

روش تحلیل ریسک برای محاسبه ارتفاع دیوارهای سیل بند

حمید سنگین‌آبادی^{۱*}، جلال عطاری^۲

۱- دانش‌آموخته مهندسی عمران- رودخانه، دانشگاه صنعت آب و برق

۲- استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق

* تهران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹

hsanginabadi@yahoo.com

چکیده- یکی از روش‌های سازه‌ای مهار سیلاب، احداث دیوارهای سیل بند در کناره‌های رودخانه است. در روش سنتی طراحی، ارتفاع دیوار سیل بند به‌ازای یک دبی با دوره بازگشت معین محاسبه شده و از عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه سیل طراحی، ظرفیت هیدرولیکی رودخانه و تحلیل‌های اقتصادی صرف نظر می‌شود، اما در روش تحلیل ریسک، اثر این عدم قطعیت‌ها نیز در فرایند طراحی اعمال می‌شود. در مقاله حاضر، در وهله اول جزئیات این روش تبیین شده و سپس به‌عنوان مطالعه موردی، ارتفاع دیوارهای سیل بند رودخانه قشلاق با استفاده از روش تحلیل ریسک محاسبه می‌شود. برای این منظور، پارامترهای تابع بارگذاری با برآزش توزیع‌های آماری بر دبی‌های حداکثر سالیانه و پارامترهای تابع مقاومت دیوار، با در نظر گرفتن عدم قطعیت ضریب مانینگ، شیب خط انرژی و خصوصیات هندسی مقطع محاسبه شده است. علاوه بر این در تحلیل اقتصادی، اثر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طراحی دیوارهای سیل بند رودخانه قشلاق، نتیجه استفاده از روش سنتی دست پایین بوده و در مقایسه با روش طراحی مبتنی بر ریسک، از اطمینان کمتری برخوردار است. در مجموع و با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی، کاربرد روش تحلیل ریسک برای طراحی دیوارهای سیل بند توصیه می‌شود.

کلید واژگان: مهندسی رودخانه، دیوار سیل بند، عدم قطعیت، تحلیل ریسک.

۱- مقدمه

یکی از رایج‌ترین روش‌های سازه‌ای مهار سیلاب، ساخت گوره‌ها و دیوارهای سیل بند است که علاوه بر جلوگیری از هجوم امواج ناشی از سیلاب به مناطق اطراف رودخانه، از فرسایش کناره‌های رودخانه نیز جلوگیری می‌کند (دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آفا، ۱۳۸۹).

تعیین ارتفاع دیوارهای سیل بند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا طراحی دست پایین دیوار (با ارتفاع کم)، ریسک تخریب سازه را بر اثر روگذری جریان سیلاب افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، ارتفاع زیاد دیوار، علاوه بر غیر اقتصادی کردن طرح، مشکلاتی را مانند سختی تأمین پایداری و حفاظت دیواره‌ها و سخت شدن

Mays (1979) گروه‌ها را بر مبنای تحلیل ریسک طراحی کرده و Lee و Mays در سال ۱۹۸۶ عدم قطعیت هیدرولیکی سیل‌بندها را بررسی کردند. روش طراحی دیوار سیل‌بند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها توسط Plate (2001) بررسی شد. همچنین طراحی بر اساس تحلیل ریسک برای سیستم‌های مختلف کنترل سیل توسط Merz در سال ۲۰۰۶ و Faber در همین سال انجام شد (Faber, 2006).

در ایران نیز تحقیقاتی در خصوص طراحی دیوار سیل‌بند با استفاده از رویکرد احتمالاتی انجام شده است. برای مثال، خاکباز (۱۳۸۰) تاثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (عامل‌های باد و سیلاب) را در بررسی عدم قطعیت پروفیل سطح آب مطالعه کرده است. همچنین افتخاریان (۱۳۸۲) در زمینه قابلیت اعتماد سیل‌بندها با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تحقیق کرده است. نتایج محاسبات وی نشان داده است که صرف‌نظر کردن از عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، ارتفاع دیوار سیل‌بند را دست پایین برآورد کرده و ریسک تخریب این سازه را افزایش می‌دهد.

سنگین‌آبادی و همکاران (۱۳۸۴) تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی را بر پروفیل سطح آب و قابلیت اعتماد دیوارهای سیل‌بند مطالعه کرده‌اند. در آن مقاله، هرچند روش‌های سنتی و امروزی تحلیل ریسک برای تعیین ارتفاع دیوار به طور مختصر مقایسه شدند، اما پارامترهای اقتصادی و تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و اقتصادی بر محاسبه خسارات سیلاب و انتخاب گزینه برتر برای دیوار سیل‌بند ارائه نشده است.

سرابندی (۱۳۸۷)، به‌منظور تعیین ابعاد بهینه سیستم کنترل سیلاب (سد-گوره) در رودخانه خشک معالی آباد (تنگ سرخ) شیراز از نرم‌افزار LINGO استفاده کرد. فدایی و

دسترسی به رودخانه در پی خواهد داشت (Plate, 2001). اصولاً در مهندسی آب، عدم قطعیت‌های موجود به چهار دسته: هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، سازه‌ای و اقتصادی تقسیم می‌شوند. در تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند، عدم قطعیت‌ها بیشتر از نوع هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است. عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی به سه دسته عدم قطعیت‌های ذاتی، مدل و پارامتری تقسیم می‌شوند (Mays, 2001).

عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، شامل عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی ظرفیت مقطع رودخانه (تابع مقاومت) است و از دو منبع اساسی مدل و پارامتری ناشی می‌شوند (Mays, 2001).

عدم قطعیت‌های سازه‌ای به ضعف سازه مربوط بوده و می‌تواند ناشی از عواملی مانند فرسایش، امواج و نیروی باد، بارگذاری شدید هیدرولیکی، لغزش سازه‌ای، واژگونی پی و مانند آن باشد (USACE, 1996).

عدم قطعیت‌های اقتصادی، شامل عدم قطعیت‌های ارزیابی هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری، نگهداری، تورم اقتصادی و مانند آن می‌باشد. هزینه ساخت دیوار سیل‌بند، به دلیل تقریب در تخمین ارزش اجزای سازه‌ای، هزینه‌های خاکبرداری، تورم اقتصادی و مانند آن، همواره با عدم قطعیت محاسبه می‌شود. همچنین محاسبه هزینه‌های ناشی از خسارت سیلاب در مناطق ساحلی، به دلیل برآورد تقریبی مواردی چون خسارت وارد شده به محصولات کشاورزی، تعداد ساختمان‌ها و غیره همواره با تقریب و عدم قطعیت توأم است. نرخ بهره و نرخ تورم نیز جزو پارامترهایی هستند که در تخمین آنها، عدم قطعیت وجود دارد (USACE, 1996).

