

بررسی پدیده نشست زمین بر اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده شهر ارومیه

با استفاده از تغییرات دانه‌بندی لایه‌های زمین

همايون مقیمی^{۱*}، اسفندیار عباس نوین‌پور^۲، بهمن مرشدی^۳

۱. استادیار، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران ایران

۲. استادیار، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه پیام نور، مرکز ابهر، زنجان ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۵/۰۵)

چکیده

در تحقیق حاضر پدیده فرونشست زمین در محدوده دشت ارومیه (غرب دریاچه ارومیه) بررسی شده است. در محدوده مطالعاتی از ۵۳ حلقه چاه مشاهده‌ای برای بررسی تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی استفاده شد. عمق آب زیرزمینی دشت بین ۱ تا ۵۰ متر متغیر است و از غرب به شرق کاهش می‌یابد. در شمال غربی دشت در اراضی نوشین شهر رقوم منحنی‌های هم‌عمق ۵۰ متر بوده و از غرب به شرق سطح ایستابی کاهش یافته است. با بررسی اطلاعات حاصل از بازدیدهای دوره‌ای در سطح دشت ارومیه، در حواشی تعدادی از پیزومترهای حاشیه شرقی آبخوان محدوده به علت پدیده فرونشست لوله‌زایی در ملحقات چاه‌ها مشاهده شد. روند میزان فرونشست‌ها در ۱۸ پیزومتر محدوده مطالعاتی بررسی شد. مقادیر فرونشست در دشت ارومیه از ۵ تا ۱۷ سانتی‌متر متغیر است. بیشترین فرونشست در شمال و شمال غربی دشت اتفاق افتاده که از لحاظ دانه‌بندی دارای درصد بیشتری رسوبات دانه‌ریز است. میزان فرونشست در محدوده روضه‌چای تا شهرچای کاهش می‌یابد و در چاه جارچیلو به ۵ سانتی‌متر می‌رسد. مقدار فرونشست بین رودخانه‌های شهرچای تا باراندوز چای تقریباً به سمت دریاچه ارومیه افزایش قابل توجهی دارد و بین ۶ تا ۱۳ سانتی‌متر متغیر است. این تغییرات به دو دلیل عمده یعنی افت شدید سطح ایستابی (برداشت‌های بی‌رویه) و همچنین فشردگی رسوبات دانه‌ریز ایجاد می‌شود. افت شدید سطح ایستابی باعث کاهش فشار هیدرواستاتیک در آبخوان شده و در نتیجه، فضاهای خالی بین دانه‌ای که پیش‌تر با آب اشباع بود، این بار با افزایش وزن رسوبات بالایی این فضاها به وسیله رسوبات دانه‌ریز جایگزین می‌شود. در نتیجه، با توجه به شرایط زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی تا کنون به مرور فرونشست اتفاق افتاده است.

کلیدواژگان: افت سطح آب زیرزمینی، پیزومتر، دشت ارومیه، فرونشست زمین.

مقدمه

فرونشست زمین پدیده‌ای است که بر اثر آن سطح زمین به صورت تدریجی و در برخی موارد، به‌طور ناگهانی فرو می‌نشیند. این جنبش زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های متخلخل یا درز و شکاف‌دار زیرین نتوانند فشار لایه‌های بالایی را تحمل کنند [۲ و ۱۸].

در سال‌های اخیر به دلیل عدم مدیریت صحیح مصرف از یک‌طرف و کاهش نزولات جوی از طرف دیگر، بخش‌های زیادی از کشور با مشکل کم‌آبی و فرونشست زمین مواجه شده است [۸]. یکی از مشکلات اساسی و روزافزون در اکثر جوامع بشری که بیشتر بر اثر فعالیت‌های بشری رخ می‌دهد، پدیده فرونشست است. فرونشست به فرورفتگی سطح زمین اشاره دارد که بر اثر عوامل گوناگون طبیعی مانند انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و یا نفت به وجود می‌آید. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، عمده‌ترین عامل نشست زمین در دشت‌های کشور، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت شدید سطح آب زیرزمینی است [۹]. افت سطح آب در قسمت‌های مختلف دشت متفاوت بوده و سبب نشست زمین در برخی نقاط شده است. برای مشاهده تغییرات سطح از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. تکنیک GPS مشاهدات پیوسته و ترازیبی تغییرات سطح را به‌طور دقیق در یک سری نقاط که همان ایستگاه‌ها هستند، ارائه می‌دهد [۱۴].

در سال‌های اخیر افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن، نشست در بسیاری از آبخوان‌های ایران گزارش شده است. از جمله می‌توان برای اولین بار به نشست دشت رفسنجان در استان کرمان اشاره کرد. در این دشت به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، سطح زمین حدود ۴۴ سانتی‌متر زمین نشست می‌کند [۱۹]. عوامل مؤثر بر ایجاد این پدیده عبارت‌اند از: تغییر سطح آب زیرزمینی و تغییر الگوی جریان‌های آب سطحی، کاهش کیفیت آب و حتی در بعضی مناطق، هجوم آب شور، کاهش ضریب ذخیره آبخوان، محدودیت در عملیات پمپاژ در مناطق نشست‌کرده، تمرکز سیلاب در مناطق نشست‌کرده، تخریب ساختمان‌ها، سازه‌ها، مزارع و راه‌های مواصلاتی [۱ و ۴]. طبق آماربرداری صورت‌گرفته توسط جانسون (۱۹۹۱) در مورد خسارت‌های ناشی از نشست نشان می‌دهد که تخمین اولیه‌ای از هزینه خسارت‌ها یا هزینه‌های جبرانی ناشی از نشست در دنیا به

چندین میلیارد دلار آمریکا می‌رسد. از طرف دیگر، خسارت‌های ناشی از نشست طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ به اوج خود رسیده که هم‌زمان با رشد شهرنشینی و صنعتی شدن است [۲۱].

به‌طور کلی، از نشست می‌توان تحت عنوان «حرکات زمین» یاد کرد که بر اثر برداشت زیاد آب ایجاد شده و به تحکیم رسوبات نسبت داده می‌شود. تحکیم نتیجه افزایش استرس مؤثر است. فشار کل در نهشته‌های اشباع یا کمی‌اشباع توسط ساختمان دانه‌ها و آب روزه‌ای تحمل می‌شود. برداشت آب زیرزمینی منجر به کاهش فشار آب منفذی می‌شود (با زهکشی آب از حفرات) این پدیده به معنای انتقال تدریجی استرس از آب منفذی به دانه‌ها است [۳].

برای مثال، اگر سطح آب به اندازه یک متر افت کند، مطابق با افزایش فشار مؤثر و در نتیجه، تحکیم و نشست در مقیاس بزرگ است. طبق تحقیقات صورت‌گرفته، کاهش فشار آب منفذی بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد، بلکه در یک پریود طولانی‌تر از برداشت اتفاق می‌افتد. علاوه بر افزایش فشار، ضخامت و تراکم‌پذیری نهشته و طول زمان بارگذاری و درجه و نوع استرس اعمال‌شده بر نشست مؤثر است [۱۲]. افت سطح آب در قسمت‌های مختلف دشت متفاوت بوده و سبب نشست زمین در برخی نقاط شده است. برای مشاهده تغییرات سطح از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. تکنیک GPS مشاهدات پیوسته و ترازیبی تغییرات سطح را به‌طور دقیق در یک سری نقاط که همان ایستگاه‌ها هستند، ارائه می‌دهد [۱۸]. این افت شدید سطح استاتیک آب منطقه و نشست و جابه‌جایی زمین ناشی از آن، سبب ایجاد تخریب در قسمت‌هایی از سازه‌های زیرزمینی از جمله چاه‌های آب می‌شود که خسارت‌های مالی فراوانی در پی دارد.

به طور کلی، این وضعیت برای بیشتر دشت‌های ایران صادق است و دشت ارومیه به طور خاص از این معضل دور نیست.

پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر به علت رشد روزافزون بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و کاهش نزولات جوی، بیشتر این پدیده‌ها در مناطق مختلف دنیا رخ داده است. از آن جمله می‌توان به ایالت‌های آریزونا و کالیفرنیا (امریکا)، شهرهای توکیو و اوساکا (ژاپن)، و نیز در ایتالیا، بانکوک در تایلند و نقاط دیگر اشاره

می‌یابد. همچنین، در پژوهش یادشده ضخامت رسوبات بین ۱۶۰ تا ۱۷۰ متر و ضخامت کواترنر بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر برآورد شد. پژوهشگران یادشده احتمال خطر فرونشست زمین در منطقه مطالعه‌شده بین ۵۱/۳ درصد تا ۲۸/۳ درصد بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ به دست آوردند. آنها افزایش پمپاژ از آب‌های زیرزمینی منطقه را باعث فرونشست و کاهش سطح ایستابی دانستند [۱۳].

فرداس و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل همبستگی مقدار فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر SAR Sentinel 1 و سیستم اطلاعات جغرافیایی در شهر سمرنگ اندونزی پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد میزان فرونشست در منطقه طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ حدود $\pm 3/4$ سانتی‌متر سالانه بوده و همبستگی بین فرونشست زمین و کاهش سطح آب زیرزمینی حدود ۴۷/۵۸ درصد است. همچنین، مشاهده کردند کیفیت آب زیرزمینی شهر سمرنگ با کاهش سطح آب زیرزمینی کاهش یافته است [۵].

