تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوازدهم، شماره ۱بهار ۱۳۹۵
Volume 12, No. 1, Spring 2016 (IR-WRR)
۱۱۰-۱۲۱

معرفی روش مجانب برای اعتبارسنجی جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی تبرید شبیه‌سازی شده و کاربرد آن در بهبود عملکرد کانالهای توزیع آب، آبیاری سطحی و مدیریت مخزن

سید اسداله محسنی موحد[۱*]، محمود اکبری[۲]، علیرضا عمادی[۳]، جواد مظفری[۴] و زهرا یزدی[۵]

چکیده

روش تبرید شبیه‌سازی شده (SA) یکی از روش‌های فراابتکاری کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفی پیچیده است. در این روش پس از اجرای نهایی الگوریتم برای مسأله مورد نظر، همچون سایر روشهای فراابتکاری بایستی اعتبار جوابها ارزیابی شود. به لحاظ فقدان یک روش معتبر محققین معمولاً جوابها را با وضع موجود مقایسه می‌کنند. در این مقاله روشی بنام روش مجانب ارائه شده که در آن مشخص می‌شود جوابهای SA به بهینه سراسری به‌طور مجانبی همگرا خواهند شد و مقداری را نیز برای بهینه سراسری ارائه می‌کند. برای نمایش دقت روش، در ۵ مساله نمونه که دارای حل تحلیلی است روش مجانب بین حداقل ۰/۶ درصد تا حداکثر ۱۰ درصد و به طور متوسط با حدود ۵ درصد خطا، تخمین قابل قبولی از بهینه سراسری ارائه داد. همچنین ۵ مدل بهینه‌سازی ICSSDOM، OPTIFUR، SOP-SA، BISEDOM و ARM-SA به ترتیب برای بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری، آبیاری جویچه‌ای، بهره‌برداری بهینه از مخزن، آبیاری نواری و توزیع رسوب مخزن سدها با روش SA، ارائه شده توسط محققین این تحقیق با این روش اعتبارسنجی شد. نتیجه آنکه از روش مجانب می‌توان برای اعتبارسنجی جواب‌های SA برای مسائلی که معیار معتبری برای مقایسه و ارزیابی جوابها وجود ندارد استفاده کرده و صحت آنها را بررسی نمود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، تبرید شبیه‌سازی شده، بهینه سراسری، اعتبارسنجی، روش مجانب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۲/۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک، ایران.
۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۴- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک، ایران.
۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
*- نویسنده مسئول

Introduction of Asymptote Method for Validation of SA Optimization Algorithms Solutions and its Application in Improving the Performance of Water Distribution Channels, Surface Irrigation and Reservoir Management

S. A. Mohseni movahed [1] , M. Akbari[2] , A. Emadi [3], J. Mozafari[4] and Z. Yazdi[5]*

Abstract

SA method is known as one of the most effective meta-heuristic numerical methods for solving complex optimization problems. In this method after determining the appropriate combination of SA parameters and the final implementation of the algorithm for the problem considered, the results should be evaluated using an appropriate approach. Hence in this paper an initiative method named the asymptote is presented and it is shown how the SA algorithm will converge to the asymptote of the global optimum and also presents a value for global optimum. The method is applied to solve 5 problems which have analytical solutions and it led to a reasonable estimate of the global optimum where the minimum, maximum and average error was 0.6, 10, and 5 percent, respectively. Also 5 models of ICSSDOM, OPTIFUR, SOP-SA, BISEDOM and ARM-SA is verified by asymptote method for optimization of hydraulic performance of water distribution channels, furrow irrigation, optimal operation of reservoir, border irrigation and sediment distribution of dam reservoir, respectively. As a result, asymptote method can be used for validation of SA algorithm results when there is not valid criteria to assess them.

Keywords: Optimization, SA method, Global optimum, Validation, Asymptote method.

Received: April 29, 2015
Accepted: January 22, 2016

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Arak University, Arak, Iran. Email: movahed244@yahoo.com
2- Ph.D. Student of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Sari Agriculture and Natural Resources University, Sari, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Arak University, Arak, Iran.
5- M.Sc. Graduated, Drainage and Irrigation Engineering, Bu Alisina University, Hamadan, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

مدیریت و بهره‌برداری بهینه آب از مخزن سد و شبکه آبیاری و تحویل و توزیع بهینه آن در مزارع و ارتقای راندمانهای آبیاری ضروری و مستلزم بهینه‌سازی توابع هدفی متشکّل از شاخص‌های کمّی است. این توابع از نظر ریاضی معمولاً ناپیوسته، غیر صریح و مشتق‌ناپذیرند. روش بهینه‌سازی تبرید شبیه‌سازی شده (SA) یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با فرآیند فیزیکی تبرید، شبیه‌سازی شده است. ابتدا این روش برای شبیه‌سازی فرآیند فیزیکی تبرید در صنعت پایه‌گذاری شد و مفهوم بهینه‌سازی نداشت و اولین بار توسط Kirkpatrick et al. (1983) در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و به‌تدریج توسط محققین بعدی الگوریتم‌های تکامل‌یافته‌تری از آن توسعه یافت. در حال حاضر این روش یکی از روش‌های فراابتکاری با الگوریتم تصادفی هوشمند است که برای مسائل مختلف بهینه‌سازی ترکیبی کاربردی رو به توسعه دارد. از ویژگیهای مهم الگوریتم SA توانایی گریز از گرفتارشدن در کمینه محلی هنگام یافتن کمینه سراسری است؛ این امر با پذیرش احتمالی تعدادی انتقال که منجر به افزایش تابع هدف می‌گردند امکان‌پذیر است.

لازم به ذکر است که این الگوریتم نیز همچون سایر الگوریتم‌های شبیه‌سازی شده با پدیده‌های فیزیکی یا طبیعی نظیر الگوریتم ژنتیک دارای یک سری پارامترهای کنترلی مطابق با طبیعت پدیده شبیه‌سازی شده است. از آنجا که روش SA بر مبنای فرایند فیزیکی تبرید (Annealing) در صنعت شبیه‌سازی شده است، دارای تعدادی پارامتر کنترلی متناسب با این فرایند می‌باشد که مهمترین آنها پارامتر کنترلی دما است که با همین نام در الگوریتم بکار می‌رود و فقط نقش یک پارامتر کنترلی را دارد بدون اینکه درکاربردهای SA مفهوم دما را داشته باشد.

یکی از نقاط ضعف، یا به عبارت بهتر نقطه‌ای برای شروع تحقیقات در روشهای بهینه‌سازی فراابتکاری، عدم وجود اثبات ریاضی برای همگرایی این الگوریتم‌ها به جواب بهینه سراسری می‌باشد. به همین دلیل محققین در استفاده از این روشها معمولاً مسأله را به دفعات و با مقادیر مختلف پارامترها حل نموده و نتایج را با جوابهای تحلیلی مقایسه می‌کنند تا از درستی روش اطمینان حاصل کنند (Merikh Bayat, 2012).

تحقیقات نشان داده است یکی دیگر از ویژگیهای بارز SA آن است که این الگوریتم دارای یک توزیع ایستایی است که پس از یک سری انتقال‌های تصادفی، احتمال بولتزمن تقریباً یکسان می‌شود و زمانی که پارامتر کنترلی دما به سمت صفر میل کند، توزیع احتمال دارای یک توزیع یکنواختی بوده و جوابهای الگوریتم SA به‌طور مجانبی به سمت بهینه سراسری همگرا خواهد شد (Egles,1990).