محققان مختلفی استفاده از روش طراحی احتمالاتی را در مهندسی رودخانه بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال

مقاومت به شکل متغیرهایی تصادفی تعریف شده و بدین ترتیب عدم قطعیت‌ها در طراحی اعمال می‌شود.

- سطح سه: در این روش نیز طراحی بر اساس احتمال شکست انجام می‌شود، اما برای محاسبه آن از ترکیب توأم توابع چگالی احتمال بارگذاری و مقاومت با استفاده از انتگرال‌گیری بر روی بازه شکست سازه استفاده می‌شود.

- سطح چهار: در این روش که طراحی مبتنی بر تحلیل ریسک^۲ است، پس از محاسبه احتمال شکست سطوح دو و سه، قابلیت اعتماد مورد نیاز یا احتمال شکست مورد قبول با استفاده از یک تابع تصمیم‌گیری - که معمولاً از تحلیل‌های اقتصادی به دست می‌آید، محاسبه می‌شود.

تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند با استفاده از تحلیل ریسک، مستلزم محاسبه توابع چگالی احتمال بارگذاری و مقاومت دیوار سیل‌بند، تحلیل اقتصادی دیوارهایی با ارتفاع مختلف و انتخاب گزینه برتر است که در ادامه این بخش تشریح می‌شود.

۲-۱- پارامترهای تابع بارگذاری دیوار سیل‌بند

در این تحقیق، اثرهای سیلاب و باد بر دیوار سیل‌بند در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری سیل، ناشی از دبی سیلابی است که از داخل بستر رودخانه و در بین دیوارهای سیل‌بند عبور می‌کند. منظور از بارگذاری باد، نوسانهای سطح آب ناشی از وزش باد است. توابع بارگذاری در واقع توابع چگالی احتمال توزیع‌های احتمالاتی مختلف بوده و پارامترهای آن میانگین و انحراف معیار دبی‌های سیلابی و ارتفاع روگذری جریان ناشی از وزش باد است. پارامترهای تابع بارگذاری کلی در مجموع از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند (Plate, 2001):

$$\mu_s = \mu_{h0} + \mu_{\Delta h} \quad (1)$$

همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از نرم‌افزار HEC-FDA گزینه‌های مدیریت سیلاب شامل دیوار سیل‌بند و تعریض مقطع رودخانه گرگانرود را تحلیل اقتصادی کردند.

با توجه به موارد فوق ملاحظه می‌شود که بررسی عدم قطعیت‌ها و تحلیل اقتصادی در تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند و انتخاب گزینه برتر، اهمیت به‌سزایی داشته و تحقیقات بیشتری را در کشور می‌طلبد. لذا در مقاله حاضر در ادامه مقاله سنگین‌آبادی و همکاران (۱۳۸۴)، بیشتر به جنبه تحلیل اقتصادی در تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند پرداخته می‌شود. در این راستا، ضمن تبیین روش تحلیل ریسک و معرفی ابزارهای به‌کار رفته، ارتفاع دیوارهای سیل‌بند در رودخانه قشلاق محاسبه می‌شود. در پایان نتایج این رویکرد با روش سنتی طراحی مقایسه و نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- مبانی نظری

اصولاً در مرحله طراحی، برای تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند از سطوح احتمالاتی به شرح زیر استفاده می‌شود (Plate, 2001):

- سطح یک: همان روش سنتی طراحی است که در آن یک دوره بازگشت برای طرح انتخاب شده و دبی سیلابی متناظر با آن محاسبه و پروفیل سطح آب به‌ازای دبی مذکور محاسبه می‌شود. سپس ارتفاع دیوار سیل‌بند با اضافه کردن مقداری به‌عنوان ارتفاع آزاد^۱ به تراز سطح آب به دست می‌آید. ارتفاع آزاد در واقع به‌منظور جبران کردن عدم قطعیت‌ها در تعیین ارتفاع سیلاب و سایر عدم قطعیت‌های طراحی در نظر گرفته می‌شود.

- سطح دو: طراحی در این سطح بر اساس احتمال شکست انجام می‌شود. برای این منظور بارگذاری و

2. Risk Based Design

1. Freeboard

عدم قطعیت شیب خط انرژی (V_{sf})، ناشی از تغییر مقدار آن در طول بازه، تراز سطح آب و ارتفاع نظیر سرعت است. اگر تغییر ارتفاع نظیر سرعت ناچیز فرض شود، داریم (Oegema and McBean, 1987):

$$V_{sf}^2 \cong V_{\Delta x}^2 + V_y^2 \quad (3)$$

که در آن $V_{\Delta x}$ عدم قطعیت شیب خط انرژی ناشی از تغییر آن در طول بازه و V_y عدم قطعیت سطح آب است. در پژوهش حاضر، انحراف معیار رابطه مانینگ از روش برآورد نقطه‌ای احتمالاتی (PPE) محاسبه شده است (Tung & Yen, 2005). در این روش، فرض می‌شود که تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی X (در اینجا ظرفیت مقطع) در دو نقطه x_+ , x_- متمرکز شده و احتمال‌های متناظر آنها برابر P_+ , P_- باشد. سپس با استفاده از تعاریف مربوط به گشتاورهای اول تا سوم، موقعیت این نقاط و احتمال‌های آنها محاسبه شده و واریانس رابطه مانینگ به دست می‌آید.

پس از محاسبه توابع چگالی احتمال بارگذاری و مقاومت برای دیوار سیل‌بند، لازم است قابلیت اعتماد محاسبه شود.

یکی از روش‌های محاسبه قابلیت اعتماد، انتگرال‌گیری مستقیم است. در این روش، قابلیت اعتماد بر حسب توابع چگالی احتمال مقاومت و بارگذاری محاسبه می‌شود (Faber, 2006):

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[\int_0^r p(r,s) dr \right] ds$$

$$R = 1 - P_f = \int_{r_1}^{r_2} \left[\int_{s_1}^r p(r,s) ds \right] dr \quad (4)$$

که در آن، (p_f) احتمال شکست و R قابلیت اعتماد، $p(r,s)$ تابع چگالی احتمال توأم بارگذاری و مقاومت و

که در آن، μ_s ، $\mu_{\Delta h}$ ، μ_{h_0} به ترتیب میانگین ارتفاع آب در هنگام سیل، ارتفاع بالاروی ناشی از باد و تابع کلی بارگذاری دیوار سیل‌بند است. با فرض مستقل بودن h_0 (ارتفاع بارگذاری سیل) و Δh (ارتفاع ناشی از بارگذاری باد)، واریانس کلی تابع بارگذاری (σ_s) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_s^2 = \sigma_{h_0}^2 + \sigma_{\Delta h}^2 \quad (2)$$

که در آن، $\sigma_{h_0}^2$ و $\sigma_{\Delta h}^2$ به ترتیب واریانس ارتفاع آب بر اثر سیل و ارتفاع بالاروی ناشی از باد است.

