

فرونشست ناشی از پمپاژ متغیر آب زیرزمینی در وضعیت لایه‌بندی خاک با کاربرد تابع تأثیر و داده‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی

محمدصادق آقاییار^۱، امیر ملک‌پور^{۲*} و بهنام شفیعی ثابت^۳

چکیده

از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست زمین، می‌توان به پمپاژ بی‌رویه آب زیرزمینی و خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی متفاوت با توجه به لایه‌بندی آبخوان در نواحی پیرامون چاه‌های تحت پمپاژ اشاره کرد. در تحقیق حاضر، یک نرم‌افزار کاربردی توسعه داده شد که خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی را از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی فراخوانی و از روش ترکیبی جدید شامل کاربرد تابع تأثیر به همراه معادلات تعیین شعاع تأثیر سطح آب زیرزمینی ناشی از پمپاژ متغیر، به منظور برآورد فرونشست ناشی از چندین چاه در مدت معین استفاده می‌کند. در پایان نتایج محاسبات انجام شده به صورت لایه اطلاعات جدید به سیستم اطلاعات جغرافیایی اضافه می‌شود. نرم‌افزار توسعه یافته در یک مطالعه موردی در غرب گیلان مورد آزمون قرار گرفت؛ به این ترتیب که ناحیه مورد مطالعه با توجه به موقعیت قرارگیری چاه‌ها به دو بخش تقسیم، سپس بر حسب مقادیر پمپاژ گزارش شده از چاه‌های منطقه، شش سناریو مختلف پمپاژ (در محدوده ۳۰ تا ۱۲۰ مترمکعب بر روز) اعمال شد. اعتبارسنجی مقادیر فرونشست حاصل از نرم‌افزار ارائه شده با نتایج مطالعات میدانی بیانگر عملکرد قابل قبول نرم‌افزار است. همچنین طبق نتایج به دست آمده در منطقه مورد مطالعه، با افزایش پمپاژ و افزایش عمق فرونشست پیرامون چاه‌ها تا ۳۰ سانتی‌متر مساحت ناحیه تحت فرونشست در منطقه افزایش یافته، اما افزایش بیشتر عمق فرونشست تأثیری بر مساحت ناحیه تحت فرونشست نداشته و حداکثر ۷۰٪ از مساحت ناحیه پیرامون چاه‌ها تحت تأثیر فرونشست است. طبق نتایج، رابطه خطی با همبستگی قابل قبول بین میانگین دبی پمپاژ آب زیرزمینی در بازه زمانی ده سال و حداکثر عمق فرونشست برقرار است. همچنین حداکثر عمق نهایی فرونشست بیش از هر عاملی تحت تأثیر لایه‌بندی خاک می‌باشد؛ در حالی که میزان افزایش فرونشست بیشتر متأثر از میزان افزایش پمپاژ است. در نهایت، میزان تغییرات فرونشست منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ده سال کمتر از مقدار حاصل در دامغان در مدت پنج سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برداشت آب زیرزمینی، مدل رایانه‌ای، نشست تحکیمی، نرم‌افزار MATLAB.

ارجاع: آقاییار م. ص. ملک‌پور ا. و شفیعی ثابت ب. ۱۳۹۹. فرونشست ناشی از پمپاژ متغیر آب زیرزمینی در وضعیت لایه‌بندی خاک با کاربرد تابع تأثیر و داده‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۱۵۳-۱۶۲.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

* نویسنده مسئول: malekpour.amir@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹

مقدمه

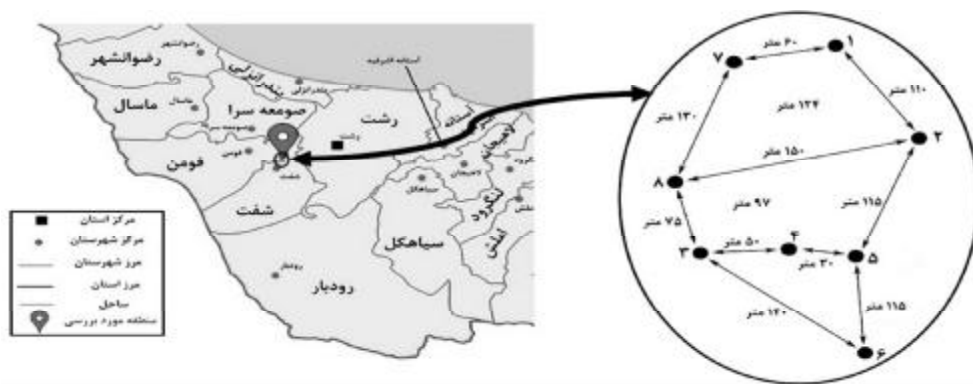
از مهم‌ترین عوامل فرونشست زمین برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی است که در بعضی از نقاط دنیا همچون کشور چین، از آن به‌عنوان عامل اصلی فرونشست زمین، یاد می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۰۸). از پیامدهای فرونشست زمین، می‌توان به ایجاد ترک در سطح زمین، تخریب ابنیه، آسیب به خطوط انتقال آب قرار گرفته در داخل زمین، تغییر شیب رودخانه‌ها، و ریزش جداره‌چاه‌ها اشاره کرد (موسایی و دوستی، ۱۳۹۳). همچنین از دیگر تبعات منفی فرونشست زمین آسیب‌پذیری در برابر سیل (به‌دلیل کاهش نفوذپذیری زمین پس از فرونشست) است (اورتگا- گوئررو و همکاران، ۱۹۹۹). در ایران از جمله مناطقی که در اثر افت شدید سطح آب زیرزمینی دچار پدیده فرونشست شده‌اند، می‌توان به دشت اراک، نهاوند، خمین، گلپایگان، نطنز و ابرکوه اشاره کرد (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴؛ یمانی و همکاران، ۱۳۸۸؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ عالی‌پور اردی و همکاران، ۱۳۹۶). به طور مشابه، در نقاط مختلف جهان نیز موارد متعددی از فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی گزارش شده است (گالووی و بربی، ۲۰۱۱؛ چانگ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به کاربرد گسترده سیستم اطلاعات جغرافیایی در تحلیل خصوصیات زمین، تاکنون تحقیقات مختلف در زمینه به‌کارگیری آن در تحلیل فرونشست انجام شده است. موراکامی و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی فرونشست و با استفاده از یک معادله تجربی پیش‌بینی فرونشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی در آینده را انجام دادند. ژو و همکاران (۲۰۰۳) با کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار MODFLOW فرونشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی را بر اساس تخمین میزان فرونشست در محل چاه‌ها و درون‌یابی فرونشست در نقاط دیگر پیش‌بینی کردند. در برخی دیگر از تحقیقات مرتبط با کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، داده‌های حاصل از رادارهایی همچون In-sar بدون انجام تحلیل ژئوتکنیکی و با استفاده از روش‌هایی همچون تداخل‌سنجی برای پایش فرونشست به کار گرفته شد (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ دی پرکل و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به لزوم اعمال تحلیل ژئوتکنیکی دقیق برای برآورد فرونشست، رن و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تابع تأثیر و با تعریف پارامتر زاویه کشیدگی، تأثیر پمپاژ از چاه و

