

برآورد و تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیل محتمل (PMF) با استفاده از رویکرد

ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل‌سازی هیدرولوژیکی

(مطالعه موردی: حوضه آبریز قمرود)

ابراهیم فتاحی^{۱*}، عباس رنجبر سعادت‌آبادی^۱، مجید دلاور^۲

۱- دانشیار پژوهشکده هواشناسی

۲- استادیار گروه مهندسی منابع آب دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

ابعاد خسارات حاصل از سیلاب‌ها در سطح جهان، حساسیت بسیار بالای انتخاب سیل طراحی به منظور حفظ پایداری این تأسیسات و همچنین هدف‌گذاری برای کنترل و مدیریت سیلاب‌های محتمل را نشان می‌دهد. در این مطالعه، به برآورد و تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیل محتمل (PMF) حوضه آبریز رودخانه قمرود با توجه به اهمیت مسئله کنترل سیلاب در این منطقه پرداخته شده است. بدین منظور در برآورد حداکثر سیل محتمل دو رویکرد کلی مد نظر قرار گرفت. در رویکرد اول از روش آماری و با توجه به ارتباط بین مقادیر بارش حداکثر و دبی حداکثر لحظه‌ای سیلاب در دوره برگشت‌های مختلف، مقادیر PMF متناظر با حداکثر بارش محتمل برآورد گردید. در روش آماری، با توجه به معادله خطی برازش داده شده بر مقادیر حداکثر بارش محتمل برآورد شده در منطقه و دبی حداکثر لحظه‌ای، مقادیر دبی حداکثر حدود ۴۸۵/۸ متر مکعب در ثانیه برآورد گردید. در رویکرد دوم برآورد PMF بر اساس روش شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و با استفاده از مدل بارش رواناب HEC-1 انجام گرفت. تحلیل عدم قطعیت نتایج حاصل از این رویکرد نیز با لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی و داده‌های ورودی انجام شد. بدین منظور دامنه و باند عدم قطعیت تغییرات هیدروگراف PMF، به ازای دامنه تغییرات و ترکیب‌های مختلف از شرایط بحرانی در زمان وقوع PMP با استفاده از آنالیز عدم قطعیت نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی سیلاب حاصله از PMP به روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گردید. نتایج نشان داد مقدار حداکثر سیل محتمل در منطقه مطالعاتی در دامنه‌ای بین ۴۳۲ تا ۵۳۶ متر مکعب در ثانیه قرار خواهد گرفت.

کلید واژه‌ها: حداکثر سیل محتمل، روش آماری، مدل HEC-1، شبیه‌سازی مونت کارلو، قمرود

مقدمه

برآورد حداکثر سیل محتمل در رودخانه‌ها که یکی از معیارهای مهم طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد در مطالعات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به مطالعه Alfier et al., (2015) اشاره کرد. آنها تغییرات سیلاب‌های قرن حاضر را در اروپا بررسی کردند و با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب، مقادیر دبی پیک سیلاب را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق دو برابر شدن مقادیر سیلاب با دوره بازگشت بیشتر از ۱۰۰ سال را در طول سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ در اروپا نشان می‌دهد.

Kundzewicz et al., (2014) نیز در مطالعه‌ای، تغییرات بزرگی و دوره بازگشت اوج سیلاب‌ها را در مقیاس جهانی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنها در ۴۰ درصد مناطق، سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، در سال ۲۰۵۰ حداقل دو بار اتفاق می‌افتد و میزان تغییرات خطر سیل بین ۹٪ - تا ۳۷۶٪ خواهد بود.

Woodbury et al., (1994) با بررسی و حداقل سازی (PMF) در قالب یک مطالعه موردی بر روی رودخانه میشیگان ارتباط کاهش حداکثر سیل محتمل با کاهش قابل توجه هزینه سرریز سدها را ارزیابی نموده‌اند.

Paimazd et al., (2006) محاسبه (PMF) را در شرایط کمبود آمار و اطلاعات و عوامل تاثیرگذار بر آن از جمله توزیع زمانی بارندگی و مدل‌های بارش و رواناب را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که تلفیق میانگین مشاهده‌ای و روش بلوک‌های متناوب توزیع مناسب بارندگی برای محاسبه PMF منطقی می‌باشد.