Mitra et al. (1986) ثابت کردند که الگوریتم SA به سمت بهینه سراسری همگرایی دارد و اگر زمان اجرای الگوریتم و تعداد تکرارها به سمت بی‌نهایت میل کند جوابهای الگوریتم با احتمال یک با جواب بهینه سراسری همگرا می‌شود. Laarhoven et al. (1992) نشان دادند هر چه تعداد تکرارها افزایش یابد جواب حاصل به بهینه سراسری نزدیک‌تر خواهد شد. Lundy and Mees (1986) بطور تئوری ثابت کردند که جوابهای الگوریتم SA به سمت جواب بهینه سراسری همگرایی دارند.

نتایج تحقیقات فوق که همه حاکی از همگرایی جوابها با بهینه سراسری در ازای بی‌نهایت تکرار است گرچه از جنبه نظری بسیار مهم است لیکن تا کنون هیچگونه راهبرد عملی مفیدی از آن استخراج نشده است. در این مقاله ضمن مشاهده و تأیید نتایج تحقیقات فوق از این خاصیت روشی برای برآورد بهینه سراسری و مقایسه جواب‌های حاصله با آن پیشنهاد گردیده است. این روش می‌تواند برای اعتبارسنجی جواب‌های شبیه‌سازی تبرید درحل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی که حل تحلیلی نداشته و معیار مناسب بهتری برای ارزیابی موجود نباشد مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تئوری روش مجانب

در ابتدا الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله مورد نظر نوشته می‌شود، در این تحقیق از الگوریتم رسمی شبیه‌سازی تبرید استفاده شده که نمودار گردشی آن در شکل ۱ ارائه شده است. در این روش کیفیت جواب‌ها نسبت به پارامترهای موجود در روش شبیه‌سازی تبرید حساس می‌باشند و تعیین پارامترهایی که جواب‌های مناسبی را ایجاد نمایند بسیار مهم است. پارامترهای به کار رفته در الگوریتم رسمی شبیه‌سازی تبرید شامل T_0: دمای اولیه، T_f: *دمای* نهایی، B:فاکتور کاهش دما، *Epoch*: طول دوره، *It*: حداکثر تکرارهای پذیرفته شده در هر دما و *EBS*: خطای مجاز درمحاسبات شرط تعادل می‌باشد. با این توضیح که m شمارنده طول دوره، r شمارنده مراحل کاهش دما، S و S' جواب اولیه و ثانویه و رابطه

$\frac{\left|\overline{FF}_e - \overline{FF}_g\right|}{\overline{FF}_g} < EBS$ بیانگر شرط تعادل ویلهلم و وارد می‌باشد.

پس از آن‌که ترکیب مناسب پارامترهای شبیه‌سازی تبرید در تحلیل حساسیت تعیین گردید اجرای نهائی الگوریتم برای مسأله مورد نظر انجام می‌گیرد. در این مرحله نیاز است تا بتوان به نحوی جواب‌های حاصله را ارزیابی و معتبر بودن آن‌ها را مشخص نمود. روش‌های معمول در این زمینه عبارتند از: ۱- مقایسه جواب‌ها با سطح عملکرد موجود سیستم مورد نظر. ۲- مقایسه جواب بدست آمده با جواب‌های نظیر حاصل ازروش‌های انجام شده دیگر که قبلاً اعتبارشان مورد تأیید قرار گرفته است. ۳- مقایسه جواب حاصله با حد پایین غیر امکان‌پذیر. ۴- استفاده از مجموعه داده‌ها. روش اول تنها زمانی توصیه می‌شود که دسترسی به هیچ روش دقیق‌تری امکانپذیر نباشد. کاربرد روش دوم نیز به لحاظ اینکه وجود حالت‌های معتبر مشابهی که بتوان مسئله مورد نظر را با آن مقایسه کرد بسیار نادر است به سختی امکانپذیر است و بالاخره در استفاده از روش سوم معمولاً کدنویسی مشکل و حتی گاهی غیر ممکن است. به‌علاوه حد یا معیار مقایسه در این روش چنانچه از نامش پیداست ممکن است خیلی دور از بهینه سراسری باشد. و بالاخره در استفاده از روش چهارم غالباً مجموعه داده‌های مسأله مورد نظر ما موجود نیست.

از این رو در این مقاله سعی شده است روشی مستقل و مبتنی بر اصول ریاضی و بر اساس ساختار خود الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تحت عنوان روش مجانب ارائه گردد، بطوری که برای هر نوع مسئله بهینه سازی و تحت هر شرایطی برای اعتبارسنجی جواب‌های شبیه سازی تبرید قابل استفاده باشد. به عبارت دیگر در این روش نشان داده می‌شود که شبیه‌سازی تبرید ماهیتاً می‌تواند خود را اعتبارسنجی کند. همان‌طور که گفته شد، از نظر تئوری ثابت شده است الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به سمت بهینه سراسری همگرائی داشته و اگر زمان اجرای الگوریتم و به تبع آن تعداد تکرارها به سمت بی‌نهایت میل کند الگوریتم صد در صد با بهینه سراسری به طور مجانبی همگرا خواهد شد. از این خاصیت روشی برای برآورد بهینه سراسری و مقایسه جواب‌های حاصله با آن پیشنهاد می‌شود.

۲-۲-مراحل روش مجانب

گام اول- با افزایش دمای اولیه در پارامترهای تنظیم شده، الگوریتم را اجرا نموده و بدین ترتیب تعداد تکرارها افزایش یافته و میدان وسیع‌تری از انتقال‌های رو به پایین ایجاد خواهد شد. مقادیر بهبود یافته تابع هدف و تکرارهای پذیرفته شده تا رسیدن به دمای نهایی استخراج می‌شود.

گام دوم- مقادیر بهبود یافته تابع هدف، در دامنه انتخابی به عنوان متغیر مستقل و تکرارهای پذیرفته شده به‌عنوان متغیر وابسته با مدل تابع معکوس[1] در رگرسیون ساده[2] مدل می‌شود. لذا بایستی در برنامه‌نویسی کاربرد روش شبیه‌سازی تبرید، تمهیدات لازم برای گزارش تکرارهای پذیرفته شده در مقابل مقادیر بهبود یافته تابع هدف در یک فایل خروجی انجام گرفته باشد. برای این منظور می‌توان از نرم‌افزارهایی نظیر Statgraphics، SPSS یا Table Curve استفاده کرد. اگر ضریب تبیین مناسبی به‌دست آمد محاسبات ادامه می‌یابد در غیر این صورت به گام اول بازگشته و با افزایش دمای اولیه یا کاهش دمای نهایی عملیات تکرار می‌شود تا این که ضریب تبیین مناسبی به‌دست آید.

گام سوم- با رسیدن به یک ضریب تبیین مورد قبول مقادیر a و b ضرایب ثابت تابع معکوس را از جدول تحلیل رگرسیون استخراج کرده و مدل رگرسیونی تابع معکوس به صورت $1/N=a+b(FF)$ تشکیل می‌شود. در این رابطه FF مقدار تابع هدف و N تعداد تکرارهای پذیرفته شده می‌باشد. حال در ازای $N=\infty$ خط مجانب تابع معکوس را محاسبه کرده و به عنوان برآوردی از بهینه سراسری بپذیریم.

