مدل سازی مشکلات آب در معادن روباز با استفاده از روش اجزاء محدود

فرامرز دولتی ارده‌جانی[۱، ۲] *، سید ضیاالدین شفایی تنکابنی[۱، ۲] و رضا کاکایی[۱]

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- پژوهشکده صنایع رنگ ایران

E-mail: fdoulati@shahrood.ac.ir

چکیده

پیش بینی میزان آب ورودی به معادن روباز و متعاقباً طراحی سیستم پمپاژ از مسائل مهم در طراحی و توسعه چنین معادنی می باشند. اگر میزان آب ورودی به معدن به درستی تخمین زده شود آنوقت امکان یک طراحی مناسب برای شبکه پمپاژ آب وجود دارد و چنانچه سیستم پمپاژ به طور صحیح اجرا گردد استخراج و توسعه معدن کاری روباز بدون هیچ گونه مشکل خاصی در مناطقی که سطح آب زیر زمینی بالا می باشد انجام می شود، پایداری شیب ها افزایش پیدا کرده و مشکلات زیست محیطی تقلیل یافته و خوردگی ماشین آلات و تجهیزات معدنی کاهش می یابد. فرمول های تحلیلی ارائه شده توسط محققین مختلف بر اساس یک سری فرضیات و شرایط مرزی خاص می باشند که سبب محدود شدن کاربرد آنها در وضعیت های مختلف معدن کاری می گردد. ولی روش های مدل سازی عددی خصوصاً روش اجزاء محدود به عنوان یک ابزار قدرتمند قادر است تا چنین شرایط پیچیده ای را با دقت بالا شبیه سازی نماید و میزان آب های هجومی به داخل معدن را پیش بینی کنند. در این مقاله یک مدل کامپیوتری دو بعدی به روش عددی اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار SEEP/W ارائه گردیده که قادر است میزان آب ورودی به معدن روباز را پیش بینی نموده و اطلاعات لازم را برای طراحی سیستم پمپاژ آب معدن تخمین بزند. این مدل قادر است تا شرایط مختلف جریان از قبیل اشباع یا غیر اشباع بودن جریان، محصور یا غیر محصور بودن سفره را در نظر بگیرد و می تواند ارتفاع سطوح تراوش را در دیواره های معدن روباز به درستی تعیین نماید. نتایج مدل سازی با فرمول های تحلیلی و همچنین مدل عددی ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه و نتایج بسیار نزدیکی به دست آمد. نتایج چنین شبیه سازی هایی می تواند اطلاعات سودمندی برای طراحی شبکه های پمپاژ در معادن روباز فراهم آورد.

واژه های کلیدی: مدل سازی عددی، اجزاء محدود، SEEP/W ، معادن روباز، آب های هجومی

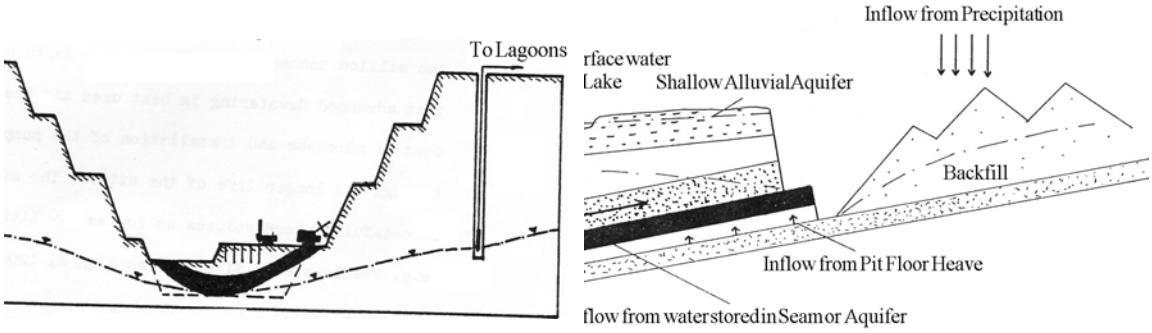
مقدمه

کاهش ذخایر سطحی سبب شده تا معدنکاران به منابع معدنی که در اعماق بیشتری واقع شده اند توجه

* شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، صندوق پستی ۳۱۶، کد پستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱، تلفن و دور نگار ۳۳۳۵۵۰۹-۰۲۷۳