از آنجایی که سیل به طور ذاتی یک پدیده غیر قطعی می‌باشد، اطمینان و اعتبار مطالعات حداکثر سیل محتمل نیز به نوبه آن بدون در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت بسیار حائز اهمیت است. منابع عدم قطعیت عواملی هستند که منجر به افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی یک سامانه مدل‌سازی شده می‌شوند (Fathian, 2010). در زمینه برآورد حداکثر سیل محتمل منابع عدم قطعیت می‌تواند مربوط به عواملی همچون عدم قطعیت مدل شبیه‌ساز هیدرولژیکی، عدم قطعیت پارامترهای مدل، عدم قطعیت ورودی‌ها و شرایط اولیه مدل مانند میزان بارندگی، تبخیر، آب معادل برف و غیره و عدم قطعیت طبیعی و عملیاتی به

سیلاب به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، سالانه علاوه بر وارد آوردن خسارات مالی سنگین، جان تعداد زیادی از انسان‌ها را نیز می‌گیرد. علی‌رغم پیشرفت‌های بشر در این زمینه، حتی وقتی پروژه‌های کنترل سیلاب به خوبی طراحی و اجرا شده باشد، خسارات اقتصادی و تلفات جانی ناشی از سیلاب به دلایلی همچون: رشد و تراکم بیشتر جمعیت در مناطق سیل‌گیر، افزایش ارزش اقتصادی دارایی‌ها و املاک بشر در مناطق سیل‌گیر و تغییرات ایجاد شده توسط بشر در طبیعت رو به افزایش است. کمیت سیلی که برای طراحی سازه‌های تحت تأثیر وقایع هیدرولوژیکی با توجه به عواملی چون ایمنی سازه، هزینه، طول عمر و خسارت محتمل به کار می‌رود، سیل طراحی نام دارد. سیل طراحی معمولاً در سه دسته سیل‌های بر پایه فراوانی، حداکثر سیلاب محتمل (PMF) و سیل استاندارد پروژه تقسیم‌بندی می‌شوند (Iran Ministry of Energy, 2013). کارشناسان آب در برخی کشورها، حداکثر سیلاب محتمل را به عنوان سیلاب ایمنی سدهای بزرگ که در پایین‌دست آن‌ها، خطرات جانی قابل‌توجهی وجود دارد و هیچ‌گونه ریسک تلفات قابل پذیرش نیست، محسوب می‌نمایند. تحلیل فراوانی سیل یکی از روش‌های اصلی برآورد سیلاب است که دارای بیشترین حوزه فعالیت تحقیقات آمار و احتمالات در هیدرولوژی می‌باشد (Hamed and Rao, 1999). در تحلیل فراوانی بین بزرگی حوادث حدی و فراوانی وقوع آنها از انواع توزیع آماری استفاده می‌گردد (Rahman, et al., 2013).

حداکثر سیلاب محتمل (PMF) عبارت است از سیلی که از ترکیب شدیدترین شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی که به طور منطقی ممکن است در یک منطقه پدید آید حاصل می‌شود (Lester et al., 1988) (Lester et al., 1990). اعتقاد دارند که (PMF) نه محتمل است و نه حداکثر، بلکه یک فضاوت مهندسی درباره بزرگترین سیل در یک محل معین برای اهداف طراحی است. تعیین حداکثر سیل محتمل به همان اندازه که یک علم است یک هنر نیز محسوب می‌شود (Lester, et al, 1990).

نتیجه رسیدند که این مدل ابزاری مفید برای طراحی اقتصادی سرریز است.

Micovi et al., (2015) نیز تغییرات پارامترهای کالیبره مدل بارش-رواناب را طی تغییرات مکانی بارش ارزیابی کردند. در این پژوهش از مدل بارش-رواناب AGNPS کمک گرفته شد و عدم قطعیت پارامترهای مدل حاصل از تغییرات مکانی بارش تعیین گردید. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از یک ایستگاه برای تعیین بارش در سطح حوضه سبب افزایش خطای بارش متوسط حوضه و بالارفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل در برآورد سیلاب می‌شود. در مطالعه دیگری نیز عدم قطعیت ناشی از تعریف ساختار و پارامترهای مدل بارش-رواناب مفهومی را با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. مدل مفهومی مورد استفاده، مدل HBV بود و برای حوضه برف گیر بروگا با مساحت حدود ۴۰ کیلومتر مربع واقع در جنوب آلمان بکار گرفته شد. نتایج بیانگر این امر بود که عدم قطعیت پارامترها در عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها تأثیر مستقیم دارد.

