



بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی با استفاده از روش شبیه‌سازی آنیلینگ

فرناز خدابخشی^۱، علیرضا برهانی داریان^۲

پست الکترونیکی: f_kh@engineer.com

پست الکترونیکی: dariania@yahoo.com

f_kh@engineer.com

خلاصه

امروزه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن موضوعی است که بیش از پیش مورد توجه برنامه ریزان منابع آب قرار دارد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتر پیدا می‌کند که بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه که در آن مجموعه مخازن مانند زنجیره‌ای به هم پیوسته عمل می‌کنند، مطرح باشد. هدف اصلی در این مقاله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنه سیروان در طرح انتقال آب از این رودخانه به مناطق گرمسیری غرب کشور، توسط روش هوشمند شبیه‌سازی آنیلینگ می‌باشد. همچنین، بمنظور ارزیابی و مقایسه، نتایج این روش با نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی MODSIM که محور اصلی آن را الگوریتم Out-Of-Kilter تشکیل می‌دهد مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم‌های چند مخزنه، مسائل بزرگ، شبیه‌سازی آنیلینگ.

مقدمه

در سیستم‌های چند مخزنه، هنگامی که تعداد مخازن زیاد است بکارگیری مدل‌های متداول چون برنامه‌ریزی پویا (DP) و برنامه‌ریزی پویای استوکستیک کلاسیک (SDP) بعلت مسئله " نفرین ابعادی" که در این مدل‌ها وجود می‌آید، با مشکل مواجه می‌شود. همچنین در این مدل‌ها مدت زمان زیاد و حافظه بالا برای دستیابی به جواب مورد نیاز بوده که عملاً بکارگیری این روش‌ها را مشکل می‌سازد. به همین منظور تلاش برای توسعه و گسترش فرضیه " جستجوی تصادفی" بکار گرفته شد تا جانشین مناسبی برای روش‌های مذکور در این زمینه گردد. روش شبیه‌سازی آنیلینگ که برای اولین بار توسط کرک پاتریک و همکاران (Kirkpatrick et al.) ارائه شد، یکی از روش‌های جستجوی تصادفی در بهینه‌سازی می‌باشد. این روش سعی دارد تا جواب موجود را با حرکت کردن تصادفی در فضای ممکن جواب‌ها و با استفاده از پارامتری که "الگوی دمایی آنیلینگ" نامیده می‌شود، بهبود بخشد [1]. این جابجایی‌های تصادفی در دماهای بالا تقریباً از مسیر اصلی خود که همان حرکت به سمت مقادیر کاهش یافته در مسائل کمینه‌سازی می‌باشد، منحرف شده و جهش‌هایی نیز رو به بالا دارند. هر چه دما کاهش می‌یابد انتقالات تصادفی در مسیر اصلی خود، که حرکت به سوی جواب بهینه می‌باشد، گام برمی‌دارند. مجموعه درجه حرارت اولیه، تابع سرد کردن، طول دوره و شرایط توقف "الگوی آنیلینگ" خوانده می‌شود [2].

بنابراین الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ یک روش جستجوی محلی است که از افتادن در دام بهینه موضعی بوسیله پذیرفتن انتقالات رو به بالا (افزایش تابع هدف) با احتمالی نسبت داده شده به آن جلوگیری می‌کند. در این الگوریتم در ابتدا جواب اولیه تولید شده، پس از آن جوابی تصادفی در همسایگی جواب اولیه انتخاب و با احتمالی که بین صفر و یک قرار دارد، پذیرفته می‌شود [3]. اگر چه روش شبیه‌سازی آنیلینگ از نظر کدنویسی و همچنین مفاهیم مربوطه بسیار ساده‌تر در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد، لیکن خالی از انتقاد نیست. یکی از معایب عمده این روش صرف زمان زیاد برای رسیدن به جواب است، بخصوص هنگامیکه از تکنیک استاندارد بولتزمن استفاده شود.