تغییرات مخروط افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین را پیش‌بینی کردند. کاربرد این روش در گذشته در برآورد فرونشست ناشی از برداشت معادن زیرزمینی زغال‌سنگ گزارش شده است (آلوارز فرناندز و همکاران، ۲۰۰۵؛ یی و چنگ، ۲۰۰۹). با وجود دقت روش ارائه شده در اعمال نقش لایه‌بندی خاک، عدم احتساب تغییرات سطح فریاتیک ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی در حالت پمپاژ متغیر از چند چاه به‌عنوان ضعف روش پیشنهادی آن‌ها محسوب می‌شود.

در تحقیق حاضر، کاربرد تابع تأثیر برای تحلیل دقیق فرونشست در ترکیب با روش‌های تعیین شعاع تأثیر سطح آب زیرزمینی (در حالت پمپاژ متغیر از چاه‌های متعدد) به‌عنوان یک نوآوری در مقایسه با مطالعات گذشته ارائه می‌شود. همچنین توسعه یک نرم‌افزار کاربردی دارای رابط گرافیکی کاربر با قابلیت دریافت و تحلیل لایه‌های اطلاعات مرتبط با محاسبات فرونشست از سیستم اطلاعات جغرافیایی از دیگر نکات مهم تحقیق حاضر است. نرم‌افزار رایانه‌ای توسعه داده شده برای اعتبارسنجی در منطقه‌ای واقع در غرب گیلان با سناریوهای مختلف پمپاژ آزموده و با نتایج یکی از مطالعات فرونشست در کشور ایران مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، واقع در حد فاصل جاده سراوان به فومن در استان گیلان است. شکل ۱ موقعیت نسبی چاه‌های مورد بررسی و موقعیت جغرافیایی منطقه را نشان می‌دهد. در این پژوهش خصوصیات ژئوتکنیکی و هیدرولیکی نمونه‌های خاک برداشت شده از محل ۸ چاه، در آزمایشگاه مکانیک خاک استان گیلان مورد آزمایش قرار گرفت. سپس داده‌های حاصل به‌صورت یک فایل ArcGIS جهت فراخوانی به نرم‌افزار توسعه داده شده در تحقیق (با عنوان CALS_SVD به زبان MATLAB) آماده شد. در جدول ۱ طول جغرافیایی E و عرض جغرافیایی N، و مقادیر متوسط خصوصیات هیدرولیکی و فیزیکی خاک در محل هر چاه شامل ضریب ذخیره ویژه (Ss)، هدایت هیدرولیکی (K)، نسبت تخلخل اولیه خاک (e0)، عمق اولیه تراز آب زیرزمینی نسبت به سطح زمین (h0)، شاخص فشردگی خاک (Cc)، وزن مخصوص مرطوب (γ) و وزن مخصوص اشباع خاک (γsat) ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مقادیر متوسط خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی خاک در محل ۸ چاه مورد بررسی

شماره چاه	E (°)	N (°)	S _s	K (m/sec)	e ₀	C _c	γ (gr/cm ³)	γ _{sat} (gr/cm ³)
1	49/41801	37/21334	0/19	8/10*۱۰ ⁻⁷	0/82	0/20	15/11	19/62
2	49/41833	37/21238	0/19	۷/۳۵*۱۰ ⁻⁷	0/89	0/20	14/52	19/13
3	49/41685	37/21145	0/31	1/44*۱۰ ⁻⁶	0/64	0/12	16/58	20/60
4	49/41742	37/21147	0/14	9/71*۱۰ ⁻⁷	0/81	0/13	14/42	18/84
5	49/41776	37/21143	0/18	8/57*۱۰ ⁻⁷	0/76	0/14	15/11	19/33
6	49/41765	37/21039	0/18	1/59*۱۰ ⁻⁶	0/80	0/20	14/81	19/13
7	49/41737	37/21317	0/21	4/74*۱۰ ⁻⁷	0/71	0/15	۱۶/۰۹	۲۰/۴۰
8	49/4167	37/21213	0/13	5/97*۱۰ ⁻⁷	0/66	0/10	۱۶/۶۸	۲۰/۵۰

در این روش، ابتدا ناحیه مخروط افت سطح آب زیرزمینی به چهار لایه تقسیم شد (شکل ۲- الف) و با استفاده از روابط نشست تحکیمی (ترزاقی، ۱۹۴۳) میزان نشست به ازای افت سطح آب در هر لایه محاسبه و با جمع مقادیر به دست آمده، حداکثر نشست تحکیمی در محل چاه برآورد می‌شود. معادله (۱) فرونشست را بر حسب فاصله شعاعی از چاه به صورت فاکتور تأثیر فرونشست $S(i)$ ارائه می‌کند.

