

# طرح بهینه خاکریزهای کنار رودخانه (گوره‌ها) با اعمال عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی به روش مونت کارلو

معصومه بهروز<sup>1</sup>، سعید علیمحمدی<sup>2</sup>، جلال عطاری

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، پردیس فنی-مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

2- استادیار دانشکده عمران و محیط زیست، پردیس فنی-مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

3- استادیار دانشکده عمران و محیط زیست، پردیس فنی-مهندسی عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

\* تهران، صندوق پستی 13739-44967

S\_alimohammadi@sbu.ac.ir

**چکیده** - طراحی، تحلیل و بهره‌برداری سیستم‌های کنترل سیل به دلیل ماهیت تصادفی سیلاب و خطاهای اندازه‌گیری با عدم قطعیت همراه است. یکی از این مسائل، طراحی خاکریزهای کناره رودخانه (گوره‌ها) است که با عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی همراه می‌باشد. در این مقاله به طراحی ابعاد بهینه گوره با در نظر گرفتن انواع عدم قطعیت‌های موجود پرداخته شده و برای تجزیه و تحلیل این عدم قطعیت‌ها یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی مونت‌کارلو<sup>1</sup> توسعه داده شده است. مدل بهینه‌سازی حاصل، یک مدل استوکستیک غیرخطی است که حل آن توسط نرم‌افزار LINGO-13<sup>2</sup> صورت گرفته است. در این مقاله محدوده شمال شیراز در مجاورت رودخانه خشک معالی‌آباد (تنگ سرخ) مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل با نتایج مدل قطعی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مقایسه شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته و در پی اجرای مدل، سیلاب با دوره بازگشت 20 ساله همانند مدل قطعی دارای بیشترین سود خالص سالانه بوده و به عنوان سیل طراحی انتخاب شده است. برخلاف مدل قطعی که ابعاد سیستم به صورت قطعی و تک مقداری حاصل می‌شوند، مدل استوکستیک یک بازه برای هر پارامتر نتیجه می‌دهد و می‌توان توزیع آماری این پارامترها را نیز تخمین زد.

**کلیدواژگان:** کنترل سیل، گوره، عدم قطعیت، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو

## 1- مقدمه

عدم قطعیت همراه است. منابع ایجاد عدم قطعیت‌ها را می‌توان به پنج گروه ذاتی یا طبیعی، 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

طراحی، تحلیل و بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب با

1. Mont Carlo  
2. LINDO Systems Inc- Version 13

رودخانه‌های آمریکا با دو رویکرد  $USACE^2$  و  $NRC^3$  پرداخته است. (1997)  $USACE$  در آیین‌نامه دیگری به بررسی عدم قطعیت در منحنی‌های فراوانی که توزیع مشخصی ندارند، می‌پردازد. در این روش از تحلیل‌های احتمالاتی برای محاسبه عدم قطعیت استفاده شده است و برای تحلیل و آنالیز ریسک طرح‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. افتخار احمد (2004) عدم قطعیت را در منحنی دبی-اشل برای محاسبه خسارت سیلاب برآورد نموده است. در این تحلیل ارتفاع آزاد در گوره‌ها را مدنظر قرار داده 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 نموده است. (2005) Loucks and van Beek به بررسی انواع مدل‌های بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت و آنالیز عدم قطعیت مدل‌ها، تحلیل اقتصادی برای تعیین حجم بهینه کنترل سیلاب در مخزن و شبیه‌سازی سیستم ترکیبی سد-گوره پرداخته‌اند.

(2006)  $USACE$  در آیین‌نامه‌ای به بررسی و تعریف مواردی از جمله ریسک و عدم قطعیت و آنالیز ریسک پرداخته است، همچنین عدم قطعیت هیدرولیکی موجود در روابط دبی - اشل را نیز مورد بررسی قرار داده، در انتها نیز به موضوع تحلیل اقتصادی طرح‌ها اشاره کرده است. پیوست این آیین‌نامه نیز نتایج تحلیل اقتصادی طرحی را با استفاده از آنالیز ریسک به اختصار بیان می‌کند. (2007) Zhu et al. به بهینه‌یابی ارتفاع و عقب-نشینی گوره با تحلیل اقتصادی سود-هزینه با رویکرد آنالیز ریسک در شرایط دینامیکی تغییر اقلیم و کاربری اراضی حفاظت شده در حوضه رودخانه ساکرامنتو<sup>4</sup> در پایین‌دست سد فالسوم<sup>5</sup> پرداخته‌اند. (2009)  $USACE$

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 به علت اندازه‌گیری‌های نادقیق، غیرهمگن و پراکنده 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). Lee (1986) عدم قطعیت هیدرولیکی ایجاد شده به علت ناتوانی مدل‌های ریاضی و معادلات تجربی را برای تعیین ظرفیت گوره مورد بررسی قرار داده است. معادله مانینگ را برای تعیین ظرفیت استفاده نموده و عدم قطعیت پارامتر ضریب زبری را در آن اعمال کرده است. Mays and Tung (1992) به انواع روش‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی اشاره کرده و به بررسی تأثیر روش‌های مختلف سازه‌ای کنترل سیل و کاهش خسارات آن پرداخته‌اند. Linsley (1992) به برآورد خسارات سیل، شناخت نقاط آسیب‌پذیر و تحلیل اقتصادی روش‌های مختلف مهار سیلاب پرداخته است. (1993) Yen and Tung به تعریف و بررسی عدم قطعیت در سیستم‌ها پرداخته‌اند، همچنین روش‌های مختلف بررسی عدم قطعیت (تحلیلی، تقریبی و شبیه‌سازی) را تشریح کرده‌اند. (1996)  $USACE$  به بررسی عدم قطعیت‌های موجود در نمودارهای چهارگانه دبی-اشل، دبی-فراوانی، اشل-خسارت و خسارت احتمالاتی برای محاسبه خسارت‌های مورد انتظار سالانه (EAD) پرداخته است. (1997) Goldman به ارزیابی خسارت قابل انتظار سالانه<sup>1</sup> بر روی گوره‌های

2. United State Army Corps of Engineers  
3. Natural Research Council  
4. Sacramento  
5. Folsom

1. Expected Annual Damage (EAD)

معالی آباد (تنگ سرخ) شیراز را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات پیشین همه مدل‌سازی‌ها به صورت قطعی بوده و پارامترها و ورودی‌های مدل به صورت تک مقداری وارد مدل شده و ابعاد طراحی نیز به صورت تک مقداری حاصل شده‌اند. به طور کلی هدف این مقاله ارائه یک مدل بهینه سازی با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی است تا عملکرد سیستم در زمان‌های آینده (که اطلاعات کاملی از آن به هنگام مطالعه سیستم در دسترس نیست) رضایتبخش شود. از این رو پارامترهای مدل از قبیل دبی طراحی و ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره همراه با عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند و برای تحلیل عدم قطعیت از روش شبیه-سازی مونت کارلو استفاده شده است.

در طرح‌های کنترل سیلاب، سود عبارت است از جلوگیری یا کاهش خسارت سیلاب در ناحیه پتانسیل خسارت، سود حاصل از استفاده از اراضی استحصال شده و سود ناشی از امکان استفاده اقتصادی‌تر از اراضی محدوده سیلابدشت، و هزینه عبارت است از مجموع هزینه‌های اجرایی و بهره-برداری و نگهداری سیستم (USACE, 1996). در این مقاله از سودهای ناشی از استفاده از اراضی استحصال شده محدوده سیلابدشت، صرف نظر شده است. مدل بهینه‌سازی حاصل، یک مدل غیرخطی استوکستیک است و توسط نرم‌افزار LINGO-13، حل شده است. حل مدل ضمن تعیین ابعاد بهینه مؤلفه‌های طراحی سیستم از قبیل ارتفاع گوره، و عقب‌نشینی گوره از کرانه رودخانه<sup>1</sup>، سیل طرح<sup>2</sup> را نیز نتیجه می‌دهد.

