

مدلسازی عددی، مدیریت آب زیرزمینی و ارزیابی میزان بهینه پمپاژ آب در معدن سنگ آهن گهر زمین (سیرجان-ایران)

امیرحسین نجف آبادی پور^{۱*}، غلامرضا کمالی^۲، حسین نظام آبادی پور^۳

۱ - دکتری معدن، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۲ - دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۳ - استاد، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

* نویسنده مسئول: najafabadipour@eng.uk.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

چکیده

افزایش عمق معدنکاری، منجر به قرار گرفتن تراز کف پیت معدن محدوده استخراج ماده معدنی در زیر سطح آب زیرزمینی می‌شود. ورود آب زیرزمینی به پیت معدن باعث افزایش هزینه‌ها و همچنین کاهش راندمان و سطح ایمنی کار می‌شود. معدن سنگ آهن گهر زمین با ذخیره تقریبی ۶۰۰ میلیون تن یکی از بزرگترین معادن روباز آهن خاورمیانه در جنوب غرب شهرستان سیرجان واقع در استان کرمان می‌باشد که در حال حاضر مشکل ورود آب زیرزمینی به پیت معدن دارد. در این پژوهش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی حرکت آب زیرزمینی و همچنین مدیریت صحیح فرآیند زهکشی، از نرم‌افزار MODFLOW در محیط پیچیده معدن سنگ آهن گهر زمین استفاده شده است. با توجه به ناهمگن بودن زمین که در هر مکان باعث تغییرات زیادی در پارامترهای هیدرودینامیکی می‌شود، از یک شبکه نوآورانه Pilot Point برای درون‌یابی مقدار پارامترهای هیدرودینامیکی موردنیاز مدل استفاده شده است. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه از سمت شمال پیت به سمت غرب می‌باشد. میزان آب ورودی از قسمت شمالی پیت و آب خروجی از قسمت غربی پیت، به ترتیب حدود ۶۷۹ و ۱۴۴۸ مترمکعب بر شبانه‌روز می‌باشد. در انتها با انجام بهینه‌سازی توسط مدل، موقعیت هفت حلقه چاه جدید و دبی بهینه پمپاژ شده برای چاه‌های موجود و جدید در یک سناریوی پیشنهادی زهکشی، مشخص شد. نتایج پیش‌بینی مدل نشان از کاهش سطح ایستابی به اندازه ۱۴ متر در بخش شمالی و ۱۰ متر در بخش شرقی محدوده مورد مطالعه در طی یک ماه دارد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان معدن روباز، سنگ آهن گهرزمین، مادفلو، مدل‌سازی عددی، مدیریت منابع آب زیرزمینی.

مقدمه

(Najafabadipour et al., 2022a). هنگامی که معدنکاری در مجموعه‌ای از لایه‌های آبدار زیرزمینی انجام می‌گیرد، مقادیر چشم‌گیری از آب زیرزمینی به پیت وارد می‌شود. جریان‌های غیرمنتظره آب زیرزمینی در مقیاس زیاد ممکن است باعث کاهش راندمان، فرآیند تولید و همچنین سطح ایمنی کار و علاوه بر آن باعث افزایش هزینه‌های تولید، آلودگی محیط زیست، ضایعات، مصرف مواد و انرژی می‌گردد (Liu et al., 2022). بنابراین باید حجم زیادی از آب زهکشی گردد تا

کاهش ذخایر سطحی مواد معدنی، منجر به افزایش عمق معدنکاری در استخراج معادن روباز گردیده است. این موضوع سبب می‌شود تا در پاره‌ای از موارد عملیات استخراج معدنی در زیر سطح آب‌های زیرزمینی انجام شود. حفر یک پیت معدنی در محلی زیر سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی منجر به حضور آب در محیط معدنی می‌شود که می‌تواند بر طراحی، اجرا و مسائل اقتصادی معدن تأثیرگذار باشد

فرانسه را با استفاده از MODFLOW توصیف کردند. همچنین، تأثیر تغییرات آب و هوایی بر تعادل آب و سطح آب برای ۱۰۰ سال آینده مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل سطح آب زیرزمینی نشان داد که این تاسیسات در طول سال از جمله در طول رویدادهای بارندگی شدید ثبت شده، در وضعیت غیراشباع قرار دارد. نتایج سناریوی احیاء پیشنهادی باعث کاهش ۱ متری سطح آب زیرزمینی در سایت مورد مطالعه دارد. (Mohan et al., 2022) با مدل سازی جریان آب زیرزمینی توسط MODFLOW از یک رویکرد ترکیبی برای مدیریت طرح آبیگری معدن سنگ آهک آدانا کوریچی در تامیل نادو واقع در هند استفاده کردند. نتایج نشان از مورد نیاز بودن افزایش ۲۰ درصدی میزان پمپاژ در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۶ داشت. علاوه بر آن، نتایج حاصل از این مطالعه برای مدیریت بهتر عملیات کنترل آب زیرزمینی در سفره های کارستی، تحت سطوح مختلف عملیات ایمن مفید خواهد بود. (Surinaidu et al., 2014) به مدل سازی آب زیرزمینی توسط یک مدل عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم افزار MODFLOW در معدن ذغال سنگ در هند پرداخته اند که نتایج نشان از تخمین قابل قبول با خطای کم میزان آب ورودی به داخل معدن دارد. علاوه بر آن به منظور زهکشی آب زیرزمینی و کاهش سطح ایستابی آب به زیر سطح ماده معدنی در معادن روباز و مشکلات ناشی از ورود آب به داخل معدن استفاده از مدل های ریاضی مرسوم می باشد (Whithe et al., 2004; Yang et al., 2007; Simin et al., 2012; Kumar and Sarcar, 2013; Sahoo et al., 2014). بنابراین با توجه به اهمیت مدل سازی آب زیرزمینی در محدوده های معدنی، هدف در این پژوهش بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی، مدل سازی و مدیریت سفره ی آب زیرزمینی در محدوده پیت روباز معدن سنگ آهن گهر زمین که در جنوب غرب شهر سیرجان واقع شده می باشد. در ابتدا محدوده مورد مطالعه بررسی شده، سپس مدل عددی با استفاده از نرم افزار GMS v.10 که یکی از پرکاربردترین بسته های گرافیکی MODFLOW می باشد توسعه داده شده و بعد از آن مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار اجرا و واسنجی شده است. در ادامه حساسیت مدل بررسی شده و مدل صحت سنجی می شود. با توجه به این نکته که در محدوده

باتوجه به افزایش عمق معدنکاری، سطح آب زیرزمینی پایین نگه داشته شود و همچنین شرایط خشک برای معدنکاری فراهم گردد (Najafabadipour et al., 2022b). برای آنکه یک سیستم زهکشی موثر در یک معدن روباز طراحی و به خوبی اجرا شود، مدل سازی جریان آب های زیرزمینی و پیش بینی میزان آب ورودی به داخل معدن ضروری می باشد (Adhikari and Mal, 2021). نتایج این مدل سازی ها می تواند در تهیه یک برنامه مدیریت آبی به منظور استفاده از این آب زیرزمینی، کاهش مشکلات معدنکاری در زیر آب و متعاقب آن اثرات دراز مدت زیست محیطی، مورد استفاده قرار گیرد (جهانشاهی، ۱۳۹۲). شناسایی خصوصیات هیدروژئولوژیکی لایه ها و همچنین شناخت کافی از رژیم آب های زیرزمینی در اطراف معدن، در مدل سازی آب های زیرزمینی محدوده معدن موثر خواهد بود. به منظور مدل سازی آب زیرزمینی محدوده معدن، لازم است تا منابع آب ورودی و خروجی و همچنین جهت حرکت این جریان ها شناسایی شود (Singh and Reed, 1988). به منظور مدل سازی عددی جریان آب زیرزمینی، مشتقات جزئی معادله جریان آب های زیرزمینی در محیط های متخلخل با استفاده از روش های عددی تفاضل محدود حل می شود (Mohanty et al., 2013). روش تفاضل محدود یکی از روش های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است که در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن ها تقریب زده می شود که اساس این روش برای حل معادلات استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است (Hai and Meiling, 2022). به منظور مدل سازی آب های زیرزمینی با توجه به شرایط مختلف محیط های زمین شناسی و همچنین بر اساس روش های حل عددی متفاوت، نرم افزارهای متعددی وجود دارد (نخعی و همکاران، ۱۴۰۰). پرکاربردترین نرم افزار به منظور مدل سازی عددی آب های زیرزمینی MODFLOW می باشد (خالدی علمداری و همکاران، ۱۴۰۱). این نرم افزار برای حل معادلات از روش تفاضل محدود استفاده می کند که برای مدل سازی بایستی خصوصیات آبخوان برای هر سلول وارد شود و خروجی های مدل شامل: هد آب زیرزمینی و دبی جریان برای هر سلول می باشند (کرد و همکاران، ۱۳۹۸). (Hermite et al., 2022) از داده های ۱۳ پیزومتر وضعیت فعلی و آینده جریان آب زیرزمینی در یک معدن اورانیوم در برتولن

اتفاق افتاده که سن یابی و ارتباط واحدها با یکدیگر مشکل می باشد. بیشتر منطقه از آبرفت های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات معدودی که رخنمون دارند شامل سنگ های مارنی و آهکی نئوژن در قسمت شرق و جنوب شرقی معدن و در قسمت غرب و شمال غربی معدن نهشته های رودخانه ای کوآترنری قابل مشاهده است. گسل های متعدد گل گهر- خیرآباد، باغ چوبی، چاه بادام، چاه میل، باغ نصر و گل گهر- باغات در این محدوده شناسایی شده اند (حسن زاده، ۱۳۹۴).