۲-۲- پارامترهای تابع مقاومت دیوار سیل‌بند

معمولاً برای محاسبه ظرفیت هیدرولیکی از رابطه مانینگ استفاده می‌شود که در آن ضریب مانینگ، شیب خط انرژی و خصوصیات هندسی مقطع با عدم قطعیت همراه است و عدم قطعیت ضریب مانینگ اهمیت بیشتری دارد. پژوهش در رودخانه‌های با بستر شنی - که ضریب زبری مانینگ با استفاده از محاسبات میدانی محاسبه شده - نشان می‌دهد که ۲۰٪ عدم قطعیت در ضریب مانینگ باعث ۷٪ افزایش در پروفیل سطح آب و ۸٪ کاهش در سرعت جریان می‌شود (Kim, et al., 2010). در صورت در دسترس بودن آمار دبی - اشل، عدم قطعیت ضریب مانینگ به کمک کالیبره‌سازی مدل دقیق می‌شود. در غیر این صورت، می‌توان از روشهایی مانند فرض توزیع مثلثی برای ضریب مانینگ استفاده کرد و میانگین، انحراف استاندارد و عدم قطعیت آن را از این روش به دست آورد (Oegema and McBean, 1987).

منشأ عدم قطعیت در مورد خصوصیات هندسی مقطع، تغییرات سطح مقطع بر اثر فرسایش و رسوب‌گذاری است. پس از محاسبه عدم قطعیت کف رودخانه، عدم قطعیت خصوصیات هندسی مقطع محاسبه می‌شود.

(r_1, r_2) و (s_1, s_2) به ترتیب کرانه‌های بالا و پایین مقادیر مقاومت و بارگذاری است.

بر اساس فهرست‌های بها و تجارب کارشناسان ارزیاب تعیین می‌شود.

۲-۳- تحلیل اقتصادی و انتخاب گزینه برتر

در روش طراحی بر اساس تحلیل ریسک لازم است به منظور انتخاب گزینه برتر، تحلیل اقتصادی انجام شود. برای این منظور، محاسبه خسارات سیلاب، هزینه ساخت و منافع حاصل از سیستم کنترل سیلاب ضروری است. ارتفاع دیوار سیل‌بند در حالتی بهینه است که مجموع هزینه‌های احداث و ریسک خسارت ناشی از سیلاب (TAEC) در رابطه زیر کمترین مقدار را داشته باشد (Tung & Yen, 2006):

$$TAEC = CRF \times FC(X) + E(D|X) \quad (5)$$

در این رابطه، TAEC خسارت سالیانه کل مورد انتظار و $FC(X)$ هزینه اولیه ساخت است. $E(D|X)$ خسارت سالیانه مورد انتظار و CRF ضریب تبدیل هزینه اولیه به هزینه سالیانه است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} \quad (6)$$

i نرخ بهره است.

در ادامه این بخش، نحوه محاسبه پارامترهای مربوط به خسارت کل مورد انتظار بررسی می‌شود.

۲-۳-۱- هزینه‌های ساخت دیوار سیل بند

هزینه ساخت دیوار سیل‌بند شامل هزینه‌های احداث و نظارت، هزینه تملک اراضی واقع در محدوده طرح، هزینه عدم کشت در زمان اجرای پروژه، هزینه سرمایه‌ای ساخت طرح و هزینه بهره‌برداری^۲ و نگهداری^۳ سالیانه است که

۲-۳-۲- خسارت سالیانه مورد انتظار

به منظور محاسبه خسارت سالیانه مورد انتظار، لازم است تابع خسارت به دست آید و این خود به ارزیابی خسارات سیلاب نیاز دارد.

اصولاً خسارت‌های سیلاب شامل خسارت‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. خسارت‌های مستقیم سیلاب نتیجه برخورد فیزیکی آب بوده و خسارت‌های غیرمستقیم ناشی از ایجاد اختلال در وضعیت طبیعی جامعه بر اثر قطع راه‌ها، از بین رفتن موقعیت‌های شغلی و مانند آن است (سنگین‌آبادی، ۱۳۸۴).

در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بر اساس تحلیل ریسک، محاسبه $E(D|X)$ بر مبنای توابع چگالی احتمالاتی بارگذاری و مقاومت انجام می‌شود.

چنانچه فقط اثر عدم قطعیت‌های ذاتی هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود، خسارت سالیانه مورد انتظار از رابطه زیر به دست می‌آید (Tung & Yen, 2006):

$$E(D|X) = \int_{q_c}^{\infty} D(q|q_c, X) f(q) dq \quad (7)$$

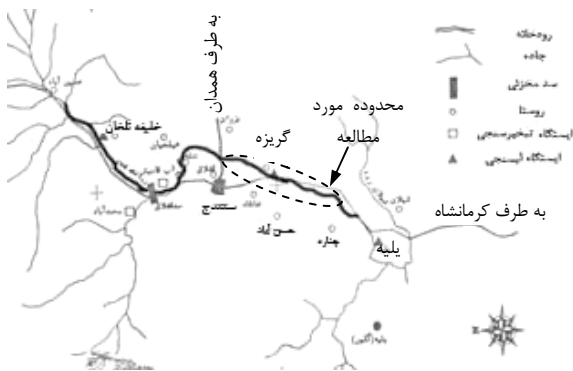
که در آن، $D(q|q_c, X)$ تابع خسارت است که به بزرگی دبی سیلاب (q) و ظرفیت سازه (q_c) و ابعاد آن (X) بستگی دارد و $f(q)$ تابع چگالی احتمال بارگذاری است.

در صورتی که عدم قطعیت‌های هیدرولیکی نیز علاوه بر عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود، خسارت سالیانه مورد انتظار از رابطه زیر به دست می‌آید (Tung and Yen, 2006):

$$E(D|X) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} D(q|q_c, X) f(q) dq g(q_c|X) dq_c \quad (8)$$

1. Total Annual Expected Cost
2. Operation
3. Maintenance

مترمکعب در ثانیه و انحراف معیار برابر ۵۲ مترمکعب در ثانیه و ضریب چولگی برابر ۲/۷ به دست آمد (مهندسان مشاور دزآب ۱۳۸۰). با توجه به اینکه در تصحیح و تحویل دبی‌های مذکور، آمار نادرست یا دبی‌های تحت تأثیر سد قشلاق اصلاح یا شاید حذف شده بود، به نظر می‌رسد که این آمار از صحت کافی برخوردار باشد.



