

مقایسه قابلیت‌های بسته‌های محاسبه کننده جریان درون سلولی BCF و LPF در مدل عددی MODFLOW برای بکارگیری در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

محمد حسین کوچک‌زاده^۱، فرزین نصیری صالح^۲، ضیاءالدین ایدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب دانشگاه تربیت مدرس
h_kou66@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس
nasirisaleh@yahoo.com

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب دانشگاه صنعتی شریف
zapwit@yahoo.com

خلاصه

امروزه علی‌رغم توسعه نرم‌افزارهای گوناگون از سوی شرکت‌های مختلف در زمینه شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، محدودیت‌های موجود در آنها از یک سو و عدم شناخت قابلیت‌های آنها از سوی دیگر، می‌تواند باعث ایجاد عدم قطعیت در نتایج گردد. به نظر می‌رسد، قوی‌ترین نرم‌افزار در زمینه شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، MODFLOW باشد. با این حال، این نرم‌افزار نیز به مانند سایر نرم‌افزارهای موجود، با محدودیت‌هایی روبرو است که موجب بروز عدم قطعیت در نتایج می‌گردد. علاوه بر این، عدم شناخت کافی از قابلیت‌های نرم‌افزار و کاربرد آنها در موقعیت‌های متفاوت، بر این عدم قطعیت می‌افزاید. در این مقاله، قابلیت‌های بسته‌های محاسبه گر جریان درون سلولی BCF و LPF به منظور بکارگیری در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW، بیان گردیده‌است.

کلمات کلیدی: MODFLOW، بسته‌های BCF و LPF، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

۱- مقدمه

در زمینه مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نرم‌افزارهای متعددی توسط شرکت‌های مختلف تهیه و به بازار عرضه شده‌اند. کارایی مدل، عمومیت مدل و سهولت کاربرد مدل توسط کاربر از اصلی‌ترین معیارها برای انتخاب مدل می‌باشد. مدلی که در مراحل مختلف مدل‌سازی اعم از ورود داده‌ها، خروج داده‌ها و تنظیم و ارائه نتایج پیچیده نباشد، مناسب بوده و ترجیح داده می‌شود [۱].

در مجموع، با احتساب شرایط موجود در کشور ایران و قابلیت‌های نرم‌افزارهای گوناگون، نرم‌افزار MODFLOW به عنوان بهترین نرم‌افزار برای مدل‌سازی آب زیرزمینی در ایران مطرح گردیده‌است [۲]. با این حال، این نرم‌افزار نیز به مانند بسیاری دیگر از نرم‌افزارهای موجود، دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که استفاده از آن برای مدل‌سازی، مستلزم شناخت حداکثری از شرایط منطقه و اعمال دقت مناسب در بکارگیری آنها می‌باشد. MODFLOW، مدلی بر پایه فیزیک می‌باشد که توسط موسسه زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، توسعه یافته است. این مدل، معادله داری را با معادله تعادل جرم یا پیوستگی برای جریان زیرسطحی ترکیب می‌کند. MODFLOW، یک کد ماژولی، سه بعدی و تفاضل محدود بلوک مرکزی می‌باشد که برای سیستم آبخوان لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. MODFLOW دارای پیشینه دراز مدت از استفاده و مقبولیت در اجتماع مدل‌سازان می‌باشد [۳ و ۴].

قابلیت‌ها:

MODFLOW قادر به شبیه‌سازی شرایط متفاوتی از آبخوان مانند محصور، غیر محصور، نشتی، دارای عملکرد تأخیری و شرایط محصور/آزاد تبدیل‌شونده می‌باشد. محدوده‌های هم‌روند و غیرهم‌روند، می‌توانند در MODFLOW هم به حالت هم‌گن و هم به صورت ناهم‌گن، مدل شوند. هر دو حالت ماندگار و انتقالی برای جریان آرام، می‌تواند در آن شبیه‌سازی گردد. وجود گزینه موجود برای غیر فعال کردن مناطق مورد نظر

در درون محدوده مطالعاتی، امکان مدل کردن آسان سیستم های غیرخطی پیچیده را برای کاربر فراهم آورده است. تمام شرایط مرزی که در شرایط واقعی وجود دارد، می توانند در مدل نیز تعریف گردند. این شرایط شامل هدها و فشارهای ثابت، جریان های ثابت یا متغیر، جریان ها و هدهای وابسته به زمان، تغذیه و تخلیه جریان آب زیرزمینی، نقاط برداشت و زهکش ها می باشند. چندین فعل و انفال سطحی-زیرسطحی مانند تبخیر و ترق و اندرکنش رودخانه-آبخوان، می توانند به گونه رضایت بخشی توسط MODFLOW شبیه سازی گردند. امکان انتخاب از بین گزینه های مختلف تکنیک های حل معادلات، MODFLOW را به ابزاری قدرتمند برای مسائل پیچیده، تبدیل کرده است [۳]. این قابلیت ها، باعث گردیده که MODFLOW، تبدیل پرکاربردترین نرم افزار در زمینه مدل سازی آب زیرزمینی گردد [۴].

