



## طراحی بهینه ابعاد آبشکن با استفاده از الگوریتم چندهدفه جستجوی هارمونی مطالعه‌ی موردی: رودخانه زنجانرود

بابک شاه‌نژاد<sup>1\*</sup>، حجت‌الله یونسی<sup>2</sup>، مریم میربیک سبزواری<sup>3</sup>

1- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

3- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: 1401/10/08

تاریخ پذیرش: 1401/11/16

### چکیده

یکی از روش‌های معمول کنترل فرسایش کناری و ساماندهی رودخانه‌ها استفاده از آبشکن است. در این خصوص در نظر گرفتن همزمان چندین هدف مختلف و گاهاً متضاد در کنار یکدیگر در مطالعات مهندسی رودخانه می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد. به همین منظور در این پژوهش طراحی بهینه‌ی ابعاد آبشکن‌های حوضه آبریز زنجانرود با اهداف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن دبی بار بستر مدنظر قرار گرفت. زنجانرود یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قزل اوزن می‌باشد که زهکشی آب‌های منطقه را به صورت سطحی و زیرزمینی انجام می‌دهد. در مدل مورد مطالعه از تلفیق مدل مورفولوژیکی، طراحی و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی هارمونی استفاده شد. هم‌چنین برای بررسی پایداری مقطع از روش تئوری‌های حدی استفاده شد. پس از آنالیز حساسیت پارامترهای دبی، شیب و عرض اولیه رودخانه، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های زنجانرود و با در نظر گرفتن معادله بار بستر فان-راین و معادله آبشستگی گیل انجام گرفت. سپس براساس جبهه پارتو، سناریوهای مختلف استخراج گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده در مقایسه با طراحی انجام شده توسط سایر محققین، جواب‌های بهینه‌تری را ارائه داده است. براساس کم‌ترین فاصله اقلیدسی نسبت به نقطه ایده‌آل، به ترتیب 63/90 درصد هزینه کمتر و 25/48 درصد دبی انتقال بار بستر بیش‌تری را نسبت به طراحی انجام شده توسط حسینی و همکاران (1382) و به ترتیب 3/3 درصد هزینه کمتر و 16/62 درصد دبی انتقال بار بستر بیش‌تری را نسبت به مدل استادی و همکاران (1393) ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده کارایی مطلوب و دقت بهتر مدل پیشنهادی است.

**کلمات کلیدی:** ساماندهی رودخانه، بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پارتو، فاصله اقلیدسی، حوضه آبریز زنجانرود.

## 1-مقدمه

رودخانه تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند توپوگرافی دره رودخانه، مشخصات هیدرولوژیکی حوضه آبریز، شرایط هیدرولیکی جریان و نیز نحوه بهره‌برداری بشر از آن، تمایل طبیعی به دستیابی به تعادل پویا دارد. طبیعت تغییرپذیری برخی از عوامل فوق سبب می‌گردد تا رودخانه حتی در کوتاه‌مدت و در بازه‌های مختلف آن همواره در معرض تغییر و تحول باشد. تغییرات رودخانه‌ای به‌صورت فرسایش و رسوب‌گذاری متناوب در بستر، تخریب و تعریض دیواره‌ها و سواحل، جابجایی الگوی مارپیچی و راستای جریان، تغییر فرم رودخانه (شریانی- مارپیچی- مستقیم)، میانبری و یا انحراف مسیر رخ می‌دهد. فرسایش سواحل رودخانه‌ها، باعث خسارت به اراضی کشاورزی، آسیب دیدن سازه‌های مجاور مانند پل‌ها و جاده‌ها، عریض شدن آبراهه جریان و مسائل زیست‌محیطی می‌باشد؛ این مساله سبب می‌گردد هر ساله مبالغ زیادی برای حفاظت از سواحل رودخانه در برابر فرسایش هزینه شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388: 3). احداث آبشکن‌های رودخانه‌ای که از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه به‌شمار می‌آیند باعث می‌شود الگوی جریان در رودخانه تغییر کرده و کناره‌ها در معرض فرسایش قرار نگیرند، که به صورت منفرد یا به صورت یک سری متوالی در یک و یا در دو سمت رودخانه احداث می‌گردند ساخت آبشکن باعث فرسایش و یا رسوب‌گذاری در نواحی و بازه‌های مختلف رودخانه گردیده، بنابراین لازم است علاوه بر مقرون به‌صرفه بودن آن، برقراری تعادل در رودخانه نیز بررسی شود. برای بررسی پایداری با استفاده از روش‌های کیفی مانند شام<sup>1</sup> (1984) و روش‌های کمی مانند تئوری‌های رژیم، تاثیرات احتمالی مورفولوژیکی ناشی از احداث آبشکن‌ها بررسی می‌گردد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور 1388: 63).

طبق نظر پترسون<sup>2</sup>، آبشکن‌های غیر مستغرق با تاج افقی، طول ساحل بیشتری را محافظت نموده و آبشستگی موضعی بیشتری را نیز نتیجه می‌دهند. در یک سری آبشکن متوالی بهتر است ارتفاع تاج آن‌ها یکسان و یا به تدریج به سمت پایین‌دست کاهش یابد. به هر حال ارتفاع تاج آبشکن‌ها در طول رودخانه می‌تواند از پروفیل سطح آب پیروی کند (عسکری، 1374). حسینی و همکاران (1390) به ارزیابی اقتصادی آبشکن‌های احداث شده بر روی زنجان‌رود پرداخت. در این تحقیق از روش ارزش فعلی خالص کمینه<sup>3</sup> (NPV) در طی یک دوره 10 ساله و با نرخ تنزیل 11 درصد برای محاسبه ارزش اقتصادی سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده استفاده شد. به طور کلی با توجه به مطالعات و ارزیابی‌های صورت گرفته و در نظر گرفتن اهداف طرح ساماندهی زنجان‌رود، می‌توان گفت که علی‌رغم عدم هم‌خوانی برخی از مشخصات هندسی آبشکن‌های اجرا شده با اصول فنی و

1- Schumm  
2- Peterson

3- Net Present Value

معیارهای طراحی، پروژه یاد شده به اهداف اصلی اقتصادی خود دست یافته است. مسجدي و همکاران (1388) به منظور بررسی طول آبشکن با انجام مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند هر چه طول آبشکن افزایش یابد باعث افزایش عمق آبشستگی اطراف آن می‌شود و همچنین با افزایش دبی جریان و موقعیت قرارگیری آبشکن در قوس، ابعاد چاله و طول پشته در پایین دست آبشکن نیز افزایش خواهد یافت. موسوی و همکاران (1389) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر طول آبشکن در کاهش فرسایش کنار رودخانه‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش طول آبشکن از 25 به 95 سانتی‌متر، مقدار سطح فرسایش کناری را از 20 تا 40 درصد در دبی‌های 15 تا 25 لیتر بر ثانیه کاهش داده است، اگر چه بیشترین میزان آبشستگی دماغه مربوط به آبشکن با طول بیشتر یعنی 35 سانتی‌متر است؛ در این طول نیز کمترین فرسایش با دبی 15 لیتر در ثانیه رخ داده است. استادی و همکاران (1393) با بهینه‌سازی آبشکن‌ها با استفاده از نرم‌افزار لینگو<sup>1</sup> نشان دادند که به‌کارگیری معادلات بار بستر و آبشستگی نقش به‌سزایی در تعیین ابعاد آبشکن و هزینه‌های ساخت سازه دارند. از بین معادلات بار بستر استفاده شده معادله انگلند و فردسو<sup>2</sup>، بیشترین ظرفیت انتقال بار بستر و کمترین هزینه، معادله بار بستر فان-راین<sup>3</sup>، کمترین ظرفیت انتقال بار بستر و بیشترین هزینه را نتیجه داد. صمدیان و همکاران (1398) با ارزیابی طرح‌های سامان‌دهی رودخانه زرينه‌رود با استفاده از مدل MIKE11 به این نتیجه رسیدند که با عملیات سامان‌دهی رودخانه و تعریض پل علاوه بر آزادسازی اراضی مجاور رودخانه، مقادیر سطح جریان و تراز سطح آب کاهش داشته که باعث افزایش ظرفیت میزان آبگذری رودخانه (در حدود 115 هزار مترمکعب) در محدوده‌ی موردنظر خواهد شد که بیانگر تأثیر بالقوه عملیات سامان‌دهی رودخانه در آبگذری و روند جریان است. ابودری و همکاران (1400) با طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای آبشکن با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب<sup>4</sup> در قالب یک مسئله بهینه‌سازی برای رودخانه زنجان‌رود نشان دادند که طرح منتخب هزینه‌ی کمتر و بار بستر انتقالی را نسبت به طرح موجود افزایش می‌دهد. اصغری سراسکانرود و همکاران (1400) با بررسی الگو و دینامیک رودخانه‌ی قره‌سو اردبیل به این نتیجه رسیدند که طی دهه‌ی اخیر دینامیک عرضی مجرای رودخانه به‌طور محسوسی کاهش یافته است و طی دو دهه گذشته 22/45 هکتار از اراضی حاشیه رودخانه قره‌سو در نتیجه فرآیندهای فرسایشی از دست رفته‌اند. ایشان پیشنهاد کردند اقدامات سازه‌ای و غیر سازه‌ای در نواحی مشخص شده برای کاهش فرآیندهای فرسایشی و از بین رفتن اراضی طرفین رودخانه که عمدتاً اراضی کشاورزی هستند، صورت گیرد.

