

مقایسه روش‌های مختلف بر آورد سیلاب به منظور طراحی ابعاد کانال (مطالعه موردی: شهرک صنعتی علویجه در حوزه آبخیز زاینده رود)

فاطمه رجائی* - استادیار گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

چکیده

در دهه‌های گذشته میزان فراوانی و بروز سیل‌های خطرناک افزایش داشته است و به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین خطرهای از نظر مرگ و میر شناخته می‌شود. بر آورد دبی سیلابی با دوره بازگشت مناسب برای طراحی سازه آبی از اهم اهداف تحقیق می‌باشد. لذا در این پژوهش برای بررسی ابعاد کانال هدایت آب در پایین دست شهرک صنعتی علویجه به شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از HEC-HMS و روشهای تجربی فولر، کریگر و فرانکو-رودیر پرداخته شده است. در محاسبه ابعاد کانال از روشهای USBR، هندوستان و بهترین مقطع هیدولیکی استفاده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر این است که مقدار دبی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله (۳۰ مترمکعب بر ثانیه) به اندازه ۱۱،۵۲ درصد نسبت به سیلاب ۱۰۰ ساله (۲۶،۹ مترمکعب بر ثانیه) افزایش داشته است. مقدار دبی از نتایج شبیه‌سازی عددی در مقایسه با روش فرانکو-رودیر به میزان ۴/۶ درصد کاهش می‌یابد که همراه با کاهش ۶/۶ درصدی ارتفاع دیواره کانال و کاهش ۵/۵۷ درصدی در عرض پایین کانال و کاهش ۵/۸۵ درصدی عرض فوقانی کانال می‌باشد. دو روش فرانکو-رودیر و کریگر نتایج تقریباً نزدیک به هم ارائه دادند و نتایج HEC-HMS و فولر نیز نزدیک هم بود. با توجه به نتایج نزدیک روش فولر به نتایج HEC-HMS می‌توان در حوضه‌هایی که امکان مدل‌سازی به دلیل کمبود ورودی‌های مدل وجود ندارد به نتیجه این مدل نیز اکتفا کرد. در طراحی ابعاد کانال، مقدار ارتفاع دیواره کانال هدایت آب در محدوده ۲/۳ تا ۲/۹۶ قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع دیواره کانال ۲/۵ متر مربوط به نتایج HEC-HMS و کمترین ارتفاع دیواره به میزان ۲/۳۳۵ متر مربوط به دو روش کریگر و فرانکو-رودیر می‌باشد.

واژگان کلیدی: بر آورد سیلاب، طراحی کانال، مدل HEC-HMS، روشهای تجربی.

مقدمه

در دهه های گذشته میزان فراوانی و بروز سیل های خطرناک در آسیا افزایش داشته است و حدود ۴۰ درصد ضرر و زیان ناشی از بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده است که به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین خطرهای از نظر مرگ و میر شناخته می‌شود. همچنین، ۹۱ میلیون هکتار از سطح کشور ایران در تولید رواناب مستقیم و سریع تاثیر داشته که حدود ۴۲ میلیون هکتار آن شدت سیل خیزی متوسط تا خیلی زیاد دارند. از این نظر ۵۹۲ شهر، ۶۶ هزار روستا، ۲ هزار رشته قنات، یک میلیون هکتار از اراضی زراعی و بخش بزرگی از جاده های کشور و تاسیسات صنعتی در معرض خطر سیل گیری و تخریب قرار دارند (ایلخانی و همکاران، ۱۳۹۵، ۵؛ جانی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۱، ۱۵).

امروزه واحدهای صنعتی به‌صورت مجتمع‌ها و شهرک‌های صنعتی درآمده و به سرعت در حال گسترش هست. در اکثر این مناطق مطالعات جامع و مناسب از دیدگاه آمایش سرزمین برای مکان‌یابی احداث شهرک‌های صنعتی صورت نگرفته است و بنابراین پارامترهای زیست‌محیطی مانند فاصله مناسب از مسیل‌ها و آبراهه‌ها یا سایر منابع آب مانند چاه، چشمه و قنات و رعایت حریم مناسب از آن‌ها بررسی نشده است. همچنین با ساخت تاسیسات صنعتی در مسیر مسیل‌ها و آبراهه‌ها و تغییر مسیر حرکت آب در حوضه‌های تحت توسعه، تحولات هیدرولوژیکی حوضه را سبب شده است. توسعه مناطق صنعتی در بستر و حواشی دشتهای سیلابی، بدون شناخت و توجه به شرایط هیدرولوژیکی و دینامیکی رودخانه‌ها، موجب افزایش خطر سیلاب و خسارات جانی، مالی و زیر بنائی شده می‌شود (فتحی‌زاد و همکاران، ۱۳۹۹، ۳). بدین ترتیب، پیشبینی سیلابهای احتمالی در مدیریت مناطق سیلابی برای کاهش خسارات وارده بر مناطق شهری و صنعتی، تاسیسات در حال ساخت، مزارع و سایر کاربریهای موجود، در اطراف رودخانه‌ها و مسیل‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند زیرا به وسیله آنها می‌توان تمهیدات و راهکارهایی برای مهار سیلاب و به حداقل رساندن خسارات ناشی از آن کسب نمود (راماچاندرا^۱ و همکاران، ۲۰۱۹، ۵).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه برآورد سیلاب در ایران و بخشهای مختلف دنیا به انجام رسیده است از مهمترین آنها می‌توان به مطالعه لی و کلوج^۲ (۲۰۱۰) اشاره نمود که از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در ترکیب با مدل HEC-GeoHMS استفاده نمودند. کاربرد، قابلیت و مناسب بودن آن برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های آبریز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد این مدل‌ها در چین نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کنند. در مطالعه دیگر کریمی و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از HEC-HMS در حوضه آبخیز چهل چای پرداختند. کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بررسی و مشخصات آن‌مورد سیل شامل دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج با استفاده از سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اسنایدر و کلارک مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد روش SCS نسبت به روش کلارک و اسنایدر کارایی بهتری دارد. همچنین، گومیندوگ^۳ و همکاران (۲۰۱۷) مدل HEC-HMS را برای شبیه‌سازی رواناب در ده حوضه با داده اندازه‌گیری شده و بدون داده در زیمبابوه به کار گرفتند. از روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین پارامترهای هندسی و هیدرولوژیکی مورد نیاز برای تخمین پارامترهای مدل استفاده شد. در این پژوهش، روش هیدروگراف اسنایدر برای شبیه‌سازی زیرحوضه‌های بدون داده بر اساس پارامتر زیرحوضه‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل با موفقیت رواناب حوضه اندازه‌گیری شده و جریان‌های اوج را پیش‌بینی کرد. این مطالعه مناسب بودن HEC-HMS را برای شبیه‌سازی رواناب در یک حوضه آبخیز پیچیده با زیرحوضه‌ها و کانال‌های متعدد نشان می‌دهد. از سوی دیگر،