کانها و سوزا (Cunha & Sousa, 1999) از این روش در طراحی بهینه شبکه آب شهری استفاده کردند. دیکسون و همکاران (Dixon et al., 1999) شبیه‌سازی آنیلینگ را برای استقرار بهینه سایت‌های نمونه‌برداری در رودخانه بکار گرفتند. کانها (Cunha, 1999) از آن در بهینه‌سازی مدیریت آبهای زیرزمینی کمک گرفت. تیگاواراپو و سیمونوویک (Teegavarapu & Simonovic, 2002) از آن برای بهره‌برداری بهینه از سیستم چهار مخزنه با هدف آبیاری و برقایی بهره‌جستند. منعم و نامداریان در سال ۲۰۰۰ از این روش جهت تهیه برنامه توزیع آب در کانال‌های آبیاری استفاده

^۱ کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

^۲ عضو هیات علمی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر



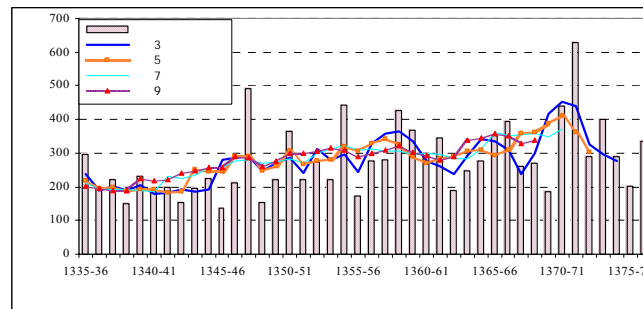
کردند. منعم و موحد در سال ۲۰۰۲ آنرا برای تهیه مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانالهای آبیاری بکار گرفتند. برهانی و شهیدی در سال ۲۰۰۶ از آن به همراه روش فازی برای تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده کردند. در این مقاله نشان می‌دهیم که چگونه روش ابتکاری الگوریتم آنیلینگ قادر به حل مسائل چند بعدی با تابع هدف خطی و غیر خطی می‌باشد. برای این منظور سیستم چند مخزنه سیروان در بزرگترین پروژه آبی کشور یعنی انتقال آب به مناطق گرمسیری غرب ایران انتخاب شده است. هدف از حل این مسئله تخصیص بهینه منابع آبی موجود منطقه جهت تأمین نیازها و مصارف بویژه در سالهای کم آبی و بحرانی می‌باشد. لازم است عنوان گردد که کلیه مدل‌های ارائه شده در این مقاله با کامپیوتر شخصی پنتیوم IV، پردازشگر ۲۸۰۰ مگا هرتز و ۲۵۶ مگابایت از حافظه اجرا گردیده است و زمانهای اجرای ارائه شده بر مبنای آن می‌باشند.

کاربرد در مسأله تک مخزنه

به منظور انتخاب یک روش مناسب برای حل چنین سیستم گسترده‌ای، در ابتدا محاسبات بر روی یک مدل تک مخزنه صورت گرفت. برای این منظور سد دز که یکی از بزرگترین سد‌های بتنی-دوقوسی ایران با حجم مخزن ۳۴۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد، انتخاب گردید. مخزن دز یکی از مخازن چند منظوره می‌باشد که از مهمترین اهداف اولیه این مخزن و سازه‌های جانبی آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کنترل سیلابهای بهاره و جلوگیری از خطرات ناشی از سیل.
- فراهم نمودن آب مورد نیاز جهت مصارف آبیاری و کشاورزی.
- تولید انرژی برقایی.
- تأمین آب جهت صنعت عظیم استان خوزستان.

همچنین جهت مقایسه کارایی روشهای مختلف، دو مدل منظور گردید: مدل کوتاه مدت و مدل بلند مدت. مدل کوتاه مدت تنها برای یکسال و بوسیله متوسط آبدی بلند مدت ماهانه رودخانه در طول ۴۲ سال آماری اجرا شد. اما در مدل بلند مدت از کلیه آمار ثبت شده متوسط ماهانه در طول دوره آماری مفروض استفاده گردید. هر دو مدل برای دو حالت ذخیره اولیه مخزن برابر ذخیره نهایی و همچنین نابرابر با آن اجرا گشتند. شکل (۱) میانگین متحرک ۹ و ۷،۵،۳ ساله آبدی رودخانه دز در محل ورودی به مخزن و همچنین متوسط آبدی سالانه در طول دوره مشاهداتی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از روش هوشمند شبیه‌سازی آنیلینگ با روشهای هوشمند دیگری چون الگوریتم ژنتیک^۱ (GA)، بهینه‌سازی سیستم مورچگان^۲ (ACO) و همچنین روش برنامه‌ریزی پویا^۳ (DP) مقایسه شده است.



