سال هفتم، شماره ۱، ۱۳۹۹، صفحات ۳۷ تا ۴۸
نشریه آب و توسعه پایدار

2020, Vol.7, No.1, Pages 37 to 48
Journal of Water and Sustainable Development

نوع مقاله: پژوهشی/مطالعه موردی

Article Type: Research/Case Study

بهینه‌سازی سامانه‌های کنترل سیلاب با ترکیب برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی و الگوریتم ژنتیک

معصومه بهروز[۱]، سعید علیمحمدی[۲*]، امیرمحمد کشوری‌فرد[۳]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دکتری، دانشیار و کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: s_alimohammadi@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۵

چکیده

پژوهش حاضر به طرح بهینه یکی از روش‌های سازه‌ای کنترل سیلاب (گوره‌ها) بر مبنای برنامه‌ریزی پویا (DP) پرداخته است. به‌منظور تسریع زمان محاسبات، مدلی بر اساس ترکیب برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی و الگوریتم ژنتیک (GA-DDDP) ایجاد شد. تابع هدف این مدل کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه احداث سازه و خسارت باقیمانده می‌باشد. به‌این‌منظور، طول رودخانه مورد مطالعه به سه بازه تقسیم شد و ابعاد بهینه چهار مقطع آب‌گذری به‌عنوان نتایج خروجی به‌دست آمد. مدل‌سازی و اجرای آن با کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام شد و نتایج نشان داد زمان اجرای مدل ترکیبی GA-DDDP تنها ۱۱ درصد زمان اجرای مدل برنامه‌ریزی پویای کلاسیک می‌باشد. همچنین در این مطالعه، نتایج مدل چهارمقطعی با مدل ساده‌تر تک‌مقطعی (مقطع معادل) مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که ساده‌سازی مسئله به حالت تک مقطعی، افزایش هزینه‌ها (حدود ۲۰ درصد) را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: کنترل سیلاب، گوره، بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی، الگوریتم ژنتیک.

Optimization of Flood Control Systems by Combining Discrete Differential Dynamic Programming and Genetic Algorithm

M. Behrouz[1], S. Alimohammadi[2*], AM. Keshvarifard[3]

1,2&3- PhD of Civil Engineering, Associate Professor & MA of Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: s_alimohammadi@sbu.ac.ir)

Received: 15-06-2019
Accepted: 26-11-2019

Abstract

The present study is aimed to optimum design the one of the structural methods of flood control (Levees) based on dynamic programming (DP). In order to accelerate computing time, a model was created based on the combination of discrete differential dynamic programming and genetic algorithm (GA-DDDP). The objective function of this model is to minimize the total costs, including the cost of constructing the structure and residual damage cost. For this purpose, the length of the studied river was divided into three reaches and the optimal dimensions of the four sections were obtained as output results. Modeling and running was done by coding in MATLAB software and the results showed that the running time of GA-DDDP combined model is just 11% of the time to running the classic dynamic planning model. Also in this study, the results of the four-section model were compared with the simpler single-section model (equivalent section). The results show that the simplification of model to one section causes the increasing costs to about 20%.

Keywords: Flood Control, Levee, Optimization, Discrete Differential Dynamic Programming, Genetic Algorithm.

DOI: 10.22067/jwsd.v7i1.81283

مقدمه

سیل یک بلای طبیعی است و در مقایسه با سایر بلایای طبیعی بیشترین خسارات جانی و مالی را ایجاد می‌نماید. طغیان رودخانه‌ها همه ساله سطح بسیار وسیعی از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی، جاده‌ها، پل‌ها، تأسیسات عمومی و زیربنایی و دیگر زیرساخت‌ها و منابع طبیعی را تهدید می‌کند. این موضوع باعث می‌شود رودخانه‌ها به موازات ایفای نقش حیاتی‌شان به‌عنوان یکی از منابع عمده تأمین آب، به‌عنوان یکی از عوامل طبیعی خسارت‌آفرین برای بشر نیز محسوب شوند.

روش‌های کاهش خسارت سیلاب به‌طورکلی به دو دسته سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم می‌شود. روش‌های سازه‌ای، به کلیه فعالیت‌هایی گفته می‌شود که با احداث سازه‌های مهندسی، منجر به کاهش پیک و/یا حجم سیلاب، افزایش ظرفیت رودخانه‌ها، جلوگیری از طغیان رودخانه‌ها، انتقال و هدایت آب اضافی به مناطق دیگر می‌شود و خسارات سیل کاهش می‌یابد. این روش‌ها، به روش‌های سخت‌افزاری در کنترل سیل معروف هستند و عموما قبل از وقوع سیل به‌کار گرفته می‌شوند. روش‌های غیرسازه‌ای به روش‌هایی گفته می‌شود که نحوه برخورد با مسئله سیل و کاهش خسارات آن بیشتر جنبه نرم‌افزاری و مدیریتی داشته و برای رفع یا تسکین اثرات تخریبی سیلاب، سازه‌های فیزیکی احداث نمی‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به سامانه‌های هشدار سیل، سازگاری با سیل، و بیمه سیل اشاره نمود.

روش استاندارد طراحی سازه‌های کنترل سیلاب روش ریسک‌مبنا[1] می‌باشد (USACE، ۱۹۹۱). در این روش هربار سیلابی با دوره بازگشت معین، به‌عنوان سیل طراحی مدنظر قرار گرفته و سازه بر اساس آن طراحی می‌شود. در نهایت دوره بازگشتی که کمترین هزینه کل (هزینه اجرایی به‌علاوه خسارت باقیمانده) را داشته باشد، به‌عنوان طرح بهینه در نظر گرفته می‌شود.

در این مطالعه، طراحی بهینه خاکریزهای کنترل سیلاب (گوره‌ها) که یکی از روش‌های سازه‌ای کنترل سیلاب می‌باشند، با استفاده از ترکیب روش‌های الگوریتم ژنتیک[2] و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی[3] (GA-DDDP) بررسی شده است.

از گذشته تا کنون مطالعه گوره‌ها مورد توجه بوده است. Shafiei و همکاران (۲۰۰۵) ارتفاع و عقب‌نشینی گوره را با تحلیل اقتصادی سود-هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی کردند. آن‌ها نشان دادند طراحی اقتصادی سیستم گوره شامل برقراری تعادل بین هزینه‌های ساخت گوره (ارتفاع گوره)، ارزش زمین در پهنه سیلاب دشت و خسارات سیل در اثر ظرفیت ناکافی کانال می‌باشد.Florsheim و Dettinger (۲۰۰۷) تاثیرات آب و هوا بر شکست گوره‌ها و خسارت وارد بر آن را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند سیل تحت تاثیر آب و هوا و تغییرات آن قرار دارد و به همین دلیل سیستم‌های رودخانه‌ای که بر مبنای مهندسی بنا شده است نیز تحت تاثیر سیل قرار گرفته و حتی تخریب شده‌اند. Zhu و Lund (۲۰۰۹) یک تئوری اقتصادی-مهندسی برای طراحی ابعاد گوره شامل ارتفاع و میزان عقب‌نشینی گوره ارائه کرد و ارتباط بین ارتفاع و عقب‌نشینی گوره و هزینه‌ها و ریسک‌های موجود را بر اساس این تئوری نشان داد. Kai و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های کنترل و مدیریت سیلاب در رودخانه Huaihe را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند مدیریت و کنترل سیلاب در حوضه این رودخانه اهمیت حیاتی در توسعه اجتماعی و اقتصادی دارد. Hui و همکاران (۲۰۱۶) آنالیز مبنی بر ریسک را بر روی شکست گوره‌ها ناشی از ناپایداری و شکست ژئوتکنیکی انجام داد و ابعاد بهینه ارتفاع گوره و عرض تاج گوره را به‌منظور جلوگیری از این شکست‌ها تحلیل کرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد در بهینه‌سازی گوره با استفاده از این روش احتمال شکست ناشی از ناپایداری باتوجه‌به ارتفاع گوره مشخص می‌شود. درحالی‌که احتمال شکست ژئوتکنیکی بر مبنای تأثیر مشترک ارتفاع گوره و عرض تاج گوره مشخص خواهد شد. همچنین وی نشان داد دامنه تغییرات عرض تاج گوره نسبت به ارتفاع گوره در شرایط بحرانی طراحی بیشتر است. علیمحمدی و همکاران (۱۳۹۲) ابعاد خاکریزهای کناره رودخانه (گوره‌ها) را با استفاده از رویکرد آنالیز ریسک و تحلیل اقتصادی سود-هزینه بهینه‌سازی کردند. آن‌ها سیستم پیشنهادی کنترل سیلاب رودخانه خشک معالی آباد (تنگ سرخ) شیراز را بررسی کردند. نتیجه این مطالعه نشان داد تغییر قیمت واحد زمین بیشترین تاثیر را روی ارتفاع گوره و فاصله آن تا لبه رودخانه گذاشته و میزان این حساسیت بیش از ۱۰۰ درصد است.

Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶) برای طراحی مبتی بر ریسک سیستم‌های کنترل سیلاب (گوره) با توجه به عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و اقتصادی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو مدلی را ارزیابی کردند. آن‌ها یک مقطع معادل در طول رودخانه در نظر گرفتند و ابعاد بهینه گوره را در دوحالت قطعی و غیرقطعی به‌دست آوردند و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمودند. آنها همچنین در این مطالعه میزان اهمیت و تأثیرگذاری هر یک از عدم‌قطعیت‌ها بر ابعاد بهینه را بررسی کردند.

برنامه‌ریزی پویا[4] یک روش بهینه‌سازی است که به‌طور وسیعی در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب استفاده می‌شود، Yakowitz (۱۹۸۲) و Heidari و همکاران (۱۹۷۱) به دلیل مشکلاتی مانند حافظه فراوان مورد نیاز و زمان محاسباتی زیاد که برای استفاده از برنامه‌ریزی پویا با کامپیوترهای دیجیتالی ایجاد می‌شد روش جدیدی را ارائه کردند. مکانیزم این روش به‌این‌صورت است که یک مسیر آزمایشی اولیه برای DP انتخاب شده و با هدف

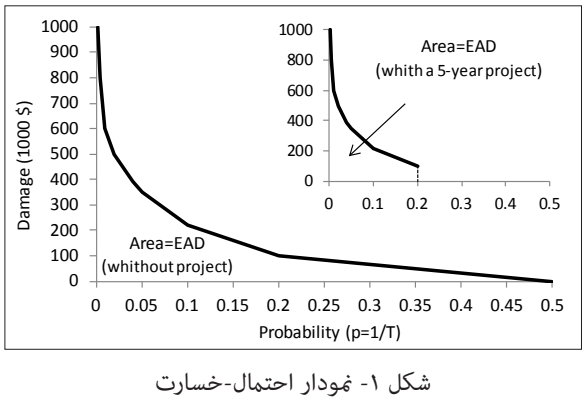
مشخص شدن مسیر بهینه معادله بازگشتی بلمن[5] در همسایگی این مسیر اجرا می‌شود. سپس از این مسیر بهینه به‌عنوان مسیر اولیه در گام بعدی استفاده می‌شود تا نتیجه نهایی حاصل شود. این روش برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی (DDDP) نامیده می‌شود. Chow و همکاران (۱۹۷۵) زمان و حافظه مورد نیاز برای حل مسائل DP و DDDP را بررسی کردند و در تحقیقات خود مقایسه تجاری بین سیستم‌های حافظه هسته‌ای با سرعت بالا و حافظه‌های با سرعت پایین را انجام دادند. Jamshidi و Heidari (۱۹۷۷) برای به‌دست آوردن سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم منابع آب در استان خوزستان ایران از DDDP استفاده کرد.Tung و Mays (۱۹۸۱) روشی برای تعریف ریسک و قابلیت اطمینان در سیستم‌های کنترل سیلاب (گوره) ارائه کردند و عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را در توابع خسارت مورد انتظار سالانه در نظر گرفتند. آن‌ها مدل‌هایی برای بررسی سازگاری اقتصادی بین هزینه‌های پروژه و میزان خسارت ناشی از سیل توسعه دادند و با استفاده از الگوریتم DP و DDDP ابعاد بهینه گوره را به‌دست‌آوردند. Li و همکاران (۱۹۷۷) یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی سیستم‌های زهکشی شهری ارائه کردند. این روش شامل انتخاب و طراحی بهینه یک طرح با توسعه مدل DDDP و اجرا بر روی یک مورد مطالعاتی مشخص بود. نتایج نشان داد انتخاب این طرح بهینه باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت می‌شود. Hsieh و Yang (۲۰۰۷) مدلی را از ترکیب DDDP و یک مدل بدون بعد کیفی مخزن برای مطالعه بر روی حوزه مخزن Fei-Tsui در شمال تایوان ایجاد کردند. تابع هدف در این مدل به‌دست آوردن بهترین شیوه مدیریت در راستای حداقل کردن هزینه‌های ساخت‌وساز و نگهداری و تعمیرات سیستم بود. Cheng و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی به‌منظور بهره‌برداری از سیستم‌های برق‌آبی بزرگ مقیاس استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند برخلاف اینکه الگوریتم DDDP یک روش کلاسیک برای کاهش مشکل ابعاد در بهره‌برداری در سیستم‌های برق‌آبی می‌باشد اما زمان محاسبات با افزایش تعداد مخازن به‌صورت تصاعدی افزایش یافته است. Li و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند بهینه‌سازی سیستم‌های برق‌آبی بزرگ با هدف تعیین دبی و یا میزان آب مورد نظر برای تولید حداکثر برق با وجود قیود محدود کننده یک مسئله پیچیده غیرخطی با ابعادی بسیار زیاد است. در این مطالعه برای حل مشکل بهینه‌سازی سیستم‌های برق‌آبی بزرگ از روشی بر مبنای الگوریتم DDDP استفاده شده است. Feng و همکاران (۲۰۱۷) بر روی بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های برق‌آبی مطالعه کردند و دریافتند مشکل ابعاد مسئله یک چالش بزرگ برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های برق‌آبی است، زیرا هزینه محاسبات با افزایش ابعاد به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کرد. آنها بیان کردند DDDP روشی مناسب برای کاهش مشکلات ابعادی است و به‌منظور بهبود عملکرد DDDP یک روش جدید به‌نام برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی متعامد (ODDDP) معرفی کردند. Huang و همکاران (۲۰۰۲) الگوریتم ژنتیک (GA) بر پایه برنامه‌ریزی پویای تصادفی برای بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه را ارائه کرد. هدف وی از ارائه این روش مقابله با مشکلات ابعادی سیستم‌های چند مخزنه بود. Tospornsampan و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی برای بهره‌برداری از مخازن روشی به‌نام (GA_DDDP) ارائه کردند و از این روش برای بهینه‌سازی بهره‌برداری در سیستم چند مخزنه Mae-klong تایلند استفاده کردند. در مقاله حاضر سعی شده است روش ارائه شده توسط Tospornsampan بر روی رودخانه اجرا شود.

مواد و روش‌ها

سازه‌های کنترل سیلاب بر اساس روش ریسک-مبنا طراحی می‌شوند (USACE، ۱۹۹۱). سود اقتصادی پروژه‌های کنترل سیلاب عبارت است از کاهش خسارات سیلاب در منطقه پتانسیل خطر و به‌طور کمی می‌توان سود حاصل از اجرای یک پروژه کنترل سیلاب را بر اساس نمودار احتمال-خسارت مطابق شکل (۱) بیان نمود. به‌منظور طراحی به روش ریسک-مبنا باید مقدار خسارت مورد انتظار سالانه (EAD)[6] مشخص شود. این مقدار برابر مساحت زیر منحنی خسارت-احتمال است و آن‌را می‌توان با استفاده از انتگرال‌گیری عددی بر اساس روش ذوزنقه‌ای محاسبه نمود:

$$E[D]=\sum_{j=1}^{n}\frac{[D(q_j)+D(q_{j+1})]}{2}[F(q_{j+1})-F(q_j)] \qquad (۱)$$

که در آن E[D] خسارت مورد انتظار سالانه، D(q) خسارت سیل مورد انتظار با دبی پیک q، F(q) مقدار تابع توزیع تجمعی به ازای مقدار دبی پیک q. ((p=1-F(q))



شکل ۱- نمودار احتمال-خسارت

۱- فرمول‌بندی مسئله

در صورتی‌که بازه رودخانه در منطقه پتانسیل خسارت همگن نباشد، به‌منظور افزایش دقت مدل، می‌توان آن‌را به چند بازه کوچکتر همگن تقسیم‌بندی نمود. در این مطالعه، رودخانه موردنظر به سه بازه تقسیم شده است. شکل (۲) مقطعی از رودخانه به همراه سیلاب دشت و گوره را نمایش می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده در این طراحی در شکل (۲) نشان داده شده است. اگرچه این شکل فرم ساده شده مقطع واقعی است اما سعی شده تا حد امکان جزئیات آن (ازجمله دو طرف رودخانه به‌صورت یک ذوزنقه با شیب متفاوت) در نظر گرفته شود. شیب اراضی مجاور رودخانه در دو طرف متفاوت است و فاصله گوره‌ها و هندسه آن‌ها نیز در دو طرف یکسان نیست. 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 آن فرمول‌بندی شود. مهمترین فرضیاتی که در ارائه مدل بهینه‌سازی در این مطالعه استفاده شده است، به شرح ذیل می‌باشد:

۱-در صورت انجام طرح کنترل سیلاب با سیل طراحی T ساله، به منطقه پتانسیل خسارت از سیلاب‌های با دوره بازگشت کمتر از T سال (با احتمال (1/T)) هیچگونه خسارتی وارد نمی‌شود (شکل ۱).