1. Ramachandran

2. Li and Cloche

3. Gumindog

دسالگان^۱ و همکاران (۲۰۲۱) به پهنه بندی مناطق سیلابی با استفاده از مدل های HEC-GeORAS، GIS و HEC-RAS در رودخانه فتام، اتیوپی پرداخته شد. مناطق تحت تاثیر سیل در امتداد رودخانه فتام ۲۷، ۲۴، ۴۷، ۱۷ و ۱۳ کیلومتر برای دوره های بازگشت ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰ و ۵ پیش بینی شد. در مطالعه مقدم نیا و وکیلی (۱۴۰۱) به مدل سازی سیلاب رودخانه شاه بهرام با ایستگاه آب سنجی نازمکان واقع در استان کهگیلویه و بویر احمد با HEC-HMS و مقایسه آن با روش تحلیل منطقه ای سیلاب و روش های تجربی پرداخته شد. مدل هیدرولوژیک HEC-HMS نتایج بهتری با درصد خطای کمتری (بیشترین مقدار ۱۰،۵۱ با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال و کمترین مقدار ۲،۷۲ با دوره بازگشت ۵ سال نسبت به روشهای تجربی و تحلیلی ارائه داد. در تحقیقی دیگر، اوما^۲ و همکاران (۲۰۲۰) مدل HEC-HMS را برای شبیه سازی بارش-رواناب در حوضه رودخانه نیانگ^۳ در کنیا، به منظور برآورد دبی اوج سیل و حجم رواناب استفاده کردند. همچنین، از مدل های SCS-CN، SCS-UH و Muskingum برای شبیه سازی هیدرولوژیکی استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که یک رویداد بارندگی ۵۰ میلی متری با مدت زمان ۲،۵ ساعت پتانسیل تولید ۹۰ مترمکعب در ثانیه دبی اوج سیلاب و $1/17 \times 10^6$ مترمکعب حجم رواناب در محل تلاقی رودخانه نیانگ و سوکوموکو^۴ را دارد. از سوی دیگر، رویداد طوفان ۱۰۰ ساله غیر متناوب با عمق حدود ۱۷۲ میلی متر، که در یک دوره حدود ۴ ساعت رخ می دهد، به طور بالقوه ۴۶۰ مترمکعب در ثانیه دبی اوج سیلاب و $10^6 \times 4/6$ مترمکعب حجم سیلاب ایجاد می کند، که اثرات فاجعه بار در حوضه را به همراه دارد. در مطالعه گودورو^۵ و همکاران (۲۰۲۳) از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای مدل سازی جریان و پیش بینی سیل در حوضه آبخیز مکی در اتیوپی استفاده شد. سیلاب های پیش بینی شده در ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۳۳،۲، ۱۷۸،۱، ۲۳۹،۷، ۳۱۳،۲ و ۳۴۶،۱۹ متر مکعب بر ثانیه بود. یافته های این مطالعه برای توسعه نقشه سیل و طراحی اقدامات کاهش سیل مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، اظهار گردید از نتایج مدل را می توان برای سایر مناطق با شرایط هیدرولوژیکی مشابه اعمال نمود. از سایر مطالعات صورت پذیرفته در ایران در این زمینه می توان به مطالعه علمداری و همکاران (۱۴۰۰)، اسدی و همکاران (۱۳۹۸) و حسینی و همکاران (۱۳۹۴) اشاره نمود. با توجه به قابلیت های مدل های هیدرولوژیکی و روش های تجربی می توان فرایندهای هیدرولوژیکی مانند رواناب را با کمترین هزینه و حداقل زمان شبیه سازی نمود. اطلاع از خصوصیات مانند حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه های آبی، مانند سدها، سرریزها، پل ها و زیرگذرها به منظور کاهش خسارت احتمالی و همچنین پیش بینی زمان دبی اوج در پایین دست در بحث هشدار سیل ضروری است و اطلاع از وضعیت سیلاب، می تواند سبب کاهش تلفات، محافظت از بناهای، اراضی و مردم شود و آسیب پذیری در برابر آن را کاهش دهد (چیذر و همکاران، ۷، ۱۳۹۰). تحقیق حاضر در حوزه آبخیز زاینده رود انجام شده است، بستر و مسیر این رودخانه از گذشته تاکنون به علت اقدامات توسعه شهری و صنعتی دستخوش تغییرات متعددی شده است. این شهرک از جمله مناطقی می باشد که در زمان ایجاد آن بدون توجه مطالعات جامع و مناسب از دیدگاه آمایش سرزمین برای مکان یابی (مانند فاصله مناسب از مسیل ها و آبراهه ها، شناخت شرایط هیدرولوژیکی و دینامیکی منطقه و رعایت حریم مناسب) صورت پذیرفته است. این امر موجب خسارات جانی، مالی و زیر بنائی در این شهرک شده است. به طوری که در طی دهه گذشته بخشی از شهرک صنعتی علویجه تحت تاثیر سیلاب قرار گرفته است و آسیب های جدی به تعدادی از صنایع وارد شده است. بنابراین در این مطالعه با توجه به قرار گرفتن شهرک صنعتی علویجه در مسیر سیلابی و توسعه آن در آینده نزدیک، ضرورت انجام یک پژوهش جامع در زمینه برآورد سیلاب احتمالی