کنند. این موضوع سبب می شود تا در پاره ای از موارد عملیات استخراج مواد معدنی در زیر سطح آب های زیرزمینی انجام شود. نتیجه آن افزایش مشکلات معدنکاری، بالا رفتن هزینه های معدن و مشکلات زیست محیطی می باشد. اطلاع داشتن از رژیم آب های زیرزمینی در اطراف معدن و خصوصیات هیدرولیکی طبقات در محدوده معدن، در کنترل آب های هجومی به داخل معدن موثر خواهد بود. در نتیجه جهت کنترل آب های زیرزمینی هجومی به داخل کارهای معدنی بایستی سیستم آبکشی و آبگیری (dewatering system) به درستی طراحی گردد تا سطح آب زیرزمینی در محدوده معدن پایین نگه داشته شود و بدین ترتیب منجر به افزایش پایداری شیب معدن گردد. برای آنکه یک سیستم آبگیری موثر در یک معدن روباز طراحی و به خوبی اجرا شود، شبیه سازی مشکلات آب در معدن، پیش بینی آب های هجومی به داخل معدن (groundwater inflow) و مدل سازی فرآیند آبگیری بسیار ضروری به نظر می رسد. نتایج این شبیه سازی ها می تواند در تهیه یک برنامه مدیریت آبی به منظور کاهش مشکلات معدنکاری در زیر آب و متعاقب آن اثرات دراز مدت زیست محیطی, در مرحله طراحی معدن مورد استفاده قرار گیرد. در مورد پیش بینی آب های هجومی به داخل معادن کارهای تحقیقاتی زیادی صورت گرفته است که مهمترین آنها در مقالات [۱، ۲ ، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷و ۸] یافت می شوند. بعلاوه تحقیقاتی نیز در باره تحلیل بازگشت آب به سطح اولیه قبل از معدنکاری (groundwater rebound) در مرحله ای که سیستم آبگیری متوقف می شود و معدن متروک می گردد، انجام پذیرفته است که در بین آنها می توان به مراجع [۹، ۱۰ ، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵و ۱۶] اشاره نمود. آب های هجومی به داخل معدن می تواند منشاء مختلفی داشته باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۷].

روش های مختلفی برای سیستم آبگیری در معادن روباز مورد استفاده قرار گرفته است که نمونه ای از آن که به روش آبگیری پیشرفته (advance dewatering method) موسوم است در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۱. منابع آب های هجومی به معدن روباز **[۱۷]**

شکل ۲. روش آبگیری پیشرفته در معدن روباز[۱۸]

اکثر مدل های ارائه شده برای پیش بینی آب های هجومی به معادن [۱، ۲ ، ۳، ۵، ۶و ۷] به صورت تحلیلی بوده که این مدل ها بر اساس یکسری فرضیات طراحی شده اند و قادر نیستند تا بدرستی شرایط و پارامتر های هیدرولیکی سفره ها را در نظر بگیرند و یک شبیه سازی واقع گرایانه از وضعیت هیدروژئولوژیکی پیچیده اطراف معادن را داشته باشند. اگر چه مدل عددی ارائه شده توسط نگارنده محدودیت های روش های تحلیلی را شامل نمی گردد [۸] و شرایط مختلف جریان را بسته به نوع سفره در نظر می گیرد ولی این مدل برای پیش بینی آب های هجومی به داخل معادن با استخراج نواری (backfilled open cast mine) ارائه شده و کمتر به شبیه سازی سیستم آبگیری در معادن روباز می پردازد. بنابر این ارائه یک مدل که قادر باشد تا کلیه مشکلات هیدروژئولوژیکی را در محدوده معدن در نظر بگیرد ضروری به نظر می رسد. در این مقاله یک مدل به روش عددی اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار SEEP/W ارائه گردیده که قادر است میزان آب ورودی به معادن روباز را پیش بینی نموده و سیستم آبگیری و پمپاژ آب معدن را به درستی طراحی نماید. این مدل قادر است تا شرایط مختلف جریان از قبیل وضعیت اشباع یا غیر اشباع بودن جریان، محصور یا غیر محصور بودن سفره را در نظر بگیرد و همچنین می تواند ارتفاع سطوح تراوش (seepage face) را در دیواره های معدن روباز به درستی تعیین نماید.

الگوریتم بکار رفته در نرم افزار SEEP/W

در این مقاله از نرم افزار SEEP/W [۱۹] به عنوان ابزار مدل سازی استفاده شده است. نرم افزار مذکور برای تحلیل جریان آب در سد های خاکی و محیط های متخلخل زیر زمین تهیه شده است. این مدل قادر است تا شرایط مختلف جریان از قبیل اشباع یا غیر اشباع بودن، با این فرض که ضرائب تراوایی و آب محتوا به صورت تابعی از فشار آب منفذی می باشند، محصور یا غیر محصور بودن سفره را در حالت دو بعدی با استفاده از روش عددی اجزاء محدود تحلیل نماید و همچنین می تواند ارتفاع سطوح تراوش را در دیواره های پیت های معدنی به درستی تعیین نماید. دامنه کاربرد این نرم افزار پروژه های مختلف ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین شناسی و معدن است. معادله اساسی حرکت آب زیر زمینی به صورت دو بعدی و تحت شرایط اشباع و غیر اشباع بودن جریان از تلفیق قانون دارسی و معادله پیوستگی به صورت زیر بدست می آید [۲۰]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)=C\frac{\partial}{\partial t}(h)+Q \qquad (۱)$$

که در آن:

K_x ، K_y = مولفه های ضریب نفوذ پذیری؛ h = هد هیدرولیکی؛ t = زمان؛ x ، y = مختصات دکارتی؛

C = شیب منحنی ضریب ذخیره (water storage curve)؛ Q = هر منبع جریان مانند پمپاژ، تغذیه و ...