مرادی و همکاران (۱۳۹۹) میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل راداری و اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیرومتری را برای منطقه شهری ۱۸ تهران تحلیل کردند. در مرحله اول تصاویر ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ مربوط به سنجنده سنتینل ۱ اخذ و سپس، در نرم‌افزار SNAP پردازش کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد از جهت شمال منطقه مطالعه‌شده به سمت جنوب دانه‌بندی کوچک‌تر، اما در کل میزان توزیع گراول قابل توجه است. درصد توزیع انواع دانه‌بندی‌ها از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر و همچنین، در سطوح مختلف متفاوت به دست آمد که این امر بیانگر رسانایی زیاد از نظر آب زیرزمینی بود. آنها همچنین، بیان کردند وجود عمق چاه‌های موجود در منطقه که ضخامت بالای آبرفت را نشان می‌دهد، به همراه افت سطح ایستابی و خالی شدن خلل و فرج بین دانه‌بندی‌ها منجر به افزایش وزن آبرفت در جهت نیروی گرانشی می‌شود که وجود پدیده فرونشست را توجیه می‌کند. همچنین، میزان فرونشست از غرب به شرق و از شمال به جنوب با افزایش همراه است. پژوهشگران یادشده حداکثر میزان فرونشست از مطالعه تداخل سنجی راداری را حدود ۴۳۰ میلی‌متر در محدوده محله یافت‌آباد به دست آوردند. در ادامه، نتایج مطالعه چاه‌های ژئوتکنیکی نشان داد در محدوده‌هایی که بافت خاک ریزدانه است، با میزان فرونشست ارتباط دارد و در قسمت‌هایی که ریزدانه‌های

کرد. در ایران نیز پدیده فرونشست به ترتیب اهمیت در دشت‌های رفسنجان، مشهد، کرمانشاه، اصفهان و دیگر دشت‌هایی که منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی و یا صنعتی آنها از منابع آب زیرزمینی است، وجود دارد (۱۱) و [۱۵]. متداول‌ترین رویکرد استفاده از مدل‌های مکانی یا فضایی با داده‌های ورودی متشکل از انواع عوامل جغرافیایی و پارامترهای آن مرتبط است. داده‌های جغرافیایی به دو دسته مکانی (فضایی) و غیر مکانی (توصیفی) تقسیم می‌شوند. این روش اغلب در مدل‌سازی محیطی استفاده می‌شود [۱۷].

مطالعات زیادی در زمینه فرونشست زمین با روش‌ها و رویکردهای مختلف انجام شده است. به طور مثال، بیش از ۸۰ درصد فرونشست زمین که در ایالات متحده آمریکا اتفاق می‌افتد، ناشی از استخراج مداوم آب‌های زیرزمینی است [۶]. روش MCDAGIS توسط قربان‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شد. در این روش برای شناسایی مناطقی که مستعد فرونشست زمین در دشت مرند هستند، استفاده شد [۷]. در حالی که دهقان سوراکی و همکاران (۲۰۱۵) از داده‌های ASAR و PALSAR برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری میزان تغییر سطح زمین ناشی از فرونشست استفاده کردند [۴].

اسکندراس و همکاران (۲۰۲۱) عکس‌های SAR که با استفاده از پردازش‌های تداخل سنجی راداری (PSI) که توسط سنتینل ۱ در آژانس فضایی اروپا ثبت شد، برای بررسی و تجزیه و تحلیل پدیده فرونشست در منطقه آلبانی استفاده کردند. نتایج تجزیه و تحلیل تصاویر نشان داد شدیدترین پدیده‌ها در مناطق Laknas و RinasBreg Shkoze رخ داده، به طوری که در فرودگاه ملی مادرترزا در تیرانا در منطقه Rinas فرونشست زمین بین ۲/۳ میلی‌متر در سال و ۴/۵ میلی‌متر در سال است. همچنین، با بررسی و ارزیابی داده‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی منطقه مشاهده شد که پدیده فرونشست در تمام مناطق به‌جز Laknas به علت فشرده شدن رسوبات آبرفتی رودخانه ایشمی و افزایش پمپاژ آب زیرزمینی رخ داده است. آنها دریافتند که تصاویر PSI می‌تواند در مکان‌یابی فرونشست روشی مناسب، دقیق و به‌صرفه باشد [۲۰]. لی و همکاران (۲۰۲۱) احتمال فرونشست بر اثر پمپاژ آب زیرزمینی دشت پکن را با استفاده از مدل بی‌زین و نظریه فازی ارزیابی کردند. آنها از سری زمانی فرونشست به‌دست‌آمده از تکنیک پردازش تداخل سنجی راداری (InSAR) استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان آب زیرزمینی بیشتر از ۱ میلی‌متر در سال کاهش

متعدد و پیوسته طی سال‌های اخیر و به تبع آن، کاهش منابع آب سطحی، باعث معطوف شدن توجه بهره‌برداران به منابع آب‌های زیرزمینی سهل‌الوصول در آبخوان‌های استان و در نتیجه، افزایش تعداد چاه‌های مجاز و غیرمجاز شده است. در حال حاضر، در برخی دشت‌های استان، متأسفانه شاهد بروز اثرات منفی کاهش افت مخازن آب زیرزمینی هستیم که یکی از تبعات مهم آن، پدیده فرونشست زمین است که با توجه به آهستگی و خزنده بودن این پدیده، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. شروع مطالعات دشت ارومیه به دهه ۱۳۴۰ باز می‌گردد، ولی اندازه‌گیری شبکه پیزومتری و رسم هیدروگراف واحد اولین بار در سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ آغاز شد. با نگاهی به دوره ۳۵ ساله از سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵ نشان می‌دهد طی این دوره از سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ تا ۱۳۷۳-۱۳۷۴ نوسانات سطح سفره حالت طبیعی داشته به طوری که خشک‌سالی‌های اوایل دهه ۱۳۶۰ و اوایل دهه ۱۳۷۰ باعث افت کمی در سطح آب زیرزمینی شده و با افزایش بارندگی در اواخر دهه ۱۳۶۰ و اوایل دهه ۱۳۷۰ این میزان جبران شده است. متأسفانه با شروع مجدد دوره خشک‌سالی، از سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ و افزایش هم‌زمان میزان بهره‌برداری، افت شدید سطح سفره شروع شده که باعث صدور اولین آگهی ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب زیرزمینی برای قسمتی از دشت ارومیه در سال ۱۳۷۹ شد. به منظور انجام مطالعات مورد نظر این تحقیق، از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، اطلاعات تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، لاگ‌های حفاری، ژئوفیزیک منطقه، میزان برداشت آب از آبخوان توسط چاه‌ها، تغییرات آورد رودخانه‌های تغذیه‌کننده آبخوان، آمار آنالیزهای شیمیایی در گستره آبخوان جمع‌آوری شد. ابتدا از نظر صحت و پیوستگی، داده‌ها ارزیابی شدند. سپس، در نقشه‌های پایه پیاده شده و پس از تفکیک آنها در لایه‌های مختلف آبخوان، تغییرات رفتار سطح تراز آب زیرزمینی و پارامترهای هیدروشیمیایی بررسی شد.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مطالعه شده

شناخت سازندهای مختلف زمین‌شناسی به لحاظ تأثیر لیتولوژی در کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی و نقش گسل‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی در ارتباط و شکل‌گیری واحدهای آبدار، از ضروریات مطالعات پایه هیدروژئولوژی محسوب می‌شود. در دشت ارومیه برون‌زدهای اطراف منطقه مطالعاتی طیفی از

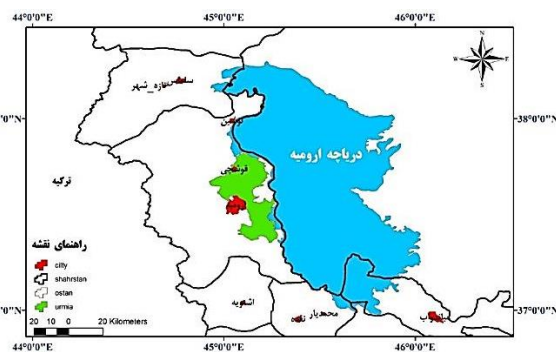
سیلتی تشکیل‌دهنده آبرفت منطقه هستند، به راحتی در تنش حاصل از فرونشست زمین واکنش نشان می‌دهد [۱۶].

کاهش حجم یک سفره آبخوان از طریق تعداد زیادی چاه آب که بیشتر برای اهداف کشاورزی حفاری شده است، منجر به فرونشست زمین می‌شود. به همین دلیل پدیده نشست زمین در محدوده دشت ارومیه بر اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تغییرات دانه‌بندی لایه‌های زمین است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی این پدیده و پهنه‌بندی تغییرات دانه‌بندی لایه‌های زمین پرداخته شده است.

