



طراحی بهینه‌ی آبشکن‌ها با لحاظ توأم معیارهای هیدرولیکی، فنی و اقتصادی

نسرین ابوذری^۱، محمد رضا مجدزاده طباطبایی^{۲*}، جعفر یزدی^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، شهیدبهشتی، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱

کلمات کلیدی:

آبشکن

ساماندهی رودخانه

بهینه‌سازی

NSGA-II

هزینه

خلاصه: آبشکن یکی از سازه‌های حفاظتی برای ساماندهی رودخانه است که اهمیت بسیاری داشته و به منظور جلوگیری از فرسایش در رودخانه احداث می‌شوند. به منظور ارائه طرحی که از لحاظ فنی و اقتصادی بهینه باشد، از مدل بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شده است. در تحقیق حاضر طراحی هیدرولیکی و همچنین طراحی سازه‌ای آبشکن در قالب یک مساله‌ی بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده که برای حل آن از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. توابع هدف مدل بهینه‌سازی شامل حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی انتقال بار رسوب به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. هدف اول برای مقرون به صرفه کردن طرح و تابع هدف دوم بر اساس تعاریف پایداری رودخانه به منظور پایدار ماندن رودخانه لحاظ شده است. واسنجی مدل با استفاده از اطلاعات رودخانه زنجان رود معادله بار بستر و آبستتگی انجام و مدل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی دبی جریان و شیب طولی حساسیت سنجی و تاثیر آن روی پارامترهای خروجی بررسی شده و صحت سنجی مدل با اطلاعات سازه‌ای مطالعه موردی انجام شد. جبهه جواب مساله بهینه‌سازی بر اساس توابع هزینه و بار بستر استخراج شد. با مقایسه پنج طرح بهینه (۵ سناریوی مختلف طراحی) از جبهه جواب با طرح موجود و نقطه ایده آل نتایج نشان می‌دهد طرحی که به عنوان طرح منتخب از بین ۵ سناریو برگزیده شده نزدیکترین نتیجه را با نقطه ایده آل دارد. طرح منتخب پیشنهاد می‌دهد که طول آبشکن و فاصله بین آبشکن‌ها نسبت به طرح موجود بیشتر و شیب یال‌های جانبی آبشکن کم شود همچنین ریشه آبشکن مقدار کم تری از ریشه در طرح موجود دارد. طرح منتخب به اندازه‌ی ۶۴/۹۵٪ هزینه‌ی کمتر و ۳۹/۹۶٪ بار رسوب انتقالی را نسبت به طرح موجود افزایش می‌دهد.

۱-مقدمه

جدید و کاربردهای دیگر در رودخانه احداث می‌شوند که ملاک‌های مختلفی برای طراحی آن‌ها وجود دارد. حفاظت ساحل رودخانه در مقابل فرسایش از اهداف اصلی ساماندهی رودخانه‌ها در توسعه پایدار منابع آب به شمار می‌آید. چرا که فرسایش سواحل رودخانه‌ها، باعث خسارت به اراضی کشاورزی، آسیب دیدن سازه‌های مجاور، مانند پل‌ها و جاده‌ها، عریض شدن آبراهه جریان و مسائل زیست محیطی قابل ملاحظه است. این مسأله موجب این است که هر ساله مبالغ زیادی برای حفاظت از سواحل رودخانه در برابر فرسایش هزینه شود [۱]. روشی که در این تحقیق بدان پرداخته شده به‌طور هم‌زمان ابعاد بهینه‌ی سازه را مطابق ضوابط استاندارد با کمینه کردن هزینه‌ی طرح، و بیشینه کردن

ساماندهی رودخانه به مجموعه عملیاتی گفته می‌شود که شامل احداث و اجرای سازه‌هایی با ایجاد تمهیدات ویژه در طول و امتداد جریان رودخانه می‌باشد و به منظور تامین اهداف خاصی صورت می‌گیرد در حقیقت ساماندهی رودخانه کاربرد دانش علمی، فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیستی و زیبا شناسی را در محیط طبیعی و دینامیکی رودخانه می‌طلبد. آبشکن یکی از سازه‌ها می‌باشد که به صورت عرضی نسبت به جریان رودخانه قرار می‌گیرد و به منظور هدایت محور جریان در جهت مطلوب و تله اندازی رسوب به منظور ایجاد ساحل

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_majdzadeh@sbu.ac.ir



اشکال¹PS پیچیده بسیار امیدوارکننده است [۵]. تعریف فاصله ازدحامی، استفاده از عملگر انتخاب و نخبه گرایی از ویژگی های عمده ی الگوریتم (NSGA-II) می باشد [۶]. الگوریتم ژنتیک با رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II) به طور گسترده و موفقیت آمیز در مسائل بهینه سازی چندهدفه استفاده می شود [۷] و در تحقیق حاضر برای مساله بهینه سازی آبشکن استفاده شده است. Qi wang et (2019) al یک روش ساده اما موثر برای گرفتن روابط میان پنج پارامتر اصلی الگوریتم ژنتیک با رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)، که یکی از الگوریتم های چند هدفه تکاملی (MOEAs) در این زمینه است، ارائه داده است. نتایج نشان می دهد که سلسله مراتبی از اثرات ناشی از پنج پارامتر NSGA-II وجود دارد و اندازه جمعیت یکی از مهم ترین هاست، که نشان می دهد که NSGA-II به خصوص برای مشکلات پیچیده حساس به جمعیت اولیه است و همچنین شاخص های تقاطع و جهش تاثیر بیشتری نسبت به احتمال آن ها دارند [۸]. Liu and Chen (2019) در مطالعه خود با توجه به تنوع الگوریتم ژنتیک با رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II) در غربال کردن راه حل های غیر مغلوب، روش فاصله ازدحامی پیشنهاد داده اند. مقایسه ای بین الگوریتم بهینه سازی NSGA-II، الگوریتم فراابتکاری بهینه سازی چند هدفه تجمع ذرات (MOPSO)^۲، الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات مرتب نشده (NSPSO)^۳ و (CDE)^۴ به ترتیب انجام شد. با تجزیه و تحلیل تنوع و همگرایی چهار الگوریتم، استراتژی انتخاب راه حل های غیرمغلوب بر اساس فاصله ازدحامی دارای عملکرد بهتری است [۹]. استادی و همکاران (۱۳۹۳)، مدل بهینه سازی آبشکن ها که متشکل از سه زیرمدل مورفولوژیکی، طراحی و بهینه سازی است را با استفاده از نرم افزار Lingo انجام دادند. نتایج حاصل، حاکی از آن است که به کارگیری معادلات بار بستر و آبشستگی، نقش به سزایی در تعیین ابعاد آبشکن و هزینه های ساخت سازه خواهند داشت. از بین معادلات بار بستر استفاده شده معادله ی Englund and Fredsoe بیشترین ظرفیت انتقال رسوب و کمترین هزینه، و معادله بار بستر van Rijn کمترین ظرفیت انتقال رسوب و بیشترین هزینه را نتیجه می دهند [۱۰]. Kalit et al (2014) در مطالعه خود، یک مدل بهینه سازی با

پایداری مقطع، طراحی می کند. در این راستا یک مدل بهینه سازی چندهدفه با الگوریتم بهینه سازی NSGA-II توسعه یافته است. دو تابع هدف مورد نظر در این مدل، تابع مقطع پایدار و تابع هزینه احداث سازه می باشد. تابع مقطع پایدار به واسطه تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب (MSTC2) به دست آمده است. با وجود پژوهش های متعددی که برای بهینه سازی اجزای آبشکن و کارایی یا عدم کارایی سازه ها، نظیر ارزیابی عمق آبشستگی پیرامون سازه و میزان رسوب گذاری و فرسایش ساحل رودخانه صورت گرفته، تاکنون روشی که همزمان قادر به بررسی ملاحظات طراحی، اقتصادی و تغییرات دینامیکی رودخانه باشد، ارائه نشده است از این رو در این تحقیق به لزوم احداث سازه ساماندهی رودخانه و در کنار آن به لزوم در نظر گرفتن همزمان پایداری سازه و رودخانه و حداقل کردن هزینه توجه شده است. مطالعات مربوط به موضوع مورد پژوهش در سه بخش تعادل و پایداری رودخانه، طراحی آبشکن و بهینه سازی در ادامه آورده شده است. Hack (۱۹۶۰) مفهوم تعادل دینامیکی را به این شکل تعریف کردند: تعادل به گونه ای که در اثر تداوم شرایط دبی و بار رسوبی ورودی، شکل و خصوصیات کلی رودخانه تغییر نکند [۲]. در مورد مطالعاتی که از مفهوم طراحی بهینه با در نظر گرفتن پایداری کانال استفاده کرده اند، می توان به مقاله ی Mays and Carriaga (2001) اشاره نمود که در آن به طراحی کانال پایدار با رویکرد بهینه سازی اقتصادی پرداخته اند. وی در بررسی پایداری کانال از روش هایی نظیر حداکثر سرعت مجاز، تنش برشی بحرانی و مقطع بهینه هیدرولیکی، به عنوان قیدهای طراحی استفاده کرده و با توجه به سایر قیدها، نظیر عمق آبشستگی حداکثر، هزینه سازه را کمینه می کند. آنها مدل بهینه سازی غیرخطی را در نرم افزار MINOS-GAMS کدنویسی و حل کرده اند [۳]. NSGA-II نسخه ی بهبود یافته ی NSGA است، اولین بار در سال 2000 توسط دب و همکاران توسعه داده شده است [۴]. Li and Zhang (۲۰۰۹) در تحقیق خود نسخه ی جدید MOEA / D را بر مبنای تکامل دیفرانسیل (DE)، یا به عبارتی MOEA / D-DE ارائه داده و الگوریتم پیشنهادی را با NSGA-II با همان اپراتورهای بازتولید در نمونه های آزمایش شده در این مقاله مقایسه کرده است. نتایج تجربی نشان می دهد که MOEA / D می تواند به طور قابل توجهی از NSGA-II در نمونه های آزمایش بهتر عمل کند. این نشان می دهد که الگوریتم های تکاملی چندهدفه تجزیه در برخورد با

