

مدل بهینه‌سازی طراحی سازه‌های کنترل شیب جهت پایداری رودخانه‌ها

سعیده آدینه (کارشناس ارشد)

محمدرضا مجذزاده طباطبایی* (استادیار)

سعید علی‌محمدی (استادیار)

حسین قریشی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۱۳۳-۱۴۰، یادداشت نمی

سازه‌های کنترل شیب با هدف کاهش شیب بستر و جلوگیری از فرسایش آن ساخته می‌شوند و با عملکرد افزایش مقاومت بستر در مقابل تنش برشی جریان، باعث تثبیت بستر می‌شوند. در پژوهش حاضر، مدل بهینه‌سازی یک نوع از سازه‌های کنترل به نام کف‌بند که در عرض بستر رودخانه و هم‌سطح کف بستر ساخته می‌شود و بستر آبراهه را از فرسایش حفاظت می‌کند، ارائه شده است. در این رابطه، مدل بهینه‌سازی به صورت ترکیبی از دو زیرمدل هیدرولیکی و سازه‌ی با اهداف کمیته‌سازی هزینه‌ی ساخت و بیشینه‌سازی پایداری کف‌بند مطرح شده است. مدل مذکور با توجه به مشخصات رودخانه‌ی دوغ، کالیبره و ابعاد و هزینه‌ی بهینه‌ی کف‌بند تعیین شد. در مرحله‌ی بعد، مدل نسبت به متغیرهای ورودی شیب طولی و دبی جریان حساسیت‌سنجی شد تا نقش تغییر پارامترهای مذکور در تأثیر خروجی‌های مدل مطالعه شود. در این راستا، منطقی بودن نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی، نیز صحت‌سنجی شد.

واژگان کلیدی: سازه‌های کنترل شیب، هزینه، بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری

کف‌بند، پایداری رودخانه.

adineh_sc@yahoo.com
m.majdzadeh@sbu.ac.ir
s.alimohammadi@sbu.ac.ir
h_ghoreishi@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه ثبات رودخانه‌های فرسایشی یکی از چالش‌ها و مشکلات پیش روی مهندسان رودخانه است. ترازگاهی در رودخانه به پل‌ها، کالورت‌ها، خطوط انتقال پتروشیمی، برق، آب و دیگر زیرساخت‌ها آسیب می‌رساند.^[۱] همچنین موجب پیشروی فرسایش به سمت بالادست و گسستگی بستر^[۱] خواهد شد.^[۱] از سوی دیگر، رسوبات فرسایش‌یافته، در پایین دست ته‌نشین می‌شود و منجر به کاهش شیب متوسط بستر رودخانه، پیچان شدن^[۲] رودخانه، کاهش ظرفیت انتقال جریان رودخانه و در نتیجه بروز سیلاب می‌شوند.^[۲] رسوب‌گذاری در پایین دست، کیفیت آب را کاهش می‌دهد و در محیط زیست موجودات آبی آثار نامطلوب می‌گذارد.^[۳]

یکی از روش‌های تثبیت بستر رودخانه، احداث کف‌بندها^[۴] (سازه‌های کنترل شیب^[۴]) است. ساخت سازه‌های مذکور علاوه بر تثبیت بستر و ایجاد آبراهه‌ی پایدار (آبراهه‌ی بدون فرسایش و رسوب‌گذاری)، موجب پایداری سازه‌های موجود در رودخانه نیز می‌شود. از آنجا که عملکرد صحیح سازه‌های مذکور منوط به پایداری آن‌هاست، انجام تحلیل پایداری برای آن‌ها ضروری است. از طرفی لزوم اقتصادی بودن طرح نیز یکی از اهداف مهم در طرح‌های سامان‌دهی رودخانه است، بنابراین در پژوهش

حاضر به منظور فراهم آوردن اهداف ذکرشده، از روش بهینه‌سازی استفاده شده است. مطالعات انجام‌شده پیرامون موضوع مورد پژوهش در ۳ بخش: بهینه‌سازی، کف‌بندها و سازه‌های کنترل شیب در ادامه بررسی شده است.

در بخش بهینه‌سازی، در پژوهشی در سال ۲۰۱۳، مدل بهینه‌سازی آب‌شکن با استفاده از لینگو^۵ ارائه شد که متشکل از ۳ زیرمدل: ریخت شناسی، طراحی و بهینه‌سازی بود و برای مطالعه‌ی پایداری رودخانه از زیرمدل ریخت شناسی استفاده شده بود که در آن ابعاد مقطع پایدار با استفاده از تئوری پیشینه‌ی ظرفیت انتقال رسوب محاسبه شده و سپس با به‌کارگیری ضوابط طراحی مناسب برای اجزاء آب‌شکن، از قبیل: طول، ارتفاع، فاصله، تعداد و عمق آب‌شستگی آب‌شکن در زیرمدل طراحی، هزینه‌های ساخت کمیته به دست آمده است. نتایج حاصل از دو زیرمدل ریخت شناسی و طراحی در زیرمدل بهینه‌سازی، با استفاده از روش وزن‌دهی به صورت یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی غیرخطی فرموله و بررسی شد، تا بدین ترتیب ابعاد بهینه‌ی آب‌شکن محاسبه شود.^[۴] در سال ۱۹۹۹، نیز یک مدل بهینه‌ی طراحی کانال پایدار با یک سری از سازه‌های کنترل شیب و با هدف بهینه‌سازی ارائه شد و مدل بهینه‌ی مذکور با اعمال قیدهای پایداری کانال (که با استفاده از روش‌های پیشینه‌ی سرعت مجاز، تنش برشی بحرانی و مقطع بهینه‌ی هیدرولیکی حاصل می‌شود)، عمق آب‌شستگی، ارتفاع سازه‌ها، و ضریب زبری مانینگ، با استفاده از نرم‌افزار

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1415

GAMS-MINOS حل شد و هزینه‌ی سازه به میزان کمیته رسید. مدل مذکور با تعدادی از رودخانه‌ها در آریزونا صحت‌سنجی شد که علاوه بر هزینه‌ی کمتر، کارکرد مناسب نیز داشت.^[۵]

همچنین برخی پژوهشگران در بخش کف‌بندها در سال ۲۰۱۲، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در پایین دست کف بند را با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان محاسبه کردند. برای انجام این کار، از ۲۲۶ داده‌ی آزمایشگاهی از پژوهشگران مختلف با شرایط هیدرولیکی و رسوبی متفاوت استفاده شد و مقایسه‌ی نتایج محاسبات در مرحله‌ی آزمون نشان داد که روش ذکرشده نسبت به روابط رگرسیونی پژوهشگران پیشین، دقت و کارایی مناسب‌تری دارد.^[۶]

در سال ۲۰۱۰، نیز اثر جریان سیل در بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی در حالت آب بدون رسوب و در شیب طولی تند بررسی و براساس تغییرات زمانی پارامترهای مهم، دو رابطه‌ی بدون بعد برای تخمین ابعاد حفره‌ی آب‌شستگی ارائه شد.^[۷] همچنین در یک رساله‌ی دکتری (۲۰۰۸)، به بررسی آب‌شستگی موضعی در پنجه‌ی کف‌بندها و در شرایط جریان حاوی رسوب و عاری از رسوب پرداخته و با به‌کار بردن آنالیز ابعادی و داده‌های مشاهده‌شده در تمام آزمایش‌ها، شامل بستر با شیب کم و زیاد، ذرات یکنواخت و غیریکنواخت، جریان حاوی و عاری از رسوب، رابطه‌ی برای تخمین عمق آب‌شستگی موضعی ارائه شد.^[۸]

برای اولین بار در سال ۲۰۰۳، نیز به بررسی فاصله‌ی بین کف‌بندها پرداخته شد و مطالعات مذکور نشان داد که نزدیک بودن فاصله‌ی کف‌بندها به یکدیگر، سبب توسعه‌ی آب‌شستگی می‌شود و نتایج نشان داد که اگر نقطه‌ی فرسایش‌ناپذیر که موقعیت کف‌بند بعدی است، از یک فاصله‌ی بحرانی کمتر باشد، اندازه و شکل حفره‌ی آب‌شستگی تغییر می‌کند.^[۹]