روش کار

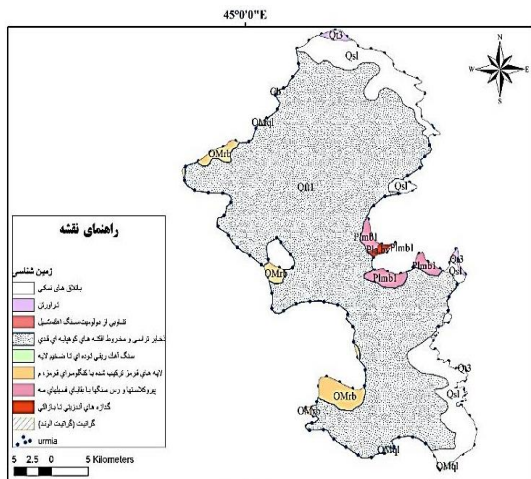
منطقه مطالعه شده

دشت ارومیه در ۲۰ کیلومتری دریاچه ارومیه قرار دارد. ارتفاع دشت ارومیه ۱۳۳۲ متر از آب‌های آزاد است. دشت ارومیه ارتفاعاتی همچون کوه سیر، کوه قیزقلعه، کوه جهودها، کوه چهل مر شهیدان، کوه ماه، کوه علی پنجه سی و کوه علی ایمان آن را احاطه کرده‌اند. در واقع، ارومیه بین دریاچه ارومیه و دیواره کوه‌های غرب استان واقع شده است. دشت ارومیه روی مدار ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه در نیم‌کره شمالی از خط استوا قرار گرفته است. همچنین، این شهر روی نصف‌النهار ۴۵ درجه و ۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. آب‌وهوای ارومیه با متوسط دمای ۹/۸ درجه سانتی‌گراد در تابستان تقریباً گرم و در زمستان سرد است. دوره بارندگی از اواخر مهر و ابتدای آبان شروع شده است و تا خرداد ادامه دارد. میانگین دوره بارش ۹۳ روزه در ارومیه ۳۶۰ میلی‌متر و میانگین بارش بلندمدت ارومیه ۲۳۸/۲ میلی‌متر است.



شکل ۱. موقعیت دشت ارومیه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

استان آذربایجان غربی به‌رغم اینکه جزء استان‌های پرآب کشور محسوب می‌شود، ولی به علت وقوع خشک‌سالی‌های



شکل ۲. زمین شناسی محدوده دشت ارومیه

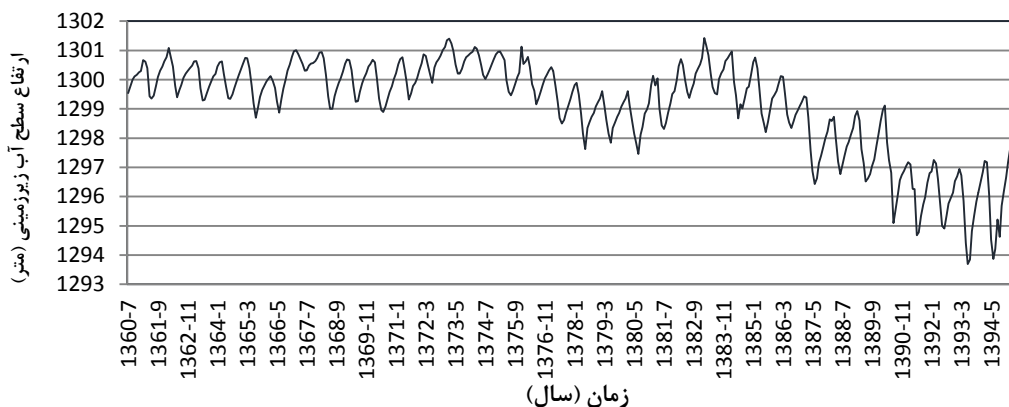


شکل ۳. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در دشت ارومیه

سنگ‌های آذرین و رسوبی است که سن آنها از کامبرین تا عهد حاضر می‌رسد که بیشترشان از سنگ‌های رسوبی و رسوبات آبرفتی متشکل هستند. زمین‌شناسی محدوده دشت ارومیه در شکل ۲ ارائه شده است. بررسی‌های آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی ارومیه مشخص می‌کند که در این محدوده مطالعاتی وسعت ناحیه دشت و ارتفاعات به ترتیب ۹۱۷ و ۱۲۴۹ کیلومترمربع بوده و آبخوان آبرفتی از نوع آزاد است. منابع بهره‌برداری‌کننده از آب‌های زیرزمینی که در سال ۱۳۹۰ آماربرداری شده‌اند، شامل ۲۲۵۷۱ حلقه چاه با تخلیه سالانه ۳۵۷/۳۲ میلیون مترمکعب و ۳۳ دهانه چشمه با تخلیه سالانه ۱۰/۵۴ میلیون مترمکعب است که تخلیه منابع آب زیرزمینی شناسایی شده در ارتفاعات محدوده مطالعاتی ارومیه سالانه ۲۱/۵۷ میلیون مترمکعب است. همچنین، در محدوده مطالعاتی دشت ارومیه تعداد ۵۳ حلقه چاه مشاهده‌ای (پیزومتر) برای بررسی تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی توسط سازمان آب منطقه‌ای حفر شده و به صورت ماهانه تغییرات آنها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.

یافته‌ها

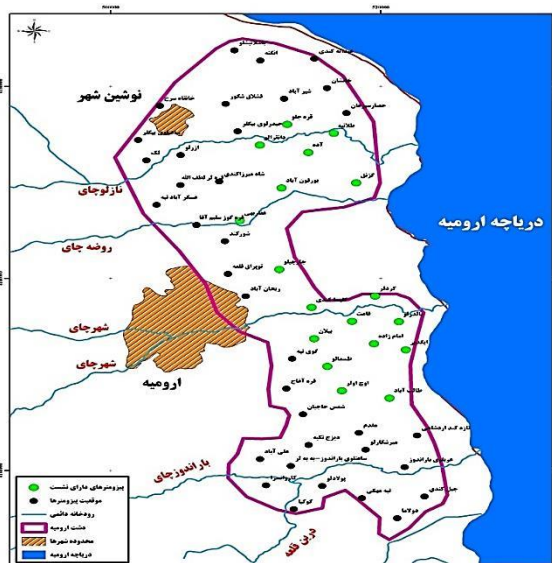
افزایش میزان بارندگی در اوایل دهه ۱۳۸۰ نیز به رغم بالا رفتن موقت سطح آب زیرزمینی، نتوانست به صورت دائمی باعث جلوگیری از افت سطح سفره شود. بنابراین، در حال حاضر تمامی محدوده مطالعاتی دشت ارومیه ممنوعه اعلام شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشهود است، طی دوره ۳۵ ساله (از ابتدای سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵) ثبت آمار دشت ارومیه، در مجموع ۴ متر افت در سطح آب زیرزمینی (به‌طور متوسط معادل ۰/۱۱ متر در سال) مشاهده شده است.



شکل ۴. تغییرات تراز آب زیرزمینی در محدوده دشت ارومیه در سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۵

پدیده فرونشست در دشت ارومیه

در تحقیق حاضر با تکیه بر پدیده رشد چاه یا لوله‌زایی در پیزومترهای آبخوان دشت ارومیه، پدیده فرونشست در دشت ارومیه بررسی شده است. با توجه به سوابق و اطلاعات حاصل از بازدیدهای دوره‌ای در سطح دشت ارومیه که نشان از وجود فرونشست در حواشی تعدادی از پیزومترهای حاشیه شرقی آبخوان ارومیه دارد، منجر به پدیده رشد چاه و لوله‌زایی شده است. مقادیر این فرونشست‌ها در اوایل سال ۱۳۹۵ اندازه‌گیری، ثبت و از عوارض ایجادشده تصاویری نیز تهیه شده است. در جدول ۱ مشخصات پیزومترهای بازدیدشده و میزان نشست نشست اندازه‌گیری شده در آنها و در شکل ۵ موقعیت این پیزومترها آورده شده است. در شکل ۶ نیز تصاویر اندازه‌گیری‌های انجام‌شده از این نشست‌ها ارائه شده است.