## 2- مبانی تئوری

### 2-1- تحلیل عدم قطعیت

در روش‌های متداول و سنتی طراحی سازه‌ها بر پایه

طراحی گوره در پروژه کنترل سیلاب رودخانه ساکرامنتو (واقع در کالیفرنیا) را براساس تحلیل آنالیز ریسک مورد بررسی قرار داده است. (Simonovic et al. (2011 در گزارشی به بحث در مورد نحوه تصمیم‌گیری و مدیریت منابع آب با لحاظ نمودن عدم قطعیت پرداختند. در این گزارش مجموعه‌ای از مثال‌ها و نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که در آنها از رویکردهای احتمالاتی و فازی برای مسائل مدیریت منابع آب استفاده شده است. بطور کلی هدف اصلی این گزارش، نمایش چگونگی تأثیر اعمال عدم قطعیت و ریسک در میزان بهبود تصمیم طراحان می‌باشد. سنگین آبادی (1384) تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی بر پروفیل سطح آب و قابلیت اعتماد دیواره‌های سیل‌بند را مورد مطالعه قرار داده است و روش‌های سنتی و جدید تحلیل ریسک را برای تعیین ارتفاع دیوار به طور مختصر مقایسه کرده است. سرابندی (1389) به شناخت مبانی، ابزار و ملزومات یک طرح کنترل سیلاب، روش‌های کاهش خسارات سیل و نحوه تحلیل اقتصادی طرح‌های کنترل سیلاب پرداخته است. در یک مطالعه موردی نیز که بر روی رودخانه خشک معالی آباد شیراز انجام گرفته است، به استفاده از مدل بهینه ترکیبی سد-گوره برای اجرای طرح کنترل سیلاب در منطقه پتانسیل خطر با تحلیل اقتصادی سود-هزینه پرداخته است. رفیعی (1389) به بررسی یک طرح کنترل سیلاب، انواع خسارات حاصل از سیل و نحوه تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی ابعاد طراحی خاکریزهای کناره رودخانه (گوره) پرداخته است. همچنین با معرفی رودخانه خشک معالی آباد شیراز از مدل بهینه گوره برای اجرای طرح کنترل سیلاب در منطقه پتانسیل خطر استفاده نموده است. علیمحمدی و همکاران (1392) به بهینه‌سازی ابعاد خاکریزهای کناره رودخانه (گوره‌ها) با استفاده از آنالیز ریسک و تحلیل اقتصادی سود-هزینه پرداخته‌اند. همچنین سیستم پیشنهادی کنترل سیلاب رودخانه خشک

1. Setback  
2. Design Flood

انحراف معیار آنها همواره دارای عدم قطعیت می‌باشد که به علت خطاهای نمونه‌گیری در تخمین پارامترهای یک توزیع مشخص ایجاد می‌شود (کراچیان و همکاران، 1378). خطای استاندارد معیاری از عدم قطعیت در برآورد دبی اوج سیل است. در واقع مقداری که برای پیشامد  $T$  ساله برآورد می‌شود مقداری قطعی نیست، بلکه میانه توزیعی است که اغلب نرمال و لاگ نرمال در نظر گرفته می‌شود و خطای استاندارد، انحراف معیار این توزیع است (افتخاریان و همکاران، 1382). در این مقاله عدم قطعیت ذاتی و پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است.

عدم قطعیت هیدرولیکی شامل عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی ظرفیت رودخانه است و از دو منبع اساسی مدل و پارامتر ناشی می‌شوند. عدم قطعیت‌های هیدرولیکی از ساده‌سازی در مدل‌های ریاضی و توصیف پدیده‌های فیزیکی و طبیعی در مهندسی هیدرولیک، اجرای غیر ایده آل سازه‌های هیدرولیکی و ... نشأت می‌گیرد.

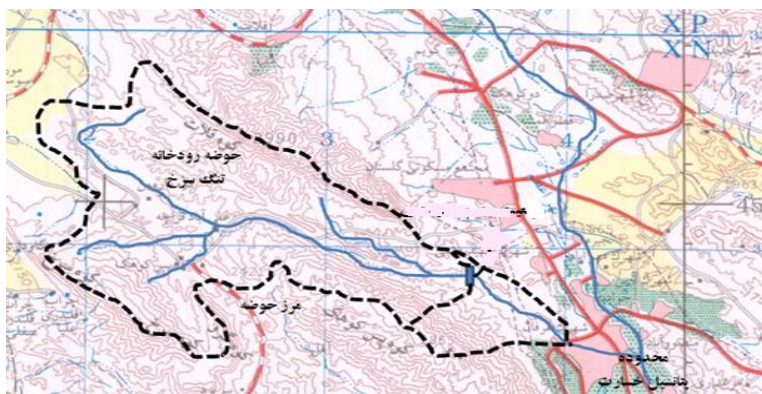
عدم قطعیت‌های هیدرولیکی به طور وسیعی از عدم قطعیت پارامترهای موجود در مدل هیدرولیکی ناشی می‌شود. به عنوان مثال در رابطه مانینگ که اساس ارزیابی دبی مقطع رودخانه است، به هر طریقی که ضریب مانینگ محاسبه شود، دارای عدم قطعیت خواهد بود. در این مقاله عدم قطعیت موجود در ضریب مانینگ به عنوان عدم قطعیت هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت اقتصادی شامل عدم قطعیت‌های ارزیابی هزینه‌های ساخت، ارزش ساختمان‌ها و محتویات آنها و زیرساخت‌های محدوده‌های سیل‌گیر، هزینه اراضی تحت و داخل بازه گوره، بهره‌برداری، نگهداری، نرخ بهره و مانند آن می‌باشد (USACE, 1996). در این مقاله عدم قطعیت نرخ بهره وارد مدل شده است.

## 2-2- فرضیات به کار رفته

شکل 1 سیستم مورد نظر در این مطالعه را با اجزای آن به طور شماتیک نمایش می‌دهد.

ریسک برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها از ضرایب اطمینان استفاده می‌شود. معمولاً این ضرایب براساس تجربیات و قضاوت مهندسی تعیین می‌شوند و بنابراین نمی‌توانند ایمنی و عملکرد مطلوب سیستم را تضمین کنند. 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 (Tung, 1996). در این مطالعه از گشتاورهای آماری میانگین و انحراف معیار برای کمی‌سازی استفاده شده است. هدف اصلی از تحلیل، تعیین عدم قطعیت نتایج مدل به صورت تابعی از عدم قطعیت‌های مدل و پارامترهای تأثیرگذار در سیستم است. روش‌های مختلفی برای تحلیل عدم قطعیت وجود دارد که شامل روش‌های تحلیلی، تقریبی و شبیه‌سازی می‌باشد. انتخاب روش مناسب به طبیعت مسأله، اطلاعات موجود، محدودیت منابع، پیچیدگی مدل و دقت مطلوب برای نتایج مدل بستگی دارد (Tung and Yen, 1993). در این مطالعه از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل استفاده شده است.

عدم قطعیت‌های هیدرولژیکی به سه دسته عدم قطعیت‌های ذاتی، مدل و پارامتری تقسیم‌بندی می‌شود (Mays and Tung, 1992). اصولاً وقوع فرایندهای هیدرولژیکی از قبیل بارندگی و سیلاب به صورت تصادفی و احتمالاتی می‌باشند، این عدم قطعیت‌ها را عدم قطعیت ذاتی می‌نامند. انتخاب مدل احتمالاتی هیدرولژیکی به منظور برازش بر داده‌های موجود همواره با عدم قطعیت همراه می‌باشد. بررسی عدم قطعیت‌های فوق با استفاده از مدل‌های احتمالاتی یا استوکستیک مختلف و برازش آنها بر داده‌های موجود امکان‌پذیر می‌باشد. این نوع عدم قطعیت‌ها را عدم قطعیت مدل گویند. محاسبه پارامترهای هیدرولژیکی به کار رفته در توزیع‌های احتمالاتی هیدرولژیکی از قبیل میانگین و



شکل 1 شمایی از سیستم مورد مطالعه (مشاور آیفن، 1387)

در صورت انجام طرح کنترل سیلاب با سیل طراحی  $T$  سال هیچ‌گونه خسارتی از سیلاب‌های کمتر از دوره بازگشت  $T$  سال (با احتمال  $\frac{1}{T}$ )، به منطقه پتانسیل خطر وارد نمی‌شود. روند شرایط مقطع آبگذری به صورت استاتیک در نظر گرفته شده است. مقطع آبگذری امن منطقه پتانسیل خطر به صورت یک مقطع دوزنقه‌ای 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 قابل توجهی در عرض رودخانه در کل منطقه پتانسیل خطر رخ ندهد. طراحی گوره و میزان عقب‌نشینی آن، بر اساس حداکثر دبی هیدروگراف سیل طراحی که در ابتدای منطقه پتانسیل خطر تعیین می‌شود، صورت گرفته است.