1 - Pareto Set

2 Multi Objective Particle Swarm Optimization

3 Non Dominated Sorting Particle Swarm Optimization Algorithm

4 crowding distance elimination

اصلاح شده بهتر از آبشکن معمولی به منظور نگه داری کانال نوابری در دبی های کم و حفاظت ساحل در دبی های زیاد است [۱۴]. روش های کمی ارزیابی پایداری رودخانه شامل روش های متعددی مانند هندسه هیدرولیکی، روش های منطقی، عددی، تئوری های حدی و... است، اما فقط به بررسی تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته می شود. در دو دهه اخیر استفاده از مدل هایی که یک فرضیه حد نهایت را به عنوان بخشی از فرمول های خود برای پیشبینی مورفولوژی آبراهه به کار می بندد، افزایش یافته است. در این روش از معیار بیشینه سازی یا کمینه سازی یک پارامتر کلیدی از قبیل قدرت جریان، نرخ مصرف انرژی یا غلظت رسوب به عنوان سومین معادله لازم برای تحلیل کامل شیب، عرض و عمق جریان استفاده می کنند [۱۵]. نیر و همکاران (۱۳۹۶) [۱۶] و دیگر افراد دیگر مطالعات آزمایشگاهی زیادی بر روی آبشکن ها و آبشستگی آبشکن ها انجام داده اند. با توجه به مطالعات پیشین توجه زیادی به آبشستگی دماغه آبشکن ها و طراحی هیدرولیکی آبشکن ها شده است و مطالعات کمتری بر روی جنبه بهینه سازی اقتصادی آبشکن انجام شده است. بنابراین هدف این مطالعه این است که با توجه به هیدرولیک کانال و نحوه طراحی آبشکن، بهینه سازی اقتصادی آبشکن انجام شود. به این معنی که هیدرولیک و سازه به طور همزمان در نظر گرفته شده و این دو توأم به لحاظ اقتصادی و پایداری رودخانه ای بهینه سازی شود.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

طراحی آبشکن

به طور کلی عوامل مهم در طراحی آبشکن شامل شکل و پلان، زاویه آبشکن نسبت به دیواره (θ)، طول آبشکن (L)، فاصله آبشکن ها (S)، ارتفاع تاج (H_g)، شکل مقطع، مصالح ساختمانی و عمق آبشستگی مورد انتظار می باشند [۱]. در این مطالعه طراحی هیدرولیکی و سازه ای آبشکن انجام شده است.

الف) طراحی هیدرولیکی آبشکن

طراحی هیدرولیکی آبشکن ها مستلزم رعایت ضوابطی می باشد. در تحقیق حاضر برای طراحی هیدرولیکی آبشکن ها روابط و ضوابط زیر در نظر گرفته شده است.

مدل هیدرودینامیکی برای به دست آوردن ترکیبی مقرون به صرفه از آبشکن ها در نظر گرفته اند که باعث می شود یک سرعت جریان تعریف شده توسط کاربر در یک بخش از پیش تعیین شده از یک رودخانه حفظ شود. مدل بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و مدل شبیه سازی جریان با استفاده از طرح پرتو و گرما برای حل معادلات دو بعدی هیدرودینامیک در جریان غیردائمی توسعه داده شده است و نتایج منطقی برای همه سناریوهای آزمایش به دست آمده است [11]. Baser et al (2015). یک روش جدید برای تعیین پارامترهای مطلوب (زاویه آبشکن حفاظتی نسبت به دیوار کانال، طول آن و فاصله آن از آبشکن، شدت جریان و قطر ذرات رسوبی) یک ضریب محافظتی آبشکن جهت کاهش عمق آبشستگی در اطراف آبشکن اصلی پیشنهاد کرده اند. پارامترهای مورد مطالعه برای به دست آوردن مقادیر بهینه مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله پیش بینی یک رویکرد ترکیبی جدید با استفاده از سیستم استنتاج فازی و بهینه سازی ذرات (ANFIS-PSO) مبتنی بر تطبیقی مبتنی بر شبکه برای پیش بینی پارامترهای حفاظتی آبشکن در جهت کنترل آبشستگی اطراف آبشکن استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت روش پیشنهادی نسبت به سایر روش ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است [12]. Mohammed ALAUDDIN و همکاران (۲۰۱۱) طراحی بهینه آبشکن ها را برای عملکرد موثر انجام داده اند. مدل دو بعدی، RIC-Nays در این مطالعه پس از صحت سنجی استفاده شده است. پارامترهای کانال و جریان بر اساس انطباق با یکی از رودخانه های معمولی بنگلادش بوده است. در این مقاله چهار جهت و سه ساختار آبشکن در نظر گرفته شده است. عملکرد آبشکن ها از طریق سه شاخص کلیدی - فرسایش در بستر کانال، رسوب در ناحیه آبشکن ها و آبشستگی در نزدیکی دماغه آبشکن ارزیابی می شود. محاسبات نشان داده که عملکرد یک آبشکن اصلاح شده بهتر از آبشکن مستقیم می باشد [13]. Mohammed ALAUDDIN و همکاران (۲۰۱۲) به دنبال ساختار بهینه آبشکن برای بهتر کردن عملکرد آبشکن ها هم در دبی های بالا و دبی های پایین بوده و رویه این تحقیق مانند تحقیق Mohammed ALAUDDIN و همکاران (۲۰۱۱) بوده و مشابه آن عملکرد آبشکن ها از طریق سه شاخص کلیدی - فرسایش در بستر کانال (تالاب)، رسوب در ناحیه آبشکن ها و آبشستگی در نزدیکی آبشکن ارزیابی شده است. محاسبات نشان می دهد که عملکرد یک آبشکن

آبشستگی گیل (۱۹۷۲) به دلیل اینکه بیشترین عمق آبشستگی را محاسبه می کند در جهت اطمینان استفاده شده است [۱] همچنین آبشکن های زنگان رود با معادله گیل (۱۹۷۲) رابطه های شماره ۴ و ۵ طراحی شده اند.

$$d_{sGeneral} = y_1 \times \left(\frac{B}{W}\right)^{-6/7} \times \left(\frac{B}{W}\right)^{-p} \times \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_1}\right) + \frac{\tau_c}{\tau_1} \quad (4)$$

$$d_{sLocal} = 8.375 \times \left(\frac{D_{50}}{y_1}\right)^{1/4} \times y_1 \times \left(\frac{B}{W}\right)^{6/7} - y_1 \quad (5)$$

$d_{sGeneral}$ عمق آبشستگی عمومی، d_{sLocal} عمق آبشستگی

موضعی، B عرض اولیه رودخانه پیش از احداث آبشکن ها، W عرض نهایی رودخانه، p ضریب پیچشی (نسبت طول راستای رودخانه اصلی به طول دره رودخانه در حد فاصل دو نقطه) رودخانه که در اینجا می باشد، τ_c تنش برشی بحرانی، τ_1 تنش برشی قبل از احداث آبشکن ها، D_{50} متوسط اندازه مواد بستر، y_1 عمق آب قبل از احداث آبشکن ها (عمق آب در بالادست آبشکن ها)، عمق جریان با استفاده از معادله ی مانینگ رابطه ی ۱ محاسبه می شود.
-تعداد آبشکن ها:

$$N_{groyne} = \frac{S + L_{total}}{S + b} \quad (6)$$

$$b = T + 2zH_g \quad (7)$$

S فاصله بین آبشکن ها، L_{total} طول کل بازه مورد مطالعه، b عرض کف آبشکن می باشد. T عرض تاج آبشکن (متر)، z شیب پال های جانبی آبشکن، H_g ارتفاع آبشکن (متر) می باشد. شکل ۱-۲ بازه و آبشکن ها را نشان می دهد.

محاسبه بار بستر رودخانه:

روابط مختلفی برای محاسبه بار بستر رودخانه وجود دارد که همه ی این معادلات شامل آستانه حرکت یعنی تنش برشی می باشند. چراکه بار بستر رودخانه برای به حرکت درآمدن نیاز به دبی مشخصی دارد و با مقدار کمتر از آن دبی، رسوبات جابه جا نمی شوند. برای

در این تحقیق از رابطه مقاومت جریان مانینگ (رابطه ی ۱) استفاده شده است [۱۷]. با داشتن n ضریب زبری مانینگ و S شیب طولی، عمق جریان محاسبه می شود.

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} R^{2/3} A \quad (1)$$

A مساحت مقطع جریان (m^2)، R شعاع هیدرولیکی جریان (m)

می باشند.

مقادیر تنش برشی جریان و تنش برشی بحرانی از روابط زیر محاسبه شده است [۱۰]. مقدار θ_c از رابطه Julien (1995) محاسبه می شود [18]

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

$$\theta_c = \begin{cases} 0.5 \tan \phi & D_* \leq 0.3 \\ 0.25 D_*^{-0.6} \tan \phi & 0.3 < D_* \leq 19 \\ 0.013 D_*^{0.4} \tan \phi & 19 < D_* \leq 50 \\ 0.06 \tan \phi & 50 < D_* \end{cases}, \tau_0 = \gamma_w R S, \quad (3)$$

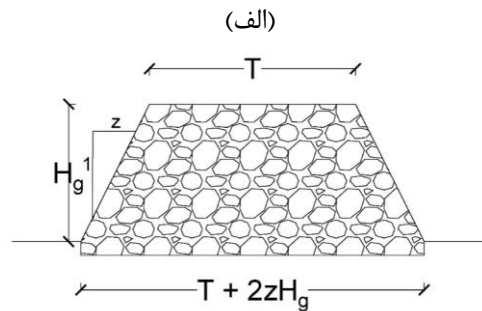
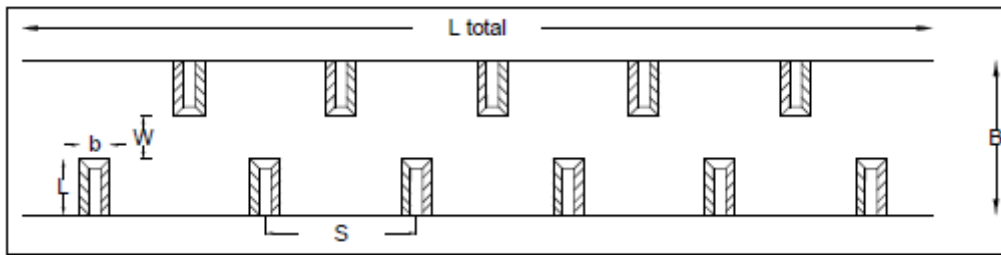
$$\tau_c = \gamma_w \theta_c (G_s - 1) D_{50}, \theta = \frac{\tau_0}{\gamma_w (G_s - 1) D_{50}}$$

D_* اندازه بی بعد ذرات، γ_w وزن مخصوص آب، θ_c تنش

برشی بحرانی بی بعد، τ_0 تنش برشی جریان، τ_c تنش برشی بحرانی جریان، θ تنش برشی بی بعد جریان، G_s چگالی جامد ذرات، D_{50} اندازه متوسط ذرات (mm)، ϕ زاویه اصطکاک داخلی رسوبات، U لزجت دینامیکی می باشد.

