بکارگیری مقادیر تغذیه استخراج شده از مدل SWAT در مدل ریاضی MODFLOW جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت فیروزآباد

سپیده دولت‌آبادی و سیدمحمدعلی زمردیان[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۰)

چکیده

یکی از ضروری‌ترین مؤلفه‌های یک مدل آب زیرزمینی مناسب، داشتن اطلاعات دقیقی از مقادیر تغذیه در بین اطلاعات ورودی است که اغلب به‌صورت درصدی از بارندگی آبخوان‌ها، به مدل معرفی می‌شوند. حال آن‌که مقادیر تغذیه از نظر زمانی و مکانی تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارند. دشت فیروزآباد یکی از دشت‌های مستعد کشاورزی در استان فارس می‌باشد که به‌علت افت سطح آب و بیلان منفی، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آن از سال ۱۳۸۱ ممنوع شده‌است. هدف اساسی این‌پژوهش، برآورد مقادیر تغذیه آبخوان آب زیرزمینی حوضه به‌کمک مدل SWAT و استفاده از آن در مدل MODFLOW می‌باشد. ابتدا قسمت آب سطحی حوضه با مدل SWAT شبیه‌سازی و نتایج با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP مورد آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت قرار گرفت. پس از استخراج مقادیر تغذیه آبخوان از مدل واسنجی‌شده، قسمت آب زیرزمینی حوضه با استفاده از مدل MODFLOW در دو شرایط پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی گردید. پس از واسنجی مدل، ضرایب هیدرودینامیکی دشت تعیین و حساسیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری بررسی شد. سپس جهت اطمینان، مدل مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. مدل رفتار آبخوان را به‌خوبی شبیه‌سازی نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل SWAT، مدل MODFLOW، فیروزآباد، شبیه‌سازی، واسنجی، اعتبارسنجی، آنالیز حساسیت

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mzomorod@shirazu.ac.ir

مقدمه

یکی از ضروری‌ترین مؤلفه‌های یک مدل آب زیرزمینی مناسب، داشتن اطلاعات دقیقی از مقادیر تغذیه در بین اطلاعات ورودی است. مقادیر تغذیه آب زیرزمینی از نظر زمانی و مکانی با تغییر عواملی نظیر شرایط آب و هوایی، کاربری اراضی، خاک، پوشش گیاهی تغییر می‌کنند (۱۱). قابلیت اعمال این عوامل در مدل‌هایی‌که جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی به‌کار می‌روند، وجود ندارد و در اغلب موارد تنها تأثیر بارش را درنظر گرفته و تغذیه را به‌صورت درصدی از بارندگی به مدل وارد می‌کنند و در طی واسنجی مدل مقادیر تغذیه را کالیبره می‌نمایند.

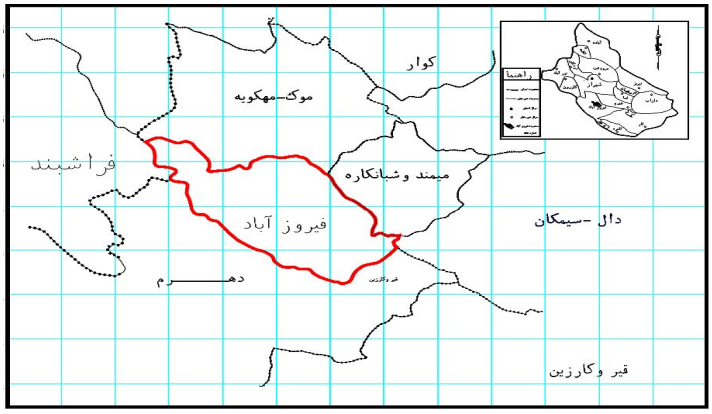
گسترش مدل SWAT از اوایل ۱۹۹۰ آغاز شده است. SWAT مخفف Soil and Water Assessment Tool، مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. این مدل توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شد (۱۲). مدل SWAT، مدلی نیمه‌توزیعی است که ماژولی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی دارد ولی از آن‌جایی که این ماژول براساس مدل‌های فله‌ای (models lumped) پایه‌گذاری شده است، بنابراین قابلیت بیان پارامترهای توزیعی هم‌چون ضریب هدایت هیدرولیکی را ندارد (۱۱). مجموع این‌دلایل سبب شد که در این تحقیق تصمیم بر آن گرفته شود به‌علت قوی بودن مدل SWAT در بحث‌های مدیریت منابع آب و درنظر گرفتن عوامل مؤثر بر تغذیه آب زیرزمینی، مقادیر تغذیه از این مدل استخراج و به‌عنوان اطلاعات ورودی در مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند.

در راستای کاربرد روش تفاضل محدود در مسائل مربوط به آب زیرزمینی، در دهه‌های اخیر، چندین مدل کاربردی توسط مرکز مطالعات زمین‌شناسی ایالات متحده ارائه و در دسترس همگان قرار گرفته است. در بین مدل‌های موجود در زمینه آب زیرزمینی، مدلی که کاربردهای گسترده‌ای داشته و در بین هیدروژئولوژیست‌ها از مقبولیت بالایی برخوردار بوده مدل MODFLOW می‌باشد. MODFLOW یک مدل سه‌بعدی تفاضل محدود جریان آب زیرزمینی‌است که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (مک‌دونالد و هارباگ) در ۱۹۸۴ بااستفاده از FORTRAN66 ارائه گردید (۱۵). در این تحقیق رفتار هیدرولیکی آبخوان دشت فیروزآباد با استفاده از رابط گرافیکی PMWIN که مدل MODFLOW یکی از مدل‌های موجود در آن است، شبیه‌سازی شد.

