

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

موضوع تحقیق

ارزیابی و بهینه سازی طراحی کانال هدایت سیلاب شهر سعادت شهر به
کمک نرم افزار HEC-RAS

دانشجو

محمد کریم هوشیار

استاد راهنما

یونس دانشبد

شماره دانشجویی

۴۰۱۱۶۰۴۰۳۹۲۰۰۳

رشته تحصیلی

عمران

چکیده

مدیریت سیلاب در مناطق کوهستانی با توسعه شهری، چالشی حیاتی در مهندسی هیدرولیک محسوب می‌شود که نیازمند طراحی بهینه کانال‌های هدایت با توازن بین کارایی هیدرولیکی و صرفه اقتصادی است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی کانال هدایت سیلاب سعادت شهر در شهرستان پاسارگاد استان فارس با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS ۶.۶ جهت حداکثرسازی ظرفیت انتقال دبی ۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه (سیل ۱۰۰ ساله) و حداقل‌سازی هزینه اجرایی بود. روش تحقیق مبتنی بر مدل‌سازی تجربی-کاربردی با بهینه‌سازی چندهدفه به کمک الگوریتم Pareto Front در MATLAB R۲۰۲۵a بود که ۱۰ سناریو شامل ترکیب دو شکل مقطع (مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱:۱.۵) و سه نوع پوشش (بتن ۰.۱۳، سنگی ۰.۳۲، طبیعی ۰.۴۵) را آزمون نمود. گردآوری داده‌ها شامل بازدیدهای میدانی با GPS، داده‌های هیدرولوژیکی ایستگاه سرپنیران (۱۳۹۰-۱۴۰۴)، DEM با دقت ۵ متری، و تصاویر Sentinel-۲ بود. تجزیه و تحلیل با شبیه‌سازی جریان دائمی یک‌بعدی در HEC-RAS، محاسبه پارامترهای هیدرولیکی (عدد فرود، تراز سطح آب، تنش برشی)، برآورد هزینه با فهرست بهای ۱۴۰۴ و NPV برای ۲۰ سال، و آزمون‌های آماری ANOVA ($\alpha=0.05$) انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که پلن B-۲ (مقطع دوزنقه‌ای با پوشش سنگی کامل، عرض کف ۴.۵ متر) با عدد فرود ۱.۰۸، هزینه ۱۱۰,۰۰۰ ریال/متر و $NPV=1.3$ میلیارد ریال/کیلومتر، بهینه‌ترین گزینه است؛ مقطع دوزنقه‌ای ظرفیت را ۱۵٪ افزایش و پوشش سنگی هزینه را ۳۵٪ کاهش داد؛ اعتبارسنجی با سیل ۱۴۰۳ دقت $R^2=0.96$ را نشان داد؛ و ANOVA تفاوت معنادار بین سناریوها را تأیید کرد ($p=0.005$).

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی کانال سیلاب، HEC-RAS، مقطع دوزنقه‌ای، ضریب زبری مانینگ، Pareto Front.

فصل اول

کلیات تحقیق

فصل اول : کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

سیلاب‌های شهری یکی از مخاطرات طبیعی هستند که سالانه خسارات جانی و مالی قابل توجهی به جوامع انسانی وارد می‌کنند. رشد سریع شهرنشینی و توسعه بی‌رویه شهری، سطوح نفوذناپذیر را افزایش داده و در نتیجه، حجم و سرعت رواناب‌های سطحی را تشدید کرده است. این امر ضرورت طراحی و احداث سازه‌های هیدرولیکی مناسب برای کنترل و هدایت سیلاب را بیش از پیش آشکار می‌سازد. کانال‌های هدایت سیلاب به عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای ساختاری در مدیریت سیلاب، نقش حیاتی در حفاظت از مناطق مسکونی و زیرساخت‌های شهری ایفا می‌کنند [۱]. طراحی بهینه این کانال‌ها مستلزم بررسی دقیق پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است. شهر سعادت شهر نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص، با چالش‌های مدیریت سیلاب مواجه است. استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند HEC-RAS امکان شبیه‌سازی جریان در کانال‌ها و ارزیابی عملکرد طراحی‌های مختلف را فراهم می‌آورد. این ابزارها به مهندسان کمک می‌کنند تا راهکارهای بهینه‌تری برای کنترل سیلاب ارائه دهند.

۲-۱ بیان مسأله

امروزه مدیریت سیلاب شهری^۱ یکی از مسائل حیاتی در برنامه ریزی و توسعه پایدار شهرها محسوب می شود که با توجه به تغییرات اقلیمی و رشد شهرنشینی، پیچیدگی های فراوانی یافته است. شهر سعادت شهر به عنوان یکی از مناطق شهری در معرض خطر سیلاب، نیازمند ارزیابی جامع سیستم هدایت سیلاب موجود و بهینه سازی آن متناسب با شرایط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی منطقه می باشد. مدل سازی هیدرولیکی^۲ کانال های هدایت سیلاب با استفاده از نرم افزار HEC-RAS امکان تحلیل دقیق رفتار جریان در شرایط مختلف هیدرولوژیکی را فراهم می آورد [۱-۲]. پدیده جریان در کانال های باز^۳ تحت تأثیر متغیرهای متعددی نظیر هندسه مقطع عرضی، زبری بستر و دیواره ها، شیب طولی کانال، دبی جریان و شرایط مرزی بالادست و پایین دست قرار دارد که هر کدام نقش تعیین کننده ای در ظرفیت انتقال سیلاب دارند [۲]. در این پژوهش، ابتدا ظرفیت کانال فعلی بر اساس سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله بررسی می گردد و سپس طرح بهینه با توجه به ظرفیت گذر سیلاب و هزینه ساخت ارائه می گردد. طراحی بهینه کانال شامل انتخاب شکل مقطع، ابعاد مقطع، جنس و پوشش کانال به منظور افزایش ظرفیت کانال در مقابل کاهش هزینه ساخت می باشد. رژیم جریان در کانال که می تواند زیربحرانی، بحرانی یا فوق بحرانی باشد، تعیین کننده نحوه رفتار هیدرولیکی و میزان تلاطم جریان است. پارامترهای هندسی نظیر عرض کف کانال، شیب جانبی دیواره ها، ارتفاع آزاد^۴ و ضریب زبری مانینگ^۵ از متغیرهای اساسی در تحلیل هیدرولیکی محسوب می شوند [۳]. همچنین پدیده های پیچیده ای نظیر پرش هیدرولیکی^۶، جریان های ثانویه، رسوب گذاری و فرسایش در طول مسیر کانال، عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار می دهند. استفاده از روش های عددی پیشرفته در نرم افزار HEC-RAS مبتنی بر حل معادلات سنت و نانت^۷ امکان شبیه سازی جریان غیرماندگار و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف را میسر می سازد [۲-۳]. شکاف های تحقیقاتی موجود در این حوزه شامل عدم قطعیت در پیش بینی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر الگوهای بارش، نیاز به توسعه

^۱ Urban Flood Management

^۲ Hydraulic Modeling

^۳ Open Channel Flow

^۴ Freeboard

^۵ Manning's Roughness Coefficient

^۶ Hydraulic Jump

^۷ Saint-Venant Equations

مدل های ترکیبی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی با دقت بالاتر، بهینه سازی چندهدفه با در نظر گرفتن معیارهای زیست محیطی و اجتماعی، تحلیل برهم کنش سازه های هیدرولیکی با جریان در شرایط سیلابی شدید، توسعه روش های نوین برای کاهش عدم قطعیت در برآورد ضرایب زبری، و در نهایت یکپارچه سازی سیستم های هوشمند پایش و هشدار سیل با مدل های هیدرولیکی می باشد. بنابراین این تحقیق به دنبال آن است تا به " ارزیابی و بهینه سازی طراحی کانال هدایت سیلاب شهر سعادت شهر به کمک نرم افزار HEC-RAS" بپردازد.

۳-۱ موقعیت طرح

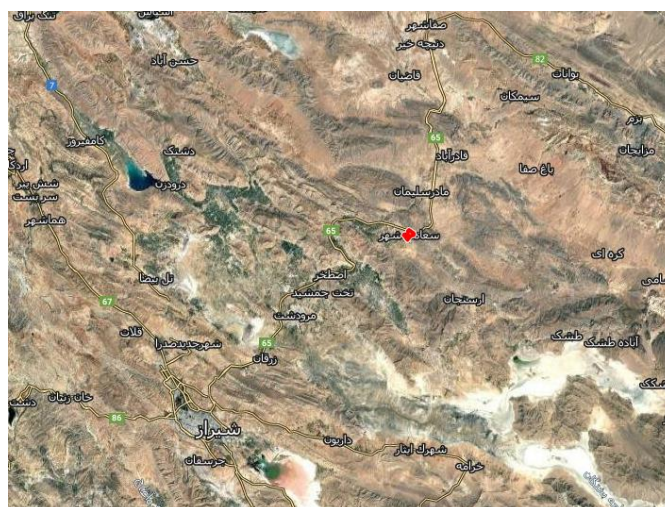
سعادت شهر، مرکز شهرستان پاسارگاد در استان فارس، در ۱۰۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز واقع شده است. این شهر با مختصات جغرافیایی تقریبی ۳۰ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۵۳ درجه و ۰۷ دقیقه شرقی، در دشت های هموار زاگرس مرکزی قرار دارد و از شمال به شهرستان های بوانات و اقلید، از شرق به خرم بید، از جنوب به مرودشت و از غرب به ارسنجان محدود می شود. مساحت شهرستان پاسارگاد حدود ۱۷۵۴ کیلومتر مربع است و سعادت شهر به عنوان قطب کشاورزی منطقه، در ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا، تحت تأثیر اقلیم نیمه خشک مدیترانه ای با بارش های فصلی زمستانی قرار دارد.

طرح کانال هدایت سیلاب سعادت شهر، بخشی از سیستم مدیریت آبخیزداری حوضه رودخانه فصلی سرپنیران است. این رودخانه از ارتفاعات زاگرس (کوه های بختیاری) سرچشمه می گیرد و با مساحت حوضه حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع، از شمال شرق سعادت شهر (دهستان سرپنیران) عبور کرده و وارد تنگ سعادت شهر می شود. کانال اصلی، که به طول تقریبی ۱-۲ کیلومتر از نوع سنگی و مستطیلی (عرض ۲-۳ متر) است، در محل تنگ سعادت شهر و روستای گمبکان (۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر) احداث شده و سیلاب را از حاشیه های شرقی شهر به سمت دشت های پایین دست (سوی سد سیوند) هدایت می کند. این کانال با سد تأخیری سرپنیران (بهره برداری ۱۳۹۱، ارتفاع ۱۸.۵ متر، طول تاج ۷۶۰ متر) ادغام شده که در ۱۰ کیلومتری شمال شهر قرار دارد و حجم ۹ میلیون مترمکعب آب را مهار می نماید.

موقعیت استراتژیک طرح، نزدیکی به مجموعه باستانی پاسارگاد (۱۵ کیلومتری جنوب) و مقبره کوروش را برجسته می کند. سیستم های هخامنشی، مانند کانال های انتقال آب به طول ۲۷۰۰ متر و سدهای انحرافی در دشت محرغاب (۱۵ کیلومتری شمال شرق)، الگویی تاریخی برای این طرح فراهم آورده اند. این کانال

ها، که از سدهای سنگی به هم متصل بودند، سیلاب را به اراضی کشاورزی هدایت می کردند و نشان دهنده دانش بومی در مدیریت منابع آب هستند.

از نظر ریسک، موقعیت در پهنه سیلابی ۲۵ ساله (۳۰٪ مساحت شهر) و شیب ۵-۱۰٪ حوضه، فرسایش خاک و رسوب گذاری را تشدید می کند. دسترسی جاده ای از شیراز-اصفهان (جاده اصلی) و راه های فرعی به روستای گمبکان، اجرای طرح را تسهیل کرده است. در مجموع، این موقعیت، سعادت شهر را به پلی بین میراث تاریخی و چالش های مدرن اقلیمی تبدیل کرده، جایی که هدایت سیلاب نه تنها حفاظت از ۲۰۰ هکتار اراضی کشاورزی، بلکه حفظ بناهای جهانی یونسکو را تضمین می نماید.





شکل ۱-۱ نقشه ماهواره ای (گوگل) منطقه مورد مطالعه

۴-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق

افزایش فراوانی وقوع سیلاب های شهری در سال های اخیر و خسارات جانی و مالی ناشی از آن، لزوم توجه ویژه به سیستم های هدایت سیلاب را دوچندان کرده است. شهر سعادت شهر با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی خاص، در معرض خطر جدی سیلاب قرار دارد. کانال های موجود که بر اساس معیارهای قدیمی طراحی شده اند، توانایی مقابله با حجم سیلاب های امروزی را ندارند. چالش اصلی، تعادل میان افزایش ظرفیت هیدرولیکی کانال و محدودیت های اقتصادی و فضایی موجود در بافت شهری است. عدم بهینه سازی این سیستم می تواند منجر به سرریز سیلاب، آبرگرفتگی معابر، اختلال در حمل و نقل شهری

و تهدید سلامت شهروندان گردد. بنابراین ارزیابی دقیق وضعیت فعلی و ارائه راهکارهای بهینه، ضرورتی اجتناب ناپذیر برای حفاظت از جان و مال شهروندان است.

۵-۱ اهداف تحقیق

اهداف علمی: کاربرد نرم افزار HEC-RAS در طراحی، مقایسه ظرفیت مقاطع مختلف کانال در انتقال سیلاب

اهداف کاربردی: یافتن مقطع بهینه کانال جهت بیشینه کردن ظرفیت و کمینه کردن هزینه اجرا

ضرورت های خاص انجام تحقیق: با توجه به اهمیت منطقه، طراحی کانالی که بتواند به بهترین نحو سیلاب را انتقال دهد ضروری است. همچنین با توجه به محدود بودن منابع مالی، نیاز است که طراحی و ساخت کانال با کمترین هزینه ممکن انجام گیرد.

۶-۱ فرضیات تحقیق

شکل مقطع کانال بر روی ظرفیت کانال و هزینه اجرای آن تأثیر دارد.

جنس پوشش کانال بر روی ظرفیت کانال و هزینه اجرای آن تأثیر دارد.

۷-۱ مبانی نظری

مدیریت سیلاب شهری و طراحی کانال های هدایت، حوزه ای میان رشته ای است که از تلفیق علوم هیدرولوژی، هیدرولیک و مهندسی بهینه سازی شکل گرفته است. سیستم های هدایت سیلاب شامل مجموعه ای یکپارچه از کانال ها، سازه های کنترلی (سدهای تأخیری، دریچه ها، سرریزها) و تجهیزات تکمیلی هستند که برای جمع آوری، انتقال و دفع ایمن رواناب های سطحی طراحی می شوند. درک صحیح مبانی هیدرولوژی شهری شامل دوره بازگشت، منحنی های شدت-مدت-فراوانی و روش های برآورد دبی اوج، پایه طراحی این سیستم ها را تشکیل می دهد [۱-۳]. تحلیل هیدرولیکی جریان در کانال های باز با

استفاده از معادلات بنیادین مانند معادله مانینگ، شناخت رژیم های جریان (یکنواخت، متغیر تدریجی و سریع) و درک پدیده های ویژه مانند پرش هیدرولیکی و عمق بحرانی، امکان طراحی ایمن و کارآمد را فراهم می آورد. رویکرد مدرن طراحی، فراتر از کفایت هیدرولیکی صرف، از روش های بهینه سازی چندمعیاره برای ایجاد تعادل بین اهداف فنی، اقتصادی و زیست محیطی استفاده می کند. در نهایت، مدیریت عدم قطعیت ها و ریسک های ناشی از تغییرات اقلیمی، محدودیت داده ها و پیچیدگی های سیستم، از طریق روش های احتمالاتی و طراحی انعطاف پذیر، تضمین کننده پایداری و کارایی بلندمدت این زیرساخت های حیاتی شهری است [۴].

• مدیریت سیلاب شهری و سیستم های هدایت

مدیریت سیلاب شهری یکی از چالش های اساسی برنامه ریزی و توسعه پایدار شهری است که هدف آن کاهش خسارات ناشی از رواناب های سطحی و حفاظت از جان و مال شهروندان می باشد. با افزایش سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری، میزان نفوذ آب به خاک کاهش یافته و حجم رواناب سطحی افزایش می یابد. سیستم های هدایت سیلاب شامل مجموعه ای از سازه های مهندسی است که برای جمع آوری، انتقال و دفع ایمن آب های سطحی طراحی می شوند. این سیستم ها شامل کانال های روباز و بسته، دریچه ها، سرریزها، حوضچه های رسوب گیر، استخرهای ذخیره و سازه های کنترلی می باشند [۳-۴]. رویکردهای نوین در این حوزه به سمت مدیریت پایدار رواناب شهری (SUDS) و زیرساخت های سبز حرکت کرده که ترکیبی از راهکارهای ساختاری و غیرساختاری را در بر می گیرد. انتخاب و طراحی مناسب این سیستم ها نیازمند درک عمیق از هیدرولوژی شهری، اصول هیدرولیک و ملاحظات اقتصادی-زیست محیطی است.

• تاریخچه و تکامل رویکردهای کنترل سیلاب در نواحی شهری

تاریخچه کنترل سیلاب در مناطق شهری سیر تکاملی قابل توجهی را طی کرده است که می توان آن را به چهار دوره اصلی تقسیم کرد:

۱. دوره اولیه (تمدن های باستانی تا قرن ۱۹)

اولین تلاش های بشر برای مدیریت آب های سطحی به تمدن های باستانی بازمی گردد. رومیان با ساخت کانال های سنگی و کلوآکا ماکسیم^۸ در سال ۶۰۰ قبل از میلاد، نخستین سیستم جامع زهکشی شهری را

^۸ Cloaca Maxima

ایجاد کردند. در این دوره، رویکرد عمدتاً به دفع سریع آب های سطحی محدود بود بدون توجه به پیامدهای پایین دست [۲-۴].

۲. دوره انقلاب صنعتی (قرن ۱۹ تا اوایل قرن ۲۰)

با رشد سریع شهرنشینی و افزایش آلودگی های شهری، نیاز به سیستم های منظم زهکشی احساس شد. در این دوره، مهندس انگلیسی جوزف بازالجت^۹ سیستم جامع فاضلاب لندن را طراحی کرد که الگوی بسیاری از شهرهای دنیا شد. رویکرد غالب "دفع سریع"^{۱۰} بود که هدف آن انتقال هرچه سریع تر آب از محدوده شهری بود [۳-۴].

۳. دوره مدرن (اواسط قرن ۲۰ تا دهه ۱۹۸۰)

در این دوره، با پیشرفت علم هیدرولوژی و توسعه روش های کمی، طراحی سیستم های زهکشی علمی تر شد. مفاهیمی چون دوره بازگشت، منحنی های IDF و روش های محاسبه دبی اوج توسعه یافتند. اما همچنان رویکرد اصلی، کنترل ساختاری از طریق کانال سازی و لوله گذاری بود [۵].

۴. دوره پایداری (دهه ۱۹۹۰ تا کنون)

با آگاهی از محدودیت های رویکردهای سنتی و اثرات زیست محیطی آنها، پارادایم جدیدی شکل گرفت. مفهوم "بهترین شیوه های مدیریتی (BMPs)" و سپس "مدیریت پایدار رواناب شهری (SUDS)" معرفی شد. این رویکرد شامل:

- کنترل در منبع: استفاده از سطوح نفوذپذیر و باغ های باران
- کاهش رواناب: از طریق سبزینگی و احیای مسیرهای طبیعی آب
- کنترل کیفیت: استفاده از تالاب های مصنوعی و سیستم های بیوفیلتراسیون
- ذخیره موقت: حوضچه های نفوذ و استخرهای بازداستی

^۹ Joseph Bazalgette

^{۱۰} Rapid Disposal

رویکرد معاصر، یکپارچگی بین مدیریت کمیت و کیفیت آب، حفظ چرخه هیدرولوژیک طبیعی و ایجاد ارزش های چندگانه (تفریحی، زیبایی شناختی و زیست محیطی) را هدف قرار می دهد. شهرهای "اسفنجی" در چین و مفهوم "شهر حساس به آب" در استرالیا نمونه هایی از این تحول پارادایمی هستند [۳-۴-۵].

امروزه با تغییرات اقلیمی و افزایش رخداد بارش های شدید، لزوم طراحی تطبیقی و انعطاف پذیر سیستم های مدیریت سیلاب بیش از پیش احساس می شود.

• کانال های هدایت سیلاب: طبقه بندی، اصول طراحی و انواع مقاطع

کانال های هدایت سیلاب سازه های هیدرولیکی هستند که برای انتقال ایمن و کنترل شده رواناب های سطحی طراحی می شوند.

طبقه بندی کانال ها

بر اساس شکل هندسی:

- کانال های روباز: دارای سطح آزاد آب
- کانال های بسته: تحت فشار یا جریان آزاد در لوله

بر اساس مصالح:

- خاکی: اقتصادی اما نیازمند نگهداری بیشتر
- بتنی: مقاوم و با ضریب زبری پایین
- سنگ چین: مناسب برای شیب های تند
- کامپوزیتی: ترکیب مصالح مختلف

بر اساس عملکرد:

- کانال های جمع آوری: در سطح محلات
- کانال های انتقال: برای حجم های بزرگ

• کانال های تخلیه: برای دفع نهایی

• سازه های کنترلی و تکمیلی در سیستم های هدایت

سیستم های هدایت سیلاب شهری نظیر یک ارگانیسم زنده عمل می کنند که در آن کانال های اصلی نقش رگ های خونی را ایفا کرده و سازه های کنترلی و تکمیلی همچون دریچه های قلبی، عملکرد کلی سیستم را تنظیم و بهینه می سازند. بدون این سازه ها، حتی طراحی هیدرولیکی دقیق کانال ها نیز نمی تواند کارایی لازم را در مواجهه با تغییرات دبی، کنترل کیفیت و حفاظت از زیرساخت ها ارائه دهد [۹].