1- Lingo  
2- Englund and Fredsoe  
3- Van Rijn

4- Non- dominated Sorting Genetic Algorithm-II  
(NSGA-II)

کریجا و مایز<sup>1</sup> (2001) به طراحی کانال پایدار با رویکرد بهینه‌سازی اقتصادی پرداختند. آن‌ها در بررسی پایداری کانال از روش‌هایی نظیر حداکثر سرعت مجاز، تنش برشی بحرانی و مقطع بهینه هیدرولیکی به‌عنوان قیده‌های طراحی استفاده کردند و با توجه به سایر قیده‌ها نظیر عمق آبستتگی حداکثر، هزینه سازه را کمینه کردند. آن‌ها مدل بهینه‌سازی غیرخطی را در نرم‌افزار MINOS- GAMS کدنویسی و حل کردند. تلات<sup>2</sup> و همکاران (2009) به منظور معرفی آبشکن‌های غیرمستغرق برای کاهش فرسایش کناری رودخانه‌ها در ناگا هامدی<sup>3</sup> (واقع در ساحل غربی رودخانه نیل) دریافتند که عملکرد آبشکن با فاصله آبشکن نسبت عکس دارد اما در زاویه و فاصله ثابت با طول آبشکن نسبت مستقیم دارد. علاءالدین و تسوجیموتو<sup>4</sup> (2011) طراحی بهینه آبشکن‌ها را با مدل دو بعدی RIC-Nays انجام دادند. پارامترهای کانال و جریان بر اساس انطباق با یکی از رودخانه‌های معمولی بنگلادش بوده است. در این تحقیق چهار جهت و سه ساختار آبشکن در نظر گرفته شد. عملکرد آبشکن‌ها از طریق سه شاخص کلیدی، فرسایش در بستر کانال، رسوب در ناحیه آبشکن‌ها و آبستتگی در نزدیکی دماغه آبشکن ارزیابی می‌شود. محاسبات نشان داد که عملکرد یک آبشکن اصلاح‌شده بهتر از آبشکن مستقیم است. کلیتا<sup>5</sup> و همکاران (2014) یک مدل بهینه‌سازی با مدل هیدرودینامیکی برای به دست آوردن ترکیبی مقرون به‌صرفه از آبشکن‌ها در نظر گرفتند که باعث می‌شود یک سرعت جریان تعریف‌شده توسط کاربر در یک بخش پیش تعیین‌شده از یک رودخانه حفظ شود. مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و مدل شبیه‌سازی جریان با استفاده از طرح پرتو و گرما برای حل معادلات دو بعدی هیدرودینامیک در جریان غیر دائمی توسعه داده شد و نتایج منطقی برای همه سناریوهای آزمایش به‌دست آمد. زارع و هنر<sup>6</sup> (2016) اثر آبشکن ساده بر کاهش فرسایش کناره در قوس رودخانه در شرایط آزمایشگاهی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبستتگی در پای آبشکن‌ها مربوط به آبشکن عمودی است و در هر سه نوع آرایش عمودی، دافع و جاذب، آبشکن اول بیشترین عمق آبستتگی و آبشکن آخر، کمترین عمق را دارد. واقفی و همکاران (2018) به بررسی عددی الگوی جریان حول شکل محافظت‌شده با یک آبشکن محافظ در T آبشکن سه حالت دافع، قائم و جاذب در قوس 90 درجه یک کانال پرداختند. ایشان عنوان کردند که با افزایش زاویه آبشکن محافظ نسبت به حالت قائم چه در حالت جاذب و چه در حالت دافع، مقادیر ماکزیمم سرعت در محدوده آبشکن اصلی افزایش می‌یابد و این افزایش برای حالت دافع بیشتر است. عباسی و همکاران (2019) به بررسی تغییرات مورفولوژی بستر در کانال‌های دارای سری آبشکن‌های موازی با طول‌های نامساوی و جهت‌گیری‌های مختلف پرداختند. آن‌ها به‌منظور شبیه‌سازی عددی خود از نرم‌افزار FLOW- 3D استفاده

1- Carriaga and Mays  
 2- Talaat  
 3- Naga Hammad

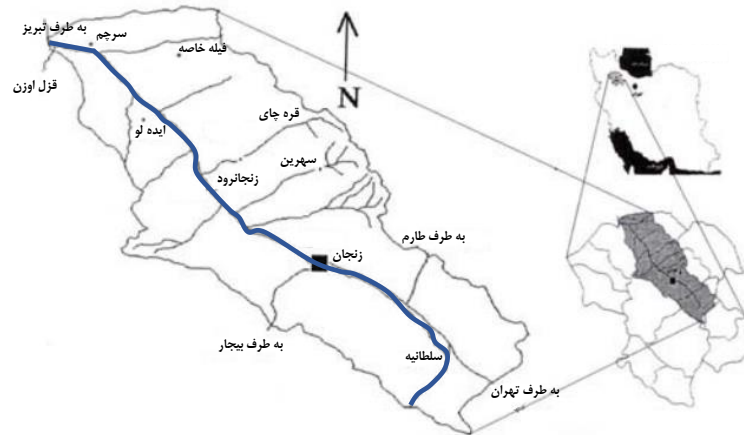
4- Alauddin and Tsujimoto  
 5- Kalita  
 6- Zare and Honar

کردند. از آنجایی که در نظر گرفتن همزمان اهداف مختلف و بعضاً متضاد در کنار یکدیگر در مطالعات مهندسی رودخانه از اهمیت بسزائی برخوردار بوده لذا در این تحقیق سعی گردید طراحی بهینه‌ی ابعاد آبشکن مطابق ضوابط استاندارد با اهداف کمینه‌کردن هزینه طرح و بیشینه کردن بار بستر با حفظ پایداری مقطع مورد مطالعه قرار گیرد که در مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته شده است. به بیان دیگر در برخورد با چنین مسائلی معمولاً از روش‌های تبدیل مساله چندهدفه به تک هدفه استفاده شده است. ولی در این تحقیق سعی گردید که از روش حل مستقیم استفاده گردد، بدین منظور جهت مدل بهینه‌سازی چند هدفه غیرخطی از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده گردید. همچنین دو تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل، تابع هزینه احداث سازه و تابع مقطع پایدار می‌باشند که باید هزینه ساخت حداقل (کریجا و مایز، 2001) و ظرفیت انتقال بار بستر حداکثر (هوانگ و نانسون<sup>1</sup>، 2000) شود. در پایان نیز مدل ارائه شده با مطالعات قبلی انجام شده بر روی آبشکن‌های احداث شده در رودخانه زنجان رود مقایسه و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

## 2- مواد و روش

### 2-1- منطقه مورد مطالعه

رودخانه زنجان رود یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قزل اوزن در شمال غربی ایران است. وسعت حوضه آبریز زنجان رود حدود 4614 کیلومترمربع است. این رودخانه زهکشی آب‌های منطقه را به صورت سطحی و زیرزمینی انجام می‌دهد. شکل 1 موقعیت حوضه آبریز و محدوده سامان‌دهی شده زنجان رود را نشان می‌دهد. زنجان رود در ماه‌های پر باران، سیلابی است و علاوه بر فرسایش بستر، مشکل فرسایش کناره‌ای را نیز دارد به طوری که اراضی حاشیه آن که از بهترین و حاصل خیزترین اراضی حوضه به‌شمار می‌روند در معرض تهدید مداوم قرار دارند. در پروژه سامان‌دهی زنجان رود با هدف تثبیت کناره‌های رودخانه، کنترل فرسایش، حفاظت از جاده ترانزیت زنجان- میانه، حفاظت و استحصال اراضی کشاورزی و حفظ محیط زیست که در منطقه از نظر اقتصادی و اجتماعی دارای اهمیت بالایی است در مسیر رودخانه ترکیبی از دیواره‌های خاکریز ساحلی و آبشکن‌ها اجرا شده است (حسینی، 1390: 207).