آبشستگی

آبشستگی عبارت است از فرسایش ناشی از حرکت سیال آب در مجاورت بستر یا جداره های قابل فرسایش، در مجاورت این فرآیند شرایطی فراهم می گردد که آب توانایی حرکت دادن ذرات و رسوبات مجاور خود را پیدا کرده و آن ها را با خود حمل می کند عمق آبشستگی کل شامل عمق آبشستگی موضعی و عمق آبشستگی عمومی می باشد و برای محاسبه آن روابط مختلفی وجود دارد. در این جا از رابطه ی



شکل ۱-۲- الف) بازهی آبشکنها در راستای طولی رودخانه ب) مقطع عرضی آبشکن [۱]

و Moscotr (2002) تاریخچه نسبتا جامعی از این تئوری‌ها ارائه کرده‌اند [20]. Huang and Nanson (2000) تعادل یا هندسه هیدرولیکی پایدار در رودخانه‌های آبرفتی قابل تنظیم را معادل شرایطی می‌دانند که آب و جریان رسوب بدون فرسایش و رسوب گذاری عبور کنند. به عقیده آن‌ها به علت کافی نبودن معادلات اساسی جریان، شامل معادلات پیوستگی، مقاومت جریان و انتقال رسوب برای توضیح پدیده تعادل (وجود سه معادله و چهار مجهول عرض، عمق، سرعت و شیب) استفاده از تئوری‌های حدی پیشنهاد شده است [۲۱]. در این تحقیق از تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب استفاده شده است.

ب) طراحی سازه ای آبشکن

نیروهایی که به آبشکن وارد می‌شود نیروهای محرک و مقاوم است (نیروها در واحد طول آبشکن می‌باشند). شکل ۲-۲- نیروهای وارد بر آبشکن را نشان و در جدول ۱ نحوه محاسبه این نیروها قید شده است..

$$\sum F_R = f_g + f_{dw} + f_w + F_d \quad (10)$$

محاسبه تنش برشی بحرانی از روابطی که در بالا گفته شد استفاده می‌شود.

$$q^* = \frac{q_b}{D_{50} \sqrt{(G_s - 1) g D_{50}}} \quad (8)$$

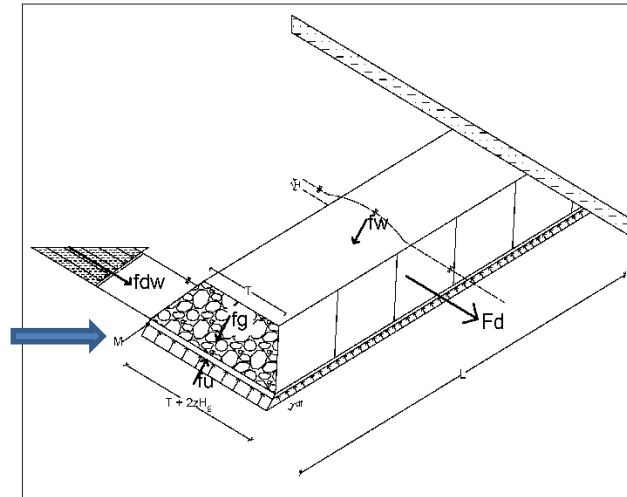
q^* شار حجمی رسوبی بی بعد و q_b بار رسوب واحد عرض ($\frac{m^3}{m.s}$) می‌باشد. در این تحقیق از معادله بار بستر Van Rijn (1984) استفاده شده است که مطابق رابطه زیر می‌باشد [۱۹].

$$q^* = \frac{0.053}{D_*^{0.3}} \left(\frac{\theta}{\theta_c} - 1 \right)^{2.1} \quad (9)$$

تئوری‌های حدی^۱

تعدادی از معروف‌ترین تئوری‌های حدی، تئوری حداکثر ظرفیت انتقال رسوب^۲ (MSTC)، تئوری حداقل نرخ اتلاف انرژی^۳ (MEDR)، تئوری حداقل توان جریان^۴ (MSP) و ... می‌باشند. Leon (2003) ، Singh (2003) ، Hung et al. (2004)

- 1 External Hypothesis
- 2 Maximum Sediment Transport Capacity
- 3 Minimum Energy Dissipation Rate
- 4 Minimum Stream Power



شکل ۲-۲ نیروهای وارد بر آبشکن
Fig. 2.2. Forces on the groynes

جدول ۱. نیروهای وارد بر آبشکن
Table 1. Forces on the groynes

نیروی زیر فشار آب (نیوتن)	نیروی درگ	فشار قائم آب	نیروی هیدروستاتیکی آب در پایین- دست آبشکن	نیروی وزن آبشکن	نیروها
-	$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d V_{gf}^2 A_s [22]$	$f_w = \gamma_w \times \Delta H \times T \times 1$	$f_{dw} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times y^2 \times 1$	$f_g = \gamma_g \times (T + 2 \times z \times (H_g + d_f)) \times (H_g + d_f) \times 1$	نیروهای مقاوم
$f_u = \gamma_w \times y \times (T + 2 \times z \times H_g) \times 1$	-	-	-	-	نیروهای محرک
وزن $(\frac{N}{m^3}) \gamma_w$ مخصوص آب، عمق آب در ناحیه آبشکن‌ها، T عرض تاج آبشکن، z شیب یال-های جانبی آبشکن و ارتفاع آبشکن H_g	$C_d = \frac{2g s y^3 S}{q_{gf}^2 H_g}, V_{gf} = 0.1V, [22]$ A_s ضریب درگ، (N) ، مساحت مقطع عرضی $\rho, (m^2)$ چگالی S فاصله بین آبشکن‌ها (m) ، شیب طولی، g شتاب گرانش $(\frac{m}{s^2})$ و V_{gf} سرعت ناحیه آبشکن‌ها	ΔH : ارتفاع آب روی آبشکن		وزن مخصوص $(\frac{N}{m^3}) \gamma_g$ آبشکن و d_f عمق پی در دماغه آبشکن	توضیحات

لنگرهای محرک حول نقطه M می باشد.

$$\sum F_D = f_u \quad (11)$$

توسعه‌ی مدل

$\sum F_R$ مجموع نیروهای مقاوم، $\sum F_D$ مجموع نیروهای محرک،

در این مطالعه، طراحی آبشکنی که کمترین هزینه و بیشترین

$\sum M_D$ مجموع لنگرهای مقاوم حول نقطه M ، $\sum M_R$ مجموع

$$f_2 = \text{Max} Q_s(\bar{x}) = W \times q_b \quad (13)$$

هزینه های طراحی شامل هزینه های خاکبرداری و خاکریزی و هزینه ساخت آبشکن می باشد. f_1 و f_2 توابع هدف زیرمدل هیدرولیکی بوده و اجزای آبشکن ها را با هدف کمینه سازی هزینه و همچنین حصول عرض و عمق تعادلی رودخانه طراحی می کنند که به ترتیب در روابط ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. $Cost(\bar{x})$ تابع هدف هزینه است که از محاسبه حجم احداث سازه آبشکن و همچنین حجم خاکبرداری و خاکریزی مورد نیاز و ضرب آن ها در هزینه واحد متناظر با آن و تعداد آبشکن ها به دست آمده است. تابع هدف رسوب یا $Q_s(\bar{x})$ برای پیش بینی حالت تعادل در رودخانه هندسه پایدار مقطع مورد استفاده قرار می گیرد که هدف آن کمی سازی حالات پایداری قبل و بعد از احداث سازه بوده و این کار با استفاده از تئوری های حدی انجام می شود. حل تحلیلی توسط Huang and Nanson (2000) انجام شده است. تابع هدف بیشینه سازی رسوب که با $Q_s(\bar{x})$ نمایش داده می شود برای به دست آوردن نسبت عرض به عمق بهینه کانال ($\zeta = \frac{W}{y}$) می باشد. نسبت مذکور متناظر با مقطعی از کانال است که بیشترین ظرفیت انتقال بار بستر را دارد. N_{groyne} تعداد آبشکن ها، T عرض تاج آبشکن، Z شیب پال های جانبی آبشکن، H_g ارتفاع آبشکن، L طول آبشکن، $root$ ریشه آبشکن، d_f عمق پی در دماغه آبشکن، $UPRC_{groyne}$ هزینه واحد حجم سازه، $UPRC_{excavation}$ هزینه واحد حجم خاکبرداری، $UPRC_{earthfill}$ هزینه واحد حجم خاکریزی می باشد. شکل شماتیک پی کنی دماغه آبشکن در شکل ۳-۱ آورده شده است.

$$length = R \times \pi \quad (14)$$

$$R = \frac{(T + 2 \times Z \times H_g)}{2} + d_f \quad (15)$$

جهت محاسبه عمق پی و حجم خاکبرداری پی مطابق رابطه ۱۴ و ۱۵ و شکل ۳-۱ عمل شده است [۲۴].