شکل ۱ شمایی از محدوده مورد مطالعه

۴- روش محاسبه و نتایج

در این بخش، ضمن تشریح روش محاسبه و ابزارهای مورد استفاده برای تحلیل ریسک در این مطالعه موردی، نتایج مربوط ارائه و تحلیل می‌شود. در این مقاله فقط ارتفاع دیوار سیل‌بند بررسی شده است. بررسی پارامترهای دیگری مانند محل قرارگیری دیوارها در دو طرف رودخانه^۱، نیازمند مطالعات گسترده‌تری بوده و می‌تواند مسأله‌ای برای پژوهش‌های بعدی باشد.

۴-۱- روند محاسبات

در شکل ۲ روندنمای محاسبات و ابزارهای محاسباتی مورد استفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است. جزئیات

که در آن، $g(q_c | X)$ تابع چگالی احتمال مقاومت سازه است. این انتگرال‌ها معمولاً به روش عددی محاسبه می‌شوند.

۳- مطالعه موردی

حوضه آبریز رودخانه قشلاق در شمال- جنوب و غرب شهر سنندج قرار دارد. برای سامان‌دهی این رودخانه در بازه‌ای شش کیلومتری در شرق شهر سنندج، از اصلاح مسیر و دیوارهای سیل‌بند استفاده شده است.

اطلاعات و آمار مورد استفاده شامل دبی‌های حداکثر سالیانه، سرعت باد، مقطع طولی، مقاطع عرضی و ضریب مانینگ است. آمار سرعت بادها در منطقه از اداره هواشناسی استان کردستان دریافت و سایر آمار از گزارش مطالعات مهندسان مشاور دزآب (۱۳۸۰) استخراج شد.

در مطالعات هیدرولوژی این طرح، از سه ایستگاه آبسنجی خلیفه ترخان، گریزه و بلیه استفاده شد. ایستگاه خلیفه ترخان در داخل حوضه آبریز رودخانه قشلاق و ایستگاه‌های گریزه و بلیه بر روی این رودخانه در پایین دست سد قشلاق قرار گرفته‌اند (شکل ۱). از آنجا که در بازه مورد نظر ایستگاه آبسنجی وجود نداشت، لذا با توجه به شباهت خصوصیات هندسی و پوشش گیاهی این بازه با ایستگاه گریزه، آمار این ایستگاه مورد استفاده قرار گرفت. هر چند این ایستگاه در سال ۱۳۴۴ تاسیس شده، اما آمار دبی ثبت شده در آن فقط برای چند سال در دست بوده و لذا این آمار به دلیل ناقص بودن، نمی‌توانست مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، با استفاده از آمار سایر ایستگاه‌های منطقه و روابط مربوط، آمار مورد نظر صحت‌سنجی و تطویل شده و دبی حداکثر روزانه ایستگاه فوق محاسبه شد (مهندسان مشاور دزآب، ۱۳۸۰). بر این اساس برای دوره آماری ۴۱ ساله، میانگین دبی‌ها برابر ۶۹

این توزیع در محاسبه قابلیت اعتماد استفاده شد. همچنین ارتفاع بالاروی ناشی از باد، بر اساس آمار سرعت بادهای منطقه و به کمک روشهای موجود (Hemphil et al, 1989) محاسبه و به اشل سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف اضافه شد. سپس پارامترهای تابع بارگذاری (f_R) دیوار سیل‌بند (شامل میانگین و انحراف معیار ارتفاع سیلاب و بالاروی باد) با استفاده از منحنی دبی-اشل رودخانه و با به‌کارگیری روابط (۱) و (۲) محاسبه شد. در مراحل بعدی اشل‌های محاسبه شده با استفاده از منحنی دبی اشل به دبی متناظر تبدیل شد (سنگین‌آبادی، ۱۳۸۴).

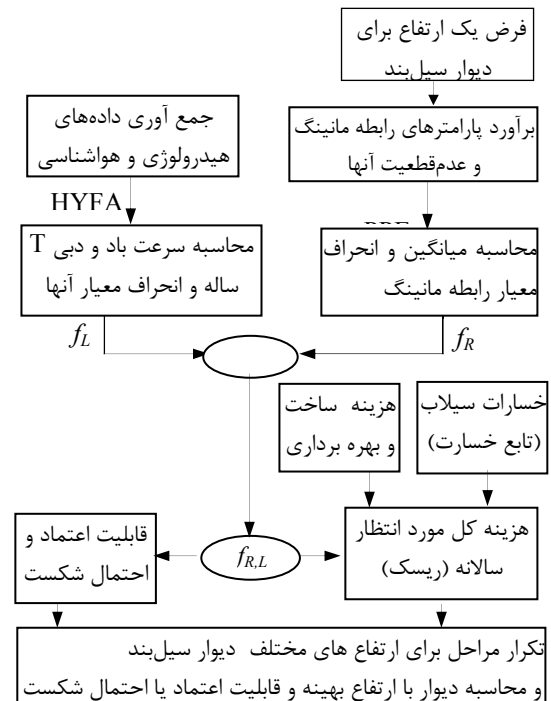
۳-۴- محاسبه پارامترهای تابع احتمال مقاومت

در این تحقیق، برای محاسبه پارامترهای تابع مقاومت (f_R) از رابطه مانینگ و روش برآورد نقطه‌ای (PPE) استفاده شد. عدم قطعیت مدل مانینگ با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ضریب مانینگ، شیب خط انرژی و تغییرات مقاطع بر اثر فرسایش و رسوبگذاری اعمال شد. عدم قطعیت ضریب مانینگ با فرض کردن توزیع مثلثی برای آن محاسبه شد (سنگین‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۴).

برای بررسی عدم قطعیت خصوصیات هندسی مقاطع (تغییرات کف رودخانه بر اثر فرسایش و رسوبگذاری در زمانهای مختلف و در مقاطع عرضی موجود)، از نتایج نرم‌افزار HEC-6 (مهندسان مشاور دزآب، ۱۳۸۰) استفاده شد. عدم قطعیت شیب خط انرژی ناشی از تغییرات آن در بازه مطالعاتی (ΔX)، عدم قطعیت تراز سطح آب (y) و به‌علت ناچیز بودن عدم قطعیت ارتفاع نظیر سرعت جریان از آن صرف‌نظر می‌شود.

با توجه به رابطه (۵)، به‌منظور محاسبه مولفه عدم قطعیت شیب خط انرژی ناشی از تغییرات آن در فواصل طولی

هر یک از مراحل در قسمت‌های بعدی آورده شده است.