روش تابع تأثیر در تعیین فرونشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی

در این روش، ابتدا ناحیه مخروط افت سطح آب زیرزمینی به چهار لایه تقسیم شد (شکل ۲- الف) و با استفاده از روابط نشست تحکیمی (ترزاقی، ۱۹۴۳) میزان نشست به ازای افت سطح آب در هر لایه محاسبه و با جمع مقادیر به دست آمده، حداکثر نشست تحکیمی در محل چاه برآورد می‌شود. معادله (۱) فرونشست را بر حسب فاصله شعاعی از چاه به صورت فاکتور تأثیر فرونشست $S(i)$ ارائه می‌کند.

$$S(i) = S/S_0 = e^{-p^{(r_i-1)/R})^2} - e^{-p^{(r_i/R)^2}} \quad (1)$$

که در آن S_0 حداکثر فرونشست در محل چاه، S میزان فرونشست در فاصله r_i از چاه (مربوط به لایه i ام)، $S(i)$ فاکتور تأثیر فرونشست لایه i ام، r_{i-1} : شعاع حلقه کوچکتر (برای کوچک‌ترین لایه، شعاع چاه به عنوان r_{i-1} در نظر گرفته می‌شود) و R : شعاع تأثیر فرونشست در سطح زمین (با استفاده از معادله (۲)) است.

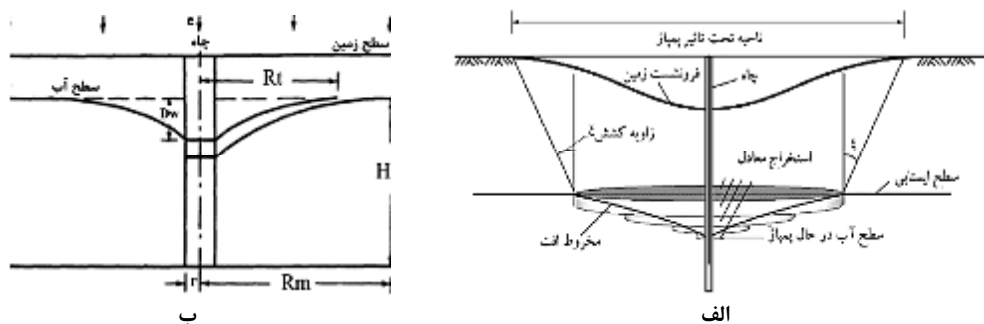
$$R = R_i + h_0 \tan x \quad (2)$$

در شکل ۲- ب پارامترهای مورد استفاده در تعیین شعاع تأثیر (معادلات (۳) و (۴)) مربوط به هر یک از چاه‌های تحت پمپاژ توسط روابط تجربی چو (۱۹۹۴) که امکان انجام محاسبات به صورت ماندگار و غیرماندگار را فراهم می‌کند، نشان داده شده است.

$$R_m = \sqrt{\frac{Q}{pe}} \quad (3)$$

$$R_i = R_m \sqrt{1 - \exp\left(\frac{-4KH}{S_s R_m^2 t}\right)} \quad (4)$$

که R_m بیشینه شعاع تأثیر (شعاع تأثیر نهایی پس از پمپاژ طولانی‌مدت) بر حسب متر، Q دبی متوسط پمپاژ روزانه بر حسب متر مکعب بر روز، e میانگین بارش سالانه بر حسب متر بر روز، H ضخامت آبخوان بر حسب متر، R_i شعاع تأثیر متغیر با زمان بر حسب متر، t زمان بر حسب روز و S_s و K (طبق توضیحات جدول ۱) است.



شکل ۲- مکانیزم روش تابع تأثیر (رن و همکاران، ۲۰۱۴) در تعیین فرونشست زمین ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی (الف) پارامترهای روش چو (۱۹۹۴) در تعیین شعاع تأثیر (ب)

با استفاده از معادلات (۶) تا (۸) (جین و اوروز، ۲۰۱۸) فاصله نسبی آن‌ها از یکدیگر تعیین شد.

$$a = \sin^2(\Delta f / 2) + \cos f_1 \cdot \cos f_2 \cdot \sin^2(\Delta y / 2) \quad (۶)$$

$$b = 2a \tan 2(\sqrt{a} \cdot \sqrt{1-a}) \quad (۷)$$

$$Dis \tan ce = R_{Earth} b \quad (۸)$$

که در آن $\Delta\varphi$ و $\Delta\lambda$ به ترتیب اختلاف عرض و طول جغرافیایی دو نقطه بر حسب درجه، R_{Earth} شعاع زمین برابر با ۶۳۷۱ کیلومتر و Distance فاصله بین هر دو چاه دلخواه هستند. همچنین عبارت $\text{atan}2$ تانژانت معکوس چهار کوارانت، که عبارت است از زاویه بین خط واصل دو چاه با جهت مثبت محور X که مقدار این زاویه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت مثبت است. شکل ۳ فلوچارت مراحل محاسبات در نرم‌افزار توسعه داده شده CALS_SVD را نشان می‌دهد.

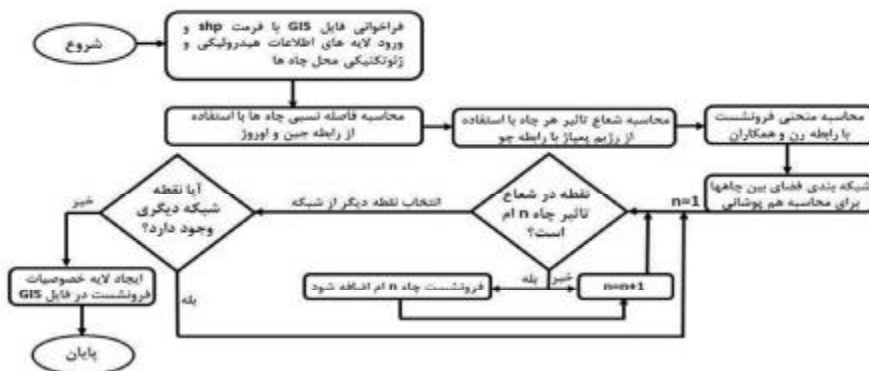
پس از محاسبه شعاع تأثیر، از رابطه پیشنهادی بودهو و آدیامان (۲۰۱۰) برای تعیین تغییرات سطح آب پیرامون چاه در محدوده شعاع تأثیر استفاده شد (معادله (۵)).

$$h_w = -(a x^2 + h_0) \quad (۵)$$

که در آن h_w افت سطح آب در چاه بر حسب متر، α ضریب ثابت بر اساس نتایج آزمایش پمپاژ در منطقه مورد مطالعه به‌طور میانگین برابر $0.025/x$ فاصله هر نقطه روی شعاع تأثیر چاه از مبدا بر حسب متر (مبدا عبارت است از دورترین نقطه روی شعاع تأثیر نسبت به محل چاه) است.