شکل (1): کروکی و تصویر ماهواره ای حوزه آبریز و محدوده سامان دهی شده زنجانرود (رابط، 1384)  
Fig (1): Sketch and satellite image of the basin and the organized area of Zanjánrood (Rabet, 2005)

## 2-2- مدل بهینه سازی

طراحی آبشکن باید به گونه ای باشد که تعادل رودخانه و شرایط رژیم را حفظ کند و بیشترین پایداری و کمترین هزینه را داشته باشد. برای طراحی ابعاد آبشکن با در نظر گرفتن چند گزینه، گزینه ای که کمترین تغییر در شرایط هیدرولیکی و رسوبی را داشته باشد به عنوان طرح بهتر انتخاب می شود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388: 73). بنابراین یک مدل بهینه سازی چند هدفه مورد نیاز است که ترکیبی از دو مدل طراحی و مورفولوژیکی را با هدف کمینه کردن هزینه های طرح و بیشینه کردن ظرفیت انتقال بار بستر مدنظر قرار دهد. در ادامه هر یک از مدل های مورفولوژیکی و طراحی به طور جداگانه بررسی می شود.

### 3-2- مدل مورفولوژیکی

برای بررسی تعادل و پایداری رودخانه بعد از ساخت آبشکن، از مدل مورفولوژیکی مقطع پایدار حاصل از تئوری‌های حدی استفاده شده است. هوانگ و نانسون (2000) به علت کافی نبودن معادلات اساسی جریان شامل معادله پیوستگی، مقاومت جریان و انتقال بار بستر برای توضیح پدیده تعادل (وجود سه معادله و چهار مجهول؛ عرض، عمق، سرعت و شیب) استفاده از تئوری‌های حدی<sup>1</sup> را پیشنهاد دادند. در این پژوهش از تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال بار بستر<sup>2</sup> (MSTC) استفاده شده است. از آنجا که تعداد مجهولات بیشتر از معادلات است با تبدیل عرض و عمق به یک متغیر بی‌بعد (ضریب شکل) از تعداد مجهولات کم می‌شود. ضریب شکل متناظر با مقطعی از کانال است که بیشترین ظرفیت انتقال بار بستر را دارد. ضریب شکل بی‌بعد ( $\xi$ ) طبق رابطه 1 محاسبه می‌شود. سپس سایر متغیرهای وابسته مانند عمق جریان، عرض مقطع کانال، سرعت، شیب و سایر متغیرهای طراحی بر اساس ضریب شکل برای مقطع ذوزنقه‌ای بر اساس روابط 2 تا 7 به دست می‌آیند (هوانگ و نانسون 2000).

$$\xi = \frac{B}{Y} \quad (1)$$

$$Y = \left( \frac{nQ}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{8}} (\xi + z)^{-\frac{5}{8}} (\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$B = \left( \frac{nQ}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{8}} (\xi + z)^{\frac{3}{8}} (\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$A = \left( \frac{nQ}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{4}} (\xi + z)^{-\frac{1}{4}} (\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$R = \left( \frac{nQ}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{8}} (\xi + z)^{\frac{3}{8}} (\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{-\frac{3}{4}} \quad (5)$$

$$\tau_o = \gamma R S = \gamma S^{16} (nQ)^{\frac{3}{8}} (\xi + z)^{\frac{3}{8}} (\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{-\frac{3}{4}} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)D_{50}} = \frac{S^{\frac{13}{16}}(nQ)^{\frac{3}{8}}(\xi + z)^{\frac{3}{8}}(\xi + 2\sqrt{1+z^2})^{-\frac{3}{4}}}{(G_s - 1)D_{50}} \quad (7)$$

که در آن‌ها  $B$  عرض مقطع کانال،  $Y$  عمق جریان،  $V$  سرعت،  $z$  شیب جانبی کانال (که در این تحقیق  $z$  برابر صفر در نظر گرفته شده است)،  $S$  شیب متوسط بازه رودخانه (درصد)،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $\tau_0$  تنش برشی،  $\theta$  تنش برشی بی‌بعد،  $\gamma$  وزن مخصوص آب،  $\gamma_s$  وزن مخصوص رسوب،  $G_s$  دانسیته مخصوص ذرات و  $D_{50}$  اندازه متوسط ذرات (mm) است.

$$\phi = 0.053 \frac{\left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c}\right)^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left[\frac{(G_s - 1)g}{v^2}\right]^{0.1}} \quad (8)$$

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma_w) D_{50} \theta_c \quad (9)$$

$$Q_s = \phi \times D_{50} \sqrt{G_s g D_{50}} \times B \quad (10)$$

$$\theta_c = \begin{cases} 0.24D_*^{-1} & 1 < D_* \leq 4 \\ 0.14D_*^{-0.64} & 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04D_*^{-0.1} & 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013D_*^{-0.29} & 20 < D_* \leq 150 \\ 0.055 & 150 < D_* \end{cases} \quad (11)$$

$$D_* = \left(\frac{(G_s - 1)g}{v^2}\right)^{1/3} D_{50} \quad (12)$$

#### 4-2- محاسبه بار بستر رودخانه

روابط مختلفی برای محاسبه بار بستر رودخانه وجود دارد. در این تحقیق از معادله بار بستر فان راین (1987) مطابق رابطه 8 استفاده شده است. دلیل انتخاب معادله فان راین علاوه بر دقت و کاربردی بودن آن، امکان مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با ابعاد آبشکن‌های طراحی شده توسط حسینی و همکاران (1382) و مدل استادی و همکاران (1393) (جدول 3) می‌باشد.



در روابط بالا  $\phi$  شار حجمی رسوبی بی بعد انیشتین،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی شیلدز،  $g$  شتاب ثقل،  $V$  لزجت سینماتیک آب،  $\theta_c$  تنش برشی بحرانی بی بعد،  $Q_s$  دبی رسوب و  $D_*$  اندازه بی بعد ذرات می‌باشد. برای محاسبه تنش برشی بحرانی بی بعد، منحنی شیلدز<sup>1</sup> که نشان‌دهنده آستانه حرکت ذرات است به صورت معادله 11 بیان می‌شود (فان راین، 1993 به نقل از یالین<sup>2</sup>، 1972).

### 5-2- آبشستگی

آبشستگی در اثر عبور جریان آب در مرزهای تماس با بستر و دیواره‌های قابل فرسایش ایجاد شده و باعث آسیب رساندن به پایداری و دوام سازه‌های هیدرولیکی می‌شود. پایداری، ایمنی و کارکرد آبشکن‌های رودخانه‌ای به ارزیابی صحیح از عمق و گستره آبشستگی در پیرامون آبشکن بستگی دارد. زیرا تراز کف بدنه و به‌ویژه پنجه آبشکن باید تا زیر عمق آبشکن ادامه یابد. عمق کل آبشستگی عبارتست از مجموع عمق آبشستگی موضعی و عمومی و برای محاسبه آن روابط مختلفی ارائه شده است (رابطه 13). از میان روش‌های پیشنهاد شده برای برآورد عمق آبشستگی، رابطه گیل<sup>3</sup> عمق آبشستگی بیشتری نسبت به سایر معادلات محاسبه می‌کند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388: 121). بنابراین در این تحقیق در جهت اطمینان از معادله گیل استفاده شد. آبشکن‌های زنجان‌رود نیز با رابطه گیل (روابط شماره 14 و 15) طراحی شده‌اند (مهندسان مشاور سازه‌پردازی ایران، 1372). عمق آبشستگی آبشکن منفرد نیز طبق رابطه 16 به دست می‌آید.

$$d_{s\_total} = (d_{s\_local} + d_{s\_general}) \quad (13)$$

$$d_{s\_local} = d_{s\_1} \times \left( \left( 0.07 \times \frac{L}{b} \right) + 0.14 \right) \quad (14)$$

$$d_{s\_general} = Y_1 \times \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{-\frac{6}{7}} \times \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{-P} \times \left( 1 - \frac{\tau_c}{\tau_1} \right) + \frac{\tau_c}{\tau_1} \quad (15)$$

$$d_{s\_1} = 8.4 \times Y_1 \times \left( \frac{D_{50}}{Y_1} \right)^{0.25} \times \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} - Y_1 \quad (16)$$

$d_{s\_total}$  عمق آبشستگی کل،  $d_{s\_local}$  عمق آبشستگی موضعی،  $d_{s\_general}$  عمق آبشستگی عمومی،  $L$  فاصله بین آبشکن‌ها،  $b$  طول آبشکن‌ها،  $B_1$  و  $B_2$  به ترتیب عرض رودخانه قبل و بعد از احداث آبشکن (متر)،  $\tau_c$  تنش

برشی بحرانی شیلدز می‌باشند.  $Y_1$  عمق آب (متر) قبل از احداث آبشکن (با استفاده از رابطه مانینگ محاسبه می‌شود)، و  $P$  ضریب مارپیچی (نسبت طول راستای رودخانه اصلی به طول دره رودخانه در حد فاصل دو نقطه) برابر 1 در نظر گرفته شد.