مدل بهینه سازی

مدل بهینه سازی از ترکیب زیرمدل هیدرولیکی و زیرمدل سازه ای تشکیل می شود. توابع هدف آن مطابق روابط ۱۲ و ۱۳ شرح

پایداری را داشته و تعادل رودخانه را حفظ کند، مورد بررسی قرار می گیرد. برای دست یابی به این اهداف یک زیر مدل بهینه سازی چند هدفه مطرح می شود، که دارای دو تابع هدف است، یکی از توابع هدف کمینه سازی هزینه و دیگری بیشینه سازی رسوب می باشد. مدل حاضر شامل سه زیرمدل هیدرولیکی، سازه ای و از مجموع این دو زیرمدل بهینه سازی می باشد. در زیر مدل هیدرولیکی، پس از تعیین پارامترهای هیدرولیکی رودخانه، عرض و عمق تعادلی رودخانه به دست می آید و در ادامه تعداد و ابعاد آبشکن ها محاسبه شده و در انتها هزینه احداث آبشکن ها به دست می آید. در زیر مدل سازه ای، تحلیل پایداری آبشکن پس از محاسبه نیرو های وارد بر آبشکن انجام می شود، و در صورت پایدار نبودن آبشکن، لازم است ابعاد به دست آمده از زیر مدل هیدرولیکی اصلاح شود.

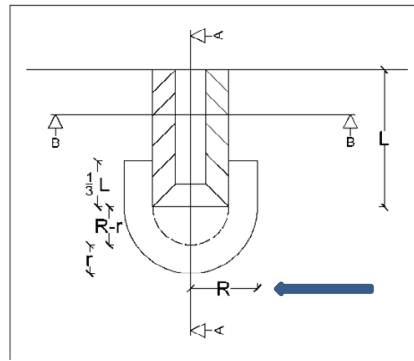
۳- مفروضات و روابط حاکم بر مدل بهینه سازی

بازه ای اصلاح شده مستقیم فرض شده و جریان دائمی می باشد مقطع رودخانه مستطیلی و عریض می باشد. همچنین برخی پارامترها که شامل شیب طولی تاج آبشکن (افقی)، ریشه آبشکن (۲ متر)، زاویه آبشکن (قائم) برای ساده سازی ثابت در نظر گرفته شده اند. ورودی های زیرمدل هیدرولیکی شامل Q دبی طراحی، s شیب طولی رودخانه، n ضریب زبری مانینگ، D_{50} اندازه متوسط ذرات، \emptyset زاویه اصطکاک داخلی رسوبات، v لزجت سینماتیکی، G_s چگالی جامد ذرات رسوب و B عرض اولیه رودخانه پیش از احداث آبشکن ها می باشد.

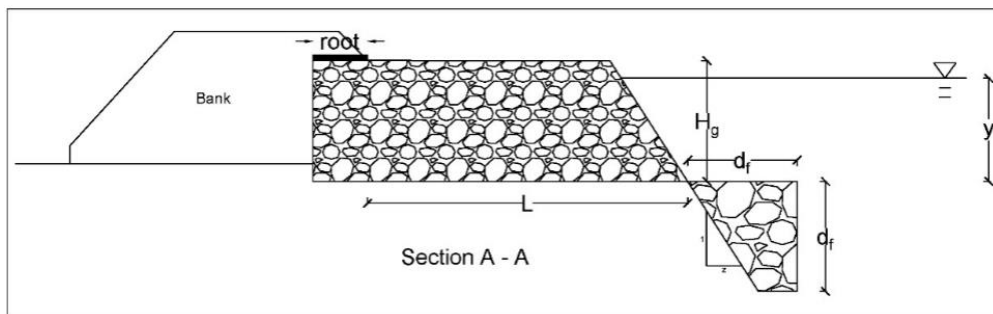
فرمول بندی مساله بهینه سازی

هدف از بهینه سازی کمینه شدن هزینه های ساخت آبشکن که با $Cost(\bar{x})$ و بیشینه شدن ظرفیت انتقال رسوب رودخانه که با $Q_s(\bar{x})$ نمایش داده شده است، می باشد. این اهداف بصورت زیر فرمول بندی شده است:

$$f_1 = \text{Min} Cost(\bar{x}) = (N_{groyne} \times UPRC_{groyne} \times (T + z \times H_g) \times H_g \times (L + root)) + (N_{groyne} \times UPRC_{excavation} \times (2 \times d_f^2 - z \times d_f^2) \times \frac{1}{3} \times L) + (N_{groyne} \times UPRC_{earthfill} \times (2 \times d_f^2 - z \times d_f^2) \times \frac{1}{3} \times L) + (N_{groyne} \times UPRC_{earthfill} \times length \times (2 \times d_f^2 - z \times d_f^2)) + (N_{groyne} \times UPRC_{excavation} \times length \times (2 \times d_f^2 - z \times d_f^2)) \quad (12)$$



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱-الف) پلان آبشکن (ب) سایر مشخصات آبشکن و پی آن [۲۳]

Fig. 3.1. groynes plan (b) Other groynes specifications and its foundation

متغیر تصمیم‌هایی که در بردار \vec{x} نشان داده شده به ترتیب ارتفاع آبشکن، طول آبشکن، شیب یال‌های جانبی آبشکن، عرض تاج آبشکن و فاصله بین آبشکن‌ها می‌باشد. $g(\vec{x})$ و $h(\vec{x})$ قیود مساله بهینه‌سازی می‌باشند که به صورت زیر در مدل تعریف شده‌اند و به دو دسته قیود هیدرولیکی و قیود سازه‌ای تقسیم می‌شوند:

الف: قیدهای مربوط به زیرمدل هیدرولیکی:

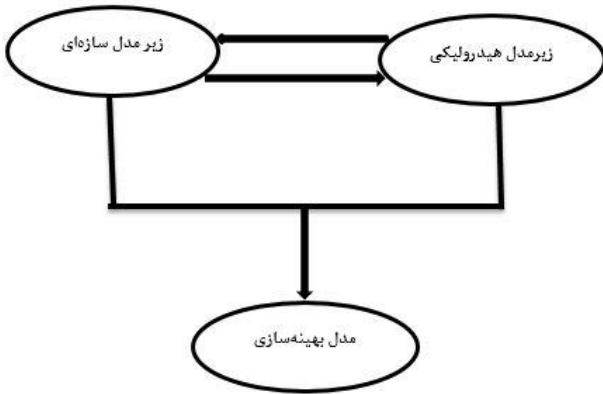
$$S.T.: \frac{S}{L} < 4, W > 10, W < 0.3B, \zeta > 0 \quad (18)$$

قیدهای (۱۸) به ترتیب از چپ به راست مربوط به محدودیت طول و فاصله بین آبشکن‌هاست که از رابطه سوزوکی و همکاران (۱۹۸۷) [۱]، مربوط به عرض نهایی آبشکن‌ها، در انتخاب طول آبشکن‌ها

داده شد. در زیرمدل بهینه‌سازی W و y و به دنبال آن ابعاد آبشکن یعنی ارتفاع آبشکن (H_g)، طول آبشکن (L)، شیب یال‌های جانبی آبشکن (z)، عرض تاج آبشکن (T) و فاصله بین آبشکن‌ها (S) با توجه به ضوابط و قیدهای طراحی و مطابق شکل ۲-۱-ب بهینه می‌شود. با توجه به مقادیری که از این مرحله به دست می‌آید هزینه احداث آبشکن‌ها کمینه و همچنین دبی رسوب بیشینه به صورت توأمان برای هر مقطع محاسبه شده‌است. متغیرهای تصمیم در مدل به شرح بردار \vec{x} تعریف شده‌اند که با زیرمدل بهینه‌سازی مقادیر بهینه آن‌ها محاسبه شده‌است:

$$\vec{x} = [H_g, L, z, T, S] \quad (16)$$

$$\text{Subjected to: } g(\vec{x}) \leq 0, h(\vec{x}) = 0, \vec{x} \geq 0 \quad (17)$$



شکل ۳-۲- روندنمای زیرمدل بهینه سازی
Fig. 3.2. Optimization sub-model layout

نزدیک شدن به مقدار بهینه یک هدف متناظر با دور شدن از مقدار بهینه هدف دیگر می باشد. برای حل مساله بهینه سازی پیش رو از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه NSGA-II استفاده شده است. چرا که از مزایایی نظیر کنترل ازدحام جبهه‌ی جواب بهینه با استفاده از فاصله ازدحامی و سهولت نسبی پیاده سازی برخوردار است. شکل ۳-۲- روندنمای زیرمدل بهینه سازی را نشان می دهد.

مراحل الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)

مراحل اصلی الگوریتم NSGA-II که یکی از روش‌های چند هدفه الگوریتم ژنتیک می باشد، به شرح ذیل است:

ایجاد جمعیت اولیه

محاسبه معیارهای برازندگی

مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط های غلبه کردن

محاسبه فاصله ازدحامی

انتخاب: به محض اینکه جمعیت اولیه بر اساس شرط های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می شود.

مفهوم غلبگی به صورت زیر تعریف می شود:

در یک مسأله حداقل سازی از دو جواب x_1 و x_2 ، جواب x_1 ، جواب x_2 را مغلوب می کند اگر:

$$\forall i : f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \quad i = 1, \dots, m \quad (21)$$

$$\exists i | f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \quad i = 1, \dots, m \quad (22)$$

در رودخانه های کوچک، رعایت حداقل عرض ۱۰ متر رودخانه، در هر مقطع عرضی از بازه رودخانه، مجموع طول موثر آبشکن ها در دو سمت رودخانه حداکثر باید معادل ۳۰ درصد عرض رودخانه در وضعیت طبیعی و موجود آن باشد [۱]، نسبت عرض به عمق بهینه کانال می باشد که با $\zeta = \frac{W}{y}$ نشان داده می شود و به صورت بدیهی بایستی مقداری مثبت داشته باشد.

ب: قیدهای مربوط به زیرمدل سازه ای:

برای بررسی پایداری آبشکن هایی که در رودخانه احداث شده اند زیرمدل سازه ای تعریف شده است که هدف از آن محاسبه نیروهای وارده بر آبشکن بوده و پس از آن تحلیل در مقابل لغزش و واژگونی می باشد.

الف) ضریب اطمینان در مقابل لغزش

پایداری در مقابل لغزش زمانی اتفاق می افتد که نسبت مجموع نیروهای مقاوم ($\sum F_R$) به مجموع نیروهای محرک ($\sum F_D$) بزرگتر از ۱/۳ باشد.

