

Sensitivity Analysis of Hydrologic, Hydraulic and Economic Uncertainties in Design of Flood Control Systems

M. Behrooz^{1*}, S. Alimohammadi² and J. Atari³

Abstract

Design of flood control systems are subjected to different kinds of uncertainties of hydrologic, hydraulic, geotechnical, and economic along, due to inherent behavior of flooding and random errors associated with measurement. The purpose of this paper is sensitivity analysis to determining the effect of uncertainties on the dimensions of design parameters. Therefore, using LINGO software a nonlinear optimization model based on risk analysis in both deterministic and probabilistic scheme have been developed for design of one of the most common structural flood control measure. In The probabilistic design, each of uncertainties once separately and once again all together are applied and Monte Carlo simulation for uncertainty analysis has been used. In this paper a reach in the Moali-abad river at north of Shiraz city, has been considered as case study. According to the results of probabilistic and deterministic models, the optimum return period equal to 20 years. Unlike the deterministic model that every output (design parameters) is single valued, stochastic model gives a range for each parameter that its value affected by the uncertainty imposed. The results show that applying the hydrologic uncertainty in the design is more efficient than economic uncertainty, and the economic one is more efficient than the hydraulic uncertainty. In the situation of limited time and budget, it has suggested that at least hydrologic uncertainty has been considered in design.

Keywords: Uncertainty, Hydrological, Hydraulic, Economic, Risk Design, Optimization, Levee

Received: April 22, 2014

Accepted: July 23, 2014

تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب

معصومه بهروز^{۱*}، سعید علی محمدی^۲ و جلال عطاری^۳

چکیده

طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب به دلیل ماهیت تصادفی سیل و خطاهای اندازه‌گیری با انواع عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و اقتصادی همراه است. هدف این مقاله تحلیل حساسیت این عدم قطعیت‌ها به منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از آن‌ها بر ابعاد طراحی سازه می‌باشد. بدین منظور، با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی مینی بر تحلیل ریسک^۱ در دو حالت احتمالاتی و قطعی در نرم افزار LINGO، به طراحی یکی از معمول‌ترین سازه‌های مهار سیلاب یعنی گوره‌ها^۲ پرداخته شده است. در طراحی احتمالاتی، هر یک از این عدم قطعیت‌ها یک بار به طور جداگانه و بار دیگر همه با هم در مدل اعمال شده و جهت تحلیل عدم قطعیت‌ها از روش شبیه سازی مونت کارلو^۳ استفاده شده است. در این مقاله، محدوده شمال شهر شیراز در مجاورت رودخانه خشک معالی‌آباد به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. در پی اجرای مدل، دوره بازگشت بهینه طراحی در هر دو حالات احتمالاتی و قطعی یکسان و برابر ۲۰ سال به دست آمده است. برخلاف مدل قطعی که در آن ابعاد سیستم به صورت تک مقداری حاصل می‌شوند، مدل احتمالاتی یک بازه برای هر پارامتر نتیجه می‌دهد که مقادیر آن‌ها تحت تأثیر نوع عدم قطعیت اعمال شده، تغییر می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که اعمال عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی، مؤثرتر از عدم قطعیت اقتصادی، و آن هم مهم‌تر و مؤثرتر از عدم قطعیت هیدرولیکی است. در صورت وجود محدودیت‌های هزینه و زمان، جهت اطمینان و رضایت از عملکرد بهتر سیستم در زمان آینده، لازم است حداقل عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی منظور شود.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، اقتصادی،

تحلیل ریسک، بهینه‌سازی، گوره

تاریخ دریافت مقاله: ۲ اردیبهشت ۱۳۹۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱ مرداد ۱۳۹۳

1-M.Sc.in Civil Engineering(River Engineering), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_behroz_cemb@yahoo.com.

2-Assisatant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assisatant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید بهشتی.

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

۳- استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

در زمینه عدم قطعیت‌های موجود در طراحی‌ها سازه‌های هیدرولیکی، تاکنون مطالعات متعددی صورت گرفته است.

Lee (1986) عدم قطعیت هیدرولیکی ایجاد شده به علت ناتوانی مدل‌های ریاضی و معادلات تجربی را برای تعیین ظرفیت گوره مورد بررسی قرار داد. معادله مانینگ را برای تعیین ظرفیت مقطع استفاده نمود و عدم قطعیت پارامتر ضریب زبری مانینگ را در آن اعمال کرد. Yen and Tung (1993) به تعریف و بررسی عدم قطعیت در سیستم‌های هیدرولیکی پرداختند، همچنین روش‌های مختلف بررسی عدم قطعیت که به سه دسته تحلیلی، تقریبی و شبیه‌سازی تقسیم می‌شود را به طور کامل و با جزئیات تشریح کردند. Loucks and van Beek (2005) به بررسی انواع مدل‌های بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت و آنالیز عدم قطعیت مدل‌ها، تحلیل اقتصادی برای تعیین حجم بهینه سیلاب در مخزن و شبیه‌سازی سیستم ترکیبی سد-گوره پرداختند. Ahmed (2004) عدم قطعیت را در منحنی دبی-اشل برای محاسبه خسارت سیلاب برآورد نمود. در این تحلیل ارتفاع آزاد در گوره‌ها را هم مدنظر قرار داد و از نرم افزار HEC-FDA برای تعیین ارتفاع آزاد برای گوره با قابلیت اعتماد مورد نظر و از نرم‌افزار HEC-RAS برای محاسبه منحنی دبی-اشل استفاده نمود. افتخاریان (۱۳۸۰) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی عدم قطعیت تراز سطح آب رودخانه سیستان را تحلیل نمود. وی برای تحلیل قابلیت اعتماد سیستم از روش گشتاور دوم استفاده نمود. علیمحمدی (۱۳۹۲) به بررسی یک طرح کنترل سیلاب، انواع خسارات حاصل از سیل و نحوه تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی ابعاد طراحی خاکریزهای کناره رودخانه (گوره) پرداخت. وی همچنین با معرفی رودخانه خشک معالی‌آباد شیراز از یک مدل بهینه‌سازی قطعی جهت تعیین ابعاد بهینه گوره استفاده نمود.

۲- مبانی تئوری

عدم قطعیت، حاصل فقدان یا کمبود اطلاعات صحیح درباره پدیده‌ها و فرایندهای مرتبط با تعریف مسائل مختلف و حل آن‌ها می‌باشد. با افزایش حضور پدیده‌های طبیعی و تصادفی، مقادیر عدم قطعیت‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین عدم قطعیت‌های مختلف که به دلیل نقصان اطلاعات در کامل کردن فرایندها، مدل‌ها، پارامترها، داده‌ها و ... به وجود می‌آیند، با پژوهش، تکمیل داده‌ها و استفاده از ابزار اندازه‌گیری با دقت بالا، کاهش می‌یابد (افتخاریان، ۱۳۸۴).

طراحی سیستم‌های آبی با عدم قطعیت همراه است. منابع ایجاد عدم قطعیت‌ها را می‌توان به پنج گروه ذاتی، مدل، پارامتر، داده و عملکرد تقسیم‌بندی نمود. عدم قطعیت‌های طبیعی از ماهیت تصادفی فرایندهای طبیعی مانند بارش ناشی می‌شوند. عدم قطعیت‌های مربوط به مدل شامل دو گروه اصلی سیستماتیک و تصادفی می‌باشند. خطاهای سیستماتیک ناشی از در نظر نگرفتن برخی پارامترها یا قیدها در مدل بوده و خطاهای تصادفی نتیجه مستقیم خطاهای موجود در نمونه‌برداری می‌باشد. خطاهای ناشی از پارامتر بر اثر خطا در برآورد دقیق پارامترهای ورودی مدل به وجود می‌آیند. عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌ها بعلاوه اندازه‌گیری‌های نادقیق، غیرهمگن و پرت بودن داده‌ها، خطاهای مربوط به جمع‌آوری داده‌ها و ثبت آنها و تعداد ناکافی آنها است. عدم قطعیت‌های مربوط به عملکرد سازه ناشی از خطاهای موجود در مرحله ساخت و بهره‌برداری و نگهداری از سازه می‌باشد (Tung, 1999).

