



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی کرمان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و یکم، شماره سوم، ۱۳۹۳  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## تخمین توزیع رسوب ورودی به مخزن سد کرج با استفاده از انواع الگوریتم‌های توسعه‌یافته جستجوی هارمونی

\*کیانا عالی‌خانی<sup>۱</sup>، کورش قادری<sup>۲</sup> و محمدمهدی احمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان،

<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۲۲

### چکیده

احداث سد روی رودخانه‌ها منجر به رسوب‌گذاری در مخازن سدها شده که این امر مشکلات فراوانی را به بار می‌آورد. پیش‌بینی مقدار و نحوه توزیع رسوب در مخازن برای طراحی و بهره‌برداری از سد، اهمیت فراوانی دارد. یکی از مدل‌های تجربی که پژوهشگران برای تخمین رسوب‌گذاری در مخزن از آن استفاده می‌کنند، روش کاهش سطح می‌باشد. پارامترهای روش تجربی کاهش سطح توسط بولند و میلر از ۳۰ سد آمریکا به دست آمده‌اند. برای تخمین دقیق‌تر مقادیر رسوب ورودی به مخازن در دیگر مناطق باید مقادیر بهینه این پارامترها به دست آیند. در این پژوهش برای محاسبه مقادیر بهینه پارامترهای روش کاهش سطح و تخمین دقیق‌تر رسوبات ورودی به مخزن سد کرج، چند مدل براساس تلفیق روش بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) و انواع بهبودیافته آن مانند الگوریتم‌های GHS، IHS و SAHS با روش کاهش سطح توسعه داده شده است. ابتدا صحت و سقم مدل‌های توسعه داده شده مورد بررسی قرار گرفته و سپس میزان رسوب ورودی به مخزن سد کرج با استفاده از مدل توسعه داده شده تخمین زده شده است. مقایسه آماری روش‌های مختلف توسعه داده شده و روش کاهش سطح با میزان رسوبات واقعی تهنشین شده در سد کرج بیانگر عملکرد بالای روش‌های توسعه داده شده می‌باشد. در بین این روش‌ها، با ترکیب روش کاهش سطح با الگوریتم‌های SAHS و IHS، مقدار خطا ۹۰ درصد کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب‌گذاری، مخزن، روش کاهش سطح، HS، سد کرج

\*مسئول مکاتبه: [kiyanaulikhani@yahoo.com](mailto:kiyanaulikhani@yahoo.com)

## مقدمه

از مهم‌ترین اهداف ساخت مخازن، استفاده از منابع آبی ذخیره شده در درازمدت می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که مخازن در طول دوره بهره‌برداری با آن مواجه هستند ورود رسوبات و ته‌نشین شدن آن‌ها می‌باشد که کاهش عمر مفید مخازن را در پی دارد. همچنین انباشت رسوبات در مخازن، بالادست و پایین دست سد را تحت تأثیر تغییرات زیست‌محیطی قرار می‌دهد (وانگ و هو، ۲۰۰۹). با اطلاع از نحوه توزیع رسوبات و پیش‌بینی آن می‌توان با ضریب اطمینان بالاتری سیاست‌های مربوط به بهره‌برداری از مخزن و تصمیمات لازم در ارتباط با مشکلات ناشی از رسوب‌گذاری را اتخاذ نمود. علاوه بر آن برای تحلیل پایداری سد، محاسبه حجم مفید، تعیین ارتفاع مناسب دریچه‌های تخلیه‌کننده و توربین‌های مولد برق به پیش‌بینی ارتفاع رسوب در پشت دیواره سد و نحوه توزیع رسوب در مخزن سد، نیاز می‌باشد (یونینگان و همکاران، ۲۰۱۰). در ایران حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب از گنجایش مفید سدهای مخزنی به‌خاطر رسوب‌گذاری کاسته می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۰۷). ضروری به‌نظر می‌رسد که وضعیت توزیع رسوب و مقدار رسوب ورودی به مخزن قبل از طراحی و ساخت سد، تخمین زده شود (گیمیر و ردی، ۲۰۱۰).

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی توزیع رسوبات در ترازهای مختلف مخزن وجود دارد. این روش‌ها شامل مدل‌های ریاضی، روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی و مدل‌های آزمایشگاهی می‌باشند (تونیلو و پارکر، ۲۰۰۳). دقت پیش‌بینی مقدار رسوب وارده به مخازن سدها، بستگی زیادی به روش‌های محاسباتی و معادله‌های ارائه شده در این زمینه دارد. مدل‌های آزمایشگاهی به‌علت هزینه‌های سنگین، طولانی بودن مدت انجام و محدود بودن مدل ساخته شده، فقط در بعضی موارد مورد توجه می‌باشند. مدل‌های ریاضی نیز به پارامترهای زیادی نیاز دارند که بیش‌تر این پارامترها در بیش‌تر مخازن به سختی قابل اندازه‌گیری بوده و یا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نشده‌اند اما در صورت وجود این پارامترها، این مدل‌ها نیز از دقت بالایی برخوردار می‌باشند. تاکنون روش‌های تجربی بسیاری برای محاسبه چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها ارائه شده است. دو روش افزایش سطح و کاهش سطح نسبت به سایر روش‌ها متداول‌تر هستند. اساس هر دو روش بر پایه تعدیل سطح اولیه مخزن بر اثر ته‌نشست افقی رسوبات می‌باشد. روش کاهش سطح، اولین بار توسط بورلند و میلر (۱۹۵۸) ارائه شد و سپس توسط مودی اصلاح گردید (صفرزاده و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهشگران بسیاری از این دو روش برای پیش‌بینی و تخمین رسوبات ورودی به مخازن استفاده کرده‌اند. موسوی و صمدی‌بروجنی (۱۹۹۶)، شعبانلو و همکاران (۲۰۰۲)، موسوی و همکاران (۲۰۰۶)، آناندل (۱۹۸۴)

و محمدیها و همکاران (۲۰۱۰) از این روش برای بررسی توزیع رسوب در مخازن استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش تجربی کاهش سطح با کم‌ترین خطا بیش‌ترین تطابق را با توزیع رسوبات دارد. از برتری‌های روش کاهش سطح نسبت به روش‌های دیگر این است که نیاز به داده‌های ورودی کم‌تری دارد اما این روش همه جنبه‌های رسوب‌گذاری در مخزن را پوشش نمی‌دهد. ضرایب به‌کار رفته در این روش به‌صورت تجربی محاسبه شده و ممکن است پارامترهای به‌کار رفته در این روش، مناسب مناطق دیگری نباشد که این موضوع درصد خطای تخمین رسوبات ورودی به مخزن را افزایش می‌دهد. محمدیها و عمادی (۲۰۱۰) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه روش کاهش سطح را به‌دست آوردند که میزان خطا را در سد کارده به‌میزان ۵۰ درصد کاهش دادند.