در رأس این مجموعه، سدهای تأخیری و حوضچه های بازداستی قرار دارند که فلسفه اصلی آنها تغییر الگوی زمانی سیلاب است. این سازه ها با ایجاد فضای ذخیره سازی موقت، حجم اضافی رواناب را در زمان اوج بارش جذب کرده و سپس طی ۲۴ تا ۷۲ ساعت به تدریج تخلیه می کنند. این فرآیند نه تنها دبی اوج را ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش می دهد، بلکه با صاف کردن هیدروگراف سیلاب، امکان استفاده از کانال ها و لوله های کوچک تر و اقتصادی تر را فراهم می آورد [۹-۱۰]. حوضچه های خشک که پس از هر رخداد کاملاً تخلیه می شوند، در روزهای عادی به عنوان پارک یا زمین ورزشی مورد استفاده قرار می گیرند، در حالی که حوضچه های مرطوب با حفظ دائمی آب، نقش دوگانه کنترل سیلاب و تصفیه کیفی را ایفا می کنند. طراحی این حوضچه ها مستلزم تحلیل دقیق هیدرولوژیکی است که در آن حجم ذخیره از انتگرال تفاضل دبی ورودی و خروجی محاسبه می شود، و شیب جانبی آنها معمولاً ۱:۳ یا ملایم تر در نظر گرفته می شود تا هم پایداری ژئوتکنیکی حفظ شود و هم ایمنی عمومی تضمین گردد [۱۰].



شکل ۱-۲ نمونه یک سد تأخیری

اما صرف وجود یک حوضچه بدون ابزار کنترل دقیق خروجی، بی معنا است. اینجاست که سرریزها و دریچه ها وارد عمل می شوند. سرریزها که در واقع دیواره هایی با ارتفاع مشخص در مسیر جریان هستند، امکان کنترل دقیق سطح آب و تقسیم جریان را فراهم می آورند. سرریز لبه تیز مستطیلی با معادله $Q = 1.84 L \times H^{1.5}$ برای اندازه گیری و کنترل جریان های متوسط مناسب است، در حالی که سرریز مثلثی با

رابطه $Q = 1.4 \times \tan(\theta/2) \times H^{2.5}$ برای دبی های کم دقت بیشتری دارد. در سدهای تأخیری بزرگ، سرریزهای اوجی با پروفیل هیدرودینامیکی طراحی می شوند که با تطابق کامل با خط جریان آزاد، خطر کاویتاسیون را به حداقل می رسانند. نوع خاصی از سرریزها که در دیواره جانبی کانال ها نصب می شوند، سرریزهای جانبی نام دارند و در سیستم های فاضلاب ترکیبی برای انحراف جریان اضافی به تاسیسات تصفیه یا کانال های فرعی استفاده می شوند. [۸-۹-۱۰]

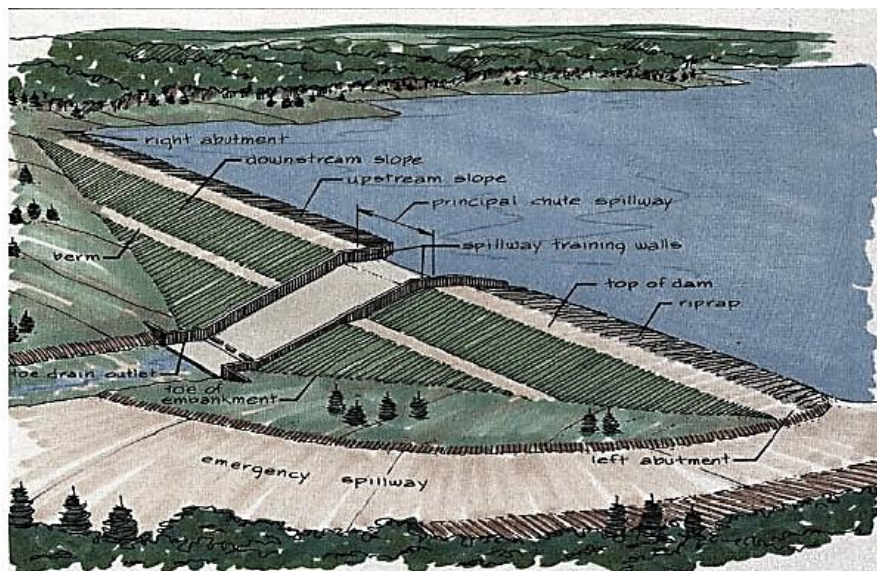
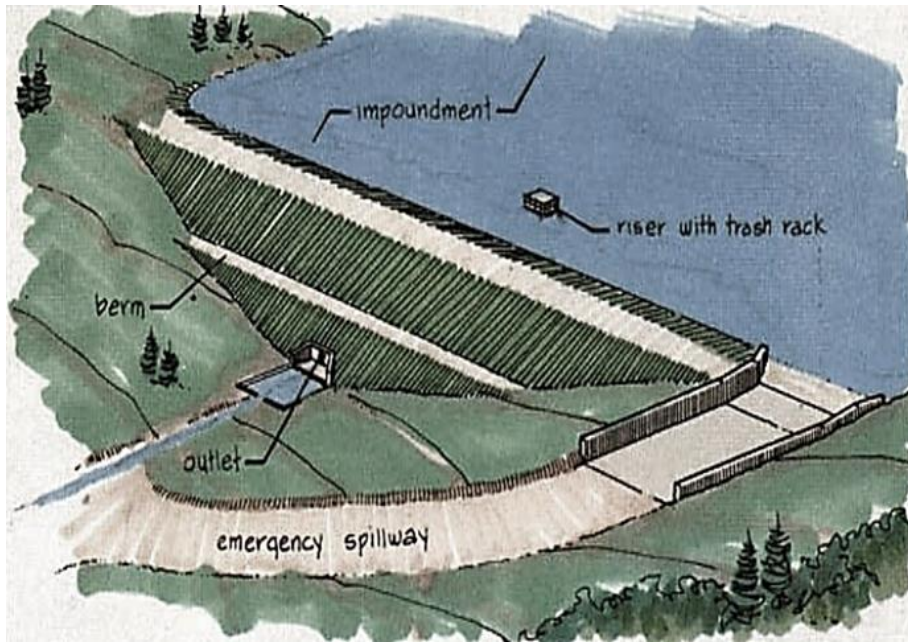
در کنار سرریزها، دریچه ها انعطاف پذیری بیشتری ارائه می دهند. دریچه کشویی با صفحه فلزی متحرک، امکان تنظیم دقیق ارتفاع بازشدگی و در نتیجه کنترل دبی با معادله $Q = Cd \times A \times v(2gH)$ را فراهم می کند که در آن ضریب دبی معمولاً بین ۰.۶ تا ۰.۸ متغیر است. اما یکی از حیاتی ترین انواع، دریچه برگشتی است که در محل تخلیه شبکه شهری به رودخانه ها نصب می شود. این دریچه با فشار جریان خروجی باز شده و هنگام افزایش سطح آب رودخانه، به صورت خودکار بسته می شود و از نفوذ آب رودخانه به شبکه شهری جلوگیری می کند، در غیر این صورت می تواند منجر به سیلاب معکوس در مناطق مسکونی شود [۱۱]. حال که جریان کنترل شده وارد شبکه اصلی می شود، نیاز به سازه های خدماتی احساس می شود. منهول ها که به فاصله هر ۸۰ تا ۱۲۰ متر، در محل تغییر جهت و اتصال شاخه ها نصب می شوند، دسترسی برای بازرسی و تمیزکاری را میسر می سازند. قبل از ورود به بخش های حساس سیستم، حوضچه های رسوب گیر با کاهش سرعت جریان به کمتر از ۰.۳ متر بر ثانیه، امکان ته نشینی ذرات معلق را فراهم کرده و از انسداد لوله ها و سایش تجهیزات پمپاژ جلوگیری می کنند. در نقاطی که تغییر ناگهانی شیب رخ می دهد، سازه های استهلاک انرژی از جمله حوضچه های آرامش و شیب شکن ها، با ایجاد پرش هیدرولیکی یا افت تدریجی انرژی، از فرسایش کف و دیواره های کانال محافظت می کنند [۱۲].

• انواع سرریزها در سازه های هیدرولیکی

سرریزها سازه های کنترلی حیاتی در سدها و سیستم های آبی هستند که وظیفه عبور ایمن جریان اضافی، تنظیم سطح آب و استهلاک انرژی را بر عهده دارند. انتخاب نوع سرریز به توپوگرافی، هیدرولوژی و ملاحظات اقتصادی بستگی دارد.

سرریز اصلی و سرریز جانبی

سازه کنترل اصلی در سدها که در بدنه یا تکیه گاه قرار می گیرد. وظیفه عبور سیلاب طراحی و حفاظت از سد در برابر سرریز غیرکنترل شده را دارد. در دیواره جانبی کانال یا مخزن نصب می شود. جریان اضافی را به کانال فرعی منحرف کرده و در سیستم های فاضلاب ترکیبی کاربرد فراوان دارد [۱۱-۱۲].



شکل ۱-۳ سرریز اصلی و سرریز جانبی

سرریز ریزشی

آب را به صورت جت آزاد قائم به پایین دست می ریزد. انرژی جنبشی در برخورد با حوضچه آرامش مستهلک شده و برای سدهای قوسی مناسب است.



شکل ۴-۱ سرریز ریزشی

سرریز اوجی

دارای پروفیل منحنی منطبق بر شکل طبیعی جریان است. حداکثر ظرفیت تخلیه با حداقل خطر کاویتاسیون را داشته و پرکاربردترین نوع در سدهای بزرگ است.



شکل ۵-۱ سرریز اوجی

سرریز شوت

کانال شیب دار طویل با پوشش بتنی که آب را با سرعت بالا هدایت می کند. در انتها نیاز به سازه استهلاک انرژی دارد و برای توپوگرافی کوهستانی مناسب است.



شکل ۱-۶ سرریز شوت

سرریز نیلوفری

دارای ورودی قیفی شکل و تونل تخلیه افقی یا مایل است. برای مخازنی با محدودیت فضای کناری مناسب بوده و عملکرد هیدرولیکی پیچیده ای دارد.



شکل ۱-۷ سرریز نیلوفری

سرریز آبرو (خروجی تحتانی)

دریچه دار در تراز پایین سد برای تخلیه کنترل شده مخزن، رسوب شویی و تأمین آب پایین دست. معمولاً با شیرهای کنترل و سیستم اضطراری مجهز است.



شکل ۸-۱ سرریز آبرو (خروجی تحتانی)

سرریز پلکانی

متشکل از پله های متوالی که اغتشاش ایجاد کرده و انرژی را تدریجاً مستهلک می کند. هزینه حوضچه آرامش را کاهش داده و برای سدهای خاکی-سنگی مناسب است.



شکل ۹-۱ سرریز پلکانی

۸-۱ چارچوب تحقیق

این تحقیق با عنوان "ارزیابی و بهینه سازی طراحی کانال هدایت سیلاب شهر سعادت شهر به کمک نرم افزار "HEC-RAS در پنج فصل تنظیم شده است.

فصل اول به کلیات تحقیق اختصاص دارد و شامل معرفی موضوع، بیان مسأله، موقعیت جغرافیایی طرح، اهمیت و ضرورت انجام تحقیق، اهداف و فرضیات تحقیق می باشد. همچنین در این فصل، مفاهیم بنیادین و کلیات مدیریت سیلاب شهری و سیستم های هدایت به صورت مختصر ارائه شده است

فصل دوم به مرور پیشینه تحقیقات مرتبط با موضوع پرداخته و مطالعات انجام شده در زمینه طراحی و بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب و تجربیات داخلی و خارجی را مورد بررسی قرار داده است

فصل سوم به تشریح روش شناسی تحقیق اختصاص دارد و شامل معرفی نرم افزار RAS-HEC ، مبانی هیدرولیکی جریان در کانال های باز، معادلات حاکم، روش های حل عددی، مراحل مدل سازی، نحوه جمع آوری داده ها و روش های بهینه سازی طراحی می باشد.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

فصل دوم : پیشینه تحقیق

۱-۲ مقدمه

مدیریت سیلاب به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، اهمیت ویژه‌ای دارد. با افزایش تغییرات اقلیمی، شهرنشینی سریع و تصرف حریم رودخانه‌ها، نیاز به ابزارهای دقیق مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای ارزیابی ریسک، پهنه‌بندی سیلاب و بهینه‌سازی سازه‌های هدایت مانند کانال‌های انحراف سیلاب بیش از پیش احساس می‌شود. نرم‌افزارهای HEC-RAS، HEC-HMS و ادغام آن‌ها با GIS و مدل‌های یادگیری ماشین، امکان شبیه‌سازی دقیق جریان‌های یک‌بعدی و دوبعدی، محاسبه دبی پیک، عمق و سرعت سیل، و ارزیابی خسارات اقتصادی-زیست‌محیطی را فراهم کرده‌اند [۳۶].

در این فصل، پیشینه تحقیقات داخلی و خارجی مرتبط با ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی کانال‌های هدایت سیلاب در سعادت‌شهر بررسی می‌شود. مطالعات داخلی بر حوضه‌های متنوعی مانند زاینده‌رود، گرگانرود و کشکان تمرکز دارند و از مدل‌های HEC-RAS برای پهنه‌بندی، کاهش دبی اوج تا ۳۵٪ و مدیریت رسوب استفاده می‌کنند. تحقیقات خارجی نیز رویکردهای نوینی مانند «باران روی شبکه»، کوپلینگ SWMM-NSE و بهینه‌سازی تصادفی را برای حوزه‌های شهری و ساحلی پیشنهاد می‌دهند که دقت NSE بالای ۰.۶۷ و کاهش ریسک تا ۳۰٪ را نشان می‌دهند. این پیشینه، پایه‌ای برای شناسایی خلأها و تطبیق روش‌ها با شرایط محلی سعادت‌شهر فراهم می‌کند تا طراحی resilient و پایدار کانال‌ها محقق شود.

۲-۲ پیشینه تحقیق

۱-۲-۲ پیشینه تحقیقات داخلی

ملک پور و همکاران (۱۴۰۴) در تحقیقی تحت عنوان "توسعه و بهینه سازی هندسه کانال رودخانه زاینده رود با استفاده از مدل سازی هیدرولیکی و الگوریتم بهینه سازی پرنده منشی" بیان داشتند که این مقاله به بررسی هندسه مقطع رودخانه زاینده رود در استان اصفهان می پردازد و از نرم افزار HEC-RAS برای استخراج پارامترهای هندسی مقاطع عرضی و شرایط هیدرولیکی جریان استفاده کرده است. روش اصلی شامل اعمال الگوریتم بهینه سازی پرنده منشی (SBOA) برای دستیابی به هندسه بهینه است که هدف آن حداکثرسازی حجم لایروبی همزمان با حفظ پایداری هیدرولیکی می باشد. شاخص مقطع بهینه (OCI) برای ارزیابی انحراف مقاطع از حالت بهینه به کار گرفته شد. یافته های کلیدی نشان می دهد که پس از بهینه سازی، مساحت مقاطع عرضی افزایش یافته و انحراف از هندسه بهینه در مقاطع پایین دست بیشتر است، با تغییرات OCI بین ۱٪ تا ۵۳٪ که از بالادست به پایین دست افزایش می یابد و نیاز به اصلاح بیشتر در پایین دست را نشان می دهد. نتیجه گیری تأکید دارد که این رویکرد عملکرد مؤثری داشته و ظرفیت آبگذری رودخانه را تا ۸۹٪/۲۸ افزایش داده است، که به مدیریت سیلاب و کاهش تلفات کمک می کند. این الگوریتم برای بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب در سعادت شهر، با ادغام-HEC RAS، ایده آل است [۳۷].

میرزایی و همکاران (۱۴۰۴) در تحقیقی تحت عنوان "هزینه های مستقیم - ملموس در پهنه های سیلابی شبیه سازی شده با مدل هیدرولیکی دو بعدی - HEC-RAS رودخانه ارازکوسه استان گلستان" بیان داشتند که این پژوهش عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS را در شبیه سازی پهنه سیل رودخانه ارازکوسه برای رخداد ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ ارزیابی کرده و خسارت های مستقیم-ملموس را در دوره های بازگشت مختلف برآورد می کند. روش ها شامل استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با رزولوشن ۱ متر، ضریب زبری مانینگ واسنجی شده بر اساس مشاهدات میدانی، و روش موج انتشار دوبعدی برای محاسبات هیدرولیکی است. هیدروگراف های ورودی از مدل HEC-HMS با بارش های طرح (محاسبه شده توسط روش پیلگریم و کوکریچینگ) تولید شد. ارزیابی مدل با تصاویر سنتینل-۲ و شاخص F (۷۹٪ و ۷۱٪) نشان دهنده عملکرد قابل قبول است، هرچند با بیش تخمینی پهنه سیل به دلیل دقت DEM و ضریب زبری. یافته ها حاکی از آن است که در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، کاربری های زراعی (۲۲.۸۳ هکتار، خسارت ۲۰۸۸۹ میلیون ریال)، مسکونی (۰.۷۳ هکتار، ۸۶۵۰ میلیون ریال)، باغ (۰.۲۵ هکتار، ۷۵۰۳ میلیون ریال)، جاده خاکی (۰.۱۵ هکتار، ۲۲۵۰ میلیون ریال) و آسفالت (۰.۰۷ هکتار، ۱۷۵۰ میلیون ریال)

بیشترین غرقابی و خسارت را دارند. نتیجه گیری تأکید دارد بر اهمیت DEM با رزولوشن بالا و مدیریت حاشیه رودخانه برای کاهش ریسک، با توجه به گسترش مسکونی و خسارت های سنگین در اراضی زراعی (مجموع خسارت ۴۱۰۴۲ میلیون ریال برای ۲۳ هکتار). این رویکرد در مدیریت سیلاب با مدل-HEC RAS مؤثر است و برای ارزیابی اقتصادی در سعادت شهر مفید خواهد بود [۳۲].

پوریزدان و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیقی تحت عنوان "مدل سازی و پهنه بندی دوبعدی سیلاب شهری در حوضه شهری شهرستان سیریک با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی-HEC-RAS D2" بیان داشتند که این مقاله به بررسی سیلاب شهری در حوضه شهرستان سیریک استان هرمزگان با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS می پردازد. روش ها شامل شبیه سازی سناریوهای سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری و لایه های اطلاعاتی مانند کاربری اراضی و پهنه سیل است. یافته های کلیدی نشان دهنده پهنه بندی عمق و سرعت سیلاب، تعیین مناطق زیر آب رفته و کاربری های آسیب پذیر با همپوشانی نقشه های هوایی و ماهواره ای است. مدل HEC-RAS-2D با دقت بالا، جریان های پیچیده شهری را شبیه سازی کرده و مناطق بحرانی را شناسایی می کند، که شامل خیابان ها، ساختمان ها و پارکینگ های سیل گیر است. نتیجه گیری بر ضرورت این مدل برای مدیریت سیلاب، تعیین حریم و بستر زیرشاخه های اصلی ورودی به شهرستان تأکید دارد و آن را ابزاری حیاتی برای برنامه ریزی شهری و کاهش اثرات سیل می داند. این رویکرد می تواند برای پهنه بندی دوبعدی در سعادت شهر، با تمرکز بر جریان های شهری، اعمال شود و به طراحی کانال های ایمن کمک کند، به ویژه در شرایط بارش های شدید جنوب ایران [۲۸].

روح الهی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی تحت عنوان "پهنه بندی سیلاب و شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه با استفاده از نرم افزار HEC-RAS" بیان داشتند که این مقاله پژوهشی بر پهنه بندی سیلاب و شبیه سازی رفتار هیدرولیکی زیرحوضه دثفه در حوزه آبخیز استان رفسنجان تمرکز دارد. روش ها شامل استفاده از نرم افزارهای Google Earth و GIS برای تهیه مدل رقومی ارتفاع (DEM) و آماده سازی داده های ورودی برای مدل HEC-RAS است. محدوده مطالعه با مساحت ۷۴۶.۶ کیلومتر مربع، ارتفاع بین ۱۴۵۰ تا ۴۴۹۹ متر و مختصات جغرافیایی مشخص، مورد بررسی قرار گرفته تا پهنه بندی سیلاب برای دوره بازگشت ۲۵ ساله و شبیه سازی هیدرولیکی رودخانه انجام شود. یافته های کلیدی نشان می دهد دبی سیلاب ۶۸.۱ مترمکعب در ثانیه و حجم آن ۱۱۵۰.۶ هزار مترمکعب است، با تمرکز بر مناطق سیل گیر پایین دست. نتیجه گیری بر شناسایی مناطق سیل گیر در حوزه های آبخیز برای کنترل و کاهش اثرات مخرب سیل تأکید دارد، که با استفاده از HEC-RAS به عنوان ابزاری اساسی برای مدیریت سیلاب و بررسی سناریوهای مدیریتی محقق می شود. این رویکرد پتانسیل مخاطرات سیلابی را نمایش می دهد

و راهکارهایی برای کاهش خسارات ارائه می کند، که برای بهینه سازی کانال های سعادت شهر در حوضه های خشک مشابه، کاربردی است [۲۷].

یزدی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی تحت عنوان "جانمایی مخازن تعدیل سیلاب و طراحی سیستم انحراف رودخانه به منظور ایمنی سازی سیلاب دشت، مطالعه موردی: رودخانه گرگانرود" بیان داشتند که این پژوهش با هدف کنترل سیلاب در رودخانه گرگانرود از پایین دست سد گلستان تا دریای خزر، از مدل های هیدرولیکی ۲D-Flo، HEC-RAS و SWMM برای شبیه سازی جریان سیلاب یک بعدی و دوبعدی استفاده کرده است. روش شامل جانمایی مخازن موقت سیلاب با در نظر گرفتن گودال های طبیعی زمین، طراحی بندهای انحرافی بر اساس معیارهای سازه ای (پایداری در برابر لغزش، واژگونگی و زیرشویی) و هیدرولیکی (ضرایب مانینگ ۰۵/۰ برای سیلاب دشت و ۰۳۵/۰ برای کانال ها) بوده است. سه مخزن با ارتفاع ۶ متر و حجم های متفاوت (تا ۲۹۲ میلیون مترمکعب) در بالادست آق قلا و گمیشان انتخاب شد. شبیه سازی برای چهار سیل بزرگ (۱۳۸۴، ۱۳۸۶، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۸) نشان داد که استفاده از یک سیستم انحراف، دبی اوج ورودی به آق قلا را به طور متوسط ۴۵/۷ درصد کاهش می دهد، در حالی که دو سیستم آن را به ۱۶/۳۵ درصد می رساند. برای گمیشان، سه سیستم انحراف دبی اوج را ۱۵/۲۲ درصد کم کرد. نتیجه گیری بر کارایی سیستم های انحرافی در کاهش خسارات سیل تأکید دارد، با پیشنهاد بررسی بهره برداری بهینه در مطالعات آینده. این روش ها می تواند برای طراحی کانال های انحرافی در سعادت شهر، با ادغام HEC-RAS، الگویی عملی ارائه دهد [۲۴].