طراحی بر مبنای ریسک روشی است که به طراح اجازه می‌دهد تا عدم قطعیت‌های موجود را در طراحی اعمال نموده و نتایج عدم قطعیت‌ها را ضمن محاسبه قابلیت اعتماد در قالب طراحی احتمالاتی ترکیب نموده و ریسک آنها را تحلیل نماید. آنچه که در این مقاله به آن پرداخته شده است، تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سازه‌های کنترل سیلاب می‌باشد. این تحلیل حساسیت به منظور تعیین درجه و میزان تأثیر هر یک از این عدم قطعیت‌ها، و مؤثرترین عدم قطعیت بر مقدار ابعاد طراحی سازه می‌باشد. بدین منظور طراحی یکی از معمول‌ترین سازه‌های مهار سیلاب (گوره‌ها) با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی بر اساس تحلیل "سود - هزینه" در نرم‌افزار LINGO مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس سه مدل بدین شرح تهیه شده است: ۱- یک مدل قطعی و بدون اعمال عدم قطعیت به منظور مقایسه و تعیین میزان تأثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها، ۲- مدلی که در هر بار اجرا تنها یکی از عدم قطعیت‌ها اعمال شده و ۳- مدلی که در آن هر سه نوع عدم قطعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی لحاظ شده است.

در پی اجرای هر سه مدل ضمن تعیین دوره بازگشت بهینه طراحی، ابعاد بهینه سیستم در هر سیل طراحی از قبیل ارتفاع گوره و عقب‌نشینی گوره^۵ از کرانه رودخانه نتیجه می‌شود. با توجه به پیچیدگی سیستم مورد بررسی، در این مقاله به منظور تحلیل عدم قطعیت‌ها از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است.

در مهندسی منابع آب، انواع عدم قطعیت‌ها به چهار گروه اصلی هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، اقتصادی و سازه‌ای (ژئوتکنیکی) تقسیم بندی می‌شوند. در طراحی احتمالاتی سیستم‌های منابع آب، لازم است این عدم قطعیت‌ها به صورت کمی ارائه گردد (Tung, 1999). در ادامه به بررسی این عدم قطعیت‌ها پرداخته شده است.

عدم قطعیت‌های موجود در طراحی گروه از چهار جنبه اساسی قابل بررسی است (Tung, 1999):

۳-۱- عدم قطعیت هیدرولوژیکی

عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی شامل عدم قطعیت در محاسبه سیل طراحی و ارتفاع موج ناشی از باد است. یک عامل در ایجاد ریسک و عدم قطعیت، نوع توزیع برازش یافته بر آمار دبی‌های سیل و بادهای ثبت شده در محل پروژه می‌باشد. چرا که غالباً آماره‌های میانگین و انحراف معیار کمیت‌های هیدرولوژیکی در توزیع‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. بنابراین عدم قطعیت جزء لاینفک آنها می‌باشد. لذا به منظور اعمال عدم قطعیت‌های مذکور لازم است که توزیع‌های مختلفی بر داده‌های آماری برازش یابند و توزیع مناسب براساس آزمون‌های آماری انتخاب شود.

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

در مجموع، عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه سیلاب با یک دوره بازگشت معین دارای دو منبع اساسی است، یکی عدم قطعیت مربوط به مدل‌های آماری و دیگری عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای سیلاب. غالباً عدم قطعیت در برآورد پارامترهای سیلاب مهم‌تر از عدم قطعیت در مدل‌های برازش یافته می‌باشد.

۳-۲- عدم قطعیت هیدرولیکی

عدم قطعیت‌های هیدرولیکی از ساده‌سازی در مدل‌های ریاضی و توصیف پدیده‌های فیزیکی و طبیعی در مهندسی هیدرولیک، اجرای غیر ایده آل سازه‌های هیدرولیکی و ... نشات می‌گیرد (Mays, 1996). عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، شامل عدم

قطعیت‌های موجود در ارزیابی ظرفیت مقطع رودخانه بوده و از دو منبع اساسی مدل و پارامتر ناشی می‌شود. هر چند، عدم قطعیت در داده‌های موجود نیز نباید از دید طراح پنهان بماند، لیکن وجود عدم قطعیت‌های ناشی از مدل و پارامتر بسیار مهم‌تر و دارای تأثیر مضاعف بوده و لازم است که در تعیین کمی مقدار آنها توجه کافی مبذول گردد.

عدم قطعیت‌های مربوط به مدل هیدرولیکی و پارامترهای آن‌ها، ناشی از استفاده از یک مدل هیدرولیکی مشخص در توصیف شرایط جریان می‌باشد. به عنوان مثال، مدلی که جریان را با فرض دو بعدی بودن آن تحلیل می‌کند، نسبت به مدلی که جریان را یک بعدی فرض می‌کند، دارای عدم قطعیت کمتری است. بنابراین تنها راه برخورد با اینگونه عدم قطعیت‌ها، استفاده از مدل‌های هیدرولیکی و احتمالاتی مختلف و نهایتاً انتخاب بهترین آن‌ها می‌باشد. طبعاً مدل‌های با محدودیت کمتر می‌توانند به مقدار قابل توجهی، عدم قطعیت موجود در مدل‌های هیدرولیکی را کاهش دهند. البته باید توجه نمود که همیشه استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر (مثلاً دو بعدی در برابر یک بعدی) به معنای کاهش عدم قطعیت نیست. زیرا اگر چه عدم قطعیت مدل کاهش می‌یابد اما عدم قطعیت پارامتر افزایش خواهد یافت، زیرا مدل‌های پیچیده دارای پارامترهای بیشتری نسبت به مدل‌های ساده هستند. لذا باید یک سطح بهینه از ترکیب انتخاب‌های ممکن در نظر گرفت.

عدم قطعیت‌های هیدرولیکی به طور وسیعی از عدم قطعیت پارامترهای شرکت‌کننده در مدل ناشی می‌شود. به عنوان مثال در رابطه مانینگ که اساس مقاومت جریان مقطع رودخانه است، به هر طریقی که ضریب مانینگ محاسبه شود، دارای عدم قطعیت خواهد بود. این عدم قطعیت جزو لاینفک ضریب مانینگ می‌باشد، چرا که وابسته به شرایط محیطی است که نه تنها قابل پیش بینی نمی‌باشد، بلکه نسبت دادن مقدار کاملاً قطعی به آن در زمان مطالعه پروژه غیر ممکن است. همچنین کمبود اطلاعات لازم در ارزیابی این پارامترها عامل ایجاد عدم قطعیت خواهد بود. یکی دیگر از منابع ایجاد عدم قطعیت در پارامترهای موجود در سازه‌های هیدرولیکی به خطاهای انسانی در ارزیابی و برداشت مقادیر کمی داده‌ها بر می‌گردد.

معمولاً برای تعیین ظرفیت هیدرولیکی از رابطه مانینگ (رابطه ۱) استفاده می‌شود، که شامل پارامترهای غیر قطعی ضریب مانینگ، شیب خط انرژی و خصوصیات هندسی مقطع می‌باشد:

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

در این روابط Q دبی، A مساحت مقطع، n ضریب زبری مانینگ، S شیب خط انرژی، R شعاع هیدرولیکی و P محیط تر شده مقطع است $(R=A/P)$.

ضریب زبری مانینگ نشان‌دهنده مقاومت بستر کانال در برابر جریان و میزان افت انرژی است. در صورتیکه داده‌های مربوط به تراز سطح آب و دبی جریان رودخانه موجود باشد، مقدار ضریب مانینگ را می‌توان به کمک واسنجی دقیق نمود. در غیر این صورت، مقدار آن با استفاده از روابط تجربی، جدول‌ها، مقایسه عکس‌ها و تجربه افراد صاحب‌نظر برآورد می‌گردد. مدل اصلی و کاربردی که در اکثر طراحی‌های سستی و احتمالاتی مربوط به سیلاب در رودخانه به کار می‌رود، رابطه مانینگ است که دارای عدم قطعیت مدل و پارامتر می‌باشد. یکی از منابع ایجاد عدم قطعیت از نوع مدل هیدرولیکی در رابطه مذکور، فرض جریان به صورت یک بعدی می‌باشد. حال آنکه در مواقع سیلابی چنین فرضی کاملاً معتبر نمی‌باشد. لازم به ذکر است که عدم قطعیت کلی رابطه مانینگ به مقدار خیلی زیادی از عدم قطعیت ضریب مانینگ ناشی می‌شود.