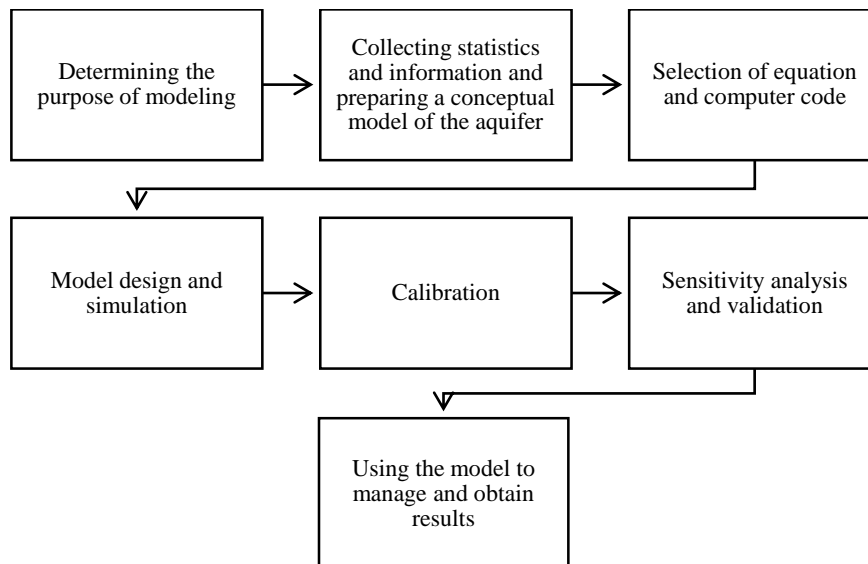
آبخوان معدن سنگ آهن گهر زمین شامل دو بخش آبرفتی رسوبات دوران چهارم و سنگی می باشد که لایه بالایی از رسوبات آبرفتی دوران چهارم و لایه پایینی از سازندهای سنگی سخت تشکیل شده است. جنس لایه بالایی اغلب حاصل هوازدگی و فرسایش سازندهای سنگی اطراف می باشد. در این سازند سخت، شکستگی ها و گسل ها مانند یک مسیر جریان آب عمل کرده و آب های زیرزمینی از طریق همین شکستگی ها به راحتی حرکت می کنند (حسن زاده، ۱۳۹۴). علاوه بر وجود گسل ها، انفجارات معدنکاری باعث بازشدگی زون ها شده که منجر به نشت آب در دیواره پیت معدن شده است. آنومالی شماره ۳ (گهرزمین) در حال حاضر با ورود آب زیرزمینی به داخل پیت مواجه است به طوری که نفوذ آب از آبرفت دیواره های پیت و آرتزین شدن گمانه های اکتشافی از مشکلات این معدن می باشد. وجود گسل های متعدد در اطراف معدن از جمله گسل خیرآباد-گل گهر احتمال جریان آب از کفه خیرآباد به سمت معدن را دوچندان می نماید. در صورتی که این گسل ها در انتقال آب نقش داشته باشند، بخش قابل توجهی از آب ممکن است از طریق گسل ها به سمت معدن جریان یابد. با شناسایی منابع و تخمین میزان آب ورودی به پیت معدن طراحی مناسب برای زهکشی انجام می گیرد. در این تحقیق برای طراحی مناسب مدل عددی آب زیرزمینی معدن گهرزمین، از پروتکل مدل سازی Anderson and Woessner (1992) استفاده شده است (شکل ۱).

معدن سنگ آهن گهر زمین تا کنون مطالعات مدیریت آب زیرزمینی انجام نشده است نوآوری این پژوهش علاوه بر موردی بودن این مطالعه، استفاده از یک شبکه Pilot Point که مجموعه ای از نقاط پراکندگی دو بعدی می باشد به منظور درون یابی پارامترهای هیدرودینامیکی به جای ایجاد یک منطقه و تخمین مدل معکوس و داشتن یک مقدار برای کل منطقه می باشد.

مواد و روش ها محدوده مورد مطالعه

منطقه معدنی گل گهر با داشتن معادن غنی از سنگ آهن به عنوان یکی از مطرح ترین قطب های فعال معدنی، صنعتی در خاورمیانه است. کانسار سنگ آهن گل گهر در شش آنومالی مجزا در مجموع با ذخیره ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن در محدوده ای به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۴ کیلومتر قرار گرفته است که آنومالی شماره ۳ به عنوان بزرگترین آنومالی با ذخیره ای بالغ بر ۶۰۰ میلیون تن به عنوان سنگ آهن گهرزمین شناخته می شود. معدن سنگ آهن گهرزمین در استان کرمان، در محدوده طول های جغرافیایی ۳۲۹۵۳۵ تا ۳۴۱۸۹۱ متر شرقی و عرض های جغرافیایی ۳۲۰۹۲۴۷ تا ۳۲۲۲۰۰۲ متر شمالی در محدوده R ۴۰ واقع شده است.

ناحیه معدنی گهرزمین شامل یک دشت وسیع و ناهموار با وسعت بالا است که ارتفاعات آن دارای دامنه نامنظم، آبراهه های فرسایشی و کارستی نامنظم می باشند. ناحیه معدنی گهر زمین در دامنه جنوبی یک طاقدیس قرار داشته که رسوبات دوران چهارم معدن را پوشانده اند. این ناحیه در لبه شرقی زون سنندج-سیرجان و لبه فروافتادگی نمکزار کفه خیرآباد، که خود در حد فاصل زون سنندج-سیرجان و کمر بند آتشفشانی ارومیه دختر به وجود آمده، قرار گرفته است. این منطقه دارای ساختار بسیار پیچیده ای است به همین دلیل ساختار و نیز حوادث دگرشکلی و دگرگونی متعددی که در آن



شکل ۱- روند مدل سازی پیشنهادی آب زیرزمینی (Anderson and Woessner, 1992).
Figure 1- Proposed groundwater modeling process (Anderson and Woessner, 1992).

مدل مفهومی و انتخاب معادله حاکم

روش های تفاضل محدود به دلیل نیاز به داده کمتر استفاده کرد. کد MODFLOW یک ماژول سه بعدی شبیه سازی جریان آب زیرزمینی به روش تفاضل محدود است که توسط سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است. GMS v.10 یکی از بسته های گرافیکی MODFLOW می باشد که به دلیل داشتن ضمیمه های گوناگون، بسته های نرم افزاری گرافیکی متعدد و کاربر پسند بودن محیط نرم افزاری در این پژوهش برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی معدن گهرزمین استفاده شده است.

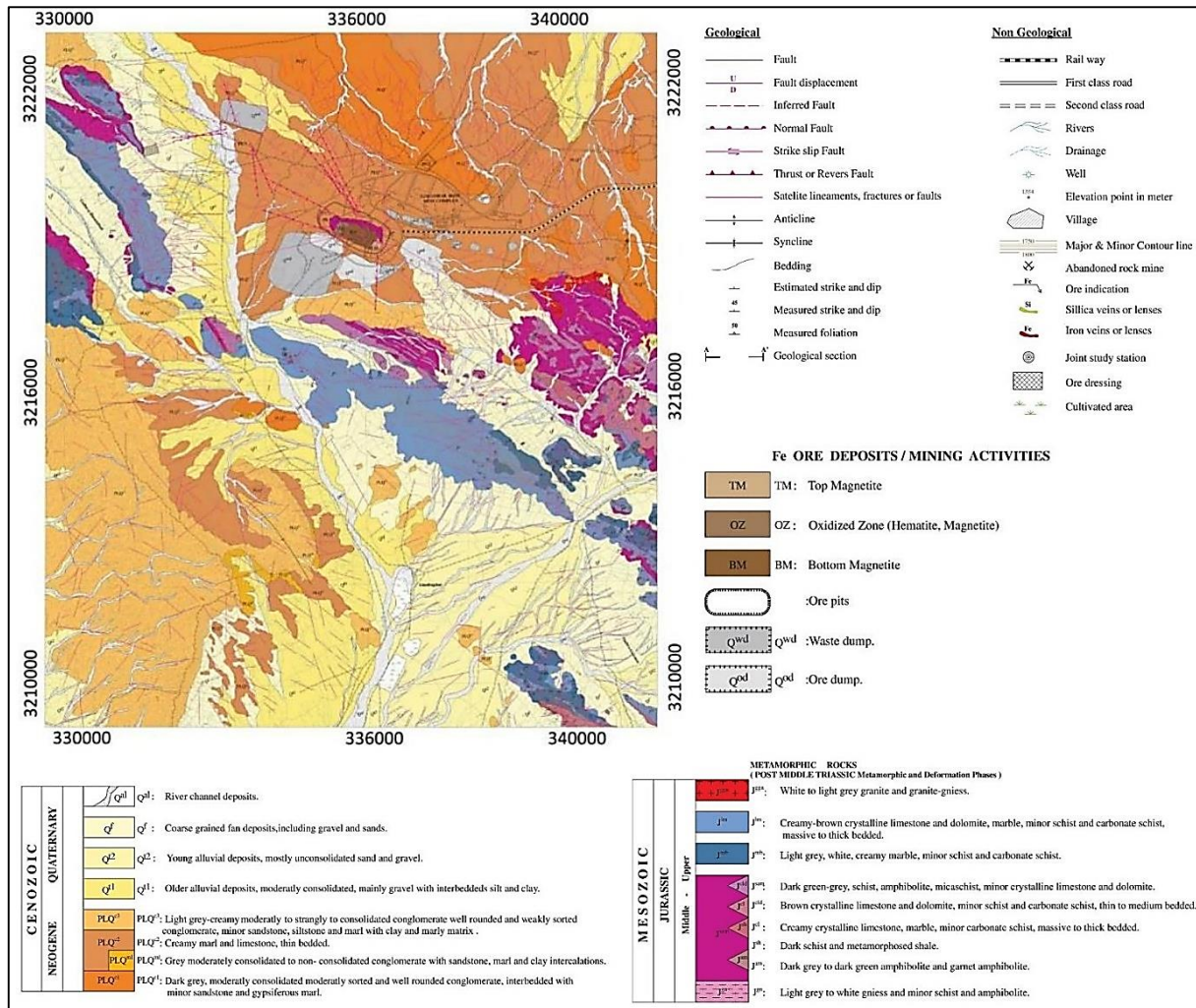
اندازه شبکه مدل

تعداد سلول هایی که در خارج از مرزهای محدوده مدل های تفاضل محدود قرار می گیرند بایستی حداقل باشد. هد هیدرولیکی با اینکه در سلول های غیرفعال محاسبه نمی گردند، اما فضایی را اشغال می کنند که منجر به کند شدن زمان پردازش مدل می شود (Anderson and Woessner, 1992). در این پژوهش محدوده مورد نظر به ۵۰ ستون و ۵۰ ردیف از نوع مرکز بلوکی با طول ۲۷۹۰ متر و عرض ۳۱۵۷ متر شبکه بندی شد.