۲-شرایط مقطع آب‌گذری و سیلاب‌دشت به‌صورت استاتیک (بدون اعمال تغییرات آینده) در نظر گرفته شده است (تغییر کاربری اراضی سیلاب‌دشت در آینده در نظر گرفته نشده است).

۳-طراحی گوره بر اساس حداکثر دبی سیل طراحی در ابتدای منطقه پتانسیل، صورت گرفته است.

۴-برای محاسبه جریان عبوری از مقاطع رودخانه از فرمول مانینگ استفاده شده است.

۵-هزینه اجرایی ساخت گوره به‌صورت حاصل‌ضرب هزینه واحد حجم گوره در حجم گوره در نظر گرفته شده است.

۶-رابطه تراز-خسارت معلوم و ثابت فرض می‌شود.

۷-طول رودخانه به چند بازه تقسیم شده و فرض شده هر بازه همگن است.

۸-مقطع سیلاب‌دشت در هر بازه مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است.

۲- فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی

تابع هدف در این مسئله به‌صورت حداقل کردن هزینه کل، در نظر گرفته شده است، بنابراین داریم:

$$\min Z = \mathrm{Tcost} \quad (۲)$$

$$T\cos t = A\cos t + DR \quad (۳)$$

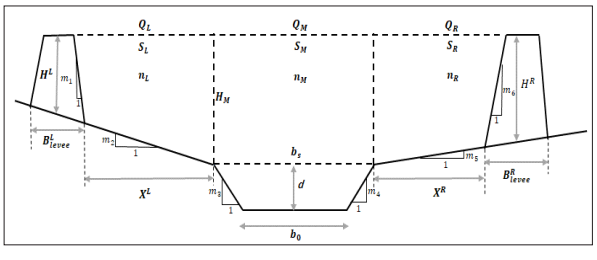
$$A\cos t = CRF \times (C_{levee} + C_{land}) \quad (۴)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۵)$$

$$C_{levee} = f_1(UPRC_{levee}, A_{levee}, L, H_L, H_R, m_1, m_6) \quad (۶)$$

$$C_{land} = f_2(UPRC_{land}, X_L, X_R, L, B_{levee}, B, m_1, m_6) \quad (۷)$$

که در آن Tcost مجموع هزینه‌های معادل سالانه طرح می‌باشد. Acost هزینه سالانه طرح، شامل هزینه ساخت و هزینه تملک اراضی، DR خسارت باقی‌مانده در منطقه پتانسیل خطر، CRF ضریب بازگشت سرمایه، Clevee هزینه احداث گوره و Cland هزینه تملک اراضی مجاور رودخانه، Alevee مساحت گوره، L طول بازه، H_L ارتفاع گوره سمت چپ، H_R ارتفاع گوره سمت راست، m_1 شیب کناره گور در ساحل راست، m_6 شیب کناره گوره در ساحل چپ، X_L فاصله لبه گوره چپ تا پای رودخانه، X_R فاصله لبه گوره راست تا پای رودخانه، B_{levee} قاعده گوره و B عرض فوقانی گوره است. Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶) جزییات مربوط به توابع f_1، f_2، را ارائه نمودند.



شکل ۲- مقطع آبگذری در منطقه پتانسیل خطر Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶)

۳- محدودیت‌ها

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 وکرانه‌های چپ و راست با دبی طراحی برابر شود. قیود مربوط به نحوه مدل‌سازی مقطع رودخانه وگوره در منطقه پتانسیل خطر به شرح ذیل می‌باشد. برای هر یک از مقاطع:

$$Q_T = Q_L + Q_M + Q_R \quad (۸)$$

$$Q_L = f_3(S_L, X_L, H_L, m_1, m_2, n_L) \quad (۹)$$

$$QM = f_4(S_M, b_0, b_s, d, H_m, m_3, m_4, n_m) \quad (۱۰)$$

$$Q_R = f_5(S_R, X_R, H_R, m_5, m_6, n_R) \quad (۱۱)$$

$$Setback = X_R + b_s + X_L \quad (۱۲)$$

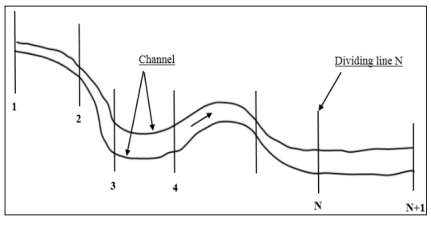
Q_T دبی طراحی گوره با دوره بازگشت T سال، Q_L، Q_R، Q_M، به‌ترتیب دبی عبوری از سیلاب‌دشت در سمت چپ و راست رودخانه و دبی عبوری از مقطع اصلی رودخانه، S_L، S_R، S_M شیب طولی سلاب‌دشت در ساحل چپ و راست و مقطع اصلی رودخانه، m_2 شیب متوسط عرضی سیلاب‌دشت در سمت راست، m_3 شیب عرضی کناره رودخانه در سمت راست، m_4 شیب عرضی کناره رودخانه در سمت چپ، m_5

شیب متوسط عرضی سیلاب‌دشت در سمت چپ، b_0 عرض کف رودخانه، b_s عرض فوقانی مقطع گوره، H_M فاصله لبه رودخانه تا بالای گوره، n_M، n_R، n_L به‌ترتیب ضریب زبری مانینگ در مقطع اصلی، ساحل راست و چپ می‌باشد. توابع f_3، f_4 و f_5 نیز فرمی از معادله مانینگ برای مقاطع مرکب می‌باشد.

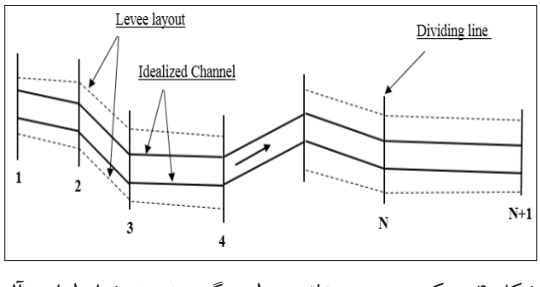
۴- برنامه‌ریزی پویا (DP)

در برنامه‌ریزی پویا (DP) مسئله بهینه‌سازی به یک فرآیند تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای تبدیل می‌شود. به‌طورکلی در بسیاری از مسائل، که در آن‌ها رشته‌ای از تصمیم‌های مرتبط با یکدیگر مطرح باشد، غالبا از برنامه‌ریزی پویا که ماهیت آن روش ریاضی‌است استفاده می‌شود(Hillier و Lieberman، ۲۰۱۴)

طراحی گوره بر اساس الگوریتم DP توسط Tung و Mays (۱۹۸۱) ارائه شده است. برای طراحی گوره به این روش با توجه به فرضیات ذکر شده، طول رودخانه به چند بازه تقسیم می‌شود. بازه‌ها از نظر هیدرولیکی همگن بوده و دارای ارزش یکسان زمین می‌باشند. شکل‌های (۳ و ۴) پیکربندی مقاطع گوره در رودخانه تحت شرایط واقعی و شرایط ایده‌آل را نشان می‌دهد.