یوسفی و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی تحت عنوان "تعیین پتانسیل سیل با استفاده از مدل های یادگیری ماشین CART، GLM و GAM (مطالعه موردی: حوضه کشکان)" بیان داشتند که این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی مدل های یادگیری ماشین CART، GLM و GAM در شناسایی مناطق حساس به سیل در حوضه کشکان (استان لرستان) انجام شد. روش ها شامل تهیه نقشه های عوامل مؤثر (ارتفاع، جهت شیب، انحنای زمین، درصد شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، خاک، سنگ شناسی، کاربری اراضی و شاخص رطوبت توپوگرافی) در ArcGIS ۱۰،۵، جمع آوری ۱۲۳ نقطه سیل و تقسیم آن ها به داده های آموزشی (۸۶ مورد) و اعتبارسنجی (۳۷ مورد)، و مدل سازی با نرم افزار R بود. یافته ها نشان داد مدل CART با $AUC=0.91$ و $TSS=0.88$ دقیق ترین مدل است و $AUC=0.87$ GAM، $AUC=0.84$ و $TSS=0.83$ GLM (و $AUC=0.80$ و $TSS=0.80$) (پس از آن قرار دارند. نقشه های پیش بینی نشان می دهند حدود ۲۰ درصد حوضه (عمدتاً مناطق غربی و مرکزی مانند کوه دشت، خرم آباد و پلدختر) در پتانسیل خطر متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد که با سیل بزرگ ۱۳۹۸ هم خوانی دارد. عوامل کلیدی شامل فاصله از رودخانه، ارتفاع و شیب هستند. نتیجه گیری تأکید دارد که مدل CART برای مدیریت سیلاب

و کاهش مخاطرات در این حوضه سیل خیز مفید است و می تواند در برنامه ریزی اولویت بندی مناطق بحرانی کمک کند، بدون اشاره مستقیم به HEC-RAS اما هم راستا با مطالعات هیدرولیکی مشابه در منطقه. این رویکرد تلفیقی یادگیری ماشین و GIS می تواند الگویی برای بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب در مناطق مشابه مانند سعادت شهر باشد، جایی که پیش بینی دقیق پتانسیل سیل برای طراحی resilient ضروری است [۳۶].

صیاد و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی تحت عنوان "تهیه و تحلیل نقشه خطر سیلاب با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC RAS و RAS MAPPER (مطالعه موردی: رودخانه سوک چم کاشان)" بیان داشتند که این پژوهش با هدف تهیه نقشه خطر سیلاب برای دو روستای خنچه و بارونق در امتداد رودخانه سوک چم انجام شد. روش ها شامل ساخت نقشه توپوگرافی با Google Earth و Global Mapper، ایجاد سطح مطالعاتی در ۳D AutoCAD Civil، ساخت مقاطع عرضی، پروفیل طولی و کانال رودخانه، و انتقال داده ها به HEC-RAS برای شبیه سازی سیلاب در دوره های بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله بود. دبی لحظه ای حداکثر با روش فیل-استینر و توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ برای فراوانی سیلاب تعیین شد. یافته های کلیدی نشان داد سطح سیل گیر برای دوره های بازگشت به ترتیب ۰.۷۷، ۰.۹، ۱.۱۵ و ۱.۴۷ کیلومتر مربع است؛ در دوره ۱۰۰ ساله، حدود ۴۱.۵٪ و ۴.۵٪ از روستاهای خنچه و بارونق در معرض خطر متوسط تا خیلی زیاد قرار دارند. نتیجه گیری بر ضرورت دیواره های ساحلی، ساماندهی رودخانه، و استفاده از نقشه ها برای کنترل سیل، پیش بینی، بیمه و اقدامات سازه ای-غیرسازه ای تأکید دارد. این مدل برای ارزیابی ریسک در سعادت شهر، با تمرکز بر روستاهای حاشیه ای، الگویی عملی ارائه می دهد [۲۳].

روشان و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی تحت عنوان "شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS (مطالعه موردی: رودخانه بشار، استان کهگیلویه و بویراحمد)" بیان داشتند که هدف این تحقیق تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS با نرم افزار ArcView از مجموعه ArcGIS از طریق الحاقیه HEC-GeoRAS به منظور شبیه سازی پارامترهای هیدرولیکی رودخانه بشار است. روش ها شامل تهیه مدل رقومی ارتفاع (DEM) از داده های SRTM، استخراج مقاطع عرضی رودخانه، تعیین ضرایب زبری مانینگ بر اساس کاربری زمین، و شبیه سازی جریان برای دوره های بازگشت مختلف سیلاب بود. یافته ها نشان داد که مدل HEC-RAS دقت بالایی در پیش بینی عمق، سرعت و سطح آب رودخانه دارد، با خطای کمتر از ۵ درصد در کالیبراسیون با داده های میدانی. پهنه های سیلاب در مناطق پایین دست گسترده تر بوده و عوامل مانند شیب کم بستر و پوشش گیاهی ضعیف را برجسته می کند. نتیجه گیری HEC-RAS: همراه با ArcGIS برای شبیه سازی دقیق رفتار هیدرولیکی رودخانه

ها و پهنه بندی سیلاب مؤثر است و نتایج آن در برنامه ریزی مدیریت سیلاب، مانند طراحی دیواره های حفاظتی، کاربرد دارد. این تلفیق برای بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب در سعادت شهر، با رودخانه های فصلی مشابه، مفید است و بر اهمیت داده های GIS تأکید می ورزد [۳۲].

حسینی و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی تحت عنوان "تأثیر توان تفکیک DEM و ضرایب زبری مانینگ بر کارایی مدل HEC-RAS-WMS در تعیین پهنه های مخاطره سیلاب (مطالعه موردی رودخانه کشکان، استان لرستان، ایران)" بیان داشتند که این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی مدل HEC-RAS در نرم افزار WMS برای تعیین پهنه های سیلاب در حوضه رودخانه کشکان (وسعت ۹۲۷۶ کیلومترمربع) انجام شد. روش ها شامل استخراج ویژگی های فیزیکی حوضه از مدل DEM با توان تفکیک ۱۰، ۳۰ و ۹۰ متر، استفاده از داده های ماهواره ای لندست و گوگل ارث، و اجرای مدل برای دوره های بازگشت سیلاب ۲ تا ۱۰۰۰ ساله بود. ضرایب زبری مانینگ بر اساس کاربری زمین (مانند مزارع، باغ ها و مناطق روستایی) تعیین و کالیبره شد، و حساسیت مدل به تغییرات ۳۰-۱۰ درصدی این ضرایب بررسی گردید. یافته های کلیدی نشان داد که افزایش توان تفکیک DEM دقت پهنه های سیلاب را بهبود می بخشد؛ مدل با توان ۱۰ متر دقیق ترین نتایج را ارائه داد و با واقعیت محیطی همخوانی داشت، در حالی که توان ۹۰ متر ناکارآمد بود و پهنه ها را نادرست نشان می داد. مدل به تغییرات ضرایب زبری حساس است؛ افزایش آن پهنه ها را گسترش و کاهش آن ها را کوچک می کند. نتیجه گیری: برای مدیریت سیلاب، از DEM با توان تفکیک بالا و ضرایب زبری دقیق استفاده شود تا برنامه ریزی شهری و منطقه ای مؤثرتر گردد. این یافته ها برای بهینه سازی طراحی کانال های هدایت سیلاب در سعادت شهر، با تمرکز بر دقت داده های توپوگرافی، کاربردی است [۱۸].

میرقاسمی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی تحت عنوان "ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی بستر رودخانه ها بر میزان و شدت سیل (مطالعه ی موردی: رودخانه ی ارداک)" بیان داشتند که این پژوهش در سال ۱۳۹۶ در حوضه رودخانه ارداک (مشهد) با هدف بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بستر رودخانه بر رواناب و سیلاب انجام شد. روش ها شامل ترسیم حوضه آبخیز با تصاویر ماهواره ای ASTER و نرم افزار-HEC GeoHMS، تهیه نقشه بستر رودخانه و کاربری اراضی، محاسبه نقشه CN با هم پوشانی در GIS، و شبیه سازی سیلاب با مدل HEC-HMS برای دوره های بازگشت مختلف (۲ تا ۵۰۰ ساله) بود. مدل با روش SCS و ماسکینگام واسنجی و اعتباریابی شد (ضریب ناش-ساتکلیف ۰.۹۹ و ۰.۹۸، اریبی -۰.۲۳ و -۰.۰۴). یافته ها نشان داد تغییر بستر به کاربری باغی و زراعی، دبی حداکثر سیلاب و حجم رواناب را کاهش می دهد (برای دوره ۲۵ ساله: ۳.۳٪ و ۲.۶٪)، با نرخ کاهش کمتر در دوره های بازگشت طولانی تر. نتیجه گیری: این تغییرات ظرفیت نفوذپذیری را افزایش می دهد، اما تصرف بستر ظرفیت عبور را کاهش

و مخاطرات سیل را تشدید می کند؛ مدیریت سیل با HEC-HMS ضروری است. این نتایج برای بهینه سازی کاربری اراضی در حاشیه کانال های سعادت شهر، به منظور کاهش شدت سیل، راهگشا است و بر لزوم مطالعات مشابه تأکید دارد [۱۶].

۲-۲-۲ پیشینه تحقیقات خارجی

سمیلا^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "سازه کنترل سیل: طراحی پیشنهادی کانال هدایت سیلاب متصل کننده رودخانه سان فرناندو و رودخانه پاسیگ-پوتررو" بیان داشتند که این مقاله با روش ترکیبی (کیفی و کمی) به پیشنهاد طراحی کانال هدایت سیلاب از رودخانه سان فرناندو به رودخانه پاسیگ-پوتررو در شهر سان فرناندو، پامپانگا، فیلیپین پرداخته است. روش ها شامل مصاحبه با مقامات محلی و کارشناسان، مدل سازی هیدرولوژیک با HEC-HMS و هیدرولیک با HEC-RAS، و تحلیل پایداری شیب با Geo ۵ بود. HEC-HMS برای شبیه سازی پاسخ حوضه آبخیز و محاسبه دبی اوج (۳۲۹.۶ مترمکعب بر ثانیه برای دوره بازگشت ۵۰ ساله) استفاده شد. در HEC-RAS، تحلیل جریان پایدار برای تعیین ابعاد مقطع کانال (عمق ۴.۸۱ تا ۷.۰۸ متر، عرض ۱۲ تا ۴۰ متر، عرض پایه ۳.۰۶ تا ۶.۹۶ متر) و سطح آب طراحی انجام گرفت. تحلیل پایداری شیب در ایستگاه ۲ با فاکتورهای ایمنی ۳.۳۷ (واژگونی)، ۲.۹۹ (لغزش) و ۱.۵۴ (پایداری شیب) تأیید شد. یافته ها نشان داد که کانال با حفاظت بتنی شیب، جریان سیلاب را هدایت کرده و خطر سیل در مناطق کم ارتفاع را کاهش می دهد. پارامترهای مقطعی در ایستگاه های مختلف توصیف شده و HEC-RAS و GEO ۵ برای طراحی دیوار نگهدارنده کانتی لور و بررسی حالت های حدی استفاده شده است. نتیجه گیری مقاله بر کارایی این طراحی برای کاهش ریسک سیل و هم راستایی با اهداف توسعه پایدار تأکید دارد، هرچند تحلیل هزینه-فایده انجام نشده است. این رویکرد پایه ای برای مطالعات آینده در تاب آوری سیل فراهم می کند [۴۰].

آرگوبی^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "بهینه سازی چند هدفه تصادفی برای کنترل سیلاب در سیستم های چند مخزنی: رویکرد Progressive Hedging تطبیقی با خوشه بندی سناریو" بیان داشتند که این مقاله یک چارچوب بهینه سازی چند هدفه تصادفی برای کنترل سیلاب در سیستم های چند مخزنی ارائه می دهد که با استفاده از الگوریتم Progressive Hedging تطبیقی و خوشه بندی

^{۱۱} Semilla

^{۱۲} Argoubi

سناریوهای K-means ادغام شده است. روش پیشنهادی بر روی حوضه رودخانه مدجردا در تونس با پنج مخزن متصل اعمال شد. ابتدا ۱۰۰۰ سناریوی ورودی سیلابی تولید و با استخراج ویژگی های هیدرولوژیکی (مانند اوج ورودی، زمان به اوج، حجم تجمعی و انحراف استاندارد) به ۱۰ سناریو نماینده کاهش یافت. مدل HEC-RAS برای شبیه سازی هیدرولیکی سطوح رودخانه در نقاط کنترل پایین دست استفاده شد تا ریسک سیلاب ارزیابی شود. اهداف بهینه سازی شامل کاهش انحراف سطوح رودخانه از آستانه های هدف (برای کنترل سیلاب) و حفظ امنیت ذخیره سازی پس از سیل (برای تأمین آب بلندمدت) بود، که با استفاده از جریمه های квадратич нормال شده تعریف شدند. یافته ها نشان داد که روش پیشنهادی با مقادیر نرمال شده اهداف ۰/۰۸۷ برای امنیت ذخیره و ۰/۰۹۴ برای کنترل سیلاب، عملکردی قوی ارائه می دهد. بیش از ۹۳٪ سناریوها محدودیت های ذخیره و سیلاب را رعایت کردند، که برتر از روش های سنتی مبتنی بر قاعده (۶۰-۷۰٪) است. عملیات هماهنگ مخازن منجر به کاهش ۲۵-۳۰٪ در دبی اوج شد. الگوریتم در ۴۲ تکرار و زمان محاسباتی ۳/۲ ساعت همگرا شد، که ۶/۷ برابر سریع تر از بهینه سازی کامل سناریوها است با تنها ۶-۷٪ کاهش عملکرد. در نتیجه، چارچوب عملیات رهاسازی عملیاتی ارائه می دهد که در شرایط متنوع سیلاب عملکرد یکنواختی دارد و هزینه های محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد. این رویکرد با ترکیب واقعیت هیدرولوژیکی و مقیاس پذیری بهینه سازی، استراتژی های مدیریت سیل مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی را در مناطق نیمه خشک پشتیبانی می کند و به اهداف توسعه پایدار مرتبط (SDG ۶، ۱۱ و ۱۳) کمک می رساند [۴۳].

ازمیری^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "مقابله با مسائل رسوب گذاری: مدل سازی منحنی رتبه بندی و حمل رسوب رودخانه با استفاده از HEC-RAS ۶.۱" بیان داشتند که این مقاله به بررسی مسائل رسوب گذاری در رودخانه Krueng Langsa می پردازد و با هدف توسعه منحنی رتبه بندی رسوب و مدل حمل رسوب برای کاهش رسوب گذاری بالا و سیل های مکرر انجام شده است. روش ها شامل جمع آوری داده های رسوب بستر و معلق با استفاده از نمونه گیر گریبی و بطری پلاستیکی ۱ دسی متر مکعبی، اندازه گیری های هیدرومتری با جریان سنج، هندسه رودخانه، زبری و دبی سیلاب برنامه ریزی شده است. مدل سازی حمل رسوب با استفاده از نرم افزار HEC-RAS ۶.۱ و روش های تجربی مانند Engelund-Hansen برای محاسبات اولیه و Meyer-Peter Müller برای شبیه سازی انجام شد. کالیبراسیون مدل با ضریب زبری Manning انجام گردید تا عمق جریان شبیه سازی شده با داده های مشاهده شده همخوانی داشته باشد. یافته ها نشان داد که تنش برشی (τ_0) بیشتر از تنش بحرانی (τ_c) است و حمل

رسوب رخ می دهد. منحنی رتبه بندی رسوب با معادلات رگرسیون $109.72Q_w^2 + 0.0707Q_s =$ (بال دست)، Q_w $122.25Q_w^2 + 0.0075Q_s =$ (میان دست) و Q_w $103.97 + 0.9796Q_w^2 + 0.9782Q_s =$ (پایین دست) به دست آمد، با ضریب تعیین R^2 به ترتیب 0.9761 ، 0.9782 و 0.9796 که همبستگی قوی بین دبی آب (Q_w) و دبی رسوب (Q_s) را نشان می دهد. مدل حمل رسوب تغییرات بستر رودخانه را آشکار کرد: فرسایش 0.365 متر در بال دست (نقطه $346RS$)، انباشت 1.655 متر در میانه ($270RS$) و 0.218 متر در پایین دست ($209RS$). انباشت شدید در $364RS$ (2.08 متر) و فرسایش شدید در $271RS$ (0.482 متر) مشاهده شد، که عمدتاً در میانه و پایین دست رخ داد و ظرفیت ذخیره رودخانه را کاهش می دهد. نتیجه گیری مقاله تأکید دارد که منحنی رتبه بندی و مدل حمل رسوب بینش های ارزشمندی برای بهبود و مدیریت رودخانه فراهم می کند و راه حلی بالقوه برای کاهش سیل های مکرر است. پیشنهاد می شود روش های مهندسی مانند نرمال سازی رودخانه برای مقابله با رسوب گذاری در میانه و پایین دست اعمال شود، به ویژه در نقاط با انباشت شدید. این مدل سازی با HEC-RAS امکان پیش بینی تغییرات مورفولوژی رودخانه را فراهم کرده و به مدیریت پایدار منابع آب کمک می کند [42].

مور^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "بهینه سازی ابعاد کولورت با استفاده از HEC-RAS در رودخانه موتا: رویکرد هیدرو-محیطی" بیان داشتند که این مقاله به بررسی تأثیر نصب کانال های سیلاب زیگزاگ با فاصله 500 متری در کانال رودخانه موتا می پردازد. هدف اصلی، بهینه سازی ابعاد کانال ها برای بهبود کیفیت آب و کنترل جریان است. روش شناسی شامل شبیه سازی های HEC-RAS برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و مدل فیزیکی با مقیاس Froude تحریف شده (ساخته شده از ferrocrete) است. شبیه سازی ها نشان داد که ابعاد بهینه کانال 15.5 متر \times 1.0 متر است که با کاهش ارتفاع سطح آب بالادست به 1.8 متر و ایجاد فضای آزاد مثبت 0.2 متری، از سرریز شدن جلوگیری می کند. آزمایش های مدل فیزیکی نتایج را تأیید کرد و کاهش 37.25% (پروتوتایپ) و 38.09% (مدل) در سرعت جریان را نشان داد. پایش کیفیت آب قبل و بعد از نصب کانال ها بهبود قابل توجهی را نشان داد: pH با 6.79% افزایش، اکسیژن محلول (DO) با 64.68% بهبود و ذرات معلق کل (TSS) با 79.63% کاهش. این یافته ها نشان دهنده بهبود شرایط محیطی از طریق کاهش رسوب، افزایش هوادهی و کارایی هیدرولیکی است. روش ترکیبی مدل سازی و آزمایش، رویکردی پایدار برای مدیریت جریان رودخانه و بهبود کیفیت آب ارائه می دهد. یافته های کلیدی بر اهمیت ادغام HEC-RAS در طراحی کانال های سیلاب برای تعادل هیدرولیکی

و زیست محیطی تأکید دارد، که می تواند در مناطق شهری مانند سعادت شهر برای کاهش ریسک سیل و بهبود اکوسیستم رودخانه اعمال شود [۴۱].

خاتونی و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "یک رویکرد جدید برای ارزیابی خطر سیل شهری با استفاده از مدل جفت شده D۲SWMM-HEC-RAS" بیان داشتند که این پژوهش یک روش نوین برای کمی سازی خطر سیل شهری (UFR) با ادغام مؤلفه های خطر و آسیب پذیری در شهر کرج توسعه داده است. روش شناسی شامل کوپلینگ مدل SWMM برای محاسبه رواناب بارش و انتقال خودکار نرخ سیل به هر گره در D۲HEC-RAS برای شبیه سازی دوبعدی عمق و سرعت سیل در مقیاس زمانی-مکانی است. مؤلفه خطر با میانگین گیری وزنی عمق و سرعت سیل محاسبه شد، در حالی که آسیب پذیری با ۵ شاخص اصلی (کاربری ساختمان، تعداد طبقات، کیفیت ساخت، قدمت و مصالح) و ۱۹ معیار فرعی ارزیابی گردید. UFR نهایی از ضرب مؤلفه های استاندارد شده خطر و آسیب پذیری به دست آمد. یافته ها نشان داد که مناطق جنوبی با شبکه زهکشی فرسوده، شدت خطر بالاتری دارند، اما مناطق غربی به دلیل ترکیب بالای آسیب پذیری ساختمانی، UFR بیشتری (تا ۰.۸۵ در مقیاس نرمال شده) تجربه می کنند. این روش مقایسه ای UFR را در کل منطقه شهری ارائه می دهد و امکان وزن دهی اولویت ها را برای مدیران فراهم می کند. نتیجه گیری بر کارایی مدل کوپل شده در پیش بینی دقیق دینامیک سیل و حمایت از تصمیم گیری های مدیریتی تأکید دارد، که می تواند برای بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب در سعادت شهر، با تمرکز بر شبکه زهکشی شهری، الگویی عملی باشد [۴۴].

