Archive of SID



# شبیه‌سازی و پیش بینی فرایند زهکشی در محیط آبرفتی و سازند سخت پیت روباز معدن سنگ آهن گل‌گهر

**رضا جهانشاهی**
*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان*
**الهام راوند**
*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان*
**ناصر اسدی**
*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان*
**سپیده مالی**
*کارشناس ارشد آب شناسی، شرکت پویان آب هامون*
**سید محمد حسینی سبزواری**
*کارشناس ارشد آب شناسی، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر*
*تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۹*
jahanshahireza@science.usb.ac.ir

## چکیده

ناحیه معدنی سنگ‌آهن گل‌گهر در ۵۳ کیلومتری جنوب غرب شهرستان سیرجان، استان کرمان یکی از بزرگترین معادن روباز کشور می‌باشد. در اثر استخراج و بهره‌برداری از معدن، تراز کف پیت معدن به زیر سطح آب زیرزمینی منطقه رسیده و هجوم آب زیرزمینی به پیت معدن رخ داده است. جهت جلوگیری از آب‌گرفتگی پیت معدن، عملیات زهکشی آب زیرزمینی با نرخ حدود ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر مکعب بر روز اجرا می‌شود و درنتیجه‌ی آن، یک مخروط افت بزرگ در محدوده‌ی پیت تشکیل شده است. جهت انجام مدیریت صحیح فرایند زهکشی، خصوصاً تشدید احتمالی نشت آب زیرزمینی به محدوده پیت در اثر تعمیق آن در طی توسعه آتی معدن و همچنین به منظور شناخت مکانیسم حرکت آب‌های زیرزمینی در این محدوده، با استفاده از نرم‌افزار FEFLOW یک مدل ریاضی حرکت آب زیرزمینی در محدوده‌ی معدنکاری ارائه شده است که بتواند شرایط پیچیده تخلخل دوگانه سازند سخت معدن را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید. در این تحقیق، تلاش گردیده تا با به‌کارگیری شبکه‌بندی عناصر محدود، درنظر گرفتن درزه و شکاف‌های سازند سخت و به کارگیری متناسب معادلات حاکم بر حرکت آب در این محیط ناهمگن و اعمال سطح تراوش محدوده‌ی پیت در مدل، نوسانات سطح آب زیرزمینی منطقه، به نحوه‌ی مناسب و قابل قبولی شبیه‌سازی شوند. در نهایت با انجام بهینه‌سازی توسط مدل، موقعیت ۱۰ حلقه چاه و دبی پمپاژ بهینه در یک سناریوی پیشنهادی زهکشی، مشخص شده است. پیش‌بینی مدل، حاکی از آن است که در طول یک سال، سطح ایستابی در محدوده‌ی پیت به اندازه ۱۸ متر افت خواهد نمود. لذا با اجرای بخش کاربردی تحقیق با استفاده از سناریوی پیشنهادی مذکور در زهکشی، سطح آب زیرزمینی به زیر توده معدنی خواهد رسید و عملیات معدنکاری می‌تواند بدون مشکل از لحاظ آب‌گرفتگی پیت ادامه یابد.

**کلمات کلیدی:** *مدل آب زیرزمینی، زهکشی، سطح تراوش، بهینه‌سازی، نرم‌افزار FEFLOW*

## مقدمه

در امر استخراج معادن، در پاره‌ای از موارد، به‌ناچار، عملیات استخراج مواد معدنی در زیر سطح آب‌های زیرزمینی انجام می‌شود. یکی از مسائل اصلی و مهم که در چنین مواردی معدنکاران با آن مواجه هستند، ورود آب زیرزمینی به تونل‌ها یا گودال‌های معدنی می‌باشد. وجود آب در معادن علاوه بر مزاحمتی که در عملیات استخراج ایجاد می‌کند، یکی از پارامترهای مهم در ناپایداری دیواره‌هاست. بی‌تردید، شناخت کافی از رژیم آب‌های زیرزمینی در اطراف معدن و ویژگی‌های هیدرولیکی لایه‌های زمین‌شناسی، در کنترل آب‌های زیرزمینی ورودی مؤثر می‌باشد. در نتیجه، جهت کنترل آب‌های زیرزمینی هجومی به محدوده‌ی معدنکاری بایستی سیستم آبکشی و زهکشی به‌درستی طراحی گردد تا ضمن اقتصادی بودن، سطح آب زیرزمینی را در محدوده‌ی مورد نظر با توجه به نرخ پایین رفتن کف گودال معدن، پایین نگه دارد. شبیه‌سازی جریان آب به داخل معدن و جریان آب‌های هجومی طی فرآیند مدل‌سازی می‌تواند به‌عنوان وسیله‌ای کارآمد به این امر کمک نماید. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در تهیه یک برنامه مدیریتی زهکشی معدن به‌منظور کاهش مشکلات معدنکاری در شرایط وجود آب زیرزمینی و اثرات متعاقب درازمدت زیست‌محیطی، در مراحل معدنکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (بیرانوند و همکاران، ۱۳۹۲). برای پیش‌بینی دقیق میزان آب ورودی به معادن روباز و طراحی شبکه پمپاژ، لازم است تا منابع مختلف آب‌های ورودی به آن و همچنین آب‌های خروجی و جهت حرکت این جریان‌ها مورد شناسایی قرار گرفته و در مدل‌سازی منظور گردند. مهم‌ترین بخش آب ورودی به معادن روباز از منابع الف) جریان‌های افقی و قائم آب زیرزمینی که از آبخوان‌های مجاور و سنگ بستر و ب) بارندگی و جریان‌های سطحی تامین می‌شود (Singh and Reed, 1988).

برای پیش‌بینی آب‌های هجومی به معادن، روش‌های تحلیلی و عددی ارائه شده است. روش‌های تحلیلی بر اساس یک سری فرض‌های ساده‌سازی طراحی شده‌اند و قادر نیستند تا به‌درستی شرایط و پارامترهای هیدرولیکی سفره‌ها را در نظر بگیرند و یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه از وضعیت هیدروژئولوژیکی پیچیده اطراف معدن را داشته باشند؛ ولی روش‌های عددی، بخصوص روش عناصر محدود، شرایط مختلف جریان را بسته به نوع سفره در نظر می‌گیرد و قادر است شرایط پیچیده هیدروژئولوژیکی را در محدوده معدن با دقت بالا شبیه‌سازی کند و میزان آب ورودی به معادن روباز را پیش‌بینی نموده و سیستم زهکشی و پمپاژ آب معدن را به‌درستی طراحی نماید (دولتی ارده‌جانی و همکاران،



www.SID.ir

Archive of SID



۱۳۸۳). در ارتباط با شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان مختلف، معمولا محققین از کد نرم‌افزاری مادفلو (Surinaidu et al., 2014، چیت سازان و همکاران، ۱۳۹۱، چیت سازان و همکاران، ۱۳۹۴، نخعی و صابری نصر، ۱۳۹۱) استفاده می کنند. همچنین در رابطه با فرایند زهکشی و پایین آمدن سطح ایستابی به زیر سطح تراز توده معدنی در پیت‌های روباز معادن و مشکلات ناشی از ورود آب به داخل معادناستفاده از مدل ریاضی متداول می باشد (Chengxin et al., 2016، Kumar and Sarcar, 2013، Sahooa et al., 2014، Simin at al., 2012، Whithe et al., 2004، Yang et al., 2007).

لذا با توجه به مطالب ذکر شده در ارتباط با زهکشی معادن، در این تحقیق حرکت آب زیرزمینی در محدوده‌ی پیت روباز معدن سنگ‌آهن گل‌گهر در جنوب غرب شهر سیرجان، استان کرمان شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

## منطقه مورد مطالعه

از نظر مورفولوژی، ناحیه معدنی گل‌گهر (شکل ۱) شامل یک دشت وسیع هموار تا ناهموار است که تک رشته‌هایی از تشکیلات کربناته از آن سر برآورده است. این ارتفاعات دارای دامنه نامنظم، آبراهه‌های فرسایشی و کارستی نامنظم می‌باشند. این ناحیه در دامنه جنوبی یک طاقدیس قرار داشته و آبرفت‌های عهد حاضر به‌جز چند رخنمون روی معدن را پوشانده‌اند. ناحیه معدنی گل‌گهر در لبه شمال شرقی پهنه سنندج-سیرجان و لبه فروافتادگی نمک‌زار کفه خیر آباد، که خود در حدفاصل پهنه سنندج-سیرجان و کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر به وجود آمده، قرار گرفته است (درویش زاده، ۱۳۷۰).

