

بررسی تأثیر همبستگی ورودیهای شبیه در تحلیل عدم قطعیت سامانه‌های مهار کردن سیلاب

معصومه بهروز^{۱*}، سعید علیمحمدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۴

چکیده

امروزه بررسی و تحلیل عدم قطعیتها در هر برنامه‌ای امری ضروری محسوب می‌گردد، بطوری که بدون در نظر گرفتن و تحلیل این عدم قطعیتها، وقوع حالات نامطلوبی، که رخداد آنها اهداف برنامه را به چالش می‌کشاند، دور از انتظار نیست. بررسی و تحلیل عدم قطعیتها در چارچوب مدیریت ریسک انجام می‌گیرد. اصولاً از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان ابزاری جهت تحلیل و بررسی یکپارچه و همزمان ترکیبات مختلف عدم قطعیتها استفاده می‌گردد. این روش، ابزار قدرتمندی جهت بررسی پیامد رخداد انواع حالات سامانه، با توجه به عدم قطعیتها می‌باشد که مزایای قابل توجهی، از جمله در نظر گرفتن رخداد توأم عدم قطعیتها و قابلیت ارائه‌ی ابعاد گوناگون تابع مطلوبیت را دارا می‌باشد. در سامانه‌های طبیعی و مهندسی وجود متغیرهای تصادفی وابسته به یکدیگر امری کاملاً معمول و محتمل است. به منظور بررسی لزوم اعمال همبستگی عدم قطعیتها، به طراحی سامانه‌های مهار کردن سیلاب، با لحاظ انواع عدم قطعیتهای آبخش‌ی، هیدرولیکی و اقتصادی پرداخته شده است. در این مقاله، بطور خاص، طراحی سازه‌ی گوره، که یکی از روشهای معمول سازه‌ای مهار کردن سیلاب می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه بهینه‌سازی غیر خطی توسعه یافته، عدم قطعیتها یک بار بدون اعمال همبستگی، و بار دیگر با اعمال همبستگی آنها وارد شده‌اند. حل شبیه، به وسیله‌ی نرم‌افزار LINGO-13 انجام شده است. در شبیه بدون اعمال همبستگی عدم قطعیتها مقادیر ارتفاع و سایر ابعاد گوره کوچکتر از شبیه با اعمال همبستگی به دست آمده است. نتایج بیانگر این مطلبند که در نظرنگرفتن نوع و میزان تأثیر متقابل عدم قطعیتها بر یکدیگر، ترکیباتی از خروجیهای سامانه را ارائه خواهد داد که در دنیای واقعی امکان پذیر نبوده و تابع مطلوبیت را تا حدی از واقعیت دور می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مهار کردن سیلاب، عدم قطعیت، خطر کردن، گوره، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی مونت کارلو

^۱ - دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی

^۲ - استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

* - نویسنده مسوول مقاله " m_behroz_cemb@yahoo.com

مقدمه

یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی، وقوع سیلابهای مخرب ناشی از رگبارهای سیل‌آسا در مناطق سیلخیز است. دخل و تصرف بشر در منابع طبیعی و تغییر کاربری اراضی این وضعیت را وخیمتر می‌کند. نتیجه‌ی این اثرات طبیعی و مصنوعی قرار گرفتن ایران در وضعیت نامناسب به‌لحاظ جریان سیلاب، و به تبع آن زیانهای ناشی از آن می‌باشد. به‌این ترتیب، پرداختن به مسأله‌ی سیل و ارائه‌ی راهکارهایی برای کاهش زیانهای سیل، از جمله مواردی است که باید مورد توجه قرار گیرد. روشهای مختلفی برای کاهش زیانهای سیل وجود دارد، که بطور کلی، آنها را به دو گروه سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم می‌کنند.

در طراحی سازه‌ها عدم قطعیت‌های مختلفی وجود دارند. منابع ایجاد عدم قطعیتها را می‌توان به پنج گروه ذاتی، شبیه، فراسنج، داده و عملکرد به شرح زیر تقسیم کرد: عدم قطعیت‌های طبیعی از ماهیت تصادفی فرایندهای طبیعی مانند بارش ناشی می‌شوند. عدم قطعیت‌های مربوط به شبیه شامل دو گروه اصلی نظام مند و تصادفی می‌باشند. خطاهای ناشی از در نظر نگرفتن برخی فراسنجهای یا قیدها در شبیه بوده و خطاهای تصادفی نتیجه مستقیم خطاهای موجود در نمونه‌برداری می‌باشند. خطاهای ناشی از فراسنج بر اثر خطا در برآورد دقیق فراسنجهای ورودی شبیه به وجود می‌آیند. عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌ها به علت اندازه‌گیری‌های نادقیق، غیرهمگن و پرت بودن داده‌ها، خطاهای مربوط به جمع‌آوری داده‌ها، ثبت آنها و تعداد نابسندگی آنها است. عدم قطعیت‌های مربوط به عملکرد سازه ناشی از خطاهای موجود در مرحله‌ی ساختن و بهره‌برداری و نگهداری از سازه می‌باشد (تانگ، ۱۹۹۹). در این زمینه مطالعاتی صورت گرفته است که از آن جمله به موارد ذیل می‌توان اشاره نمود:

طراحی بر اساس خطرکردن در دهه‌های اخیر مبنای بسیاری از آیین‌نامه‌ها قرار گرفته است (کراچیان و همکاران، ۱۳۷۸). روش طراحی فوق، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و آبشناسی ذاتی در سامانه‌های انتقال فاضلاب به وسیله‌ی میز و ین در سال ۱۹۷۵ و تانگ و همکارانش در سال ۱۹۷۵ و ین و همکارانش در سال ۱۹۷۶ بررسی شد (ین و تانگ، ۱۹۹۳). میز (۱۹۷۹)

با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های آبشناسی ذاتی و هیدرولیکی، کالورتها را طراحی نمود. وی در ارزیابی عدم قطعیت‌های هیدرولیکی از روش گشتاور دوم مرتبه‌ی اول پیرامون میانگین استفاده کرد. لی (۱۹۸۶) عدم قطعیت هیدرولیکی ایجاد شده به علت ناتوانی شبیه‌های ریاضی و معادلات تجربی را برای تعیین ظرفیت گوره مورد بررسی قرار داده است. نامبرده از معادله‌ی مانینگ برای تعیین ظرفیت استفاده نموده، و عدم قطعیت فراسنج ضریب زبری را در آن اعمال کرده است. تانگ (۱۹۸۷) تأثیر عدم قطعیت را در طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از تحلیل خطرکردن بررسی نمود. وی همچنین تأثیر عدم قطعیت آبشناسی ذاتی و عدم قطعیت فراسنج-های هیدرولیکی را در طراحی نمونه‌ای از سازه‌ها مانند گوره مورد بررسی قرار داد. افشار و همکاران (۱۹۹۴) یک شبیه بهینه‌سازی انحراف رود را تهیه نموده‌اند. در این شبیه عدم قطعیت در تعیین میزان سیلاب طراحی، و عدم قطعیت هیدرولیکی، در نظر گرفته شد. عدم قطعیت‌های طراحی با استفاده از گشتاور دوم مرتبه‌ی اول اعمال شده است. شبیه تهیه شده درباره‌ی سد کارون مورد بررسی قرار گرفته است. افشار و پرزایان (۱۹۹۸) سامانه انحراف موقت رود را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و آبشناسی و روندیابی سیلاب بهینه‌سازی کردند. رسته‌ی مهندسی ارتش ایالات متحده (۲۰۰۵) به تحلیل و بررسی فرایند تحلیل خطرکردن به منظور بهبود و اصلاح گوره‌های مهار کردن سیلاب رود ساکرامنتو پرداخت. در این گزارش نتایج حاصل از فرایند قطعی با نتایج فرایند تحلیل خطرکردن مقایسه، برای تحلیل و بررسی فرایند قطعی از تحلیل حساسیت، و برای فرایند خطرکردن از عدم قطعیت آبشناسی و هیدرولیکی استفاده شد.

خاکباز (۱۳۸۰)، در ارتباط با تحلیل خطرکردن و قابلیت اعتماد سیل بندها پژوهش نمود که در آن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و آبشناسی در بررسی عدم قطعیت نیمرخ سطح آب مطالعه شد. عدم قطعیت آبشناسی بررسی شده شامل عدم قطعیت‌های موجود در اندازه سیلاب و عاملهای باد می‌باشد که ارزیابی خطرکردن روگذری ناشی از باد یکی از عاملهای اصلی مورد مطالعه آن می‌باشد. افتخاریان

عدم قطعیت‌های آشناسی، هیدرولیکی، اقتصادی و ژئوتکنیکی با کاربرد تحلیل خطر کردن تهیه شده است. در طرح‌های مهار کردن سیلاب سود عبارت است از جلوگیری یا کاهش خسارت سیلاب در ناحیه‌ی مورد خطر، و هزینه عبارت است از مجموع هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سامانه (رسته‌ی مهندسی ارتش ایالات متحده، ۱۹۹۶). در این مطالعه سازه‌ی گوره که یکی از روش‌های معمول مهار کردن سیلاب است برای، هدایت سیلابها به پایین دست در نظر گرفته شده است. گوره، بند خاکی کوتاهی است که در فواصل مختلف از کناره‌ی دو طرف رود و در امتداد آنها ساخته می‌شود تا به عنوان کناره‌های مصنوعی در دوره‌های سیلابی، که آب رود از بستر طبیعی خود بیرون می‌رود، زمینهای اطراف رود را از آب گرفتگی محافظت کند. شبیه بهینه‌سازی، یک شبیه غیرخطی بوده و حل آن به وسیله‌ی نرم افزار LINGO-13، ضمن تعیین ابعاد بهینه‌ی مولفه‌های سامانه در هر سیل طراحی از قبیل: ارتفاع گوره و عقب‌نشینی آن (setback) از کرانه رود، سیل طرح (Design Flood) را نیز نتیجه می‌دهد. از آن جا که ساختار شبیه و فراسنج‌های آن، و نیز بده طراحی سیل، عدم قطعیت‌هایی دارند، نتایج شبیه را نمی‌توان قطعی تلقی کرد؛ از این رو برای تحلیل عدم قطعیتها از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. تولید متغیرهای تصادفی، در دو حالت: یکی با استفاده از قابلیت شبیه‌سازی خود نرم‌افزار LINGO و در حین اجرای شبیه و بدون اعمال همبستگی بین متغیرها و بار دیگر در خارج از محیط LINGO (با استفاده از نرم افزار Excel) و با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته انجام گردیده، و در این حالت متغیرهای تصادفی تولیدی به عنوان ورودی در شبیه بهینه‌سازی استفاده شده است. در پایان، نتایج این دو حالت نیز با هم مقایسه شده اند.