با توجه به آنچه اشاره گردید. هدف از مطالعه حاضر برآورد و تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیل محتمل در شرایط اطلاعاتی حوضه‌های آبریز کشور پرداخته شده است. بدین منظور از یک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده گردید و تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف سیلاب حاصل از حداکثر بارش محتمل مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی روش شناسی نیز حوضه آبریز رودخانه قمرود مورد توجه قرار گرفت. که به دلیل شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی حاکم بر حوضه رودخانه، تاکنون سیل، خسارات قابل توجهی به ساکنان حاشیه آن وارد آورده که از جمله می‌توان به سیلاب سال‌های ۱۳۰۰، ۱۳۳۰، ۱۳۵۸، ۱۳۶۳، ۱۳۷۱، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۸ اشاره کرد. همچنین با توجه به تعداد زیاد مسافر در برخی از ایام سال در حاشیه و بستر رودخانه، در صورت رخداد سیل در این هنگام می‌تواند خسارات جانی بسیار گسترده‌ای را در پی داشته باشد.

دلیل عوامل پیش‌بینی نشده مانند طغیان دریاچه یخ‌زده، شکست سد، زمین‌لغزش‌ها و غیره باشد (Maskey & Price, 2003). تاکنون در مطالعات به عدم قطعیت‌های ورودی‌ها و ساختار مدل خیلی کم توجه شده است این به علت پیچیدگی ذاتی در سامانه‌های غیرخطی و فقدان روش‌های مرسوم ریاضی برای ارزیابی عدم قطعیت مدل و ورودی‌ها به ویژه عدم قطعیت ورودی‌ها می‌باشد (Ajami et al., 2006). در این زمینه (Hoybye & Rosbjerg, 2006) عدم قطعیت برآورد سیل را به علت عدم قطعیت در ورودی و عامل‌های مدل بارش رواناب تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که تغییر عامل‌های مدل هیدروگراف واحد تأثیر مستقیم بر تغییر رواناب دارد در حالی که سهم خطا از واریانس بارش موثر بستگی به مقدار متوسط پارامترها و نسبت بین بارش موثر و رواناب شبیه‌سازی شده دارد. در مطالعه دیگری (Maskey, et al., 2004) به منظور ارزیابی عدم قطعیت بارش در مدل قطعی بارش-رواناب، روش گسسته‌سازی زمانی در چهارچوب تئوری مجموعه فازی را ارایه نمودند. مقایسه کیفی عدم قطعیت در مقادیر دبی نشان داد که عدم قطعیت مقادیر دبی به علت عدم قطعیت در توزیع زمانی و مکانی غیرقطعی بارش می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از عدم قطعیت در مقدار غیرقطعی بارش باشد. (Safavi 2009) برای بررسی میزان عدم قطعیت در برآورد (PMF)، میزان عدم قطعیت در فرآیندهای زمینه‌ساز آن را مورد بررسی قرار داد و حوضه آبریز سد گلستان بعنوان منطقه مطالعه انتخاب گردید که مقدار حداکثر بارش محتمل در حوضه مذکور براساس توفان حداکثری مورخ ۲۰ مرداد ۱۳۸۰ برابر با ۱۵۷/۸ میلی‌متر به دست آمد و میزان عدم قطعیت آن با توجه به عدم قطعیت موجود در روند محاسبه بین ۱۰٪- تا ۲۰٪+ نسبت به مقدار محاسبه شده در نظر گرفته شد.