همچنین در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی (۲۰۰۰) و در شرایط جریان عاری از رسوب و با به‌کار بردن آنالیز ابعادی، رابطه‌ی برای تخمین عمق آب‌شستگی موضعی در پنجه‌ی کف‌بندها ارائه و نتیجه‌گیری شد که عمق آب‌شستگی موضعی در پنجه‌ی کف‌بندها با افزایش ارتفاع کف‌بند، افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه‌ی متوسط ذرات بستر، کاهش می‌یابد.^[۱۰]

در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۲، نیز در بخش سازه‌های کنترل شیب، تأثیر نشت رو به بالا در میزان آب‌شستگی بستر پایین دست سازه‌های مذکور بررسی شد و با ساخت مدل فیزیکی سازه‌ی کنترل شیب و انجام آزمایش‌های متعدد، با استفاده از ۳ نوع اندازه‌ی رسوب بستر و برقراری ۳ مقدار دبی مختلف و تحت شرایط ۳ عمق مختلف پایاب، عمق حفره‌ی آب‌شستگی بدون منظور کردن نشت از بستر اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، تعدادی از روابط موجود مقایسه و مناسب‌ترین آن‌ها معرفی شد. در سری دوم، آزمایش‌های مذکور با منظور کردن نشت از بستر (با تعداد ۵ دبی) تکرار شدند که هدف از آن‌ها، بررسی تأثیر نشت آب از بستر بود؛ که برای اولین بار در پایین دست جت‌های عمودی بررسی و در انتها، روابطی برای ابعاد حفره‌ی آب‌شستگی در شرایط نشت رو به بالا ارائه شد.^[۱۱]

همچنین در سال ۲۰۱۱، کنترل شیب و تثبیت بستر رودخانه‌ها به منظور احیای حوضه‌های آبریز مطالعه و ضمن معرفی سازه‌های کنترل شیب و مزایا و معایب‌شان، مکان‌یابی و جانمایی سازه‌های ذکرشده بررسی شدند.^[۱۲] برخی پژوهشگران (۲۰۱۰)، نیز فاصله‌ی بهینه‌ی سدهای اصلاحی را که نوعی از سازه‌های کنترل شیب هستند، بررسی کردند و به عملکرد نامناسب برخی سدهای اصلاحی در دامنه‌های شیرکوه که ناشی از مدفون شدن سدهای ذکرشده است، پرداختند و در نهایت، رابطه‌ی مناسبی برای آبراهه‌های مشابه آبراهه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، جهت بهینه بودن فاصله‌ی بین سدها ارائه دادند.^[۱۳]

همچنین در سال ۱۹۹۰، تنوع زیست‌گاه‌های ایجادشده در تعدادی از رودخانه‌ها در اثر ساخت سازه‌های کنترل شیب بررسی و نشان داده شد که در رودخانه‌های با جریان کم، تنوع زیست‌گاه‌ها در حوضه‌ی آب‌شستگی افزایش می‌یابد.^[۱۴] در سال ۱۹۸۷، نیز با مطالعه‌ی حوضه‌های طبیعی و مصنوعی آب‌شستگی ایجادشده در اثر ساخت سازه‌های کنترل شیب در شمال می‌سی‌سی‌پی نتیجه‌گیری شد که ساخت سازه‌های مذکور باعث افزایش زیستگاه‌هایی برای ماهی‌ها می‌شود.^[۱۵] مطالعاتی روی آستانه‌های احداث‌شده (۱۹۷۹) نیز نشان داد که پس از احداث سازه‌های ذکرشده و با توجه به عملکردشان به‌عنوان سازه‌های تله‌انداز رسوب، تجمع شن بین آن‌ها منجر به بهبود تخم‌ریزی و افزایش قابل توجه ماهی‌ها می‌شود.^[۱۶]

به‌طورکلی مطالعات انجام‌شده پیرامون کف‌بندها، تخمین عمق آب‌شستگی موضعی در پنجه‌ی آن‌ها بوده است. نظیر مطالعاتی که در سال ۱۹۹۹ انجام و بیشتر نیز به آن اشاره شد، فقط به طراحی هیدرولیکی سازه‌های کنترل شیب پرداخته و پارامترهای هیدرولیکی از قبیل عمق آب‌شستگی در پنجه‌ی سازه‌ها و شیب تعادلی بستر رودخانه در طراحی لحاظ شده است.

در مطالعات ذکرشده، پایداری سازه فقط در پیش‌بینی عمق آب‌شستگی موضعی و در نتیجه ارتفاع کف‌بند بوده است. در صورتی‌که یکی از عوامل تأثیرگذار در پایداری کف‌بند، حصول اطمینان از پایداری آن در برابر لغزش و واژگونی است؛ بنابراین پیش‌بینی عرض سازه علاوه بر ارتفاع آن ضروری به‌نظر می‌رسد. از طرفی فاصله‌ی بین کف‌بندها و ارتفاع آب‌شستگی از عرض سازه هم اثر می‌پذیرند از این رو لزوم طراحی سازه‌ی علاوه بر طراحی هیدرولیکی مشخص می‌شود. لذا هدف اصلی از پژوهش حاضر، طراحی کف‌بند با کمیته‌ی هزینه و بیشینه‌ی پایداری با اضافه کردن پارامتر عرض کف‌بند در طراحی و تأثیر پارامتر مذکور در فاصله و ارتفاع کف‌بندها در یک بازه‌ی مشخص است.

۲. مبانی تئوری

در پژوهش حاضر، طراحی کف‌بندی که کمترین هزینه و بیشترین پایداری را داشته باشد، تحلیل و بررسی شده است. برای دست‌یابی به اهداف موردنظر، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه مطرح شده است که دو تابع هدف دارد: ۱. کمیته‌سازی هزینه‌ی احداث کف‌بند و ۲. بیشینه‌سازی پایداری کف‌بند احداث‌شده. برای کمیته‌سازی هزینه، زیرمدل هیدرولیکی و برای بیشینه‌سازی پایداری سازه، زیرمدل سازه‌ی ایجاد شده است. در زیرمدل هیدرولیکی، شیب تعادلی بستر رودخانه، عمق آب‌شستگی موضعی و کلی به‌دست می‌آید. از آنجا که فاصله‌ی بین کف‌بندها و عرض هر کف‌بند از پارامترهای تأثیرگذار در طراحی محسوب می‌شوند، در این راستا در زیرمدل سازه‌ی با استفاده از محدوده‌ی پیش‌بینی شده برای ضرایب اطمینان و قیدهای تعریف‌شده، عرض و فاصله بین کف‌بندها محاسبه و در مدل بهینه‌سازی، به ازاء شیب تعادلی بستر رودخانه و دبی مشخص، ابعاد بهینه‌ی کف‌بند به گونه‌ی حاصل شده است که بیشترین پایداری در برابر لغزش و واژگونی و کمترین هزینه‌ی احداث را داشته باشد. در شکل ۱، روند نمای مدل بهینه‌سازی کف‌بند نشان داده شده است.

۱.۲. زیرمدل هیدرولیکی

هدف از زیرمدل هیدرولیکی، کمیته‌سازی هزینه‌های ساخت کف‌بند است. در این رابطه، ابعاد کف‌بند با توجه به ضوابط طراحی هیدرولیکی کف‌بند به‌دست می‌آید،

$$SI = \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) / 2 \quad (10)$$

$$h_b = FS * (y_d + y_s + y_g) \\ = 1.3 * (y_d + y_s + y_g) \quad (11)$$

S.T :

$$y_d \leq y_t \quad (12)$$

$$L - W_b \geq 1.5 * H_s \quad (13)$$

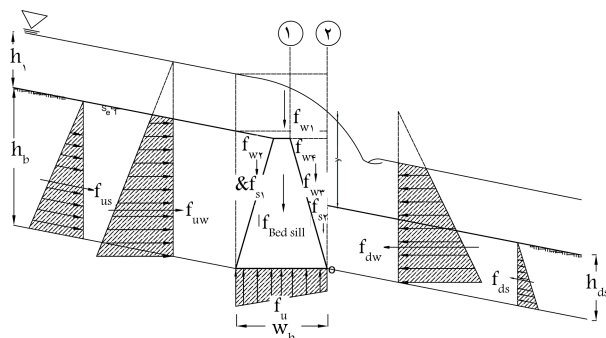
$$0.7 \leq \frac{y_d}{H_s} \leq 1.87 \quad (14)$$