دشت فیروزآباد از دشت‌های مستعد استان فارس در زمینه کشاورزی است. این دشت یکی از دشت‌های حوضه آبریز رودخانه فیروزآباد می‌باشد که به‌علت خشکسالی‌های چند سال اخیر و همزمان با آن توسعه بهره‌برداری در دشت، روند نزولی سطح آب زیرزمینی آن از سال ۱۳۷۸ آغاز و با آن‌که از سال ۱۳۸۱ جزء مناطق پیشنهادی در مورد تمدید ممنوعیت منابع آب زیرزمینی بوده است این روند نزولی هم‌اکنون نیز ادامه دارد.

کاربرد مدل MODFLOW در راستای توصیف و پیش‌بینی رفتار سامانه‌های آب زیرزمینی در سال‌های اخیر توسعه بسیاری داشته‌است که مطالعاتی نظیر «مدل‌سازی حوضه آب زیرزمینی نیومکزیکوی‌جنوبی»، توسط سامانی و همکاران (۱۴)، «مدل جریان آب زیرزمینی سه‌بعدی دشت ناربروگ باگ انگلستان» توسط برادلی (۶)، «محاسبه ضریب ذخیره و ضریب قابلیت انتقال آبخوان ناتینگهام شایر انگلستان» توسط جایو و لیرنر (۹)، «تأثیر جریان آب زیرزمینی بر روی بیلان آبی مرتبط با خاک‌های آلی یخچال مینه‌سوتا» توسط ریو و همکاران (۱۳)، «مدل‌سازی بیلان آبی دشت ریوتوربیو مکزیک» توسط جوهانس (۱۰) از این نمونه‌اند.

از تحقیقات اخیر که به‌صورت خاص در زمینه موضوع این‌تحقیق صورت گرفته است می‌توان به این موارد اشاره‌کرد که کیم و همکاران (۱۱) با هدف پیوند مناسب آب زیرزمینی با آب سطحی و با بیان این‌مطلب که تغذیه آب زیرزمینی به‌طور مستقیم با بارش، تبخیر و تعرق و رواناب سطحی در ارتباط



شکل ۱. موقعیت محدوده فیروزآباد

می‌باشد، یک مدل ترکیبی کامل از SWAT-MODFLOW را ارائه دادند که قادر به توصیف تغذیه آب زیرزمینی توزیع شده و تبخیر- تعرق صورت‌گرفته از سطح آن بود. این مدل ترکیبی در حوضه میوسیم چن کره توسط آنها اجرا شد. چانگ وهمکاران (۸) نیز جهت ارزیابی نرخ تغذیه آب زیرزمینی توزیع شده در سطح حوضه میهاچن کره‌جنوبی از این مدل ترکیبی آب زیرزمینی و آب سطحی (SWAT-MODFLOW) استفاده نمودند.

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه تلفیق این دو مدل در نقاط مختلف دنیا و نتایج موفقیت‌آمیز آن در حوضه‌های مورد مطالعه، متأسفانه در کشور تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی در این زمینه صورت نگرفته است. بنابراین با توجه به نیاز احساس شده در کشور در زمینه تلفیق دو مدل و لینک آنها از طریق پارامتر تغذیه آب زیرزمینی، وضعیت بحرانی منابع آب به‌خصوص آب زیرزمینی دشت فیروزآباد این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. لذا این تحقیق نخستین پژوهشی خواهد بود که در سطح کشور در این زمینه انجام می‌شود.

مواد و روش‌ها

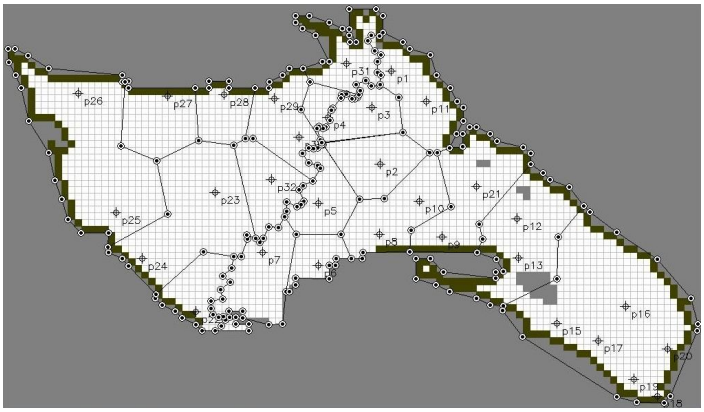
معرفی منطقه

محدوده مطالعاتی فیروزآباد در موقعیت جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این محدوده در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر شیراز قرار دارد. شکل ۱ موقعیت این حوضه را نسبت به حوضه‌های مجاور نشان می‌دهد. محدوده فیروزآباد جزء زیرحوضه رودخانه فیروزآباد است به‌طوری که رودخانه از ناحیه میانی آن گذشته و دشت را به دو قسمت تقسیم می‌کند. وسعت این محدوده ۷۲۳ کیلومترمربع می‌باشد که از این مقدار ۲۴۰ کیلومترمربع دشت و ۴۸۳ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. بلندترین نقطه ارتفاعی محدوده ۲۸۹۱ متر در ارتفاعات شمال شرقی و پایین‌ترین نقطه ارتفاعی آن ۱۳۰۰ متر در ناحیه جنوب شرق و محل خروجی حوضه می‌باشد. ارتفاع متوسط ارتفاعات ۱۹۶۰ متر و نواحی دشت ۱۳۲۷ متر از سطح دریا است. گستره محدوده مطالعاتی فیروزآباد جزء سیستم چین‌خورده زاگرس محسوب می‌گردد (۱).