تابع چگالی احتمال بارگذاری: f_L
 تابع چگالی احتمال مقاومت: f_R
 برآورد نقطه‌ای احتمالی: PPE

شکل ۲ روندنمای محاسبات تحلیل ریسک در تحقیق حاضر

۲-۴- محاسبه پارامترهای تابع احتمال بارگذاری

در تحقیق حاضر، با استفاده از نرم‌افزار HYFA، توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال دوپارامتری، لوگ نرمال سه پارامتری، پیرسون نوع سه و گامبل بر آمار دبی‌های حداکثر ۴۱ ساله رودخانه قشلاق برازش شد و بر حسب نوع توزیع و برای هر دوره بازگشت، مقداری به عنوان دبی سیل برآورد شد. بررسی نکویی برازش با استفاده از روش مربع خی^۱ نشان داد که نتایج توزیع پیرسون نوع سه نسبت به سایر توزیع‌ها مناسب‌تر است و لذا از پارامترهای

1. Khi Square

به صورت صلب است، فرسایش و رسوب‌گذاری فقط مربوط به بستر رودخانه بوده و لذا عدم قطعیت خصوصیات هندسی مقطع در اینجا کمترین سهم را داشته است.

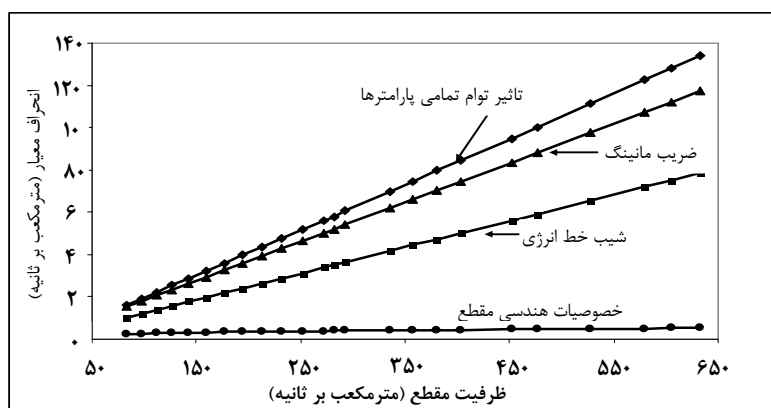
باید توجه داشت که این نتایج برای شرایط رودخانه قشلاق به دست آمده و ممکن است در شرایط دیگر، تغییر کنند. برای مثال، به نظر می‌رسد که صلب کردن بستر رودخانه ضریب زبری را به شدت تحت تأثیر قرار داده و از عدم قطعیت آن می‌کاهد، اما بعید است که فقط تغییر در جنس مصالح دیوار سیل‌بند، تغییر قابل ملاحظه‌ای را در نتایج ایجاد کند. بررسی سایر شرایط و تعمیم نتایج مقاله حاضر به سایر رودخانه‌ها، به مطالعات گسترده‌ای نیاز داشته و می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد.

۴-۴- محاسبه قابلیت اعتماد

در تحقیق حاضر برای محاسبه قابلیت اعتماد، از رابطه (۴) به روش عددی انتگرال‌گیری شد. برای این منظور برنامه‌ای به زبان ++C نوشته شد (سنگین‌آبادی، ۱۳۸۴) و نتایج محاسبات در اینجا ارائه می‌شود.

(V_{AX}) ، بازه مورد مطالعه به چند قسمت (ΔX) تقسیم شده و در هر یک، شیب خط انرژی محاسبه شد. برای این منظور به علت کوتاه بودن فاصله، شیب خط انرژی با شیب کف کانال، مساوی فرض شد. در پایان V_{AX} با مولفه دیگر یعنی عدم قطعیت تراز سطح آب (V_y) جمع شده و عدم قطعیت خط انرژی به دست می‌آید.

انحراف معیار ظرفیت مقطع با روش برآورد نقطه‌ای محاسبه شد. در شکل ۳ تأثیر عدم قطعیت هر یک از پارامترها در عدم قطعیت کلی مدل مانینگ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است انحراف استاندارد کلی (خط تأثیر توأم پارامترها) با ظرفیت مقطع رابطه‌ای خطی دارد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که مهمترین پارامتر ایجاد عدم قطعیت در ظرفیت محاسباتی از رابطه مانینگ، خود ضریب مانینگ بوده که ناشی از وابستگی آن به پارامترهای طبیعی و تصادفی متعددی مانند پوشش گیاهی است. شیب خط انرژی در مرتبه دوم ایجاد عدم قطعیت قرار گرفت. دلیل اصلی ایجاد عدم قطعیت در شیب خط انرژی، تغییرات مقدار آن در طول رودخانه (زیر بازه‌ها) در جهت جریان است. با توجه به این که دیوارهای سیل‌بند واقع در طرف رودخانه قشلاق



شکل ۳ عدم قطعیت پارامترهای مختلف و عدم قطعیت کل آنها در رابطه مانینگ

شده کمتر از حالتی است که اثر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی نیز در نظر گرفته شود.

جدول ۱ محاسبه قابلیت اعتماد دیوار سیل‌بند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

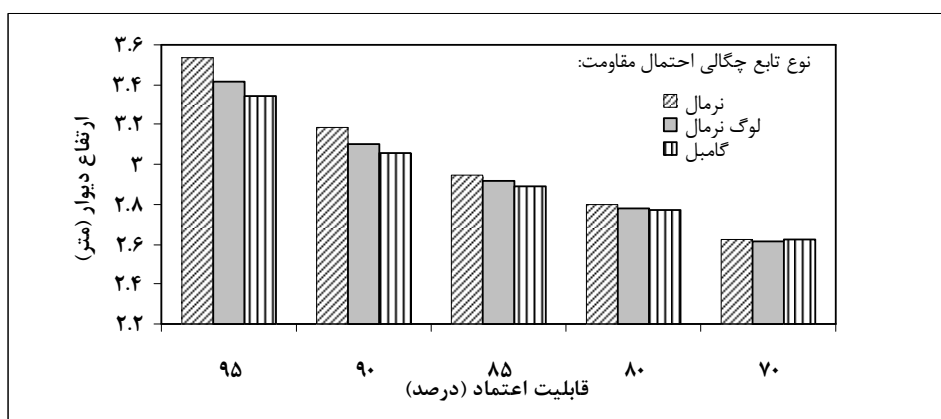
ارتفاع دیوار سیل‌بند (متر)		قابلیت
عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی	فقط عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی	اعتماد (درصد)
۳/۴	۳	۹۵
۳/۱۵	۲/۸	۹۰
۲/۸۵	۲/۶۵	۸۵

بنابراین در اینجا چنانچه عدم قطعیت‌های هیدرولیکی در نظر گرفته نشود، نتایج دست‌پایین بوده و ریسک تخریب سازه افزایش می‌یابد. همچنین جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش سطح اعتماد، اختلاف در ارتفاع محاسبه شده افزایش می‌یابد.