مواد و روش‌ها

عدم قطعیت آشناسی: عدم قطعیت‌های آشناسی شامل عدم قطعیت در محاسبه‌ی سیل طراحی و ارتفاع موج ناشی از باد است. یک عامل در ایجاد خطر و عدم قطعیت، نوع توزیع برازش یافته بر آمار بده‌های سیل و بادهای ثبت

(۱۳۸۲)، قابلیت اعتماد سیل‌بندها را با در نظر گرفتن فراسنجهای هیدرولیکی و آشناسی مورد بررسی قرار داد. وی عدم قطعیت فراسنجهای هیدرولیکی ضریب مانینگ، شیب خط کارمایه و خصوصیات هندسی مقطع در نتیجه-ی خطاهای اندازه‌گیری بررسی کرده و عدم قطعیت رابطه مانینگ را با روش گشتاور دوم مرتبه‌ی اول حول میانگین محاسبه نمود. سنگین آبادی (۱۳۸۴)، تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و آشناسی را بر نیمرخ سطح آب و قابلیت اعتماد دیواره‌های سیل بند را مورد مطالعه قرار داد و روشهای سنتی و امروزی تحلیل خطر کردن را برای تعیین ارتفاع دیوار بطور مختصر مقایسه کرد. سرابندی (۱۳۸۷) به شناخت مبانی، ابزار و ملزومات یک طرح مهار کردن سیلاب، روشهای کاهش زیانهای سیل و نحوه‌ی تحلیل اقتصادی طرحهای مهار کردن سیلاب پرداخته است. در یک مطالعه موردی نیز که درباره‌ی رود خشک معالی آباد شیراز انجام گرفته است، به استفاده از شبیه بهینه‌ی ترکیبی سد-گوره برای اجرای طرح مهار کردن سیلاب در منطقه‌ی مورد خطر با تحلیل اقتصادی سود-هزینه پرداخته‌است. رفیعی انزاب (۱۳۸۹) به بررسی یک طرح مهار کردن سیلاب، انواع زیانهای حاصل از سیل و نحوه‌ی تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی ابعاد طراحی خاکریزهای کناره‌ی رود (گوره) پرداخته‌است. همچنین با معرفی رود خشک معالی آباد شیراز از شبیه بهینه‌ی گوره برای اجرای طرح مهار کردن سیلاب در منطقه مورد خطر استفاده نموده است. بهروز و همکاران (۱۳۹۲) به طراحی بهینه‌ی ابعاد سازه‌ی گوره با اعمال انواع عدم قطعیت‌های آشناسی، هیدرولیکی و اقتصادی و ژئوتکنیکی پرداخته اند و برای شبیه غیر خطی احتمالاتی تهیه شده از اطلاعات رود Leaf در ایالت می‌سی‌سی‌پی استفاده کردند. ایشان همچنین از این شبیه برای تعیین ابعاد گوره در رود خشک شیراز نیز بهره برده و به بررسی میزان تاثیر هر یک از عدم قطعیتها در ابعاد گوره و سایر متغیرهای طراحی نیز پرداخته اند.

در اغلب تحقیقات انجام شده به عدم قطعیت‌های مختلف، و وجود همبستگی آنها توجه نشده است. هدف این مقاله بررسی لزوم اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته است. بدین منظور یک شبیه بهینه‌سازی با لحاظ نمودن

عدم قطعیت اقتصادی: عدم قطعیت اقتصادی، شامل عدم قطعیت‌های موجود در تجزیه و تحلیل اقتصادی و برآورد سودها و هزینه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال، در مناطق شهری تعیین ارتفاع متوسط طبقه‌ی همکف ساختمانها، ارزش اجناس داخل ساختمانها، نرخ بازگشت سرمایه و ... همواره با تقریب و عدم قطعیت همراه است (رسته مهندسی ارتش ایالات متحده، ۱۹۹۶).

هزینه‌ی ساخت گوره به دلیل تقریب در تخمین ارزش اجزای سازه‌ای، تورم و مانند آن، همواره با عدم قطعیت محاسبه می‌شود. همچنین، محاسبه‌ی هزینه‌های ناشی از سیلاب در سیلابدشت، به دلیل برآورد تقریبی مواردی چون خسارت وارد شده به ساختمانها، جاده‌ها و تأسیسات شهری، محصولات کشاورزی و غیره همواره با تقریب و عدم قطعیت توأم است. نرخ بهره و نرخ تورم نیز جزء فراسنج‌هایی می‌باشند که در تخمین آنها، عدم قطعیت وجود دارد. بدیهی است که بررسیهای اقتصادی به منظور انتخاب گزینه‌ای ایمن و با عدم قطعیت پایین ضروری می‌باشد. نتیجه‌ی مستقیم چنین مطالعاتی، کاهش زیانهای سالانه‌ی مورد انتظار است. در آن صورت، اهداف بلند مدت سازه تثبیت شده و خطرکردن تخریب آن کاهش می‌یابد.

تحلیل خطرکردن

در حالت کلی، دو عامل موثر در انتخاب ابعاد و فراسنج‌های طراحی، عامل هزینه (اقتصاد طرح) و اطمینان (ایمنی) طرح می‌باشند. متناسب با نوع طرح و میزان حساسیت آن، و حتی نظر و قضاوت کارشناسانه، هر یک از این دو عامل ممکن است، مبنای اصلی انتخاب ابعاد طراحی در نظر گرفته شود. هر دو این عوامل، در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

یکی از مزایای شبیه احتمالاتی این است که می‌توان در مورد ابعاد طراحی تصمیم گرفت و از میان خروجی‌های مختلف، گزینه‌ی مطلوب را انتخاب کرد. موثر بودن عامل اقتصاد، یا عامل ایمنی، در انتخاب ابعاد طراحی بدین معناست که ممکن است با توجه به موقعیت برنامه و سازه، میزان اهمیت و سایر ملاحظات، یک مقدار معینی خطرکردن برای اقتصاد طرح و ایمنی آن قابل قبول باشد.

شده در محل اجرای برنامه می‌باشد، چرا که غالباً آماره-های میانگین و انحراف معیار کمیت‌های آشناسی در توزیعهای مختلف، متفاوت می‌باشند.

یکی از مسائلی که اغلب در هیدرولوژی با آن روبرو هستیم، برآورد بده سیلابی با استفاده از نمونه‌های کوچکی از مشاهدات جریان رود است. با استفاده از روشهای تحلیل آماری-احتمالی، مقدار متغیر آشناسی با دوره‌ی بازگشت مورد نظر برآورد می‌شود. همچنین، توزیع احتمالی مقدار مذکور نیز بسیار مهم می‌باشد، که بدین منظور از داده‌های موجود استفاده گردیده و فراسنجهای مربوط به توزیع احتمال محاسبه می‌شوند.

در مجموع، عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه‌ی سیلاب با یک دوره‌ی بازگشت معین دارای دو منبع اساسی است، یکی عدم قطعیت مربوط به شبیه‌های آماری و دیگری عدم قطعیت‌های مربوط به فراسنجهای سیلاب. غالباً عدم قطعیت در برآورد فراسنجهای سیلاب مهمتر از عدم قطعیت در شبیه‌های برازش یافته می‌باشد (پلیت، ۲۰۰۱).

عدم قطعیت هیدرولیکی: عدم قطعیت‌های هیدرولیکی از ساده سازی در شبیه‌های ریاضی و توصیف پدیده‌های فیزیکی و طبیعی در مهندسی هیدرولیک، اجرای غیر مطلوب سازه‌های هیدرولیکی و ... نشات می‌گیرد (میز، ۱۹۹۶). عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، شامل عدم قطعیت-های موجود در ارزیابی ظرفیت مقطع رود بوده و از دو منبع اساسی شبیه و فراسنج ناشی می‌شود. هر چند، عدم قطعیت در داده‌های موجود نیز نباید از دید طراح پنهان بماند، لکن وجود عدم قطعیت‌های ناشی از شبیه و فراسنج بسیار مهمتر و دارای تأثیر مضاعف بوده، و لازم است که در تعیین کمی مقدار آنها توجه کافی مبذول گردد (میز، ۱۹۹۶).

عدم قطعیت‌های مربوط به شبیه هیدرولیکی و فراسنجهای آنها، ناشی از استفاده از یک شبیه هیدرولیکی مشخص در توصیف شرایط جریان می‌باشد، بنابراین، تنها راه برخورد با این گونه عدم قطعیتها، استفاده از شبیه‌های هیدرولیکی و احتمالاتی مختلف، و در پایان گزینش بهترین آنها می‌باشد. طبعاً شبیه‌های با محدودیت کمتر می‌توانند به مقدار قابل توجهی عدم قطعیت موجود در شبیه‌های هیدرولیکی را کاهش دهند.

مانینگ در ساحل چپ و راست محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن ضریب همبستگی، باید منحنی ضریب زبری مانینگ معادل با بدهی طراحی رسم شود. در مقاطع مرکب روشهای مختلفی جهت تعیین ضریب زبری مانینگ معادل وجود دارد که در این مطالعه از یکی از ۲۶ رابطه‌ی ارائه شده به وسیله ی Chen و Yen (۲۰۰۲) استفاده شده است. این روش منجر به تولید تراز سطح آب بیشتری نسبت به سایر معادلات شده و از این رو به منظور رعایت ایمنی از طغیان و آب گرفتگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (فغفور مغربی و حیدر بیگی، ۱۳۸۸). در این روش اغلب، سطح مقطع جریان به تعدادی زیر مقطع تقسیم می‌شود. شکل ۱ که هر زیر مقطع، دارای قطعه‌ای از پیرامون مرطوب با زبری یکنواخت می‌باشد (فلینتام و کارلینگ، ۱۹۹۲):

$$n_e = \left[\frac{1}{A} \sum n_i^2 A_i \right]^{0.5} \quad (1)$$

در این رابطه، n_e ضریب زبری مانینگ معادل، A_i و n_i به ترتیب مساحت و ضریب زبری مانینگ هر یک از زیر مقطعها می‌باشد.

در ادامه منحنی لگاریتمی بدهی طراحی و ضریب زبری مانینگ معادل رسم شده و از برازش خطی بر آنها، مقدار همبستگی بین این دو متغیر محاسبه خواهد بود. در بخش بعد، روابط مربوط به تولید اعداد تصادفی وابسته و نحوه استفاده از ضریب همبستگی حاصل آورده شده است.

در این صورت با توجه به این اندازه‌ی خطرکردن می‌توان در مورد ابعاد طراحی حاصل از اجرای شبیه، تصمیم گرفت.