برای محاسبه جریان عبوری از مقاطع از فرمول مانینگ استفاده شده است. برای دو پارامتر تصادفی (دبی طراحی، ضریب زبری مانینگ) یک توزیع (لاگ نرمال) و برای پارامتر نرخ بهره، توزیع (نرمال) با میانگین و انحراف معیار مشخص در نظر گرفته شده است.

### 3-2- فرمول‌بندی مدل

3-2-1- تابع هدف و محدودیت‌های مربوط به اجزای تابع هدف

تابع هدف مدل بهینه‌سازی، حداکثرسازی مقدار مورد

اجزای اصلی سیستم عبارتند از: گوره، منطقه پتانسیل خسارت، حوضه آبریز بالادست و رودخانه. در این سیستم مقطع سیلاب‌دشت در دو طرف رودخانه متفاوت در نظر گرفته شده است.

رفیعی (1389) مدل قطعی بهینه‌سازی ابعاد گوره را بدون لحاظ عدم قطعیت‌های مختلف تهیه نمود. در این مقاله از این مدل به عنوان مدل اولیه قطعی برای بهینه‌سازی ابعاد گوره استفاده شده است. از میان پارامترهایی که منشاء عدم قطعیت بوده‌اند، مهم‌ترین آنها انتخاب شده و به جای ورود آنها به صورت قطعی و معین، به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع معلوم در مدل تعریف گردیده‌اند. در این میان دبی طراحی، ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره به طریقی که در ادامه تشریح خواهد شد به صورت پارامترهای تصادفی وارد مدل شده و لذا مدل حاصل یک مدل استوکستیک خواهد بود. نظر به تولید تصادفی مقادیر متغیرها و اجرای مکرر مدل برای هر کدام از این مقادیر، رویکرد حاصل برای مواجهه با عدم قطعیت، رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو نام دارد.

هر مدلی که ارائه می‌شود مبتنی بر یک سری فرضیات است که باید در ابتدای تهیه مدل مورد توجه قرار گرفته و مدل بر اساس آن‌ها فرمول‌بندی شود. مهم‌ترین فرضیاتی که در ارائه مدل بهینه‌سازی این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

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

for  $Q_c = Q_j^{pda,natura} \leq Q_{j+1}^{pda,natura} \leq \dots \leq Q_n^{pda,natura} \leq \infty$  (5)

$$EAD_{with} = \left[ \sum_{j=p}^n \left[ \frac{D(Q_{j,x}^{Pda}) + D(Q_{j+1}^{Pda})}{2} \right] \right] \times [F(Q_{j+1}^{Pda}) - F(Q_j^{Pda})]$$

for  $Q_c = Q_j^{pda} \leq Q_{j+1}^{pda} \leq \dots \leq Q_n^{pda} \leq \infty$  (6)

در روابط فوق  $D(Q_{j,i}^{pda,natural})$  خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت  $j$  در سناریو  $i$  در منطقه پتانسیل خطر و  $F(Q_{j,i}^{pda,natural})$  احتمال عدم وقوع سیل با دوره برگشت  $j$  می‌باشد. هزینه سالانه طرح و هر یک از پارامترهای موجود از روابط (7) تا (22) حاصل می‌شوند (علیمحمدی و همکاران، 1392).

$$ACOST = \left( \sum_{i=1}^k [CRF_i] \times (Cleeve_i + LPRC_i + AOMR_i + CR_{levee,i}) \right) / K$$
 (7)

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$
 (8)

$$Cleeve = C_{levee}^L + C_{levee}^R$$
 (9)

$$C_{levee}^L = UPRC_{levee} \times A_{levee}^L \times L_{levee}$$
 (10)

$$C_{levee}^R = UPRC_{levee} \times A_{levee}^R \times L_{levee}$$
 (11)

$$LPRC = C_{set}^L + C_{set}^R + C_{LB}^L + C_{LB}^R$$
 (12)

$$C_{set}^L = UPRC_{land}^L \times X_{levee}^L \times L_{levee}$$
 (13)

$$C_{set}^R = UPRC_{land}^R \times X_{levee}^R \times L_{levee}$$
 (14)

$$C_{LB}^L = UPRC_{land}^L \times B_{levee}^L \times L_{levee}$$
 (15)

$$C_{LB}^R = UPRC_{land}^R \times B_{levee}^R \times L_{levee}$$
 (16)

$$AOMR = \beta \times Cleeve$$
 (17)

انتظار سود خالص سالانه  $(E[ANB])$  حاصل از اجرای سازه گوره در منطقه پتانسیل خطر می‌باشد و با توجه به آن سیل طراحی انتخاب می‌شود (USACE, 1996).

$$MAX E[ANB] = E[ABEN] - E[ACOST] \quad (1)$$

که در این رابطه،  $E[ANB]$  مقدار مورد انتظار سود خالص سالانه،  $E[ABEN]$  مقدار مورد انتظار سود سالانه و  $E[ACOST]$  مقدار مورد انتظار هزینه سالانه می‌باشد.

همان‌طور که در رابطه (2) مشاهده می‌شود، سود از تفاضل خسارت مورد انتظار سالانه در دو وضعیت عدم وجود طرح کنترل سیلاب و وجود طرح محاسبه می‌شود (Chow, 1988). عموماً خسارت مورد انتظار سالانه طبق رابطه (3) محاسبه می‌شود، این رابطه تنها شامل عدم قطعیت هیدرولوژیکی ذاتی می‌شود. با استفاده از همین روند می‌توان سایر عدم قطعیت‌ها را نیز در محاسبات اعمال نمود. در رابطه (4) عدم قطعیت هیدرولوژیکی و هیدرولیکی وارد شده است (Tung and Yen, 1996).

$$E[ABEN] = EAD_{without} - EAD_{with} \quad (2)$$

$$EAD_1 = \int_{q_c}^{\infty} D(q/q_c) \times f(q) \times d(q) \quad (3)$$

$$EAD_2 = \int_0^{\infty} EAD_1 \times g_{q_c}(q_c) \times dq_c \quad (4)$$

در روابط یاد شده،  $EAD_{without}$  خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل در شرایط طبیعی (بدون طرح)،  $EAD_{with}$  خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل پس از اجرای طرح کنترل سیلاب،  $q_c$  مقدار دبی طراحی،  $D(q/q_c)$  تابع خسارت حاصل از دبی و  $f(q)$  تابع چگالی احتمال دبی و  $g_{q_c}(q_c)$  تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی  $q_c$  می‌باشد. در عمل انتگرال موجود در رابطه (3) به روش ذوزنقه‌ای با روابط (5) و (6) تقریب زده می‌شود، رابطه (4) نیز به همین روال با استفاده از روش‌های عددی ساده‌سازی می‌شود.

$$Q_L = (S_L)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\left( X_{levee}^L \times H_{levee}^L + \frac{1}{2} \times H_{levee}^L{}^2 \times (1/m_1) + \frac{1}{2} \times X_{levee}^L{}^2 \times m_2 \right)^{\frac{5}{3}}}{n_L \left( H_{levee}^L \sqrt{1 + (1/m_1)^2} + X_{levee}^L \sqrt{1 + m_2^2} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (24)$$

$$Q_M = (S_M)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\left( \frac{b_0 + b_s}{2} \times d + H_m \times b_s \right)^{\frac{5}{3}}}{n_M \left( b_0 + d \times \left( \sqrt{1 + (1/m_3)^2} + \sqrt{1 + (1/m_4)^2} \right) + 2 \times H_m \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (25)$$

$$Q_R = (S_R)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\left( X_{levee}^R \times H_{levee}^R + \frac{1}{2} \times H_{levee}^R{}^2 \times (1/m_6) + \frac{1}{2} \times X_{levee}^R{}^2 \times m_5 \right)^{\frac{5}{3}}}{n_R \left( H_{levee}^R \sqrt{1 + (1/m_6)^2} + X_{levee}^R \sqrt{1 + m_5^2} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (26)$$

$$b_s = b_0 + d(1/m_3 + 1/m_4) \quad (27)$$

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

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

در روابط فوق، حداکثر دبی هیدروگراف ورودی در سناریو  $i$  به ابتدای منطقه پتانسیل خطر،  $Q_{M,i}$ ،  $Q_{R,i}$ ،  $Q_{L,i}$  به ترتیب دبی عبوری از سیلابدشت در سمت چپ و راست و دبی عبوری از رودخانه در سناریو  $i$ ،  $S_M$ ،  $S_R$ ،  $S_L$  به ترتیب شیب طولی سیلابدشت در سمت چپ و راست و رودخانه،  $n_{M,i}$ ،  $n_{R,i}$ ،  $n_{L,i}$  به ترتیب ضریب زبری مانینگ سیلابدشت در سمت چپ و راست و رودخانه در سناریو  $i$  (ضریب زبری مانینگ رودخانه به صورت پارامتر تصادفی در نظر گرفته شده است و ضریب زبری مانینگ سیلابدشت در سمت چپ و راست به صورت ضریبی از این پارامتر تصادفی منظور شده است)،  $m_2$  و  $m_5$  به ترتیب شیب متوسط سیلابدشت در منطقه پتانسیل خطر در سمت چپ و راست رودخانه،  $m_3$  و  $m_4$  به ترتیب شیب کناره‌های رودخانه در سمت چپ و راست،  $b_0$

$$\mathcal{C}R_{levee} = \sum_{j=K}^n Clevee \times [F(Q_{j+1,max}^{pda}) - F(Q_{j,max}^{pda})] \quad (18)$$