1. Desalegn

2. Uuma

3. Ngong

4. Sokomoko

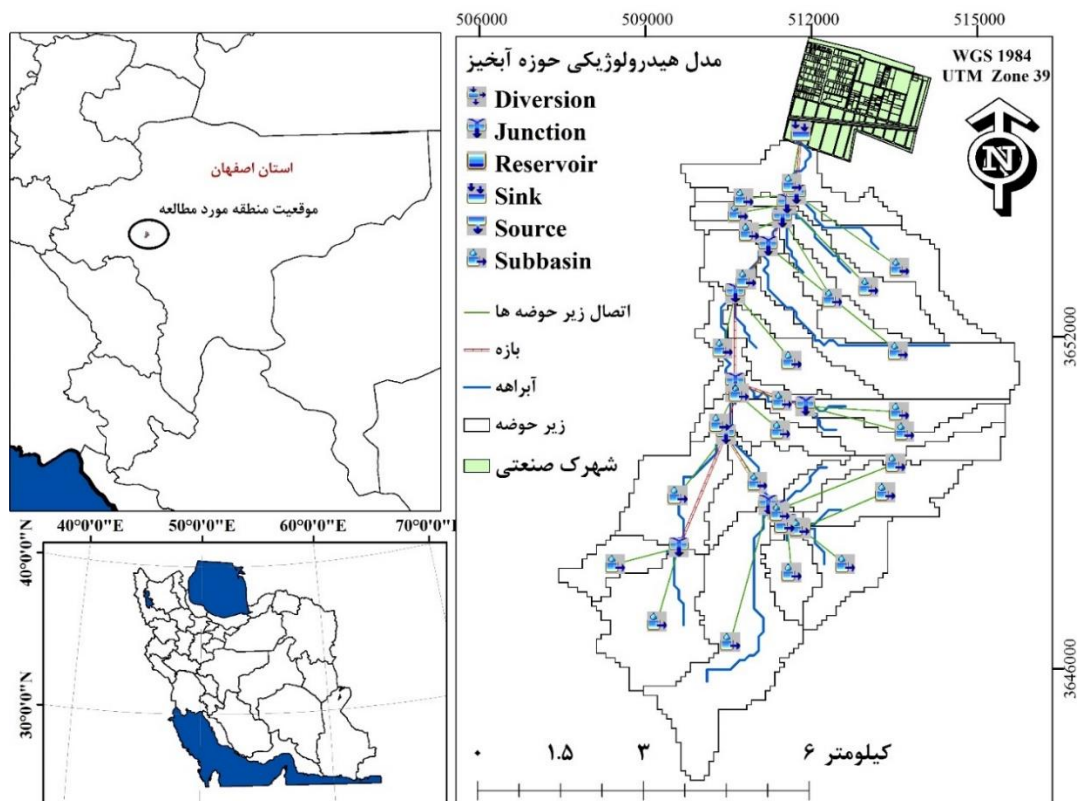
5. Guduru

ورودی به منطقه شهرک صنعتی علویجه (واقع در مسیر سیلابی) به روش‌های مختلف و طراحی کانال هدایت آب جهت مدیریت ریسک سیل ضروری می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق برآورد حداکثر سیلاب محتمل با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله با استفاده از نرم افزار HEC-HMS و سایر روش‌های کلاسیک برآورد و طراحی ابعاد کانال صورت پذیرفت.

روش تحقیق

موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرک صنعتی علویجه در ۷۰ کیلومتر جاده اصفهان- علویجه واقع شده است و در فاصله دو کیلومتری شرق شهر علویجه واقع شده است. شهرک صنعتی علویجه با ۲۰۰ هکتار مساحت به خاطر قرار گرفتن در شهرستان نجف‌آباد کمک بسزایی در اقتصاد این شهرستان کرده است. از ۲۰۰ هکتار شهرک صنعتی علویجه ۱۵۸ هکتار دارای کاربری صنعتی است. از نظر اشتغال این شهرک صنعتی موجود موفق شده است ۴۹۴۰ شغل ایجاد نماید و تا به امروز ۲۱۶ واحد به بهره‌برداری رسیده و پتانسیل بالایی در جذب سرمایه دارد. بخش توسعه شهرک صنعتی علویجه به مساحت ۱۸۰ هکتار در راستای توسعه فعالیت‌های شهرک در حال انجام است. از دیدگاه محیط‌زیست فیزیکی، اقلیم منطقه مورد مطالعه جز مناطق خشک است. متوسط بارندگی ۱۵۳ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۶ سانتی‌گراد متغییر است. در محدوده مورد مطالعه، شبکه‌ای از خشکه رودهایی وجود دارد که در اغلب ماه‌های سال بدون آب هستند. همچنین موقعیت منطقه مورد مطالعه نسبت به منابع آب سطحی در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی شهرک صنعتی علویجه در استان اصفهان

روش‌های مختلف برآورد سیلاب

مدل^۱ HEC-HMS

برآورد دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله

در طرح حاضر با استفاده از مدل HEC-HMS به شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی از حوزه و زیرحوزه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف پرداخته شد. در این بخش هر یک از مراحل روش تحقیق به تشریح بیان می‌گردد.

الف- شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب

در این پژوهش با کاربرد مدل HEC-HMS از روش SCS در تبدیل رابطه بارش-رواناب و نیز روندیابی آبراهه‌ها به روش ماسکینگام کونژ به منظور استخراج هیدروگراف سیل خروجی استفاده گردید. ورودی این نرم افزار جهت انجام شبیه‌سازی سیلاب شامل مدل فیزیوگرافی و مدل بارش حوزه است که در ادامه هر یک از مراحل به تفصیل بیان می‌شود. الف) مدل فیزیوگرافی: این مدل شامل شماره منحنی حوضه، زمان تاخیر و تمرکز حوضه است. جهت تهیه شماره منحنی نیاز به نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک است. نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای Google earth تهیه شد. برای تهیه نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی، نقشه خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ و شیب حوضه استفاده شد و با استفاده از ابزار HEC-GeoHMS با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، نقشه شماره منحنی تهیه شد.

روش SCS

در روش SCS برای تعیین بارش مازاد یا رواناب نیاز به مقدار کل تلفات یا S می‌باشد که از طریق رابطه ۳-۱ با یک عامل بی بعد^۲ به نام CN محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از رابطه ۳-۲ ارتفاع رواناب ناشی از بارندگی ۲۴ ساعته با دوره بازگشت‌های مشخص مورد محاسبه قرار گرفت (مهدوی، ۱۳۸۸ و علیزاده، ۱۳۸۸).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-1)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3-2)$$

در این روابط S تلفات حوزه به اینچ، CN شماره منحنی به اینچ، P ارتفاع بارندگی ۲۴ ساعته بر حسب میلی‌متر و Q ارتفاع رواناب بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

پس از محاسبه ارتفاع رواناب، دبی پیک با استفاده از رابطه ۳-۳ محاسبه می‌گردد:

$$Q_{\max} = \frac{(2.083 A Q)}{t_p} \quad \dots \quad (3-3)$$

¹ Hydrologic Modeling System

² Dimensionless

که در آن Q_{max} دبی حداکثر لحظه‌ای به مترمکعب بر ثانیه، A سطح حوزه به کیلومتر مربع، Q ارتفاع رواناب محاسبه شده به سانتی متر و t_p زمان از شروع شاخه صعودی هیدروگراف تا رسیدن به اوج^۱ بر حسب ساعت که می‌توان آن را از مجموع زمان تأخیر^۲ و نصف مدت زمان بارش موثر به دست آورد.