بنابراین هدف از انجام این پژوهش یافتن مقادیر بهینه پارامترهای روش تجربی کاهش سطح با استفاده از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی (HS)<sup>۱</sup> و انواع توسعه‌یافته‌تر آن مانند الگوریتم جستجوی هارمونی بهبود یافته (HIS)<sup>۲</sup>، الگوریتم جستجوی بهینه سراسری (GHS)<sup>۳</sup> و الگوریتم جستجوی هارمونی تطبیقی (SAHS)<sup>۴</sup> با روش تجربی کاهش سطح برای تخمین دقیق‌تر رسوبات ورودی به سد مخزنی کرج می‌باشد. در این پژوهش توسعه مدل‌های تلفیقی روش کاهش سطح و الگوریتم جستجوی هارمونی و انواع توسعه‌یافته آن در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

**روش کاهش سطح:** روش تجربی کاهش سطح، اولین بار توسط بورلند و میلر (۱۹۵۸) ارائه و سپس توسط مودی اصلاح گردید (صفرزاده و همکاران، ۲۰۰۹). در این روش، توزیع رسوب در مخزن به ضریب شکل مخزن و حجم رسوبات انباشته شده در آن بستگی دارد. ضریب شکل مخزن عبارت است از عکس شیب منحنی ارتفاع-حجم مخزن ( $M$ ) که در یک کاغذ لگاریتمی ترسیم شده باشد. با توجه به مقدار  $M$ ، بورلند و میلر مخازن را به ۴ دسته کلی طبقه‌بندی کردند (شفاعی‌بجستان، ۱۹۹۹). معادله اساسی در روش کاهش سطح به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد:

- 1- Harmony Search
- 2- Improved Harmony Search
- 3- Global Best Harmony Search
- 4- Self Adaptive Harmony Search

$$s = \int_{Y_1}^{Y_2} A dy + \int_{Y_1}^H K dy \quad (1)$$

که در آن،  $s$ : حجم کل رسوبات،  $H$ : عمق اولیه مخزن،  $A$ : سطح مخزن در ترازهای مختلف،  $Y$ : عمق رسوب در پشت سد (قبل از رسوب‌گذاری)،  $a$ : سطح نسبی رسوب به‌ازای مقادیر مختلف عمق نسبی،  $dy$ : جزء ارتفاع و  $K$ : ضریب تناسب برای تبدیل سطح نسبی رسوب به سطح واقعی می‌باشد که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$k = \frac{A}{a} \quad (2)$$

که در آن،  $A$ : سطح اولیه مخزن در تراز  $Y$  می‌باشد. سطح نسبی از رابطه زیر تعیین می‌شود که  $P$  عمق نسبی می‌باشد:

$$a = CP^m (1 - P)^n \quad (3)$$

که در آن، ضرایب ثابت  $m$ ،  $n$  و  $C$  با توجه به تیپ مخزن تعیین می‌گردند. ضرایب رابطه  $a$  در جدول ۱ آمده است (محمدزاده‌هایلی و موسوی، ۲۰۰۹).

جدول ۱- مقادیر ضرایب  $a$

تیپ مخزن	C	m	N
I	۳/۴۱۷	۱/۵	۰/۲
II	۲/۳۲۴	۰/۵	۰/۴
III	۱۵/۸۸۲	۱/۱	۲/۳
IV	۴/۲۳۲	۰/۱	۲/۵

در روش کاهش سطح، برای تعیین چگونگی توزیع رسوب‌گذاری در مخزن ۵ مرحله طی می‌شود که در کتاب‌ها و مقالات علمی معتبر به‌صورت کامل توضیح داده شده است (موسوی و همکاران، ۲۰۰۷). سپس مقادیر رسوب به‌دست آمده از روش کاهش سطح با مقادیر به‌دست آمده از هیدروگرافی مقایسه شده و مقدار انحراف معیار ( $\sigma$ ) طبق رابطه ۴ به‌دست می‌آید.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 / (n-1)} \quad (4)$$

**الگوریتم جستجوی هارمونی:** الگوریتم فراابتکاری<sup>۱</sup> جستجوی هارمونی (HS)، برای اولین بار با الهام از پدیده موسیقی توسط گیم و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شده است. الگوریتم HS در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی عددی برتری‌هایی دارد که از جمله آن می‌توان به توانایی کار با متغیرهای گسسته و احتمال بسیار کم‌تر به دام افتادن در دام نقاط بهینه موضعی اشاره نمود (لی و گیم، ۲۰۰۴). همچنین این الگوریتم از برخی ویژگی‌های سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند حفظ بردارهای قبلی، حفظ حافظه هارمونی از شروع تا پایان و ارزیابی چندین بردار در یک زمان نیز استفاده می‌کند. اما در مقایسه با آن‌ها پیش‌نیازهای ریاضی کم‌تری به‌کار برده و توانایی حل مسایل مختلف بهینه‌سازی مهندسی را دارد (گیم، ۲۰۰۷). مراحل انجام الگوریتم HS به‌شرح زیر می‌باشد:

**مرحله اول- مقداردهی اولیه پارامترهای مسئله و الگوریتم:** پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی شامل اندازه حافظه هارمونی (HMS)<sup>۲</sup>، سرعت بررسی حافظه هارمونی (HMCR)<sup>۳</sup>، سرعت تنظیم قطعات (PAR)<sup>۴</sup>، پهنای باند (BW)<sup>۵</sup> و تعداد تکرار (NI)<sup>۶</sup> می‌باشد (لی و گیم، ۲۰۰۵).

**مرحله دوم- مقداردهی اولیه حافظه هارمونی (HM):**<sup>۷</sup> قبل از این‌که هارمونی جدید ایجاد شود، ماتریس حافظه هارمونی با گروهی از بردارهای جواب (هارمونی) که به‌صورت اتفاقی ایجاد می‌شوند پر می‌شود. در این مرحله به تعداد HMS، بردار جواب در حافظه هارمونی قرار داده می‌شود. به این منظور هر بردار جواب به‌صورت زیر ایجاد می‌شود (انتخابی تصادفی خواهد بود):

$$X_i^j = Lb_{xi} + (Ub_{xi} - Lb_{xi}) * r \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \ \& \ j = 1, 2, \dots, HMS \quad (5)$$

که در آن،  $X_i^j$ : بیانگر متغیر  $i$ ام در بردار جواب  $j$ ام می‌باشد. پارامتر  $r$  عدد یکنواخت تصادفی بوده و دارای مقداری بین صفر و یک می‌باشد.  $Lb$  و  $Ub$  به‌ترتیب کران بالا و کران پایین متغیرها می‌باشد.