## 6-2- مدل طراحی

با توجه به دینامیک بودن سیستم رودخانه‌های آبرفتی در مدل طراحی از فرضیات ساده‌کننده‌ی زیر استفاده شده است:

- هزینه‌های طراحی شامل هزینه ساخت سازه است.
- بعضی از پارامترهای طراحی از جمله شیب طولی تاج آبشکن (افقی)، عرض تاج آبشکن (2 متر)، زاویه آبشکن (قائم)، شیب دماغه (قائم) و شیب یال‌های جانبی (قائم) ثابت در نظر گرفته شده‌اند.
- شرایط پایدار و تعادلی مدنظر است که این شرایط متناظر با ارضای تئوری حدی است.

آبشکن‌های مورد نظر این تحقیق از نوع آبشکن‌های غیر مستغرق و نفوذناپذیر بوده و در دو طرف رودخانه ساخته می‌شوند. هزینه ساخت آبشکن‌ها طبق رابطه 17 به دست می‌آید. روابط 17 تا 20 روابط مربوط به مدل طراحی (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388) و روابط 21 تا 24 قیود مدل طراحی می‌باشند.

$$COST = 2 \times N_{groyne} \times (b + root) \times (H + d_{s\_total}) \times T \times UPRC_{groyne} \quad (17)$$

$$H = \left( 0.019 \frac{L^{0.6}}{S^{0.3}} + 1 \right) \quad (18)$$

$$b = \frac{B_1 - B_2}{2} \quad (19)$$

$$N_{groyne} = \frac{L_1}{L} \quad (20)$$

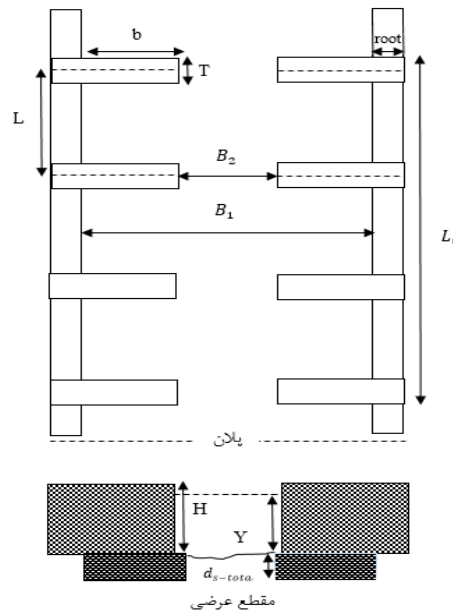
$$2 \leq \frac{L}{b} \leq 5 \quad (21)$$

$$2 \leq root \leq 4 \quad (22)$$

$$B_2 \leq B_1 \quad (23)$$

$$H \geq Y_2 \quad (24)$$

در روابط بالا قبل از احداث سازه و بعد از آن به ترتیب با اندیس 1 و 2 نشان داده شده‌اند. تعداد آبشکن‌ها در هر طرف رودخانه، ریشه آبشکن،  $H$  ارتفاع آبشکن،  $T$  عرض تاج آبشکن،  $UPRC_{groyne}$  قیمت واحد حجم سازه،  $L$  فاصله بین آبشکن‌ها،  $L_t$  طول بازه اصلاح شده و واحد تمام ابعاد بر حسب متر است. پارامترهای طراحی در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل (2): پلان و مقطع عرضی آبشکن‌ها

Fig (2): Plan and cross- section of spur dikes

طبق مطالعات سبجان و کومارداس<sup>۱</sup> (1999) و چارلتون<sup>۲</sup> (1982) نسبت فاصله به طول آبشکن (رابطه 21) بین 2 و 5 توصیه شد. همچنین محققین ریشه آبشکن (رابطه 22) را بین 2 و 4 پیشنهاد دادند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). در رابطه 23 نیز عرض تعادلی رودخانه (بعد از احداث آبشکن) نباید از عرض اولیه رودخانه بیشتر شود. در رابطه 24 به دلیل غیر مستغرق بودن آبشکن‌ها، ارتفاع آبشکن باید بزرگتر یا مساوی عمق جریان پس از احداث آبشکن گردد.

در نهایت ظرفیت انتقال بار بستر (رابطه 10) و هزینه احداث آبشکن‌ها (رابطه 17) برای هر مقطع محاسبه شده و ترکیبی که بیشترین ظرفیت انتقال بار بستر و کمترین هزینه را دارد به عنوان طرح بهینه انتخاب می‌گردد. این اهداف در تعارض با یکدیگرند. به این معنی که با بهبود مقدار یک تابع، مقدار تابع دیگر دچار افت می‌شود. مقیاس تابع هزینه واحد پولی و مقیاس تابع ظرفیت انتقال بار بستر، حجم در واحد زمان است. هدف اصلی در حل یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غالب است که در اختیار شخص تصمیم‌گیرنده برای اتخاذ تصمیم نهایی قرار می‌گیرد. به عبارتی هدف اصلی در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، تولید مجموعه جواب بهینه پارتو<sup>1</sup> می‌باشد (شریفی، 1384). برای حل مسئله بهینه‌سازی حاضر از الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه استفاده شده و برنامه در محیط برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شد.

## 2-7- الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>2</sup> (HSA)

الگوریتم جستجوی هارمونی یکی از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی بوده که از پدیده موسیقی الهام گرفته شده و توسط گیم (2000) ارائه شده است. این الگوریتم به وسیله تخمین زیبایی‌شناسی در جستجوی یک موقعیت خارق‌العاده از هارمونی است و مانند سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهترین موقعیت بهینه سراسری به وسیله ارزیابی توابع هدف تعیین می‌شود. فرآیند بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در پنج گام خلاصه می‌شود:

گام اول: معرفی مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم

ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت فرمول 25 زیر مشخص می‌گردد:

$$\text{Minimize } f(x) \quad x_i \in X_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

در مدل بهینه‌سازی، محدوده مجاز برای متغیر تصمیم به صورت  $X_{i_{\min}} < X_i < X_{i_{\max}}$  که  $X_{i_{\min}}$  و  $X_{i_{\max}}$  به ترتیب محدوده پایین و بالای هر متغیر تصمیم است. در این گام یک سری پارامترهایی مخصوص الگوریتم جستجوی هارمونی از جمله: اندازه حافظه هارمونی (HMS) که تعداد بردارهای جواب را در حافظه هارمونی نشان می‌دهد، نرخ بررسی حافظه هارمونی (HMCR<sup>3</sup>)، نرخ تنظیم قطعات (PAR<sup>4</sup>) و ماکزیمم تعداد تکرارها یا شرط توقف وارد می‌شود (ماکزیمم تعداد تکرارها به عنوان شرط توقف در نظر گرفته می‌شود). در حافظه هارمونی بعد از به دست آوردن تابع هدف هر یک از هارمونی‌ها، آن‌ها مرتب می‌شوند.

1- Pareto  
 2- Harmony Search Algorithm

3- Harmony Memory Consideration Rate  
 4- pitch adjustment rate

گام دوم: تولید حافظه هارمونی اولیه به صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیر تصمیم (جنت رستمی و همکاران، 1389: 66)

$$HM = \left[ \begin{array}{cccc|c} R_1^1 & R_2^1 & \dots & R_N^1 & F(R^1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ R_1^{HMS-1} & R_2^{HMS-1} & \dots & R_N^{HMS-1} & F(R^{HMS-1}) \\ R_1^{HMS} & R_2^{HMS} & \dots & R_N^{HMS} & F(R^{HMS}) \end{array} \right] \quad (26)$$

که  $R$  بردار یا هارمونی تولید شده،  $F(R^1)$  مقدار تابع هدف به دست آمده به ازای بردار اول و  $HM$  ماتریس حافظه هارمونی است (جنت رستمی و همکاران، 1389: 66).