۳-۳- 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 طبقه همکف ساختمان‌ها، ارزش اجناس داخل ساختمان‌ها، نرخ بازگشت سرمایه و ... همواره با تقریب و عدم قطعیت همراه است (USACE, 1996).

هزینه ساخت گوره به دلیل تقریب در تخمین ارزش اجزای سازه‌ای، تورم و مانند آن، همواره با عدم قطعیت محاسبه می‌شود. همچنین محاسبه هزینه‌های ناشی از خسارت 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 پارامترهایی هستند 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. نتیجه مستقیم چنین مطالعاتی کاهش خسارت‌های سالانه مورد انتظار است. در آن صورت، اهداف بلند مدت سازه تثبیت شده و ریسک تخریب آن کاهش می‌یابد.

۳-۴- عدم قطعیت ژئوتکنیکی

عدم قطعیت ژئوتکنیکی، شامل عدم قطعیت‌های موجود در بارهای

وارد به سازه، هندسه سازه، خواص مواد، فرآیندهای ساخت و ... می‌شود. بسیاری از پارامترهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل خاک و پی، به ویژه خواص مکانیکی خاک، دارای عدم قطعیت هستند. هرچه میزان این عدم قطعیت‌ها بیشتر باشد، تأثیر قابل توجه‌تری بر روی خروجی‌های مدل مورد بررسی خواهد داشت. از این رو مهندسی ژئوتکنیک برای اعمال صحیح این عدم قطعیت‌ها در مطالعات، همواره تلاش می‌کند که مقادیر منطقی محافظه‌کارانه‌ای را برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت انتخاب کند. عدم قطعیت‌های مرتبط با مسائل ژئوتکنیکی به دو دسته اصلی، ذاتی و پارامتر تقسیم می‌شوند. در واقع در یک لایه زمین‌شناسی یکسان، این دو عدم قطعیت، ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار داده و باعث تفاوت می‌شود. عدم قطعیت ذاتی ویژگی‌های خاک غیرقابل حذف و جز ویژگی‌های آن هستند و ناشی از پدیده‌های طبیعی می‌باشد. عدم قطعیت پارامتر و داده از کمبود اطلاعات و آگاهی ناشی می‌شود. عدم قطعیت پارامتر و داده به علت کمبود نمونه‌گیری‌ها و خطای اندازه‌گیری و ... بوده و می‌توان با استفاده از روش‌ها دقیق‌تر آن‌ها را کاهش داد (Griffiths & Fenton, 2007).

لازم به ذکر است در این مقاله تنها عدم قطعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی لحاظ شده و از عدم قطعیت ژئوتکنیکی صرف نظر شده است.

۳-۵- شبیه‌سازی مونت کارلو

از دیدگاه احتمالاتی در مسائل مهندسی آب، برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت روش‌های مختلفی وجود دارد. این روش‌ها به سه دسته، تحلیلی^۶ تقریبی^۷ و شبیه‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند (Tung, 1996). هریک از این روش‌ها در سطوح مختلفی از پیچیدگی از دیدگاه ریاضی و نیز نقطه نظر تعیین برآورد پارامترها و داده‌های مورد نیاز قرار دارند. انتخاب روش مناسب به ماهیت مسئله، میزان دسترسی به اطلاعات، پیچیدگی مدل ریاضی مورد استفاده و نوع و دقت نتایج خواسته شده بستگی دارد (Yen & Tung, 1993).

در مواردی که رابطه بین ورودی و خروجی به طور صریح یا ضمنی مشخص نباشد، استفاده از مدل‌ها 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. اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو، محاسبه ترکیبات تصادفی حالات ممکن از عدم قطعیت‌هایی است، که در یک پدیده رخ می‌دهند. در این روش ابتدا تابع توزیع

می‌گیرد. به هر حال بسته به هدف مطالعه، این ساده‌سازی‌ها نباید در حدی باشد که باعث کاهش توانایی مدل گردیده و نتایج آن نادرست باشد. مهم‌ترین فرضیاتی که در ارائه مدل بهینه‌سازی این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از:

در صورت انجام طرح کنترل سیلاب با سیل طراحی T سال هیچ‌گونه خسارتی از سیلاب‌های مساوی یا کمتر از دوره بازگشت T سال (با احتمال $(1/T)$)، به منطقه پتانسیل خسارت وارد نمی‌شود. شرایط مقطع آب‌گذری و سیلابدشت به صورت استاتیک و بدون اعمال تغییر اقلیم در نظر گرفته شده است. تغییر کاربری اراضی سیلابدشت در آینده در نظر گرفته نشده است. مقطع آب‌گذری امن منطقه پتانسیل خطر به صورت یک مقطع چندضلعی معادل در مدل وارد می‌شود. مدل تنها قادر به دریافت یک مقطع در کل منطقه پتانسیل خطر می‌باشد. در شرایطی این فرض قابل قبول است که تغییرات قابل‌توجهی در مقطع رودخانه در کل منطقه پتانسیل خطر رخ ندهد. در اثر احداث گوره، دبی پیک سیلاب در پایین دست افزایش می‌یابد و ممکن است اثرات زیان باری را به وجود آورد، در این مدل اثرات افزایش خسارت در پایین دست بازه مورد مطالعه در نظر گرفته نشده است. طراحی گوره بر اساس حداکثر دبی سیل طراحی که در ابتدای منطقه پتانسیل خطر تعیین می‌شود، صورت می‌گیرد. برای محاسبه جریان عبوری از مقطع از فرمول مانینگ استفاده شده است. از نشت رودخانه به آب‌های زیرزمینی و به عکس صرف‌نظر گردیده است. رابطه تراز خسارت معلوم فرض می‌شود. نسبت بین دبی‌های طراحی در طول اجرای برنامه ثابت در نظر گرفته شده است. هزینه اجرایی ساخت گوره به صورت حاصل ضرب هزینه واحد حجم گوره در مقدار حجم گوره در نظر گرفته شده است. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری به صورت ضریبی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری منظور شده است. از برخی سودها، از جمله سودهای حاصل از استحصال سیلاب دشت‌ها، افزایش کاربری زمین و سودهای غیر ملموس صرف‌نظر شده و تنها سود حاصل از کاهش آب گرفتگی ناشی از سیل در مدل‌سازی اعمال شده است. در صورتی که دبی، بیش از دبی طراحی رخ دهد، سازه گوره تخریب شده و باید مجدداً احداث گردد.

هر مدل بهینه‌سازی شامل دو بخش اصلی تابع هدف و محدودیت‌هاست. در ادامه روابط مدل بهینه‌سازی طراحی گوره ارائه گردیده است.

احتمالاتی انواع عدم قطعیت‌هایی که شناسایی شده‌اند، توسط کارشناسان و برخی تجربیات پروژه‌های گذشته تعیین می‌گردند. به عنوان مثال ممکن است هزینه که یکی از عدم قطعیت‌های مشترک در پروژه‌های مختلف می‌باشد، از توزیع نرمال با پارامترهای μ و σ^2 پیروی نماید. در مرحله دوم، تعداد اجراهای شبیه‌سازی تعیین می‌گردد، تعداد این شبیه‌سازی بسته به اقتصاد طرح و میزان هزینه هر اجرا، پیچیدگی و ابعاد پروژه و اهمیت ریسک‌های مورد بررسی در پروژه تعیین می‌شود. تعداد مشخص از پیش تعیین شده‌ای برای آن موجود نیست (Morgan & Henrion, 1990). البته هرچه تعداد اجراهای شبیه‌سازی بیشتر باشد؛ حالات احتمالی بیشتری در فضای ممکن (فضای جواب) بررسی می‌گردند و البته زمان شبیه‌سازی نیز طولانی‌تر می‌گردد.

