

# مدل بهینه‌سازی طراحی ابعاد آبشکن‌های رودخانه‌ای و نقش آن در پایداری‌سازی مورفولوژیکی رودخانه

فریبا استادی<sup>1</sup>، محمدرضا مجدزاده طباطبایی<sup>2\*</sup>، سعید علیمحمدی<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی  
2- استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

m\_majdzadeh@sbu.ac.ir

**چکیده** - آبشکن‌ها سازه‌هایی عرضی هستند که در کنار رودخانه‌ها اجرا شده و باعث انحراف آب از محل کناره‌ها می‌شوند. مدل بهینه‌سازی آبشکن‌ها که در این مقاله ارائه شده است، متشکل از سه زیرمدل مورفولوژیکی، طراحی و بهینه‌سازی است. برای بررسی پایداری رودخانه از زیرمدل مورفولوژیکی استفاده می‌شود. در این زیرمدل ابعاد مقطع پایدار با استفاده از تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب محاسبه می‌شود. سپس با به کارگیری ضوابط طراحی مناسب برای اجزای آبشکن از قبیل طول، ارتفاع، فاصله، تعداد و عمق آبشستگی آبشکن در زیرمدل طراحی، هزینه‌های ساخت کمینه خواهد شد. نتایج حاصل از دو زیرمدل مورفولوژیکی و طراحی در زیرمدل بهینه‌سازی، با استفاده از روش وزن‌دهی به صورت یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی فرموله شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد، تا به این وسیله ابعاد بهینه آبشکن محاسبه شود. به عبارتی زیرمدل بهینه‌سازی از ترکیب وزنی دو تابع هدف زیرمدل طراحی و زیرمدل مورفولوژیکی تشکیل شده است. مدل توسعه یافته، روند تغییرات هزینه ساخت سازه را نسبت به ظرفیت حمل رسوب کانال که بیان‌گر وضعیت پایدار رودخانه است، محاسبه می‌کند. این مدل با استفاده از اطلاعات رودخانه زنگان رود در محدوده پل سرچم، به ازای ضریب وزنی 0/6 برای تابع هزینه و 0/4 برای تابع ظرفیت انتقال رسوب، کالیبره شده است. همچنین تحلیل حساسیت در مدل فوق نسبت به معادلات بار بستر و آبشستگی صورت پذیرفت. نتایج حاصل، حاکی از آن است که به کارگیری معادلات بار بستر و آبشستگی، نقش بسزایی در تعیین ابعاد آبشکن و هزینه‌های ساخت سازه خواهند داشت. از بین معادلات بار بستر استفاده شده معادله 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 می‌دهند.

کلید واژگان: آبشکن، تئوری‌های حدی، پایداری رودخانه، هزینه، بهینه‌سازی چندهدفه.

## 1- مقدمه

محیطی قابل توجه می‌باشد. این مسأله سبب می‌شود هر ساله مبالغ زیادی برای حفاظت از سواحل رودخانه در برابر فرسایش هزینه شود. روش‌های حفاظت سواحل از دیدگاه عملکرد سازه‌ها به دو گروه کلی حفاظت مستقیم<sup>1</sup> و

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

1. Direct Methods

غیرمستقیم<sup>1</sup> تقسیم می‌شوند. در روش غیرمستقیم، تثبیت رودخانه‌ها توسط احداث سازه‌های عرضی یا آبشکن در طول ساحل فرسایش‌پذیر انجام می‌گیرد (معاونت برنامه-ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). با وجود پژوهش‌های متعددی که برای بهینه‌سازی اجزای آبشکن و کارایی یا عدم کارایی سازه‌ها، نظیر ارزیابی عمق آبستگي پیرامون سازه و میزان رسوب‌گذاری و فرسایش ساحل رودخانه صورت گرفته، تاکنون روشی که همزمان قادر به بررسی ملاحظات طراحی، اقتصادی و تغییرات دینامیکی رودخانه باشد، ارائه نشده است.

روشی که در این تحقیق بدان پرداخته شده به طور همزمان ابعاد بهینه سازه را مطابق ضوابط استاندارد با کمینه کردن هزینه طرح، و بیشینه کردن پایداری مورفولوژیکی مقطع، طراحی می‌کند. در این راستا یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به روش وزن‌دهی توسعه یافته است. دو تابع هدف مورد نظر در این مدل، تابع مقطع پایدار و تابع هزینه احداث سازه می‌باشد. تابع مقطع پایدار به واسطه تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب ( $MSTC^2$ ) و با استفاده از زیرمدل مورفولوژیکی مقطع پایدار، و تابع هزینه با استفاده از زیرمدل طراحی با توجه به ضوابط طراحی استاندارد به دست آمده است. به عبارتی مسأله طراحی به صورت یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی فرموله شده، و از قیدهایی که هیدرولیک جریان و رسوب و ضوابط طراحی پایدار را دربر می‌گیرد، استفاده کرده و یک تابع مرکب که هزینه پروژه را کمترین (Carriaga, 2001) و ظرفیت انتقال رسوب را بیشترین (Huang, 2000) به کار می‌گیرد. این مدل توسط نرم‌افزار Lingo13 حل شده است و علاوه بر تعیین ابعاد بهینه شامل طول، ارتفاع، فاصله بین آبشکن‌ها و تعداد آنها، هزینه اجرای سازه، دبی رسوب انتقالی و عمق آبستگي را نیز نتیجه می‌دهد.

مطالعات مربوط به موضوع مورد پژوهش در سه بخش تعادل و پایداری رودخانه، طراحی آبشکن و بهینه‌سازی در ادامه آورده شده است. Mackin (1948) رودخانه‌ای را در تعادل تعریف می‌کند که در آن طی یک بازه زمانی و

تحت دبی و سایر مشخصات موجود، شیب به گونه‌ای تغییر کند که سرعت دقیقاً به مقدار موردنیاز برای انتقال رسوب وارده از حوضه آبریز، برسد [4].

Stahler (1957) و Hack (1960) مفهوم تعادل دینامیکی را به این شکل تعریف کردند: تعادل به گونه‌ای که در اثر تداوم شرایط دبی و بار رسوبی ورودی، شکل و خصوصیات کلی رودخانه تغییر نکند (Rosgen, 2001).

بر اساس تحقیقات Rosgen (1996)، پایداری کانال رودخانه به صورتی است که رودخانه در گذر زمان و تحت شرایط اقلیمی موجود، توانایی حمل رسوبات و جریان وارده از حوضه آبریز را به گونه‌ای داشته باشد که بتواند ابعاد، الگو و شکل خود را بدون فرسایش یا رسوب‌گذاری حفظ کند (Rosgen, 2001). در این مقاله تعریف ارائه شده توسط Rosgen (1996) از مفهوم تعادل مد نظر قرار گرفته است. روش‌های کمی ارزیابی پایداری رودخانه شامل روش‌های متعددی مانند هندسه هیدرولیکی، روش‌های منطقی، عددی، تئوری‌های حدی و ... می‌باشد، اما تنها به بررسی تئوری حدی حداکثر ظرفیت انتقال رسوب که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته خواهد شد. در دو دهه اخیر استفاده از مدل‌هایی که یک فرضیه حد نهایی را به عنوان بخشی از فرمول‌های خود برای پیش‌بینی مورفولوژی آبراهه به کار می‌بندد، افزایش یافته است. در این روش از معیار بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی 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 می‌کنند (طاهر شمسی، 1389). تعدادی از معروف‌ترین تئوری‌های حدی، عبارتند از تئوری حداکثر ظرفیت انتقال رسوب<sup>3</sup> ( $MSTC$ )، تئوری حداقل نرخ اتلاف انرژی<sup>4</sup> ( $MEDR$ ) و تئوری حداقل توان جریان<sup>5</sup> ( $MSP$ ). بیشترین ظرفیت انتقال رسوب برای اولین بار توسط Pickup (1976) پیشنهاد گردید و در طی دهه‌های اخیر توسط دیگر محققان توسعه یافت (Singh, 2003).

White (1982) و همکاران رهیافتی پیشنهاد کردند که بر

3. Maximum Sediment Transport Capacity

4. Minimum Energy Dissipation Rate

5. Minimum Stream Power

1. Indirect Methods

2. Maximum Sediment Transport Capacity

تحقیق از روش ( $NPV^1$ ) یعنی روش ارزش فعلی خالص کمینه در طی یک دوره 10 ساله و با نرخ تنزیل 11 درصد، برای محاسبه ارزش اقتصادی سرمایه‌گذاری‌های انجام شده استفاده شده است (حسینی، 1382). تحقیقات مشابهی توسط چوپانی بر روی آبشکن‌های رودخانه میناب (چوپانی، 1386)، و توسط گلرنگ در رودخانه لار انجام شده است (گلرنگ، 1383). ارزیابی فنی عملکرد آبشکن‌های احداثی در رودخانه قزل‌اوزن توسط حسینی (1384) در بازه‌ای از این رودخانه پیرامون تغییرات مورفولوژیکی و هیدرولیکی رودخانه صورت گرفت (حسینی، 1388). ترابی‌زاده و بی‌نا (1389) نقش تنگ-شدگی ناشی از احداث آبشکن‌های رودخانه زهره در تغییر پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات صحرایی با کمک نرم‌افزار MIKE11 را بررسی و تفسیر نمودند (ترابی‌زاده، 1388).

در خصوص مطالعاتی که از مفهوم طراحی بهینه با در نظرگرفتن پایداری کانال استفاده کرده‌اند، می‌توان به مقاله (Carriaga and Mays, 2002) اشاره کرد که در آن به طراحی کانال پایدار (کانال احداث شده توسط خاک‌برداری) با رویکرد بهینه‌سازی اقتصادی پرداخته‌اند. وی در بررسی پایداری کانال از روش‌هایی نظیر حداکثر سرعت مجاز، تنش برشی بحرانی و مقطع بهینه هیدرولیکی (مقطع دایره‌ای یا بیضی شکل)، به عنوان قیدهای طراحی استفاده کرده و با توجه به سایر قیدها، نظیر عمق آبشستگی حداکثر، هزینه سازه را کمینه می‌کند. آن‌ها مدل بهینه‌سازی غیرخطی را در نرم‌افزار GAMS-MINOS کدنویسی کرده و حل نموده‌اند (Carriaga, 2001).

مدل بهینه‌سازی مورد مطالعه در این تحقیق، با در نظر گرفتن همزمان هزینه طرح و پایداری مقطع کانال، شیوه جدیدی برای طراحی آبشکن ارائه می‌دهد.