به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات سطح آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، تعداد۳۲ حلقه چاه مشاهده‌ای به‌وسیله سازمان آب منطقه‌ای فارس در سال ۱۳۷۱ حفر و ترازیابی گردید (۱). در این تحقیق، آمار نوسانات ماهانه سطح ایستابی این ۳۲ چاه از زمان حفر جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. اغلب چاه‌های بهره‌برداری دشت، مصارف کشاورزی دارند که طبق آخرین آماربرداری صورت‌گرفته در سال ۱۳۸۸ تعداد آنها به ۱۸۰۵ حلقه رسیده است. جدول ۱ آمار منابع آبی حوضه را در

جدول۱. آمار منابع آبی حوضه

سال	چاه		قنات		چشمه		تخلیه کل
	تعداد	تخلیه(MCM)	تعداد	تخلیه(MCM)	تعداد	تخلیه(MCM)	
۱۳۶۳	۱۴۵	۲۱/۹۵	۱۲	۳۶/۲۲۶	۱۰	۷۱/۲۰۶	۱۲۹/۴۲۲
۱۳۷۱	۲۴۰	–	۱۶	–	۱۰	–	۱۲۸/۴
۱۳۷۵	۹۱۰	–	۱۵	–	۸	–	۱۹۴/۱۳۳
۱۳۷۶	۹۱۷	–	۱۸	–	۹	–	۱۹۴/۴۶۶
۱۳۸۲	۱۷۸۴	۱۸۴/۶۸۱	۲	۰/۶۲۲	۷	۱۷/۵۶۶	۲۰۲/۹۰۹
۱۳۸۸	۱۸۰۵	۱۸۷/۱۸۸	۲	۰/۶۲۲	۷	۱۷/۵۶۶	۲۰۵/۴۱۶

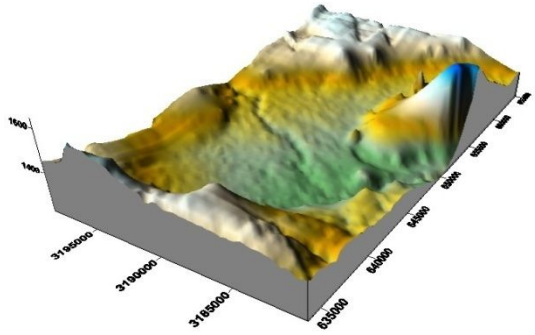


شکل۲. وضعیت شبکه‌بندی و سلول‌ها و مرزهای مدل و منطقه‌بندی‌های صورت گرفته

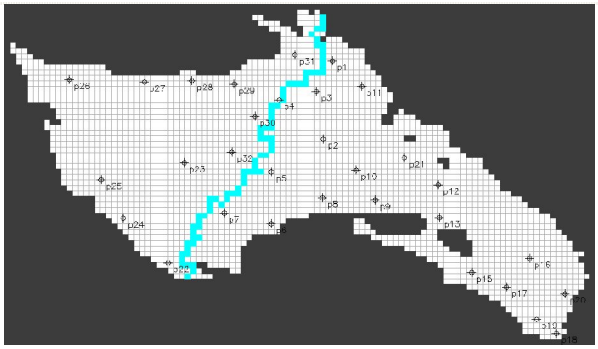
سال‌های آمارگیری شده نشان می‌دهد (۲). بر طبق این آمار، تعداد چاه‌ها یک روند کاملاً صعودی داشته و در طی ۲۵ سال (۱۳۸۸-۱۳۶۳) تقریباً ۱۲/۵ برابر شده اما مقدار تخلیه کل در این بازه زمانی به‌همراه توسعه چاه‌ها افزایش نداشته زیرا همراه با افزایش تعداد و تخلیه چاه‌ها، تعداد و تخلیه قنوات و چشمه‌ها کاهش یافته است.

شبیه‌سازی آبخوان فیروزآباد و اختصاص پارامترها به مدل

در چارچوب هندسی ابتدا بایستی محدوده‌ی مرز آبخوان مورد مطالعه، مشخص شود. برای این کار نقشه زمین‌شناسی دشت فیروزآباد و سازندهای آن مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت آبخوان آزاد فیروزآباد به شبکه‌ای مشتمل بر ۶۲ ردیف و ۱۰۵ ستون و هر سلول به‌ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ متر تقسیم گردید. ارتفاع نقطه نشانه ۳۲ چاه مشاهده‌ای با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) تصحیح و داده‌های مربوط به سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای از مهرماه ۱۳۷۱ تا مهرماه ۱۳۸۹ تهیه‌شد. با محاسبات انجام‌شده، در ابتدا سه زمان به‌عنوان زمان پایدار درنظر گرفته که در مرحله بعدی با ارزیابی اطلاعات موجود و در دسترس، دی‌ماه ۱۳۷۳ به‌عنوان زمان پایدار انتخاب شد. جهت جریان آب زیرزمینی در دشت اصلی فیروزآباد به‌موازات رودخانه فیروزآباد می‌باشد که در شبیه‌سازی آبخوان با بررسی نقشه‌های جهت جریان، مرزهای مدل در کلیه قسمت‌ها (به‌جز قسمت کوچکی در جنوب آبخوان) به‌صورت مرزهایی که جریان در آنها وابسته به بار هیدرولیکی است (GHB) تعریف گردید. شکل ۲ وضعیت شبکه‌بندی آبخوان و سلول‌های شبکه به‌همراه مرزهای مدل و منطقه‌بندی‌های صورت گرفته برای هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد. برای توپوگرافی دشت از نقشه رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر استفاده شد. شکل ۳ وضعیت توپوگرافی دشت



شکل۳. توپوگرافی دشت فیروزآباد



شکل۴. موقعیت رودخانه فیروزآباد در مدل

را نشان می‌دهد.

جهت تعیین سنگ‌کف دشت ، ابتدا به کمک لاگ یک سری چاه و پیزومتر در سطح دشت (۵)، ۱۳ چاه در لاگ‌ها مشخص بودند که به سنگ‌کف برخورد کرده‌اند و توزیع مناسبی در سطح دشت داشتند. با استفاده از توپوگرافی که با دقت مناسبی تهیه شد و عمق این ۱۳ چاه تا رسیدن و برخورد به سنگ‌کف، سنگ‌کف دشت تعیین گردید. سنگ‌کف دشت فیروزآباد کاسه‌ای شکل است، نقطه‌ی قعر آن تقریباً در مرکز دشت و نزدیکی روستای موشگان قرار دارد.