هد هیدرولیکی توسط رابطه زیر با آب محتوای حجمی (θ) مربوط می شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۲)$$

بسط مدل به روش اجزاء محدود

برای حل معادله ۱ به روش اجزاء محدود از تکنیک تقریب زنی گالرکین (Galerkin approach) استفاده شده است [۲۱، ۲۲ و ۲۳]. تکنیک مذکور قادر است با استفاده از شرایط مرزی مناسب، یک راه حل تقریبی برای معادله ۱ را تعیین نماید [۲۱]. معادله ۱ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) - C\frac{\partial h}{\partial t} - Q = 0 \qquad (۳)$$

که در آن L یک تابع اپراتور می باشد که در سیستم جریان آب زیر زمینی تعریف می گردد. برای حل رابطه $L(h) = 0$ با استفاده از روش تقریب زنی گالرکین به رابطه زیر که به trial solution معروف است نیاز می باشد:

$$h \approx \hat{h}(x, y, t) = \sum_{i=1}^{n} h_i(t) N_i(x, y) \qquad (۴)$$

که در آن:

$h_i(t)$ = هد هیدرولیکی در گره i؛ n = تعداد کل گره ها؛ $N_i(x, y)$ = توابع شکل (shape functions)

با جایگزینی معادله ۴ در معادله ۳ رابطه زیر بدست می آید:

$$L\left[\hat{h}(x, y, t)\right] = R \qquad (۵)$$

که در آن:

R = مقدار باقیمانده یا مقدار خطا

اگر مقدار باقیمانده برای تمامی گره ها صفر باشد جواب دقیق (exact solution) حاصل می شود یعنی:

$$\int_D R W_i \, dD = 0 \qquad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (٦)$$

که در آن:

W_i = توابع وزنی (weighting functions) روی دامنه D که در تکنیک گالرکین توابع وزنی با توابع شکل برابر فرض می شوند.

در تکنیک گالرکین $L(\hat{h})$ بر تمامی توابع شکل ارتوگونال می باشد یعنی:

$$\iint_D L\left[\hat{h}(x,y,t)\right] N_i(x,y)\,dxdy = 0 \qquad i = 1,2,\ldots,n \tag{۷}$$

توابع شکل N_i طوری انتخاب می شوند تا مقدار واحد در گره i و مقدار صفر برای سایر گره ها داشته باشند. در این صورت $h_i(t)$ برابر $\hat{h}$ در n گره از دامنه D می باشد [۲۱].

با جایگزین نمودن رابطه ۴ در رابطه ۷ n معادله به صورت زیر (به شکل ماتریسی) به دست می آید:

$$[G]\{h\} + [H]\left\{\frac{dh}{dt}\right\} + \{F\} = 0 \tag{۸}$$

که در آن $[G]$ و $[H]$ ماتریس های n در n بوده که n معرف تعداد گره ها می باشد. این ماتریس ها به صورت زیر می باشند:

(۹)

$$G_{ij} = \iint_D \left[K_x \frac{dN_i}{dx}\frac{dN_j}{dx} + K_y \frac{dN_i}{dy}\frac{dN_j}{dy} \right] dxdy$$

(۱۰)

$$H_{ij} = \iint_D C\, N_i N_j\, dxdy$$

$\{F\}$ بردار جریان بوده و به صورت زیر بیان می گردد:

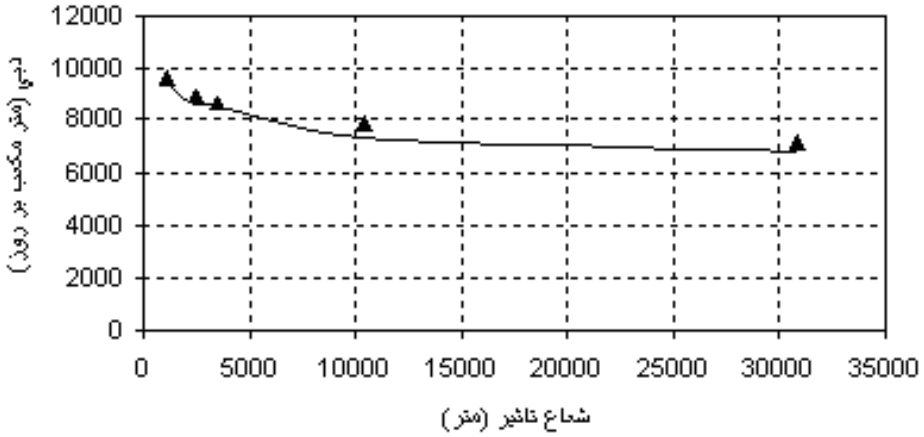
$$C_i = -\iint_D Q\, N_i\, dxdy - \int_\beta N_i \sum_{j=1}^{n} \left[K_x \frac{dN_j}{dx} l_x + K_y \frac{dN_j}{dy} l_y \right] h_j\, d\beta \tag{۱۱}$$

پیش بینی مدل

برای آنکه توانایی مدل اجزاء محدود ارائه شده برای شبیه سازی مشکلات آب در معدن آشکار گردد، پنج مثال مختلف در زیر ارائه می گردند. این مثال ها اکثراً در مورد آزمایشات پمپاژ و آبگیری در سفره های مختلف و در وضعیت های متفاوت جریان می باشند. جهت بررسی صحت پیش بینی های مدل از فرمول های تحلیلی و یک مدل عددی ارائه شده توسط محققین دیگر به عنوان روش های مقایسه ای استفاده شده است. توافق کاملاً نزدیک در اکثر موارد بین نتایج پیش بینی شده توسط مدل حاضر و مدل های قبلی مشاهده می گردد.