## 2- مبانی تئوری

در تحقیق حاضر برای بررسی پایداری رودخانه از زیرمدل مورفولوژیکی "مقطع پایدار" حاصل از تئوری حدی

پایه قوانین حساب تغییراتی بوده و فرض می‌کند کانال‌های آبرفتی شیب و هندسه خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که ظرفیت انتقال رسوب حداکثر شود (Singh, 2003). اولین استفاده از مفهوم ضریب شکل (نسبت عرض به عمق جریان) در کنار این تئوری توسط (Huang and Nanson, 2000) انجام گرفت. آن‌ها برای توسعه تئوری "بیشترین بازدهی جریان" که معادل است با "بیشترین ظرفیت انتقال رسوب در واحد توان جریان"، با استفاده از رابطه مقاومت جریان لیزی و انتقال بار بستر دوبوی، در شرایط مشخصی از دبی، شیب و اندازه متوسط مواد بستر، ضریب شکل بهینه کانال (نسبت عرض به عمق) را به دست آوردند. نظری (1390) با استفاده از سایر معادلات بار بستر و معادله مقاومت جریان مانینگ به نتایج مشابهی دست یافت (نظری، 1390).

با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای، ارزیابی عملکرد آبشکن‌ها معمولاً به روش‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های ریاضی و عددی و یا ارزیابی تجربی در دوران بهره‌برداری از آنها محدود می‌شود. در مورد بررسی آبشکن‌ها، بنی‌حبیب در سال (1387) با بررسی صحرایی فاصله بین آبشکن‌های زنجان‌رود نشان داده که بیشترین رسوبگذاری بین آبشکن‌هایی با نسبت فاصله به طول  $3/75$  رخ می‌دهد (بنی‌حبیب، 1387).

(Sobhan and Kumar Das, 1999) با مطالعه آزمایشگاهی بر روی فواصل آبشکن‌ها بر روی رودخانه گانگس بنگلادش نتیجه گرفتند فواصل  $4/5$  الی  $5$  برابر طول آبشکن‌ها می‌تواند با عملکرد مشابه فواصل  $2$  الی  $2/5$  برابر طول آبشکن از هزینه کمتری برخوردار شود (Sobhan, 1999). (Charlton, 1982) برای مسیرهای مستقیم فاصله آبشکن‌ها را حداکثر  $4$  الی  $4/5$  برابر طول قائم آنها پیشنهاد می‌کند (Charlton, 1982).

(Petersen, 1986) عقیده دارد که بطور کلی طول آبشکن متناسب با اهداف و شرایط رودخانه و با توجه به عرض مورد نظر و عمق آبشستگی مجاز انتخاب شود، ولی میزان تنگ‌شدگی نباید بیش از  $30$  درصد باشد (Petersen, 1986). حسینی به ارزیابی اقتصادی آبشکن‌های احداث شده بر روی زنجان‌رود پرداخت. در این

1. Net Present Value

## 2-1- زیرمدل طراحی

هدف از زیرمدل طراحی کمینه شدن هزینه‌های ساخت آبشکن است. در زیرمدل طراحی، هزینه‌های ساخت سازه که با  $COST(\bar{x}1)$  نشان داده شده است، شامل اجزای طراحی و ضوابط حاکم بر آنها می‌باشد که برای محاسبه آن لازم است حجم عملیات اجرایی سازه محاسبه شود. برای ساده‌سازی، بازه اصلاح شده، مستقیم فرض شده است. هزینه‌های طراحی شامل هزینه ساخت سازه بوده و برخی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این ابعاد شامل زاویه آبشکن (فائلم)، شیب طولی تاج آبشکن (افقی)، عرض تاج آبشکن (2 متر)، شیب دماغه (فائلم) و شیب پال‌های جانبی (فائلم) می‌باشد.

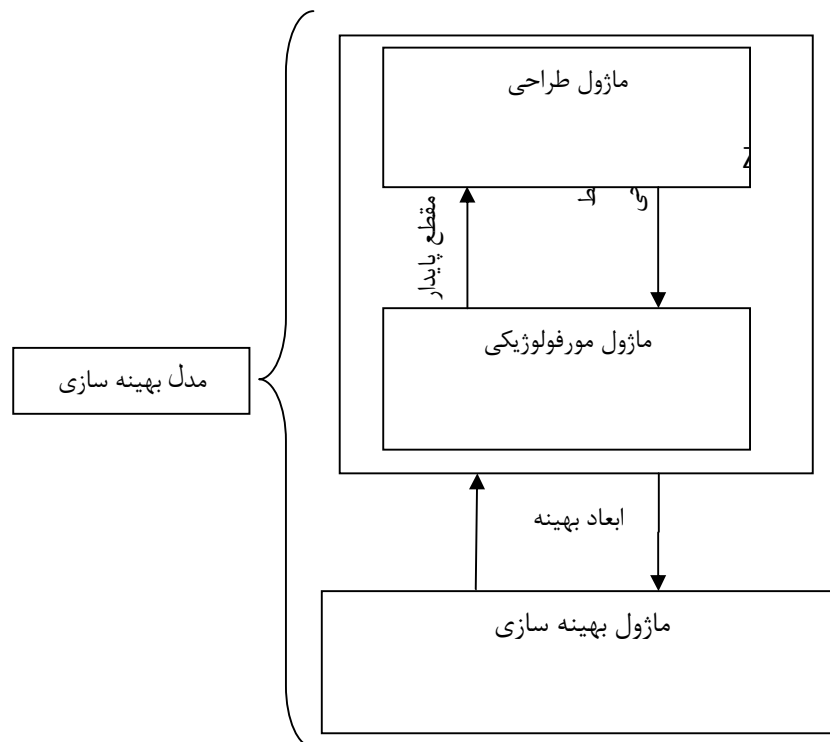
شکل 2 هندسه مقطع عرضی رودخانه و آبشکن و پلان رودخانه را نشان می‌دهد. اجزای مشخص شده در این شکل شامل عرض رودخانه ( $W$ )، عمق آب ( $Y$ )، بازه اصلاح شده ( $L_{total}$ )، طول آبشکن‌ها ( $L_{groynes}$ )، فاصله بین آبشکن‌ها ( $L_e$ )، ارتفاع آبشکن ( $H_{groynes}$ )، ریشه آبشکن (root)، عمق آبشستگی ( $d_{s\_total}$ ) و پهنا دماغه سازه ( $T$ ) می‌باشد.

حداکثر ظرفیت انتقال رسوب (MSTC) استفاده شده، و زیرمدل طراحی نیز برای محاسبه هزینه‌های ساخت سازه با توجه به ضوابط طراحی حاصل گردیده است. در نهایت زیرمدل بهینه‌سازی آبشکن به صورت ترکیبی از دو زیرمدل مورفولوژیکی و طراحی، با هدف حداکثر شدن پایداری رودخانه پس از اجرای سازه و حداقل شدن هزینه ساخت به دست می‌آید. مدل حاصل با استفاده از روش وزن دهی توسط نرم‌افزار Lingo13 حل خواهد شد. ابعاد بهینه سازه و مقطع پایدار کانال با استفاده از تابع  $Z_1(\bar{x}1)$  جهت کمینه کردن هزینه‌های طرح مطابق رابطه (1) و تابع  $Z_2(\bar{x}2)$  برای بیشینه کردن ظرفیت انتقال رسوب کانال مطابق رابطه (2) محاسبه می‌شوند. متغیرهای  $(\bar{x}1)$  و  $(\bar{x}2)$  به ترتیب شامل اجزای طراحی سازه و ابعاد مقطع عرضی کانال می‌باشند.

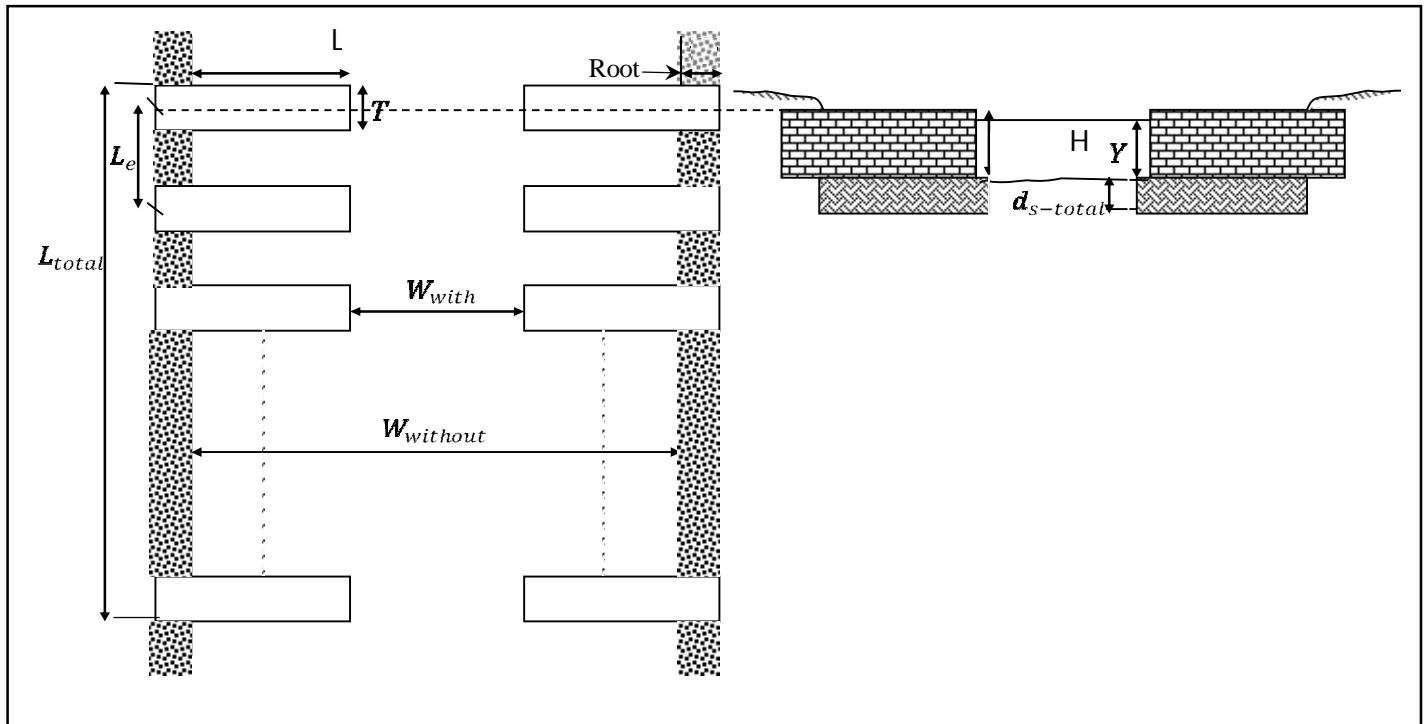
$$Z_1(\bar{x}1) = \text{Min } COST(\bar{x}1); \quad (\bar{x}1) \geq 0 \quad (1)$$

$$Z_2(\bar{x}2) = \text{Max } Q_s(\bar{x}2); \quad (\bar{x}2) \geq 0 \quad (2)$$

روند نمای شکل 1 ارتباط ما بین زیرمدل‌های طراحی و مورفولوژیکی یا همان توابع هدف مدل اصلی و ارتباط آنها با زیرمدل بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد.