به منظور توسعه مدل مفهومی معدن گهرزمین که مرحله آغازین مدل و مهمترین بخش آن است، پارامترهای هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژی و دینامیک جریان آب های زیرزمینی در داخل و اطراف منطقه مورد مطالعه همراه با نقشه های زمین شناسی (شکل ۲) مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از نرم افزارهای ArcMap داده های ورودی مورد پردازش قرار گرفته و نقشه های لازم استخراج گردیدند. به منظور شبیه سازی جریان آب زیرزمینی بایستی معادله جریان که تلفیقی از قانون دارسی و معادله پیوستگی می باشد حل گردد

$$\frac{\partial(K_x \frac{\partial H}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(K_y \frac{\partial H}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(K_z \frac{\partial H}{\partial z})}{\partial z} \pm Q = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه (۱) مولفه هدایت هیدرولیکی در راستای محور x، K_x مولفه هدایت هیدرولیکی در راستای محور y، K_y مولفه هدایت هیدرولیکی در راستای محور z، K_z هد هیدرولیکی، H و مختصات دکارتی، Q ورودی یا خروجی آب زیرزمینی، x, y, z ضریب ذخیره سازی و t زمان می باشد. در این رابطه مولفه تخلیه با علامت منفی و مولفه تغذیه با علامت مثبت محاسبه می شود. به منظور حل معادله جریان آب زیرزمینی می توان از



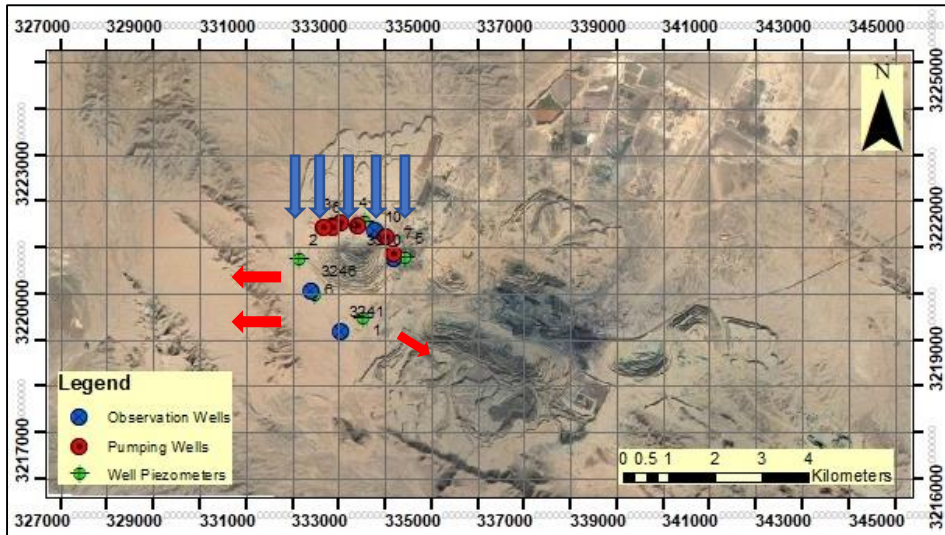
شکل ۲- نقشه زمین شناسی و تکتونیک ناحیه معدنی گل گهر با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۲).

Figure 2- Geological and tectonic map of Golghar mineral area with a scale of 1:25000 (National Geological and Mineral Exploration Organization, 2012).

جنوب شرق و غرب محدوده تخلیه (پیکان قرمز رنگ) آب زیرزمینی می باشد و مرزهای تبدالی در مدل به صورت مرز عمومی جریان در نظر گرفته شده اند. به منظور تعیین شرایط مرزی مدل، از ۲۵۰۰ سلول اختصاص داده شده ۱۶۸۸ سلول فعال و ۸۱۲ سلول غیرفعال می باشند. در شکل ۴ هندسه مدل محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است که محدوده خاکستری مربوط به سلول های فعال و محدوده بدون رنگ مربوط به سلول های غیرفعال می باشد که در مرحله بعد حذف می شوند. در شکل ۵ شبکه بندی سه بعدی و توپوگرافی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است که در قسمت شمال پیت ارتفاع بیشتری مشاهده می شود.

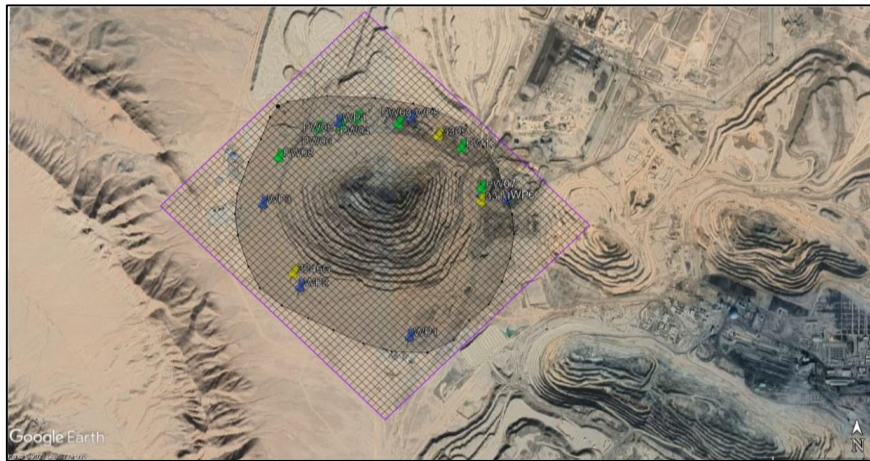
شرایط مرزی

مهم ترین گام در توسعه مدل مفهومی، انتخاب سطح و شرایط مرزی می باشد. عدم دقت لازم برای انتخاب سطح و شرایط مرزی نامناسب باعث کاهش دقت مدل می شود که منجر به دریافت پاسخ های متفاوت از پاسخ واقعی به استرس ها می باشد (Lu et al., 2013). اگرچه مرزها تأثیر زیادی بر الگوی جریان آب های زیرزمینی در حالت ماندگار دارند اما در حالت غیرماندگار، در صورتی که استرس های وارده به سیستم جریان به مرزها برسد می تواند بر جواب های مدل تأثیرگذار باشد. بر اساس مدل مفهومی (شکل ۳) شرایط مرزی برای مدل، شامل مرزهای تبدالی در دورتادور پیت معدن گهر زمین هستند که اغلب بخش شمالی محل تغذیه (پیکان آبی رنگ) و در بخش



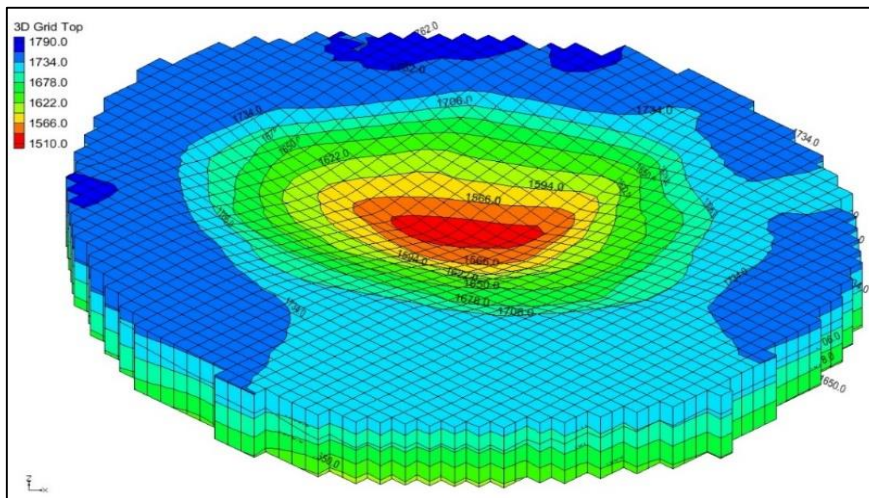
شکل ۳- محدوده معدن گهر زمین، مدل مفهومی و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، پمپاژ و پیزومتری.

Figure 3- Gohar Zamin iron ore mine area, conceptual model and location of observation, pumping, and piezometric wells.



شکل ۴- هندسه مدل محدوده مورد مطالعه.

Figure 4- The geometry of the studied area model.



شکل ۵- شبکه‌بندی سه بعدی و نقشه توپوگرافی محدوده سنگ آهن گهر زمین (ارتفاع بر حسب متر از سطح دریا).