زمان تأخیر از طریق رابطه ۳-۴ محاسبه می‌شود. همچنین این زمان را بر حسب دقیقه از رابطه ۳-۵ و از روی زمان تمرکز می‌توان محاسبه کرد. ضریب $۲/۰۸۳$ برای حوزه‌های معمولی بوده و در حوزه‌های کوهستانی پرشیب باید ۲۰ درصد آن را افزایش و در حوزه‌های مسطح همراه با مانداب ۳۰ درصد کاهش داد (مهدوی، ۱۳۸۸).

$$T \log = \frac{L^{0.8} (S + 1)^{0.7}}{1900Y^5} \quad (3-4)$$

$$Tc = 1.67(T \log) \quad (3-5)$$

که در فرمول‌های بالا $T \log$ زمان تأخیر به ساعت، L طول آبراهه اصلی به فوت، Y شیب آبراهه اصلی به درصد و Tc زمان تمرکز به ساعت می‌باشد.

شماره منحنی (CN)

شماره منحنی رواناب (CN) نمایه خصوصیات حوزه از نظر نفوذپذیری است که در محاسبات مربوط به رواناب حائز اهمیت می‌باشد. این شاخص با توجه به جدولی که توسط سازمان حفاظت خاک ایالات متحده بر اساس نوع بهره‌برداری از زمین، عملیات زراعی و یا کارهای اصلاحی، وضعیت هیدرولوژیکی و گروه‌های هیدرولوژیکی تهیه می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۸؛ مهدوی ۱۳۸۸). مقدار CN بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است. در CN برابر صفر هیچ‌گونه رواناب از بارندگی حاصل نیامده و در CN برابر ۱۰۰ کل بارش در سطح زمین جریان یافته و ارتفاع رواناب برابر ارتفاع بارندگی خواهد بود. CN از ترکیب ۲ عامل گروه هیدرولوژیکی و کاربری اراضی در هر نقطه از حوزه برآورد می‌شود و CN کل حوزه از میانگین‌گیری وزنی محاسبه می‌گردد.

در این پژوهش پس از تهیه نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه هیدرولوژیکی با تلفیق نقشه‌های مذکور بر اساس جدول SCS در نهایت نقشه رستری شماره منحنی با قدرت تفکیک ۳۰ متر تهیه گردید. در ادامه نحوه تهیه نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی تشریح می‌شود.

گروه‌های هیدرولوژیک خاک^۳

خصوصیات خاک روی تحول و پیدایش رواناب اثر داشته و در محاسبات مربوط به آن در نظر گرفته می‌شود. خصوصیات خاک را می‌توان با یک عامل هیدرولوژیک بیان کرد که آن حداقل سرعت نفوذپذیری در حالت مرطوب طولانی مدت خاک می‌باشد. بدین ترتیب تمام خاک‌ها بر اساس تولید رواناب به چهار گروه A، B، C و D تقسیم می‌شود. گروه A: خاک‌هایی هستند با شدت نفوذپذیری بالا (۷/۵-۱۱/۵ میلی‌متر در ساعت) حتی هنگامی که کاملاً مرطوب هستند، دارای زهکشی خوبی بوده و آب‌گذری بالایی داشته و خاک‌های شنی و قلوه‌سنگی را شامل می‌گردند و توان تولید رواناب در آن‌ها ضعیف است.

1. Time to peak

2. Lag time

3. Hydrologic soil groups

گروه B: خاک‌هایی هستند با شدت نفوذپذیری متوسط (۳/۸-۷/۵ میلی‌متر در ساعت) هنگامی که مرطوب هستند. خاک‌هایی که عمیق بوده و زهکشی متوسط تا خوب داشته و دارای بافت ریز تا متوسط می‌باشند و توانایی متوسطی از نظر تولید رواناب دارند.

گروه C: خاک‌هایی با نفوذپذیری کم (۳/۱-۳/۸ میلی‌متر در ساعت) وقتی که مرطوب هستند، اغلب دارای لایه‌ای هستند که مانع نفوذ آب به قسمت‌های پایین‌تر می‌گردد و یا دارای بافت ریز تا نسبتاً ریز بوده و توان تولید رواناب در آن‌ها بسیار زیاد است.

گروه D: خاک‌هایی با نفوذپذیری کم (۳/۱-۰ میلی‌متر در ساعت) هنگامی که خیس هستند و عمدتاً شامل خاک‌های رسی، خاک‌هایی با یک سفره آب بالا و دائمی، خاک‌هایی با لایه‌های سخت رسی در سطح و یا نزدیک آن و خاک‌های کم عمق روی تشکیلات تقریباً غیرقابل نفوذ می‌باشند. خاک‌های این گروه توان تولید رواناب بالایی دارند، مانند آسفالت خیابان‌ها، جاده‌ها و خاک‌های رس متورم.

در واقع گروه‌های هیدرولوژیکی وضعیت خاک را از نظر ظرفیت نفوذپذیری در ۴ سطح A, B, C, D طبقه‌بندی می‌کند. طبقه A دارای بیش‌ترین ظرفیت و طبقه D دارای کم‌ترین ظرفیت نفوذپذیری است. در این پژوهش نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی، با استفاده نقشه بافت خاک تهیه گردید.

ب) مدل بارش حوضه: جهت ورود داده‌ها (بارش ۲۴ ساعته) به مدل بارش حوضه از آمار ایستگاه سینوپتیک دهق استفاده شد. پس از بررسی داده‌های حداکثر بارش ۲۴ ساعته به بررسی تحلیل فراوانی پرداخته شد. تحلیل فراوانی بارش با استفاده از نرم‌افزار EasyFit و آزمون نکوئی برازش کلموگراف-اسمیرنوف و آندرسون انجام شد (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۸، ۴).

حداکثر بارش روزانه قابل دسترس‌ترین رگبارهای هر منطقه است. این بارش قابل تفکیک به رگبارهای ساعتی است، بنابراین تحلیل نقطه‌ای و منطقه‌ای حداکثر بارش ۲۴ ساعته از ضروریات طرح‌های آب و هواشناسی است (خاک چین مقدم و همکاران، ۱۳۸۹). استفاده از بارش‌های حداکثری در برآورد سیلاب و مقادیر رواناب در حوزه‌های کوچک یا فاقد آمار طولانی مدت هیدرومتری همواره مورد توجه بوده است و استفاده از آن‌ها در محاسبه هیدروگراف‌ها اهمیت زیادی دارد (شاهریپارسا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶، ۵؛ مارتین^۲ و همکاران، ۲۰۲۰، ۷). پس از استخراج داده‌های حداکثر روزانه، همگنی و تصادفی بودن داده با روش غیر نموداری ران‌تست و استقلال داده‌ها با کاربرد آزمون ناپارامتری من-ویننی به وسیله نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از آزمون نکوئی برازش و توابع توزیع احتمال به بررسی توزیع احتمالاتی بارش پرداخته شد.