تحلیل عدم قطعیت

از دیدگاه احتمالاتی در مسائل مهندسی آب، برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت روشهای مختلفی وجود دارد. این روشها به سه دسته، تحلیلی^۱، تقریبی^۲ و شبیه‌سازی^۳ طبقه‌بندی می‌شوند (تانگ، ۱۹۹۶). هریک از این روشها در سطوح مختلفی از پیچیدگی از دیدگاه ریاضی، و نیز نقطه‌ی نظر تعیین برآورد فراسنج‌ها و داده‌های مورد نیاز قرار دارند. انتخاب روش مناسب به ماهیت مساله، میزان دسترسی به اطلاعات، پیچیدگی شبیه ریاضی مورد استفاده و نوع و دقت نتایج خواسته شده بستگی دارد (تانگ و ین، ۱۹۹۳).

در مواردی که رابطه‌ی بین ورودی و خروجی بطور صریح یا ضمنی مشخص نباشد، استفاده از شبیه‌ها ضروری است. طبیعتاً، در این شرایط نمی‌توان از روشهای تحلیلی یا تقریبی استفاده کرد. رویکردی که در این شرایط مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش شبیه‌سازی مونت کارلو است.

همبستگی متغیرهای تصادفی و شبیه سازی آنها

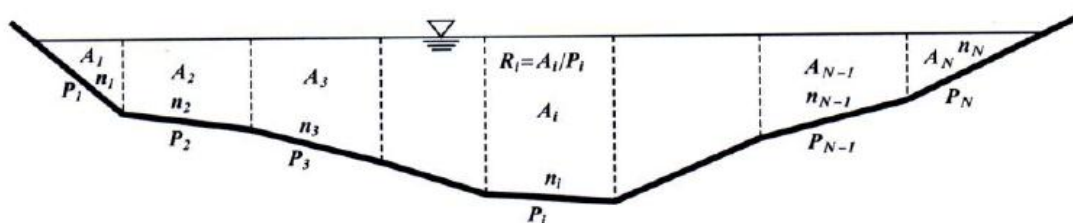
در بسیاری از مسائل مهندسی، بطور معمول با متغیرهای تصادفی وابسته روبرو می‌باشیم. به عنوان مثال، بسیاری از داده‌ها و اطلاعات موجود نشان می‌دهند که دو متغیر بده اوج و حجم آب نگار سیلاب به هم وابسته‌اند. همچنین، با توجه به توضیحاتی که در مورد عدم قطعیت آبشناسی و هیدرولیکی ارائه شده است، می‌توان دریافت که دو متغیر بده طراحی و ضریب زبری مانینگ، که به ترتیب در برگزیده‌ی عدم قطعیت آبشناسی و هیدرولیکی می‌باشند، به هم وابسته بوده و باید در طراحیها همبستگی بین این دو فراسنج در نظر گرفته شود.

جهت تعیین همبستگی بدهی طراحی و ضریب زبری مانینگ، هر بار یکی از بده‌های طراحی (منظور بده با دوره‌ی برگشت مشخص است.) به عنوان بدهی مقطع بر مقطع معادل، در نظر گرفته‌شده و با استفاده از رابطه‌ی مانینگ، ضریب زبری مانینگ در بستر رود و ضریب زبری

¹- analytic

²- approximate

³- simulation



شکل ۱- جریان در یک نهر با زبری غیریکنواخت با زیر مساحت‌هایی که به وسیله ی خطوط قائم از هم جدا شده‌اند.

جدول ۱- بده های اوج در منطقه مستعد خطر.

T (year)	۲	۵	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
Qpeak(m ³ /s)	۸۳.۰	۱۲۰.۷	۱۴۴.۵	۱۶۷.۰	۱۹۸.۸	۲۹۳.۹	۳۲۶.۱	۳۶۶.۴	۴۰۰.۵

در این رابطه u متغیر مستقل یکنواخت u(0,1) می‌باشد (تانگ و ین، ۲۰۰۵).

تولید متغیر تصادفی مستقل با توزیع لاگ بهنجار اگر متغیر تصادفی X دارای توزیع لاگ بهنجار با میانگین μ_x و انحراف معیار σ_x به صورت $X = LN(\mu_x, \sigma_x)$ باشد، آن گاه متغیر $Y = \ln(X)$ دارای توزیع بهنجار خواهد بود. میانگین و انحراف معیار متغیر $\ln(X)$ از طریق روابط (۶) و (۷) قابل محاسبه است. در نتیجه از آن جا که $Y = \ln(X)$ دارای توزیع بهنجار می‌باشد، متغیر تصادفی $X = LN(\mu_x, \sigma_x)$ به طریق زیر قابل محاسبه خواهد بود (تانگ و ین، ۲۰۰۵).

$$\sigma_y = \left[\ln \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\mu_y = \ln(\mu_x) - 0.5 * \sigma_y^2 \quad (7)$$

ابتدا μ_y و σ_y و سپس متغیر معیار بهنجار Z طبق رابطه‌ی (۵) محاسبه شده، با استفاده از رابطه‌ی (۸) متغیر Y تولید خواهد شد:

$$Y = \mu_{\ln x} + \sigma_{\ln x} Z \quad (8)$$

پس از آن متغیر تصادفی X از رابطه (۹) حاصل می‌گردد:

$$X = e^Y \quad (9)$$

تولید متغیرهای تصادفی وابسته با توزیع بهنجار

در بخشهای قبل درباره‌ی تولید متغیرهای تصادفی مستقل بحث شد. در بسیاری از مسائل مهندسی، بطور معمول با متغیرهای تصادفی وابسته روبرو می‌باشد. شبیه‌سازی سامانه‌های با متغیرهای تصادفی وابسته، باید

تولید عدد تصادفی

در این قسمت، نحوه‌ی تولید متغیرهای تصادفی مستقل و متغیرهای تصادفی وابسته با استفاده مشخصه‌های آماری مرتبط، از جمله میانگین و انحراف معیار، شرح داده است.

تولید متغیر تصادفی مستقل با توزیع بهنجار

برای یک متغیر تصادفی X با توزیع بهنجار که دارای میانگین μ_x و انحراف معیار σ_x می‌باشد، رابطه‌ی بین متغیر X و متغیر بهنجار معیار Z به صورت زیر است:

$$X = N(\mu_x, \sigma_x) \quad (2)$$

$$X = \mu_x + Z\sigma_x \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳) متغیر تصادفی بهنجار معیار با میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد رابطه‌ی ۴.

$$Z = N(0,1) \quad (4)$$

براساس رابطه‌ی (۳) متغیر تصادفی بهنجار X با میانگین و انحراف معیار مشخص، با استفاده از متغیر بهنجار معیار Z قابل تولید می‌باشد (تانگ و ین، ۲۰۰۵).

روشهای متعددی برای تولید متغیر بهنجار معیار وجود دارد. یکی از این روشها، الگوریتم باکس-مولر^۱ می‌باشد که در ادامه تشریح شده است.

الگوریتم باکس - مولر: این الگوریتم متغیر معیار بهنجار $Z = N(0,1)$ را از طریق رابطه (۵) تولید می‌کند:

$$Z = \sqrt{-2 \ln(u)} \cos(2\pi u) \quad (5)$$

¹ - Box-Muller Algorithm

بر اساس تبدیل ارتوگونال^۶ با استفاده از ماتریس کوواریانس C_x یا ماتریس همبستگی R_x می‌باشد. ماتریس همبستگی در رابطه (۱۲) آورده شده است. (کاتز و همکاران، ۲۰۰۰):

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1k} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{k1} & \rho_{k2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

این تبدیل، یک بردار با متغیرهای تصادفی بهنجار مستقل را نتیجه می‌دهد که به راحتی با استفاده از روش باکس-مولر شرح داده شده می‌توان آن را تولید کرد.

- الگوریتم ریشه‌ی دوم

الگوریتم ریشه دوم، ماتریس کوواریانس C_x و ماتریس همبستگی R_x را به شکل زیر تجزیه می‌کند:

$$C_x = \tilde{L}\tilde{L}' \quad (13)$$

$$R_x = LL' \quad (14)$$

که در آن L و \tilde{L} به ترتیب ماتریسهای پایین مثلثی $K \times K$ متناظر با ماتریسهای همبستگی و کوواریانس می‌باشند.

علاوه بر مقارن بودن، اگر R_x یا C_x ماتریس مثبت متناهی باشند، روش تجزیه‌ی چولسکی^۷ راهی موثر برای یافتن ماتریسهای پایین مثلثی L و \tilde{L} می‌باشد.

با استفاده از ماتریس L یا \tilde{L} بردار متغیرهای تصادفی بهنجار چند متغیره را می‌توان چنین بیان کرد:

$$X = \mu_x + \tilde{L}Z' \quad (15)$$

که در آن بردار ستونی $K \times 1$ متغیرهای معیار بهنجار مستقل می‌باشد (تانگ و یین، ۲۰۰۵).

- روش چولسکی: هر ماتریس معمولی A ، می‌تواند به شکل رابطه‌ی (۱۶) تجزیه شود (تانگ و یین، ۲۰۰۵):

$$A = LU \quad (16)$$

که در آن، ماتریس L پایین مثلثی و ماتریس U بالا مثلثی است.

هنگامی که ماتریس A ماتریس مقارن، مثبت و متناهی باشد، در آن صورت می‌توان رابطه‌ی (۱۶) را به صورت رابطه‌ی (۱۷) نوشت که در آن $U = L'$ می‌باشد:

به گونه‌ای باشد که ویژگیهای آماری هر یک از متغیرها و وابستگی بین آنها حفظ شود. تولید متغیرهای تصادفی وابسته در مقایسه با متغیرهای تصادفی مستقل محدودیت بیشتری در نوع توزیع احتمالاتی مورد استفاده داشته و اغلب در تولید آنها توزیع‌های بهنجار، لاگ بهنجار و گاما^۱ استفاده می‌شود (رونینگ، ۱۹۷۷. جانسون، ۱۹۸۷، پریش، ۱۹۹۰). بطور کلی، الگوریتم تولید متغیرهای تصادفی مستقل به عنوان الگو و پایه‌ی اصلی، برای تولید متغیرهای تصادفی وابسته می‌باشد.