مثال ۱. آزمایش پمپاژ تحت شرایط پایا دریک سفره محصور

در این مثال، پیش بینی های مدل عددی اجزاء محدود مربوط به یک آزمایش پمپاژ در یک سفره محصور و تحت شرایط پایا با نتایج حاصل از فرمول تحلیلی ارائه شده توسط مرجع[۲] مقایسه شده است. برای این آزمایش مدل اجزاء محدود شامل ۵۰ المان و ۲۵۳ گره انتخاب شد. این المان ها به شکل مستطیل بوده و با توجه به محصور بودن سفره تنها یک ردیف المان به صورت تک لایه ای و با طول برابر ضخامت سفره (۱۵ متر) و عرض متغیر در نظر گرفته شد. ضریب تراوایی و ضریب ذخیره برای سفره مورد نظر به ترتیب ۰۰۰۰۷ /۰ متر بر ثانیه و ۰/۰۰۰۰۱۵ می باشند. همچنین شعاع چاه مورد پمپاژ ۰/۱ متر در نظر گرفته شد. هد هیدرولیکی در دو انتهای مدل طوری انتخاب شد که یک افت معادل ۱۶۰ متر تامین گردد. در مرزهای بالایی و پایینی مدل شرایط مرزی فاقد جریان (no-flow boundary conditions) در نظر گرفته شد. در چپ و راست مدل نیز شرایط مرزی هد ثابت (fixed head) منظور گردید. با انتخاب شعاع های تاثیر ۱۱۶۳، ۲۴۹۲, ۳۴۷۲، ۱۰۴۲۰ و ۳۰۸۰۰ متر دبی پمپاژ محاسبه شد. در شکل ۳ دبی محاسبه شده به صورت تابعی از شعاع تاثیر چاه مورد پمپاژ توسط روش عددی اجزاء محدود و فرمول تحلیلی نشان داده شده است. همانطوری که از شکل مذکور ملاحظه می شود نتایج دو روش خیلی به هم نزدیک می باشند.



شکل ۳. مقایسه نتایج مدل سازی عددی اجزاء محدود (——) و تحلیلی (▲) برای پیش بینی دبی پمپاژ در یک سفره محصور و شرایط جریان پایا

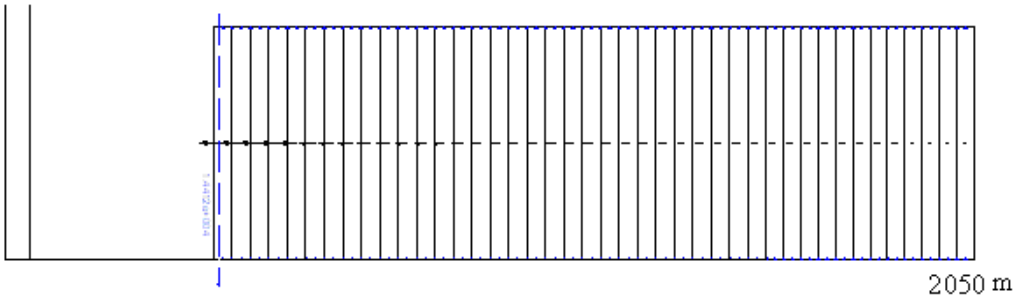
مثال ۲. پیش بینی آب هجومی به پیت با دیواره های قائم تحت شرایط پایا در سفره محصور

در این مثال قابلیت و توانایی مدل عددی اجزاء محدود جهت پیش بینی دبی آب ورودی (inflow) به یک چاه معدنی یا در یک پیت با دیواره های قائم بررسی شده است و نتایج مدل سازی با روش تحلیلی ارائه شده توسط مرجع [۳] مقایسه گردیده است. شکل ۴ مدل اجزاء محدود مسئله را نشان می دهد. مدل از ۴۲ المان مستطیلی و ۸۶ گره تشکیل شده است. ضخامت سفره ۲۰ متر می باشد. شعاع تاثیر پمپاژ ۲۰۵۰ متر فرض شده است. ضرائب انتقال و ذخیره سفره به ترتیب ۷۵ متر مربع بر روز و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. هد هیدرولیکی در سمت راست مدل ۷۰ متر و در دیواره پیت ۲۰ متر انتخاب گردید. بدین ترتیب اختلاف هدی معادل ۵۰ متر در دو انتهای مدل تعبیه گردید. شعاع معادل پیت مطابق رابطه زیر ۴۰۰ متر منظور شد [۴].

$$r = \left(\frac{2}{\pi}\right)(Y.W)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۲)$$

که در آن: r = شعاع معادل (متر)؛ Y = طول معدن (متر)؛ W = عرض معدن (متر)

شرایط مرزی مورد استفاده در این مثال همانند مثال ۱ می باشد. در جدول ۱ دبی پیش بینی شده توسط مدل با مقدار دبی محاسبه شده با روش تحلیلی مقایسه شده است. نتایج محاسبه شده توسط دو روش از توافق خوبی برخوردار هستند به طوری که خطای نسبی محاسبه شده ۰/۰۴ در صد می باشد.