در شکل ۴ ارتفاع مناظر دیوار سیل‌بند در صورت استفاده از پارامترهای دبی ۱۰۰ ساله در تابع چگالی احتمال بارگذاری نرمال و مقاومت نرمال، لوگ نرمال و گامبل نشان داده شده است. اختلاف نتایج این توزیع‌ها در شکل، بیانگر عدم قطعیت مدل‌های آماری است. این شکل نشان می‌دهد که ارتفاع محاسبه شده برای تأمین مقدار مشخصی از قابلیت اعتماد برای توزیع‌های مقاومت مختلف یکسان نبوده و میزان این اختلاف با افزایش قابلیت اعتماد بیشتر می‌شود. این نشان می‌دهد که برای دستیابی به مقادیر نسبتاً بالای قابلیت اعتماد در طراحی احتمالاتی (سطوح ۲ و ۳)، باید عدم قطعیت مدل‌ها با دقت بیشتری بررسی شوند.

جدول ۱ تأثیر اعمال عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی را در محاسبه قابلیت اعتماد دیوارهای سیل‌بند نشان می‌دهد.

این جدول نشان می‌دهد که در اینجا برای تأمین سطح مشخصی از اعتماد، چنانچه فقط اثر عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود، ارتفاع دیوار محاسبه



شکل ۴ ارتفاع مناظر دیوار در صورت استفاده از پارامترهای دبی ۱۰۰ ساله در تابع نرمال

۴-۵- تحلیل اقتصادی و انتخاب گزینه برتر

۴-۵-۱- هزینه ساخت دیوار

برای تعیین دیوار سیل‌بند با ارتفاع بهینه لازم است هزینه اجرای دیوار - که شامل هزینه‌های اجرایی ساختمان طرح، هزینه عدم کشت در زمان اجرا، هزینه نگهداری و هزینه‌های پیش‌بینی نشده - محاسبه شود (جدول ۲).

جدول ۲ محاسبه هزینه کل اجرای دیوار سیل‌بند در بازه مورد مطالعه (میلیون ریال)

ارتفاع سیل‌بند (متر)	هزینه سازه دیوار	هزینه توقف کشت	سایر هزینه‌ها	کل هزینه
۲/۲	۱۰۴۷	۸۷	۱۰۴	۱۲۳۹
۲/۴	۱۱۵۷	۸۷	۱۱۶	۱۳۶۰
۲/۶	۱۲۳۶	۸۷	۱۲۴	۱۴۴۷
۲/۸	۱۳۲۷	۸۷	۱۳۲	۱۵۴۶
۳	۱۴۱۹	۸۷	۱۴۲	۱۶۴۸
۳/۲	۱۵۱۱	۸۷	۱۵۱	۱۷۴۹
۳/۴	۱۶۰۳	۸۷	۱۶۰	۱۸۵۰
۳/۶	۱۶۹۵	۸۷	۱۷۰	۱۹۵۲

در این جدول، هزینه سرمایه‌ای ساخت دیوار سنگی بر مبنای میزان عملیات ساخت دیوار (خاکریزی، خاکبرداری، مصالح مصرفی) بر اساس فهرست بها تعیین شد. همچنین میانگین مبالغ پرداختی به کشاورزان محدوده مورد مطالعه در سال‌های ۸۱، ۸۲ و ۸۳ به‌عنوان هزینه توقف کشت که مستقل از ارتفاع دیوار است، مورد استفاده قرار گرفت. سایر هزینه‌ها که شامل هزینه بهره‌برداری و نگهداری و موارد پیش‌بینی نشده می‌شود، برابر با ۱۰ درصد هزینه ساخت سازه دیوار در نظر گرفته شد. این جدول نشان می‌دهد که کل هزینه اجرا با افزایش ارتفاع دیوار افزایش می‌یابد.

۴-۵-۲- برآورد تابع خسارت ناشی از سیلاب

خسارت‌های سیلاب در محدوده مطالعاتی، بیشتر ناشی از خسارت‌های مستقیم وارد شده بر زمین‌های کشاورزی و سازه‌های زیربنایی است. برای ارزیابی خسارت‌های ناشی از سیلاب به زمین‌های کشاورزی برای هر یک دبی سیلاب، ظرفیت متوسط مقطع ارزیابی شده و تفاضل دبی سیلاب از میانگین ظرفیت محاسبه می‌شود، این دبی به سیلابدشت وارد شده و عامل اصلی ایجاد خسارت است. برآورد تابع خسارت وارد شده به زمین‌های کشاورزی، مستلزم محاسبه تراز متناظر با دبی و پهنا زمین‌های زیر آب رفته است و برای این منظور از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد. هزینه خسارت وارد شده با توجه به نوع کشت منطقه، ارزش روز محصولات کشاورزی و هزینه‌های نیروی انسانی تعیین شد. این مقدار بر اساس تجربه کشاورزان منطقه برابر ۵۰۰۰ ریال به ازای هر متر مربع از زمین‌های زیر آب رفته، برآورد شد. علاوه بر این موارد، برای برآورد تابع خسارت ناشی از سیلاب لازم است خسارت‌های ناشی از تخریب راه‌های دسترسی، تخریب سازه دیوار سیل‌بند و مانند آنها ارزیابی شود. برای این منظور خسارت چند نمونه سیلاب (از جمله سیلاب فروردین ۱۳۸۳) که پس از اجرای قسمتی از پروژه رخ داده بود، در نظر گرفته شده و رابطه‌ای خطی بین دبی و خسارت سیلاب برآزش داده شود.

خسارت سیلاب برای هر دبی معین، برابر با مجموع خسارت سیلاب به زمین‌های کشاورزی و هزینه‌های تحمیل شده به تأسیسات زیربنایی است. برای تعیین تابع خسارت و محاسبه خسارت سالیانه مورد انتظار، لازم است خسارت برای دبی‌های مختلف محاسبه شود. در تحقیق حاضر، به دلیل کم بودن تعداد آمار، امکان بررسی عدم قطعیت تابع خسارت-سیلاب وجود نداشته و لذا به

دوم آنکه خسارت سالیانه مورد انتظار - با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی به‌تنهایی و همچنین در صورت در نظر گرفتن توأم عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی - نسبت به افزایش ارتفاع دیوار روندی نزولی دارد. البته برای هر ارتفاع، خسارت در حالت اول بیشتر از حالت دوم برآورد شده است. لذا با توجه به رابطه (۵)، صرف نظر کردن از عدم قطعیت‌های هیدرولیکی در مطالعه موردی حاضر، ریسک تخریب سازه را افزایش می‌دهد.

۴-۵-۳- محاسبه کل هزینه سالیانه مورد انتظار و

انتخاب دیوار سیل‌بند برتر

کل هزینه سالیانه مورد انتظار سالانه با استفاده از رابطه (۵) و با در نظر گرفتن عمر مفید ۳۰ سال برای سازه، و برای مقادیر مختلف نرخ بهره در تعیین ضریب CRF از رابطه (۶) محاسبه شد. در جدول ۴ کل هزینه سالیانه مورد انتظار با در نظر گرفتن تابع بارگذاری نرمال (به‌عنوان نمونه) ارائه شده است. در این جدول، مقایسه کل هزینه سالیانه مورد انتظار سالانه نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بهره، کل هزینه مورد انتظار (شامل هزینه ساخت اولیه و خسارت مورد انتظار سالانه) افزایش می‌یابد.