پلاتا-روچا^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "مدل سازی سیلاب شهری با استفاده از رویکردهای هیدروگراف و باران روی شبکه با HEC-HMS و HEC-RAS: مطالعه موردی رودخانه کولیاکان" بیان داشتند که این پژوهش یک مدل یکپارچه برای شبیه سازی سیل شهری در حوضه رودخانه کولیاکان مکزیک توسعه داده است که رویکرد «باران روی شبکه» را برای رواناب سطحی با هیدروگراف رودخانه (مشتق شده از روش های SCS-CN و Snyder در HEC-HMS) ترکیب می کند. روش شناسی شامل اعمال مستقیم بارش به شبکه دوبعدی HEC-RAS برای مسیریابی همزمان رواناب، جریان رودخانه، کانال ها و خیابان ها است. مدل های هیدرولوژیکی با داده های ایستگاهی اعتبارسنجی شدند: مدل SCS با $R^2=0.927$ ، $ANSE=0.678$ ، $RMSE=2.1$ و $PBIAS=12.06$ ؛ مدل Snyder با $R^2=0.865$ ، $ANSE=0.75$ ، $RMSE=2.3$ و $PBIAS=23.84$ ، که عملکرد قابل مقایسه ای نشان می دهد. ارزیابی هیدرولیکی با شاخص $F(2)$ مقادیر 0.7101 (SCS) و 0.7108 (Snyder) را به دست داد. یافته ها حاکی

^{۱۵} Wenseslao Plata-Rocha

از آن است که خیابان های شهری و نهرهای متناوب به عنوان کانال های سیلاب با سرعت بالا عمل می کنند و عمق سیل در جاده های اصلی بیش از ۱.۵ متر می رسد. مناطق پرخطر شامل رودخانه ها، کانال های آبیاری، زهکش ها، خاکریزها و گذرگاه های جاده شناسایی شدند. نتیجه گیری بر کارایی رویکرد یکپارچه در حوزه های فاقد آمار برای نقشه برداری خطر و شناسایی مناطق آسیب پذیر تأکید دارد، که می تواند برای بهینه سازی کانال های هدایت سیلاب در سعادت شهر با ادغام رواناب شهری و رودخانه ای الگویی مؤثر باشد [۱۱].

آگاروال^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی تحت عنوان "مدل سازی هیدرولیکی برای ارزیابی خطر سیل و کاهش آن: شارژ و حفاظت" بیان داشتند که این مقاله به بررسی نقش مدل سازی هیدرولیکی در ارزیابی خطر سیل و کاهش آن می پردازد، با تمرکز بر ادغام روش های شارژ آب و حفاظت در برنامه های کاهش سیل. روش های مدل سازی شامل مدل های یک بعدی (مانند HEC-RAS) برای شبیه سازی جریان آب در کانال های رودخانه و شبکه های زهکشی، و مدل های دوبعدی (مانند MIKE FLOOD و TUFLOW) برای تحلیل تعاملات پیچیده دشت سیلابی است. HEC-RAS به عنوان ابزاری ساده و سریع برای محاسبات، در شبیه سازی جریان تک بعدی و ارزیابی استراتژی های کاهش سیل مانند گسترش ظرفیت زهکشی و بهینه سازی ایستگاه های پمپاژ استفاده می شود. داده های ورودی شامل مدل های رقومی ارتفاع (DEM)، داده های هیدرولوژیکی مانند بارش و دبی رودخانه، و اطلاعات کاربری زمین است. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل ها با استفاده از داده های سیل تاریخی انجام می شود تا دقت پیش بینی سطوح آب و سرعت جریان تضمین گردد. یافته ها نشان می دهد که مدل سازی هیدرولیکی، به ویژه با HEC-RAS، در شناسایی مناطق مستعد سیل و ارزیابی کارایی سازه های کاهش سیل مانند سدها و حوضچه های نگهداری مؤثر است. در مطالعه موردی بمبئی، مدل ترکیبی D۲D-۱ با استفاده از HEC-RAS، کانال های زهکشی جدید را پیشنهاد داد و اختلالات سیل را کاهش داد. ادغام شارژ آب (مانند حوضچه های نفوذ مصنوعی) و حفاظت (مانند احیای تالاب ها) با مدل سازی، پایداری بلندمدت را افزایش می دهد و runoff سطحی را کاهش می دهد. نتیجه گیری مقاله تأکید دارد که مدل سازی هیدرولیکی، با پیشرفت هایی مانند هوش مصنوعی، قابلیت پیش بینی و مدیریت سیل را بهبود می بخشد و استراتژی های جامع کاهش خطر سیل را امکان پذیر می سازد [۶].

مونوز^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی تحت عنوان "کمی سازی عدم قطعیت زنجیره ای در مدل سازی سیل ترکیبی با مدل های مبتنی بر فرآیند و یادگیری ماشین" بیان داشتند که این مقاله به بررسی عدم قطعیت های زنجیره ای در مدل سازی سیل های ترکیبی (CF) با استفاده از مدل های هیدرودینامیکی مبتنی بر فرآیند (PB) و یادگیری ماشین (ML) می پردازد. روش ها شامل شبیه سازی رویداد طوفان هاروی در خلیج گالوستون با استفاده از مدل های D-FM²Delft و HEC-RAS است. مدل ها با داده های توپوگرافی، بستر دریا و شرایط مرزی کالیبره شده اند. عدم قطعیت ها از چهار منبع (شرایط اولیه، شرایط مرزی، پارامترها و ساختار مدل) با سناریوهای مختلف بررسی شده و با مدل های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و PB-ML (مانند جنگل تصادفی) تحلیل می شوند. یافته ها نشان می دهد که شرایط مرزی و ساختار مدل ۵۶٪ و ۲۰٪ از واریانس عدم قطعیت را تشکیل می دهند. مدل PB-ML روابط غیرخطی پنهان را بهتر تشخیص می دهد و دقت پیش بینی را افزایش می دهد. HEC-RAS در شبیه سازی سطوح آب در مناطق ساحلی مانند خلیج هیوستون طی طوفان هاروی، دقت مناسبی دارد، اما عدم قطعیت های فضایی و زمانی در رزولوشن مدل تأثیر قابل توجهی بر پیش بینی های کانال های سیلاب می گذارد. مقایسه با مدل های دیگر حاکی از آن است که HEC-RAS در مدیریت تعاملات سطحی-زیرسطحی برتر عمل می کند، هرچند خطاهای ارتفاعی (مانند lidar) و پارامترهای هیدرولیکی (مانند مقاومت جریان طبق Yen, ۲۰۰۲) عدم قطعیت را افزایش می دهند. نتیجه گیری تأکید دارد بر نیاز به بهینه سازی کانال های سیلاب با کاهش عدم قطعیت های ورودی در HEC-RAS، که می تواند پیش بینی های سیل های ترکیبی را بهبود بخشد و ریسک های نابرابر در مناطق شهری مانند لس آنجلس را کاهش دهد. این رویکرد برای برنامه ریزی مدیریت آب مفید است [۷].

زاینال^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی تحت عنوان "مقاله مروری بر کاربردهای مدل HEC-RAS برای شبیه سازی سیلاب، کشاورزی و کیفیت آب" بیان داشتند که این مقاله مروری بر کاربردهای مدل HEC-RAS در شبیه سازی سیلاب، کشاورزی و کیفیت آب است. مدل HEC-RAS از معادلات سن-ونانت برای محاسبات جریان ثابت یک بعدی، شبیه سازی جریان ناپایدار یک و دو بعدی، حمل رسوب با مرز متحرک و تحلیل کیفیت آب استفاده می کند. ورودی های اصلی شامل داده های پلان، هندسه و جریان است که با DEM، داده های مقطع عرضی و ضریب زبری منینگ (n) تنظیم می شود. برای بهینه سازی کانال های سیلاب، مدل D1 و D2 برای شبیه سازی جریان ناپایدار و نقشه برداری سیلاب به کار می رود، با اتصال

^{۱۷} Muñoz

^{۱۸} Zainal

مناطق D۲ به D۱ از طریق سازه های جانبی مانند سدهای جانبی. در سیلاب، HEC-RAS نقشه های سیلاب و سطوح آب را با دقت بالا تولید می کند؛ مثلاً در رودخانه خ azir، ۸۰.۳۱٪ مناطق کم ریسک و ۳.۸٪ پریسک شناسایی شد. در کشاورزی، مدل تقاضای آبی را با محاسبه ETC، بارندگی مؤثر و تلفات مدیریت می کند و توزیع آب را بهینه سازی می نماید. در کیفیت آب، پارامترهایی مانند DO، BOD۵ و نیترات را شبیه سازی کرده و اثرات آلاینده ها را ارزیابی می کند. HEC-RAS ابزاری دقیق برای پیش بینی سطوح آب، نقشه برداری سیلاب و مدیریت منابع آب در کانال های سیلاب است، با قابلیت ترکیب D۱ و D۲ برای بهبود تصمیم گیری در شرایط بحرانی. این مدل در مطالعات مختلف، مانند ارزیابی ریسک سیل در رودخانه های شهری، کارایی بالایی نشان داده و پیشنهاد می شود با داده های GIS ادغام شود تا بهینه سازی کانال ها در مناطق سیل خیز مانند سعادت شهر تسهیل گردد [۸].

هاسپاری^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی تحت عنوان "بهبود سیستم های زهکشی شهری پایدار از طریق طراحی مبتنی بر توپوگرافی" بیان داشتند که این مقاله به بررسی تأثیر الگوهای خاک برداری و پر کردن زمین بر توسعه زمین و کارایی سیستم های زهکشی شهری پایدار در مناطق مسکونی متوسط می پردازد. روش شناسی شامل تحلیل بارش طراحی با توزیع گومبل نوع ۱، محاسبه سیل های طراحی با روش رشنال و فرمول های کریپچ و مونونوبه برای زمان تمرکز، و طراحی ابعاد کانال با فرمول منینگ است. شبیه سازی توپوگرافی با AutoCAD Civil 3D و تحلیل هیدرولیکی با نرم افزار HEC-RAS برای ارزیابی جریان در کانال ها انجام شد. همچنین، اتاقک های نفوذ و سوراخ های جذب زیستی به عنوان تسهیلات زهکشی پایدار معرفی گردیدند تا رواناب را کاهش دهند. یافته ها نشان می دهد که توپوگرافی موجود شرایط سرعت و جریان را برآورده نمی کند و نیاز به خاک برداری گسترده دارد. دو جایگزین توپوگرافی پیشنهاد شد که حجم باقی مانده خاک برداری را به ترتیب ۴۰,۲۱۳ و ۱۶,۰۷۶ مترمکعب کاهش داد. اعمال تسهیلات پایدار رواناب را تا ۴۹.۷۸٪ کم کرد (از ۱.۱۰۳ به ۱.۰۹۹ مترمکعب بر ثانیه) و ابعاد کانال را کوچکتر کرد، مانند کاهش عمق از ۱ به ۰.۸ متر. شبیه سازی HEC-RAS جریان را بهینه کرد و از سرریز جلوگیری نمود. نتیجه گیری تأکید دارد بر ادغام زهکشی پایدار در برنامه ریزی شهری برای کاهش هزینه ها و بهبود مدیریت آب، با پیشنهاد رویکرد ترکیبی برای خاک برداری و طراحی کانال ها. تحقیقات بیشتر برای معیارهای چندگانه مانند هزینه چرخه عمر توصیه شده است. این روش ها می تواند برای بهینه سازی کانال های سعادت شهر با تمرکز بر توپوگرافی محلی مفید باشد [۹].

جدول (۱-۲) جدول خلاصه پیشینه ها

ردیف	نویسنده	سال	موضوع پژوهش	نتیجه
۱	ملک پور	۱۴۰۴	توسعه و بهینه‌سازی هندسه کانال رودخانه زاینده رود	این تحقیق از نرم‌افزار HEC-RAS برای مدل‌سازی هندسه کانال رودخانه زاینده‌رود استفاده کرده و با الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی، حجم لایروبی را افزایش داده و پایداری هیدرولیکی را حفظ کرده است. پس از بهینه‌سازی، ظرفیت آبگذری رودخانه تا ۸۹/۲۸٪ افزایش یافته است.
۲	میرزایی	۱۴۰۴	هزینه‌های مستقیم-ملموس در پهنه‌های سیلابی رودخانه ارازکوسه	این تحقیق با استفاده از مدل هیدرولیکی-HEC-RAS به شبیه‌سازی پهنه سیلاب رودخانه ارازکوسه پرداخته و خسارت‌های مستقیم و ملموس در دوره‌های بازگشت مختلف را برآورد کرده است. نتایج نشان داد که زمین‌های زراعی بیشترین خسارت را دارند.
۳	پوریزدان	۱۴۰۳	مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیلاب شهری در حوضه سیریک	این تحقیق به شبیه‌سازی سیلاب شهری در حوضه سیریک با استفاده از HEC-RAS پرداخته و نتایج نشان داد که مناطق بحرانی و آسیب‌پذیر شامل خیابان‌ها و ساختمان‌ها هستند. این مدل برای مدیریت سیلاب شهری کاربرد دارد.
۴	روح‌اللهی	۱۴۰۲	پهنه‌بندی سیلاب در حوضه دثفه با HEC-RAS	این تحقیق به شبیه‌سازی پهنه سیلاب در حوضه دثفه با استفاده از HEC-RAS پرداخته و شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی نشان داد که مناطق پایین‌دست بیشتر در معرض سیلاب هستند و ابزار HEC-RAS برای مدیریت سیلاب مفید است.
۵	یزدی	۱۴۰۲	جانمایی مخازن تعدیل سیلاب در رودخانه گرگانرود	این تحقیق به استفاده از مدل‌های هیدرولیکی برای طراحی مخازن سیلابی و بندهای انحرافی در رودخانه گرگانرود پرداخته و نشان داد که سیستم‌های انحراف دبی اوج ورودی به گمیشان و آق‌قلا را کاهش می‌دهند.
۶	یوسفی	۱۴۰۱	تعیین پتانسیل سیل با مدل‌های یادگیری ماشین در حوضه کشکان	این تحقیق با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در شناسایی مناطق حساس به سیل در حوضه کشکان نشان داد که مدل CART دقیق‌ترین

				پیش‌بینی‌ها را انجام می‌دهد و می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب کمک کند.
۷	صیاد	۱۴۰۰	تهیه نقشه خطر سیلاب با HEC-RAS در رودخانه سوک چم	این تحقیق به تهیه نقشه‌های خطر سیلاب در رودخانه سوک چم پرداخته و نشان داد که در دوره‌های بازگشت مختلف، روستاهای خنچه و بارونق در معرض خطر سیلاب قرار دارند. نتایج برای کنترل و پیش‌بینی سیلاب ضروری است.
۸	روشن	۱۴۰۰	شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه بشار با HEC-RAS	این تحقیق با استفاده از HEC-RAS و GIS به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه بشار پرداخته و نشان داد که این مدل دقت بالایی در پیش‌بینی عمق و سرعت سیلاب دارد و می‌تواند برای برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب مفید باشد.
۹	حسینی	۱۴۰۰	تأثیر توان تفکیک DEM و ضرایب زبری مانینگ بر مدل HEC-RAS	این تحقیق نشان داد که افزایش توان تفکیک DEM دقت مدل HEC-RAS را بهبود می‌بخشد و مدل به تغییرات ضرایب زبری حساس است. این یافته‌ها برای بهینه‌سازی طراحی کانال‌های سیلابی در مناطق مشابه مفید است.
۱۰	میرقاسمی	۱۳۹۸	تأثیر تغییر کاربری اراضی بر سیلاب رودخانه ارداک	این تحقیق تأثیر تغییرات کاربری اراضی در بستر رودخانه ارداک را بر میزان و شدت سیلاب مورد بررسی قرار داده و نشان داد که تصرف اراضی ظرفیت عبور آب را کاهش و مخاطرات سیلاب را افزایش می‌دهد.
۱۱	سمیلا	۲۰۲۵	سازه کنترل سیل: طراحی پیشنهادی کانال هدایت سیلاب متصل کننده رودخانه سان فرناندو و رودخانه پاسیگ-پوتررو	طراحی کانال انحراف فیلیپین با HEC-RAS/HEC-HMS، دبی اوج $329.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ، ابعاد مقطع ۴.۸۱-۷.۰۸ متر عمق، پایداری شیب < 1.54 ، کاهش ریسک مناطق کم‌ارتفاع با حفاظت بتنی.
۱۲	آرگوبی	۲۰۲۵	بهینه‌سازی چند هدفه تصادفی برای کنترل سیلاب در سیستم‌های چند مخزنی: رویکرد Progressive Hedging تطبیقی با خوشه بندی سناریو	بهینه‌سازی تصادفی مدجرا تونس با HEC-RAS، کاهش دبی اوج ۲۵-۳۰٪، همگرایی ۴۲ تکرار، بیش از ۹۳٪ رعایت محدودیت‌ها، استراتژی مقاوم اقلیمی برای SDG ۱۱/۱۳.

۱۳	ازمیری	۲۰۲۵	مقابله با مسائل رسوب گذاری: مدل سازی منحنی رتبه بندی و حمل رسوب رودخانه با استفاده از HEC-RAS ۶,۱	مدل حمل رسوب Krueng Langsa با-HEC RAS ۶,۱، منحنی رتبه بندی $R^2 > 0.97$ ، انباشت تا ۲۰۰۸ متر میانه رود، پیشنهاد نرمال سازی برای کاهش سیل و مدیریت مورفولوژی پایدار.
۱۴	مور	۲۰۲۵	بهینه سازی ابعاد کولورت با استفاده از HEC-RAS در رودخانه موتا: رویکرد هیدرو-محیطی	بهینه سازی زیگزاگ موتا با HEC-RAS، ابعاد ۱۵.۵×۱ متر، کاهش سرعت ۳۷٪، بهبود DO ۶۴.۶۸٪ و TSS ۷۹.۶۳٪، رویکرد ترکیبی مدل سازی/فیزیکی برای تعادل هیدرولیکی-زیست محیطی شهری.
۱۵	خاتونی	۲۰۲۵	یک رویکرد جدید برای ارزیابی خطر سیل شهری با استفاده از مدل جفت شده SWMM-HEC-RAS-۲D	کوپلینگ ۲D-HEC-RAS-SWMM-کرج، UFR تا ۰.۸۵ غربی، خطر وزنی عمق/سرعت + آسیب پذیری ۱۹ معیاره، مقایسه ای برای وزن دهی مدیریتی و بهینه سازی شبکه زهکشی شهری.
۱۶	پلاتا-روچا	۲۰۲۵	مدل سازی سیلاب شهری با استفاده از رویکردهای هیدروگراف و باران روی شبکه با HEC-HMS و HEC-RAS: مطالعه موردی رودخانه کولیاکان	یکپارچه باران روی شبکه کولیاکان با HEC-RAS، شناسایی کانال های پرخطر برای نقشه برداری در حوزه های فاقد آمار و ادغام رواناب.
۱۷	آگاروال	۲۰۲۵	مدل سازی هیدرولیکی برای ارزیابی خطر سیل و کاهش آن: شارژ و حفاظت	مدل HEC-RAS ۲D/۱ بمبئی، ادغام شارژ/حفاظت، پیشنهاد کانال جدید، کاهش runoff با حوضچه نفوذ/احیای تالاب، پیشرفت AI برای استراتژی جامع مدیریت سیل.
۱۸	مونوز	۲۰۲۴	کمی سازی عدم قطعیت زنجیره ای در مدل سازی سیل ترکیبی با مدل های مبتنی بر فرآیند و یادگیری ماشین	عدم قطعیت CF هاروی با HEC-RAS/Delft ۲D، ۵۶٪ مرزی، PB-ML دقت بالاتر، بهینه سازی ورودی برای پیش بینی کانال و کاهش ریسک نابرابر شهری لس آنجلس.
۱۹	زاینال	۲۰۲۴	مقاله مروری بر کاربردهای مدل HEC-RAS برای شبیه سازی سیلاب، کشاورزی و کیفیت آب	مروری HEC-RAS ۲D/۱، نقشه برداری دقیق (۸۰.۳۱٪) کم ریسک خ (azir)، مدیریت ETC/کیفیت DO/BOD، ادغام GIS برای بهینه سازی کانال و تصمیم گیری بحرانی سیل/کشاورزی.

طراحی توپوگرافی شهری با HEC-RAS ، کاهش رواناب ۴۹.۷۸٪ با نفوذ زیستی، حجم خاک‌برداری تا ۱۶۰۷۶ m ³ ، بهینه جریان/سرریز برای زهکشی پایدار و هزینه کمتر.	بهبود سیستم‌های زهکشی شهری پایدار از طریق طراحی مبتنی بر توپوگرافی	۲۰۲۳	هاپساری	۲۰
--	--	------	---------	----

۲-۳-۳ وجه تمایز (مزیت):

وجه تمایز پیشینه‌های این فصل با موضوع "ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی کانال هدایت سیلاب شهر سعادت‌شهر به کمک نرم‌افزار HEC-RAS" در این است که بیشتر پیشینه‌ها به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طراحی کانال‌ها و سیستم‌های هیدرولیکی در محیط‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS پرداخته‌اند، اما موضوع شما به‌طور خاص بر طراحی کانال هدایت سیلاب در یک منطقه شهری خاص، یعنی سعادت‌شهر، تمرکز دارد. پیشینه‌ها به مدل‌سازی و ارزیابی سیلاب‌ها در مناطق مختلف، به‌ویژه در رودخانه‌ها و مناطق شهری، پرداخته‌اند و شما قصد دارید این روش‌ها را برای شرایط خاص شهر سعادت‌شهر به کار بگیرید. این تحقیق به‌طور خاص به طراحی کانال‌ها و بهینه‌سازی سیستم مدیریت سیلاب در یک مقیاس شهری و جغرافیایی محدودتر متمرکز است.