شکل۴. مدل اجزاء محدود برای پیش بینی دبی جریان در یک سفره محصور و شرایط جریان پایا

جدول ۱. مقایسه دبی محاسبه شده با روش های تحلیلی و عددی و محاسبه خطای نسبی

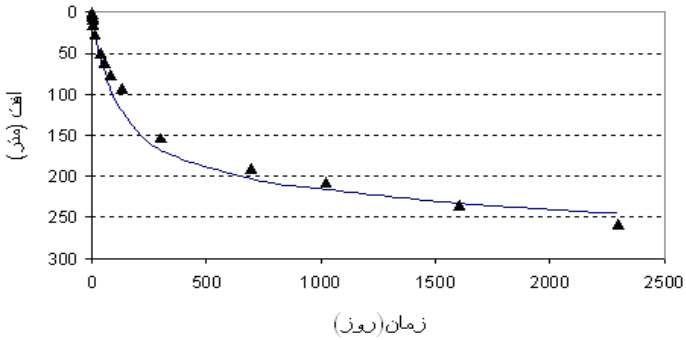
روش	دبی (متر مکعب بر روز)	خطای نسبی (٪)
تحلیلی	۱۴۴۱۸	----
مدل عددی اجزاء محدود	۱۴۴۱۲	۰/۰۴

مثال ۳. پمپاژ گودال معدنی (pit dewatering) در یک سفره آزاد تحت شرایط ناپایا

در این مثال، نتایج حاصل از مدل عددی حاضر جهت پیش بینی افت حاصل از پمپاژ به صورت تابعی از زمان در یک سفره آزاد و تحت جریان ناپایا با افت های پیش بینی شده توسط مدل عددی اجزاء محدود ارائه شده توسط مرجع [۱۱] مقایسه شده است. در این مسئله شعاع پیت ۱۵۰ متر، ضریب انتقال ۰/۰۰۱۳۹ متر مربع بر روز و ضریب مخزن ۰/۰۰۱ فرض شده است. دبی پمپاژ یا آبگیری ۱/۹ مترمکعب بر ثانیه انتخاب گردید. ضخامت ناحیه اشباع شده در سفره آزاد ۳۰۰ متر منظور گردید. یک مدل عددی اجزاء محدود متقارن محوری (axisymmetric) متشکل از ۲۵۰۱ گره و ۲۴۰۰ المان به صورت ۴۰ لایه که ضخامت هر لایه ۱۰ متر بود، تشکیل داده شد. طول مدل ۲۰۰۰ متر انتخاب شد. نزدیک دیواره های پیت المان های ریز تر در نظر گرفته شد.

ابتدا مدل سازی در یک وضعیت جریان پایا انجام گرفت تا ضخامت منطقه اشباع شده قبل از عمل پمپاژ را که برابر ۳۰۰ متر بود در سفره فراهم نموده و سطح ایستابی سفره آزاد را در ارتفاع مورد نظر از مرز پایینی سفره قرار دهد. برای این منظور در تمامی گره های مدل تا ارتفاع مورد بحث هدی معادل ۳۰۰ متر منظور شده و سپس مدل در وضعیت جریان پایا اجرا گردید. این مدل به عنوان یک شرط اولیه در مرحله اصلی مدل سازی پمپاژ در حالت ناپایا فرا خوانده شد.

اما در قسمت اصلی مدل سازی، ابتدا هد اولیه ۳۰۰ متر از کلیه گره ها برداشته شد. در مرز پایینی مدل شرط مرزی فاقد جریان (no-flow) در نظر گرفته شد. در مرز خارجی مدل (سمت مخالف پیت) یعنی جایی که اثر ناشی از پمپاژ روی سطح ایستابی بسیار ناچیز می باشد، نیز شرط مرزی هد ثابت (fixed head) معادل ۳۰۰ متر منظور گردید. دبی پمپاژ نیز با اعمال یک شرط مرزی نوع جریان (flux boundary condition) در سمت دیواره پیت اعمال گردید. پس از اعمال شرایط مرزی و شرط اولیه، مدل در یک وضعیت ناپایا و در ۱۴ گام زمانی اجرا شد. شکل ۵ پیش بینی های مدل حاضر برای افت حاصل از پمپاژ به صورت تابعی از زمان را با افت های محاسبه شده توسط مدل عددی مرجع [۱۱] مقایسه می نماید.

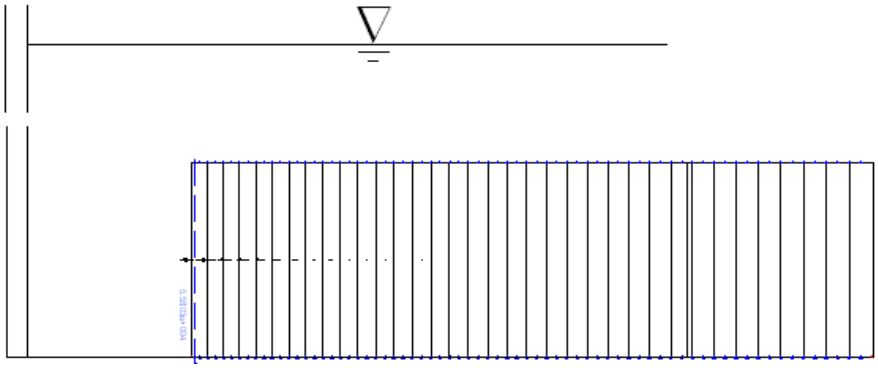


شکل ۵. مقایسه افت محاسبه شده به صورت تابعی از زمان توسط مدل عددی SEEP/W (▲) و مدل عددی اجزاء محدود ارائه شده توسط مرجع [۱۱] مربوط به آزمایش پمپاژ در یک پیت معدنی