یک بردار تصادفی چند متغیره $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ با توزیع بهنجار را در نظر بگیرید که دارای بردار میانگین μ_x و بردار کوواریانس C_x می‌باشد ($X \sim N(\mu_x, C_x)$). تابع چگالی احتمال پیوسته‌ی K متغیر تصادفی بهنجار به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد (کاتز و همکاران، ۲۰۰۰).

$$f_x(X) = \frac{|C_x^{-1}|^{0.5}}{(2\pi)^{k/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X - \mu_x)' C_x^{-1} (X - \mu_x)\right] \quad (10)$$

for $-\infty < X < \infty$

که در آن $\mu_x = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)'$ یک بردار ستونی $K \times 1$ است. بالانویس^۲ t نشان‌دهنده‌ی ترانهاده^۳ بردار بوده و C_x بردار $K \times K$ کوواریانس^۴ می‌باشد که به صورت زیر است:

$$C_x = \text{Cov}(X) = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_{k1} & \sigma_{k2} & \dots & \sigma_{kk} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ماتریس کوواریانس، یک ماتریس مقارن است که در آن برای هر $j \neq k$ داریم: $\sigma_{jk} = \sigma_{kj}$ و در آن $\sigma_{jk} = \text{Cov}(X_j, X_k)$ می‌باشد.

یکی از روشهای تولید متغیرهای تصادفی بهنجار چند متغیره روش یا الگوریتم ریشه‌ی دوم^۵ است. این الگوریتم

1 - Gamma
2 - Superscript
3 - Transpose
4 - Covariance
5 - Square-root Algorithm

6 - Orthogonal transformation

7 - Cholesky Decomposition

گردد. از طرفی زمان اجرای شبیه و تحلیل نتایج نیز بطور مستقیم افزایش می‌یابد. البته هرچه تعداد اجراهای شبیه سازی بیشتر باشد، حالات احتمالی بیشتری در فضای ممکن (فضای جواب) بررسی می‌گردند.

در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، در هر اجرا برای هر یک از متغیرهای تصادفی یک مقدار احتمالی بین حد پایین و حد بالای متغیرهای مربوطه تولید می‌شود که فراوانی آن، از تابع توزیع احتمالات آن متغیر پیروی می‌کند. بدین طریق در هر اجرا، یک مجموعه‌ی جواب، که در تناظر یک به یک با متغیر تصادفی تولید شده می‌باشد فراهم می‌گردد که بیانگر یکی از حالات ممکن مطلوبیت می‌باشد.

روش مونت کارلو به عنوان روشی در نظر گرفته می‌شود که از اعداد تصادفی برای یافتن راه حل‌های یک شبیه استفاده می‌نماید. اعداد تصادفی، متغیرهای تصادفی مستقلی که به صورت یکنواخت در فاصله‌ی بین صفر و یک (۰ و ۱) توزیع می‌شوند. به صورت ساده، شبیه سازی مونت کارلو، با تلفیق شبیه سازی و نمونه گیری تصادفی، نمایشنامه‌هایی از آینده را تولید می‌کند. عملاً، روش شبیه سازی مونت کارلو برای آنالیز ریسک، کمی نمودن آن، آنالیز حساسیت، و پیش بینی به کار گرفته می‌شود. این روش قادر است تا سامانه‌های واقعی را با استفاده از محاسبات تصادفی و عدم قطعیت‌های موجود در آینده شبیه سازی کرده و حالت‌های مختلف را ارزیابی کند، تا در نهایت با استفاده از تحلیل نتایج در خروجی شبیه، ریسک تصمیم گیری حداقل گردد (کروس و همکاران، ۲۰۱۱).

اگر چندین متغیر غیر قطعی، که هر یک می‌تواند تعداد زیادی از مقادیر ممکن را اختیار کند، به عنوان متغیرهای ورودی در یک برنامه در نظر گرفته شوند، در عمل امکان به کارگیری روش‌های تحلیلی برای ارزیابی خطر وجود ندارد. در چنین حالتی می‌توان با برداشتن n نمونه از جامعه مورد نظر، تخمینی از فراسنج‌های آماری جامعه‌ی نمونه را به دست آورد و فراسنج‌های جامعه کل را شبیه سازی کرد. نمونه‌ای که از جامعه برداشته می‌شود بایستی حتی الامکان معرف کل جامعه را باشد تا تخمین درستی از توزیع جامعه در اختیار بگذارد. هر چه شمار نمونه‌ها بیشتر باشد این تشابه بیشتر خواهد بود. روش شبیه سازی مونت کارلو، عدم قطعیت‌های احتمالی موجود را در خروجی

$$A = LL^t \quad (17)$$

در نتیجه داریم:

$$I_{kk}^2 + \sum_{j=1}^{k-1} I_{kj}^2 = a_{kk} \quad \text{for } k=1,2,\dots,K \quad (18)$$

$$I_{kk}I_{jj} + \sum_{j=1}^{i-1} I_{kj}I_{ji} = a_{kj} \quad \text{for } k=j+1,\dots,K \quad (19)$$

که در آن، I_{ij} و a_{ij} به ترتیب مؤلفه‌های ماتریس A و L می‌باشند. همچنین، روابط (۱۸) و (۱۹) را می‌توان به شکل روابط زیر نیز نوشت:

$$I_{ii} = \left(a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ik}^2 \right)^{0.5} \quad (20)$$

$$I_{ij} = \frac{1}{I_{ii}} \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} I_{ik}I_{jk} \right) \quad \text{for } i=j+1,\dots,K \quad (21)$$

براساس رابطه‌ی (۱۵) و توضیحات روش چولسکی، مراحل تولید متغیرهای تصادفی بهنجار چند متغیره براساس الگوریتم ریشه دوم، به شرح زیر می‌باشد (تانگ و یین، ۲۰۰۵):

۱- تولید ماتریس پایین مثلثی از ماتریس همبستگی یا کوواریانس، با استفاده از روش چولسکی.

۲- تولید K متغیر تصادفی بهنجار براساس الگوریتم باکس-مولر (رابطه ۵).

۳- تولید متغیرهای تصادفی بهنجار با استفاده از رابطه (۱۵).

۴- تکرار مراحل ۱ تا ۳، برای تولید این متغیرها به تعداد مطلوب.

شبیه سازی مونت کارلو

اساس روش شبیه سازی مونت کارلو، نمایش ترکیبات تصادفی حالات ممکن از عدم قطعیت‌هایی است که در یک پدیده رخ می‌دهند. در این روش، ابتدا تابع توزیع احتمالات انواع عدم قطعیت‌های که شناسایی شده‌اند، به وسیله‌ی کارشناسان و گاهی تجربیات طرح‌های گذشته تعیین می‌گردند. به عنوان مثال، ممکن است هزینه، که یکی از عدم قطعیت‌های مشترک در برنامه‌های مختلف می‌باشد، از توزیع بهنجار پیروی نماید.

در مرحله‌ی دوم تعداد اجراهای شبیه سازی تعیین می‌گردد. این تعداد بسته به پیچیدگی و ابعاد طرح و اهمیت ریسک‌های مورد بررسی در طرح تعیین می‌گردد (مورگان و هنریون، ۱۹۹۰) و می‌تواند ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ... انتخاب

$$Q_{\text{design}} = \bar{Q}_{\text{design}} + \rho \times s_n \times s_Q \times Z_1 + s_Q^2 \times Z_2 \quad (18)$$

که در آنها Z_1 و Z_2 متغیر معیار بهنجار و ρ ضریب همبستگی دو متغیر وابسته می‌باشند.

بدین ترتیب ۱۰۰ مقدار از دو متغیر معیار بهنجار Z_1 و Z_2 فراهم آمده، سپس دو فراسنج n_m و Q_{design} تولید می‌شود.

جهت شبیه‌سازی عدم قطعیت اقتصادی، از فراسنج نرخ بهره (\bar{i}) استفاده گردیده است. فرض شده که این فراسنج، یک متغیر تصادفی بهنجار است. در این تحلیل این متغیر، با دیگر متغیرهای ورودی، همبستگی نداشته و می‌تواند به صورت مستقل تولید گردد. روش کار به شرح زیر است:

\bar{i} فراسنج نرخ بهره با میانگین \bar{i} و انحراف معیار s_n دارای توزیع بهنجار می‌باشد، بدین ترتیب می‌توان این فراسنج را به روال زیر تولید کرد:

$$i = \bar{i} + s_n \times Z \quad (15)$$

که در آن Z متغیر معیار بهنجار با میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد.

بدین ترتیب با تولید N مقدار Z می‌توان N مقدار i تولید نمود.

شبیه‌سازی

در روشهای متداول و سنتی طراحی سازه‌ها برپایه خطرپذیری برای در نظر گرفتن عدم قطعیتها از ضرایب اطمینان استفاده می‌شود. این ضرایب براساس تجربیات و قضاوت مهندسی تعیین گردیده و نمی‌توانند ایمنی و عملکرد مطلوب سامانه را تامین کنند. در طراحی اصولاً تصمیم‌گیریها بستگی زیادی به پاسخ سامانه در شرایط طراحی دارد. در صورت غیر قطعی بودن برخی اجزا، پاسخ سامانه دارای اطمینان کافی نیست. همین مساله بررسی عدم قطعیت را در طراحیها ضروری می‌سازد. برای توصیف و کمی‌سازی عدم قطعیت متغیرهای تصادفی از مشخصه‌های مختلفی استفاده می‌شود که برخی از آنها عبارتند از: تابع چگالی احتمال، بازه اطمینان متغیر برای احتمال مشخص و گشتاورهای آماری. یکی از مناسبترین روش‌های کمی‌سازی عدم قطعیت استفاده از گشتاورهای آماری مانند میانگین و انحراف معیار است. در این مقاله

شبیه‌سازی می‌کند. این عدم قطعیتها ناشی از تغییر پذیری مقدار متغیرهای ورودی است که در اثر عوامل مختلفی به وجود می‌آیند. در روش مونت کارلو، الگوی تغییرات احتمالی به وسیله اعداد تصادفی شبیه‌سازی می‌گردد. اعداد تصادفی به گونه‌ای تولید می‌شوند که احتمال رخدادان هر کدام یکسان باشد.

شبیه‌سازی مونت کارلو در LINGO

به رغم مزیت نرم‌افزار LINGO در قابلیت به کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو در بهینه‌سازی استوکستیک، متاسفانه این نرم افزار تأثیرات متقابل عدم قطعیتها را بر یکدیگر، که ناشی از همبستگی بین متغیرهای تصادفی ورودی است، در نظر نمی‌گیرد.

در شبیه‌سازی مونت کارلو در LINGO، انتخاب مقادیر مختلف برای هر عدم قطعیت، متغیر تصادفی، بدون در نظر گرفتن تعامل آن با دیگر عدم قطعیتها می‌باشد. در واقعیت، بین عدم قطعیتها (متغیرهای تصادفی) تأثیرات متقابل با درجات مختلف همبستگی وجود دارند. اما در شبیه‌سازی مونت کارلو در LINGO، تولید متغیرهای تصادفی کاملاً مستقل از این اثرات متقابل صورت می‌پذیرد، که در نتیجه، بسیاری از حالات ناسازگار با شرایط واقعی در خروجی، حاصل می‌گردند.