- 
- 1- Heuristic
  - 2- Harmony Memory Size
  - 3- Harmony Memory Consideration
  - 4- Pitch Adjusting Rate
  - 5- Band Width
  - 6- Number of Improvisation
  - 7- Harmony Memory

مرحله سوم- ایجاد یک هارمونی جدید از حافظه هارمونی: در مرحله تولید هارمونی جدید، زمانی که حافظه هارمونی آماده شد یک بردار جواب جدید (هارمونی)، با استفاده از حافظه هارمونی ایجاد می‌شود. به عبارتی برای هر متغیر یک مقدار جدید انتخاب می‌شود. در انتخاب هر مقدار جدید معمولاً از سه عملگر بررسی حافظه هارمونی، تنظیم قطعات و انتخاب تصادفی استفاده می‌شود. عملگر بررسی حافظه هارمونی برای مقدار جدید متغیر مورد نظر با احتمال  $HMCR$ ، مقداری را از حافظه هارمونی انتخاب می‌کند. مثلاً برای متغیر اول قبل از همه عملگرها، عدد یکنواخت تصادفی  $(r_1)$  در بازه  $[0-1]$  ایجاد می‌شود، اگر این عدد کم‌تر از مقدار  $HMCR$  باشد مقدار جدید متغیر اول،  $x_i^{new}$  با استفاده از عملگر بررسی حافظه، از حافظه هارمونی برداشته می‌شود  $(x_i^1 - x_i^{HMS})$ . در غیر این صورت عملگر انتخاب تصادفی با احتمال  $(1-HMCR)$  مقدار جدید را از تمام مقادیر دامنه متغیر، حتی آن‌هایی که در مرحله دوم در حافظه هارمونی قرار نگرفته‌اند، انتخاب می‌کند. مقادیر جدید سایر متغیرها نیز به همین ترتیب به دست می‌آیند.

$$x_i^{new} \rightarrow \begin{cases} x_i^{new} \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & w.p.HMCR \\ x_i^{new} \in X_i & w.p.(1-HMCR) \end{cases} \quad (6)$$

پس از این که در مرحله سوم مقدار جدید برای متغیر مورد نظر،  $x_i^{new}$  انتخاب شد، احتمال  $PAR$  روی آن اعمال می‌شود. یک عدد یکنواخت تصادفی  $(r_2)$  از بازه  $[0-1]$  ایجاد می‌شود که اگر این عدد از مقدار  $PAR$  کم‌تر باشد مقدار جدید متغیر،  $x_i^{new}$  با استفاده از مرحله تنظیم گام به مقداری در همسایگی آن تغییر می‌یابد، در غیر این صورت با احتمال  $1-PAR$  همان مقدار جدید برای متغیر انتخاب می‌گردد.

$$\text{Pitch adjusting decision for } x_i^{new} \rightarrow \begin{cases} \text{Yes} & w.p \quad PAR \\ \text{No} & w.p \quad (1-PAR) \end{cases} \quad (7)$$

تغییر ایجاد شده روی متغیر جدید توسط عملگر تنظیم قطعات انجام می‌شود. اگر متغیرها پیوسته باشند تغییرات براساس رابطه ۱۰ و اگر گسسته باشند براساس رابطه ۱۱ خواهد بود.

$$x_i^{new} \rightarrow \begin{cases} x_i^{new} \pm r * Bw & w.p. \quad PAR \\ x_i^{new} & w.p. (1 - PAR) \end{cases} \quad (8)$$

$$x_i^{new} \rightarrow \begin{cases} x_{(i+m)}^{new} & w.p. \quad PAR \\ x_i^{new} & w.p. (1 - PAR) \end{cases} \quad (9)$$

که در آن، پارامتر  $m$  اندیس همسایگی بوده و مقداری برابر با ۱- یا ۱ اختیار می‌کند. پارامتر  $PAR$  احتمال تغییر مقدار جدید به مقداری در همسایگی آن در حافظه هارمونی است. محدوده آن مقداری بین صفر و یک است اما معمولاً مقداری کم‌تر از ۰/۵ برای آن در نظر گرفته می‌شود (گیم، ۲۰۰۶).

**مرحله چهارم- به‌روزرسانی کردن حافظه هارمونی:** در این مرحله بردار جواب جدید،  $x_{new}$ ، که در مرحله سوم ایجاد شده است با استفاده از تابع هدف ارزیابی می‌شود. اگر بردار جواب جدید،  $x_{new}$ ، از بدترین بردار جواب در حافظه هارمونی، از نظر مقدار تابع هدف بهتر باشد، هارمونی جدید به حافظه هارمونی اضافه شده و بدترین هارمونی از حافظه خارج می‌گردد.

**مرحله پنجم- بررسی شرط توقف:** معمولاً در الگوریتم جستجوی هارمونی تعداد تکرار (جستجو) به‌عنوان شرط توقف در نظر گرفته می‌شود (لی و گیم، ۲۰۰۴) که پارامتر مربوط به آن (NI) در مرحله اول مقداردهی می‌شود. اگر تعداد هارمونی‌های ایجاد شده به NI رسیده باشد محاسبه‌ها متوقف شده در غیر این صورت مراحل سوم تا پنجم تکرار خواهند شد.