۴- فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی

در روش طراحی بر اساس آنالیز ریسک، پس از محاسبه عدم قطعیت عوامل مؤثر در طراحی و ارزیابی قابلیت اعتماد و ریسک شکست سازه، لازم است که به منظور تعیین قابلیت اعتماد مورد نیاز و انتخاب گزینه بهینه، آنالیز اقتصادی انجام گیرد. بنابراین ارزیابی طرح‌های مهار سیلاب مستلزم مطالعات اقتصادی به صورت کاربردی است، بدین معنا که باید هزینه‌های احداث سازه، بهره‌برداری و نگهداری از آن با مزایای اجرای پروژه که عمدتاً بر حفاظت و توسعه حواشی رودخانه و ایجاد جاذبه‌های گردشگری در منطقه و کاهش خسارت‌های سیلاب تأثیر دارد، مقایسه شود. بدین منظور باید خسارت مورد انتظار سالانه محاسبه شود. لازم به ذکر است در این مقاله تنها خسارات مستقیم و محسوس لحاظ شده‌اند.

بررسی اقتصادی طرح‌های پیشنهاد شده و انتخاب گزینه بهینه، روش طراحی بر اساس تجزیه و تحلیل ریسک را کامل می‌کند. مقایسه اقتصادی گزینه‌های مختلف، با اهمیت‌ترین نوع تصمیم‌گیری در هر پروژه می‌باشد. لازم است که هر مدیر با به کارگیری تکنیک‌های مختلف اقتصاد مهندسی و کاربرد آنها، اقتصادی‌ترین طرح را انتخاب کند (اسکونزاد، ۱۳۷۸).

۴-۱- فرضیات حاکم بر مدل

ایجاد یک مدل بهینه‌سازی با لحاظ تمامی جزئیات و ضوابط حاکم بر سیستم واقعی تقریباً غیرممکن است. هر مدلی که ارائه می‌گردد مبتنی بر یک سری فرضیات است که باید در ابتدای تهیه مدل مورد توجه قرار گرفته و مدل بر اساس آن‌ها فرمول‌بندی گردد؛ بنابراین در فرمول‌بندی سیستم، ساده‌سازی‌هایی در روابط پیچیده آن صورت

۴-۲- تابع هدف

$$ACOST = CRF \times (C_{levee} + LPRC + AOMR + CR_{levee}) \quad (۶)$$

که در آن:

CRF، Clevee، LPRC، AOMR، CR_{levee} به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه، هزینه احداث گوره، هزینه تملک اراضی مجاور رودخانه، هزینه بهره‌برداری و نگهداری گوره پس از احداث و هزینه احداث مجدد گوره بعد از تخریب می‌باشند، داریم:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۷)$$

$$C_{levee} = C_{levee}^L + C_{levee}^R \quad (۸)$$

$$C_{levee}^L = UPRC_{levee} \times A_{levee}^L \times L_{levee} \quad (۹)$$

$$C_{levee}^R = UPRC_{levee} \times A_{levee}^R \times L_{levee} \quad (۱۰)$$

$$LPRC = C_{set}^L + C_{set}^R + C_{LB}^L + C_{LB}^R \quad (۱۱)$$

$$C_{set}^L = UPRC_{land}^L \times X_{levee}^L \times L_{levee} \quad (۱۲)$$

$$C_{set}^R = UPRC_{land}^R \times X_{levee}^R \times L_{levee} \quad (۱۳)$$

$$C_{LB}^L = UPRC_{land}^L \times B_{levee}^L \times L_{levee} \quad (۱۴)$$

$$C_{LB}^R = UPRC_{land}^R \times B_{levee}^R \times L_{levee} \quad (۱۵)$$

$$AOMR = \beta \times C_{levee} \quad (۱۶)$$

$$CR_{levee} = \sum_{j=K}^n C_{levee} \times [F(Q_{j+1}) - F(Q_j)] \quad (۱۷)$$

$$\text{for } Q_j = Q_K \leq Q_{K+1} \leq \dots \leq Q_n \leq \infty$$

در روابط فوق:

i نرخ بهره سالانه، n عمر مفید طرح کنترل سیلاب به سال، C_{levee}^L و C_{levee}^R به ترتیب هزینه احداث گوره در ساحل چپ و راست رودخانه، $UPRC_{levee}$ هزینه واحد حجم ساخت گوره، L_{levee} طول گوره منطقه پتانسیل خسارت، C_{set}^L و C_{set}^R هزینه تملک اراضی بین گوره و رودخانه به ترتیب در ساحل چپ و راست، C_{LB}^L و C_{LB}^R هزینه تملک اراضی جهت ساخت گوره (واقع در قاعده گوره) به ترتیب در ساحل چپ و راست رودخانه، $UPRC_{land}^L$ و $UPRC_{land}^R$ قیمت واحد زمین در منطقه پتانسیل خسارت به ترتیب در ساحل چپ و راست رودخانه، X_{levee}^L و X_{levee}^R به ترتیب فاصله پای گوره تا لب رودخانه در ساحل چپ و راست رودخانه، B_{levee}^L و B_{levee}^R به ترتیب اندازه قاعده گوره در سمت چپ و راست رودخانه، β ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری گوره (به صورت ضریبی از هزینه‌های اجرایی)، A_{levee}^L و A_{levee}^R مساحت سطح مقطع گوره به ترتیب در ساحل چپ و راست رودخانه می‌باشد که از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

تابع هدف مدل بهینه‌سازی ابعاد گوره، حداکثرسازی سود خالص سالانه (Max ANB) حاصل از اجرای سازه گوره در منطقه پتانسیل خسارت می‌باشد و با توجه به آن سیل طراحی انتخاب می‌گردد (USACE, 1996):

$$MAX ANB = ABEN - ACOST \quad (۲)$$

که در این رابطه، ANB سود خالص سالانه، ABEN سود سالانه و ACOST هزینه سالانه می‌باشد.

۴-۳- محدودیت‌های مربوط به اجزای تابع هدف

سود از تفاضل خسارت مورد انتظار سالانه (EAD) در دو وضعیت بدون اجرای طرح کنترل سیلاب و وجود طرح کنترل سیلاب بدست می‌آید (Chow, 1988).

$$ABEN = EAD_{without} - EAD_{with} \quad (۳)$$

$$EAD_{without} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{D(Q_j) + D(Q_{j+1})}{2} \right] \times [F(Q_{j+1}) - F(Q_j)] \quad (۴)$$

$$\text{for } Q_j = Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq \infty$$

$$EAD_{with} = \sum_{j=k}^n \left[\frac{D(Q_j) + D(Q_{j+1})}{2} \right] \times [F(Q_{j+1}) - F(Q_j)] \quad (۵)$$

$$\text{for } Q_j = Q_k \leq Q_{k+1} \leq \dots \leq Q_n \leq \infty$$

$EAD_{without}$ خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل در شرایط بدون طرح، EAD_{with} خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل پس از اجرای طرح کنترل سیلاب، n تعداد کل دوره بازگشت‌ها و k شمارنده مربوط به دوره بازگشت طراحی، $D(Q_j)$ خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت z در منطقه پتانسیل خسارت، $F(Q_j)$ احتمال عدم وقوع سیل با دوره برگشت z ، $(F = 1 - p = 1 - 1/T)$ ، Q_j دبی ماکزیمم سالانه با دوره برگشت z ؛ در منطقه پتانسیل خسارت (شرایط بدون طرح) می‌باشد.

به منظور محاسبه EAD_{with} نیز همان‌گونه که ذکر شد، مشابه $EAD_{without}$ عمل می‌شود؛ با این تفاوت که فقط سیلاب‌های بزرگتر از دوره بازگشت طراحی ($z \geq K$) که ایجاد خسارت می‌نمایند، لحاظ می‌گردند.