در زمان پایدار طبق آماربرداری انجام شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان فارس تعداد ۸۱۷ حلقه چاه بهره‌برداری در دشت فیروزآباد سرشماری گردیده است (۳). برای چاه‌های بهره‌برداری ۱۵ درصد تخلیه آنها به‌عنوان آب‌برگشتی درنظر گرفته و برای هر چاه از مقدار تخلیه آن کاسته شد. برای شبیه‌سازی رودخانه فیروزآباد از بسته نرم‌افزاری River استفاده شد که در این بسته رودخانه به‌صورت تغییرات غیرخطی مرز نشتی معرفی می‌شود. دراین روش تاوقتی که بار آبی در آبخوان بالاتر از بار آبی در رودخانه باشد جریان از آبخوان به‌سمت رودخانه حرکت خواهدکرد و وقتی بار آبی رودخانه پایین‌تر از آبخوان باشد، حرکت جریان از رودخانه به‌سمت آبخوان است (۷). شکل ۴ موقعیت رودخانه فیروزآباد را در مدل نشان می‌دهد.

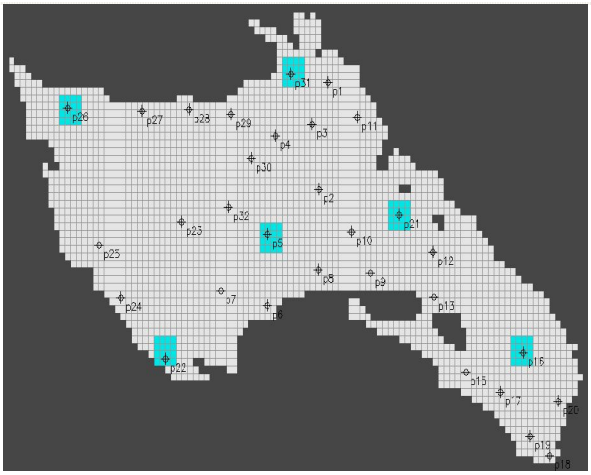
برای معرفی چشمه و قنوات (۴) منطقه که به‌عنوان منابع تغذیه یا تخلیه آبخوان مطرح می‌باشند از بسته نرم‌افزاری Well استفاده‌شد. برای مقادیر تغذیه، ابتدا مدل هیدرولوژیکی حوضه تهیه و در مدل SWAT در بازه‌زمانی ۲۰۱۰-۱۹۹۴ به‌صورت ماهانه شبیه‌سازی شد. در مرحله بعد خروجی‌های مدل در مقایسه با داده‌های ایستگاه هیدرومتری دهرود با استفاده از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP مورد آنالیز حساسیت و تحلیل عدم‌قطعیت و در بازه‌زمانی ۲۰۰۶-۱۹۹۸ مورد واسنجی و در بازه‌زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۷ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. دامنه‌های نهایی که برای پارامترهای مؤثر بر حوضه در آخرین تکرار مرحله‌ی واسنجی تعیین شده بودند به‌مدل SWAT اعمال و مدل مجدداً برای دوره آماری ۱۷ ساله براساس گام زمانی روزانه اجرا شد. در مرحله‌ی بعد، مقادیر تغذیه واردشده به کل آبخوان که تحت عنوان متغیر GW_RCHG در سربرگ output.hru فایل خروجی مدل SWAT، قرار دارد استخراج گردید. سپس از آن‌جایی که مدل براساس تاریخ میلادی شبیه‌سازی و بالطبع آن نتایج را ارائه می‌دهد بنابراین جهت اعمال تغذیه به‌مدل MODFLOW تاریخ‌های میلادی به شمسی تبدیل شدند. در مرحله‌ی بعد برای زیرحوضه‌هایی که داخل حوضه فیروزآباد و آبخوان آب زیرزمینی بودند، تعداد سلول‌های قرار گرفته درون هر کدام از آنها مورد شمارش قرار گرفت و مقادیر تغذیه ارائه شده توسط SWAT که برحسب میلی‌متر است بر تعداد سلول‌ها تقسیم و در نهایت با انجام تبدیل واحد برحسب میلی‌متر بر روز به

هرکدام از سلول‌های زیرحوضه مربوطه اعمال شد. ذکر این نکته ضروری است که در هنگام تخصیص سلول‌ها به هر زیرحوضه، بایستی به این نکته توجه داشت که هر سلول تنها برای یک زیرحوضه مورد شمارش قرار بگیرد یعنی یک سلول برای دو زیرحوضه اعمال نشود مخصوصاً در مورد سلول‌هایی که در مرز بین دو زیرحوضه هستند. در طی انجام این تلفیق، زیرحوضه‌هایی وجود داشتند که درون حوضه بوده ولی داخل آبخوان آب زیرزمینی نبودند برای اعمال تغذیه آنها به‌مدل در زمان مورد نظر ابتدا نقشه خطوط جریان در درون آبخوان ترسیم گردید. سپس با توجه به جهت جریان، مشخص شد که تغذیه این زیرحوضه‌ها باید به کدام زیرحوضه‌های قرار گرفته داخل آبخوان تأثیر داده شود. از طرف دیگر چون مرزهای آبخوان در مدل MODFLOW به‌صورت مرزهایی که ارتفاع آب در آنها وابسته به جریان است معرفی شدند بنابراین مقادیر تغذیه این زیرحوضه‌ها به مرز زیرحوضه‌هایی که براساس جهت جریان تشخیص داده شده بودند، اعمال گردید.