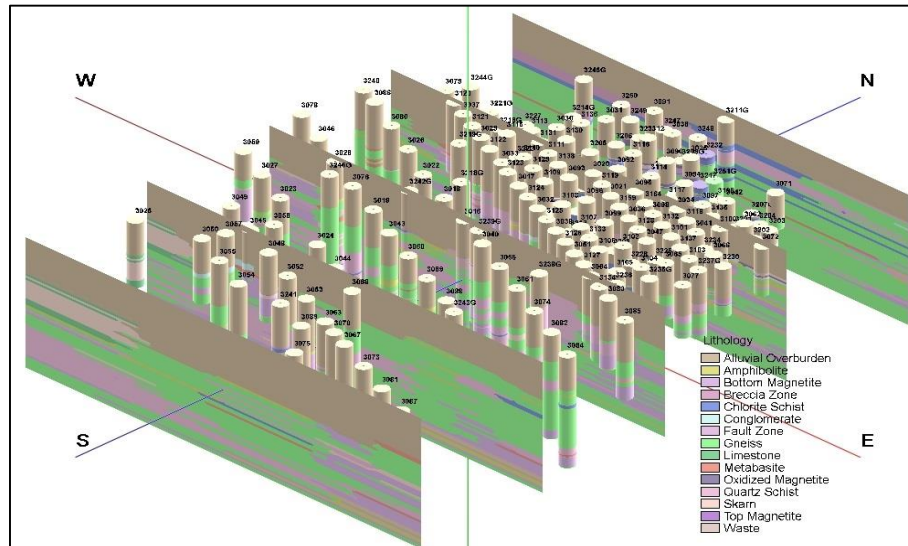
Figure 5- 3D grid and topographic map of Gohar Zamin iron ore mine (height in meters above sea level).

شرایط اولیه

MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به شرایط هد هیدرولیکی اولیه نیاز دارد که این اطلاعات از مدل‌سازی داده‌های شش پیژومتر و چهار چاه مشاهده‌ای واقع در دورتادور معدن به روش کریجینگ استفاده شده که در دی ماه ۱۳۹۸ جمع‌آوری شده است.

تعیین سقف و کف لایه آبدار

مدل توسعه یافته تک لایه در نظر گرفته شده است که برای ارتفاع بالا و پایین لایه از داده‌های ۷۱ چاه‌های سنگ‌شناسی (شکل ۶) که به روش کریجینگ تخمین زده شده، استفاده شده است (Najafabadipour and Kamali, 2017).



شکل ۶- نمودار حصارى چاه‌های سنگ‌شناسی محدوده پیت معدن گهر زمین.

Figure 6- Fence diagram of lithological wells in the Gohar Zamin iron ore mine pit area.

تنش‌های هیدرولیکی

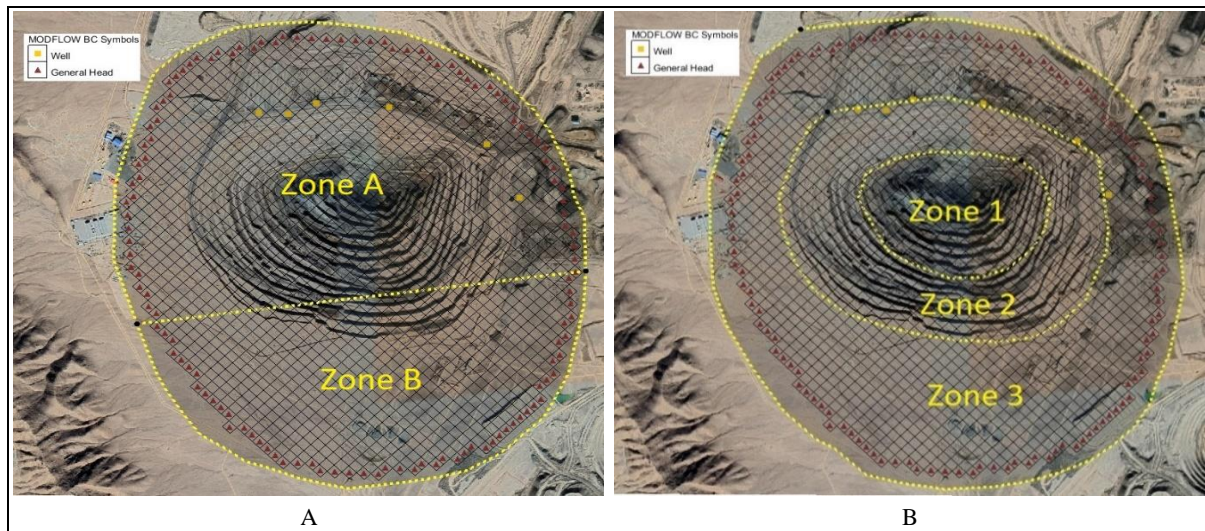
تنش‌های هیدرولیکی موجود در محدوده معدن گهر زمین را می‌توان به چاه‌های بهره‌برداری و تغذیه تقسیم‌بندی کرد. چاه‌های پمپاژ شامل شش حلقه چاه در قسمت شمالی و شرقی پیت معدن می‌باشد. در محدوده معدن گهر زمین به دلیل ویژگی‌های مختلف زمین‌شناسی، شیب زمین و وجود سد باطله، در نقاط مختلف میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی مختلف می‌باشد. کمبود داده‌های میزان تغذیه آب زیرزمینی در مناطق مختلف باعث در نظر گرفتن محدوده وسیعی برای پارامتر تغذیه می‌شود که در طول فرآیند واسنجی بهینه می‌شود (Anderson and Woessner, 1992). در نرم‌افزار استفاده شده از بسته تغذیه با پسوند RCH برای در نظر گرفتن تغذیه در محدوده مورد مطالعه استفاده می‌شود. برای اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای از شش چاه پیژومتری و چهار چاه مشاهده‌ای قرار گرفته که در دورتادور معدن وجود دارد، استفاده شده است (شکل ۳).

پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان

ضریب هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و تخلخل از پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشند که براساس داده‌های چاه‌های پیژومتری، اکتشافی و مشاهداتی و همچنین مقاطع ژئوفیزیکی تهیه شده از منطقه زون‌بندی می‌شود (Najafabadipour and Kamali, 2019). با توجه به جنس رسوبات هر زون مقادیر اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی از داده‌های موجود آزمایش پمپاژ ناحیه بین ۰/۱ تا ۵ متر بر شبانه روز می‌باشد و در مرحله‌ی واسنجی برای هر زون مقدار بهینه به دست می‌آید. مقدار ضریب ذخیره نیز براساس داده‌های موجود آزمایش پمپاژ در رسوبات آبرفتی حدود ۰/۰۲ و در محیط‌های سنگی حدود ۰/۰۰۰۰۰۸ می‌باشد. با افزایش عمق معدنکاری بر اساس جنس متفاوت پله‌های پیت معدن، به منظور منطقه‌بندی برای ضریب هدایت هیدرولیکی سه ناحیه در نظر گرفته شده است که هر چه از مرکز پیت

این نکته که در قسمت شمالی پیت معدن سد باطله قرار دارد، محدوده مورد مطالعه به دو ناحیه طبقه‌بندی شد که مقدار تغذیه در ناحیه بالایی مقدار 0.000008 و در ناحیه پایینی مقدار 0.000005 متر بر شبانه‌روز می‌باشد (شکل ۷ سمت چپ).

دورتر می‌شویم مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۷ سمت راست). مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی در ناحیه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با افزایش عمق معدنکاری و تغییر جنس لایه از رسوبات به سنگ برابر با 0.1 ، 0.5 و 0.5 متر بر شبانه‌روز در نظر گرفته شده است. با توجه به



شکل ۷- A) منطقه‌بندی محدوده مورد مطالعه برای تغذیه و B) ضریب هدایت هیدرولیکی.
 Figure 7- A) Zoning of the studied area for recharge, B) and hydraulic conductivity.

توقف معیار تغییرات هدایت هیدرولیکی بر اساس کمتر یا مساوی بودن مقدار بیشینه مطلق تغییرات در بار محاسباتی سلول می‌باشد.

واسنجی مدل

واسنجی مدل به منظور یافتن مجموعه تنش‌های هیدرولیکی و پارامترهای هیدرودینامیکی است که طی آن نتایج بدست می‌آید که به اندازه‌گیری‌های صحرائی بارهای هیدرولیکی و جریان بسیار نزدیک است. واسنجی یکی از مهمترین فرآیندهای مدل‌سازی است که به شکل تقریبی انجام می‌شود (ندیری و همکاران، ۱۳۹۵).

اجرای مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار

به منظور حل مدل در GMS v10 می‌توان از بسته‌های DE4, GMG, LMG, PCG و SIP1 استفاده نمود که پیشنهاد می‌شود تمام بسته‌ها آزمایش و بهترین روش حل بر اساس کمترین مقدار خطا انتخاب شود. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های حل مدل روش گرادیان مزدوج از پیش شرطی شده (PCG) می‌باشد، اما در این پژوهش به دلیل نتایج آماری قابل قبول‌تر، سرعت بهتر و استفاده از حافظه کمتر از بسته LMG استفاده شده است (جدول ۱). به منظور همگرا شدن این بسته‌ها از ماکزیمم تکرار مجاز و معیار تغییر بار استفاده می‌شود. شرط

جدول ۱- نتایج آماری حل مدل با استفاده از بسته‌های PCG و LMG در نرم‌افزار GMS.

Table 1- Statistical results of solving the model using PCG and LMG packages in GMS software.

Model solution package	Mean residual	Absolute mean residual	Root mean square residual
LMG	0.05	1.82	1.95
PCG	0.73	16.15	18.99

واسنجی مدل در حالت ماندگار

استفاده می‌کند. این محدودیت فرآیند معکوس‌سازی را بسیار پایدارتر می‌کند و الزام اینکه تعداد پارامترها باید کمتر از تعداد مشاهدات باشد را برطرف می‌کند بنابراین با منظم‌سازی تعداد پارامترها می‌تواند بسیار بیشتر از تعداد مشاهدات باشد (Tziatzios et al., 2021). در این پژوهش از روش کریجینگ با ایجاد واریوگرام مدل برای درون‌یابی توسط روش Pilot Point استفاده شده است. پس از بررسی داده‌های طولانی و کوتاه مدت سطح آب زیرزمینی می‌توان نتیجه گرفت که شرایط ماندگار جریان آب زیرزمینی در محدوده معدن گهر زمین مشاهده نمی‌شود بنابراین در ادامه واسنجی مدل در حالت غیرماندگار بررسی می‌شود.