شکل ۵. پیزومترهای دارای نشست در محدوده دشت ارومیه

جدول ۱. مقادیر نشست در پیزومترهای دشت ارومیه (سال ۱۳۹۵)

ردیف	نام پیزومتر	utmX	utmY	میزان نشست (cm)	ردیف	نام پیزومتر	utmX	utmY	میزان نشست (cm)
۱	طالب‌آباد	۵۲۰۶۵۲	۴۱۴۷۵۶۵	۷	۱۰	کلیسا کندی	۵۱۴۸۸۴	۴۱۵۷۰۰۷	۱۰
۲	اوج اولر	۵۱۷۱۱۷	۴۱۴۸۳۲۰	۱۲	۱۱	جارچیلو	۵۱۲۴۸۷	۴۱۶۰۹۵۱	۵
۳	طسمالو	۵۱۶۰۴۵	۴۱۵۰۸۵۷	۶	۱۲	گزندق	۵۱۸۱۸۸	۴۱۶۹۹۴۰	۹
۴	بیلان	۵۱۵۰۷۴	۴۱۵۳۷۴۶	۱۴	۱۳	غفاربهی	۵۰۹۵۶۹	۴۱۶۶۰۱۱	۶
۵	قامت	۵۱۷۸۷۰	۴۱۵۵۵۶۴	۹	۱۴	دانقرالو	۵۱۱۰۶۴	۴۱۷۳۸۸۱	۱۷
۶	امامزاده	۵۱۹۴۹۲	۴۱۵۳۲۲۲	۱۱	۱۵	قره جلو	۵۱۳۰۶۸	۴۱۷۶۰۳۵	۱۳
۷	ایگدیر	۵۲۱۸۵۸	۴۱۵۲۵۸۷	۸	۱۶	طلاتیپه	۵۱۶۵۲۱	۴۱۷۵۱۰۲	۱۰
۸	بالدرلو	۵۲۱۳۴۴	۴۱۵۵۵۱۶	۱۳	۱۷	آده	۵۱۴۶۳۸	۴۱۷۳۱۰۲	۸
۹	کردلر	۵۱۹۵۸۴	۴۱۵۸۱۶۶	۸	۱۸	یورقون‌آباد	۵۱۲۶۶۶	۴۱۶۹۴۲۳	۱۱

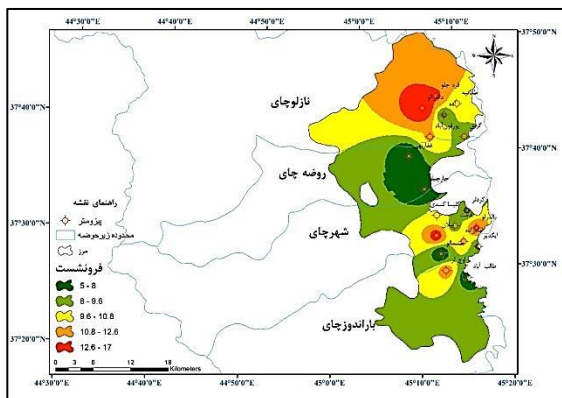




شکل ۶. تصاویری از بیزومترهای فرونشست

زیرزمینی در دشت ارومیه از غرب به شرق دشت است. با برداشت بیش از حد آب زیرزمینی سطح ایستابی لایه آبدار پایین رفته و فشار هیدرو استاتیک کاهش یافته است و در نتیجه، فرونشست‌هایی در قسمت‌هایی از دشت رخ داده است. با توجه به نقشه هم‌افت آب زیرزمینی دشت ارومیه (شکل ۸)، ملاحظه می‌شود که میزان افت سطح ایستابی آب در بعضی از قسمت‌های دشت مانند بخش‌های میانی و حوالی شهر ارومیه طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۵ تا ۴ متر در طول دوره آماری به ثبت رسیده است.

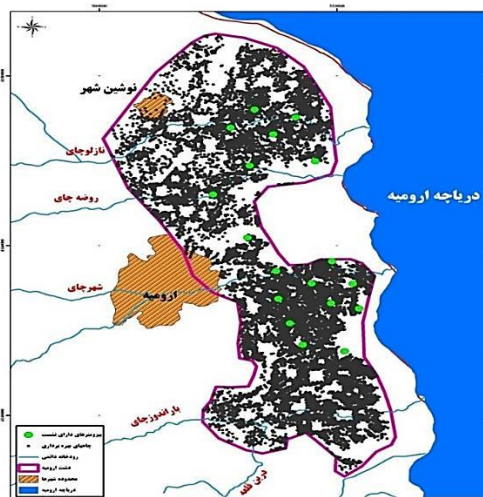
میزان فرونشست زمین در محدوده دشت ارومیه به صورت نقشه تهیه شد (شکل ۷). در کل میزان فرونشست از جهت مقادیر فرونشست در دشت ارومیه از ۵ تا ۱۷ سانتی‌متر متغیر است. بیشترین فرونشست در شمال و شمال غربی دشت (چاه دانقرقلو) و کمترین میزان، در مرکز دشت و در محدوده آبریز روضه‌چای اتفاق افتاده است. دشت ارومیه پایاب چهار حوضه آبریز نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای است که مطابق پهنه‌بندی شکل ۷ محدوده‌های نازلوچای (بیزومتر دانقرقلو) و شهرچای (بیزومتر بیلان) بیشترین مقدار فرونشست را دارند، در محدوده نازلوچای تا باراندوزچای از شمال به جنوب کاهش و کمترین آن، در چاه جارچیلو به میزان ۵ سانتی‌متر و غفاریهی به میزان ۶ سانتی‌متر در روضه‌چای است.



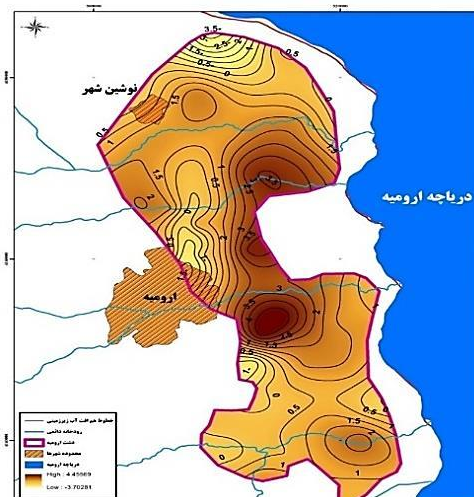
شکل ۷. پهنه‌بندی فرونشست زمین در دشت ارومیه

بررسی علل فرونشست زمین در دشت ارومیه برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی

جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ارومیه بیشتر از جهت جریان‌های سطحی و شیب توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند. مطالعات و آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد جهت جریان آب



شکل ۹. نقشه موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در محدوده دشت ارومیه در سال ۱۳۹۰



شکل ۸. نقشه خطوط هم‌افت (دو حد اقل سطح ایستابی) سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت ارومیه

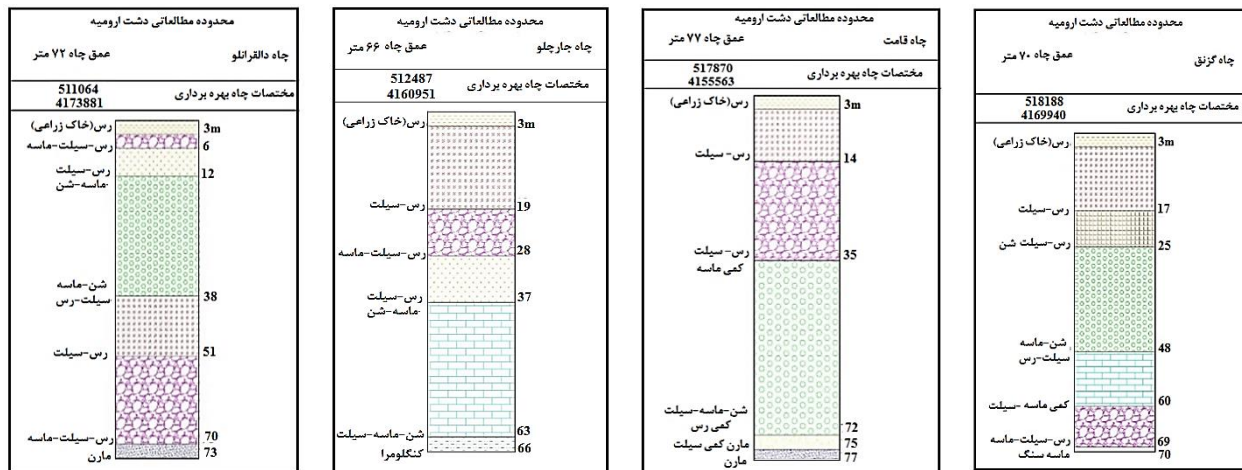
جنس زمین در محدوده دشت تا سنگ بستر با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در محدوده مطالعاتی و لوگ‌های حفاری حاصل از چاه‌های بهره‌برداری و پیژومتر، به علت رسوب‌گذاری ناشی از جریان‌های سیلابی در منطقه، جنس لایه آبدار در این محدوده بیشتر از نوع لایه‌های درهمی از شن دانه‌درشت تا ریز به همراه ماسه، سیلت و رس و در برخی موارد، به همراه کمی گراول و مقداری قلوه‌سنگ است. بیشترین ضخامت لایه‌های آبدار در قسمت شرقی دشت (حاشیه دریاچه ارومیه) در حدود ۷۰ تا ۷۷ متر است و کمترین ضخامت لایه‌های آبدار به علت زیاد بودن سنگ کف در سمت حاشیه‌های غربی دشت (پای ارتفاعات) به صورت نواری باریک از لایه اشباع سفره آب دارای ضخامت ناچیزی است. با پیگیری به‌عمل‌آمده از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی در خصوص دریافت لوگ چاه‌های پیژومتر موجود در محدوده مطالعاتی، تعداد ۸ حلقه از چاه‌های پیژومتر موجود در محدوده دشت ارومیه لوگ تا محدوده سنگ بستر بوده است.