**جستجوی هارمونی بهبودیافته (Improved Harmony Search):** پارامترهای  $PAR$  و  $Bw$  در عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی تأثیر به‌سزایی دارند. با توجه به این‌که پارامتر  $Bw$  در بازه  $(0, \infty)$  قرار دارد بنابراین انتخاب آن مشکل‌تر می‌باشد. در الگوریتم HS، مقادیر ثابتی برای پارامترهای  $PAR$  و  $Bw$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار کوچک  $PAR$  و بزرگ  $Bw$ ، می‌تواند باعث کارایی ضعیف الگوریتم و افزایش تکرارهای (جستجوهای) الگوریتم در یافتن جواب بهینه شود. هر چند مقدار کوچک  $Bw$ ، باعث بهتر شدن جواب‌های جدید نهایی می‌شود اما در جواب‌های جدیدی که در تکرارهای اولیه ایجاد می‌شوند باید مقدار بزرگ‌تری داشته باشد تا منجر به ایجاد بردارهای جواب متنوع‌تری شود. بنابراین با مقدار بزرگ  $PAR$  و کوچک  $Bw$ ، الگوریتم معمولاً جواب‌های بهتری در تکرارهای نهایی ایجاد کرده و همگرایی بهتری خواهد داشت. برای حل مشکلات ثابت بودن

پارامترهای PAR و Bw، مهدوی و همکاران (۲۰۰۷) شکل توسعه‌یافته‌ای از الگوریتم HS را به نام الگوریتم توسعه‌یافته جستجوی هارمونی (HIS) ارائه کردند که این پارامترها به صورت دینامیکی و همراه با افزایش تکرارها تغییر می‌کنند. بدین گونه:

$$PAR_{(gn)} = PAR_{\min} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{NI} \times gn \quad (10)$$

که در آن، PAR: سرعت تنظیم قطعات،  $PAR_{\min}$  و  $PAR_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت تنظیم قطعات و gn: شماره تکرار (جستجو) می‌باشد. پارامتر Bw از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Bw_{gn} = Bw_{\max} \times \exp\left(-\frac{Ln\left(\frac{Bw_{\min}}{Bw_{\max}}\right)}{NI} \times gn\right) \quad (11)$$

که در آن،  $Bw_{gn}$ : پهنای باند در هر تکرار (جستجو)،  $Bw_{\min}$ : حداقل پهنای باند و  $Bw_{\max}$ : حداکثر پهنای باند می‌باشد. بنابراین با افزایش تکرارها مقادیر این پارامترها نیز به صورت خطی و نمایی تغییر خواهند کرد به طوری که در تکرارهای نهایی مقدار بزرگ PAR و کوچکی برای Bw به دست خواهد آمد (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷).

**جستجوی هارمونی سراسری بهینه (Global-best Harmony Search):** یک نوع دیگر توسعه‌یافته از مدل HS، جستجوی هارمونی سراسری بهینه (GHS) می‌باشد که توسط عمران و مهدوی (۲۰۰۸) توسعه‌یافته است. در این روش در گام سوم الگوریتم تغییراتی ایجاد شده است. به این طریق که پارامتر Bw حذف می‌شود و در مرحله سوم X جدید برابر با بهترین بردار X در حافظه قرار می‌گیرد. از برتری‌های این روش این است که دشواری انتخاب پارامتر Bw حذف شده و به راحتی برای هر دو نوع داده‌های پیوسته و گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**جستجوی هارمونی تطبیقی (Self-Adaptive Harmony Search):** در این روش نیز تغییراتی در گام سوم (تنظیم گام) این الگوریتم ایجاد شده است (وانگ و هوانگ، ۲۰۱۰). پارامترها به طور خودکار از نتایج مراحل قبل و مقدار حداکثر و حداقل تابع هدف در حافظه هارمونی استفاده می‌کنند. اگر مقدار عدد تصادفی از مقدار پارامتر PAR کم‌تر باشد مقادیر جدید X از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:



$$\text{New\_x}(i)=\text{new\_x}(i)+[\max(i)-\text{new\_x}(i)]\times\text{rand} \quad (12)$$

$$\text{New\_x}(i)=\text{new\_x}(i)-[\text{new\_x}(i)-\min(i)]\times\text{rand} \quad (13)$$

از برتری‌های این روش حذف انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای PAR و BW و افزایش دقت در بردارهای جواب است.

**منطقه مورد مطالعه:** سد کرج بر روی رودخانه کرج در استان البرز و در فاصله ۶۳ کیلومتری شمال غربی تهران و در کیلومتر ۲۳ جاده کرج- چالوس، در شمال شهرستان کرج قرار دارد. این سد اولین سد چندمنظوره کشور بوده و یکی از منابع تامین‌کننده آب شرب شهر تهران می‌باشد. بهره‌برداری از این سد از سال ۱۳۴۰ آغاز شد. نوع سد کرج بتنی دو قوسی با طول تاج ۳۹۰ متر می‌باشد. مساحت مخزن یا دریاچه سد از ۱/۱ کیلومترمربع تا ۴ کیلومترمربع متغیر بوده و گنجایش آن ۲۰۶ میلیون مترمکعب است. حوضه آبخیز سد کرج در شیب‌های جنوبی سلسله کوه‌های البرز بین ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز ۸۳۹۷۶ هکتار و محیط حوضه ۱۴۶/۴ کیلومتر می‌باشد. شکل ۱ طرح شماتیک زیرحوضه سد کرج را نشان می‌دهد.

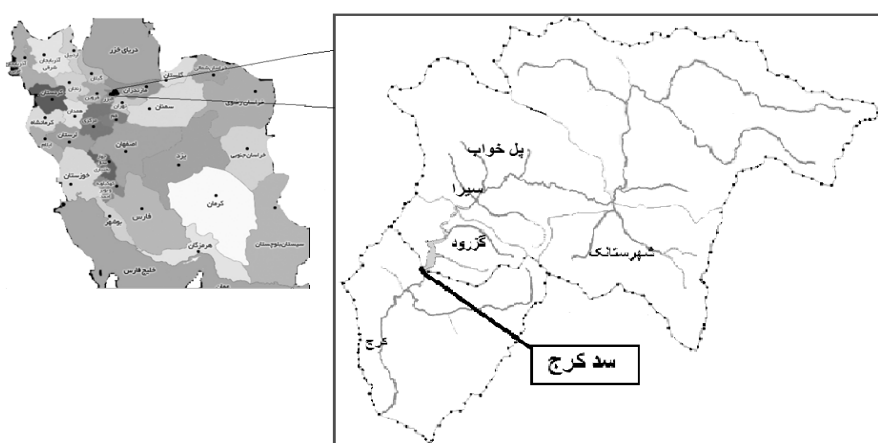
**بررسی صحت و سقم مدل:** همان‌طوری‌که اشاره شد در این پژوهش چندین مدل براساس الگوریتم HS و انواع بهبودیافته آن در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است. برای نشان دادن درستی عملکرد الگوریتم‌های توسعه داده شده در این پژوهش، از چند تابع استاندارد استفاده شده است. توابع De Jong's, Michalewicz's, Axis parallel hyper-ellipsoid, Goldstein-Price's و Six-hump camel back از جمله این توابع هستند که توسط پژوهشگران زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌عنوان مثال تابع استاندارد روزنبراک<sup>۱</sup> به‌صورت زیر می‌باشد:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{Nd} (100 \cdot (x_i - x_{i-1}^*)^2 + (x_{i-1} - 1)^2) \quad (14)$$

1- Rosenbrock

هدف یافتن مقدار حداقل سراسری تابع بالا می‌باشد. دامنه متغیرهای آن  $2/0.48 \leq x_i \leq 2/0.48$  می‌باشد ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) و مقدار بهینه تابع بالا برابر با صفر است. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهاد شده شامل  $HMS=10$ ،  $HMCR=0/9$ ،  $PAR=0/46$  و  $Bw=0/096$  می‌باشند. ابتدا مقادیر متغیرهای  $x_1$  و  $x_2$  از دامنه  $[2/0.48 - 2/0.48]$  با استفاده از رابطه ۱۵ به تعداد  $HMS$  مقداردهی می‌شوند:



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز سد کرج.