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

$$A_{levee}^L = (B_{levee}^L - (H_{levee}^L / m_1)) \times H_{levee}^L \quad (19)$$

$$A_{levee}^R = (B_{levee}^R - (H_{levee}^R / m_6)) \times H_{levee}^R \quad (20)$$

$$B_{levee}^L = B_L + 2(H_{levee}^L / m_1) \quad (21)$$

$$B_{levee}^R = B_R + 2(H_{levee}^R / m_6) \quad (22)$$

که در آن،  $CRF_i$  ضریب بازگشت سرمایه در هر سناریو و تابعی از  $n$ ،  $i$   $Clevee_i$  هزینه احداث گوره و  $LPRC_i$  هزینه تملک اراضی مجاور رودخانه و  $AOMR_i$  هزینه بهره برداری و نگهداری گوره،  $CR_{levee,i}$  هزینه احداث مجدد گوره بعد از تخریب،  $i$  نرخ بهره (این پارامتر به عنوان متغیر تصادفی در مدل وارد شده است)،  $n$  عمر مفید سازه گوره به سال،  $UPRC_{levee}$  هزینه واحد حجم ساخت گوره،  $UPRC_{land}^R$  و  $UPRC_{land}^L$  قیمت واحد زمین در منطقه پتانسیل خطر 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،  $L_{levee}$  طول گوره،  $H_{levee}^L$  و  $H_{levee}^R$  به ترتیب ارتفاع گوره در ساحل چپ و راست رودخانه،  $m_1$  و  $m_6$  به ترتیب شیب کناره‌های گوره در کرانه چپ و راست رودخانه،  $B_L$  و  $B_R$  به ترتیب اندازه عرض فوقانی گوره در سمت چپ و راست رودخانه،  $B_{levee}^L$  و  $B_{levee}^R$  به ترتیب اندازه عرض پایین گوره در سمت چپ و راست و  $\beta$  ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری گوره (به صورت ضریبی از هزینه‌های اجرایی) می‌باشند.

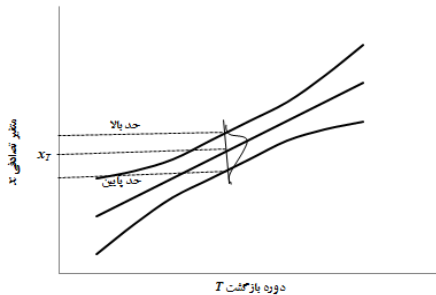
### 2-3-2- محدودیت‌های مربوط به هندسه رودخانه و گوره

طراحی گوره بر اساس حداکثر دبی هیدروگراف سیل طراحی  $T$  ساله، ورودی به منطقه پتانسیل خطر صورت می‌گیرد. بنابراین باید مجموع دبی عبوری از مقطع میانی و کرانه‌های چپ و راست را برابر با دبی اوج رودخانه قرار داد.

$$Q_{T,i}^{pda} = Q_{L,i} + Q_{M,i} + Q_{R,i} \quad (23)$$

نرمال محاسبه شده است. مطابق شکل 2 برای یک متغیر تصادفی نرمال مانند  $x_T$  انحراف معیار از رابطه (29) محاسبه می‌شود (Kite, 1977).

عرض کف رودخانه،  $b_s$  عرض فوقانی مقطع رودخانه،  $d$  عمق رودخانه و  $H_{m,i}$  فاصله لبه رودخانه تا بالای گوره در سناریو  $i$  می‌باشد.



شکل 2 نمایش متغیر تصادفی با توزیع نرمال (Chow, 1988)

$$s_{nm} = ((2 + (Q_{design} - \bar{Q}/s)^2)/n)^{0.5} \times s \quad (29)$$

که در آن  $s_{nm}$  مقدار انحراف معیار در توزیع نرمال،  $\bar{Q}$  مقدار میانگین دبی‌های اوج مشاهداتی،  $s$  انحراف معیار مجموعه دبی‌ها،  $n$  تعداد دبی‌ها و  $Q_i$  سری دبی‌های اوج سالانه می‌باشد. پارامتر  $s$  طبق رابطه (30) محاسبه می‌شود (Kite, 1977).

$$s = ((1/n - 1) \times \sum (Q_i - \bar{Q})^2)^{0.5} \quad (30)$$

حال مقدار  $s_{nm}$  که انحراف معیار متغیر دبی طراحی با توزیع نرمال می‌باشد، با استفاده از رابطه (31) به توزیع لاگ نرمال تبدیل می‌شود (Maidment, 1992).

$$s_n = (\ln(1 + (s_{nm}^2 / \bar{Q}_{design}^2)))^{0.5} \quad (31)$$

با توجه به روش تعیین ضریب زبری مانینگ که غالباً تخمینی و بر مبنای قضاوت مهندسی است، مقدار برآورد شده آن قطعی نیست. تحقیقات نشان داده که عدم قطعیت ضریب مانینگ تأثیر زیادی بر عدم قطعیت ظرفیت هیدرولیکی آبراه دارد. برای تعیین عدم قطعیت ضریب مانینگ، روش مشخص و استاندارد شده‌ای وجود ندارد. پژوهشگران مقادیر مختلفی را برای این عدم قطعیت فرض کرده و بیشتر آنان به مبنای این فرضیات اشاره‌ای نکرده‌اند. تحقیقات وسیعی در مرکز مهندسی هیدرولوژی

### 3-3-2 محدودیت‌های مربوط به عدم قطعیت پارامترها

در این بخش روابطی به منظور گنجاندن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، و اقتصادی در مدل بهینه سازی ارائه شده است. بدین منظور متغیر دبی طراحی ( $Q_{design}$ ) مربوط به هیدرولوژی، ضریب زبری مانینگ ( $n_M$ ) مربوط به هیدرولیک رودخانه، و نرخ بهره ( $i$ ) مرتبط با اقتصاد طرح به صورت متغیرهای تصادفی و دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. تابع توزیع احتمالاتی هر یک از متغیرهای تصادفی بر اساس مطالعات پیشین و مراجع موجود تعیین شده‌اند. بدین ترتیب توزیع احتمالاتی دو پارامتر دبی طراحی و ضریب زبری، لاگ نرمال، و توزیع احتمالاتی پارامتر نرخ بهره، نرمال در نظر گرفته شده است. برای کمی‌سازی عدم قطعیت، علاوه بر میانگین نیاز به انحراف معیار متغیر تصادفی نیز می‌باشد. این آماره برای هر یک از متغیرهای تصادفی مورد بحث به ترتیب زیر حاصل می‌شود.

خطای استاندارد، معیاری از عدم قطعیت در برآورد دبی سیل با تحلیل فراوانی است. در واقع مقداری که برای پیشامد  $T$  ساله برآورد می‌شود، مقدار قطعی نیست، بلکه میانگین توزیع است که اغلب نرمال در نظر گرفته می‌شود و خطای استاندارد، انحراف معیار این توزیع است (شکل 2). در مدل مورد بررسی برای متغیر تصادفی دبی طراحی، توزیع لاگ نرمال در نظر گرفته شده است که برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو باید میانگین و انحراف معیار این متغیر محاسبه شود. ابتدا انحراف معیار این متغیر را با فرض اینکه دارای توزیع نرمال باشد، محاسبه نموده، سپس با استفاده از ارتباط بین گشتاورهای آماری توزیع نرمال و لاگ نرمال، انحراف معیار متغیر دبی طراحی با توزیع لاگ



پس از عبور از شمال شهر شیراز به دریاچه مهارلو می‌ریزد. این رودخانه دارای دو شاخه اصلی به نام‌های نهراعظم و خشک معالی‌آباد (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 (مشاورین آبن، 1387). بر روی شاخه خشک معالی‌آباد قبل از اتصال به شاخه نهراعظم، طرح کنترل سیلاب پیش‌بینی شده است، چراکه در این بازه از رودخانه به دلیل کم بودن ظرفیت آبگذری کانال، پتانسیل خسارت‌پذیری در برابر سیلاب‌ها نمود بیشتری دارد (رفیعی، 1389).