واسنجی مدل در حالت غیرماندگار

پس از واسنجی مدل در حالت ماندگار، مدل در حالت غیرماندگار نیز واسنجی می‌شود و دوره‌های تنش حالت غیرماندگار در طی یک دوره پنج ماه از بهمن ماه ۱۳۹۸ تا خرداد ماه ۱۳۹۹ به تدریج به مدل اضافه شده و مدل در هر مرحله واسنجی می‌گردد. بعد از کالیبره شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی و مقدار تغذیه در حالت ماندگار، سلول‌های مرزی بهینه شده در مدل غیرماندگار ثابت در نظر گرفته و از همین مقادیر بهینه برای واسنجی کردن مدل در حالت غیرماندگار استفاده می‌شود و مدل با استفاده از پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تغذیه مجدداً واسنجی می‌شود. در جدول ۲ نتایج آماری مدل واسنجی شده با استفاده از روش‌های سعی و خطا، PEST و Pilot Point به منظور تخمین پارامترهای ذخیره و ضریب هدایت هیدرولیکی نشان داده شده است که روش Pilot Point در هر دو حالت ماندگار و غیرماندگار کمترین میزان خطا را دارد.

پس از طراحی مدل، تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه، پارامترهای مدل و تنش‌های هیدرولیکی آبخوان، مدل برای حالت ماندگار با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی و با استفاده از MODFLOW-2000 اجرا می‌گردد. با توجه به داده‌های موجود از اطلاعات دی ماه ۱۳۹۸ برای شبیه‌سازی جریان آب استفاده می‌شود. به منظور واسنجی مدل می‌توان از دو روش (۱) سعی و خطا و (۲) واسنجی خودکار استفاده کرد. به منظور واسنجی مدل محدوده معدن گهر زمین، ابتدا بر اساس نظر کارشناسی واسنجی دستی انجام گرفت و پس از آن برای بهبود نتایج و کمتر شدن خطای مدل از واسنجی خودکار به دو روش PEST و Pilot Point انجام شده است. الگوریتم تخمین پارامتر غیرخطی مورد استفاده توسط PEST به واسنجی مدل و تجزیه و تحلیل پیش‌بینی کمک می‌کند. با توجه به ناهمگن بودن زمین که در هر مکان باعث تغییرات زیادی در پارامترهای هیدرودینامیکی می‌شود، می‌توان از یک شبکه Pilot Point که مجموعه‌ای از نقاط پراکنندگی دوعده‌ای می‌باشد استفاده کرد. در این روش تخمین خودکار پارامتر، به جای ایجاد یک منطقه و تخمین مدل معکوس و داشتن یک مقدار برای کل منطقه، مقدار پارامتر مورد نظر در منطقه از Pilot Point درون‌یابی می‌شود. در این روش مدل معکوس، مقادیر را در Pilot Point تخمین می‌زند. با استفاده از Pilot Point، مقادیر از سلولی به سلول دیگر متفاوت خواهد بود. هنگامی که مدل معکوس اجرا می‌شود، مقادیر در Pilot Point تنظیم می‌شوند و تا زمانی که تابع هدف به حداقل برسد، مجدداً در سلول‌های شبکه درون‌یابی می‌شوند. Pilot Point از منظم‌سازی به منظور محدودیت بیشتر برای درون‌یابی

جدول ۲- نتایج آماری واسنجی مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار با استفاده از دو روش سعی و خطا و خودکار.

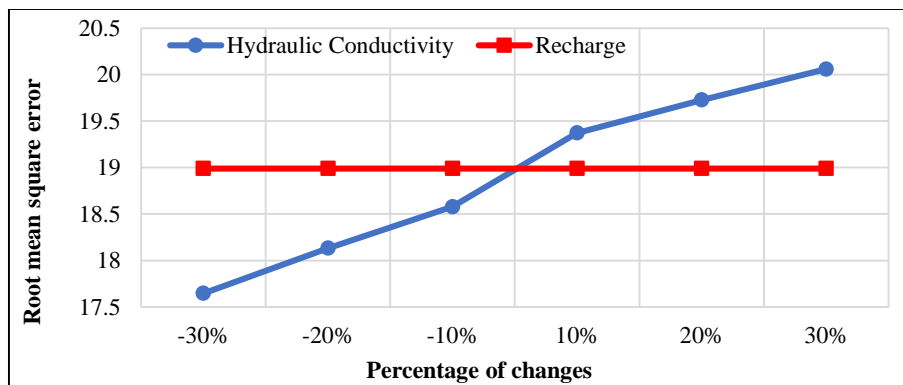
Table 2- Statistical results of model calibration in the steady state and transient state using trial and error and automatic methods.

	Steady state			Transient state		
	Expert advice	PEST	Pilot Point	Expert advice	PEST	Pilot Point
Mean residual	0.73	-1.27	-1.64	-3.55	-6.18	-12.2
Absolute mean residual	16.15	11.14	3.19	17.23	14.32	12.32
Root mean square residual	18.99	13.02	4.23	20.78	16.67	14.58

آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی

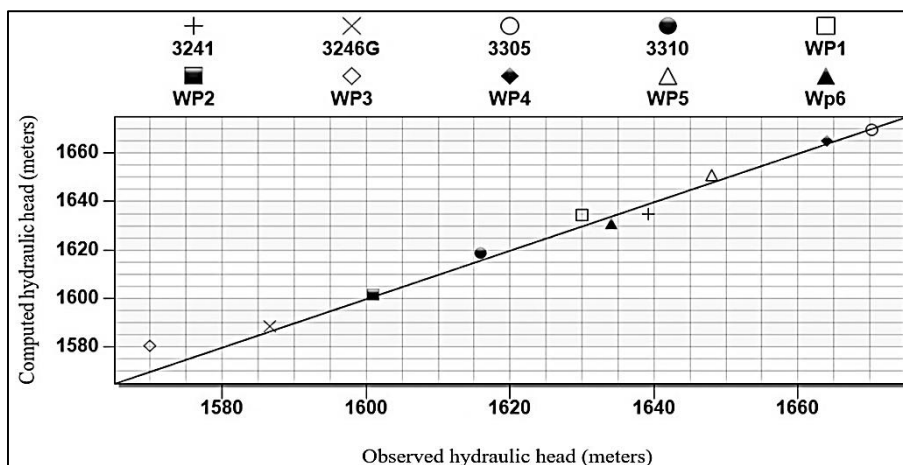
رنگ رسم شده است، نشان از عدم تأثیرگذاری این پارامتر بر خطای مدل دارد و با کاهش و افزایش این پارامتر هیچ تغییر قابل توجهی در مقدار خطا ایجاد نشده است. دلیل این موضوع تغییر بسیار جزئی میزان تغذیه به دلیل بارندگی بسیار کم در محدوده بزرگ معدن سنگ آهن گهر زمین می‌باشد. بر اساس همین نتایج اقدام به تنظیم و واسنجی مدل شد. به منظور واسنجی مدل علاوه بر تغییر در محدوده پلی‌گون‌ها، در برخی موارد مقدار پلی‌گون‌ها نیز تغییر کرد. نتایج حاصله در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی چاه‌ها به غیر از چاه WP3 دارای خطای بسیار کمی می‌باشند. اختلاف خطای زیاد در این چاه، احتمالاً به دلیل قرار گرفتن سد باطله در محدوده این چاه می‌باشد.

به‌منظور بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای متغیر در مدل که شامل ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه می‌باشند به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به صورت افزایشی و کاهشی تغییر داده شدند. در شکل ۸ نمودار آبی رنگ مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی می‌باشد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل توسعه داده شده حساسیت زیادی نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی دارد و با کاهش مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی خطای مدل کاهش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در بخش‌هایی از محدوده مورد مطالعه که ضریب هدایت هیدرولیکی درصد تغییرات کمتری دارد پیچیدگی زمین‌شناسی کمتر بوده و خطای مدل کمتر خواهد بود. علاوه بر آن، نتایج بررسی حساسیت برای تغذیه که با نمودار قرمز



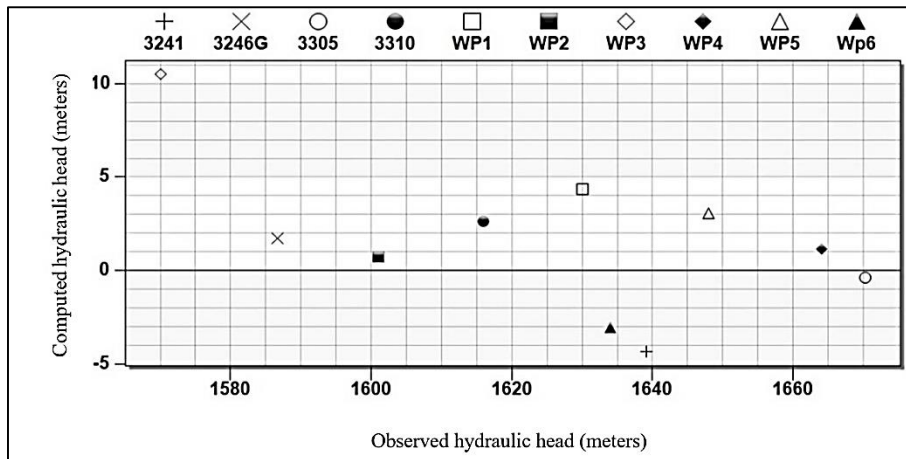
شکل ۸- نمودار حساسیت مدل نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه (دی ماه ۱۳۹۸).