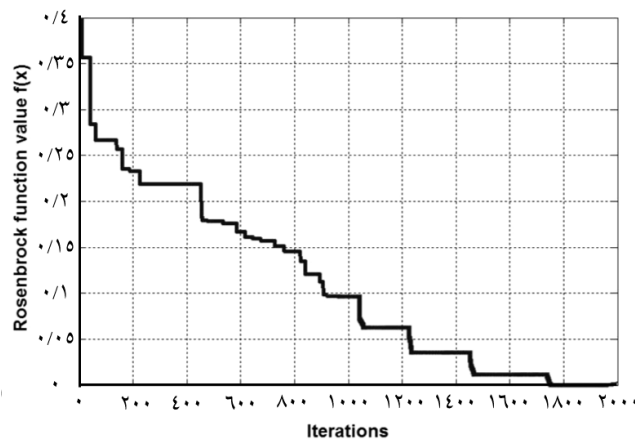
$$X_i^j = LBx_i + (UBx_i - LBx_i) \times r \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \ \& \ j = 1, 2, \dots, HMS \quad (15)$$

که در آن،  $N$ : تعداد متغیرها می‌باشد. ترتیب قرارگیری حافظه هارمونی براساس مقدار تابع هدف انجام شده است. در روش HS شرط توقف تعداد تکرار است که بعد از ۵۰۰۰ تکرار محاسبه‌ها متوقف می‌شوند. در این مقاله علاوه بر شرط بالا از شرط دیگری نیز به صورت هم‌زمان استفاده شده است. به این صورت که اگر مقادیر بهینه تابع هدف در ۱۰۰ تکرار متوالی، اختلافی کم‌تر از مقدار بسیار کوچک  $10^{-8}$  داشته باشند برنامه متوقف شود. در جدول ۲ مقادیر بهینه به دست آمده برای چندین تابع استاندارد ارایه شده است.

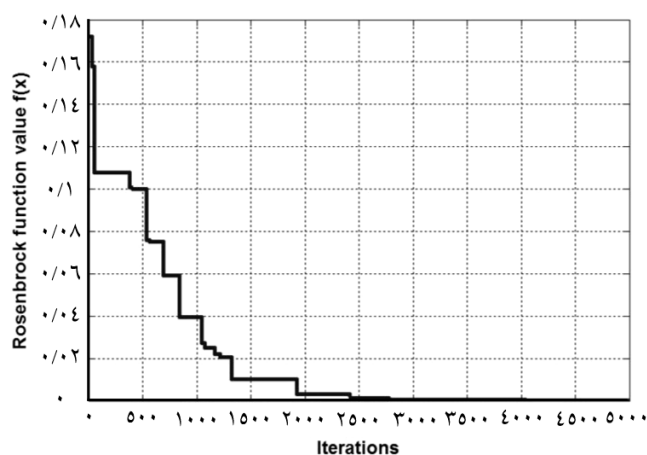
جدول ۲- مقادیر توابع استاندارد.

توابع استاندارد	HS	HIS	GHS	SAHS	مقدار بهینه تابع	تعداد تکرار
De Jong's	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۰۰
Six-hump camel back	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	۱۵۰۰
Michalewicz's	-۴/۷۵۲	-۴/۵۵۴	-۴/۶۵۶	-۴/۶۵۷	-۴/۶۸۷	۱۰۰۰
Goldstein-Price's	۳	۳	۳/۰۰۰۱۲	۳	۳	۱۲۰۰
Axis parallel hyper-ellipsoid	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰

در این جدول مقادیر بهینه واقعی این توابع و مقادیر بهینه به دست آمده توسط مدل‌های مختلف و همچنین تعداد تکرارهای انجام شده برای رسیدن به پاسخ‌های بهینه ارائه شده است. همچنین به‌عنوان نمونه روند همگرایی تابع روزنبراک با دو شرط توقف نیز در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تابع در شکل ۳ پس از ۲۰۰۰ تکرار همگرا شده و پاسخ‌های بسیار نزدیکی همانند شکل ۱ ارائه نموده است.



شکل ۲- روند همگرایی به سمت مقدار مینیمم در تابع Rosenbrock (با شرط همگرایی پیشنهادی).