گام سوم: اصلاح هارمونی جدید

در این گام با استفاده از سه مکانیزم انتخاب تصادفی، بررسی حافظه و سرعت تنظیم قطعات، یک هارمونی جدید به صورت  $R^{new} = (R_1^{new}, R_2^{new}, \dots, R_N^{new})$  تولید می‌کنند، متغیرهای تصمیمی که در این مرحله تولید می‌شوند باید در محدوده مجاز باشند.  $HMCR$  سرعت انتخاب از مقادیر مرتب‌شده در حافظه هارمونی بوده و مقدار آن بین 0 و 1 است در حالی که  $1-HMCR$  سرعت انتخاب تصادفی از محدوده مجاز است.

$$R_1^{new} \begin{cases} R_1^{new} \in \{R_1^1, R_1^2, \dots, R_1^{new}\} & \text{with probability } HMCR \\ R_1^{new} \in R(t) & \text{with probability } (1-HMCR) \end{cases} \quad (27)$$

به‌عنوان مثال اگر  $HMCR$  برابر 0/85 باشد، الگوریتم با احتمال 85 درصد بردار جدید را از بین بردارهای مرتب‌شده در حافظه هارمونی و با احتمال 15 درصد بردار جدید به صورت تصادفی در محدوده مجاز انتخاب می‌کند. این مسئله شبیه الگوریتم ژنتیک است که سرعت جهش در فرآیند انتخاب استفاده می‌شود در صورت انتخاب ارزش‌ها از داخل حافظه هارمونی پروسه صدای مجاور اجرا می‌شود. برای هر بردار جدید به دست آمده باید امتحان شود که آیا لازم است تنظیم قطعات بر روی آن انجام شود؟ اگر جواب بله بود با احتمال  $PAR$  همسایه‌های بالا و پایین نقطه به دست آمده را مورد بررسی قرار می‌دهند (رابطه 28)

$$R_i^{new} \leftarrow R_i^{new} \pm rand \times bw \quad (28)$$

اگر جواب منفی باشد، با احتمال  $1-PAR$  کاری انجام نمی‌دهد.  $bw$  فاصله اختیاری برای پهنای باند و  $rand()$  اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند.

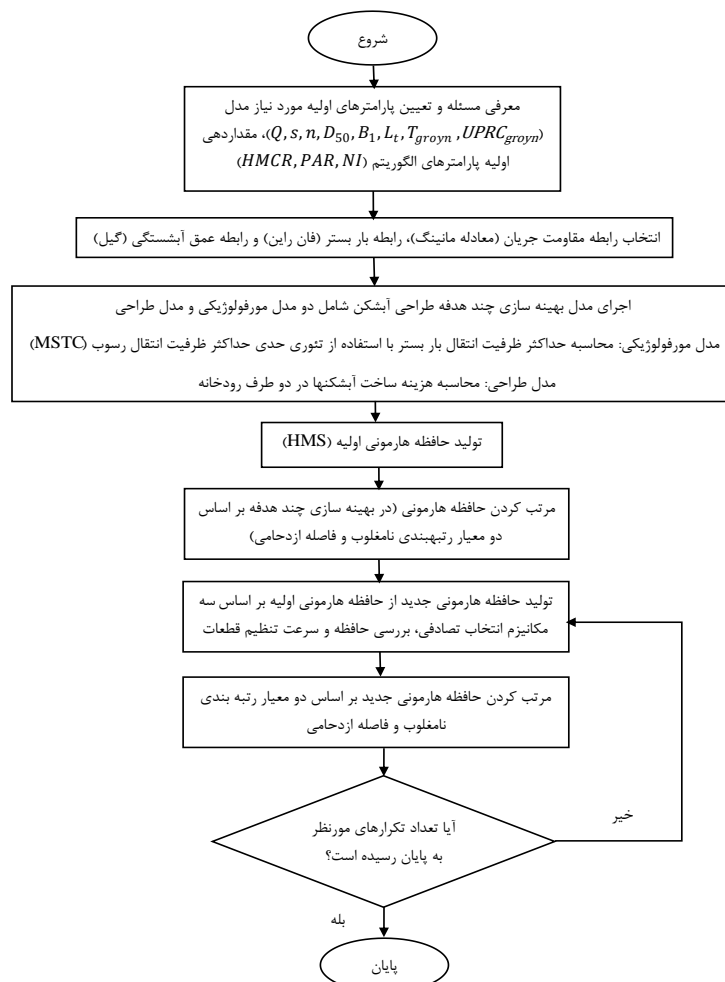
گام چهارم: جدید کردن حافظه هارمونی

اگر هارمونی جدید تولید شده بهتر از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی باشد، جایگزین آن در حافظه می‌شود و هارمونی بدتر از حافظه خارج می‌شود. در غیر این صورت الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود.

گام پنجم: بررسی معیار توقف

گام سوم و چهارم آن قدر تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی بررسی تعداد تکرار است. در صورت عدم برقراری شرط پایان، گام سوم و چهارم مجدداً تکرار می‌گردد. البته می‌توان شرط پایان یافتن الگوریتم را بر مقدار بهینه مشخصی تنظیم نمود و تا یافتن آن مقدار مراحل الگوریتم را تکرار کرد. به این ترتیب آخرین بردار به دست آمده در الگوریتم جواب مسئله است (جنت رستمی و همکاران، 1389: 67). معمولاً مقدار HMCR را در محدوده 0/90-0/99 در نظر می‌گیرند. اندازه حافظه هارمونی HMS را در محدوده 5-50 در نظر می‌گیرند، این پارامتر به تعداد متغیرهای تصمیم وابسته است، هرچه اندازه حافظه هارمونی بزرگتر باشد مسئله از نظر ابعادی بزرگ می‌شود بنابراین بیشتر سعی می‌کنند این پارامتر کوچکتر انتخاب شود. احتمال بررسی تنظیم قطعات PAR را معمولاً بین 0/3-0/99 در نظر می‌گیرند، البته با توجه به مسئله مورد نظر ممکن است کمتر از این محدوده را هم در نظر بگیرند (مهدوی و همکاران، 2007: 1572). الگوریتم هارمونی در مواردی می‌تواند بهتر از روش‌های فراکاووشی قبلی باشد از جمله این موارد حافظه مصرفی بسیار مناسب و همچنین وابستگی نسبتاً کمتر به دانش پیچیده ریاضیات و در مواردی که فضای جستجو گسترده باشد عملکرد بسیار مطلوبی دارد بنابراین در این مقاله از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شد. در شکل 3 فلوجارت الگوریتم جستجوی هارمونی چند هدفه نشان داده شده است.

جهت اجرای مدل بهینه‌سازی از داده‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه به عنوان ورودی مدل استفاده شد که در جدول 1 و 2 ارائه شده‌اند.



شکل (3): فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی چند هدفه

Fig (3): Flowchart of multi-objective harmony search algorithm

جدول (1): دبی با دوره بازگشت‌های مختلف در ایستگاه سرچم (مهندسان مشاور سازه‌پردازی ایران، 1372)

Table (1): Discharge with different return periods at Sarcham station (Sazeh Pardazi Iran Consulting Engineers, 1993)

$T$ (year)	2	5	10	20	50	100	200	1000
$Q$ ( $m^3/s$ )	85	146	210	271	390	440	520	752

جدول (2): ورودی‌های مورد نیاز مدل بهینه‌سازی (مهندسان مشاور سازه‌پردازی ایران، 1372)

Table (2): Required inputs of the optimization model (Sazeh Pardazi Iran Consulting Engineers, 1993)

$L_t$ (m)	$T_{groyn}$ (m)	$UPRC_{groyn}$	$Q_s$ ( $m^3/s$ )	$D_{50}$ (m)	$B_1$ (m)	S	$\rho_s$ ( $kg/m^3$ )	n
17000	2	1	0/2012	0/011	100	0/005	2650	0/038