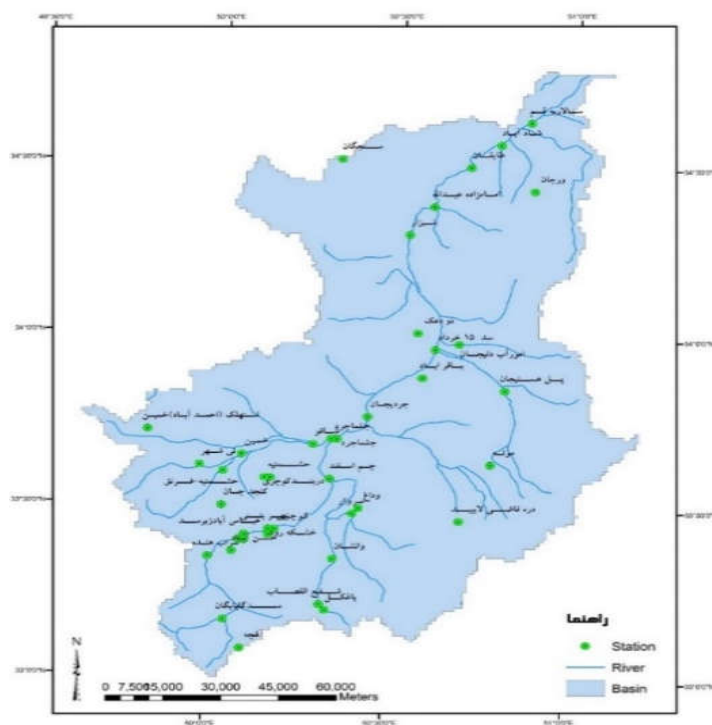
(Abrishamchi, et al., 2005) با استفاده از تئوری فازی روشی برای تخمین تابع خسارت ناشی از سرریز آب از روی بدنه سد ارائه نمودند. آنها همچنین با بررسی عدم قطعیت‌های مورد بحث در مراحل انجام روندیابی و تخمین مقدار سیل، یک مدل بهینه سازی برای طراحی سرریز ارائه کردند و با بکاربردن مدل برای سد ماکو به این

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز رودخانه قمرود در محدوده جغرافیایی ۴۰' ۴۹° تا ۳۳' ۳۳° طول شرقی و ۱۸' ۵۶° تا ۳۳' ۳۳° عرض شمالی قرار دارد. این حوضه آبریز از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه قره چای و از جنوب به حوضه آبریز رودخانه دز و رودخانه زاینده رود محدود می‌باشد. همچنین در سمت شرق این حوضه دریاچه نمک و کویر کاشان و سمت غرب آن نیز حوضه آبریز رودخانه مسدود کویر میغان اراک وجود دارد. حوضه آبریز قمرود دارای آبراهه‌های متعددی است، رودخانه قمرود آبراهه اصلی آن می‌باشد که سرچشمه آن در کوه سرخ واقع در جنوب غربی حوضه بوده و به سمت شمال حوضه امتداد می‌یابد. از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم احداث شده بر روی رودخانه قمرود نیز دو سد مخزنی گلپایگان و پانزده خرداد را می‌توان نام برد. محدوده‌ای از این حوضه که در مطالعات برآورد حداکثر سیل محتمل مورد بررسی قرار می‌گیرد، میان حوضه آن از سد پانزده خرداد تا شهر قم می‌باشد. حدود

جغرافیایی این محدوده در ناحیه‌ای با ۴۰' ۴۹° تا ۱۸' ۵۶° طول شرقی و ۳۳' ۳۳° تا ۳۳' ۳۳° عرض شمالی قرار گرفته است. این حوضه مساحتی حدود ۳۷۰۰ کیلومتر مربع داشته و محدوده ارتفاعی آن از ۱۵۱۵ تا ۲۵۵۵ متر از سطح دریا می‌باشد. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در محدوده مطالعاتی تعداد ۲۶ ایستگاه آب‌سنجی فعال وجود دارد. نظر به هدف مطالعه، داده‌های مورد نیاز جهت تحلیل حداکثر سیل محتمل که از نوع داده‌های با مقیاس زمانی کوتاه (در حد ساعتی) می‌باشند، دو ایستگاه هیدرومتری امامزاده عبدا... و شادآباد تنها ایستگاه‌هایی در محدوده مطالعاتی مورد بررسی هستند که اطلاعات رویدادهای ثبت شده سیلاب آن‌ها وجود دارد. آمار و اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه اعم از داده‌های روزانه بارش و دما و داده‌های ثبت شده رگبار از ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی، اقلیم‌شناسی و بارانسنجی سازمان هواشناسی و همچنین ایستگاه‌های بارانسنجی و تبخیر سنجی وزارت نیرو تهیه گردید.