مثال۴. پیش بینی آب های هجومی به یک پیت معدنی با نفوذ کامل درسفره محصور در وضعیت جریان ناپایا

پس از اطمینان از صحت پیش بینی های مدل، از آن به منظور محاسبه مقدار آب های هجومی به داخل یک پیت در یک سفره محصور در وضعیت جریان ناپایا استفاده گردید. در این مثال، ضرایب انتقال و ذخیره سفره به ترتیب ۷۵ متر مربع بر روز و ۰/۱۵ می باشند. ضخامت سفره محصور ۲۰ متر می باشد و شعاع تاثیر ناشی از پمپاژ ۲۰۵۰ متر فرض شده است. شعاع معادل پیت ۴۰۰ متر در نظر گرفته شده است. پس از مدت زمان ۱۰۰ روز، افتی برابر ۵۰ متر که ناشی از ورود آب به داخل پیت می باشد، ایجاد گردیده است.

برای حل این مسئله به صورت عددی با نرم افزار SEEP/W، یک مدل اجزاء محدود (شکل ۶) به طول ۲۰۵۰ متر متشکل از ۳۵ المان مستطیلی و ۷۲ گره ایجاد گردید. به دلیل گرادیان هیدرولیکی بالا در نزدیکی پیت، المان ها در این بخش از مدل از تراکم بالایی برخوردار می باشند.

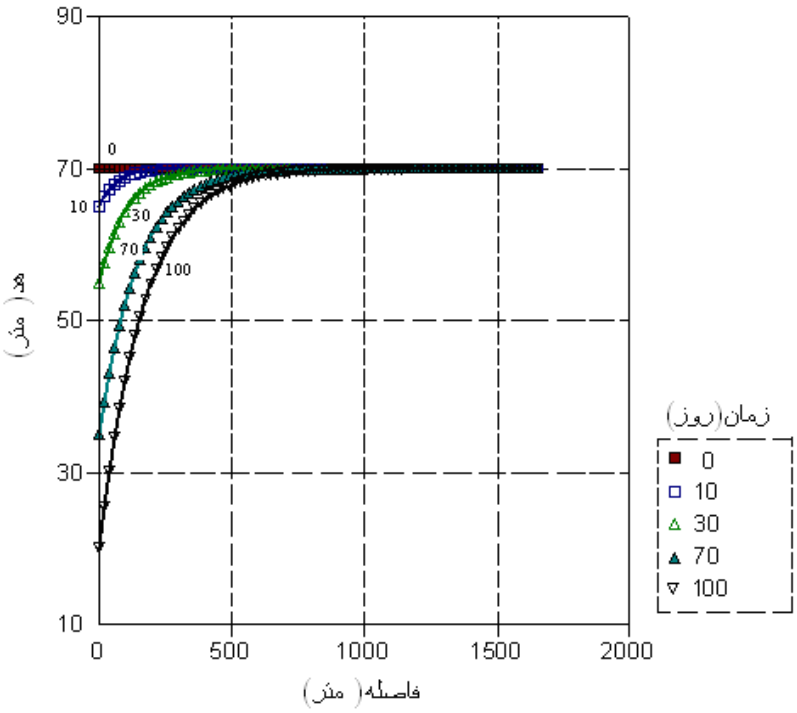


شکل ۶. مدل اجزاء محدود

هد هیدرولیکی در دو انتهای مدل طوری انتخاب شد که یک افت معادل ۵۰ متر را پس از مدت زمان ۱۰۰ روز ایجاد نمود. در مرزهای بالایی و پایینی مدل شرایط مرزی فاقد جریان در نظر گرفته شد تا وضعیت سفره محصور را شبیه سازی نماید. پس از اعمال شرایط مرزی، مدل سازی تحت شرایط ناپایا انجام پذیرفت که میزان آب ورودی به داخل پیت ۵۵۸۰۳ متر مکعب بر روز پیش بینی شد. شکل ۷ توزیع هد را در زمان های مختلف در دیواره پیت نمایش می دهد.

مثال۵. پیش بینی آب های هجومی به یک پیت معدنی با نفوذ کامل درسفره آزاد در وضعیت جریان پایا

در این مثال توانایی مدل عددی اجزاء محدود در پیش بینی آب های هجومی به داخل یک پیت که در یک سفره آزاد دارای سطح ایستابی نفوذ نموده است، بررسی شده است. صحت پیش بینی مدل برای دبی آب هجومی به داخل پیت با مقدار دبی بدست آمده از یک فرمول تحلیلی [۳] تایید شده است. سفره دارای یک ضریب نفوذپذیری اشباع شده (saturated permeability) ۳/۵ متر بر روز و جدایش ویژه ۰/۱۵ می باشد. ارتفاع سطح ایستابی اولیه در حالت تعادلی ۷۰ متر است. افت سطح ایستابی در دیواره پیت ۵۰ متر می باشد. پیت دارای یک شعاع معادل ۴۰۰ متر بوده و فرض بر این است که در فاصله دورتر از ۲۰۵۰ متر اثر افت قابل اغماض می باشد.