هزینه سالانه طرح از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

۴-۴- محدودیت‌های مربوط به هندسه رودخانه و گوره

طراحی گوره بر اساس حداکثر دبی هیدروگراف سیل طراحی T ساله، ورودی به منطقه پتانسیل خسارت صورت می‌گیرد. بنابراین باید مجموع دبی عبوری از مقطع میانی و کرانه‌های چپ و راست را برابر با دبی پیک رودخانه قرار داد و رابطه بین آن‌ها را به صورت رابطه (۲۲) می‌باشد.

$$Q_T = Q_L + Q_M + Q_R \quad (22)$$

با توجه به شکل ۱ روابط زیر نحوه مدل‌سازی طراحی گوره و میزان عقب‌نشینی آن، در منطقه پتانسیل خسارت را نشان می‌دهند.

$$A_{levee}^L = (B_{levee}^L - (H_{levee}^L / m_1)) \times H_{levee}^L \quad (18)$$

$$A_{levee}^R = (B_{levee}^R - (H_{levee}^R / m_6)) \times H_{levee}^R \quad (19)$$

در این روابط:

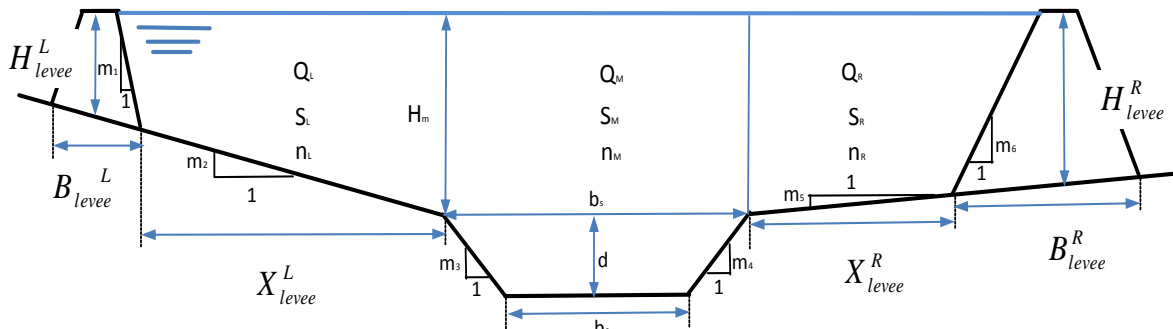
H_{levee}^L و H_{levee}^R به ترتیب ارتفاع گوره در ساحل چپ و راست رودخانه و m_1 و m_6 به ترتیب شیب کناره‌های گوره در کرانه چپ و راست رودخانه می‌باشند.

برای محاسبه B_{levee} نیز باید به ترتیب زیر عمل نمود:

$$B_{levee}^L = B_L + 2(H_{levee}^L / m_1) \quad (20)$$

$$B_{levee}^R = B_R + 2(H_{levee}^R / m_6) \quad (21)$$

B_L و B_R به ترتیب اندازه عرض فوقانی گوره در سمت چپ و راست رودخانه می‌باشند.



شکل ۱- مشخصات اصلی رودخانه و سیلابدشت و ابعاد و پارامترهای طراحی گوره

$$Q_L = (S_L)^{\frac{1}{2}} \frac{\left(X_{levee}^L \times H_{levee}^L + \frac{1}{2} \times H_{levee}^L{}^2 \times (1/m_1) + \frac{1}{2} \times X_{levee}^L{}^2 \times m_2 \right)^{5/3}}{n_L \left(H_{levee}^L \sqrt{1 + (1/m_1)^2} + X_{levee}^L \sqrt{1 + m_2^2} \right)^{2/3}} \quad (23)$$

$$Q_M = (S_M)^{\frac{1}{2}} \frac{\left(\frac{b_0 + b_s}{2} \times d + H_m \times b_s \right)^{5/3}}{n_M \left(b_0 + d \times \left(\sqrt{1 + (1/m_3)^2} + \sqrt{1 + (1/m_4)^2} \right) + 2 \times H_m \right)^{2/3}} \quad (24)$$

$$Q_R = (S_R)^{\frac{1}{2}} \frac{\left(X_{levee}^R \times H_{levee}^R + \frac{1}{2} \times H_{levee}^R{}^2 \times (1/m_6) + \frac{1}{2} \times X_{levee}^R{}^2 \times m_5 \right)^{5/3}}{n_R \left(H_{levee}^R \sqrt{1 + (1/m_6)^2} + X_{levee}^R \sqrt{1 + m_5^2} \right)^{2/3}} \quad (25)$$

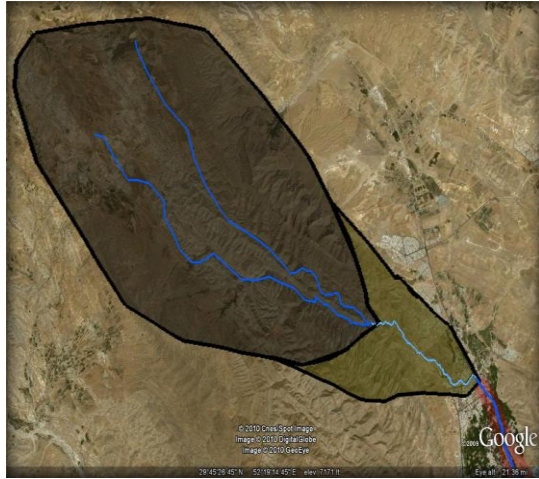
$$H_m = H_{levee}^L + x_{levee}^L / m_2 \quad (28)$$

$$\text{or } H_m = H_{levee}^R + x_{levee}^R / m_5$$

$$b_s = b_0 + d(1/m_3 + 1/m_4) \quad (26)$$

$$\text{Setback} = X_{levee}^R + b_s + X_{levee}^L \quad (27)$$

که در آن‌ها،
 Q_T دبی طراحی گوره با دوره بازگشت T سال، Q_M ، Q_R ، Q_L به ترتیب دبی عبوری از سیلابدشت درون گوره در سمت چپ و راست رودخانه و دبی عبوری از مقطع اصلی رودخانه، S_M ، S_R ، S_L به ترتیب شیب طولی سیلابدشت در سمت چپ و راست رودخانه و رودخانه، n_M ، n_R ، n_L به ترتیب ضریب مانینگ سیلابدشت در سمت چپ و راست رودخانه و در مقطع اصلی رودخانه، m_6 و m_1 به ترتیب شیب کناره‌های گوره در کرانه چپ و راست رودخانه، m_2 و m_5 به ترتیب شیب متوسط عرضی سیلابدشت در منطقه پتانسیل خسارت در سمت چپ و راست رودخانه، m_3 و m_4 به ترتیب شیب عرضی کناره‌های رودخانه در سمت چپ و راست، b_0 عرض کف رودخانه، b_s عرض فوقانی مقطع رودخانه، d عمق رودخانه، $Setback$ مقدار عقب‌نشینی گوره از کرانه رودخانه و H_m فاصله لبه رودخانه تا بالای گوره می‌باشد.



شکل ۲- حوضه آبریز مورد مطالعه در شهر شیراز



شکل ۳- موقعیت اتصال دو شاخه نهراعظم و خشک معالی آباد و تشکیل رودخانه خشک شیراز

۶- حل مدل

در مدل قطعی سود خالص به ازای هر دوره بازگشت محاسبه می‌شود. سود خالص هریک از دوره بازگشت‌ها که حداکثر باشد، به عنوان دوره بازگشت طراحی و دبی متناظر با آن، به عنوان دبی طراحی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این دبی طراحی، ابعاد بهینه طراحی گوره محاسبه می‌شود. در مدل احتمالاتی پس از مشخص شدن بازه هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت، مقادیری برای آن‌ها در بازه متناظرش تولید می‌شود. هر ترکیب از این پارامترها را یک سناریو گویند. برای هر دوره بازگشت به ازای هر یک از سناریوها خسارت مورد انتظار سالانه و سود خالص طرح محاسبه می‌شود و مطابق با آن ابعاد طراحی هر سناریو نیز تعیین

۴-۵- محدودیت‌های مربوط به عدم قطعیت پارامترها

در این بخش عدم قطعیت پارامترهای ضریب زبری مانینگ مربوط به هیدرولیک رودخانه، دبی طراحی مربوط به هیدرولوژی و نرخ بهره مرتبط با اقتصاد طرح مدل‌سازی شده است. برای این مدل‌سازی طبق مطالعات پیشین برای هر سه پارامتر دبی طراحی، ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره توزیع لاگ نرمال در نظر گرفته شده است. برای کمی‌سازی عدم قطعیت از شاخص‌های آماری میانگین و انحراف معیار استفاده شده که به صورت رابطه ذیل می‌باشد.

$$n_m = LN(\bar{n}_m, s_n) \quad (29)$$

$$Q_{design} = LN(\bar{Q}_{design}, s_Q) \quad (30)$$

$$i = LN(\bar{i}, s_i) \quad (31)$$

\bar{n}_m مقدار میانه پارامتر ضریب زبری مانینگ در توزیع لاگ نرمال، \bar{Q}_{design} مقدار میانه پارامتر دبی طراحی در توزیع لاگ نرمال و \bar{i} مقدار میانه پارامتر نرخ بهره در توزیع لاگ نرمال و S مقدار انحراف هریک از پارامترها در توزیع مربوطه می‌باشد.

