



Water Resources Interaction Modeling Using Satellite Images and GIS Techniques

G.R. Bahreini¹ and H.R. Safavi²

Abstract

Surface and ground water interaction modeling has always been one of the basic concerns in water resources management. Such interaction is usually considered as an internal boundary condition in modeling and exact state of the components would be determined throughout the simulation process. This will need sets of accurate data which confirms the use of assistant tools such as the satellite images and the Geographical Information System (GIS). In this research, the interaction of the Najafabad aquifer and the Zayandehrud river passing through has been modeled. A conjunctive model have been developed by modifying the watershed and aquifer limits using geological maps and DEM Sheets of the region as well as statistical analysis of related data. By using satellite images and GIS technique, in addition to the improvement of the model capabilities a data base for further studies has been established. Model outcomes in both steady and unsteady states proved the basic and important role of the river, recharging the neighboring area. River bed thickness was determined as an average for the 36 km river branch as one of the basic elements of the process. Mass exchanges were also defined separately at the end of each calculation steps as well as in average during each stress period.

Keywords: Conjunctive modeling, Surface water, Geographical Information System, Groundwater, Najafabad Aquifer, Mass balance.

شبیه‌سازی اندرکنش منابع آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)

غلامرضا بحرینی^۱ و حمیدرضا صفوی^۲

چکیده

مدل‌سازی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی همواره در بیلابندی منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. این اندرکنش معمولاً به عنوان یک شرط مرزی داخلی در مدل‌سازی آبهای زیرزمینی در نظر گرفته شده و وضعیت دقیق اندرکنش منابع بر یکدیگر در خلال فرآیند مدل‌سازی مشخص می‌گردد. جهت مدل‌سازی دقیق تلفیقی این دو منبع نیاز به حجم داده‌های زیادی است که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی را به عنوان ابزار کمکی لازم می‌نماید. در این تحقیق، شبیه‌سازی آبخوان دشت نجف‌آباد و رودخانه زاینده‌رود در گذر از آن مد نظر قرار گرفته است. ضمن تدقیق مرزهای حوضه آبریز و آبخوان با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه‌های DEM^۱ منطقه و تحلیل و پردازش‌های آماری مورد نیاز بر روی داده‌های مربوط به حوضه، مدل شبیه‌سازی تلفیقی جهت محدوده مورد نظر ارائه گردید. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) افزایش قابلیت‌های مدل در شبیه‌سازی دقیقتر آبخوان و ایجاد پایگاه داده‌های مورد نیاز جهت تحلیل‌های گسترده‌تر، مد نظر قرار گرفت. نتایج حاصل از خروجی مدل اندرکنشی واسنجی شده در حالت‌های ماندگار و ناماندگار بیانگر نقش اساسی و اهمیت رودخانه زاینده‌رود در گذر از روی آبخوان و نیز آب برگشتی از سیستم‌های آبیاری در تغذیه سفره آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. میزان پارامتر ضخامت بستر که از فاکتورهای اساسی در فرآیند مدل‌سازی تلفیقی می‌باشد نیز به صورت متوسط در طول بازه ۳۶ کیلومتری عبور رودخانه از روی آبخوان تعیین و ارائه گردید. همچنین میزان تبادلات جرمی در هر یک از گام‌های زمانی محاسباتی و نیز متوسط هر یک از دوره‌های تنش به صورت مجزا در قالب ورودی‌ها و خروجی‌های حوضه تعیین و محاسبه گردید.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی تلفیقی، آبهای سطحی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، آبهای زیرزمینی، آبخوان نجف‌آباد، توازن جرمی.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۹ آذر ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۳ مرداد ۱۳۸۷

1- M.Sc., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

امروزه مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن آنالیز همزمان سیستم‌های آبی، اعم از سطحی و زیرزمینی و بررسی اثرات متقابل این منابع بر یکدیگر که از آن به نام مدیریت تلفیقی^۲ منابع آب یاد می‌شود، به عنوان روش مناسب و کار آمد مدیریتی در زمینه شناخت و برنامه‌ریزی هیدروسیستم‌ها مطرح می‌باشد. در بررسی عملکرد سیستم‌ها همچنین توجه به این نکته ضروری است که بخش عمده‌ای از داده‌های موجود به خصوص در مبحث منابع آب، از نوع استوکستیک و غیرقطعی بوده و قطعاً مدل‌سازی کامل اینگونه پدیده‌ها را با دشواری‌های خاص خود مواجه می‌سازد.

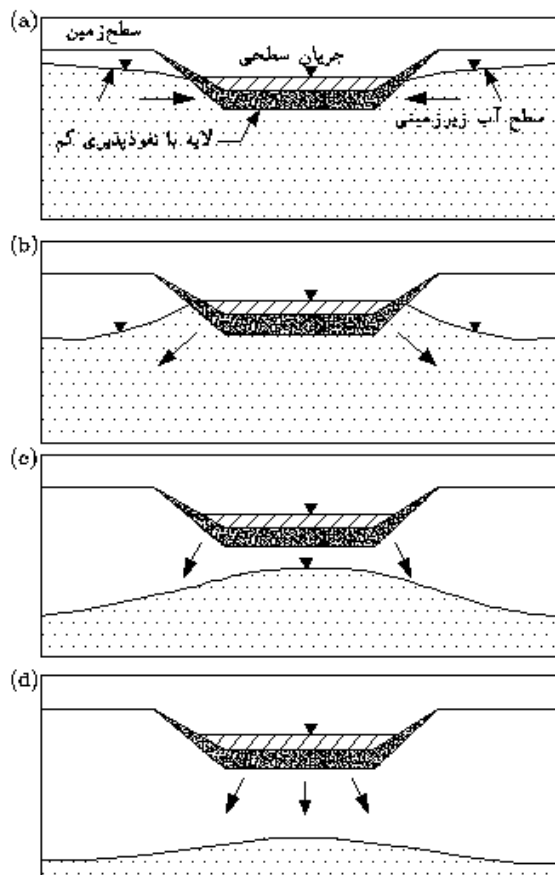
اصولاً مبحث مطالعات تلفیقی در زمینه منابع آب را به چهار دوره می‌توان به صورت کلی تقسیم‌بندی نمود. در دوره اول که مربوط به اوایل دهه ۱۹۶۰ و قبل از آن می‌شود، کل مسأله به عنوان یک الگوی توصیفی در نظر گرفته شده و از اندرکنش‌های بین این دو منبع (سطحی و زیرزمینی) نیز صرف نظر می‌گردید. مرحله دوم که توسعه دوره اول محسوب می‌گردد، با تعریف الگوی توصیفی از جریان بین آبهای سطحی و زیرزمینی توسط معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی آغاز گردید و تا اوایل دهه ۱۹۷۰ نیز ادامه یافت، جنبه‌های فنی و اقتصادی نیز بعضاً در مطالعات مذکور مد نظر قرار می‌گرفت که از آن جمله می‌توان به کارهای (Bittinger 1965) اشاره نمود. مرحله سوم که در واقع تحولی در بررسی اینگونه مسایل محسوب می‌گردد در خلال دهه ۱۹۷۰ تبیین و توسعه داده شد. در این مرحله از کار، توابع جبری تکنولوژیکی^۳ پیشنهاد گردید که حجم پمپاژ چاهها و افت چاههای مجموعه را به یکدیگر مرتبط می‌ساخت. (Maddock 1974) کار خود را با تعریف یک مجموعه چندتایی از چاهها و آبهای سطحی و زیرزمینی توسعه داد. این کار توسط (Morel-Seytoux and Daly 1975) به صورت تعریف و تولید ضرایب تأثیر^۴ (پاسخ) گسترش داده شد. متعاقباً روشهای جدیدی توسط گروه کاری (Morel-Seytoux and Illangaskare 1986) به کار گرفته شد. اما با توجه به اینکه این الگوها برای شرایط خاص تهیه و تطبیق داده می‌شد، محدودیتهایی برای استفاده از آن در سایر بخشها وجود داشت. با شروع دوره چهارم از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون، بیشتر الگوهای توسعه مدل مرحله سوم، وارد مباحث مدیریتی شده و در حین ارائه روشهای نوین در تعریف و تبیین شرایط مدل، روشهای حل معادلات و برنامه‌های محاسباتی مرتبط، مد نظر قرار گرفت. از جمله کسانی که مطالعات ویژه‌ای در این خصوص ارائه نموده‌اند می‌توان به کارهای (Morel-Seytoux and Illangaskare 1986) و (Hantush and Marino 1989) اشاره