در عملکرد نشست زمین تراکم برگشت‌ناپذیر در قسمت‌هایی از سفره که خاک‌های ریزدانه دارند، بیشتر رخ می‌دهد و بر اثر آن زهکشی آب از لایه ریزدانه به دلیل افت فشار هیدرولیکی (بر اثر افت تراز آب) انجام می‌گیرد. لایه‌های رسی ریزدانه، نسبت به خاک‌های با بافت درشت‌دانه بسیار تراکم‌پذیرند. در چنین حالتی افزایش تنش مؤثر موجب تراکم خاک می‌شود و آرایش دانه‌های خاک به هم می‌خورد. در نتیجه آرایش جدیدی در دانه‌بندی خاک رخ می‌دهد که

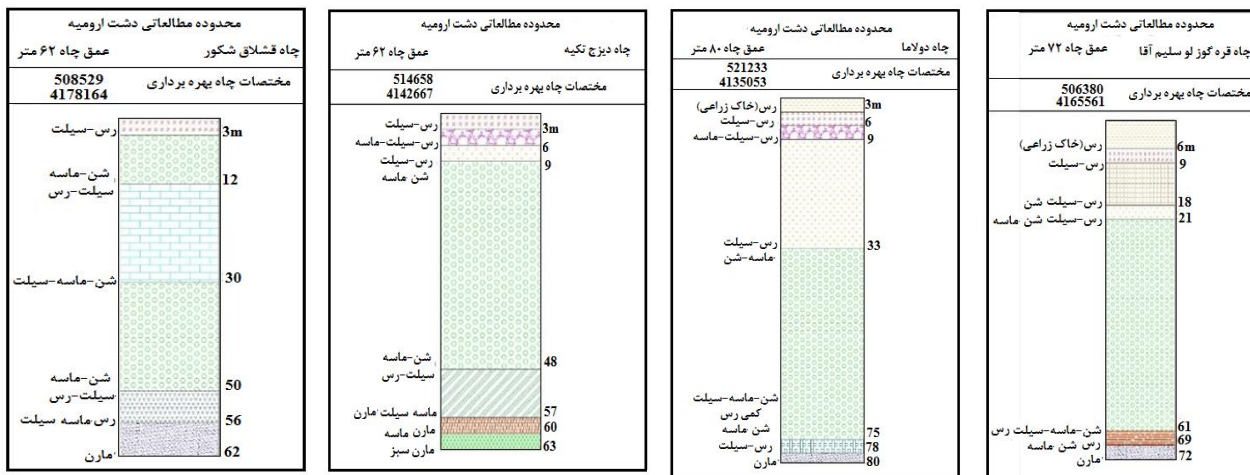
همان‌طور که در شکل ۹ مشهود است، در سال ۱۳۹۰ تعداد چاه‌های موجود در دشت ۲۲۵۷۱ حلقه و چشمه‌ها ۳۳ دهانه است که در حال حاضر، تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق افزایش یافته است. این چاه‌ها در محدوده پیژومترهایی که افت کرده‌اند، تراکم‌تر هستند و این موضوع افزایش برداشت آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی آب را در این قسمت‌ها توجیه می‌کند. با توجه به نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی در دشت ارومیه، مهم‌ترین علل به وجود آمدن نشست‌های زمین مربوط به برداشت بیش از حد آب زیرزمینی بوده است. با خروج آب از آبخوان دشت ارومیه که بیشتر با حفاری چاه‌ها صورت می‌گیرد، به تدریج فشار آب افت می‌کند و از آنجا که این فشار با توجه به وزن لایه‌های فوقانی سفره در حال تعادل است، با بهره‌برداری بیش از حد آب با عدم تعادل مواجه می‌شود و فرونشست رخ می‌دهد. با توجه به نمودار وضعیت سطح ایستابی در آبخوان دشت ارومیه، ملاحظه می‌شود که از سال ۱۳۸۳ تا کنون افت سطح ایستابی تداوم داشته است. با افزایش تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق (مجاز و غیرمجاز) در دشت سطح ایستابی در آبخوان هرساله کاهش نشان می‌دهد و از آنجا که رودخانه‌های موجود در منطقه به علت برداشت زیاد آب از این رودخانه‌ها برای مصارف کشاورزی نمی‌توانند آب مورد برداشت را تأمین کنند، تخلیه سفره دشت ارومیه بسیار بیشتر از تغذیه آن است. افت سطح آب زیرزمینی در دشت باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آنها شده است؛ بنابراین حتی اگر سطح آب زیرزمینی دوباره بالا بیاید، جبران این خسارت‌ها را نخواهد کرد (شکل ۹).

قامت)، درصد بافت ریزدانه اعم از رسی و سیلتی بیشتر از چاه‌هایی است که در خارج از این محدوده قرار گرفته‌اند (چاه‌های قشلاق شکور، قره گوزسلیم آقا، دیزج تکیه و دولاما).

باعث کاهش حجم و ضخامت عمودی لایه و درنهایت، نشست زمین می‌شود. بررسی لوگ چاه‌های دریافتی در محدوده مطالعه‌شده نیز گویای این مطلب است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد در چاه‌هایی که در محدوده فرونشست کرده قرار دارند (چاه‌های دانقرالو، گزلق، جارچیلو و



شکل ۱۰. چینه‌شناسی چاه‌های موجود در محدوده فرونشست دشت ارومیه (چاه‌های محدوده فرونشست)

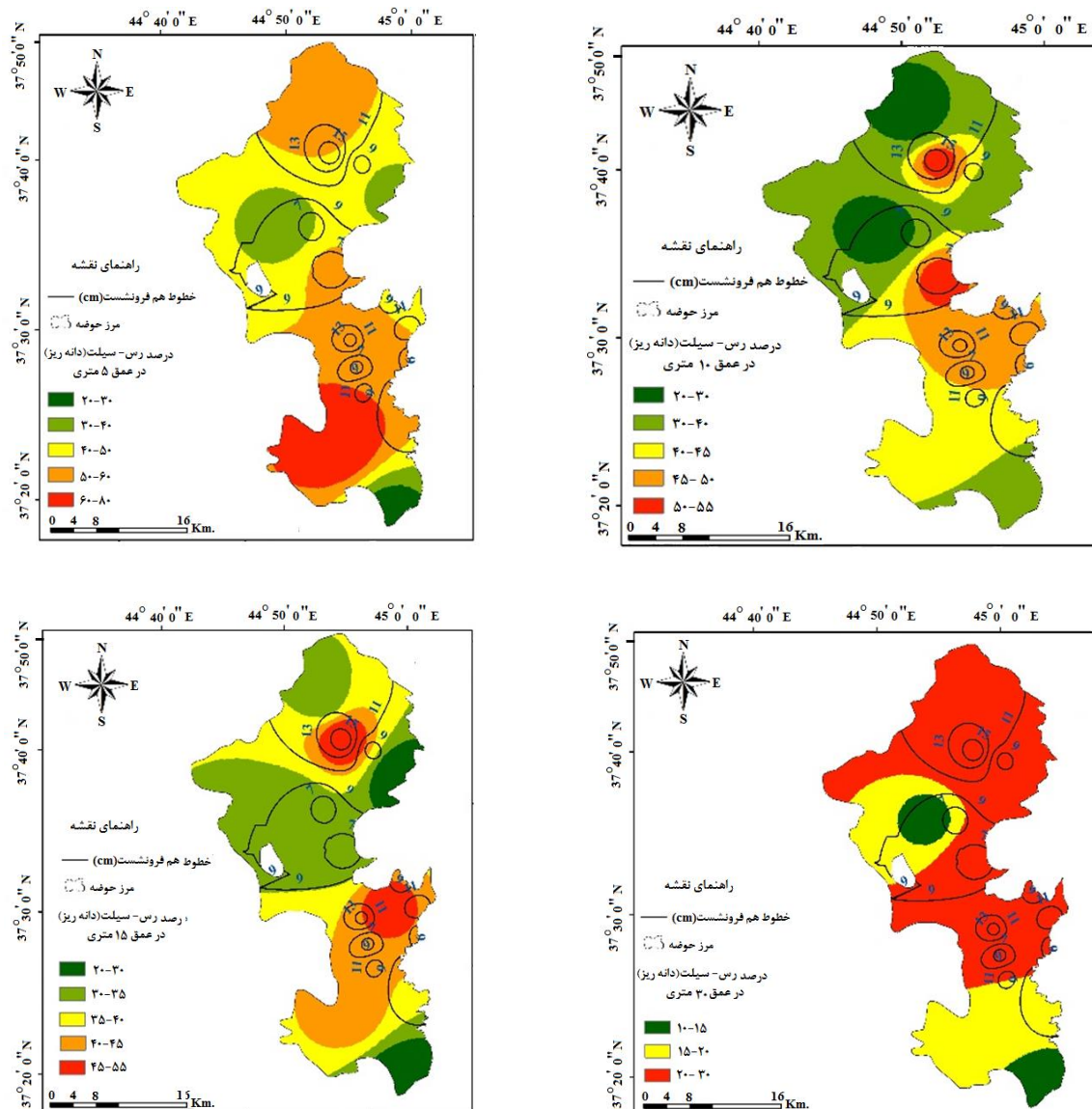


شکل ۱۱. چینه‌شناسی چاه‌های موجود در محدوده فرونشست دشت ارومیه (چاه‌های خارج از محدوده فرونشست)

یافته‌اند. مطابق شکل ۱۲ و لاگ چاه‌های منطقه، به طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که توزیع بافت ریزدانه آبرفتی در دشت از سطح به سمت عمق با افزایش توزیع همراه است. همچنین، گذر رودخانه‌های نازلوچای تا شهرچای در این دشت توجیه مناسبی برای فراوانی رس و سیلت در بخش شمالی دشت در عمق‌های کم باشد.