شکل 1 روند نمای مدل بهینه سازی



شکل 2 هندسه مقطع عرضی آبشکن (سمت راست)، بازه آبشکن‌ها در راستای طولی رودخانه (سمت چپ)

$$N_{groyne} = \frac{L_{total}}{L_e} \quad (6)$$

$$\left(\frac{n \times Q}{S^5}\right) = \frac{(W \times Y)^{5/3}}{(W + 2 \times Y)^{2/3}} \quad (7)$$

$$d_{s\_total} = (d_{s\_local} + d_{s\_general}) \quad (8)$$

$$d_{s\_local} = d_{s1} \times \left(0.07 * \left(\frac{L_e}{L_{qroyne}}\right) + 0.14\right) \quad (9)$$

$$d_{s\_general} = Y_{without} \times \left(\frac{W_{without}}{W_{with}}\right)^{-6/7} \times \left(\left(\frac{W_{without}}{W_{with}}\right)^{-1} \times \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_{without}}\right) + \frac{\tau_c}{\tau_{without}}\right) \quad (10)$$

$$d_{s1} = Y_{without} \times 8.4 \times \left(\frac{D_{50}}{Y_{without}}\right)^{25} \times \left(\frac{W_{without}}{W_{with}}\right)^{6/7} - Y_{without} \quad (11)$$

محدودیت‌های مربوط به زیرمدل طراحی:

$$2 \leq \frac{L_e}{L_{qroyne}} \leq 5 \quad (12)$$

$$2 \leq root \leq 4 \quad (13)$$

$$W_{with} \leq W_{without} \quad (14)$$

معادله (4) ارتفاع آبشکن را محاسبه می‌کند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). در

در صورت لزوم هر یک از پارامترها قبل از احداث سازه با اندیس (without) و بعد از احداث آن با اندیس (with) نمایش داده شده‌اند.  $N_{groyne}$  نیز تعداد آبشکن‌ها در هر طرف از رودخانه بوده و برابر با تقسیم طول بازه اصلاح شده بر فاصله بین آبشکن‌ها بعلاوه یک می‌باشد. واحد تمام ابعاد ذکر شده متر (m) می‌باشد

$Z_1(\bar{x1})$  تابع هدف زیرمدل طراحی بوده و اجزای آبشکن‌ها را با هدف کمینه کردن هزینه ساخت آنها محاسبه می‌کند. شکل فضایی هر تک آبشکن به صورت یک مکعب مستطیل فرض شده و هزینه ساخت آن‌ها طبق معادله (3) به دست می‌آید. روابط (4) تا (14) اجزا و محدودیت‌های مربوط به زیرمدل طراحی می‌باشند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

$$Z_1(\bar{x1}) = \text{Min}(\text{COST}(\bar{x1}))$$

$$\text{COST}(\bar{x1}) = 2 \times N_{groyne} \times (L_{qroyne} + root) \times (H_{groyne} + d_{s\_total}) \times T_{groyne} \times UPRC_{groyne} \quad (3)$$

$$H_{groyne} = \left(0.019 \frac{L_e^6}{S^3} + 1\right) \quad (4)$$

$$L_{qroyne} = \frac{W_{without} - W_{with}}{2} \quad (5)$$

در این زیرمدل مقطع رودخانه مستطیلی فرض شده، جریان حالت دائم در نظر گرفته شده، روابط بار بستر بیشترین ظرفیت انتقال بار بستر را محاسبه می‌کنند (Chanson, 2004)، شرایط پایدار و تعادلی مد نظر است (در این شرایط مقطع بهینه و تعادلی مقطعی است که در آن کف کنی یا ترازافزایی مشاهده نشود)، کانال مستقیم است، تغییرات قابل توجهی در عرض رودخانه در کل بازه رخ نمی‌دهد و مصالح غیرچسبنده می‌باشد.

$Z_2(\bar{x}_2)$  تابع هدف زیرمدل مورفولوژیکی بوده، و حداکثر ظرفیت انتقال رسوب رودخانه و عرض و عمق مقطع متناظر با آن را به ازای ورودی‌های زیرمدل، شامل دبی ( $Q$ )، شیب ( $S$ ) و اندازه متوسط ذرات بستر ( $D_{50}$ ) محاسبه می‌کند. روابط (15) تا (24) اجزا و محدودیت‌های مربوط به زیرمدل مورفولوژیکی می‌باشند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

$$Z_2(\bar{x}_2) = \text{Max} (Q_s(\bar{x}_2))$$

$$Q_s(\bar{x}) = W \times q_s \quad (15)$$

$$\phi = \frac{q_s}{D_{50} \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g D_{50}}} \quad (16)$$

$$P_e = W_{\text{with}} + 2 \times Y_{\text{with}} \quad (17)$$

$$A = W_{\text{with}} \times Y_{\text{with}} \quad , \quad R = \frac{A}{P_e}$$

$$Q = A \times V \quad (18)$$

$$V = \frac{\sqrt{S}}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \quad (19)$$

$$\tau_0 = \gamma R S \quad (20)$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (21)$$

$$D_* = \left( \frac{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g}{\nu^2} \right)^{1/3} D_{50} \quad (22)$$

$$\theta_c = \begin{cases} 0.24 D_*^{-1} & 1 < D_* \leq 4 \\ 0.14 D_*^{-0.64} & 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04 D_*^{-0.1} & 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013 D_*^{0.29} & 20 < D_* \leq 150 \\ 0.055 & 150 < D_* \end{cases} \quad (23)$$

محدودیت مربوط به زیرمدل مورفولوژیکی:

$$\text{if } \theta < \theta_c \rightarrow Q_s = 0 \quad (24)$$

رابطه (5) طول آبشکن از تفاضل عرض اولیه رودخانه و عرض تعادلی آن بخش بر دو حاصل می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). تعداد آبشکن‌ها از رابطه (6) با تقسیم طول بازه اصلاح شده بر فاصله بین آبشکن‌ها به دست می‌آید. رابطه (7) رابطه مقاومت جریان مانینگ می‌باشد که عمق آب را با توجه به دبی و شیب بستر و عرض تعادلی محاسبه می‌کند. رابطه (8) عمق آبشستگی کل بوده که مجموع آبشستگی موضعی (رابطه 9) و آبشستگی عمومی (رابطه 10) می‌باشد، که هر دو بر اساس معادلات (Gill, 1972) محاسبه می‌شوند (Gill, 1972). عمق آبشستگی موضعی با توجه به عمق آبشستگی آبشکن منفرد مطابق رابطه (11) به دست می‌آید (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). رابطه (12) نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها را با توجه به مطالعات افرادی نظیر Charlton (1982) و Sobhan and Kumar Das (1999) در یک بازه بین 2 و 5 محدود می‌کند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388). طبق شرط (13) ریشه آبشکن با توجه به مطالعات وطن‌فدا (1369) بین 2 تا 4 متر در نظر گرفته می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1387). شرط (14) به معنای بیشتر نشدن عرض تعادلی از عرض اولیه رودخانه است.

## 2-2- زیرمدل مورفولوژیکی

برای بررسی تغییرات مورفولوژیکی ناشی از احداث آبشکن در بازه اصلاح شده رودخانه، و برای پیش‌بینی حالت تعادل در رودخانه، زیرمدل مورفولوژیکی "هندسه پایدار مقطع" مورد استفاده قرار می‌گیرد که هدف از آن کمی‌سازی حالات پایداری قبل و بعد از احداث سازه بوده و ابزار این کار، تئوری‌های حدی است. حل تحلیلی این زیرمدل توسط (Hung and Nanson, 2000) توسعه یافته است. هدف از حل این زیرمدل به دست آوردن نسبت عرض به عمق بهینه کانال ( $\xi_m = \frac{W}{Y}$ ) است. نسبت مذکور متناظر با مقطعی از کانال است که بیشترین ظرفیت انتقال رسوب را دارد.

جدول 1 معادلات مورد استفاده جهت محاسبه بار بستر

نام محقق	رابطه	توضیحات
Englund and Fredsoe (1976)	$\phi = 9.3\beta^{-1}(\theta - \theta_c)(\sqrt{\theta} - 7\sqrt{\theta_c})$	$\beta = 0.8$
Yalinn (1977)	$\phi = 0.635s\sqrt{\theta}[1 - \frac{1}{as} \ln(1 + as)]$	$\frac{\rho_s}{\rho} = 2.65, s = \frac{\theta}{\theta_c} - 1$ $a = 1.66\sqrt{\theta_c}$
Wiberg and Smith (1989)	$\phi = \alpha_s(\theta - \theta_c)^{1.5}$	$\alpha_s = 1.6 \ln(\theta) + 9.8$
Van Rijn (1987)	$\phi = 0.053 \frac{(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c})^{2.1}}{D_{50}^3 [\frac{\rho_s - \rho}{\rho v^2}]^{0.1}}$	$v = 0.000001$

ظرفیت انتقال رسوب و کمترین هزینه را دارد به عنوان طرح بهینه انتخاب شده است.

$$\text{Min } \bar{Z}(\bar{x}) = [\text{COST}(\bar{x}), -Q_s(\bar{x})]$$

$$\bar{x} = [Y, W, L_{\text{groynes}}, H_{\text{groynes}}, d_{s\text{-total}}, \text{root}, L_e, N_{\text{groynes}}]$$

$$\text{Subject to: } g(\bar{x}) \leq 0, h(\bar{x}) = 0, \bar{x} \geq 0 \quad (25)$$

### 2-3-1- تابع هدف زیرمدل بهینه‌سازی

زیرمدل بهینه‌سازی دارای دو تابع هدف بوده که در جهت متضاد با یکدیگر قرار دارند. در نتیجه تابع هدف زیرمدل بهینه‌سازی ( $Z(\bar{x})$ ) زمانی حداقل می‌شود که هزینه در جهت کاهش و ظرفیت انتقال رسوب در جهت افزایش حرکت کند. به عبارت دیگر نزدیک شدن به مقدار بهینه یکی از اهداف متناظر با دور شدن از بهینه هدف دیگر است.