شکل (۱) میانگین متحرک ۳ تا ۹ ساله آبدی رودخانه در محل مخزن دز

تطبيق پارامترهای مدل

دمای اولیه

پارامتر دمای اولیه در الگوی آنیلینگ بطریقی محاسبه گردیده است که در مراحل اولیه کاهش دمایی تقریباً تمامی جایجایی‌ها پذیرفته شود. بطوریکه عکس تابع نمایی به توان تغییرات تابع هدف تقسیم بر دمای اولیه تقریباً برابر ۱ شود $(\exp(-\Delta E / T_0) \approx 1)$. در واقع دمای اولیه با محاسبه متوسط تغییرات در تابع هدف برای تعدادی جایجایی تصادفی اولیه از رابطه (۲) که از رابطه (۱) استخراج شده است، بدست می‌آید [4].

$$x_0 = \exp\left(\frac{-\overline{\Delta E}^{(+)}}{T_0}\right) \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta E}^{(+)}}{\ln(x_0^{-1})} \quad (2)$$

در رابطه (۱) x_0 یا ضریب پذیرش، نشاندهنده تعداد جایجایی‌های پذیرفته شده از میان جایجایی‌های انجام شده، می‌باشد. در معادلات فوق E نماینده تابع انرژی و یا بهتر بگوییم همان تابع هدف می‌باشد. در مدل‌های بهینه‌سازی حاضر ضریب پذیرش (X_0) ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

¹ Genetic Algorithm

² Ant Colony Optimization

³ Dynamic Programming



دمای نهایی

معیار توقف حاصل نشدن بهبود در تابع هدف پس از چند دما که به شرط توقف جانسون معروف است، لحاظ گردید.

طول زنجیره مارکف

L_k که نشاندهنده طول زنجیره مارکف در مرحله k -ام می‌باشد، تا حد زیادی به سایز مسأله، یعنی تعداد متغیرهای آن، بستگی دارد. لذا L_k مستقل از مرحله k می‌باشد. در مطالعات حاضر این پارامتر از میان مقادیر مختلف در نظر گرفته شده برای آن، و از طریق تحلیل حساسیت انتخاب شده است.

تابع سرد کردن

در ابتدا تابع هندسی درج شده در رابطه (۳) که اولین بار توسط کرک پاتریک و همکاران معرفی و لارهون و آرتز (Laarhoven & Aarts, 1987) از آن با عنوان الگوی ساده^۱ یاد می‌کنند، در محاسبات لحاظ گردید. ولی همانطور که در مراحل بعدی نیز ذکر خواهد شد از توابع لگاریتمی نیز استفاده گردید [5].

$$T_{k+1} = \alpha.T_k \quad (3)$$

معیار پذیرش

در الگوریتم آنیلینگ در هر مرحله تغییر مکان، دو جواب موجود می‌باشد. جواب اول که جواب اصلی یا در واقع همان جواب جاری ما می‌باشد و دومین جواب، جواب تغییر یافته یا جواب کارکننده می‌باشد. هر کدام از جوابها انرژی وابسته به خود دارند که در واقع قوت و توانایی جواب بدست آمده را نشان می‌دهد. در مسائل کمینه‌سازی هرچه انرژی جواب مذکور کمتر باشد، جواب حاصله قابل قبول تر می‌باشد. پس از آن جواب تغییر یافته با جواب جاری مقایسه شده و در صورت بهتر بودن جایگزین آن می‌شود. در صورتیکه جواب بدست آمده بدتر از جواب فعلی باشد، احتمال پذیرش جواب جدید توسط معیار پذیرش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورتیکه احتمال پذیرش آن بیشتر از عددی تصادفی بین صفر و یک باشد، مانند حالت قبل جایگزین جواب فعلی می‌شود [6].

$$P_{T_k} \{accept j\} = \begin{cases} 1 & \text{if } E(j) \leq E(i) \\ \exp\left(\frac{-\Delta E}{T_k}\right) & \text{if } E(j) > E(i) \end{cases} \quad (4)$$

جواب تغییر یافته تصادفی

جواب تغییر یافته بصورت تصادفی از رابطه (۵) حاصل می‌گردد که در این رابطه α_k^i پارامتری در بعد i و در مرحله k -ام می‌باشد. β متغیر تصادفی بین -1 و $+1$ بوده و $\text{Gam}(a)$ که تا حد زیادی بستگی به فضای ممکن جواب هر پارامتر داشته و با تحلیل حساسیت و از میان مقادیر مختلف در نظر گرفته برای این پارامتر انتخاب می‌گردد. همانطور که بیشتر نیز عنوان گردید یکی از معایب روش شبیه‌سازی آنیلینگ صرف زمان زیاد برای رسیدن به جواب بهینه می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل از روش گام حرکت متغیر در مدل‌های مطرح در این مقاله استفاده شده است که نتایج بسیار خوبی حاصل نموده است.