توزیع رسوبات ریزدانه (رس و سیلت)

شکل ۱۲ میزان توزیع بافت ریزدانه را در دشت ارومیه نشان می‌دهد. به طور کلی، در جهت عمق دو نوع توزیع وجود دارد؛ نوع اول مربوط به عمق‌های ۵ تا ۱۵ متری بوده که از درصد توزیع نسبتاً زیادی برخوردار است. نوع دوم مربوط به عمق ۳۰ متری است که از توزیع ریزدانه با درصد کم تشکیل

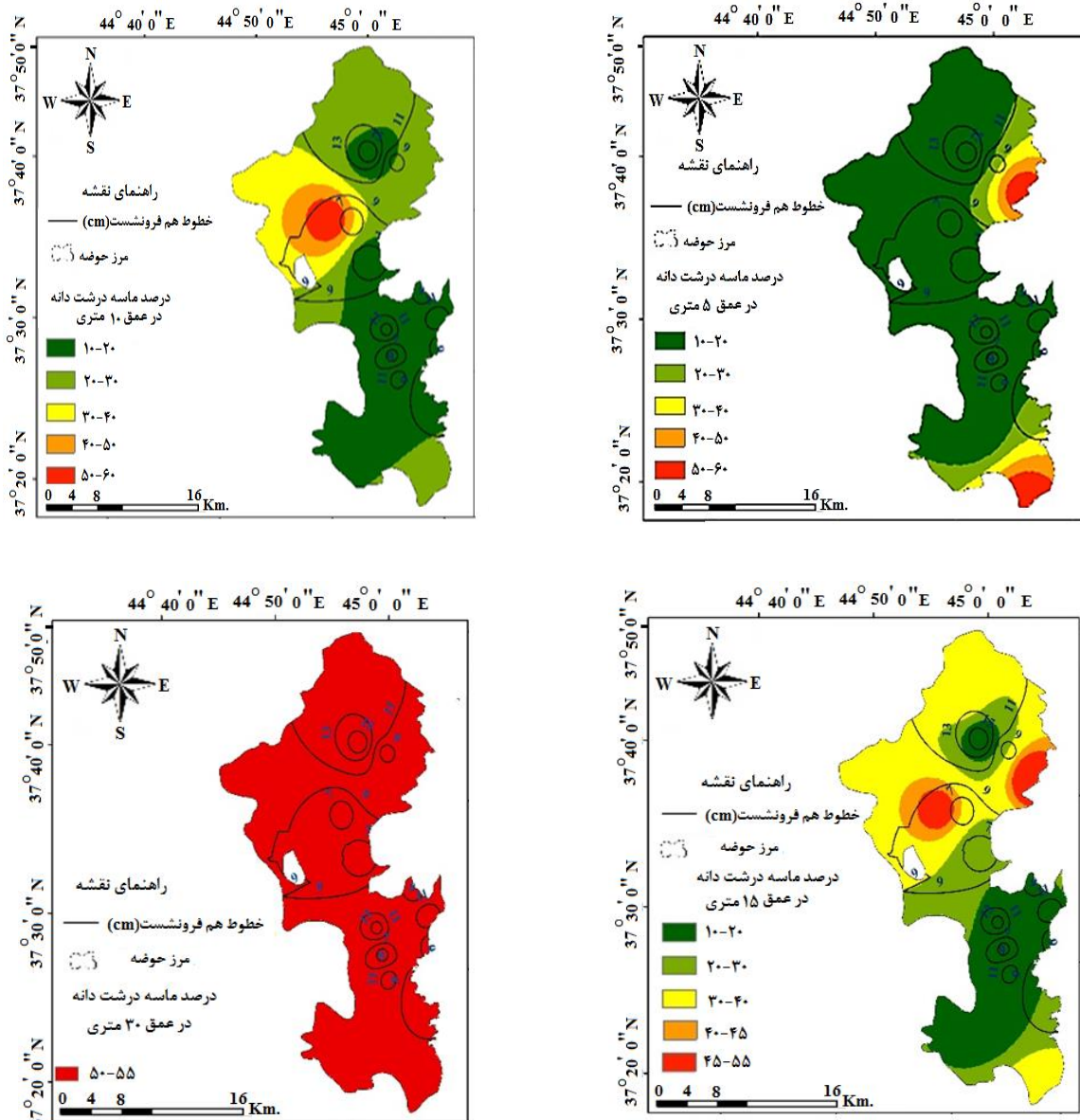


شکل ۱۲. نقشه‌های توزیع رس سیلت در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ متری در محدوده مطالعه‌شده

و همچنین، توزیع نسبتاً زیاد ماسه در افزایش عمق در نیمه‌های شمالی و در محل‌هایی که فرونشست زمین زیاد بوده، قابل توجه است. وجود لاگ چاه‌ها تا عمق ۷۰ متری و دانه‌بندی در اعماق مختلف گواه خوبی بر این مورد می‌تواند باشد. اول مربوط به عمق‌های ۵ تا ۱۵ متری بوده که از درصد توزیع نسبتاً زیادی برخوردار است. نوع دوم مربوط به عمق ۳۰ متری است که از توزیع ریزدانه با درصد کم تشکیل یافته‌اند. مطابق تصاویر لاگ چاه‌ها منطقه به طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که توزیع بافت ریزدانه آبرفتی در گستره مطالعه‌شده از سطح به سمت عمق (تقریباً تا ۳۰ تا ۳۵ متری) با افزایش توزیع همراه است.

توزیع رسوبات درشت‌دانه (ماسه)

نقشه‌های توزیع ماسه از روی اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی موجود در محدوده مطالعه‌شده با استفاده از تکنیک درون‌یابی GIS تهیه شد (شکل ۱۳). در عمق ۵ متری ماسه در قسمت‌های شرقی دشت ارومیه نسبت به مناطق غربی از درصد نسبتاً کمتری برخوردار است. میزان تغییرات توزیع ماسه در عمق ۱۰ متری در بخش غربی بوده که با افزایش توزیع همراه است. میزان تغییرات توزیع ماسه در عمق ۱۵ متری درصد ماسه بخش شمالی افزایش یافته و در عمق ۳۰ متری ماسه به طور یکنواخت و با درصد زیاد توزیع یافته است. به طور کلی، با افزایش عمق، میزان ماسه افزایش یافته



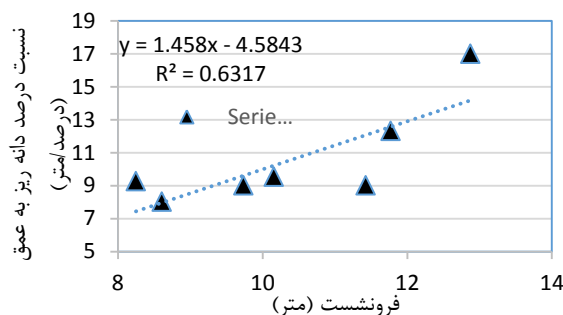
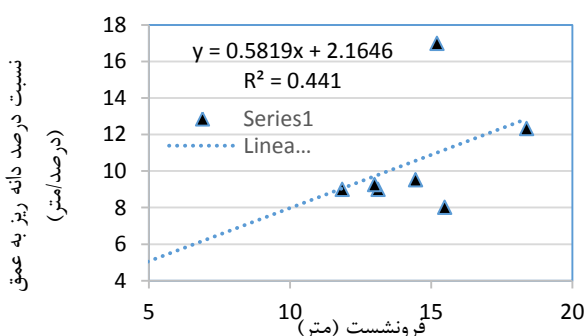
شکل ۱۳. نقشه‌های توزیع ماسه در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ متری در محدوده مطالعه‌شده

چاه‌ها میزان فرونشست برآورد شد. سپس، نمودار همبستگی بین نسبت درصد ریزدانه و درشت‌دانه خاک به عمق با میزان فرونشست ترسیم شد. مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد ریزدانه خاک میزان فرونشست زیاد و با افزایش درصد درشت‌دانه خاک، میزان فرونشست کاهش یافته است. عدد همبستگی بین مقدار نسبت و فرونشست در دانه‌ریز، برابر ۰/۶۳ و برای درشت‌دانه، ۰/۴۴ است.