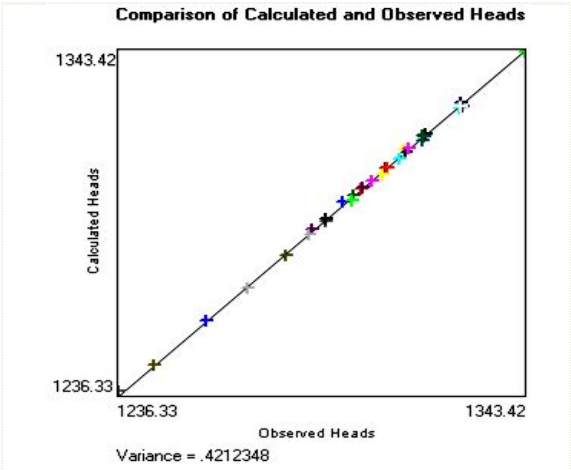
برای تعیین مقادیر اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه از نتایج آنالیز آزمایشات پمپاژ سال ۱۳۸۵ استفاده شد (۵) که با استفاده از این آزمایشات و نقشه چندضلعی تیسن دشت برای اعمال این ضرایب آبخوان منطقه‌بندی شد (شکل ۲). تحقیقات نشان داده است که تا عمق تقریبی ۲/۵ متر تبخیر قابل توجه بوده و در اعماق بیشتر ناچیز می‌باشد. در محدوده آبخوان فیروزآباد در شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری سطح آب پایین‌تر از عمقی‌است که تبخیر بتواند بر آن اثر کند، لذا از تأثیر این عامل در مدل‌سازی صرف‌نظر گردید. شرایط اولیه از مهم‌ترین پارامترهای حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب‌های زیرزمینی است که مدل با داشتن این شرایط، محاسبات را شروع می‌کند. برای شبیه‌سازی در شرایط پایدار سطح ایستابی در دی‌ماه ۱۳۷۳ و با توجه به این‌که شبیه‌سازی در شرایط ناپایدار از بهمن ۱۳۷۳ تا آذر ۱۳۷۴ صورت می‌گیرد در شرایط ناپایدار سطح ایستابی در ماه قبل به‌عنوان هد اولیه درنظر گرفته می‌شود. ذکر این‌نکته ضروری به نظر می‌رسد که در ابتدا هر ۳۲ چاه مشاهده‌ای به‌مدل آب زیرزمینی وارد شد ولی در مراحل بعدی پس از اتمام کالیبراسیون در زمان پایدار و در گام‌های زمانی شرایط ناپایدار مدل در واسنجی چاه شماره ۱۴ با مشکل روبرو شد. پس از بررسی وضعیت سطح آب این چاه در ماه‌های مختلف نوسانات زیادی در سطوح آب آن مشاهده گردید. با توجه به این نوسانات غیرطبیعی که با تغییرات سطوح آب در چاه‌های دیگر آبخوان نیز همخوانی ندارد. این فرضیه مطرح شد که احتمالاً این‌چاه از آبخوان مجاور آب می‌گیرد. لذا برای تأیید این فرضیه هیدروگراف مشاهده‌ای دشت در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۷۱ تهیه و نوسانات آن بررسی شد. مشخص گردید نوسانات هیدروگراف چاه شماره ۱۴ با بقیه چاه‌ها همخوانی ندارد، لذا فرضیه‌ی مطرح شده تقریباً تأیید و این چاه از مدل حذف و مراحل انجام واسنجی در شرایط پایدار و ناپایدار دوباره انجام گرفت. درحالی که قرارگرفتن سازند آسماری که حاوی آهک است در بالای این‌چاه بر این نوسانات تأثیر خواهد گذاشت.

واسنجی، آنالیز حساسیت و اعتبارسنجی مدل

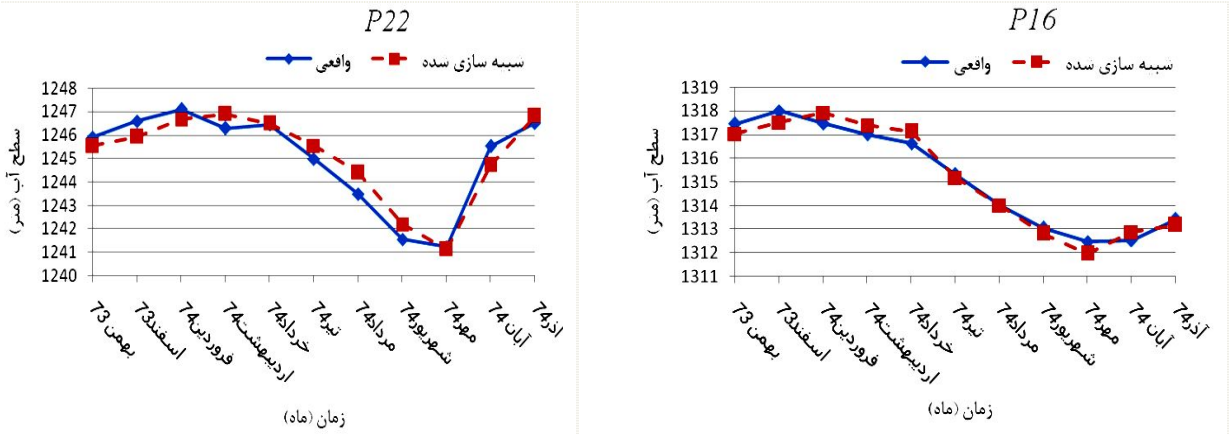
در نهایت پس از بارها اجرا و استفاده نسبی از مدل UCODE، مدل در حالت پایدار واسنجی گردید. واسنجی مدل در حالت ناپایدار از بهمن ۱۳۷۳ تا آذر ۱۳۷۴ صورت گرفت. بعد از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار برای اطمینان به مدل واسنجی شده لازم‌است مدل مورد اعتبارسنجی قرار بگیرد. اعتبارسنجی مدل دشت فیروزآباد در سال آبی ۱۳۷۵-۱۳۷۴ انجام شد. برای انجام آنالیز حساسیت آبخوان فیروزآباد در ابتدا هدایت هیدرولیکی در تمامی زون‌ها به‌صورت هم‌زمان و به‌مقدار مساوی افزایش یا کاهش داده شد و بعد از هر تغییر مدل اجرا و مقدار واریانس خطا تعیین گردید. برای بررسی حساسیت مدل به‌میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری، تعداد شش بلوک که دربرگیرنده چاه مشاهده‌ای باشند با اندازه‌های مساوی در نقاط مختلف آبخوان درنظر گرفته شد (شکل ۵). سپس میزان تخلیه از چاه‌ها در بلوک مورد نظر به‌میزان ۲۰ و ۵۰ درصد افزایش و



شکل۵. موقعیت بلوک‌های انتخاب شده جهت انجام آنالیز حساسیت



شکل ۶. نتیجه واسنجی مدل در شرایط پایدار



شکل ۷. نتایج واسنجی مدل در شرایط ناپایدار در دوره‌های زمانی پریود ۶ و ۱۰

کاهش داده شد.

