابی جهانی (GPS)، تراز یابی<sup>۲</sup>، توتال استیشن، لیزر اسکن و استفاده از عکس‌های هوایی و داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد. روش تراز یابی دقیق‌ترین و قدیمی‌ترین روش است که به علت محدودیت در اندازه‌گیری، پرهزینه بودن و ارائه داده‌های نقطه‌ای قابلیت تعیین الگو و وسعت فرونشست را دارا نیست (Gong et al., 2014).

استفاده از داده‌های ماهواره‌های راداری به علت وسعت سریع، قیمت ارزان، دقت مناسب و امکان بررسی به صورت سری زمانی امروزه توسط محققان پیشنهاد می‌گردد. تداخل سنجی راداری تفاضلی D-InSAR یک روش رایج و جدید غیر ژئودتیک برای محاسبه تغییر شکل پوسته زمین با استفاده از اطلاعات ماهواره‌های راداری می‌باشد. پوشش سراسری، قدرت تفکیک مکانی خوب، دقت قابل قبول، قیمت مناسب، نداشتن نیاز به کار می‌دانی، امکان دسترسی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی و پوشش وسیع از مزایای این روش است. از قابلیت‌های تداخل سنجی راداری شناسایی پدیده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی است. (vldb. gsi. go. jp). در این روش سه تصویر (دو

2- Tension Spline Interpolation

3- Absolute Error

4- Coefficient of Determination

1- Compaction

هستند. این رودخانه‌ها در ورودی دشت از روی مخروط افکنه‌های درشت دانه عبور می‌نمایند و وارد ناحیه مرکزی و انتهایی دشت با مواد دانه ریز سیلتی و رسی می‌شوند. در ناحیه درشت دانه مخروط افکنه‌ای، آبخوان از نوع آزاد است و با حرکت به سمت مرکز و خروجی دشت به صورت تدریجی به آبخوان‌های آزاد و تحت فشار تبدیل می‌گردد که به هم مرتبط هستند. در شمال دشت قزوین، از آبیگ به سمت غرب، وجود رودخانه‌های بزرگ و کوچک مانند زیاران سبب ایجاد مخروط افکنه‌های زیادی شده‌اند که در ابتدا درشت دانه با شیب تقریباً زیاد هستند و به باتلاق مرکزی در سمت جنوب منتهی می‌شوند. فاصله مخروط افکنه‌ها از دامنه تا باتلاق کمتر از ۱۰ کیلومتر است و سبب می‌شود آب‌های نفوذی در مخروط افکنه، باتلاق حاشیه دشت را خیلی سریع تحت تأثیر قرار دهند. آبخوان قزوین به صورت کاسه‌ای می‌باشد و آب‌های سطحی و زیرزمینی از غرب به شرق و شمال به جنوب حرکت می‌کنند و از قسمت شرقی که یک معبر نمکی است به سمت کویر قم خارج می‌شوند. در قسمت جنوبی آبخوان قزوین یک دریاچه باتلاقی و تبخیری وجود دارد که آورد رودخانه‌های ابهررود، خررود و حاجی‌عرب در آن می‌ریزد و رودخانه شور نیز از سرریز این دریاچه باتلاقی به وجود آمده است.

برای انجام این پژوهش از داده‌های کاربری اراضی<sup>۱</sup>، زمین شناسی<sup>۲</sup>، پارامترهای هیدرودینامیکی سفره، لایه بندی خاک، ارتفاع<sup>۳</sup> منطقه و داده‌ی طولانی مدت تغییرات سطح ایستایی<sup>۴</sup> استفاده شده است. این اطلاعات از سازمان‌های مربوطه آب منطقه‌ای، آب و فاضلاب، سازمان جهادکشاورزی استان قزوین جمع‌آوری شده است. اطلاعات چاه‌های استان قزوین از سایت شرکت مدیریت منابع آب دریافت گردید. که شامل داده‌های کمی ۲۵۰ چاه در دوره زمانی ۵۵ سال آبخوان قزوین (۱۳۴۳-۱۳۹۷) بوده است. این داده‌ها شامل مختصات جغرافیایی چاه‌ها، تراز و عمق سطح ایستایی و زمان قرائت آن می‌باشد. همچنین گزارش بیلان قزوین ۱۳۸۴، گزارش هیدروژئولوژی و بیلان چاه‌های استان قزوین ۱۳۸۹ و گزارش خاکشناسی استان برای دستیابی به سایر داده‌های مورد نیاز مورد استفاده قرار گرفت. همچنین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان شامل ضریب ذخیره و ضریب قابلیت انتقال از گزارش‌های مطالعات پایه قزوین از شرکت مدیریت منابع آب مستخرج شده است. داده‌های DEM نیز از مدل ارتفاعی دیجیتال ۹۰ متری SRTM<sup>۵</sup> استفاده شده است که با ثبت نام در سایت USGS قابل دانلود است. برای نرم افزار SARscape فرمت hgt داده DEM مورد نیاز است که از سایت