نسبت میزان تجمع درصد ریز دانه و درشت‌دانه خاک محدوده دشت ارومیه برای چاه‌ها به دست آمده و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که از لاگ چاه‌ها نمایان است، با افزایش عمق چاه، درصد درشت‌دانه‌ها نسبت به ریزدانه‌ها بیشتر شده است. با استفاده از روش درون‌یابی در محیط GIS ابتدا رستری میزان فرونشست چاه‌های بررسی‌شده تهیه شد و با استفاده از دستور ex برای لاگ

جدول ۲. مقادیر نسبت دانه ریز و دانه درشت به عمق چاه

ردیف	UTMX	UTMY	نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه		ردیف	UTMX	UTMY	نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه	
			نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه	نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه				نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه	نسبت (دانه ریز / دانه درشت) / عمق چاه
۱	۵۱۷۸۷۰	۴۱۵۵۵۶۴	۹/۷	۱۳/۱	۵	۵۰۶۳۸۰	۴۱۶۵۵۶۱	۸/۶	۱۵/۴
۲	۵۱۱۰۶۴	۴۱۷۳۸۸۱	۱۲/۹	۱۵/۲	۶	۵۰۸۵۲۹	۴۱۷۸۱۶۴	۱۱/۸	۱۸/۳
۳	۵۱۸۱۸۸	۴۱۶۹۹۴۰	۱۱/۴	۱۱/۸	۷	۵۲۱۲۳۳	۴۱۳۵۰۵۳	۸/۳	۱۳
۴	۵۱۲۴۸۷	۴۱۶۰۹۵۱	۱۸/۳	۴/۷	۸	۵۱۴۶۵۸	۴۱۴۲۶۶۷	۱۰/۲	۱۴/۴

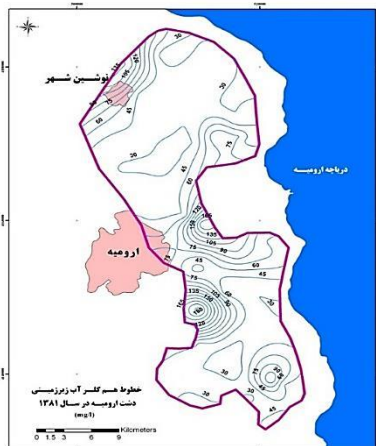
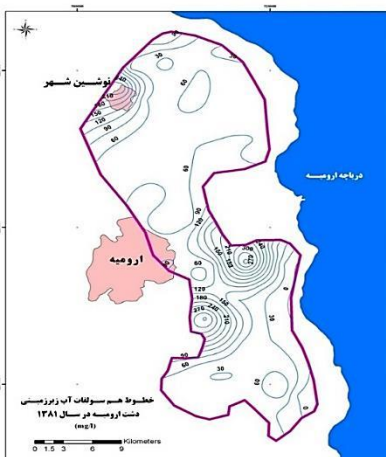
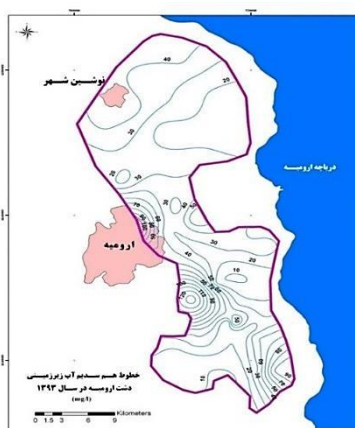


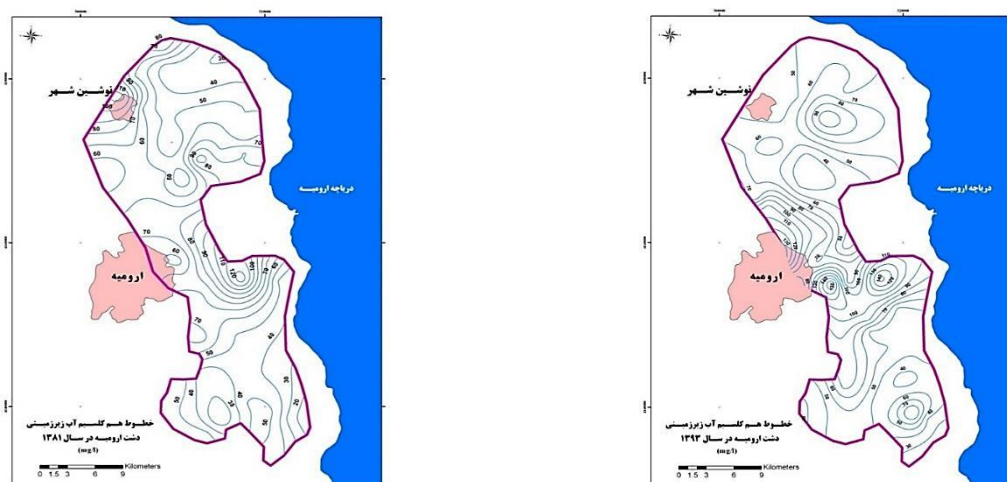
شکل ۱۴. میزان همبستگی بین نسبت درصد دانه ریز / درشت خاک به عمق و میزان فرونشست

داشته ، به طوری که متوسط این پارامتر طی این مدت افزایش داشته است. مقادیر TDS در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۸۱ در جنوب دشت ثابت بوده، ولی در شمال دشت کاهش یافته و در قسمت‌های میانی دشت و اطراف شهر ارومیه افزایش شدیدی داشته است، به طوری که متوسط آن در دشت افزایش نشان می‌دهد. از نظر مقادیر کلر نیز مقدار آن در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۸۱ در جنوب حوضه ثابت بوده، ولی در شمال حوضه کاهش یافته است و در اطراف شهر ارومیه افزایش نشان می‌دهد، به طوری که متوسط آن در کل دشت ثابت بوده و تغییری نکرده است. از نظر مقادیر کلسیم نیز تغییرات در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۸۱ در جنوب دشت تقریباً ثابت بوده، ولی در شمال دشت کاهش یافته و در قسمت‌های میانی دشت افزایش زیادی را نشان می‌دهد. به طوری که این مقدار در کل دشت افزایش یافته و کیفیت بیشتر چاه‌ها با سرعت زیادی در حال بدتر شدن است که این تغییرات در حاشیه دریاچه بسیار وخیم‌تر و ملموس‌تر است.

پارامترهای کیفی

نقشه‌های هم‌تراز پارامترهای کیفی (EC، منیزیم، کلسیم، سدیم، سولفات، کلر و TDS) منابع آب زیرزمینی دشت ارومیه برای سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۳ ترسیم شده و در شکل ۱۵ ارائه شده است. میزان EC در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳ افزایش داشته است که از دلایل این امر، می‌توان به خشک‌سالی‌های اخیر و روند خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییراتی که در اکوسیستم‌های منطقه ایجاد شده است، اشاره کرد. از نظر مقادیر منیزیم، در سال ۱۳۹۳ مقدار این پارامترها در قسمت‌های جنوبی حوضه بیشتر شده، ولی در شمال دشت مقدار آن کاهش یافته که البته این تغییرات کم و ناچیز است. از نظر مقادیر سدیم، در سال ۱۳۹۳ مقدار این پارامتر در شمال و جنوب دشت کاهش یافته، ولی در قسمت‌های میانی دشت و اطراف شهر ارومیه افزایش یافته است. به طوری که میانگین آن در کل دشت تغییر محسوسی نکرده است. از نظر مقادیر سولفات نیز در سال ۱۳۹۳ مقدار این پارامترها در قسمت‌های میانی حوضه و اطراف شهر ارومیه افزایش یافته، ولی در شمال و جنوب حوضه کاهش





شکل ۱۵. خطوط هم تراز پارامترهای کیفی دشت ارومیه

راهکارهای مقابله با فرونشست

برداشت بیش از حد مجاز را می‌توان نتیجه نبود مدیریت درست منابع آب در بخش برداشت و از سوی دیگر، به هدر رفتن حجم عظیمی از آب در نتیجه نادرست بودن شیوه‌های کشاورزی و مصارف صنعتی و شهری یا به‌طور خلاصه، مصرف نامتناسب دانست. فرونشست‌ها و پیامدهای ناخوشایند آن، شوربختانه سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند و به‌سختی می‌توان آنها را کند و مهار کرد. شالوده هر پروژه ملی برای رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش‌بینی، تشخیص و پایش استوار است که مدیریت درست منابع آب، کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نقش کلیدی در جلوگیری از رخداد این پدیده دارد. فرایند پیش‌بینی و تشخیص بر پایه داده‌های حاصل از چاه‌پیمایی، آزمون‌های ژئوفیزیکی و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری میزان نشست خاک و تخلخل مفید و پتانسیل تراکم‌پذیری آن است. از سوی دیگر، همان‌گونه که بیان شد، پایش، مکان‌یابی و اندازه‌گیری میزان فرونشست می‌تواند با روش‌های نوین نقشه‌برداری و دورسنجی انجام پذیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد آبخوان ارومیه دارای سفره آزاد است که تقریباً در بخش وسیعی از آبخوان گسترش دارد. افزایش برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از آبخوان باعث شده که جهت جریان آبخوان تغییر کند. به بیانی، به جای آنکه آب به سمت دریا حرکت کند، به عکس شده و به سمت غرب و مرکز آبخوان حرکت می‌کند. بررسی‌های هیدروشمیایی