ج- نحوه ورود اطلاعات به مدل HEC-HMS

در این پژوهش، مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب HEC-HMS جهت شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب استفاده گردید. برای محاسبه تلفات و تخمین هیدروگراف از روش SCS و برای روندیابی از روش ماسکینگام کوئز استفاده شده است. با استفاده از الحاقیه Arc Hydro مرز زیرحوزه‌ها و حوزه آبخیز بسته شد. با بازدیدهای میدانی شرایط کلی حوزه به منظور برآورد برخی پارامترهای مورد نیاز در روش روندیابی ماسکینگام کوئز مانند عرض بستر آبراهه، شیب کناره آبراهه در هر بازه و ضریب مانینگ مورد بررسی قرار گرفت. مدل هیدرولوژی، در واقع ترکیبی از اجزاء زیرحوزه‌ها، بازه‌های روندی و خروجی‌ها می‌باشد. به منظور تهیه این مدل، پس از بستن مرز حوزه و زیرحوزه‌ها با افزونه Arc Hydro، داده‌های

¹. ShahiriParsa

². Martins

رستری و وکتوری تولید شده به افزونه HEC-geo-HMS در محیط برنامه ArcGIS فراخوانی شد. سپس با اضافه کردن نقشه شیب و شماره منحنی حوزه، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوزه مدل‌سازی و همچنین ریخت درختی (نموگراف) با استفاده از این افزونه تهیه گردید و جهت شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی حوزه و زیرحوزه‌ها به برنامه HEC-HMS انتقال داده شد. پس از انتقال خروجی HEC-geo-HMS به محیط مدل HEC-HMS اطلاعات مربوط به مدل بارش در دوره بازگشت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ بر اساس روش کار عنوان شده وارد مدل هواشناسی برنامه شد. سپس مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی واسنجی و اعتبارسنجی گردید و در نهایت برای دوره بازگشت‌های مذکور اجرا و هیدروگراف‌های در دوره بازگشت‌های مذکور شبیه‌سازی گردید (آشوک^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

محاسبات روش‌های تجربی

علاوه بر شبیه‌سازی جریان در HEC-HMS از سه روش تجربی جهت محاسبه دبی اوج سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله اقدام شد که این روشها شامل روش فولر، کریگر و فرانکو-رودیر می‌باشد. دلیل استفاده از این سه روش به دلیل وجود پارامتر مساحت در هر سه روش بود و این روابط وابسته به وجود داده در ایستگاه مبنا نبود و به طور مستقیم از مساحت حوضه در روابط استفاده گردید. در ادامه به روابط این سه روش اشاره شده است.

روش فولر

در این روش از رابطه ذیل جهت برآورد سیلاب در محل‌های مورد مطالعه و مهم استفاده می‌گردد:

$$Q_{tr} = CA^{0,8} [1 + 0,8 \text{Log}(Tr)] (1 + 2,66 A)^{-0,3}$$

که در آن Q_{tr} دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب در ثانیه)، C ضریب فولر و A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) می‌باشد.

روش کریگر

روش کریگر یکی از روش‌های تعیین دبی حداکثر سیلاب در سطوح حوزه‌های آبخیز بزرگ و کوچک بوده که فرمول آن به صورت زیر می‌باشد.

$$Q = \frac{1}{3} C (0,386 A)^{0,894(0,386A)-0,048}$$

که در آن: A مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع، C ضریب کریگر و Q دبی سیلاب بر حسب مترمکعب در ثانیه می‌باشند.

با استفاده از فرمول فوق‌الذکر، ضریب کریگر برای حوزه مورد مطالعه تعیین شده و در نهایت با استفاده از فرمول کریگر مقدار سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله در محل مورد نظر برآورد گردیده است.

روش فرانکو-رودیر

در این روش از رابطه ذیل جهت برآورد سیلاب در محل‌های مورد مطالعه استفاده می‌گردد:

$$Q_p = 10^6 \left(\frac{A}{10^8} \right)^{1-0,1k}$$

که در آن Q_p دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب در ثانیه)، k ضریب فرانکو-رودیر و A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) می‌باشد. با استفاده از مقدار سیلاب در دوره برگشت ۲۰۰ ساله، مقادیر ضریب فرانکو-رودیر برای این دوره تعیین گردیده و سپس با استفاده از ضریب فوق‌الذکر مقدار سیلاب محاسبه شده است.

محاسبه ابعاد کانال

روش‌های مطرح در طراحی کانال‌های باز شامل روش بهترین سطح مقطع هیدرولیکی، روش هندوستان و روش USBR می‌باشد. روش بهترین سطح مقطع هیدرولیکی بر مبنای کمترین محیط خیس شده ارائه شده است. اساس این روش‌ها مطابق با روابط زیر ارائه می‌گردد:

$$\frac{dp}{dy} = 0$$

$$\frac{b}{y} = 2 \left\{ \sqrt{1 + m^2} - m \right\}$$

$$m = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

روش هندوستان از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Y = \sqrt{\frac{A}{3}}$$

$$\frac{b}{y} = 3 - m$$

بر اساس روش USBR طرح کانال با شکل ذوزنقه‌ای بصورت زیر ارائه می‌گردد:

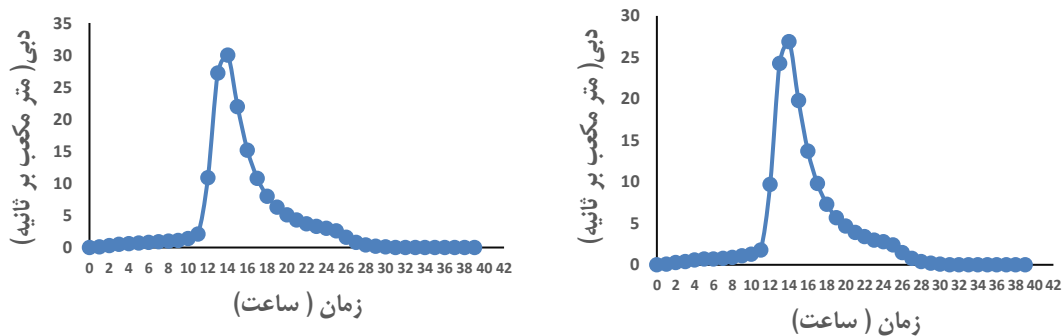
$$Y = \frac{\sqrt{A}}{2}$$

$$\frac{b}{y} = 4 - m$$

m شیب جانبی کانال، b عرض کف کانال ذوزنقه‌ای، y عمق جریان می‌باشد. در این مطالعه حاضر شیب جانبی کانال ۱:۱ و ۱:۱٫۵ در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها

پس از تعیین مقادیر حداکثر بارش شش ساعته و سایر پارامترهای مورد نیاز و وارد شده به مدل مقادیر حداکثر سیلاب با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله شبیه‌سازی گردید. نتایج مربوط به دبی حداکثر در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. هیدروگراف‌های با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است و از شروع بارندگی تا زمان اوج هیدروگراف سیل در هر دو مورد حدود ۸۴۰ دقیقه می‌باشد و ۶۰ دقیقه از شروع بارندگی هیچ روانابی ایجاد نمی‌شود و کل بارندگی اتفاق افتاده در این زمان از شروع بارندگی در سطح حوضه نفوذ می‌کند. همچنین از لحظه جاری شدن رواناب تا اوج هیدروگراف در هر دو دوره بازگشت حدود ۷۲۰ دقیقه طول می‌کشد. ضمناً از لحظه شروع بارندگی تا زمان فروکش کردن سیل حجم آب در حدود ۵۳۶۷۶۰ و ۵۹۴۰۰۰ مترمکعب ایجاد می‌شود.