$$a_{k+1}^i = a_k^i + \beta.Gam(a) \quad (5)$$

مدل کوتاه مدت

همانطور که بیشتر نیز توضیح داده شد مدل کوتاه مدت تنها برای یکسال، یعنی متوسط آبدهی ماهانه بلند مدت دوره آماری، منظور گردید. هدف این مدل کمینه ساختن مجموع سالانه مقادیر مجذور کمبود از نیاز می‌باشد. در رابطه (۶) مقدار کل نیاز شرب و کشاورزی منطقه در هر ماه و R نشاندهنده حجم خروجی از مخزن و اختصاص داده شده به نیازهاست. همچنین این موضوع نیابستی نادیده گرفته شود که همواره تأمین نیاز شرب بر تأمین نیاز آبیاری و کشاورزی ارجحیت داشته و می‌بایست با اعتمادپذیری بالاتری تأمین گردد. ولیکن در بررسیهای حاضر به منظور ساده‌سازی بیشتر و مد نظر داشتن این موضوع که هدف اصلی از مقایسه روشهای مختلف در مسأله تک مخزنه نهایتاً ارائه روشی مناسب برای حل مسأله پیچیده چند مخزنه می‌باشد، لذا در کلیه مدل‌های بررسی شده مجموع مقادیر نیاز شرب و کشاورزی بصورت یک نیاز و در واقع با اولویت تأمین یکسان در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t=1}^{12} (TD_t - R_t)^2 \quad t = 1 \dots 12 \\ \text{if } R_t < TD_t, \text{Then } R_t = R_t \\ \text{Else } R_t = TD_t \end{aligned} \quad (6)$$

¹ Simple Schedule



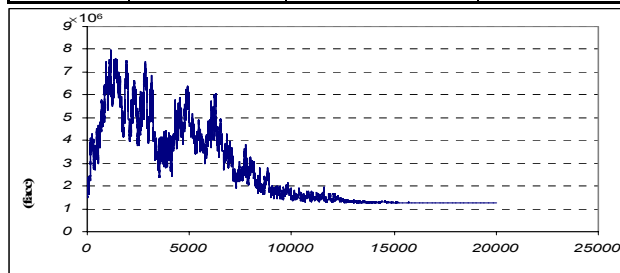
الگوریتمهای بهینه‌سازی نامبرده بر پایه معادله تعادل جرمی^۱ جهت روندیابی جریان رودخانه از مخزن استوار می‌باشند. معادله آورده شده در رابطه (۷) نشان دهنده حجم مخزن در ابتدای دوره در زمان $t+1$ می‌باشد که براساس معادله تعادل و با استفاده از پارامترهای دوره قبلی خود، t ، محاسبه گشته است.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t \quad t=1, \dots, 12 \quad (7)$$

در معادله فوق S_t ذخیره مخزن در شروع دوره t ، Q_t حجم آبدهی ورودی به مخزن در ابتدای دوره t و R_t حجم خروجی از مخزن در دوره t می‌باشد. فرض براین بوده است که در حالت اول ذخیره اولیه مخزن در شروع دوره با ذخیره نهایی در پایان دوره برابر باشد. در حالت دوم این شرط آزاد در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول (۱) نیز مشهود است، کیفیت جوابهای بدست آمده توسط الگوریتم آنیلینگ به مراتب بهتر از روشهای دیگر است. بدلیل اینکه پارامترها و نتیجه نهایی بدست آمده برای تابع هدف در هر تکرار متفاوت (البته با تفاوت ناچیز) می‌باشد، میانگین ۱۰ اجرای مختلف برای ارزیابی و مقایسه نتایج لحاظ گردیده است. شکل (۲) تغییرات تابع هدف پذیرفته شده در هر مرحله از روش آنیلینگ، بدست آمده از بهترین اجرا را نشان می‌دهد.

جدول (۱) نتایج حاصل از روشهای مختلف بر روی مدل کوتاه مدت

سناریو	روش	متوسط اجرا ۱۰ (ثانیه)	زمان اجرا (ثانیه)
سناریو ۱	آنیلینگ	۱/۲۴۳	۳
	سیستم مورچگان	۱/۳۷	۸۸۰
	ژنتیک	۱/۲۷	۵۵
	برنامه‌ریزی پویا	۱/۳۱	۶۰
سناریو ۲	آنیلینگ	۰/۲۱	۴
	سیستم مورچگان	۰/۷۴	۸۷۸
	ژنتیک	۰/۳۱	۵۴
	برنامه‌ریزی پویا	۰/۳۲	۵۹