هدف اصلی در حل یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غالب می‌باشد که نهایتاً در اختیار شخص تصمیم‌گیر برای اتخاذ تصمیم نهایی قرار می‌گیرد. به عبارتی هدف اصلی در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، تولید مجموعه جواب بهینه پارتو می‌باشد (شریفی، 1384). روش‌های مختلفی برای تولید تقریبی مجموعه پارتو وجود دارد. در این تحقیق برای حل مسئله بهینه‌سازی از روش وزن‌دهی استفاده می‌شود و به این ترتیب دو تابع هدف به یک تابع هدف تبدیل می‌شوند (Augusto, 2012). تابع هدف مرکب به صورت تفاضل تابع هزینه از تابع ظرفیت انتقال رسوب طبق رابطه (26) تعریف می‌شود که هر یک وزنی مطابق رابطه (27) خواهند داشت. با تغییر دادن مقادیر  $\alpha$  و حل مسئله

رسوب منتقل شده با ضرب بار رسوبی واحد عرض ( $q_s$ ) در عرض مقطع ( $W$ ) مطابق رابطه (15) محاسبه گردیده و برای محاسبه بار رسوبی واحد عرض از روابط بار بستر جدول 1 استفاده می‌شود. در اکثر روابط بار بستر به جای استفاده از بار رسوبی واحد عرض شار حجمی رسوبی بی‌بعد انشتین ( $\phi$ ) بر اساس رابطه (16) مورد استفاده قرار گرفته است. متغیرهای هیدرولیکی شامل محیط خیس مقطع ( $P_e$ )، مساحت مقطع ( $A$ )، شعاع هیدرولیکی ( $R$ ) با روابط (17)، پیوستگی جریان با رابطه (18)، سرعت ( $V$ ) با رابطه (19)، تنش برشی ( $\tau$ ) با رابطه (20) و تنش برشی بی‌بعد ( $\theta$ ) با رابطه (21) محاسبه می‌شوند. برای محاسبه تنش برشی بحرانی بی‌بعد ( $\theta_c$ )، van Rijn (1987) به نقل از Bonnefille (1963) و Yalinn (1972) اظهار می‌کند که می‌توان منحنی شیلدز را با استفاده از پارامترهای تنش برشی بحرانی بی‌بعد و اندازه بی‌بعد ذرات ( $D_*$ ) بیان کرد (van Rijn, 1987). لذا منحنی شیلدز که نشان دهنده آستانه حرکت ذرات است، با توجه به اندازه بی‌بعد ذرات که از معادله (22) محاسبه می‌شود، به صورت معادلات (23) بیان می‌شود. شرط (24) مؤید عدم انتقال بار بستر در شرایطی است که تنش برشی از تنش برشی بحرانی کمتر می‌باشد.

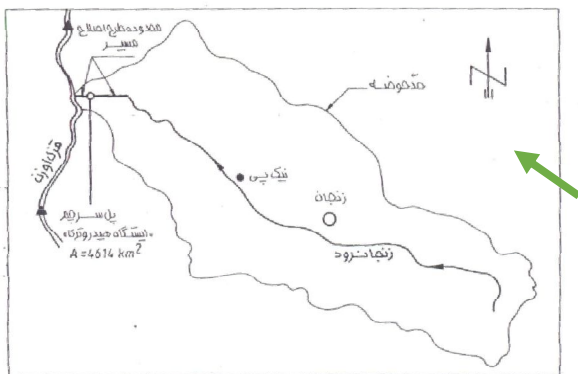
### 2-3-2- زیرمدل بهینه‌سازی

زیرمدل بهینه‌سازی از ترکیب زیرمدل طراحی و زیرمدل مورفولوژیکی به دست آمده است. هر یک از دو زیرمدل طراحی و مورفولوژیکی به عنوان توابع هدف زیرمدل بهینه‌سازی بوده و طبق رابطه (25) ترکیبی که بیشترین

است که از محل چمن سلطانیه واقع در 45 کیلومتری شرق زنجان شروع شده و پس از طی حدود 142 کیلومتر در محل روستای رجعین واقع در 85 کیلومتری غرب شهر زنجان به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. شکل 3 موقعیت حوضه آبریز و محدوده ساماندهی شده زنجان‌رود را نشان می‌دهد. این رودخانه در ماه‌های پرباران سیلابی بوده و هر ساله با ایجاد فرسایش در سواحل، خسارات و مشکلات زیادی را برای تأسیسات و زمین‌های مستعد کشاورزی حاشیه‌ی رودخانه به وجود می‌آورد. در پروژه ساماندهی زنجان‌رود ستاد اجرایی طرح آبخیزداری سفیدرود با همکاری مدیریت آبخیزداری و امور زیربنایی زنجان 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 35 کیلومتر از مسیر رودخانه طبق شکل 4 ترکیبی از دیواره‌های خاکریز ساحلی و آبشکن‌ها اجرا کرده‌است (حسینی، 1382). البته در تحقیق حاضر، تطبیق مدل تنها با استفاده از آبشکن‌ها صورت گرفته است.

### 3-2- داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل بهینه‌سازی

در جدول‌های 2 و 3 داده‌های مورد نیاز برای حل مدل ملاحظه می‌شود. جدول 2 شامل دبی‌های اوج سیلاب در رودخانه زنجان‌رود، بر اساس داده‌های آماری 33 ساله ایستگاه آبسنجی پل سرچم است. جدول 3 حاوی سایر مشخصات رودخانه، شامل مشخات رسوبی، مقطع عرضی اولیه، ابعاد ثابت آبشکن و ضریب وزنی توابع می‌باشد.



شکل 3 موقعیت حوضه آبریز و محدوده ساماندهی شده زنجان

بهینه‌سازی برای هر کدام از حالت‌های مختلف  $\alpha$  شکلی از مجموعه جواب پارتو بدست می‌آید (شریفی، 1384).

$$\text{Min} Z = \left[ \text{weight}_1 \frac{\text{COST}(\bar{x})}{\text{COST}(\bar{x})_{\max}} - \text{weight}_2 \frac{Q_s(\bar{x})}{Q_s(\bar{x})_{\max}} \right] \quad (26)$$

$$\text{weight}_1 = \alpha, \text{weight}_2 = (1 - \alpha), 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (27)$$

البته باید توجه داشت که توابع مورد نظر هم مقیاس نیستند. لذا برای بی‌بعدسازی، هر یک از توابع بر مقدار حداکثر تابع مورد نظر تقسیم شده است. پس از اینکه مدل چندهدفه به یک تابع تک هدفه تبدیل شد، مدل جدید با استفاده از نرم‌افزار Lingo13 قابل حل خواهد بود. علاوه بر ضرایب وزنی، سایر ورودی‌های مدل شامل دبی ( $Q$ )، شیب ( $s$ )، اندازه متوسط ذرات بستر ( $D_{50}$ )، عرض اولیه رودخانه ( $Y_{\text{without}}$ )، طول بازه اصلاح شده ( $L_{\text{total}}$ )، عرض دماغه آبشکن ( $T$ ) و قیمت واحد حجم سازه ( $UPRC_{\text{groyne}}$ ) می‌باشد. اجزاء تابع هدف به شرح ذیل است:

$\text{COST}(\bar{x})_{\max}$ : آبشکنی که ارتفاع جریان را تا 6 متر افزایش دهد، به عنوان آبشکنی که احداث آن بیشترین هزینه را دارد در نظر گرفته می‌شود (رابطه 28). تغییرات هزینه حداکثر، در واقع مشابه تغییر در وزن تابع هزینه می‌باشد، لذا با تغییر مقدار هزینه حداکثر مجموعه جواب‌های بهینه پارتو تغییری نخواهد کرد.

$$\text{COST}(\bar{x})_{\max} = \text{COST}(\bar{x}) | Y = Y_{\max} \quad (28)$$

$Q_s(\bar{x})_{\max}$ : همانطور که توضیح داده شد مقدار حداکثر ظرفیت انتقال رسوب با استفاده از مدل مورفولوژیکی به دست می‌آید.

$\text{COST}(\bar{x})$ : تابع هزینه مطابق رابطه (3) محاسبه می‌شود. این پارامتر معادل مقدار رسوب عبوری به ازاء هر مقطع عرضی است و با استفاده از رابطه (15) محاسبه خواهد شد.

### 3- کاربرد مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج

#### 3-1- معرفی منطقه مورد مطالعه

زنجان‌رود یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قزل‌اوزن

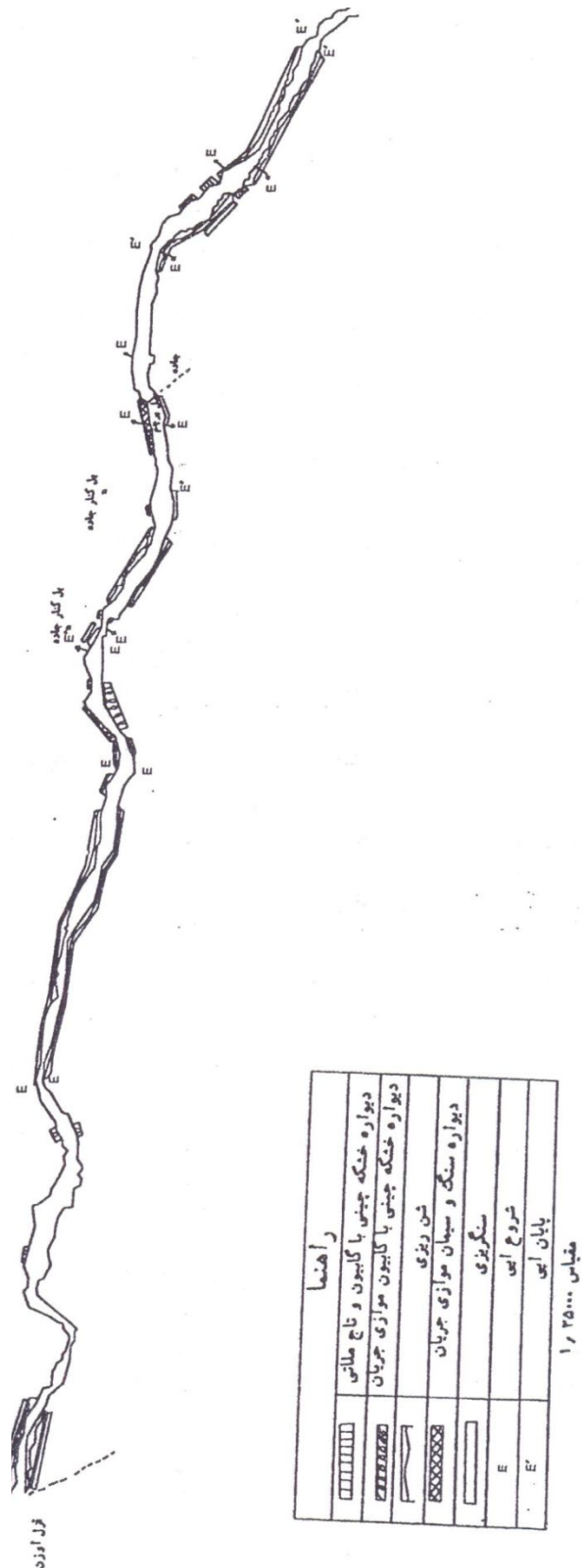


دبی طراحی آبشکن‌های زنگان رود بر اساس طرح تحقیقاتی انجام شده توسط حسینی و همکاران (1382) معادل 390 مترمکعب بر ثانیه بوده و بر اساس همین مطالعه دبی غالب رودخانه معادل 85 مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، که دوره بازگشت 2 ساله دارد (حسینی، 1382).