شایان ذکر است در حال حاضر بخشی از رودخانه خشک شیراز دو بانده شده است تا از بستر آن برای تسهیل در ترافیک شهر به صورت مقطعی استفاده کنند. به منظور محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه نیاز است که خسارت ناشی از دبی‌های مختلف سیل محاسبه شود. پهنه‌بندی سیلاب در ناحیه پتانسیل خطر به ازای دبی‌های مختلف توسط نرم‌افزار HEC-RAS انجام گردیده و بر اساس نتایج این کار خسارت‌ها برآورد شده‌اند (رفیعی، 1389).

(HEC) در سال 1986 در قالب مطالعات آماری برای تعیین ضریب مانینگ و عدم قطعیت آن انجام شده است. رابطه‌ای که از این تحقیقات برای انحراف معیار ضریب مانینگ با توزیع لاگ نرمال به دست آمده است به صورت زیر است (HEC, 1986):

$$s_n = \bar{n}_m \times (e^{(0.582+0.1 \times \ln(\bar{n}_m)^2)} - 1)^{0.5} \quad (32)$$

مقدار انحراف معیار نرخ بهره نیز طبق تجربیات برابر 0/02 در نظر گرفته شده است.

در نتیجه معادلات کلی متغیرهای تصادفی مذکور به صورت روابط (33) تا (35) می‌باشد.

$$Q_{design} = LN(\bar{Q}_{design}, s_n) \quad (33)$$

$$n_m = LN(\bar{n}_m, s_n) \quad (34)$$

$$i = N(\bar{i}, s_n) \quad (35)$$

$\bar{n}_M$  مقدار میانه پارامتر ضریب زبری مانینگ در توزیع لاگ نرمال،  $\bar{Q}_{design}$  مقدار میانه پارامتر دبی طراحی در توزیع لاگ نرمال،  $\bar{i}$  مقدار میانه پارامتر نرخ بهره در توزیع نرمال و  $s_n$  مقدار انحراف معیار هر یک از پارامترها در توزیع مربوطه می‌باشد.

### 3- مطالعه موردی

رودخانه خشک شیراز یک رودخانه فصلی می‌باشد که



شکل 3 موقعیت اتصال دو شاخه نهراعظم و خشک معالی‌آباد و تشکیل رودخانه خشک شیراز (سرابندی، 1387)

خسارت مورد انتظار سالانه سیل در شرایط با و بدون طرح می‌باشد. برای تعیین خسارت مورد انتظار سالانه منحنی خسارت-احتمال مورد نیاز است که براساس نمودارهای احتمال-دبی، دبی-اشل و اشل-خسارت در منطقه پتانسیل خطر، این منحنی تولید می‌شود و سطح زیر این نمودار خسارت قابل انتظار سالانه سیل در شرایط بدون انجام طرح (EAD اولیه) را مشخص می‌نماید.

روند حل مدل بدین صورت است که برای هر دبی طراحی مورد نظر خسارت مورد انتظار سالانه در محدوده پتانسیل خطر در صورت اجرا و عدم اجرای طرح گوره محاسبه شده و از تفاضل این دو مقدار سود حاصل از اجرای طرح گوره محاسبه شده و با هزینه‌های اجرای گوره مقایسه شده و سود خالص محاسبه می‌شود. سود خالص هر یک از دبی‌ها که حداکثر شود به عنوان دبی طراحی با دوره بازگشت معین در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از این دبی طراحی، ابعاد بهینه گوره با تولید سناریوهایی که از عدم قطعیت پارامترها ناشی می‌شود، محاسبه می‌شود.

لازم به ذکر است که در این مطالعه تنها خسارت‌های محسوس ناشی از سیل، نظیر خسارت وارد بر یک منزل مسکونی در اثر غرقاب شدن آن تا یک تراز مشخص یا غرقاب شدن یک مزرعه و از بین رفتن محصولات آن و ... در نظر گرفته شده‌اند.

جدول‌های 1 تا 3 اطلاعات مربوط به رودخانه خشک شیراز و ورودی‌های مدل را نمایش می‌دهد. همچنین جدول 4 مقادیر اشل-خسارت را نشان می‌دهد.

#### 4- حل مدل

همان‌طور که قبلاً نیز عنوان شد، برای طراحی، انواع عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در نظر گرفته شده است. برای اعمال این عدم قطعیت‌ها در مدل، سه پارامتر دبی طراحی، ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره که به ترتیب مربوط به هیدرولوژی، هیدرولیک و اقتصاد طرح می‌باشند، در نظر گرفته شده‌اند. بهینه‌سازی انجام شده براساس تحلیل اقتصادی "سود-هزینه" صورت می‌گیرد. برای تعیین سود نیاز به محاسبه

جدول 1 دبی‌های اوج در منطقه پتانسیل خطر (سرابندی، 1387)

T (year)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Qpeak(m <sup>3</sup> /s)	83/0	120/7	144/5	167/0	198/8	293/9	326/1	366/4	400/5

جدول 2 مشخصات هندسی گوره و رودخانه

مشخصات	واحد	مشخصات گوره	واحد
$b_0$	16	$S_M$	0/002
d	1/23	$m_1$	2
$L_{\text{levee}}$	2100	$m_2$	0/05
$B_L$	2	$m_3$	1/5
$B_R$	2	$m_4$	1/5
$S_L$	0/002	$m_5$	0/05
$S_R$	0/002	$m_6$	2

خسارت مورد انتظار سالانه را محاسبه کرد.

در این مقاله برای اعمال عدم قطعیت‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، 100 سناریو با احتمال مساوی تولید شده و خسارت مورد انتظار به صورت یک بازه محاسبه شده است. در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، در هر اجرا برای هریک از عدم قطعیت‌ها یک مقدار محتمل بین حد پایین و بالای عدم قطعیت‌های مربوطه تولید می‌شود، که فراوانی آن، از تابع توزیع احتمالات آن عدم قطعیت‌ها پیروی می‌کند. بدین طریق در هر اجرا، یک مجموعه جواب که در تناظر یک به یک با عدم قطعیت‌ها می‌باشد؛ تولید می‌شود که بیانگر یکی از حالات ممکن مطلوبیت می‌باشد. اجراهای دیگر شبیه‌سازی، وضعیت‌های بیشتری از حالات ممکن مطلوبیت را ارائه می‌دهند. در نهایت مقدار مورد انتظار سود خالص این 100 سناریو که همزمان در مدل وارد و اجرا می‌شوند، به عنوان سود نهایی حاصل از اجرای طرح برای آن دوره بازگشت مطلوب، خواهد بود. این روند برای سایر دبی‌های طراحی با دوره بازگشت‌های متفاوت تکرار شده و هریک که سود خالص بیشتری ایجاد کنند به عنوان دبی طراحی گروه و دوره بازگشت طراحی انتخاب می‌شود. سپس ابعاد حاصل از 100 سناریو مربوط به دوره برگشت انتخاب شده به عنوان محدوده ابعاد طراحی خواهد بود.