شکل (۲) تغییرات تابع هدف پذیرفته شده در هر مرحله کاهش دمای آنیلینگ

مدل بلند مدت

مسئله مخزن از نوع مسائل خاص می‌باشد. از اینرو یک روش کلی برای مطالعه رفتار سیستم نمی‌تواند بکار برده شود. مدل‌های حاضر در این مقاله بر پایه بهره‌برداری ماهانه از مخزن استوار هستند. بهره‌برداری در مدل بلند مدت به اینصورت می‌باشد که ذخیره‌ای اولیه در مخزن در نظر گرفته می‌شود. پس از آن حجم ذخیره در پایان دوره که برابر حجم شروع مخزن در ابتدای دوره بعدیست، با احتساب مقادیر ورودی و خروجی از مخزن، توسط معادله تعادل جرمی که در رابطه (۸) ارائه گردیده است، محاسبه می‌شود. تابع هدف این مدل نیز مانند مدل کوتاه مدت بصورت یکطرفه و برابر مجذور مقادیر کمبود از نیاز در طول دوره مذکور می‌باشد.

$$S_{i,j+1} = S_{i,j} + Q_{i,j} - R_{i,j} \quad i=1, \dots, 42; j=1, \dots, 11 \quad (8)$$

$$S_{i+1,1} = S_{i,12} + Q_{i,12} - R_{i,12} \quad i=1, \dots, 41$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{42} \sum_{j=1}^{12} (TD_j - R_{ij})^2 \quad (9)$$

$$\text{if } R_{ij} < TD_j \text{ Then } R_{ij} = R_{ij}$$

$$\text{Else } R_{ij} = TD_j$$

نتایج حاصل از این مدل توسط روشهای مختلف بهینه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که از نتایج نیز استنباط می‌شود روش شبیه‌سازی آنیلینگ قادر به همگرایی به جواب بهینه در مدت زمان کمتری در مقایسه با روشهای GA و DP می‌باشد.

¹ Mass Balance



جدول (۲) نتایج حاصل از روشهای مختلف بر روی مدل بلند مدت

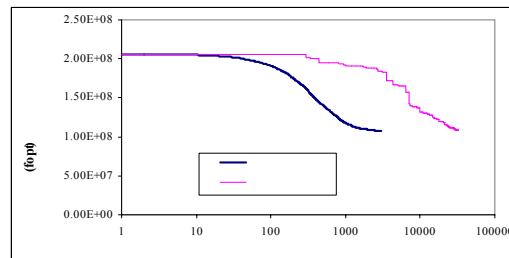
سناریو	روش	متوسط ۱۰ اجرا (۱۰ ^۶)	زمان اجرا (ثانیه)
سناریو ۱	آنیلینگ	۰/۹۳	۱۸۰
	سیستم مورچگان	۱/۷۷	۱۱۸۳۲
	ژنتیک	۰/۹۳	۲۹۶۲
	برنامه‌ریزی پویا	۰/۹۳	۳۱۴
سناریو ۲	آنیلینگ	۰/۸۴	۱۵۸
	سیستم مورچگان	۱/۷۱	۱۱۳۹۱
	ژنتیک	۰/۹	۲۸۴۳
	برنامه‌ریزی پویا	۰/۹۱	۳۱۸

دو تابع دمایی لگاریتمی نشان داده شده در رابطه (۱۰) [7] نیز بکار گرفته شدند لیکن بهبود مؤثری در نتایج مشاهده نگردید.

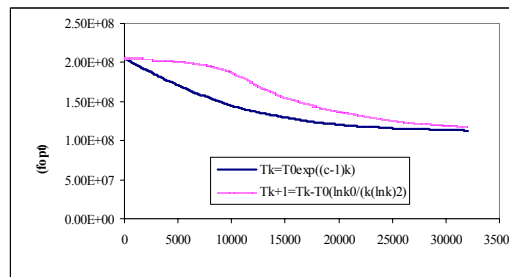
$$T_k = T_0 \exp((c-1)k) \quad (10)$$

$$T_{k+1} = T_k - T_0 \frac{\ln k_0}{k(\ln k)^2}$$

شکل (۳) و شکل (۴) به ترتیب مقایسه نتایج حاصل از روش آنیلینگ و روش الگوریتم ژنتیک و همچنین تغییرات تابع هدف با استفاده از توابع لگاریتمی نشان داده شده در رابطه (۱۰) را نشان می‌دهد.