نتایج و بحث

در طی واسنجی، پارامترهای ورودی در یک محدوده منطقی و همخوان با خصوصیات منطقه مورد مطالعه تغییر داده شد تا تطابق قابل‌قبولی بین مقادیر سطح آب مشاهده و محاسبه شده توسط مدل برقرار شود. عملیات واسنجی در دو شرایط پایدار و ناپایدار انجام پذیرفت. در PMWIN، یک مدل در صورتی به‌شکل مناسب واسنجی شده‌است که مقدار واریانس به زیر یک برسد. شکل ۶، مقایسه سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای محاسبه شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده را پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار نشان می‌دهد. بعد از واسنجی مدل در شرایط پایدار، واسنجی در شرایط ناپایدار انجام می‌شود. در این مرحله ضریب ذخیره آبخوان کالیبره خواهد شد. مدل در بازه زمانی بهمن‌ماه ۱۳۷۳ تا آذرماه ۱۳۷۴ (یعنی ۱۱ ماه پس از ماه پایدار) به‌صورت ماهانه واسنجی گردید. شکل ۷ دو نمونه از هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای نیمه شرقی و غربی آبخوان را پس از اتمام واسنجی شرایط ناپایدار نشان می‌دهد. مقادیر هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه بهینه در زون‌های مشخص شده در شکل ۲، در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ میزان واریانس‌های خطا را بازه زمانی که مدل مورد واسنجی قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

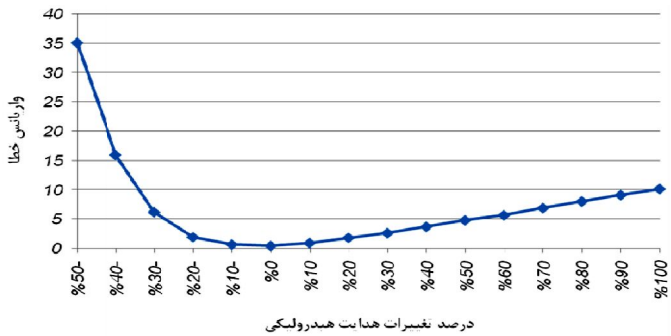
جدول ۲. مقادیر هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه بهینه

زون‌ها	پیزومترهای قرار گرفته در زون مربوطه	هدایت هیدرولیکی (m/day)	آب‌دهی ویژه
۱	p۲۵– p۲۶	۱/۲۹	۰/۰۰۹
۲	p۲۷	۳۸	۰/۲۲۸
۳	p۲۸	۱۶/۵	۰/۱۰۷۸
۴	p۲۳	۱۶/۵	۰/۰۹
۵	p۲۴	۱۳/۷	۰/۰۹
۶	p۲۹ –p۳۰	۱۶/۵	۰/۱۹۶
۷	p۳۲	۱۶/۴	۰/۱۹۶
۸	p۲	۲/۵	۰/۰۳
۹	p۴	۳۵	۰/۲
۱۰	p۳۱	۵/۲۳	۰/۰۵۵
۱۱	p۱ –p۱۱	۷/۲	۰/۰۴۵
۱۲	p۲	۹/۹۶	۰/۰۸
۱۳	p۳	۶	۰/۰۶۹
۱۴	p۵	۲۰/۱	۰/۱۵
۱۵	p۶	۳۰/۵	۰/۱۶
۱۶	p۷	۱/۴۲	۰/۰۲۵
۱۷	p۸ –p۱۰	۱۷/۴	۰/۱۰۹
۱۸	p۹ –p۲۱	۲۰/۱۳	۰/۱۵۱
۱۹	p۱۲ – p۱۳	۱۸/۸	۰/۱۲
۲۰	p۱۵–p۱۶–p۱۷–p۱۸–p۱۹–p۲۰	۸	۰/۰۷۷

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، مدل روند تغییرات سطح آب را در چاه‌ها به‌خوبی و مطابق با روند تغییرات سطح آب اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی کرده است. گرچه در بعضی موارد سطح آب شبیه‌سازی شده بالاتر و یا پایین‌تر از سطح آب اندازه‌گیری شده می‌باشد و در بعضی از چاه‌ها هر دو حالت اتفاق افتاده است. دلایل زیادی می‌تواند باعث بروز چنین حالاتی شود. از جمله دلایلی که می‌توان به آنها اشاره کرد، عبارتند از: ۱- خطا در ثبت میزان دبی منابع به خصوص در مورد چاه‌های بهره‌برداری. زیرا اگر میزان دبی در یک منطقه کمتر از میزان واقعی در مدل درنظر گرفته شود، سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل بالاتر از سطح آب واقعی خواهد شد و بالعکس. ۲- خطاها و سهل انگاری‌هایی که تکنسین‌های سازمان آب در هنگام برداشت داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای دارند.۳- خطا در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی. بروز این خطا هم تا حدی اجتناب‌ناپذیر است زیرا در روش تفاضل‌محدود که در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تمام خصوصیات و ضرایب به‌صورت شبکه‌های چهار ضلعی به مدل ارائه می‌شوند. درحالی‌که اگر امکان استفاده از روش عناصر محدود فراهم شود، در این روش می‌توان شبکه‌بندی چندوجهی را به‌کار برد که در مناطقی‌که شکل