شکل ۳-نحوه تقسیم رودخانه به چند بازه و انتخاب مقاطع (Tung و Mays، ۱۹۸۱)



شکل ۴- پیکربندی رودخانه و طرح گوره تحت شرایط ایده‌آل

روش حل این مسائل با پیدا کردن جواب بهینه مربوط به کلیه حالت‌های مرحله آخر (در روش پسرو یا Backward) یا اول (در روش پیشرو یا Foreward) آغاز می‌شود. در مسائل مختلف برنامه‌ریزی پویا، شکل دقیق معادله برگشتی تا حدی با هم تفاوت دارد. فرض کنید در روش پسرو $S_n(i)$ متغیر حالت سیستم در ابتدای مرحله i و $X_n(j)$ متغیر تصمیم در انتهای مرحله n باشد، ($n=1,2,\ldots,N$; $i=1,2,\ldots,I_n$; $j=1,2,\ldots,J_n$). اگر در مرحله n و در حالت $S_n(i)$ متغیر تصمیم $X_n(j)$ انتخاب شده باشد در این صورت $f_n(S_n(i),X_n(j))$ به ازای تمام مقادیر j را با $f^*_n(S_n(i))$ نشان می‌دهیم. در این صورت رابطه بازگشتی به‌صورت ذیل خواهد بود:

$$f_n^*(S_n(i)) = \min[C(S_n(i), X_n(j)) + f_{n+1}^*(X_n(j))] \quad (۱۳)$$

روش حل پس‌رو با استفاده از رابطه بازگشتی، از مرحله‌ای به مرحله قبل اعمال می‌شود. در هر مرحله سیاست‌های بهینه در رابطه با تمام حالت‌های آن مرحله مشخص می‌شود و سرانجام سیاست بهینه اولین مرحله تعیین خواهد شد.

برای سیستم مورد نظر دو متغیر حالت شامل فاصله وارتفاع گوره‌ها در نظرگرفته شده است. ماتریس حالت ورودی، S_n با مجموعه‌ای از فاصله‌ها و ارتفاع‌ها در پایان مرحله n نشان داده می‌شود.

$$S_n = (W_n, H_n)$$
$$W_n, n = 1,\ldots, N_W \qquad H_n, n = 1,\ldots, H_W \quad (۱۴)$$

که در آن S_n ماتریس حالت ورودی با مجموعه‌ای از فاصله‌ها و ارتفاع‌ها است. N_w تعداد فاصله‌های احتمالی ممکن و N_H تعداد ارتفاع‌های احتمالی ممکن برای گوره می‌باشد. حالت خروجی، مجموعه‌ای از فاصله‌ها و ارتفاع‌های ممکن در پایین‌دست گوره در مرحله n می‌باشد. برای ماتریس خروجی نیز مانند ماتریس ورودی داریم:

$$\widetilde{S}_n = (\widetilde{W}_n, \widetilde{H}_n) \quad (۱۵)$$

فضای حالت خروجی به فضای حالت ورودی، تصمیمات اتخاذ شده و روابط عملکردی که تابع انتقال نامیده می‌شوند، بستگی دارد. متغیرهای تصمیم مستقل در هر مرحله، تغییرات در فاصله و ارتفاع می‌باشد که می‌توانند مقادیری مثبت و یا منفی داشته باشند. فضای تصمیم در مرحله n، که با D_n تعریف می‌شود شامل دو متغیر تصمیم می‌باشد، که و صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_n = (d_n^W, d_n^H),\ n = 1,2,\ldots,N_s \quad (۱۶)$$

که در آن N_s شماره مرحله (بازه) می‌باشد و مقدار افزایش (یا کاهش) مقادیر فاصله یا ارتفاع گوره به‌عنوان تفاوت حالات ورودی و خروجی (مرحله n و مرحله n+1) تعریف می‌شود. تابع انتقال، حالت‌های ورودی در یک مرحله معین با متغیرهای تعیین شده را به خروجی تبدیل می‌کند. برای مرحله n تابع انتقال به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\widetilde{S}_n = (\widetilde{X}_n, \widetilde{H}_n) = (X_n, H_n) + (d_n^X, d_n^H) \quad (۱۷)$$

تابع انتقال، به متغیرهای حالت مقدار می‌دهد، که این امر امکان محاسبه ظرفیت گوره در هر مقطع را فراهم می‌نماید. این اطلاعات و قیود با یکدیگر استفاده قرار می‌شوند و یک فضای تصمیم امکان‌پذیر را در هر مقطع تعریف می‌کنند. ارزیابی مقادیر تابع هزینه به هدف طراحی بستگی دارد، تابع هدف

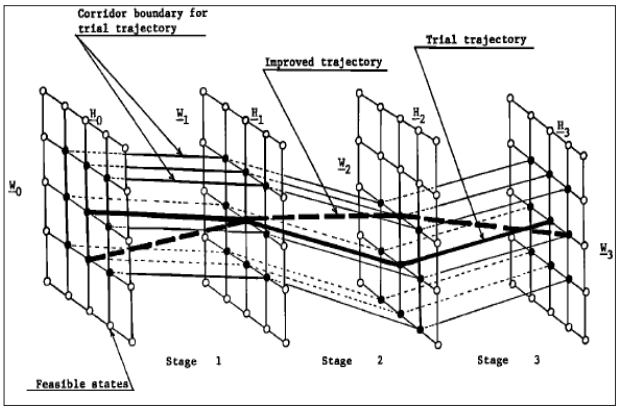
مورد نظر در این مطالعه حداقل کردن هزینه کل می‌باشد. حالت‌های ورودی در مرحله n+1 به متغیرهای ورودی در مرحله n بستگی دارد و محاسبه تابع هزینه به‌صورت بازگشتی انجام می‌شود. بیشترین و کمترین مقادیر عرض و ارتفاع برای گوره و همچنین مقدار افزایش در هر حالت مشخص می‌باشد. پس از مشخص کردن فضای حالت برای سیستم، مراحل بهینه‌سازی آغاز می‌شود. هنگامی‌که مراحل محاسباتی برای آخرین مرحله از سیستم کامل شد، هزینه مربوط به حالت خروجی در آخرین مرحله حداقل هزینه کل سیستم می‌باشد. سپس فرایند برنامه‌ریزی پویا ادامه پیدا می‌کند تا بهترین حالت سیستم مشخص شود.

۵- برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی (DDDP)

Hall (۱۹۶۴) از گونه‌ای از مدل DP به‌نام برنامه‌ریزی پویای جزئی[۷] در مطالعات بهره‌برداری از مخزن استفاده نمود. سپس Heidari و همکاران (۱۹۷۱) این مدل را به‌صورت سیستماتیک ارائه کرد و آن را برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی (DDDP) نامید. DDDP یک روش تکراری است که معادله بازگشتی آن از برنامه‌ریزی پویا تبعیت می‌کند (Mays و Yen، ۱۹۷۵). از روش DDDP می‌توان به‌عنوان جایگزینی برای DP در طراحی گوره‌ها بهره برد. در این روش ابتدا یک مسیر اولیه[۸] فرض می‌شود و سپس در اطراف این مسیر اولیه با استفاده از ارتفاع‌های مختلف و حریم‌های عرضی گوناگون حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده و راهرو[۹] رسم می‌شود. ادامه روند مانند برنامه‌ریزی پویا در داخل هر راهرو انجام می‌گیرد. پس از پیدا کردن مسیر بهینه در تکرار اول، از آن به‌عنوان مسیر آزمایشی اولیه (مسیر اولیه) در تکرار بعدی استفاده می‌شود و راهرو جدید حول این مسیر تشکیل می‌شود. این روند تا مسیر بهینه نهایی ادامه پیدا می‌کند، در این روند داخل راهرو افزایش مقدار حالت‌ها در مرز بالایی و پایینی مسیر به اندازه Δ_W و Δ_H می‌باشد، که منجر به تشکیل راهرو جدید می‌شود. این تکرارها (مشخص شدن جواب در هر بار تکرار و انتخاب این جواب به‌عنوان مسیر اولیه در مرحله بعد) تا زمان‌که میزان کاهش تابع هدف (مجموع هزینه‌های ساخت و خسارات ناشی از سیلاب) حداقل شود، ادامه پیدا می‌کند یا به‌عبارتی جواب نهایی در دو مرحله متوالی یکسان باشد. جزییات این روش در شکل (۵) نشان داده شده است.