در جدول ۴ همچنین مشاهده می‌شود که برای مقدار ثابت نرخ بهره، با افزایش ارتفاع دیوار سیل‌بند کل هزینه سالیانه مورد انتظار ابتدا کاهش و پس از عبور از یک نقطه حداقل - که نمایانگر حالت بهینه است - افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، رابطه بین ارتفاع دیوار و هزینه کل به‌صورت نوعی تابع درجه دوم در نظر گرفته شد.

ناچار این پارامتر بررسی نشد. پس از محاسبه تابع خسارت دیوار سیل‌بند، خسارت سالیانه مورد انتظار برای سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی (ذاتی) به‌تنهایی از رابطه (۷) و عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به‌صورت توأم از رابطه (۸) محاسبه شد. در جدول ۳ نمونه‌ای از نتایج با در نظر گرفتن تابع مقاومت نرمال ارائه شده است. پارامترهای تابع چگالی احتمال بارگذاری، میانگین و انحراف معیار دبی‌های حداکثر ۴۱ سال آماری است که با استفاده از نرم افزار HYFA محاسبه شده است.

جدول ۳ خسارت سالیانه مورد انتظار (میلیون ریال) با در نظر

گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی

ارتفاع سیل‌بند (متر)	تابع بارگذاری	عدم قطعیت هیدرولوژیکی به تنهایی	عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی
قبل از احداث	نرمال	۹۶۱	۹۵۴
	لوگ نرمال	۹۸۰	۹۷۱
۲/۲	نرمال	۵۰۸	۵۰۱
	لوگ نرمال	۴۹۳	۴۷۱
۲/۴	نرمال	۳۵۸	۳۵۰
	لوگ نرمال	۳۱۷	۳۰۹
۲/۶	نرمال	۲۲۷	۲۱۹
	لوگ نرمال	۲۰۹	۲۰۱

اول آنکه این جدول نشان می‌دهد که بدون توجه به نوع تابع بارگذاری انتخاب شده، خسارت سالیانه مورد انتظار برای سیلاب با افزایش ارتفاع دیوار، کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که تفاوت خسارت مورد انتظار در توابع بارگذاری نرمال و لوگ نرمال ناشی از عدم قطعیت مربوط به مدل‌های آماری باشد.

جدول ۴ کل هزینه سالیانه مورد انتظار (میلیون ریال) برای مقادیر مختلف نرخ بهره

ارتفاع سیل بند (متر)	۳/۶۰	۳/۴۰	۳/۲۰	۳	۲/۸۰	۲/۶۰	۲/۴۰	۲/۲۰	نرخ بهره
	ارتفاع بهینه (متر)	هزینه	هزینه	هزینه	هزینه	هزینه	هزینه	هزینه	
۳/۱۸	۳۸۹	۳۶۷	۳۶۲	۳۷۲	۴۱۷	۵۰۳	۶۲۴	۷۵۳	٪۲۰
۳/۱۸	۲۹۵	۲۷۹	۲۷۶	۲۹۳	۳۴۲	۴۳۳	۵۵۸	۶۹۳	٪۱۵
۳/۲۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۳	۲۱۳	۲۶۶	۳۶۰	۴۹۰	۶۳۲	٪۱۰
۳/۲۱	۱۵۲	۱۴۵	۱۴۰	۱۷۳	۲۲۹	۳۲۶	۴۵۸	۶۰۰	٪۷.۵
۳/۲۱	۱۰۵	۱۰۱	۹۸	۱۳۳	۱۹۱	۲۹۰	۴۲۴	۵۷۰	٪۵

کمتر از روش تحلیل ریسک بود. به عنوان مثال، قابلیت اعتماد متناظر با دبی ۱۰۰ ساله از روش سنتی حدود ۵۸ درصد است، در حالی که این مقدار در رویکرد تحلیل ریسک برابر ۹۲ درصد به دست آمد. لذا، در مطالعه موردی حاضر، خطر تخریب دیوار طراحی شده از روش طراحی سنتی نسبت به روش تحلیل ریسک بیشتر است. با توجه به مقایسه اقتصادی روش تحلیل ریسک و روش سنتی و همچنین مقایسه قابلیت اعتماد متناظر با آنها، کاربرد روش تحلیل ریسک با در نظر گرفتن تمامی ملاحظات اقتصادی و فنی، برای تعیین ارتفاع دیوارهای سیل بند توصیه می شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ضمن بررسی عدم قطعیت ها و تأکید بر توجه به تحلیل های اقتصادی، ارتفاع دیوارهای سیل بند رودخانه قشلاق به روش تحلیل ریسک محاسبه و با روش طراحی سنتی مقایسه شد و بر اساس یک مطالعه موردی در سیل بند قشلاق نتایج زیر به دست آمد:

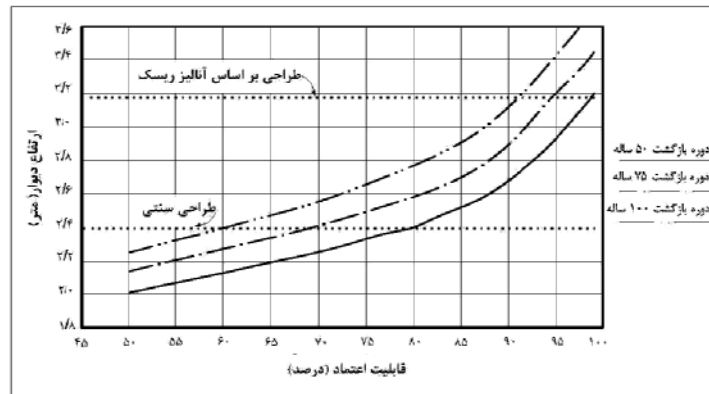
۱- مهمترین پارامتر ایجاد عدم قطعیت در ظرفیت محاسباتی از رابطه مانینگ، خود ضریب مانینگ بوده و عدم قطعیت خصوصیات هندسی مقطع کمترین سهم را دارد.

همچنین مقایسه ارقام ستونهای اول و آخر در این جدول نشان می دهد که حساسیت ارتفاع بهینه دیوار نسبت به نرخ بهره کم است، به طوری که به ازای تغییر نرخ بهره از ۵ تا ۲۰ درصد، ارتفاع بهینه دیوار فقط ۳ سانتی متر (تقریباً ۰/۹ درصد) تغییر می کند.