### 3-3- کالیبراسیون مدل

کالیبراسیون مدل بهینه‌سازی آبشکن با استفاده از اطلاعات موجود در جدول 22 برای دبی با دوره بازگشت 50 ساله انجام شده‌است. جبهه پارتو یا به عبارتی مجموعه جواب‌های غیر مغلوب مدل بهینه‌سازی به ازای دبی 390 متر مکعب بر ثانیه با تغییر ارزش وزنی هر یک از توابع بین 0 تا 1، با استفاده از معادلات بار بستر جدول 1 به دست می‌آید. در این مرحله برای مشاهده خروجی های مدل از معادله بار بستر van Rijn به دلیل کالیبره شدن مدل با استفاده از معادله مذکور و اختلاف کمتر پاسخ های مدل با طراحی انجام شده توسط حسینی و همکاران (1382)، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، استفاده شده است. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود ستون اول، ضرایب وزنی ( $\alpha$ )، ستون دوم، رسوب منتقل شده متناظر با مقطع عرضی ( $Q_s$ )، ستون سوم، ضریب شکل بهینه مقطع ( $\xi$ )، ستون چهارم، فاصله بهینه بین آبشکن‌ها ( $L_e$ )، ستون پنجم، طول بهینه سازه ( $L_{opt}$ )، ستون ششم، هزینه اجرای سازه به ازای هزینه واحد حجم ( $COST$ )، ستون هفتم، عمق بهینه ( $Y_{opt}$ )، ستون هشتم عرض بهینه ( $W_{opt}$ )، ستون نهم ارتفاع بهینه سازه ( $H_{opt}$ )، ستون دهم ظرفیت انتقال رسوب حداکثر ( $Q_{smax}$ )، ستون یازدهم هزینه حداکثر ( $COST_{max}$ ) و ستون دوازدهم عمق آبشستگی ( $d_{s-total}$ ) می‌باشد. هر ردیف از جدول شامل پاسخ‌های بهینه مدل به ازای ارزش وزنی تعلق گرفته می‌باشد.

با رسم مقادیر دو تابع هدف در مقابل هم (ستون دوم و ششم از جدول 4) جبهه پارتو به شکل نمودار 1 خواهد بود. همچنین برای بررسی تأثیر تغییر هزینه حداکثر ( $COST_{max}$ ) مقادیر متفاوتی به آن داده شد. در نمودار 1 نتیجه این تغییرات به ازاء سه مقدار متفاوت ( $Y_{max}$ ) نشان داده شده است.



شکل 4 جانمایی سازه‌های احداث شده در زنگان رود نرود در محدوده پل سرچم (حسینی، 1382)

جدول 2 دبی‌های اوج با دوره بازگشت‌های مختلف در ایستگاه سرچم (حسینی، 1382)

$T(\text{year})$	2	5	10	20	50	100	200	1000
$Q_{\text{peak}}(\text{m}^3/\text{s})$	85	146	210	271	390	440	520	752

جدول 3 ورودی‌ها موردنیاز مدل بهینه‌سازی

$L_{\text{total}}$	$W_{\text{groynes}}$	$\alpha$	$UPRC_{\text{groynes}}$	$D_{50}$	$W_{\text{without}}$	$S$	$n$	$Y_{\text{max}}$
1700 m	2 m	$0 \leq \alpha \leq 1$	1	0/011 m	100 m	0/005	0/038	6 m

جدول 4 محاسبات مربوط به اجرای مدل با استفاده از معادله van Rijn و دبی 390 متر مکعب بر ثانیه

$\alpha$	$Q_s$	$\xi$	$L_e$	$L_{\text{opt}}$	$COST$	$Y_{\text{opt}}$	$W_{\text{opt}}$	$H_{\text{opt}}$	$Q_{s\text{max}}$	$COST_{\text{max}}$	$d_s\text{-total}$
0/00	0/25	11/62	165/16	33/03	104308/87	3/19	33/94	2/99	0/25304	169548/49	4/24
0/05	0/25	11/17	162/61	32/52	102602/87	3/13	33/95	2/98	0/25304	169548/49	4/13
0/10	0/25	11/80	159/74	31/95	100790/56	3/06	36/10	2/95	0/25304	169548/49	4/02
0/15	0/25	12/54	156/49	31/30	98862/96	2/98	37/41	2/93	0/25304	169548/49	3/90
0/20	0/25	13/39	152/76	30/55	96811/45	2/90	38/90	2/90	0/25304	169548/49	3/78
0/30	0/25	15/61	143/49	28/70	92313/79	2/73	42/60	2/83	0/25304	169548/49	3/51
0/40	0/25	18/82	130/87	26/17	87324/53	2/53	47/65	2/73	0/25304	169548/49	3/23
0/50	0/24	23/46	113/92	22/78	82180/30	2/32	54/43	2/60	0/25304	169548/49	2/96
0/60	0/23	29/32	94/14	18/84	77893/93	2/13	62/33	2/42	0/25304	169548/49	2/75
0/70	0/22	34/64	77/51	15/50	75489/52	1/99	68/99	2/27	0/25304	169548/49	2/65
0/80	0/22	38/23	66/78	13/36	74543/37	1/92	73/29	2/16	0/25304	169548/49	2/61
0/90	0/22	40/50	60/17	12/03	74237/64	1/87	75/93	2/09	0/25304	169548/49	2/59
1/00	0/22	42/01	55/85	11/17	74176/12	1/85	77/66	2/04	0/25304	169548/49	2/59

ازای تمام فضای مجاز جستجو با مقدار کمینه مماس می‌شود.

### 3-3-1- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با روابط تجربی رژیم

روابط هندسه هیدرولیکی از مجموعه بزرگی از داده‌های صحرایی به دست آمده و بنا به عقیده بسیاری از محققین از جمله Huang and Nanson (2000) مبنای مناسبی برای صحت سنجی نتایج می‌باشند. برای بررسی و مقایسه نتایج مدل با روابط تجربی رژیم به ازای معادلات رسوب مورد استفاده در این تحقیق، عرض و عمق بهینه کانال با استفاده از دبی‌های مختلف و ضرایب وزنی بین 0 و 1 از طریق مدل محاسبه شده و رسم می‌شود. سپس به هر یک از این نمودارها یک تابع توانی برازش داده می‌شود. منحنی دبی-عرض برای ضریب وزنی 0/5 به ازای معادلات بار بستر متفاوت در نمودار 2 قابل مشاهده است.

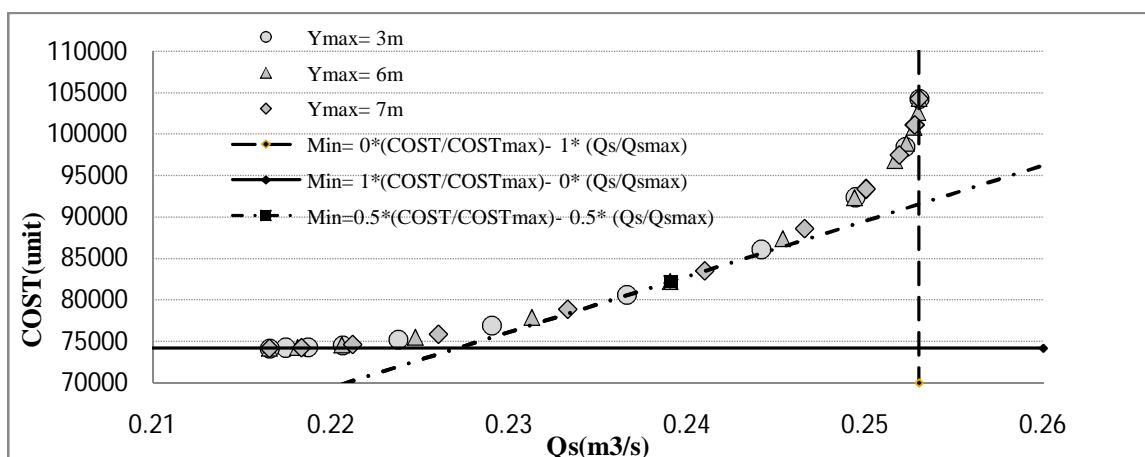
همان‌طور که ملاحظه می‌شود با این تغییرات مقادیر مجموعه جواب جدید دوباره روی همان جبهه قبلی قرار می‌گیرد. خطوط دیگری که روی نمودار ترسیم شده است پاسخ بهینه به ازای هر یک از ضرایب وزنی را به شکل شماتیک مشخص کرده است. زمانی که ارزش وزنی 0 به تابع هزینه تعلق می‌گیرد (خط عمودی) دیگر این تابع در محاسبات مؤثر نیست. در این حالت مقطع بهینه تنها از تابع ظرفیت انتقال رسوب متاثر شده و در واقع هزینه احداث سازه‌ای که حداکثر ظرفیت حمل رسوب را دارد محاسبه می‌شود. زمانی که تابع هزینه دارای ارزش وزنی 1 است (خط افقی)، نتایج مدل از تابع هزینه متاثر شده و ابعاد سازه‌ای که حداقل هزینه را دارد محاسبه می‌شود. پاسخ مدل برای ضرایب وزنی بین 0 و 1، به ازای ضریب وزنی 0/5 با خط مورب نشان داده شده است. شیب این خطوط متناسب با وزن اختصاص یافته تغییر می‌کند و به

وزنی 0/5 قابل مشاهده است. مقادیر اختلاف برای سایر ضرایب وزنی نیز به نحو مذکور محاسبه شده و در نمودار 3 نشان داده شده است. در بیشتر مطالعات صحرایی توان رابطه دبی-عرض بین 0/45 و 0/55 می باشد (Richard, 1986). لذا اختلاف توان کمتر از 10 درصد نسبت به توان رابطه Hey & Thorne (1986) نشان دهنده پایداری مناسب مقطع است.