سه متغیر ورودی، دبی طراحی، ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند و با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و استفاده از مشخصه‌های آماری آنها (میانگین و انحراف معیار)، 100 مقدار برای هر متغیر تولید شده است که جدول 5 نشان دهنده حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار این 100 مقدار تولید شده می‌باشد. در واقع اعداد این جدول نشان دهنده برخی ویژگی‌های ورودی‌های تولید شده با شبیه‌سازی است که در مدل بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

جدول 3 هزینه‌های اجرایی

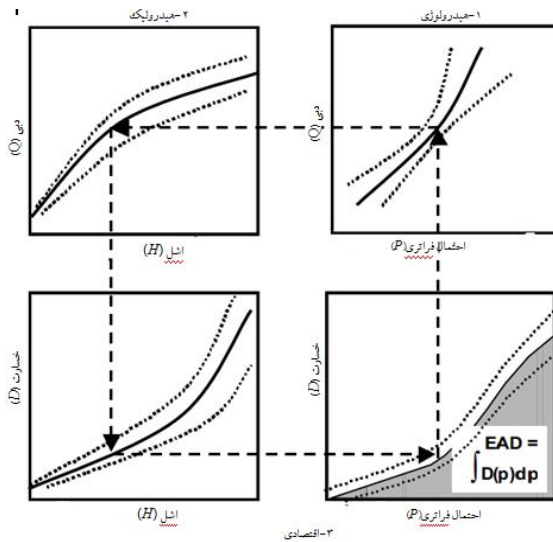
واحد	هزینه‌ها	
ریال	UPRC <sub>lev</sub> <sup>L</sup>	1600000
ریال	UPRC <sub>lev</sub> <sup>R</sup>	1600000
ریال	UPRC <sub>land</sub> <sup>L</sup>	1000000
ریال	UPRC <sub>land</sub> <sup>R</sup>	1000000
-	n	50
-	$\beta$	0/3

جدول 4 داده‌های دبی-اشل-خسارت

اشل (m)	خسارت (میلیارد ریال)
1/59	296/52
1/84	409/01
1/98	473/09
2/09	522/25
2/24	615/15
2/62	837/15
2/73	905/152
2/85	988/92
2/96	1059/83
3/25	1264/21
3/91	1769/63

در صورتی که هیچ‌گونه عدم قطعیتی در مدل و پارامترها وارد نشود، خسارت مورد انتظار سالانه طبق روندنمای شکل 4 محاسبه می‌شود.

لیکن در صورتی که مانند مدل مورد بررسی عدم قطعیت در طراحی منظور شود روند محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه به صورت شکل شماتیک 5 که نحوه ارتباط عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی را نشان می‌دهد، خواهد بود. همان‌طور که در شکل هم مشهود است از طریق ارتباط منحنی‌های دبی-فراوانی و دبی-اشل و اشل-خسارت که به علت ورود عدم قطعیت در طراحی به صورت یک بازه هستند، بازه منحنی احتمال-خسارت به دست آمده و می‌توان محدوده

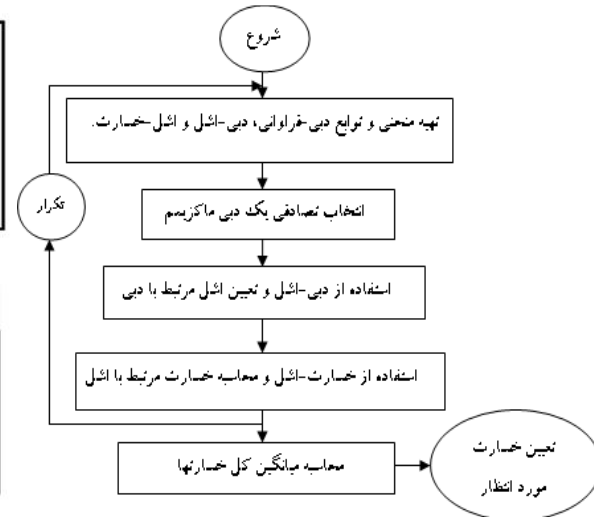


شکل 5 نمایش عدم قطعیت و نحوه ارتباط منحنی دبی-فراوانی، دبی-اشل، اشل-خسارت، خسارت-احتمال (USACE, 2004)

صورتی که همانطور که از نتایج جدول‌های 6 و 7 مشخص است حداکثر سود خالص سالانه در هر دو مدل قطعی و استوکستیک در دوره بازگشت 20 سال رخ می‌دهد. این دوره بازگشت به عنوان دوره بازگشت طراحی گوره در منطقه پتانسیل خسارت منظور شده است.

مدل بهینه‌سازی حاصل، یک مدل استوکستیک است که با حل آن تمام نتایج سناریوهای مختلف حاصل می‌شود. در واقع مدل تهیه شده، این قابلیت را دارد که در آن بهینه‌سازی و شبیه‌سازی (مونت‌کارلو) به طور همزمان انجام می‌شود. در واقع در حین اجرای مدل، 100 سناریو برای متغیرهای تصادفی تولید شده و خروجی مدل، 100 سناریو می‌باشد که به ازای هر سری از متغیرهای تصادفی تولیدی، یک سری ابعاد طراحی تولید می‌شود و در نهایت یک مقدار ANB (تابع هدف مدل) کلی هم در خروجی مدل حاصل می‌شود، که میانگین مقدار ANB این 100 سناریو می‌باشد. اعداد جدول 6 این مقدار میانگین را نمایش می‌دهد که مبنای تصمیم‌گیری برای تعیین دوره بازگشت طراحی می‌باشد.

مدل استوکستیک 100 مقدار برای هر یک از ابعاد طراحی



شکل 4 روندنمای محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه

جدول 5 مشخصه‌های آماری پارامترهای دارای عدم قطعیت

پارامتر	ضریب زبری مانینگ	دبی طراحی (متر مکعب بر ثانیه)	نرخ بهره
حداقل	0/0343	121/728	0/032
حداکثر	0/0362	234/776	0/127
میانگین	0/0351	168/328	0/080
انحراف معیار	0/000315	22/288	0/019

نتایج نمایش داده شده برای ضریب زبری مانینگ و نرخ بهره برای تمام دوره بازگشت‌ها یکسان است، اما دبی طراحی و مشخصه‌های آماری در هر دوره بازگشت متفاوت است، اعداد این جدول مربوط به دوره بازگشت 20 سال می‌باشد.

به منظور مشاهده و درک تفاوت نتایج مدل با اعمال عدم قطعیت، مدل یک بار هم بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و به صورت قطعی حل شده است که نتایج آن با نتایج مدل غیرقطعی مقایسه شده است.

## 5- نتایج

با توجه به تابع هدف در نظر گرفته شده برای مدل، هزینه ساخت در دوره‌های بازگشت بالاتر بیشتر است، در

این تفاوت، هندسه متفاوت مقطع سیلاب‌دشت در دو طرف رودخانه (برخلاف سایر مطالعات پیشین) می‌باشد. یکی از مزایای مدل استوکستیک و شبیه‌سازی مونت کارلو، امکان تخمین توزیع احتمالاتی متغیرهای خروجی مدل است. بدین منظور مقادیر یک متغیر خروجی (مثلاً ارتفاع گوره) از 100 سناریوی تولیدی استخراج شده و از طریق احتمال تجربی (مثلاً ویبول) یا برازش توزیع‌های احتمالاتی (لاگ نرمال، لاگ پیرسون تیپ 3، ...) می‌توان تابع چگالی احتمال آن را برآورد کرد. این نمودار به طراح کمک می‌کند تا مقادیر پارامترهای طراحی مورد نظر خود را با اطمینان بیشتری انتخاب کند.

شکل 6 ابعاد طراحی گوره را با احتمالات متناظر آنها برای 100 سناریوی مورد نظر، به همراه مقدار حاصل از مدل قطعی با احتمال متناظر نمایش می‌دهد. در ادامه نیز دو نوع توزیع (لاگ نرمال و لاگ پیرسون) به داده‌ها برازش داده شده است.

نتیجه می‌دهد، در حالی که با اجرای مدل قطعی برای هریک از ابعاد، یک مقدار حاصل می‌شود. جدول 8 مقایسه‌ای از نتایج حاصل از مدل قطعی و استوکستیک را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که از نتایج موجود در جدول مشهود است مقادیر ابعاد ناشی از مدل قطعی بین محدوده حداقل و حداکثر مقادیر حاصل از اجرای مدل استوکستیک قرار می‌گیرند. در واقع اعمال عدم قطعیت باعث می‌شود که مقادیر ابعاد در محدوده‌ای کمتر و بیشتر از مقدار قطعی قرار گیرند. طبق جدول مشاهده می‌شود که سود خالص سالانه در مدل قطعی 6/484 و سود مدل استوکستیک بین 3/057 تا 10/794 میلیارد ریال متغیر می‌باشد.