شکل ۲: هیدروگراف دبی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله

شکل ۳: هیدروگراف دبی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله

با مقایسه نتایج هیدروگراف دبی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و ۲۰۰ ساله مشاهده می‌گردد که هر دو مساحت یکسانی (۱۷/۶ کیلومتر مربع) را زهکشی می‌کنند ولی مقدار دبی اوج ۲۰۰ ساله بیشتر از دبی اوج ۱۰۰ ساله می‌باشد. با توجه به شرایط حوضه مورد مطالعه و در نظر گرفتن بیشترین سیلاب جهت طراحی از دبی اوج سیلاب ۲۰۰ ساله جهت برآورد ابعاد کانال استفاده شده است. در مقایسه، حجم زیر هیدروگراف دبی سیلاب ۱۰۰ ساله ۵۳۶۷۶۰ مترمکعب و سیلاب ۲۰۰ ساله ۵۹۴۰۰۰ مترمکعب را دربرمی‌گیرد که به اندازه ۱۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. بنابراین مقدار ارتفاع رواناب ایجاد شده در دبی سیلاب ۱۰۰ ساله ۰/۳۰۴ متر و در دبی سیلاب ۲۰۰ ساله به میزان ۰/۳۳ متر می‌باشد که افزایش ۸/۵۵ درصدی داشته است.

بعد از محاسبه دبی حداکثر توسط روش‌های کلاسیک و HEC-HMS، این مقادیر با دبی اوج ۲۰۰ ساله مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که روش کریگر کمترین دبی و مدل HEC-HMS بیشترین مقدار دبی را برآورد کردند. روش فولر نزدیکترین نتیجه را به مدل HEC-HMS داشت.

محاسبه ابعاد کانال

در این مطالعه، از هر سه روش بهترین سطح مقطع هیدرولیکی، روش هندوستان و روش USBR جهت محاسبه کانال دوزنقه‌ای شکل استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد براساس آیین‌نامه هندوستان محاسبه شده اند که برای دبی بزرگتر از ۹ مترمکعب بر ثانیه باید بیشتر از ۰/۹ به مقدار عمق آب اضافه شود. در جدول ۲ تا ۵ مقادیر ابعاد کانال با توجه به نتایج مدل HEC-HMS و سایر روش‌های کلاسیک ارائه شده است.

جدول ۱: محاسبه دبی حداکثر محاسبه شده با روش‌های کلاسیک و مدل HEC-HMS

روش	فولر	کریگر	فرانکو- رودیر	HEC-HMS
دبی دوره بازگشت ۲۰۰ ساله	۲۹/۵	۲۸/۷	۲۸/۶	۳۰

جدول ۲: نتایج محاسبه ابعاد کانال هدایت آب با نتایج مدل HEC-HMS

روش	شکل کانال	ارتفاع به ازای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله
بهترین مقطع هیدرولیکی	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۴۴ متر و عرض بالا ۵/۸۳ یا شیب $1:\sqrt{3}/3$	۲/۹۶۹
هندوستان	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۱۹۲ متر و عرض بالا ۶/۳۸۴ یا شیب ۱:۱	۲/۴۹۶
USBR1	دوزنقه ای با عرض پایین ۴/۱۹۱ متر و عرض بالا ۶/۹۸۷ یا شیب ۱:۱	۲/۲۹۷
	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۵۳ متر و عرض بالا ۷/۷۷ یا شیب ۱:۱,۵	۲/۳۱۳

جدول ۳: نتایج محاسبه ابعاد کانال هدایت آب با نتایج فولر

ارتفاع به ازای دوره بازگشت ۲۰+ ساله	شکل کانال	روش
۲/۸	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۳ متر و عرض بالا ۵/۷ با شیب $1:\sqrt{3}/3$	بهترین مقطع هیدرولیکی
۲/۳۴	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۰۵ متر و عرض بالا ۶/۱۲ با شیب ۱:۱	هندوستان
۲/۲۳	دوزنقه ای با عرض پایین ۴/۰۳ متر و عرض بالا ۶/۸۶ با شیب ۱:۱	USBR1
۲/۲۱	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۴۶ متر و عرض بالا ۷/۵۷ با شیب ۱:۱,۵	

جدول ۴: نتایج محاسبه ابعاد کانال هدایت آب با نتایج کریگر

ارتفاع به ازای دوره بازگشت ۲۰+ ساله	شکل کانال	روش
۲/۶۷	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۲ متر و عرض بالا ۵/۶ با شیب $1:\sqrt{3}/3$	بهترین مقطع هیدرولیکی
۲/۲۸	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۰۲ متر و عرض بالا ۶/۰۹ با شیب ۱:۱	هندوستان
۲/۲۱	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۹۹ متر و عرض بالا ۶/۶۶ با شیب ۱:۱	USBR1
۲/۱۸	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۳۶ متر و عرض بالا ۷/۵۳ با شیب ۱:۱,۵	

جدول ۵: نتایج محاسبه ابعاد کانال هدایت آب با نتایج فرانکو-رودیر

ارتفاع به ازای دوره بازگشت ۲۰+ ساله	شکل کانال	روش
۲/۶۷	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۲ متر و عرض بالا ۵/۶ با شیب $1:\sqrt{3}/3$	بهترین مقطع هیدرولیکی
۲/۲۸	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۰۳ متر و عرض بالا ۶/۰۸ با شیب ۱:۱	هندوستان
۲/۲۱	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۹۹ متر و عرض بالا ۶/۶۶ با شیب ۱:۱	USBR1
۲/۱۸	دوزنقه ای با عرض پایین ۳/۳۶ متر و عرض بالا ۷/۵۳ با شیب ۱:۱,۵	