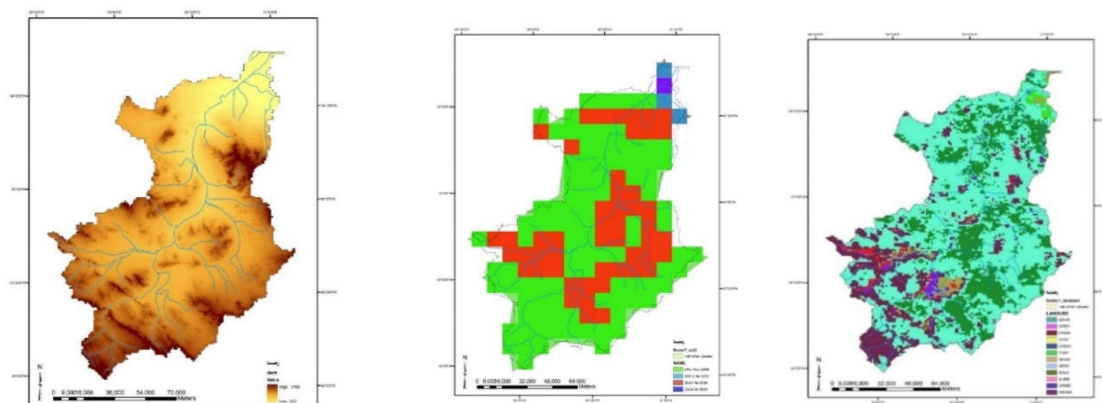
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و شبکه آبراهه‌ای و ایستگاه‌های هیدرومتری آن

۲-۲- آماده‌سازی و واسنجی مدل بارش -

رواناب

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی بارش و رواناب از مدل HEC-1 و رابط گرافیکی نرم افزار WMS استفاده گردید. این مدل که یکی از نرم‌افزارهای تولید شده توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیک (HEC) رسته مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا (USACE) است، در واقع محیطی جامع جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب، روندیابی ساده هیدرولیکی و کالیبراسیون خودکار مدل‌ها است که طیف گسترده‌ای از انواع مدل‌های بارش-رواناب را در بر دارد. تاکنون چه در سطح بین‌المللی و چه در سطح پروژه‌های ملی، از این نرم‌افزار به طور گسترده در مطالعات مختلف برآورد سیلاب، استفاده شده است.

از آنجا که خصوصیات حوضه آبریز از نظر نفوذپذیری از عوامل مؤثر در شکل‌گیری سیلاب‌ها می‌باشد، در این مطالعه با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و خاک حوضه و با توجه به طبقه‌بندی اولیه گروه‌های هیدرولوژیک خاک و نوع کاربری، نقشه عدد منحنی (CN) برای شرایط رطوبتی II تهیه شد. در این مطالعه از نقشه کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در سال ۲۰۰۵ استفاده گردید (شکل ۲ الف) و با توجه به عدم دسترسی به نقشه‌های محلی خاک، از نقشه خاک فائو با دقت سلولی ۱۰۰۰۰ متر مربع استفاده گردید (شکل ۲ ب). همچنین از لایه DEM با دقت ۳۰ متری Aster برای تهیه شبکه رودخانه‌ها، مرز حوضه و زیر حوضه‌های، مشخصه‌های ارتفاعی زیر حوضه‌ها و همچنین نقشه شیب حوضه رودخانه قمرود استفاده شد (شکل ۲ ج).