محدودیت های مدل MODFLOW:

MODFLOW فرض می کند که چاهها به طور کامل در تمام ضخامت آبخوان نفوذ دارند و در نتیجه پایین افتادگی آب در نزدیکی چاهی که به طور کامل در ضخامت اشباع نفوذ نکرده است، به طور دقیق مدل نمی گردد. با این حال، این حالت در مدلسازی، بحرانی به حساب نمی آید زیرا اثر پایین افتادگی در مقیاس منطقه ای، مهم می باشد نه در مقیاس محلی [۳].

محدودیت دیگر مدل آن است که نمی تواند موقعیت مکانی دقیق چاه را در شبکه سلول ها، تخصیص دهد. در نتیجه، چندین چاه ممکن است یکپارچه شده و در یک مکان (مرکز یک سلول) تخصیص یابند. در این حالت، پایین افتادگی در سلول های نزدیک به سلول های پمپاژ، ممکن است با حالت واقعی، تطابق دقیقی نداشته باشند. این مورد در گذشته به عنوان یک مشکل بنیادین محسوب نمی شد زیرا با توجه به کم بودن تعداد چاهها، اثر منطقه ای این حالت، کم بود [۳]. ولی امروزه با افزایش تعداد چاهها بخصوص در کشور ما، این مشکل می تواند بر روند مدلسازی، اثرگذار باشد.

محدودیت دیگری که مرتبط با جریان های سطحی می باشد، مربوط به شکل مقطع عرضی رودخانه می باشد. ماژول رودخانه در MODFLOW، یک شکل مستطیلی را برای بستر رودخانه فرض می کند. نیمرخ مورد استفاده در مدل، ممکن است مسطح تر از نیمرخ سهمی وار در واقعیت باشد. با این حال، تجربه استفاده از MODFLOW، نشان داده است که از آنجا که رودخانه عمیق نیوده و عرض آن بسیار بزرگتر از عمق می باشد، تخمین مستطیلی از بستر، می تواند تا حدی قابل قبول باشد [۳].

از آنجا که مدل هایی مانند MODFLOW، اقدام به گسسته کردن محدوده مورد مدل می نمایند، پارامترهای هیدرولوژیکی بر مبنای یک متوسط مکانی تخصیص داده می شوند که در آن، یک مقدار منحصر به فرد به هر سلول تخصیص می یابد. این درجه از تخمین مطلوب تلقی می گردد زیرا داده ها در مقیاس هایی بهتر از مقیاس شبکه، شناخته نشده اند [۳].

مشکلات زیادی در مدلسازی جریان آب زیرزمینی سیستم دنیای واقعی وجود دارد زیرا همواره کمبودهای زیادی در داده های مورد نیاز برای حل مستقیم یا معکوس معادلات، وجود دارد. توزیع هد هرگز دقیقاً مشخص نمی باشد زیرا اندازه گیری ها در تمام نقاط صورت نگرفته و در مناطقی هم که این اندازه گیری ها انجام شده اند، نتایج دقیق نمی باشند. همچنین تخمین پارامترها کاملاً ناشناخته بوده و یا از اندازه گیری های موردی بدست آمده اند که تعداد کمی از آنها برای ساخت مقادیر موثر مجزا برای استفاده در مدل، مستقیماً قابل کاربرد می باشند [۳].

اگرچه این محدودیت ها می تواند در روند مدل سازی با استفاده از این نرم افزار خلل وارد نماید، با این حال، قسمت اعظمی از خطاهای حاصله در نتایج، مرتبط با عدم شناخت کافی از قابلیت های اجزای مختلف نرم افزار می باشد. MODFLOW، همانگونه که پیش از این ذکر گردید، دارای گزینه های مناسبی برای بکارگیری در نزدیک کردن شبیه سازی به دنیای واقعی می باشد که استفاده از آنها، مستلزم شناخت ویژگی های هر یک است. در این مقاله سعی گردیده تا قابلیت های دو بسته محاسبه گر جریان درون سلولی BCF و LPF شرح داده شود.

۲- مکانیزم حل معادلات در MODFLOW

معادله دیفرانسیل جزئی جریان آب زیرزمینی در حالت انتقالی، برای لایه آبدار غیر همروند و ناهمگن، با فرض چگالی ثابت برای آب، به صورت معادله ۱ بیان می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن، K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} ، مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی در طول محورهای x و y و z ، h ، هد (L) ، W ، جریان حجمی در واحد حجم لایه که بیانگر منابع ورودی به آب زیرزمینی ($W > 0$) و یا منابع خارج کننده آب ($W < 0$) از آن می باشد $(T-1)$ ، SS ، ضریب ذخیره ویژه در محیط متخلخل $(L-1)$ و t ، بیانگر زمان می باشد (T) [۵].

MODFLOW، از روش تفاضل محدود که در آن، سیستم پیوسته معادلات، با دسته ای از نقاط گسسته در زمان و مکان، جایگزین می گردند، برای حل معادله جریان آب زیرزمینی، بهره می برد [۶].

یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبانماه ۱۳۹۱، دانشگاه ارومیه

توسعه معادله جریان آب زیرزمینی به فرم تفاضل محدود، از کاربردهای معادله پیوستگی، تبعیت می کند. شکل معادله ۱ به صورت گسسته، به صورت زیر می باشد:

$$(2) \quad CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) - P_{i,j,k}h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

در این معادله، مقادیر CR، CV و CC، ضرایب انتقال بین سلولی برای سه جهت (Row, Column, Vertical) (L^2/T) و m بیانگر گام زمانی می باشد. dh بیانگر هد (L) و ترم های Δr ، Δc و Δv ، به ترتیب بیانگر ابعاد سلول در راستای سطری، ستونی و عمودی (L) می باشند. مقدار ضریب انتقال برای دو سلول مجاور در یک سطر، از رابطه ۳ محاسبه می گردد. می توان این مقدار را برای سایر جهات نیز به همین ترتیب، محاسبه نمود.

$$(3) \quad CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}}$$

هر یک از شش جزء اول در سمت چپ معادله ۲، بیانگر جریان ورودی به سلول و یا خروجی از آن (متناسب با هد)، ناشی از هر یک از شش سلول مجاور سلول می باشد که از معادله دارسی، نتیجه گردیده اند. ترم های ۷ و ۸ در سمت چپ معادله ۲، بیانگر مقادیر جریان ورودی یا خروجی به سلول ناشی از منابع خارجی (تنش ها) مانند چاه ها، رودخانه ها، زهکش ها و ... می باشند. سمت راست معادله، ترم مربوط به ذخیره را نشان می دهد. برای ساخت ماتریس حل، معادله تفاضل محدود به شکل زیر بازنویسی می گردد [۶]:

$$(4) \quad CV_{i,j,k-1/2}h_{i,j,k-1} + CC_{i-1/2,j,k}h_{i-1,j,k} + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k} + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k})h_{i,j,k} + CR_{i,j+1/2,k}h_{i,j+1,k} + CC_{i+1/2,j,k}h_{i+1,j,k} + CV_{i,j,k+1/2}h_{i,j,k+1} = RHS_{i,j,k}$$

که در آن:

$$(5) \quad HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k}{t - t^{m-1}} (L^2/T)$$

$$(6) \quad RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} (L^3/T)$$

در نهایت معادله به شکل ماتریسی زیر نوشته و با استفاده از روش تکراری، حل می گردد:

$$(7) \quad [A]\{h\} = \{q\}$$

تعریف شرایط موجود برای مدل سازی در نرم افزار، به وسیله بسته های مربوطه صورت می گیرد. بسته های موجود در نرم افزار MODFLOW برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و دسته ی مربوطه، در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد [۶].

جدول ۱: بسته های موجود در نرم افزار MODFLOW و دسته بندی آنها [۶]

Package Name	Abbreviation	Package Category
Basic	BAS	Program Control
Block-Centered Flow	BCF	Hydrologic/Internal
Layer-Property Flow	LPF	Hydrologic/Internal
Horizontal Flow Barrier	HFB	Hydrologic/Internal
Well	WEL	Hydrologic/Internal
Recharge	RCH	Hydrologic/Internal
River	RIV	Hydrologic/Internal
General-Head Boundary	GHB	Hydrologic/Internal
Drain	DRN	Hydrologic/Internal
Evapotranspiration	EVT	Hydrologic/Internal
Strongly Implicit Proceture	SIP	Solver
Preconditional Conjugate Gradient	PCG	Solver
Direct Solution	DE4	Solver

از دو بسته BCF و LPF به منظور شبیه سازی جریان درونی در شبیه سازی با استفاده از MODFLOW استفاده می گردد. تفاوت این دو بسته در ورودی های تخصیص داده شده توسط کاربر و جزئیات اجرا می باشد. در یک شبیه سازی خاص، تنها از یک بسته می توان استفاده نمود. بسته جریان

درونی، اقدام به محاسبه مقادیر ضرایب انتقال CV، CC و CR و نیز ترم‌های ذخیره در معادله ۴ می‌نماید که این ترم‌ها در درون ضرایب HCOF و RHS، مخفی می‌باشند بسته HFB برای شرایط خاصی کاربرد داشته و در مدل‌سازی‌های رایج کمتر از آن استفاده می‌گردد. این بسته به صورت ترکیب با دو بسته‌ی دیگر عمل نموده و نمی‌توان آن را مستقل استفاده نمود [۶].

۳- معادلات هیدرولیکی پایه برای ضریب انتقال

روش‌های مربوط به محاسبه ضریب انتقال معادل بین سلولی در بسته‌های BCF و LPF، به شرح جدول ۲ می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، ۴ روش می‌تواند در محاسبه ضرایب C در رابطه ۴ بکار گرفته شود. چنانچه قابلیت انتقال (T) برای هر سلول، مقداری ثابت و منحصر به فرد باشد، از روش "میانگین هارمونیک" برای محاسبه مقادیر ضریب انتقال افقی معادل (C) در هر راستا استفاده می‌گردد. برای حالتیکه قابلیت انتقال به صورت خطی بین گره‌ها تغییر کند، از روش "میانگین لگاریتمی" برای محاسبه قابلیت انتقال معادل در هر راستا استفاده می‌گردد. این رابطه، نتایج دقیقی را برای جریان ماندگار و یک بعدی در صورت یکنواخت بودن جریان و همراستا بودن آن با راستای تغییرات قابلیت انتقال، در اختیار قرار می‌دهد. برای حالتیکه آبخوان مسطح، همگن و دارای سطح ایستایی در خود باشد، از روش "میانگین حسابی" برای محاسبه قابلیت انتقال معادل استفاده می‌گردد. این رابطه، نتیجه دقیقی را برای جریان یکنواخت، یک بعدی و ماندگار در اختیار می‌گذارد. حالتیکه آبخوان مسطح و دارای سطح ایستایی باشد و در آن هدایت هیدرولیکی به صورت خطی بین گره‌ها تغییر کند، از روش "میانگین حسابی در ضخامت و لگاریتمیک" در هدایت هیدرولیکی، برای قابلیت انتقال معادل استفاده می‌گردد. این روش، نتایج دقیقی را برای جریان یکنواخت، ماندگار و یک بعدی زمانیکه هدایت هیدرولیکی در راستای جریان تغییر می‌کند، تولید می‌نماید [۶].

جدول ۲: نحوه محاسبه ضریب انتقال معادل بین سلولی در بسته‌های BCF و LPF [۶]

روش	رابطه محاسبه T برای هر سلول	رابطه محاسبه C برای هر سلول	رابطه محاسبه T معادل بین دو سلول مجاور	رابطه محاسبه C معادل بین دو سلول مجاور
میانگین هارمونیک	$TR_{ij,k} = \Delta v_{ij,k} HK_{ij,k}$ $TC_{ij,k} = \Delta v_{ij,k} HK_{ij,k} HANI_{ij,k}$	$C = \frac{TW}{L}$	-	$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
میانگین لگاریتمی				$T_{eq} = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2/T_1)}$
میانگین حسابی				$C_{eq} = \frac{T_{eq} W}{L_{eq}}$
میانگین حسابی در ضخامت و لگاریتمیک در هدایت هیدرولیکی				$T_{eq} = \left(\frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{2} \right) \left(\frac{K_1 - K_2}{\ln(K_2/K_1)} \right)$

در جدول فوق، T، قابلیت انتقال در مسیر جریان (L/2/T)، W، عرض منشور (L)، طول منشور (L)، ۱ و ۲، به ترتیب، ضرایب انتقال برای گره‌های ۱ و ۲، HK، ضریب هدایت هیدرولیکی سلول در راستای سطری (L/T)، ΔV ، ضخامت اشباع سلول (L) و HANI، نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی ستونی به سطری برای سلول می‌باشد.

ضخامت اشباع سلول، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta v_{ij,k} = (TOP_{ij,k} - BOT_{ij,k}) \quad (۸)$$

که در آن، TOP، بیانگر تراز بالایی سلول (L) و BOT، تراز کف سلول (L) می‌باشد. در شرایط تراز ایستایی، ΔV وابسته به هد بوده و از روابط شماره ۱۵ برای محاسبه ضخامت اشباع استفاده می‌گردد.

زمانیکه شرایط سطح ایستایی شبیه‌سازی گردید، ضخامت اشباع سلول در آغاز هر تکرار با استفاده از معادله ۱۵ مجدد محاسبه می‌گردد. چنانچه هد پایین‌تر از کف آبخوان قرار گیرد، در این حالت، سلول به صورت کاملاً خالی از آب در نظر گرفته شده و به صورت سلول بدون جریان تبدیل می‌گردد.

$$\text{if } HNEW_{ij,k} \geq TOP_{ij,k} \quad \text{then } \Delta V_{ij,k} = (TOP_{ij,k} - BOT_{ij,k}) \quad (۹-الف)$$

$$\text{if } TOP_{ij,k} > HNEW_{ij,k} > BOT_{ij,k} \quad \text{then } \Delta V_{ij,k} = (HNEW_{ij,k} - BOT_{ij,k}) \quad (۹-ب)$$

$$\text{if } HNEW_{ijk} \leq BOT_{ijk} \quad \text{then } \Delta V_{ijk} = 0 \quad (9-ج)$$

ضریب انتقال عمودی بین دو سلول، به همین ترتیب، از رابطه ۱۰ محاسبه می گردد.

$$CV_{i,j,k+1/2} = \frac{DELK_j DELC_i}{\frac{(1/2)\Delta V_{i,j,k}}{VK_{i,j,k}} + \frac{(1/2)\Delta V_{i,j,k+1}}{VK_{i,j,k+1}}} \quad (10)$$

که در آن، VK ، ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی سلول (L/T) می باشد.