از دیگر نتایج قابل توجه دو مدل، تفاوت ارتفاع گوره در دو سمت رودخانه و نیز تفاوت عقب‌نشینی گوره در دو طرف می‌باشد. این تفاوت در سایر پارامترها نیز دیده می‌شود. همان‌طور که در تشریح سیستم ذکر شد، علت

جدول 6 سود خالص هر دوره بازگشت در مدل استوکستیک (میلیارد ریال)

T (سال)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Expected ANB	3/531	5/688	6/106	<b>6/562</b>	6/056	3/746	3/193	2/387	1/753

جدول 7 سود خالص هر دوره بازگشت در مدل قطعی (میلیارد ریال)

T (سال)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
ANB	3/526	5/102	6/046	<b>6/484</b>	5/980	3/663	3/114	2/378	1/681

جدول 8 مقایسه مقادیر ابعاد طراحی در دو مدل قطعی و استوکستیک

Setback (m)	ANB (میلیارد ریال)	ACOST (میلیارد ریال)	$B_{levee}^L$ (m)	$B_{levee}^R$ (m)	$H_m$ (m)	$H_{levee}^L$ (m)	$H_{levee}^R$ (m)	ابعاد بهینه طراحی گوره
28/598	3/057	3/235	3/732	3/552	1/735	1/732	1/552	حداقل
46/067	10/794	12/652	4/588	4/027	2/588	2/588	2/027	حداکثر
35/664	6/562	7/243	4/048	3/704	2/133	2/048	1/704	میانگین
3/520	1/579	1/876	0/150	0/087	0/165	0/150	0/087	انحراف معیار
34/852	6/484	7/169	4/147	3/678	2/147	2/147	1/678	نتایج مدل قطعی

نشان می‌دهد. با توجه به وجود چولگی در متغیرهای طراحی، به نظر می‌رسد که توزیع لاگ پیرسون تپ 3 برازش مناسب‌تری به داده‌ها داشته و توزیع مناسب‌تری برای توصیف این داده‌های خروجی است.

### 6- نتیجه‌گیری

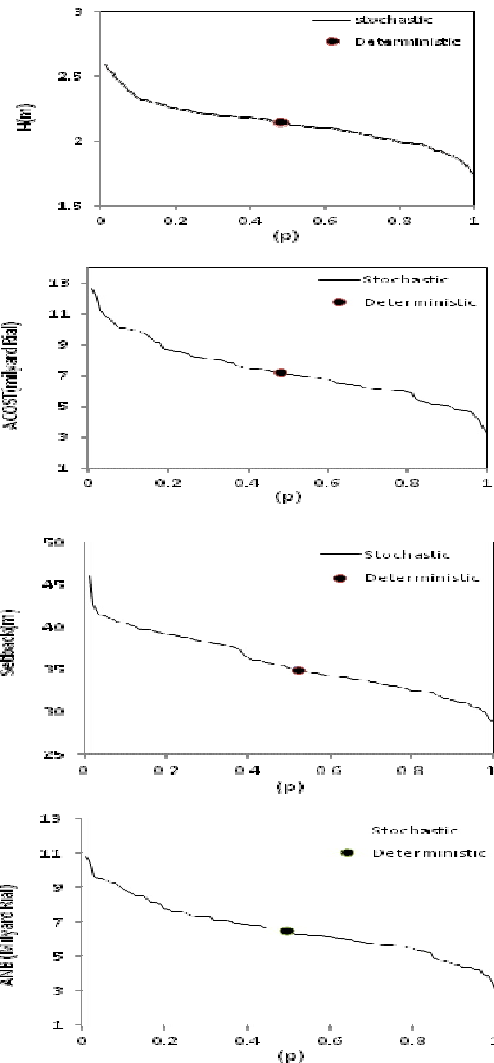
در این مقاله به طراحی بهینه ابعاد گوره با در نظر گرفتن انواع عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی پرداخته شده و برای کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها از روش گشتاورهای آماری و برای تحلیل این عدم قطعیت‌ها یک مدل بهینه‌سازی استوکستیک بر مبنای شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. مدل بهینه‌سازی حاصل، یک مدل غیرخطی است که حل آن توسط نرم‌افزار LINGO-13 صورت گرفته است.

برخی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر می‌باشند:  
 - در این مقاله به علت متفاوت در نظر گرفتن مقطع سیلابدشت در دو طرف رودخانه و نیز مقطع اصلی رودخانه (برخلاف سایر مطالعات پیشین)، ارتفاع گوره در دو سمت رودخانه و نیز عقب‌نشینی گوره در دو طرف مقادیر متفاوتی بدست آمده است که تطابق بیشتری با واقعیت دارد، این تفاوت در سایر پارامترها نیز مشاهده می‌شود.

- با توجه به تابع هدف در نظر گرفته شده برای مدل، هزینه ساخت در دوره‌های بازگشت بالاتر بیشتر است، در صورتی که حداکثر سود خالص سالانه در هر دو مدل قطعی و استوکستیک در دوره بازگشت 20 سال رخ می‌دهد. این دوره بازگشت به عنوان دوره بازگشت طراحی گوره در منطقه پتانسیل خسارت منظور شده است.

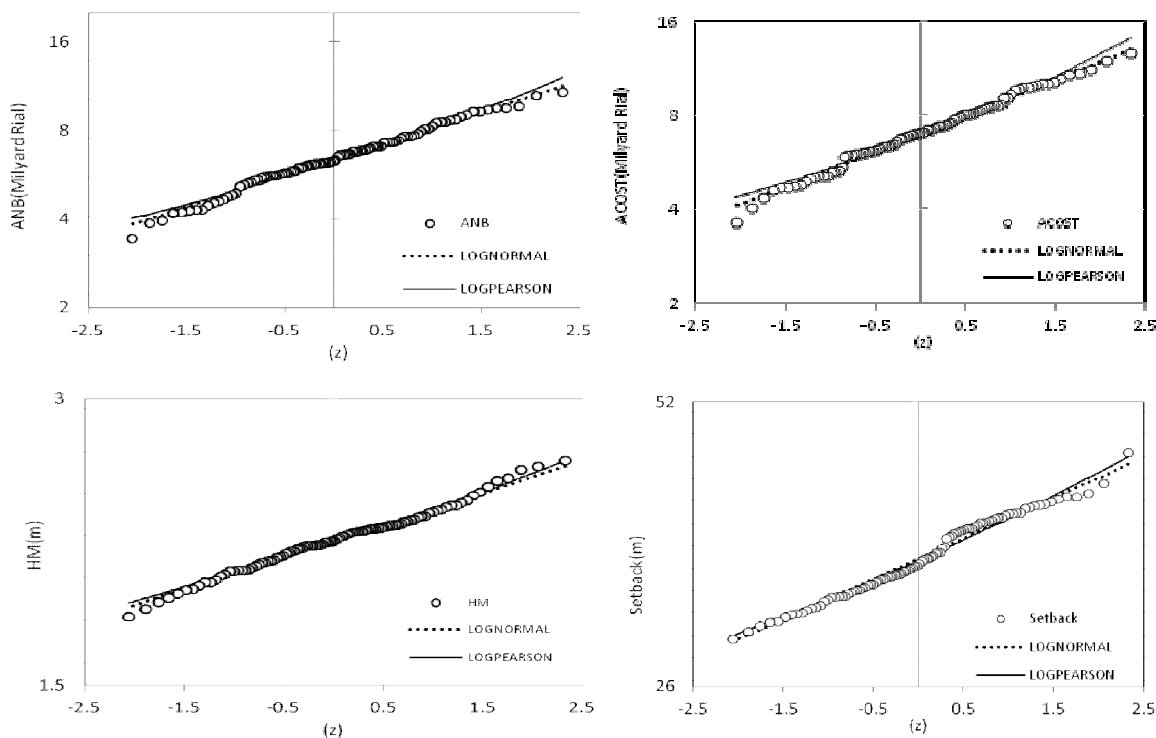
- در مقاله حاضر، مدل استوکستیک تهیه شده یک محدوده از اعداد را برای هر یک از ابعاد طراحی نتیجه داده است. این در حالی است که مدل قطعی ابعاد سیستم را به صورت تک مقداری نتیجه می‌دهد. ابعاد ناشی از مدل قطعی در محدوده‌ای با احتمال تقریباً 0/5 در بازه مدل استوکستیک قرار گرفته‌اند.

یکی از مزایای مدل استوکستیک، امکان تخمین تابع توزیع احتمالاتی متغیرهای خروجی سیستم است. این کار را می‌توان با مرتب‌سازی متغیر مورد نظر که از هر سناریو بدست آمده، با استفاده از روابط تجربی (مانند ویبول) یا برازش توابع توزیع احتمالاتی به انجام رساند.