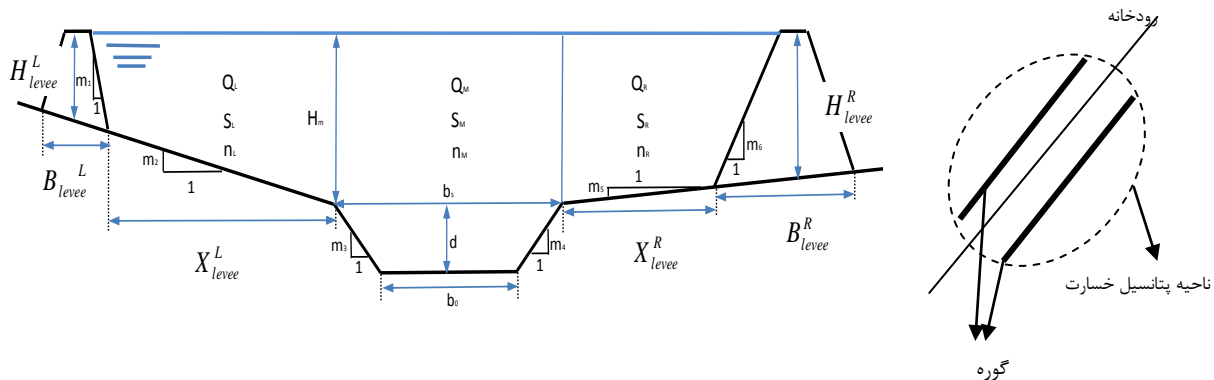
این روند و همبستگی در متغیرهای تصادفی مورد استفاده در شبیه‌سازی این مطالعه نیز وجود دارد. دو متغیر تصادفی، بدهی طراحی و ضریب زبری مانینگ به هم وابسته اند. جهت تعیین این همبستگی و لحاظ آن در شبیه‌سازی، مقطع تقریبی سیلابدشت در منطقه‌ی مستعد زیان در نظر گرفته شد و با تغییرات بدهی طراحی، رقوم معادل آب در سیلابدشت (از فرمول مانینگ) به دست آمد و سپس از رابطه‌ی (۱) ضریب زبری مانینگ معادل حاصل شد. سپس رابطه همبستگی خطی بین مقادیر لگاریتمی این دو متغیر حاصل شد. در ادامه، متغیرهای تصادفی لگاریتمی با لحاظ همبستگی بین آنها تولید گردیده سپس به مقادیر معمولی (غیر لگاریتمی) تبدیل شدند.

تولید دو متغیر تصادفی وابسته با ضریب همبستگی ρ و توزیع لاگ بهنجار براساس شبیه‌سازی مونت کارلو:

$$n_m = \bar{n}_m + s_n^2 \times Z_1 + \rho \times s_n \times s_Q \times Z_2 \quad (17)$$

(۲) طرح واره‌ای از سامانه مورد نظر در این مطالعه را با اجزای آن نمایش می‌دهد. چنانچه در این شکل دیده می‌شود، اجزای اصلی سامانه عبارتند از: گوره، منطقه مستعد زیان، حوضه‌ی آبخیز بالادست و رود. در این سامانه مقطع سیلابدشت در دو طرف رود متفاوت در نظر گرفته شده است.

جهت کمی سازی عدم قطعیت از میانگین و انحراف معیار، و جهت تحلیل عدم قطعیت از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو استفاده شده است. باید توجه نمود که روش و شبیه سازی کلی است و برای هر روش سازه‌ای مهار کردن سیلاب قابل کاربرد است. در این جا جهت تشریح بهتر، فرض شده است که سازه‌ی مهار کردنی گوره است. شکل



شکل ۲- طرح واره ای از سامانه‌ی مورد مطالعه.

$$EADwith = \sum_{j=K}^n \left[\frac{D(Q_{j,max}^{Pda}) + D(Q_{j+1,max}^{Pda})}{2} \right] \quad (19)$$

$$\times [F(Q_{j+1,max}^{Pda}) - F(Q_{j,max}^{Pda})]$$

$$\text{for } Q_c = Q_{K,max}^{pda} \leq Q_{K+1,max}^{pda} \leq \dots \leq Q_{n,max}^{pda} \leq \infty$$

در روابط یاد شده، EADwithout خسارت مورد انتظار سالانه‌ی ناشی از سیل در شرایط بدون طرح، EADwith خسارت مورد انتظار سالانه‌ی ناشی از سیل پس از اجرای طرح مهار کردن سیلاب، $D(Q_{j,max}^{pda,natural})$ خسارت ناشی از سیل با دوره‌ی برگشت T در منطقه‌ی مستعد خطر و $F(Q_{j,max}^{pda,natural})$ احتمال عدم وقوع سیل با دوره‌ی برگشت T می‌باشد. هزینه‌ی سالانه طرح از روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$ACOST = CRF \times (Clevee + LPRC + AOMR + CR_{levee}) \quad (20)$$

$$CRF = f_1(i, n) \quad (21)$$

$$Clevee = f_2(UPRC_{levee}^L, L_{levee}^L, H_{levee}^L, H_{levee}^R, B_L, B_R, m_1, m_6) \quad (22)$$

$$LPRC = f_3(UPRC_{land}^L, UPRC_{land}^R, X_{levee}^L) \quad (23)$$

$$AOMR = f_4(\beta, Clevee) \quad (24)$$

تابع هدف

تابع هدف شبیه بهینه‌سازی، حداکثرسازی سود خالص سالانه (Max ANB) حاصل از اجرای سازه مهار کردن سیلاب در منطقه مستعد خطر بوده، و با توجه به آن سیل طراحی انتخاب می‌گردد (رسته مهندسی ارتش ایالات متحده، ۱۹۹۶):

$$MAX ANB = ABEN - ACOST \quad (16)$$

که در آن، ANB سود خالص سالانه، ABEN سود سالانه و ACOST هزینه‌ی سالانه می‌باشند.

سود از تفاضل خسارت مورد انتظار سالانه در دو وضعیت بدون اجرای طرح مهار کردن سیلاب و وجود طرح مهار کردن سیلاب به دست می‌آید (چو و همکاران، ۱۹۸۸).

$$ABEN = EADwithout - EADwith \quad (17)$$

$$EADwithout = \sum_{j=1}^n \left[\frac{D(Q_{j,max}^{Pda,natura}) + D(Q_{j+1,max}^{Pda,natura})}{2} \right] \times [F(Q_{j+1,max}^{Pda,natura}) - F(Q_{j,max}^{Pda,natura})] \quad (18)$$

$$\text{for } Q_c = Q_{K,max}^{pda,natura} \leq Q_{K+1,max}^{pda,natura} \leq \dots \leq Q_{n,max}^{pda,natura} \leq \infty$$

راست رود، m_2 و m_5 به ترتیب شیب متوسط سیلابدشت در منطقه‌ی مستعد خطر در سمت چپ و راست رود، m_3 و m_4 به ترتیب شیب کناره‌های رود در سمت چپ و راست، b_0 عرض کف رود، b_s عرض فوقانی مقطع رود، d عمق رود، H_m فاصله لبه‌ی رود تا بالای گوره می‌باشد. بسط روابط تابعی به وسیله‌ی بهروز و همکاران (۱۳۹۲) ارائه شده است.

جدول ۲- هزینه های اجرایی.

واحد	ترم هزینه	فراسنج
ریال	۱۶۰۰۰۰۰	$UPRC_{lev}^L$
ریال	۱۶۰۰۰۰۰	$UPRC_{lev}^R$
ریال	۱۰۰۰۰۰۰	$UPRC_{land}^L$
ریال	۱۰۰۰۰۰۰	$UPRC_{land}^R$
-	۵۰	n
-	۰.۳	β

محدودیت‌های مربوط به عدم قطعیت فراسنج‌ها

در این بخش عدم قطعیت فراسنج‌های ضریب زبری مانینگ مربوط به هیدرولیک رود، بدهی طراحی مربوط به هیدرولوژی حوضه‌ی آبخیز و نرخ بهره مرتبط با اقتصاد طرح شبیه‌سازی شده است. برای این شبیه‌سازی طبق مطالعات پیشین به دو فراسنج بدهی طراحی و ضریب زبری، توزیع لاگ بهنجار و به فراسنج نرخ بهره، توزیع بهنجار برآزش داده شده است. برای کمی‌سازی عدم قطعیت از شاخصهای آماری میانگین و انحراف معیار استفاده شده است که به صورت رابطه‌ی ذیل می‌باشند.

$$n_m = LN(\bar{n}_m, s_n) \quad (30)$$

$$Q_{design} = LN(\bar{Q}_{design}, s_Q) \quad (31)$$

$$i = N(\bar{i}, s_i) \quad (32)$$

\bar{n}_m مقدار میانه فراسنج ضریب زبری مانینگ در توزیع لاگ بهنجار، \bar{Q}_{design} مقدار میانه فراسنج بدهی طراحی در توزیع لاگ بهنجار و \bar{i} مقدار میانه فراسنج نرخ بهره در توزیع بهنجار و s_n مقدار انحراف معیار ضریب زبری مانینگ، هر یک از فراسنج‌ها در توزیع مربوطه می‌باشد.

$$CR_{levee} = f_5(Clevee, F(Q_{j,max}^{pda,natural}), F(Q_{j,max}^{pda})) \quad (25)$$

که در آنها، CRF ضریب بازگشت سرمایه، $Clevee$ هزینه احداث گوره، $LPRC$ هزینه‌ی تملک اراضی مجاور رود، $AOMR$ هزینه‌ی بهره برداری و نگهداری گوره، CR_{levee} هزینه‌ی احداث مجدد گوره بعد از تخریب، i نرخ بهره، n عمر مفید سازه گوره به سال، $UPRC_{levee}$ هزینه‌ی واحد حجم ساختن گوره، $UPRC_{land}^L$ و $UPRC_{land}^R$ قیمت واحد زمین در منطقه مستعد خطر به ترتیب در ساحل چپ و راست رود، X_{levee}^R و X_{levee}^L به ترتیب فاصله‌ی پای گوره تا لب رود در ساحل چپ و راست، L_{levee} طول گوره، H_{levee}^L و H_{levee}^R به ترتیب ارتفاع گوره در ساحل چپ و راست رود، m_1 و m_6 به ترتیب شیب کناره‌های گوره در کرانه‌ی چپ و راست رود، B_L و B_R به ترتیب اندازه عرض فوقانی گوره در سمت چپ و راست رود، β ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری گوره (به صورت ضریبی از هزینه‌های اجرایی) می‌باشند.