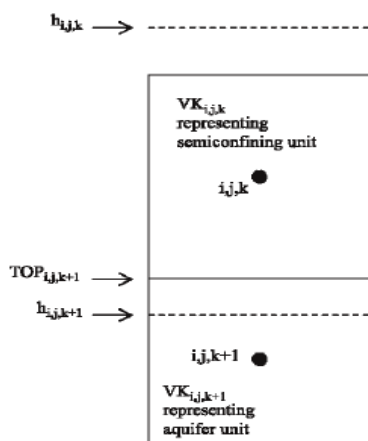
در محاسبه ضریب انتقال عمودی، حالتی ممکن است وجود داشته باشد که در آن سلولها i,j,k و $i,j,k+1$ به وسیله یک واحد نیمه محصور جدا شده باشند. اگر فرض بر آن باشد که این واحد دارای توزیع قابل توجهی از ضریب انتقال افقی و یا ظرفیت در لایه مدل نباشد، در این صورت تنها اثر آن محدود کردن جریان عمودی بین سلولها می باشد و رابطه فوق برای این حالت، اصلاح می گردند [۶].

۴- تبدیل از سلول خشک به تر

زمانیکه ضخامت اشباع صفر می گردد، بدین معنی که هد در پایین تر از تراز کف سلول قرار گیرد، واضح است که سلول با هد متغیر (wet) باید به خشک تبدیل شود. روش صریحی برای تعیین اینکه چه زمان سلول خشک باید به تر تبدیل شود، وجود ندارد. در MODFLOW، تبدیل سلول خشک به تر بر اساس مقایسه هد در سلولهای مجاور با آستانه ترشدن (THRESH برای سلول) صورت می گیرد. یک گزینه برای تعیین زمان تر شدن سلول، استفاده از هر چهار سلول افقی مجاور یا سلولی که مستقیماً در زیر آن قرار گرفته است، می باشد. در گزینه دیگر، فقط از سلول زیرین استفاده می گردد. استفاده از هد زیرین، می تواند برای تعیین زمان تر شدن، گزینه بهتری باشد. مقادیر آستانه و دوره آزمایش، توسط کاربر تخصیص می یابد. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه، به مرجع ۶ مراجعه نمایید.

۵- اصلاح جریان عمودی تحت شرایط آبکشی

ترمهای مربوط به جریان ورودی از سلولهای مجاور به هر سلول، در سمت چپ معادله ۲، بر اساس این فرض که هر دو سلول کاملاً اشباع می باشند، تعریف گردیده اند. حالتی ممکن است رخ دهد که بخشی از آبخوان محصور، غیر اشباع گردد. برای مثال، زمانیکه پمپاژ باعث پایین افتادگی در تراز آب به زیر تراز بالای لایه، حتی به صورت مقطعی، می گردد. این حالت در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیتی که در آن، سلول زیرین در نتیجه آبکشی، غیر اشباع گردیده است

برای حالت نشان داده شده در شکل، هد در سلول بالایی در تراز که مربوط به آن سلول است، قرار گرفته است. در زیر این سلول، حالت غیر اشباع غالب می باشد. در نتیجه، فشار در سطح پایینی این سلول، اتمسفر بوده و در محاسبات، صفر لحاظ می گردد. بنابراین، هد در سطح کف سلول بالایی، تراز کف که تراز بالای سلول تحتانی نیز می باشد، تعریف می گردد. اگر این تراز را تحت عنوان $TOP_{i,j,k+1}$ تعریف کنیم، در نتیجه جریان واقعی در امتداد بستر محصور، از رابطه ۱۱ (به جای ترمهای موجود در رابطه ۴) محاسبه می گردد:

$$q_{i,j,k+1} = CV_{i,j,k+1/2} (TOP_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (11)$$

بنابراین، در این حالت، نیاز به اصلاح در معادلات می باشد. این اصلاح با اعمال ترم جدیدی به سمت راست معادله، RHS، صورت می گیرد. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه، به مرجع ۶ مراجعه نمایید.

۶- تبدیل ترم ذخیره

در MODFLOW، بین حالت لایه محصور که در آن ترم ذخیره در طول شبیه سازی ثابت باقی می ماند و لایه هایی که در آنها ترم ذخیره ممکن است از حالت مقدار محصور به مقدار غیر محصور (بسته به اینکه تراز ایستایی در بالای سلول باشد و یا پایین تر از تراز بالای آن قرار گیرد) تبدیل شود و یا بالعکس، فرق گذاشته شده است. برای لایه محصور، فرمول ذخیره بر اساس کاربرد مستقیم از جزء ذکر شده در معادله ۲ پایه گذاری گردیده است.

$$SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad (12)$$

با این حال، در صورتیکه تراز ایستایی آب پایین تر از تراز بالای سلول در طول شبیه سازی قرار گیرد، آنگاه سلول تحت تأثیر شرایط سطح ایستایی بوده و فرمول زیر برای نرخ ذخیره آب در سلول باید بکار گرفته شود:

$$SY(\Delta r_j \Delta c_i) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad (13)$$

که در آن، Sy، آبدهی مخصوص (بدون بعد) می باشد.

در طی هر گام زمانی، ۴ حالت ذخیره زیر برای یک سلول ممکن است رخ دهد که بسته به شرایط، باید رابطه مناسب برای ترم ذخیره، بکار گرفته شود و متناسب با آن، ترم هایی به مقادیر HCOF و RHS در معادله ۴، اضافه گردد:

- سلول در تمام طول گام زمانی اشباع باقی بماند.
- سلول در تمام گام زمانی غیر اشباع باشد.
- سلول از حالت اشباع به غیر اشباع تبدیل شود.
- سلول از حالت غیر اشباع به اشباع تبدیل گردد.

برای شرایط ماندگار، هیچ ذخیره ای وجود نداشته و بنابراین چیزی به ضرایب HCOF و RHS برای بیان ذخیره اضافه نمی گردد (HCOF=RHS=0).

گزینه های موجود برای محاسبه ضریب انتقال افقی تحت شرایط سطح ایستایی، اصلاح جریان عمودی و تبدیل ترم ذخیره، تماماً بر این فرض بنا شده که هر لایه مدل متناظر با یک آبخوان مشخص یا یک خط افقی نفوذپذیر که توسط واحدهای مجزا با خاصیت نفوذپذیری پایین تفکیک گردیده اند، می باشد. استفاده از این گزینه ها در جاییکه این شرایط برقرار نمی باشد، ممکن است منجر به تغییراتی در مسئله و عدم دقت شبیه سازی گردد. برای مثال، اگر از گزینه مربوط به محاسبات ضریب انتقال افقی تحت شرایط سطح ایستایی در جاییکه سطح ایستایی توسط چند لایه بیان می شود و می تواند در بیش از یک لایه رفت و آمد کند، استفاده گردد، در هنگام انجام تکرارها، ممکن است تبدیل غیر صحیح سلول ها به حالت بدون جریان رخ دهد. اگر گزینه تر شدن، استفاده نگردد، تبدیل به بدون جریان شدن، برگشت پذیر است. این گزینه امکان برگشت را به سلول های تبدیل شده به بدون جریان، فراهم می آورد، در حالیکه تبدیل رفت و برگشتی برخی مواقع ممکن است مکرراً رخ دهد و همگرایی در حل حاصل نشود. بنابراین باید در استفاده از این گزینه ها، دقت لازمه به عمل آید [۶].

۷- مقایسه بسته های جریان BCF و LPF از نظر قابلیت کاربرد

BCF، از متغیر ۱ (LAYCON) برای دسته بندی لایه ها بر اساس اینکه از کدامیک از فرمول های وابسته به هد استفاده شود، استفاده می نماید. کاربرد مقدار LAYCON را برای هر لایه تعریف می کند. ۴ مقدار برای LAYCON می تواند تعریف گردد:

- مقدار صفر بیانگر لایه محصور
 - مقدار ۱ برای لایه دارای سطح ایستایی (آزاد)
 - ۲ برای لایه با قابلیت تبدیل شوندگی محدود
 - ۳ و ۴ برای لایه با قابلیت تبدیل شوندگی کامل
- قابلیت های هر حالت، در جدول ۲ نمایش داده شده است که باید در انتخاب بسته و شرایط مناسب لحاظ گردد.

بسته LPF، دو دسته از لایه‌ها را پوشش می‌دهد: محصور و قابل تبدیل (confined and convertible). ویژگی‌های هر دسته به شرح جدول زیر می‌باشد. در انتخاب هر یک، بسته به شرایط محیطی، باید بسته‌های مناسب انتخاب گردد. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده برای MODFLOW، عدم اطلاع از شرایط موجود و یا انتخاب نامناسب بسته‌ها منجر به نتایج با دقت نامناسب از مدل می‌گردد [۶].

جدول ۲: قابلیت بسته‌های BCF و LPF در شبیه‌سازی شرایط واقعی

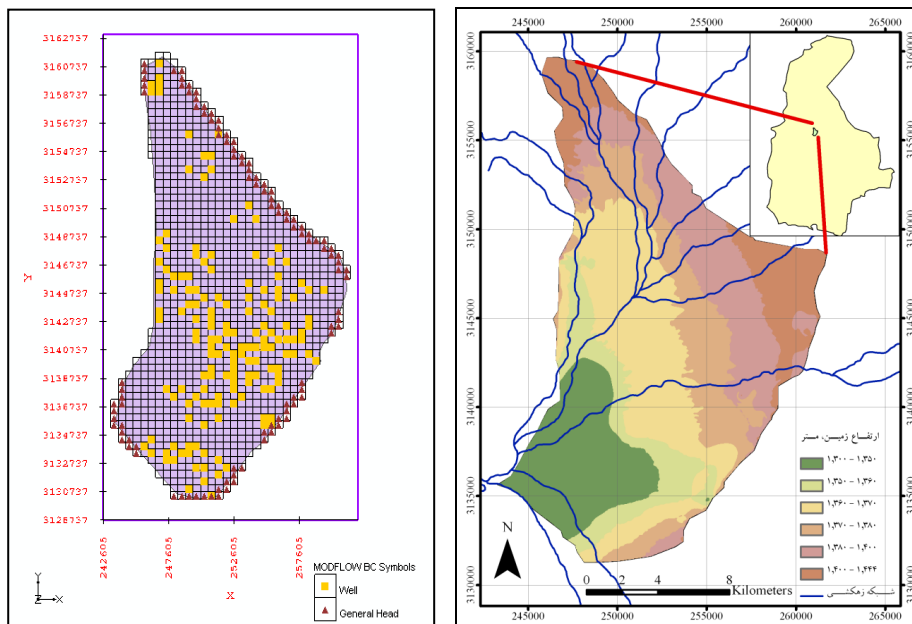
Package	LAYCON	قابلیت محاسبه T از مقادیر موجود		قابلیت محاسبه ضریب انتقال افقی				قابلیت اصلاح T در هنگام تغییر در سطح ایستایی		قابلیت تبدیل به خشک شدن برای سلول		قابلیت تبدیل به تر شدن برای سلول		قابلیت تبدیل ترم ذخیره		قابلیت اصلاح جریان عمودی		قابلیت پوشش معادلات ضخامت اشباع		
		Yes	No	Harmonic Mean	Log	Arithmetic Mean	Arith tX Log(K)	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	9-الف	9-ب	9-ج
BCF	0																	-	-	-
	1																	-	-	-
	2																	-	-	-
	3																	-	-	-
LPF	confined																	-	-	-
	convertible																	-	-	-

در جدول ۲، قابلیت تحت پوشش، با رنگ تیره مشخص گردیده است.

۸- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد شبیه سازی مدل آب زیرزمینی، منطبق بر محدوده آبخوان دشت گوهر کوه واقع در استان سیستان و بلوچستان و با وسعت حدود ۳۰۳۵۳۷۵۰۰ متر مربع می‌باشد که در طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی و عرض ۲۸ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی واقع است. محدوده مورد مطالعه، شبکه زهکشی دشت و حدود ارتفاعی آن در محیط GIS در شکل ۲ نشان داده شده است [۸]. مدل ریاضی این منطقه در سال ۱۳۸۸ به منظور تعادل بخشی به بیلان آب زیرزمینی دشت گوهر کوه و به کارفرمایی شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان، تهیه گردید.

در ساخت مدل، از نرم‌افزار مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی GMS بهره گرفته شد. این مدل جدیدترین و جامع‌ترین نرم افزار مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد. از این مدل در بیش از ۹۰ کشور دنیا به صورت گسترده‌ای استفاده می‌گردد. از جمله بزرگترین مزایای GMS استفاده از روش مدل‌سازی مفهومی است. مدل عددی GMS، از نرم‌افزار MODFLOW در محاسبات مربوط به جریان آب زیرزمینی بهره می‌برد [۹]. در آبخوان گوهر کوه جهت جریان آب زیرزمینی تقریباً از شمال، غرب و جنوب به سمت جنوب غربی دشت می‌باشد. آبخوان گوهر کوه از نوع سفره آزاد می‌باشد و چون بخشی از حوضه بزرگ گوهر کوه می‌باشد مرزهای اطراف آن بجز مرز غربی، ورودی و خروجی اصلی آب زیرزمینی می‌باشند که مرز با هدا عمومی فرض شده‌اند. مرز غربی و بخش‌هایی از شمال و شرق دشت با توجه به خطوط جریان و ارتفاعات، مرز با دبی صفر فرض شده‌اند [۹].



شکل ۲) موقعیت محدوده مطالعاتی گوهر کوه، شبکه زهکشی و حدود ارتفاعی آن و شبکه‌بندی انجام شده در مدل

در حوضه گوهرکوه تعداد زیادی رودخانه و مسیل از جمله رودخانه قلعه بید وجود دارد که جهت جریان آن از شمال به جنوب می باشد، سایر مسیلهای عبارتند از گرانتر، کلتنگی، پادوگی و تودلینگ. کلیه جریانهای سطحی موجود در منطقه گوهرکوه از بخش جنوب غربی حوضه آبریز از دره ای واقع در جنوب کوه در محمود خارج می شود که در نهایت رودخانه کاواری را تشکیل داده، این رودخانه پس از پیوستن به رودخانه شور وارد کویر لوت می گردد. جریانهای زیرزمینی نیز به همین صورت زهکشی شده و از دره مذکور خارج می گردند. طبق مطالعات هیدرولوژی انجام شده کل رواناب سالانه جاری شده در حوضه حدود ۹ میلیون متر مکعب (رواناب حوضه قلعه بید نیز وارد این حوضه می شود که لحاظ شده است) می باشد (البته ۱۵ درصد از این مقدار مستقیماً وارد آبهای زیرزمینی می شود) [۸]. در آبخوان گوهرکوه با توجه به اطلاعات پایه آبهای زیرزمینی و عدم وجود رودخانه و زهکش فعال در منطقه، ابعاد شبکه بطور یکنواخت ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد که در نتیجه شبکه بندی منطقه مدل شامل ۳۹ ستون و ۶۸ ردیف گردید (شکل ۲). منطقه شامل ۴۸۳۰ گره و ۲۳۱۲ سلول می باشد [۹].