ب) ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

پایداری در مقابل واژگونی زمانی رخ می دهد که نسبت مجموع لنگرهای مقاوم نسبت به دماغه آبشکن (نقطه M در شکل) بزرگتر از ۱/۳ برابر مجموع لنگرهای واژگون کننده نسبت به همان نقطه باشد [۲۵].

S.T. :

$$F.S. = \frac{\sum F_R}{\sum F_D} > 1.3 \quad (19)$$

$$F.R. = \frac{\sum M_R}{\sum M_D} > 1.3 \quad (20)$$

الگوریتم حل

بهینه سازی برای حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن ظرفیت انتقال رسوب است و این دو هدف در تناقض با یکدیگر هستند.

تکرار می‌شوند [26].

در جدول ۲ پارامترهای مربوط به الگوریتم NSGA-II پس از حساسیت‌سنجی برای چند مساله ریاضی بهینه‌سازی چندهدفه (ZDT1, ZDT2, ZDT3, ZDT4) نشان داده شده است [۲۷].

۴- نتایج و بحث

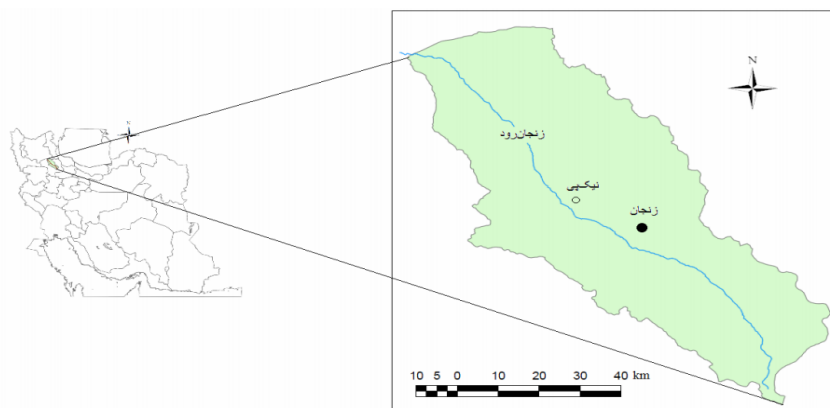
زنجان رود یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قزل‌اوزن است که از محل چمن سلطانیه واقع در ۴۵ کیلومتری شرق زنجان شروع و پس از طی حدود ۱۴۲ کیلومتر در محل روستای رجین واقع در ۸۵ کیلومتری غرب شهر زنجان به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. شکل (۴-۱) موقعیت حوضه آبریز و محدوده‌ی ساماندهی شده‌ی زنجان رود را نشان می‌دهد. در پروژه‌ی ساماندهی 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 طول ۳۵ کیلومتر از مسیر رودخانه طرح‌هایی را که از نظر اقتصادی

این انتخاب بر اساس دو المان صورت می‌پذیرد: رتبه جمعیت: جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند. محاسبه فاصله: با فرض این که p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. گفتنی است که اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس براساس فاصله ازدحامی است. انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید. تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش. جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل.

در مرحله‌ی نخست، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والد‌های قبلی می‌شوند و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا بر حسب رتبه‌ی دسته‌بندی می‌شوند و قسمتی از آن‌ها که دارای رتبه پایین‌تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در اینجا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌شود. تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم NSGA-II
Table 2. Parameter's algorithm NSGA 2

اندازه جمعیت (nPop)	تعداد تکرارها (MaxIt)	احتمال تقاطع (Pcrossover)	احتمال جهش (Pmutation)	تعداد متغیرهای تصمیم (nVar)	نرخ جهش (mutation rate= μ)
۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۷	۰/۳	۵	۰/۰۲



شکل ۴-۱- موقعیت حوضه آبریز و محدوده ساماندهی شده‌ی زنجان رود در محدوده پل سرچم [۱۰]
Fig. 4.1. Location of water zone and Zanjanrood organized area in Sarcham bridge area

هزینه‌ی محاسبه شده توسط مدل ۱۵۹۷۱۳/۷ واحد هزینه می باشد در صورتی که هزینه احداث آبشکن های اجرا شده در رودخانه زنجانرود ۳۱۰۶۵۲/۳۶۲ واحد هزینه می باشد و ضرایب اطمینان لغزش و واژگونی محاسبه شده توسط مدل به ترتیب ۴/۹۶ و ۵/۰۱ می باشد که مطابق جدول ۴ انطباق قابل قبولی با ضرایب اطمینان لغزش و واژگونی آبشکن های اجرا شده در رودخانه زنجانرود را دارد بنابراین می توان اظهار داشت که مدل نتایج قابل قبولی حتی بهتری را داشته است. بر این اساس سایر پارامترهای خروجی مدل اندازه گیری شده و براساس گزارش شرکت مشاورین سازه پردازی ایران در جدول ۳ و ۴ می باشد که خطای آن ها و مقایسه ای از پارامترهای خروجی مدل و طرح موجود نیز در شکل ۵-۱ آمده است:

حلیل حساسیت مدل

تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیرهای مستقل شامل شیب (s)، دبی (Q). درصد تغییرات خروجی های مدل نسبت به درصد تغییرات ورودی های مذکور با استفاده از دبی ۳۹۰ متر مکعب بر ثانیه صورت گرفته است. درصد تغییرات ورودی ها نسبت به مشخصات زنجانرود که در جدول ۴ قید شده است محاسبه می شود.

تحلیل حساسیت پارامترهای خروجی نسبت به تغییرات شیب و دبی جریان

با توجه به نمودار ۵-۲ ملاحظه می شود که با افزایش دبی جریان، پایداری کاهش یافته است. زیرا با توجه به اینکه تحلیل حساسیت

دارای مزیت های نسبی هستند، در بستر رودخانه اجرا کرده است. این امر با احداث آب شکن های پاره سنگی، به کار گیری سازه هایی از جنس گابیون، خشکه چین، سنگ و ملات، ایجاد خاک ریزهای طولی (گوره) و برپا نمودن دیوارهای سنگ و سیمانی در دو جناح اصلی رودخانه صورت گرفته است [۱۰].

داده های مورد نیاز برای بهینه سازی از منطقه‌ی مورد مطالعه در جدول های ۳ و ۴ داده های موردنیاز برای بهینه سازی مشاهده می شود.

واسنجی مدل

با توجه به اینکه مدل بهینه سازی طراحی آبشکن با استفاده از داده های زنجان رود واسنجی شده است واسنجی مدل با اطلاعات موجود در جدول ۴ و دبی طراحی با دوره بازگشت ۵۰ ساله و معادله بار بستر Van Rijn(1987) و معادله آبشستگی گیل (۱۹۷۲) رابطه (۴) و (۵) انجام شده است.

صحت سنجی

در تحقیق حاضر همانطور که در بخش واسنجی مدل گفته شد، مدل با معادلات هیدرولیکی واسنجی شده است. برای صحت سنجی مدل و اطمینان از اینکه مدل به درستی عمل می کند از اطلاعات سازه ای رودخانه زنجان رود که در گزارش شرکت مشاورین سازه پردازی ایران (طرح موجود) در جدول (۴) شرح داده شده است استفاده می شود.

جدول ۳. دبی با دوره بازگشتهای مختلف در ایستگاه سرچم [۲۳]

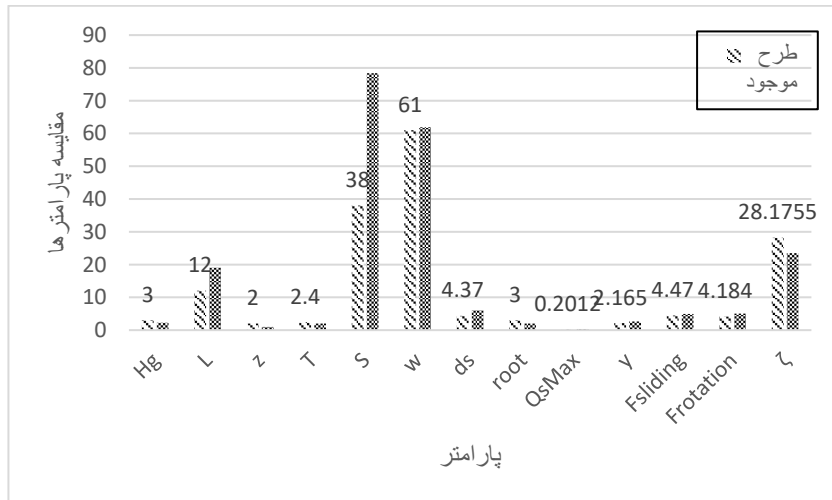
Table 3. Discharge with variety returns period (Sarcham station)

T(year)	۲	۵	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰۰
Q(m ³ /s)	۸۵	۱۴۶	۲۱۰	۲۷۱	۳۹۰	۴۴۰	۵۲۰	۷۵۲

جدول ۴. اطلاعات و ورودی های موردنیاز مدل بهینه سازی [۲۳]

Table 4. Optimized input data

UPRC _{groyne}	UPRC _{excavation}	UPRC _{earthfill}	L _{total}	B	S ₀	w
۱	۱	۱	۱۷۰۰۰ متر	۱۰۰ متر	۰/۰۰۵	۶۱ متر
D ₅₀	n	$\rho_s(\frac{kg}{m^3})$	φ	Cost(unit)	F _{sliding}	F _{rotation}
۰/۰۱۱ متر	۰/۰۳۸	۲۶۵۰	۳۷°	۳۱۰۶۵۲/۳۶۲	۴/۴۷	۴/۱۸۴



شکل ۵-۱- مقایسه پارامترهای خروجی مدل و اجرا شده در رودخانه زنجانرود
 Fig. 5.1. Comparison between output data and run's data

رسوب و در نتیجه برای تعدیل عرض رودخانه منجر به افزایش عرض تعادلی رودخانه و در نتیجه کاهش طول آبشکن می شود. در اینجا هم ضرایب اطمینان پایداری به تغییر شیب حساسیت بیشتری دارند. که همه این ها در تایید عملکرد مدل می باشد. همچنین به دلیل اینکه پارامترهای عرض تاج آبشکن و شیب یال ها جانبی آبشکن حساسیت بسیار کمی نسبت به تغییرات پارامترهای مستقل داشته اند در نمودار نشان داده نشده است.