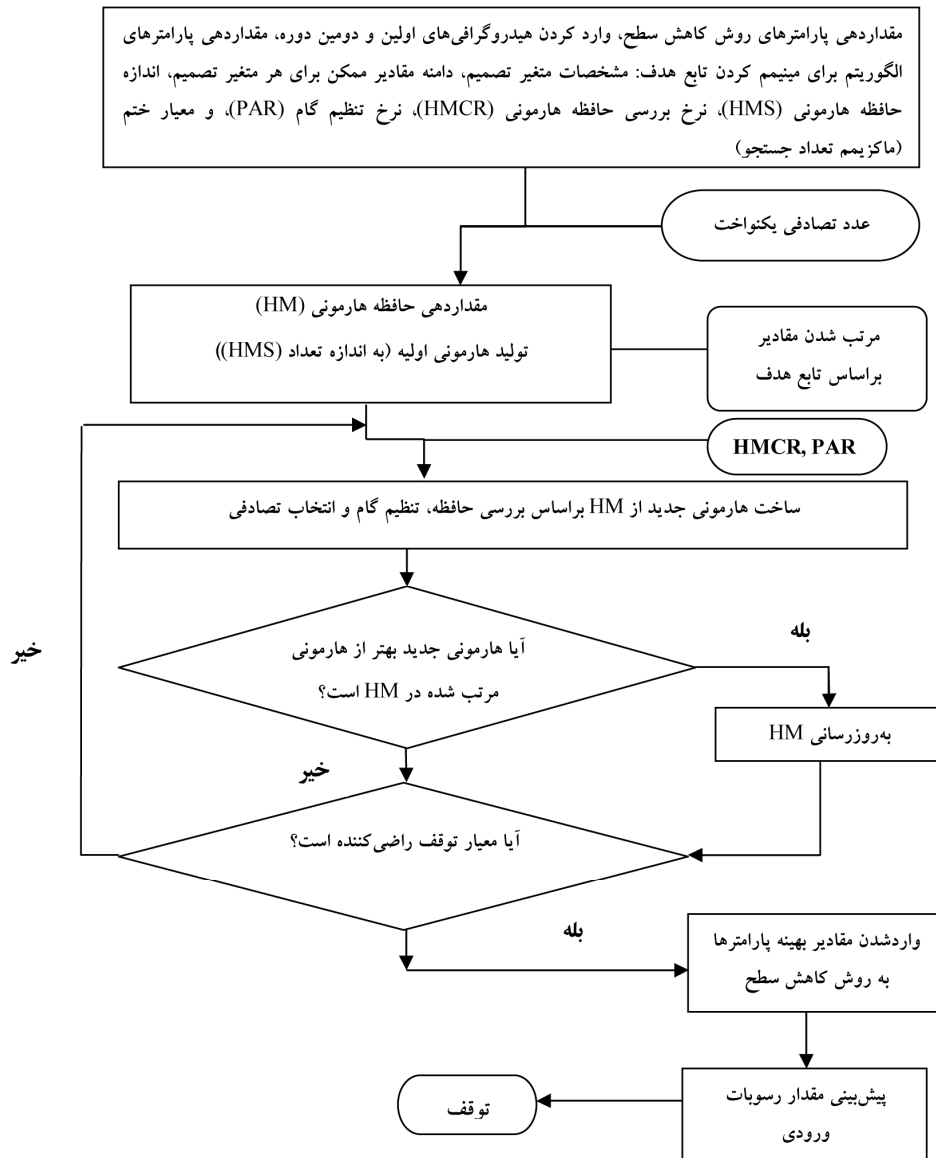


شکل ۳- روند همگرایی به سمت مقدار مینیمم در تابع Rosenbrock (با شرط همگرایی ۵۰۰۰ تکرار).

پس از بررسی صحت و سقم مدل‌ها، می‌توان از تلفیق آن‌ها با روش کاهش سطح برای تخمین مقادیر رسوب ورودی به مخزن سد کرج استفاده نمود. مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی در قسمت برنامه‌نویسی محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است. شکل ۴ الگوریتم مدل تهیه شده را نشان می‌دهد.

### نتایج

سد کرج دارای سه هیدروگرافی در سال‌های ۱۳۴۰، ۱۳۷۰ و ۱۳۸۶ می‌باشد. در روش کاهش سطح مقادیر پارامترهای  $C$ ،  $m$  و  $n$  از روی نوع مخزن و مقادیر تجربی پیشنهاد شده به دست می‌آیند. با استفاده از این مقادیر می‌توان مقادیر رسوب ورودی به مخزن را تخمین زد. در مدل‌های توسعه داده شده در این پژوهش، کالیبراسیون ضرایب  $C$ ،  $m$  و  $n$  براساس هیدروگرافی‌های سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۷۰.



شکل ۴- فلوچارت تلفیق الگوریتم جستجوی هارمونی و روش کاهش سطح.

با استفاده از تلفیق الگوریتم جستجوی هارمونی و روش کاهش سطح انجام شده است. بعد از واسنجی ضرایب توسط مدل توسعه داده شده، از مقادیر بهینه پارامترهای به دست آمده برای تخمین رسوبات ورودی به مخزن برای سال ۱۳۸۶ که دارای یک هیدروگرافی مشاهداتی نیز می‌باشد استفاده شده است. علاوه بر تخمین رسوبات ورودی به سد کرج با استفاده از تلفیق الگوریتم جستجوی هارمونی با روش کاهش سطح، از تلفیق الگوریتم‌های توسعه یافته تر HS مانند GHS، HIS و SAHS با روش کاهش سطح نیز برای تخمین رسوبات ورودی به مخزن سد کرج نیز استفاده شده است. به همین منظور چندین مدل براساس تلفیق روش‌های بالا با روش کاهش سطح در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است. در این مدل‌ها نیز از هیدروگرافی سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۷۰ برای کالیبراسیون پارامترهای روش کاهش سطح استفاده شده است. سپس از ضرایب بهینه به دست آمده برای تخمین میزان رسوبات ورودی به مخزن سد کرج در سال ۱۳۸۶ استفاده شده است. نتایج به دست آمده از کالیبراسیون و میزان انحراف از مقادیر واقعی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد کرج در دوره کالیبراسیون با استفاده از روش‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است تعیین پارامترهای بهینه در این روش تأثیر به‌سزایی در کاهش میزان تابع هدف و بالا رفتن دقت این روش دارد.

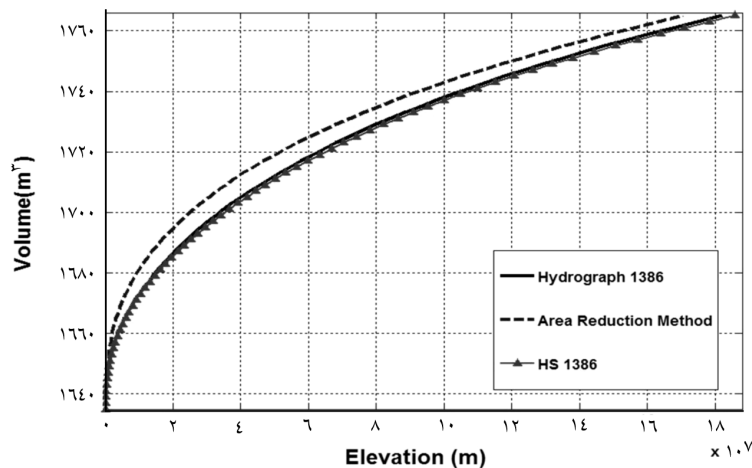
جدول ۳- مقدار تابع هدف با مقادیر معمول و بهینه C، m و n در دوره کالیبراسیون.