۵- مطالعه موردی

رودخانه خشک شیراز یک رودخانه فصلی است که پس از عبور از شمال شهر شیراز به دریاچه مهارلو می‌ریزد (شکل ۲). این رودخانه دارای دو شاخه اصلی به نام‌های نهراعظم و خشک معالی آباد (تنگ‌سرخ) است که به ترتیب از ارتفاعات شمال و شمال غرب شیراز سرچشمه می‌گیرند (شکل ۳). این دو شاخه در ابتدای شهر شیراز به هم پیوسته و رودخانه خشک را تشکیل می‌دهند (مشاورین آیفن، ۱۳۸۷). بر روی شاخه خشک معالی‌آباد قبل از اتصال به شاخه

می‌شود. در نهایت میانگین سود خالص کل سناریوها به عنوان سود نهایی حاصل از اجرای طرح برای آن دوره بازگشت مطلوب خواهد بود. این روند برای سایر دوره بازگشت‌ها تکرار شده و هریک از آن‌ها که سود خالص نهایی بیشتری ایجاد کند، به عنوان دوره بازگشت بهینه طراحی انتخاب می‌شود. سپس ابعاد حاصل از سناریوهای آن دبی طراحی به عنوان محدوده ابعاد طراحی خواهد بود.

به منظور نتیجه‌گیری و مقایسه، مقادیر ابعاد حاصل از مدل قطعی، مدل احتمالاتی با هر سه نوع عدم قطعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی، مدل احتمالاتی با عدم قطعیت هیدرولوژیکی، مدل احتمالاتی با عدم قطعیت هیدرولیکی و مدل احتمالاتی با عدم قطعیت اقتصادی با هم مقایسه شده و درصد اختلاف مقدار هر یک از ابعاد طراحی مدل‌های احتمالاتی نسبت به ابعاد طراحی مدل قطعی محاسبه شده است.

۷- نتایج

همانطور که در شکل ۴ نمایان است، حداکثر سود خالص سالانه در همه مدل‌ها (قطعی- احتمالاتی با عدم قطعیت هیدرولوژیکی، احتمالاتی با عدم قطعیت هیدرولیکی و احتمالاتی با عدم قطعیت اقتصادی و احتمالاتی با هر سه نوع عدم قطعیت) در دوره بازگشت ۲۰ سال و دبی‌های طراحی مختلف رخ می‌دهد، این دوره بازگشت به عنوان دوره بازگشت طراحی گوره در منطقه پتانسیل خسارت منظور شده و ابعاد طراحی گوره با این دوره بازگشت تعیین شده است. با اجرای مدل احتمالاتی در دوره بازگشت طراحی، برای هر سناریو ابعاد طراحی گوره تعیین شده است. در حالی که اجرای مدل قطعی برای هر دوره بازگشت تنها یک مقدار را برای ابعاد طراحی

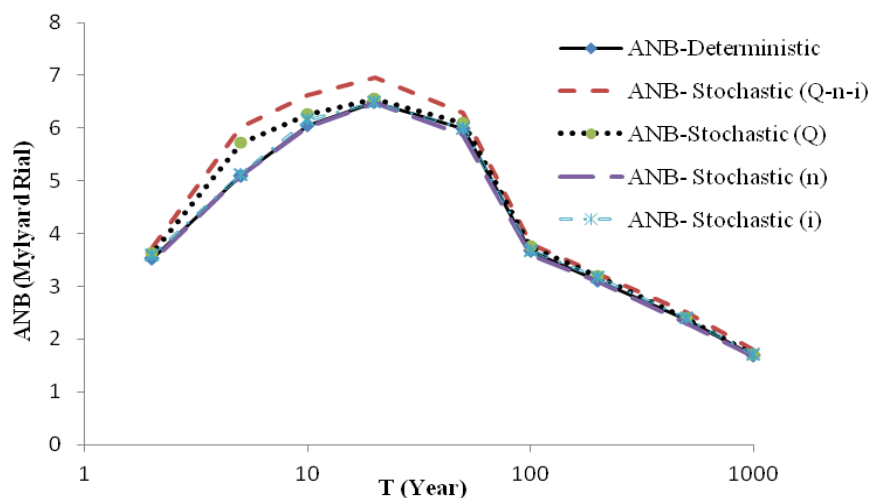
نمایش می‌دهد. همانطور که از نتایج موجود مشهود است مقادیر ابعاد ناشی از مدل قطعی بین محدوده‌ی مینیمم و ماکزیمم مقادیر حاصل از اجرای مدل احتمالاتی قرار می‌گیرند (جدول ۱ تا ۶). همچنین به منظور مشاهده بازه پاسخ مدل‌های مختلف برای هر پارامتر، تابع توزیع فراتری هر یک از آن‌ها ترسیم شده است (شکل‌های ۵ تا ۱۰).

جهت کمی‌نمودن میزان تأثیرگذاری هر یک از عدم قطعیت‌ها قدر مطلق اختلاف هر یک از مقادیر ابعاد و پارامترهای طراحی از مقدار آن در مدل قطعی محاسبه شده و سپس میانگین اختلاف‌ها محاسبه و تقسیم بر مقدار ابعاد در مدل قطعی شده و در ۱۰۰ ضرب شده است تا درصد اختلاف به دست آید (رابطه (۳۲)). بر این اساس هر چه درصد اختلاف بیشتر باشد، عدم قطعیت مربوطه تأثیر بیشتری بر پارامتر دارد.

(۳۲)

$$\% \text{ of Difference} = \frac{\sum_{i=1}^{100} |ANB(i) - ANB(Deterministic)|}{ANB(Deterministic)} \times 100$$

مقادیر درصد اختلاف ابعاد و پارامترهای طراحی در جدول ۷ آورده شده است. همان طور که در این جدول و شکل ۱۱ نیز مشخص است، بعد از عدم قطعیت هیدرولوژیکی، به ترتیب عدم قطعیت‌های اقتصادی و هیدرولیکی، دارای بیشترین تأثیر بوده‌اند. همچنین اعمال هر سه نوع عدم قطعیت تأثیر قابل توجه‌تری نسبت به اعمال آن‌ها به طور جداگانه دارد و بازه وسیع‌تری برای هریک از پارامترها را نتیجه می‌دهد و در واقع بازه اطمینان گسترده‌تری در طراحی ایجاد می‌کند و در نتیجه طراحی نتایج مطلوب‌تری خواهد داشت.