درصد خطای نسبی با استفاده از رابطه ی ۲۳ تعیین می شود.

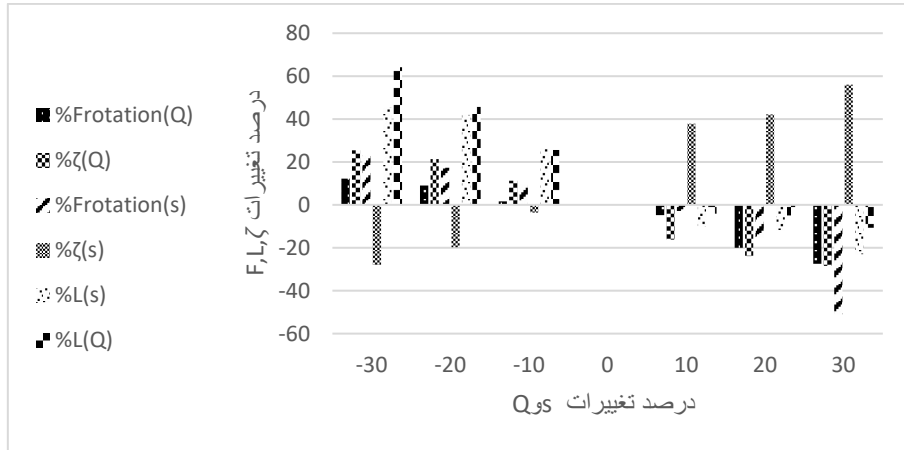
$$\%Error = \frac{X_o - X_c}{X_o} \times 100 \quad (23)$$

X_o مقدار مشاهداتی پارامتر مورد نظر، X_c مقدار محاسباتی پارامتر مورد نظر، %Error خطای نسبی به عنوان درصدی از مقدار مشاهداتی پارامترهای X_o و X_c را نشان می دهند.

۱-۳-۱-۵- جبهه ی جواب خروجی از الگوریتم NSGA-II

در شکل ۵-۳- جبهه جواب حاصل از کاربرد الگوریتم NSGA-II که با اطلاعاتی که مدل با آن واسنجی شده است به دست آمده نشان داده شده است. در جدول ۵-۲- پنج سناریو و دو نقطه دیگر که در ادامه توضیح داده می شود تعریف شده که از جبهه جواب خروجی الگوریتم NSGA-II که در شکل ۴-۵- (الف) نشان داده

نسبت به دبی جریان صورت گرفته و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده اند و با افزایش دبی طراحی دوره بازگشت آن نیز افزایش یافته لذا سازه ای که با دوره بازگشت ۵۰ ساله طراحی شده است با دبی طراحی با دوره بازگشت بالاتر جوابگو نخواهد بود و ضریب اطمینان پایداری آن کاهش پیدا کرده است. اما اگر با افزایش دبی طراحی سایر پارامترهای طراحی هم تغییر داده می شد در آن صورت ضرایب اطمینان پایداری هم بیشتر شده پس مدل عملکرد درستی داشته است. همچنین با افزایش دبی طراحی ضریب شکل بهینه و طول آبشکن کاهش یافته است. چرا که با افزایش دبی جریان و ثابت بودن اندازه متوسط ذرات و شیب، مطابق رابطه $QS \propto Q_s D_{50}$ ، Lane (1955)، ظرفیت انتقال رسوب نیز افزایش و در نتیجه ضریب شکل کاهش می یابد. همچنین با افزایش دبی طبق رابطه پیوستگی مقطع عریض تری برای انتقال جریان آب و رسوب لازم بوده و طول سازه کمتر می شود. از طرفی با افزایش دبی عمق آب با نرخ تغییرات بیشتری افزایش یافته و باعث کاهش ضریب شکل می شود. افزایش دبی روی پایداری تاثیر بیشتری گذاشته و می توان گفت این پارامتر به افزایش دبی حساسیت بیشتری دارد. با افزایش مقدار شیب چون رودخانه به سمت شریانی شدن می رود از طرفی رودخانه های شریانی ضریب شکل بالاتری دارند بنابراین با افزایش شیب ضریب شکل نیز افزایش می یابد. افزایش شیب منجر به کاهش پایداری می شود زیرا رودخانه های شریانی اغلب ناپایدار هستند. افزایش شیب منجر به افزایش ظرفیت انتقال



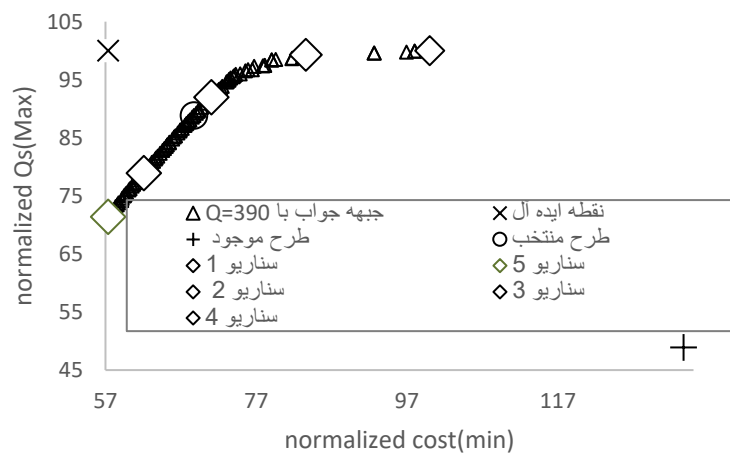
نمودار ۵-۲- درصد تغییرات پایداری، ضریب شکل و طول آبشکن نسبت به درصد تغییرات Q و s

Fig. 5.2. Percentage changes in stability, shape coefficient and breakwater length relative to percentage changes in Q and s

جدول ۵. سناریوها و متغیر تصمیم و توابع هدف متناظر با آن

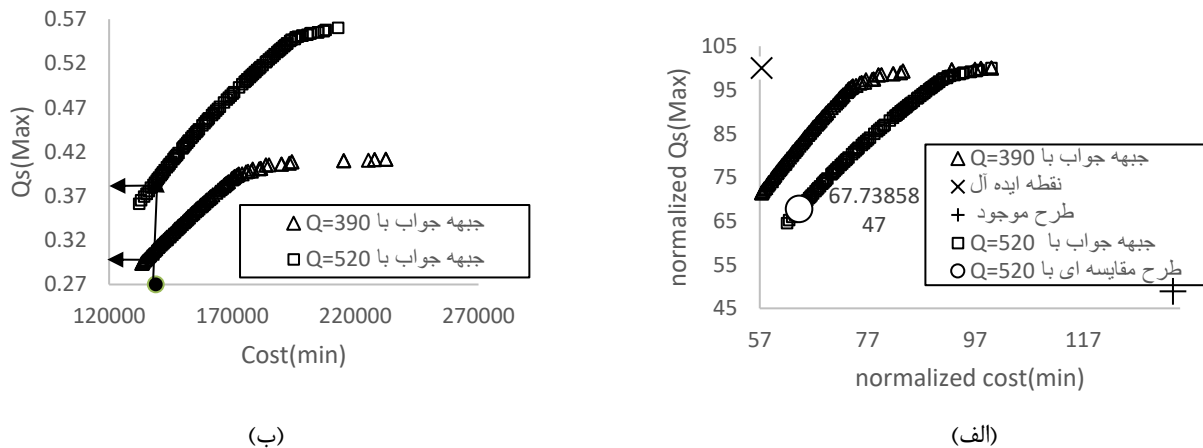
Table 5. Scenarios and decision variables and corresponding objective functions

f_2	f_1	$(f_2)_n$	$(f_1)_n$	S(متر)	T(متر)	z	L(متر)	Hg(متر)	سناریو
۰/۴۱۱۵۷۱	۲۳۲۳۸۷/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲	۱	۲۵/۸۴۴	۲/۶۳۳۲۴۵	سناریو ۱
۰/۴۰۸۵۷۸	۱۹۴۲۰۷/۵	۹۹/۲۸۵۸۳	۸۳/۵۷۰۶۹	۷۲/۵۱۱۸۷	۲	۱	۱۸/۱۳۲	۲/۱۲۴۰۵۴	سناریو ۲
۰/۳۷۸۴۷۶	۱۶۵۱۲۰/۷	۹۱/۹۷۰۸۶	۷۱/۰۵۴۱۴	۱۰۰	۲	۱	۲۷/۰۷۳	۲/۷۲۵۳۵۵	سناریو ۳
۰/۳۲۴۷۵۱	۱۴۴۲۶۹/۹	۷۸/۹۱۵۶۱	۶۲/۰۸۱۷۱	۷۲/۵۱۰۷	۲	۱	۱۸/۱۳۲	۱/۹۷۱۸۰۶	سناریو ۴
۰/۲۹۳۸۲۴	۱۳۳۲۹۱/۹	۷۲/۴۰۰۲	۵۷/۳۵۷۷۲	۷۲/۵۰۸۶۵	۲	۱	۱۸/۱۲۷	۱/۵	سناریو ۵
۰/۲۰۱۲	۳۱۰۶۵۲/۴	۴۸/۸۹۲۲۹	۱۳۳/۶۷۸۸	۳۸	۲/۴	۲	۱۲	۳	طرح موجود
۰/۳۶۵۶۴۵	۱۵۹۷۱۳/۷	۸۸/۸۵۲۸۹	۶۸/۷۲۷۴۴	۷۸/۳۷۲۷	۲	۱	۱۹/۰۶	۲/۲۶۳۰۵	طرح منتخب