عوارض کاهش آب‌های زیرزمینی در دشت ارومیه

طبق بررسی‌های انجام‌گرفته، افت کیفیت منابع آب زیرزمینی و افزایش شوری خاک و تخریب محیط زیست، افزایش هزینه‌ها و کاهش تولیدات کشاورزی که منجر به گسترش فقر و بیکاری شده، بروز مشکلات و بحران‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و همچنین، مهاجرت کشاورزان به شهرها، از مهم‌ترین عوارض کاهش آب‌های زیرزمینی در محدوده دشت ارومیه تعیین شده است. همچنین، افت سطح آب‌های زیرزمینی مشکلاتی همچون خشک شدن چاه‌های آب، کاهش دبی رودخانه‌ها و آب دریاچه ارومیه، تنزل کیفیت آب، افزایش هزینه پمپاژ و استحصال آب و نشست زمین را به دنبال داشته است. پمپاژ بیش از حد از سفره آب زیرزمینی، پیامدهای زیست‌محیطی فراوانی همچون تغییر کیفیت آب زیرزمینی، افزایش مصرف انرژی استحصال آب زیرزمینی، افزایش آسیب‌پذیری دشت نسبت به خشک‌سالی، نشست زمین و ایجاد درز و شکاف در سطح زمین به دنبال دارد. همچنین، برداشت بی‌رویه از چاه‌های کشاورزی اطراف دریاچه ارومیه علاوه بر کاهش سطح آب زیرزمینی و شوری بیشتر آب، باعث حرکت آب زیرزمینی به سمت چاه‌های اطراف مؤثر بوده است. کاهش آب دریاچه ارومیه خسارت‌های متعددی همچون بالا رفتن سطح غلظت بیش از حد دریاچه، به خطر افتادن زندگی آرتمیای، مرگ‌ومیر پرندگان، شوره‌زار شدن زمین‌های اطراف را باعث می‌شود. روند تشدید کیفیت کاهش سطح دریاچه ارومیه موجب پایین آمدن سطح کیفیت آب، لب‌شور و غیر قابل برداشت شدن آن در چاه‌های حاشیه دریاچه شده است.

چاه‌های حفرشده به این طریق (که در بسیاری موارد تعداد آن‌ها از چاه‌های مجاز بیشتر است) مبادرت ورزید. در غیر این صورت و با روند موجود، ضمن از دست دادن بخش عظیمی از منابع آب برای همیشه، پدیده‌هایی نظیر فروچاله‌ها و فرونشست‌های ناحیه‌ای با ابعاد نامعلوم و با آسیب‌های جبران‌ناپذیر، باز هم به وقوع خواهد پیوست.

منابع

- [1]. AlKhamis R, Karimi Nasab S, Ariana F. Investigation of the effect of subsidence resulting from groundwater exploitation on the wall pipe of water wells, *Journal of Water and Sewerage*. 2006; 60. [Persian]
- [2]. Ashraf H, Cawood F. Geospatial subsidence hazard modelling at Sterkfontein Caves. *South Africa J Geomat*. 2015; 4(3):273-284.
- [3]. Bell F.G. Subsidence, ground engineer's reference book, F.G. Bell, ed., 1st Ed., Butterworths and Co. Publishers. 1987.
- [4]. DehghanSoraki Y, Sharifikia M, Sahebi MR. A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. *GISci Remote Sens*. 2015; 52(1):58-77.
- [5]. Firdaus HS, Prasetyo Y, Diyanah D. 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). Published in E3S Web of Conferences. 2018; 73: p 03022.
- [6]. Galloway DL, Jones DR, Ingebritsen SE. Land subsidence in the United States. *US Geological Survey*. 1999; 1182.
- [7]. Ghorbanzadeh O, Rostamzadeh H, Blaschke T, Gholaminia K, Aryal J. A new GISbased data mining technique using an adaptive neurofuzzy inference system (ANFIS) and kfold cross validation approach for land subsidence susceptibility mapping, *Natural Hazards*, Springer. 2018; 94:497-517.
- [8]. Ganguli M. Groundwater withdrawal and land subsidence: a study of Singur Block, West Bengal, India. *Intern. J. Geom. Geo. Sci*; 2011. p465.
- [9]. Ghorbanzadeh O, Feizizadeh B, Blaschke T.

نشان می‌دهد تغییر جهت جریان باعث نشده است که آب دریا وارد آبخوان شود و به بیانی، ارتباط هیدرولیکی آبخوان با دریا قطع شده و یا بسیار ضعیف است. طی دوره ۳۵ ساله مطالعه‌شده در این تحقیق (از ابتدای سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵) ثبت آمار دشت ارومیه، در مجموع ۴ متر افت در سطح آب زیرزمینی (به‌طور متوسط معادل ۰/۱۱ متر در سال) مشاهده شده است. بر اثر بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و پایین رفتن سطح این ذخایر آبی در محدوده دشت ارومیه، شاهد فرونشست در حواشی تعدادی از پیژومترهای حاشیه شرقی آبخوان ارومیه بوده‌ایم که منجر به پدیده رشد چاه و لوله‌زایی شده است. مقادیر این فرونشست‌ها در اوایل سال ۱۳۹۵ اندازه‌گیری و ثبت شده که این مقادیر از ۵ تا ۱۸ سانتی‌متر در محدوده دشت ارومیه متغیر بوده است. فرونشست زمین در محدوده دشت ارومیه به‌طور کلی ناشی از دلایل عمده‌ای همچون برداشت بیش از اندازه آب زیرزمینی با ایجاد افت مداوم سطح آب، انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و انقباض خاک‌های رسی باشد. از عوامل مهم دیگری که می‌توانند در ایجاد پدیده فرونشست در محدوده دشت ارومیه مؤثر باشند، تغییر کاربری زمین، احداث و یا بارگذاری سازه‌های مهندسی و زهکشی خاک‌های آلی است. شرایطی همچون فرایندهای تکتونیکی رخداد در منطقه، نفوذ ریزش‌ها و وجود لایه‌های نامقاوم در تشکیلات رسوبی زیرین، منجر به توسعه پدیده‌های فرونشستی در این دشت شده است. با تهیه نقشه‌های توزیع ماسه از روی اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی برای عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ متری مشاهده شد که با افزایش عمق میزان دانه‌درشت افزایش و فرونشست افزایش می‌یابد. در بررسی توزیع ریزدانه‌ها مشخص شد که چاه‌ها در عمق‌های ۵ تا ۱۵ متری ریزدانه‌ها افزایش یافته است. در عمق بیشتر از ۳۰ متری ریزدانه‌ها کاهش و درشت‌دانه‌ها افزایش یافته است. در بررسی رابطه همبستگی بین نسبت درصد ریزدانه/درشت‌دانه خاک به عمق و فرونشست مشاهده شد که با افزایش درصد ریزدانه خاک میزان فرونشست زیاد و با افزایش درصد درشت‌دانه خاک میزان فرونشست کاهش یافته است. به‌عنوان راهکار درازمدت بر مبنای تجربه سایر کشورها چاره‌ای جز اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب وجود ندارد و تا زمان باقی است باید به‌سوی آن حرکت کرد؛ اما تا آن هنگام و به‌عنوان راهکار فوری و اضطراری دست‌کم می‌توان به جلوگیری از ادامه فعالیت استفاده‌کنندگان غیرمجاز و

- program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. *Can. Journal Civ. Eng.* 2001; 28(3):452464.
- [16]. Moradi A, Amadedin S, Arkhi S, Rezaee. Land subsidence analysis using radar interferometry technique, well information Geotechnical and piezometric (Case study: Tehran urban area 18). *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards.* 2020; 7(1): 153176.
- [17]. Navas JM, Telfer TC, Ross LG. Separability indexes and accuracy of neurofuzzy classification in geographic information systems for assessment of coastal environmental vulnerability. *Ecol. Inform.* 2012; 12:43–49.
- [18]. Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Quere´taro valley, Me´xico. *Eng Geol.* 2006; 84(3):143–160.
- [19]. Rahnema M. B, Moafi H. Investigation of land subsidence due to groundwater with draw in Rafsanjan plain using GIS Software, Iran, *Geotech. Geol. Eng.* 2010; 2. 241246.
- [20]. Skenderas D, Loupasakis C, Papoutsis I, Alatza S, Kontoes C. Investigation of Land Subsidence Phenomena in the wider Tirana (Albania) Region by applying Persistent Scatterer Interferometry Techniques, EGU2112199. 2021.
- [21]. Waltham A. C, Waltham T. *Ground Subsidence*, Pub. Blackie, Michigan University, USA; 1989.
- Multicriteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into GISbased sensitivity and uncertainty analyses. *Geomat, Nat. Hazards Risk.* 2017; 9(1):127–151.
- [10]. Huijun Li1, Lin Zhu, Gaoxuan Guo, Yan Zhang, Zhenxue Dai, Xiaojuan Li, Linzhen Chang, Pietro Teatini. Subsidence due to groundwater pumping: hazard probability assessment through the combination of Bayesian model and fuzzy set theory. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2021; 21: 823–835.
- [11]. Karimi Nasab S. Research report of the project to investigate the causes of rupture of wall pipes of drinking water wells, Bahonar University of Kerman. 2004. [Persian]
- [12]. Lofgren B. E. Analysis of stresses causing land subsidence, in *Geological Survey Research 1968*, U.S. Geol. Survey Prof. 1968; 600: 219B225.
- [13]. Li H, Zhu L, Guo G, Zhang Y, Dai Z, Li X, Chang L, Teatini P. Land subsidence due to groundwater pumping: hazard probability assessment through the combination of Bayesian model and fuzzy set theory. 2021; 21: 823535.
- [14]. Lanari.P, Lundgren P, Manzo F, Casu F. Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California, *Geophysical Research Letters*; 2004. p 31.
- [15]. Mousavi S. M, Shamsai A, EI Naggar M. H, Khamehchian M. A GPSbased monitoring