آبخوان سنگ معدن گل‌گهر از دو بخش آبرفتی و سنگی تشکیل شده است؛ لایه فوقانی از آبرفت و لایه تحتانی از سازندهای سخت تشکیل شده است. لایه فوقانی، بیشتر از جنس سازندهای سخت اطراف می‌باشد که فرسایش یافته و منفصل شده‌اند. با توجه به شکل گنبدی لایه سنگی که قلّه‌ی آن در موقعیت پیت قرار دارد؛ ضخامت آبرفت در مرکز پیت معدن کم و به سمت حواشی بیشتر می‌شود و به حدود ۱۵۰ متر می‌رسد. در سازند سخت به دلیل وضعیت تکتونیکی منطقه، شکستگی‌ها و گسل‌ها مانند یک آبخوان آبرفتی عمل کرده و آب‌های زیرزمینی در خلال شکستگی‌ها به‌راحتی انتقال می‌یابند (حسینی سبزواری، ۱۳۸۶). عملکرد گسل‌ها به همراه انفجارات معدنکاری در بعضی از قسمت‌ها باعث باز شدگی زون‌ها و در نتیجه، نشت آب در دیواره پیت معدنی شده است. همچنین ن در سمت شرقی محدوده‌ی پیت، ، محلی تحت عنوان تیل تر جهت تلنبار کردن پساب تر کارخانه در نظر گرفته شده است که احتمال داده می‌شود نشت آب از تیل تر ، نقش بسزایی در تروات آب از دیوار شرقی پیت داشته باشد.

## روش مطالعه و بحث

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی سفره‌ی آب زیرزمینی در محدوده پیت معدن و محدوده اطراف آن درمجموع تاکنون ۲۳۹ چاه مشاهده‌ای در دو لایه آبرفتی و سنگی حفر شده است (شکل ۲) که بسیاری از چاه‌های بخش درونی پیت در مراحل بعدی در نتیجه عملیات معدنکاری تخریب گردیده‌اند.

بر مبنای نقشه تراز سطح آب زیرزمینی و جهت جریان آبخوان (شکل ۳) ملاحظه می‌شود، حداکثر تراز سطح آب در شرق محدوده مطالعاتی قرار دارد و حداقل تراز سطح آب در محدوده پیت قرار دارد. با توجه به این شکل، جهت جریان آب زیرزمینی در نواحی مرکزی منطقه به دلیل زهکشی بالا در ناحیه معدن، به سمت پیت معدن می‌باشد و سرعت جریان در محدوده معدن افزایش قابل توجهی دارد. بنابراین در راستای انجام مدیریت صحیح فرایند زهکشی و شناخت مکانیسم حرکت آب‌های زیرزمینی در این محدوده، با استفاده از نرم‌افزار FEFLOW یک مدل ریاضی حرکت آب زیرزمینی در محدوده‌ی معدنکاری، با به‌کارگیری شبکه‌بندی عناصر محدود ارائه شده است که بتواند شرایط پیچیده‌ی هیدروژئولوژیکی معدن را شبیه‌سازی نماید و با ارائه یک سناریوی زهکشی مناسب، از آب‌گرفتگی پیت معدن، جلوگیری شود.

## مدل مفهومی

جزئیات سیستم واقعی و رفتار آن ممکن است بسیار پیچیده‌تر از آن چیزی باشد که مورد نیاز ما می باشد. مثلا برای تعیین دبی پمپاژ نیازی نیست که موقعیت تک تک ذرات خاک، همه لنزهای رسی در یک سازند ماسه‌ای و یا اثر هوای حل شده در آب مشخص شود. در عوض باید به ساده‌سازی سیستم مورد مطالعه تا حدی که برای اهداف مفید است اقدام شود. ساده‌سازی سیستم باید با توجه به هدف مدل‌سازی، منابع موجود و مساله مدیریتی مورد نظر صورت گیرد. اگر سیستم مورد مطالعه را بیشتر از حد مورد نیاز ساده شود ممکن است نتوان اطلاعات مورد نیاز را از مدل بدست آورد و اگر ساده‌سازی کمتر از حد لازم باشد احتمالا نمی‌توان اطلاعات مورد نیاز برای کالیبراسیون مدل و یا منبعی که بتواند مدل را حل کند، بدست آورد. در ساخت مدل مفهومی واحدهای آبچینه‌ای و مرزهای سیستم مشخص می‌گردند و اطلاعات صحرایی مورد نیاز برای بیلان آبی، اختصاص مقادیر پارامترهای مدل و استرس‌های هیدرولوژیکی، تهیه می‌گردد. بازدیدهای صحرایی در این مرحله توصیه می‌گردد. این بازدیدها مدل‌ساز را در چارچوب واقعیت‌های منطقه مورد مطالعه قرار داده و بر تصمیمات وی در حین کار تاثیر مثبتی می‌گذارد. لذا در این تحقیق مدل مفهومی مدلسازی بر مبنای سه اصل زیر در نظر گرفته شده است:

۱- درزه و شکافهای موجود در آبخوان سازند سخت. این بازشدگی‌ها می توانند هدایت هیدرولیکی بالایی داشته باشند و در نتیجه موجب افزایش سرعت آب زیرزمینی شوند و لذا معادله دارسی حاکم بر حرکت آب زیرزمینی در محیط متخلخل، در درزه و شکافها صادق نخواهد بود. بنابراین اگر در محل درزه و شکافها و گسلها معادلات Hagen-Poiseuille و یا Manning-Strickler حاکم باشد، شبیه سازی رفتار آبخوان سنگی می تواند نتایج بهتری را نشان دهد.

۲- به دلیل انجام فعالیت معدنی و انفجار، باز و بسته شدن بسیاری از درزه و شکافها، جابجایی ذرات در آبرفت و تغییر در تخلخل اتفاق می‌افتد و این سبب کاهش و افزایش هدایت هیدرولیکی در آبخوان نسبت به زمان می‌گردد. بهر حال در نرم افزارهای شبیه سازی فرض بر این است که هدایت هیدرولیکی نسبت به زمان عددی ثابت است. بنابراین نمی‌توان تغییرات زمانی سطح ایستابی حاصل از تغییرات زمانی هدایت هیدرولیکی را به راحتی شبیه سازی کرد. در حالیکه این قابلیت در نرم افزار FEFLOW وجود دارد که پارامترهای هیدرولیکی آبخوان بصورت متغیر تابع زمان وارد مراحل شبیه سازی شوند.

۳- به سبب شیب تند دیواره‌های پیت روباز معدن و برخورد سطح ایستابی، سطوح تراوشی در پیت ایجاد می‌شود. همانطور که می دانید در این سطوح، بار هیدرولیکی کل برابر با بار ارتفاعی می‌باشد و مولفه بار فشاری صفر است. در اکثر نرم افزارها شرایط مرزی محیط پیت معادن به درستی تعریف نمی‌شود و پس از شبیه سازی، در محدوده‌ی پیت سطح ایستابی بالاتر از سطح زمین است و یا به معنای دیگر در پیت مولفه بار فشاری مثبت است.