نمود، که مورد اول در خصوص ارائه یک روش کرنل گسسته برای مدیریت تلفیقی سیستم روخانه- آبخوان براساس حل تابع گرین معادلات دیفرانسیل پاره‌ای سیستم و مورد دوم ارائه مدل آب زیرزمینی به صورت استوکستیک و توزیع پارامترهای غیرقطعی در آبخوان را مد نظر قرار داده بودند. (Nishikawa 1998) یک مدل شبیه‌سازی-بهبینه‌سازی برای مدیریت منابع آب در شهر سانتا باربارا ارائه نمود و آنرا با شبیه‌سازی آب مورد نیاز با یک برنامه‌ریزی خطی مرتبط نمود (Ramireddygary 2000). مدل شبیه‌سازی را در مورد بخشی از حوضه ایالت کانزاس ارائه نمود که تأثیر ساختار آبخوان و آبیاری کشاورزی را بر جریان مدل‌سازی شده مورد بررسی قرار می‌داد. مطالعات جدید با استفاده از مبانی و کاربردهای سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و امکان استفاده از آن در مطالعات تلفیقی منابع آب نیز امروزه گسترش زیادی یافته است. از آن جمله می‌توان به کارهای (Ruud et al. 1999) اشاره نمود. هدف مطالعه ایشان ارائه مدل شبیه‌سازی تلفیقی بود که تغییرات ذخیره آبهای زیرزمینی در اثر پمپاژ مورد نیاز به منظور تامین آب کشاورزی مازاد بر آب در دسترس سطحی را پیش بینی نماید. در این مطالعه سه زیر مدل شامل الف- مدل منبع آب سطحی به منظور محاسبه نشت از رودخانه به آبخوان، ب- مدل آب و هوا در ناحیه غیراشباع، به منظور محاسبه میزان نفوذ بارندگی، آبیاری و تغذیه به آبخوان و ج- مدل آبهای زیرزمینی به منظور محاسبه تغییرات طولانی مدت در ذخیره آبخوان با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به یکدیگر متصل گردیده بودند. همچنین مطالعه و ارائه مدل نیاز آبی منطقه بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی توسط (Satti and Jacobs 2004) انجام پذیرفت. در این مطالعه ارائه مدل شبیه‌سازی نیاز آبی کشاورزان منطقه و نتایج حاصل در بررسی الگوی کشت منطقه مورد نظر در بخشی از ایالت فلوریدا مورد بررسی قرار گرفت.

در خصوص مطالعات تلفیقی انجام شده در حوضه زاینده‌رود نیز می‌توان به مطالعات شبیه‌سازی بهره‌برداری هماهنگ آبهای سطحی و زیرزمینی در زیرحوضه زاینده‌رود توسط سامانی مجد (۱۳۷۹) اشاره نمود. همچنین صفوی (۱۳۸۳) مدل شبیه‌سازی تلفیقی کمی-کیفی آبهای سطحی و زیرزمینی را با پارامترهای قطعی ارائه نمود.

در مدل‌های شبیه‌سازی با مقیاس بزرگ با توجه به تنوع و پراکندگی کمی و کیفی داده‌ها، اصولاً ایجاد پایگاه مناسب داده که قابلیت مدیریت و تحلیل اطلاعات موجود را فراهم آورد، از اهمیت فوق‌العاده‌ای در فرآیند مدل‌سازی برخوردار است. بدین لحاظ استفاده از تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزار کمکی در هر دو بخش ورودی و خروجی مدل ارائه شده در این تحقیق مد نظر

هر چند در مدل‌سازی فرض می‌گردد کل افت بار هیدرولیکی در عبور جریان از یک لایه مشخص از بستر رودخانه رخ می‌دهد، لیکن عموماً چنین لایه مشخصی در نمونه واقعی موجود نیست یا افت بارها تنها محدود به این لایه نمی‌شود. با این حال با فرض محدود شدن افت به لایه بستر و نیز عدم وجود افت بار قابل توجه بین کف لایه بستر و گره زیرین متناظر در آبخوان و نیز عدم کاهش تراز سطح آب از کف لایه بستر، جریان بین رودخانه و گره i, j, k را می‌توان براساس معادلات زیر بیان نمود:



شکل ۱- حالت‌های مختلف اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی به لحاظ ارتباط هیدرولیکی (Peterson & Wilson, 1988)

$$QRIV = CRIV * (HRIV - h_{i,j,k}) \quad \text{و} \quad h_{i,j,k} > RBOT \quad (1)$$

$$QRIV = CRIV * (HRIV - RBOT) \quad \text{و} \quad h_{i,j,k} \leq RBOT \quad (2)$$

در این روابط $CRIV$ هدایت‌پذیری هیدرولیکی^۶ لایه ارتباطی رودخانه-آبخوان، $HRIV$ هدایت‌پذیری در رودخانه و $h_{i,j,k}$ هدایت‌پذیری در گره متناظر سلول زیرین در این بازه از رودخانه است. مقدار $QRIV$ نیز دبی تعادل بین رودخانه و آبخوان بوده که در جهت

قرار گرفته است. با ایجاد یک ارتباط دو سویه بین مدل اصلی شبیه‌ساز حوضه و مدل جغرافیایی آن، همچنین امکان ایجاد تغییرات ساختاری در مدل و افزایش کمی یا کیفی داده‌های اطلاعاتی به مرور زمان و تدقیق مدل شبیه‌ساز در هر مرحله فراهم آمده است. لذا در این تحقیق مدل‌سازی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در یک هیدروسیستم نسبتاً پیچیده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است.

۲- مفاهیم پایه و معاملات حاکم

در مقیاس بزرگ همانند حوضه‌های آبریز، اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط سه عامل عمده کنترل می‌گردد (Woessner, 2000):

- ۱- توزیع و مقدار هدایت هیدرولیکی در مجاورت آب‌های سطحی و رسوبات آبرفتی مجاور
- ۲- ارتباط و تفاوت نسبی تراز هیدرولیکی در جریان آب سطحی و آبخوان مجاور
- ۳- هندسه و موقعیت منبع آب سطحی در صفحه آبرفتی آبخوان مورد نظر

شکل شماره ۱، حالت‌های مختلف ارتباط هیدرولیکی آب سطحی در مجاورت آبخوان را نشان می‌دهد. در حالت اول سیستم آب سطحی و آبخوان به یکدیگر متصل^۵ و آبخوان تغذیه کننده جریان سطحی است. در حالت دوم باز هم سیستم متصل، لیکن آبخوان تغذیه شونده تلقی می‌گردد. حالت سوم سیستم غیرمتصل با تراز آب زیرزمینی در عمق کم و حالت چهارم نیز سیستم غیرمتصل با سطح تراز آب زیرزمینی در عمق زیاد را نشان می‌دهد.

همچنین (Bouwer and Maddock, 1997) شرح داده‌اند که از یک عمق معین پایین آوردن بیشتر سطح آب زیرزمینی تأثیری در میزان نشست نخواهد داشت. در چنین عمقی که اغلب به خصوصیات خاک و تراز آب موجود در کانال ارتباط دارد، آبخوان را می‌توان به لحاظ هیدرولیکی جدا از جریان سطحی در نظر گرفت.

اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در مکان‌هایی که ضخامت ناحیه غیراشباع در مقایسه با ناحیه کلی مجاور، کم تا ناچیز است در ابتدا شروع و گسترش یافته و سپس به صورت جانبی در مناطق دیگر که این ناحیه ضخیم‌تر می‌باشد نیز توسعه می‌یابد (Winter, 1999).

ورود به آبخوان مثبت اختیار می‌شود. روابط فوق به صورت نمودار شکل ۲ مشخص می‌گردد. براین اساس مشاهده می‌گردد که جریان با کاهش $h_{i,j,k}$ به صورت خطی افزایش می‌یابد تا زمانی که به حد RBOT (تراز کف لایه ضخامت بستر) تنزل یابد و پس از آن ثابت باقی می‌ماند.

با تعریف شرایط اولیه، شرایط مرزی، نرخهای تغذیه و تخلیه در دوره‌های زمانی و گامهای مکانی معادلات فوق به روش تفاضلات محدود حل و خروجی مورد نظر در هر گره محاسبه می‌گردد.

۳- استفاده از تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تصاویر ماهواره‌ای

مسائل تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی در مقیاسهای بزرگ همواره با حجم زیادی از داده‌های مکانی روبروست که با روشهای معمول عمدتاً نیاز به ساده‌سازی و کاهش حجم داده‌ها را دارد. با کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و نیز سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌توان تمامی داده‌های مورد نیاز را به صورت مکانی با دقت مورد نظر در فرآیند مدل‌سازی لحاظ نمود. در این تحقیق به طور مؤثری از این تکنیک در بخشهای مختلف ارائه مدل شبیه‌ساز و تحلیل نتایج خروجی آن بهره‌برداری شده است. به منظور ایجاد یک پایگاه قابل مدیریت، بازیابی و تکمیل داده‌ها، کلیه داده‌های ورودی مدل از جمله شرایط مرزی مختلف، خواص سلولی از قبیل پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، تغذیه و تخلیه، مقادیر مشاهداتی چاههای پیزومتریک و سایر داده‌های مدل در قالب نقشه‌های GIS تکمیل و به عنوان ورودی به مدل اعمال گردیده‌اند. همچنین بخش عمده‌ای از اصلاحات و بازنگریهای مورد نیاز در مرحله تدوین و تصحیح مدل، تدقیق مرزها، تغییرات ساختارهای تعریف شده در مدل و بازنگری مورد نیاز در مقادیر براساس اجرای آزمایشی مدل شبیه‌ساز در این مرحله توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شده، مدیریت و اعمال گردید. همچنین در مطالعه موردی انجام شده به طور مؤثری از تصاویر ماهواره‌ای حوضه جهت تعیین سطوح زیرکشت، نوع کشت، مرزهای دقیق حوضه، مرزهای نفوذناپذیر، شبکه‌های آبیاری و به ویژه مسیر واقعی و دقیق عبور رودخانه از حوضه استفاده گردید. تصاویر اخذ شده از ماهواره‌های سری IRS هندوستان با سنجنده‌های چند طیفی LISS III و پانکروماتیک به علاوه در ثبت و زمین مرجع نمودن داده‌های اخذ شده و امکان بهره‌برداری مناسب تر داده‌ها، مد نظر قرار گرفته‌اند.

۴- مطالعه موردی

محدوده مورد نظر، زیرحوضه آبریز نجف‌آباد و آبخوان مربوطه است که بخشی از حوضه بزرگ آبریز رودخانه زاینده‌رود با وسعتی در حدود ۴۰۰ و دو هزار کیلومترمربع در فلات مرکزی ایران را شامل می‌گردد. محدوده مذکور به لحاظ جغرافیایی بین مدارهای ۵۷° تا ۵۰° ۳۲' ۲۶" تا ۴۹' ۲۱" طول شرقی و مدارهای ۱۳° ۲۰' تا ۳۲' ۳۲" عرض شمالی واقع شده است. شکل ۳ موقعیت محدوده موردنظر را

موارد فوق که اساس مدل شبیه‌سازی تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی را تشکیل می‌دهد، براین فرض استوار است که اندرکنش رودخانه با آبخوان به موقعیت بازه رودخانه در سلول بستگی ندارد. ضمناً سطح آب رودخانه در طول این بازه، یکنواخت و در هر دوره تنش ثابت است، به این معنا که شرایط جریان در رودخانه در طول دوره تنش تغییرات مهمی نداشته و به حالت‌های کاملاً خشک یا سرریزی نمی‌رسد.

مقدار CRIV برحسب پارامترهای K ضریب هدایت هیدرولیکی، W, L به ترتیب طول و عرض ناحیه تماس و M ضخامت بستر براساس رابطه زیر معرفی می‌گردد:

$$CRIV = \frac{KLW}{M} \quad (3)$$

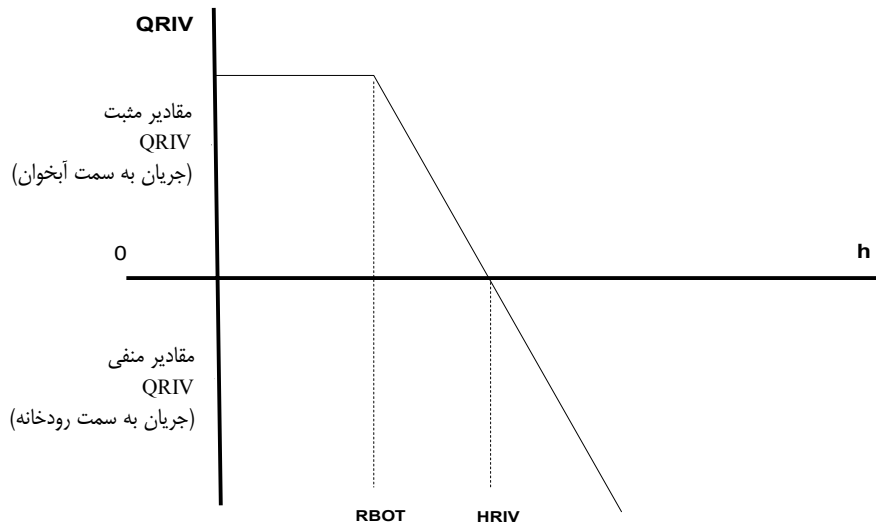
در رابطه فوق، پارامتر ضخامت بستر (M) می‌تواند، عامل کالیبراسیون مدل‌های اندرکنش تلقی گردد.

همچنین معادله کلی جریان در محیط متخلخل غیرهمگن در شرایط غیردائمی به صورت سه بعدی و نیز نرخ تبادلات جرمی بین رودخانه و آبخوان که در تماس هیدرولیکی با یکدیگرند، توسط معادلات زیر بیان می‌گردند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q_r - Q_p \quad (4)$$

$$q = \begin{cases} -k_r w_r \frac{h_r - h_g}{m_r} & h_g > (z_r - m_r) \\ -k_r w_r \frac{h_r - (z_r - m_r)}{m_r} & h_g \leq (z_r - m_r) \end{cases} \quad (5)$$

که در این روابط k_x, k_y, k_z ضرایب هدایت هیدرولیکی در راستاهای x, y, z و h هد هیدرولیکی، S_s ضریب ذخیره ویژه، Q_r و Q_p نرخ برداشت و تغذیه، q جریان تبدالی بین رودخانه و آبخوان، k_r هدایت هیدرولیکی رسوبات کف رودخانه، W_r محیط خیس شده بستر، m_r ضخامت بستر، h_r تراز سطح آب رودخانه و h تراز سطح ایستابی آبخوان است.



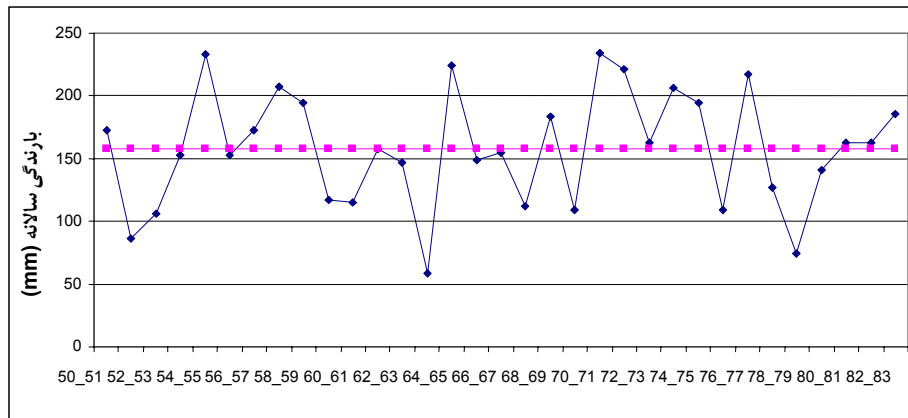
شکل ۲- نمودار دبی تعادلی (QRIV) بر حسب بار هیدرولیکی (h) در سلول آبخوان

به لحاظ هواشناسی و اقلیمی منطقه با وجود منابع نسبتاً غنی آبهای سطحی و زیرزمینی، جزو اقلیمهای خشک و بیابانی محسوب می‌گردد. میانگین سالانه بارش در سطح حوضه ۱۵۸ میلی‌متر و تبخیر و تعرق پتانسیل بالغ بر ۱۵۰۰ میلی‌متر محاسبه گردیده است. به منظور تعیین پارامترهای مرتبط با مدل شبیه‌ساز حوضه از میانگین نتایج دو ایستگاه هواشناسی موجود در حوضه استفاده گردیده است. شکل ۴، نمودار بارندگی سالانه حوضه آبریز در طول یک دوره ۳۰ ساله و تفکیک سالهای آبی پرباران و کم باران حوضه را نشان می‌دهد.

که براساس نقشه‌های ارائه شده آبخوان‌های کشور توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران تعیین و مشخص گردیده است، نشان می‌دهد. وسعت زیرحوضه آبریز نجف‌آباد و آبخوان آبرفتی مربوطه به ترتیب برابر ۱۷۲۰ و ۱۱۴۳ کیلومتر مربع می‌باشد. در محدوده این زیرحوضه، تنها یک لایه آزاد آبرفتی قرار گرفته و منابع آب کارستیک موجود (مربوط به نهشته‌های کرتاسه دوران دوم زمین‌شناسی) نیز از گستردگی چندانی برخوردار نمی‌باشند. حداکثر ارتفاع حوضه براساس تحلیل‌های انجام شده بر روی حوضه مطابق نقشه‌های DEM اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور به ترتیب برابر ۱۵۷۹ و ۲۹۴۲ متر و شیب عمومی حوضه از غرب به شرق و شمال شرق می‌باشد.



شکل ۳- محدوده مرزهای زیرحوضه آبریز نجف‌آباد و آبخوان آن



شکل ۴- نمودار متوسط بارندگی سالانه زیر حوضه آبریز نجفآباد و تفکیک سالهای آبی پرباران و کم باران

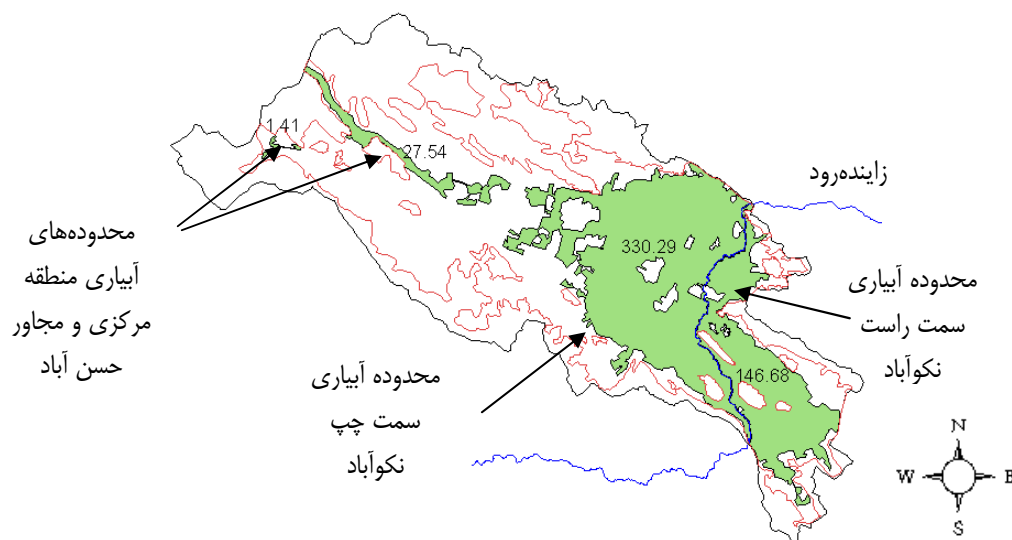
عنوان سال اجرای مدل در حالت ماندگار و سالهای آبی متوالی ۸۱- تا ۱۳۸۰ تا ۸۳-۸۲ به عنوان دوره شبیه‌سازی مدل در حالت ناماندگار تعیین گردید.

براساس آمار چاههای بهره‌برداری موجود در منطقه، نرخ برداشتهای مربوطه به عنوان نرخ تخلیه در سلول‌های مدل محاسبه و اعمال گردید. همچنین نرخ تغذیه سالانه براساس آمار شبکه‌های آبیاری، آمار بارندگی سالانه حوضه و محاسبه رواناب ارتفاعات به نحو مناسبی در سلول‌های مدل توزیع گردید.

ضمن اعمال شرایط مرزی رودخانه در سلول‌های مربوطه، شرایط مرزی در محل ارتباط آبخوان با آبخوان‌های مجاور نیز براساس داده‌های آماری موجود و تحلیل آن در مدل اعمال گردید.

مهمترین منبع آب سطحی منطقه، رودخانه زاینده‌رود می‌باشد که به طول ۳۶ کیلومتر از آن عبور می‌نماید. سیستم‌های آبیاری مدرن از سال ۱۳۴۹ با تکمیل سد زاینده‌رود و احداث بند انحرافی نکوآباد به منظور تنظیم آب شبکه‌های آبیاری واقع در ساحل چپ و راست رودخانه، جایگزین سیستم‌های سنتی آبیاری گردیده و توسعه یافته‌اند. شکل ۵ موقعیت و محدوده حوضه آبریز و آبخوان مورد مطالعه و سطوح آبیاری سمت راست و چپ نکوآباد و همچنین سایر سطوح زیرکشت موجود در منطقه را که براساس آنالیز و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای در سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین گردیده است نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی تلفیقی در این زیرحوضه در دو حالت ماندگار و ناماندگار به صورت جداگانه اجرا و واسنجی گردید. سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ به



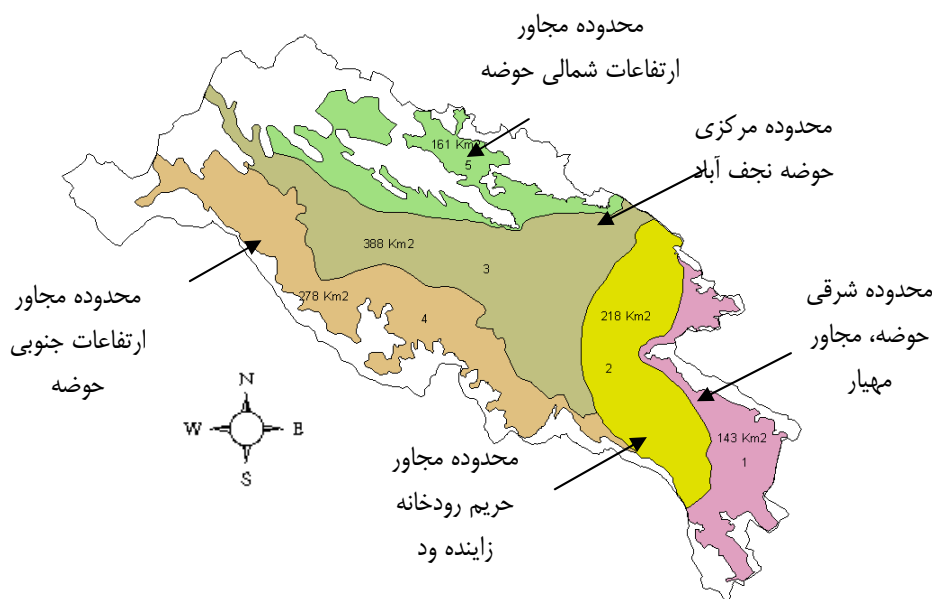
شکل ۵- محدوده زیرحوضه آبریز و آبخوان نجفآباد و محدوده و مقادیر سطوح زیرکشت موجود در منطقه براساس آنالیز تصاویر ماهواره‌ای (مساحت‌ها بر حسب کیلومتر مربع)

شکل شماره ۶ محدوده‌های مشخص شده جهت تعیین پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در سطح حوضه را نشان می‌دهد. براین اساس پنج ناحیه بر مبنای تحلیل نقشه‌های زمین‌شناسی و لوگ چاههای اکتشافی موجود در منطقه مورد نظر و مقادیر مربوط به هر بخش، در مرحله واسنجی مورد تدقیق و محاسبه مجدد قرار گرفت.

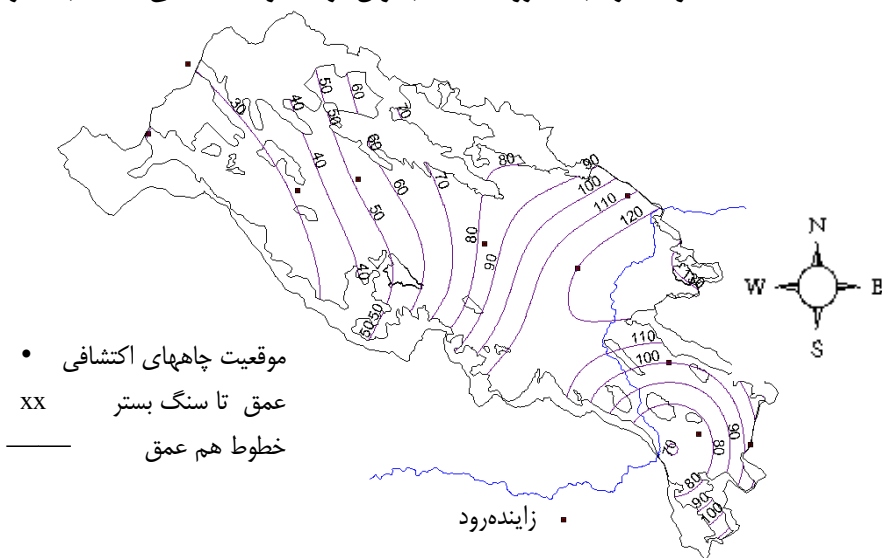
شکل ۷ به منظور تعیین و اعمال رقوم سطح و کف آبخوان، از تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده گردید. نقشه‌های DEM حوضه پس از تفسیر و ثبت داده‌ها به نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس

شکل شماره ۶ محدوده‌های مشخص شده جهت تعیین پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در سطح حوضه را نشان می‌دهد. براین اساس پنج ناحیه بر مبنای تحلیل نقشه‌های زمین‌شناسی و لوگ چاههای اکتشافی موجود در منطقه مورد نظر و مقادیر مربوط به هر بخش، در مرحله واسنجی مورد تدقیق و محاسبه مجدد قرار گرفت.

شکل ۷ به منظور تعیین و اعمال رقوم سطح و کف آبخوان، از تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده گردید. نقشه‌های DEM حوضه پس از تفسیر و ثبت داده‌ها به نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس



شکل ۶- محدوده ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در محدوده مطالعاتی مدل شبیه‌ساز



شکل ۷- خطوط تراز هم ضخامت ابرفت و موقعیت چاههای اکتشافی در آبخوان نجف‌آباد

مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده گردید. اطلاعات حاصل از برداشت‌های ماهانه منابع آب زیرزمینی در قالب جداول اطلاعاتی به انضمام محل دقیق چاهها براساس مختصات UTM در قالب لایه اطلاعاتی در سیستم GIS تعریف و به مدل اعمال گردید.

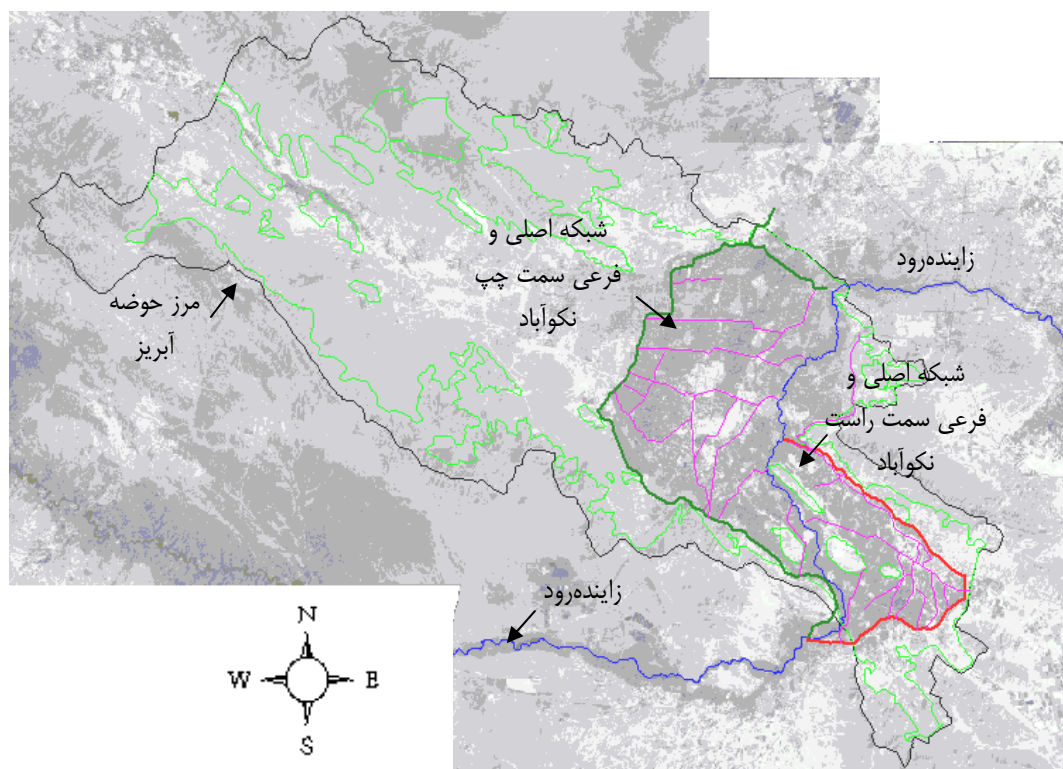
۴-۱- مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی

انتخاب مدل مناسب جهت شبیه‌سازی سیستم‌های تلفیقی منابع آب به طور ویژه بستگی به محدودیت‌های موجود و اهداف مورد نظر از خروجی هیدروسیستم دارد. مدل استفاده شده در این تحقیق، ویرایش چهارم Groundwater Vistas می‌باشد که در سال ۲۰۰۴ توسط مؤسسه ESI^۲ توسعه یافته است. مدل مذکور بر پایه تلفیقی از مدل‌های نظیر MODFLOW، MT3DMS و MODPATH در قالب یک محیط جدید نرم‌افزاری طراحی و ارائه گردیده است. در این مدل معادلات جریان آبهای زیرزمینی در حالت سه بعدی و به روش تفاضلات محدود حل و پاسخها ارائه می‌گردند. از خصوصیات مؤثر این مدل که در انتخاب آن به عنوان گزینه اصلی در این تحقیق مؤثر بوده است، قابلیت تلفیق مناسب آن با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و ارتباط دو سویه مناسبی است که در جهت ورود و خروج داده‌ها و نتایج با فرمت‌های مورد نظر ارائه می‌نماید.

موقعیت دقیق رودخانه و سلول‌های مرتبط با آن در مدل، موقعیت دقیق شبکه‌های اصلی و فرعی آبیاری سمت چپ و راست نکوآباد، تطبیق عوارض داخلی و مرزهای فاقد جریان^۳، اطراف حوضه و نیز مناطق ارتباطی با آبخوان‌های مجاور و سطوح تحت کشت منطقه براساس آنالیز دقیق تصاویر ماهواره‌ای حوضه تعیین و ارائه گردید. شکل ۸ نمایی از تصویر ماهواره‌ای پانکروماتیک حوضه که شبکه‌های آبیاری اصلی سمت چپ و راست نکوآباد، موقعیت رودخانه و مرزهای دقیق آبخوان بر روی آن پیاده گردیده است را نشان می‌دهد.

با توجه به قدرت تفکیک بالای تصاویر پانکروماتیک ماهواره IRS به میزان ۵/۷ متر، به جز در تعیین و تفسیر سطوح تحت کشت که با توجه به نیاز به تحلیل داده‌ها از تصاویر سنجه LISS III استفاده گردید، در سایر موارد ذکر شده عموماً تصویر پانکروماتیک از قابلیت مناسبی در ایجاد لایه‌های اطلاعاتی و تغییر یا اصلاح آن در مدل شبیه‌ساز ارائه شده برخوردار بوده و مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها در زمان واسنجی مدل و تعیین پارامترهای مورد نظر و همچنین ارائه یک حدس اولیه در حالت ناماندگار برای حل مدل از یک مجموعه ۴۹ تایی از چاههای



شکل ۸- موقعیت رودخانه، شبکه‌های آبیاری و مرزهای زیرحوضه آبریز نجف آباد در تصویر ماهواره‌ای PAN

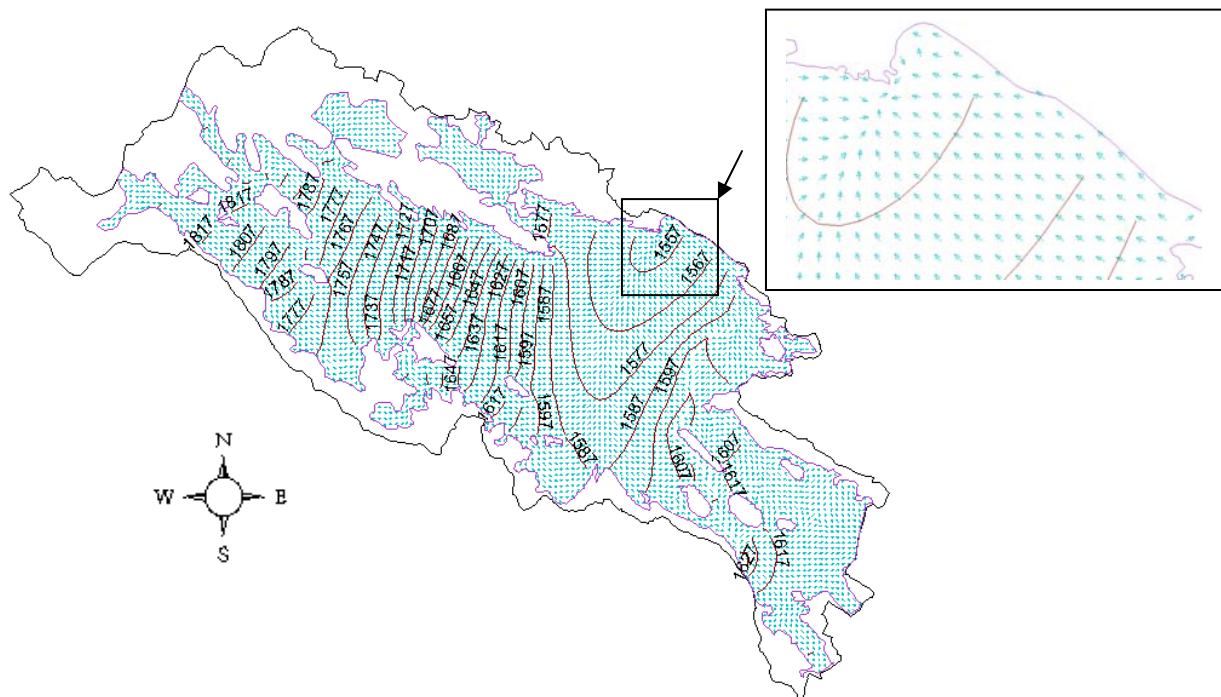
۲-۴- اجرای مدل شبیه‌ساز در حالت‌های ماندگار و ناماندگار

صورت سعی و خطا و پارامتر ضریب ذخیره به صورت خودکار در مدل واسنجی و تدقیق گردید. جدول ۱ مقادیر پارامترهای کالیبره شده نهایی مرتبط با تغذیه مدل در طول دوره شبیه‌سازی حالت ناماندگار را نشان می‌دهد.

از عوامل مهم و تاثیرگذار در کارایی مدل، تعیین مقادیر صحیح نرخ تغذیه و تخلیه می‌باشد. مقادیر تخلیه عموماً مشخص و قابل محاسبه می‌باشند در حالیکه برای تعیین مقادیر تغذیه با توجه به فقدان مقادیر قابل اندازه‌گیری نرخ نفوذ، بایستی از فرضهای منطقی و مناسب استفاده گردد. مقادیر تغذیه مدل شامل پارامترهای بارندگی، آب برگشتی حاصل از آبیاری با آب چاهها، آب برگشتی آبیاری سنگین و آب حاصل از نفوذ رواناب ارتفاعات می‌باشد. مقادیر بارش مشخص شده در جدول شماره ۱ از داده‌های جمع‌آوری و تحلیل شده ایستگاه‌های هواشناسی موجود اخذ و پس از تحلیل‌های لازم بر روی سطوح دشت و دامنه مدل، رواناب ارتفاعات نیز به صورت جداگانه در مدل اعمال گردید. مقادیر آب برگشتی سطحی نیز با استفاده از اطلاعات ورودی و خروجیهای شبکه‌های آبیاری موجود در منطقه اخذ و به مدل داده شد. مقادیر ضرایب برگشتی مشخص شده در جدول اخیر، در واقع ضرایب کالیبره شده حاصل از چندین بار اجرای مدل در حالت ناماندگار می‌باشد.

پس از تکمیل لایه‌های داده‌های اطلاعاتی در سیستم GIS و اعمال آن به مدل، ابتدا در حالت ماندگار مدل اجرا و پارامترهای خروجی تعیین گردید. براساس اصلاحاتی در مرحله واسنجی مدل از جمله بر روی میزان آب برگشتی آبیاری، آب کشاورزی، بارندگی و رواناب ارتفاعات به عنوان پارامترهای تغذیه مدل و همچنین آرایه‌های مرزی، محدوده‌های تغذیه و تخلیه مدل و نحوه توزیع آن به صورت سعی و خطا و بر روی پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت خودکار با استفاده از روش کاهش مجموع مربعات خطا، صورت پذیرفت. نهایتاً مدل کالیبره شده در این مرحله به عنوان مدل پایه در حالت ناماندگار مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفت. شکل شماره ۹ نتایج خروجی مدل شبیه‌ساز در حالت ماندگار را برای خطوط هم تراز ایستایی و بردارهای سرعت را در سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان می‌دهد.

با توجه به نیاز سیستم به تعریف شرایط اولیه در حالت ناماندگار، تراز ایستایی متوسط چاههای مشاهده‌ای در شهریورماه ۱۳۸۰ به عنوان ورودی در این حالت محاسبه و به مدل اعمال گردید. در این حالت نیز پس از اجرای مدل، در چند مرحله نسبت به واسنجی و تدقیق آن اقدام گردید. درصد آب برگشتی از آبیاری در حالت ناماندگار به



شکل ۹- خطوط هم تراز ایستابی و بردارهای سرعت مدل شبیه‌ساز در حالت ماندگار در سیستم اطلاعات جغرافیایی جدول ۱- مقادیر نهایی تغذیه مدل در طول دوره شبیه‌سازی در حالت ناماندگار (۸۳-۱۳۸۰)

ردیف	عنوان	ضریب برگشتی در حالت ناماندگار	سال آبی	مجموع بارش سالانه (mm)	حجم کل سالانه منابع (MCM)	نرخ تغذیه محاسباتی (m/day)
۱	آب برگشتی از آبیاری با آب چاهها	۰/۳۵	۸۰-۸۱	۱۶۳	۵۶۷/۳	۰/۰۰۰۹۸
			۸۱-۸۲	۱۶۲/۸	۶۶۷/۷	۰/۰۰۱۱۶
			۸۲-۸۳	۱۸۵/۷	۷۹۵/۱	۰/۰۰۱۳۷
۲	آب برگشتی از آبیاری با آبهای سطحی	۰/۳۰	۸۰-۸۱	۱۶۳	۳۶۷	۰/۰۰۰۷۱۵
			۸۱-۸۲	۱۶۲/۸	۲۲۱/۶	۰/۰۰۰۴۳
			۸۲-۸۳	۱۸۵/۷	۲۲۵/۹۸	۰/۰۰۰۴۴
۳	نفوذ بارندگی به آبخوان	۰/۳۰	۸۰-۸۱	۱۶۳	۱۸۶/۲	۰/۰۰۰۱۳۴
			۸۱-۸۲	۱۶۲/۸	۱۸۵/۹	۰/۰۰۰۱۳۴
			۸۲-۸۳	۱۸۵/۷	۲۱۲/۱	۰/۰۰۰۱۵۳
۴	نفوذ بارندگی از ارتفاعات	۰/۳۰	۸۰-۸۱	۱۶۳	۶۸/۸	۰/۰۰۰۲۹
			۸۱-۸۲	۱۶۲/۸	۸۶/۷	۰/۰۰۰۲۹
			۸۲-۸۳	۱۸۵/۷	۸۹/۹	۰/۰۰۰۳۳

$$M = \frac{K.L.W}{C} = \frac{0/74 \times 500 \times 40}{10673/76} = 1/387m \quad (۶)$$

براساس نتایج حاصل از مدل معکوس MODFLOW 2000 و اسنجی مدل، با اعمال تراز چاههای مشاهداتی به عنوان نقاط معلوم به مدل (متوسط تراز سالانه سال مینا)، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی به طور متوسط برای کل مدل برابر $۰/۷۱۹۴۲$ متر در روز معادل $۱۰^{-۶} \times ۸/۳۳$ تعیین گردید.

در مرحله دوم با ارائه ناحیه‌های پنجگانه (شکل شماره (۶)) در سیستم اطلاعات جغرافیایی و انجام مراحل مدل معکوس، مقادیر هدایت هیدرولیکی و اسنجی شده برای زونهای ۱ تا ۵ به شرح جدول ۲ تعیین گردید.

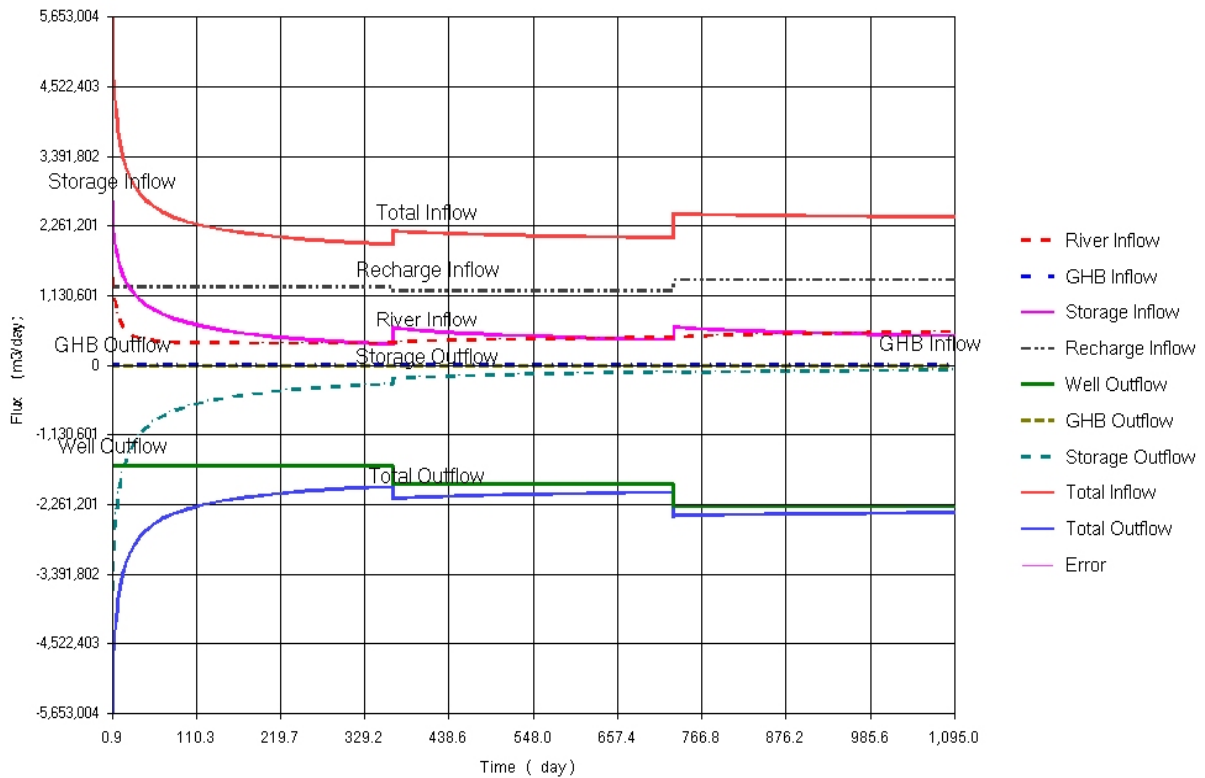
براساس نتایج حاصل از مدل و اسنجی شده در حالت ماندگار و استفاده از نتایج حاصل در خصوص پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان، در دو مرحله نسبت به اسنجی مقدار ضریب ذخیره سفره در حالت ناماندگار اقدام گردید. در مرحله اول با انتخاب ضریب ذخیره یکسان جهت کل مدل و استفاده از مدل معکوس، مقدار متوسط ضریب ذخیره برای کل محدوده آبخوان برابر $۴/۱۷\%$ محاسبه و تعیین گردید.

با لحاظ نمودن پیش فرضهای منطقی، مقادیر هر یک از ضرایب به گونه ای تعیین گردید که پاسخهای مدل کمترین تغییرات را نسبت به نتایج حاصل از داده‌های مشاهداتی ایجاد نماید. در حالت ناماندگار خروجی‌های مدل برای هر یک از پارامترهای مورد نظر در گامهای محاسباتی مسأله، تعیین گردید. از آن جمله مقادیر سطح تراز ایستابی در هر یک از سلول‌های مدل شبیه‌ساز در گامهای زمانی مختلف به صورت پایگاه داده در سیستم اطلاعات جغرافیایی مشابه آنچه در شکل ۹ ارائه گردید، قابل دسترسی می‌باشد. شکل ۱۰، نمودار توازن جرمی در حالت ناماندگار در طول دوره شبیه‌سازی مدل (سه سال) را براساس میزان نشت از رودخانه، جریان ورودی و خروجی از مرزها، پمپاژها و تغییرات ذخیره آبخوان نشان می‌دهد. مدل با استفاده از روش تفاضلات محدود و با استفاده از روابطی نظیر معادلات ۴ و ۵ در هر گام زمانی محاسباتی تعادل جرمی را محاسبه و فاکتورهای ورودی و خروجی را به تفکیک مشخص می‌نماید.

همچنین براساس و اسنجی مدل شبیه‌سازی برای پارامتر هدایت‌پذیری بستر (CRIV) و اجرای مدل معکوس، میزان تدقیق شده این پارامتر و براساس آن میزان پارامتر ضخامت بستر بر اساس رابطه (۶) به طور متوسط در بازه شبیه‌سازی شده برابر $۱/۳۸۷$ متر محاسبه گردید. این مقدار می‌تواند به عنوان تخمینی مناسب جهت پارامتر مذکور در این حوضه و حوضه‌های مشابه به عنوان پارامتر اولیه استفاده گردد.

در مرحله دوم براساس محدوده‌های انتخابی پنجگانه (شکل شماره ۶)، تغییرات ضریب ذخیره تعیین و به عنوان ورودی در مدل معکوس ناماندگار، به مدل اعمال گردید.

Mass Balance Summary for Entire Model



شکل ۱۰- تغییرات توازن جرمی در حالت ناماندگار در طول دوره شبیه‌سازی

جدول ۲- مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی محدوده‌های ۱ تا ۵ براساس نتایج واسنجی مدل در حالت ماندگار

شماره محدوده	ناحیه تحت پوشش	K(m/day)	K(m/sec)
۱	محدوده شرقی آبخوان مجاور مرز مهیار شمالی	۰/۸۸	$۱/۰۲ \times ۱۰^{-۵}$
۲	مجاور حریم رودخانه	۰/۷۳	$۸/۵ \times ۱۰^{-۶}$
۳	محدوده مرکزی آبخوان	۰/۶۱	$۷/۱ \times ۱۰^{-۶}$
۴	مجاور ارتفاعات جنوبی آبخوان	۱	$۱/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$
۵	مجاور ارتفاعات شمالی آبخوان	۱	$۱/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$

دوره‌های تنش، مقادیر فاکتورهای ورودی و خروجی مدل در قالب جدول شماره ۴ ارائه گردید. براین اساس مقادیر داده‌های ورودی و خروجی در هر یک از سالها شبیه‌سازی و برای متوسط طول دوره شبیه‌سازی مشخص و ارائه گردیده است. برای تعیین مقادیر مشخص شده در جدول شماره ۴، برای هر یک از گامهای زمانی ماهانه نتایج خروجی مدل به صورت جداگانه به همراه نرخهای مبادله

مقادیر ضریب ذخیره در مدل واسنجی شده که برای تعیین پاسخهای نهایی سیستم در حالت ناماندگار مورد تأیید قرار گرفت به شرح جدول ۳ ارائه گردیده است.

براساس محاسبه تبادلات جرمی در هر یک از گامهای زمانی محاسباتی و محاسبه متوسط داده‌های محاسباتی در طول هر یک از

بین حوضه‌ای از مرزهای مدل تعیین و متوسط مقادیر مربوط به هر پارامتر در طول دوره شبیه سازی مشخص و ارائه گردید.

جدول ۳- مقادیر ضریب ذخیره محدوده‌های ۱ تا ۵ براساس نتایج واسنجی مدل در حالت ناماندگار

شماره محدوده	مشخصات ناحیه تحت پوشش	ضریب ذخیره واسنجی شده ناحیه (%)
۱	محدوده شرقی آبخوان مجاور مرز مهیار شمالی	۴
۲	مجاور حریم رودخانه	۷
۳	محدوده مرکزی آبخوان	۷/۸
۴	مجاور ارتفاعات جنوبی آبخوان	۵
۵	مجاور ارتفاعات شمالی آبخوان	۵

همچنین مقادیر نفوذ (تغذیه و نفوذ رودخانه) با استفاده از تعادل جرمی برای کل مدل مطابق روش پیش گفته به صورت جداگانه محاسبه و ارائه گردید.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل‌سازی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های بزرگ نظیر حوضه‌های آبریز، نیاز به تجزیه و تحلیل مقادیر زیادی از داده‌های مکانی دارد که با نرم‌افزارها و تکنیک‌ها معمول دقت کافی نداشته یا به لحاظ مدیریت داده‌ها و زمان محاسباتی بسیار ناکارآمد می‌باشند. از این رو استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در اینگونه موارد اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این تحقیق، زیرحوضه نجف‌آباد که دارای هیدروسستم نسبتاً پیچیده‌ای از نظر تلفیق منابع آبی است مورد توجه قرار گرفته و کلیه اطلاعات مکانی آن از تصاویر ماهواره‌ای اخذ و بر روی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی اعمال گردیده است. نقشه‌های حدود حوضه آبریز و

آبخوان، شرایط مرزی و داخلی اعم از رودخانه، شبکه‌های آبیاری، موقعیت چاهها، پیزومترها، لوگ‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی کشاورزی بر روی سیستم مذکور پیاده‌سازی و به صورت لایه‌های اطلاعاتی ذخیره گردید. با اتصال پایگاه‌های داده تولید شده به مدل شبیه‌ساز GV4.0 و کالیبراسیون مدل در دو حالت ماندگار و ناماندگار، اندرکنش ایندو سیستم بررسی و پارامترهای نظیر ضخامت بستر، ضرایب هیدرودینامیک، تبادلات جرمی با آبخوان‌های مجاور، نشت از رودخانه به آبهای زیرزمینی، بارندگی مؤثر و درصد آب برگشتی مشخص و نشان داده شد که آب برگشتی از آبیاری از طریق شبکه‌های آبیاری نکوآباد و نشت از رودخانه بیشترین نرخ تغذیه آبخوان را دارا می‌باشد. همچنین رشد فزاینده پمپاژ از لایه آبدار براساس جدول شماره ۴ که از ۴۲۰/۲ میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۲-۸۳ به مقدار ۸۴۰/۳ میلیون مترمکعب در سال آبی ۸۳-۱۳۷۹ رسیده است، نیاز به کنترل و برنامه‌ریزی بیشتر در این خصوص را ضروری نشان می‌دهد. با توجه به وجود هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی در این حوضه، لزوم برنامه‌ریزی و مدیریت تلفیقی در بهره‌برداری از این هیدروسستم پیچیده به عنوان امری اجتناب‌ناپذیر، بیش از پیش مورد تأکید قرار می‌گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Digital Elevation Map
- 2- Conjunctive Management
- 3- Algebraic Technological Function
- 4- Influence Coefficients
- 5- Hydraulically Connected
- 6- Hydraulic Conductance
- 7- Environmental Simulation Inc.
- 8- Shape File
- 9- No Flow Boundaries

جدول ۴- مقادیر فاکتورهای ورودی و خروجی سالانه مدل براساس توازن جرمی در هر یک از دوره‌های شبیه‌سازی (واحدها بر حسب MCM)

سال آبی	حالت مدل	فاکتورهای خروجی مرزها و چاه			فاکتورهای ورودی مرزها و تغذیه		
		آبخوان اصفهان برخوار	آبخوان مهیار شمالی	خروجی چاهها	مرز لنجانان	مرز کرون	تغذیه (نفوذ) رودخانه
۷۹-۸۰	ماندگار	۱/۴۶	۵/۶۶	۴۲۰/۲	۰/۶۴	۲/۴	۲۹۴/۳
۸۰-۸۱	ناماندگار	۲/۸۴	۲/۸۱	۶۰۰/۸	۰/۴۶	۰/۷۵	۴۶۴/۲
۸۱-۸۲	ناماندگار	۲/۷۳	۳/۱	۷۰۵/۹	۰/۴۴	۰/۶۸	۴۳۹/۵
۸۲-۸۳	ناماندگار	۲/۴۸	۳	۸۴۰/۳	۰/۴۷	۰/۶۳	۵۰۵

- Resources Planning and Mgmt.*, 124 (5), pp. 252-263.
- Peterson, D. M., Wilson, J. L., (1988). "Variably saturated flow between streams and aquifers", *Tech. Completion Rep.*, New Mexico, Water Resources Research Institute, Socorro.
- Ramireddygary, S.R. (2000). "Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on stream flow and groundwater", *J. of Hydrology.*, 236, pp. 223-246.
- Rumbaugh, J.O, Rumbaugh, D.B., (2004). Guide to Using Groundwater Vistas Version 4.0, ESI Environmental Simulation Inc., 367p.
- Ruud, N.C., Naugle, A.W. and Harter, T. (1999). "A GIS-linked conjunctive use groundwater-surface water flow model for the Tule river basin, San Jaquin Valley California", *Proceeding of IAHS/IAHR Model Care99*, Zurich, Switzerland, pp. 739-744.
- Satti, S.R., Jacobs, J.M. (2004). "A GIS-based model to estimate the regionally distributed drought water demand", *Agricultural Water Management*, 66, pp. 1-13.
- Winter, T.C., (1999). "Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems", *J. of Hydrology*, 7, pp. 28-45.
- Woessner, W.W., (2000). "Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought", *Ground Water*, Vol. 38, pp. 423-429.
- سامانی مجد، ا.م. (۱۳۷۹)، "شبیه سازی بهره برداری هماهنگ از آبهای سطحی و زیرزمینی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- صفوی، ح.ر، (۱۳۸۳)، "مدل شبیه سازی تلفیقی کمی - کیفی آبهای سطحی و زیرزمینی"، پایان نامه دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- Bittinger, M.W., (1965). "Stream-aquifer analysis", *J. of Hydrology*, S (HY6), pp.153-164.
- Bouwer, H. and Maddock, T., (1997). "Making sense of the interaction between groundwater and stream flow: lessons for water masters and adjudicators", *Rivers*, 6(1), pp. 19-31.
- Hantush, M. M. S. and Marino, M. A., (1989). "Chance-constrained model for management of stream-aquifer system", *J. Water Resources Planning and Mgmt.*, 115(3), pp. 259-277.
- Maddock, T., (1974). "The operation of a river-aquifer system under stochastic demand", *J. of water resources research*, Vol. 10, No. 1, pp.15-23.
- Morel-Seytoux, H. J., Daly, C., (1975). "A discrete kernel generator for stream-aquifer", *Water Resources Research*, 11(6), pp. 968-972.
- Morel-Seytoux, H.J., Illangaskare, T.H., (1986). "A discrete kernel simulation model for conjunctive management of a stream-aquifer system", *J. of Hydrology.*, Vol. 85, No. 3-4, pp. 319-338.
- Nishikawa, T., (1998). "Water resources optimization model for Santa Barbara, California", *J. Water*