هم‌پوشانی تأثیر چاه‌های تحت پمپاژ و سناریوهای مورد بررسی

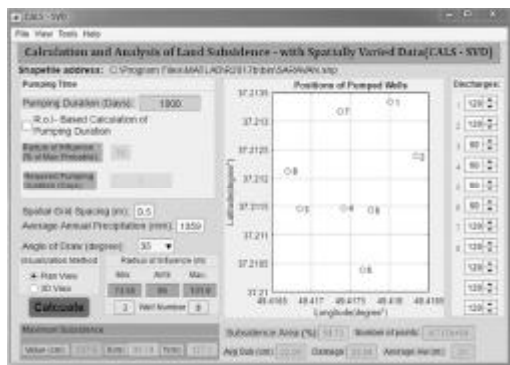
برای تعیین اثر هم‌پوشانی چاه‌ها، از چاه‌ها، به‌عنوان مبدأ انتخاب و بر اساس طول و عرض جغرافیایی دیگر چاه‌ها و



شکل ۳- فلوچارت برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده (CALS_SVD)

برای بررسی تأثیر الگوهای مختلف پمپاژ، ابتدا منطقه مورد بررسی با توجه به فواصل چاه‌ها به دو ناحیه تقسیم‌بندی شد. چاه‌های شماره ۱، ۲، ۷ و ۸ در ناحیه A،

شکل ۴ تصویری از رابط گرافیکی کاربر مربوط به نرم‌افزار رایانه‌ای توسعه داده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۴- صفحه اصلی برنامه رایانه‌ای CALS_SVD توسعه داده شده در تحقیق حاضر

و چاه‌های شماره ۳، ۴، ۵ و ۶ در ناحیه B قرار گرفت. طبق مطالعات میدانی و تحقیقات گذشته (محمدی فتیده، ۱۳۸۲؛ زحمتکش، ۱۳۹۷) حداکثر دبی پمپاژ در منطقه، ۱۲۰ مترمکعب بر روز در نظر گرفته شد. با توجه به اهداف شرکت آب منطقه‌ای استان در مدیریت و محدودسازی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و بررسی تأثیر آن بر فرونشست زمین، شش سناریوی مختلف (جدول ۲) بر اساس مطالعات میدانی و تعیین حداقل و حداکثر برداشت از چاه‌ها در نظر گرفته شد. این سناریوها شامل دبی‌های حداکثر، متوسط (نصف برداشت حداکثر) و حداقل (یک چهارم برداشت حداکثر) در بازه زمانی ده سال از آغاز بهره‌برداری چاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- دبی پمپاژ از چاه‌ها در هر ناحیه و نام‌گذاری سناریوها بر حسب دبی

شماره سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دبی ناحیه A	۱۲۰	۱۲۰	۶۰	۶۰	۱۲۰	۳۰
دبی ناحیه B	۱۲۰	۶۰	۱۲۰	۶۰	۳۰	۱۲۰
نام سناریو	A120B120	A120B60	A60B120	A60B60	A120B30	A30B120

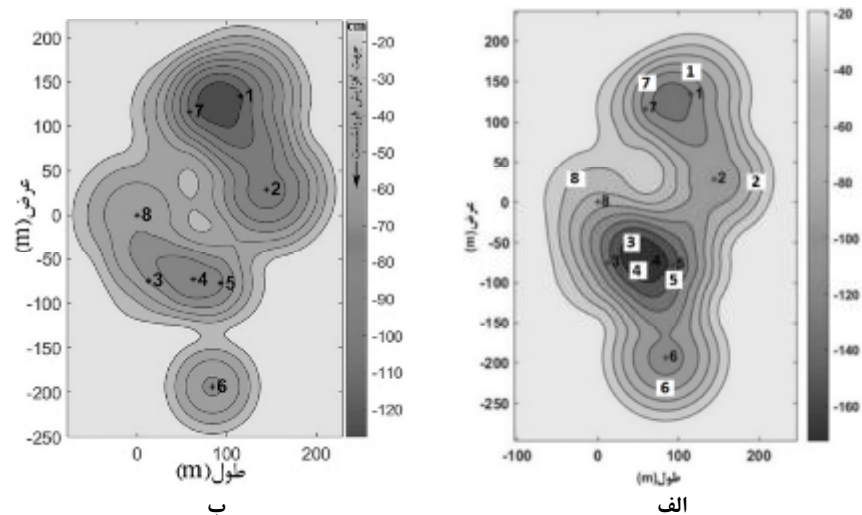
نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، بر اساس نتایج گزارش‌های آب منطقه‌ای، مطالعات میدانی و پرسشنامه‌های تهیه شده نتایج مدل‌سازی فرونشست حاصل از حداکثر پمپاژ (A120B120 به عنوان سناریوی غالب در منطقه) با مقادیر فرونشست اندازه‌گیری شده (از طریق اندازه‌گیری ارتفاع بالامدگی دیواره چاه‌ها) مقایسه شد (مستطیل‌های سفید با شماره چاه در شکل ۵-الف). اعتبارسنجی نرم‌افزار بر اساس موقعیت قرارگیری مستطیل‌های سفید روی منحنی تراز فرونشست و میزان نزدیکی نتایج فرونشست اندازه‌گیری شده به مقادیر برآورد شده انجام شد. نتایج نشان داد که فرونشست اندازه‌گیری شده نزدیک به مقدار برآورد شده و اندکی کمتر که با توجه به عدم اعمال رژیم پمپاژ حداکثر در تمام زمان‌ها (در شرایط واقعی) عملکرد مدل قابل قبول است. شکل ۵ منحنی‌های تراز فرونشست سناریوهای A120B120 و A120B60 را نشان می‌دهد. طبق نتایج شکل ۵-الف، در سناریوی A120B120 حداکثر فرونشست به میزان ۱۷۲/۴ سانتی‌متر و موقعیت وقوع آن در نزدیکی چاه شماره ۴ و مختصات نسبی (۷۰/۶۲-، ۶۰/۰۶ متر) نسبت به نقطه مبنا (چاه شماره ۸) به دست آمد. در این حالت میانگین فرونشست در منطقه مورد

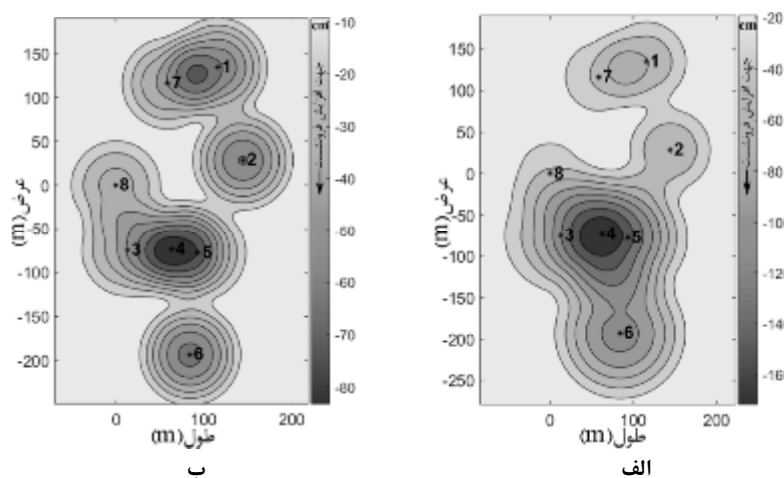
بررسی ۳۵ سانتی‌متر است. علاوه بر این، با اعمال سناریوی A120B120، ۶۸٪ از مساحت منطقه مورد مطالعه در معرض وقوع فرونشست قرار گرفت. همچنین شعاع تأثیر فرونشست پیرامون هر چاه در محدوده ۹۱ تا ۱۰۳ متر به دست آمد، که بیانگر هم‌پوشانی شعاع تأثیر همه چاه‌ها با چاه‌های مجاور خود به ازای اعمال سناریوی A120B120 است. شکل ۵-ب منحنی‌های تراز فرونشست مربوط به سناریوی A120B60 را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از مدل، به ازای اعمال سناریوی A120B60 حداکثر فرونشست برابر با ۱۲۷/۶ سانتی‌متر و در مختصات (۹۲/۰۶، ۱۲۶/۹ متر) نسبت به چاه مبنا رخ می‌دهد. در این حالت میانگین فرونشست در منطقه مورد مطالعه ۲۲/۱ سانتی‌متر و ۵۸/۷٪ از مساحت منطقه در معرض فرونشست قرار گرفت؛ در نتیجه سناریوی A120B60 در مقایسه با سناریوی A120B120 بیانگر کاهش ۹/۳٪ مساحت ناحیه در معرض فرونشست و کاهش ۳۶/۹٪ میانگین فرونشست است. در این سناریو حداقل شعاع تأثیر فرونشست ۷۳/۶ متر در چاه ۳، تا حداکثر ۱۰۱/۹ متر در چاه ۸ به دست آمد. در شکل ۶-الف به ازای اعمال سناریوی A60B120، حداکثر فرونشست برابر با ۱۷۱/۸ سانتی‌متر در فاصله (۷۴/۶۷-

۵۷/۸٪ از مساحت کل منطقه به دست آمد.

۶۳/۲۱ متر) نسبت به چاه مبنا، میانگین فرونشست ۲۴ سانتی‌متر و مساحت منطقه تحت فرونشست به میزان



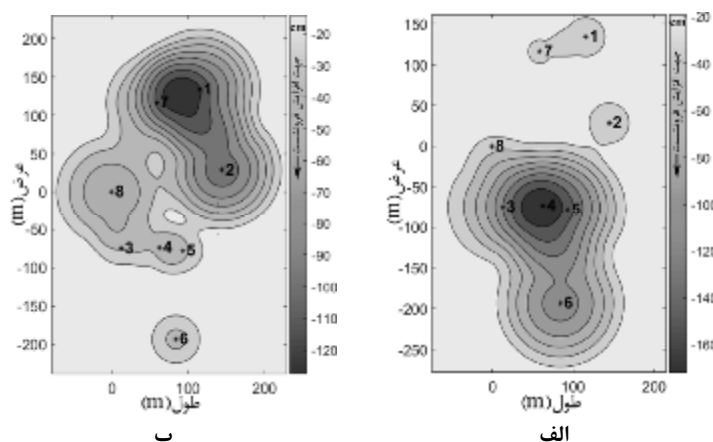
شکل ۵- منحنی‌های تراز فرونشست زمین (برحسب سانتی متر) به ازای سناریوهای A120B60 و A120B120 در برنامه رایانه‌ای CALS_SVD سناریوی A120B120 برای اعتبارسنجی مدل (الف) سناریوی A120B60 (ب)



شکل ۶- منحنی‌های تراز فرونشست زمین (برحسب سانتی متر) به ازای سناریوهای A60B60 و A60B120 در برنامه رایانه‌ای CALS_SVD سناریوی A60B120 (الف) سناریوی A60B60 (ب)

به دلیل قرارگیری چاه ۸ در مجاورت و شعاع تأثیر یکی از دو ناحیه دارای حداکثر پمپاژ است. با اعمال سناریوی A60B60 (شکل ۶- ب) حداکثر فرونشست برابر با ۸۳/۲ سانتی‌متر در موقعیت (۷۵/۱۳، -۶۴/۳۱ متر) نسبت به چاه مبنا، ۴۷/۹۶٪ از مساحت کل منطقه در معرض فرونشست و میانگین فرونشست برابر با ۱۱ سانتی‌متر به دست آمد. مقادیر به دست آمده بیانگر کاهش ۶۸/۵٪ میانگین فرونشست نسبت به سناریوی A120B120 و میانگین شعاع تأثیر چاه‌ها ۷۳/۴ متر است.

این مقادیر نشان‌دهنده کاهش ۳۱/۵٪ میانگین فرونشست نسبت به سناریوی A120B120 است. همچنین تغییرات شعاع تأثیر فرونشست از میزان حداقل ۷۱/۹ متر در چاه ۷ تا حداکثر ۱۰۳/۳ متر در چاه ۶ به دست آمد. در مقایسه نتایج شکل ۶- الف و شکل‌های ۵- الف و ۵- ب مشخص می‌شود که چاه شماره ۸ (واقع در ناحیه A) به دلیل قرارگیری در موقعیت میانی چاه‌های منطقه، تحت تأثیر کاهش پمپاژ (تنها در یکی از دو ناحیه مورد بررسی)، تغییرات ناچیزی در فرونشست نشان می‌دهد. این مسأله



شکل ۷- منحنی‌های تراز فرونشست زمین (برحسب سانتی متر) به ازای سناریوهای A120B30 و A30B120 در برنامه رایانه‌ای CALS_SVD سناریوی A120B30 (الف) سناریوی A30B120 (ب)

برای درک روند تأثیر دبی پمپاژ آب زیرزمینی بر میزان فرونشست در بازه زمانی ده ساله، میانگین حداکثر فرونشست پیرامون چاه‌ها به ازای هریک از دبی‌های مورد مطالعه در این تحقیق تعیین شد (شکل ۸- ب). همان‌گونه که در شکل ۸- ب مشاهده می‌شود، بین دبی پمپاژ آب زیرزمینی و میانگین حداکثر فرونشست پیرامون چاه‌ها رابطه‌ای خطی با همبستگی قابل قبول برقرار است. شکل ۹ تأثیر دبی پمپاژ آب زیرزمینی بر میانگین شعاع تأثیر فرونشست به ازای سناریوهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دبی پمپاژ شعاع تأثیر فرونشست می‌یابد؛ اما میزان افزایش شعاع تأثیر با افزایش دبی کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که میانگین شعاع تأثیر محدود به ۱۰۵ متر است و افزایش دبی پمپاژ بر میزان آن تأثیرگذار نیست.

در جدول ۳ مقادیر حداکثر عمق فرونشست بر حسب سانتی‌متر پیرامون ۸ چاه مورد مطالعه به ازای دبی‌های پمپاژ به کار رفته در تحقیق حاضر ارائه شده است.

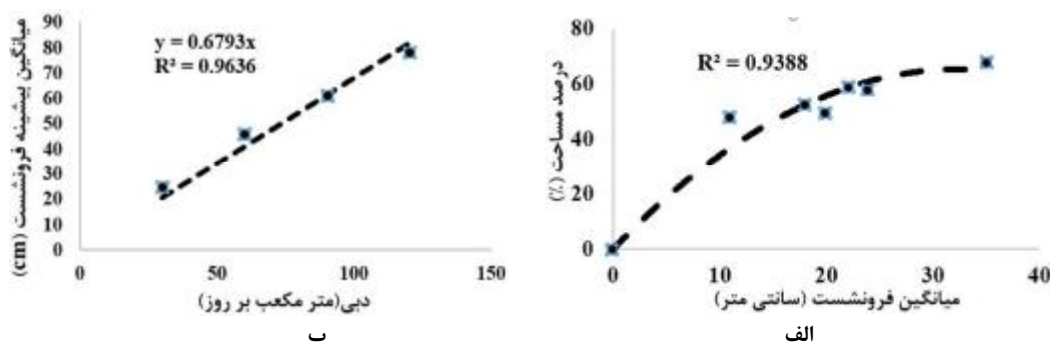
طبق نتایج، حداکثر فرونشست همواره پیرامون چاه شماره ۶ که در دورترین موقعیت از شعاع تأثیر چاه‌های دیگر قرار گرفته رخ می‌دهد. بنابراین با وجود تأثیر میزان پمپاژ چاه‌ها بر فرونشست در چاه‌های مجاور، نقش خصوصیات خاک در محل هر یک از چاه‌ها در ایجاد حداکثر عمق فرونشست از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکل ۱۰- الف اختلاف درصد فرونشست در ۸ چاه با افزایش دبی پمپاژ به میزان ۷۵٪ (از ۳۰ به ۱۲۰ مترمکعب بر ساعت) را نشان می‌دهد. منحنی خط چین نشان‌دهنده درصد افزایش فرونشست به ازای افزایش دبی پمپاژ است.

در شکل ۷- الف نتایج سناریوی A120B30 نشان داده شده است. در این حالت حداکثر فرونشست برابر با ۱۲۷/۶ سانتی‌متر در موقعیت (۱۰۱/۹، ۵۲/۷۴ متر) نسبت به چاه مبنا، ۵۲/۴٪ از مساحت کل منطقه تحت فرونشست و میانگین فرونشست برابر ۱۸/۱ سانتی‌متر به دست آمد. این نتایج بیانگر ۲۲/۹٪ کاهش مساحت ناحیه تحت فرونشست و ۴۸٪ کاهش عمق میانگین فرونشست نسبت به سناریوی A120B120 است. در این حالت شعاع تأثیر فرونشست بین ۵۲/۷ متر در چاه ۳ تا ۱۰۱/۹ متر در چاه ۸ تغییر می‌کند. با اعمال سناریوی A30B120 (شکل ۷- ب) حداکثر فرونشست برابر با ۱۷۱/۷ سانتی‌متر و در موقعیت (۷۴/۶۷، ۶۲/۷۴ متر) نسبت به چاه مبنا به دست آمد. در سناریوی A30B120، ۴۹/۳٪ از مساحت کل منطقه تحت فرونشست و میانگین فرونشست ۲۰ سانتی‌متر برآورد شد، که در مقایسه با سناریوی A120B120 کاهش ۲۷/۵٪ مساحت ناحیه تحت فرونشست و کاهش ۴۲/۸٪ میانگین فرونشست دیده می‌شود.