که در آن n ، تعداد کف بند است (رابطه ۱). روابط ۲ الی ۴ به ترتیب محاسبه‌ی شیب تعادلی با استفاده از معادلات Meyer-peter, Muller و Schoklitsch, Shields را بیان می‌کنند که در آن‌ها شیب تعادلی بر مبنای اندازه‌ی متوسط ذرات بستر بر حسب متر (D_{50}) در رابطه‌ی Shields و بر حسب میلی‌متر در روابط Meyer-peter, Muller و Schoklitsch و عمق متوسط جریان بر حسب متر و چگالی دانه‌های رسوب (G_s) محاسبه می‌شوند. [۱۷] رابطه‌ی ۵، محاسبه‌ی عمق متوسط جریان (d_f) در دبی طراحی واحد عرض رودخانه (q_f) با استفاده از رابطه‌ی مانینگ را نشان می‌دهد که در آن n_s ضریب زبری مانینگ است. رابطه ۶، محاسبه عرض کف بند را نشان می‌دهد. روابط ۷ و ۸ به ترتیب اعماق آب‌شستگی کلی و موضعی را بیان می‌کنند. عمق آب‌شستگی کلی از رابطه‌ی نیل^۶ (۱۹۷۳) و براساس دبی غالب واحد عرض (q_i)، دبی طراحی واحد عرض و عمق متوسط جریان محاسبه می‌شود، [۱۸] و عمق آب‌شستگی موضعی نیز از رابطه‌ی ترگناقی^۷ (۲۰۰۸) و بر مبنای کمینه‌ی انرژی مخصوص بر حسب متر (H_s) رابطه‌ی ۹، دبی طراحی واحد عرض رودخانه، شتاب نقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه (g)، قطری از ذرات بستر که ۸۴٪ مصالح از آن کوچک‌ترند بر حسب متر (D_{84})، قطری از ذرات بستر که ۱۶٪ مصالح از آن کوچک‌ترند بر حسب متر (D_{16})، شاخص جورشدگی ذرات بستر (SI)، ارتفاع و فاصله‌ی بین کف‌بندها در هر بازه به دست می‌آید (رابطه ۱۰). ارتفاع کف بند در هر بازه با احتساب مجموع اعماق آب‌شستگی و ضریب اطمینان (FS) ۱.۳، [۱۹] توسط رابطه‌ی ۱۱ بیان می‌شود.

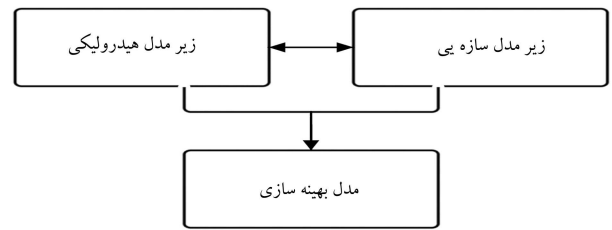
۲.۲. زیرمدل سازه‌ی

به منظور بررسی پایداری کف بند احداث شده در رودخانه پس از رسیدن به شیب تعادلی زیرمدل سازه‌ی مطرح می‌شود که هدف از آن محاسبه‌ی بارهای وارد بر کف بند و سپس تحلیل آن در مقابل لغزش و واژگونی است. شکل ۳، بارهای وارد بر کف بند را نشان می‌دهد.

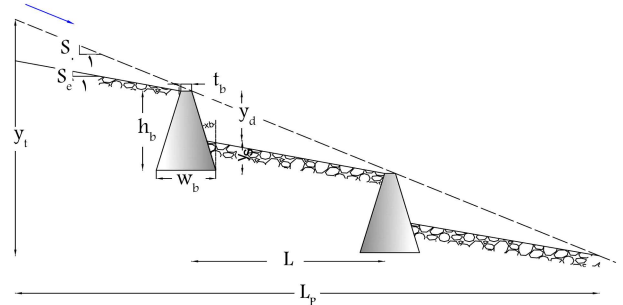
که در آن، (f_{w1}) الی (f_{w2}) نیروهای قائم ناشی از وزن آب، (f_{s1})



شکل ۳. بارهای وارد بر کف بند.



شکل ۱. روند نمای مدل بهینه‌سازی کف بند.



شکل ۲. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی طراحی هیدرولیکی در پروفیل طولی بستر.

سپس حجم عملیات اجرایی در هزینه‌ی واحد حجم سازه ضرب می‌شود و در نهایت، هزینه‌ی ساخت کف بند به دست می‌آید. به منظور ساده‌سازی و با توجه به مقایسه‌ی مدل با کف‌بندهای اجرا شده در رودخانه‌ی دوغ و از طرفی عریض بودن رودخانه (نسبت عرض به عمق جریان بزرگ‌تر از ۱۰ است)، بازه‌ی اصلاح‌شده‌ی مستقیم و مقطع رودخانه، عریض و مستطیلی فرض شده است. شکل ۲، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی طراحی هیدرولیکی در پروفیل طولی بستر را نشان می‌دهد. در شکل مذکور، S_e شیب متوسط بستر، S شیب تعادلی بستر، y_t ارتفاع تعدیل‌شده‌ی بستر رودخانه، y_d ارتفاع کف بند در هر بازه، y_s عمق آب‌شستگی در پنجه‌ی کف بند، h_b ارتفاع کف بند با در نظر گرفتن عمق آب‌شستگی، L_p فاصله‌ی افقی بازه‌ی فرسایشی، L فاصله‌ی بین کف‌بندها، t_b عرض تاج کف بند، w_b عرض کف بند و x_b زاویه‌ی وجه جانبی کف بند با راستای قائم است. واحد پارامترهای ذکر شده در شکل ۲، بر حسب متر (m) محاسبه شده‌اند. همچنین پارامترهای مذکور براساس روابط ۱ الی ۱۴ محاسبه می‌شوند.

$$n = \frac{y_t}{y_d} = \frac{(S_e - S_e) * L_p}{(S_e - S_e) * L} = \frac{L_p}{L} \quad (1)$$

$$(S_e)_{Sh} = \frac{(0.1056 * (G_s - 1) * D_{50})^{1.07}}{(n_s)^{6.7}} \quad (2)$$

$$(S_e)_{sch} = 0.000293 \left(\frac{D_{50} * W_c}{Q_f} \right)^{2.72} \quad (3)$$

$$(S_e)_{MPPM} = \frac{0.1058 (n_s / D_{90}^{1/6})^{2.72} D_{50}}{d_f} \quad (4)$$

$$d_f = \left(\frac{q_f * n_s}{\sqrt{S_e}} \right)^{0.6} \quad (5)$$

$$w_b = 2 * h_b * \tan x_b + t_b \quad (6)$$

$$y_g = 0.15 * d_i * \left(\frac{q_f}{q_i} \right)^{0.85} \quad (7)$$

$$\frac{y_s}{H_s} = 3 \left(\frac{y_d}{H_s} \right)^{0.6} SI^{-0.19} \left(1 - e^{-0.25 \frac{L}{H_s}} \right) \quad (8)$$

$$H_s = 1.5 \sqrt[3]{\frac{q_f}{g}} \quad (9)$$

جدول ۱. بارهای وارد بر کف‌بند.