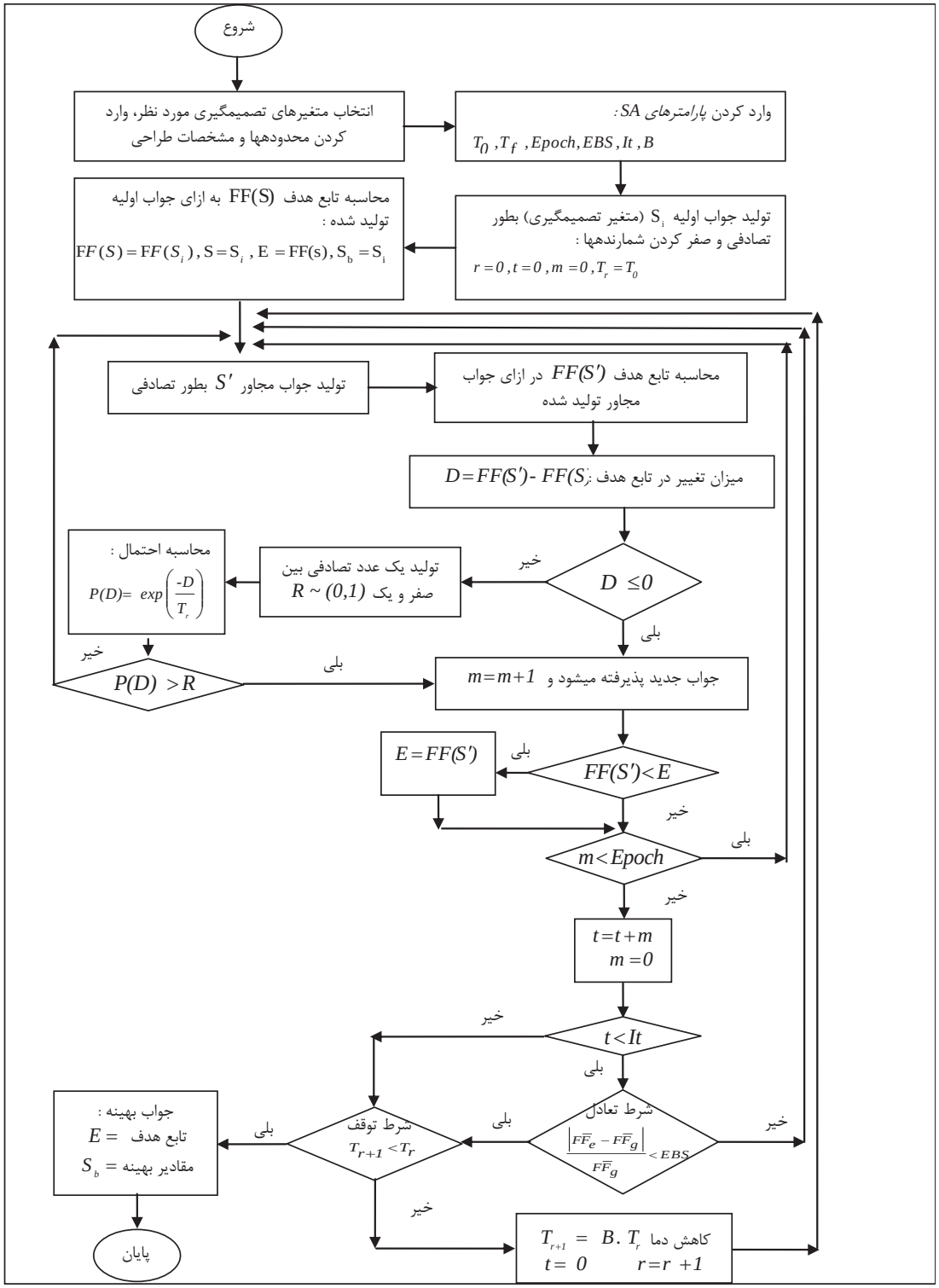
$$\lim_{N\to\infty} 1/N = a + b(FF) \Rightarrow FFglobal \approx -a/b \qquad (۱)$$

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که مقدار تخمینی برای بهینه سراسری که به روش فوق به‌دست می‌آید بایستی در ازای یک ضریب رگرسیون خوب بدست آمده باشد؛ در غیر این‌صورت می‌توان با افزایش بیشتری برای دمای اولیه یا کوچکتر کردن دمای نهایی (افزایش تعداد تکرارها) الگوریتم را مجدداً به اجرا در آورد تا خط مجانب به اندازه کافی به بهینه سراسری نزدیکتر شده و ضریب همبستگی در رگرسیون تابع معکوس رابطه (۱) تا حد مطلوب افزایش یابد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-اعتبارسنجی روش مجانب

برای بررسی دقت روش پیشنهادی، پنج مساله نمونه که دارای حل تحلیلی می‌باشند را با روش شبیه‌سازی تبرید حل نموده و روش مجانب را برای آن‌ها انجام داده و در نهایت جواب‌ها را با حل تحلیلی مقایسه می‌نماییم. این مسایل به ترتیب با روش‌های تحلیلی ترسیمی، شرایط کان‌وتاکر، تصویر گرادیان روزن، سیمپلکس و



شکل ۱- نمودار گردشی روند اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

سیمپلکس دوگان حل شده‌اند (Shahidipoor, 1994) این مسایل با الگوریتم رسمی شبیه‌سازی تبرید نیز حل شده و هر دو سری جواب‌ها به انضمام تابع هدف، قیود و پارامترهای شبیه‌سازی تبرید به تفکیک مساله نمونه در جدول ۱ درج گردیده است.

در ستون جواب با روش شبیه‌سازی تبرید، زمان رسیدن به جواب (T_{CPU}) و تعداد تکرارها (ITT) نیز قید شده است. از مقایسه جواب‌های تحلیلی با جواب‌های شبیه‌سازی تبرید، دقت بالای جواب‌ها که با سرعت بالایی نیز به دست آمده‌اند مشهود است.

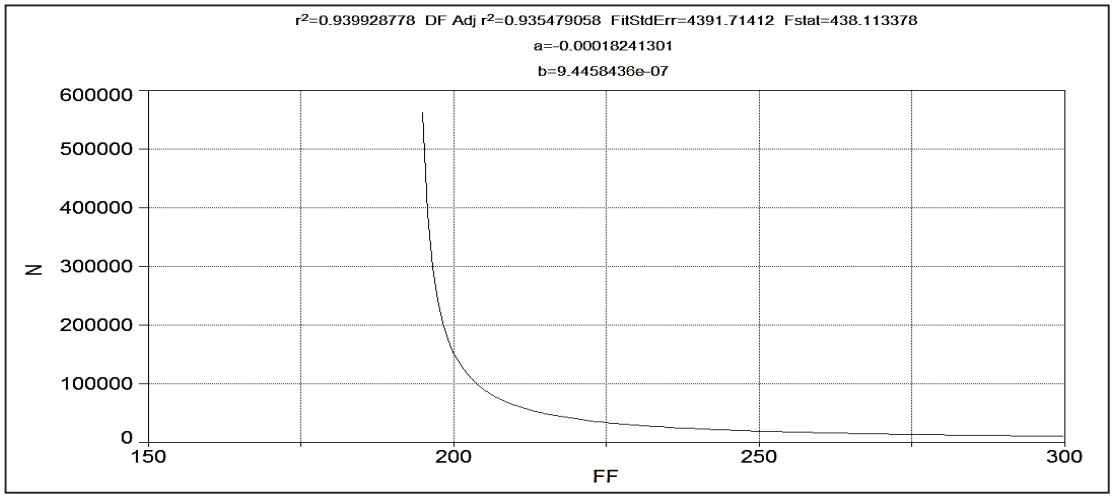
برای بررسی روش پیشنهادی مجانب، در مثال‌های فوق، روش مجانب را انجام داده و جواب‌ها با حل تحلیلی (بهینه واقعی) مقایسه می‌شوند. چون بهینه سراسری مسایل مورد نظر مشخص است، برای هر مساله نمونه مقادیر بهبود یافته تابع هدف و تکرارهای پذیرفته شده به ازای آن از فایل خروجی استخراج و از طریق رگرسیون تابع معکوس با استفاده از نرم افزار Table Curve مدل گردید. این محاسبات به تفکیک مساله نمونه در جدول ۲ ارائه شده است. به عنوان مثال در مساله نمونه ۱، با استفاده از نقاط مربوط به انتقال‌های رو به پایین تحلیل همبستگی انجام گرفت. نتیجه آن که با ضریب تبیین ۰/۹۸ بهینه سراسری تخمینی با درصد خطای ۱۰ درصد (که هر چه به صفر نزدیکتر باشد بهتر است)، کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شد. به عنوان نمونه در شکل ۲ برای مساله نمونه ۵، نتایج این آزمون همبستگی نشان داده شده است.