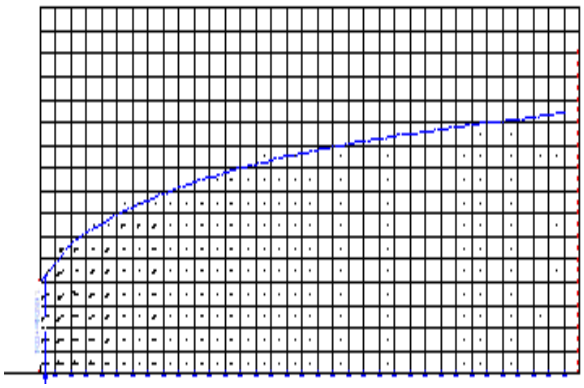


شکل ۷. وضعیت هد به صورت تابعی از زمان در دیواره پیت

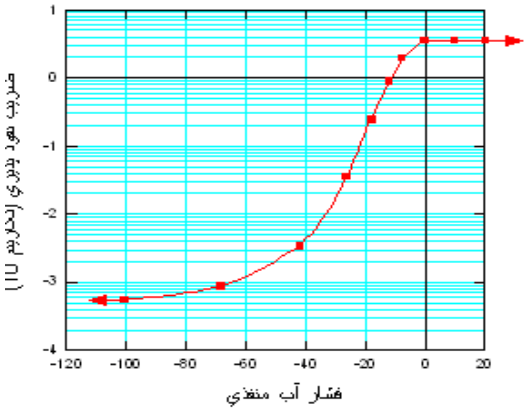
شکل ۸ مدل اجزاء محدود این مسئله را نشان می دهد که شامل ۵۶۰ المان و ۶۱۲ گره می باشد. در مرز پایینی مدل شرط مرزی فاقد جریان در نظر گرفته شد. در سمت راست مدل هد ثابتی برابر ۷۰ متر و در سمت چپ آن هد ثابت ۲۰ متر منظور گردید. با توجه به اینکه سفره مورد بررسی آزاد بوده و ضریب نفوذ پذیری تابعی از فشار آب منفذی می باشد، برای بخش اشباع شده سفره ضریب نفوذپذیری برابر ۳/۵ متر بر روز و برای بخش اشباع نشده، نفوذ پذیری نشان داده شده در شکل ۹ به صورت تابعی از فشار آب منفذی در نظر گرفته شد. این تابع در اجرا های متوالی مدل به تدریج اصلاح شده است. نهایتاً مدل تحت شرایط پایا اجرا گردید که جدول ۲ حجم آب هجومی به داخل پیت را که توسط روش های عددی و تحلیلی محاسبه شده است نشان می دهد. مقدار خطای نسبی محاسبه شده (۰/۱۱ درصد) برای نتایج دو روش گویای دقت خوب مدل عددی اجزاء محدود ارائه شده در این مقاله می باشد.

جدول۲. مقایسه دبی آب های هجومی به پیت با روش های تحلیلی [۳] و عددی و محاسبه خطای نسبی

روش	دبی (متر مکعب بر روز)	خطای نسبی (٪)
تحلیلی	۱۶۸۲۲	----
مدل عددی اجزاء محدود	۱۶۸۰۴	۰/۱۱



شکل۸. مدل اجزاء محدود برای یک سفره آزاد، نشان دهنده سطح ایستابی و بردار های جریان



شکل۹. ضریب تراوایی به صورت تابعی از فشار آب منفذی دریک وضعیت جریان اشباع و غیر اشباع

نتیجه گیری و پشنهادات

وجود آب در معادن روباز مشکلات اجرایی و زیست محیطی زیادی را به همراه دارد. پیش بینی میزان آب ورودی به معادن روباز از مسائل مهم در طراحی سیستم آبگیری و پمپاژ در چنین معادنی می باشد. در این مقاله یک مدل به روش عددی اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار SEEP/W ارائه گردیده که می تواند مشکلات وجود آب در معادن روباز را شبیه سازی نموده و سیستم پمپاژ آب معدن را به درستی طراحی نماید. نتایج حاصل از مدل سازی برای پیش بینی میزان آب های هجومی به داخل معادن روباز با فرمول های تحلیلی و همچنین مدل عددی ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه و نتایج بسیار نزدیکی به دست آمد. با توجه به اینکه مدل های عددی محدودیت های فرمول های تحلیلی را دارا نمی باشند و قادر هستند تا شرایط مختلف جریان و نوع سفره آب ها را در نظر بگیرند بنابراین نتایج دقیق تری را به همراه دارند. نتایج چنین شبیه سازی هایی می تواند اطلاعات مفیدی برای پیش بینی بسیاری از مشکلات زیست محیطی، طراحی شبکه های پمپاژ ، ذخیره آب و استخراج بهینه مواد معدنی در معادن روباز به دست آورد.

فهرست منابع

[۱] McWhorter, D.B. (۱۹۸۱). *Predicting groundwater response to disturbance by mining- selected problems*. Symposium of Surface Mining, Hydrology, Sedimentology and Reclamation, pp.۸۹-۹۵, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, U.S.A.

[۲] Singh R.N., and Atkins A.S. (۱۹۸۴). *Application of analytical solutions to simulate some mine inflow problems in underground coal mining*. International Journal of Mine Water, ۳(۴), pp.۱-۲۷.