شکل (۳) مقایسه نتایج روش الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی آنیلینگ بر روی تابع هدف f



شکل (۴) مقایسه نتایج روش شبیه‌سازی آنیلینگ با تابع دمایی لگاریتمی

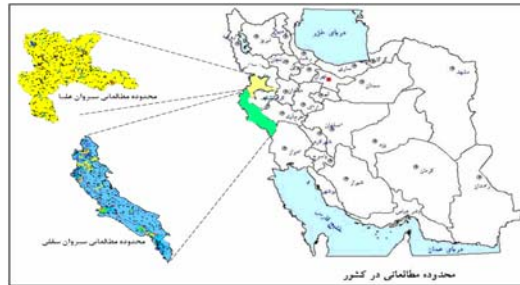
نتایج بدست آمده در جدول (۲) مؤکد کارایی مؤثر و بالای الگوریتم آنیلینگ در مقایسه با دیگر روشهای هوشمند بهینه‌سازی و همچنین روش برنامه‌ریزی پویا می‌باشد. اگر چه این روش از نظر نتیجه نهایی تابع هدف، کمتر و یا برابر با دیگر روشهاست، ولیکن از نظر زمان اجرا به مراتب کمتر از روشهای نامبرده می‌باشد.

مدل MODSIM

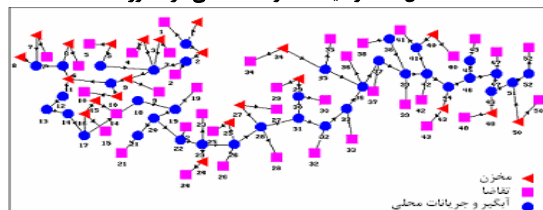
مدل Modsim یک مدل شبیه‌سازی- بهینه سازی می‌باشد. این مدل اولین بار توسط دکتر جان لبدی (John Labadie) در اواسط دهه ۱۹۷۰ از دانشگاه ایالتی کارادو (CSU) ارائه گردید و در حال حاضر نیز دفتر آباد سازی امریکا از آن جهت طرحهای بهره‌برداری از حوضه رودخانه Snake استفاده می‌شود [8]. همچنین این مدل در تعدادی از سیستمهای رودخانه‌ای پیچیده مانند حوضه رودخانه Riogrande (Graham et al,1986)، حوضه رودخانه Snake (Frevert et al,1994)، حوضه رودخانه Guiem در کره جنوبی (Labadie & Fontane,2002) و تعدادی حوضه دیگر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم افزار با استفاده از الگوریتم شبکه جریان، توزیع جریان را در سیستم رودخانه‌ای شبیه‌سازی می‌نماید. سیستم رودخانه‌ای با مجموعه‌ای از معادلات خطی بیان می‌گردد، یکی از این معادلات تابع هدف می‌باشد که بطور ساده مجموع کلیه اتصالات شبکه جریان است که هر اتصال با توجه به هدف کاربر در یک هزینه‌ای ضرب می‌گردد. بطور کلی هزینه هر اتصال برابر با میزان اولویت در تخصیص می‌باشد.

کاربرد در مسئله چند مخزنه

مدل بر روی سیستم پیچیده‌ای با ۲۲ مخزن و تعداد زیادی محل مصرف بکار گرفته شد. شکل (۵) موقعیت محدوده مطالعاتی بر روی نقشه ایران را نشان می‌دهد. در مجموع سیستم شامل ۵۲ گره می‌باشد که در واقع نقاط بین جریان‌ها در قسمت‌های مختلف سیستم می‌باشند. با توجه به گستردگی و عظمت سیستم تخصیص منابع حاضر، نیاز به اطلاعات مکانی وسیعی بوده که در عمل مدل را در رده مدل‌های پیچیده تخصیص منابع آب قرار می‌دهد. امروزه در دسترس بودن کامپیوتر با سرعت بالا و ظرفیت مناسب، امکان اجرای چنین مدل‌های پیچیده‌ای با طول دوره شبیه‌سازی دلخواه را فراهم می‌سازد. شکل (۶) توپولوژی سیستم مذکور را نشان می‌دهد.