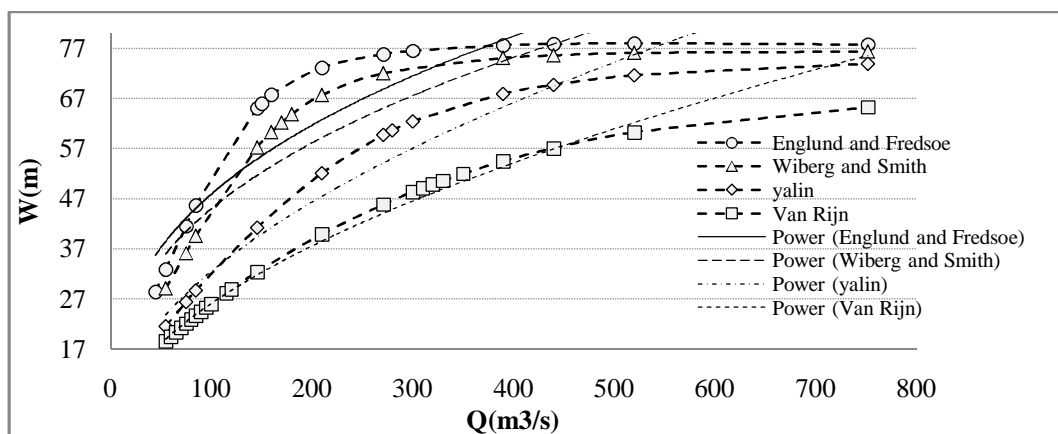
در ادامه اختلاف توان هر یک از توابع توانی نسبت به توان رابطه تجربی Hey & Thorne (1986) (رابطه 35) محاسبه شده است (Richard, 1986).

(35)

در جدول 5 روابط توانی مربوط به هر یک از معادلات بار بستر و مقادیر اختلاف این توان‌ها نسبت به توان رابطه Hey & Thorne (1986) بر حسب درصد برای ضریب



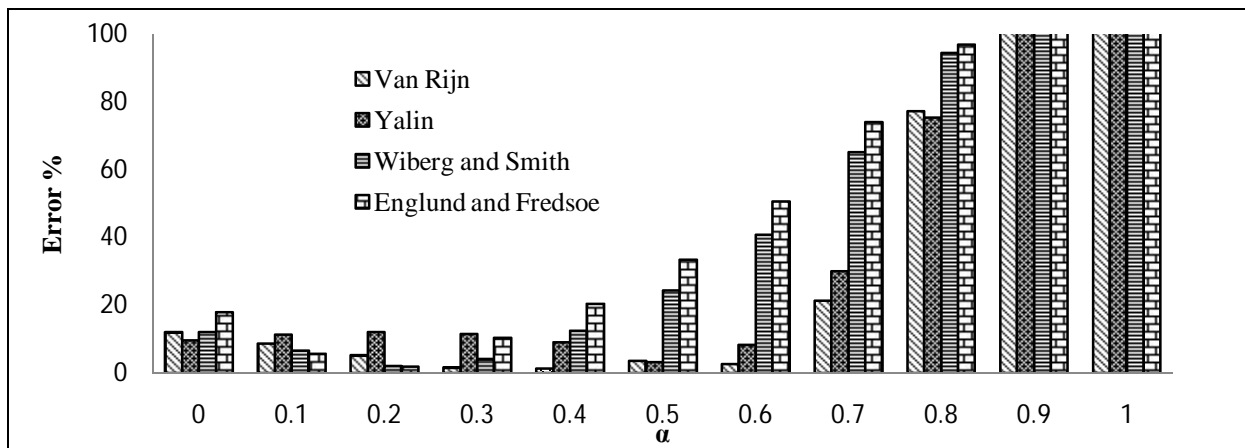
نمودار 1 منحنی پارتوی حاصل از مدل برای رودخانه زنگانرود (به ازای دبی 390 مترمکعب بر ثانیه)



نمودار 2 منحنی دبی-عرض حاصل از مدل به ازای معادلات رسوب مختلف

جدول 5 محاسبه اختلاف توان رابطه Hey & Thorne (1986) و رابطه حاصل از نتایج مدل به ازای ضریب وزنی 0/5

رابطه	توابع توانی حاصل از نتایج مدل	ضریب تعیین ( $R^2$ )	توان رابطه Hey & Thorne	Error (%)
Wiberg and Smith	$W=8.1223Q^{0.3712}$	0/8315	0/5	25/76
van Rijn	$W=2.282Q^{0.5285}$	0/9916	0/5	5/7
Yalin	$W = 3.0088Q^{0.5158}$	0/9503	0/5	3/16
Englund and Fredsoe	$W = 8.8726Q^{0.3656}$	0/8198	0/5	26/88



نمودار 3 تغییرات اختلاف توان‌ها نسبت به ضرایب وزنی مختلف

عرض تعادلی محاسبه شده توسط حسینی و همکاران (1382) دارد.

اختلاف زیاد فاصله بین آبشکن‌ها در جدول 7 به این دلیل است که نسبت فاصله بین آبشکن‌ها به طول آنها در مدل بهینه‌سازی طبق رابطه (12) در یک بازه تعریف شده است، در صورتی که در طراحی انجام شده در زنجان رود ابتدا عرض تعادلی از رابطه هندسه هیدرولیکی Lacey (1981) به دست آمده و سپس طول آبشکن از رابطه (5) حاصل شده است.

#### 4- حساسیت سنجی و تحلیل نتایج

حساسیت سنجی در این مدل بسیار گسترده می‌باشد، اما به لحاظ محدودیت فضای ارائه به بررسی تأثیر ضرایب وزنی و معادلات بار بستر بر خروجی‌های مدل (ظرفیت انتقال رسوب بهینه، ضریب شکل، طول آبشکن، هزینه و عمق آبشستگی) و نیز تأثیر انتخاب رابطه آبشستگی پرداخته شده است.

#### 4-1- بررسی تغییرات نتایج مدل نسبت به تغییر

##### وزن توابع و تغییر معادلات بار بستر

در نمودار 4 ظرفیت انتقال رسوب محاسبه شده توسط مدل که به ازای وزن‌های مختلف به دست آمده نشان داده شده است.

با توجه به این نمودار می‌توان گفت به ازای اکثر معادلات در ضرایب وزنی کمتر از 0/6، اختلاف توان‌ها کمتر از 10 درصد بوده و شرایط رژیم برقرار است، از این رو طراحی انجام شده در ضریب وزنی  $\alpha < 0.6$ ، نتایج قابل قبولی از نظر پایداری خواهد داشت. این روند به دلیل ارزش وزنی بیشتر تابع ظرفیت انتقال رسوب در این بازه است.

با توجه به اینکه پاسخ‌های مدل به صورت مجموعه‌ای حاصل از تغییر ضرایب وزنی می‌باشد، لازم است با توجه به اولویت‌های تصمیم‌گیرنده یک ضریب مناسب انتخاب شود. وزنی که مقدار هزینه و ظرفیت انتقال رسوب را در تعادل نگه دارد، به عنوان وزن مناسب انتخاب می‌شود، از این رو ضریب وزنی بین 0/5 و 0/6 می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

#### 3-3-2- مقایسه نتایج مدل بهینه‌سازی با طراحی

##### آبشکن‌های زنجان‌رود

با توجه به اینکه مدل بهینه‌سازی طراحی آبشکن با استفاده از داده‌های زنجان‌رود کالیبره شده است، از بین معادلات رسوب ذکر شده معادله‌ای انتخاب می‌شود که نتایج حاصل از مدل به ازای معادله مورد استفاده اختلاف کمی با ابعاد آبشکن‌های زنجان‌رود داشته باشند. با توجه به جدول 6 و بازه مناسب انتخاب شده برای ضرایب وزنی که بین 0/5 و 0/6 می‌باشد، عرض تعادلی حاصل از مدل با استفاده از رابطه بار بستر van Rijn (1987) طبق جدول 7 به ازای ضریب وزنی 0/6 اختلاف کمتری نسبت به

جدول 6 نتایج مدل با استفاده از روابط بار بستر مختلف (به ازای دبی 390 مترمکعب بر ثانیه)

ردیف	معادله بار بستر	$\alpha$	$Q_s$	$\xi$	$L_e$	$L_{opt}$	$COST$	$Y_{opt}$	$W_{opt}$	$H_{opt}$	$Q_{smax}$	$d_{s-total}$
1	Wiberg and Smith	0/5	0/87	39/69	62/51	12/50	74318/83	1/89	74/99	2/11	0/87	2/60
2	Wiberg and Smith	0/6	0/87	40/45	60/32	12/06	74241/98	1/88	75/87	2/09	0/87	2/59
3	van Rijn	0/5	0/24	23/46	113/92	22/78	82180/30	2/32	54/43	2/60	0/25	2/96
4	van Rijn	0/6	0/23	29/32	94/18	18/84	77893/93	2/13	62/33	2/42	0/25	2/75
5	Yalin	0/5	0/61	33/75	80/22	16/04	75805/49	2/01	67/91	2/29	0/63	2/66
6	Yalin	0/6	0/61	36/57	71/69	14/34	74912/81	1/95	71/32	2/21	0/63	2/63
7	Englund and Fredsoe	0/5	0/94	41/93	56/10	11/22	74176/32	1/85	77/56	2/04	0/94	2/59
8	Englund and Fredsoe	0/6	0/94	41/96	56/02	11/20	74176/22	1/85	77/59	2/04	0/94	2/59

جدول 7 اختلاف نتایج مدل و نتایج طراحی حسینی و همکاران (1382)

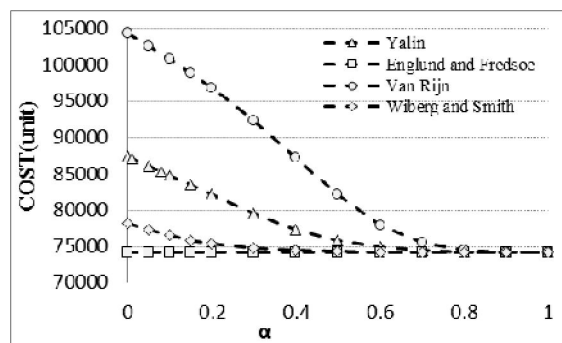
ردیف	شرح	$L_e$	$L_{opt}$	$W_{opt}$	$H_{opt}$	$d_{s-total}$
1	نتایج مدل به ازای ضریب وزنی 6 و معادله بار بستر van Rijn	94/18	18/84	62/33	2/42	2/75
2	نتایج طراحی انجام شده توسط حسینی و همکاران (1382)	56	20	61	2	4
3	اختلاف ردیف 2، 1 بر حسب درصد (%)	68/17	5/8	2/18	21	31/25

رابطه مناسب بار بستر در طراحی سازه‌هایی نظیر آبشکن می‌باشد. طول آبشکن‌های مربوط به معادله van Rijn (1987) که رسوب کمتری را محاسبه می‌کند، نرخ تغییرات بیشتری دارد، و بالعکس معادله‌ی Englund and Fredsoe (1976) که رسوب بیشتری را محاسبه می‌کند، نرخ تغییرات قابل توجهی ندارد. علت این موضوع مربوط به مقدار ضریب شکل متناظر با ظرفیت انتقال رسوب حداکثر است، که هر یک از این معادلات محاسبه می‌کنند. با استفاده از معادله Englund and Fredsoe (1976) ضریب شکل بزرگتری به دست می‌آید و به همین ترتیب ضریب شکل‌های محاسبه شده توسط معادله Wiberg and Smith (1989) بزرگتر از معادله Yalin (1977) و ضریب شکل به دست آمده از رابطه van Rijn (1987) کوچکترین ضریب شکل می‌باشد. ضریب شکل بزرگتر را می‌توان معادل مقطعی با عرض بیشتر و آبشکن کوتاه‌تر در نظر گرفت.