۶- ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی (GA-DDDP)

یکی از روش‌های انعطاف‌پذیر جهت حل مسائل پیچیده، بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی می‌باشد که با الهام از سیستم‌های بیولوژیکی و فیزیکی موجود در طبیعت به‌وجود آمده است. در این روش تعداد زیادی ذره در فضای مساله پخش شده و به‌طور همزمان به دنبال جواب بهینه می‌گردند. این روش‌ها را الگوریتم‌های تکاملی می‌نامند (Rao، ۲۰۰۹). در این میان، الگوریتم ژنتیک از اولین و موفق‌ترین الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود(Goldberg و Richardson، ۱۹۸۷). الگوریتم ژنتیک شامل عملگرهای کدگذاری[۱۰]، ارزیابی[۱۱]، انتخاب[۱۲]، ترکیب[۱۳] و جهش[۱۴] است. ابتدا متغیرهای مساله کدگذاری می‌شوند. سپس در مرحله ارزیابی تابع برازندگی[۱۵] از روی تابع هدف، هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند و کیفیت آن را مشخص می‌کند. هر چه کیفیت رشته جواب بیشتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی افزایش خواهد یافت. در مرحله انتخاب یک جفت از کروموزوم‌ها برگزیده می‌شوند تا با هم ترکیب شوند. در عملگر ترکیب نسل قدیمی کروموزم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند و نسل تازه‌ای از کروموزم‌ها را به‌وجود می‌آورند. به‌این‌ترتیب عملگر جهش جواب‌های ممکن دیگری را تولید می‌کند. این عملگر روی هر یك از کروموزوم‌های حاصل از عملگر ترکیب اثر می‌کند (Coley، ۱۹۹۹). در این مطالعه با هدفکاهش زمان حل محاسبات، مدل‌سازی انجام گرفته از طریق روش برنامه‌ریزی پویا، از روش دیگری که از ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی به‌وجود آمده استفاده شده است، تا از مزایای این دو روش استفاده شود و نقاط ضعف آن‌ها نیز برطرف شود. اگرچه DDDP در محاسبه بسیار کارآمد است و می‌تواند یک راه‌حل همگرا ایجاد کند اما زمان زیادی برای پیدا کردن مسیر اولیه صرف می‌شود و همچنین دشواری این امر در مسائل پیچیده بسیار مشهود است. از سوی دیگر، GA می‌تواند بسیاری از پاسخ‌های خوب نزدیک به بهینه را تولید کند، اما برای به‌دست آوردن دقیق پارامترهای بهینه زمان زیادی لازم است. بنابراین باید به دفعات زیاد با تغییر پارامترها این الگوریتم اجرا شود تا به جواب بهینه دست یافت. رویکرد پیشنهادی GA-DDDP به‌این صورت است که ابتدا مدل بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد گوره باتوجه‌به تابع هدف و محدودیت‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. چون برای پیدا کردن پارامترهای مناسب در این روش زمان اضافی لازم نیست، با استفاده از GA یک راه‌حل قابل قبول (صرف‌نظر از همگرایی) به‌دست خواهد آمد. سپس جواب به‌دست آمده از این قسمت شامل ارتفاع و فاصله گوره است به‌عنوان جواب اولیه (Initial Trajectory) در ساختار برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی وارد می‌شود. به‌این ترتیب تا زمانی‌که نتیجه نهایی حاصل شود، روند حل مانند حل مسئله عادی با روش DDDP ادامه پیدا می‌کند.

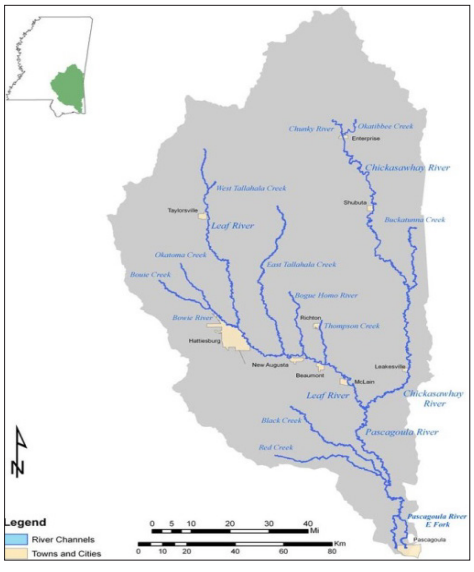


شکل ۵- مختصات مسیر و وراهرو ترسیم شده ازDDDP برسیستم گوره (Tungو Mays، ۱۹۸۱)

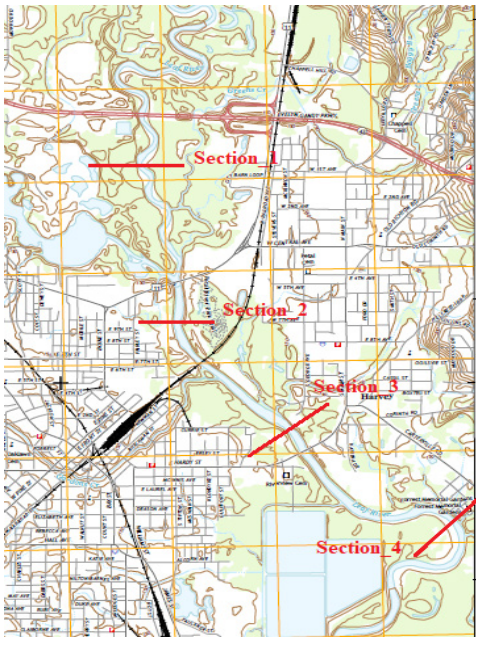
مطالعه موردی

به‌منظور مدل‌سازی و بررسی نتایج حاصل از اجرای آن به اطلاعات مختلفی از جمله توابع فراوانی سیلاب، دبی-اشل و اشل-خسارت در منطقه پتانسیل خطر احتیاج است. به‌منظور انجام مطالعه موردی از داده‌های رودخانه لیف در شهر هاتیزبرگ ایالت می‌سی‌سی‌پی آمریکا استفاده شده است. اطلاعات این رودخانه توسط Corry و Jones (۱۹۸۱) و Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶ و ۲۰۱۸) ارائه شده است. شهر هاتیزبرگ[۱۶] چهارمین شهر بزرگ ایالت می‌سی‌سی‌پی در کشور آمریکا می‌باشد. جمعیت آن در سرشماری سال ۲۰۱۰ ایالات متحده برابر ۴۶۰۰۰ نفر بوده است. این شهر چندین مرتبه جاری شدن سیل را تجربه کرده است. از جمله این سیل‌ها، چهار سیل بزرگ در طول صد سال گذشته است.

برخی از این سیل‌ها (از جمله سیل سال ۱۹۶۱) خسارات قابل توجهی را به به همراه داشتند. خسارت وارده از آن سیل در این ایالت بدون در نظر گرفتن نرخ تورم در حدود ۳,۲۵ میلیون دلار برآورد شده است (Wilson، ۱۹۶۶). اکثر خسارات سیل در امتداد رودخانه لیف[۱۷] و شاخه‌های متعدد آن از جمله رودخانه بوئی[۱۸] رخ داده است. سیلاب‌دشت‌ها در شهر هاتیزبرگ نسبتاً توسعه یافته است و شامل ترکیبی از سازه‌های مسکونی و تجاری می‌باشند. به‌این‌دلیل وقوع سیل، خسارات جانی و مالی زیادی ایجاد می‌کند (Storm، ۲۰۱۲). شکل (۶) موقعیت شهر هاتیزبرگ و رودخانه لیف در ایالت می‌سی‌سی‌پی نشان می‌دهد. مدل‌سازی برروی بازه‌ای از رودخانه به طول ۵۱۷۴ متر انجام شده است. این محدوده به سه بازه همگن به طول‌های L_1=۲۰۴۲، L_2=۱۳۷۱ و L_3=۱۷۶۱ متر تقسیم شده است. شکل (۷) بازه‌های در نظر گرفته شده در طول رودخانه را نشان می‌دهد.