[۳] Singh, R.N., Ngah, S.A. and Atkins, A.S. (۱۹۸۵). *Applicability of current groundwater theories for the prediction of water inflows to surface mining excavations*. Proceedings of the Second International Congress of the International Mine Water Association, Granada, Spain, pp.۵۵۳-۵۷۱.

[۴] Singh, R.N. and Reed, S.M. (۱۹۸۷). *Estimation of pumping requirements for a surface mining operation*. Pumps and Pumping, two day Symposium at east Midlands Conference Centre, Marylebone press limited, University of Nottingham, England, pp.۱-۲۴.

[۵] Hanna, T.M., Azrag, E.A. and Atkinson, L.C. (۱۹۹۴). *Use of an analytical solution for preliminary estimates of groundwater inflow to a pit*. Mining Engineering, ۴۶ (۲), pp.۱۴۹-۱۵۲.

[۶] Lewis, R.L. (۱۹۹۹). *Predicting the steady-state water quality of pit lakes*. Mining Engineering, ۵۱ (۱۰), pp.۵۴-۵۸.

[۷] Marinelli, F. and Niccoli, W.L. (۲۰۰۰). *Simple analytical equations for estimating ground water inflow to a mine pit*. Ground Water, ۳۸ (۲), p.۳۱۱-۳۱۴.

[۸] Doulati Ardejani F., Singh R.N., Baafi E.Y. and Porter I. (۲۰۰۳). *A finite element model to: ۱. Predict groundwater inflow to surface mining excavations*. Journal of the International Mine Water Association (IMWA), ۲۲ (۱), pp.۳۱-۳۸.

[۹] Henton, M.P. (۱۹۸۱). *The problem of water table rebound after mining activity and its effect on ground and surface water quality*. Quality of groundwater, Proceedings of an International Symposium, Noordwijkethout, The Netherlands, W. Van Duijvenbooden, P. Glasbergen and H. Van Lelyveld (Eds.), studies in environmental science, Vol. ۱۷, Elsevier scientific publishing company, Netherlands.

[۱۰] Norton, P.J. (۱۹۸۳). *A study of groundwater control in British surface mining*, Ph.D. Thesis, Nottingham University, ۴۶۰p.

[۱۱] Naugle, G.D. and Atkinson, L.C. (۱۹۹۳). *Estimating the rate of post-mining filling of pit lakes* Mining Engineering, ۴۵(۴), pp. ۴۰۲-۴۰۴.

[۱۲] Vandersluis, G.D., Straskraba, V. and Effner, S.A. (۱۹۹۵). *Hydrogeological and geochemical aspects of lakes forming in abandoned open pit mines*. Proceedings on Water Resources at Risk, W.R. Hotckkiss, J.S. Downey, E.D. Gutentag and J.E. Moore (Eds.), American Institute of Hydrology, pp.۱۶۲-۱۷۷.

[۱۳] Davis, A.D. and Zabolotney, G.A. (۱۹۹۶). *Ground-water simulations for the determination of post mining recharge rates at the Belle Ayr Mine*. Mining Engineering, ۴۸ (۱۱), pp.۸۰-۸۳.

[۱۴] Shevenell, L. (۲۰۰۰). *Analytical method for predicting filling rates of mining pit lakes: example from the Getchell Mine, Nevada*. Mining Engineering, ۵۲(۳), p.۵۳-۶۰.

[۱۵] Doulati Ardejani F., Singh R.N., Baafi E.Y. and Porter I. (۲۰۰۳). *A finite element model to: ۲. Simulate groundwater rebound problems in backfilled open cut mines*. Journal of the International Mine Water Association (IMWA), ۲۲ (۱), pp.۳۹-۴۴.

[۱۶] Doulati Ardejani F. and Singh R.N. (۲۰۰۴). *Assessment of groundwater rebound in backfilled open cut mines using the finite element method*. Journal of the Rock Mechanics & Tunnelling Techniques, ۱۰ (۱), pp.۱-۱۶.

[۱۷] Reed, S.M. (۱۹۸۶). *Groundwater recovery problems associated with opencast mine Backfills*. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, ۳۳۲p.

[۱۸] Norton, P.J. (۱۹۸۳). *A study of groundwater control in British surface mining*, Ph.D. Thesis, Nottingham University, ۴۶۰p.

[۱۹] *Geo-slope International*, Ltd (۲۰۰۲) SEEP/W for finite element seepage analysis,

http://www.geo-slope.com/products/seepw.asp

[۲۰] Freeze R.A., Cherry J.A. (۱۹۷۹). *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, ۶۰۴ pp.

[۲۱] Pickens J.F., Lennox W.C. (۱۹۷۶). *Numerical simulation of waste movement in steady groundwater flow systems* Water Resources Research ۱۲(۲), pp.۱۷۱-۱۸۰.

[۲۲] Pinder G.F., Frind E.O. (۱۹۷۲). *Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis* Water Resources Research ۸(۱), pp.۱۰۸-۱۲۰.

[۲۳] Pinder G.F. (۱۹۷۳). *A Galerkin-finite element simulation of groundwater contamination on Long Island, New York* Water Resources Research ۹(۶), pp.۱۶۵۷-۱۶۶۹.