### 3- یافته‌ها و بحث

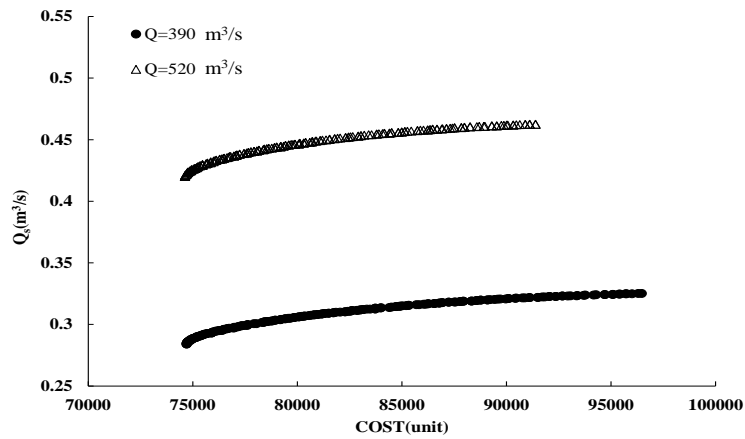
قبل از ورود به حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه آبشکن لازم است عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. به همین منظور از توابع  $MOP_2$  و  $MOP_4$  (کارلوس و همکاران، 2002) به عنوان توابع تست استفاده شد. پس از صحت‌سنجی و موفقیت الگوریتم جستجوی هارمونی در پیدا کردن جواب‌های بهینه توابع تست، از آن برای حل مسئله اصلی آبشکن با تعداد تکرار 200، تعداد جمعیت برابر 100 و با در نظر گرفتن HMCR و PAR به ترتیب برابر 0/9 و 0/4 استفاده شد. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های زنجان‌رود (جدول 1 و 2) برای دبی طراحی با دوره بازگشت 50 سال، معادله بار بستر فان راین (1987) و معادله آبشستگی گیل (1972) اجرا گردید.

#### 1-3- آنالیز حساسیت

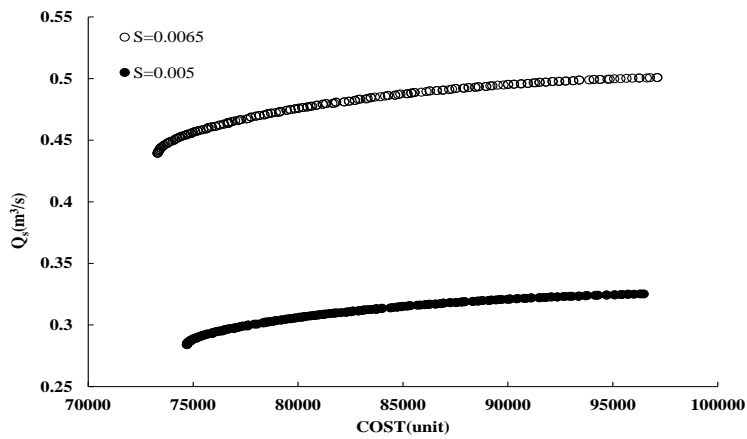
برای متغیرهای مستقل مدل شامل: دبی، شیب و عرض اولیه رودخانه آنالیز حساسیت نسبی انجام شد. با توجه به شکل 4 مشاهده می‌گردد که با افزایش دبی از 390 به 520 متر مکعب بر ثانیه، ظرفیت انتقال بار بستر آن افزایش می‌یابد. همچنین عمق آبشستگی افزایش یافته و فاصله بین آبشکن‌ها کمتر شده که نتیجه آن افزایش هزینه ساخت سازه به علت زیاد شدن تعداد آبشکن‌ها می‌باشد. طبق رابطه پیوستگی نیز با افزایش دبی، سطح مقطع افزایش و طول آبشکن کاهش می‌یابد. با افزایش دبی نرخ تغییرات عمق نسبت به عرض مقطع سرعت بیشتری داشته که باعث کاهش ضریب شکل می‌شود. با افزایش شیب، رودخانه‌های مستقیم به سمت شریانی شدن پیش می‌روند. شریانی‌شدن رودخانه‌ها باعث افزایش ضریب شکل شده و علاوه بر آن ظرفیت انتقال بار بستر نیز افزایش می‌یابد (شکل 5). بنابراین عرض رودخانه نیز افزایش و طول آبشکن کم شده و هزینه ساخت سازه نیز کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش عرض اولیه رودخانه، ضریب شکل افزایش می‌یابد که طبق تئوری حداکثر ظرفیت انتقال رسوب ( $MSTC^1$ ) ظرفیت انتقال بار بستر افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین به ازای دبی ثابت عمق آب کم شده و ارتفاع آبشکن و میزان آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. طول آبشکن نیز زیاد شده که باعث افزایش هزینه می‌شود.

1- Maximum Sediment Transport Capacity

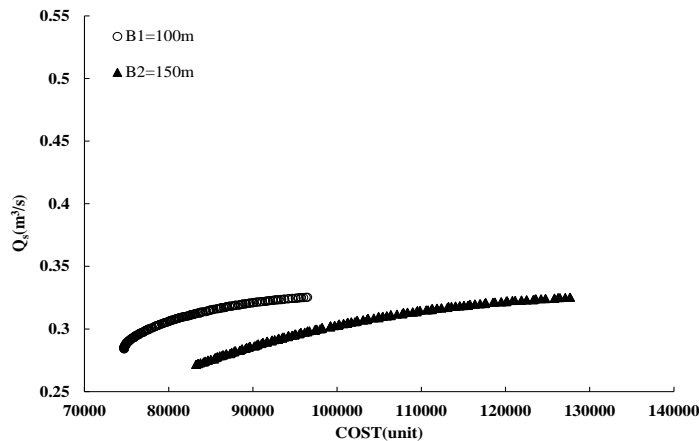




شکل (4): جبهه جواب ناشی از تغییر دبی  
**Fig (4):** Pareto front from change in discharge



شکل (5): جبهه جواب ناشی از تغییر شیب (دبی 390 مترمکعب بر ثانیه)  
**Fig (5):** Pareto front from change in slope (Q=390 m<sup>3</sup>/s)

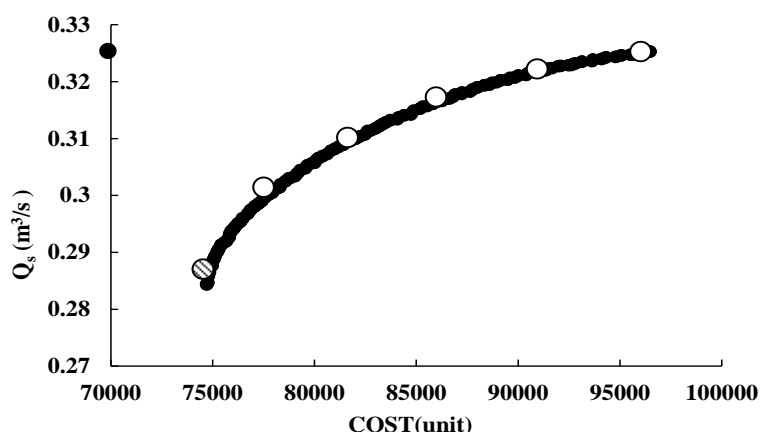


شکل (6): جبهه جواب ناشی از تغییر عرض اولیه رودخانه (دبی 390 مترمکعب بر ثانیه)  
**Fig (6):** Pareto front from change in initial width of the river ( $Q=390 \text{ m}^3/\text{s}$ )

### 3-2- جبهه جواب خروجی از الگوریتم جستجوی هارمونی چند هدفه

در شکل 7 جبهه جواب حاصل از اجرای مدل نشان داده شده است. منحنی پارتو نشان داده شده در شکل دارای گستردگی و توزیع مناسبی است که سطح زیادی را پوشش داده و به خوبی رابطه معکوس توابع هدف را نشان می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش مقدار یک تابع از مقدار دیگری کاسته می‌شود و بالعکس. در این پژوهش با توجه به جبهه جواب پارتو، سناریوهای مختلفی روی منحنی (دایره‌های تو خالی و دایره هاشور زده در شکل 7) در نظر گرفته شد. روش انتخاب سناریوهای مختلف روی نمودار هم به صورتی است که در فضای هدف پخش منظم و یکنواختی داشته و بتوانند پوشش مناسبی از جبهه پارتو ارائه دهند. سپس از بین گزینه‌های موجود سناریویی که کمترین فاصله اقلیدسی را با نقطه ایده‌آل داشته باشد به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید. نقطه ایده‌آل نقطه‌ای است که بیشترین مقدار بار بستر و کمترین هزینه را داشته باشد که بر روی شکل 7 با علامت دایره توپر مشخص شده است. فاصله اقلیدسی از رابطه 29 محاسبه می‌شود (کارول و همکاران، 1997).