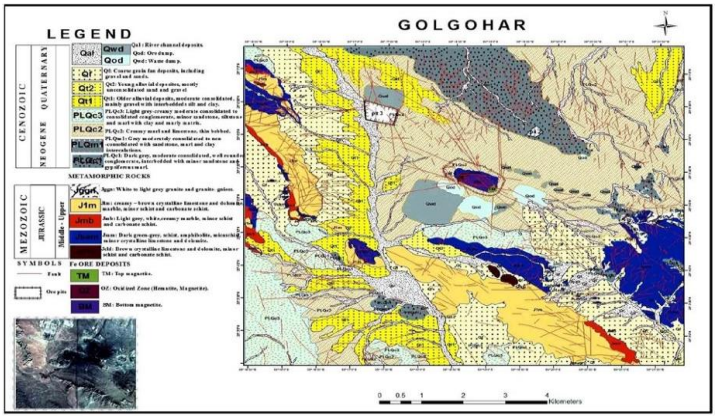


www.SID.ir

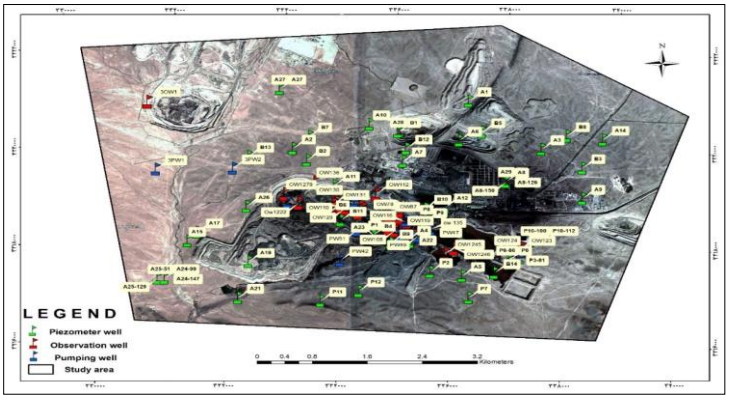
Archive of SID



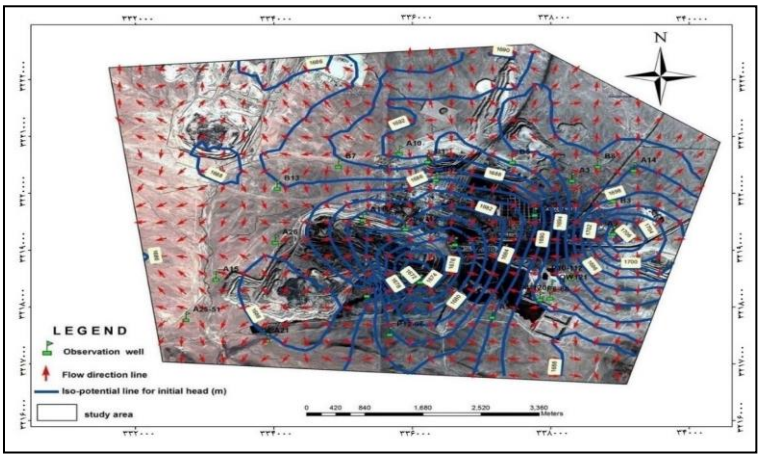
برای حل این مشکل در شرایط مرزی مدل، محدوده‌ی پیت در نرم افزار FEFLOW بعنوان سطح تراوش تعریف شده است و مدل در هنگام شبیه سازی نودهای موجود در پیت را به نحوی شبیه سازی می کند که سطح ایستابی بالاتر از سطح زمین قرار نگیرد.




شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی رقومی شده محدوده‌ی مطالعاتی گل‌گهر




شکل ۲. موقعیت چاه‌های پمپاژ، مشاهده‌ای و پیزومتری در منطقه‌ی مورد مطالعه




شکل ۳. جهت جریان و تراز سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی معدن

## تعیین شکل هندسی آبخوان

همانطور که پیش از این اشاره شد، آبخوان محدوده‌ی مطالعاتی، از لایه‌ی آبرفتی و سنگی تشکیل شده است و توده‌ی معدنی در بین این دو لایه قرار گرفته است(شکل ۴). ازاین‌رو در این پژوهش مدل از چهار لایه تشکیل شده است. لایه‌ی اول شامل آبخوان آبرفت، لایه‌ی دوم، آبخوان سازند سخت، لایه‌ی سوم، توده معدنی و لایه‌ی چهارم، آبخوان سنگی می‌باشد.

## تعیین شرایط مرزی

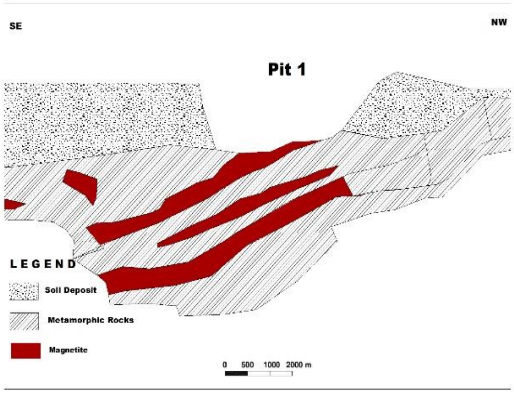
محدوده‌ی مدل‌سازی با توجه به گسترش مکانی چاه‌های پیزومتری در محدوده‌ی معدن، انتخاب شده است. در این محدوده، مرزهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی از جوانب، سطوح تراوشی در پیت، تخلیه از چاه‌های پمپاژ و تغذیه در تِیلِ تر و حوضچه تبخیر بعنوان شرایط مرزی مد نظر قرار گرفته است.



www.SID.ir

Archive of SID

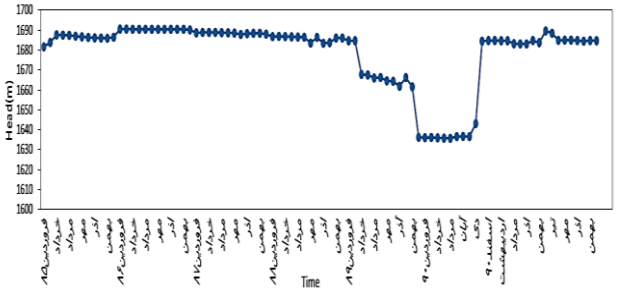





شکل ۴. نیمرخ زمین‌شناسی از محدوده‌ی پیت معدن

## تعیین شرایط اولیه

طبق هیدروگراف واحد سطح آب زیرزمینی (شکل ۵)، در مهرماه ۱۳۸۶، سطح ایستابی کمترین نوسات را دارد و نزدیک به حالت پایدار است. لذا این زمان به‌عنوان زمان حالت پایدار مدل‌سازی در نظر گرفته شده است و بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهده‌ای مهرماه ۸۶ به‌عنوان بار آبی اولیه در شرایط پایدار انتخاب شده است. معمولاً مدل برای حالت پایدار واسنجی می‌شود و نتایج آن به عنوان شرایط اولیه در حالت ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایط ناپایدار، بار آبی نهایی محاسبه‌شده توسط مدل کاملاً به بار آبی اولیه وابسته می‌باشد و با تغییر آن نتیجه نهایی نیز تغییر می‌یابد. لذا در این مطالعه بار هیدرولیکی محاسبه‌شده در حالت پایدار به عنوان بار آبی اولیه شرایط ناپایدار در نظر گرفته شده است.

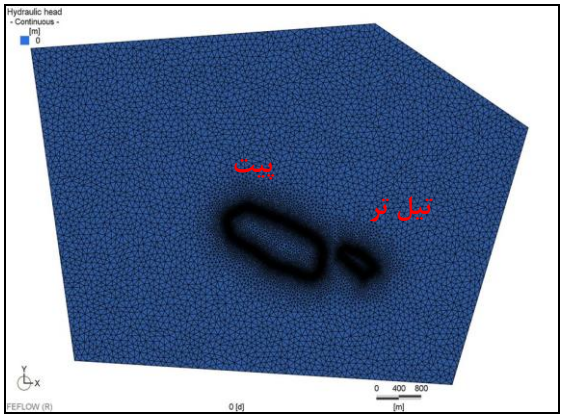



شکل ۵. هیدروگراف واحد آب زیرزمینی محدوده‌ی معدن در بازه زمانی ۹۲-۱۳۸۵

مدل ریاضی محدوده مطالعاتی برای دو حالت پایدار و ناپایدار تهیه شده است. در شرایط پایدار، مدل برای یک دوره تنش یک ماهه (مهر۱۳۸۶) و در شرایط ناپایدار، برای یک دوره یک ساله (مهر ۱۳۸۶تا مهرماه ۱۳۸۷) با ۱۲ دوره‌ی تنش یک ماهه (۱۲گام زمانی)، اجرا و واسنجی شده است.

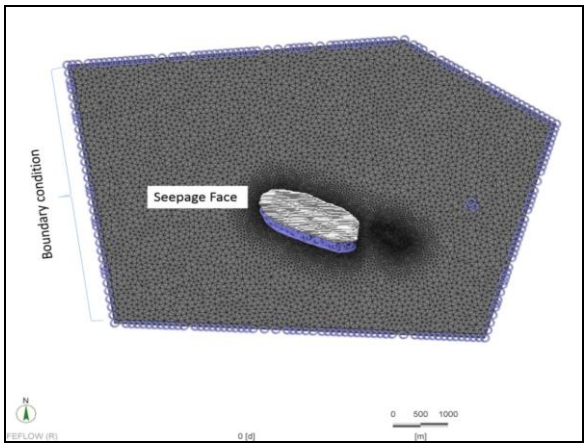
## شبکه‌بندی

برای اینکه بتوان معادلات جریان آب زیرزمینی را حل کرد؛ باید محدوده موردمطالعه را به صورت مکانی، تقسیم‌بندی نمود. در روش عناصر محدود، معمولاً منطقه مطالعاتی به تعدادی عناصر مثلثی (شبکه) تقسیم می‌گردد. در واقع با طراحی شبکه و سلول‌های مذکور، خصوصیات هیدرودینامیکی، تغذیه و تخلیه در محدوده‌ای از آبخوان که در داخل یک سلول واقع می‌شود، یکسان فرض می‌گردد. با توجه عملیات زهکشی در محدوده پیت معدن، اعمال شکستگی ها و همچنین موقعیت تِیلِ تر، شبکه‌بندی ریزتر و از مش‌بندی با چگالی ۶۰۰۰ استفاده گردید. همانطور که در (شکل ۶) مشاهده می‌شود، شبکه‌بندی در مرزهای پیت معدنی و تیل تر ریزتر و به سمت مرزهای محدوده‌ی بزرگ‌تر می‌باشند. مجموع تعداد مش‌ها برابر با ۹۵۲۰۰۰ و تعداد نودها برابر با ۶۰۰۳۵ می‌باشد.