$f_{w\downarrow} = \gamma_w * h_1 * w_b * w_c$	
$f_{w\uparrow} = \gamma_w * \gamma_w * w_c * h_b^1 * \tan(x_b) * (\lambda + s_e * \tan(x_b))$	وزن آب
$f_{w\uparrow} = \gamma_w * \gamma_w * w_c * h_b^1 * \tan(x_b)$	
$f_{w\uparrow} = \gamma_w * \gamma_w * w_c * h_b * \tan(x_b) * s_e * (\lambda * w_b - h_b * \tan(x_b))$	
$f_{s\uparrow} = \gamma_{sat} * \gamma_w * w_c * y_s^1 * \tan(x_b) * (\lambda - s_e * \tan(x_b))$	وزن خاک
$f_{s\downarrow} = \gamma_{sat} * \gamma_w * w_c * h_b^1 * \tan(x_b) * (\lambda + s_e * \tan(x_b))$	
$(f_{ds})_v = \gamma_{sub} * w_c * y_s^1 * (\lambda - s_e * \tan(x_b))^1 * k_p * \sin(\text{atan}(s_e))$	مولفه‌های عمودی قائم
$(f_{us})_v = \gamma_{sub} * w_c * h_b^1 * (\lambda + s_e * \tan(x_b))^1 * k_a * \sin(\text{atan}(s_e))$	فشار جانبی خاک
$f_{bedsill} = \gamma_{satg} * w_c * h_b * (w_b - h_b * \tan(x_b))$	وزن کف‌بند
$f_u = \gamma_w * w_b * w_c * (h_b + y_s + h_1 + y + h_b * s_e * \tan(x_b) - y_s * s_e * \tan(x_b))$	زیرفشار
$f_{dw} = \gamma_w * w_c * (\lambda * (y - y_d - y_s * s_e * \tan(x_b) + h_b) * h_b * (\cos(\text{atan}(s_e))))^1$	
$f_{uw} = \gamma_w * w_c * (\lambda * h_1 + h_b * (\lambda + s_e * \tan(x_b))) * h_b * (\lambda + s_e * \tan(x_b)) * (\cos(\text{atan}(s_e)))^1$	فشار جانبی آب
	افقی
$(f_{ds})_h = \gamma_{sub} * w_c * y_s^1 * (\lambda - s_e * \tan(x_b))^1 * k_p * \cos(\text{atan}(s_e))$	مولفه‌های افقی فشار
$(f_{us})_h = \gamma_{sub} * w_c * h_b^1 * (\lambda + s_e * \tan(x_b))^1 * k_a * \cos(\text{atan}(s_e))$	جانبی خاک
$h_b = \lambda^3 * (y_d + y_l + y_g)$	
$h_1 = (\frac{q_f * n_s}{\sqrt{S_c}})^{0.6}$	
$h_{ds} = y_s = \lambda^3 * (y_g + y_l)$	توضیحات
$\gamma_{sat} = \gamma_s * (\lambda - n) + n * \gamma_w, \gamma_{satg} = \gamma_s * (\lambda - n_g) + n_g * \gamma_w, \gamma_{sub} = (\gamma_s - \gamma_w) * (\lambda - n)$	
$H_s = y + \frac{q_f}{\lambda * g * y^1} - (y_d + y_s * s_e * \tan(x_b)) + h_b * s_e * \tan(x_b), H_s = \lambda^3 * (\frac{q_f}{g})^1$	

به‌دست می‌آید. (γ_{sub}) وزن مخصوص مستغرق خاک، (γ_{satg}) وزن مخصوص اشباع کف‌بند گابیونی که براساس درجه‌ی پوکی گابیون (n_g) و وزن مخصوص جامد خاک محاسبه می‌شود.

$$S_s = \frac{\tan \phi \Sigma f_v}{\Sigma f_h}$$

$$S_r = \frac{\Sigma m_r}{\Sigma m_o}$$

S.T.:

$$S_s \geq 1.3$$

$$S_r \geq 1.3$$

مطابق رابطه‌ی ۱۵، پایداری در مقابل واژگونی (S_r) هنگامی رخ می‌دهد که نسبت مجموع لنگرهای مقاوم (Σm_r) نسبت به پنجه‌ی کف‌بند (o) در شکل ۳، برابر مجموع لنگرهای واژگون‌کننده (Σm_o) نسبت به همان نقطه

نیروی قائم ناشی از وزن خاک در بالادست کف‌بند، $(f_{s\uparrow})$ نیروی قائم ناشی از وزن خاک در پایین‌دست کف‌بند، $(f_{bedsill})$ نیروی قائم ناشی از وزن کف‌بند، (f_u) نیروی زیرفشار، (f_{uw}) فشار جانبی آب در بالادست کف‌بند، (f_{dw}) فشار جانبی آب در پایین‌دست کف‌بند، (f_{us}) فشار جانبی محرک خاک در بالادست کف‌بند، (f_{ds}) فشار جانبی مقاوم خاک در پایین‌دست کف‌بند، (h_1) ارتفاع آب در بالادست کف‌بند، (y) ارتفاع آب در پایین‌دست کف‌بند و (h_{ds}) ارتفاع خاک در پایین‌دست کف‌بند است. در زیرمدل مذکور، مصالح ساخت کف‌بند گابیونی، اشباع و مصالح بستر رودخانه، غیرچسبیده و اشباع فرض شده است.

بارهای وارد بر کف‌بند در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول مذکور، k_p و k_a به ترتیب ضرایب فشار جانبی مقاوم و محرک خاک هستند که با توجه به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و از جدول‌های مرتبط و با صرف‌نظر از چسبندگی خاک به‌دست می‌آیند.^[۱۰] (γ_w) وزن مخصوص آب، (γ_{sat}) وزن مخصوص اشباع خاک که براساس درجه‌ی پوکی خاک (n) و وزن مخصوص جامد خاک (γ_s)

دسته از مسائل بهینه‌سازی چندهدفه در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. از جمله معروف‌ترین و موفق‌ترین آن‌ها می‌توان روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر بهینه‌سازی پارتو^۸ را نام برد. در روش‌های مذکور یک مفهوم اساسی سبب شده است تا الگوریتم بتواند به پاسخ بهینه دست پیدا کند که مفهوم چیره‌بودن است و به این صورت بیان می‌شود: جواب x بر جواب y غالب است، هرگاه جواب x از دید هیچ‌یک از توابع هدف از جواب y بدتر نباشد و جواب x دست‌کم در یکی از توابع هدف از جواب y بهتر باشد.^[۲۳] در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از مفهوم پارتو و ضرایب وزنی که به توابع هدف اختصاص می‌یابد، دو تابع هدف به یک تابع هدف تبدیل شده‌اند و با تغییر ضرایب وزنی و حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، مجموعه جواب پارتو به‌دست آمده است.

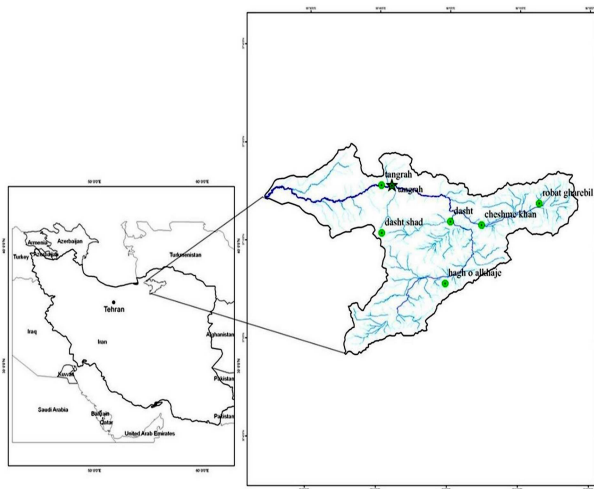
۳. کاربرد مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج

۱.۳. معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

رودخانه‌ی دوغ یا مادرسو از شاخه‌های رودخانه گرگان‌رود است که مطابق شکل ۴ از شمال مرکز شهرستان مینودشت (شرق شهر کلالة) جریان دارد و از کوه فلور با ارتفاع ۱۶۳۲ متر واقع در ۲۰ کیلومتری شرق شهرستان مینودشت سرچشمه می‌گیرد و در نهایت به رودخانه‌ی گرگان‌رود می‌ریزد. طول رودخانه ۵۰ کیلومتر، شیب بستر کوهستانی آن ۰.۲٪، شیب بستر جلگه‌یی ۰.۰۶٪ و شیب متوسط بستر آن ۰.۱٪ است. ایستگاه هیدرومتری رودخانه‌ی دوغ در تنگراه از نوع تکمیلی است و از سال ۱۳۴۵ آماربرداری می‌کند. همچنین مختصات جغرافیایی ایستگاه مذکور عبارت از: طول ۴۴°۵۵، عرض ۲۷°۳۷، ارتفاع ۳۳۰ متر و مساحت ۱۷۹۱ کیلومترمربع است.^[۲۴] در پژوهش حاضر جهت واسنجی، مدل بازه‌یی به طول ۸۶۶ متر انتخاب شده است. لازم به ذکر است که کف‌بندهای احداث‌شده در بازه‌ی مذکور، گابیونی است.