شکل (۵) موقعیت محدوده مطالعاتی در کشور



شکل (۶) شماتیک طرح سیروان

مدل بهره‌برداری

همانطور که شکل (۶) نیز نشان می‌دهد، سیستم مخازن بهم پیوسته بصورت شبکه‌ای از گره‌ها و اتصالات بین آنها قابل توصیف می‌باشد. گره‌ها در واقع نقاط ذخیره و یا ورود جریان‌ها محلی بین نقاط و اتصالات نشاندهنده خروجی مخازن، جریان‌های رودخانه‌ای و کانال می‌باشند. توجه عمده در این مسئله بر حداکثر استفاده از پتانسیل آبی رودخانه سیروان و دیگر رودخانه‌های مرزی جهت رفع نیازهای منطقه می‌باشد. در رابطه (۱۱) مجموعه اتصالات شبکه، N مجموعه گره‌ها، O_i مجموعه تمامی اتصالاتی که از گره i خارج می‌شوند (اتصالات خروجی)، L_i مجموعه اتصالاتی که به گره i وارد می‌شوند (اتصالات ورودی)، x_{ij} جریان در اتصال l در دوره t ، u_{ij} حد پایین و بالایی جریان در اتصال l می‌باشد. سری تاریخی بکار گرفته شده در این مدل ۴۶ سال می‌باشد. در شروع روند شبیه‌سازی از مخازن، حجم ذخیره در ابتدای سال آبی (مهر ماه)، در دو حالت ثلث حجم نرمال مخازن و همچنین دو سوم آن اجرا گردیده است که با توجه به اینکه مدل از نوع بهینه‌سازی است، تفاوت محسوسی در نتایج رخ نداد. با توجه به عملکرد قابل قبول مدل آنلینینگ در مسئله تک مخزنه، در سیستم پیچیده حاضر نیز از روش مذکور جهت تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از مخازن استفاده گردید و در پایان نتایج حاصله با مدل MODSIM مقایسه شد. در این مدل نیز همانند مدل تک مخزنه دو رویکرد لحاظ گردید.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{n=1}^{n=52} \sum_{j=1}^{j=12} \sum_{i=1}^{i=42} (TD_{nj} - R_{nj})^2 \\
 & \text{if } R_{nj} < TD_{nj} \text{ Then } R_{nj} = R_{nj} \\
 & \text{Else } R_{nj} = TD_{nj} \\
 & \text{subject to :} \\
 & \sum_{n=1}^{n=52} \sum_{j=1}^{j=12} \sum_{i \in O_i} x_{ij} - \sum_{k \in I_i} x_{ki} = 0 \\
 & l_i \leq x_{ij} \leq u_{ij} \text{ for all } l \in A, i = 1..42, j = 1..12
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

رویکرد اول

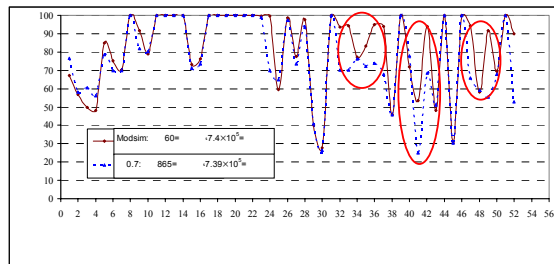
در این مدل، بهره‌برداری از مخازن بصورت منفرد و تک به تک صورت گرفته است. شبیه‌سازی مخازن با مقادیر خروجی فرضی اولیه برابر ۰، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ برابر تقاضای مورد نیاز در نقاط مصرف اجرا شده است. تعداد متغیرهای تصمیم در این مسئله برابر ۲۸۷۰۴ متغیر می‌باشد. جدول (۳) نتایج حاصل از رویکرد اول را نشان می‌دهد.



جدول (۳) نتایج رویکرد اول با مقادیر خروجی فرضی اولیه

$(\times 10^5)$		/	/	/	
	/	/	/	/	/
()					

با توجه به نتایج مندرج در جدول (۳)، بهترین جواب بوسیله خروجی فرضی اولیه به مقدار ۰,۷ برابر نیاز مصرفی نقاط بدست آمده است. لذا نتیجه حالت مذکور با نتیجه بدست آمده از مدل MODSIM، با فرضیاتی کاملاً مشابه به مدل آنیلینگ مقایسه شده است. شکل (۷) مقایسه اعتمادپذیری کمی دو مدل منتخب شرح داده شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز واضح است علیرغم نتیجه بالاتر، مدل MODSIM قادر به تأمین بیشتر نیازهای سیستم، بخصوص در منطقه سیروان جنوبی بوده است. البته نایبستی فراموش گردد که تابع هدف مدل MODSIM خطی می‌باشد.



شکل (۷) مقایسه اعتمادپذیری کمی مدل آنیلینگ و Modsim

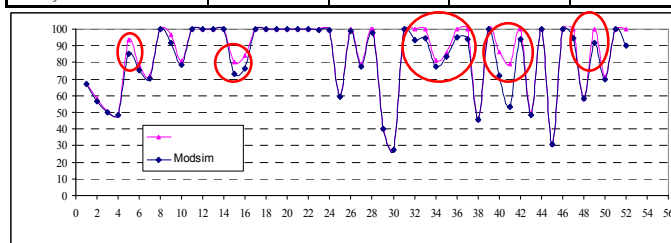
رویکرد دوم

در رویکرد دوم، برخلاف رویکرد اول سیستم بصورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. همانطور که نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد در این حالت مدل آنیلینگ