جدول ۱- تابع هدف، قیود و جواب‌ها به تفکیک مساله نمونه

مثال	تابع هدف (FFmin)	قیود	جوابهای تحلیلی	جواب با روش SA	پارامترهای SA
۱	9.82X1X2+2X1	2≤ X1 ≤14 0.2≤ X2 ≤0.8 X1X2≥1.593 X1X2 (X 2 + X22) < 47.3	X1=5.44 X2=0.293 FFmin=26.53	X1=5.44 X2=0.292 FFmin=26.53 TCPU=7sec ITT=68923	T0=1000 Tf=1, It=180 B=0.99 Epoch=20 Ebs=0.001
۲	X12+X22+X32+40X1 +20X2-3000	X1-50≥0 X1+X2-100≥0 X1+X2+X3-150≥0	X1=50 X2=50 X3=50 FFmin=7500	X1=50.005 X2=49.995 X3=50.001 FFmin=7500 TCPU=3sec ITT=155339	T0=1000 Tf=1, It=150 B=0.99 Epoch=30 Ebs=0.001
۳	X12+ X22-2X1-4X2	X1≥0 X2≥0 X1+4X2-5≤0 2X1+3X2-6≤0	X1=0.7647 X2=1.0588 FFmin=-4.06	X1=0.76364 X2=1.05909 FFmin=-4.06 TCPU=2sec ITT=72240	T0=500 Tf=10 , It=80 B=0.99 Epoch=20 Ebs=0.001
۴	3X1+10X2+X3+2X4+ 3X5	Xi≥0 25X1+30X2+6X3+X4+6X5=30 8X1+15X2+2X3+X4+4X5=10	X1=1.15 X2= X3= X4=0 X5=0.19 FFmin=4.04	X1=1.1 X2= X3=X4=0 X5=0.18 FFmin=3.8 TCPU=5sec ITT=61920	T0=1000 Tf=1, It=80 B=0.99 Epoch=30 Ebs=0.001
۵	20X1+16X2	X1≥2.5 X2≥6 2X1+X2≥17 X1+X2≥12	X1=5 X2=7 FFmin=212	X1=5 X2=7 FFmin=212 TCPU=8sec ITT=108870	T0=10000 Tf=0.1, It=180 B=0.99 Epoch=10 Ebs=0.001

جدول ۲- محاسبات تخمین بهینه سراسری با روش مجانب به تفکیک مساله نمونه

مثال	a	b	بهینه واقعی	بهینه تخمینی	ضریب تبیین	درصد خطا
۱	-۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۱	۲۶/۵۳	۲۳/۷	۰/۹۸	-۱۰
۲	$-۱/۱۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۳ \times ۱۰^{-۷}$	۷۵۰۰	۷۵۴۵/۱	۰/۹۷	۰/۶
۳	$۱/۵۵۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۶۸۹ \times ۱۰^{-۴}$	-۴/۰۶	-۴/۲۲	۰/۹۲	-۴/۱
۴	-۰/۶۶	۰/۱۷	۴/۰۴	۳/۷۹۲	۰/۹۸	-۶/۱۳
۵	$۱/۸۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۹/۴۵ \times ۱۰^{-۷}$	۲۱۲	۱۹۳/۱	۰/۹۴	-۹



شکل۲- نمودار بهبود تابع هدف و تکرارهای رو به پایین مسأله نمونه ۵

۳-۲-کاربرد روش مجانب در حل مسائل بهینه‌سازی

مهمترین دستاورد این پژوهش این است که از روش مجانب می‌توان برای اعتبارسنجی جواب‌های شبیه‌سازی تبرید برای مسائلی که حل تحلیلی آن وجود ندارد و یا بسیار مشکل بوده و توابع هدف در آن‌ها غیر صریح، ناپیوسته و مشتق‌ناپذیر می‌باشند و معیار مناسب معتبری هم برای مقایسه وجود ندارد ، استفاده کرده و صحت و دقت جواب‌ها را بررسی نمود. بدین ترتیب روش شبیه‌سازی تبرید، می‌تواند خود را اعتبارسنجی کند. از این راهبرد تا به حال در ۵ کار تحقیقاتی که معیار مشابه و معتبری برای مقایسه و اعتبارسنجی جوابها موجود نبوده، به شرح زیر استفاده شده است:

۳-۲-۱- مدل *ICSSDOM*[۳]

Mohseni Movahed (2002) بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری را در شرایط واقعی و غیرماندگار جریان توسط مدل ریاضی ترکیبی توسعه‌یافته ICSSDOM انجام داد. در این مدل از روش بهینه‌سازی SA به صورت یک حلقهٔ داخلی در ترکیب با مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شده است. او برای اعتبارسنجی مدل خود اولین بار روش مجانب را پیشنهاد و مورد استفاده قرار داد.

وی با اشاره به این که مدل‌های ریاضی که از ترکیب مدل‌های هیدرودینامیک و روش‌های بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری ارائه شده‌اند، تا قبل از مدل ترکیبی ICSSDOM منحصر به مدل ICSSPOM[۴] (Monem,1996) می‌باشد و از طرفی مدل ICSSPOM از الگوریتم ژنتیک و تابع هدفی متفاوت استفاده نموده است و لذا امکان مقایسه معتبری بین جوابهای بهینه حاصل از ICSSDOM با ICSSPOM وجود ندارد؛ بویژه آنکه برای جوابهای بهینه در مدل ICSSPOM نیز به غیر از مقایسه با وضع موجود هیچگونه اعتبارسنجی گزارش نشده است. به همین دلیل وی روش مجانب را برای اعتبارسنجی مدل خود پیشنهاد و مورد استفاده قرار داد.