شکل ۵-۳- جبهه جواب خروجی از الگوریتم NSGA-II

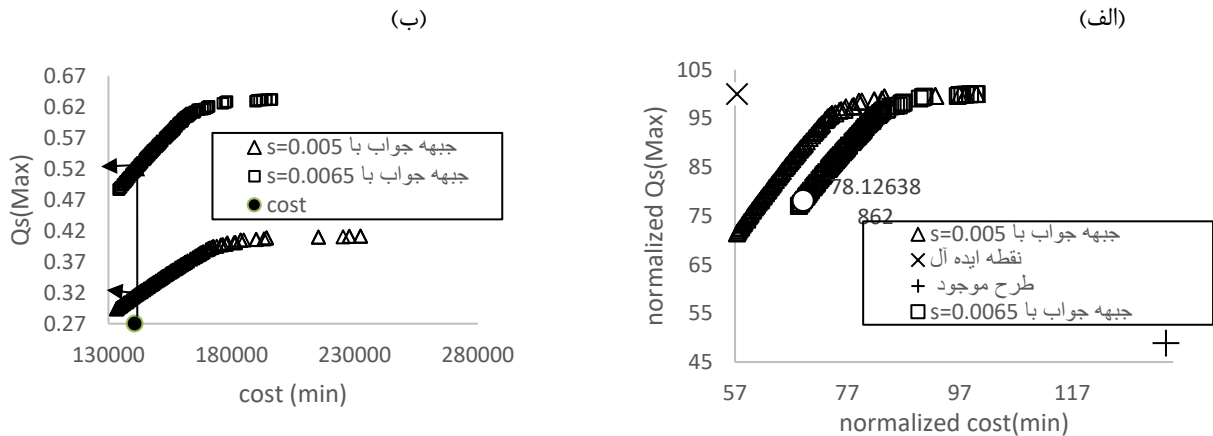
Fig. 5.3. Output response front of NSGA-II algorithm



شکل ۵-۴-الف) جبهه جواب ناشی از دبی $Q=390$ و ب) $Q=520$ مترمکعب بر ثانیه
 Fig. 5.4. Response front due to flow $Q = 390$ and b) $Q = 520$ cubic meters per second

سناریوی ۱ از نظر رسوب بهترین طرح ولی از نظر هزینه بدترین طرح است اما این سناریو نسبت به طرح موجود ۳۳/۶۷ درصد هزینه کمتر و ۵۱/۱۱ درصد رسوب آن بیشتر است و بر اساس فاصله اقلیدسی کمترین فاصله را نسبت به سناریوهای دیگر با طرح موجود دارد. سناریوی ۲ نسبت به سناریوی اول هزینه کمتر ولی ظرفیت انتقال رسوب کمتری نیز دارد و لذا برتری نسبت به سناریوی اول ندارد، چراکه طرحی بهتر است که هزینه کمتر و انتقال رسوب بیشتری داشته باشد. به همین دلیل در سناریوی دو با کم شدن هزینه، رسوب آن نیز کم شده است. با مقایسه سناریوی دو با طرح موجود ملاحظه می شود که ۵۰/۱ درصد هزینه آن از طرح موجود کمتر و ۵۰/۳۹ درصد رسوب آن بیشتر است. سناریوی ۳ نیز نسبت به دوسناریوی قبل هزینه کمتر و در نتیجه رسوب کمتری دارد و در مقایسه با طرح موجود ۶۲/۶۲ درصد هزینه آن کمتر و ۴۳/۰۷ درصد رسوب آن بیشتر است. سناریوی ۴ نیز نسبت به سه سناریوی قبل هزینه کمتر و رسوب کمتری دارد و نسبت به طرح موجود ۷۱/۵۹ درصد هزینه آن کمتر و ۳۰/۰۲ درصد رسوب آن بیشتر است. سناریوی ۵ همان طور که گفته شد طرحیست که دارای کمترین هزینه است و در نتیجه از نظر هزینه بهترین ولی مقدار رسوب آن کمترین مقدار می باشد با مقایسه این طرح با طرح موجود ملاحظه می شود که ۷۶/۳۲ درصد هزینه این طرح نسبت به طرح موجود کمتر و رسوب آن ۲۲/۵ درصد از طرح موجود بیشتر است. بنابراین پنج سناریوی مذکور که از جبهه جواب انتخاب شده بودند از لحاظ رسوب و اقتصاد از طرح موجود

شده استخراج شده است. $(f_1)_n$ و $(f_2)_n$ به ترتیب تابع هدف هزینه و تابع هدف رسوب می باشند که بی بعد شده اند و f_1 و f_2 در بخش ۱-۳ معرفی شدند. سناریوی اول و پنجم به ترتیب به طرحی که بیشترین و کمترین هزینه را دارند مربوط می شود. طرحی که بیشترین هزینه را دارد طرحیست که دارای بیشینه مقدار ظرفیت انتقال رسوب است و طرحی که کمترین هزینه را دارد کمترین مقدار ظرفیت انتقال رسوب را دارا می باشد. چرا که دو تابع هدف هزینه و ظرفیت انتقال رسوب در جهت مخالف هم بوده و همانطور که قبل تر گفته شد هدف از تحقیق حاضر کمینه کردن تابع هدف هزینه و بیشینه کردن تابع هدف رسوب است و نزدیک شدن به مقدار بهینه هر یک متناظر با دور شدن از مقدار بهینه دیگری می باشد. سناریوهای دو تا چهار به ترتیب جواب هایی از جبهه جواب می باشند که برای مقایسه با نقطه ایده آل و طرح موجود انتخاب شده اند و نحوه انتخاب آن ها به گونه ای بوده است که پوشش خوبی از جبهه جواب را داشته باشند. نقطه ایده آل یا Utopia point نقطه ایست که کمترین هزینه و بیشترین مقدار رسوب را دارا باشد که پس از بی بعد سازی مقادیر تابع هدف هزینه و رسوب مقدار نقطه ایده آل در شکل ۴-۵-الف) نشان داده شده است. طرح موجود طرحیست که توسط شرکت مشاورین سازه پردازی ایران طراحی و در منطقه مورد مطالعه اجرا شده است. از میان تمام جواب های جبهه جواب پاسخی که کمترین فاصله را با نقطه ایده آل داشته طرح منتخب نام دارد و این فاصله از رابطه فاصله اقلیدسی رابطه ی ۲۴ محاسبه شده است [۲۸].



شکل ۵-۵- جبهه جواب ناشی از $s=0.005$ و $s=0.0065$ (الف بدون بعد ب) بعددا
Fig. 5.5. Answer front resulting from $s = 0.005$ and $s = 0.0065$ a) without dimension b) dimensioned

۰/۰۰۵ نشان داده است. در این حالت از پارامترهای ورودی مدل فقط شیب رودخانه تغییر کرده و سایر پارامترهای ورودی ثابت نگه داشته شده اند. مطابق شکل ۵-۵- (الف) که جبهه جواب های بدون بعد شده دو تابع هدف هزینه و رسوب می باشد با افزایش شیب از $s=0.005$ به $s=0.0065$ همانطور که از جبهه جواب های آن ها در شکل مشخص است، در مقایسه طرحی با مشخصات $normalized\ Q_{s(Max)}=78.12$ و $cost(min)=69.14$ با طرح موجود به ازای $64/5$ درصد کاهش هزینه نسبت به طرح موجود، ظرفیت انتقال رسوب $29/23$ درصد افزایش داشته است. در شکل ۵-۴- (ب) جبهه جواب دبی $Q=390$ و دبی $Q=520$ مترمکعب بر ثانیه در حالت بعد دار نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می شود به ازای یک هزینه مشخص $1/156$ $cost(min)=138992$ با افزایش دبی جریان ظرفیت انتقال رسوب از $Q_{s(Max)}=0/310751$ به $Q_{s(Max)}=0/385073$ افزایش یافته است. چرا که با افزایش دبی جریان مطابق رابطه Lane(1995) ظرفیت انتقال رسوب افزایش می یابد [۲۹]. در شکل ۵-۵- (الف) جبهه جواب با شیب $s=0.005$ و با شیب $s=0.0065$ در حالت بعد دار نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می شود به ازای یک هزینه مشخص $140668/963$ با افزایش شیب ظرفیت انتقال رسوب از $Q_{s(Max)}=0/315568$ به $Q_{s(Max)}=0/517082$ افزایش یافته است. چرا که با افزایش شیب مطابق رابطه Lane(1995) ظرفیت انتقال رسوب افزایش می یابد. در اینجا با افزایش شیب ظرفیت انتقال

بهتر می باشند. نقطه ایده آل همانطور که گفته شد نقطه ایست که اگر هردو تابع هدف در نظر گرفته شود این طرح ایده آل می باشد که هزینه آن نسبت به طرح موجود $76/32$ درصد کمتر و رسوب آن نسبت به طرح موجود $51/1$ درصد بیشتر است. نقطه ای که طرح منتخب نامیده شده است کمترین فاصله را با نقطه ایده آل داشته و می تواند به عنوان طرح منتخب برگزیده شود.

$$Distance = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (24)$$

در شکل ۵-۴- (الف) و (ب) با افزایش دبی به 520 مترمکعب بر ثانیه جبهه جواب ناشی از آن و جبهه جواب مربوط به دبی جریان 390 مترمکعب بر ثانیه نشان داده است. در این حالت از پارامترهای ورودی مدل فقط دبی جریان تغییر کرده و سایر پارامترهای ورودی ثابت نگه داشته شده اند. مطابق شکل ۵-۴- (الف) ملاحظه می شود که با افزایش دبی از $Q=390$ متر مکعب بر ثانیه به $Q=520$ مترمکعب بر ثانیه در مقایسه طرحی با مشخصات $normalized\ cost(min)=64/3$ و $normalized\ Q_{s(Max)}=67/73$ با طرح موجود به ازای $69/37$ درصد کاهش هزینه نسبت به طرح موجود، ظرفیت انتقال رسوب آن $18/84$ درصد نسبت به طرح موجود افزایش می یابد. چرا که با کاهش هزینه ظرفیت انتقال رسوب به حالت بهینه خود نزدیک و افزایش می یابد. در شکل ۵-۴- (الف) و (ب) با افزایش شیب به 0.0065 جبهه جواب ناشی از آن و جبهه جواب مربوط به شیب