Figure 8- Diagram of the sensitivity of the model to the hydraulic conductivity and recharge (December 2018).



شکل ۹- نمودار متقابل داده‌های محاسباتی و مشاهداتی هد هیدرولیکی در محدوده مورد مطالعه بعد از واسنجی (نمادهای بالای نمودار راهنمای چاه‌های موجود می‌باشند).

Figure 9- Cross-diagram of computed and observed data of hydraulic head in the studied area after calibration (symbols above the diagram are guides for wells).

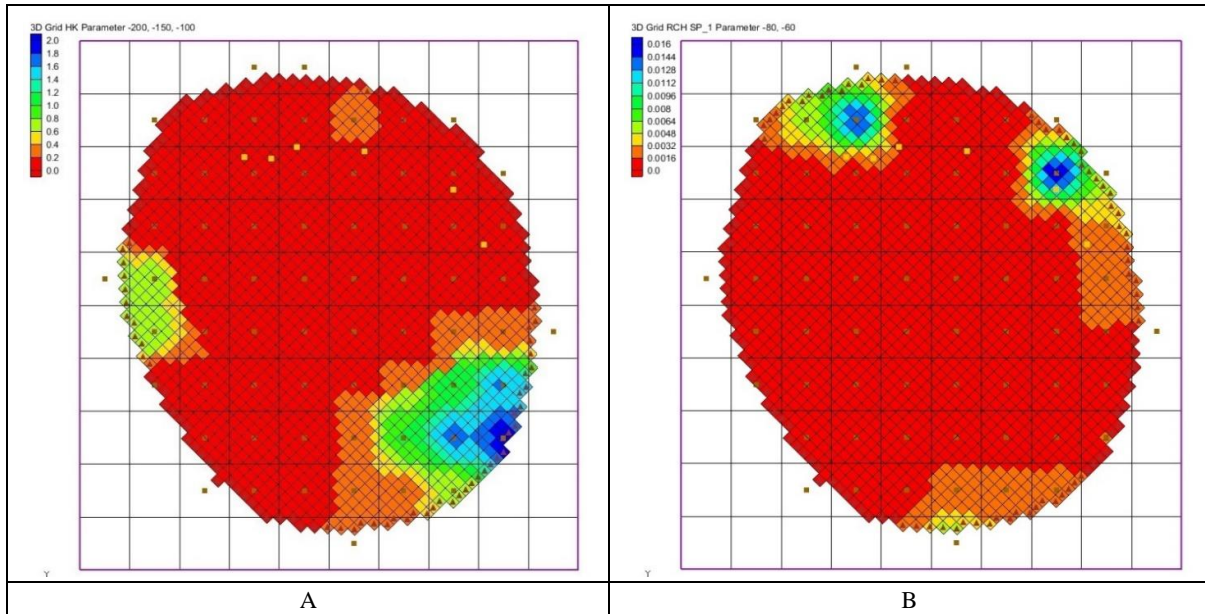


شکل ۱۰- اختلاف داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مدل پس از واسنجی، در چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومتری محدوده مورد مطالعه (نمادهای بالای نمودار راهنمای چاه‌های موجود می‌باشند).

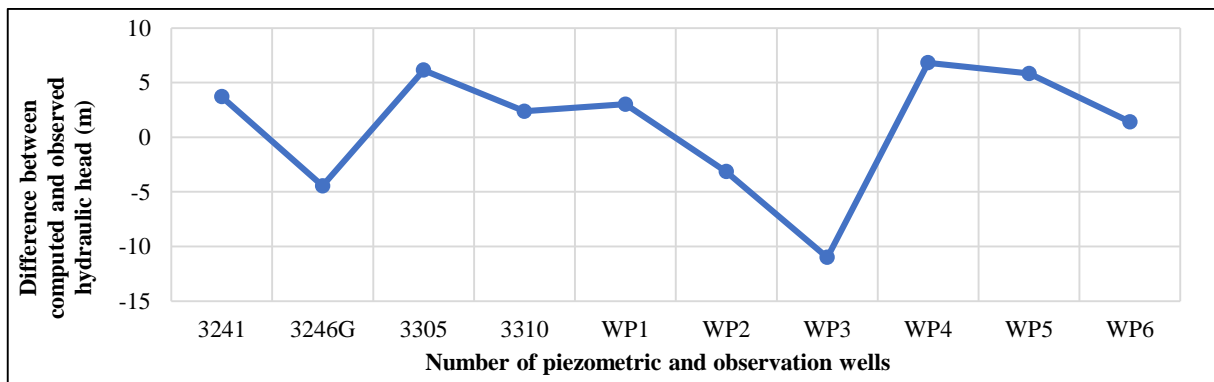
Figure 10- The difference between the observed and computed data of the model after calibration, in observational and piezometric wells of the study area (symbols above the diagram are guides for wells).

صحت‌سنجی نشان داده شده است. در قسمت شمال شرق محدوده مورد مطالعه به دلیل قرار گرفتن پیت در نزدیکی کارخانه احداث شده و همچنین در قسمت شمال غرب محدوده مورد مطالعه به دلیل قرار گرفتن در نزدیکی سد باطله مقدار بیشتر تغذیه مشاهده می‌شود. در شکل ۱۲ نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره تنش تیرماه ۱۳۹۹ با استفاده از پارامترهای واسنجی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه چاه‌ها غیر از WP3 اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی قابل قبول می‌باشد. اختلاف زیاد هدایدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی این چاه به دلیل وجود گسل‌های متعدد در نزدیکی این چاه و شرایط تکتونیکی پیچیده در این قسمت از محدوده مورد مطالعه می‌باشد. با بررسی میزان خطای شبیه‌سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان نتیجه گرفت که مدل تا حد زیادی توانسته است رفتار جریان آب زیرزمینی و استرس‌های وارد بر آن را به خوبی شبیه‌سازی کند. در جدول ۳ مشخصات مدل در حالت‌های مختلف برای مدل‌سازی گزارش شده است.

برای صحت‌سنجی، مدل واسنجی شده جریان آب زیرزمینی را برای دوره‌های زمانی غیر از دوره زمانی واسنجی شبیه‌سازی می‌کند و میزان تطابق آن با شرایط واقعی و صحرایی بررسی می‌شود. مدل واسنجی شده‌ای قابل قبول است که توانایی شبیه‌سازی حوادث این دوره زمانی را به درستی داشته باشد. در طی این مرحله به منظور صحت‌سنجی مدل پس از واسنجی آن، صحت آن در دوره زمانی بهمن ۱۳۹۸ مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۱۱ پارامترهای واسنجی شده ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه، با استفاده از روش Pilot Point در یک شبکه دو بعدی ۱۰ در ۱۰ نشان داده شده است که طول و عرض هر جز از شبکه به ترتیب حدود ۳/۳ و ۳/۱ کیلومتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۱ (B) مشاهده می‌شود ضریب هدایت هیدرولیکی در قسمت جنوب شرق که رسوبات ضخامت بیشتری دارند، بیشترین مقدار خود و نزدیک به ۲ متر بر شبانه روز می‌باشد. همچنین در قسمت‌های مرکزی پیت که شامل قسمت سنگی می‌باشد، کمترین مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی در حدود ۰/۱ متر بر شبانه روز می‌باشد. در شکل ۱۱ (A) مقدار پارامتر تغذیه بعد از واسنجی و



شکل ۱۱- A) مقادیر پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی و B) تغذیه آبخوان بعد از واسنجی و صحت‌سنجی.
Figure 11- A) The parameter values of the hydraulic conductivity and B) Recharge of the aquifer after calibration and verification.



شکل ۱۲- اختلاف داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مدل پس از واسنجی در چاه‌های پیزومتری و مشاهداتی محدوده مورد مطالعه.
Figure 12- The difference between the observed and computed data of the model after calibration in piezometric and observation wells of the studied area.

جدول ۳- مشخصات مدل در حالت‌های مختلف برای مدل‌سازی.

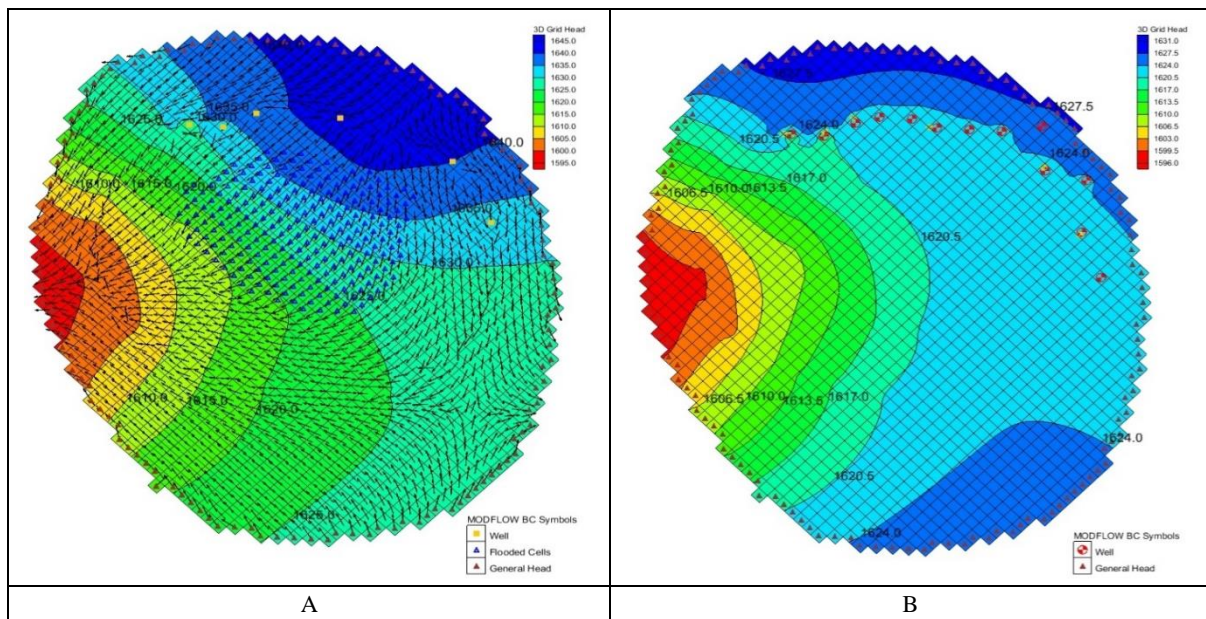
Table 3- Model specifications in different modes for modeling.