در مدل ICSSDOM شاخص‌های عملکرد کفایت (*MPA*)، راندمان (*MPF*)، عدالت (*MPE*) و پایداری (*MPD*) در تحویل به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته اند. با این هدف که در یک دوره تحویل بر حسب نیاز پایین دست هر یک از آبگیرهای کانال، چهار معیار زیر در ترکیب مناسبی در یک تابع هدف بطور همزمان و با توجه به شرایط واقعی بهینه شوند (Mohseni Movahed and Monem,2007)

$$MPA=\frac{1}{T}\sum_{T}\frac{1}{N}\sum_{N}(PA) \qquad \begin{cases} if: QD<QR \\ PA=\dfrac{QD}{QR} \end{cases} \quad \begin{cases} if: QR<QD \\ PA=1 \end{cases} \tag{۲}$$

$$MPF=\frac{1}{T}\sum_{T}\frac{1}{N}(PF) \qquad \begin{cases} if: QD>QR \\ PF=\dfrac{QR}{QD} \end{cases} \quad \begin{cases} if: QD<QR \\ PF=1 \end{cases} \tag{۳}$$

$$MPE = \frac{1}{T}\sum_{T} CV_N\left(\frac{QD}{QR}\right) \quad (۴)$$

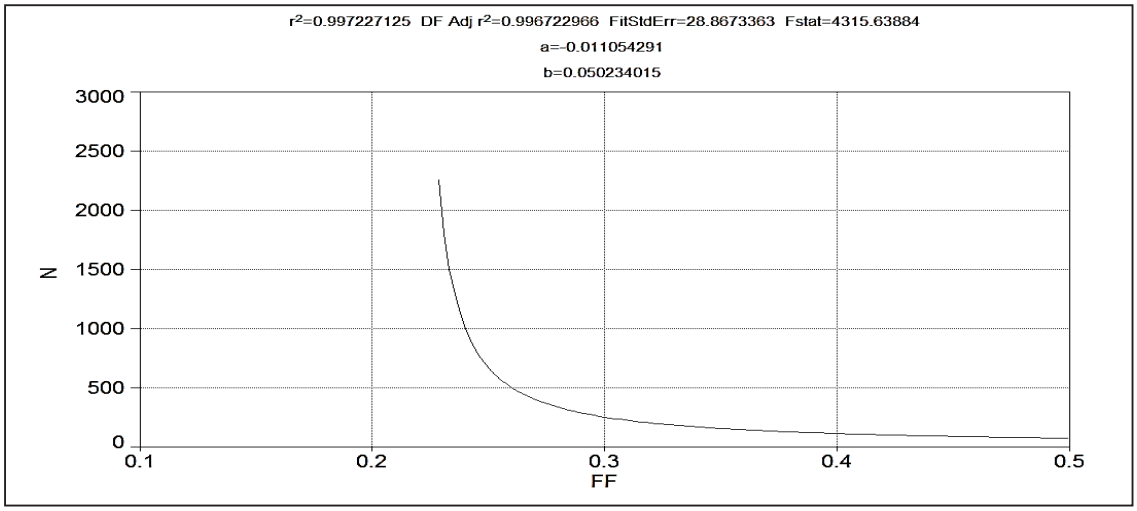
$$MPD = \frac{1}{N}\sum_{N} CV_T\left(\frac{QD}{QR}\right) \quad (۵)$$

در این روابط MPA، MPF، MPE و MPD به ترتیب عبارتند از متوسط کفایت، راندمان، عدالت و پایداری در تحویل، در طول دوره بهره برداری می باشند. QR دبی مورد تقاضای هر دریچه، QD دبی واقعی تحویلی به هر دریچه، N تعداد دریچه های آبگیر و T تعداد گامهای زمانی مناسب در یک پریود تحویل است و از رابطه $T = t_{dur} / \Delta t$ محاسبه می شود. t_{dur} و Δt به ترتیب طول دوره بهره برداری و طول گام زمانی محاسبات هیدرولیکی برحسب ساعت است. $CV_T\left(\frac{QD}{QR}\right)$ و $CV_N\left(\frac{QD}{QR}\right)$ نیز به ترتیب عبارتند از ضریب تغییرات زمانی و ضریب تغییرات مکانی نسبت $\frac{QD}{QR}$.

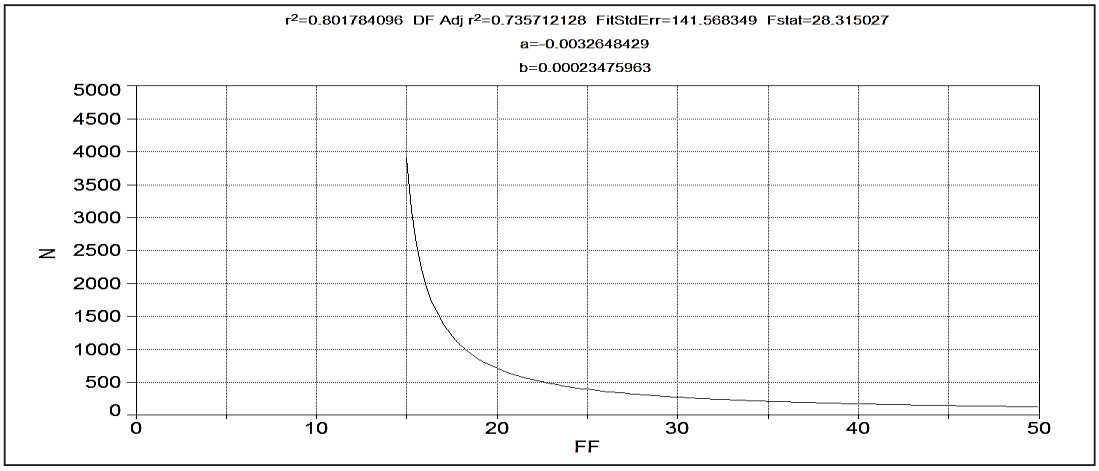
از آنجا که مقدار ایده‌آل شاخص های کفایت و راندمان تحویل، ۱ و مقدار ایده آل شاخص های عدالت و پایداری تحویل، صفر است لذا تابع هدفی که مقدار کمینه آن مقدار بهینه شاخص های فوق را ارائه می‌دهد به‌صورت ترکیب خطی زیر است:

$$FF = C_1(1-MPA) + C_2(1-MPF) + C_3 MPE + C_4 MPD \quad (۶)$$

مقادیر Ci در رابطه فوق ضرایب وزنی جملات تابع هدف هستند که بستگی به اهمیت نسبی شاخص ها دارند. راه کار رسیدن به این هدف، تنظیم بهینه دریچه‌های آبگیر و سازه های کنترل است که به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در فرایند بهینه‌سازی تعیین می‌شود. به منظور آزمون و ارزیابی مدل تهیه شده از داده‌های واقعی یک کانال توزیع‌کننده از شبکه آبیاری دز استفاده شد و برای اعتبارسنجی نتایج مدل، علاوه بر مقایسه با وضع موجود از روش ریاضی مجانب نیز استفاده به عمل آمد. از طیف گسترده انتقال‌های رو به پایین از ابتدا تا انتها مواردی انتخاب گردید (با توزیع مناسب) و تحلیل همبستگی انجام گرفت. نتیجه آن بود که با ضریب تبیین ۰/۹۹ جوابهای بهینه ICSSDOM با تقریب ۹ درصد بیشتر از بهینه سراسری حاصل از روش مجانب تخمین زده شد. در شکل ۳ نتایج این آزمون همبستگی به صورت نمودار نشان داده شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که مدل ICSSDOM قادر است پاسخ‌های معتبری را با صحت و دقت کافی در زمان نسبتاً کوتاهی ارائه نماید. پس از ارائه مدل مذکور توسط Mohseni Movhed (2002) و آزمایش آن روی کانال E1R1 از شبکه آبیاری دز، Mohseni (2007) و Norouzpour (2008) نیز به ترتیب به ارزیابی و بهبود عملکرد کانالهای E1R5 و E1L4 در شبکه آبیاری دز پرداخته‌اند. در این تحقیقات نیز برای اعتبار سنجی نتایج مدل، علاوه بر مقایسه با وضع موجود از روش ریاضی مجانب استفاده به عمل آمد. به عنوان نمونه در شکل ۴ نمودار مجانب برای نتایج تحقیق Norouzpour (2008) نشان داده شده است.