زمین در ایران بیان کرد که اکثر موارد در اثر افت شدید سطح ایستایی ناشی از برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی بوده‌اند (مهشاد نیا، ۱۳۸۴). نتایج نشان داد که بافت خاک ریزدانه با میزان فرونشست ارتباط دارد. مقیمی و همکاران (۱۴۰۰) پدیده فرونشست زمین در محدوده دشت ارومیه (غرب دریاچه ارومیه) را بررسی نمودند. در محدوده مطالعاتی از ۵۳ حلقه چاه مشاهده‌ای برای بررسی تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی استفاده شد و در حواشی تعدادی از پیژومترها به علت پدیده فرونشست، لوله‌زایی در ملحقات چاه‌ها مشاهده شده است. بیشترین فرونشست در دانه بندی رسوبات دانه ریز دیده شده است. در استان قزوین به علت کشاورزی، سطح آب زیرزمینی به صورت چشم‌گیر و مداوم افت داشته است. همچنین گزارش‌های از پدیده لوله‌زایی در اطراف چاه‌ها و ترک خاک به صورت می‌دانی در سطح استان به ویژه جنوب ارائه شده است، از این رو بررسی بیشتر پدیده فرونشست در سطح استان قزوین لازم می‌باشد (gsa.ir). میرهاشمی و همکاران (۱۳۹۷) تغییرات عمق آبخوان در محدوده شبکه قزوین را طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ بررسی نمودند و افت سالانه ۱/۵ متر در دشت قزوین را گزارش نمودند. آن‌ها عمده دلیل افت سطح ایستایی را کاهش بارندگی، کاهش آب‌های سطحی و برداشت از چاه‌های کشاورزی بیان نمودند. بابایی و همکاران با استفاده از داده‌های ماهواره Envisat و Sentinel به ارزیابی فرونشست دشت قزوین با روش سری زمانی و PS در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ پرداخته و میانگین فرونشست در دشت قزوین را ۴۰ میلی‌متر در سال گزارش نموده‌اند (Babaee et al. 2020). با توجه به بررسی مطالعات انجام شده در منطقه، کمبود بررسی فرونشست زمین در دشت قزوین به همراه عوامل تأثیرپذیر و تأثیرگذار بر این پدیده دیده می‌شود. بنابراین هدف از این پژوهش، استفاده از داده‌های سنجنش از دور برای واسنجی مدل GMS و استفاده از این مدل برای بررسی اثر فرونشست بر میزان آب برگشتی است.

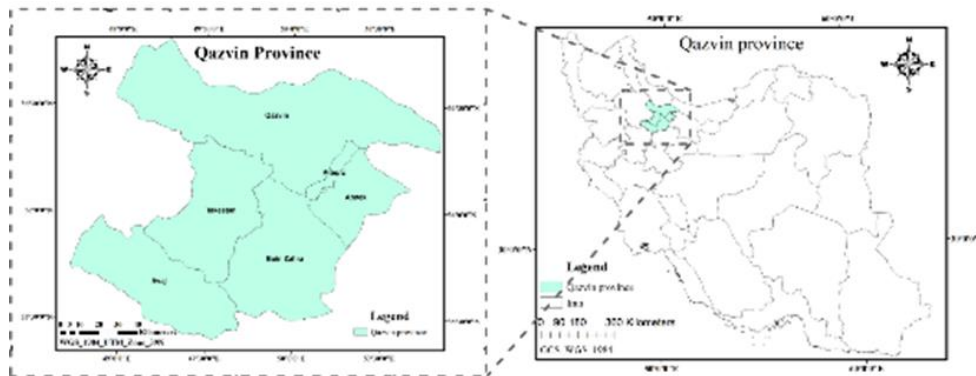
## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

استان قزوین به عنوان دشتی که قدمت ۱۴۰۰ ساله در کشاورزی دارد و قطب کشاورزی است و از دیرباز دارای شبکه آبیاری و ابزارهای مدیریت آب و اندازه‌گیری بوده است. دشت قزوین بر اثر یک رویدادهای تکنونیک بوجود آمده است و حالت گرانبسی دارد و توسط مواد حمل شده از ارتفاعات مجاور بوسیله آب‌های جاری پر شده است. وجود رودخانه‌های بزرگ و کوچک در این منطقه و نحوه رسوبگذاری آن‌ها سبب موقعیت بسیار خوبی سفره آب زیرزمینی شده است و مهم‌ترین منبع تغذیه آبخوان قزوین رودخانه‌های دائمی و فصلی

- 1- Land use
- 2- Geology
- 3- Elevation
- 4- Water Table
- 5- Shuttle Radar Topographic Mission

شده است. استان قزوین از شمال به سلسله جبال البرز محدود می‌شود و در مختصات ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی استان قزوین و آبخوان اصلی آن در **Error! Reference source not found.** و ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان قزوین

سری زمانی فرونشست اخذ شده از سنجش از دور بر اساس مطالعه جانباز فوتمی و همکاران (۱۳۹۹) میزان فرونشست دشت قزوین در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ به دست آمده است. شکل (۱) نمونه‌ای از نقشه‌های فرونشست تولید شده در سطح استان قزوین می‌باشد.

با توجه به شکل ۲، فرونشست قابل توجه‌ای در استان قزوین مشاهده شده است. به صورت مکانی بیشترین مقادیر فرونشست در قسمت جنوب استان، شهرستان آبیک، تاکستان و بوین زهرا مشاهده شده است. از نظر زمانی بیشترین نرخ فرونشست مربوط به سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ بوده و در منطقه بوین زهرا رخ داده است. سری زمانی فرونشست به صورت میانگین و بیشینه به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۳، به صورت متوسط سالانه ۲- سانتی‌متر فرونشست از سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در دشت قزوین وجود داشته است. میانگین مقادیر فرونشست سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در شکل (۵) نمایش داده شده است.

مدل‌سازی فرونشست دشت قزوین شبیه‌سازی فرونشست آبخوان از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷ توسط مدل GIS انجام شد.

#### واسنجی و صحت‌سنجی مدل فرونشست دشت قزوین

برای واسنجی از اطلاعات سه دوره سنجش از دور ۲۰۱۶-۲۰۱۵،

<http://www.viewfinderpanoramas.org/Coverage%20map%20viewfinderpanoramas.org3.htm> دریافت شده است. در نهایت برای صحت‌سنجی محاسبات فرونشست، داده‌های ترازبایی استان قزوین از سازمان نقشه برداری کشور دریافت گردید. برای محاسبه فرونشست از تصاویر Sentinel استفاده شده است که از سایت سازمان فضایی اروپا (ESA) با آدرس <https://search.asf.alaska.edu> دریافت شد. اطلاعات مداری تصاویر سنتینل از سایت <https://step.esa.int/auxdata/orbits/Sentinel-1> دریافت

GMS<sup>۱</sup> یکی از مدل‌های کاربردی شبیه‌سازی جریان در آبخوان‌هاست که بر پایه‌ی کد MODFLOW به منزله‌ی یک مدل تفاضل محدود سه‌بعدی برای تشریح و پیش‌بینی رفتار جریان در منابع آب زیرزمینی به کار می‌رود. با توجه به مطالعات اخیر انجام شده و همچنین هدف انجام این تحقیق مبنی بر شبیه‌سازی فرونشست و وجود بسته فرونشست در نرم‌افزار GMS<sup>۲</sup> برای مدل‌سازی آبخوان دشت قزوین از مدل MODFLOW ۲۰۰۰ موجود در نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS استفاده شد. در بسته محاسباتی فرونشست که تحت عنوان Subcidence در نرم‌افزار رابط گرافیکی GMS شناخته می‌شود، به عنوان پس پردازش بر خروجی مدل آب زیرزمینی، مقدار عددی تغییرات سازند آبخوان بر حسب واحد طول، از طریق رقوم تجمعی ۷۰ در هر دوره زمانی بدست داده می‌شود. این مقدار در یک رابطه مستقیم با افت جریان آب زیرزمینی در مناطقی که با عدد منفی تعیین می‌شود نشان دهنده نشست زمین می‌باشد (رجبی خمسه و همکاران، ۱۳۹۹).

#### نتایج و بحث

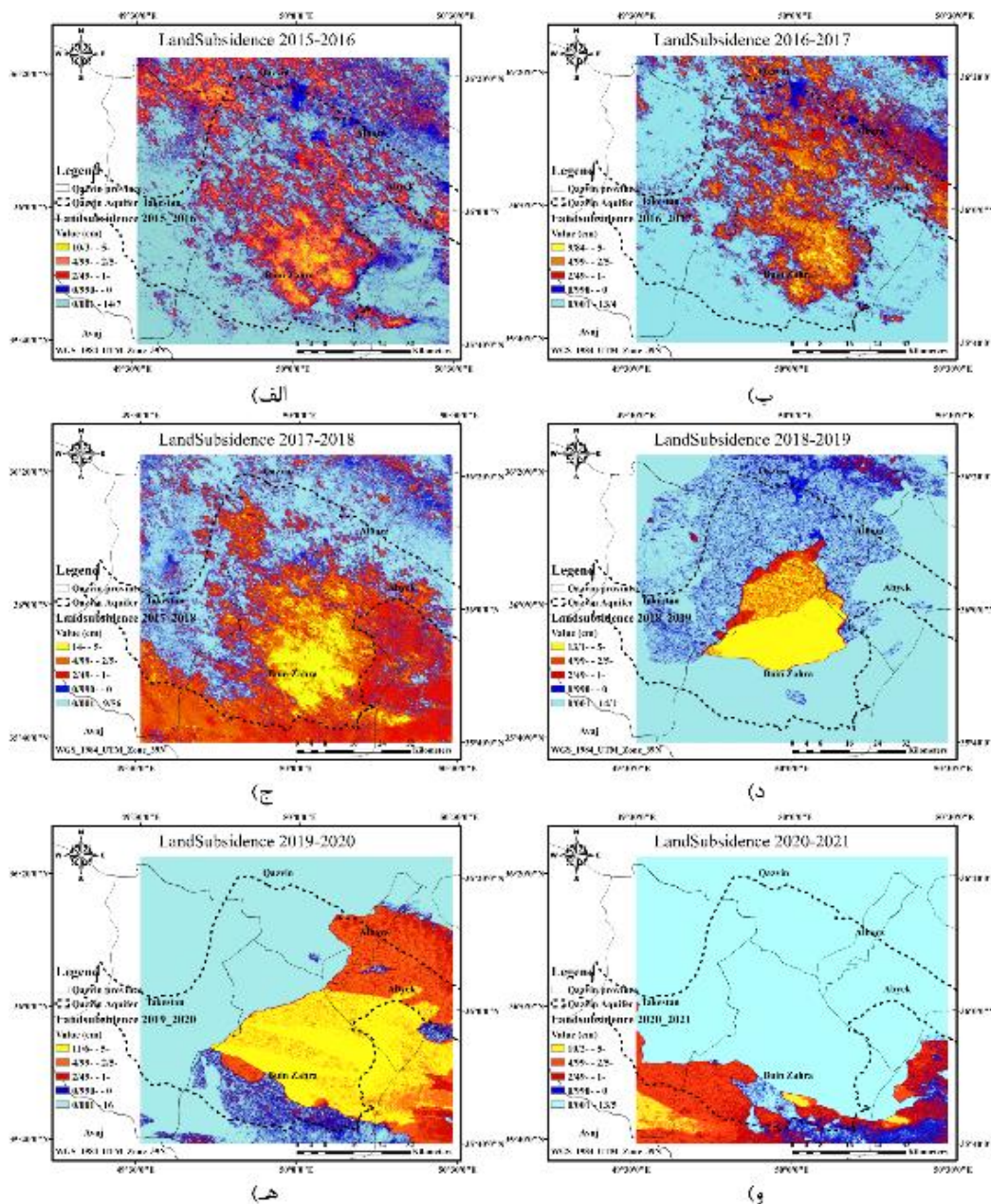
1- Groundwater Modeling System

2-

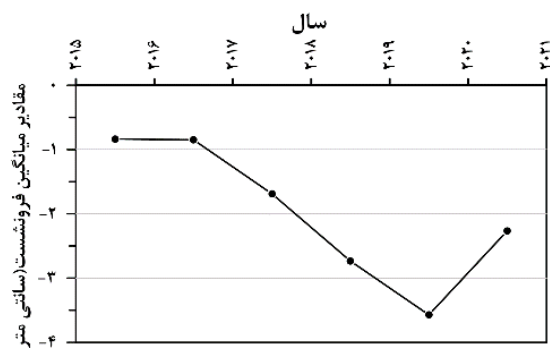
<https://downloads.aquaveo.com/f.php?s=gms&v=۱۰.۷&p=full۴bit>

مدل سازی شده نیز انجام شد و نتایج با هم مقایسه گردید. نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل فرونشست نسبت به تصاویر اخذ شده از سنجنش از دور در جدول (۱) ارائه شده است.

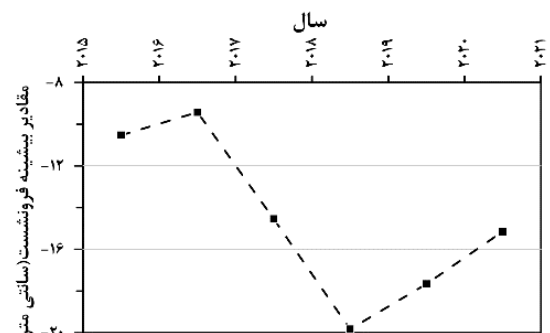
دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و ۲۰۱۸-۲۰۱۷ استفاده شد و برای صحت سنجی از دو دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۲۰۲۱-۲۰۲۰ استفاده شد. برای محاسبه شاخص های آماری تصاویر اخذ شده از سنجنش از دور در محیط Arcmap کلاسه بندی شد. کلاسه بندی مشابه برای آبخوان



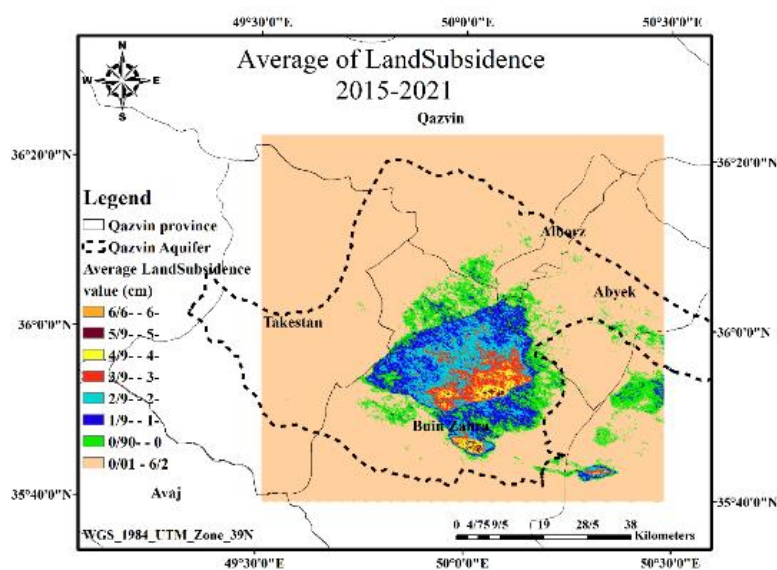
شکل ۲- نقشه فرونشست (الف) ۲۰۱۶-۲۰۱۷، (ب) ۲۰۱۷-۲۰۱۶، (ج) ۲۰۱۸-۲۰۱۷، (د) ۲۰۱۹-۲۰۱۸، (ه) ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و (و) ۲۰۲۱-۲۰۲۰



شکل ۳- سری زمانی میانگین فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱



شکل ۴- سری زمانی بیشینه فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱



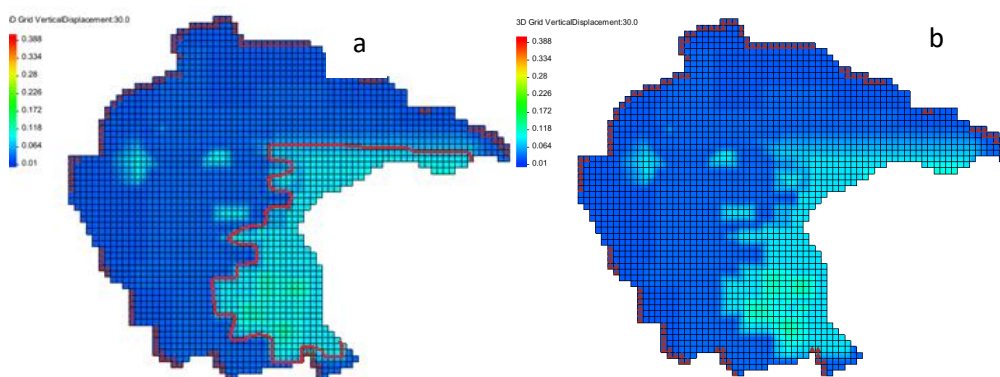
شکل ۵- کلاسه بندی میانگین فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱

جدول ۱- وضعیت شاخص های آماری مدل فرونشست

Property	مقادیر مرحله واسنجی	مقادیر مرحله صحت سنجی
Relative Bias	۰/۰۳۸	۰/۰۵۳
Mean Absolue Residual (m)	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۶۵
Root Mean Squared Residual (m)	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۷۲

### نقشه فرونشست شبیه‌سازی شده دشت قزوین

شکل (۶) نقشه فرونشست شبیه‌سازی شده دشت قزوین را با استفاده از بسته SUB در سال ۱۳۹۷ نشان می‌دهد. قسمت مشخص شده با خط قرمز در شکل (۶-b) منطقه بیشینه فرونشست آبخوان را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نقشه شبیه‌سازی شده فرونشست دشت قزوین در سال ۱۳۹۷

### وضعیت فرونشست، سطح آب زیرزمینی و میزان آب برگشتی در محدوده آبخوان

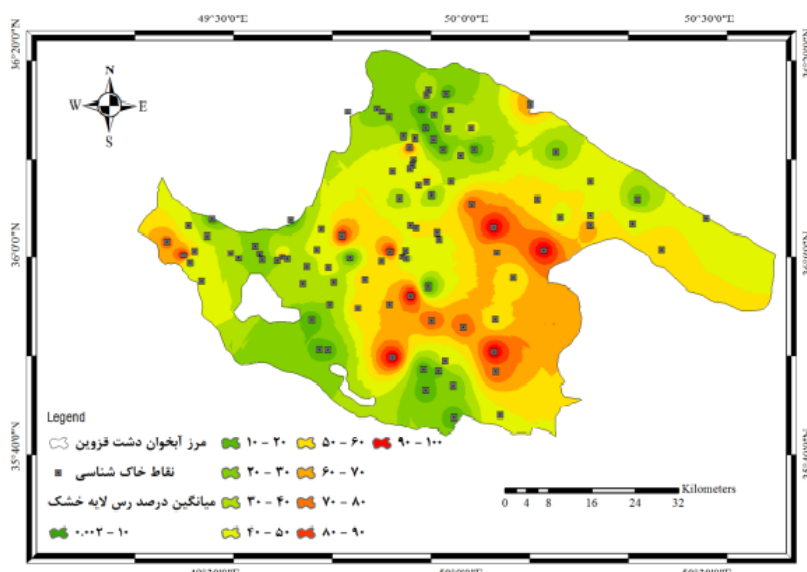
شبیه‌سازی آبخوان در دوره پایه از سال ۱۳۸۲ تا سال ۱۳۹۷ انجام شد. شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی فرونشست را در مقایسه با میزان آب برگشتی به آبخوان نشان می‌دهد. میزان فرونشست رخ داده در دوره پایه به‌طور متوسط سالانه ۲/۸ سانتیمتر و در محدوده بیشینه فرونشست ۵/۲ سانتیمتر می‌باشد.

### پیش‌بینی فرونشست زمین

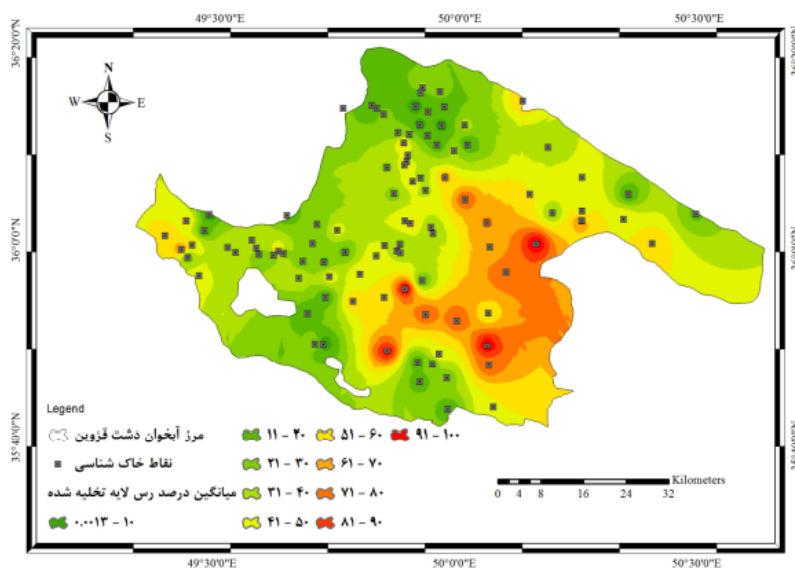
در شکل (۱۰) نقشه فرونشست دشت قزوین تحت سناریوی حفظ وضعیت موجود سیستم‌های آبیاری، نشان داده شده است. در سناریوی حفظ وضعیت موجود سیستم‌های آبیاری نیز که وضعیت موجود سیستم‌های آبیاری ثابت فرض شده، تغییر سیستم‌های آبیاری بدون تغییر در میزان آب برداشتی از آبخوان و با تغییر در میزان تغذیه صورت گرفته، در میزان فرونشست رخ داده تأثیرگذار می‌باشد. هر چه میزان تغذیه بیشتر باشد، میزان فرونشست رخ داده کمتر می‌باشد. میزان آب برگشتی به آبخوان با فرض دانستن میزان آب برگشتی سناریوی اول (۲۶ درصد بر اساس گزارش‌های بیلان) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی بسته فرونشست، ۰/۰۵۲ متر و خطای نسبی ۰/۰۳۸ بدست آمد. این مقادیر حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. شاخص‌های آماری در مرحله صحت‌سنجی نیز حکایت از صحت مدل دارد. با توجه اطلاعات اخذ شده از سنجش از دور، بیشترین مقادیر فرونشست در قسمت جنوب استان، شهرستان آبیگ، تاکستان و بویین زهرا مشاهده شده است. این روند با نقشه‌های بدست آمده از مدل نیز انطباق دارد (شکل (۶)).

بر اساس شکل فوق در قسمت‌های شرقی و خروجی آبخوان در شهرستان‌های بویین زهرا و آبیگ و همچنین در قسمت‌هایی از تاکستان میزان فرونشست رخ داده بیشتر از مابقی نقاط است. در شکل (۷) در ناحیه غیراشباع نشان می‌دهد درصد متوسط رس نواحی شرقی، جنوب شرقی و مرکزی دشت دارای بیشترین مقدار و در قسمت‌های غربی، شمال غربی و جنوبی دارای کمترین مقدار می‌باشند. در شکل (۸) در ناحیه تخلیه شده آب آبخوان، نواحی شرقی، جنوب شرقی و مرکزی دشت دارای بیشترین درصد متوسط رس و نواحی غربی، شمال غربی و جنوبی دارای کمترین درصد متوسط رس می‌باشند. با مقایسه نقشه پهنه‌بندی درصد رس نواحی غیراشباع و تخلیه شده آب آبخوان با نقشه پهنه‌بندی فرونشست، مشاهده می‌شود در نواحی که درصد رس بالاتری وجود دارد، فرونشست بیشتری نیز رخ داده است. نقشه‌های آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی بدست آمده از مدل، نشان می‌دهند در قسمت‌های خروجی آبخوان در شهرستان‌های آبیگ و بویین‌زهرا این پارامترها دارای مقادیر کمتری نسبت به قسمت‌های ورودی آبخوان هستند. با مقایسه نقشه پهنه‌بندی فرونشست مشاهده می‌شود در مناطقی که دارای آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی کمتری هستند فرونشست بیشتری اتفاق افتاده است.



شکل ۷- توزیع مکانی درصد متوسط رس ناحیه غیراشباع دشت قزوین



شکل ۸- توزیع مکانی درصد متوسط رس ناحیه تخلیه شده دشت قزوین

وجود مطالعات و گزارش‌ها بسیار زیادی که در خصوص ویژگی‌های منطقه و آبخوان، منطقه مناسبی برای مدلسازی و بررسی اثر فرونشست و آب برگشتی به آبخوان است. به دلیل پیچیده بودن این موضوع، عدم استفاده از مدل‌های کامپیوتری برای پیش‌بینی آب برگشتی به آبخوان با فرونشست یا بدون فرونشست تقریباً غیرممکن است. بنابراین در این مطالعه بررسی میزان آب برگشتی در شرایط فرونشست در آبخوان قزوین با استفاده از مدل GMS صورت گرفت. تأثیر میزان فرونشست بر آب برگشتی در دوره پایه طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷ نشان می‌دهد چنانچه آبخوان بدون فرونشست در نظر

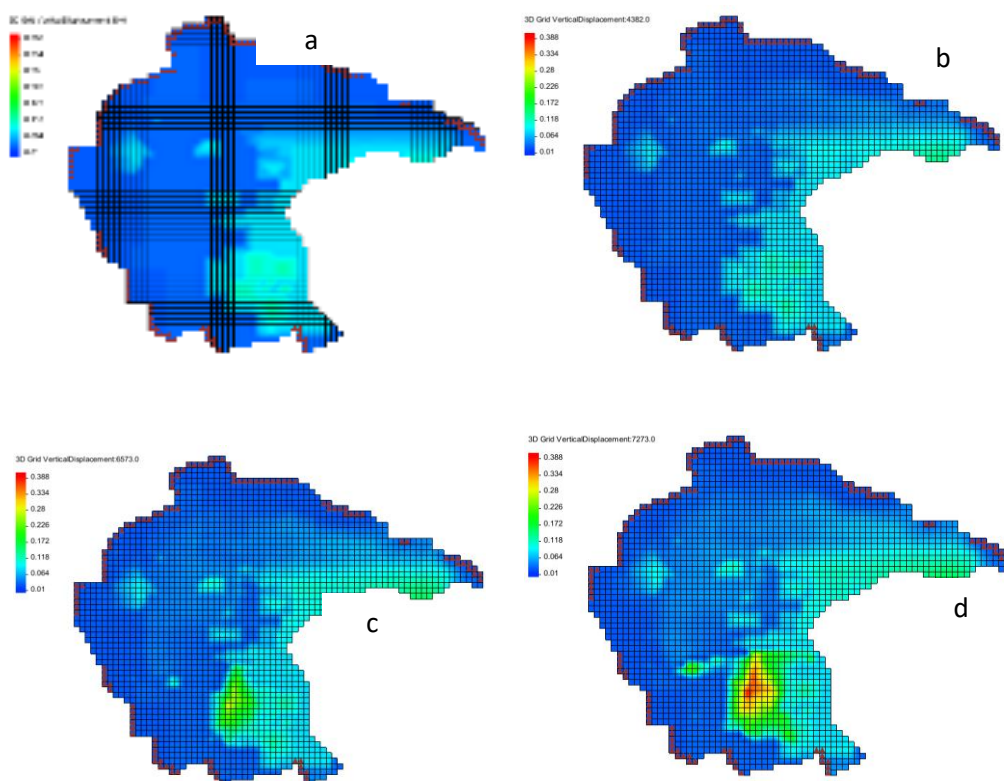
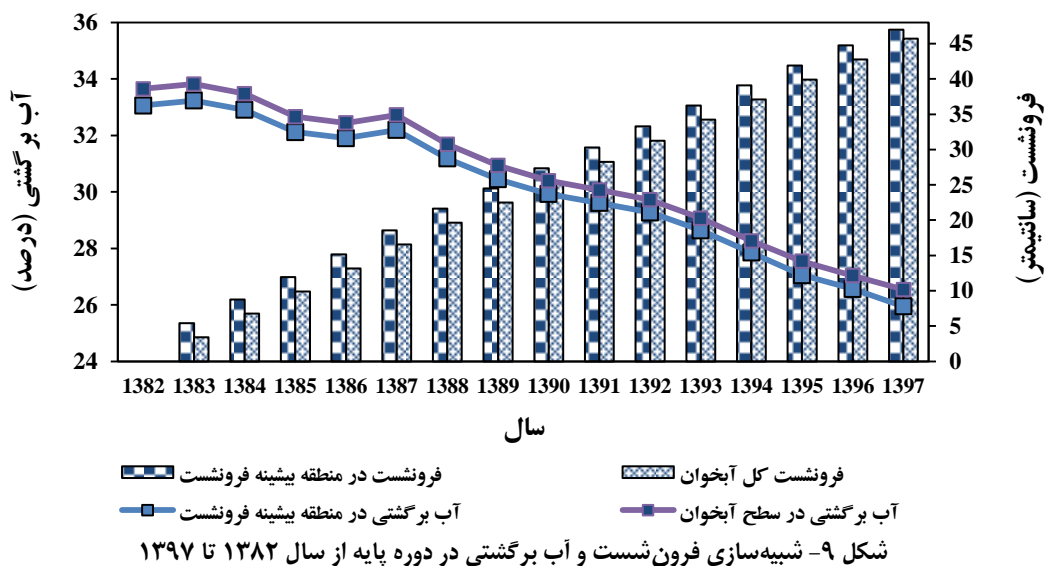
با مقایسه میزان آب برگشتی در منطقه بیشینه فرونشست نسبت به کل آبخوان، مشاهده می‌شود که میزان آب برگشتی در سناریوی اول در این منطقه ۹/۲ درصد کمتر از کل آبخوان است.

### نتیجه‌گیری

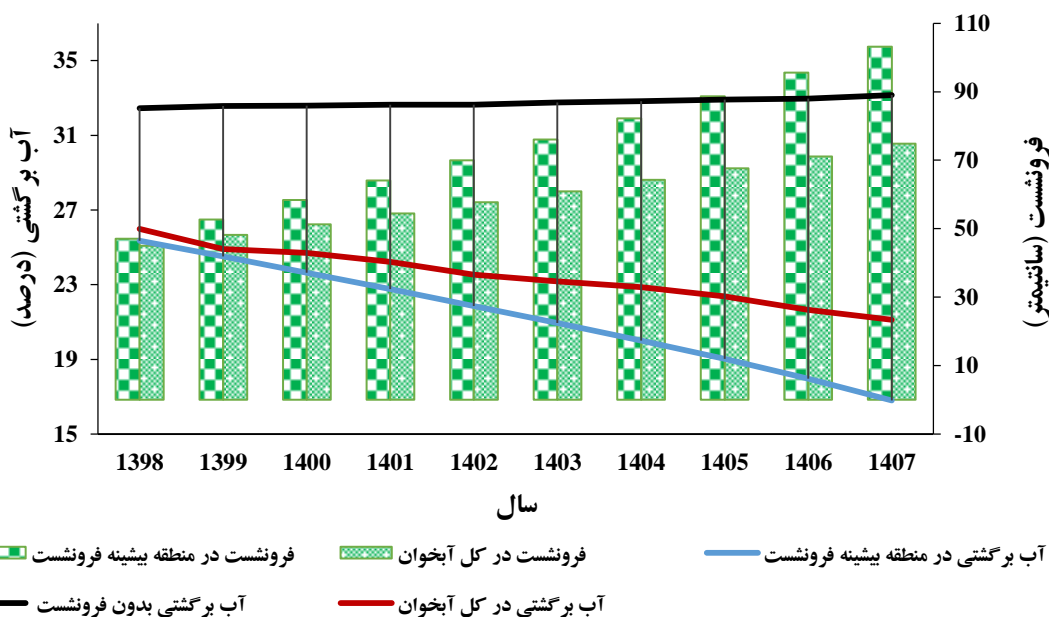
مطالعات فرونشست و آب برگشتی با توجه به نیاز به اطلاعات و داده‌های نیاز و دقیق بسیار پیچیده، زمان‌بر و هزینه‌بر خواهد است. آبخوان دشت قزوین با توجه به اهمیت و سابقه طولانی و همچنین

فرونشست به دلیل تحکیم لایه‌های مختلف و تغییر در ضرایب هیدرودینامیک آبخوان باعث کاهش میزان آب برگشتی به آبخوان خواهد شد. کاهش برداشت از آب زیرزمینی به هر نحوی مانند تغییر در سیستم‌های آبیاری یا کاهش سطح زیرکشت می‌تواند نقش مهمی در کاهش فرونشست داشته باشد.

گرفته شود، میزان آب برگشتی به‌طور متوسط ۲/۸ درصد بیشتر از حالتی است که آبخوان با فرونشست مواجه است. این میزان در منطقه بیشینه فرونشست، ۳/۴ درصد است. میزان تأثیر فرونشست در این بازه زمانی در کل آبخوان بر میزان آب برگشتی به‌طور متوسط ۸/۶ درصد و در منطقه بیشینه فرونشست، ۱۰/۱۴ درصد بوده است.



شکل ۱۰- پیش‌بینی فرونشست تحت سناریوی حفظ وضعیت موجود سیستم‌های آبیاری در a- سال ۱۳۹۸ b- سال ۱۴۰۲ c- سال



شکل ۱۱- مقایسه میزان آب برگشتی در سناریوی حفظ وضعیت موجود سیستم‌های آبیاری (SC1)

کوپال، مجله پژوهش نفت. ۲۸(۱۰۱): ۴-۱۶.

## منابع

سعیدی، ح.، لشکری پور، غ. و غفوری، م. ۱۳۹۸. ارزیابی درز و شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت کاشمر-بردسکن در شمال شرق ایران. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۹(۳۵): ۷۴-۸۸.

احمدی، ن.، موسوی، ز. و معصومی، ز. ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. فصلنامه سنجش از دور و GIS ایران. ۱۰(۳): ۳۳-۵۲.

سودمند، ا. ر. و احمدی، س. ۱۳۹۹. پایش فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیر زمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به روش پراکنش‌گرهای دائمی (مطالعه موردی: شهرستان اسداباد و دشت‌های مجاور). مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. ۱۸(۱): ۷۹-۹۹.

انگورانی، س.، معماریان، ح.، شریعت پناهی، م. و بلورچی، م. ج. ۱۳۹۴. مدل‌سازی پویای فرونشست دشت تهران. علوم زمین. ۲۵(۹۷): ۲۲۰-۲۱۱.

شادفر، ص.، نصیری، ا.، چیتگر، س. و احمدی، ع. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ناحیه مورد مطالعه (شهر بوئین زهرا). نشریه جغرافیائی سرزمین. ۱۲(۴۸): ۱۰۱-۱۱۶.

آمیغ پی، م.، عربی، س. و طالبی، ع. ۱۳۸۹. بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و ترازبندی دقیق. علوم زمین. ۲۰(۷۷): ۱۵۷-۱۶۴.

شریفی کیا، م. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR-D) در دشت نوق - بهرمان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۱۶(۳): ۵۵-۷۷.

حقیقت مهر، پ.، ولدان زوج، م. ج.، تاجیک، ر.، جباری، س.، صاحبی، م. ر.، اسلامی، ر.، گنجیان، م. و دهقانی، م. ۱۳۹۱. تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت یابی جهانی. علوم زمین. ۲۲(۸۵): ۱۱۴-۱۰۵.

شفیعی، ن.، گلی مختاری، ل.، امیراحمدی، . و زندی، ر. ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۸(۴):

طاحونی، ش.، مکانیک خاک، انتشارات کتاب شریف، ۳۲۴ ص.

رضاطاهری، س. پ. ع. و شاد، س. ۱۳۹۷. مطالعه و بررسی توزیع زمانی و مکانی فرونشست زمین در فرآیند برداشت از میدان نفتی

- Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas, (1): 1-5. <https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370>. ۹۳-۱۱۱.
- شمشکی، ا.، بلورچی، م. ج. و انتظام سلطانی، ا. ۱۳۸۴. فرونشست زمین در دشت تهران عوامل مؤثر در شکل گیری آن. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، تهران.
- Arjmandzadeh, R., Sharifi Teshnizi, E., Rastegarnia, A. et al. 2020. GIS-based landslide susceptibility mapping in Qazvin province of Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 44: 619-647. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00326-3>.
- صالحی متعهد، ف.، حافظی مقدس، ن.، لشکری پور، غ. و دهقانی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. *مجله زمین شناسی مهندسی*. ۱۳(۳): ۴۳۵-۴۶۲.
- Ashrafianfar, N., Busch, W., Dehghani, M. and Haghghatmehr, P. 2010. Differential SAR interferometric technique for land subsidence monitoring due to ground water exploitation in the Hasthgerd. *Proc. 'Fringe 2009 Workshop'*, Frascati, Italy, 30 November -4 December 2009, ESA SP-677, March 2010.
- صفاری، ا.، جعفری، ف. و توکلی صبور، س. م. ۱۳۹۵. پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج- شهریار. *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*. ۹۳-۸۲: (۲)۵.
- Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R. and Garfias, J. 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advanced in Water Resources*. 34:83 -97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>.
- طاهری زنگی، ص. و واعظی هیر، ع. ۱۳۹۹. پتانسیل فرونشست دشت شازند ناشی از افت آب زیرزمینی با مدل وزن دهی و آنالیز صحت سنجی آن با استفاده از تداخل سنجی راداری. *مجله اکوهیدرولوژی*. ۱۷(۱): ۱۸۳-۱۹۴.
- Calderhead, R. I., Therrien, A., Rivera, R. and Martel, J. G. 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico, *Advances in Water Resources*. 34(1): 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>.
- Akbari, A. H., Momenim, A. and Khorasani, E. 2019. Assessment of land subsidence of the Semnan plain due to groundwater extraction. *New findings in applied geology*. 13(26):98-110.
- Wu, J. C., Shi, X. Q., Ye, S. J. et al. 2009. Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation in Su-Xi-Chang area, China, *Environmental Geology*. 57: 1409-1421.
- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A and Walter, T. R. 2008. InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. 2008 Second Workshop on Use of

## Studying the Effect of Land Subsidence on the Amount of Water Returned to the Qazvin Aquifer

M. Jenab<sup>1</sup>, H. Ramezani Etedali<sup>2</sup>, KH. Omid<sup>3\*</sup>

Received: Mar.07, 2025

Accepted: Apr.01, 2025

### Abstract

A sharp drop in the water table causes consolidation and subsidence, causing irreparable human, environmental and financial losses. The drop in the water table and the characteristics of the aquifer have a direct impact on the rate of subsidence, and on the other hand, the occurrence of subsidence will cause changes in the hydrodynamic parameters of the aquifer, resulting in a decrease in aquifer recharge. Preventing over-abstraction of wells, blocking unauthorized wells, reducing groundwater withdrawal, changing the crop pattern, using low-water-consuming crops, switching to greenhouse crops, reducing the area under agricultural cultivation, and artificial recharge of the aquifer can be effective in aquifer management. The root mean square error in the calibration stage of the subsidence package was 0.0052 m and in the validation stage it was 0.0072. These values indicate the appropriate accuracy of the model in the simulation. Based on the simulation of the subsidence of the Qazvin plain, the subsidence rate in the eastern parts and the outlet of the aquifer in the cities of Buin Zahra and Abik, as well as in parts of Takestan, is higher than in the rest of the places. In the mentioned areas, the aquifer has a higher percentage of clay than in the rest of the places. On the other hand, in parts of the aquifer where the specific water yield and hydraulic conductivity are lower, the subsidence rate has been higher. With increasing subsidence, the amount of water returned to the aquifer decreases. Studies show that the effect of returned water on subsidence varies from 16.7 percent to 84.5 percent in different scenarios in the entire aquifer and from 18.8 percent to 90.4 percent in the maximum subsidence area.

**Keywords:** Subsidence, Groundwater Modeling, Rebound Water, Qazvin Plain

---

1- PhD in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Professor of water sciences and engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Master's student in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(\*- Corresponding Author Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)