شکل ۶. شبکه‌بندی عناصر محدود در محیط FEFLOW

به سبب شیب تند دیواره‌های پیت روباز معدن و برخورد سطح ایستابی، سطوح تراوشی در پیت ایجاد شده است. در این سطوح، بار هیدرولیکی کل برابر با بار ارتفاعی می‌باشد و مولفه‌ی بار فشاری صفر است. در اکثر نرم‌افزارها شرایط مرزی محیط پیت معادن به درستی تعریف نمی‌شود و پس از شبیه‌سازی، در محدوده‌ی پیت، سطح ایستابی بالاتر از سطح زمین است و یا به معنای دیگر، در پیت معدن، مولفه بار فشاری مثبت است. برای حل این مشکل در شرایط مرزی مدل، محدوده‌ی پیت، در نرم‌افزار به‌عنوان سطح تراوش تعریف شده است و مدل در هنگام شبیه‌سازی، نودهای موجود در پیت معدن را به نحوی شبیه‌سازی می‌کند که سطح ایستابی بالاتر از سطح زمین قرار نگیرد. بنابراین در محدوده‌ی پیت معدنی، در بخش‌های جنوبی و شرقی پیت معدنی گل‌گهر، یک سطح نشت وجود دارد که این سطح به عنوان سطح تراوش و شرایط مرزی پیت معدنی در نظر گرفته شد (شکل ۷).




شکل ۷. شرایط مرزی مدل، در محدوده‌ی پیت از بسته Seepage Face استفاده شده است

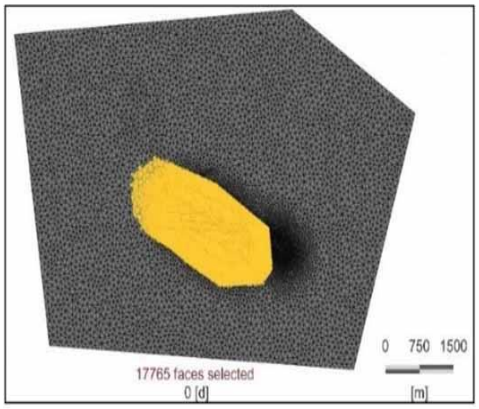
به دلیل وجود تخلخل دوگانه در محیط سنگی، درزه و شکاف‌های منطقه در محدوده‌ی پیت، به‌صورت بسته نرم‌افزاری Features در مدل تعریف شده‌اند (شکل۸). طبق این بسته، گسیختگی‌های لایه‌های سنگی به‌عنوان فضایی که می‌توانند هدایت هیدرولیکی از صفر تا بی نهایت داشته باشند، تعریف شده است. در این ناحیه معادلات حاکم بر حرکت آب زیرزمینی در محل درزه و شکاف‌ها معادله‌ی هیگن-پوازیله (Bear et al., 1993)، و برای مناطق بدون شکستگی معادله دارسی در نظر گرفته شده‌است.



www.SID.ir

Archive of SID






شکل ۸. موقعیت شکستگی ها در مدل

## مولفه‌های بیلان

میزان بارندگی در سال ۸۷-۱۳۸۶، حدود ۱۷۷ میلی‌متر می‌باشد که با توجه به مساحت ۴۲/۷۴ کیلومتر مربع محدوده مورد مطالعه، و با اعمال ضریب حداکثر ۲۰ درصد نفوذ بارش (جهانشاهی، ۱۳۹۲)، میزان حجم آبی که از طریق بارش به آبخوان نفوذ می‌کند برابر ۱۵۱۲۹۹۶ مترمکعب (۱/۵میلیون متر مکعب) در سال می‌باشد. از طرفی دیگر به سبب اینکه در این ناحیه عمق قرارگیری سطح سفره‌ی آب زیرزمینی، نسبتاً زیاد است، میزان تبخیر از آب زیرزمینی ناچیز در نظر گرفته شده است.

حجم آب زهکش شده در سال ۸۷-۱۳۸۶ از دیواره پیت و چاه‌های پمپاژ به ترتیب ۰/۸۵ و ۱/۴۹ میلیون متر مکعب می باشد، که در مجموع میزان تخلیه از پیت معدن برابر ۲/۵۵ میلیون متر مکعب می باشد.

بر اساس نتایج آزمایشات استوانه مضاعف در محدوده‌ی تِیلِ تر (جهانشاهی، ۱۳۹۲)، نرخ نفوذ آب در محدوده‌ی تِیلِ تر برابر با ۰/۰۷۹ متر بر روز در نظر گرفته شده است. با توجه به مساحت تِیلِ تر که حدود ۰/۱۲کیلومتر مربع می‌باشد؛ میزان آب نفوذی به آب زیرزمینی از طریق تیل تر برابر ۰/۰۱ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود.

## ضرائب هیدرولیکی آبخوان

مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان با استفاده از آزمونهای پمپاژ و لاگ های حفاری چاه‌های پیزومتری و اکتشافی در محدوده‌ی مطالعاتی استفاده بر مبنای جداول استاندارد (Todd and Mays, 2005) محاسبه و به نرم‌افزار معرفی گردید.

## واسنجی

مرحله واسنجی، مهم‌ترین و مشکل‌ترین عمل در مطالعات مدل‌سازی می‌باشد. در ساخت هر مدلی، نتایج حاصل از اولین محاسبه، معمولاً با مشاهدات اختلاف دارد. لذا به‌منظور کاهش اختلاف بین نتایج محاسباتی با مشاهداتی، کالیبراسیون یا واسنجی مدل صورت گرفته و مدل کالیبره می‌شود. در این تحقیق، بار هیدرولیکی به علت سهولت اندازه‌گیری آن و خطای کم ایجاد شده هنگام اندازه‌گیری، و همچنین کالیبراسیون آسان‌تر آن نسبت به دیگر پارامترها بعنوان معیار اصلی واسنجی انتخاب شده است. میزان خطای قابل قبول مربوط به بار هیدرولیکی، با توجه به تجربیات کسب شده در مدل‌سازی و با توجه به تحقیقات و کارهای مشابه انجام شده (کرسیک، ۱۳۸۱)، معادل ۱± متر در نظر گرفته شد و به مدل معرفی گردید.

با توجه به اینکه بار هیدرولیکی به عنوان معیار واسنجی به شمار می‌رود؛ برای مقادیر مشاهداتی در حالت پایدار، سطح آب در ۲۵ پیزومتر موجود در منطقه مدل‌سازی در ماه پایدار (مهر۸۶) به مدل معرفی گردید و پس از اجرای اولیه مدل، این مقادیر با مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل مقایسه گردید.

با توجه به اینکه مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان آبرفتی و سنگی از آزمون‌های پمپاژ و همچنین لاگ چاه‌های اکتشافی و پیزومتری تعیین گردیده و دارای درجه‌ی قطعیت کمتری است، در محدوده‌ای از مقادیر قابل قبول مورد تعدیل و تغییر قرار گرفت و واسنجی شد. از آنجایی که بر مبنای مدل مفهومی، مدل از چهار لایه با جنس‌های مختلف طراحی شد؛ علاوه بر لایه‌ی اول که بیشتر رسوبات آن را، رسوبات آبرفتی تشکیل داده است؛ ضرایب هیدرودینامیکی واحدهای سنگی لایه‌ی دوم، سوم و چهارم نیز مورد تغییر و واسنجی قرار گرفت.