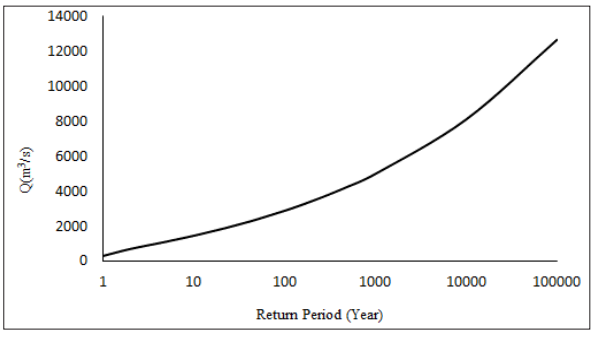
شکل ۶- موقعیت رودخانه لیف و شهر هاتیزبرگ در ایالت می‌سی‌سی‌پی (https://www.researchgate.net)



شکل ۷- بازه‌های در نظر گرفته شده در طول مسیر رودخانه (https://www.usgs.gov)

۱- داده‌های ورودی مدل

شکل (۸) منحنی فراوانی سیلاب را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. دوره بازگشت ۵۰ سال به‌عنوان دوره بازگشت طراحی سیستم انتخاب شده است. دبی پیک متناظر با این دوره بازگشت برابر ۲۴۱۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

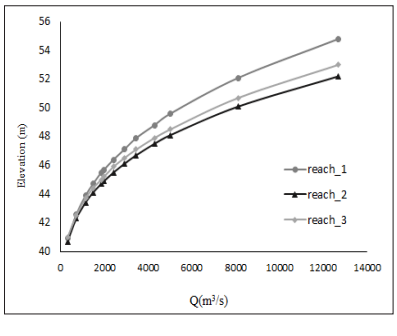


شکل ۸- منحنی دبی-فراوانی (دوره بازگشت) در بازه مورد مطالعه (Behrouz و Alimohammadi، ۲۰۱۶) باتوجه‌به مطالعات پیشین (Behrouz و Alimohammadi، ۲۰۱۶)

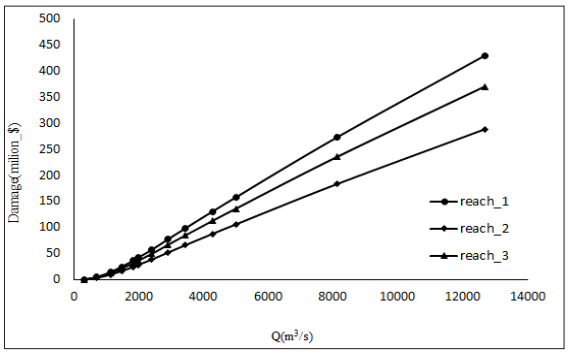
باتوجه‌به اینکه در بازه‌های مختلف این مدل مشخصات هیدرولیکی متفاوت لحاظ شده است، منحنی دبی اشل در هر بازه متفاوت خواهد بود. منحنی‌های دبی-اشل و اشل-خسارت در بازه‌های مختلف رودخانه در شکل‌های (۹ و ۱۰) ارائه شده است. سایر ورودی‌های مدل در جداول (۱ و ۲) آورده شده است (برای تعریف پارامترها در این جداول به شکل (۱) مراجعه شود). در این جدول $UPRC_{levee}$ و $UPRC_{land}$ به‌ترتیب هزینه واحد حجم ساخت گوره و هزینه زمین در منطقه پتانسیل خطر، m_1 و m_6 شیب کناره‌های گوره در کرانه چپ و راست رودخانه، B اندازه قاعده گوره و n_m ضریب زبری مانینگ بستر رودخانه می‌باشد.

جدول ۱- داده‌های ورودی ثابت در همه بازه‌ها (مقاطع)

پارامتر	واحد	مقدار
$UPRC_{levee}$	($/m^3$)	۱۵
$UPRC_{land}$	($/m^2$)	۳
m_1	-	۲
m_6	-	۲
B	(m)	۴
n_m	-	۰/۰۳۵



شکل ۹-منحنی‌های دبی-شل در بازه‌های اول، دوم و سوم (Behrouz و Alimohammadi، ۲۰۱۶)



شکل۱۰-منحنی‌های اشل-خسارت در بازه‌های اول، دوم و سوم

جدول ۲-داده‌های ورودی متغیر در مقاطع مختلف

پارامتر	مقطع-۱	مقطع-۲	مقطع-۳	مقطع-۴
m_2	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵۵	۰/۰۰۲۱
m_3	۰/۱۳	۰/۱۲۹۷	۰/۲۱۷۲	۰/۱۶۳۵
m_4	۰/۰۵۶۵	۰/۱۰۵۰	۰/۲۱	۰/۴۲۵
m_5	۰/۰۲۸۶	۰/۱۲۹	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۲۷
b_0 (m)	۳۰/۴۸	۴۵/۷۶	۵۶/۲۶	۷۵/۸۹
d (m)	۳/۹۶	۴/۴۱۹	۷/۰۱	۵/۱۸
n_l	۰/۱۷۵	۰/۱۰۵	۰/۱۴	۰/۱۴
n_R	۰/۱۷۵	۰/۱۰۵	۰/۱۴	۰/۱۷۵
S	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳

DP یک الگوریتم بهینه‌سازی گسسته است. بنابراین قبل از حل مدل لازم است متغیرهای حالت مسئله گسسته‌سازی شوند. در این مسئله متغیرهای حالت عبارتند از H_L، X_L و X_R (با معلوم بودن این سه، مقدار H_R مشخص خواهد شد). مقادیر گسسته X_L و X_R عبارت است از ۲۰، ۳۰، ۴۰، ...، ۲۰۰ (هر کدام ۱۹ مقدار) و مقادیر گسسته ارتفاع H_L عبارت است از ۰، ۲، ۴، ...، ۲۰ (۱۱ مقدار) بنابراین در مجموع به تعداد ۳۹۷۱ (۱۱×۱۹×۱۹) حالت وجود خواهد داشت (با معلوم بودن پارامترهای H_L، X_L و X_R می‌توان H_R را محاسبه نمود.). نحوه مدل‌سازی به‌این‌صورت است که ابتدا تمامی حالات ممکن برای مقادیرH_L، X_L و X_R به‌عنوان ورودی برای هر چهار مقطع در نظر گرفته می‌شوند و بر اساس حالات به‌دست‌آمده کلیه مقادیر مانند دبی ورودی در هر مقطع، قیمت زمین، هزینه ساخت گوره، میزان خسارت و مجموع هزینه‌ها برای تمامی حالات محاسبه شده سپس به شیوه برنامه‌ریزی پویای پس‌رو بر حسب هزینه‌های محاسبه شده، بهترین حالت مقادیر، ابتدا برای مقطع چهار، سپس مقطع سوم در ادامه برای مقطع دوم و در پایان برای مقطع اول به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود. سپس سایر پارامترها مانند H_R و B_{levee} که تابعی از مقادیر H_L، X_L و X_R هستند، محاسبه می‌شوند.

نتایج حاصل از اجرای مدل در جدول (۳) ارائه شده است. هزینه لازم جهت اجرای سازه گوره با ابعاد بهینه در بازه اول، دوم و سوم به‌ترتیب برابر ۴۰۵۲۴۰، ۴۲۳۸۴۰ و ۶۷۲۸۱۰ دلار خواهد بود. لازم به ذکر است برای محاسبه هزینه مقطع معادل در هر بازه، خصوصیات هندسی بازه برابر میانگین خصوصیات هندسی مقاطع بهینه حاصل در ابتدا و انتهای آن بازه در نظر گرفته شده است (Mays و Tung، ۱۹۸۱).

در حل به روش GA-DDDP ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل حل شده، سپس از نتایج آن به‌عنوان مسیر اولیه در DDDP استفاده شده است. باتوجه‌به کاهش تعداد حالات ورودی مدل، می‌توان انتظار داشت ابعاد ماتریس‌های تشکیل شده برای محاسبه مقادیر هزینه و سایر مجهولات کاهش پیدا کرده و زمان اجرای مدل در الگوریتم جدید کاهش پیدا کند. اجرای مدل GA-DDDP نشان می‌دهد نتایج حاصل از این روش برابر نتایج به‌دست‌آمده از روش DP می‌باشد.زمان اجرای مدل GA-DDDP (۹۳۸ ثانیه) کمتر از زمان اجرای مدل DP (۸۴۱۶ ثانیه) می‌باشد. شکل‌های (۱۱ و ۱۲) ابعاد بهینه و جانمایی مقاطع در طول مسیر رودخانه را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهند.