شکل ۴- تعیین دوره بازگشت بهینه طراحی

جدول ۱- مقادیر پارامتر ANB در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

| متغیر (ANB) | | | نوع عدم قطعیت | |
|-------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۸/۲۷ | ۶/۵۵ | ۵/۶۳ | | هیدرولوژیکی |
| ۶۶۰ | ۶/۴۷ | ۶/۳۳ | | هیدرولیکی |
| ۶/۸۰ | ۶/۴۹ | ۴/۲۱ | | اقتصادی |
| ۱۴/۳۹ | ۶/۹۵ | ۲/۸۶ | هر سه | |
| ۶/۴۸ | | | مدل قطعی | |

جدول ۲- مقادیر پارامتر Acost در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

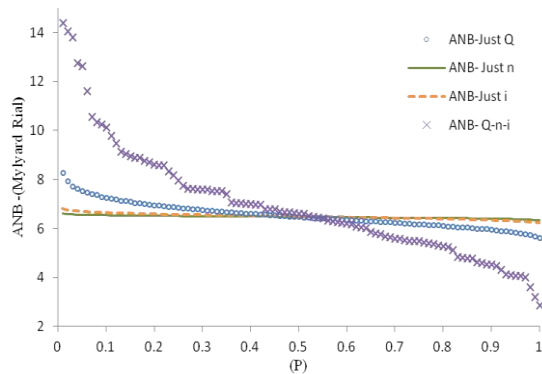
| متغیر (Acost) | | | نوع عدم قطعیت | |
|---------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۹/۳۶ | ۷/۱۸ | ۵/۳۰ | | هیدرولوژیکی |
| ۷/۳۳ | ۷/۱۹ | ۷/۰۵۴ | | هیدرولیکی |
| ۷/۵۲ | ۷/۱۸ | ۶/۸۷ | | اقتصادی |
| ۱۵/۹۰ | ۷/۳۴ | ۲/۷۸ | هر سه | |
| ۷/۱۷ | | | مدل قطعی | |

جدول ۳- مقادیر پارامتر H-Levee-L در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

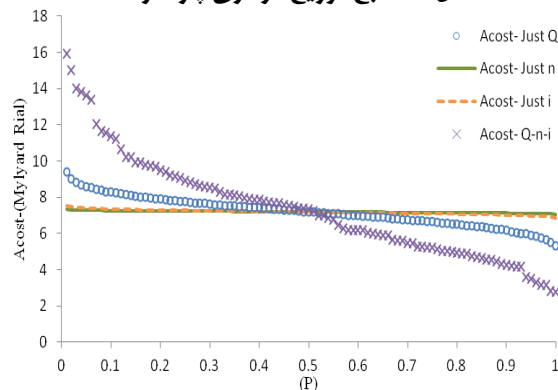
| متغیر (H-Levee-L) | | | نوع عدم قطعیت | |
|-------------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۲/۱۵ | ۲/۰۰ | ۱/۷۳ | | هیدرولوژیکی |
| ۲/۱۸ | ۲/۱۱ | ۱/۹۷ | | هیدرولیکی |
| ۲/۱۵ | ۲/۱۵ | ۲/۱۵ | | اقتصادی |
| ۲/۵۱۳ | ۱/۹۸ | ۱/۰۲۴ | هر سه | |
| ۲/۱۴ | | | مدل قطعی | |

جدول ۴- مقادیر پارامتر H-Levee-R در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

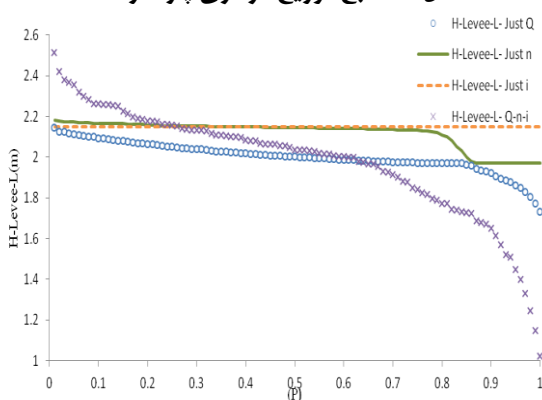
| متغیر (H-Levee-R) | | | نوع عدم قطعیت | |
|-------------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۱/۹۲ | ۱/۷۰ | ۱/۵۵ | | هیدرولوژیکی |
| ۱/۷۲ | ۱/۶۸ | ۱/۶۷ | | هیدرولیکی |
| ۱/۶۷ | ۱/۶۷ | ۱/۶۷ | | اقتصادی |
| ۲/۲۷ | ۱/۷۲ | ۱/۰۲۴ | هر سه | |
| ۱/۶۸ | | | مدل قطعی | |



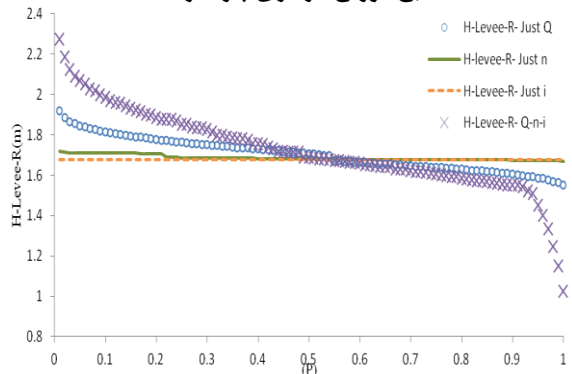
شکل ۵- تابع توزیع فراتری پارامتر ANB



شکل ۶- تابع توزیع فراتری پارامتر Acost



شکل ۷- تابع توزیع فراتری پارامتر H-Levee-L



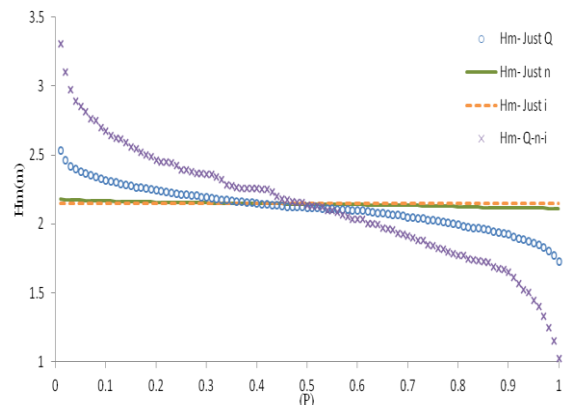
شکل ۸- تابع توزیع فراتری پارامتر H-Levee-R

جدول ۵- مقادیر پارامتر Hm در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

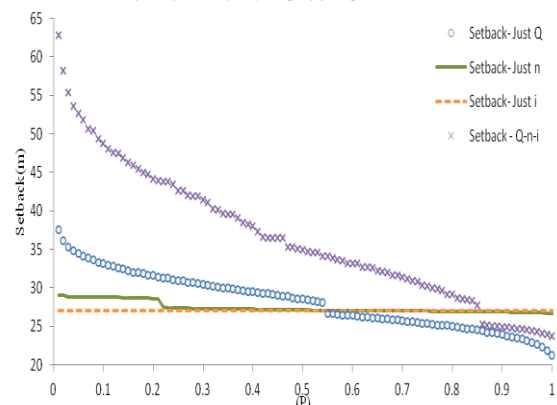
| متغیر (Hm) | | | نوع عدم قطعیت | |
|------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۲/۵۳ | ۲/۱۲ | ۱/۷۳ | | هیدرولوژیکی |
| ۲/۱۸ | ۲/۱۴ | ۲/۱۱ | | هیدرولیکی |
| ۲/۱۴ | ۲/۱۴ | ۲/۱۴ | | اقتصادی |
| ۳/۳۰۴ | ۲/۱۳۰ | ۱/۰۲ | هر سه | |
| ۲/۱۵ | | | مدل قطعی | |

جدول ۶- مقادیر پارامتر Setback در مدل‌های احتمالاتی و قطعی

| متغیر (Setback) | | | نوع عدم قطعیت | |
|-----------------|---------|--------|---------------|-------------|
| ماکزیمم | میانگین | مینیمم | | |
| ۳۷/۶۲ | ۲۸/۲۷ | ۲۱/۲۳ | | هیدرولوژیکی |
| ۲۹/۰۱۱ | ۲۷/۴۱ | ۲۶/۶۸ | | هیدرولیکی |
| ۲۷/۰۲۶ | ۲۷/۰۲۶ | ۲۷/۰۲۵ | | اقتصادی |
| ۶۲/۸۲ | ۳۶/۵۳ | ۲۳/۶۹ | هر سه | |
| ۳۴/۸۵ | | | مدل قطعی | |