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (29)$$



شکل (7): نمودار پارتو (کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن دبی بار بستر)  
**Fig (7): Pareto diagram (minimizing cost and maximizing sediment discharge)**

### 3-3- مقایسه نتایج

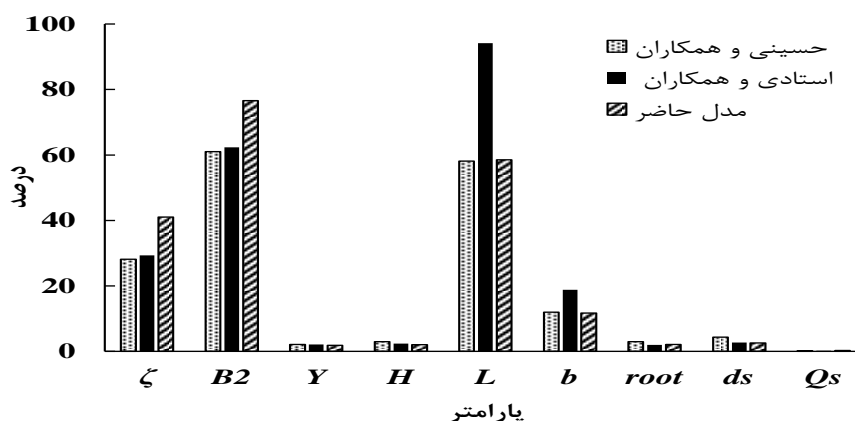
دبی اولیه برای طراحی آبشکن‌های زنجان‌رود 520 مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است که دبی بزرگی می‌باشد. حسینی و همکاران (1382) طراحی استاندارد آبشکن‌های زنجان‌رود را بر اساس دبی 390 مترمکعب بر ثانیه اصلاح و انجام دادند. آن‌ها احداث آبشکن‌های زنجان‌رود را از نظر اقتصادی مطلوب ارزیابی کردند ولی از نظر فنی، ایراداتی به آن وارد نمودند. از جمله این موارد مطابق نبودن با استانداردهای طراحی است. نتایج بدست آمده از این پژوهش با طراحی انجام شده توسط حسینی و همکاران (1382) و مدل استادی و همکاران (1393) مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول 3 سناریوهای مختلف به دست آمده از مدل پیشنهادی، طراحی انجام شده حسینی و همکاران (1382) و مدل به دست آمده توسط استادی و همکاران (1393) براساس توابع هدف هزینه و دبی بار بستر بی‌بُعد شده مقایسه شده است. سناریوی اول تا ششم به ترتیب 46/90، 41/34، 30/34، 51/63، 56/50، 60/88 و 63/90 درصد هزینه کمتر و به ترتیب 38/14، 37/10، 35/59، 33/41، 30/34 و 25/48 درصد دبی بار بستر بیشتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) ارائه می‌دهد. در بین سناریوهای مختلف، سناریوی ششم (دایره هاشور زده در شکل 7) با توجه به اینکه کمترین فاصله اقلیدسی را نسبت به سایر سناریوها با نقطه ایده‌آل دارد، به عنوان طرح بهینه انتخاب شد. جواب بهینه بدست آمده در مقایسه با نتایج استادی و همکاران 3/3 درصد هزینه کمتر و 16/62 درصد دبی بار بستر بیشتری را نتیجه می‌دهد. براساس اطلاعات جدول 3 و با بررسی نتایج بدست آمده از پژوهش اخیر می‌توان اظهار داشت که مدل پیشنهادی ضریب شکل بزرگتری را در مقایسه با طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393) ارائه کرده است به بیان دیگر برای عرض تعادلی رودخانه به ترتیب 25/55 و 22/87 درصد مقدار بیشتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393)

و برای عمق جریان نیز به ترتیب 14/08 و 12/67 درصد مقدار کمتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393) به دست آورده است. طول آبشکن بهینه به ترتیب 41/5 و 37/89 درصد مقدار کمتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393) و ارتفاع آبشکن بهینه نیز 107 درصد مقدار بیشتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) و 14/46 درصد مقدار کمتری نسبت به مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393) برآورد شده که نتیجه آن برآورد کمتر عمق آبشستگی و به دنبال آن هزینه ساخت کمتر آبشکن می‌باشد. فواصل بین آبشکن‌ها در مدل حاضر نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) 4/5 درصد مقدار بیشتری ارائه کرده است که در نتیجه به تعداد آبشکن‌های کمتری نیاز است و نسبت به مدل استادی و همکاران (1393) نیز 37/86 درصد فاصله کمتری محاسبه کرده است. این مدل همچنین دبی بار بستر را به ترتیب به میزان 41/15 و 23/47 درصد نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) و پژوهش استادی و همکاران (1393) بیشتر محاسبه کرده است که نشان‌دهنده عملکرد و کارایی بهتر مدل پیشنهادی است. در شکل 8 نیز جواب طرح بهینه با نتایج طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل بهینه‌سازی استادی و همکاران (1393) مقایسه شده است.

جدول (3): متغیرهای تصمیم (سناریوهای) حاصل از پژوهش حاضر و توابع هدف متناظر با آن‌ها، مدل به دست آمده توسط استادی و همکاران (1393) و طرح زنجانرود

**Table (3):** The decision variables (scenarios) resulting from the current research and the objective functions corresponding to them, the obtained model by Ostadi et al. (2014) and the Zanjanrood design

پارامتر	متغیرهای تصمیم مدل پژوهش حاضر						
	سناریو 1	سناریو 2	سناریو 3	سناریو 4	سناریو 5	سناریو 6	مدل استادی
$Q$	390	390	390	390	390	390	390
$\square$	13/41	16/16	19/40	23/72	50/1	41/07	29/32
$B_{opt}$	38/92	43/49	48/54	54/80	63/14	76/59	62/33
$Y_{opt}$	2/90	2/69	2/50	2/30	2/10	1/86	2/13
H	2/91	2/81	2/71	2/58	2/40	2/07	2/42
$b$	30/53	28/25	25/72	22/59	18/42	11/70	18/84
$L$	152/68	141/25	128/64	112/98	92/14	58/52	94/18
$d_{s-total}$	3/74	3/42	3/16	2/92	2/72	2/57	2/75
$T$	2	2	2	2	2	2	2
root	2/145	2/145	2/145	2/145	2/145	2/145	2
Cost	96470	91100	86540	81840	77620	74701	77894
$Q_s$	0/3253	0/3219	0/3170	0/3099	0/2999	0/2840	0/23
هزینه بی‌بعد شده	100	94/43	89/70	84/83	80/46	77/43	80/74
دبی رسوب بی‌بعد شده	100	98/95	97/44	95/26	92/19	87/33	70/70



شکل (8): مقایسه پارامترهای خروجی مدل پژوهش حاضر با طراحی حسینی و همکاران (1382) و مدل استادی و همکاران (1393)

Fig (8): Comparison of the output parameters of the present research model with the plan of Hosseini et al (2003) and the model of Ostadi et al (2014)

#### 4- نتیجه‌گیری

در نظر گرفتن مسائل چند هدفه در مطالعات مهندسی رودخانه اهمیت زیادی دارد. در پژوهش اخیر طراحی بهینه‌ی ابعاد آبشکن‌های احداث‌شده در زنگان‌رود با در نظر گرفتن همزمان دو هدف کمینه کردن هزینه طرح و بیشینه کردن بار بستر با حفظ پایداری مقطع در نظر گرفته شد. هدف از ارائه این مدل، طراحی بهینه سازه‌ای است که شرایط مورفولوژیکی رودخانه در آن برقرار باشد یعنی از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری در حالت تعادل و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی در حل مسائل چند هدفه ابتدا حل توابع تست انجام شد. پس از موفقیت‌آمیز بودن عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی در حل مسائل چند هدفه، مدل بهینه‌سازی چند هدفه غیرخطی برای محاسبه پارامترهای طراحی آبشکن و پایداری مقطع مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل با استفاده از داده‌های زنگان‌رود و برای دبی طراحی با دوره بازگشت 50 سال، معادله بار بستر فان راین (1987) و معادله آبشستگی گیل (1972) اجرا شد. حساسیت-سنجی مدل نسبت به متغیرهای مستقل شامل دبی، شیب و عرض اولیه رودخانه نشان داد که با افزایش دبی، ظرفیت انتقال بار بستر افزایش می‌یابد که باعث افزایش عمق آبشستگی و کمتر شدن فاصله بین آبشکن‌ها و افزایش هزینه ساخت شده و همچنین ضریب شکل بزرگتری به همراه داشته و همچنین ظرفیت انتقال بار بستر افزایش می‌یابد، بنابراین عرض رودخانه افزایش و طول آبشکن کم شده و در نتیجه هزینه ساخت کاهش می‌یابد. با افزایش عرض اولیه رودخانه نیز ضریب شکل افزایش می‌یابد و ظرفیت انتقال بار بستر افزایش