۲.۳. واسنجی مدل

واسنجی مدل بهینه‌سازی کف‌بند با استفاده از اطلاعات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی موجود در جدول ۲، انجام شد. جبهه‌ی پارتو یا به عبارت دیگر مجموعه جواب‌های



شکل ۴. موقعیت حوضه‌ی آبریز گرگان‌رود و رودخانه‌ی دوغ در آن.

باشد. همچنین پایداری در برابر لغزش (S_s) هنگامی رخ می‌دهد که نسبت مجموع نیروهای قائم (Σf_v) تا تازنانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک به مجموع نیروهای افقی (Σf_h) بزرگ‌تر از $1/3$ باشد.^[۲۱]

۳.۲. مدل بهینه‌سازی

یکی از اهداف مطلوب در طراحی سازه‌ها، کمیته‌سازی هزینه‌ی احداث سازه است. در پژوهش حاضر، تابع هزینه با استفاده از ضوابط هیدرولیکی، که در بخش ۱.۲ به آن اشاره شد، و با ثابت فرض‌کردن ابعاد کف‌بند در طول آن ($W_b = t_b, x_b = 0$) و با در نظر گرفتن فاصله بین کف‌بندها به‌عنوان متغیر طراحی در قالب رابطه‌ی ۱۷ تعریف می‌شود:

$$Cost(x) = \sum_{i=1}^n n(UPRC)_b(V_i + m_1 V_i' + m_2 V_i'') \quad (17)$$

که در آن، $(UPRC)_b$ هزینه‌ی واحد حجم سازه، V_i ، V_i' ، V_i'' به ترتیب حجم‌های سازه، خاک‌برداری و خاک‌ریزی و m_1 و m_2 ضرایب تبدیل هزینه‌ی خاک‌برداری و خاک‌ریزی به هزینه‌ی احداث سازه هستند.^[۲۲] علاوه بر کمیته‌سازی هزینه، بیشینه ساختن پایداری سازه تحت بارهای وارد بر آن نیز هدف دیگر طراحی است. به‌طوری که با تأمین هدف ذکرشده، هزینه‌های احتمالی ناشی از خرابی سازه به میزان کمیته می‌رسد. در پژوهش حاضر، تابع پایداری از تحلیل بارهای وارد بر کف‌بند که در بخش (۲.۲) محاسبه شد و با فرض کافی‌بودن ظرفیت باربری خاک مطابق رابطه‌ی ۱۸ به‌دست می‌آید:

$$Stability(x) = \frac{\tan \phi \Sigma f_v}{\Sigma f_h} + \frac{\Sigma m_r}{\Sigma m_o} \quad (18)$$

لازم به ذکر است که در سازه‌های کنترل شیب، فاصله‌ی بین سازه‌ها و عرض سازه بیشترین اثر را در دیگر پارامترهای طراحی، نظیر: عمق آب‌شستگی، تعداد سازه‌ها، پایداری سازه در برابر واژگونی و لغزش و هزینه‌ی سازه دارند. از این رو در مطالعه‌ی حاضر، دو پارامتر عرض سازه و فاصله‌ی بین سازه‌ها به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند.

۱.۳.۲. تابع هدف

مدل بهینه‌سازی کف‌بند، مقادیر بهینه‌ی متغیرهای طراحی را جست‌وجو می‌کند، به گونه‌یی که بهترین خروجی را با توجه به اهداف خواسته‌شده (کمیته‌سازی هزینه‌ی احداث و بیشینه‌سازی پایداری کف‌بند) و قیدهای مسئله دارد. بنابراین با کنار هم قرار گرفتن دو تابع به‌دست آمده از بخش ۳.۲، تابع هدف بهینه‌سازی مطابق رابطه‌ی ۱۹ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Minimize : } & \frac{W_\alpha * \sum_{i=1}^n n(UPRC)_b(m_1 V_i + m_2 V_i' + m_2 V_i'')}{Cost_{max}} \\ & + W_\beta * \left(1 / \left(\frac{\tan \phi \Sigma f_v}{\Sigma f_h} + \frac{\Sigma m_r}{\Sigma m_o} \right) \right) \end{aligned}$$

S.T. :

$$\begin{aligned} S_s & \geq 1/3, S_r \geq 1/3, y_d \leq y_t, L - W_b \geq 15 * H_s, \\ 0.07 & \leq \frac{y_d}{H_s} \leq 1.87 \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن، W_β و W_α ضرایب وزنی اختصاص‌یافته به توابع هدف هستند و مجموع‌شان برابر ۱ است. در چند سال اخیر، الگوریتم‌های مختلفی برای حل این

۱.۲.۳. بررسی اثر فاصله بین کف‌بندها در پایداری و هزینه‌ی احداث آن‌ها
فاصله‌ی بهینه بین سازه‌ها در مدل با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ در حالتی که m برابر ۱ است، به‌دست آمده است:

$$m \times L - W_b \geq 15 \times H_s \quad (20)$$

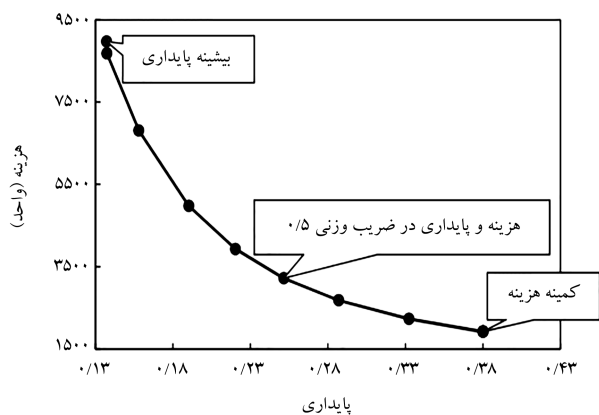
چنانچه ضریب m ضریب فاصله از ۰٫۵ (بیشینه‌ی هزینه در ضریب وزنی ۰٫۵ تا ۲٫۵ (کمینه‌ی هزینه در ضریب وزنی ۰٫۵) به مدل داده شود، ابعاد بهینه‌ی سازه مطابق جدول ۵ حاصل می‌شود. مطابق شکل ۶، با کاهش ضریب m از ۱ تا ۰٫۵، اگر چه تعداد سازه‌ها کاهش می‌یابد، اما به دلیل افزایش ارتفاع سازه، هزینه‌ی احداث آن افزایش و پایداری سازه کاهش می‌یابد و در نتیجه طرح غیراقتصادی می‌شود. از طرفی با افزایش ضریب m از ۱ تا ۲٫۵، فاصله‌ی بین سازه‌ها کاهش می‌یابد و با توجه به کاهش ارتفاع سازه، از عمق آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست آن کاسته می‌شود. بنابراین پایداری سازه افزایش و هزینه‌ی احداث آن کاهش می‌یابد. در این حالت نیز شرایط مطلوب حاصل نمی‌شود، زیرا شرایط تعادلی آب‌شستگی موضعی در فاصله‌ی ۱۵ برابر انرژی مخصوص بحرانی است، رخ می‌دهد و

نامغلوب مدل بهینه‌سازی با تغییر ارزش وزنی (۰ تا ۱) هر یک از توابع هدف مطابق جدول ۳ به‌دست آمد.

با رسم مقادیر دو تابع هدف (کمینه‌ی هزینه و بیشینه‌ی پایداری) در مقابل هم مجموعه جواب‌های نامغلوب (پارتو) به شکل نمودار ۵ خواهد بود. پاسخ‌های بهینه به ازاء ضرایب وزنی ۰، ۱، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ در شکل ۵ نشان داده شده است که مطابق آن، هنگامی که هدف از طراحی احداث سازه با کمینه‌ی هزینه باشد، ضریب وزنی ۰ برای تابع پایداری منظور می‌شود و با اعمال ضریب وزنی ۱ در تابع پایداری، هدف احداث سازه با بیشینه‌ی پایداری محقق می‌شود. در ضرایب وزنی ۰ تا ۱ و با توجه به ضریب وزنی اختصاص‌یافته به توابع هدف، هزینه و پایداری سازه به‌دست می‌آید. ابعاد کف‌بندهای رودخانه دوغ و نتایج طراحی آن‌ها در اجرا در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه‌ی جدول‌های ۳ و ۴ گویای آن است که با در نظر گرفتن دو تابع هدف (کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی دو تابع هدف)، علاوه بر دست‌یابی به گزینه‌های مختلف طراحی، کف‌بندهای با هزینه‌ی کمتر و پایداری بیشتر به‌دست خواهد آمد.