شکل ۳- همبستگی بهبود تابع هدف و تکرارهای رو به پایین برای مدل ICSSDOM و کانالE1R1



شکل ۴- همبستگی بهبود تابع هدف و تکرارهای رو به پایین برای مدل ICSSDOM و کانال E1L4

۳-۲-۲- مدل OPTIFUR [۵]

Yazdi (2008) مدل شبیه‌سازی OPTIFUR را به منظور ارزیابی، طراحی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های آبیاری شیاری ارائه نمود که در این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان سطحی، از معادله موازنه حجم و برای بهینه‌سازی از روش SA استفاده شده است. این مدل براساس متغیرهای تصمیم‌گیری متفاوت (دبی کل سیستم آبیاری، طول شیار، شیب طولی شیار و فواصل شیار)، پارامترهای بهینه طراحی را در شرایط و محدودیت‌های واقعی طرح ارائه می‌نماید. همچنین به منظور بهینه‌سازی، پنج شاخص عملکرد راندمان کاربرد *(Ea)* ، راندمان آب مورد نیاز *(Er)*، نسبت نفوذ عمقی *(DPR)*، نسبت رواناب پایاب *(TWR)* و یکنواختی توزیع *(DU)* در یک تابع هدف به طور توأم و هم زمان تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است که مقدار ایده‌آل شاخص‌های *Ea*، *DU* و *Er* عدد ۱ و مقدار ایده‌آل شاخص‌های *DPR* و *TWR* صفر می‌باشد. بنابراین تابع هدفی که در شکل کمینه‌سازی بتواند مجموعه شاخص‌های فوق را بهینه کند، بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$FFmin = C_1(1 - E_a) + C_2(1 - DU) + C_3(1 - E_r) + C_4\,DPR + C_5\,TWR \quad (۷)$$

نتایج مدل به منظور بهینه‌سازی عملکرد سیستم آبیاری شیاری در یک شیار آزمایشی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از طراحی بهینه پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری با استفاده از مدل OPTIFUR نشان داد که با طراحی بهینه سیستم‌های آبیاری شیاری، می‌توان راندمان‌های آبیاری، یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری را در مقایسه با وضع موجود سیستم درحد قابل قبولی ارتقا بخشید. در مدل OPTIFUR برای اعتبارسنجی از روش مجانب استفاده شده است. به طوری که نزدیکی جواب‌های مدل به جواب‌های روش مجانب با ۱/۷ درصد خطا گواهی بر اعتبار این مدل تلقی گردیده است. (مراجعه به جدول ۳).

۳-۲-۳- مدل SOP-SA [۶]

Khademi (2010) مدل SOP-SA را به منظور بهره برداری بهینه از مخزن ارائه نمود. و از ترکیب مدل SOP و روش SA استفاده نمود. هدف تحقیق ایشان تدوین سیاستی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن و کمینه‌سازی کمبودها بود. دو مدل SOP و SOP-SA برای سد مخزنی درودزن فارس با دوره آماری ۲۸ ساله (۳۳۶ ماه) و با هدف تنظیم آب مورد نیاز کشاورزی اراضی پایاب و تامین آب مورد نیاز شهری و صنعتی به اجرا درآمدند و خروجی های دو مدل بررسی شدند. تعداد ماههایی که درصد تامین ماهانه بسیار کم است از ۲۲ ماه در مدل SOP به ۱۰ ماه در مدل SOP-SA کاهش یافت. در مجموع مدل تهیه شده ایشان این قابلیت را دارد که خروجی‌های مخزن را کنترل کند و میزان برداشت بهینه آب از مخزن را در ماههای مختلف سال به نحوی مشخص کند که در سالهای خشک با کمترین مقدار کمبود آب و خسارت مواجه شود. Khademi (2010) روش مجانب را برای اعتبارسنجی مدل خود به کار گرفتند و اختلاف بسیار کم (۰/۱ در صد) جواب مدل SOP-SA با این روش را به عنوان معیاری برای دقت مدل خود عنوان کرد. (مراجعه به جدول ۳). برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن از الگوریتم SA استفاده شده است که در آن تابع هدف به صورت رابطه (۸) می‌باشد که کمینه‌سازی آن مدنظر است.

$$FF = \sum_{y=1}^{N}\sum_{t=1}^{12}((R_{y,t} - TD_{y,t}) / D_{max})^2 \qquad (۸)$$

که در این رابطه، FF: مقدار تابع هدف، y: شمارنده‌ی سال، N: تعداد سال‌های آماری، t: شمارنده‌ی ماه، $R_{y,t}$: حجم برداشت یا رهاسازی از مخزن سد در ماه t از سال y، $TD_{y,t}$: نیاز کل (مجموع نیاز کشاورزی، شهری و صنعتی) در ماه t از سال y و D_{max}؛ حداکثر نیاز آبی ماهانه در طول دوره‌ی بهره‌برداری می‌باشد. مقادیر رهاسازی از مخزن سد در ماه‌های مختلف سال به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. مهمترین قید اصلی موجود در یک مسئله‌ی بهره‌برداری از مخزن سد، رابطه ۸ می‌باشد. از جمله قیدهای اصلی دیگر می‌توان به حد پایین و حد بالا برای هر یک از متغیرهای تصمیم گیری شامل حداقل و حداکثر مجاز حجم مخزن و حداقل و حداکثر مجاز رهاسازی مخزن برای انتخاب تصادفی اشاره نمود.

در نهایت پس از انجام آزمون حساسیت، ترکیب مناسب پارامترها برای اجرای نهایی الگوریتم تعیین شد و از روش مجانب برای اعتبارسنجی جواب‌های بدست آمده از مدل SOP-SA استفاده گردید. بدون پرداختن به جزییات و با توجه به جدول ۳، با توجه به نزدیک بودن مقادیر تابع هدف بدست آمده از مدل و روش مجانب می‌توان گفت که مدل تهیه شده قابلیت یافتن نقطه‌ی نزدیک به بهینه سراسری را دارد و جواب به‌دست آمده صحیح می‌باشد. مقدار تابع هدف بر اساس سیاست بهره‌برداری استاندارد ۱۲/۳۹۵ به‌دست آمده است که الگوریتم SOP-SA توانسته تابع هدف را به میزان ۳۳/۱ درصد نسبت به الگوریتم SOP کاهش دهد.