با حساسیت سنجی مدل نسبت به افزایش دبی جریان ملاحظه شد که با افزایش دبی جریان پایداری سازه، ضریب شکل بهینه و طول آبشکن کاهش می یابد که این خود نشانگر این است که مدل نتایج قابل قبولی داشته است. همچنین با حساسیت سنجی مدل نسبت به افزایش شیب طولی ملاحظه شد که منجر به افزایش ضریب شکل، کاهش پایداری و کاهش طول آبشکن می شود پارامترهای عرض تاج آبشکن و شیب یال های جانبی آبشکن حساسیت بسیار کمی نسبت به تغییرات پارامترهای مستقل داشته اند. با حساسیت سنجی مدل نیز منطقی بودن خروجی های مدل با تغییر ورودی ها بررسی شد و روند تغییرات آن با تئوری مهندسی رودخانه انطباق قابل قبولی داشته است. بر روی جبهه جواب خروجی از الگوریتم NSGA-II پنج طرح تحت عنوان سناریو و همچنین طرح موجود و نقطه ایده آل مشخص شد که با محاسبه فاصله اقلیدسی پنج سناریو از طرح موجود و نقطه ایده آل ملاحظه شد که سناریوی اول کمترین فاصله را با طرح موجود با اختلاف هزینه ۳۳/۶۷ درصد و اختلاف بار بستر ۵۱/۱۱ درصد با طرح موجود و سناریوی تحت عنوان طرح منتخب کمترین فاصله را با نقطه ایده آل دارد. جبهه جواب مساله بهینه سازی بر اساس توابع هزینه و بار بستر استخراج شد. با مقایسه پنج طرح بهینه (۵ سناریوی مختلف طراحی) از جبهه جواب با طرح موجود و نقطه ایده آل نتایج نشان می دهد طرحی که به عنوان طرح منتخب از بین ۵ سناریو برگزیده شده نزدیکترین نتیجه را با نقطه ایده آل دارد. طرح منتخب پیشنهاد می دهد که طول آبشکن و فاصله بین آبشکن ها نسبت به طرح موجود بیشتر و شیب یال های جانبی آبشکن کم شود همچنین طول ریشه آبشکن مقدار کم تری از طول ریشه در طرح موجود دارد. نتایج و نقاط روی جبهه جواب حاکی از این است که پاسخ های حاصل از مدل بهینه سازی که روی جبهه جواب در شکل ۵-۳ نشان داده شده است همگی از طرح موجود نتایج بهتری داشته و این مدل توانایی خوبی در بهینه کردن همزمان اقتصاد و رسوب با در نظر گرفتن پایداری سازه ای آبشکن داشته است.

مراجع

1. Supervision, V.P.o.S.P.a., Deputy Director of Strategic Planning and Control, "Guide for Designing and Maintenance of River groynes". 2009.
2. Rosgen, D.L. A hierarchical river stability/watershed-based

رسوب افزایش بیشتری نسبت به حالت افزایش دبی جریان داشته است و این نشانگر این است که خروجی های مدل حساسیت بیشتری به تغییرات شیب رودخانه دارند.

۵- نتیجه گیری

مدل ارائه شده در تحقیق حاضر علاوه بر بهینه سازی ابعاد آبشکن، پایداری سازه ای آبشکن و همچنین پایداری مقطع عرضی رودخانه را نیز لحاظ کرده است. این مدل در انتها ترکیب مناسبی از هزینه های ساخت سازه و شرایط هیدرولیکی و سازه ای را ارائه می دهد که با توجه به نظر طراح و اولویت های موجود این امکان را به طراح می دهد که طرحی اقتصادی و پایدار را ارائه دهد. همچنین این مدل، علاوه بر اعمال گزینه های طراحی جامع تر، شرایط تصمیم گیری مناسب تری را بین پایداری سازه و هزینه ای احداث آن فراهم می کند. مطالعه موردی این مقاله، آبشکن های زنجارود بوده است. مقاله حاضر که ترکیبی از طراحی هیدرولیکی که پارامترهای آن شامل دبی طراحی، ارتفاع آبشکن، عرض تاج آبشکن و مقطع بهینه رودخانه است و قیود آن شامل $4 < \frac{S}{L} < 10$ ، $W < 0.3B$ ، $W > 10$ ، $\zeta > 0$ می باشد و این قیود در بخش مدل بهینه سازی توضیح داده شدند و طراحی سازه ای که در آن میزان خاکبرداری، خاکریزی، ابعاد پی و مصالح ساخت سازه در نظر گرفته شده و قیود سازه ای آن شامل $F.S. > 1.3$ و $F.R. > 1.3$ می باشد. مدل حاضر که در آن از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است قادر به در نظر گرفتن همزمان دو هدف کمینه کردن هزینه $f_1 = Min Cost(\bar{x})$ و بیشینه کردن رسوب $f_2 = Max Q_s(\bar{x})$ می باشد. واسنجی مدل با اطلاعات هیدرولیکی رودخانه زنجان رود و براساس آن مدل با معادله رسوب $Van Rijn(1984)$ و معادله آبستگگی گیل (۱۹۷۲) انجام شد که بر این اساس اختلاف عرض محاسباتی از مدل با عرض مشاهداتی ۱/۴۴ درصد به دست آمده است که نسبت به سایر معادلات بار بستر دارای کمترین اختلاف می باشد. بنابراین صحت پاسخ های مدل به انتخاب معادله رسوب و آبستگگی بستگی دارد. صحت سنجی مدل با اطلاعات سازه ای رودخانه زنجان رود انجام گرفت که ضرایب اطمینان لغزش و واژگونی طرح موجود با ضرایب اطمینان لغزش و واژگونی حاصل از اجرای مدل به ترتیب ۱۰/۹۶- و ۱۹/۷۴- درصد اختلاف دارد که نتایج قابل قبول و بیانگر عملکرد بهتر مدل می باشد.

- Applied Soft Computing, 2015. **30**: p. 642-649.
13. Alauddin, M. and T. Tsujimoto, *Optimum design of groynes for stabilization of lowland rivers*. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 2011. **67**(4): p. I_145-I_150.
 14. Alauddin, M. and T. Tsujimoto, *Optimum configuration of groynes for stabilization of alluvial rivers with fine sediments*. International Journal of Sediment Research, 2012. **27**(2): p. 158-167.
 15. Tahershamsi Ahmad, Iman Shaar Farhad. Determining river regime equations based on the unit power flow equation. Journal of Civil Engineering and Surveying (Faculty of Engineering) (Civil Engineering Infrastructures). 1389 [cited 2021May25]; 44 (1): 73-81. (in Persian)
 16. Nir Shahab, Farzin Saeed, Karami Hojjat, Rostami Mohammad. Laboratory study of the effect of different shapes of groynes on the temporal changes of scour around them. Engineering research of irrigation and drainage structures. 1397 [cited 2021May25]; 19 (72): 33-50. (in Persian)
 17. CHOW, V.T., *OPEN-CHANNEL HYDRAULICS*. 1959.
 18. Julien, P.Y. second ed. 1995-2010, united kingdom by cambridge university press, UK.
 19. Rijn, L.C., *Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport*. 1987: Waterloopkundig Laboratorium.
 20. Nazari, B., *Forecasting the morphological response of the river to dam construction using extreme theories*, in *University of Water and Power Industry*. 2011.
 21. Huang, H.Q. and G.C. Nanson, *Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action*. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2000. **25**(1): p. 1-16.
 22. Kruijt, M., *Resistance of submerged groynes*. 2013, Delft University of Technology.
 23. Engineers, I.S.C., *Control and Evaluation of Zanjanrood River Conservation Plan*. 2004.
 24. Blazejewski, R., K.W. Pilarczyk, and B. Przedwojski, *sediment assessment methodology*. in *Proceedings of 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March, Reno, Nevada*. 2001.
 3. Carriaga, C.C. and L.W. Mays. *Optimization approach to stable channel system design*. in *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*. 2001.
 4. Deb, K., et al., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002. **6**(2): p. 182-197.
 5. Li, H. and Q. Zhang, *Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II*. IEEE transactions on evolutionary computation, 2009. **13**(2): p. 284.
 6. Karimi, M. and M. Mohammadzadeh, *Modeling of Urban Land Use Allocation Using Reference-Point-Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015. **4**(4): p. 47-66.
 7. Jain, V., et al., *Thermo-economic and environmental analyses based multi-objective optimization of vapor compression-absorption cascaded refrigeration system using NSGA-II technique*. Energy Conversion and Management, 2016. **113**: p. 230-242.
 8. Wang, Q., et al., *Parameterization of NSGA-II for the Optimal Design of Water Distribution Systems*. Water, 2019. **11**(5): p. 971.
 9. Liu, J. and X. Chen, *An Improved NSGA-II Algorithm Based on Crowding Distance Elimination Strategy*. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2019. **12**(2): p. 513-518.
 10. Ostadi, F., et al. (2015). "Optimization model for designing the dimensions of river groynes and its role in morphological stabilization of the river." *Hydraulic Journal* 9 (4): 55-72. (in Persian)
 11. Kalita, H.M., A.K. Sarma, and R.K. Bhattacharjya, *Evaluation of optimal river training work using GA based linked simulation-optimization approach*. Water resources management, 2014. **28**(8): p. 2077-2092.
 12. Basser, H., et al., *Hybrid ANFIS-PSO approach for predicting optimum parameters of a protective spur dike*.

- rehabilitation of urban drainage networks*. Urban Water Journal, 2017. **14**(5): p. 483-492.
28. Carroll, J.D., E. Kumbasar, and A.K. Romney, *An equivalence relation between correspondence analysis and classical metric multidimensional scaling for the recovery of Euclidean distances*. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 1997. **50**(1): p. 81-92.
29. Leon, C., P.Y. Julien, and D.C. Baird, *Case study: equivalent widths of the middle Rio Grande, New Mexico*. Journal of Hydraulic Engineering, 2009. **135**(4): p. 306-315.
- River Training Techniques: Fundamentals, Design and Applications*. 1995: Taylor & Francis.
25. adineh, s., *Optimal design of slope control structures for river stability (case study: Garmabdr river)*. 2015.
26. Senthilkumar, C., G. Ganesan, and R. Karthikeyan, *Optimization of ECM process parameters using NSGA-II*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2012. **11**(10): p. 931.
27. Yazdi, J., D. Yoo, and J.H. Kim, *Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. abouzarria, M.R.M. Tabatabaib, J. yazdi, *Optimal design of groynes with hydraulic, technical and economic criteria*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 749-766.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16646.6289](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16646.6289)