جدول ۲. اطلاعات موردنیاز جهت واسنجی مدل.

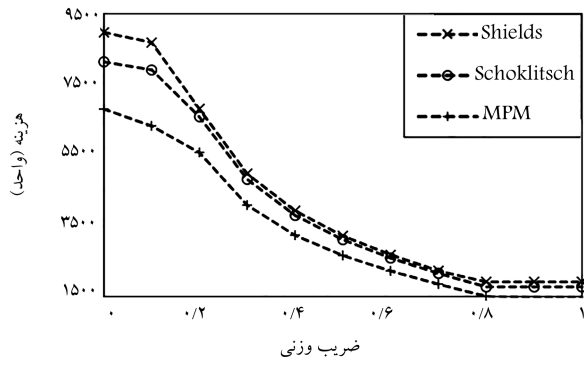
اطلاعات ژئوتکنیکی رودخانه‌ی دوغ		اطلاعات هیدرولیکی رودخانه‌ی دوغ	
$L_p (km)$	۸۶۶	n_g	۰٫۳
$W_c (m)$	۷۰	$\gamma_{sat} (kg/m^3)$	۲۱۳۳
S_0	۰٫۰۱۱۷	$\gamma_{satg} (kg/m^3)$	۲۱۵۵
$Q_{100} (m^3/s)$	۶۱۳	$\gamma_s (kg/m^3)$	۲۶۵۰
$D_{50} (mm)$	۱۸	$\gamma_w (kg/m^3)$	۱۰۰۰
$D_{84} (mm)$	۳۸	$\gamma_{sub} (kg/m^3)$	۱۱۳۳
$D_{16} (mm)$	۹	ϕ°	۴۰
n	۰٫۱۹۵	n_s	۰٫۰۳۵



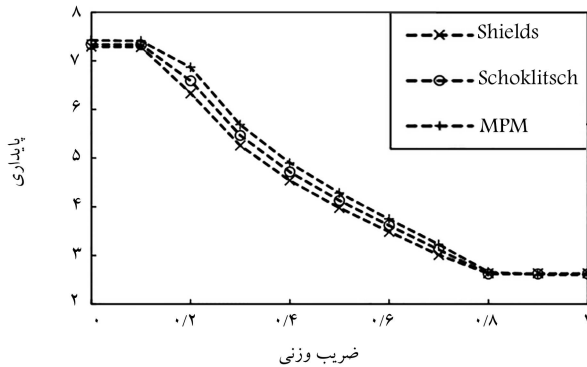
شکل ۵. منحنی پارتوی حاصل از مدل برای رودخانه‌ی دوغ.

جدول ۳. نتایج حاصل از واسنجی مدل.

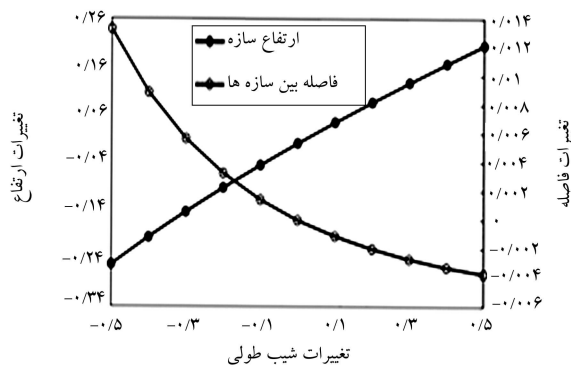
$Cost(unit)$	$Stability$	$L(m)$	$W_b(m)$	$h_b(m)$	$y_s(m)$	$y_d(m)$	w_α
۸۹۷۲٫۹۹۱	۷٫۲۹۰	۵۹٫۱۲۶	۲۱	۴٫۹۱۲	۲٫۸۶۸	۰٫۶۷	۰
۸۶۸۳٫۲۷۱	۷٫۲۸۳	۵۶٫۹۶۹	۲۰٫۷۳۸	۴٫۸۱۴	۲٫۷۹۳	۰٫۶۴۵	۰٫۱
۶۸۱۰٫۴۹۲	۶٫۳۳۱	۵۲٫۹۵۰	۱۶٫۷۱۹	۴٫۶۵۸	۲٫۶۷۳	۰٫۶۰۰	۰٫۲
۴۹۷۷٫۵۲۴	۵٫۲۵۹	۴۸٫۷۸۹	۱۲٫۵۵۸	۴٫۴۹۱	۲٫۵۴۵	۰٫۵۵۲	۰٫۳
۳۹۲۷٫۰۴۵	۴٫۵۳۹	۴۶٫۲۸۰	۱۰٫۰۴۹	۴٫۳۸۸	۲٫۴۶۵	۰٫۵۲۴	۰٫۴
۳۲۱۸٫۳۲۶	۳٫۹۷۷	۴۴٫۵۲۸	۸٫۲۹۷	۴٫۳۱۵	۲٫۴۰۹	۰٫۵۰۴	۰٫۵
۲۶۸۱٫۱۱۰	۳٫۴۸۶	۴۳٫۱۶۴	۶٫۹۳۳	۴٫۲۵۷	۲٫۳۶۴	۰٫۴۸۹	۰٫۶
۲۲۳۰٫۶۷۳	۳٫۰۰۹	۴۱٫۹۹۳	۵٫۷۶۲	۴٫۲۰۶	۲٫۳۲۶	۰٫۴۷۶	۰٫۷
۱۹۱۷٫۹۷۹	۲٫۶۳۱	۴۱٫۱۶۶	۴٫۹۳۵	۴٫۱۷۱	۲٫۲۹۸	۰٫۴۶۶	۰٫۸
۱۹۱۷٫۹۷۹	۲٫۶۳۱	۴۱٫۱۶۶	۴٫۹۳۵	۴٫۱۷۱	۲٫۲۹۸	۰٫۴۶۶	۰٫۹
۱۹۱۷٫۹۷۹	۲٫۶۳۱	۴۱٫۱۶۶	۴٫۹۳۵	۴٫۱۷۱	۲٫۲۹۸	۰٫۴۶۶	۱



شکل ۷. اثر شیب تعادلی در هزینه‌ی احداث کف‌بند.



شکل ۸. اثر شیب تعادلی در پایداری کف‌بند.



شکل ۹. تغییر فاصله و ارتفاع کف‌بند با تغییر شیب طولی.

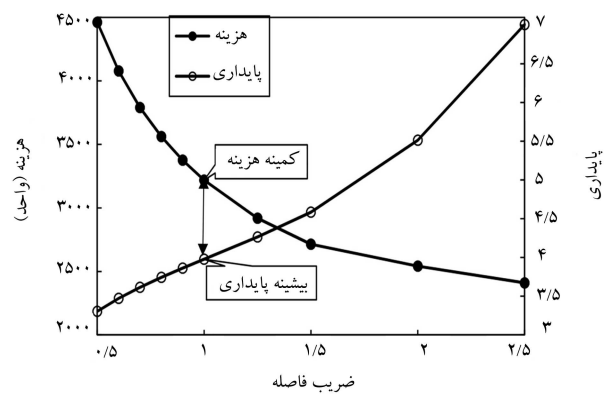
و سازه‌های با ارتفاع کمتر نیاز است؛ بنابراین احداث سازه با کاهش هزینه و افزایش پایداری همراه خواهد بود.

۳.۳. حساسیت‌سنجی مدل

هدف از بخش کنونی را می‌توان تأثیر متغیرهای مستقل در برآورد هزینه‌ی احداث و پایداری سازه عنوان کرد. حساسیت‌سنجی با تغییر شیب طولی و دبی تا ۵٪ و در ضریب وزنی ۰٫۷۵ انجام شده است.