۳-۲-۴- مدل BISEDOM [۷]

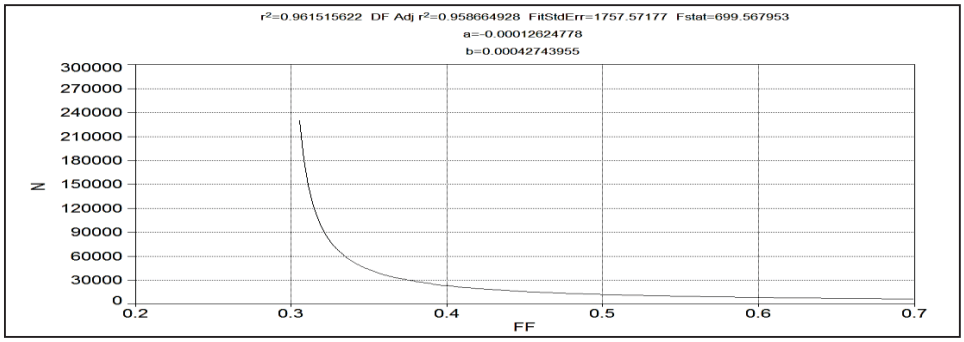
در مدل BISEDOM که توسط (Akbari,2011) برای بهینه‌سازی، طراحی و ارزیابی آبیاری نواری ارائه شده است، از ترکیب روش بهینه‌سازی SA و معادله موازنه حجم استفاده شده است. این مدل براساس متغیرهای تصمیم‌گیری متفاوت (دبی ورودی، طول، عرض و شیب نوار)، پارامترهای بهینه را در شرایط و محدودیت‌های واقعی طرح ارائه می‌نماید. همچنین به منظور بهینه‌سازی، پنج شاخص عملکرد راندمان کاربرد (Ea)، راندمان آب مورد نیاز (Er)، نسبت نفوذ عمقی (DPR)، نسبت رواناب پایاب (TWR) و یکنواختی توزیع (DU) در یک تابع هدف به طور توأم و هم زمان تعریف شده‌اند. از آن جایی‌که رابطه تابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری در این مدل، یک رابطه پیچیده و غیرصریحی است که تنها از طریق شبیه‌سازی و استفاده از روشهای بهینه‌سازی غیر کلاسیک امکان‌پذیر است؛ از این رو، در مدل BISEDOM، از روش بهینه‌سازی SA که یک روش عددی با ساختار تصادفی هوشمند می‌باشد، استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی نتایج مدل، در بخش طراحی و ارزیابی، اعداد حاصل شده برای راندمان‌ها با مدل شناخته شده SIRMOD مقایسه شده و مشاهده شد نتایج حاصل از دو مدل بسیار نزدیک به هم می‌باشد و در بخش بهینه‌سازی از روش ریاضی مجانب استفاده شد. دلیل استفاده از روش مجانب برای اعتبارسنجی مدل‌های OPTIFUR و BISEDOM بدین صورت بیان شده که مدل‌هایی که قبل از دو مدل مزبور برای آبیاری شیاری و نواری نوشته شده‌اند، مانند مدل معروف SIRMOD راندمان‌ها را به طور انفرادی در نظر می‌گیرند، به علاوه در این مدل‌ها فرآیند بهینه‌سازی صورت نمی‌گیرد. لذا امکان قیاس بین اعداد حاصل شده از بخش بهینه‌سازی مدل‌های OPTIFUR و BISEDOM با مدل‌های دیگر وجود ندارد. توانایی بالای SIRMOD در شبیه‌سازی و ارائه نتایج به صورت جدول و گرافیک بر کسی پوشیده نیست؛ لیکن این مدل نمی‌تواند بهینه‌سازی صورت دهد. در حالی که در مدل‌های OPTIFUR و BISEDOM راندمان‌ها به طور توأم در نظر گرفته شده و در یک تابع هدف بهینه می‌شوند. لذا نمی‌توان جواب‌های این دو مدل را با مدل‌های دیگر مقایسه نمود. به همین منظور برای اعتبارسنجی جوابهای بهینه از روش مجانب استفاده گردید.

برای اعتبارسنجی بخش بهینه سازی مدل BISEDOM، از طیف گسترده انتقال‌های رو به پایین از ابتدا تا انتها مواردی انتخاب گردید (با توزیع مناسب) و تحلیل همبستگی انجام گرفت. نتیجه آن بود که در مدل BISEDOM، با ضریب تبیین ۰/۹۷۳ بهینه BISEDOM با تقریب ۹/۸ درصد کمتر از بهینه سراسری حاصل از روش مجانب تخمین زده شد. در شکل ۵ نتایج این آزمون همبستگی به صورت نمودار همبستگی نشان داده شده است.

۳-۲-۵- مدل ARM-SA [۸]

این مدل که توسط Emadi et al. (2012) ارائه شده است، کاربرد الگوریتم SA در واسنجی روش تجربی کاهش سطح در توزیع رسوبات در مخزن سدها را بیان می‌کند. روش کاهش سطح یکی از رایج‌ترین روش‌های تجربی در تعیین توزیع رسوبات در مخازن می‌باشد. در این روش، مخازن به ۴ نوع تقسیم‌بندی شده که برای هر یک از آنها پارامترهای c، m و n ضرایب ثابتی هستند که با توجه به نوع مخزن ارایه شده است.



شکل ۵- همبستگی بهبود تابع هدف و تکرارهای رو به پایین برای مدل BISEDOM

جزییات بیشتر و مراحل تعیین توزیع رسوب در ایـــن روش تـــوسط Emadi et al. (2012) تشریح شده است. در این پژوهش بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی SA و روش تجربی کاهش سطح دو برنامه کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شد. سپس با ترکیب این دو برنامه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به‌دست آمد که توانایی تعیین پارامترهای بهینه روش تجربی کاهش سطح را دارد. در واقع با این مدل پارامترهای بهینه روش کاهش سطح بصورتی تعیین می‌شوند که کمترین اختلاف بین حجم برآوردی و واقعی وجود داشته باشد. در این تحقیق c، m و n متغیرهای تصمیم می‌باشند؛ که برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها تابع هدف به صورت جذر میانگین مربعات خطا با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$FF = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(V_{h_i} - V_{c_i}\right)^2}{n}} \qquad (۹)$$

که در این رابطه، FF، تابع هدف؛ n، تعداد ترازها در منحنی سطح– حجم– ارتفاع؛ V_{h_i}، حجم واقعی مخزن بر اساس اطلاعات هیـدروگرافی در تراز iام و V_{c_i}، حجم محاسباتی مخزن بـــر اساس روش تجربی کاهش سطح در تراز iام می‌باشد. مدل تهیه شده برای سد مخزنی کرج با سه دوره اطلاعات اندازه‌گیری شده سطح– حجم– ارتفاع مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از دو دوره اول اطلاعات واقعی، پارامترهای بهینه روش تجربی کاهش سطح بدست آمد و نحوه کارایی الگوریتم SA در تعیین بهینه سراسری با روش مجانب اعتبارسنجی شد. مقادیر بهینه c، m و n به ترتیب ۰/۰۵۲، ۰/۸۳۶ و ۱۴/۲۳۴ به دست آمد. به منظور نشان دادن قابلیت پارامترهای بهینه در افزایش دقت پیش‌بینی، توزیع رسوب در دوره سوم، اطلاعات واقعی با پارامترهای معمول و بهینه محاسبه و نتایج آنها با مقادیر واقعی مقایسه شد. نتایج نشان داد استفاده از پارامترهای بهینه، مقدار خطا در پیش‌بینی توزیع رسوب را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. اختلاف بین حجم برآوردی و واقعی مخزن سد کرج در حالت استفاده از پارامترهای بهینه در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۵۴ و ۲۰ درصد نسبت به پارامترهای معمول کاهش می‌یابد. پس از تعیین پارامترهای بهینه، توزیع رسوب در مخزن این سد برای سال‌های آینده پیش‌بینی شده است.

جدول ۳- خلاصه نتایج اعتبار سنجی مدل‌ها با روش مجانب

مدل و محقق	تابع هدف	روش مجانب					تابع هدف	درصد
	وضع موجود	a	B	r^2	FSE*	تابع هدف	مدل	خطا
(Mohseni Movhed, 2002) ICSSDOM	۰/۴۵	-۰/۰۱۱	۰/۰۵۰	۰/۹۹۷	۲۸/۸۷	۰/۲۲۴	۰/۲۴۳	+۹٪
(Mohseni, 2007) ICSSDOM	۲۷/۱	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۸۷۱	۸۲/۸	۱۳/۰۳	۱۴/۳۶	+۱۰٪
(Norouzpour, 2008) ICSSDOM	۳۴/۸۳	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۸۰۲	۱۴۱/۶	۱۳/۹	۱۲/۴۵	-۱۰٪
(Yazdi, 2008) OPTIFUR	۰/۴۵	-۰/۱۱۸	۰/۴۳۱	۰/۷۶۰	۰/۰۱۰	۰/۲۷۴	۰/۲۷۸	+۱/۷٪
(Khademi, 2010) SOP-SA	۱۲/۳۹۵	-۰/۴۴۲	۰/۰۵۴	۰/۹۸۷	۶۶/۹	۸/۲۱۱	۸/۲۲۴	+۰/۱٪
(Akbari, 2011) BISEDOM	۰/۸۱۲	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۴	۰/۹۶۲	۱۷۵۷/۶	۰/۳۵۶	۰/۳۲۱	-۹/۸٪
(Emadi et al., 2012) ARM-SA	۳	-۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۱	۰/۹۵۳	۱۵۶/۵	۱/۱۹۲	۱/۲۴	+۴ ٪

* Fit Standard Error

بدون پرداختن به جزییات و با توجه به جدول ۳، به کمک روش مجانب مشاهده شده است که تابع هدف به سمت نقطه بهینه سراسری ۱/۱۹۲ میل می‌کند. با توجه به نزدیک بودن مقدار تابع هدف به‌دست آمده از مدل با مقدار حاصله از روش مجانب می‌توان گفت که مدل تهیه شده قابلیت یافتن جواب معتبر را دارد و جواب بدست آمده به اندازه کافی به نقطه بهینه سراسری نزدیک می‌باشد. در جدول ۳ خلاصه نتایج اعتبارسنجی مدل‌های ICSSDOM، OPTIFUR، SOP-SA، BISEDOM و ARM-SA با روش مجانب ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

روش مجانب که مطابق با طبیعت الگوریتم SA و بر مبنای اصول ریاضی طرح و پیشنهاد شده، ابزاری است که با دقت قابل قبول بهینه سراسری روش SA را برآورد می‌کند و می‌تواند به عنوان امتیاز SA نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی و فراابتکاری تلقّی شده و نگرانی‌های مربوط به اعتبارسنجی نتایج را به‌ویژه در مواقعی که هیچگونه ملاک و معیار معتبر دیگری برای مقایسه وجود ندارد، مرتفع سازد. این روش در مسایلی که دارای حل تحلیلی می‌باشند بین حداقل ۰/۶ درصد تا حداکثر ۱۰ درصد خطا و به طور متوسط با حدود ۵ درصد خطا، تخمین قابل قبولی از بهینه سراسری را ارائه نمود. روش مجانب ضمن تایید پژوهش های پیشین در ارتباط با همگرایی جوابها به بهینه سراسری در تعداد تکرار بی‌نهایت، مقدار (-a/b) در رگرسیون تابع معکوس را نیز برای این منظور ارائه می‌نماید.

در این پژوهش علاوه بر موارد فوق، کاربرد روش مجانب برای اعتبارسنجی جوابهای ۵ مدل ICSSDOM، OPTIFUR، SOP-SA، BISEDOM و ARM-SA که هـر یک بـرای بهینه‌سازی اهداف خاصی با روش شبیه سازی تبرید توسط محققین متعدد مورد استفاده قرار گرفته است به نمایش گذاشته شده است. توابع هدف در مدل‌های فوق غیر صریح و مشتق ناپذیر بوده و معیار مناسب معتبری هم برای مقایسه و اعتبارسنجی جوابها وجود نداشته است؛ به همین دلیل از روش مجانب استفاده شده است. هدف عمده این پژوهش معرفی روش پیشنهادی و دستاوردهای این تحقیق به جامعه محققین است که اگر مورد تأیید و تکمیل هرچه بیشتر قرار گیرد می‌توان نتیجه گرفت روش SA علاوه بر ویژگیهای مطلوب و شناخته شده، دارای یک ویژگی ممتاز است به‌طوریکه ماهیتاً می‌تواند خود را اعتبارسنجی کند.

پی نوشت‌ها

1-Reciprocal Model
2-Simple Regression
3-Irrigation Conveyance System Simulation Delivery Optimization Model
4-Irrigation Conveyance System Simulation Performance Optimization Model
5-Optimization of Furrow irrigation
6-Standard Operation Policy Simulated Annealing
7-Border Irrigation Simulation, Evaluation, Design and Optimization Model
8-Area Reduction Method Simulated Annealing

۵- مراجع

Akbari M (2011) Development of optimization-simulation model for border irrigation. Msc Thesis, Tehran University (In Persian).

Egles RW (1990) Simulated annealing: a tool for operational research. Eur. ournal of Operational Research 46:271-281.

Emadi A, Khademi M, Mohamadiha A (2012) Application of simulated annealing algorithm in calibration of area reduction method in sediment distribution of dams reservoir. Journal of Investigation of Water and Soil Conservation 4:173-188 (In Persian).

Khademi M (2010) Optimization of reservoir operation by SA algorithm. Msc Thesis, Sari Agriculture Sciences & Natural Resources University (In Persian).

Khademi M, Emadi A, Mohseni Movahed SA (2011) Optimization of reservoir operation by using of SA algorithm and application of asymptote method for its validation. Journal of Watershed Management 3:80-94 (In Persian).

Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP (1983) Optimization by simulated annealing. Journal of Science 220: 671-680.

Laarhoven P J, Aarte EH, Lenstra JK (1992) Job shop scheduling by simulated annealing. Journal of Operation Research 40:113-125.

Lundy M, Mees A (1986) Convergence of an annealing algorithm. Journal of Mathematical Programming 34:111-124.

Merikh Bayat F (2012) Optimization algorithm inspirited from nature. Nas Press, 216p (In Persian).

Mitra D, Romeo F, Sangiovanni-Vincentelli AL (1986) Convergence of finite-time behavior of simulated annealing. Journal of Advances and Applied Probability 18: 747-771.

genetic algorithm. Ph.D. Dissertation, Calgary University. Canada.

Norouzpour S (2008) Assessing impacts of weighting indicators and various operations on optimum performance of irrigation canals using ICSSDOM (case study on E1L4 canal of Dez irrigation project) M.Sc. thesis. Bu Ali Sina University (In Persian).

Shahidipoor M (1994) Optimization (Theory and Practice). Ferdowsi University Press, 680p (In Persian).

Yazdi Z (2008) Developing a mathematical model for design and performance optimization of furrow irrigation using volume balance method and SA optimization technique. M.Sc. Thesis. Bu Ali Sina University (In Persian).

Mohseni N (2007) Determination of the most appropriate weighting coefficient of Indicator for performance optimization of irrigation canals with sensitivity analysis using ICSSDOM Model. M.Sc. Thesis. Bu Ali Sina University (In Persian).

Mohseni Movahed SA (2002) Developing a model for optimization of hydraulic performance of irrigation canals using simulated annealing method and determining relative values of indicators. Ph.D Thesis. Tarbiat Modares University (In Persian).

Mohseni Movahed SA, Monem M (2007) Introducing of a new mathematical method for evaluation and optimization of irrigation canal performance. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources 40:13-25 (In Persian).

Monem MJ (1996) Performance evaluation and optimization of irrigation canal systems using