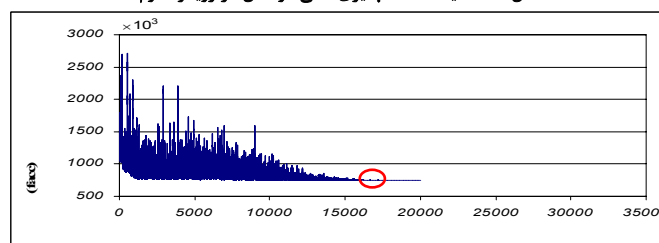
در هر دو تابع هدف خطی و غیر خطی نتایجی بهتر از مدل MODSIM ارائه داده است. شکل (۸) تغییرات تابع هدف در مدل غیر خطی و شکل (۹) مقایسه اعتمادپذیری کمی مدلها را نشان می‌دهد.

جدول (۴) مقایسه نتایج حاصل از رویکرد دوم مدل چند مخزنه

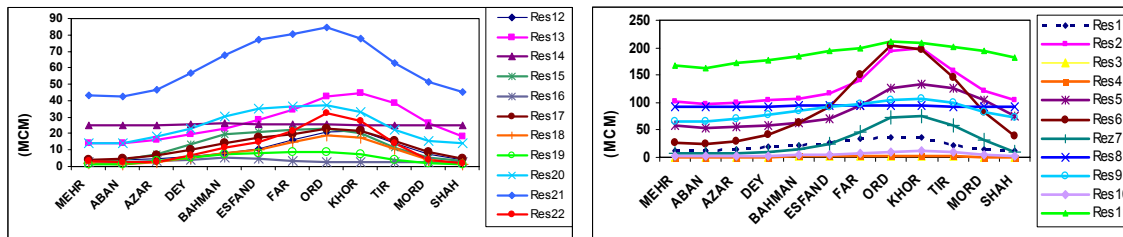
	MODSIM			
$\sum_{i=1}^{46} \sum_{j=1}^{12} (TD_j - R_{ij})$	/ *		/ *	
$\sum_{i=1}^{46} \sum_{j=1}^{12} (TD_j - R_{ij})^2$	/ *		/ *	



شکل (۸) مقایسه اعتمادپذیری کمی دو مدل در رویکرد دوم



شکل (۹) تغییرات تابع هدف در مدل غیرخطی رویکرد دوم



شکل (۱۰) مقادیر حجم ذخیره مخازن جهت بهره‌برداری بهینه

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی و مدیریت بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه موضوع مهمی است که بایستی مورد توجه برنامه‌ریزان منابع آب قرار گیرد. به خوبی استنباط می‌شود که بهبود هر چند جزئی در عملکرد این سیستمها منجر به سود و منفعت قابل ملاحظه می‌شود. نتایج بدست آمده از روش شبیه‌سازی آنیلینگ بیانگر آنست که برای دستیابی به جواب بهینه توسط روش مذکور، تعیین مناسب گام حرکت در فضای ممکن جواب از اهمیت بسزایی برخوردار است و چنانچه این تغییرات درون دامنه مناسبی نباشد ممکن است جواب حاصله بهینه محلی باشد. مدل ارائه شده در این مقاله نمایانگر قابلیت بسیار خوب روش آنیلینگ در حل مسائل منابع آب و بویژه بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. لذا با توجه به کدنویسی آسان و نتایج خوب این روش می‌توان بعنوان اولین انتخاب در حل مسائل بهینه‌سازی از آن بهره جست.

مراجع

1. Ingber, L., (1989) Very fast simulated re-annealing, Math. Comput. Modeling, Vol.12, 8, 967-973.
2. Kalai, A., Vempala, S., (2004) Simulated Annealing for Convex Optimization.
3. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. (1982) Optimization by Simulated Annealing. Science, Vol.220, 671-680.
4. Johnson, D.S., Aragon, C.R., McGeoch, L.A. and Schevon, C., (1986) Optimization by Simulated Annealing: an Experimental Evaluation, List of Abstracts, Workshop on Statistical Physics in Engineering and Biology, Yorktown Heights, April 1984, revised version, 1986.
5. Ingber, L., (1993) Simulated annealing: Practice versus theory, Math. Comput. Modeling, Vol. 18, 11, 29-57.
6. Van Laarhoven, P.J.M., Aarts, E.H.L. (1987) Simulated Annealing Theory and Application
7. Ingber, L., (1996) Adaptive Simulated Annealing (ASA), Control and Cybernetics, on "Simulated Annealing Applied to Combinatorial Optimization."
8. Labadie, J. W., (2004) Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the- Art Review, Jour. Of Water Resources Plan. And Mang. ASCE.