	Steady state	Transient state
Time	A period of one month	A period of 6 months including 6 periods of tension with time steps of 30 days
Variable parameter	The upper and lower surface level of the aquifer, hydraulic conductivity, recharge, porosity, primary head	The upper and lower surface level of the aquifer, hydraulic conductivity, recharge, porosity, primary head, groundwater level of wells in different periods of time, transmissivity of aquifer
Modules used in the model	Well, recharge, boundary conditions	Well, recharge, boundary conditions
Solver	PCG .LMG	PCG .LMG
The number of iterations	50	100

سطح ایستابی، جهت جریان و میزان آب ورودی و خروجی از بخش‌های مختلف پیت معدن

با توجه به اهمیت شناسایی سطح ایستابی آب زیرزمینی در مکان‌های مختلف به منظور تعیین جهت جریان آب زیرزمینی در این بخش سطح آب زیرزمینی بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ سمت چپ مشاهده می‌شود سطح آب زیرزمینی در قسمت شمال پیت افزایش داشته است که احتمالاً به دلیل وجود آب‌های فسیلی و یا ورود آب از بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه می‌باشد. علاوه بر آن در قسمت جنوبی پیت هم افزایش سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود که احتمالاً به دلیل وجود آب‌های فسیلی و یا ورود آب از آنومالی شماره یک در این محدوده می‌باشد. در قسمت غربی پیت با وجود قرار گرفتن در نزدیکی ارتفاعات، سطح آب زیرزمینی کاهش داشته است که به دلیل شرایط تکتونیکی پیچیده به‌ویژه وجود گسل‌های متعدد در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. آب‌گرفتنی در قسمت‌های مرکز پیت نشان از ورود آب زیرزمینی از پله‌های مختلف دارد که به دلیل افزایش عمق معدنکاری و قرار گرفتن پیت معدن در زیر سطح ایستابی آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به شناسایی سطح آب زیرزمینی در اطراف محدوده معدن، شیب هیدرولیکی و جهت جریان

آب زیرزمینی از قسمت شمال پیت به سمت مرکز پیت و محدوده غربی معدن گهر زمین می‌باشد. شناسایی شیب هیدرولیکی و جهت جریان آب زیرزمینی علاوه بر اینکه برای مکان‌یابی چاه‌های پمپاژ استفاده می‌شود، تا حدودی شیب لایه‌های زیر سطحی را شناسایی می‌کند. در ادامه با توجه به بررسی سطح آب زیرزمینی میزان آب ورودی و خروجی در سه بخش شمالی، غربی و مرکزی پیت بعد از واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. در قسمت شمالی پیت از ۳۳ سلول انتخاب شده برای محاسبه میزان آب ورودی و خروجی در مجموع حدود ۶۸۰ مترمکعب بر شبانه روز آب وارد محدوده مدل‌سازی می‌شود. در قسمت غربی به دلیل شیب هیدرولیکی موجود از ۱۹ سلول انتخاب شده حدود ۱۴۴۸ مترمکعب بر شبانه روز آب از محدوده خارج می‌شود. این محدوده پتانسیل خوبی برای زهکشی آب و استفاده از آن برای مصارف صنعتی دارد. در قسمت مرکزی پیت هم از ۲۴۵ سلول آب گرفته انتخاب شده به ترتیب حدود ۷۲۶ و ۷۱۰ مترمکعب آب وارد و خارج می‌شود که نشان از عدم بهینه بودن پمپاژ دارد. در جدول ۵ میزان مجموع آب ورودی و خروجی به کل محدوده مدل‌سازی شده در حالت غیرماندگار را نشان داده است.



شکل ۱۳- A) مقدار سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی بعد از واسنجی و صحت‌سنجی و B) موقعیت چاه‌های پیشنهادی بهره‌برداری و سطح ایستابی ایجاد شده بعد از بهینه شدن چاه‌ها.

Figure 13- A) The water table's value and the groundwater flow direction after calibration and validation. B) the position of the proposed wells, and the water table created after the optimization of wells.

جدول ۴- میزان آب ورودی و خروجی به محدوده‌های مختلف پیت بعد از واسنجی و صحت‌سنجی.

Table 4- The amount of water inflow and outflow to different areas of the pit after calibration and validation.

	The northern part of the area	The central part of the area	The western part of the area
Water inflow (m ³ /d)	824.41	726.69	56.41
Water outflow (m ³ /d)	-144.61	-710.9	-1504.42
Total	679.79	15.78	-1448.01

جدول ۵- میزان آب ورودی و خروجی به کل محدوده مدل‌سازی شده در حالت غیرماندگار.

Table 5- The amount of water inflow and outflow to the modeled area in a transient state.

	First tension period	Second tension period	Third tension period	Fourth tension period	Fifth tension period	Sixth tension period	Total
Water inflow to pit (m ³ /d)	16983.41	8874.65	7137.69	6260.57	5718.21	5355.85	-0.3673
Water outflow to pit (m ³ /d)	-16983.81	-8875.03	-7138.02	-6260.96	-5718.57	-5356.21	

مدیریت زهکشی پیت معدن گهر زمین

موقعیت شمالی پیت متمرکز شده‌اند نرخ پمپاژ آن‌ها افزایش پیدا کرده و علاوه بر آن‌ها تعداد هفت چاه دیگر با کمترین فاصله مکانی از لبه پیت در اطراف محدوده شمالی پیت در نظر گرفته شد. در ادامه به منظور بررسی کارایی مدیریت زهکشی پیشنهادی، مدل با چاه‌های بهره‌برداری بهینه شده و پیشنهادی اجرا شده است. در شکل ۱۳ سمت راست موقعیت چاه‌های پمپاژ موجود (رنگ زرد) و پیشنهادی (رنگ قرمز) در محدوده مورد مطالعه و همچنین سطح ایستابی آب زیرزمینی بعد از اعمال چاه‌های بهینه شده که به مدت یک ماه فعالیت داشته‌اند نشان داده شده است. شکل ۱۳ سمت راست نشان از پایین آمدن حدود ۱۴ متری سطح ایستابی در محدوده شمال پیت معدن که محل ورود آب می‌باشد دارد. همچنین در قسمت شرقی پیت معدن افت حدود ۱۰ متری بعد از بهینه شدن چاه‌های بهره‌برداری مشاهده می‌شود. علاوه بر آن در قسمت مرکزی پیت بعد از بهینه شدن مقادیر چاه‌های پمپاژ، آب گرفتگی در قسمت‌های مرکزی محدوده مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود. در جدول ۶ موقعیت جغرافیایی، عمق و مقدار دبی بهینه چاه‌های پمپاژ موجود و پیشنهادی نشان داده شده است.

پس از تایید صحت عملکرد مدل، با توجه به بالا بودن سطح آب زیرزمینی در قسمت شمالی پیت و همچنین آب گرفتگی بخش‌های مرکزی پیت نوبت به بهینه‌سازی مقادیر برداشت چاه‌های پمپاژ از آب زیرزمینی می‌رسد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در محدوده پیت معدن آهن گهرزمین نشان می‌دهد که میزان جریان آب ورودی به پیت در بخش‌های شمالی نسبت به سایر بخش‌ها بیشتر می‌باشد که این با موقعیت سطوح تراوش در پله‌های معدن نیز مطابقت دارد. بنابراین برای بهینه‌سازی نرخ برداشت آب زیرزمینی از محدوده پیت معدن، علاوه بر چاه‌های پمپاژ موجود که در ساعت‌های محدود در طول شبانه روز و بدون برنامه مشخص فعالیت دارند، ۷ چاه به صورت پیشنهادی به مدل وارد شد تا دبی بهینه چاه‌های موجود و جدید بررسی شود. موقعیت چاه‌های پمپاژ پیشنهادی بر مبنای سطوح تراوش و همچنین قرارگیری سد باطله در نظر گرفته شده است، تا از محل‌هایی که بیشترین حجم آب به پیت ورود می‌کند، آب زیرزمینی زهکشی شده و نفوذ آب به محدوده معدنکاری به حداقل برسد. بنابراین چاه‌های موجود که در

جدول ۶- دبی بهینه شده چاه‌های موجود و پیشنهادی.

Table 6- Optimized flow of existing and proposed wells.

Name of the well	Longitude(m)	Latitude (m)	Depth of wells (m)	Flow Rate (m ³ /d)	
Existing wells	PW03	333428	3221480	223	-86
	PW04	333037	3221536	250	-96
	PW05	332889	3221456	250	-6
	PW06	332677	3221440	241	-13
	PW07	334207	3220869	239	-83
	PW10	334020	3221254	249	-106
	Proposed wells	1	333168	3221538	149
2		333338	3221526	147	-100
3		333636	3221466	151	-86
4		333803	3221457	150	-113
5		334010	3221486	144	-105
6		334241	3221177	144	-115
7		334315	3220628	142	-71

نتیجه‌گیری

۴- میزان میانگین بارندگی جزئی نشان از این دارد که آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نتیجه بارندگی نمی‌باشد و مربوط به آب‌های فسیلی است.

۵- محدوده معدن سنگ آهن گهر زمین به دو بخش رسوبات نفوذپذیر دوران چهارم به عنوان آبخوان و بخش سنگی به عنوان آبخوان کم‌تراوا تقسیم‌بندی می‌شود.