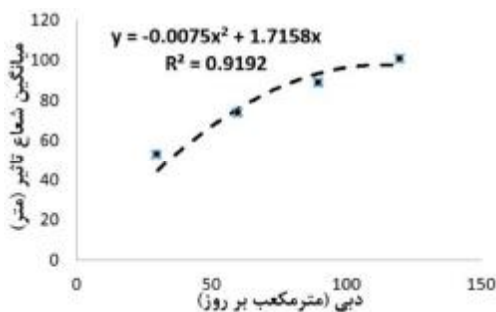
همچنین شعاع تأثیر فرونشست از ۵۲/۷ متر در چاه ۷ تا ۱۰۳ متر در چاه ۶ متغیر است. از نتایج مهم قابل برداشت از تحلیل‌های انجام شده رابطه میانگین عمق فرونشست و درصد مساحت ناحیه تحت فرونشست در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۸- الف). طبق نتایج به دست آمده با افزایش میانگین عمق فرونشست به مقادیر بیش از ۳۰ سانتی‌متر، میزان تغییرات مساحت ناحیه تحت فرونشست کاهش می‌یابد و کمتر از ۷۰٪ ناحیه مورد مطالعه را شامل می‌شود.

در استان گیلان نشان می‌دهد. طبق نتایج، در منطقه دامغان میزان افزایش فرونشست به ازای کاهش سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی پنج سال بیش از نرخ تغییرات منطقه مورد مطالعه تحقیق حاضر در بازه زمانی ده سال است. با توجه به وجود خاک‌های ریزدانه رسی در منطقه مورد مطالعه و وقوع نشست‌های تحکیمی به‌عنوان رفتار غالب فرونشست، تفاوت فرونشست این منطقه در مقایسه با دامغان را می‌توان به تغذیه مجدد آب زیرزمینی و جبران سریع پائین افتادگی سطح آب زیرزمینی ناشی از میزان زیاد بارش در استان گیلان و کاهش رفتار تحکیمی نسبت داد.

مشاهده می‌شود به ازای ۷۵٪ افزایش دبی پمپاژ در محل همه چاه‌های مورد مطالعه، درصد افزایش عمق فرونشست تقریباً ثابت و نزدیک به ۷۰٪ می‌باشد؛ به عبارت دیگر، افزایش درصد فرونشست با افزایش دبی پمپاژ کمتر تحت تأثیر خصوصیات خاک در محل چاه‌ها و بیشتر تحت تأثیر درصد افزایش دبی پمپاژ است. در یکی از مطالعات انجام شده، پرهیزکار و همکاران (۲۰۱۵) آبخوان دشت دامغان را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند. شکل ۱۰- ب، مقایسه‌ای میان نتایج کاربرد اطلاعات حاصل از پرهیزکار و همکاران (۲۰۱۵) در مدل رایانه‌ای تحقیق حاضر را در مقایسه با نتایج حاصل از منطقه مورد مطالعه



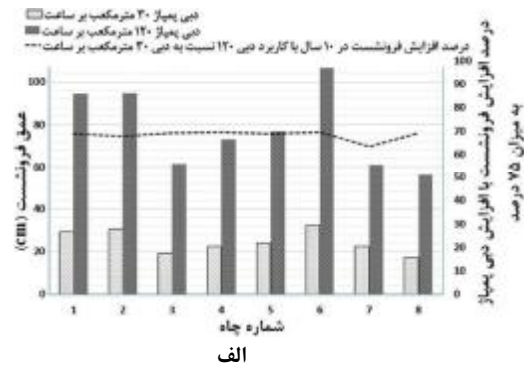
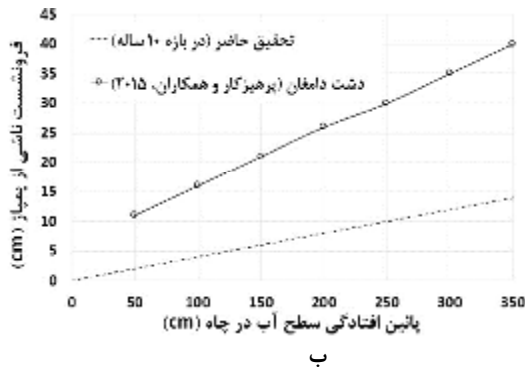
شکل ۸- تغییرات مساحت منطقه تحت فرونشست در مقابل میانگین عمق فرونشست منطقه مورد مطالعه (الف) تغییرات میانگین بیشینه فرونشست پیرامون چاه‌ها در مقابل میانگین دبی پمپاژ آب زیرزمینی در یک دوره ده ساله (ب)



شکل ۹- تغییرات میانگین شعاع تأثیر فرونشست پیرامون چاه‌ها در مقابل دبی پمپاژ

جدول ۳- حداکثر عمق فرونشست (برحسب سانتی‌متر) پیرامون ۸ چاه مورد بررسی

دبی پمپاژ (m ³ /day)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۳۰	۲۹/۴	۳۰/۵	۱۹	۲۲/۴	۲۴	۳۲/۳	۲۲/۴	۱۷/۳
۶۰	۵۵/۳	۵۶/۶	۳۵/۶	۴۱/۷	۴۴/۶	۶۰/۲	۴۰/۲	۳۲/۳
۹۰	۷۷	۷۸/۲	۴۹/۷	۵۸/۵	۶۲/۲	۸۴/۷	۵۲/۵	۴۵/۲
۱۲۰	۹۴/۶	۹۴/۹	۶۱/۳	۷۲/۱	۷۶/۷	۱۰۶/۳	۶۱/۱	۵۶/۱



شکل ۱۰- افزایش درصد فرونشست با افزایش دبی پمپاژ به میزان ۷۵٪ در چاه‌های مختلف (الف) فرونشست ناشی از افت سطح آب در چاه منطقه مورد مطالعه در مقایسه با دشت دامغان (پرهیزکار و همکاران، ۲۰۱۵) (ب)

خصوصیات خاک (لایه‌بندی) در محل چاه‌ها بر حداکثر عمق فرونشست بیش از نقش درصد افزایش پمپاژ است.

برای ادامه تحقیقات با استفاده از مدل نرم‌افزاری ارائه شده، توسعه کاربرد آن در تحلیل احتمالاتی فرونشست با کاربرد روش‌هایی همچون شبیه‌سازی مونت کارلو پیشنهاد می‌شود.

منابع

۱. زحمتکش ف. ۱۳۹۷. اثر عدم قطعیت خصوصیات ژئوتکنیکی محلی بر احتمال فرونشست پی تحت شرایط پمپاژ آب زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان. ۵۳ ص.
۲. شمشکی ا. بلورچی م. ج. و انتظام سلطانی ا. ۱۳۸۴. فرونشست زمین در دشت تهران عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن، مجموعه مقالات، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی تهران. ۸ اسفند. ۱۰ ص.
۳. صفاری ا. جعفری ف. و توکلی صبور س. م. ۱۳۹۵. پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار. نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۵(۲): ۸۲-۹۳.
۴. عالی‌پور اردی م. ملک محمدی ب. و جعفری ح. ۱۳۹۶. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، یک نرم‌افزار کاربردی برای تعیین فرونشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی توسعه داده شد که دارای قابلیت فراخوانی لایه‌های خصوصیات هیدرولیکی و فیزیکی خاک (مرتبط با فرونشست) از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است. نوآوری مدل ارائه شده استفاده از روابط تعیین شعاع تأثیر و سطح فریاتیکی آب زیرزمینی ناشی از پمپاژ متغیر در ترکیب با روش کارآمد تابع تأثیر که کاربرد این روش اعمال تأثیر همزمان پمپاژ متغیر و لایه‌بندی خاک بر شکل منحنی فرونشست سطح زمین است. نتایج کلی حاصل از کاربرد این مدل نرم‌افزاری در یک مطالعه موردی به شرح زیر است:

- با افزایش فرونشست پیرامون چاه‌های تحت پمپاژ تا عمق معین (در تحقیق حاضر تا عمق فرونشست ۳۰ سانتی‌متر) مساحت ناحیه تحت فرونشست افزایش می‌یابد؛ اما به ازای افزایش بیشتر عمق فرونشست، مساحت ناحیه تحت فرونشست تقریباً ثابت است (در تحقیق حاضر به طور تقریبی حداکثر ۷۰٪ ناحیه تحت تأثیر فرونشست قرار گرفت).
- بین میانگین دبی پمپاژ آب زیرزمینی و حداکثر عمق فرونشست (در بازه زمانی ده ساله) رابطه خطی با ضریب همبستگی قابل قبول برقرار است.
- با افزایش دبی پمپاژ شعاع تأثیر افزایش یافته، اما میزان افزایش شعاع تأثیر با افزایش دبی کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در منطقه مورد مطالعه، میانگین شعاع تأثیر محدود به ۱۰۵ متر است و افزایش دبی پمپاژ بر میزان آن نمی‌گذارد. نقش

- visualization using geographical information system (GIS). In *Groundwater Updates*. 79-84.
17. Ortega-Guerrero A. Rudolph D. L. and Cherry J. A. 1999. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*. 35(11): 3327-3341.
 18. Parhizkar S. Ajdari K. Kazemi G.A. and Emamgholizadeh S. 2015. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damghan aquifer by combining GMS and GEP models. *Geopersia*. 5(1): 63-80.
 19. Ren G. Buckeridge J. and Li J. 2014. Estimating land subsidence induced by groundwater extraction in unconfined aquifers using an Influence Function Method. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 141(7): 1-10.
 20. Terzaghi K. 1943. Theory of consolidation. *Theoretical Soil Mechanics*. 265-296.
 21. Xu Y. S. Shen S. L. Cai Z. Y. and Zhou G. Y. 2008. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China. *Natural Hazards*. 45(1): 123-135.
 22. Yi L. U. O. and Cheng J. W. 2009. An influence function method based subsidence prediction program for longwall mining operations in inclined coal seams. *Mining Science and Technology*. 19(5): 592-598.
 23. Zhou G. Esaki T. and Mori J. 2003. GIS-based spatial and temporal prediction system development for regional land subsidence hazard mitigation. *Environmental Geology*. 44(6): 665-678.
- ۱۱ (۳۸): ۳۴-۳۲۵.
 ۵. محمدی فتیده م. ۱۳۸۲. شناخت منابع آب‌های زیرزمینی دشت فومنات و مطالعه تغییرات کیفی آن‌ها. *مجله علوم کشاورزی ایران*. ۳۴ (۱): ۷۷-۹۰.
 ۶. موسایی ر. و دوستی م. ۱۳۹۳. اثرات زیست‌محیطی افت سطح آب زیرزمینی دشت مشهد، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها، تبریز. ۶ اسفند. ۹ ص.
 ۷. یمانی م. نجفی ا. و عابدینی م. ح. ۱۳۸۸. ارتباط فرونشست سطح زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت قره بلاغ استان فارس. *نشریه جغرافیا*. ۳ (۸-۹): ۲۷-۹.
 8. Álvarez-Fernández M. I. González-Nicieza C. Menéndez-Díaz A. and Álvarez-Vigil A. E. 2005. Generalization of the n-k influence function to predict mining subsidence. *Engineering Geology*. 80(1-2): 1-36.
 9. Budhu M. and Adiyaman I. B. 2010. Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 34: 1459-1478.
 10. Chang Y. L. Tsai T. L. and Yang J. C. 2019. Flood hazard mitigation in land subsidence prone coastal areas by optimal groundwater pumping. *Journal of Flood Risk Management*. 12(2): 1-15.
 11. Chen M. Tomás R. Li Z. Motagh M. Li T. Hu L. Gong H. Li X. Yu J. and Gong X. 2016. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*. 8(6): 468.
 12. Chu S. T. 1994. Transient radius of influence model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 120(5): 964-969.
 13. DePrekel K. Bouali E. H. and Oommen T. 2018. Monitoring the impact of groundwater pumping on infrastructure using Geographic Information System (GIS) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI). *Infrastructures*. 3(4): 57.
 14. Galloway D. L. and Burbey T. J. 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*. 19(8): 1459-1486.
 15. Jin I. G. and Orosz G. 2018. Connected cruise control among human-driven vehicles: Experiment-based parameter estimation and optimal control design. *Transportation research part C: emerging technologies*. 95: 445-459.
 16. Murakami S. Yasuhara K. and Murata F. 2000. Land subsidence prediction and its