پارامتر دیگری که در واسنجی حالت پایدار تغییر داده شد؛ شرایط مرزی محدوده‌ی مدل‌سازی است. تغییر شرایط مرزی با توجه به جهت جریان به پیت معدن و محل‌های ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی در پیت معدنی صورت گرفته است. علاوه بر واسنجی ضرایب هیدرودینامیکی کلیه لایه‌ها، شرایط مرزی سطوح تراوشی محدوده‌ی پیت، موقعیت و میزان بازشدگی شکستگی‌ها و ضرائب هیدرودینامیکی آن‌ها در لایه‌های سنگی نیز تغییر داده شد. در (شکل ۹) شبیه‌سازی بار هیدرولیکی در حالت جریان پایدار چاه‌های مشاهده‌ای پیش و پس از پایان مرحله واسنجی را نشان می‌دهد. بعد از واسنجی تمام پیزومترهای موجود در منطقه‌ی مدل‌سازی، در محدوده‌ی خطای قابل قبول قرار گرفتند (جدول ۱). همچنین در (شکل ۱۰) مقدار بهینه‌ی ضریب هدایت هیدرولیکی چهار لایه مدل نشان داده شده است.

جدول ۱. میزان خطای واسنجی در شرایط جریان پایدار

| دوره‌ی واسنجی | RMSE |
|---|---|
| اولین دوره در آغاز واسنجی | ۵/۳۶۳ |
| پایان مرحله‌ی واسنجی | ۰/۴۰۸ |

به‌طور کلی می‌توان مقادیر کمِ هدایت هیدرولیکی را به لیتولوژی متغیر و وجود لنزهای رسی در منطقه نسبت داد که با ضرایب به دست آمده از لاگ‌های حفاری همخوانی دارد. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی لایه‌ی اول مربوط به محدوده‌ی پیزومترهای OW123,OW121, OW124 و P10 می‌باشد که در قسمت شرقی پیت معدن قرار دارند و با توجه به لاگ حفاری نیز مشاهده می‌شود که جنس بیشتر رسوبات در محل برخورد با سطح آب، در این چاه‌ها، ماسه سنگ و گراول می‌باشد. بخش سنگی، درصد تخلخل بسیار ناچیزی دارد و نسبت به بخش آبرفتی منطقه هدایت هیدرولیکی کمتری دارد. پس از واسنجی مدل ساخته شده در حالت جریان پایدار، مدل‌سازی در حالت جریان ناپایدار طراحی شده است. در حالت جریان ناپایدار، مقدار پارامترهای مختلف به صورت دوازده دوره‌ی یک ماهه به مدل وارد شده است. به دلیل وجود اطمینان نسبی در خصوص صحت مقادیر پارامترهایی چون میزان تغذیه از طریق بارش و سطح آب اندازه‌گیری شده در پیزومترهای موجود در منطقه، طی دوره واسنجی، تغییری در مقدار داده‌های این لایه‌های اطلاعاتی داده نشد. لذا مهم‌ترین پارامتری که طی واسنجی مدل در حالت جریان ناپایدار مورد واسنجی قرار گرفت، آبدهی ویژه آبخوان بود. بهر حال طی چندین سعی و خطا به روش دستی، مدل واسنجی شد. در ( جدول۲) مشاهده می‌شود میزان خطای RMSE، در پایان دوره واسنجی به کمتر از یک رسیده است.



www.SID.ir

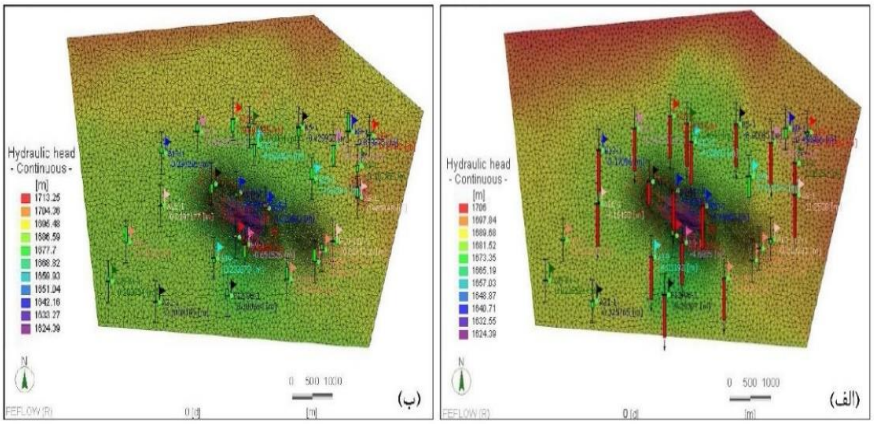
Archive of SID



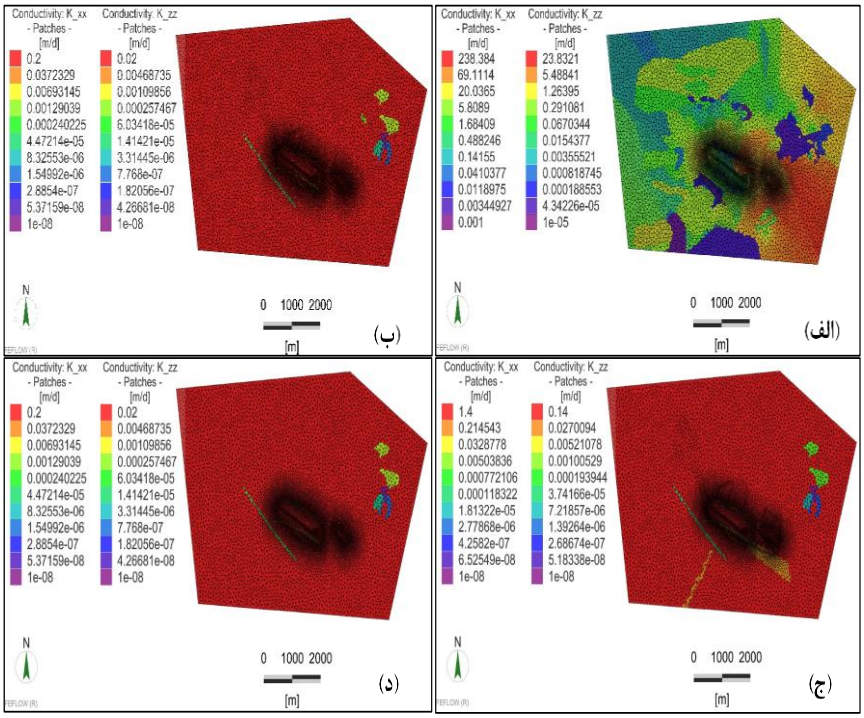
جدول ۲. میزان خطای واسنجی در شرایط جریان ناپایدار

| دوره‌ی واسنجی | RMSE |
|---|---|
| اولین دوره در آغاز واسنجی | ۱۰/۴۰۲ |
| پایان مرحله‌ی واسنجی | ۰/۱۸۵ |

در ادامه، هیدروگراف شبیه‌سازی شده سطح ایستابی قبل و بعد از واسنجی برخی از پیزومترها به همراه هیدروگراف مشاهداتی آن‌ها در (شکل ۱۱)شکل ۱۱. ترسیم شده است. با مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در ابتدای شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی توسط مدل دارای خطاهای زیادی بوده است و در طی مرحله واسنجی، با محاسبه مقادیر بهینه‌ی پارامتر آبدهی (شکل ۱۲) شبیه سازی تغییرات زمانی و مکانی سطح ایستابی به خوبی انجام شده است. بهر حال سفره‌ی آبدار منطقه مورد مطالعه از نظر لیتولوژی بسیار ناهمگن است و ترکیبات رسی زیادی را شامل می شود. لذا حداقل مقادیر آبدهی ویژه‌ی بهینه شده به میزان ۰/۰۲ به مناطق دارای رس و حداکثر مقادیر ضریب ذخیره به مناطق ماسه سنگی و گراولی اختصاص داده شده است.




شکل ۹. (الف) بار هیدرولیکی محاسباتی اولین اجرای مدل در حالت جریان پایدار، (ب) بار هیدرولیکی نهایی محاسباتی مدل در حالت جریان پایدار




شکل ۱۰. مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم

## حساسیت‌سنجی

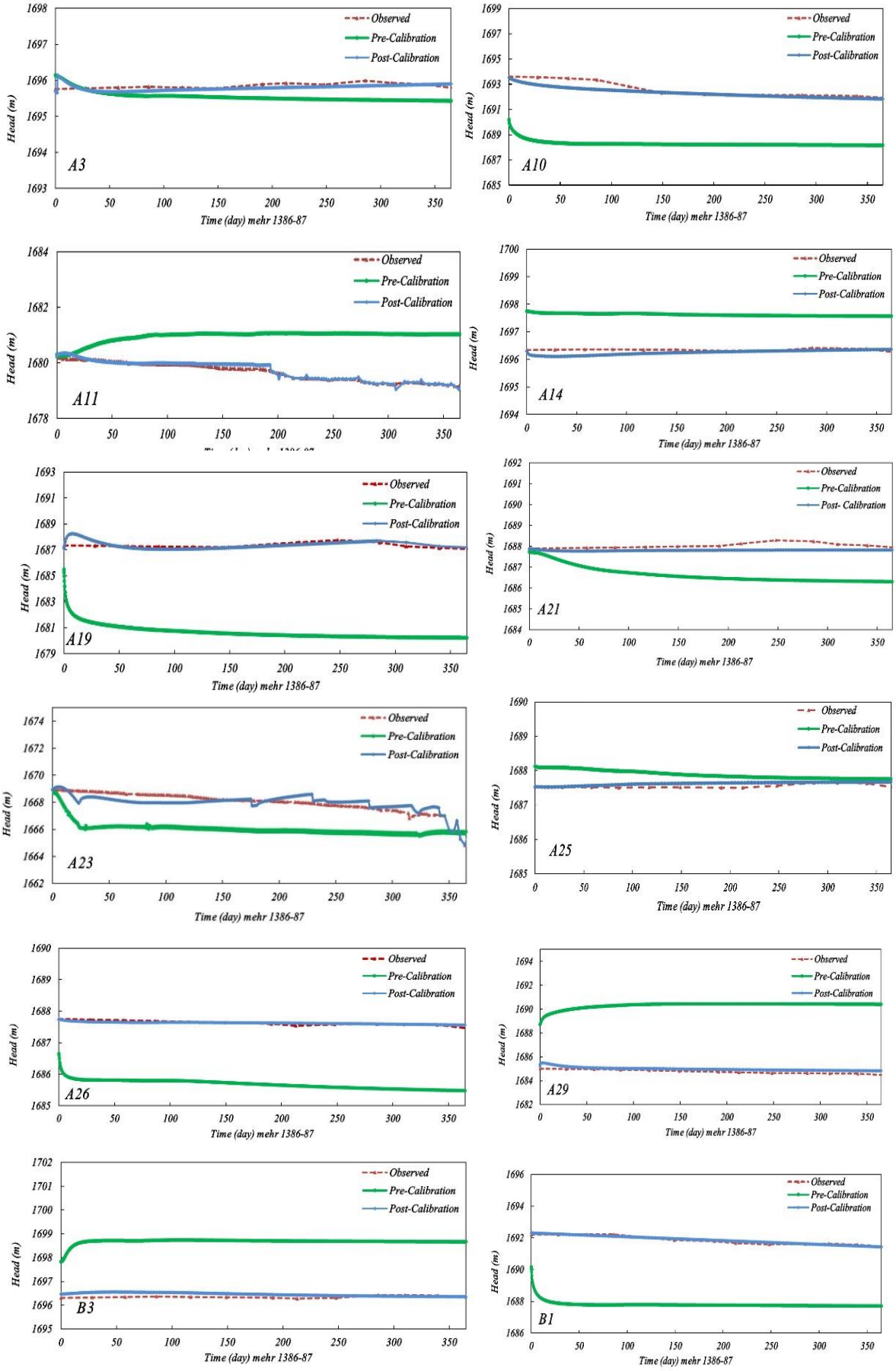
به‌منظور تعیین حساسیت مدل، نسبت به پارامترهای به کار رفته در مدل، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و میزان پمپاژ از چاه‌های تخلیه به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به صورت افزایشی و کاهشی تغییر داده شدند (شکل ۱۳). مدل بیشترین حساسیت را در وهله اول نسبت به هدایت هیدرولیکی و سپس نسبت به مقادیر تخلیه آب زیرزمینی نشان داده است.



www.SID.ir

Archive of SID





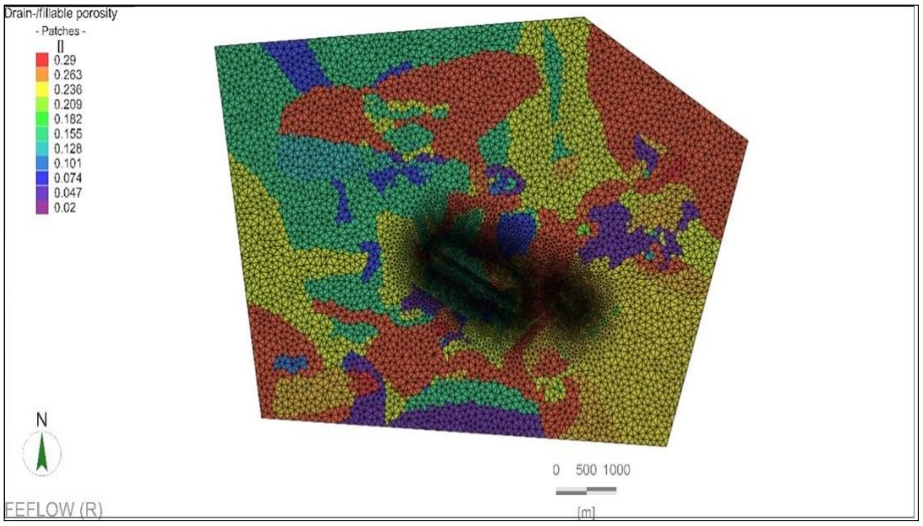

شکل ۱۱. هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی برخی از چاه‌های مشاهده‌ای طی فرایند واسنجی دوره‌ی جریان ناپایدار



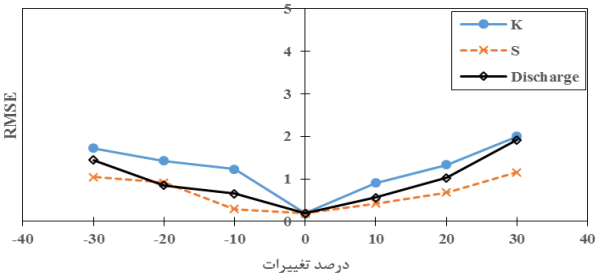
www.SID.ir

Archive of SID






شکل ۱۲. مقادیر واسنجی شده و بهینه‌ی آبدهی ویژه (الف) لایه‌ی اول، (ب) لایه‌های دوم، سوم و چهارم




شکل ۱۳. حساسیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی (K)، آبدهی ویژه (S) و تخلیه آب زیرزمینی (Discharge)

## صحت‌سنجی

پس از حساسیت‌سنجی، مدل وارد مرحله‌ی صحت‌سنجی شده و میزان تطابق آن با شرایط واقعی و صحرایی بررسی می‌شود. در طی این مرحله پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته شدند. مقادیر سطح آب چاه‌های پیزومتری، میزان تغذیه از بارندگی و تخلیه توسط چاه‌های پمپاژ با توجه به آمارهای موجود در بازه زمانی صحت‌سنجی، به صورت دوازده دوره‌ی زمانی یک ماهه، در یک دوره زمانی مهر۸۸ - ۱۳۸۷، متفاوت از دوره‌ی زمانی واسنجی، اجرا گردید تا صحت مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. خطای RMSE این مرحله ۰/۱۸۱ بوده است. جهت مقایسه‌ی ترسیمی، از نتایج هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی این دوره استفاده شده است (شکل ۱۴).

با بررسی میزان خطای شبیه‌سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی و تغییرات زمانی سطح آب مشاهداتی و محاسباتی پیزومترها می‌توان گفت که مدل تا حد زیادی توانسته است رفتار جریان آب زیرزمینی و استرس‌های وارد بر آن را به خوبی شبیه‌سازی کند و لذا با اطمینان خاطر می‌توان از آن برای پیش‌بینی شرایط آینده استفاده نمود.

## مدیریت زهکشی پیت

بخاطر طبیعت پیچیده‌ی سیستم‌های آب زیرزمینی و فاکتورهای مؤثر در مدل‌سازی که روی مدیریت و توسعه آب زیرزمینی تأثیر دارند؛ فرایند انتخاب بهترین روش کاربردی و خط مشی مدیریتی سیستم‌های آب زیرزمینی بسیار مشکل می‌باشد. بدین منظور مدل‌های شبیه‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی به تکنیک‌های مدل‌سازی بهینه برای تعیین بهترین استراتژی مدیریتی از بین استراتژی های موجود مجهز شده‌اند. تکنیک بهینه سازی یک سری برنامه ریاضی برای اختصاص بهینه منابع و تعیین میزان بهینه مصرف می باشد. در مدیریت آب زیرزمینی، منابع شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی یک حوضه آبریز و یا منابع پولی در ارتباط با آب می باشد. ترکیب مدل آب زیرزمینی و مدل بهینه سازی در مسائل مختلف مدیریت آبهای زیرزمینی از جمله کنترل افت آب زیرزمینی، نشست زمین ناشی از برداشت بی رویه آب و مدیریت ارتباط متقابل آبهای سطحی و زیرزمینی کاربرد دارد. طی دهه‌های گذشته کدهای رایانه ای مختلف با استفاده از حل عددی برای مسائل فوق ارائه شده است. GWM یک نرم افزار مدیریت منابع آب زیرزمینی می باشد و برای مدل سازی سه بعدی آبهای زیرزمینی و حل مسائل خطی و غیر خطی مدیریت منابع آب کاربرد دارد. هر مساله و فرمول مدیریت متشکل از یک سری متغیر های تصمیم گیری، یک تابع هدف و یک سری قید می باشد. که هدف، بیشینه یا کمینه کردن تابع هدف با استفاده از متغیرهای تصمیم گیری و قیدها می باشد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی جریان در محدوده پیت معدن آهن گل گهر نشان می‌دهد که میزان جریان ورودی به پیت در بخش‌های شرقی و جنوبی پیت، نسبت به سایر بخش‌ها بیشتر می‌باشد که این موارد با موقعیت سطوح تراوش در پله‌های معدن نیز مطابقت دارد. لذا برای بهینه‌سازی نرخ برداشت آب زیرزمینی از محدوده‌ی پیت معدن، ۱۵ چاه به صورت دستی به مدل داده شد تا مدل از میان آن‌ها، چاه‌های مناسب را انتخاب نموده و دبی آن‌ها را بهینه نماید. موقعیت محلهای پیشنهادی چاه‌های پمپاژ بر مبنای نقشه‌ی هدایت هیدرویکی، ضریب ذخیره (اشکال ۹ و ۱۰) و همچنین سطوح تراوش در پیت در نظر گرفته شده است، تا از مکانهایی که بیشترین حجم آب زیرزمینی به پیت نفوذ می‌کند، اب پمپاژ شود و ورود آب به محدوده‌ی معدنکاری به حداقل برسد. لذا بیشترین تعداد چاهها در سمت شرق و جنوب شرقی پیت تمرکز داده شده‌اند. همچنین تعدادی چاه دیگر با فاصله مکانی بیشتر نسبت به یکدیگر و با کمترین فاصله مکانی از لبه پیت در اطرف پیت نیز در نظر گرفته شد. در شکل ۱۵ موقعیت این چاه‌ها در منطقه معدن نمایش داده شده است. پس از اجرای مدل مدیریتی از میان این چاه‌ها ۱۰ چاه انتخاب و دبی آن‌ها بهینه گردید. شکل ۱۶، موقعیت چاه‌ها انتخابی و جدول ۴ دبی بهینه شده آن‌ها را نشان می‌دهد. در ادامه به‌منظور بررسی کارایی مدیریت زهکشی پیشنهادی، پیش‌بینی پایین آمدن سطح ایستابی در محدوده‌ی پیت، به مدت یکسال اجرا شده است.

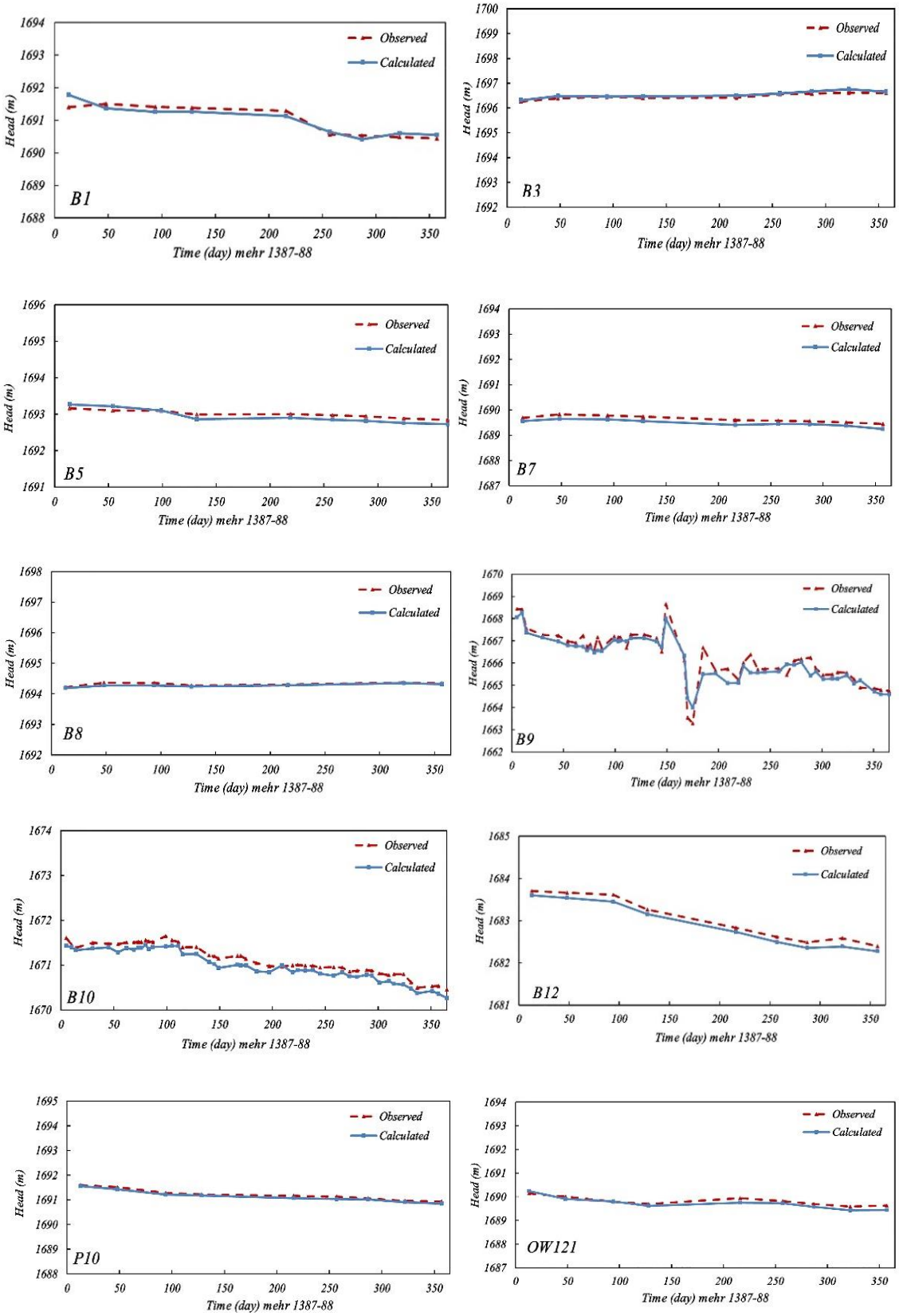


www.SID.ir

Archive of SID



در نمودار (شکل ۱۷) متوسط روند تغییرات زمانی سطح ایستابی دیده می شود. در این پیش‌بینی مشاهده می‌شود که در طول یکسال، سطح ایستابی در محدوده‌ی پیت، به اندازه ۱۸ متر افت داشته است و به زیر عمق اکتشافی توده معدنی رسیده است.



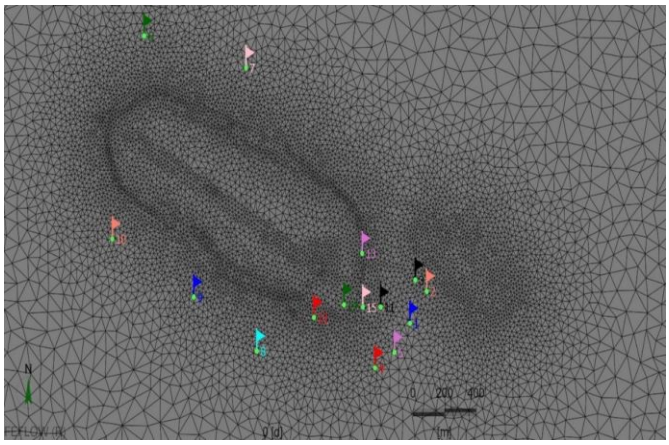

شکل ۱۴. (الف) بار هیدرولیکی اولین اجرای مدل در حالت پایدار، (ب) بار هیدرولیکی نهایی مدل در حالت پایدار



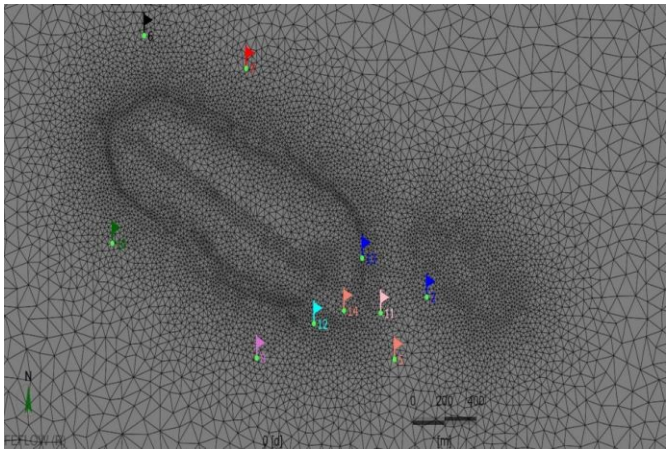
www.SID.ir

Archive of SID





شکل ۱۵. موقعیت چاه‌های کاندیدا شده برای بهینه‌سازی



شکل ۱۶. موقعیت چاه‌های پیشنهادی مدل

جدول ۴. دبی بهینه شده چاه‌های انتخابی

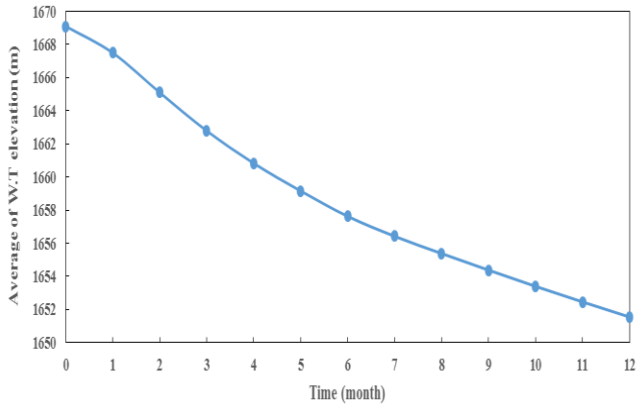
| کد چاه | X | Y | میزان تخلیه (لیتر بر ثانیه) |
|---|---|---|---|
| ۲ | ۳۳۷۱۷۴ | ۳۲۱۸۵۷۵ | ۳۸/۵۸ |
| ۵ | ۳۳۶۹۶۹ | ۳۲۱۸۲۷۹ | ۳۸/۴۵ |
| ۶ | ۳۳۵۳۸۰ | ۳۲۱۹۸۱۷ | ۳۴/۳۴ |
| ۷ | ۳۳۶۰۲۶ | ۳۲۱۹۶۶۱ | ۳۶/۵۰ |
| ۸ | ۳۳۶۰۹۵ | ۳۲۱۸۲۸۵ | ۳۸/۱۲ |
| ۱۰ | ۳۳۵۱۷۸ | ۳۲۱۸۸۳۰ | ۳۳/۵۴ |
| ۱۱ | ۳۳۶۸۸۲ | ۳۲۱۸۴۹۹ | ۳۶/۲۳ |
| ۱۲ | ۳۳۶۴۵۸ | ۳۲۱۸۴۴۹ | ۳۲/۸۹ |
| ۱۳ | ۳۳۶۷۶۴ | ۳۲۱۸۷۶۰ | ۳۷/۱۸ |
| ۱۴ | ۳۳۶۶۴۹ | ۳۲۱۸۵۱۰ | ۳۷/۷۷ |



www.SID.ir

Archive of SID






شکل ۱۷. متوسط روند تغییرات سطح ایستابی محدوده‌ی پیت معدن

## نتیجه گیری

تا پیش از این پژوهش، مدلهای آب زیرزمینی بکار برده شده در این منطقه نتوانسته بودند تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای را بخوبی شبیه سازی کنند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با بکارگیری عوامل ذیل مدلسازی جریان آب زیرزمینی در محدوده‌ی معدن کارآ بوده است و می تواند در موارد مشابه معادن دیگر نیز کاربرد داشته باشد:

۱- بکارگیری معادله Hagen-Poiseuille در محل درزه و شکافها در مدل سبب شده است رفتار ناهنجار تغییرات زمانی سطح ایستابی پیزومترهای نزدیک به پیت، به نحوی مناسبی شبیه سازی شوند.

۲- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان بصورت متغیر تابع زمان وارد مراحل شبیه سازی شدند.

۳- محدوده‌ی پیت در نرم افزار بعنوان سطح تراوش تعریف شد و مدل در هنگام شبیه سازی نودهای موجود در پیت را به نحوی شبیه سازی کرد که سطح ایستابی بالاتر از سطح زمین قرار نگیرد.

علاوه بر نتایج فوق الذکر، انجام بهینه‌سازی توسط مدل حاکی از آن است که در طول یک سال، سطح ایستابی در محدوده‌ی پیت می‌تواند به اندازه ۱۸ متر افت نماید. لذا با اجرای سناریوی پیشنهادی مذکور برای زهکشی، سطح آب زیرزمینی به زیر توده معدنی خواهد رسید و عملیات معدنکاری می‌تواند بدون مشکل از لحاظ آب‌گرفتگی پیت ادامه یابد.

بهرحال این تحقیق جنبه کاربردی موثری در جلوگیری از آبگرفتگی پیت و تاسیسات معدن خواهد داشت و بصورت غیر مستقیم در کاهش هزینه‌های آتشباری با خشک کردن چاله‌های حفاری و در نتیجه افزایش بهره‌وری استخراج مواد معدنی تاثیرگذار خواهد بود.

## سپاسگزاری

این تحقیق از حمایت مالی و معنوی پژوهشکده آهن و فولاد شرکت معدنی و صنعتی گل گهر بهره‌مند شده است.

## منابع

بیرانوند.ن.، زارع.م.، حسینی سبزواری.س.م.، ۱۳۹۲، طراحی سیستم زهکشی معدن سنگ‌آهن شماره یک گل‌گهر با استفاده از مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

جهانشاهی.ر.، ۱۳۹۲، اثرات زیست محیطی معدن سنگ‌آهن گل‌گهر بر آب‌های زیرزمینی منطقه، پایان‌نامه دکترا، دانشگاه شیراز.

چیت سازان.م.، موسوی.ف.، میرزایی.ی.، رستگار زاده.س.، ۱۳۹۱، مدیریت کمی و کیفی آبخوان دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی در MODFLOW و MD3DMS، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵.

چیت سازان.م.، نوذرپور.ل.، ندری.آ.، فرهادی منش.م.، ۱۳۹۴، ارزیابی ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت لور اندیمشک و رودخانه دز با استفاده از مدل MODFLOW، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۷.

نخعی.م.، صابری نصر.ا.، ۱۳۹۱، پیش بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه با استفاده از شبکه عصبی-موجکی و مقایسه آن با مدل عددی MODFLOW، شماره ۴.

حسینی سبزواری.س.م.، ۱۳۸۶، بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی سفره آب زیرزمینی در معدن گل گهر، سیرجان، دانشگاه صنعتی شاهرود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

درویش زاده.ع.، ۱۳۷۰، زمین‌شناسی ایران، تهران، انتشارات امیر کبیر.

دولتی اردجانی.ف.، شفایی تنکابنی.س.ض.، کاکایی.ر.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی مشکلات آب در معادن روباز با استفاده از روش اجزاء محدود، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

کرسیک.ن.، ۱۳۸۱، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی، مترجم چیتسازان.م.، کشکولی.ح.ع.، اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

Bear.J., Tsang.C.F., Marsily.de.G., 1993, Flow and contaminant transport in fractured rock. Academic Press, San Diego.

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, pp: 957-964.



www.SID.ir

Archive of SID



Sahooa.L.K., Bandyopaphyay.S., Banerjee.R., 2014, Water and energy assessment for dewatering in opencast mines, Journal of Cleaner Production, Vol:84, pp: 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, Vol:10, Issue1, pp: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, Vol:7, pp: 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, Vol:7, pp: 49-65.

Todd.D.K., Mays Larry.W., 2005, Groundwater hydrology, John Wiley & Sons, New York.

Whithe.S.P., Creighton. A., Bixley. P., Kissling.W.M., 2004 Modeling the dewatering and depressurization of the Lihir open-pit gold mine.," Geothermics, Vol:3, no. papua new Guinea, pp: 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, Vol:44, pp: 87-97.



www.SID.ir