نتایج حاصل از این تحقیق، بر روی مدل تهیه شده از گوهرکوه، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب که مدل نهایی در حالت غیرماندگار، با استفاده از بسته های داخلی متفاوت و شرایط مختلف، اجرا گردید. از آنجایی که مدل دارای آبخوان آزاد می باشد، در استفاده از بسته BCF، حالت LAYCON (1) و در استفاده از بسته LPF، حالت Convertible اجرا و نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیان حاصله از این شرایط برای حالتی که گزینه ترشدن سلول غیر فعال باشد، به شرح جدول ۳ می باشد. از آنجایی که در مدل نهایی، در راستای قائم تنها از یک ستون سلول استفاده گردیده است (به دلیل یکسان لحاظ کردن ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی در تمام مدل)، در نتیجه حتی با فعال بودن گزینه ترشدن سلول نیز، تغییری در نتایج حاصل نمی گردد.

جدول ۳: بیان حاصل از اجرای مدل با استفاده از بسته های جریان داخلی مختلف (m³/s)

Package	LAYCON	روش محاسبه ضریب انتقال افقی			
		Harmonic Mean	Log	Arithmetic Mean	Arith tX Log(K)
BCF	1	-۲۴.۸۴۵۸	-۲۴.۸۴۵۵	-۲۴.۸۴۵۵	-۲۴.۸۴۵۱
LPF	convertible	۶۴.۰۵۹۸		۷۵.۰۸۴۸	۵۳.۳۹۹۹

همانگونه که مشاهده می گردد، استفاده از بسته های مختلف با روش های محاسبه ضریب انتقال متفاوت، باعث تولید نتایج خروجی مختلفی می شود تا جاییکه حتی می تواند منجر به ارائه بیان منفی برای منطقه گردد. در این مدل، بسته LPF، بسیار بیشتر از بسته BCF نسبت به تغییر در روش محاسبه قابلیت انتقال، حساس می باشد. در مدل نهایی مورد استفاده برای دشت گوهرکوه، از بسته LPF با روش محاسبه میانگین هارمونیک برای محاسبه ضریب انتقال، بهره گرفته شده است. علاوه بر مقادیر بیان متفاوت، در هر مرحله اجرای مدل با شرایط مختلف، مقادیر هد محاسباتی در هر سلول نیز دستخوش تغییرات نسبتاً گسترده ای در محدوده مدل می گردد.

۹- نتیجه گیری

علی رغم امکانات مناسب تعبیه شده در نرم افزار MODFLOW برای شبیه سازی نزدیک به واقعیت، محدودیت های مدل و عدم دقت مناسب اطلاعات موجود از یک سو و عدم شناخت کافی از قابلیت های مدل از سوی دیگر، باعث ایجاد خطا در نتایج می گردد. از جمله قسمت هایی که موجب بروز عدم قطعیت در نتایج می گردد، محاسبات مربوط به جریان درون سلولی در معادله تفاضل محدود مورد استفاده توسط مدل می باشد. بسته های BCF و LPF، مهم ترین بسته های محاسباتی ترم های جریان داخلی و تغذیه می باشند که قابلیت های مناسبی را فراهم آورده اند. با این حال، عدم استفاده بجا از این بسته ها، می تواند باعث ایجاد خطاهای بزرگ در نتایج خروجی مدل گردد و استفاده از چنین مدلی برای پیش بینی می تواند لطمات جبران ناپذیری به منابع آب وارد نماید. این مسئله، لزوم انجام آزمایشات دقیق در محدوده مورد نظر و گردآوری آمار و اطلاعات با دقت مناسب را به منظور بکارگیری در انتخاب گزینه های محاسباتی مناسب، متذکر می شود که متأسفانه در کشور ما، نواقص فراوانی در این خصوص وجود دارد.

۱۰- مراجع

۱. نیکبخت، ج.، (۱۳۸۵)، "مدل بهره برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب" رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
۲. همتی نژاد، ح.، (۱۳۷۶)، "استفاده از مدل های آبهای زیرزمینی جهت تهیه طرح های جامع آبهای زیرزمینی" پایان نامه کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران-محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس.

3. Ramireddigary, S.R., (1998), "A Comprehensive, Integrated Computer Model For Basin-Wide Water Resources Management," submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree doctor of philosophy, Department of civil engineering, Kansas State University.

4. Kim N., Chung I., Won Y., Arnold J., (2008)," development and application of the integrater SWAT-MODFLOW model ",Journal Of Hydrology, 10.1016/j.jhydrol.2008.02.024

5. Dingman S.L, Physical Hydrology

6. Harbaugh A.W., (2005)," MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process",U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6—A16

۷. محمودیان شوشتری.محمد، هیدرولیک آبهای زیرزمینی، انتشارات دانشگاه شهید چمران

۸. هلال بیگی، ع. و ایدی، ض.، (۱۳۸۹)، "مکانیابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و خروجی‌های مدل شبیه سازی شده آب زیرزمینی دشت گوهرکوه خاش"، مجله عمران-آب، شماره ۳۵.

۹. ایدی، ض.، و هلال بیگی، ع. (۱۳۸۹)، " تهیه مدل آب زیرزمینی دشت گوهرکوه و پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی دشت در تراز آب زیرزمینی"، مجله عمران-آب، شماره ۳۵.