همانطور که در جداول ۲ تا ۶ مشاهده می‌شود با کاهش دبی به ترتیب در نتایج مدل HEC-HMS، فولر و کریگر و فرانکو-رودیر شاهد کاهش ابعاد کانال در روشهای مختلف می‌باشیم. بیشترین ارتفاع دیواره کانال ۲/۵ متر مربوط به نتایج HEC-HMS و کمترین ارتفاع دیواره به میزان ۲/۳۳۵ متر مربوط به روش کریگر و فرانکو-رودیر می‌باشد. با تغییر روش HEC-HMS به روش فولر بیشترین تغییر در ارتفاع دیواره مربوط به روش بهترین مقطع هیدرولیکی می‌باشد. این اختلاف در حدود ۵/۶ درصد می‌باشد. این اختلاف در مورد روش کریگر و فرانکو-رودیر نیز در روش بهترین مقطع هیدرولیکی مشاهده می‌شود و این اختلاف در این حالات به اندازه ۱۰ درصد می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه روش بهترین مقطع هیدرولیکی بیشترین حساسیت نسبت به تغییر ابعاد کانال به ویژه ارتفاع کانال دارد باید بیشتر مورد توجه طراحان قرار بگیرد. در تمامی روشهای برآورد سیلاب می‌توان مشاهده کرد که روش USBR با شیب ۱:۱ کمترین ارتفاع دیواره و روش بهترین مقطع هیدرولیکی بیشترین مقدار را دارا هستند. همانطور که نتایج نشان داد مقدار ارتفاع دیواره کانال هدایت آب در محدوده ۲/۳ تا ۲/۹۶ قرار گرفته است. از آنجا که بهترین مقطع هیدرولیکی لزوماً اقتصادی‌ترین مقطع نمی‌باشد بنابراین مقدار نهایی این ارتفاع را می‌توان متوسطی از روش‌های فوق در نظر گرفت که در اینجا این مقدار ۲/۵ و مربوط به نتایج مدل HEC-HMS انتخاب شد. کمترین ارتفاع آبیگری مربوط به روش USBR با شیب ۱:۱ و بیشترین مقدار مربوط به روش بهترین مقطع هیدرولیکی می‌باشد.

بحث

تعیین ابعاد سازه‌های آبی نیازمند محاسبه دبی طراحی از مطالعات هیدرولوژی می‌باشد. لذا برآورد دبی سیلابی با دوره بازگشت مناسب آن سازه از اهم اهداف طرح می‌باشد. لذا در این پژوهش به بررسی ابعاد کانال هدایت آب در پایین دست شهرک صنعتی علویجه در کیلومتر ۷۰ جاده اصفهان - علویجه به شبیه‌سازی سیلاب طراحی با استفاده از HEC-HMS و روش‌های تجربی فولر، کریگر و فرانکو - رودیر پرداخته شده است. در محاسبه ابعاد کانال از روش‌های USBR، هندوستان و بهترین مقطع هیدرولیکی استفاده گردید که در سال ۱۳۸۹ مصباحی نیز از این روشها جهت برآورد ابعاد کانال رودخانه و تعیین بهترین و اقتصادی ترین مقطع استفاده کرده بود. در جمع بندی نتایج تحقیق می‌توان اشاره کرد که دقیق ترین نتیجه مربوط به HEC-HMS با ۱۰/۶۳ درصد خطا و بیشترین خطا مربوط به روش کریگر می‌باشد که می‌توان با نتایج پژوهش و کیلی و مقدم نیا در سال ۱۴۰۱ مقایسه کرد که آن‌ها روش‌های تجربی فولر و کریگر را بعد از HEC-HMS به ترتیب بهترین نتایج اعلام کردند. همچنین در این مطالعه نیز نتیجه آن‌ها در مورد نزدیک بودن نتایج دو روش فرانکو-رودیر و کریگر به هم حاصل شد.

دقت مناسب روش SCS که از مشخصه‌های مختلف اقلیمی، زمین شناسی و فیزیوگرافی و بارش استفاده میکند، دلیلی است که در این مطالعه نتایج روش SCS به عنوان روش مناسب جهت تعیین سیلاب طرح پیشنهاد شد که کرکوتی و همکاران در سال (۱۳۸۹) به همین نتیجه رسیدند و باباعلی و همکاران در سال (۱۳۹۷) نیز مدل HEC-HMS را به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای مختلف هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه جهت برآورد رواناب پیشنهاد دادند. نتایج حاصل از مدل HEC-HMS، دلالت بر اهمیت واسنجی متغیر تلفات اولیه دارد که منتج از CN بوده، با نتایج غلامی (۲۰۲۱) مبنی بر امکانسنجی مدل SCS با تغییر در مقادیر CN و تلفات اولیه مطابقت دارد. با توجه به کارایی خوب مدل HEC-HMS می‌توان از این مدل جهت برآورد سیلاب در حوضه‌های بدون آمار با واسنجی مناسب استفاده کرد و نتایج قابل قبولی به دست آورد. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS دارای قابلیت خوبی در پیش بینی زمان واقعی سیل است و لذا در این تحقیق از آن استفاده شده است. این مسئله با نتایج آل شریف و همکاران (۲۰۱۳)، محمدرشید عالی و همکاران (۲۰۲۰) و سایر محققان مطابقت دارد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر این است که مقدار دبی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله (۳۰ مترمکعب بر ثانیه) به اندازه ۱۱،۵۲ درصد نسبت به سیلاب ۱۰۰ ساله (۲۶،۹ مترمکعب بر ثانیه) افزایش داشته است که این مقدار می‌تواند در تعیین ارتفاع دیواره کانال هدایت موثر باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و با در نظر گرفتن سیلاب ۲۰۰ ساله به عنوان سیلاب طراحی که ۳۰ متر مکعب بر ثانیه محاسبه شد مقدار ارتفاع دیواره مورد نظر جهت طراحی کانال هدایت آب ۲/۵ متر در نظر گرفته شد. این کانال جهت عبور دبی طراحی به صورت دوزنقه‌ای با عرض تحتانی و فوقانی به ترتیب ۴ و ۷ متر با شیب جانبی $1:\sqrt{3}/3$ انتخاب شد. کمترین ارتفاع دیواره مربوط به روش USBR با شیب ۱:۱ و بیشترین مقدار مربوط به روش بهترین مقطع هیدرولیکی می‌باشد ولی کمترین ارتفاع دیواره دلیلی برای انتخاب گزینه اقتصادی نمی‌باشد و بیشترین مقدار ارتفاع دیواره با اینکه از نظر ایمنی در اولویت قرار می‌گیرد ولی از نظر اقتصادی نیاز به بررسی دارد. بنابراین در این پژوهش یک مقدار متوسط ارائه شد.

مقدار دبی از نتایج مدل عددی در مقایسه با روش فرانکو-رودیر به میزان ۴/۶ درصد کاهش می‌یابد که همراه با کاهش ۶/۶ درصدی ارتفاع دیواره کانال و کاهش ۵/۵۷ درصدی در عرض پایین کانال و کاهش ۵/۸۵ درصدی عرض فوقانی کانال می‌باشد. دو روش فرانکو-رودیر و کریگر نتایج تقریباً نزدیک به هم ارائه دادند و نتایج HEC-HMS و فولر نیز نزدیک هم بود. با توجه به نتایج نزدیک روش فولر به نتایج HEC-HMS می‌توان در حوضه‌هایی که امکان مدل سازی به دلیل کمبود ورودی‌های مدل وجود ندارد به نتیجه این مدل نیز اکتفا کرد. در پایان پیشنهاد می‌شود در استفاده از

معادله‌های تجربی که بر مبنای سطح حوزه آبخیز نیز نیستند، آزمون به عمل آمده، با سایر روش‌ها در برآورد دبی حداکثر سیلاب مقایسه شود.

منابع

- اسدی، جباری، ح.، جباری، ا.، حصادی، ه. ۱۳۹۸. مدل سازی سیلاب در مناطق خشک و نیمه خشک با بهره گیری از مدل *HEC-HMS* مطالعه موردی (حوضه آبریز سد استقلال میناب). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۳): ۳۳-۱۷.
- باباعلی، ح.ر.، رامک، ز. و سپوند، ر. (۱۳۹۷). برآورد سیلاب طرح حوضه آبخیز با بهکارگیری تئوری فرکتال و مدل بارش-رواناب *HEC-HMS* مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه خرم‌آباد. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۲(۶): ۱۱۰۷-۱۰۹۷.
- حسینی، م.، جعفر بیگلر، م.، یمانی، م. ۱۳۹۴. پیش بینی سیلاب های رودخانه کشکان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS*. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴ (۱): ۱۱۸-۱۳۳.
- چیدز، آ.، محسنی، آ.، وفاخواه، م. (۱۳۸۹). ارزیابی مدل *HEC-HMS* برای تخمین هیدروگراف سیل در حوزه آبخیز کاسیلیان. مجله تحقیقات آبخیزداری. ۴ (۳): ۵۴-۶۳.
- علمداری، پ. ۱۴۰۰. تحلیل مکانی مخاطرات سیلاب در حوضه آبریز قلعه چای عجب شیر با استفاده از *GIS* و *HEC-HMS*. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۱۰ (۱): ۹۳-۱۱۱.
- فتحی زاد، عابدینی، ا.، جیبی، ه. ۱۳۹۸. بررسی علل وقوع سیلاب و مخاطرات آن در حوضه آبریز زوزچای با استفاده از مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS* و منطق فازی. مجله ژئومورفولوژی کمی ۹ (۱): ۱۳۴-۱۵۵.
- کریمی، م.، ملکی نژاد، حسن آبخاری، حسن عزیزیان، م. (۱۳۹۰). ارزیابی روش های مختلف شبیه سازی هیدروگراف سیالات با استفاده از *HEC-HMS* (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل چای). مجله تحقیقات آب ایران، ۵ (۹): ۱-۶.
- کرکوتی، ع. نظریه‌ها، م. باغوند، آ. جعفری سلیم، ب. کرباسی، ع. و وثوق، ع. (۱۳۸۹). برآورد مقدار سیلاب حداکثر به روشهای مشاهده‌ای، کریگر و مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو در کرمانشاه. محیط شناسی، ۵۵ (۸۹): ۹۹-۱۱۰.
- میرزائی، س.، وفاخواه، م.، علوی، ج.، پردهان، ب. (۱۳۹۹). پیشبینی و تحلیل پهنه سیل در شرایط تغییر اقلیم براساس سناریوهای مدل *CanESM2 9 2*. اکوهیدرولوژی. ۲ (۷): ۲۲۹-۲۶۲.
- مصباحی، مسعود، ۱۳۸۹، بررسی مناسبترین معیارهای طراحی کالورتها از طریق مقایسه روابط هیدرولیکی و نمودارهای *USBR*، همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، استهبان.
- وکیلی، ش.، مقدم، نی، ع. ۱۴۰۱. بررسی مقایسه ای مدل بارش-رواناب *HEC HMS* با روشهای تجربی مختلف برآورد سیلاب. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۶ (۵۸): ۳۲-۴۱.
- *Al-Shareef, O.H. Ezzeldin, M. and Gutub, S.A. 2013. Comparison of peak discharge estimation methods in northern Jeddah in western Saudi Arabia. Advances and Applications in Fluid Mechanics. 14(2): 219-236.*
- *Aliye, M.R. Aga, A.O. Tadesse, T. and Yohannes, P. 2020. Evaluating the Performance of HEC-HMS and SWAT Hydrological Models in Simulating the Rainfall-Runoff Process for Data Scarce Region of Ethiopian Rift Valley Lake Basin. Open Journal of Modern Hydrology. 10 (4):105-122.*
- *Ashok V., Umamahesh N., Bhatt C. 2019. Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. Modeling Earth Systems and Environment volume 5, pages 1839-1851.*

- Desalegn H, Mulu A. (2021). Mapping Flood Inundation Area Using GIS and HEC-RAS Model at Fetam River. Ethiopia., *Scientific African*. . e00834
- Guduru J., BoruJilo N., Rabba Z., Geyisa Namara V. 2023. Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki river watershed, rift valley basin, *Ethiopia Journal of African Earth Sciences*. 197: 104743.
- Juma B., Hassan M., Mulligan J., Shiundu P. 2022. Simulation of flood peak discharges and volumes for flood risk management in the ungauged urban informal settlement of Kibera, Kenya .*Physics and Chemistry of the Earth* . 128: 10323.
- Janizadeh S., Chandera S., Saha A. 2021. Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future .*Journal of Environmental Management*, 298 (15): 113551
- Gumindoga W., Donald T.Rwasok D., Nhapia I., Dubec T. 2017. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 100, 371-382.
- Gholami, V. and Khaleghi, M.R. 2021. A simulation of the rainfall-runoff process using artificial neural network and HEC-HMS model in forest lands. *Journal of Forest Science*. 67(4):165-174.
- Martins M, Concalves A, Gomes A. Definition of Flood Prone Area: A Comparison between HEC RAS and Iber software results” in *Advances in Natural Hazards and Hydrological Risk: Meeting the Challenge*. 2020. Pp. 127-131.
- Oloche O ., Li . Z. 2010. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China *Water Science and Engineering* .3 (1): 14-22.
- Ramachandran A, Palanivelu K, Mudgal BV, Jeganathan A, Guganesh S, Abinaya B, et al. (2019) Climate change impact on fluvial flooding in the Indian sub-basin: A case study on the Adyar sub-basin. *PLOS ONE*. 14(5): e02164.
- ShahiriParsa A., Noori M., Noori M. 2016. Floodplain Zoning Simulation by Using HEC-RAS and CCHE2D Models in the Sungai Maka River. *Air Soil and Water*. 9 (1): 63-74.