شکل 6 پارامترهای طراحی همراه با احتمال متناظر آن‌ها

برای بررسی امکان برازش توابع توزیع احتمالاتی، دو توزیع لاگ نرمال و لاگ پیرسون تپ 3 به نتایج برازش داده شده است. شکل 7 برازش این توزیع‌ها را به داده‌ها



شکل 7 برازش توزیع‌های لاگ نرمال و لاگ پیرسون بر خروجی‌های Hm, Setback, ACOST, ANB

<i>ANB</i>	سود خالص سالانه
<i>AOMR</i>	هزینه بهره برداری و نگهداری گوره
$B_L$	عرض فوقانی گوره در سمت چپ
$B_R$	عرض فوقانی گوره در سمت راست
$\beta$	ضریب هزینه‌های بهره‌برداری
$b_0$	عرض کف رودخانه
$b_s$	عرض فوقانی مقطع رودخانه
<i>Clevee</i>	هزینه احداث گوره
<i>CRF</i>	ضریب بازگشت سرمایه
$CR_{levee}$	هزینه احداث مجدد گوره
<i>D</i>	خسارت ناشی از سیل
$D(q/q_t)$	تابع خسارت دبی
<i>d</i>	عمق رودخانه
<i>EADwithout</i>	خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح
<i>EADwith</i>	خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط

- یکی از مزایای مدل استوکستیک، امکان تخمین تابع توزیع احتمالاتی متغیرهای خروجی سیستم است. با توجه به وجود چولگی در متغیرهای طراحی سیستم مورد بررسی و نتایج، به نظر می‌رسد که توزیع لاگ پیرسون تیپ 3 برازش مناسب‌تری به داده‌ها داشته و توزیع مناسب‌تری برای توصیف ابعاد طراحی است.

- طراحان سیستم با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی هر یک از پارامترهای طرح، می‌توانند محدوده عملکرد سیستم را در آینده (که اطلاعات کاملی از آن به هنگام مطالعه سیستم در دسترس نیست)، در طراحی اعمال کرده و مورد بررسی قرار دهند.

### 7- فهرست علایم

<i>ABEN</i>	سود سالانه
<i>ACOST</i>	هزینه سالانه

$S_n$	انحراف معیار		وجود طرح
$UPRC_{levee}$	هزینه واحد حجم ساخت گوره	$F$	احتمال عدم وقوع
$UPRC_{land}^L$	قیمت واحد زمین سمت چپ	$F(q)$	تابع چگالی احتمال دبی
$UPRC_{land}^R$	قیمت واحد زمین سمت راست	$H_m$	فاصله لبه رودخانه تا بالای گوره
$X_{levee}^L$	فاصله پای گوره چپ تا رودخانه	$H_{levee}^L$	ارتفاع گوره چپ
$X_{levee}^R$	فاصله پای گوره راست تا رودخانه	$H_{levee}^R$	ارتفاع گوره راست
		$i$	نرخ بهره
		$LPRC$	هزینه تملک اراضی مجاور رودخانه
		$L_{levee}$	طول گوره
		$m_1$	شیب کناره‌های گوره در کرانه چپ
		$m_2$	شیب متوسط سیلابدشت چپ
		$m_3$	شیب کناره‌های رودخانه در سمت چپ
		$m_4$	شیب کناره‌های رودخانه در سمت راست
		$m_5$	شیب متوسط سیلابدشت راست
		$m_6$	شیب کناره‌های گوره در کرانه راست
		$n_L$	ضریب زبری مانینگ در سمت چپ رودخانه
		$n_M$	ضریب زبری مانینگ در رودخانه
		$n_R$	ضریب زبری مانینگ در سمت راست رودخانه
		$n$	عمر گوره
		$Q_T^{Pda}$	ماکزیمم دبی هیدروگراف
		$Q_L$	دبی عبوری از سیلابدشت چپ
		$Q_M$	دبی عبوری از رودخانه
		$Q_R$	دبی عبوری از سیلابدشت راست
		$Q_{design}$	دبی طراحی
		$\bar{Q}_{design}$	میانه پارامتر دبی طراحی
		$\bar{Q}$	میانگین دبی‌های پیک مشاهداتی
		$Q_i$	سری دبی‌های پیک سالانه
		$S_L$	شیب طولی سیلابدشت در سمت چپ
		$S_M$	شیب طولی سیلابدشت در رودخانه
		$S_R$	شیب طولی سیلابدشت در سمت راست
		$S_{nn}$	انحراف معیار در توزیع نرمال

## 8- منابع

افتخاریان، ل.، ابریشمچی، ا. و تجریشی، م. (1382). "تحلیل عدم قطعیت تراز سطح آب رودخانه سیستان و بررسی قابلیت اعتماد سیستم کنترل سیل"، ششمین کنفرانس مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

رفیعی انزاب، ن. (1389). طراحی خاکریزهای کنار رودخانه (گوره‌ها) به روش آنالیز ریسک، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعت آب و برق.

سرابندی، ا. (1387). بهینه سازی ابعاد سیستم‌های ترکیبی (سد- گوره)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.

سنگین‌آبادی، ح. (1384). تعیین ارتفاع دیوارهای سیل‌بند با استفاده از آنالیز ریسک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.

علیمحمدی، س.، رفیعی انزاب، ن. و مرادی، م. (1392). طراحی خاکریزهای کنار رودخانه (گوره‌ها) به روش آنالیز ریسک، مجله آب و فاضلاب، شماره 89، ص.ص. 95-110.

کراچیان، ر.، ابریشم چی، ا. و افشار، ع. (1378). بهینه‌سازی سرریز سدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و روندیابی سیلاب، دومین کنفرانس هیدرولیک، تهران، ایران، 25 تا 27 آبان.

مهندسین مشاور آبن، تهران، (1387). مطالعات طرح سد کنترل سیلاب تنگ سرخ، گزارشات برنامه‌ریزی منابع آب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی.

Ahmed, I., and Freeman, G.E. (2004). "Estimating stage-discharge uncertainty for flood damage



- Tung, Y.K., and Yen, B. C. (1993). "Some progress in uncertainty analysis for hydraulic design", Yen, B. C. and Tung, Y.K., (Eds.). *In reliability and uncertainty analysis in hydraulic design (report)*, American Society of Civil Engineers.
- Tung, Y. K. (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.
- Tung, Y. K. (1999). *Risk / Reliability-Based Hydraulic Engineering Design in Hydraulic Design Handbook*, L.W. Mays (ed). Mc Graw-Hill, New York.
- U. S. Army Corps of Engineers. (1996). *Risk-Based analysis for flood damage reduction studies*, EM1110-2-1619, Washington.
- U. S. Army Corps of Engineers. (1997). *Distribution restriction statement*, ETL 1110-2-537, Washington.
- U. S. Army Corps of Engineers, (2004). *Hamilton city flood damage reduction and ecosystem restoration project*, Appendix Economics, California.
- U. S. Army Corps of Engineers. (2006). *Planning risk analysis for flood damage reduction studies*, ER 1105-2-101, Washington.
- U. S. Army Corps of Engineers, (2009). *Documentation and demonstration of a process for risk analysis of proposed modifications to the sacramento river flood control project (SRFCP) Levees*, San Francisco.
- WWW: <http://www.lindo.com-LINDO> Systems Inc- Version 13.
- Zhu, T. (2004). *Climate change and water resources management: adaptations for flood control and water supply*, PhD Thesis, University of California at Davis, USA.
- assessment", Arid Lands Symposium, Proc., World Water and Environmente.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W., (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Dejan K. and Nemanja B., (2005). *Uncertainty analysis as a complement to flood risk assessment*, University of Belgrade.
- Goldman, D., (1997). "Estimating expected annual damage for levee retrofits", J. Water Resour. Plann. Manage, 123, pp. 89-94.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (1986). *Accuracy of computed water surface profiles*, Research document 26, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, C.A.
- Kite, G. W. (1977). *Frequency and risk analysis in hydrology*, *Water resources publications*, Colorado 80522, USA.
- Lee, H. L. (1986). "Hydraulic uncertainties in flood levee capacity". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No.10, pp. 928- 934.
- Linsley, R. K., Franzini, J.B., Freyberg, D.L. and Tchobanoglous, G. (1992). *Water Resources Engineering*, 4th. Ed., McGraw-Hill.
- Loucks, D. P. and van Beek, E. (2005). *Water resources system planning and management*, UNESCO, The Netherlands.
- Mays, L. W. and Tung, Y. Y. (1992). *Hydrosystems engineering and management*, McGraw-Hill, New York.
- Maidment and David R. (1992). *Handbook of hydrology*, chapter 18, McGraw-Hill, New York, USA.
- Tung, Y.K., Yen, B. C. and Melching, C. S. (1996). *Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis*, McGraw-Hill, New York, USA.