روش	C	m	n	$\sigma(MCM)$
کاهش سطح	۱۵/۸۸۲	۱/۱	۲/۳	۵/۵۳
HS	۶/۹۴	۰/۴۳۴	۰/۸۵۵	۲/۰۹۵
IHS	۱۲/۵	۰/۴	۰/۶۷	۲/۰۶۱
GHS	۱۰/۷۴	۰/۴	۰/۶۵۵	۲/۰۱۴
SAHS	۱۳/۳۴	۰/۴۸۴	۱/۳۰۳	۲/۲۷

در مورد سد کرج میزان تابع هدف براساس روش کاهش سطح و مدل توسعه داده شده بر مبنای روش HS در سال ۱۳۷۰ به ترتیب برابر با ۵/۵۳ و ۲/۰۹۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. مقدار تابع هدف به دست آمده با استفاده از مدل توسعه داده شده کاهش ۶۲ درصدی نسبت به مقدار تابع هدف محاسبه شده از طریق روش کاهش سطح دارد. بعد از واسنجی ضرایب و محاسبه مقادیر بهینه ضرایب با

استفاده از مدل‌های توسعه داده شده، می‌توان مقدار رسوب ورودی به مخزن سد را در سال‌های بعد پیش‌بینی نمود. شکل ۵ نحوه توزیع رسوب در مخزن سد کرج را نسبت به ارتفاع در سال ۱۳۸۶ با استفاده از روش HS و روش کاهش سطح نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار حجم-ارتفاع به دست آمده با استفاده از پارامترهای بهینه مطابقت بهتری با هیدروگرافی مشاهده شده دارد.

نتایج تلفیق روش کاهش سطح با الگوریتم‌های HS و ترکیب آن‌ها با شرط توقف پیشنهادی این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این روش‌ها در تعداد تکرار کم‌تری به جواب می‌رسند. همچنین مقادیر انحراف از معیار توزیع رسوب نیز بسیار کم‌تر می‌شوند. همان‌طور که در جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود مقدار انحراف معیار به دست آمده با روش GHS نسبت به روش کاهش سطح در هر دو شرط توقف دارای کم‌ترین مقدار می‌باشد. مقادیر بهبود تخمین رسوبات وارد شده به سد کرج با استفاده از روش‌های مختلف نسبت به روش کاهش سطح در جدول ۵ ارائه شده است. روش GHS در هر دو طریق محاسبه مقدار خطا را حدود ۷۰ درصد کاهش داده و نتایج بهتری ارائه نموده است.



شکل ۵- تخمین توزیع رسوب در مخزن سد کرج با روش HS در سال ۱۳۸۶.

جدول ۴- مقدار تابع هدف با مقادیر بهینه C، m و n (با شرط همگرایی پیشنهادی).

تعداد تکرار	$\sigma$ (MCM)	n	m	C	روش
۴۰۰	۰/۲۴۶۵۸	۱/۴۵	۰/۷۸	۱/۷۷	HS
۲۰۰	۰/۲۸۷۱۰	۱/۴۴	۰/۸	۱۸/۸۴	IHS
۱۵۰	۰/۲۴۳۱۱	۲/۱۸	۰/۹۷۹	۱۶/۶۱	GHS
۵۰۰	۰/۲۴۴۲۰	۱/۳۴	۰/۷۷	۱۰/۹۵	SAHS

جدول ۵- مقدار انحراف از معیار توزیع رسوب.

روش	درصد بهبود تخمین رسوبات (توقف ۵۰۰۰ تکرار)	$\sigma$ (MCM) (شرط توقف پیشنهادی)	درصد بهبود تخمین رسوبات (شرط توقف پیشنهادی)	$\sigma$ (MCM) (شرط توقف ۵۰۰۰ تکرار)	روش
HS	۵۷/۶۷	۰/۳۵۲۸۱	۷۰/۴۲	۰/۲۴۶۵۸	HS
IHS	۷۰/۸۱	۰/۲۴۳۲۸	۶۵/۵۶	۰/۲۸۷۱۰	IHS
GHS	۷۱/۷۲	۰/۲۳۵۷۳	۷۰/۸۳	۰/۲۴۳۱۱	GHS
SAHS	۶۹/۸۳	۰/۲۵۱۴۹	۷۰/۷۰	۰/۲۴۴۲۰	SAHS

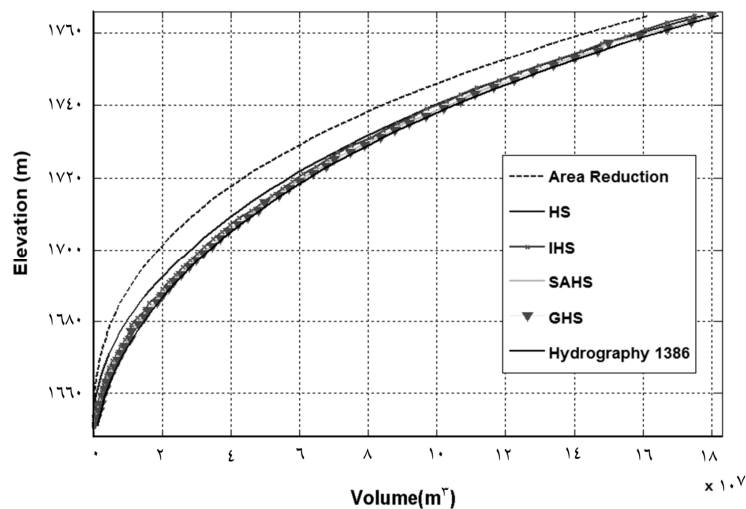
شکل ۶ مقادیر حجم مخزن را نسبت به ارتفاع در حالت‌های اندازه‌گیری شده، محاسبه‌هایی با استفاده از پارامترهای معمول روش کاهش سطح و پارامترهای بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار حجم-ارتفاع به‌دست آمده با استفاده از پارامترهای بهینه مطابقت بهتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش کاهش سطح برای تخمین رسوب ورودی به مخزن سد کرج استفاده شد. پارامترهای روش تجربی کاهش سطح به‌صورت تجربی به‌دست می‌آیند که بهینه کردن آن‌ها تأثیر زیادی در بالا بردن دقت این روش و کاهش خطا دارد. برای بهینه کردن این پارامترها از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی استفاده شده است. به این منظور مدلی براساس تلفیق روش کاهش سطح با HS در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. مقایسه نتایج این برنامه با هیدروگرافی سال ۱۳۸۶ بیانگر بهبود این روش می‌باشد. علاوه بر HS، مدل‌هایی نیز براساس تلفیق انواع توسعه‌یافته این الگوریتم با کاهش سطح توسعه داده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده روش SAHS مناسب‌ترین روش برای تخمین و پیش‌بینی رسوبات ورودی به مخزن سد کرج بوده است.



همان‌طورکه پیش‌تر توضیح داده شد در این پژوهش علاوه بر تعداد تکرارها، شرط توقف دیگری نیز برای انجام محاسبه‌های در نظر گرفته شد. به این ترتیب که اگر در ۱۰۰ تکرار متوالی اختلاف مقادیر تابع هدف از  $10^{-8}$  کوچک‌تر شد محاسبه‌ها متوقف می‌شود. از ترکیب این شرط توقف با انواع توسعه‌یافته الگوریتم جستجوی هارمونی، جواب بهینه در مدت زمان کم‌تر و تعداد تکرار کم‌تری به دست می‌آید. همان‌طورکه از نتایج ارایه شده در جدول ۵ مشخص است در این مدل‌ها نیز روش SAHS جواب بهتری تولید کرده است. بنابراین می‌توان گفت تلفیق الگوریتم جستجوی هارمونی با روش کاهش سطح، یک روش مؤثر و کارا در تخمین رسوب ورودی به مخازن می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه توزیع رسوب در مخزن سد کرج با روش‌های مختلف.

### منابع

1. Annandal, G.W. 1984. Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoir. Challenges in African Hydrology and water Resources, IAHS Publ. No. 144: 549-558.
2. Borland, W.M., and Miller, C.R. 1958. Distribution of sediment in large reservoir. J. Hydr. Div. 84: 2. 1-18.
3. Geem, Z.W. 2007. Optimal Scheduling of Multiple Dam System Using Harmony search Algorithm. Notes Comput. Sci. 4507: 316-323.

4. Geem, Z.W. 2006. Optimal Cost Design of Water Distribution Networks Using Harmony search. *Eng. Optim.* 38: 3. 259-280.
5. Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76: 2. 60-68.
6. Ghimire, B.N.S., and Reddy, M. 2010. Development of Stage-Discharge Curve in River Using Genetic algorithms And Model Tree. *International Workshop Advances in Statistical Hydrology*. Tormina, Italy.
7. Lee, K.S., and Geem, Z.W. 2004. New structural optimization based on the harmonysearch algorithm. *Computers and structures*, 82: 781-798.
8. Lee, K.S., and Geem, Z.W. 2005. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 194: 3902-3933.
9. Mahdavi, M., Fesanghary, M., and Damangir, E. 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188: 1567-1579. (In Persian)
10. Mohamadiha, A., Emadi, A., and Samani, J.M.V. 2010. Determining the optimal parameters of area reduction method in sediment distribution of Dam Kardh. *Ninth Iranian Hydraulic Conference*, T. M.U. (In Persian)
11. Mohamadiha, A., and Emadi, A. 2010. Calibration of Area reduction method to Prediction the distribution of deposited sediment in Golestan Reservoir. *Fifth National Congress of Civil Engineering*, Ferdosi university of Mashhad. (In Persian)
12. Mohammadzadeh Habili, J., and Mousavi, F. 2009. Improvement of the reservoir shape factor method and evaluation of its changes due to sedimentation. *J. Water Soil.* 22: 2. (In Persian)
13. Mousavi, S.F., Mohammadzadeh Habili, J., and Heydarpour, M. 2007. Evaluating the error of area reduction method in predicting sediment distribution of Dez, Dorodzan and Shahid abaspour Dam. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour.* Year XII, Issue Forty-Six. (In Persian)
14. Mousavi, S.F., Heydarpour, M., and Shaabanlou, S. 2006. Predicting the distribution of deposited sediment in Zayandehroud Reservoir Using area reduction method. *J. Water Sewage.* 57: 76-82. (In Persian)
15. Mousavi, S.F., and Samadi Borojeni, H. 1996. Sediment distribution evaluation in small reservoirs in Chahar Mahal Bakhtiari. *J. Water Sewage.* 18:4-13. (In Persian)
16. Omran, M.G.H., and Mahdavi, M. 2008. Global-best harmony search. *Applied Mathematics and Computation.* 198: 643-656.
17. Shaabanlou, S., Mousavi, S.F., and Heydarpour, M. 2002. Predicting the distribution of deposited Sediment in reservoir for now and future. *Sixth International Seminar on River*, SH. Chamran University, Pp: 55-65. (In Persian)

18. Shafae bejestan, M. 1999. sediment hydraulic. Publishment of Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
19. Safarzadeh, S., Irandoust, M., and Saghi, H. 2009. Analysis of Reservoir Sedimentation Process Using Artificial Neural Network. Second National Conference on Dams, Zanzan University. (In Persian)
20. Toniolo, H., and Parker, G. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. Proc., IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, Pp: 457-468.
21. Wang, Ch.M., and Huang, Y.F. 2010. Self-adaptive harmony search algorithm for optimization. Expert System with Applications. 37: 2826-2837.
22. Wang, Z., and Hu, C. 2009. Strategies for managing reservoir sedimentation. Inter. J. Sed. Res. 24: 369-384.
23. Yenigun, K., Bilgehan, M., Gerger, R., and Mutlu, M. 2010. A comparative study on prediction of sediment yield in the Euphrates basin. Inter. J. Physic. Sci. 5: 5. 518-534.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(3), 2014*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Predicting the distribution of deposited sediment in Karaj reservoir using various improved harmony search algorithms**

**\*K. Aalikhani<sup>1</sup>, K. Qaderi<sup>2</sup> and M.M. Ahmadi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, <sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 10/24/2012; Accepted: 05/12/2013

### **Abstract**

Dam construction on rivers can lead to sedimentation in reservoirs causing a lot of problems. Forecasting the amount and distribution of sedimentation is very important for the designers of the dam. The area reduction method is one of the experimental models to study the sedimentation in reservoirs. The parameters used in area reduction method have been obtained by Borland and Miller according to the study on 30 dams in America. It is necessary to obtain the optimal values of these parameters for the reservoir sedimentation in other areas. In this study, some models has been developed based on harmony search algorithm (HS) and its various improved algorithms such as IHS, GHS and SAHS in combination with area reduction methods for calculating optimal values of area reduction parameters. At first the accuracy of the developed models has been evaluated using standard functions and then Karaj reservoir sediment is estimated using developed model. Statistical comparisons of different improved methods and area reduction method with the actual sediment deposits in Karaj dam indicate high performance of developed models. Among these methods, the rate of error 90 percent has been reduced by combination of SAHS and HIS with area reduction method.

**Keywords:** Sedimentation, Reservoir, Area reduction method, HS, Karaj Dam

---

\* Corresponding Author; Email: [kiyanaulikhani@yahoo.com](mailto:kiyanaulikhani@yahoo.com)