و سپس کاهش می‌یابد. به ازای دبی ثابت عمق آب کم شده و ارتفاع آبشکن و میزان آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. همچنین طول آبشکن نیز زیاد شده که باعث افزایش هزینه می‌شود. پس از اجرای مدل، یک جبهه پارتوی نامغلوب بهینه برای اهداف ذکر شده بدست آمد. براساس جبهه جواب پارتو، شش سناریوی مختلف در نظر گرفته شد. سناریوی اول تا ششم به ترتیب 41/34، 46/90، 51/63، 56/50، 60/88 و 63/90 درصد هزینه کمتر و به ترتیب 38/14، 37/10، 35/59، 33/41، 30/34 و 25/48 درصد انتقال دبی بار بستر بیشتری نسبت به طراحی حسینی و همکاران (1382) ارائه دادند. فاصله اقلیدسی سناریوهای مختلف نسبت به نقطه ایده‌آل محاسبه و بر مبنای آن سناریوی ششم به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید. مقایسه جواب بهینه با نتایج به دست آمده توسط استادی و همکاران (1393) نشان داد که مدل پیشنهادی 3/3 درصد کاهش در هزینه و 16/62 درصد انتقال دبی بار بستر بیشتری را ارائه داده است که نشان‌دهنده کارایی مطلوب و دقت بهتر مدل پیشنهادی و روش مستقیم است هر چند که پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها می‌تواند تا حدودی کاربرد این روش‌ها را با محدودیت مواجه نماید. الگوریتم‌های تکاملی جدید به همراه ارائه مکانیزم‌های جدید مرتب‌سازی پاسخ‌ها برای استخراج جبهه پارتو و مقایسه آن با مدل مورد استفاده در این تحقیق نیز می‌تواند در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

## 5-منابع

- Abbasi, S., Pourshahbaz, H., & Taghvai, P. (2019). Investigation of Bed Morphological Variation in Channels with a Group of Parallel Unequal Spur Dike in Various Orientations. *Irrig. Water Eng. J.*, 9(35), 38-48.
- Abouzari, N., Majdzade Tabatabeib, M., & yazdi, J. (2021) Optimal Design of Groynes with Hydraulic, Technical and Economic Criteria, *Amirkabir Journl Civil Engineering*, 53(2) 749-766.
- Alauddin, M. & Tsujimoto, T. (2011). Optimum Design of Groynes for Stabilization of Lowland Rivers. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*. 67(4), I\_145- I\_150.
- Asghari Sarasekanrood, A., Madadi, A., Bashokouh, Z., & Ghaleh, E. (2021). Investigating the Pattern and Dynamics of Gharasu River in Ardabil (From Samian Bridge to Sabalan Dam), *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(27), 4- 7.
- Askari, A. (1995). Investigating the Effect of the Distance to Length to Depth of Local Scouring Ratio on Local Scouring at the Head of Stone Mesh Spur-Dikes, *Master's thesis*, Tehran University.
- Carlos, A., Coello, C., David A., Veldhuizen, V. & Gary, B. L. (2002). Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. 2<sup>nd</sup> edition.
- Carriaga, C.C. & Mays, L.W. (2001). Optimization Approach to Stable Channel System Design, *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*.
- Carroll, J.D., Kumbasar, E., & Romney, A.K. (1997). An Equivalence Relation between Correspondence Analysis and Classical Metric Multidimensional Scaling for the Recovery of Euclidean Distances. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*. 50(1), 81-92.
- Charlton, F.G. (1982). River Stabilization and Training in Gravel-Bed Rivers. In Chapter 23 of Gravel Bed Rivers. Edited by R.D. Hey, et al., John Wiley and Sons Ltd., Chichester, England, p 875.
- Geem Z.W. (2000). Optimal Design of Water Distribution Networks Using Harmony Search. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University.
- Gill, M.A. (1972). Erosion of Sand Beds Around Spur Dikes, *Journal Hydraulic Division, ASCE*, 98(HY9), 1587-1602.
- Hosseini, A., Habibi, M., & Saberi, A. (2003). Research Project of Technical and Economical Evaluation of Zanjanrood built Spur-Dikes in the Zanjanrood River, *Soil Protection and Watershed Research Center*.
- Hosseini, A., Saberi, A., & Habibi, M. (2011). Economical Evaluation of built Spur-Dikes on Zanjanrood, *Watershed Engineering and Management*, 2(4), 205- 213.

- Huang, H.Q., & Nanson, G.C. (2000). Hydraulic Geometry and Maximum Flow Efficiency as Products of the Principle of Least Action, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1 – 16.
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. (2010). Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes, No.516.
- JanatRostami, S., Kholghi, M., & Bozorg Haddad, O. (2010). Management of Reservoir Operation System Using Improved Harmony Search Algorithm, *Water and Soil Science*, 20/1, 3, 61-71.
- Julien, P.Y. second ed. (1995-2010). United Kingdom by Cambridge University Press, UK.
- Kalita, H.M, Sarma, A.K & Bhattacharjya, R.K. (2014). Evaluation of Optimal River Training Work using GA Based Linked Simulation- Optimization Approach. *Water resources management*. 28(8), 2077- 2092.
- Lee, K.S., & Geem, Z.W. (2004). A New Structural Optimization Method based on the Harmony Search Algorithm. *Computers & structures*, 82, 781-798.
- Mahdavi M, Fesanghary, M., & Damangir, E. (2007). An Improved Harmony Search Algorithm for Solving Optimization Problems. *Applied Mathematics and Computation* 188, 1567-1579.
- Masjedi, A., Otufi, A., & Moradi, A. (2009). Investigating the Effect of the Length of Spur-Dike on the Depth of Scouring around it at the Position of 90 Degrees in the 180 Degrees Arc of Rivers. *8th International Congress on Civil Engineering*, May 11- 13, Shiraz University.
- Mosavi, B.S., Sanei, M., Salajegheh, A., & Motamed Vaziri, B. (2010). Experimental Investigation of Groin Length Effect on River Bank Erosion Reduction. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 4 (12), 65-68.
- Nazari, B. (2011). Predicting the Morphological Response of the River to Dam Construction using Hypothetical Theories, *Master's thesis*, Power and Water University of Technology.
- Ostadi, F., Majdzade Tabatabaei, M., & Alimohammadi, S. (2014). The Optimization Model of the Design of the Dimensions of River Spur-Dikes and its Role in the Morphological Stabilization of River, *Journal of Hydraulics*, 9(4), 55-72.
- Rabet, A. (2005). Investigating the positive economic and social effects of land stabilization along the Zanjanrood, *3rd Erosion and Sediment National Conference*.
- Samadian, M., Hessari, B., Mohammadi, M., Alami, M. (2020). Assessment of River Training Plans Using MIKE11 Model (Case Study: Zarineh River in Shahindezh City Conjunction). *Journal of Hydrogeomorphology*. 6(22), 5-8.
- Sazeh Pardazi Iran Consulting Engineers. (1993). Control and Evaluation of Zanjanrood border land protection plan.



- Schumm, S.A. (1984). Channel morphology, Symposium on River Meandering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Sharifi, F. (2005). Optimization Operation of Multi-Purpose Reservoirs using the Multi-Community Ant Colony Algorithm, *Master's thesis*, Iran University of Science & Technology.
- Shields, A. (1936). Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed- Load Movement. *California Institute of Technology*, Pasadena (translated from German).
- Sobhan, S.A. & Kumar Das, S. (1999). Spacing of Straight Spurs in Series. *Journal of Civil Eng*, The Institution of Engineers, Bangladesh. CE27 (2), 177-181.
- Talaat, A., Attia, K., Elsaheed, G., & Ibraheem, M. (2009). Implementation of Spur Dike to Reduce Bank Erosion of Temporary Diversion Channels during Barrages Construction. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3190-3205.
- Vaghefi, M., Faraji, B., Akbari, M., & Eghbalzadeh, A. (2018). Numerical Investigation of Flow Pattern Around a Tshaped Spur Dike in the Vicinity of Attractive and Repelling Protective Structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(93), 1-15.
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical Modeling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport. Ph.D Thesis, Delft University of Technology.
- Yalin, M. S. (1977). *Mechanics of Sediment Transport*. Pergamon, Oxford, UK.
- Zare, M., & Honar, T. (2016). The Effect of Groyne on Reduction of the Scour Depth around Bridge Piers in River Bends. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74), 167-192.