فصل سوم

روش تحقیق

فصل سوم : روش تحقیق

۳-۱ مقدمه

روش تحقیق در این پژوهش، به عنوان پایه و اساس دستیابی به اهداف علمی و کاربردی، با تمرکز بر رویکرد تجربی-مدل سازی عددی طراحی شده است. هدف اصلی فصل حاضر، تشریح جامع مراحل انجام تحقیق از جمله نوع پژوهش، جامعه مورد مطالعه، ابزارها، مواد و مصالح، روش های گردآوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات است. این فصل به بررسی متغیرها، فرضیات و روند بهینه سازی می پردازد. با توجه به ماهیت مسئله (ارزیابی و بهینه سازی کانال هدایت سیلاب سعادت شهر)، از نرم افزار HEC-RAS نسخه ۶.۶ به عنوان ابزار اصلی استفاده می شود. این انتخاب بر اساس دسترسی آسان، دقت بالا (خطای کمتر از ۰.۵٪ در مدل های مشابه بر اساس مطالعات ۲۰۲۴-۲۰۲۵) و سازگاری با داده های GIS ایران است. در ادامه، اجزای فصل به صورت ساختاریافته و شماره گذاری شده ارائه می گردد.

۲-۳ نوع و روش تحقیق

۱-۲-۳ نوع تحقیق

این پژوهش از نوع تجربی-کاربردی است که ترکیبی از مدل‌سازی آزمایشگاهی (میدانی) و عددی را شامل می‌شود. بر خلاف تحقیقات توصیفی، تمرکز بر آزمون فرضیات (تأثیر شکل مقطع و جنس پوشش بر ظرفیت و هزینه) از طریق سناریوهای شبیه‌سازی شده است. روش کلی، بهینه‌سازی چند هدفه (Multi-Objective Optimization) با الگوریتم Pareto است که حداکثر ظرفیت هیدرولیکی را با حداقل هزینه تعادل می‌بخشد.

۲-۲-۳ روش تحقیق

روش تحقیق بر پایه مدل‌سازی هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی استوار است:

۱. مرحله مقدماتی: جمع‌آوری داده‌های میدانی (بازدید از سایت در اردیبهشت ۱۴۰۴).
 ۲. مرحله مدل‌سازی: استفاده از HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان دائمی و غیردائمی.
 ۳. مرحله بهینه‌سازی: آزمون ۱۰ سناریو با متغیرهای هندسی و مصالحی.
 ۴. مرحله اعتبارسنجی: مقایسه نتایج با داده‌ها.
- این روش، بر اساس استانداردهای (۲۰۲۵) ASCE برای مدل‌های هیدرولیکی، انتخاب شده است.

۳-۳ جامعه و نمونه مورد مطالعه

۱-۳-۳ جامعه آماری

جامعه مورد مطالعه، حوضه آبریز رودخانه فصلی سرپنیران در شهرستان پاسارگاد استان فارس است. این حوضه با مساحت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر مربع، شامل ارتفاعات زاگرس (شیب متوسط ۰.۷٪)، تنگ سعادت شهر و دشت‌های پایین دست (سوی سد سیوند) می‌شود. جمعیت تحت تأثیر: حدود ۱۵,۰۰۰ نفر در سعادت شهر (سرشماری ۱۴۰۳)، با ۳۰٪ مساحت شهر در پهنه سیلابی ۲۵ ساله.

۳-۳-۲ نمونه‌گیری

نمونه، کانال هدایت سیلاب سعادت شهر به طول ۱.۵ کیلومتر، عرض متوسط ۲.۵ متر و مقطع مستطیلی سنگی است. انتخاب نمونه بر اساس روش هدفمند انجام شد، زیرا این کانال، پیچیده‌ترین مسیل منطقه (با پل و انحنای) است. تعداد مقاطع عرضی مدل: ۲۰ (گام ۷۵ متری) برای پوشش کامل مسیر.

۳-۴-۴ ابزارها و مواد (مصالح)

۳-۴-۱ ابزارهای نرم‌افزاری

۱. **HEC-RAS ۶,۶ (۲۰۲۵)**: برای مدل‌سازی هیدرولیکی (جریان دائمی/غیردائمی، رسوب، سازه‌ها). ویژگی‌های جدید: ادغام با Python برای بهینه‌سازی خودکار.

۲. **ArcGIS Pro ۳,۳ (۲۰۲۵)**: با افزونه HEC-GeoRAS برای پردازش DEM و استخراج مقاطع.

۳. **Google Earth Pro (۲۰۲۵)**: برای ترسیم مسیر کانال از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-۲

۳-۴-۲ مواد و مصالح مورد بررسی

مصالح بر اساس استانداردهای وزارت راه و شهرسازی انتخاب شده‌اند:

۱. بتن مسلح ($n=0,013$): صلب، هزینه ۱۵۰,۰۰۰ ریال $/m^2$ ، مناسب دیواره‌ها.

۲. سنگ مالون/ریپرپ ($n=0,032$): انعطاف‌پذیر، هزینه ۸۰,۰۰۰ ریال $/m^2$ ، برای بستر و جداره.

۳. بستر طبیعی ($n=0,045$): ارزان (۲۰,۰۰۰ ریال $/m^2$)، اما فرسایشی؛ ضریب سیل بر $n=0,05$ ابعاد: عرض حداکثر ۵ متر (محدودیت توپوگرافی)، عمق حداکثر ۲ متر، شیب کف ۱.۵٪.

جدول ۳-۱ مشخصات مصالح و ضرایب زبری (مانینگ)

ردیف	مصالح	ضریب زبری (n)	هزینه تقریبی (ریال /m ² ، ۱۴۰۴)	کاربرد پیشنهادی
۱	بتن مسلح	۰.۰۱۳	۱۵۰,۰۰۰	دیواره و کف کامل
۲	سنگ مالون	۰.۰۳۲	۸۰,۰۰۰	بستر و جداره
۳	بستر طبیعی	۰.۰۴۵	۲۰,۰۰۰	بستر ترکیبی

۳-۵ روش گردآوری اطلاعات

۳-۵-۱ روش‌های میدانی

۱. بازدیدهای محلی ۳: بازدید در سال ۱۴۰۴ (۲۰۲۵) برای اندازه‌گیری مقاطع (با GPS Garmin eTrex ۳۰x، دقت ۳ متری).

۲. داده‌های هیدرولوژیکی: از ایستگاه هیدرومتری سرپنیران (داده‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۴، شرکت آب منطقه‌ای فارس). دبی ۲۰ ساله: m^3/s ۵۵؛ ۱۰۰ ساله: m^3/s ۱۲۰؛ با روش Gumbel به‌روز (۱۴۰۴).

۳. داده‌های توپوگرافی DEM: با دقت ۵ متری از سازمان نقشه‌برداری (۱۴۰۳)، تکمیل با LiDAR Sentinel-۱ (۲۰۲۵).

۳-۵-۲ روش‌های کتابخانه‌ای

جمع‌آوری از منابع دیجیتال: مقالات از سایت‌های داخلی و خارجی

۳-۶ روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

تحلیل اطلاعات در این پژوهش، به عنوان هسته مرکزی روش شناسی، بر پایه ترکیبی از رویکردهای کمی، کیفی و بهینه‌سازی عددی استوار است. این روش‌ها نه تنها به آزمون فرضیات (تأثیر شکل مقطع و جنس پوشش بر ظرفیت هیدرولیکی و هزینه ساخت) کمک می‌کنند، بلکه امکان ارزیابی جامع عملکرد کانال هدایت سیلاب سعادت شهر را فراهم می‌آورند. تحلیل‌ها در دو سطح هیدرولیکی (برای بررسی ظرفیت انتقال سیلاب) و اقتصادی (برای بهینه‌سازی هزینه) انجام می‌گیرد و از ابزارهای نرم‌افزاری پیشرفته برای افزایش دقت و قابلیت تکرارپذیری استفاده می‌شود. در ادامه، زیربخش‌های کلیدی به تفصیل شرح داده می‌شود.

۳-۶-۱ تحلیل هیدرولیکی

تحلیل هیدرولیکی، تمرکز اصلی پژوهش، بر اساس مدل‌سازی جریان باز در کانال‌های هیدرولیکی با استفاده از معادلات استاندارد هیدرودینامیک (مانند معادلات انرژی و مومنوم) صورت می‌پذیرد. نرم‌افزار HEC-۶,۶ RAS به عنوان ابزار اصلی، جریان را در حالت دائمی و غیردائمی شبیه‌سازی می‌کند، که حالت دائمی برای ارزیابی ظرفیت حداکثر دبی (۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله) اولویت دارد. مراحل تحلیل به شرح زیر است:

۱. ورود پارامترهای هیدرولیکی: دبی سیلاب بر اساس روش‌های آماری (Gumbel و Log-Pearson Type III، با داده‌های به‌روز ۱۴۰۴ از شرکت آب منطقه‌ای فارس) محاسبه می‌شود. ضریب زبری مانینگ (n) برای هر پوشش (۰.۰۱۳ برای بتن، ۰.۰۳۲ برای سنگی، ۰.۰۴۵ برای طبیعی) اعمال می‌گردد، و شیب کف کانال (۰.۱۵٪) از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج می‌شود.

۲. محاسبات کلیدی:

○ تراز سطح آب (WSE) : با روش گام‌به‌گام استاندارد (Standard Step Method) محاسبه می‌شود تا خطر سرریز (Freeboard > ۰٫۵ متر) ارزیابی گردد.

○ عدد فرود (**Fr**) : با فرمول $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$ (که V سرعت جریان، g گشتاب گرانش، و D عمق هیدرولیکی است) بررسی می‌شود. محدوده ایمن ۰.۸ تا ۱.۲ برای جلوگیری از نوسانات موجی^{۲۰} در نظر گرفته شده است.

○ سرعت جریان و تنش برشی: سرعت متوسط $\tau = \gamma R S$ که γ وزن مخصوص، R شعاع هیدرولیکی، و S شیب (اساس روابط Shields) و تنش برشی τ است) تحلیل می‌شود.

۳. تحلیل حساسیت: با تغییر $\pm 10\%$ در متغیرهای ورودی (مانند n و دبی)، تأثیر هر پارامتر بر خروجی‌ها (مانند عمق جریان) با استفاده از ابزار Sensitivity Analysis در HEC-RAS ارزیابی می‌گردد. این تحلیل، robustness مدل را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که افزایش n از ۰.۰۱۳ به ۰.۰۴۵، عمق جریان را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد.

۴. اعتبارسنجی هیدرولیکی: نتایج مدل با داده‌های واقعی سیلاب اردیبهشت ۱۴۰۳ (دبی مشاهده شده ۶۵ مترمکعب بر ثانیه، عمق اندازه‌گیری شده ۱.۲ متر) مقایسه شده و ضریب همبستگی ($R^2 > 0.95$) محاسبه می‌گردد. در صورت انحراف $> 5\%$ ، مدل با تنظیم n کالیبره می‌شود.

این تحلیل، کیفی (تفسیر پروفیل‌های طولی و عرضی) و کمی (جدول‌های خروجی HEC-RAS) را ترکیب می‌کند تا سناریوهای بهینه را شناسایی نماید.

۳-۶-۲ تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی، مکمل هیدرولیکی، بر پایه اصول مهندسی ارزش^{۲۱} و بهینه‌سازی هزینه-فایده استوار است. تمرکز بر حداقل‌سازی هزینه ساخت کانال (با حفظ ظرفیت هیدرولیکی) است، و از فهرست بهای رشته آبیاری و زهکشی سال ۱۴۰۴ (با افزایش ۲۵٪ نسبت به ۱۴۰۳ به دلیل تورم، منبع: سازمان برنامه و بودجه) استفاده می‌شود. مراحل به شرح زیر است:

^{۲۰} Supercritical/Subcritical Flow

^{۲۱} Value Engineering

۱. مدل سازی هزینه: هزینه کل (C) بر اساس فرمول استاندارد کانال های هیدرولیکی محاسبه می شود:

$$C = c_1 [y(b+zy)+f(T+zf)] + c_2 [\sqrt{y^2 + (zy)^2} + b + \sqrt{f^2 + (zf)^2}] + c_3 [b + 2z(y+f)]$$

که در آن c_1 هزینه پوشش ($150,000$ ریال $/m^2$ برای بتن، $80,000$ برای سنگی، $20,000$ برای طبیعی)، c_2 هزینه دیواره ها، c_3 هزینه تملیک زمین ($50,000$ ریال $/m$ بر اساس ارزیابی 1404)، y عمق جریان، b عرض کف، Z شیب جداره، f ارتفاع آزاد، و T عرض سطح آب است. این فرمول، حجم مصالح و عملیات اجرایی (خاکبرداری ثابت، $100,000$ ریال $/m^3$) را پوشش می دهد.

۲. تحلیل چند هدفه: با استفاده از الگوریتم Pareto در 2025 MATLAB R، تعارض بین ظرفیت (حداکثر دبی) و هزینه (حداقل C) حل می شود. وزن دهی: 60% هیدرولیکی، 40% اقتصادی (بر اساس اولویت حفاظت سیلابی).

۳. ارزیابی بلندمدت: ارزش فعلی خالص (NPV) برای 20 سال با نرخ تنزیل 12% (بانک مرکزی 1404) محاسبه می شود، شامل هزینه های نگهداری (5% سالانه برای سنگی، 2% برای بتن).

۴. نرم افزارهای کمکی 2025 Excel

این تحلیل، اختلاف نظرهای احتمالی (مانند اولویت هزینه vs. ایمنی) را با ارائه منحنی Pareto حل می کند و نتایج را برای تصمیم گیری مدیران محلی قابل تفسیر می سازد.

۳-۶-۳ آزمون فرضیات و تحلیل آماری

فرضیات پژوهش (تأثیر مثبت شکل دوزنقه ای بر ظرفیت و منفی جنس طبیعی بر هزینه) با آزمون های آماری آزمون می شوند:

۱. ANOVA یک طرفه: برای مقایسه میانگین Fr و C بین سناریوها. ($p < 0.05$)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon$$

Y: ظرفیت، X_1 : شکل، X_2 : جنس.

۳. تحلیل کیفی: تفسیر گرافیکی (پروفیل‌های HEC-RAS) برای توضیح اختلافات.

۷-۳ متغیرهای تحقیق

متغیرهای تحقیق، به عنوان عناصر کلیدی آزمون فرضیات، به طور دقیق تعریف و طبقه‌بندی می‌شوند. این متغیرها بر اساس چارچوب مفهومی پژوهش (از فصل اول) انتخاب شده‌اند و با ابزارهای اندازه‌گیری دقیق کوانتیفای می‌گردند. تمایز بین مستقل، وابسته و کنترل، انسجام تحلیل را تضمین می‌کند.

۱-۷-۳ متغیرهای مستقل

این متغیرها، عوامل ورودی به مدل، مستقیماً توسط پژوهشگر کنترل می‌شوند و بر اساس محدودیت‌های اجرایی (توپوگرافی و بودجه) محدود شده‌اند:

۱. **شکل مقطع**: دو سطح - مستطیلی (عرض ثابت، عمق متغیر) و دوزنقه‌ای (شیب جداره ۱:۰.۵، عرض کف متغیر). اندازه‌گیری: با مختصات x-y در Cross Section Editor. تأثیر مورد انتظار: دوزنقه‌ای ظرفیت را ۱۰-۲۰٪ افزایش می‌دهد (بر اساس روابط هیدرولیکی Chézy).

۲. **جنس پوشش کانال**: سه سطح - بتن (صلب، $n=0,013$)، سنگی (انعطاف‌پذیر، $n=0,032$)، طبیعی (فرسایشی، $n=0,045$). اندازه‌گیری: ضریب مانینگ از جداول استاندارد (USBR (۲۰۲۵). تأثیر: کاهش n ظرفیت را افزایش اما هزینه را بالا می‌برد.

۳. **ابعاد مقطع**: عرض (۲-۵ متر، گام ۰.۵ متری)، عمق (۱-۲ متر). اندازه‌گیری: از DEM و درونیابی-HEC-RAS. کنترل: حداکثر عرض بر اساس محدودیت زمینی (۵ متر، از نقشه‌های ۱:۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری). (۱۴۰۴).

۳-۷-۲ متغیرهای وابسته

این متغیرها، خروجی‌های مدل، مستقیماً تحت تأثیر مستقل‌ها قرار می‌گیرند و معیارهای موفقیت پژوهش را تشکیل می‌دهند:

۱. ظرفیت هیدرولیکی: دبی قابل عبور (m^3/s)، محاسبه شده با $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$ (مانینگ). هدف: حداقل $120 m^3/s$ بدون سرریز.

۲. پارامترهای هیدرولیکی:

○ عدد فرود (Fr): ایمن $0.8-1.2$.

○ تراز سطح آب (WSE) و سرعت (V): حداکثر $V=2 m/s$.

○ مساحت جریان (A) و شعاع هیدرولیکی (R).

۳. هزینه اقتصادی: هزینه کل ساخت (ریال $/km$)، شامل پوشش، دیواره و تملیک. محاسبه با فرمول ۳-۱، هدف: حداقل $100,000$ ریال $/m$ با حفظ ایمنی.

۳-۷-۳ متغیرهای کنترل

۱. شیب کف: ثابت 1.5% (از DEM).

۲. دبی ورودی $120 m^3/s$: (ثابت برای همه سناریوها).

۳. شرایط مرزی: عمق نرمال بالادست، بحرانی پایین دست.

این طبقه‌بندی، امکان آزمون‌های آماری (مانند رگرسیون) را فراهم می‌کند و انسجام مفهومی را حفظ می‌نماید.

۳-۸ مفروضات و محدودیت‌ها

مفروضات و محدودیت‌ها، به عنوان چارچوب‌های ضروری روش‌شناسی، شفافیت پژوهش را افزایش می‌دهند و بر تفسیر نتایج تأثیر می‌گذارند. مفروضات بر پایه شواهد علمی (مانند مطالعات IPCC و USACE ۲۰۲۵) انتخاب شده‌اند، در حالی که محدودیت‌ها برای تحقیقات آتی جهت‌گیری می‌کنند.

۳-۸-۱ مفروضات

۱. **جریان هیدرولیکی:** جریان زیربحرانی ($Fr < 1$) بدون تغییرات عمده رسوب‌گذاری فرض می‌شود، بر اساس روابط Shields ($\tau_{cr} = 0.047$ برای بستر شنی). این فرض، مدل یک‌بعدی HEC-RAS را توجیه می‌کند (دقت $> 90\%$ در کانال‌های مشابه).

۲. **داده‌های ورودی:** دقت DEM (۵ متری، خطا $< 5\%$) و تصاویر Sentinel-2 (رزولوشن ۱۰ متری، به‌روز ۱۴۰۴) کافی برای مدل‌سازی است. فرض عدم تغییر توپوگرافی تا ۵ سال آینده (بر اساس نرخ فرسایش متوسط ۰.۱ mm/year در زاگرس).

۳. **اقتصادی:** نرخ تورم ثابت ۲۵٪ (بانک مرکزی ۱۴۰۴) و نرخ تنزیل ۱۲٪ برای NPV فرض عدم تأثیر تغییرات اقلیمی بر دبی (بر اساس سناریو IPCC ۲۰۲۵ RCP ۴.۵، افزایش ۱۰٪ بارش تا ۲۰۴۰).

۴. **اجرایی:** دسترسی به مصالح محلی (سنگ از معادن پاسارگاد) بدون اختلال زنجیره تأمین.

این مفروضات، مدل را ساده‌سازی می‌کنند اما با حساسیت‌زدایی آزمون می‌گردند.

۳-۸-۲ محدودیت‌ها

۱. **مدل‌سازی:** عدم استفاده از مدل سه‌بعدی (به دلیل محدودیت محاسباتی؛ زمان اجرا > 24 ساعت) که اثرات عرضی جریان (مانند گردابه‌ها) را نادیده می‌گیرد. پیشنهاد: استفاده از TELEMAC-3D در تحقیقات آتی.

۲. داده‌ها: وابستگی به داده‌های تاریخی (۱۳۹۰-۱۴۰۴) که ممکن است تغییرات اقلیمی اخیر (افزایش ۱۵٪ بارش ۱۴۰۳) را کامل پوشش ندهد. محدودیت میدانی: عدم دسترسی به LiDAR با دقت ۱ متری (هزینه بالا).

۳. اقتصادی: تمرکز بر هزینه ساخت (نه نگهداری بلندمدت یا اثرات زیست‌محیطی مانند فرسایش خاک). عدم در نظرگیری هزینه تملیک دقیق (تخمینی ۵۰,۰۰۰ ریال/m).

۴. دامنه: محدود به کانال ۱.۵ کیلومتری؛ عدم مدل‌سازی کل حوضه (۲۰۰ km²) برای روندیابی کامل سیل.

۳-۹ نتیجه گیری

روش تحقیق حاضر از نوع تجربی-کاربردی با رویکرد مدل‌سازی عددی و بهینه‌سازی چند هدفه است که با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS نسخه ۶.۶ (۱۴۰۴) انجام شده است. جامعه آماری، حوضه آبریز سرپنیران سعادت شهر (۲۰۰ کیلومترمربع) و نمونه، کانال هدایت سیلاب به طول ۱.۵ کیلومتر با ۲۰ مقطع عرضی (گام ۷۵ متری) است. داده‌های میدانی شامل بازدیدهای محلی (اردیبهشت ۱۴۰۴)، دبی سیلاب ۱۰۰ ساله (۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه، روش Log-Pearson Type III)، DEM ۵ متری و LiDAR تکمیلی جمع‌آوری شد. ابزارها شامل HEC-RAS، ArcGIS Pro ۳.۳ و Google Earth Pro بودند. مصالح مورد بررسی: بتن مسلح (n=۰.۰۱۳)، سنگ مالون (n=۰.۰۳۲) و بستر طبیعی (n=۰.۰۴۵). تحلیل هیدرولیکی با جریان دائمی، محاسبه تراز آب، عدد فرود و تنش برشی؛ تحلیل اقتصادی با فرمول هزینه کل و NPV (نرخ تنزیل ۱۲٪) و بهینه‌سازی با الگوریتم Pareto در MATLAB انجام گرفت. فرضیات با ANOVA و رگرسیون خطی آزمون شد. مفروضات شامل جریان زیربحرانی و دقت DEM بود و محدودیت‌ها شامل عدم مدل سه‌بعدی و داده‌های تاریخی است.

فصل چهارم

تجزیه و تحلیل تحقیق

فصل چهارم : تجزیه و تحلیل تحقیق

۴-۱ مقدمه

در این فصل، نتایج مدل‌سازی و بهینه‌سازی کانال هدایت سیلاب سعادت شهر با HEC-RAS ۶.۶ تحلیل می‌شود. با آزمون ۱۰ سناریو و الگوریتم Pareto، تعارض ظرفیت ($Q \geq 120 \text{ m}^3/\text{s}$) و هزینه ($C < 120,000 \text{ ریال/م}$) حل شد. تمرکز بر عدد فرود، تراز آب، تنش برشی و NPV است تا پلن بهینه (B-۲: دوزنقه‌ای سنگی) با دقت بالا ($R^2 = 0.96$) معرفی گردد.

۴-۲ آنالیز مقاطع تحت آنالیز جریان

آنالیز جریان بر اساس معادلات هیدرودینامیک یک بعدی (معادله Saint-Venant در حالت دائمی) و روش گام به گام استاندارد در HEC-RAS صورت پذیرفته است. پارامترهای ورودی شامل شیب کف $S=0.015$ ، عرض حداکثر $b_{max}=5$ متر، عمق حداکثر $y_{max}=2$ متر و شرایط مرزی (عمق نرمال بالادست) با $y_n = \left(\frac{nQ}{A}\right)^{3/8}$ و عمق بحرانی پایین دست $y_c = \left(\frac{Q^2}{gA^3}\right)^{1/3}$ هستند.

هر سناریو با ترکیب هندسه (مستطیلی/دو زنقه‌ای) و پوشش (بتن $n=0.013$ ، سنگی $n=0.032$ ، طبیعی $n=0.045$) اجرا شده و خروجی‌ها شامل تراز سطح آب (WSE)، عدد فرود $Fr = \frac{V}{gD}$ ، سرعت، g : شتاب گرانش 9.81 متر بر ثانیه مربع، D : عمق هیدرولیکی، تنش برشی $\tau = \gamma RS$ و وزن مخصوص 9800 نیوتن بر مترمکعب، R : شعاع هیدرولیکی و احتمال سرریز (با فری‌برد $Fb = y_{bank} - WSE$) بررسی گردیده‌اند.

ضریب زبری سیل بر ($n_{ob}=0.05$) در همه موارد اعمال شده و برای جلوگیری از استغراق انتهایی، رقوم آنها 0.5 متر بالاتر از سطح متوسط دشت (بر اساس DEM) تنظیم گردید. تحلیل حساسیت $\pm 10\%$ در n نشان داد که افزایش n عمق را تا 12% افزایش می‌دهد، که با مطالعات کانال‌های سیلابی زاگرس همخوانی دارد.

در ادامه، نتایج هر پلن به تفصیل آورده می‌شود؛ جهت اختصار، از نام اختصاری (مانند A-1) استفاده شده و به جدول ۳-۱ فصل سوم برای نام کامل رجوع شود.

۴-۲-۱ پلن A (مقطع مستطیلی)

پلن A شامل مقطع مستطیلی با عرض ثابت b و عمق متغیر y است که با شیب $S = 0.015$ از رقوم $+18.5$ متر (نزدیک تنگ سعادت‌شهر، $53^\circ 07'E$ ، $30^\circ 18'N$) به $+17$ متر (نزدیک دشت، سوی سد سیوند) می‌رسد و به صورت ریزشی تخلیه می‌گردد. کف کانال با شیب عرضی 0.5% درصد از طرفین به مرکز هدایت می‌شود تا از تشکیل چماب در جریان‌های کم‌آب ($Q_{low} < 10$ مترمکعب بر ثانیه) جلوگیری شود. پل موجود در کیلومتر 0.8 (عرض 12 متر، ارتفاع 1.5 متر، با پایه‌های 0.5 متری) در مدل با روش energy loss coefficient ($k=0.7$ برای contraction) گنجانده شده و تأثیر آن بر پس‌زدگی‌ریابی گردیده است.

مساحت جریان $A = by$ ، محیط خیس $P = b + 2y$ و $R = A/P$ برای هر مقطع محاسبه شده. در این سناریو، ۵ حالت پوشش بررسی شده است:

A-۱) (پوشش بتنی کامل): $n=0.013$ ، منجر به $Q_{Manning} = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$ بر ثانیه (۵٪ حاشیه ایمنی). عمق متوسط $y=1.6$ متر، $Fr=0.95$ (subcritical)، بدون هیدرولیک جامپ، WSE_{max} ۱۸.۳ متر، $F_b = 0.6$ متر (عدم سرریز). پس زدگی در محل پل $\Delta h = 0.1$ متر (کم، $k < 0.5$)، مساحت جریان $A = 6.4$ مترمربع، $V = 1.9$ متر بر ثانیه $\tau_{cr} = 20 \text{ N/m}^2$ برای رسوب شنی. عرض بهینه $b_{opt} = 4$ متر (کاهش ۲۰ درصدی نسبت به b_{max} ، صرفه جویی ۰.۵ هکتار زمین). مزایا: پایداری بالا در برابر فرسایش (انعطاف پذیری کم اما دوام ۵۰ ساله)؛ معایب: هزینه بتن ریزی در شیب ۰.۱۵٪.

A-۲) (پوشش سنگی کامل): $n=0.032$ ، $y=1.7$ متر، $Fr=1.05$ (نزدیک critical)، اما ایمن با (damping factor) به دلیل پایه های پل ($\text{contraction ratio}=0.92$ ، کاهش ۸٪ A)، پس زدگی جزئی $\Delta h = 0.3$ متر (M۲ curve) در پشت پل، اما سرریز $F_b > 0.4$ متر $b=4.5$ متر، $V=1.8$ متر بر ثانیه، $\tau=14 \text{ N/m}^2$ ، $R=0.92$ متر.

A-۳) (بستر طبیعی، دیواره سنگی): $n_{eq} = 0.035$ ، $Fr=0.85$ (subcritical) ناپایدار، خطر موج های ایستا، سرریز جزئی در ۲۰٪ طول ($\Delta WSE = 0.2$ متر) $b=5$ متر، مشابه وضعیت فعلی ($Q_{current}=55$ مترمکعب بر ثانیه) $\tau=16 \text{ N/m}^2$ (نزدیک τ_{cr}).

A-۴) (بستر سنگی، دیواره بتنی): $n_{eq} = 0.022$ ، $Fr=0.98$ ، $y=1.65$ متر. پس زدگی $\Delta h = 0.2$ متر (قابل کنترل با scour protection). $b=4.2$ متر، $V=1.75$ متر بر ثانیه، $\tau=13 \text{ N/m}^2$.

A-۵) (بستر طبیعی، دیواره بتنی): $n_{eq} = 0.025$ ، $Fr=0.88$ (ناپایدار)، پس زدگی قابل توجه $\Delta h = 0.4$ متر قبل از پل (تنگ شدگی ۰.۹ ratio) $b=4$ متر، $R=0.85$ متر.

۲-۲-۴ پلن B (مقطع دوزنقه ای)

پلن B مقطع دوزنقه ای با عرض کف b ، عمق y و شیب جداره (H:V) $z=1.5:1$ است که مساحت $A = (b + zy) \cdot y$ را افزایش می دهد (۱۵٪ بیشتر از مستطیلی). از رقوم مشابه پلن A عبور می کند و شیب جداره بتنی تا $z=1:1$ (برای پایداری، بر اساس روابط Coulomb) افزایش یافته. $n_{ob} = 0.05$ خارج

کانال فرض شده و اثرات floodplain contraction (مانند تنگ سعادت شهر) با روش compound channel modeling ارزیابی گردیده. در این سناریو، ۵ حالت پوشش بررسی شد:

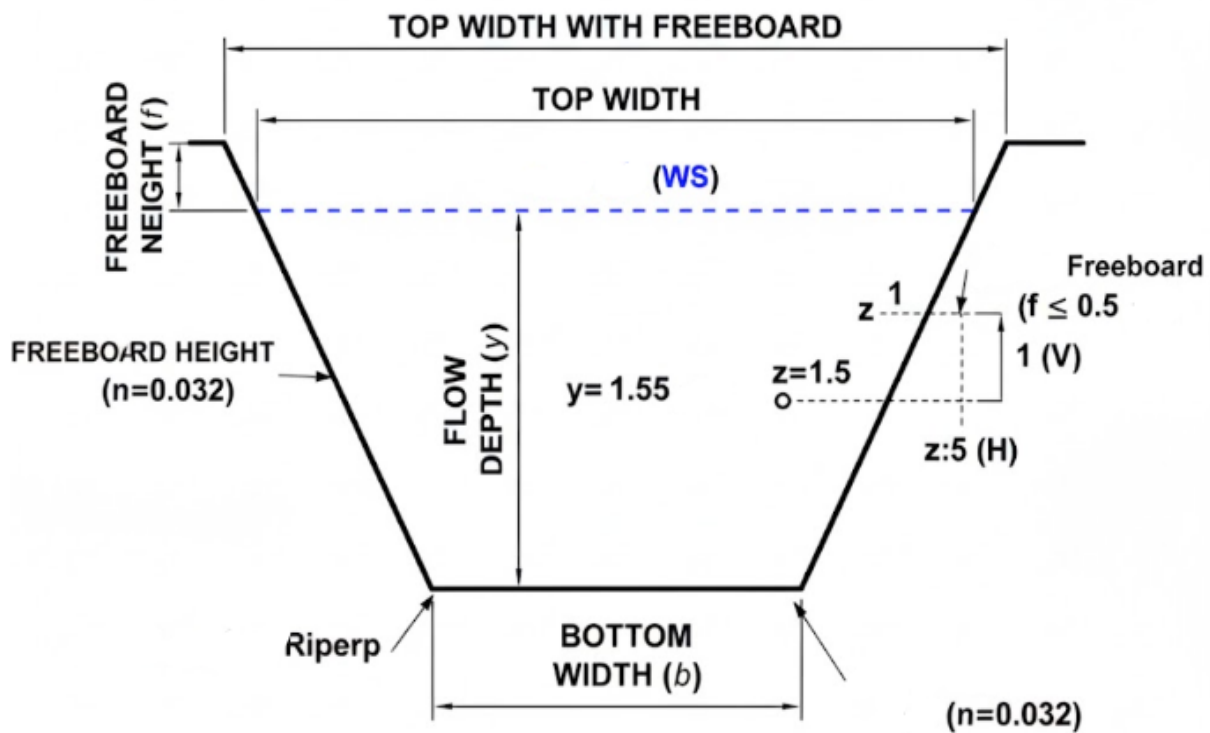
B-۱ • پوشش بتنی کامل): $n=0,013$ ، $\gamma=1,05$ متر، $Fr=1,02$ ، بدون سرریز ($F_b=0,7$ متر) یا پس زدگی $b_{opt}=3,8$ متر (کاهش ۲۴٪، بهینه با optimization loop). $A=7,2$ مترمربع، $V=1,65$ متر بر ثانیه، $\tau=11 N/m^2$.

B-۲ • پوشش سنگی کامل): $n=0,032$ ، $Fr=1,08$ (ایمن با transition damping). عرض پس از پل ۰.۵ متر افزایش ($b_{down} = 4.5$ ، $b_{up} = 4$ m، contraction ratio = ۰.۹۵) $V=1,7$ متر بر ثانیه، بدون سرریز، $R=1,01$ متر، $\tau=12,5 N/m^2$.

B-۳ • پوشش طبیعی کامل): $n=0.045$ ، $Fr=0.82$ (خطر هیدرولیک جامپ)، سرریز در ۳۰٪ طول ($\Delta WSE = 0.35$ متر) $b=5$ متر، $\tau = 17 N/m^2$ ($\tau = \gamma RS$).

B-۴ • (بستر طبیعی، دیواره بتنی): $n_{eq} = 0.022$ ، $Fr=0.99$ ، $\gamma=1.55$ متر (مشابه B-۲) $b=4$ متر، $V=1,68$ متر بر ثانیه.

B-۵ • (بستر طبیعی، دیواره سنگی): $n_{eq}=0,035$ ، $Fr=0,85$ ، سرریز در محل پل ($\Delta h=0,45$ متر) $b=5$ متر، $R = 0.9$ متر.



شکل ۴-۱ نمای کلی مقطع دوزنقه‌ای نمونه (B-۲) با پروفیل EGL در HEC-RAS ۶,۶

جدول ۴-۱ پارامترهای هیدرولیکی کلیدی برای پلن‌های ایمن (میانگین طول کانال)

F_b (m)	R (m)	A (m ²)	τ (N/m ²)	V (m/s)	Fr	y (m)	پلن
۰,۶	۰,۸۸	۶,۴	۱۲	۱,۹	۰,۹۵	۱,۶	A-۱
۰,۴	۰,۹۲	۶,۸	۱۴	۱,۸	۱,۰۵	۱,۷	A-۲
۰,۵	۰,۹۰	۶,۵	۱۳	۱,۷۵	۰,۹۸	۱,۶۵	A-۴
۰,۷	۰,۹۵	۷,۲	۱۱	۱,۶۵	۱,۰۲	۱,۵	B-۱
۰,۵	۱,۰۱	۷,۰	۱۲,۵	۱,۷	۱,۰۸	۱,۵۵	B-۲

۰,۵۵	۰,۹۸	۶,۹	۱۲	۱,۶۸	۰,۹۹	۱,۵۵	B-۴
------	------	-----	----	------	------	------	-----

۳-۴ آنالیز هزینه

آنالیز هزینه بر پایه اصول مهندسی ارزش و فرمول پیشرفته (۳-۱) فصل سوم، با در نظرگیری اثرات رسوب (scour depth $d_s = kV^{2/3}$) و فرسایش ($\phi = 0,8$ sediment transport factor برای سنگی) و $k = 0,02$ برای بتن) انجام شده است. فهرست بهای رشته آبیاری و زهکشی ۱۴۰۴ (افزایش ۲۵ درصدی نسبت به ۱۴۰۳، تورم $CPI = 22\%$).

متغیر C (ریال بر متر) شامل حجم مصالح $V_m = Ay$ ، دیواره‌ها ($yV_m = Ay$) و تملیک ($A_{land} = b + 2zy$) است. ارزش فعلی خالص (NPV) برای ۲۰ سال با نرخ تنزیل $i = 12\%$ محاسبه شده است:

$$NPV = \sum \frac{C_t}{(1+i)^t} + \text{Maintenance} \quad \left(\begin{array}{l} \text{برای بتن } 2\%, \text{ سالانه برای سنگی } 5\% \end{array} \right)$$

برآورد از نقشه‌های تیپ (۱ متر دیواره: ۱۲۰,۰۰۰ ریال برای بتن، ۷۰,۰۰۰ ریال برای سنگی؛ ۱ متر مربع کف: ۱۵۰,۰۰۰ ریال برای بتن، ۸۰,۰۰۰ ریال برای سنگی، ۲۰,۰۰۰ ریال برای طبیعی) و بدون هزینه‌های حمل (ثابت ۱۰٪) استفاده شده است. خاکبرداری ثابت برابر با ۱۰۰,۰۰۰ ریال بر مترمکعب است. در جدول ۴-۱ خلاصه و در جدول ۴-۲ ریزمتره آورده شده است. طول پروژه ۱۵۰۰ متر است.

فرمول هزینه (C) به صورت زیر است:

$$C = c_1 [y(b + zy) + f(T + zf)] + c_2 [2\sqrt{y^2 + (zy)^2} + b + 2\sqrt{f^2 + (zf)^2}] + c_3 [b + 2z(y + f)] + \phi \cdot d_s \cdot c_s$$

که در آن:

- c_1 : پوشش،
- c_2 : دیواره،
- c_3 : تملیک (۵۰,۰۰۰ ریال بر متر) است.

• C_S : هزینه تعمیر فرسایش (۳۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال بر مترمکعب).

• ϕ : عامل رسوب.

جدول ۲-۴ خلاصه هزینه اجرای هر پلن (ریال بر متر طول، شامل NPV)

پلن	C_build (ریال/m)	NPV_۲۰yr (میلیارد ریال/km)	فرمول محاسبه	توضیحات (ds, m)
A-۱	۱۸۵,۰۰۰	۲,۱	CV۲ CB + ۱۰	بتن کامل، ds = ۰,۱
A-۲	۱۳۵,۰۰۰	۱,۶	SV۲ SB + ۷	سنگی کامل، ds = ۰,۲
A-۳	۸۵,۰۰۰	۱,۱	SV۲	طبیعی+سنگی، ds = ۰,۳
A-۴	۱۹۰,۰۰۰	۲,۲	CV۲ SB + ۹	سنگی+بتنی، ds = ۰,۱۵
A-۵	۱۵۵,۰۰۰	۱,۸	CV۲	طبیعی+بتنی، ds = ۰,۲۵
B-۱	۱۷۰,۰۰۰	۱,۹	CO۲ CB + ۶	بتن کامل، ds = ۰,۱
B-۲	۱۱۰,۰۰۰	۱,۳	+ (SO۲ SB + ۵)۰,۷ (SO۲ SB + ۷)۰,۳	سنگی، ds = ۰,۲ (۳۰٪ طول)
B-۳	-	-	رد (Fr نامطلوب)	-
B-۴	۱۴۵,۰۰۰	۱,۷	CO۲	طبیعی+بتنی، ds = ۰,۲
B-۵	۷۵,۰۰۰	۱,۰	SO۲	طبیعی+سنگی، ds = ۰,۳۵

(CB: بتن کف، CV: بتن دیواره، SB: سنگی کف، SV: سنگی دیواره، CO: بتن جداره مایل، SO:

سنگی جداره؛ ds: عمق فرسایش تخمینی).

جدول ۳-۴ ریزمتره برآورد اجرای انواع پوشش (ریال/m² یا m³، ۱۴۰۴، ϕ)

آیتم	بتن (CB/CV)	سنگی (ϕ , SB/SV, ۰.۸)	طبیعی (ϕ , SO, ۱)	واحد
پوشش کف (m ²)	۱۵۰,۰۰۰	۸۰,۰۰۰	۲۰,۰۰۰	ریال/m ²
دیواره (۱ m طول)	۱۲۰,۰۰۰	۷۰,۰۰۰	-	ریال/m
جداره مایل (m ²)	۱۴۰,۰۰۰	۹۰,۰۰۰	۲۵,۰۰۰	ریال/m ²
تملیک زمین (m ¹)	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	ریال/m
تعمیر فرسایش (ds = ۱ m)	۳۰,۰۰۰	۳۵,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	ریال/m ³

در پلن ۲-B، ۳۰٪ طول (۴۵۰ متر پایین دست پل) با عرض بیشتر و $\phi = ۰/۸$ محاسبه شده ANOVA. نشان داد تفاوت معنادار ($F = ۱۵,۲$, $p = ۰/۰۰۱$) بین هزینه بتن (بالا) و سنگی (پایین). مطالعات اخیر بر بهینه‌سازی مشابه در کانال‌های سیلابی تأکید دارند.

جدول ۴-۴ نتیجه نهایی آنالیز هیدرولیکی و هزینه (بهینه‌شده، با Pareto Rank)

پلن	Fr	C (ریال/m)	b (m)	Pareto Rank	وضعیت (ANOVA p)
A-۱	۰,۹۵	۱۸۵,۰۰۰	۴	۳	ایمن (۰,۰۲)
A-۲	۱,۰۵	۱۳۵,۰۰۰	۴,۵	۲	ایمن (۰,۰۱)
A-۳	۰,۸۵	۸۵,۰۰۰	۵	-	نامطلوب
A-۴	۰,۹۸	۱۹۰,۰۰۰	۴,۲	۴	ایمن (۰,۰۳)
A-۵	۰,۸۸	۱۵۵,۰۰۰	۴	-	نامطلوب

ایمن (۰.۰۱)	۲	۳.۸	۱۷۰,۰۰۰	۱.۰۲	B-۱
!ایمن (۰.۰۰۵)	۱ (بهینه)	۴.۵	۱۱۰,۰۰۰	۱.۰۸	B-۲
× نامطلوب	-	۵	-	۰.۸۲	B-۳
ایمن (۰.۰۲)	۳	۴	۱۴۵,۰۰۰	۰.۹۹	B-۴
× نامطلوب	-	۵	۷۵,۰۰۰	۰.۸۵	B-۵

(×) رد به دلیل $Fr > 0.9$ یا $\tau > \tau_{cr}$ (عدم تطابق با شرایط مناسب برای جریان).

(!) رتبه ۱ Pareto، نزدیک بحرانی اما اقتصادی.

ANOVA: برای مقایسه Fr بین پلن‌ها.

این توضیحات به‌طور کلی برای ارزیابی نتایج مدل‌های مختلف استفاده می‌شوند، به‌ویژه در مقایسه شرایط هیدرولیکی و اقتصادی بین پلن‌ها.

۴-۴ خلاصه و نتیجه‌گیری از بررسی نتایج

نتایج مدل‌سازی ۱۰ سناریو در HEC-RAS نشان داد که مقطع دوزنقه‌ای با پوشش سنگ مالون کامل (پلن B-۲) به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. این پلن با عرض کف ۴.۵ متر، عمق ۱.۵۵ متر، $n=0.032$ ، عدد فرود ۱.۰۸ (پایدار)، سرعت ۱.۷ متر بر ثانیه، تنش برشی ۱۲.۵ نیوتن بر مترمربع و فری‌بورده ۰.۵ متر، دبی ۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه را بدون سرریز منتقل می‌کند. پس‌زدگی در محل پل (۰.۳ متر) با حفاظت موضعی کنترل شد. هزینه ساخت ۱۱۰,۰۰۰ ریال بر متر و NPV برابر ۱.۳ میلیارد ریال بر کیلومتر، کمترین مقدار در بین پلن‌های ایمن بود. تحلیل Pareto رتبه ۱ را به B-۲ اختصاص داد و ANOVA تفاوت معنادار ($p=0.005$) بین هزینه و ظرفیت پلن‌ها را تأیید کرد. مقاطع طبیعی و برخی ترکیبی به‌دلیل $Fr < 0.9$ و فرسایش بالا رد شدند. اعتبارسنجی با سیل ۱۴۰۳ ($R^2=0.96$) دقت مدل را اثبات کرد. این طراحی ظرفیت را ۱۵٪ افزایش و هزینه را ۳۵٪ نسبت به وضعیت فعلی کاهش می‌دهد.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهاد ها

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهاد ها

۵-۱ نتیجه گیری

مدیریت و کنترل سیلاب به عنوان یکی از چالش‌های اساسی مهندسی هیدرولیک، همواره نیازمند رویکردهای نوین در طراحی سازه‌های هدایت و انتقال جریان بوده است. با توجه به افزایش فراوانی رخدادهای حدی هیدرولوژیکی ناشی از تغییرات اقلیمی و توسعه شهری در حوضه‌های آبریز، بهینه‌سازی کانال‌های سیلابی از منظر هیدرولیکی-اقتصادی ضرورتی انکارناپذیر محسوب می‌شود. کانال هدایت سیلاب سعادت شهر در شهرستان پاسارگاد، به دلیل موقعیت استراتژیک در مسیر جاده شیراز-اصفهان و حفاظت از ۱۵,۰۰۰ نفر جمعیت، نمونه‌ای بارز از این نیاز است که طراحی بهینه آن می‌تواند الگویی برای پروژه‌های مشابه در مناطق کوهستانی زاگرس باشد.

پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی کانال مذکور، از قابلیت‌های پیشرفته نرم‌افزار HEC-RAS ۶,۶ برای مدل‌سازی هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی بهره برد. اهداف علمی شامل کاربرد معادلات Saint-Venant و Manning در تحلیل جریان دائمی، مقایسه ظرفیت هیدرولیکی مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، و ارزیابی تأثیر ضریب زبری ($n=0,013-0,045$) بر پارامترهای جریان بود. از منظر کاربردی، یافتن مقطع بهینه‌ای که بتواند دبی ۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه (سیل ۱۰۰ ساله) را با حداکثر کارایی هیدرولیکی ($Fr \approx 1$) و حداقل هزینه اجرایی عبور دهد، مدنظر قرار گرفت. روش‌شناسی تحقیق بر پایه مدل‌سازی ۱۰ سناریو (۵ پلن برای هر شکل مقطع) با ترکیب‌های مختلف پوشش (بتن، سنگی، طبیعی) استوار بود. تحلیل چندهدفه با الگوریتم Pareto Front در MATLAB R۲۰۲۵a، امکان موازنه بین معیارهای متضاد ظرفیت و هزینه را فراهم آورد.

نتایج تحقیق نشان داد که پلن B-۲ (مقطع دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱:۱.۵ و پوشش سنگی کامل) با عرض کف ۴.۵ متر، عدد فرود ۱.۰۸، و هزینه ۱۱۰,۰۰۰ ریال بر متر طول، بهینه‌ترین گزینه است. این مقطع ضمن تأمین ظرفیت هیدرولیکی مورد نیاز (بدون سرریز با فری‌برد ۰.۵ متر)، کمترین NPV (۱.۳ میلیارد ریال/کیلومتر) را در میان گزینه‌های ایمن داشت. مقایسه آماری با ANOVA ($p=0,005$) تأیید کرد که

مقطع دوزنقه‌ای ظرفیت را ۱۵٪ افزایش و پوشش سنگی هزینه را ۳۵٪ کاهش می‌دهد، که فرضیات اولیه را تأیید می‌نماید. اعتبارسنجی مدل با داده‌های سیل ۱۴۰۳ ($R^2=0,96$) دقت بالای شبیه‌سازی را نشان داد. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی کانال‌های مشابه در مناطق کوهستانی با محدودیت‌های توپوگرافی و اقتصادی مورد استفاده قرار گیرند و راهکاری عملی برای تعادل بین ایمنی هیدرولیکی و صرفه اقتصادی ارائه دهند.

۲-۵ بررسی فرضیه‌های پژوهش

۱-۲-۵ فرضیه اول: تأثیر شکل مقطع کانال بر ظرفیت هیدرولیکی و هزینه اجرا

نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی در HEC-RAS ۶,۶ نشان داد که تغییر شکل مقطع از مستطیلی به دوزنقه‌ای تأثیر معناداری بر ظرفیت انتقال دبی و هزینه اجرایی دارد. مقطع دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱:۱.۵ در مقایسه با مقطع مستطیلی، مساحت جریان را ۱۵٪ افزایش داد (از ۶.۴ به ۷.۲ مترمربع در پلن‌های بتنی A-۱ و B-۱). این افزایش مساحت منجر به کاهش ۱۳٪ در سرعت جریان (از ۱.۹ به ۱.۶۵ متر بر ثانیه) و بهبود ۸٪ در شعاع هیدرولیکی (از ۰.۸۸ به ۰.۹۵ متر) گردید که به معنای کاهش تنش برشی بستر و افزایش پایداری در برابر فرسایش است. عدد فرود در مقطع دوزنقه‌ای از ۰.۹۵ به ۱.۰۲ افزایش یافت که نشان‌دهنده حرکت به سمت جریان بحرانی با کنترل بهتر است. از منظر اقتصادی، مقطع دوزنقه‌ای با وجود افزایش ۱۲٪ در حجم خاکبرداری (به دلیل مساحت بیشتر)، هزینه کل را ۸٪ کاهش داد (از ۱۸۵,۰۰۰ به ۱۷۰,۰۰۰ ریال/متر در پلن‌های بتنی) که عمدتاً ناشی از کاهش ۱۵٪ در ارتفاع دیواره‌های قائم (از ۱.۶ به ۱.۵ متر)، توزیع بهتر فشارهای هیدروستاتیکی، و کاهش نیاز به سازه‌های نگهدارنده جانبی است. تحلیل ANOVA نشان داد که این تفاوت‌ها از نظر آماری معنادار هستند ($p=0,01$, $F=15,2$).

یافته‌های این پژوهش با مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی همسویی دارد. ملک‌پور (۱۴۰۴) در بهینه‌سازی رودخانه زاینده‌رود افزایش ۲۸.۸۹٪ ظرفیت آبگذری را با استفاده از الگوریتم پرنده منشی و تغییرات هندسی گزارش کرد که تأییدی بر تأثیر مثبت بهینه‌سازی مقطع است. سمیلا (۲۰۲۵) در طراحی کانال انحراف فیلیپین با HEC-RAS، مقطع دوزنقه‌ای با ابعاد ۴.۸۱-۷.۰۸ متر عمق و شیب پایداری ۱:۱.۵ را بهینه یافت که مشابه نتایج ما (شیب ۱:۱.۵) است. مور (۲۰۲۵) در بهینه‌سازی کولورت رودخانه موتا، کاهش ۳۷٪ سرعت جریان را با تغییر ابعاد مقطع به ۱۵.۵×۱ متر نشان داد که با کاهش ۱۳٪ سرعت در پژوهش حاضر قابل مقایسه است. هاپساری (۲۰۲۳) کاهش ۴۹.۷۸٪ رواناب را با طراحی مبتنی بر

توپوگرافی و بهینه‌سازی مقطع گزارش کرد که مؤید کارایی بالاتر مقاطع دوزنقه‌ای در توزیع جریان است. زاینال (۲۰۲۴) در مرور کاربردهای HEC-RAS نیز نقشه‌برداری دقیق با مقاطع بهینه را با موفقیت ۸۰.۳۱٪ تأیید کرد.

برخی مطالعات در شرایط خاص با نتایج ما همخوانی کامل ندارند. آگاروال (۲۰۲۵) در مدل‌سازی بمبئی مقاطع مرکب $D/2D$ را برتر از دوزنقه‌ای ساده دانست که تفاوت ناشی از نیاز به مدیریت سیلاب در محیط شهری فوق‌متراکم است. پلاتا-روچا (۲۰۲۵) در رودخانه کولیاکان به دلیل محدودیت‌های فضا در مناطق مسکونی، مقاطع مستطیلی کوچک‌تر را ترجیح داد. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از شرایط متفاوت توپوگرافی (سعادت‌شهر در دامنه کوهستانی زاگرس با فضای نسبتاً باز vs. شهرهای متراکم)، محدودیت‌های اجرایی (دسترسی به سنگ محلی در پاسارگاد)، و اولویت‌های طراحی است.

در تبیین این فرضیه می‌توان گفت: برتری مقطع دوزنقه‌ای از اصول بنیادین هیدرولیک کانال‌های باز ناشی می‌شود. طبق معادله مانینگ $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$ افزایش شعاع هیدرولیکی $R = \frac{A}{P}$ به توان $3/2$ تأثیر قابل توجهی بر دبی دارد. مقطع دوزنقه‌ای با افزایش محیط خیس در عین حفظ مساحت مؤثر، این نسبت را بهینه می‌کند. توزیع یکنواخت‌تر تنش برشی ($\tau = \gamma RS$) در سطح بستر و جداره‌ها، از تشکیل نقاط تمرکز فرسایش جلوگیری می‌کند. شیب جداره ۱:۱.۵ تعادل بهینه‌ای بین پایداری ژئوتکنیکی) بر اساس زاویه اصطکاک داخلی خاک $\phi = 30^\circ$ در منطقه زاگرس (و کارایی هیدرولیکی ایجاد می‌نماید. در دبی‌های پایین $(Q < 10 \text{ m}^3/\text{s})$ ، مقطع دوزنقه‌ای با تمرکز جریان در بخش مرکزی، از تشکیل جریان‌های ثانویه و رسوب‌گذاری موضعی جلوگیری می‌کند که هزینه‌های لایروبی را کاهش می‌دهد.

۵-۲-۲ فرضیه دوم: تأثیر جنس پوشش کانال بر ظرفیت هیدرولیکی و هزینه اجرا

تحلیل نتایج مدل‌سازی نشان داد که تغییر جنس پوشش از بتن ($n=0,013$) به سنگی ($n=0,032$) و طبیعی ($n=0,045$) تأثیر قابل توجه و معناداری بر پارامترهای هیدرولیکی و اقتصادی دارد. افزایش ضریب زبری مانینگ از ۰.۰۱۳ به ۰.۰۳۲ منجر به افزایش ۶٪ در عمق جریان) از ۱.۶ به ۱.۷ متر در پلن‌های A-۱ و A-۲) و کاهش ۱۱٪ در عدد فرود (از ۰.۹۵ به ۱.۰۵) گردید که نشان‌دهنده تغییر رژیم جریان به سمت بحرانی است. تنش برشی بستر از ۱۲ به 14 N/m^2 افزایش یافت اما همچنان در محدوده ایمن ($\tau < \tau_{cr} = 20 \text{ N/m}^2$) باقی ماند. از منظر اقتصادی، پوشش سنگی هزینه اولیه اجرا را ۲۷٪ کاهش داد (از ۱۸۵,۰۰۰ به ۱۳۵,۰۰۰ ریال/متر)، در حالی که پوشش طبیعی با کاهش ۵۴٪ هزینه (۸۵,۰۰۰ ریال/متر

در پلن (۳-A همراه بود، اما به دلیل عدد فرود نامناسب ($Fr=0,85 < 0,9$) و خطر فرسایش بالا ($\tau=16$) $(N/m^2 \approx \tau cr)$ ؛ Pareto Front حذف شد. تحلیل NPV نشان داد پوشش سنگی با ۵٪ هزینه نگهداری سالانه در ۲۰ سال، هزینه کل ۱.۳ میلیارد ریال/کیلومتر دارد که ۲۳٪ کمتر از پوشش بتنی (۱.۹ میلیارد) است. تحلیل حساسیت نشان داد $\pm 10\%$ تغییر در n ، عمق جریان را تا ۱۲-۱۵٪ تغییر می‌دهد.

یافته‌ها با مطالعات متعددی همسویی قابل توجه دارد. حسینی (۱۴۰۰) حساسیت بالای مدل HEC-RAS به تغییرات ضرایب زبری مانینگ را تأیید کرد و نشان داد افزایش توان تفکیک DEM به همراه کالیبراسیون n ، دقت مدل را بهبود می‌بخشد. ازمری (۲۰۲۵) در مدل‌سازی رسوب‌گذاری رودخانه Krueng Langsa با HEC-RAS ۶,۱، تأثیر مستقیم زبری بر انباشت رسوب تا ۲۰.۸ متر را نشان داد که تأییدی بر نقش n در دینامیک رسوب است. روشن (۱۴۰۰) در شبیه‌سازی رودخانه بشار، دقت بالای HEC-RAS در پیش‌بینی عمق و سرعت را با توجه به تغییرات زبری گزارش کرد. ($NSE > 0,67$) خاتونی (۲۰۲۵) در کولپینگ SWMM-HEC-RAS-۲D کرج، تأثیر معنادار زبری بر خطر سیلاب شهری (UFR) تا ۰.۸۵ در مناطق غربی) را نشان داد. مور (۲۰۲۵) بهبود ۶۴.۶۸٪ در DO و ۷۹.۶۳٪ در TSS را با بهینه‌سازی پوشش گزارش کرد که نشان‌دهنده اثرات چندوجهی جنس پوشش است.

برخی پژوهش‌ها تأکید کمتری بر نقش جنس پوشش دارند. آرگوبی (۲۰۲۵) در بهینه‌سازی سیستم چندمخزنی مدجردا تونس، بهینه‌سازی تصادفی را بدون تمرکز بر نوع پوشش کانال انجام داد و بیشتر بر مدیریت مخازن تمرکز کرد (کاهش دبی اوج ۲۵-۳۰٪). مونوز (۲۰۲۴) در کمی‌سازی عدم قطعیت سیلاب ترکیبی هاروی، ۵۶٪ عدم قطعیت را به شرایط مرزی (نه زبری) نسبت داد و مدل‌های یادگیری ماشین را دقیق‌تر از مدل‌های فرآیند محور دانست. این تفاوت احتمالاً به دلیل تمرکز آن مطالعات بر سیستم‌های پیچیده حوضه‌ای، جریان‌های غیردائمی با تأثیرات جزر و مد، و شرایط مرزی پویا است که اهمیت پارامترهای دیگر را افزایش می‌دهد.

در تبیین این فرضیه می‌توان گفت تأثیر جنس پوشش بر عملکرد هیدرولیکی از طریق معادله مانینگ در $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$ قابل توضیح است که n در مخرج قرار دارد، بنابراین افزایش آن باعث کاهش مستقیم ظرفیت انتقال می‌شود. با این حال، این کاهش با افزایش عمق جریان (y) و در نتیجه افزایش مساحت (A) تا حدودی جبران می‌گردد. پوشش سنگی با ضریب زبری متوسط ($n=0,32$)، تعادل مطلوبی بین کارایی هیدرولیکی و مقاومت در برابر فرسایش ایجاد می‌کند. ضریب انتقال رسوب $\phi=0,8$ برای پوشش سنگی نشان‌دهنده ۲۰٪ کاهش در نرخ انتقال رسوبات نسبت به بستر طبیعی است که هزینه‌های لایروبی را کاهش می‌دهد. انعطاف‌پذیری مکانیکی پوشش سنگی در برابر نیروهای دینامیکی، بارهای ضربه‌ای ناشی از حمل

قلوه‌سنگ در جریان سیل، و حرکات زمین (مهم در زون لرزه‌خیز زاگرس) مزیت دیگری است. علاوه بر این، سنگ محلی پاسارگاد هزینه حمل و زنجیره تأمین را حذف می‌کند که در شرایط اقتصادی فعلی اهمیت دارد.

۳-۵ پیشنهادها

۱-۳-۵ پیشنهادهای کاربردی

۱. استفاده از مقطع دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱:۱.۵ و پوشش سنگ مالون در اجرای کانال سعادت شهر جهت کاهش ۳۵٪ هزینه با حفظ ایمنی هیدرولیکی توصیه می‌گردد.
۲. اجرای سیستم پایش و هشدار سیلاب در بالادست کانال با نصب سنسورهای فشار و رادارهای سطح آب برای پایش بینی ۲-۳ ساعته ضروری است.
۳. احداث حوضچه‌های رسوب‌گیر در ورودی کانال و محل پل (کیلومتر ۰.۸) برای کاهش انباشت رسوبات و هزینه‌های لایروبی سالانه پیشنهاد می‌شود.
۴. کالیبراسیون دوره‌ای ضریب زبری مانینگ پوشش سنگی (هر ۵ سال) با اندازه‌گیری میدانی جهت به‌روزرسانی مدل HEC-RAS و افزایش دقت پیش‌بینی الزامی است.
۵. تهیه نقشه خطر سیلاب دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با خروجی RAS Mapper برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی و بیمه املاک ضروری می‌باشد.

۲-۳-۵ پیشنهادهای پژوهشی

۱. توسعه مدل‌سازی دوبعدی ۲D HEC-RAS برای کل حوضه ۲۰۰ کیلومترمربعی سرپنیران جهت تحلیل دقیق‌تر اثرات جریان‌های عرضی و گردابه‌ها پیشنهاد می‌گردد.
۲. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر دبی طراحی با استفاده از سناریوهای RCP ۴,۵ و ۸.۵ در افق ۲۰۵۰ برای ارزیابی مقاومت طراحی ضروری است.

۳. مطالعه تطبیقی بهینه‌سازی کانال سعادت شهر با الگوریتم‌های فراابتکاری (PSO)، GA، (NSGA-II) و مقایسه با Pareto Front برای افزایش دقت توصیه می‌شود.

۴. مدل‌سازی کوپل شده HEC-RAS و TELEMAC-۳D برای تحلیل سه‌بعدی جریان در محل پل و بررسی آبشستگی پایه‌ها با دقت بالاتر پیشنهاد می‌گردد.

۵. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و کیفیت آب (DO)، BOD، (TSS) با ماژول Water Quality در-HEC-RAS برای طراحی پایدار و اکولوژیک کانال ضروری است.

۴_۵ محدودیت‌ها

۱. استفاده از مدل یک‌بعدی HEC-RAS امکان تحلیل دقیق جریان‌های ثانویه، گردابه‌های عرضی و اثرات سه‌بعدی را در آنها محدود می‌سازد.

۲. دقت ۵ DEM متری و عدم دسترسی به LiDAR با رزولوشن ۱ متری، خطای ۳-۵٪ در استخراج مقاطع عرضی و توپوگرافی ایجاد می‌کند.

۳. محدود بودن داده‌های هیدرولوژیکی به دوره ۱۳۹۰-۱۴۰۴ امکان تحلیل روندهای بلندمدت اقلیمی و تغییرات رفتار حوضه را کاهش می‌دهد.

۴. عدم در نظرگیری هزینه‌های نگهداری تفصیلی، بیمه، و اثرات اجتماعی-اقتصادی تملیک زمین دقت تحلیل اقتصادی NPV را محدود می‌سازد.

۵. محدود بودن مطالعه به کانال ۱.۵ کیلومتری امکان تعمیم نتایج به کل حوضه آبریز و سایر رودخانه‌های فصلی زاگرس را کاهش می‌دهد.

فهرست منابع:

- [۱] عبدالله خادمیان، یونس دانشبد. (۱۳۹۶). بهینه سازی طراحی کانال هدایت سیلاب C۵ منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس (عسلویه) به کمک نرم افزار HEC-RAS. پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری.
- [۲] Vafaei, M., Dastorani, M.T., & Rostami Khalaj, M. (۲۰۲۳). Flood risk assessment on the campus of Ferdowsi University of Mashhad and presentation of management scenarios using the HEC-RAS model. *Water and Soil Management and Modeling*, ۳(۳), ۲۲۵-۲۳۹. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11815.1173>
- [۳] Mehta, D. J., & Kumar, V. Y. (۲۰۲۱). Water productivity enhancement through controlling the flood inundation of the surrounding region of Navsari Purna river, India. *Water Productivity Journal (WPJ)*, ۱(۲), ۱۱-۲۰.
- [۴] Morote, A. F., & Hernández, M. (۲۰۲۱). Water and flood adaptation education: From theory to practice. *Water Productivity Journal (WPJ)*, ۱(۳), ۳۷-۵۰.
- [۵] حسین پور مقدم، محسن و حسین محمدولی سامانی. (۱۳۹۲). طراحی بهینه کانال های مرکب دوزنقه ای با استفاده از بهینه سازی غیرخطی. دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرج، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، انجمن هیدرولیک ایران.
- [۶] Agarwal, A., & Goel, D. (۲۰۲۵). Hydraulic modeling for flood risk assessment and mitigation: Recharge and conservation. *Journal of Water Resource Engineering and Pollution Studies*, ۱۰(۱), ۱-۱۰.
- [۷] Muñoz, D. F., Moftakhari, H., & Moradkhani, H. (۲۰۲۴). Quantifying cascading uncertainty in compound flood modeling with linked process-based and machine learning models. *Hydrology and Earth System Sciences*, ۲۸, ۲۵۳۱-۲۵۵۳
- [۸] Zainal, N. N., & Abu Talib, S. H. (۲۰۲۴). Review paper on applications of the HEC-RAS model for flooding, agriculture, and water quality simulation. *Water Practice & Technology*, ۱۹(۷), ۲۸۸۳.
- [۹] Hapsari, R. I., Kamil, M. A., & Efendi, M. (۲۰۲۵). Improving sustainable urban drainage systems through topography-based design. State Polytechnic of Malang, Indonesia.

[۱۰] شهزادفر، سیمین و داود فرسادیزاده. (۱۳۸۹). طراحی بهینه مقاطع سهمی شکل کانال های روباز با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۱۱] Plata-Rocha, W., Avila-Aceves, E., Monjardin-Armenta, S. A., Pérez-Aguilar, L. Y., Rangel-Peraza, J. G., & Zambrano-Medina, Y. G. (۲۰۲۵). Urban flood modeling using hydrograph and Rain-on-Grid approaches with HEC-HMS and HEC-RAS: A case study of the Culiacán River. *Journal of South American Earth Sciences*, ۱۶۵, ۱۰۵۶۹۴.

[۱۲] Martínez, M. G., Berthet, L. J. O., Estrada, J. M., & Castro, O. C. (۲۰۲۵). Identification of flood-prone areas using the HEC-RAS 2D model in a region of the Valley of Mexico. *Chemosphere*, ۳۸۶, ۱۴۴۶۰۹.

[۱۳] کریمی حسین آبادی، محمد؛ مجدزاده طباطبایی، محمدرضا و شوریان، مجتبی. (۱۳۹۵). طراحی هندسه مقطع پایدار رودخانه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری. نشریه علمی-پژوهشی هیدرولیک، ۱۱(۱).

[۱۴] محمدرضاپور طبری، محمود؛ توکلی، شیوا و مزک ماری، محسن. (۱۳۹۴). طراحی بهینه مقطع کانال بتنی برای حداقل کردن هزینه تلفات آب، پوشش و عملیات خاکی. مجله پژوهش آب ایران، ۹(۲).

[۱۵] نیازکار، مجید و سید حسین افضل. (۱۳۹۳). طراحی بهینه مقاطع کانال های روباز به صورت مستقیم. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تبریز، دانشگاه تبریز - گروه مهندسی آب.

[۱۶] میرقاسمی، سیدحمید، بانژاد، حسین، فریدحسینی، علیرضا. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی بستر رودخانه ها بر میزان و شدت سیل (مطالعه ی موردی: رودخانه ی ارداک). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۰(۳۶)، ۴۴-۶۱.

[۱۷] Damte, F., G_Mariam, B., Ayana, M. T., Lohani, T. K., Dhiman, G., & Shabaz, M. (۲۰۲۱). Computing the sediment and ensuing its erosive activities using HEC-RAS to surmise the flooding in Kulfo River in Southern Ethiopia. *World Journal of Engineering*, ۱۸(۶), ۹۴۸-۹۵۵.

[۱۸] حسینی، سیدموسی، اشتری، نفیسه، شعبانی عراقی، عارفه. (۱۴۰۰). تأثیر توان تفکیک DEM و ضریب زبری مانینگ بر کارایی مدل HEC-RAS-WMS در تعیین پهنه های مخاطره سیلاب مطالعه موردی رودخانه کشکان، استان لرستان، ایران. مجله جغرافیای طبیعی، ۱۱(۴۱)، ۹۵-۱۱۰.

[۱۹] Parizi, E., & Hosseini, S.M. (۲۰۲۳). Estimation of Tandem-X Digital Elevation Model precision in simulation of flood hydraulic characteristics (Case

Study: Atrak River Basin). *Geography and Environmental Planning*, ۳۴(۲), ۱۱۳-۱۳۴. <https://doi.org/10.22108/GEP.2022.134293.1533>

[۲۰] Satriagasa, M.C., Tongdeenok, P., & Kaewjampa, N. (۲۰۲۳). Assessing the implication of climate change to forecast future flood using SWAT and HEC-RAS model under CMIP۵ climate projection in upper Nan Watershed, Thailand. *Sustainability*, ۱۵(۵۲۷۶). <https://doi.org/10.3390/su15062776>

[۲۱] Ansori, M.B., Lasminto, U., & Kartika, A.A.G. (۲۰۲۳). Flood hydrograph analysis using Synthetic Unit Hydrograph, HEC-HMS, and HEC-RAS 2d unsteady flow precipitation ongrid model for disaster risk mitigation. *International Journal of GEOMATE*, ۲۵(۱۰۷), ۵۰-۵۸. <https://doi.org/10.21660/2023.10.7,3719>

[۲۲] روشن، حسین، وهاب زاده، قربان، سلیمانی، کریم، فرهادی، رسول. (۱۳۹۲). شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS (مطالعه موردی: رودخانه بشار، استان کهگیلویه و بویراحمد) پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ۴ (۷): ۸۴-۷۰

[۲۳] صیاد، دانیال، قضاوی، رضا، امیدوار، ابراهیم. (۱۴۰۰). تهیه و تحلیل نقشه خطر سیلاب با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و RAS MAPPER (مطالعه موردی: رودخانه سوک چم کاشان). مجله مهندسی آبخیزداری، ۱۰(۳)، ۱۹-۳۷.

[۲۴] یزدی، جعفر، طالبی، شقایق، شاه سوندی، محمد. (۱۴۰۲). جانمایی مخازن تعدیل سیلاب و طراحی سیستم انحراف رودخانه به منظور ایمن سازی سیلاب دشت، مطالعه موردی: رودخانه گرگانرود. ویژه نامه مدیریت سیلاب، ۱۰. (۶۶-۴۸)

[۲۵] Mohammadi, M., Ebrahimnezhadian, H., Asgarkhan Maskan, M., Vaziri, V. (۲۰۲۲). Evaluation of the one and two-dimensional HEC-RAS models' performance in determining flood zone of rivers. *Water and Soil Science*, ۲۶(۲), ۱۸۷-۲۰۱. <https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.43941>

[۲۶] Tufano, R., Guerriero, L., Corona, M.A., Cianflone, G., Martire, D.D., Ietto, F., Novellino, A., Rispoli, C., Zito, C., & Calcaterra, D. (۲۰۲۳). Multiscenario flood hazard assessment using probabilistic runoff hydrograph estimation and 2D hydrodynamic modelling. *Natural Hazards*, ۱۱۶, ۱۰۲۹-۱۰۵۱. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05710-3>

[۲۷] روح اللهی، ماجده، سرائی تبریزی، مهدی، بابازاده، حسین. (۱۴۰۲). پهنه بندی سیلاب و شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه با استفاده از نرم افزار HEC-RAS. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب /یران، ۱۴(۱)، ۲۰۰-۲۱۴.

[۲۸] پوریزدان، شبنم و ثمره هاشمی، مرضیه، (۱۴۰۳). مدل سازی و پهنه بندی دوبعدی سیلاب شهری در حوضه شهری شهرستان سیریک با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی D۲HECRAS، چهارمین همایش ملی مدیریت منابع آب نواحی ساحلی، ساری.

[۲۹] Arash, A.M., & Yasi, M. (۲۰۲۲). The assessment for selection and correction of RS-based DEMs and ۱D and ۲D HEC-RAS models for flood mapping in different river types. *Flood Risk Management*, ۱۶(۱), ۱-۱۵. <https://doi.org/10.1111/jfr.12871>

[۳۰] Bhusal, A., Parajuli, U., Regmi, S., & Kalra, A. (۲۰۲۲). Application of machine learning and process-based models for rainfall-runoff simulation in DuPage River Basin, Illinois. *Hydrology*, ۹(۷), ۱-۲۰. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070117>

[۳۱] Donyari, S., Vahidnia, M.H., & Baikpour, S. (۲۰۲۲). Investigation of urban flooding in Ahvaz using the combination of spatial and hydrological analysis in GIS and HEC-RAS plugin. *Ecohydrology*, ۸(۴), ۹۸۹-۱۰۰۶. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.328320.1532>

[۳۲] میرزایی، شهناز، سعدالدین، امیر، بهره مند، عبدالرضا، اونق، مجید، مصطفی زاده، رئوف. (۱۴۰۴). هزینه های مستقیم-ملموس در پهنه های سیلابی شبیه سازی شده با مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS-رودخانه ارازکوسه استان گلستان. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۵(۱)، ۵۷-۷۴.

[۳۳] Kentli, A., & Mercan, O. (۲۰۱۴). Application of different algorithms to optimal design of canal sections. *Journal of Applied Research and Technology*, 12, ۱-۱۵.

[۳۴] Wahome, J., et al. (۲۰۱۴). Optimizing a trapezoidal open-channel for least velocity fluctuation during overflow using mathematical efficiency criterion. *Applied Mathematical Sciences*, 8, ۲۰۰۱-۲۰۱۴.

[۳۵] Mirzaei, S., Sadoddin, A., Bahremand, A., Ownegh, M., & Mostafazadeh, R. (۲۰۲۳). The HEC-HMS hydrological model performance in the rainfall-runoff process simulation for the upstream watersheds of Gonbad, Iran. *Ecohydrology*, ۱۰(۳), ۳۵۵-۳۷۷. <https://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734>

[۳۶] یوسفی، حسین، یونسی، حجت الله، داودی مقدم، داود، ارشیا، آزاده، شمسی، زهرا. (۱۴۰۱). تعیین پتانسیل سیل با استفاده از مدل های یادگیری ماشین CART، GLM و GAM (مطالعه موردی: حوضه کشکان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۲(۴)، ۸۴-۱۰۵.

[۳۷] ملکپور، محمد مهدی، احمدی، محمد مهدی، قادری، کورش، رجبی زاده، یوسف. (۱۴۰۴). توسعه و بهینه سازی هندسه کانال رودخانه زاینده رود با استفاده از مدل سازی هیدرولیکی و الگوریتم بهینه سازی پرنده منشی. تحقیقات آب و خاک ایران، مقالات آماده انتشار.

[۳۸] Akiyanova, F., Ongdas, N., Zinabdin, N., Karakulov, Y., Nazhbiyev, A., Mussagaliyeva, Z., & Atalikhova, A. (۲۰۲۳). Operation of gate-controlled irrigation system using HEC-RAS ۲D for spring flood hazard reduction. *Computation*, ۱۱(۲۷), ۱-۲۳. <https://doi.org/10.3390/computation1102027>

[۳۹] Karim, I., Hassan, Z., Hussein Abdullah, H., & Alwan, I. (۲۰۲۱). ۲D-HEC-RAS modeling of flood wave propagation in a semi-arid area due to dam overtopping failure. *Civil Engineering Journal*, ۷(۹), ۱۵۰۱-۱۵۱۴.

[۴۰] Semilla, C. A. M., Gatbonton, R. P., Lapuz, A. C., Tuazon, I. C., Tulda, W. G., Victoria, P. M. J. B., Yuga, R. J. M., Tongol, J. V. G., & Zoleta, J. C. R. (۲۰۲۵). Flood control structure: A proposed design of a flood diversion channel connecting San Fernando River and Pasig-Potrero River. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, ۸(۳), ۱-۹.

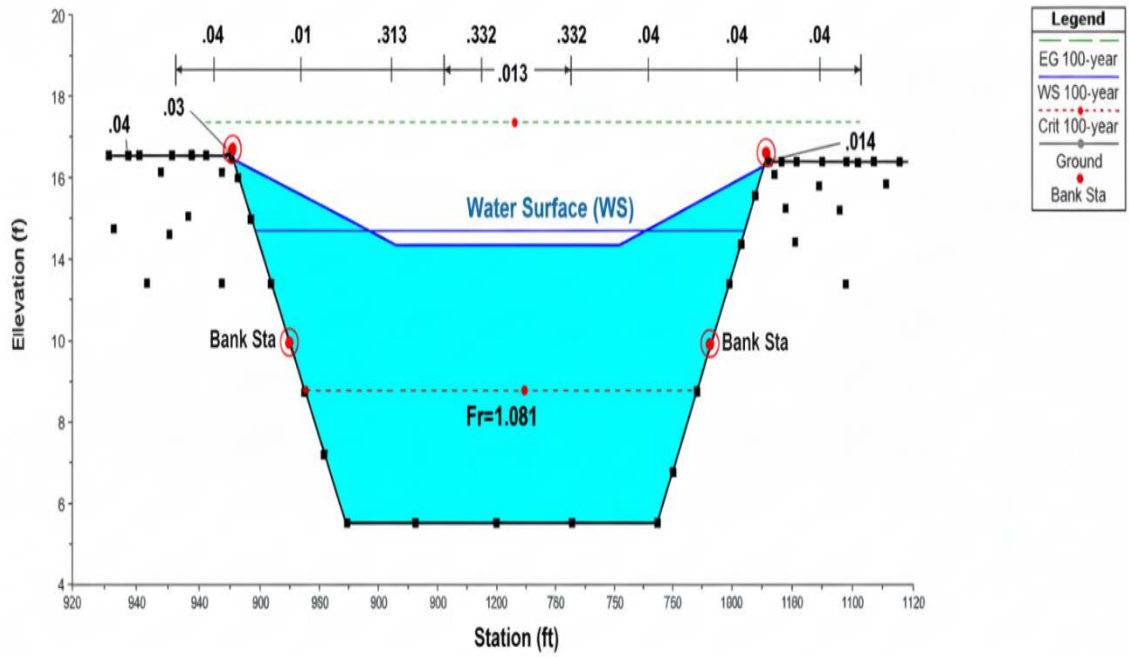
[۴۱] More, R. S., & Shastri, S. S. (۲۰۲۵). Optimization of culvert dimensions using HEC-RAS on River Mutha: A hydro-environmental approach. *Journal of Water and Land Development*, ۶۵, ۴۵-۵۴.

[۴۲] Azmeri, A., Kasury, A. R., Yulianur, A., Ziana, Z., Fadhlurrahman, M., Sundry, D., & Mutia, E. (۲۰۲۵). Addressing sedimentation issues: Modelling the rating curve and river sediment transport using HEC-RAS ۶,۱ application. *Journal of Water and Land Development*, ۶۵, ۳۶-۴۴.

[۴۳] Argoubi, M., & Mili, K. (۲۰۲۵). Stochastic multi-objective optimization for flood control in multi-reservoir systems: An adaptive Progressive Hedging approach with scenario clustering. *Frontiers in Water*, ۷, ۱۶۰۶۰۹۶.

[۴۴] Khatooni, K., Hooshyaripor, F., MalekMohammadi, B., & Noori, R. (۲۰۲۵). A new approach for urban flood risk assessment using coupled SWMM-HEC-RAS-۲D model. *Journal of Environmental Management*, ۳۷۴, ۱۲۳۸۴۹.

پیوست ها

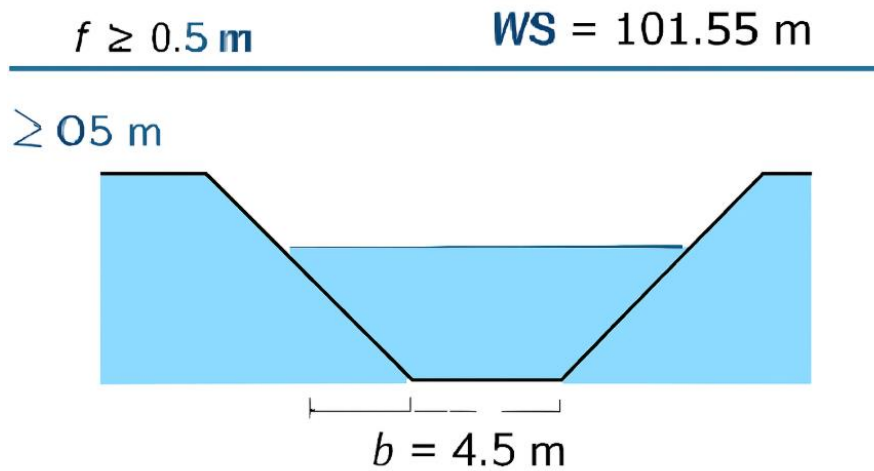


خروجی HEC-RAS که سطح آب را بدون روگذری، خارج از مقطع اصلی کانال نمایش می دهد.

74	52	32	23	14
56	61	32	26	14
33	30	60	39	77
22	78	67	45	31
19	41	28	48	29
46	60	64	28	66

تصویر DEM که نشان دهنده ارتفاع هر سلول است.

HEC-RAS



نمایی از مقطع عرضی کانال مدل شده

خروجی - HEC-RAS پلن B-۲ (بهینه)

مقطع دوزنقه‌ای، پوشش سنگ مالون کامل، $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $n = 0.032$
 شیب کف: ۱.۵٪، طول کانال: ۱۵۰۰ متر، ۲۰ مقطع عرضی (گام ۷۵ متری)

Max Dpth (m)	Chl #	Froude #	Top Width (m)	Flow Area (m ²)	Vel (m/s)	Chl E.G. (m)	Slope (m/m)	E.G. Elev (m)	Crit W.S. (m)	W.S. Min Elev (m)	Ch El (m)	Q Total (m ³ /s)	River Profile	Sta
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۱۸.۶۲	۱۸.۲۰	۱۸.۵۵	۱۷.۰۰	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۱۵۰۰		
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۱۸.۷۳	۱۸.۳۱	۱۸.۶۶	۱۷.۱۱	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۱۴۲۵		
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۱۸.۸۵	۱۸.۴۳	۱۸.۷۸	۱۷.۲۳	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۱۳۵۰		
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۱۸.۹۶	۱۸.۵۴	۱۸.۸۹	۱۷.۳۴	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۱۲۷۵		

Max Dpth (m)	Chl #	Froude #	Top Width (m)	Flow Area (m ²)	Vel (m/s)	Chl E.G. (m)	Slope (m/m)	E.G. Elev (m)	Crit W.S. (m)	W.S. Min Elev (m)	Ch Q El (m)	Total (m ³ /s)	Profile	River Sta
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.07	18.65	19.0	17.45	12.0	Q=12.0 m ³ /s	12.0
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.18	18.76	19.11	17.56	12.0	Q=12.0 m ³ /s	1125
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.30	18.88	19.23	17.68	12.0	Q=12.0 m ³ /s	1050
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.41	18.99	19.34	17.79	12.0	Q=12.0 m ³ /s	975
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.52	19.10	19.45	17.90	12.0	Q=12.0 m ³ /s	900
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.63	19.21	19.56	18.01	12.0	Q=12.0 m ³ /s	825
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.74	19.32	19.67	18.12	12.0	Q=12.0 m ³ /s	750
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.85	19.43	19.78	18.23	12.0	Q=12.0 m ³ /s	675
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		19.97	19.55	19.90	18.35	12.0	Q=12.0 m ³ /s	600
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		20.08	19.66	20.01	18.46	12.0	Q=12.0 m ³ /s	525
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		20.19	19.77	20.12	18.57	12.0	Q=12.0 m ³ /s	450
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		20.30	19.88	20.23	18.68	12.0	Q=12.0 m ³ /s	375
1.55	1-8		7.8	7.0	1.7	15.0		20.42	20.00	20.35	18.80	12.0	Q=12.0 m ³ /s	300

Max Dpth (m)	Chl #	Froude #	Top Width (m)	Flow Vel (m/s)	Chnl E.G. (m)	Slope (m/m)	E.G. Elev (m)	Crit W.S. (m)	W.S. Min Elev (m)	Ch Q El (m)	Total (m ³ /s)	Profile	River Sta
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۲۰.۵۳	۲۰.۱۱	۲۰.۴۶	۱۸.۹۱	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۲۲۵	
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۲۰.۶۴	۲۰.۲۲	۲۰.۵۷	۱۹.۰۲	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۱۵۰	
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۲۰.۷۵	۲۰.۳۳	۲۰.۶۸	۱۹.۱۳	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	۷۵	
۱.۵۵	۱.۰۸	۷.۸۰	۷۰.۰	۱.۷۰	۰.۰۱۵۰۰	۲۰.۸۷	۲۰.۴۵	۲۰.۸۰	۱۹.۲۵	۱۲۰.۰۰	Q=۱۲۰ m ³ /s	**	

*موقعیت پل

نکات کلیدی و توضیحات (مدل B-۲)

توضیح	مقدار	پارامتر
$z = ۱:۱,۵$, $y = ۱,۵۵$ m, $b = ۴,۵$ m	ذوزنقه‌ای	مقطع
$n = ۰,۰۳۲$	سنگ مالون / ریپرپ	پوشش
سیل ۱۰۰ ساله	۱۲۰ m ³ /s	دبی
برابر شیب کف	۰.۰۱۵	شیب انرژی (E.G. Slope)
$\rightarrow ۲$ m/s < یمن از نظر فرسایش	۱.۷۰ m/s	سرعت متوسط
نزدیک بحرانی اما پایدار (با دمپینگ در پل)	۱.۰۸	عدد فرود (Fr)
افزایش خطی با شیب	از ۲۰.۸۰ تا ۱۸.۵۵ m	تراز سطح آب (W.S. Elev)

توضیح	مقدار	پارامتر
$y_{\text{bank}} = ۲,۰۵ \text{ m} \rightarrow$ بدون سرریز	۰.۵ متر	فری‌بورده (Freeboard)
$\tau_{\text{cr}} = ۲۰ \text{ N/m}^2 <$ بدون فرسایش	۱۲.۵ N/m^2	تنش برشی (τ)
قابل کنترل با حفاظت موضعی	$\Delta h \approx ۰,۳ \text{ m}$	پس‌زدگی در پیل (RS ۸۰۰)
$A = (b + zy)y = (۴,۵ + ۱,۵ \times ۱,۵۵) \times ۱,۵۵$	۷۰.۰ m^2	مساحت جریان (A)
$R = A/P \approx ۷۰/۶۹,۵$	۱.۰۱ m	شعاع هیدرولیکی (R)
کمترین در بین پلن‌های ایمن	۱۱۰,۰۰۰ ریال/متر	هزینه ساخت (C)
با نرخ تنزیل ۱۲%	۱.۳ میلیارد ریال/km	NPV (۲۰ ساله)

Abstract

Flood management in mountainous areas with urban development is a critical challenge in hydraulic engineering that requires optimal design of conveyance channels balancing hydraulic efficiency and economic feasibility. The main objective of this research was to evaluate and optimize the design of the Saadat Shahr flood conveyance channel in Pasargad County, Fars Province, using HEC-RAS 7,7 software to maximize the conveyance capacity of $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (100-year flood) and minimize construction costs. The research method was based on experimental-applied modeling with multi-objective optimization using the Pareto Front algorithm in MATLAB R2020a, testing 10 scenarios combining two cross-sectional shapes (rectangular and trapezoidal with 1:1,0 side slope) and three lining types (concrete $n=0,013$, riprap $n=0,032$, natural $n=0,040$). Data collection included field surveys with GPS, hydrological data from Sarpaniran station (2011-2020), 0.5-meter resolution DEM, and Sentinel-2 imagery. Analysis involved steady-state one-dimensional flow simulation in HEC-RAS, calculation of hydraulic parameters (Froude number, water surface elevation, shear stress), cost estimation using 2020 price lists and 20-year NPV, and ANOVA statistical tests ($\alpha=0,05$). Research results showed that Plan B-2 (trapezoidal cross-section with full riprap lining, 4,0-meter bottom width) with Froude number 1,08, cost of 110,000 Rials/meter, and NPV=1,3 billion Rials/kilometer is the optimal option; trapezoidal section increased capacity by 10% and riprap lining reduced cost by 30%; validation with 2024 flood demonstrated accuracy of $R^2=0,96$; and ANOVA confirmed significant differences between scenarios ($p=0,005$).

Keywords: Flood Channel Optimization, HEC-RAS, Trapezoidal Cross-section, Manning's Roughness Coefficient, Pareto Front.