الف

ب

ج

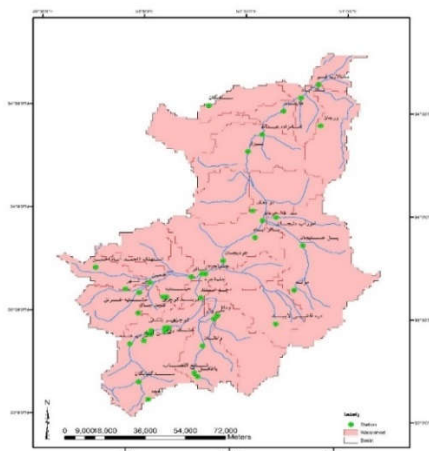
شکل ۲- الف) نقشه کاربری اراضی مورد استفاده در مطالعه (سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، ۱۳۸۳). ب) نقشه خاک FAO برای منطقه مورد مطالعه و ج) نقشه DEM حوضه آبریز قمرود (NASA, 2009)

ایستگاه بارانسنجی به زیرحوضه با توجه به مقدار بارش ۵۵ روز قبل از رگبار در نظر گرفته شد. همچنین مقدار تلفات اولیه در جدول مذکور برابر با ۱۰ درصد ظرفیت ذخیره پتانسیل هر زیر حوضه در نظر گرفته شد تا در مرحله واسنجی در صورت نیاز تغییرات لازم در آن داده شود. همچنین از روش شاخص دما یا درجه - روز برای محاسبه میزان ذوب برف استفاده شد. در این روش برای محاسبه میزان ذوب برف در هر گام زمانی به اطلاعات مربوط به

شکل ۳ شماتیک توپولوژی زیر حوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست حوضه ساخته شده در محیط گرافیکی مدل هیدرولوژیکی WMS را نشان می‌دهد. در این مطالعه برای محاسبه تلفات نفوذ از روش نفوذ SCS استفاده شد. برای برآورد شماره منحنی (CN) در هر زیرحوضه ابتدا نقشه پوشش گیاهی و گروه هیدرولوژیک خاک تهیه و تلفیق شد. سپس CN میانگین هر زیرحوضه در شرایط رطوبتی متوسط بدست آمد. برای برآورد CN شرایط موجود در نزدیکترین

روش‌های موجود روندیابی زیرحوضه، از روش هیدروگراف واحد مصنوعی کلارک به‌عنوان متداولترین روش برای روندیابی زیر حوضه‌ها استفاده شد. در این روش، زمان تمرکز و ضریب ذخیره کلارک یکی از مهمترین پارامترهای هیدرولوژیکی در روندیابی جریان در زیر حوضه‌ها می‌باشد. مقدار اولیه زمان تمرکز زیر حوضه‌ها با تقسیم طول بلندترین رودخانه هر زیرحوضه به سرعت متوسط موج در رودخانه هر زیر حوضه محاسبه شد. برای روندیابی جریان سیلاب در رودخانه‌ها از روش هیدرولوژیکی ماسکینگام استفاده گردید. در این روش، مقدار اولیه پارامتر بدون بعد X برای تمام رودخانه‌ها برابر با 0.2 در نظر گرفته شد. پارامتر K ماسکینگام به صورت زمان پیمایش موج سیلاب در هر رودخانه با تقسیم طول رودخانه بر سرعت متوسط موج جریان در رودخانه محاسبه شد. همچنین تعداد اولیه بازه‌های هر رودخانه N ، با تقسیم طول رودخانه به طولی که جریان در هر گام زمانی محاسباتی با توجه به سرعت موج طی می‌کند، تعیین شد. همچنین به منظور لحاظ کردن اثر بهره‌برداری از سد بر جریان پایین دست، میزان جریان خروجی از سد بر مبنای متوسط جریان روزانه خروجی از سد در روز قبل از وقوع طوفان در نظر گرفته شد و نحوه تغییرات حجم، ارتفاع آب و جریان خروجی از مخزن بر اساس روش روندیابی مخزن ذخیره ای برآورد گردید.

سری زمانی دما و ارتفاع اولیه آب معادل برف نیاز می‌باشد. مدل HEC-1 اثر بارش را در ذوب برف در نظر می‌گیرد به اینصورت که در هر گام محاسباتی که شدت بارش از یک شدت حد معرفی شده به مدل بیشتر باشد، ضریب ذوب برف ناشی از بارش در مدل ذوب برف در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای برآورد یک تخمین اولیه از سطح پوشش برف در حوضه و منحنی سطح پوشش برف در تراز ