



# ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان هومند -آبسرد با استفاده از روشهای سنجش از دور و ارتباط آن با برداشت آبهای زیرزمینی

الهام فیجانی <sup>1</sup>\*، پرستو زارعی <sup>۲</sup>

۱ – دانشیار دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب زمین شناسی، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: <u>Efijani@ut.ac.ir</u>

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

#### چکیدہ

در این تحقیق فرونشست دشت هومند-آبسرد و عوامل مؤثر بر آن بررسی شده است. برای اندازه گیری میزان فرونشست دشت هومند-آبسرد از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۴–۲۰۱۹ استفاده گردید. جهت تفسیر و پردازش تصاویر ماهوارهای از تکنیک DinSAR در پکیج LiCSBAS که یک پکیج پردازش تصاویر و قابل اجرا در نرم افزار پایتون میباشد، استفاده گردید. نرخ فرونشست بدست آمده برای آبخوان مورد نظر از حداقل صفر تا ۱۱ میلیمتر در سال متغیر میباشد. در ادامه جهت بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست و تعیین پتانسیل فرونشست آبخوان اقدام به ساخت لایههای اطلاعاتی در نرم افزار SGIS گردید. با بررسی موامل مؤثر بر فرونشست و تعیین پتانسیل فرونشست آبخوان اقدام به ساخت لایههای اطلاعاتی در نرم افزار GIS گردید. با ترجوان، افت تجمعی سطح آب زیرزمینی، تخلخل، ضریب فشردگی آبخوان، ضخامت آبخوان، فاصله از رودخانه، ضخامت منطقه وادوز، آبخوان، افت تجمعی سطح آب زیرزمینی، تخلخل، ضریب فشردگی آبخوان، ضخامت آبخوان، فاصله از رودخانه، ضخامت منطقه وادوز، کاربری اراضی و تغییرات تنش مؤثر در محیط GIS به صورت رستر تهیه و وزن دهی گردیدند. سپس تلفیق لایهها با وزنهای تعیین مهده به روش همپوشانی وزنی انجام شد و شاخص پتانسیل فرونشست به صورت یک نقشه تهیه گردید. جهت صحت سنجی نقشه به دست آمده، میزان فرونشست اندازه گیری شده به روش DinSAR و پتانسیل فرونشست در محل پیزومترها مقایسه گردید و همبستگی بالایی (9.11) مین دو نقشه به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در بخشهای مرکزی همبستگی برداشت و افت آب زیرزمینی را دارد و کمترین میزان فرونشست هم در بخشهای شمالی دشت اتفاق افتاده است.

واژههای کلیدی: دشت هومند-آبسرد، سنتینل ۱، فرونشست، همپوشانی وزنی، LiCSBAS.

#### مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده زیست محیطی، به معنی نشست تدریجی و یا پایین رفتن ناگهانی سطح زمین به دلیل تراکم مواد زیر سطحی است. بر اساس تعریف سازمان زمین شناسی آمریکا، پدیده فرونشست زمین، شامل فروریزش یا

نشست رو به پایین سطح زمین است که این حرکت دارای جابجایی در جهت قائم از چند میلیمتر تا چند متر، و میزان جابجایی افقی آن کم و ناچیز است (, Galloway and Burbey, 2011). پدیده فرونشست در مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی میتواند، آثار تخریبی فاجعهباری به دنبال داشته باشد. زیرزمینی، حفاری مترو و ساخت و سازهای شهری و دو عامل طبیعی سنگهای کربناته و خاکهای نرم در میزان فرونشست تأثیر داشته است. (2020) .Chen et al. بمنظور بررسی اثر سطح آبهای زیرزمینی، مقایسه میزان فرونشست زمین در پکن چین را قبل و بعد از پروژه انتقال آب با استفاده از دادههای ماهوارهای انجام دادند. مطالعه آنها نشان داد که حداکثر میزان تغییر شکل سالانه از ۲۹/۲ درصد و ۱۴۱ میلیمتر در سال قبل از پروژه انتقال آب به ۲۰/۱ درصد و ۱۳۵ میلیمتر در سال پس از پروژه کاهش یافته است.

دشت هومند – آبسرد یکی از دشتهای استان تهران میباشد که از نظر آب سطحی فقیر بوده و منابع آب سطحی قابل برنامهریزی در آن وجود ندارد، به همین دلیل، برداشت از آب زیرزمینی به-صورت گستردهای در این دشت انجام می گیرد و تقریبا بخش بسیار بزرگی از مصارف شرب، کشاورزی و صنعت در منطقه وابسته به آب زیرزمینی می باشد. در سالهای اخیر برداشتهای بی رویه از منابع زیرزمینی آب در دشت هومند-آبسرد موجب خشک و یا کم آب شدن بسیاری از چاههای آب منطقه گردیده است. همچنین خطر فرونشست زمین را نیز در این ناحیه به شدت افزایش داده و بیم آن می رود که در آینده شاهد فرونشست زمین و تخریب گسترده تاسیسات عمومی، اماکن و باغها در دشتهای اطراف شهر آبسرد باشیم. امروز دیگر این خطر یک احتمال دور از ذهن نبوده و هر لحظه امكان وقوع آن وجود دارد چرا که با توجه به گزارش شرکت آب منطقهای تهران، هم اکنون بسیاری از چاههای آب در مناطق مجاور کوههای شمالی و جنوبی آبسرد دچار کم آبی و افت قابل ملاحظه تراز آب شده و در مناطقی مثل هومند وادان و روستای وادان برخی چاهها بطور کامل خشک گردیده و در برخی از مناطق مجاور جاده فیروزکوه نیز چاههای با نقصان آبدهی مواجه هستند. از این رو، هدف این پژوهش برآورد مقادیر فرونشست زمین در آبخوان هومند-آبسرد، ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن و همچنین مقایسه نتایج به دست آمده با تخمین میزان فرونشست در این دشت میباشد. همچنین در این پژوهش سعی بر آن است تا با

خطوط راه آهن، مناطق مسکونی و تخریب مناطق کشاورزی را به دنبال داشته باشد و گاها این فرونشست ایجاد شده دائمی و برگشت نایذیر خواهد بود. بهعلاوه نشست زمین باعث تغییراتی در ضرایب هیدرودینامیک آبخوان می گردد. معمولا به دلیل فرونشست تخلخل مفيد آبخوان كاهش مى يابد و به دنبال آن ضریب آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) و هدایت هیدرولیکی نیز به میزان قابل توجهی کاهش مییابد (شریفی کیا، ۱۳۹۱). با توجه به برداشت بیش از حد از منابع آبهای زیرزمینی در مناطق مختلف جهان و همینطور میزان ذخیره این منابع در این مناطق مقدار فرونشست زمین متفاوت می باشد و بیشتر مناطق جهان دچار این پدیده می باشند ( Dinar et al., 2021; Esteban ) et al., 2024). با توجه به افزایش نرخ فرونشست در سالهای اخیر، تحقیقات زیادی در خصوص فرونشست طی سالهای گذشته انجام گرفته است (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۳؛ هلالی و همکاران، ۱۴۰۳). در اغلب بررسیهای صورت گرفته، بیشترین تأثیر در فرونشست زمین را افت سطح آب زیرزمینی و تا حدودی هم جنس لایههای زمین داشتهاند. بهعنوان نمونه، لشکریپور و همکاران (۱۳۸۶) فرونشست زمین در اثر افت سطح آبهای زیرزمینی در دشت نیشابور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نشست در قسمتهایی از دشت رخ داده که افت سطح آبهای زیرزمینی بیشتر بوده و خاک تشکیل دهنده أبخوان بيشتر از نوع ML و <sup>2</sup>CL براساس طبقه بندى متحد بودهاند. در پژوهشی دیگر، آمیغ پی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازیابی دقیق دشت یزد-اردکان پرداختهاند. بررسیهای صورت گرفته حاکی از این بود که این فرونشست در اثر استخراج آبهای زیرزمینی است که این بهرهبرداری از منابع زیرزمینی، بیش از مقداری است که بتواند با بارندگیهای منطقه جبران شود. Zhang et al., (2019) برای بدست آوردن فرونشست در منطقه ووهان چین از روش تداخل سنجی راداری استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد سه عامل انسانی بهرهبرداری از آبهای

این پدیده می تواند خطراتی برای خطوط لوله، جادههای ار تباطی،

<sup>2-</sup> Clay with Liquid Limit <50%

<sup>1-</sup> Mud with Liquid Limit <50%



در نظر گرفتن همه عوامل اصلی تأثیرگذار، بتوان دید جامعتر و بهتری نسبت به این مسئله به دست آورد، تا بر اساس آن برای کنترل میزان فرونشست راهکار ارائه کرد.

# مواد و روشها منطقه مورد مطالعه

دشت هومند-آبسرد در شرق شهر دماوند واقع شده و مهم-ترین راه دسترسی به این محدوده جاده اصلی دماوند-فیروز کوه میباشد (شکل ۱). حداکثر ارتفاع سطح زمین در محدوده هومند-آبسرد، ۳۸۰۰ متر در شمال محدوده و در ارتفاعات البرز و حداقل ارتفاع ۱۴۰۰ متر است که در خروجی محدوده در روستای دو آب (به سمت ایوانکی) قرار دارد. از نظر زمین شناسی ساختاری، ناحیه مورد بررسی در خاور البرز مرکزی قرار دارد و شامل رخنمونهایی از سنگهای پرکامبرین پسین تا عهد حاضر است. بخش شمالی منطقه هومند-آبسرد رشته کوههای البرز

مرکزی به شدت چین خورده قرار دارد که شامل نهشتههای رسوبی-آتشفشانی مزوزوئیک و سنوزوئیک و به طور نادر پالئوزوئیک است. در این واحد زمین شناسی، سنگهای کربناته سازند لار و تیزکوه دامنههای پرشیبی را در امتداد کوههای البرز شمثکیل دادهاند، در صورتی که نهشتههای سازندهایی چون شمشک نرم و کم شیب است. تاقدیس آینه ورزان-دلیچای که در بخش مرکزی محدوده دیده میشود، از نهشتههای تیره رنگ و اغلب تخریبی پرکامبرین پسین، پالئوزوئیک تشکیل یافته و در ناودیسهای مجاور آن بیشتر نهشتههای کربناته و آذرآواری مزوزوئیک-سنوزوئیک رخنمون دارد. در بخش جنوبی منطقه آبرفتهای پلیو کواترنر و سنگهای رسوبی و آتشفشانی مزوزوئیک-سنوزوئیک به صورت تپه ماهورهای کم ارتفاع نمایان



شكل ۱- موقعيت منطقه مورد مطالعه. Figure 1- Location of the study area.

بر اساس بررسی متغیرهای هواشناسی، منطقه دارای اقلیم «نیمه خشک» به روش دومارتن و «بیابانی» به روش سیلیانینوف می-باشد. طبق بررسی آمار طولانی مدت (۴۵ سال) ایستگاه هواشناسی هومند-آبسرد، میانگین بارندگی سالانه این محدوده برابر ۸۳۳۲/۸ میلیمتر است. همچنین، متوسط ماهانه دمای محدوده مورد مطالعه برابر ۱۰/۶ درجه سانتیگراد بوده که ژانویه (دی ماه) با ۲/۵– درجه و جولای (تیرماه) با ۲۳/۵ درجه سانتیگراد سردترین و گرمترین ماه در محدوده می باشند (زارعی، ۱۴۰۱).

آبخوان دشت هومند آبسرد از نوع آزاد بوده و با توجه به مطالعات ژئوفیزیک دشت، ضخامت لایههای آبرفتی در منطقه از مقدار ناچیز تا حدود ۱۶۰ متر میباشد. در حال حاضر تغییرات سطح آب در آبخوان دشت هومند-آبسرد از طریق ۱۸ حلقه چاه مشاهدهای، اندازه گیری میشود. تراز آب زیرزمینی در این دشت از ۲۱۶۰ در نزدیکی ارتفاعات شمال تا ۱۹۰۰ در پایین شهر آبسرد تغییر میکند. میزان قابلیت انتقال آب در بخش مرکزی دشت در حدود ۲۰۰۰ متر مربع در روز و در بخش شمالی حدود ۲۵۰، خروجی دشت در حاشیه جنوبی هم حدود ۲۵۰ متر مربع در روز است (مهندسین مشاور آساراب، ۱۳۹۶).

# روش پژوهش اندازهگیری مقدار فرونشست

در این تحقیق اندازه گیری فرونشست به روش DinSAR انجام شده است که در ادامه به اختصار توضیح داده میشود. تداخل سنجی رادار دیافراگم مصنوعی (InSAR) بهطور گسترده-ای برای اندازه گیری تغییر شکل سطح زمین با وضوح فضایی بالا استفاده میشود (2009 ,.Ins et al. 2009). به طور خاص، تجزیه و تحلیل سری زمانی InSAR، که از لایههای تصاویر SAR استفاده می کند، تشخیص تغییر شکل آهسته (~mm/year) و در طول زمان را امکان پذیر می کند (2016 et al. 2016). تا اواسط دهه

سریهای زمانی در مناطق کوچک حدودا تا ۱۰ کیلومتر مربع، مناطق قابل اندازه گیری به دلیل در دسترس بودن دادههای ناهمگن، فرکانس مشاهده کم، سیاستهای دسترسی به دادهها و انسجام متغیر، همچنان محدود بودند. سنجندههای دو ماهواره سنتينل-۱ که توسط آژانس فضايي اروپا (ESA) اداره مي شود، وضعیت و چشمانداز بهرهبرداری سیستماتیک از دادههای SAR را به شدت تغییر داده است. همچنین چندین بسته نرم افزار رایگان برای پردازش InSAR تولید و ارائه شده که از نظر فنی پیچیده هستند و استفاده از آنها برای افراد غیر متخصص می-تواند چالش برانگیز باشد. پروژه ( Looking inside the Continents from Space)- نگاهی به قارهها از فضا (LiCS) یکی از پروژههایی است که توسط مرکز مشاهده و مدلسازی زلزلهها، آتشفشانها و تكتونيك (COMET) شوراى تحقيقات محيط زیست طبیعی بریتانیا رهبری می شود. هدف LiCS نظارت بر مناطق زمین ساختی و آتشفشانی جهانی با استفاده از -Sentinel 1 InSAR، با وضوح مكانى بالا و استفاده از نتايج آن است. LiCSAR که یک پردازنده خودکار Sentinel-1 InSAR است که از GAMMA SAR و نرم افزار تداخل سنجى استفاده مىكند. در ادامه یک بسته تحلیل سری زمانی InSAR منبع باز به نام LiCSBAS اخیرا توسط یکسری از محققان توسعه داده شده است که با LiCSAR ادغام می شود. LiCSBAS کاربران را قادر می سازد تا به راحتی سریهای زمانی و تخمینهای سرعت InSAR را در هر کجا که محصولات LiCSAR کافی در دسترس هستند، به دست آورند. این نتایج را می توان برای اهداف مختلف، از مطالعات تکتونیکی در مقیاس بزرگ تا مطالعات تغییر شکل سطح اساس محلى استفاده كرد. پردازش سرى زمانى InSAR در این روش عمدتاً به دو بخش آمادهسازی دستهای از دادههای دسته بندی نشده و خام (مرحله صفر) و تجزیه و تحلیل سرىهاى زمانى (مرحله يک) تقسيم مى شود. فلوچارت مراحل کار در شکل ۲ نشان داده شده است.





شکل ۲- نمودار جریان کار LiCSBAS شامل آماده سازی فازهای تداخل سنجی (UNW) و دادههای کوهرنسی (COH) (مرحله ۰-۱ تا ۰-۵) قبل از تجزیه و تحلیل سری زمانی (مرحله ۱-۱ تا ۱-۶). مراحل اختیاری ترکیب اصلاحات جوی (سرویس آنلاین اصلاح جوی عمومیGACOS، ) و مرحله برش که با خط چین نشان داده میشود (<u>https://github.com/yumorishita/LiCSBAS</u>). Figure 2 - LiCSBAS workflow diagram including preparation of interferometric phases (UNW) and coherence data

(COH) (steps 1-0 to 0-5) before time series analysis (steps 1-1 to 6-1). The optional steps of combining atmospheric corrections (GACOS online public atmospheric correction service) and the clipping step are indicated by dashed lines (https://github.com/yumorishita/LiCSBAS).

#### ارزيابي يتانسيل فرونشست

در این مطالعه، ارزیابی پتانسیل فرونشست به روش وزندهی تلفیقی که شامل شناسایی و وزندهی و رتبهبندی لایهها هست، صورت گرفته است. این ارزیابی، یک فرایند مهم برای شناخت شکنندگی درونی یک منطقه به خطر فرونشست است که مخاطرات آن دارای منشاء طبیعی و یا انسانی است. در سالهای اخیر ارزیابی پتانسیل فرونشست به یک ابزار پرکاربرد در برنامه-ریزی و حفاظت از آبخوانها تبدیل شده است. روشهای مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست دریک آبخوان وجود دارد که از آن جمله می توان به روشهای

مبتنی بر شبیه سازی، روش های آماری و روش های شاخص و هم پوشانی اشاره کرد. در این تحقیق از روش وزن دهی تلفیقی لایه ها جهت برآورد پتانسیل فرونشست استفاده شده است . این مدل بر اساس مفهوم وضعیت هیدروژ ولوژیکی استوار است. برای اجرای این مدل ابتدا اطلاعات لازم (نقشه و داده ها) در ارتباط با پارامترهای مد نظر از منابع مختلف تولید اطلاعات جمع آوری شدند. با استفاده از وزن دهی لایه ها (براساس جداول استاندارد و وزن های موجود در منابع و نظرات کارشناسی) انجام و تلفیق لازم بر اساس رابطه ۱ اعمال گردید.





۲۰۱۴ یا ۱۳۹۳–۱۳۹۸) تهیه شد (شکل ۳). متوسط فرونشست برای بازه زمانی مورد مطالعه بین صفر تا ۱۱ میلیمتر در سال به دست آمد و نتایج نشان میدهد که در طول سالهای ۱۳۹۳تا ۱۳۹۸ نرخ فرونشست در حال افزایش است. به منظور بررسی تغییرات تراز آب زیر زمینی در بازه اندازه گیری فرونشست، با استفاده از دادههای به دست آمده از چاههای مشاهدهای میزان افت در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۸ محاسبه و آبنمود معرف (شکل ۴) برای این بازه زمانی و ۱۸ پیزومتر مورد نظر ترسیم شد. میزان فرونشست محاسبه شده از روش تداخل سنجى تفاضلي راداري در این بازه زمانی با میزان متوسط افت مشاهده شده در تراز آب در هر سال مقایسه گردید. همانطور که در نمودار فرونشست و نمودار افت سطح آب زیرزمینی هم مشاهده می شود، در این بازه زمانی همبستگی بین متوسط نشست سطح زمین و افت سطح ایستایی مشاهده می شود، میانگین افت در این آبخوان حدود ۲۶۰ سانتیمتر در سال و در کل بازه پنج ساله (۲۰۱۹ –۲۰۱۴) حدود ۱۳ متر مشاهده شد.

$$v = \sum_{n=1}^{\infty} (w_i * R_i) = AB_r * AB_w + D_r * D_w + P_r * P_w + Cc_r * Cc_w + R_r * R_w + CD_r * CD_w + V_r * V_w + T_r * T_w + LU_r * LU_w$$
())

*v* مقدار نهایی شاخص ، *w*<sub>i</sub> وزن پارامتر و *R*<sub>i</sub> رتبه پارامتر است که با توجه به ویژگیهای منطقه مورد مطالعه می تواند تغییر کند. در جدول ۱ عوامل ذکر شده در رابطه ۱ که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته و ضرایب مدل نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ طبقه بندی شاخص مدل فرونشست را نشان می دهد.

جدول ۱- عوامل و ضرایب مورد استفاده در مدل وزندهی تلفیقی. Table 1- Factors and coefficients used in the integrated weighting model.

Factor	Coefficient
Annual Abstraction (AB)	5
Aquifer Thickness (D)	4
Aquifer Porosity (P)	4
Aquifer Compressibility (Cc)	3
Distance from the River (R)	2
Cumulative Drawdown (CD)	4
Thickness of the Vadose Zone (V)	2
Effective Stress Variations (T)	4
Land Use (LU)	2

جدول ۲- طبقه بندی شاخص مدل فرونشست.

Table 2- Classification of	subsidence model index.
Subsidence Potential	Index

Subsidence i otentiai	писл		
Low	<100		
Moderate	100-140		
High	140-180		
Very High	>180		

#### نتایج و بحث

#### اندازه گیری فرونشست دشت هومند - آبسرد به روش DinSAR

به منظور تعیین میزان فرونشست در دشت هومند- آبسرد، ابتدا دادههای مورد نیاز جهت پردازش اطلاعات تصاویر راداری با هدف تصحیح خطاهای تصویر برداری به روش DinSAR جمع آوری شد. پس از ساختن اینترفروگرامهای (تداخل نگاشت) مورد نظر نقشه فرونشست مشاهداتی یا واقعی در بازه زمانی (۲۰۱۹-



هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳

شکل ۳- نقشه نرخ فرونشست سالانه دشت هومند – آبسرد در بازه زمانی ۲۰۱۹–۲۰۱۴ با روش DinSAR.





شکل ۴- آبنمود معرف آبخوان دشت هومند-آبسرد. Figure 4- Unit Hydrograph of Humand-Absard plain aquifer.

منطقه وادوز آبخوان، تخلخل، میزان تغذیه (بصورت فاصله از منابع تغذیه کننده آبخوان مثل آبراهههای موجود)، کاربری اراضی، تغییرات تنش مؤثر در آبخوان و ضریب فشردگی آبخوان بود که در ادامه در مورد هریک بحث خواهد شد.

**ارزیابی پتانسیل فرونشست در دشت هومند – آبسرد** عوامل مؤثری که در این تحقیق بررسی و نقشههای آنها تهیه گردید شامل لایههای اطلاعاتی افت تجمعی سطح آب زیرزمینی، میزان برداشت از آبخوان، ضخامت آبخوان، ضخامت

نقشه افت تجمعي آبخوان

برای تهیه نقشه افت سطح آب زیرزمینی نیز از اطلاعات مربوط به تراز آب در چاههای پیزومتری در فاصله زمانی (۲۰۱۹– ۲۰۱۴) پنج ساله استفاده شد (شکل۵). همانگونه که در شکل ۵ مشاهده میشود بیشترین مقدار افت سطح آب زیرزمینی در بخش مرکزی آبخوان رخ میدهد و میزان افت رابطهای مستقیم بر مقدار فرونشست دارد.

# میزان برداشت از آب زیرزمینی

نقشه میزان برداشت از آب زیرزمینی از اطلاعات مربوط به تخلیه سالانه چاههای بهرهبرداری تهیه شد. میزان برداشت از آب زیرزمینی نیز رابطهای مستقیم بر میزان افت سطح آب و همچنین نرخ فرونشست دارد و بیشترین مقدار برداشت آب در بخش مرکزی آبخوان رخ میدهد (شکل ۶).

#### فاصله از رودخانه

نقشه فاصله از رودخانه با توجه به آبراهههای موجود در محدوده و روش درونیابی تهیه شد (شکل ۷). میزان فاصله از آبراههها در منطقه رابطه مستقیم با میزان تغذیه آبخوان دارد.

#### ضخامت آبرفت

جهت تهیه نقشه ضخامت آبرفت از اطلاعات پایه زمین شناسی، ژئوفیزیک و لاگهای حفاری استفاده شده است. این عامل هم رابطهای مستقیم با فرونشست دارد و بیشترین میزان ضخامت آبرفت در بخش مرکزی و شرق آبخوان دیده می شود (شکل ۸). همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود ضخامت از ۳۰ تا ۲۹۰ متر متغیر است.

#### ضخامت منطقه وادوز آبخوان

برای تهیه نقشههای ضخامت منطقه وادوز آبخوان از اطلاعات نقشه عمق سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. بیشترین ضخامت منطقه وادوز در بخش مرکزی و شمالی آبخوان دیده می شود که از ۲۵ تا ۱۸۱ متر متغیر است (شکل ۹).

#### تخلخل آبخوان

برای تهیه نقشه تخلخل آبرفت از اطلاعات پایه زمین شناسی، ژئوفیزیک و لاگهای حفاری و درونیابی میزان تخلخل

برآورد شده در محل پیزومترها و تلفیق آن با مطالعات ژئوفیزیکی و مقطعهای زمین شناسی آبخوان و نوع رسوبات تشکیل دهنده آبخوان و دانهبندی آنها استفاده شده است. تخلخل برآورد شده از ۳۵ درصد تا ۲۰ درصد متغیر بود و بیشترین مقدار آن در بخش شمال شرقی و کمترین مقدار آن هم در بخش جنوب غربی میباشد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

# ضريب فشردكي آبخوان

یکی از مهمترین عوامل مهندسی در بخش فرونشست آبخوان، ضریب فشردگی مواد جامد آبخوان است که نشاندهنده قابلیت یک آبرفت و رسوب در تراکم پذیری و یا فشرده شدن میباشد (Wang et al., 2023). ضریب فشردگی از معادله زیر محاسبه می گردد:

 $C_c = 1.15(e - 0.27) \tag{(7)}$ 

که در این معادله C<sub>c</sub> ضریب فشردگی و e نسبت پوکی میباشد. برای تهیه نقشه ضریب فشردگی آبخوان ابتدا با استفاده از نقشه تخلخل نسبت پوکی محاسبه و سپس با استفاده از معادله بالا میزان ضریب فشردگی در نقاط پیزومترها محاسبه گردید. پس از بدست آمدن ضریب فشردگی در محل پیزومترها نقشه نهایی ضریب فشردگی تهیه شد که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

### تغييرات تنش مؤثر آبخوان

تغییرات تنش مؤثر حاصل تفریق تنش مؤثر اولیه از تنش مؤثر ثانویه است ( $\Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ ) و ارتباط مستقیمی با فرونشست زمین دارد. به عبارت دیگر در مناطقی از آبخوان که مقدار این پارامتر بزرگ و مثبت باشد، احتمال فرونشست بیشتر است (محمدزاده، ۱۳۹۶). تنش مؤثر اولیه از معادله زیر محاسبه می شود:

 $\sigma_1 = \sigma_1' + U_1 \tag{(f)}$ 

که در این معادله  $\sigma_1$  تنش کل اولیه،  $\sigma'_1$  تنش مؤثر و  $U_1$  فشار آب منفذی میباشد. تنش کل اولیه از جمع حاصلضرب ضخامت بخش خشک آبخوان در وزن مخصوص خشک مواد آبخوان و حاصلضرب ضخامت اشباع آبخوان ضربدر وزن مخصوص اشباع رسوبات آبخوان بدست میآید. فشار آب منفذی نیز از حاصلضرب وزن مخصوص آب در ارتفاع بخش اشباع بدست میآید. در این پژوهش، وزن مخصوص حالت خشک و اشباع رسوبات با توجه به

جنس رسوبات برای آبخوان هومند- آبسرد از مراجع مختلف کاربری اراضی (Arora, 2008) برآورد و تنش اوليه و تنش ثانويه در محل پیزومترها محاسبه گردید. نقشه تغییرات تنش مؤثر آبخوان پس تصاویر ماهوارهای و اطلاعات موجود در منطقه استفاده شد و از محاسبه تنش اولیه و تنش ثانویه و تفریق تنش اولیه از تنش ثانویه در محل پیزومترها و درونیابی ارقام بدست آمده که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

برای تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از رتبهبندی طبق جدول ۳ انجام شده که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



Figure 6- Map of the amount of annual abstraction from the aquifer.



شكل ٩- نقشه ضخامت منطقه وادوز آبخوان.





Kilometers 



Figure 9- Thickness map of the vadose zone of the aquifer.

00.51 2 3 4

Effective Stress Variations

High : 9

Low : 1

شكل ١٢- نقشه تغييرات تنش مؤثر آبخوان هومند-آبسرد.





Figure 13- Land use map of Humand-Absard aquifer.



تلفیق عوامل مؤثر در یتانسیل فرونشست

فرونشست دشت، وزن هر یک از عوامل با توجه به شرایط منطقه

Table 5- The weight and rate of factors influencing the subsidence potential of Humand-Absard plain.							
Factor	Range	Rate	Weight	Factor	Range	Rate	Weight
	< 1.6	1	5		< 50	1	
	1.6-2.25	2			50-75	2	
	2.25-2.75	3			75-100	3	
Annual	2.75-3.25	4		Thickness of the	100-125	4	
Abstraction	3.25-3.75	5		Vadose Zone (m)	125-150	5	2
(MCM)	3.75-4.25	6			150-175	6	
	4.25-4.75	7			175-200	7	
	4.75-55.5	8			200-225	8	
	> 5.5	9			> 225	9	
	< 60	1		Aquifer Compressibility	< 0/05	1	3
	60-90	2	4		0/05-0/08	2	
	90-120	3			0/08-0/1	3	
Aquifer	120-150	4			0/1-0/14	4	
Thickness	150-180	5			0/14-0/18	5	
(m)	180-210	6			0/18-0/22	6	
	210-240	7			0/22-0/26	7	
	240-270	8			0/26-0/29	8	
	> 270	9			> 29	9	
	< 0.75	1	2	Effective Stress Variations (N/m <sup>2</sup> )	< 12	1	4
<b>D</b> .	0.75-1.5	2			12-18	2	
Distance	1.5-2.3	3			18-22	3	
Piver (m)	2.3-3.3	4			22-25	4	
Kivei (III)	3.3-4.5	5			25-29	5	
	4.5-5.7	6			29-33	6	

جدول ۳- وزن و رتبه عوامل تأثير گذار بر پتانسیل فرونشست دشت هومند-آبسرد.

هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳

Hydrogeology, Volume 9, No. 1, Summer 2024

	5.7-7	7			33-38	7	
	7-8.3	8			38-44	8	
	> 8.3	9			> 44	9	
	< 12	1	4		< 35	10	
	12-25	2		4 Aquifer Porosity (%) Land Use	35-30	8	4
	25-37	3			25-30	6	
Cumulative	37-48	4			20-25	4	
Drawdown	48-58	5			20-10	2	
(m)	58-68	6			>10	1	
	68-80	7			Rangeland	2	
	80-92	8			Poor Rangeland	3	2
	> 92	9			Residential	8	Z
					Agriculture	10	

تلفیق نقشههای عوامل مؤثر با استفاده از روش همپوشانی وزنی و با توجه به رتبهبندی و وزندهی هر یک از عوامل انجام شد. شکل ۱۴ نقشه شاخص پتانسیل فرونشست را نشان میدهد. این شاخص بین ۷۰ تا ۲۱۰ در منطقه مورد مطالعه متغیر میباشد، همچنین در ادامه محدوده به چهار بخش پتانسیل فرونشست

خیلی بالا، بالا، متوسط و پایین تقسیم گردید. نتایج نشان می-دهد که بالاترین پتانسیل فرونشست دشت هومند آبسرد به محدوده مرکزی دشت و جایی که تمرکز برداشت آب زیرزمینی و افت سطح آب بیشتر است، تعلق دارد.



Figure 14 - Subsidence potential index map.

#### مقایسه نتایج پتانسیل فرونشست با مقادیر اندازه گیری شده

ارائه مدل بدون صحت سنجی فاقد اعتبار لازم خواهد بود، تخلخل و ضریب فشردگی بنابراین نقشه پتانسیل فرونشست محاسباتی بایستی با یک نقشه همبستگی مثبت ولی با درج معیار مقایسه شود. نقشه فرونشست در بازه زمانی هفت ساله به آنچه از مقایسه دو نقشه برم دست آمده از روش DinSAR (شکل ۱۵) به عنوان نقشه معیار بیشترین میزان فرونشست به با نقشه پتانسیل فرونشست مقایسه شد. نتایج نشان میدهد که متعلق به حاشیههای کناری بین پتانسیل فرونشست و مقادیر اندازه گیری شده حاصل از تأثیر زیاد ضخامت آبخوان و پردازش DinSAR همبستگی نسبتا قابل قبولی وجود دارد. باشد.

همچنین نتایج نشان دادند که عوامل مؤثر بر فرونشست مثل تخلخل و ضریب فشردگی همبستگی کمتر و سایر عوامل همبستگی مثبت ولی با درجات متفاوتی دارند. آنچه از مقایسه دو نقشه برمیآید این است که در هر دو روش

بیشترین میزان فرونشست به نواحی مرکزی و کمترین مقدار هم متعلق به حاشیههای کناری است. این موضوع میتواند ناشی از تأثیر زیاد ضخامت آبخوان و همچنین برداشت از آب زیرزمینی باشد. هیدروژئولوژی، سال نهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳ Hydrogeology, Volume 9, No. 1, Summer 2024



شکل ۱۵– نقشه مقایسه نقاط پتانسیل فرونشست و مقادیر اندازه گیری شده در دشت هومند–آبسرد. Figure 15- Comparison map of subsidence potential points and measured values in Humand-Absard plain.

#### نتيجهگيري

اتفاق افتاده در دشت داشت. با توجه به اینکه نواحی دارای فرونشست بالا، بر مناطقی که برداشت از آب زیرزمینی و افت سطح آب زیاد بوده، قرار گرفته است؛ میتوان گفت که برداشت بی رویه از آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر فرونشست دشت هومند-آبسرد دارد. بنابراین به منظور جلوگیری از روند افزایش فرونشست در منطقه، برداشت از منابع آب زیرزمینی به ویژه در مناطقی که افت سطح آب زیاد بوده، کنترل شود و با مدیریت اصولی آبخوان از وقوع این پدیده پیشگیری کرد. همچنین نتایج نشان داد که میتوان از روش به کار رفته در این پژوهش برای ارزیابی میزان پتانسیل و مقادیر فرونشست استفاده کرد. با این قطعیت همراه باشد. بنابراین انجام آزمایشهای تکمیلی به ویژه در ارتباط با اندازه گیری تخلخل و مطالعات بیشتر جهت برآورد مقادیر تغذیه در منطقه پیشنهاد میگردد.

### منابع

ابراهیمی، ش.، رضایی، الف.، موسوی، ز.، ۱۴۰۳. بررسی فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام در دو دوره افت و خیز تراز

در این یژوهش، برآورد مقادیر فرونشست دشت هومند – آبسرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (DinSAR)، و همچنین ارزیابی پتانسیل فرونشست و عوامل مؤثر بر آن صورت گرفت. میزان فرونشست با استفاده از یکیج LiCSBAS و داده-های راداری مربوط به سالهای ۲۰۱۴–۲۰۱۹ محاسبه شد. نتایج حاصل از اندازه گیری فرونشست به روش DinSAR نشان داد که نرخ فرونشست آبخوان در طول پنج سال از ۰ تا ۱۱ میلیمتر در سال در دشت هومند– آبسرد متغیر است. بیشترین میزان فرونشست در بخش های مرکزی به سمت جنوب دشت و کمترین در بخشهای شمالی دشت اتفاق افتاده است. در مرحله بعد، عوامل مؤثر بر میزان فرونشست تعیین شده، سپس رتبهدهی و با توجه به تأثير آنها وزندهي عوامل انجام شد. اين عوامل شامل افت تجمعی آبخوان، میزان برداشت از آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، ضخامت آبخوان، ضخامت منطقه وادوز، تخلخل، ضريب فشردگی، تغییرات تنش مؤثر و کاربری اراضی بودند. نقشه يتانسيل فرونشست با تلفيق اين عوامل به دست آمد. اين نقشه همخوانی خوبی (با ضریب همبستگی ۰/۹۱) با میزان فرونشست Plain of China, Science of The Total Environment, 735, 139111.

Dinar, A., Esteban, E., Calvo, E., Herrera, G., Teatini, P., Tomás, R., Li, Y., Ezquerro, P., Albiac, J., 2021. We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent, Science of The Total Environment, 786. 147415.

Elliott, J., Walters, R., Wright, T., 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. Nature Communications 7, 13844.

Esteban, E., Dinar, A., Calvo, E., Albiac, J., Calatrava, J., Herrera, G., Teatini, P., Tomás, R., Ezquerro, P., Li, Y., 2024. Modeling the optimal management of land subsidence due to aquifers overexploitation. Journal of Environmental Management, 349, 119333.

Galloway, D. L., Burbey, T. J., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeol J 19, 1459–1486.

Wang, Y., Zhang, F., Liu, F., 2023. Thermo-hydromechanical (THM) coupled simulation of the land subsidence due to aquifer thermal energy storage (ATES) system in soft soils. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.

Zhang, Y., Liu, Y., Jin, M., Jing, Y., Liu, Y., Liu, Y., Sun, W., Wei, J., Chen, Y., 2019. Monitoring Land Subsidence in Wuhan City (China) using the SBAS-InSAR Method with Radarsat-2 Imagery Data. Sensors 19 (3), 743.

Zhou, X., Chang, N.-B., Li, S., 2009. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. Sensors, 9, 1876-1912.

آب زیرزمینی به کمک تکنیک تداخلسنجی راداری. نشریه هیدروژئولوژی.

آمیغ پی، م.، عربی، س.، و طالبی، ع.، ۱۳۸۹. بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازیابی دقیق. علوم زمین، ۲۰(۷۷)، ۱۵۷–۱۶۴.

زارعی، پ.، ۱۴۰۱. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان هومند-آبسرد با استفاده از روشهای سنجش از دور و ارتباط آن با برداشت آبهای زیرزمینی. پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.

شریفی کیا، م.ر.، ۱۳۹۱. بررسی و تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی تفاضلی راداری DinSAR در دشت نوق – بهرمان. برنامهریزی و آمایش فضا، دوره شانزدهم، شماره ۳ (پیاپی ۷۷).

لشکری پور غ.، غفوری م.، کاظمی گلیان، ر.، دم شناس، م.، ۱۳۸۶. نشست زمین در اثر افت آبهای زیرزمینی در دشت نیشابور. پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.

محمدزاده، ح.، ۱۳۹۶. مکانیزم ذخیره و رها شدن آب در آبخوان و تأثیر آن بر افزایش تنش مؤثر و نشست زمین. همایش زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی شهر مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

مهندسین مشاور آساراب، ۱۳۹۶. مطالعات بهنگام سازی . بیلان منابع آب محدودههای مطالعاتی حوزه کویر مرکزی ایران.

هلالی، ل.، باقری، ر.، مومنی، ع.، ۱۴۰۳. بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخلسنجی راداری (مطالعه موردی: دشت سمنان). نشریه هیدروژئولوژی.

Arora, K., R., 2008. Soil Mechanics and Foundation Engineering (geotechnical Engineering). Standard Publishers. 953 p.

Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, C., Lei, K., Zhu, L., Duan, L., Zhao, X., 2020. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing