شبیه‌سازی عملکرد مخازن برقابی به‌روش پویایی سیستم

محمدرضا جلالی (دانشجوی دکترا)
عباس افشار (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

روش‌های شبیه‌سازی، در کنار پیشرفت سریع روش‌های تحلیل سیستم، همچنان به عنوان ابزاری مفید برای تصمیم‌گیری در مسائل مهندسی مورد استفاده‌اند. با این حال نیاز به یافتن روش‌های جدید شبیه‌سازی که علاوه بر تشریح پویایی سیستم‌های پیچیده، بتوانند قابلیت مدل‌سازی ساده و راحت آنها را برای کاربر ایجاد کند، احساس می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش پویایی سیستم است که یک روش شبیه‌سازی شیء گرا براساس روابط بازخورد است. از عوامل جذابیت این روش می‌توان به سرعت بالای ایجاد یک مدل، امکان توسعه‌ی گروهی مدل‌ها، و نیز قابلیت و سادگی اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم اشاره کرد. در این نوشتار با استفاده از روش پویایی سیستم، ابتدا عملکرد یک مخزن ساده و سپس یک مخزن برقابی [1] به صورت کامل مدل‌سازی شده و با نشان دادن قابلیت‌های مدل مذکور، مطالعه‌ی موردی برای بررسی نتایج، بر روی سد تنگ معشوره در سرشاخه‌های کرخه انجام شده است.

مقدمه

در چند دهه‌ی گذشته تحقیقات گسترده‌یی در زمینه‌ی استفاده از روش‌های تحلیل سیستم در مسائل مربوط به بهره‌برداری مخازن انجام شده است.[۱ و ۲] همچنین نتایج حاصل از یک بررسی بسیار گسترده در مورد روش‌های متعدد بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مخازن نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت قابل ملاحظه‌ی تحقیقات مربوط به تحلیل سیستم‌های مخازن، به‌خصوص در مورد بهره برداران واقعی، نتایج این بررسی‌ها بسیار کند عملی می‌شوند.[۳] همچنین بررسی‌های دیگر نشان می‌دهد که عموماً در طرح‌های مختلف، بهره‌برداران واقعی وارد فرمول‌بندی و تهیه‌ی مدل‌های رایانه‌یی نمی‌شوند، و بسیاری از کاربران نیز با سیستم‌های مخزن ساده شده، که انطباق آنها با شرایط واقعی بسیار مشکل است، کار می‌کنند.[۴]

با بررسی مقالات و تحقیقات انجام شده در مبحث بهره‌برداری مخازن مشاهده می‌شود که اگرچه تحلیل سیستم‌ها جایگاه خاصی در زمینه‌ی مدیریت مخازن دارد، روش‌های شبیه‌سازی همچنان به‌عنوان ابزاری مفید در ایجاد شرایط لازم برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند.[۵] با این حال، نیاز به یافتن ابزارهای شبیه‌سازی که قابلیت وارد کردن بهره‌برداران در فرایند مدل‌سازی را دارا باشد، به‌شدت احساس می‌شود. یکی از این ابزارها، روش پویایی سیستم [2] (SD) در مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن است که در مقایسه با روش‌های مرسوم تحلیل سیستم، بسیار ساده‌تر و با کارایی است و نیاز به توصیف پیچیده‌ی ریاضی سیستم نیز ندارد. روش پویایی سیستم که روشی است برای شبیه‌سازی یک سیستم بازخورد [3] شیء گرا در حال رشد و همگامی با مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب است. عده‌یی از این روش در انجام کارهایی گسترده در برنامه‌ریزی حوزه‌ی رودخانه با استفاده از SD بهره گرفته‌اند:[۶-۸] به‌کارگیری این مدل در مطالعات خشکسالی[۹]، مدل‌سازی افزایش تراز آب دریا در یک منطقه‌ی ساحلی[۱۰] و نیز استفاده از این روش به‌عنوان روشی در برنامه‌ریزی‌های درازمدت منابع آب و تحلیل سیاست در حوزه‌ی رودخانه‌ی نیل در مصر.[۱۱] همچنین عده‌یی از محققان با استفاده از روش SD مدل مدیریت سیلاب در مخزن Shellmouth در کانادا را تهیه کرده‌اند.[۴] در سال ۲۰۰۲ نیز نمونه‌ی دیگری از کاربرد SD در منابع آب با عنوان «مدل SD در پیش‌بینی سیلاب ناشی از ذوب برف» ارائه شده است.[۱۲] علاوه بر آن، در سال ۲۰۰۲ کارهای متعدد دیگری در زمینه‌ی استفاده از SD در مدل‌سازی جامع منابع آب صورت گرفته است.[۱۳و۱۴]

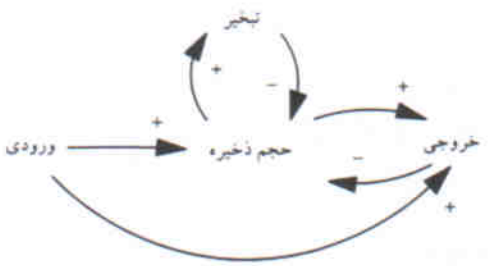
روش پویایی سیستم، چنان که عنوان شد، نمونه‌یی است از روش شبیه‌سازی بازخورد شیء گرا، که در این نوشتار، به‌عنوان روشی قوی و در عین حال ساده در مدل‌سازی عملکرد مخازن برقابی معرفی می‌شود. این مدل‌سازی با توجه به فرایندهای مختلف در عملکرد مخازن برقابی، تعیین ظرفیت نیروگاه و میزان انرژی تولیدی، و نیز قابلیت اطمینان سیستم در حالت قطعی انجام گرفته است. در این نوشتار ابتدا چهارچوب کلی روابط علت و معلولی در یک سیستم

بهره‌برداری مخزن تشریح می‌شود و پس از آن با استفاده از دیگر فرایندهای موجود در عملکرد مخازن برقابی، سیستم پیچیده‌تر شده و مدل شبیه‌سازی این مخازن تکمیل می‌شود. در انتها نیز به‌منظور بررسی مدل، نتایج داده‌های مربوط به سدتنگ معشوره که در سرشاخه‌های کرخه مورد استفاده قرار گرفته، تحلیل می‌شود.

مدل‌سازی به‌روش پویایی سیستم در بهره‌برداری مخازن

روش پویایی سیستم به‌عنوان یک نمونه روش مدل‌سازی، تاریخچه‌ی طولانی داشته و ریشه در تحقیقات سال ۱۹۶۱ فورستور دارد.[۱۵] وی برای درک مبانی راهبردی در سیستم‌های پویای پیچیده این موضوع را ایجاد کرد. مدل‌های SD با بینش فرایندهای بازخورد، کاربران سیستم را به درک بهتر رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازد. محدوده‌های کاربری SD بسیار وسیع است و به‌خصوص بر کاربردهای آن در مسائل اجتماعی و اقتصادی تأکید بسیار می‌شود. در سال‌های اخیر تمایل به شبیه‌سازی سیستم‌هایی با مقیاس کم و جزئیات زیاد، بیشتر شده است.[۸] رابطه‌ی پیوستگی جرم، یکی از مفاهیم اساسی در SD است که با توجه به نقش مهم این روابط در بهره‌برداری مخازن، مسائل شبیه‌سازی مخازن برای کاربرد SD بسیار مناسب‌اند.

ابزار SD مورد استفاده در این مطالعه به‌منظور مدل‌سازی عملکرد مخزن، چهار مؤلفه‌ی اصلی دارد: ۱. ذخایر یا تراز‌ها[۴]؛ ۲. جریان‌ها[۵]؛ ۳. اتصالات[۶]؛ ۴. مبدل‌ها[۷]. ذخیره یا تراز، برای تشریح هر پارامتر یا متغیری که تجمع می‌کند استفاده می‌شود؛ مثلاً می‌توان به آنها به عنوان آب ذخیره شده در یک مخزن اشاره کرد. جریان‌ها (نرخ‌های تغییر) نشان‌دهنده‌ی فرایندهایی است که ذخایر را پر یا خالی می‌کنند که نمونه‌ی بسیار روشن آن جریان ورودی به مخازن، یا جریان رهاسازی شده از آن است. از اتصالات به‌منظور نشان دادن روابط بین متغیرهای مدل استفاده می‌شود. این اتصالات در نرم‌افزارهای مربوطه به‌صورت گرافیکی و با پیکان نمایش داده می‌شوند که جهت این پیکان‌ها نشانگر جهت وابستگی روابط است. اتصالات حامل اطلاعات در مدل، از یک جزء به جزء دیگرند. مبدل‌ها نیز ورودی را به خروجی اتصال می‌دهند که ممکن است به‌صورت روابط جبری، نمودار یا جدول باشند. اساس روش SD بر پایه‌ی فرضیه‌ی فرایندهای بازخورد است. یک سیستم بازخورد متأثر از رفتار گذشته‌ی خود است. این سیستم یک ساختار حلقه‌بسته دارد که نتایج فعالیت‌های گذشته را در فرایندهای آینده مورد استفاده قرار می‌دهد. یک نوع از سیستم‌های بازخورد،



شکل ۱. روابط علت و معلولی متغیرهای اصلی مخزن.

حلقه‌های بازخورد منفی است که باعث تعادل پایدار سیستم می‌شود. نوع دیگر سیستم بازخورد مثبت است که فرایندهای رشد را ایجاد می‌کند و در آن فعالیت‌های صورت گرفته در گذشته باعث ایجاد فعالیت‌های بزرگ‌تر می‌شود (رشد جمعیت).

یک حلقه‌ی بازخورد نماینده‌ی ساختار اصلی یک سیستم است و ترازها و جریان‌ها متغیرهای اساسی این حلقه‌اند. متغیرهای تراز (ذخایر) شرایط سیستم را در هر زمان تشریح کرده و متغیرهای جریان (نرخ) چگونگی سرعت تغییر تراز را نشان می‌دهند. این حلقه‌های بازخورد نشان‌دهنده‌ی روابط علت و معلولی در کل سیستم‌اند. در نمودارهای علت و معلولی، پیکان‌ها نشان دهنده‌ی جهت و علامت تأثیر ارتباطات بین متغیرهای مختلف سیستم‌اند. شکل ۱ بخشی از یک نمودار ساده‌ی علت و معلولی در بهره‌برداری از مخازن را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، جریان ورودی تأثیری مثبت بر حجم ذخیره‌ی مخزن دارد. افزایش حجم ذخیره امکان رهاسازی بیشتر را فراهم می‌سازد که بر میزان رهاسازی اثر مثبت دارد. اما با رهاسازی بیشتر، میزان ذخیره‌ی مخزن کاهش خواهد یافت و متغیر جریان ورودی بر حجم ذخیره مخزن اثر منفی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که هر چه ورودی بیشتر باشد، امکان خروجی نیز بیشتر می‌شود، و بدین ترتیب جریان ورودی بر جریان خروجی اثر مثبت خواهد داشت. در صورت وجود تبخیر نیز مشاهده می‌شود که با افزایش حجم مخزن و به‌تبع آن افزایش سطح و میزان تبخیر از سطح آزاد آب نیز افزایش می‌یابد که اثر آن مثبت خواهد بود. اما هر چه میزان تبخیر زیاد شود از حجم مخزن کاسته خواهد شد و اثر تبخیر بر حجم مخزن منفی است.

مدل شبیه‌سازی مخزن که در این نوشتار ارائه شده، با استفاده از روش SD و در محیط Vensim اجرا شده است. این ابزار مدل‌سازی که یک محیط شبیه‌سازی شیء گراست[۱۶]، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده‌ی منابع آب را با مشقت کمتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم مهیا می‌سازد. با استفاده از این ابزار، برنامه‌ریز اجزائی که نشان‌دهنده‌ی مؤلفه‌های فیزیکی یا مفهومی مدل هستند

تعریف کرده و روابط تابعی این اجزاء را تعیین می‌کند. این روش ساخت مدل، مشابه ایجاد فلوچارت‌ها یا طرح‌های شماتیک سیستم در حال شبیه‌سازی است.

ساختار مدل

در این نوشتار شبیه‌سازی عملکرد مخازن برقابی با استفاده از روش SD صورت می‌گیرد. مدل مذکور یک سیستم تک‌مخزنی برقابی را در شرایط طراحی شبیه‌سازی می‌کند. به‌همین منظور، و با توجه به متغیرهای تصمیم در عملکرد مخازن و نیز با بهره‌گیری از امکان شبیه‌سازی سیستم، بهترین حالت آن تعیین می‌شود.

مدل SD در یک مخزن می‌تواند به‌صورت گرافیکی و با استفاده از بلوک‌های اصلی، مانند ذخایر، جریان‌ها، اتصالات و مبدل‌های موجود در ابزار مورد نظر ساخته شود. چنان که عنوان شد، در مدل مخزن، حجم مخزن به‌عنوان یک متغیر حالت (ذخیره) معرفی شده و جریان‌های ورودی و خروجی که باعث تغییرات حجم مخزن در طول زمان می‌شوند، نرخ‌ها یا متغیرهای جریان‌اند. مبدل‌ها در این مدل داده‌ها و توابع منطقی و ریاضی را به‌منظور عملکرد مخازن در خود جای می‌دهند. اتصالات نیز، چنان که توضیح داده شد، اجزاء مختلف مدل مانند مبدل‌ها، جریان و ذخایر را به یکدیگر مرتبط می‌سازند.

در ادامه، فرایند تنظیم ساختار یک مدل در روش پویایی سیستم براساس ابزار مورد استفاده در این نوشتار (Vensim) توضیح داده شده و پس از آن با به‌کارگیری این فرایند، ابتدا یک سیستم ساده‌ی بهره‌برداری مخزن با نیاز ماهانه تشریح می‌شود و پس از آن با اعمال متغیرها و پارامترهای مختلف و با افزایش پیچیدگی مدل، نهایتاً مدل عملکرد مخازن برقابی تهیه می‌شود.

فرایند تنظیم ساختار مدل

در روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی مسائل مختلف، ابتدا می‌بایست کلیه‌ی متغیرها و پارامترهای موجود در مسئله را فهرست کرده و آنها را در صفحه‌ی اصلی نرم‌افزار وارد ساخت. پس از شناسایی متغیرهای اصلی نوبت به تعیین اتصالات و ارتباطات بین این متغیرها می‌رسد. چنان که اشاره شد، در این روش پیکان‌ها نشان‌دهنده‌ی ارتباطات‌اند و جهت آنها نیز تعیین کننده‌ی جهت وابستگی ارتباط است. در حین اعمال ارتباطات بین متغیرهای اصلی، نیاز به یک سری متغیرهای کمکی احساس می‌شود که نقش انتقالی دارند. پس از تعیین محل متغیرها و ارتباطات فیمابین، می‌بایست روابط ریاضی و منطقی بین آنها وارد شود. این روابط که عموماً از فیزیک مسئله مطرح می‌شوند نشأت می‌گیرند، می‌توانند به‌عنوان محدودیت‌ها و قیدهای موجود در مسئله مطرح شوند. در نرم‌افزارهای مختلف موجود برای مدل‌سازی پویایی سیستم، ورود اطلاعات و روابط به‌صورت جدول، نمودار و نیز روابط مستقیم ریاضی امکان‌پذیر است.

در مدل‌سازی پویایی سیستم توصیه می‌شود که کلیه‌ی ضرایب ثابت و پارامترها به‌صورت یک متغیر کمکی تعریف شوند تا در صورت نیاز بتوان مقدار اولیه‌ی آنها را تغییر داد. اما اگر این مقادیر به‌صورت ثابت‌هایی در روابط ریاضی وارد شوند، این امکان برای سایر کاربران مدل مشکل خواهد بود. با وارد کردن روابطِ بین متغیرها، و مقدار دهی اولیه به متغیرهای حالت، و نیز تعیین محدوده و گام زمانی آنها، مدل آماده‌ی شبیه‌سازی است.

سیستم ساده‌ی تک‌مخزنی با نیاز ماهانه

براساس آنچه که گفته شد، در عملکرد مخازن، اصلی‌ترین رابطه همان رابطه‌ی پیوستگی است که میزان تغییرات حجم مخزن در هر دوره‌ی زمانی را در اثر میزان ورودی و خروجی تعیین می‌کند. بدین‌ترتیب چهار متغیر اصلی موجود در مدل را می‌توان با توجه به رابطه‌ی ۱ به‌صورت حجم ذخیره‌ی مخزن، جریان ورودی، جریان رهاسازی شده و تبخیر تعریف کرد:

$$S_{t+1}=S_t+I_t-R_t-EV_t \qquad (1)$$

که در آن:

S_t: حجم مخزن در ابتدای دوره‌ی زمانی t؛

S_{t+1}: حجم مخزن در انتهای دوره‌ی زمانی t (یاابتدای دوره‌ی زمانی (t+۱)؛

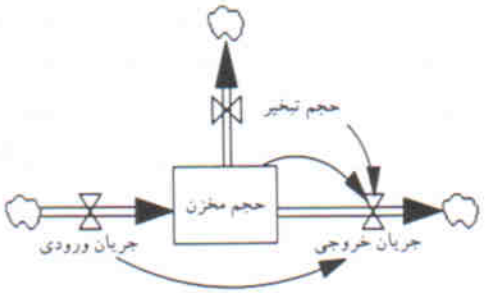
I_t: جریان ورودی مخزن در دوره‌ی t؛

R_t: جریان رهاسازی شده در دوره‌ی t؛

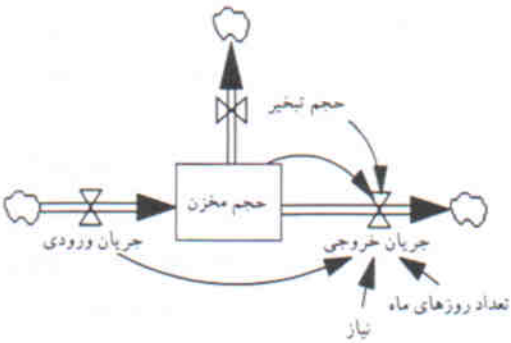
EV_t: میزان تبخیر از سطح مخزن در دوره‌ی t است.

چنان که از رابطه‌ی پیوستگی ۱ مشخص است، حجم مخزن در مدل بهره‌برداری مخزن نقش متغیر حالت (ذخیره) را ایفا می‌کند و متغیرهای جریان (نرخ) درآن عبارتند از: جریان‌های ورودی، رهاسازی شده و تبخیر. نحوه‌ی نمایش متغیرهای حالت و جریان در شکل ۲ـالف و با توجه به رابطه‌ی پیوستگی نمایش داده شده است.

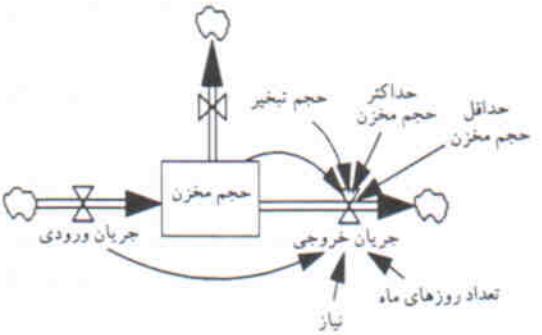
در رابطه‌ی ۱ مشاهده می‌شود که متغیرهای I و R و EV می‌بایست از نوع حجمی باشند. اگر مقادیر I و R به‌صورت دبی و از نوع جریان (نرخ) باشند، آنگاه می‌بایست از یک متغیر کمکی در هر



(الف)



(ب)



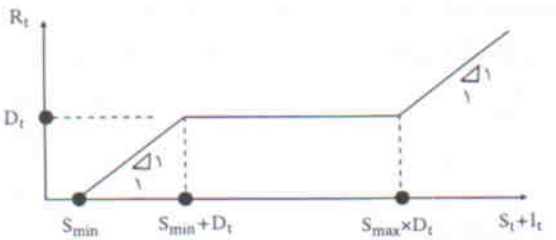
(ج)

شکل ۲. مراحل ساخت مدل شبیه‌سازی عملکرد مخزن با نیاز ماهانه به روش پویایی سیستم.

بازه‌ی زمانی استفاده کرد. با توجه به اینکه در مدل شبیه‌سازی مخزن عموماً بازه‌ی زمانی یک ماه تعیین می‌شود، لذا این متغیر کمکی می‌تواند با توجه به تعداد روزهای هر ماه وارد شود. از جمله متغیرهای اساسی دیگرِ موجود در مدل شبیه‌سازی مخزن، میزان نیاز ماهانه است که تعیین‌کننده‌ی سیاست رهاسازی مخزن است.

در شکل ۲ـب ساختار مدل پس از اعمال دومتغیر، تعداد روزهای ماه و نیز میزان نیاز ماهانه نمایش داده شده است.

یکی از سیاست‌های مرسوم و ساده‌ی شبیه‌سازی مخازن که عموماً هنگام طراحی استفاده می‌شود، سیاست بهره‌برداری



شکل ۳. سیاست بهره‌برداری استاندارد مخزن (SOP).

استاندارد[۸] (SOP) است. روابط ریاضیِ تعیین میزان خروجی در این روش به صورت معادلات ۲ و نیز شکل ۳ است.

$$R_t = \begin{cases} S_t + I_t - S_{max} & \text{if} \quad S_t + I_t - D_t \geq S_{max} \\ D_t & \text{if} \quad S_{min} \leq S_t + I_t - D_t \leq S_{max} \\ S_t + I_t - S_{min} & \text{if} \quad S_t + I_t - D_t \leq S_{min} \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آنها:

D_t: میزان نیاز در دوره‌ی زمانی t؛

S_{max}: حداکثر حجم ذخیره‌ی مخزن؛

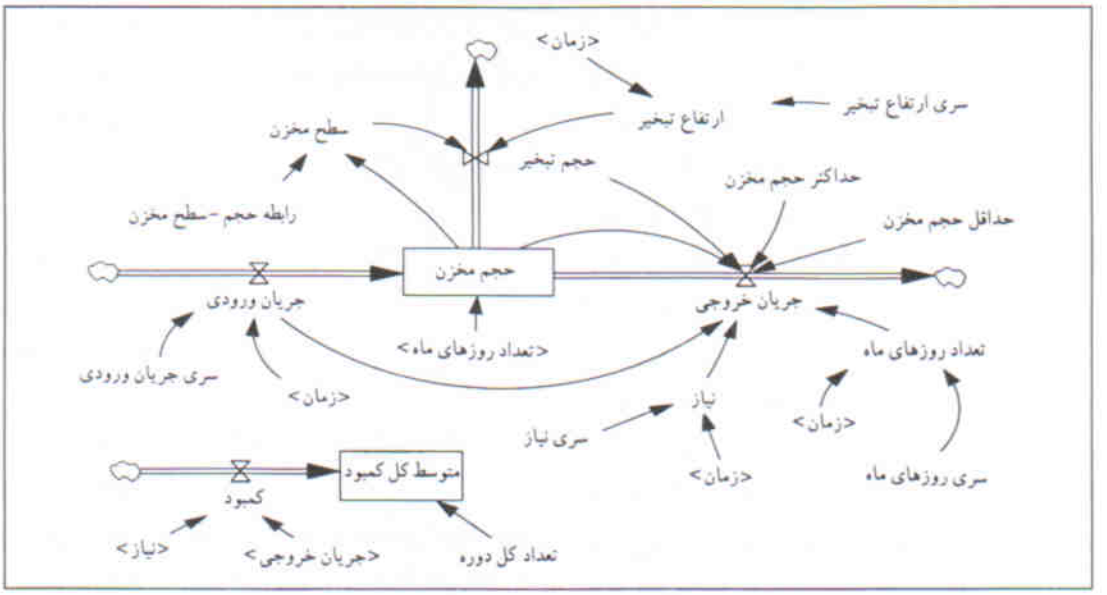
S_{min}: حداقل حجم ذخیره‌ی مخزن است.

به این ترتیب مشاهده می‌شود که دو متغیر ثابت S_{max} و S_{min} نیز در مدل شبیه‌سازی تأثیرگذار خواهند بود.

در شکل ۲ـج ساختار مدل با متغیرهای اشاره شده تا کنون نمایش داده شده است. سطح مخزن در هر دوره‌ی زمانی که خود تابعی از میزان ذخیره‌ی مخزن است، متغیر بعدی است که تأثیر مستقیم آن بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب وارد می‌شود. وارد کردن رابطه‌ی حجم ـ سطح مخزن به‌صورت مقادیر عددی یک نمودار، مدل را قادر خواهد ساخت که ضمن تعیین مقدار سطح مخزن و به تبع آن میزان تبخیر از مخزن در هر دوره‌ی زمانی، رابطه‌ی پیوستگی را کامل کند.

در نرم‌افزار مورد استفاده (Vensim)، برای وارد کردن مقادیر عددی یک رابطه می‌بایست یک متغیر تابع تعریف کرد.[۱۹] این متغیر تابع می‌تواند مثلاً تابعی از زمان و یا تابعی از متغیر دیگر باشد. به‌عنوان مثال، برای واردکردن سری زمانی، جریان ورودی به مخزن می‌بایست تابعی از زمان مثلاً به اسم «سری جریان ورودی[۹]» برای مدل تعریف کرده و مقادیر جریان ورودی به مخزن را به‌صورت عددی در هر بازه‌ی زمانی آن وارد کرد.

شکل نهایی ساختار مدل شبیه‌سازی یک مخزن ساده در شکل ۴ نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تعریف مقادیر سری جریان ورودی، سری تبخیر، و سری تعداد روز توابعی از زمان و نیز



شکل ۴. مدل کامل شبیه‌سازی عملکرد مخزن با نیاز ماهانه به روش پویایی سیستم.

برای رابطه‌ی حجم ـ سطحِ مخزن تابعی از حجم ذخیره در مدل تعریف شده است.

سیستم تک‌مخزنی برقابی

مدل شبیه‌سازی مخزن برقابی را می‌توان به صورت کلی به سه بخش اصلی تقسیم نمود: ۱. مخزن؛ ۲. انتقال بین مخزن و نیروگاه؛ ۳. نیروگاه.

۱. مخزن

مخزن بخش اصلی مدل است. این بخش همانند مدل تهیه شده در شکل ۴ خواهد بود، با این تفاوت که متغیر نیاز[۱۰] ثابت نبوده و متأثر از دو بخش دیگر است. همچنین ازآنجاکه در شبیه‌سازی مخازن برقابی، تراز مخزن نقشی معادل حجم ذخیره‌ی مخزن ایفا می‌کند، لذا به‌عنوان یکی از متغیرهای اصلی تعریف می‌شود. برای تهیه‌ی ساختار بهره‌برداری مخزن ساده و اعمال حجم ذخیره به عنوان متغیر حالت به مدل، تراز مخزن را به صورت متغیری کمکی و به شکل تابعی عددی از حجم مخزن تعریف می‌کنیم. (همانگونه که سطح مخزن نیز به‌صورت تابعی عددی از حجم مخزن تعریف شد). بدین ترتیب با اضافه کردن متغیر تراز مخزن و تابع مربوط به حجم ـ تراز، بخش اصلی مخزن در مدل شبیه‌سازی تکمیل می‌شود.

۲. انتقال بین مخزن و نیروگاه

در این بخش بحث اصلی افت بار آب در مجاری نیروگاه است. مجاری آب‌برِ نیروگاه را در هر مخزن برقابی می‌توان به دو بخش تونل آب‌بر و پنستاک تقسیم کرد. تونل آب‌بر آن بخش از مجرای انتقال است که بین آبگیری از مخزن تا محلِ چند شاخه شدن و اتصال به توربین‌ها است. پنستاک نیز که عموماً فلزی است از محل چندشاخه‌شدن مجرای آب‌بر به سمت توربین‌ها آغاز می‌شود و عموماً تعداد آن معادل تعداد واحدهای توربین نیروگاه است. به‌دلیل ماهیت انتقال آب برای تولید بار آب، هر دو مجرای آب‌بر نیروگاه تحت فشار عمل می‌کنند و افت بارهای ایجاد شده شامل افتِ ثابت ورودی، خروجی و نیز افت‌های طولی خواهد بود.

با توجه به توصیه‌ی عنوان شده در ساخت مدل پویایی سیستم، ابتدا متغیرهای موثر در این بخش از مدل فهرست می‌شوند:

- تعداد تونل آب‌بر؛
- قطر تونل آب‌بر؛
- طول تونل آب‌بر؛
- ضریب زبریِ تونل آب‌بر؛
- تعداد واحدهای نیروگاه؛
- سرعت آب در تونل آب‌بر؛
- قطر پنستاک‌ها؛
- طول پنستاک‌ها؛
- ضریب زبریِ پنستاک؛
- سرعت آب در پنستاک‌ها؛
- افتِ ثابت ورودی و خروجی.

چنان که عنوان شد، این بخش از مدل تنها بر محاسبه‌ی بار آب

خالص (و یا به‌عبارتی افت بار ایجاد شده) بر نیروگاه مؤثر است. یکی از روش‌های محاسبه‌ی افت بار آب در مجاری تحت فشار معادله‌ی دارسی وایسباخ است:

$$h_f = f\frac{L}{D}V^2/2g \qquad (3)$$

که در آن:

h_f: افت طولی (m)؛

f: ضریب زبری؛

L: طول مجرای آب‌بر (m)؛

D: قطر مجرای آب‌بر (m)؛

V: سرعت آب در مجرای آب‌بر (m/s)؛

g: شتاب جاذبه (m/s^2) است.

روش دیگر که بیشتر در محاسبات افت بار آب در پروژه‌های برقابی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تلفیق معادله‌ی مانینگ در کانال‌ها با معادله‌ی دارسی وایسباخ است که نتیجه‌ی آن چنین خواهد بود:

$$h_f = 124/5\frac{n^2L}{D^{4/3}}v^2/2g \qquad (4)$$

n همان ضریب زبری مانینگ مجرای آب‌بر خواهد بود. در مدل ایجاد شده در این نوشتار، برای محاسبه‌ی افت بار آب در تونل و پنستاک نیروگاه از معادله‌ی ۴ استفاده شده است.

۳. نیروگاه

نیروگاه که سوّمین بخش از کل مدل شبیه‌سازی مورد نظر است از چندین متغیر تشکیل شده است. این متغیرها عبارت‌اند از:

- ظرفیت مطمئن نیروگاه؛
- تراز پایاب نیروگاه؛
- ضریب کارکرد نیروگاه؛
- بازده کل نیروگاه؛
- ضریب اضافه بار نیروگاه؛
- دبی وارد شده به نیروگاه در هر بازه‌ی زمانی؛
- انرژی اولیه‌ی تولیدی در نیروگاه در هر بازه‌ی زمانی؛
- انرژی ثانویه‌ی تولیدی در نیروگاه در هر بازه‌ی زمانی.

ظرفیت مطمئن نیروگاه، طبق تعریف، توانی است که حداقل در ۹۰٪ مواقع قابل دسترسی باشد، که این ظرفیت مبیّن میزان انرژی مطمئن نیروگاه است.

$$P_{dep} = \gamma QH/1000 \qquad (5)$$

$$E_{firm} = P_{dep} \times 24 \times PF \times N/1000 \qquad (6)$$

که در آنها:

P_{dep}: ظرفیت مطمئن (MW)؛

γ: وزن حجمی آب ($9/81\ ton/m^3$)؛

Q: دبی نیروگاه (m^3/s)؛

H: بار آب خالص بر روی نیروگاه (m)؛

E_{firm}: انرژی مطمئن (GWH)؛

PF: ضریب کارکرد نیروگاه؛

N: تعداد روزها.

رسیدن به انرژی مطمئن همان هدف اصلی طرح است که در نهایت میزان نیاز را در هر بازه‌ی زمانی مشخص می‌کند. در مواقعی که مخزن در حداکثر تراز خود بوده و به‌دلیل جریان ورودی زیاد سرریز ایجاد می‌شود، با توجه به ضریب اضافه بار نیروگاه این امکان وجود خواهد داشت که با اِعمال اضافه باری بر نیروگاه، مقداری از سرریز را به داخل مجاری آب‌بر فرستاده و علاوه بر انرژی اولیه‌ی هدف، مقداری انرژی ثانویه نیز تولید کرد.

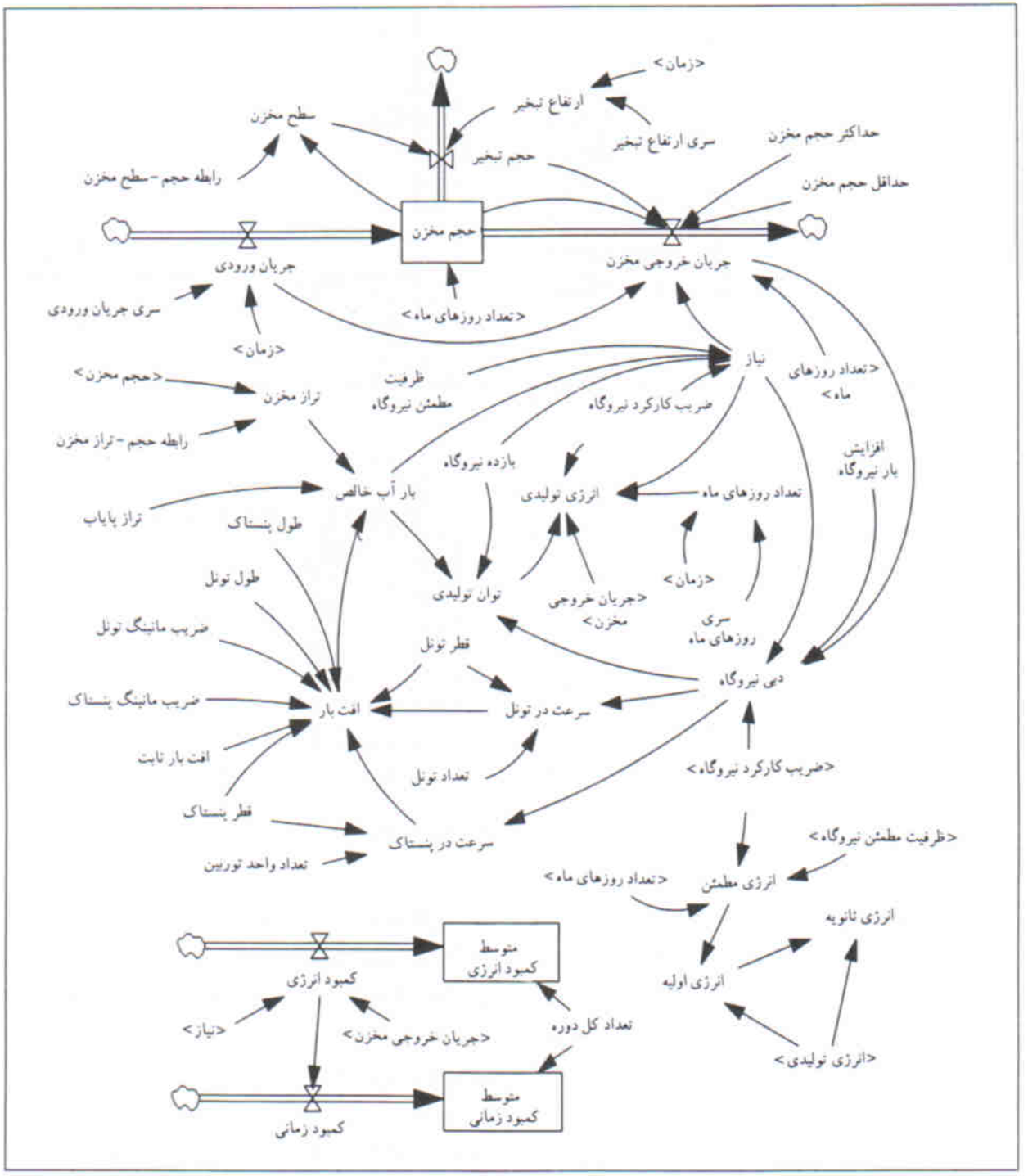
ساختار نهایی مدل

در توضیح سه بخش اصلی مدل متذکر شدیم که هر کدام از این بخش‌ها با اتصالات و رابطه‌هایی به بخش‌های دیگر مرتبط می‌باشند. به عنوان مثال، میزان نیاز در هر بازه‌ی زمانی برای خروجی مخزن را ظرفیت مطمئن نیروگاه و بار آب خالص در آن زمان تعیین می‌کند، این در حالی‌است‌که بار آب خالص از اختلاف بین تراز مخزن و تراز پایاب نیروگاه و کسر افت‌های ایجاد شده محاسبه می‌شود. تغییرات تراز مخزن نیز، به تبع تغییرات حجم مخزن، تابعی از ورودی و خروجی خواهد بود. به این ترتیب مشاهده می‌شود که با توجه به ارتباطات موجود بین این سه بخش، نیاز به حل هم‌زمان معادلات غیرخطی بین چندین متغیر است. نرم‌افزار مورد استفاده (Vensim) از قابلیت حل هم زمان این معادلات غیرخطی برخوردار است.[16]

ساختار نهایی مدل شبیه‌سازی تک‌مخزنی برقابی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای بررسی میزان کمبود و قابلیت اطمینان مدل، چند متغیر کمکی دیگر به‌صورت کمبودهای مقدار انرژی و کمبودهای زمانی تعریف شده‌اند.

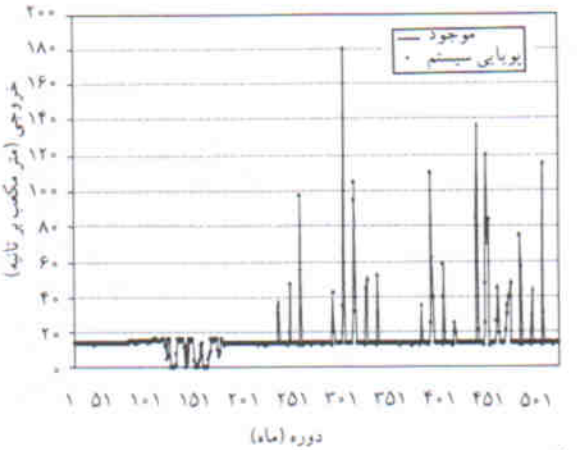
کاربرد مدل

به‌منظور بررسی صحت نتایج مدل تهیه شده، شبیه‌سازی مخزن سد و نیروگاه تنگ معشوره مورد استفاده قرار گرفته است. محور سد تنگ معشوره با مساحت حوزه‌یی معادل ۳۰۳۵ کیلومتر مربع بر روی

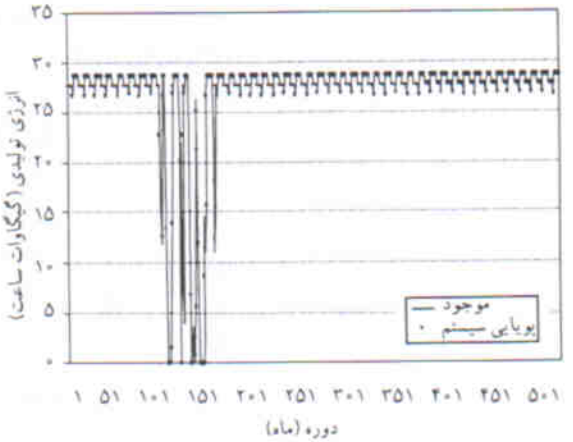


شکل ۵. مدل کامل شبیه‌سازی عملکرد مخزن برقابی به روش پویایی سیستم.

رودخانه‌ی کشکان، از سرشاخه‌های رودخانه‌ی کرخه، و در ۶۰ کیلومتری غرب شهر خرم‌آباد و ۴۵ کیلومتری شمال شهر کوهدشت واقع شده است. این سد برقابی در مرحله‌ی پیش توجیهی توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس مورد مطالعه قرار گرفته است. میانگین برآورد سالیانه‌ی ورودی به مخزن سد معادل ۵۷۳/۷۲ میلیون متر مکعب بر آورد شده است. با توجه به شرایط خاص و پیچ رودخانه پس از محل سد، موقعیت نیروگاه با احتساب طول تونل معادل ۸۷۰۰ متر به چندین کیلومتر پائین دست سد منتقل شده و حدود ۲۲۰ متر به بار آب‌بر روی نیروگاه اضافه شده است. مجاری آب نیروگاه علاوه بر تونلی با طول ۸۷۰۰ متر، دو پنستاک (دو واحد



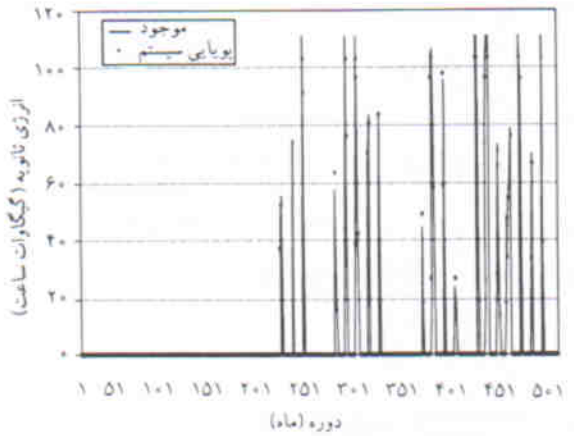
شکل ۶. مقایسه تغییرات جریان رهاسازی شده در نتایج موجود و حاصل از SD



شکل ۷. مقایسه تغییرات انرژی اولیه تولیدی در نتایج موجود و حاصل از SD

نیروگاه) با طول ۹۰ متر بوده که با توجه به محدودیت حداکثر سرعت در تونلِ بتنی معادل ۳/۵ متر بر ثانیه و پنستاکِ فلزی معادل ۶ متر بر ثانیه، قطر تونل و پنستاک‌ها به‌ترتیب معادل ۴/۸ و ۲/۶ متر محاسبه شده است. در محاسبات، ضرایب مانینگ برای تونلِ بتنی ۰/۰۱۴ و برای پنستاکِ فلزی ۰/۰۱۱ اعمال شده است. همچنین میزان افت بار آب ثابت مربوط به دهانه‌ی ورودی و خروجی و شیرهای پروانه‌یی و ... معادل ۲/۴ متر منظور شده است. ضریب کارکرد نیروگاه و همچنین ضریب اضافه بار به‌ترتیب معادل ۰/۲۵ (۶ساعته) و ۰/۱۵ اعمال شده است.

در گزارش مطالعات صورت گرفته در شرکت مهاب قدس[۱۷]، گزینه‌ی نهایی رقم‌های نرمال و حداقل مخزن به‌ترتیب معادل ۱۴۰۰ و ۱۳۵۰ متر از سطح دریا با حجم‌های مخزن به‌ترتیب ۱۳۶۹/۷۹ و ۲۹۷/۶۶ میلیون متر مکعب، معرفی شده است که در این شرایط و با توجه به سایر پارامترهای عنوان‌شده، ظرفیت مطمئن نیروگاه با



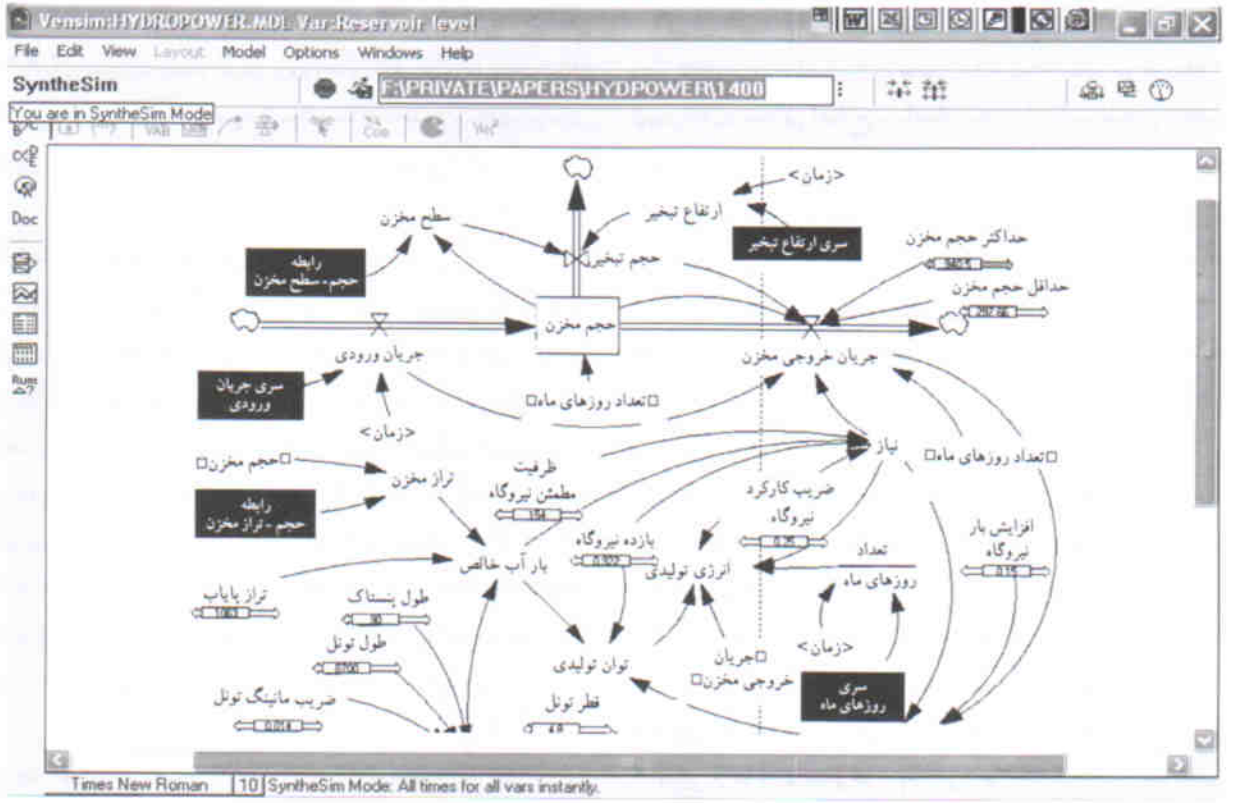
شکل ۸. مقایسه تغییرات انرژی ثانویه تولیدی در نتایج موجود و حاصل از SD

۵/۰۳ درصد کمبود انرژی و ۷/۰۱ درصد کمبود زمانی معادل ۱۵۴ مگاوات برآورد شده و متوسط انرژی مطمئن و ثانویه‌ی سالیانه در یک دوره‌ی ۴۴ ساله‌ی آماری به‌ترتیب ۳۲۰/۳۱ و ۷۶/۴۹ گیگاوات ساعت تعیین شده است. پارامترهای ثابت مدل با توجه به مقادیر موجود وارد شده و پس از انجام شبیه‌سازی در یک دوره‌ی ۴۴ ساله با استفاده از روش پویایی سیستم، مقایسه‌یی بین نتایج موجود در گزارش مهاب قدس و نتایج حاصل از روش SD صورت گرفت که در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، میزان تفاوت نتایج بین دو روش بسیار اندک و ناچیز است، به‌طوری که درصد تفاوت در میزان رهاسازی، میزان انتریی اولیه و نیز انتریی ثانویه تولیدی به ترتیب معادل ۰/۳٪، ۰/۳٪ و ۳٪ می‌باشد. میزان انرژی اولیه و ثانویه‌ی تولیدی در روش SD به‌ترتیب معادل ۳۱۹/۵۲ و ۷۴/۲۴ گیگاوات ساعت محاسبه شده است.

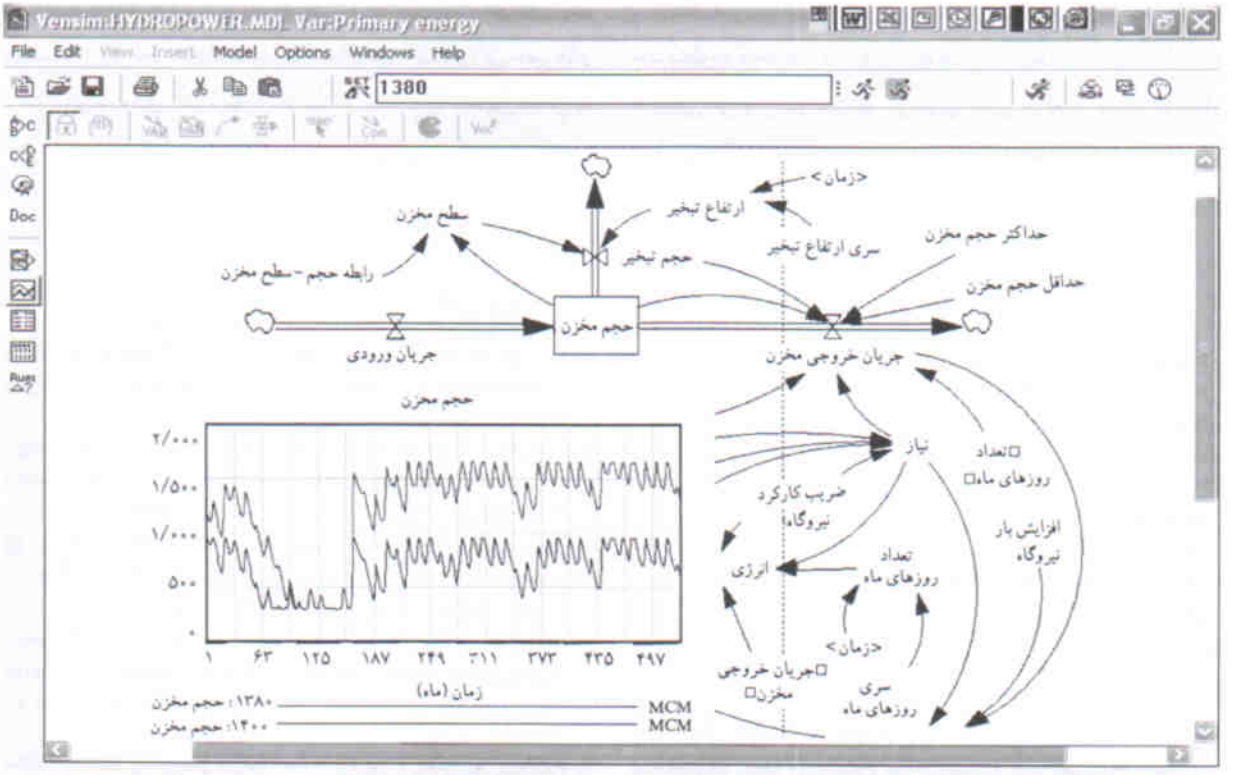
قابلیت اجرا در حین تغییرات

یکی از قابلیت‌های بسیار خوب نرم‌افزار Vensim، انتخاب حالتی است که نتایج اجرای مدل در زمان هر یک از تغییرات بر روی پارامترهای ورودی به‌صورت گرافیکی بر روی صفحه نمایش داده می‌شود.

صفحه‌ی اصلی مدل در شکل ۹ نمایش داده شده است. در حالت انتخاب اجرا در حین تغییرات چنان‌که مشاهده می‌شود برای هر یک از پارامترهای ورودی با نمایش مقدار عددی آن دو پیکان به سمت چپ و راست ظاهر می‌شود که قابلیت کاهش و افزایش مقدار را ایجاد می‌کند. همچنین تغییرات زمانی سایر متغیرهای خروجی مدل به‌صورت گرافیکی بر روی آنها نمایش داده می‌شود. در



شکل ۹. صفحه‌ی اصلی نرم‌افزار VENSIM در حالت اجرا در حین تغییرات.



شکل ۱۰. صفحه‌ی اصلی نرم‌افزار VENSIM در حالت مقایسه دو اجرا در رقوم نرمال ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰.

این حالت با هر تغییر در مقدار پارامترهای ورودی به‌صورت هم‌زمان و گرافیکی تغییرات ایجاد شده بر روی سایر متغیرهای خروجی نشان داده شده و کاربر به‌راحتی می‌تواند با توجه به محدودیت‌های سیستم، مقدار عددی هر یک از پارامترهای ورودی را تعیین کند.

قابلیت مقایسه‌ی دو اجرا

از جمله قابلیت‌های دیگر نرم‌افزار مورد نظر، مقایسه‌ی متغیرها در دو اجرای مختلف است. پس از انجام هر اجرا کل مدل و خروجی‌ها را می‌توان در یک فایل ذخیره کرد و با انجام یک اجرای جدید با انتخاب حالت مقایسه‌ی اجرا، می‌توان نحوه‌ی تغییرات خروجی‌ها را در دو یا چند اجرای مختلف به‌صورت گرافیکی مشاهده کرد. به عنوان مثال، مدل مورد نظر با دو رقم نرمال ۱۴۰۰ و ۱۳۸۰ شبیه‌سازی شده و به گونه‌یی که در شکل ۱۰ نمایش داده شده، نحوه‌ی تغییرات انرژی مطمئن تولیدی در طول زمان برای این دو اجرا به صورت گرافیکی بر روی صفحه نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار تحقیق بر روی تهیه‌ی مدل شبیه‌سازی عملکرد یک سیستم تک‌مخزنی برقابی به روش پویایی سیستم (SD) ارائه شده است. در این مدل با توجه به روابط علت و معلولی، ساختار کلی یک سیستم مخزن برقابی ایجاد شده و با اعمال تغییرات بر روی متغیرها و پارامترهای ورودی، شبیه‌سازی عملکرد سیستم به سمتِ رسیدن به محدودیت‌ها و اهداف مورد نظر سوق داده می‌شود.

روش شبیه‌سازی SD پیشنهاد شده در این نوشتار، در مقایسه با روش‌های مرسوم شبیه‌سازی بسیار ساده و کاراست. سرعت بالای تهیه‌ی مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل، قابلیت انجام تحلیل حساسیت (که از قابلیت‌های نسخه‌ی کامل نرم‌افزار است) و نیز ارتباط موثر نتایج حاصل، از توانایی‌های اساسی مدل شبیه‌سازی مخزن به روش پویایی سیستم هستند. به‌دلیل سادگی ساختار و اصلاحات مدل، ابزارهای محیطی شبیه‌سازی SD، مدل‌سازی را سریع‌تر کرده و از سعی و تلاش برنامه‌ریز به مقدار زیادی کاسته شده و زمان بیشتری را صرف مفهومی کردن سیستم و جمع‌آوری داده‌ها می‌کند.

مدل تهیه شده در این نوشتار در شبیه‌سازی مخزن نیروگاه سد تنگ معشوره مورد استفاده قرار گرفته و با نتایج موجود در گزارش‌های طرح مورد نظر مقایسه شد. با توجه به سادگی قابلیت اصلاح در مدل، ابزار مورد استفاده در جهت بررسی تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی بر کل سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با توجه به ایجاد کل ساختار مدل در یک صفحه و مشاهده‌ی گرافیکی ارتباطات متغیرها و پارامترها با یکدیگر، کاربر به‌راحتی قادر خواهد بود مسائل متنوعی را با انجام تغییرات ساده‌یی در مدل شبیه‌سازی کرده و خروجی‌های مورد نظر را از مدل دریافت کند.

مدل مورد نظر را می‌توان به‌صورت سیستم چندمخزنی و چندمنظوره گسترش داده و بر پیچیدگی‌ها و قابلیت‌های آن افزود. همچنین می‌توان سیاست بهره‌برداری مخزن را تغییر داده و به جای استفاده از SOP از یک سیاست بهینه استفاده کرد.

پانوشت

1. hydroeclectric reservoir
2. System Dynamics (SD)
3. feedback
4. stocks
5. flows
6. connectors
7. convertors
8. Standarad Operation Policy (SOP)
9. inflow series
10. demand

منابع

1. Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. *Water Resources Systems Planning and Management*, Princeton Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1981).
2. Mays, W.L., and Tung, Y.-K. *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill, NewYork. (1992).
3. Yeh, W. W.-G. "Reservoir management and operation models: a state-of-the-art-review" *Water Resour. Res.*, **21** (12), pp 1797-1818, (1985).
4. Ahmad, S., and Simonovic, P.S. "System dynamics modeling of reservoir operations for flood management" *J. Computing in Civil Engrg.*, ASCE, **14** (3), pp 190-199, (2000).
5. Simonovic, S.P. "Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice", *J. Water Resour. Plng and Mgmt.*, ASCE, 118 (3), pp 262-280, (1992).
6. Palmer, R., Keyes, A.M., and Fisher, S. "Empowering stakeholders through simulation in water resources planning", water management for the 90s, ASCE, New York, pp 451-454, (1993).
7. Palmer, R. "(ACT-ACF) River basin planning study", (1994). http://maximus.ce.washington.edu/actacf/&.
8. Palmer, R., Hilton, K., and Hahn, M. "Willamette river basin

reauthorization feasibility study", (1995). http: //www. ce. washington. edu/;willamet/&.

9. Keyes, A.M., and Palmer, R. "The role of object oriented simulation models in the drought preparedness studies", *Proc., 20th Ann. mat. Conf., Water Resour. Plng. and Mgmt. Div.*, ASCE, NewYork, pp 479-482, (1993).
10. Matthias, R., and Fredrick, P. "Modeling spatial dynamics of sea-level rise in a coastal area", *Sys.Dyn.Rev.*, **10** (4), pp 375-389, (1994).
11. Fletcher, E.J. "The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources", *Proc., 1st Int. Conf. on New Information Technolo. for Decision-Making in Civ. Engrg.*, University of Quebec, Montreal, Canada, pp 909-920, (1998).
12. Li, L., and Simonovic, S.P. "System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American Prairie watersheds" *Hydrological Processes Journal*, **16**, pp 2645-2666, (2002).
13. Simonovic, S.P. "World water dynamics: Global modeling of water resources" *J. Environ. Mgmt.*, **66** (3), pp 249-267, (2002).
14. Simonovic, S.P., "Global water dynamics: Issues for the 21st century" *J. Water Science and Tech.*, **45** (8), pp 53-64, (2002).
15. Forrester, J.W. *Industrial dynamics*, Productivity Press, Portland Oreg. (1961).
16. Totorial and technical documentation Vensim. Ventana Systems, Inc, (1988-2003).
۱۷. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. «گزارش مرحله پیش توجیهی سد و نیروگاه تنگ معشوره. برنامه‌ریزی منابع آب» (۱۳۸۱).