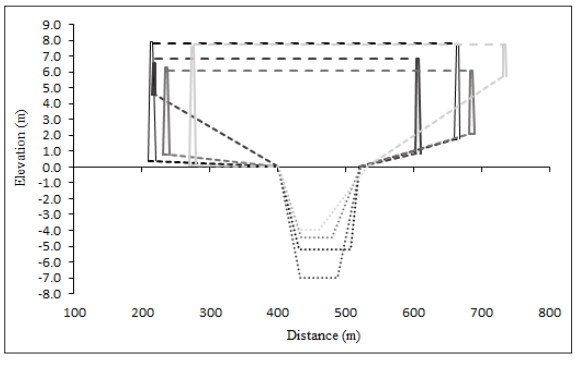
جدول ۳- ابعاد بهینه حاصل از مدل‌سازی

پارامتر	مقطع-۱	مقطع-۲	مقطع-۳	مقطع-۴
H_L (m)	۲	۴	۶	۶
H_R (m)	۷/۵	۵/۵	۲	۷/۵
H_M (m)	۷/۷	۶	۶/۸	۷/۷
XL(m)	۲۰۰	۱۶۰	۸۰	۱۴۰
X_R (m)	۱۲۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۸۰
Setback(m)	۳۵۰	۳۶۵	۳۳۱	۳۹۵
B^L_{levee} (m)	۶	۸	۱۰	۱۰
B^R_{levee} (m)	۱۱/۵	۹,۵	۶	۱۱/۵

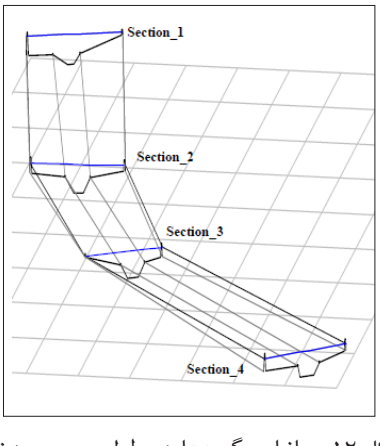
در جدول (۳) H_L و H_R به ترتیب ارتفاع گوره در ساحل سمت چپ و راست رودخانه می‌باشد، H_M فاصله لبه رودخانه تا بالای گوره، X_L و X_R فاصله لبه گوره تا پای رودخانه به‌ترتیب در ساحل چپ و راست، Setback مقدار عقب‌نشینی گوره از کرانه رودخانه B^L_{levee} و B^R_{levee} اندازه قاعده گوره در سمت چپ و راست رودخانه می‌باشد.

در ادامه، به‌منظور تحلیل حساسیت داده‌های ورودی بر نتایج خروجی با استفاده از روش مونت کارلو و استفاده از روش‌های تولید اعداد تصادفی، تعدادی سناریوی مختلف ایجاد شده و با بررسی نتایج حاصل از اجرای این سناریوها در مدل بهینه‌سازی میزان تاثیر این پارامترها بر نتایج خروجی بررسی شد. پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده برای تحلیل حساسیت شامل n، i، S، $UPRC_{levee}$ و $UPRC_{land}$ می‌باشند. لازم به ذکر است در بین متغیرهای موجود مقادیر n، S و i به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است و برای تولید مقادیر تصادفی برای این پارامترها از روش تولید اعداد تصادفی مستقل استفاده شده است. درحالی‌که، دو متغیر $UPRC_{levee}$ و $UPRC_{land}$ به هم وابسته بوده و با استفاده از روش تولید اعداد تصادفی وابسته این دو متغیر تولید شده است. باتوجه‌به توضیحات ذکر شده ۲۰ سناریو برای تولید پارامترهای یاد شده ایجاد شده که با گزینش این مقادیر به روش نمونه‌گیری لاتین هایپرکیوب در کنار یکدیگر ۲۰ سناریوی متفاوت برای مقادیر ورودی مدل حاصل شده و مدل به اجزای هر یک از این سناریوها اجرا شده است.

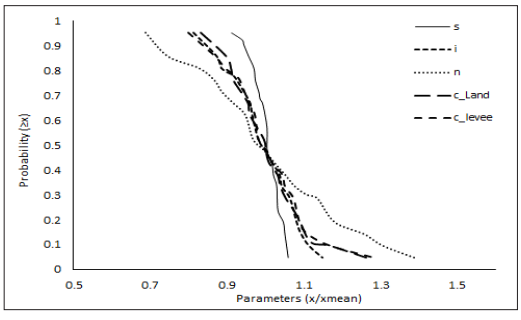
در ادامه، میزان حساسیت پارامترهای X_L، H_L، Cost و Setback به پارامترهای ورودی بررسی شد. نتایج نشان داد، تغییر پارامترهای $UPRC_{levee}$ و $UPRC_{land}$ به‌ترتیب بیشترین تاثیر را در تعیین نتایج خروجی دارد. تابع توزیع تجمعی تکمیلی (CCDF) برای پارامترهای ورودی در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- ابعاد بهینه گوره در مقاطع مختلف



شکل ۱۲- جانمایی گوره‌ها در طول مسیر رودخانه



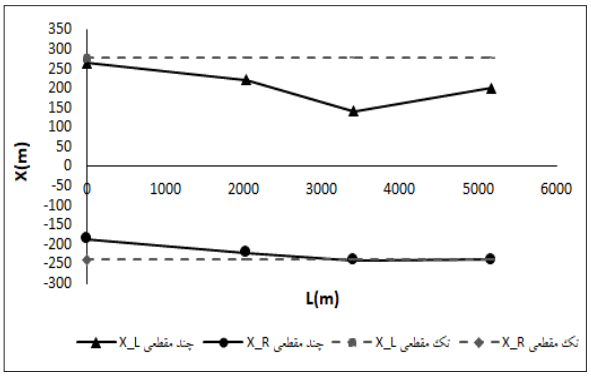
شکل ۱۳- منحنی CCDF مربوط به پارامترها

برای مقایسه تأثیر چند بازه‌ای در نظر گرفتن رودخانه با حالت ساده‌تر تک‌بازه‌ای، نتایج مدل فعلی با مدل بهینه‌سازی تک‌بازه‌ای که توسط Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶) ارائه شده، مقایسه شد. نتایج این مطالعه و مشخصات مقطع معادل در جدول (۴) ارائه شده است.

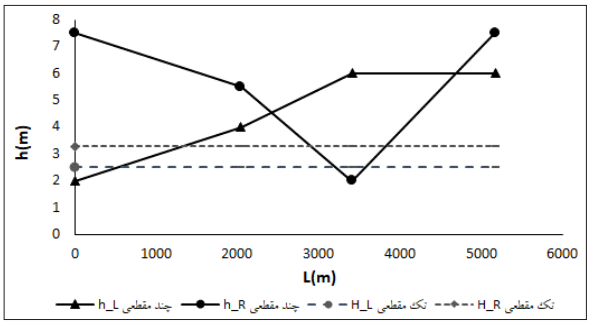
جدول ۴- ابعاد گوره در مدل تک‌بازه‌ای Behrouz و Alimohammadi (۲۰۱۶)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
H_L (m)	۲/۴۶	X_R (m)	۱۷۸
HR (m)	۳/۲۸	B^L_{levee} (m)	۶/۴۶
H_M (m)	۴/۶۶	B^R_{levee} (m)	۷/۲۸
X_L (m)	۲۱۶	Setback (m)	۴۳۲

شکل‌های (۱۴ و ۱۵) ابعاد گوره در دو حالت تک‌بازه‌ای و چندبازه‌ای را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد مجموع هزینه‌های برآورد شده برای ساخت گوره در حالت تک‌بازه‌ای در حدود ۱/۹ میلیون دلار می‌باشد، درحالی‌که این رقم برای حالت چندبازه‌ای در حدود ۱/۵ میلیون دلار حاصل شده است.



شکل ۱۴- مقادیر فاصله گوره از لبه رودخانه در سمت چپ و راست در حالت تک بازه‌ای و چند بازه‌ای



شکل ۱۵- مقادیر ارتفاع گوره در سمت چپ و راست در حالت تک بازه‌ای و چند بازه‌ای

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله تهیه یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد بهینه طرح کنترل سیلاب (سازه گوره) می‌باشد بر این اساس لازم است هزینه‌های مورد استفاده در طرح کمینه باشد. در این مطالعه، سعی بر آن است که طرح از لحاظ هزینه و زمان حل مدل بهینه شود. نوآوری مشخص این مقاله ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی در طراحی سازه‌های کنترل سیلاب می‌باشد. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که در آن‌ها جزئیات مختلف مقاطع لحاظ نمی‌شود. در توسعه مدل‌های این مطالعه با توجه به هندسه واقعی مسئله جزئیات بیشتری در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه، طول رودخانه به‌صورت سه بازه متوالی در نظر گرفته شده است و به همین دلیل ابعاد بهینه برای چهار مقطع از ابتدای بازه اول تا انتهای بازه سوم به‌دست‌آمده است.