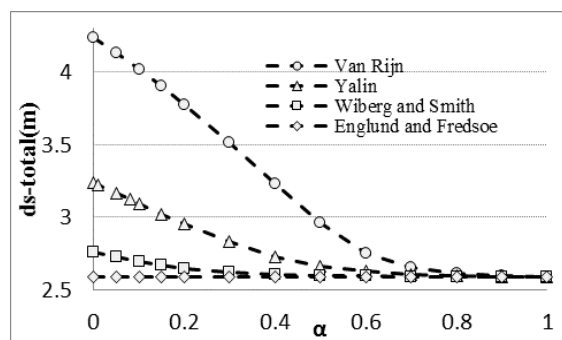
همان‌طور که ملاحظه می‌شود رسوب حمل شده به ازای معادله van Rijn (1987) کمترین مقدار را داشته و معادله Englund and Fredsoe (1976) بیشترین رسوب را در بین این معادلات محاسبه می‌کند. در این نمودار دبی رسوب به ازای افزایش وزن تابع هزینه کاهش می‌یابد، گرچه این کاهش محسوس نیست ولی علت این کاهش وابسته به تغییرات ضریب شکل است و با توجه به مدل مورفولوژیکی و حل تحلیلی مدل (Huang 2000)، روند تغییرات دبی رسوب نسبت به ضریب شکل تا رسیدن به نقطه بیشینه، صعودی و پس از آن نزولی می‌باشد. در نمودار 5 ضریب شکل با افزایش  $\alpha$  افزایش می‌یابد، چرا که با کاهش هزینه‌ها عرض مقطع افزایش یافته و پیرو آن ضریب شکل نیز بیشتر می‌شود. با توجه به نمودار 6 طول آبشکن با افزایش وزن تابع هزینه کاهش می‌یابد، تا تابع هزینه مطابق نمودار 7 در جهت کمینه شدن حرکت کند. تأثیر محسوس انتخاب رابطه بار بستر بر میزان هزینه نهایی سازه بیانگر اهمیت انتخاب

می‌شود.

یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار بر هزینه نهایی سازه میزان آبشستگی است. همان‌طور که ملاحظه شد با کاهش  $\alpha$  طول آبشکن نیز بیشتر شد. افزایش طول آبشکن به ازای یک دبی ثابت، باعث کاهش عرض و افزایش عمق آب در مجرای اصلی گردیده و در نتیجه میزان آبشستگی طبق نمودار 8 افزایش می‌یابد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، 1388).



نمودار 7 تغییرات هزینه بهینه به ازای تغییرات ضرایب وزنی

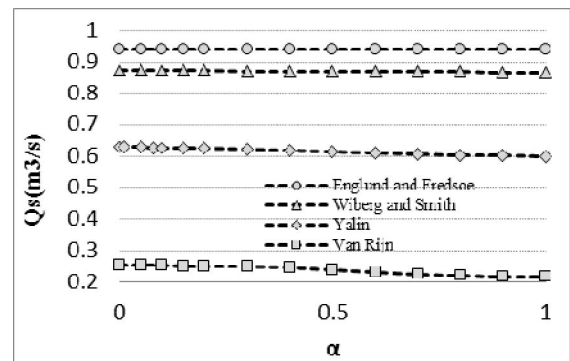


نمودار 8 تغییرات عمق آبشستگی نسبت به تغییرات ضرایب وزنی

#### 4-2- تأثیر انتخاب رابطه آبشستگی بر نتایج حاصل

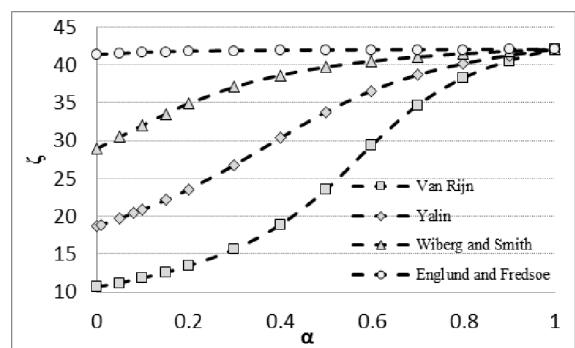
از مدل

در قسمت‌های قبلی نتایج مدل با استفاده از معادله عمق آبشستگی (Gill (1972) به دست آمده است. رابطه عمق آبشستگی عمومی (Gill (1972) در شرایط بستر متحرک و رابطه آبشستگی موضعی (Gill (1972) در آبشکن‌های با دیوار قائم در بستر ماسه‌ای کاربرد دارند. باید به این نکته توجه داشت که معادلات آبشستگی مختلفی وجود دارد که با توجه به متغیرهای متفاوت موجود در آن‌ها بر پاسخ

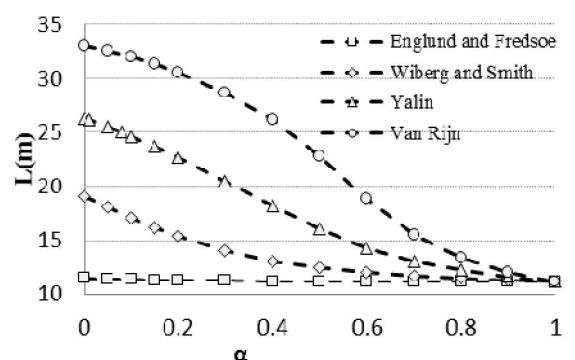


نمودار 4 تغییرات ظرفیت بهینه انتقال رسوب به ازای تغییرات

ضریب وزنی



نمودار 5 تغییرات ضریب شکل به ازای تغییرات ضرایب وزنی



نمودار 6 تغییرات طول آبشکن به ازای تغییرات ضرایب وزنی

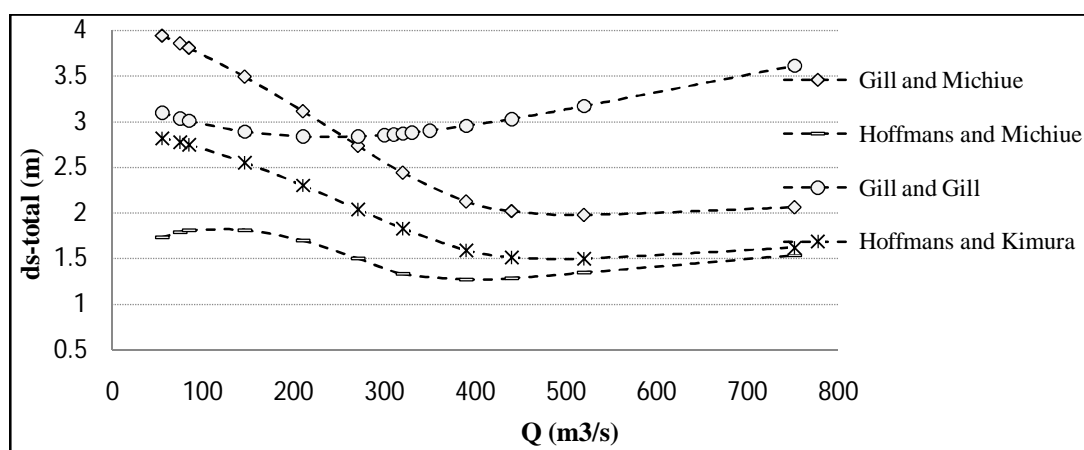
مدل بهینه‌سازی به ازای  $\alpha=0$ ، ضریب شکل حداکثر ( $\zeta_m$ ) را محاسبه می‌کند، لذا با توجه به اینکه معادله Englund and Fredsoe (1976) عرض تعادلی بزرگتر و یا به عبارتی طول آبشکن کمتری را برای انتقال این حجم از رسوب نیاز دارد، طول آبشکن با حالتی که ضریب وزنی تابع هزینه 1 است، اختلاف چندانی نخواهد داشت، چرا که به ازای ضریب وزنی 1 کمترین طول آبشکن محاسبه

این مطلب است که عمق آبشستگی محاسبه شده توسط معادلات مختلف متفاوت بوده و این مسئله بر هزینه نهایی سازه که در نمودار 10 نشان داده شده است، بسیار مؤثر می‌باشد، لذا دقت در انتخاب رابطه آبشستگی مناسب اهمیت فراوانی دارد.

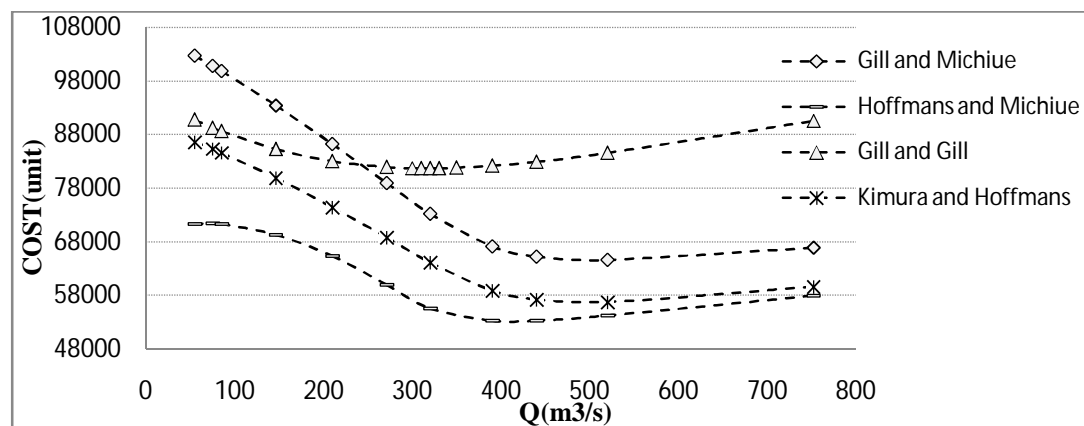
نهایی تأثیر بسیار خواهند گذاشت. لذا برای بررسی بیشتر و تأثیر انتخاب رابطه آبشستگی، مدل بهینه‌سازی با استفاده از رابطه آبشستگی موضعی (Hoffmans (1997) با ترکیب دو رابطه آبشستگی عمومی (Kimura (1997) و Michiue (1984) که روابط مربوط به آنها در جدول 8 ذکر شده است، اجرا شد. نتایج مدل در نمودار 9 بیانگر

جدول 8 روابط عمق آبشستگی مورد استفاده

نام محقق	رابطه عمق آبشستگی	توضیحات
Hoffmans et al. (1997)	$Y_{\text{without}} \times \left( \left( \frac{W_{\text{without}}}{W_{\text{with}}} \right)^{2/3} - 1 \right) + K_B L_{\text{qroyne}} \times \tanh \left( \frac{Y_{\text{without}}}{L_{\text{qroyne}}} \right)$	دیواره قائم: $K_B = 1$ دیواره شیب دار: $K_B = 1.5$
Kimura et al. (1997)	$\left( Y_{\text{without}} \times \left[ \left( \frac{W_{\text{without}}}{W_{\text{with}}} \right)^{6/7} \times \left( \frac{\tau_{\text{without}}}{\tau_{\text{with}}} \right)^{2/7} \right] \right) - Y_{\text{without}}$	جریان آب و رسوب در بستر متحرک
Michiue et al. (1984)	$Y_{\text{without}} \times \left( \left[ \left( \frac{W_{\text{without}}}{W_{\text{with}}} \right)^{-4/7} - 1 \right] + (0.5 \times Fr^2) \times \left[ \left( \frac{W_{\text{without}}}{W_{\text{with}}} \right)^{-6/7} - 1 \right] \right)$	$Fr > 1$



نمودار 9 تغییرات عمق آبشستگی به ازای تغییرات دبی و رابطه آبشستگی



نمودار 10 تغییرات هزینه بهینه به ازای تغییرات دبی و رابطه آبشستگی

**5- نتیجه‌گیری**

مدل ارائه شده در تحقیق فوق در عین بهینه‌سازی ابعاد آبشکن، پایداری مقطع عرضی رودخانه را نیز لحاظ می‌کند. این مدل در نهایت ترکیبی مناسب از هزینه‌های ساخت سازه و شرایط مورفولوژیکی رودخانه را در اختیار طراح قرار خواهد داد. پاسخ نهایی مدل فوق، وابسته به اولویت‌های طراح می‌باشد، که به نوبه خود منعکس کننده ارزش وزنی هر یک از توابع هزینه‌های ساخت سازه و پایداری مورفولوژیکی رودخانه خواهد بود.

از طرفی مدل پیشنهادی قادر است روند تغییرات هزینه را نسبت به ظرفیت حمل رسوب کانال که بیانگر وضعیت پایداری رودخانه است، محاسبه کند. این مدل علاوه بر تسریع روند طراحی و اعمال مجموعه جامع‌تری از گزینه‌های طراحی، شرایط تصمیم‌گیری مناسبی بین پایداری سازه و هزینه‌های ساخت آن را فراهم خواهد آورد. آبشکن‌های زنجان‌رود به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. مدل با استفاده از داده‌های موجود، به ازای ضریب وزنی  $0/6$  برای تابع هزینه و  $0/4$  برای تابع ظرفیت انتقال رسوب و با استفاده از معادله انتقال رسوب van Rijn (1987) کالیبره شده و نتایج اجرای مدل با آبشکن‌های طراحی شده در زنجان‌رود مقایسه گردید. علاوه بر آن، منطقی بودن پاسخ‌های مدل با تغییر ورودی‌ها، که در بخش حساسیت سنجی به عمل آمد، نشان دهنده نقش به کارگیری معادلات بار بستر و آبشستگی، در تعیین ابعاد آبشکن و هزینه‌های ساخت سازه می‌باشد. به عبارتی درستی پاسخ‌های مدل وابسته به انتخاب مناسب معادلات بار بستر و آبشستگی می‌باشد. از طرفی در تحقیق حاضر تعدادی از ضوابط طراحی نظیر زاویه آبشکن، شیب دماغه و یال‌های جانبی در جهت ساده‌سازی در نظر گرفته نشده و راستای رودخانه مستقیم فرض شده است.

**6- فهرست علائم**

$Cost$  هزینه ساخت آبشکن  
 $D_{50}$  قطر مربوط به 50 درصد ذرات عبوری از الک

$d_{s\_total}$	عمق آبشستگی کل
$d_{s\_general}$	عمق آبشستگی عمومی
$d_{s\_local}$	عمق آبشستگی موضعی
$G_s$	چگالی مخصوص ذرات
$H_{groyne}$	ارتفاع آبشکن‌ها
$L_e$	فاصله بین آبشکن‌ها
$L_{groyne}$	طول آبشکن
$L_{total}$	طول بازه اصلاح شده
$N_{groyne}$	تعداد آبشکن‌ها در طول بازه اصلاح شده
$n$	ضریب زبری مانینگ
$Q_s$	دبی رسوب
$Q$	دبی جریان آب
$q_s$	دبی رسوب در واحد عرض رودخانه
ROOT	ریشه آبشکن
$S$	شیب بستر رودخانه
$T$	عرض دماغه آبشکن
$UPRC_{groyne}$	هزینه واحد حجم ساخت سازه
$V$	سرعت جریان
$W_{with}$	عرض رودخانه بعد از احداث آبشکن
$W_{without}$	عرض رودخانه قبل از احداث آبشکن
$Y_{with}$	عمق جریان بعد از احداث سازه
$Y_{without}$	عمق جریان آب قبل از احداث سازه
$\alpha$	ضریب وزنی توابع
$\gamma_s$	وزن حجمی مخصوص رسوب
$\gamma$	وزن حجمی مخصوص آب
$\nu$	لزجت سینماتیک آب
$\xi_m$	نسبت عرض به عمق بهینه مقطع عرضی رودخانه
$\rho$	جرم مخصوص آب
$\rho_s$	جرم مخصوص رسوب
$\tau_{without}$	تنش برشی قبل از احداث سازه
$\tau_c$	تنش برشی بحرانی
$\phi$	شار حجمی رسوبی بی‌بعد انشتین

**7- منابع**

بنی‌حبیب، م.، مستوری، ا.م. و جمالی، ف. (1387). "بررسی صحرایی فاصله بهینه بین آبشکن‌ها". اولین کنفرانس بین‌المللی



Augusto, O.B., Bennis, F. and Caro, S. (2012). "A new method for desicion making in multi-objective optimaization problems". *Pesquisa Operacional* 32(2): 331-369© 2012 Brazilian Operations Research Society Printed version ISSN 0101-7438 / Online version ISSN 1678-5142 www.scielo.br/pope.

Carriaga, C.C. and Mays, L.W. (2001). "Optimization approach to stable channel system design". *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*.

Chanson, H. (2004). *Environmental hydraulics of open channel flow*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

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.

DuBoys, P. (1879). "Le Rhone et les rivieres a lit affouillab le", *Annales des Ponts et Chaussees*, 18 (Series 5): 141-195.

Englund, F., and Fredsoe, J. (1976). "A sediment transport model for straight alluvial channels". *Nordic Hydrology*, 7, pp. 293-306.

Gill, M.A. (1972.) "Erosion of sand beds around spur dikes", *Journal Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 98, No. HY9, pp. 1587-1602.

Huang, H.Q. and Nanson, G.C. (2000). "Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action". *Earth Surface Processes and Landforms*. 25, pp. 1 - 16.

Petersen, M.S. (1986). *River engineering*, Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N.J., 390p.

Richard D. Hey, Colin R. Thorne (1986). "Stable channels with mobile gravel beds". *Journal of Hydrodynamic Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 671-689.

Richardson, E.V., Karaki, S., Mahmood, K., Simons, D. B., Stevens, M. A. (1975). *Highways in the river environment, Hydraulic and environmental design considerations*. Training and design manual, U.S., Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C.

Rosgen, D.L. (2001). "A stream channel stability assessment methodology". In *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*. Reno, NV, USA, pp. II - 18-26.

Singh, V.P. (2003). "On the theories of hydraulic geometry". *International Journal of Sediment Research*. Vol. 18, No. 3, pp. 196-218.

بحران آب، دانشگاه زابل.

ترابی زاده، ع. و بینا، م. (1388). "ارزیابی هیدرولیکی آبشکن‌ها و اثرات آن بر روی رودخانه زهره با استفاده از مدل MIKE11"، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

چوپانی، س.، عباسی، ع.، پرورش، ا. و رستگار، ح. (1386). "بررسی فاکتورهای موثر در عملکرد انواع مختلف ایپی‌های موجود در رودخانه میناب". پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره 74، ص.ص. 66-78.

حسینی، الف. و همکاران (1388). "ارزیابی فنی عملکرد آب‌شکن‌های احداثی در رودخانه قزل‌اوزن". هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق (عباسپور).

حسینی، ا.، حبیبی، م. و صابری، ا. (1382). "طرح تحقیقاتی ارزیابی فنی و اقتصادی آبشکن‌های احداث شده در رودخانه زنجان‌رود"، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری.

شریفی، ف. (1384). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چند منظوره با استفاده از الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

طاهر شمسی، ا. و ایمان‌شعار، ف. (1389). "تعیین معادلات رژیم رودخانه بر اساس معادله توان واحد جریان". نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری-دانشکده فنی. دوره 44، شماره 1، ص.ص. 73-81.

گلرنگ، ب.، مشایخی، م. و حبیبی، م. (1383). "ارزیابی اقتصادی آبشکن‌های احداث شده بر روی رودخانه لار (استان تهران)". فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره 85، 14379-14403.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (1387). "مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها". نشریه 417.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (1388). "راهنمای طراحی ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای". نشریه شماره 516.

نظری، ب.، مجدزاده طباطبایی، م.ر. و قریشی، س.ح. (1390). "بررسی سطح مقطع پایدار کانال‌های آبرفتی مستقیم با استفاده از مفهوم ضریب شکل". دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، رشت.

Wiberg, P. L. and Smith, J. D. (1989). "Model for calculating bed load transport of sediment". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 115 (1), pp. 101–123.

Yalin, M. S. (1977). *Mechanics of sediment transport*. Pergamon, Oxford, UK.

Sobhan, S.A. and Kumar Das, S. (1999). "Spacing of straight spurs in series ". *Journal of Civil Eng., The Institution of Engineers, Bangladesh*, Vol. CE27, No. 2, pp. 177-181.

van Rijn, L.C. (1987). "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport". Ph.D Thesis, Delft University of Technology.