در محاسبه ارتفاع دیوار برای توزیع لوگ نرمال نیز میانگین ارتفاع بهینه برابر ۳/۱۸ متر به دست آمد (سنگین آبادی، ۱۳۸۴). بنابراین نتیجه طراحی سیل بند با رویکرد تحلیل ریسک در رودخانه قشلاق، دیواری با ارتفاع ۳/۲ متر بود؛ حال آنکه در روش سنتی، ارتفاع دیوار سیل بند برابر ۲/۴ متر محاسبه شده بود (مهندسان مشاور دزآب، ۱۳۸۰).

در جدول ۴، با مقایسه کل هزینه سالیانه مورد انتظار برای ساخت دیوارهای طراحی شده از روش سنتی (ارتفاع ۲/۴ متر) و روش تحلیل ریسک (ارتفاع تقریباً ۳/۲ متر) مشاهده می شود که کل هزینه سالیانه مورد انتظار در روش اول بیشتر از روش دوم است. لذا در مطالعه موردی رودخانه قشلاق، استفاده از روش سنتی در طراحی سیل بندها مقرون به صرفه ارزیابی نمی شود.

در شکل ۵ نتایج روش های طراحی سنتی و تحلیل ریسک از دیدگاه قابلیت اعتماد، با یکدیگر مقایسه شده است. این شکل نشان می دهد که در دبی های با دوره بازگشت ۵، ۷۵ و ۱۰۰ ساله، قابلیت اعتماد ناشی از روش سنتی



شکل ۵ ارتفاع دیوار سیل‌بند برای مقادیر مختلف قابلیت اعتماد و مقایسه روش‌های سنتی و تحلیل ریسک (سنگین‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۴)

مفید به نظر می‌رسد.

۶- سپاسگزاری

نگارندگان از شرکت مدیریت منابع آب ایران به خاطر حمایت مالی از طرح تحقیقاتی که بخشی از نتایج آن در مقاله حاضر ارائه شده، قدردانی می‌نمایند.

۷- فهرست علائم

CRF	ضریب تبدیل هزینه اولیه به هزینه سالانه
$D(q qc, X)$	تابع خسارت
$E(D X)$	خسارت مورد انتظار سالانه
$f(q)$	تابع چگالی احتمال بارگذاری
$FC(X)$	هزینه ساخت اولیه
$g(q_c, X)$	تابع چگالی احتمال مقاومت سازه
P_f	احتمال شکست
Q	دبی سیلاب
q_c	ظرفیت سازه
R	قابلیت اعتماد
$TAEC$	خسارت کل مورد انتظار سالانه
V_{sf}	عدم قطعیت شیب خط انرژی

۲- در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی در تمامی سطوح طراحی احتمالاتی، منجر به برآورد دست‌پایین برای ارتفاع دیوار سیل‌بند و در نتیجه افزایش خطر تخریب آن می‌شود و لذا نمی‌توان از این عدم قطعیت‌ها صرف‌نظر کرد.

۳- برای تأمین سطحی مشخص از اعتماد، ارتفاع دیوار محاسبه شده از توزیع‌های آماری مختلف با هم یکسان نبوده و مقدار اختلاف با افزایش سطح اعتماد بیشتر می‌شود. بنابراین عدم قطعیت این مدل‌ها باید با دقت بیشتری بررسی شود.

۴- استفاده از روش سنتی در طراحی سیل‌بندهای قشلاق مقرون به صرفه نبود. همچنین قابلیت اعتماد حاصل از طراحی سنتی کمتر از روش تحلیل ریسک برآورد شد.

۵- در مطالعه موردی حاضر، حساسیت ارتفاع بهینه دیوار نسبت به تغییرات نرخ بهره بسیار ناچیز بود.

۶- با در نظر گرفتن تمامی ملاحظات اقتصادی و فنی، کاربرد روش تحلیل ریسک برای تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند توصیه می‌شود.

۷- به‌منظور توسعه رویکرد ارائه شده و تعمیم نتایج حاضر به شرایط سایر رودخانه‌های کشور، ادامه تحقیقات

Faber, R. (2006). "Flood risk analysis: Residual risks and uncertainties in an Austrians context". Dissertation for obtaining a doctorate degree at the University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.

Hemphill, R. W. and Bramely, M. E. (1989). Protection of river and canal banks-a guide to selection and design. Butterworths.

Kim, J. S., Lee, C. J., Kim. W. and Kim, Y.J. (2010). "Roughness coefficient and its uncertainty in a gravel-bed river. River and Coastal Research Division", Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea.

Mays, L. W. (2001). Water resources engineering. John Wiley and Sons, New York.

Oegema, B. W. and McBean, E. A. (1987). "Uncertainties in flood plain mapping". In Application of Frequency and Risk and Resources, V.P Singh, ed., D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands.

Plate, E. J. (2000). "Stochastic design- has its time to come". IAHR Conference on Stochastic Hydraulics, Wang & Hu (eds.). Balkema, Rotterdam, pp. 3-13.

Tung, Y. K. and Yen, B. C. (2006). Hydrosystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis. McGraw-Hill, New York.

Tung, Y. K. and Yen, B. C. (2005). Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis. McGraw-Hill, New York.

U. S. Army Corps of Engineers. (1996). "Risk-Based analysis for flood damage reduction studies". EM1110-2-1619, Washington.

V_y عدم قطعیت سطح آب
 $V_{\Delta x}$ عدم قطعیت شیب خط انرژی ناشی از تغییر آن در طول بازه

۸- منابع

افتخاریان، لیلا. ۱۳۸۰. "تحلیل عدم قطعیت پروفیل سطح آب به منظور بررسی قابلیت اعتماد سیل‌بندها". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

خاکباز، بهناز. ۱۳۸۰. "تحلیل ریسک و قابلیت اعتماد سیل‌بند". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفای وزارت نیرو. ۱۳۸۹. راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری دیوارهای سیل‌بند (نشریه شماره ۵۱۸).

سرابندی، امیر. ۱۳۸۷. "بهینه سازی ابعاد سیستم‌های ترکیبی (سد- گوره) مهار سیلاب". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.

سنگین‌آبادی، حمید. ۱۳۸۴. "تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند با استفاده از آنالیز ریسک". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.

سنگین‌آبادی، حمید و عطاری، جلال و موسوی ندوشنی، سعید. ۱۳۸۴. "تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند با استفاده از آنالیز ریسک". چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان.

فدایی، منصور و عطاری، جلال و مصباحی، محمد مهدی. ۱۳۸۸. "مقایسه اقتصادی پروژه های مهار سیلاب با استفاده از تلفیق نرم‌افزارهای GIS، HEC-RAS و HEC-FDA در رودخانه گرگانرود". هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز

مهندسین مشاور دز آب. ۱۳۸۰. "مطالعات مرحله اول طرح ساماندهی رودخانه قشلاق".