۱.۳.۳. شیب طولی

تغییر فاصله بین کف‌بندها و ارتفاع آن‌ها با تغییر شیب طولی و به ازاء شیب تعادلی ثابت در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق نتایج مدل، افزایش شیب باعث افزایش حجم رسوبات فرسایش‌یافته برای رسیدن به شیب تعادلی می‌شود. از این



شکل ۶. اثر فاصله بین کف‌بندها در پایداری و هزینه‌ی احداث آن‌ها.

جدول ۴. ابعاد کف‌بند در اجرا و نتایج طراحی سازه در اجرا.

$W_b(m)$	$y_d(m)$	$y_l(m)$	$L(m)$
۸	۲	۵٫۵۶	۱۷۳

$Stability = ۲٫۶۵, Cost(unit) = ۶۳۰۰$

جدول ۵. تغییرات ابعاد بهینه‌ی سازه با تغییرات ضریب m .

m	$y_d(m)$	$W_b(m)$	$L(m)$
۰٫۵	۱٫۰۰۳	۸٫۰۷۵	۸۸٫۶۱۱
۰٫۶	۰٫۸۳۷	۸٫۰۹۸	۷۳٫۸۸۲
۰٫۷	۰٫۷۱۸	۸٫۱۳۳	۶۳٫۳۷۶
۰٫۸	۰٫۶۲۹	۸٫۱۷۶	۵۵٫۵۰۹
۰٫۹	۰٫۵۵۹	۸٫۲۳۰	۴۹٫۴۰۱
۱	۰٫۵۰۴	۸٫۲۹۷	۴۴٫۵۲۸
۱٫۲۵	۰٫۴۰۶	۸٫۵۳۴	۳۵٫۸۱۲
۱٫۵	۰٫۳۴۱	۸٫۹۰۳	۳۰٫۰۸۹
۲	۰٫۲۶۴	۱۰٫۴۰۲	۲۳٫۳۱۷
۲٫۵	۰٫۲۲۲	۱۲٫۷۶۸	۱۹٫۶۰۰

در فاصله‌ی کمتر از فاصله‌ی ذکرشده، شرایط تعادلی یادشده ایجاد نمی‌شود و سازه قبل از رسیدن به بیشینه‌ی عمق آب‌سستگی موضعی در پایین‌دست واژگون می‌شود. بنابراین با کاهش فاصله بین سازه‌ها، در واقع پایداری کوتاه‌مدت برای سازه ایجاد می‌شود و سازه در درازمدت در برابر لغزش و واژگونی، ایمن نیست.

۲.۲.۳. بررسی اثر شیب تعادلی بستر رودخانه در پایداری و هزینه‌ی احداث کف‌بندها

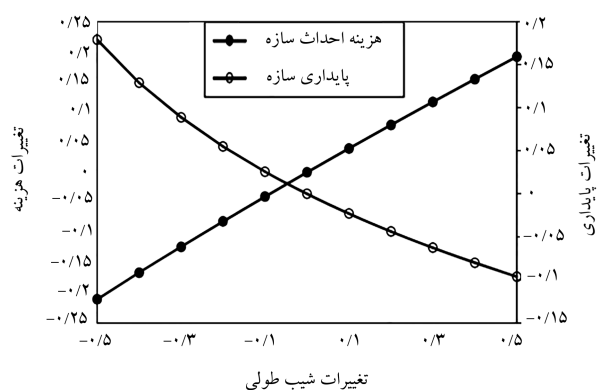
شیب تعادلی بستر رودخانه با استفاده از رابطه‌ی Shields Meyer-peter, Muller و Schoklitsch^[۱۷] به ترتیب ۰٫۰۰۰۴، ۰٫۰۰۰۶ و ۰٫۰۰۱۸ به دست آمد. نتایج هزینه‌ی احداث و پایداری سازه با اعمال ضرایب وزنی ۰ تا ۱ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مطابق پیش‌بینی مدل، کاهش هزینه‌ی احداث سازه و افزایش پایداری آن با افزایش شیب تعادلی و با استفاده از رابطه‌ی Meyer-peter, Muller امکان‌پذیر است. نتایج فوق مبین آن است که در رودخانه‌های نزدیک به شرایط پایدار (شرایط بدون فرسایش و رسوب‌گذاری)، عمق فرسایش برای رسیدن به شیب تعادلی به سبب اختلاف ناچیز شیب یادشده با شیب متوسط بستر کاهش می‌یابد

در حالت کلی نتایج این قسمت حاکی از آن است که از بین دو متغیر مستقل دبی و شیب طولی، دبی به دلیل تأثیرگذاری در دیگر پارامترهای طراحی، از قبیل انرژی مخصوص و شیب تعادلی، بیشترین اثر را در پایداری و هزینه‌ی کف‌بند دارد. همچنین ارتفاع کف‌بند نسبت به فاصله‌ی بین کف‌بندها به نسبت بیشتری به دبی وابسته است.

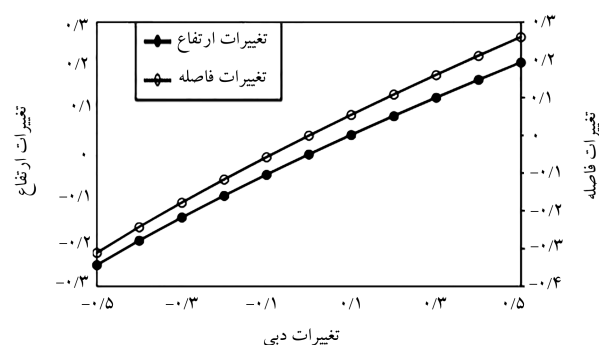
۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل بهینه‌سازی یکی از سازه‌های کنترل شیب (کف‌بند) مطالعه شد. در این راستا، دو زیرمدل هیدرولیکی و سازه‌ی مطرح شد. در زیرمدل هیدرولیکی، ابعاد کف‌بند، شامل: تعداد، ارتفاع و فاصله به دست آمد. همچنین به منظور پایداری سازه در برابر آب‌شستگی، انواع آب‌شستگی‌های محتمل در پنجه بررسی شد (در پژوهش حاضر، آب‌شستگی‌های فوق شامل آب‌شستگی موضعی و عمومی در پنجه‌ی کف‌بند بودند) و در نهایت در زیرمدل مذکور، هزینه‌ی ساخت کف‌بند به دست آمد. از آنجایی‌که احداث سازه‌های کنترل شیب (کف‌بند در پژوهش حاضر) در بستر رودخانه سبب پایداری آبراه می‌شود، به طوری که رودخانه پس از رسیدن به شیب تعادلی ایجاد شده توسط سازه‌ی کنترل شیب به پایداری می‌رسد و فرسایش و رسوب‌گذاری در آن رخ نمی‌دهد، لزوم طراحی سازه‌ی علاوه بر هیدرولیکی به منظور پایداری سازه‌ی احداث شده مشخص می‌شود. در زیرمدل سازه‌ی، کلیه‌ی بارهای وارد بر کف‌بند محاسبه شد که شامل بارهای افقی و قائم بودند. پس از محاسبه‌ی بارها، تحلیل پایداری سازه در برابر لغزش و واژگونی بررسی شد و در آخر در مدل بهینه، سازه‌ی که کمترین هزینه و بیشترین پایداری را دارد، به دست آمد. مدل مذکور شامل دو تابع هدف بود که با ضرایب وزنی به یک تابع تک‌هدفه تبدیل شد و با اعمال قیدهای هیدرولیکی و سازه‌ی با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل شد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل بهینه‌سازی، سازه‌های کنترل شیب و کف‌بندهای رودخانه دوغ نشان می‌دهد که مدل فوق قادر است ابعاد بهینه‌ی سازه را با اعمال ضرایب وزنی و با توجه به اولویت‌های اقتصادی (هزینه) و طراحی (پایداری سازه‌ی احداث شده) در اختیار طراح قرار دهد (جدول ۳).