محدودیت‌های مربوط به هندسه‌ی رود و گوره

طراحی گوره بر اساس حداکثر بده آب نگار سیل طراحی T ساله، ورودی به منطقه مستعد خطر صورت می‌گیرد، بنابراین، باید مجموع بدهی عبوری از مقطع میانی و کرانه‌های چپ و راست را برابر با بدهی اوج رود قرار داد و رابطه‌ی بین آنها را به صورت زیر (۲۶) نوشت:

$$Q_{T,max}^{pda} = Q_L + Q_M + Q_R \quad (26)$$

روابط زیر نحوه‌ی شبیه‌سازی طراحی گوره و اندازه‌ی عقب‌نشینی آن را، در منطقه‌ی مستعد خطر نشان می‌دهند.

$$Q_L = f_7(S_L, X_{levee}^L, H_{levee}^L, m_1, m_2, n_L) \quad (27)$$

$$Q_M = f_8(S_M, b_0, d, H_m, n_M, m_3, m_4) \quad (28)$$

$$Q_R = f_9(S_R, X_{levee}^R, H_{levee}^R, m_6, m_5, n_R) \quad (29)$$

که در آنها، $Q_{T,max}^{pda}$ ماکزیمم بدهی آب نگار ورودی به ابتدای منطقه مستعد خطر، Q_L ، Q_M ، Q_R به ترتیب بدهی عبوری از سیلابدشت در سمت چپ و راست و بدهی عبوری از رود، S_L ، S_M ، S_R به ترتیب شیب طولی در سمت چپ و راست و رود، n_L ، n_M ، n_R به ترتیب ضریب زبری مانینگ در سمت چپ و راست و رود، m_1 و m_6 به ترتیب شیب کناره‌های گوره در کرانه‌ی چپ و

جدول ۳- مشخصات گوره.

واحد	فراسنج	واحد	فراسنج	واحد	فراسنج
-	۰.۰۰۲	S_M	m	۱۶	b_0
-	۲	m_1	m	۱.۲۳	d
-	۰.۰۵	m_2	m	۲۱۰۰	L_{levee}
-	۱.۵	m_3	m	۲	B_L
-	۱.۵	m_4	m	۲	B_R
-	۰.۰۵	m_5	-	۰.۰۰۲	S_L
-	۲	m_6	-	۰.۰۰۲	S_R

مطالعه‌ی موردی

رودخانه‌ی خشک شیراز رود فصلی است که پس از عبور از شهر شیراز به دریاچه مهارلو می‌ریزد. این رود دارای دو شاخه‌ی اصلی به نامهای نهرا عظم و معالی آباد (تنگ‌سرخ) است که به ترتیب از ارتفاعات شمال و شمال غرب شیراز سرچشمه می‌گیرند. این دو شاخه در ابتدای شهر شیراز به هم پیوسته و رودخانه خشک را تشکیل می‌دهند (مشاور آفین، ۱۳۸۷). درباره‌ی شاخه معالی‌آباد قبل از اتصال به شاخه‌ی نهرا عظم، طرح مهار کردن سیلاب پیش‌بینی شده است، چرا که در این بازه از رود به دلیل کم بودن ظرفیت آبگذری نه‌ر، مستعد خسارت‌پذیری در برابر سیلابها بسیار بالاست (سرابندی، ۱۳۸۷). باید توجه نمود، در صورتی که بازه‌ی مستعد خسارت طولانی باشد، باید در طول مسیر روندیابی را انجام داد؛ بدین منظور می‌توان از روشهای هیدرولیکی یا آبخش‌شناسی استفاده نمود (کاکلکی و همکاران، ۱۳۹۲).

جداول (۱) و (۲) و (۳) اطلاعات مربوط به رود خشک شیراز و ورودیهای شبیه را نمایش می‌دهد. براساس شبیه مربوطه و روابط، سود خالص به ازای هر دوره‌ی بازگشت محاسبه می‌شود. سود خالص هر کدام از بده‌های طراحی که بیشتر از بقیه (والبته مثبت) باشد، به عنوان بده‌ی طراحی در نظر گرفته شده و با استفاده از آن ابعاد بهینه‌ی گوره آن محاسبه می‌شود. در این مقاله با اعمال عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، آبخش‌شناسی و اقتصادی به ترتیب در فراسنج‌های ضریب زبری مانینگ، بده‌ی طراحی و نرخ بهره، و با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۱۰۰، نمایشنامه با احتمال مساوی تولید شده و برای محاسبه خسارت مورد انتظار یک بازه ایجاد گردیده است.

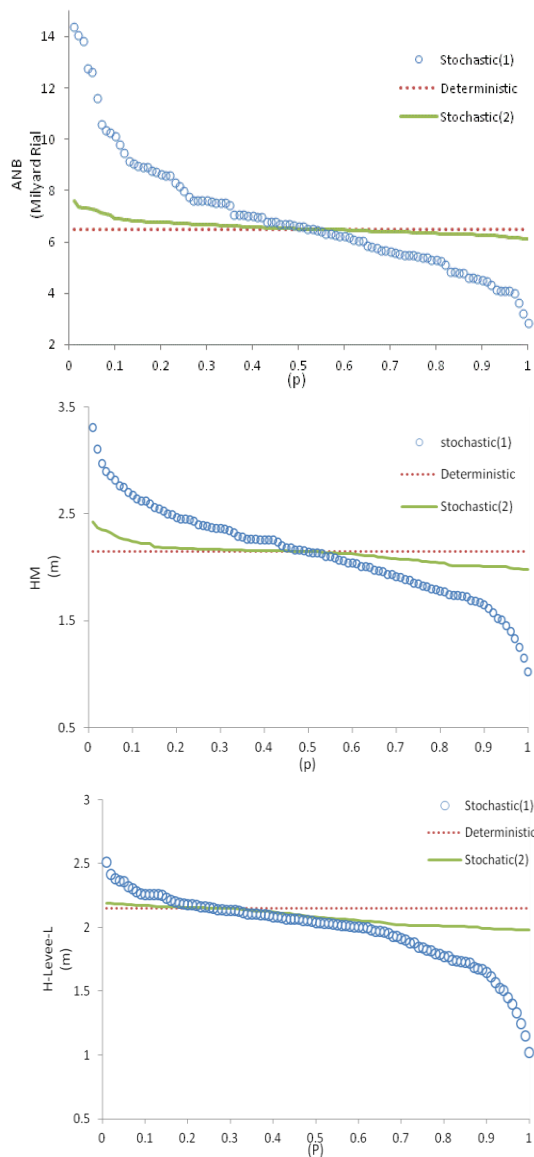
این عدم قطعیتها و مشخصه‌های آماری مربوطه در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. به عنوان مثال، برای یکی از بده‌های طراحی به ازای هریک از این نمایشنامه‌ها زیان مورد انتظار سالانه و سود خالص طرح محاسبه شده و مطابق با آن ابعاد طراحی گوره نیز برآورد گردیده است. در نهایت، میانگین سود خالص این ۱۰۰ نمایشنامه به عنوان سود نهایی حاصل از اجرای طرح برای آن دوره بازگشت مطلوب خواهد بود. این روند برای سایر بده‌های طراحی با دوره‌های بازگشت متفاوت تکرار شده و هریک که سود خالص بیشتری ایجاد کند به عنوان بده طراحی گوره و دوره‌ی بازگشت طراحی انتخاب می‌شود. سپس ابعاد حاصل از ۱۰۰ نمایشنامه مربوط به بده‌ی طراحی انتخاب شده به عنوان محدوده‌ی ابعاد طراحی خواهد بود.

به منظور مشاهده تأثیر همبستگی فراسنج‌های ورودی دارای عدم قطعیت در نتایج ابعاد طراحی، این فراسنجها یک بار به صورت مستقل و یک بار با توجه به همبستگی شان تولید گردیده و به عنوان ورودی در شبیه بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین، به منظور مشاهده و درک تفاوت نتایج شبیه با اعمال عدم قطعیت، شبیه یک بار هم بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت فراسنجها و با استفاده از مقادیر میانگین به صورت قطعی حل شده است.

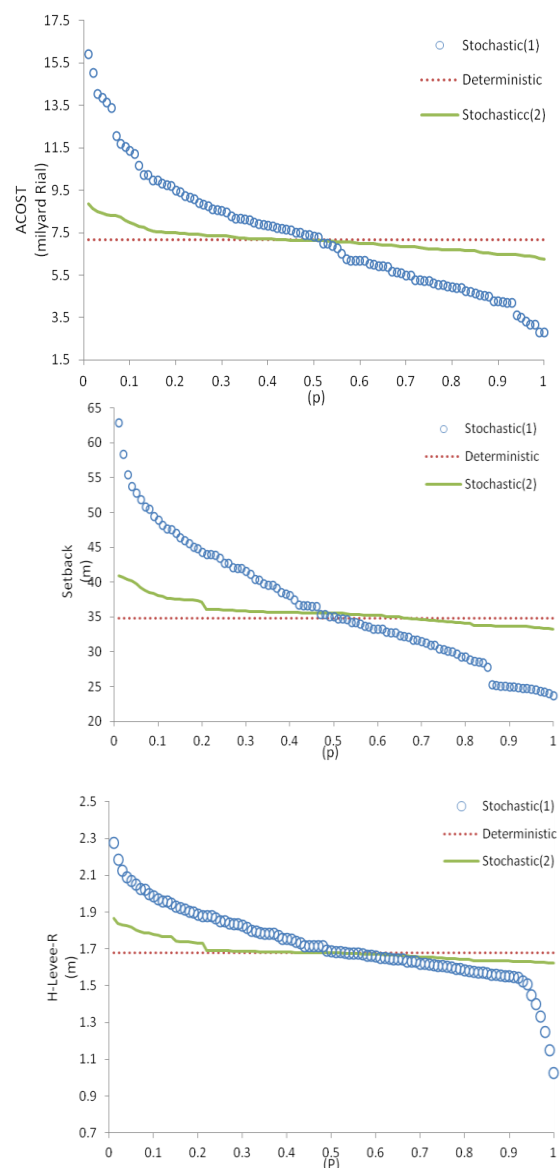
نتایج

اجرای شبیه‌ها نشان می‌دهد که حداکثر سود خالص سالانه در هر سه شبیه، قطعی، و دو شبیه احتمالاتی در دوره‌ی بازگشت ۲۰ سال رخ می‌دهد (جدول ۵). این دوره‌ی بازگشت به عنوان دوره‌ی بازگشت طراحی گوره در منطقه‌ی مستعد خسارت منظور شده است. سود خالص در دوره‌های بازگشت مختلف در شبیه قطعی اندکی کمتر از شبیه احتمالاتی است، که بیشتر بودن نتایج شبیه احتمالاتی به علت غیر قطعی بودن فراسنج‌های موثر در محاسبه‌ی سود خالص و تأثیرگذاری این فراسنجها بر یکدیگر می‌باشد. همچنین، نتایج در حالت اعمال همبستگی عدم قطعیتها به نتایج شبیه قطعی نزدیکتر است؛ و در واقع، عدم اعمال همبستگی باعث ایجاد حالاتی می‌گردد که با واقعیت همخوانی ندارد.