شکل ۹- تابع توزیع فراتری پارامتر Hm



شکل ۱۰- تابع توزیع فراتری پارامتر Setback

جدول ۷- درصد اختلاف مقادیر ابعاد حاصل از مدل‌های احتمالاتی با مدل قطعی

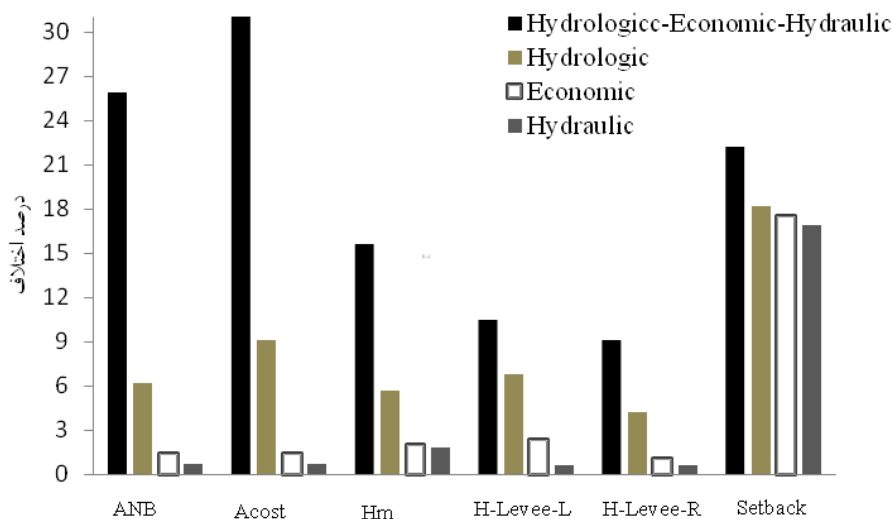
| نوع عدم قطعیت | درصد اختلاف | ابعاد و پارامترهای طراحی | | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------------------|-------|-------|-----------|-----------|---------|
| | | ANB | Acost | hm | H-Levee-L | H-Levee-R | Setback |
| هیدرولوژیکی | | ۶/۱۷ | ۹/۱۲ | ۵/۶۳ | ۶/۷۵ | ۴/۲۱ | ۱۸/۱۴ |
| هیدرولیکی | | ۰/۷۲ | ۰/۶۷ | ۱/۸۳ | ۰/۵۶ | ۰/۶۵ | ۱۵/۸۷ |
| اقتصادی | | ۱/۴۵ | ۱/۴۶ | ۲/۰۴ | ۲/۳۴ | ۱/۰۴ | ۱۷/۵۲ |
| هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، اقتصادی | | ۲۵/۸۶ | ۳۰/۹۹ | ۱۵/۵۲ | ۱۰/۴۲ | ۹/۰۳ | ۲۲/۱۸ |

این عدم قطعیت‌ها یک مدل بهینه‌سازی احتمالاتی بر مبنای شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. مدل بهینه‌سازی حاصل، یک مدل غیرخطی است که حل آن توسط نرم‌افزار LINGO-13 صورت گرفته است. تحلیل عدم قطعیت در مسائل مهندسی اجتناب‌ناپذیر است. در نظر گرفتن عدم قطعیت مسائل را ساده نمی‌کند، اما صرف‌نظر کردن از آن، صرف نظر کردن از واقعیت است و عدم رضایت از عملکرد سیستم در زمان آینده را خواهد داشت. برخی از نتایج حاصل در این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

جهت اطمینان از عملکرد سیستم هر سه نوع عدم قطعیت و در صورت وجود محدودیت زمان و هزینه در طراحی، حداقل باید عدم قطعیت هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود.

- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل حساسیت انواع عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در یکی از معمول‌ترین سازه‌های کنترل سیلاب یعنی گوره‌ها پرداخته شده است. برای کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها از روش گشتاورهای آماری و جهت تحلیل



شکل ۱۱- مقایسه میزان تأثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها بر مقدار ابعاد و پارامترهای طراحی

البته این نتیجه محدود به فرضیات این مطالعه است و برای تعمیم آن باید مطالعات بیشتری صورت پذیرد.

۶- در این مطالعه مقدار پارامتر عقب نشینی گوره از کرانه رودخانه و ارتفاع گوره به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را نسبت به اعمال و عدم اعمال عدم قطعیت دارند.

تشکر و قدردانی

بخشهایی از این مقاله در پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۲) ارائه شده است.

پی نوشت‌ها

- 1- Risk-Based Design
- 2- LINDO SYSTEMS INC
- 3- Levee
- 4- Monte Carlo Simulation
- 5- Setback
- 6- Analytic
- 7- Approximate

۵- مراجع

اسکونزادام م (۱۳۷۸) اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۱- اعمال عدم قطعیت باعث ایجاد تغییر در مقدار دبی طراحی و عدم تغییر در دوره بازگشت بهینه می‌شود و حداکثر سود خالص سالانه در هر دو مدل قطعی و احتمالاتی در دوره بازگشت ۲۰ سال رخ می‌دهد، این دوره بازگشت به عنوان دوره بازگشت طراحی گوره در منطقه پتانسیل خسارت منظور شده است.

۲- اعمال عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی مؤثرتر از اقتصادی و آن هم مهم‌تر و مؤثرتر از هیدرولیکی است. جهت اطمینان و رضایت از عملکرد بهتر سیستم، لازم است حداقل عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی منظور شود.

۳- لحاظ نمودن عدم قطعیت هیدرولیکی (عدم قطعیت در ضریب زبری مانینگ) تأثیر چندانی در مقدار ابعاد و پارامترهای طراحی ندارد و در صورت وجود محدودیت زمان و هزینه در طراحی می‌توان از آن صرف نظر نمود.

۴- اعمال هر سه نوع عدم قطعیت تأثیر قابل توجه‌تری نسبت به اعمال آن‌ها به طور جداگانه دارد و بازه وسیع‌تری برای هر یک از پارامترها را نتیجه می‌دهد و در واقع بازه اطمینان بیشتری برای صحت عملکرد طرح ایجاد می‌کند.

۵- نتایج مدل بیانگر این مطلب هستند که در نظر گرفتن عدم قطعیت هیدرولوژیکی بیش از ۹۰٪ عدم قطعیت‌هاست و در صورت لحاظ نمودن سایر عدم قطعیت‌ها خطای زیادی وارد مدل نمی‌شود.

- uncertainty analysis in hydraulic design (report), American Society of Civil Engineers.
- Mays LW (1996) The role of risk analysis in water resources engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State university, pp. 8-12.
- Tung, YK (1996) Uncertainty analysis in water resources engineering. Tick, K. S. Goulter, I. C., Xu, c., Wasimi, S. A., and Bouchart, F. (Eds.), In Stochastic Hydraulics 96
- U. S. Army Corps of Engineers (1996) Risk-based analysis for flood damage reduction studies. EM1110-2-1619, Washington.
- Tung, YK (1999) Risk/Reliability-based hydraulic engineering design in hydraulic design handbook, L. W. Mays (ed.). McGraw-Hill, New York.
- Ahmed, I and Freeman, GE (2004) Estimating stage-discharge uncertainty for flood damage assessment. Proc. World Water and Environmental. Resources Management, 1-8
- Loucks, DP and Van Beek, E (2005) Water resources system planning and management, UNESCO, Netherlands.
- Griffiths DV, Fenton GA (2007) Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, SpringerWien, New York.
- افتخاریان ل (۱۳۸۰) تحلیل عدم قطعیت پروفیل سطح آب به منظور بررسی قابلیت اعتماد سیل بندها. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- مهندسین مشاور آیفن، تهران (۱۳۸۷) مطالعات طرح سد کنترل سیلاب تنگ سرخ، گزارشات برنامه ریزی منابع آب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی.
- سرابندی ا (۱۳۸۷) بهینه سازی ابعاد سیستم‌های ترکیبی (سد-گوره)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه عباسپور.
- علیمحمدی س، رفیعی انزاب ن، مرادی م (۱۳۹۲) طراحی خاکریزهای کنار رودخانه (گوره‌ها) به روش آنالیز ریسک، مجله آب و فاضلاب. ۸۹: ۹۵-۱۱۰.
- Lee H L (1986) Hydraulic uncertainties in flood levee capacity. Journal of Hydraulic Engineering, 112(10): 928- 934.
- Chow, V T, Maidment, DR and Mays, LW (1988) Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, USA.
- Morgan, M Granger and Henrion, Max (1990) A Guige to Dealing with Uncertainty in Quantitive Risk and Policy Analysis, Cambridge, Univercity Press.
- Tung YK and Yen BC (1993) "Some progress in uncertainty analysis for hydraulic design. Yen, B. C. and Tung, Y.K., (Eds.). In reliability and