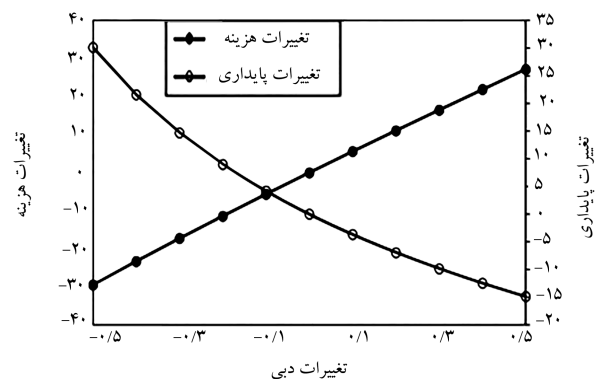
بررسی تأثیر فاصله‌ی بین کف‌بندها در هزینه و پایداری آن‌ها نشان داد که با کاهش فاصله بین کف‌بندها و ثابت ماندن دیگر پارامترهای طراحی، اگرچه پایداری افزایش و هزینه‌ی احداث کاهش می‌یابد، اما در درازمدت، سازه در برابر لغزش و واژگونی ایمن نیست. از این رو اهمیت انتخاب فاصله‌ی بهینه بین کف‌بندها به سبب پایداری کف‌بند در برابر لغزش و واژگونی و آب‌شستگی موضعی و نیز هزینه‌ی احداث است. در پژوهش حاضر، فاصله‌ی بهینه براساس پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی موضعی و عرض سازه که از آنالیز پایداری حاصل می‌شود، به دست آمده است. شیب تعادلی یکی از عوامل مهم در ابعاد بهینه‌ی کف‌بند است که با افزایش آن، هزینه‌ی احداث کف‌بند کاهش و پایداری آن افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت در بخش شیب طولی می‌تواند مصداق رودخانه‌های کوهستانی باشد. در رودخانه‌های کوهستانی که به دلیل شیب بالا، احداث سازه با هزینه‌ی بیشتر و پایداری کمتر همراه خواهد بود، می‌توان با انتخاب روابطی که شیب تعادلی را بیشتر تخمین می‌زنند، نظیر روابط Schoklitsch و Meyer-peter, Muller هزینه‌ی احداث سازه را کاهش و پایداری آن را افزایش داد. از مدل ارائه شده در پژوهش حاضر می‌توان برای پیش‌بینی ابعاد بهینه‌ی سازه‌های کنترل شیب با عملکرد کنترل‌کننده‌ی بستر مانند کف‌بندها بهره جست.



شکل ۱۰. تغییر هزینه و پایداری کف‌بند با تغییر شیب طولی.



شکل ۱۱. تغییر فاصله و ارتفاع کف‌بند با تغییر دبی.



شکل ۱۲. تغییر هزینه و پایداری کف‌بند با تغییر دبی.

رو ارتفاع کف‌بند افزایش می‌یابد و برای برقراری شرایط پایدار در کف‌بند، فاصله‌ی بین کف‌بندها و به دنبال آن عرض کف‌بند کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۱۰، افزایش شیب طولی باعث کاهش پایداری کف‌بند و افزایش هزینه‌ی احداث آن می‌شود.

۲.۳.۳. دبی

نتایج اثر دبی در فاصله‌ی بین کف‌بندها و ارتفاع آن‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مطابق پیش‌بینی مدل، افزایش دبی با افزایش فاصله و ارتفاع همراه خواهد بود. افزایش ارتفاع و فاصله‌ی کف‌بندها به دلیل افزایش انرژی مخصوص و در نتیجه افزایش عمق آب‌شستگی در پایین دست کف‌بند است. از طرفی از آنجا که افزایش دبی باعث کاهش شیب تعادلی می‌شود، هزینه‌ی احداث کف‌بندها مطابق شکل ۱۲ افزایش و پایداری آن‌ها کاهش می‌یابد.

پانویسها

1. nickpoint
2. meander
3. bed sills
4. grade control structures
5. LINGO
6. Neil
7. tregnaghi
8. Pareto

منابع (References)

1. Combs, P. "Siting, monitoring, and maintenance for the design of grade control structures", ASCE, Grade Control Task Committee, Reston, pp. 52 (1998).
2. Williams, T. "Predicting bed scour for toe protection design in bank stabilization projects", Flood Control District of Maricopa County phoenix, Arizona, pp. 40-53 (2003).
3. Thomas, J.T., Culler, M.E., Dermisis, D.C., Pierce, A.N. and Stewart, T.W. "Effects of grade control structures on fish passage, biological assemblages and hydraulic environments in Western Iowa streams", *Journal of River Research and Applications*, **29**(3), pp. 389-398 (2011).
4. Ostadi, F, Majdzadeh Tabatabai, M.R., and Alimohammadi, S., "Optimization modeling of groynes dimensions and its interaction on river stability", *Journal of Hydraulic*, **9**(4), pp. 57 (2014).
5. Carriaga, C.C. and Mays, L.W. "Optimization approach to stable channel design", ASCE, 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Arizona, pp. 5-9 (1999).
6. Zahiri, A. and Ghorbani, K.H. "Prediction of maximum scour depth downstream of bed sills using support vector machines", *Journal of Water and Soil Conservation*, **20**(6), pp. 107-125 (2012).
7. Tregnaghi, M., Marion, A., Coleman, A. and Tait, S. "Effect of flood recession on scouring at bed sills", *Journal of Hydraulic Engineering*, **136**(4), pp. 204-213 (2010).
8. Tregnaghi, M. "Local scouring at bed sills under steady and unsteady conditions", Ph.D. Thesis, University of Padova (In English) (2008).
9. Lenzi, M.A., Marion, A. and Comiti, F. "Interference processes on scouring at bed sills", *Journal of Earth Surface Process and Landforms*, **28**(1), pp. 99-110 (2003).
10. Gaudio, R., Marion, A. and Bovolín, V. "Morphological effects of bed sills in degrading rivers", *Journal of Hydraulic Research*, **38**(2), pp. 89-96 (2000).
11. Nabavi, M. "Effect of upward spill on scouring at the grade control structures", Ph.D. Thesis, Faculty of Water Science Engineering of Shahid Chamran University of Ahvaz (In Persian) (2010).
12. Arvandi, S. and Ghaderi, F. "Grade control and stabilization bed of rivers for the watershed restoration", 7th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering, Esfahan, pp. 3-8 (2011).
13. Banihabib, M. and Piri ardakani, M. "Determination the optimal distance of check dams, Case Study: Check dams of shirkooch slopes", 6th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering and Seminar on erosion and sediment, pp. 2-4 (2010).
14. Shields, F.D., Hoover, J.J., Nunnally, N.R. and Schaefer, T.E. "Hydraulic and environmental effects of channel stabilization, twentymile creek, mississippi", U.S. Army Engineer District, Alabama, pp. 3 (1990).
15. Cooper, C.M. and Knight, S.S. "Fisheries in man made pools below grade control structures and in naturally occurring scour holes of unstable streams", *Journal of Soil and Water Conservation*, **42**(5), pp. 370-373 (1987).
16. Jackson, B.J. "Stream bed stabilization in enfield creek New York", *Journal of New York Fish and Game*, **21**(1), pp. 32-46 (1974).
17. Pemberton, E.L. and Lara, J.M. "Computing degradation and local scour", Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Colorado, 48 p. (1984).
18. Neill, C.R. "Guide to bridge hydraulics", Roads and Transportation Association of Canada, Thomas Telford Ltd., 80 p. (1973).
19. Mussetter, B. and et al. "Drainage design manual for Maricopa County, Arizona", NBS Lowry Engineers & Planners and McLaughlin Water Engineers, Arizona, Ltd., 628 p. (2013).
20. Das, B.M. *Principles of Foundation Engineering*, 2nd ed., PWS-KENT Publishing Company, Boston, 368 p. (1990).
21. Chamran, J., Kastov, L., Minetti, L., Stoutesdijk, J., and Tricoli, D., "Small dams and weirs in earth and gabion materials", Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 78-82 (2001).
22. Mostafavi, G.H. "Unit price list for irrigation and drainage", Management and Planning Organization of Iran, Tehran, pp. 24-31 (2015).
23. Nagafzadeh, H. and Zahiri, S.H. "Multi-objective optimization algorithm central force", *Journal of Soft Computing and Information Technology*, **2**(1), pp. 10-11 (2012).
24. Dehghani, A., Zanganeh, M., Mosaedi, A., Kouhestani, N. "Estimation of suspended sediment by the sediment rating curve and artificial neural network, Case Study: Dough river", *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, **16**(1), pp. 266-276 (2010).