فراسنجهای طراحی به مقدار مقادیر شبیه قطعی نزدیکتر بوده و باعث شده که دامنه‌ی بالا و پایین مقادیر معقولتری داشته باشند. در واقع، اعمال همبستگی مانند یک قید عمل می‌کند که دامنه‌ی تغییرات متغیرها را محدود می‌نماید. این نتایج در شکل (۴) نیز نشان داده شده‌اند. در این شکل، منحنی استوکستیک (۱) مربوط به شبیه بدون اعمال همبستگی متغیرهای بدهی طراحی و ضریب زبری مایننگ و منحنی استوکستیک (۲) مربوط به شبیه با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته می‌باشد.



از اجرای شبیه احتمالاتی و تولید ۱۰۰ نمایشنامه به ازای دوره بازگشت طراحی برای هر نمایشنامه، ابعاد طراحی گوره تعیین شده است، در حالی که اجرای شبیه قطعی برای هر یک از ابعاد، تنها یک مقدار را نمایش می‌دهد. این نتایج در جداول (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. نتایج حاکی از آن‌اند که مقادیر ابعاد حاصل از شبیه قطعی بین حد پایین و بالای مقادیر حاصل از شبیه احتمالاتی قرار می‌گیرند. در شبیه احتمالاتی با اعمال همبستگی، متغیرهای تصادفی میانگین نتایج ابعاد و



شکل ۴- مقایسه رنج مقادیر ابعاد و فراسنجهای طراحی شبیه‌های احتمالاتی با اعمال همبستگی و بدون اعمال همبستگی

جدول ۴- مشخصه‌های آماری فراسنج‌های دارای عدم قطعیت.

فراسنج	ضریب زبری مانینگ	بده طراحی (متر مکعب بر ثانیه) [*]	نرخ بهره
حد پایین	۰.۰۳۴۳	۷۳.۱۰۰	۰.۰۷۳۱
حد بالا	۰.۰۳۶۲	۳۹۳.۸۳	۰.۰۸۸۴
میانگین	۰.۰۳۵۰	۱۶۷.۰۰۰	۰.۰۸۰
انحراف معیار	۰.۰۰۰۳۱۵	۶۰.۲۳۲	۰.۰۰۳

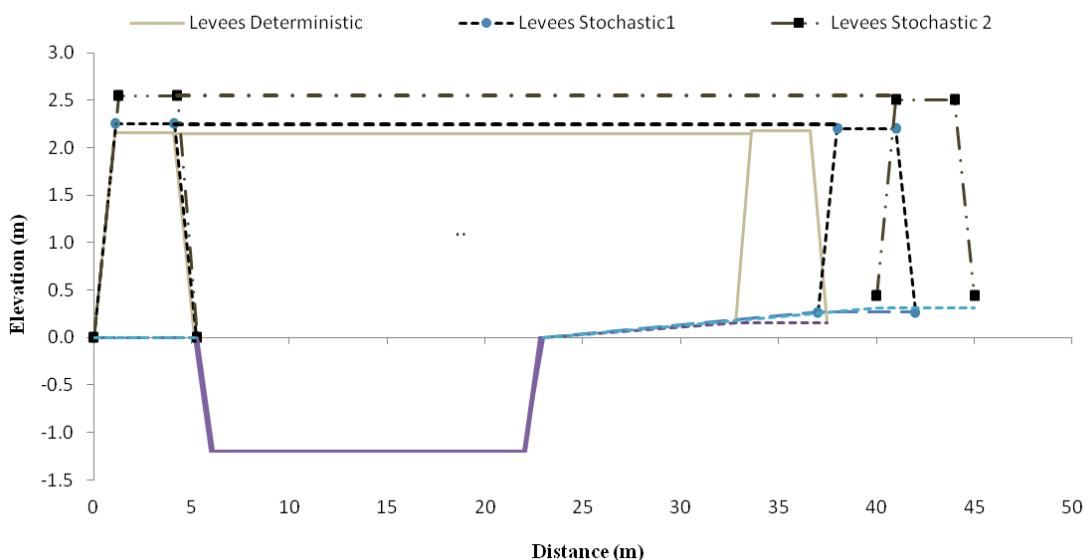
*: بده با دوره بازگشت ۲۰ سال

جدول ۵- سود خالص هر دوره بازگشت در سه شبیه احتمالاتی وابسته، غیر وابسته و قطعی (میلیارد ریال).

T	۲	۵	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
Expected ANB (Independent Model)	۳.۷۱۳	۶.۰۱۳	۶.۶۲۰	۶.۹۵۲	۶.۲۹	۳.۸۰۶	۳.۲۴۴	۲.۵۰۱	۱.۸۰۱
Expected ANB (Dependent Model)	۳.۶۱۰	۵.۳۴۵	۶.۱۱۵	۶.۵۶۵	۶.۰۱۲	۳.۵۲۳	۳.۲۳۴	۲.۴۵۶	۱.۷۰۸
ANB	۳.۵۲۶	۵.۱۰۲	۶.۰۴۶	۶.۴۸۴	۵.۹۸۰	۳.۶۶۳	۳.۱۱۴	۲.۳۷۸	۱.۶۸۱

این فراسنج، سایر فراسنجهای مشخص شده اند. از این رو، با استفاده از منحنی توزیع فراوانی فراتری QT، نمایشنامه متناظر با خطرکردن ۱۰ درصد مشخص شده، ابعاد و فراسنجهای موجود در آن نمایشنامه به عنوان ابعاد طراحی سازه با پذیرش خطرکردن به میزان ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند. این نتایج در شکل (۵) نشان داده شده اند.

در این مطالعه با فرض خطرکردن ۱۰ درصد برای ایمنی، ابعاد طراحی در حالت شبیه قطعی و شبیه احتمالاتی با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی و بدون اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی تعیین شده است. بدین منظور فراسنج بده طراحی (QT)، که درباره‌ی ارتفاع و سایر ابعاد گوره تأثیرگذار است، به عنوان عامل تعیین‌کننده ابعاد و فراسنجهای طراحی در نظر گرفته شده اند. در واقع، با پذیرش یک مقدار خطرکردن برای



شکل ۵- مقایسه ابعاد طراحی با خطرکردن ۱۰ درصد ایمنی در شبیه احتمالاتی بدون اعمال و با اعمال همبستگی عدم قطعیت‌ها

جدول ۶- مقایسه‌ی مقادیر ابعاد طراحی در دو شبیه قطعی و احتمالاتی بدون اعمال همبستگی عدم قطعیت‌ها.

Setback (m)	ANB (Milyard Rial)	ACOST (Milyard Rial)	B_{levee}^L (m)	B_{levee}^R (m)	H_m (m)	H_{levee}^L (m)	H_{levee}^R (m)	ابعاد بهینه طراحی	بدون اعمال همبستگی شبیه احتمالاتی
۲۳.۶۸۸	۲.۸۵۶	۲.۷۷۹	۳.۰۲۴	۳.۰۲۴	۱.۰۲۴	۱.۰۲۴	۱.۰۲۴	حد پایین	
۶۲.۸۲۰	۱۴.۳۹۳	۱۵.۸۹۷	۴.۵۱۳	۴.۲۷۴	۳.۳۰۴	۲.۵۱۳	۲.۲۷۴	حد بالا	
۳۶.۵۲۸	۶.۹۵۲۷	۷.۳۴۱	۳.۹۸۰	۳.۷۲۱	۲.۱۳	۱.۹۸۰	۱.۷۲۱	میانگین	
۸.۷۵۵	۲.۳۰۵	۲.۸۱۶	۰.۲۷۳	۰.۲۰۱	۰.۴۲۳	۰.۲۷۳	۰.۲۰۱	انحراف معیار	
۳۴.۸۵۲	۶.۴۸۴	۷.۱۶۹	۴.۱۴۷	۳.۶۷۸	۲.۱۴۷	۲.۱۴۷	۱.۶۷۸	شبیه قطعی	

جدول ۷- مقایسه‌ی مقادیر ابعاد طراحی در دو شبیه قطعی و احتمالاتی با اعمال همبستگی عدم قطعیت‌ها.

Setback (m)	ANB (Milyard Rial)	ACOST (Milyard Rial)	B_{levee}^L (m)	B_{levee}^R (m)	H_m (m)	H_{levee}^L (m)	H_{levee}^R (m)	ابعاد بهینه طراحی گوره	با اعمال همبستگی شبیه احتمالاتی
۳۳.۲۴۴	۶.۱۰۴	۶.۲۶۹	۳.۹۷۸	۳.۶۲۳	۱.۹۷۸	۱.۹۷۸	۱.۶۲۳	حد پایین	
۴۰.۸۹۴	۷.۶۰۹	۸.۸۵۲	۴.۱۸۶	۳.۸۶۶	۲.۴۲۵	۲.۱۸۶	۱.۸۶۶	حد بالا	
۳۵.۶۱۶	۶.۵۶۵	۷.۱۵۷	۴.۰۸۲	۳.۶۸۷	۲.۱۳۱	۲.۰۸۲	۱.۶۸۷	میانگین	
۱.۷۴۳	۰.۲۹۴	۰.۵۴۵	۰.۰۶۹	۰.۰۵۴	۰.۰۹۲	۰.۰۶۹	۰.۰۵۴	انحراف معیار	
۳۴.۸۵۲	۶.۴۸۴	۷.۱۶۹	۴.۱۴۷	۳.۶۷۸	۲.۱۴۷	۲.۱۴۷	۱.۶۷۸	شبیه قطعی	

قابلیت اعتماد مناسبی ندارند. نتایج شبیه احتمالاتی مستقل همانند نتایج حاصل از شبیه قطعی، دست پایین بوده و ارتفاع گوره را کمتر می‌کند؛ در نتیجه، با توجه به این که عامل انتخاب ابعاد سامانه، عامل اطمینان بوده و ابعاد براساس پذیرش خطرکردن ۱۰٪ برای Q_T انتخاب شده‌اند، سامانه نمی‌تواند در شرایط آینده عملکرد مناسبی داشته، و مقدار اطمینان مورد نیاز را تأمین کند. لازم به ذکر است که در اغلب تحقیقات انجام شده به عدم قطعیت‌های مختلف و وجود همبستگی آنها توجه نشده است. هدف این مقاله بررسی لزوم اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته است که تاکنون بدین منظور، مطالعه‌ای در طراحی سازه گوره صورت نگرفته است.

همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه احتمالاتی بدون اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی و احتمالاتی با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی با هم متفاوت بوده و این مساله لزوم اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته را توجیه می‌کند. مقادیر ابعاد طراحی حاصل از شبیه احتمالاتی با اعمال همبستگی، بزرگتر از هر دو حالت شبیه قطعی و شبیه احتمالاتی بدون اعمال همبستگی می‌باشد. به عنوان مثال مقدار ارتفاع کوره‌ی سمت راست در شبیه احتمالاتی با اعمال همبستگی ۲/۶ متر و در شبیه احتمالاتی بدون اعمال همبستگی ۲.۲۵ و در شبیه قطعی ۲.۱ متر محاسبه شده است. در واقع، عدم اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی در روند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی درمورد ابعاد و فراسنجهای طراحی موثر بوده، و همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، عدم اعمال همبستگی باعث ایجاد حالاتی می‌شود که با واقعیت تطابق نداشته، و

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی لزوم و تأثیر اعمال همبستگی عدم قطعیت در طراحیها پرداخته شده است. بدین منظور، طراحی یکی از سازه‌های مهار کردن سیلاب (گوره) مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه تهیه شده یک شبیه بهینه سازی غیر خطی است که جهت تحلیل عدم قطعیتها از روش شبیه سازی مونت کارلو، و برای حل آن از نرم افزار LINGO-13 استفاده کرده است.

امروزه بررسی و تحلیل عدم قطعیتها در هر طرحی ضروری محسوب می‌گردد. در بحث خطر کردن، برای تحلیل عدم قطعیتها می‌توان از روش شبیه سازی مونت کارلو بهره برد. روش شبیه سازی مونت کارلو موجود در نرم افزار لینگو تمام حالات تصادفی ممکن (عملی و غیر عملی) را از رخداد عدم قطعیتها بررسی کرده و بدون در نظرگیری نوع و میزان تأثیرات عدم قطعیتها بر یکدیگر، نتایج را ارائه می‌دهد. عدم اعمال همبستگی عدم قطعیتها در طراحی باعث امکان وقوع حالت ترکیبی از عدم قطعیتها می‌شود که عملاً در دنیای واقعی غیر ممکن بوده، و تأثیر متقابل عدم قطعیتها بر یکدیگر در نظر نمی‌گیرد.

اعمال عدم قطعیت باعث ایجاد تغییر در مقدار بدهی طراحی و عدم تغییر در دوره‌ی بازگشت بهینه می‌شود؛ بیشترین سود خالص سالانه در هر دو شبیه قطعی و احتمالاتی در دوره‌ی بازگشت ۲۰ سال رخ می‌دهد این دوره‌ی بازگشت به عنوان دوره‌ی بازگشت طراحی گوره در منطقه مستعد زبان منظور شده است. نتایج بیانگر این امرند که مقادیر ابعاد طراحی، از جمله ارتفاع گوره‌ها در شبیه احتمالاتی با اعمال همبستگی عدم قطعیتها بیشتر از مقدار حاصل از شبیه احتمالاتی بدون اعمال همبستگی عدم قطعیت است. این تفاوتها بیانگر این واقعیتند که اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته در نتایج شبیه موثر بوده و با توجه به این که فراسنجهای ورودی بدهی طراحی و ضریب زبری مانینگ فراسنجهای وابسته به همدند، و باید همبستگی آنها در نظر گرفته شود، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی احتمالاتی با فرض مستقل بودن متغیرهای وابسته، منجر به نتایج نادرست گردیده، و ابعاد طراحی حاصل از شبیه احتمالاتی بدون اعمال

همبستگی در واقعیت نمی‌تواند قابلیت اعتماد مناسبی داشته باشد.

منابع

۱. افتخاریان، لیلا، و احمد، ابریشمچی. و مسعود، تجربی، ۱۳۸۲. تحلیل عدم قطعیت تراز سطح آب رود سیستان و بررسی قابلیت اعتماد سامانه مهار کردن سیل، ششمین کنفرانس مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۲. بهروز، معصومه. ۱۳۹۲. شبیه بهینه سازی طراحی گوره‌ها با لحاظ عدم قطعیت‌های مختلف به روش مونت کارلو - مطالعه موردی رود لیف، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور.
۳. بهروز، معصومه. و سعید علیمحمدی. و جلال عطاری. ۱۳۹۲، طرح بهینه خاکریزهای کنار رود (گوره‌ها) با اعمال عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی به روش مونت کارلو، مجله هیدرولیک، سال هشتم، شماره سوم.
۴. بهروز، معصومه، سعید علیمحمدی، و جلال عطاری، ۱۳۹۳، تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های آبشناسی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سامانه‌های مهار کردن سیلاب، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال دهم، شماره دوم.
۵. رفیعی انزاب، نسرين. ۱۳۸۹. طراحی خاکریزهای کنار رود (گوره‌ها) به روش تحلیل خطر کردن، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعت آب و برق.
۶. سرابندی، امیر. ۱۳۸۷. بهینه سازی ابعاد سامانه‌های ترکیبی (سد- گوره)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.
۷. سنگین‌آبادی، حمید. ۱۳۸۴. تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند با استفاده از تحلیل خطر کردن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.
۸. علیمحمدی، سعید و نسرين رفیعی انزاب، و ملیکا مرادی. ۱۳۹۲. طراحی خاکریزهای کنار رود (گوره‌ها) به روش تحلیل خطر کردن، مجله آب و فاضلاب.

- Handbook of Monte Carlo Methods, John Wiley, New Jersey.
19. Lee, H. L. 1986. Hydraulic uncertainties in flood levee capacity. *J Hydraul. Engi*, 112: 928- 934.
 20. Linsley, R. K. Franzini, And J.B. 1992. *Water resources engineering*, 4th. Ed. McGraw-Hill.
 21. Loucks, D. P. and E. van Beek. 2005. *Water resources system planning and management*, UNESCO, the Netherlands.
 22. Mays, L. W. and Y. Y. Tung, 1992. *Hydrosystems engineering and management*, McGraw-Hill, New York.
 23. Mays, L. W. 1996. The role of risk analysis in water resources engineering. Department of civil and Environmental Engineering, Arizona State University, pp. 8-12.
 24. Maidment, David R. 1992. *Hand book of hydrology*, Chapter 18, McGraw-Hill, New York, USA.
 25. Plate, E. J. 2001. Stochastic hydraulic modeling- a way to cope with uncertainty. Handout 6 for lectures in Beijing, China.
 26. Tung, Y.K., B. C. Yen. and C. S. Melching. 1996, *Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis*, McGraw-Hill, New York, USA.
 27. Tung, Y.K., and B. C. Yen, 1993. Some progress in uncertainty analysis for hydraulic design B. C. Yen, and Y.K., Tung, (Eds.) In *reliability and uncertainty analysis*. Centennial of Manning's Formula, Water Research Publications, pp. 328-340.
 28. Tung, Y. K. 1996. Uncertainty analysis in water resources engineering. K. S. Tick, I. C., Goulter, c., Xu, S. A., Wasimi, and F. Bouchart, (Eds.), In *Stochastic Hydraulics* 96.
 29. Tung, Y. K. 1999. Risk / Reliability-based hydraulic engineering design in
 ۹. کراچیان، رضا و ابریشم چی، احمد و عباس افشار. ۱۳۷۸. بهینه سازی سرریز سدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت های آبشناسی و روندیابی سیلاب. دومین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
 ۱۰. کریمیان کاکلکی، روح الله، سید جواد ساداتی نژاد، افشین هنربخش، منصور نجفی حاجیور، و خسرو دودکانلوی میلان. ۱۳۹۲. روش های هیدرولیکی روندیابی سیل در بازه ای از رود دو آب صمصامی. *مجله مهندسی منابع آب*. ۶(۱۷): ۱۵-۲۴.
 ۱۱. گرئی ابوطالب، مجتبی طیبات، مجید شخص نیایی، کامران رضایی. ۱۳۸۶. ارائه شبیهی برای در نظر گیری وابستگی عدم قطعیت ها در شبیه سازی مونت کارلو به منظور بهبود فرایند تحلیل کمی خطر کردن برنامه. سومین کنفرانس بین المللی مدیریت برنامه. تهران، گروه پژوهشی آریانا.
 ۱۲. مهندسین مشاور آبن، تهران، ۱۳۸۷، مطالعات طرح سد مهار کردن سیلاب تنگ سرخ، گزارشات برنامه ریزی منابع آب و طراحی سازه های هیدرولیکی.
 13. Ahmed, I., and G.E. Freeman, 2004. Estimating stage-discharge uncertainty for flood damage assessment. *Arid Lands Symposium, Proc., World Water and Environmen.*
 14. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. Mays, W., 1988, *Applied hydrology*, McGraw-Hill, New York, USA.
 15. Flintham, T. P. and P. A. Carling, "Manning's n of composite roughness in channels of simple cross sections", *Centennial of Manning's Formula*, Water Research Publications.
 16. Hydrologic Engineering Center (HEC). 1986. Accuracy of computed water surface profiles. Research document 26, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, C.A.
 17. Kite, G. W. 1977, *Frequency and risk analysis in hydrology*, Water Resources Publications, Colorado 80522, USA.
 18. Kroese, Dirk P. Taimre, Botey, Thomas and I. Zdravko 2011.

- Damage reduction studies. ER 1105-2-101, Washington.
34. U. S. Army Corps of Engineers. 2009. Documentation and demonstration of process for risk analysis of proposed modifications to the Sacramento River Flood Control Project (SRFCP) Levees, San Francisco.
35. WWW: <http://www.lindo.com> - LINDO Systems Inc- Version 13.
36. Zhu, T. 2004. Climate Change and Water Resources Management: Adaptations for Flood Control and Water Supply, PhD thesis, University of California at Davis, USA.
- Hydraulic design handbook, L.W.Mays (ed). Mc Graw-Hill, New York.
30. U. S. Army Corps of Engineers. 1996. Risk-based analysis for flood damage reduction studies. EM1110-2-1619, Washington.
31. U. S. Army Corps of Engineers. 1997. Distribution restriction statement. ETL 1110-2-537, Washington.
32. U. S. Army Corps of Engineers. 2004. Hamilton city flood damage reduction and ecosystem restoration project, APPENDIX ECONOMICS, California.
33. U. S. Army Corps of Engineers. 2006. Planning risk analysis for flood