۶- بخش بزرگی از مخزن آب زیرزمینی معدن سنگ آهن گهر زمین به دلیل فشار هیدرواستاتیک، فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی، گسیختگی‌های ناشی از تنش‌های تکتونیکی درهم ریخته و منجر به تراوش آب از دیواره‌های مخزن در اغلب بخش‌ها به دلیل تحت فشار بودن مخزن شده است.

۷- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل نشانگر حساسیت بالای مدل به پارامتر هدایت هیدرولیکی می‌باشد که حاکی از این است که با تغییرات کم این پارامتر، بار هیدرولیکی تغییرات زیادی می‌کند. همچنین این نتایج نشان دهنده حساسیت خیلی کم مدل به پارامتر تغذیه می‌باشد.

۸- بررسی نقشه سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بیشترین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در مناطق شمال شرق در حدود ۱۶۴۵ متر از سطح دریا و کمترین تراز مربوط به قسمت غربی پیت و در حدود ۱۵۹۵ متر از سطح دریا می‌باشد. جهت بردارهای سرعت جریان آب زیرزمینی بیانگر جهت کلی حرکت آب‌های زیرزمینی از نواحی شمال شرق به طرف

تا پیش از این پژوهش، مدل عددی آب زیرزمینی کاملی معرفی نشده بود که به خوبی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کند. در پژوهش حاضر یک مدل مفهومی بسیار خوب با بررسی‌های هیدروژئولوژیکی انجام شده از منطقه توسعه داده شده که بر اساس آن هندسه آبخوان، مرزهای ورودی، مرزهای خروجی، ارتباط هیدرولیکی آبخوان، مناطق با افت سطح ایستابی بیشینه و هر پارامتری که در بررسی هیدروژئولوژیکی یک منطقه لازم است، تعیین یا تخمین زده شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با به‌کار بردن عوامل زیر شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در محدوده معدن سنگ آهن گهر زمین موثر بوده است و در معادن دیگر نیز می‌تواند برای مدل‌سازی آب زیرزمینی استفاده گردد:

۱- روش پیشنهادی Pilot Point به‌منظور تخمین پارامترهای تأثیرگذار بر جریان آب زیرزمینی در مدل منجر شده است که رفتار پیچیده تغییرات زمانی سطح ایستابی پیرومترها و چاه‌های مشاهده‌ای با خطای قابل قبول شبیه‌سازی شود.

۲- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان به شکل تابعی متغیر با زمان در مرحله شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی وارد مدل شدند.

۳- ضخامت رسوبات دوران چهارم از شمال به سمت جنوب و از شرق به سمت غرب کاهش دارد.

نخعی، م.، حسنی، ع.، مقیمی، ه.، و نوین‌پور، ا.، ۱۴۰۰. پیش‌بینی اثرات ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه بر آبخوان دشت زرنديه (استان مرکزی) با استفاده از نرم‌افزار GMS. هیدروژئولوژی، ۶(۲): ۱۳-۲۹.

ندیری، ع.، نادری، ک.، اصغری‌مقدم، ا.، و حبیبی، م. ح.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و زمین‌آمار (مطالعه موردی: آبخوان دشت دوزدوزان). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۰(۵۸): ۲۸۱-۳۰۱.

Adhikari, K., and Mal, U., 2021. Evaluation of contamination of manganese in groundwater from overburden dumps of Lower Gondwana coal mines, *Environmental Earth Sciences*, 80: 23.

Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied groundwater modeling flow and advective transport. Academic press, Inc. 381 p.

Hai, W., and Meiling, T., 2022. Water resources protection of mining area in Toutun river basin of Tianshan Mountains: a case study of Liuhuanguo Coal Mine, *Environmental Earth Sciences*, 81: 372.

Kumar, N., Sarcar, A., 2013. Review on Dewatering Pumping Network for Underground Coal Mine, *Proceedings Of the 1th International and 16th National Conference On Machines and Mechanism, India*, 957-964.

Hermite, L.P., Plagnes, V., Jost, A., Kern, G., Reil , B., Chautard, C., and Descostes, M., 2022. Characterizing groundwater flow in a former uranium mine (Berthol ne, France): Present status and future considerations, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44: 101221.

Liu, S., Dai, S., Zhang, W., Li, W., Liu, Y., Ren, Y., and Li. W., 2022. Impacts of underground coal mining on phreatic water level variation in arid and semiarid mining areas: a case study from the Yushenfu mining area, China, *Environmental Earth Sciences*, 81: 269.

Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., Luo, J., 2013. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers, *Journal of Hydrology*. 505: 24-34.

Mohan, S., Kumudesan Pramada, S., and Anju, M., 2022. Management of dewatering schemes in an open cast mine operation using groundwater flow modeling: a case study of karst aquifer, Tamil Nadu, India, *Acta Geophysica*, 70: 283-303.

خروجی پیت در غرب می‌باشد. احتمالاً فرآیندهای تکتونیکی سبب درهم‌ریختگی نظم لایه‌ها و منجر به پیچیدگی شرایط زمین‌شناسی این منطقه و یا حتی حضور گسل‌ها در این محدوده به‌عنوان آب‌بند در عمق زیاد شده است. به‌طوری‌که این گسل‌ها در قسمت غربی پیت مانع از ورود آب از ارتفاعات محدوده غربی معدن سنگ آهن گهر زمین شده‌اند.

علاوه بر نتایج ذکر شده، بهینه‌سازی چاه‌های بهره‌برداری توسط مدل واسنجی شده نشان از کاهش سطح ایستابی به اندازه ۱۴ متر در بخش شمالی و ۱۰ متر در بخش شرقی محدوده مورد مطالعه در طی یک ماه دارد. علاوه بر آن پس از بهینه شدن مقادیر چاه‌های پمپاژ، آب‌گرفتگی در قسمت‌های مرکزی محدوده مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود. بنابراین با اجرای زهکشی ذکر شده، سطح آب زیرزمینی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده که به شکل غیرمستقیم منجر به کاهش هزینه‌های آتشیاری با خشک کردن چاله‌های حفاری و در نتیجه افزایش بهره‌وری استخراج مواد معدنی می‌شود.

منابع

جهانشاهی، ر.، ۱۳۹۲. اثرات زیست محیطی معدن سنگ آهن گل‌گهر بر آب‌های زیرزمینی منطقه، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شیراز.

حسن‌زاده، ف.، کمالی، غ.، رنجبر، ح.، و سبزواری، م.، ۱۳۹۴. تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های لاگ سنگ‌شناسی و سونداژ زنی ژئوالکتریکی (مطالعه موردی: معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۲۹(۹): ۱۹-۲۶.

خالدی‌علمداری، م.، مجنون‌هریس، ا.، و فاخری‌فرد، ا.، ۱۴۰۱. برآورد هدایت هیدرولیکی و ضریب‌ذخیره آبخوان دشت شبستر با استفاده از مدل عددی. هیدروژئولوژی، ۱(۷): ۴۲-۵۲.

کرد، م.، اصغری‌مقدم، ا.، و نخعی، م.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۱۵۳-۱۶۷.

- case of Lake Karla aquifer, *Water Supply* (2021) 21 (6): 2633–2645.
- Whithe, S.P., Creighton, A., Bixley, P., Kissling, W.M., 2004. Modeling the dewatering and depressurization of the Lihir open-pit gold mine., " *Geothermics*, 3: 443-456.
- Yang, T.H., Liu, J., Zhu, W.C., Elsworth.D., Tham.L.G., Tang.C.A., 2007. A Coupled Flow-stress-damage Model For Groundwater Outbursts From An Underlying Aquifer into Mining Excavations, *International journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 44: 87-97.
- Mohanty, S., Madan K.J., Kumar, A., Panda, Dileep, K.P., 2013. Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulation groundwater flow in Kathjadi-surua Inter-basin of adisha, India, *Journal of Hydrology*, 495: 38-51.
- Najafabadipour, A., Kamali, G.R., 2017. 3D Modeling and Bedrock Determination Using Electrical Resistivity Inversion. 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, September, Sweden, (1): 1-5.
- Najafabadipour, A., Kamali, G.R., 2019. Exploring and Modelling the Qanat Gallery Path Using Electrical Resistivity Tomography Data, 1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM, September, Netherlands, (1): 1-5.
- Najafabadipour, A., Kamali, G., Nezamabadi-pour, H., 2022a. Application of Artificial Intelligence Techniques for the Determination of Groundwater Level Using Spatio-Temporal Parameters. *ACS Omega*. 7(12): 10751-64.
- Najafabadipour, A., Kamali, G., Nezamabadi-pour, H., 2022b. The Innovative Combination of Time Series Analysis Methods for the Forecasting of Groundwater Fluctuations. *Water Resources*. 49(2): 283-91.
- Sahooa, L.K., Bandyopaphyay, S., Banerjee, R., 2014. Water and energy assessment for dewatering in opencast mines, *Journal of Cleaner Production*, 84: 736-745.
- Simin, J., Xianglang, K., Hong, Y., Nianqing, Z., 2012. Groundwater dewatering optimization in the Shengli no. 1 open-pit coalmine, Inner Mongolia, China, *Environ Earth Science*, 10(1): 187–196.
- Singh, R.N., Reed, S.M., 1988. Mathematical modelling for estimation of mine water inflow to a surface mining operation, *international journal of mine water*, 7: 1-34.
- Surinaidu, L., Guranadha, Rao.V.V.S., Srinivasa, Rao.V., Srinu, S., 2014. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India, *Journal Water Resources and Industry*, 7: 49-65.
- Tziatzios, G., Sidiropoulos, P., Vasiliades, L., Lyra, A., Mylopoulos, N., Loukas, A., 2019. The use of the pilot points method on groundwater modelling for a degraded aquifer with limited field data: the