جدول ۳. میزان واریانس‌های خطا در انتهای واسنجی شرایط ناپایدار

ردیف	زمان		واریانس خطا
	سال	ماه	
Period۱	۱۳۷۳	بهمن	۰/۳۱۷۱۷۹
Period۲	۱۳۷۳	اسفند	۰/۴۱۵۹۳۸۲
Period۳	۱۳۷۴	فروردین	۰/۲۸۸۳۸۴۲
Period۴	۱۳۷۴	اردیبهشت	۰/۶۷۶۲۸۵۳
Period۵	۱۳۷۴	خرداد	۰/۳۲۳۹۲۱۷
Period۶	۱۳۷۴	تیر	۰/۱۹۰۶۳۴۸
Period۷	۱۳۷۴	مرداد	۰/۲۳۱۱۶۸۸
Period۸	۱۳۷۴	شهریور	۰/۴۱۵۶۹۵۱
Period۹	۱۳۷۴	مهر	۰/۳۷۳۵۰۸۲
Period۱۰	۱۳۷۴	آبان	۰/۶۹۴۶۳۶۴
Period۱۱	۱۳۷۴	آذر	۰/۵۶۷۳۸۶۴

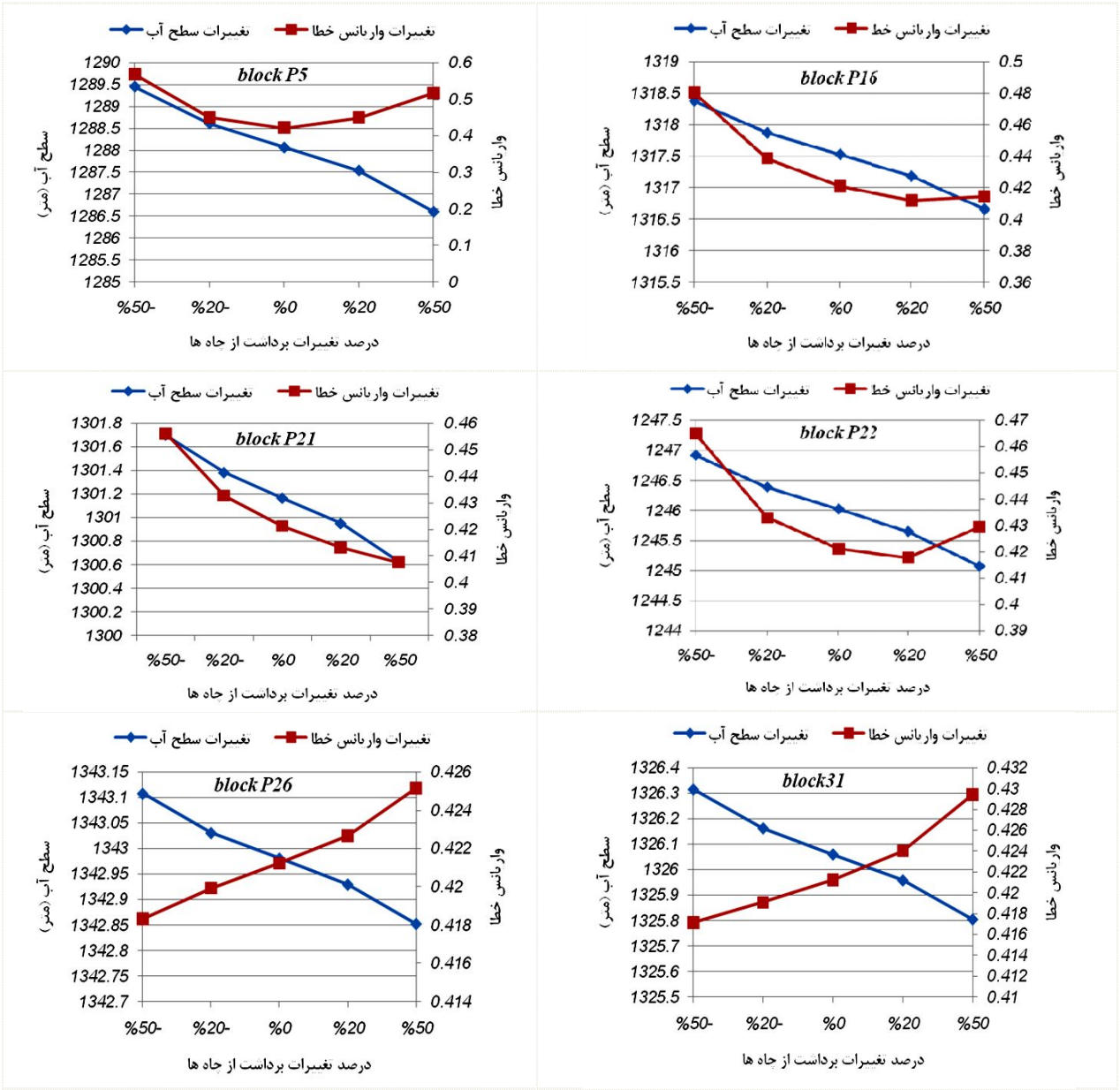


شکل ۸. آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر هدایت هیدرولیکی در کل دشت

هندسی مرزهای آنها پیچیده است دقت مدل را بالا خواهد برد. اگر ضریب هدایت هیدرولیکی در منطقه‌ای پایین‌تر از میزان واقعی تخمین زده شود، سطح آب شبیه‌سازی شده بالاتر از مقدار واقعی می‌گردد و بالعکس.

براساس ناحیه‌بندی هدایت هیدرولیکی پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار و طبق روش‌هایی که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و تخلیه چاه‌های بهره‌برداری مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت. شکل ۸ بیان‌گر روند تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل واریانس خطا است و نشان می‌دهد که مدل کمترین واریانس خطا را در مقادیر هدایت هیدرولیکی بهینه شده برای آبخوان دارد. واریانس خطا همراه با افزایش هدایت هیدرولیکی تا صفر درصد کاهش و سپس از صفر تا ۱۰۰ درصد افزایش هدایت هیدرولیکی، واریانس افزایش می‌یابد. در مرحله بعد نمودار درصد تغییرات میزان تخلیه از چاه‌ها در بلوک مورد مطالعه در مقابل واریانس خطا و سطح آب ترسیم گردید (شکل۹).

در کلیه بلوک‌ها، با افزایش میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری قرارگرفته در هر بلوک سطح آب پایین افتاده است. در بلوک‌های ۲۲ و ۱۶ (قرار گرفته در شرق آبخوان) با افزایش میزان برداشت واریانس خطا کاهش یافته است ولیکن در



شکل۹. بررسی آنالیز حساسیت بلوک‌های انتخاب شده در برابر تخلیه چاه‌های بهره‌برداری

بلوک‌های ۲۶ و ۳۱ با افزایش برداشت واریانس خطا نیز افزایش داشته است. در بلوک‌های ۵ (مجاور رودخانه) و ۲۲ (خروجی دشت) با افزایش برداشت واریانس خطا در ابتدا تا تغییرات صفر درصد که در آن حداقل واریانس رخ می‌دهد کاهش، و در ادامه با افزایش برداشت واریانس نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی امکان استخراج مقادیر تغذیه آبخوان از مدل هیدرولوژیکی SWAT به طریقی است که برخلاف تحقیقات اخیرکه جهت سهولت، مرز آبخوان را برای هر دو مدل SWAT و MODFLOW درنظر گرفته‌اند، در مدل SWAT مرز حوضه و در مدل MODFLOW مرز آبخوان معرفی شوند و در نهایت این مقادیر استخراج شده در مدل MODFLOW

جهت شبیه‌سازی آبخوان حوضه مورد استفاده قرار گیرند. استخراج مقادیر تغذیه آبخوان با موفقیت انجام شد و با این کار علاوه‌بر این‌که عوامل مؤثر بر تغذیه مانند کاربری اراضی، خاک درنظر گرفته شدند از حجم عملیات واسنجی مدل آب زیرزمینی آبخوان کاسته شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل آب زیرزمینی قابل‌قبول بوده و مدل تهیه شده سطح آب زیرزمینی آبخوان فیروزآباد را به‌خوبی شبیه‌سازی نمود که مؤید این نکته است که استفاده از مقادیر تغذیه مدل SWAT موفقیت‌آمیز بوده است. حساسیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصله بیان‌گر آن بود که مدل به هر دو پارامتر حساس بوده ولیکن درجه حساسیت آن به هدایت هیدرولیکی نسبت به تخلیه از چاه‌ها بیشتر می‌باشد. پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان نیز بهینه گردید که می‌تواند برای مطالعات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

۱. پولادیان، ع. ۱۳۸۶. گزارش توجیهی پیشنهاد تمدید ممنوعیت منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی فیروزآباد، معاونت مطالعات پایه منابع آب، مدیریت آب‌های زیرزمینی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس.

۲. سازمان آب منطقه‌ای فارس. ۱۳۷۷. گزارش بیلان آب و امکانات بهره‌برداری منابع آب دشت نمونه فیروزآباد، معاونت مطالعات پایه منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس.

۳. معاونت مطالعات سازمان مدیریت آب‌های زیرزمینی. ۱۳۷۸. گزارش آماری چاه‌های دشت فیروزآباد سال ۱۳۷۳، وزارت نیرو، سازمان آب منطقه‌ای فارس- بوشهر- کهکیلویه و بویراحمد.

۴. معاونت مطالعات منابع آب مدیریت آب‌های زیرزمینی ناحیه مطالعات جنوب فارس (فیروزآباد). ۱۳۷۷. گزارش آماری چشمه‌ها و قنوات انتخابی تعدادی از دشت‌های ناحیه مطالعات جنوب استان فارس.

۵. مهندسان مشاور آب نیرو. ۱۳۸۵. گزارش عملیات حفاری و آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی آبرفتی دشت فیروزآباد در سال ۸۵-۸۴، مطالعات آب زیرزمینی دشت فیروزآباد، شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس.

6. Bradley, C. 1996. Transient modeling of water-table variation in floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire. J. Hydrol. 185: 87-114.

7. Chiang, W. H. and W. Kinzelbach. 1998. Processing Modflow: A Simulation System For Modeling Groundwater Flow and Pollution PP. 79-109.

8. Chung, I. M., N. W. Kim, J. Lee and M. Sophocleous. 2010. Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. Hydrogeology. J. 18: 1253-1264.

9. Jiao, J. J and D. N. Lerner. 1996. Using sensitivity analysis to assist parameter zonation in groundwater flow model. J. Am. Water Resour. Association 32(1): 75-78.

10. Johannes, H. A. 2004. Modeling of water balances in the Rio Turbio aquifer, Mexico. Master degree Thesis, Wagenin Gen University, Mexico.

11. Kim, N. W., I. M. Chung, Y. S. Won and J. G. Arnold. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Hydrol. J. 356: 1-16.

12. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R Willams. 2005. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 494 p.

13. Reeve, A. S., J. Warzocha, P. H. Glaser and D. I. Siegel. 2001. Regional groundwater flow modeling of Glacial Lake Agassiz Peatlands, Minnesota. J. Hydrol. 243: 91-100.

14. Samani, Z., J. Gracia and A. Benito. 1995. Calibration and Validation of a groundwater model for New Mexico. Proceeding of international symposium on groundwater. TX. USA. ASCE, New York, NY, US. PP:89-94.

15. Todd, D. K and L. W. Mays. 2005. Groundwater Hydrology, Third Edition, PP. 413-448. *In:* John Willey & Sons (Ed).