تابع هدف مدل بهینه‌سازی حداقل کردن هزینه کل شامل هزینه‌های ساخت گوره، ارزش زمین در منطقه پتانسیل خسارت و خسارات باقیمانده (ناشی از سیلاب‌های با دوره بازگشت بالاتر از سیلاب طراحی که در این مطالعه دوره بازگشت ۵۰ سال در نظر گرفته شده است)، می‌باشد. کدنویسی مدل بهینه‌سازی، در نرم افزار Matlab انجام شده است.

به علت متفاوت در نظر گرفتن مقطع سیلاب‌دشت در دو طرف رودخانه و همچنین مقطع اصلی رودخانه، نتایج به‌دست‌آمده برای ارتفاع گوره در ساحل چپ و راست و میزان عقب‌نشینی گوره در دو ساحل مقادیر متفاوتی از یکدیگر می‌باشد.

مدل‌سازی ابتدا بر اساس الگوریتم برنامه‌ریزی پویای کلاسیک انجام شده و سپس از ترکیب برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی و الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده شده

است. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان و هزینه محاسبات شده است. زمان لازم برای اجرای مدل DP کلاسیک برابر ۸۴۱۶ ثانیه و برای مدل ترکیبی GA-DDDP برابر ۹۳۸ ثانیه بوده است. همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی تک بازه‌ای و سه بازه‌ای بیانگر این است که در نظر گرفتن سه بازه در طول رودخانه باعث کاهش هزینه‌های اجرایی طرح شده است. لازم به ذکر است برای طراحی به‌این روش به اطلاعات جامعی در خصوص مشخصات رودخانه نظیر ضریب زبری مانینگ و هزینه‌های اراضی مجاور، و ... نیاز می‌باشد و از یک سو چون این سازه‌ها در حریم رودخانه احداث می‌شوند. درصورتی‌که مسایل مربوط به حریم و بستر رودخانه رعایت نشده باشد کاربرد این روش‌ها با مشکل مواجه خواهد بود.

پی‌نوشت

1- Risk-based
2- Genetic Algoritm (Ga)
3- Discrete Differential Dynamic Programming (DDDP)
4- Dynamic Programming (DP)
5- Bellman
6- Expecred Annual Damage
7- Incremental Dynamic Programming
8- Initial trajecrory
9- Corridor
10- Encoding
11- Fitness value
12- Selection
13- Crossover
14- Mutation
15- Fitness Function
16- Hattiesburg
17- Leaf
18- Bouie
19- Latin Hypercube Sampling
20- Complementary Cumulative Distribution Function

منابع

علیمحمدی، س.، رفیعی انزاب، ن. و مرادی، م. ۱۳۹۲. طراحی خاکریزهای کنار رودخانه (گوره‌ها) به روش آنالیز ریسک، مجله آب و فاضلاب، ۲۵(۸۹): ۹۵-۱۱۰.

Behrouz M. and Alimohammadi S. 2016. Risk-based design of flood control systems considering multiple dependent uncertainties. Water resources management, 30(13): 4529-4.

Behrouz M. and Alimohammadi S. 2018. Uncertainty analysis of flood control measures including epistemic and aleatory uncertainties: Probability theory and evidence theory. Journal of Hydrologic Engineering, 23(8): 04018033.

Cheng C., Wang S., Chau K. W. and Wu X. 2014. Parallel discrete differential dynamic programming for multireservoir operation. Environmental modelling & software, 57: 152-164.

Chow V.T., Maidment D.R. and Tauxe G.W. 1975. Computer time and memory requirements for DP and DDDP in water resource systems analysis. Water Resources Research , 11(5): 621-628.

Coley D.A. 1999. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers. World Scientific Publishing Company.university of Exeter South West England, United Kingdom.

Corry M.L. and Jones J.S. 1981. Design of Encroachments on Flood Plains Using Risk Analysis, Appendixe A, Risk Analysis Sample Problem-U.S.11 Crossing Leaf River at Hattiesburg, Ms.

Feng Z.K., Niu W.J., Cheng C. T.and Liao S.L. 2017. Hydropower system operation optimization by discrete differential dynamic programming based on orthogonal experiment design. Energy, 126: 720-732.

Florsheim J.L. and Dettinger M.D. 2007. Climate and floods still govern California levee breaks. Geophysical Research Letters, 34(22): L22403, doi:10.1029/2007GL031702, 2007

Goldberg D.E. and Richardson J. 1987. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second Interna-

crete differential dynamic programming for optimization of large-scale hydropower system. Energy Conversion and Management, 84: 363-373.

Mays L.W. and Yen B.C. 1975. Optimal cost design of branched sewer systems. Water Resources Research, 11(1): 37-47.

Rao S.S. 2009. Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons.university of miami Caral gables, Florida.

Shafiei M., Bozorg Haddad O. and Afshar A. 2005. GA in optimizing Ajichai flood levee's encroachment.Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on EVOLUTIONARY COMPUTING, Lisbon, Portugal, June 16-18, 2005: 392-399.

John B. Storm 2012. Flood-Inundation Maps for the Leaf River Hattiesburg , Mississippi , U.S.Geological Survey, Reston, Virginia

Tospornsampan J., Kita I., Ishii M. and Kitamura Y. 2005. Optimization of a multiple reservoir system operation using a combination of genetic algorithm and discrete differential dynamic programming: a case study in Mae Klong system, Thailand. Paddy and Water Environment, 3(1): 29-38.

Tung Y.K. and Mays L.W. 1981. Optimal risk based design of flood levee systems. Water Resources Research, 17(4): 843-852.

U.S.Army Corps of Engineers. 1991. Hydraulic Design of Flood Control Channels.

Wilson K.V. 1966 Flood frequency of streams in Jackson, Mississippi, open file report, 6 pp., U.S. Geol. Surv., Jackson, Miss.

Yakowitz S. 1982. Dynamic programming applications in water resources. Water resources research, 18(4): 673-696.

Zhu T. and Lund J.R. 2009. Up or out? economic-engineering theory of flood levee height and setback. Journal of Water Resources Planning and Management, 135(2): 90-95.

https://www.researchgate.net/

https://pubs.usgs.gov/sim/3228/

tional Conference on Genetic Algorithms (41-49). Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum.

Hall W.A. 1964. Optimum design of a multiple-purpose reservoir, Journal of the Hydraulics Division, 1964,90(4): 141-149

Heidari M., Chow V.T., Kokotović P. V.and Meredith D. D. 1971. Discrete differential dynamic programing approach to water resources systems optimization. Water Resources Research, 7(2): 273-282.

Hillier F.S. and Lieberman G.J. 2012. Introduction to operations research. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics. Published by the Tata McGraw Hill Education Private Limited, 7 West Patel Nagar, New Delhi 110 008, Typeset at The Composers, 260, C.A. Apt., Paschim Vihar, New Delhi 110 063 and printed at India Binding House, A-98, Sector - 65, Noida, U.P.

Hsieh C.D. and Yang W.F. 2007. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan. Journal of environmental management, 85(4): 908-917.

Huang W.C., Yuan L.C. and Lee C.M. 2002. Linking genetic algorithm with stochastic dynamic programming to the long-term operation of a multireservoir system. Water Resources Research, 38(12): 1-40.

Hui R., Jachens E. and Lund J. 2016. Risk-based planning analysis for single levee. Water Resources Research, 52(4): 2513-2528.

Jamshidi M. and Heidari M. 1977. Application of dynamic programming to control Khuzestan water resources system. Automatica, 13(3): 287-293.

Kai W., Deyi C. and Zhaohui Y. 2016. Flood control and management for the transitional Huaihe River in China. Procedia Engineering, 154(2016): 703-709.

Li G. and Matthew R.G. 1990. New approach for optimization of urban drainage systems. Journal of Environmental Engineering, 116(5): 927-944.

Li C., Zhou J., Ouyang S., Ding X. and Chen L. 2014. Improved decomposition–coordination and dis-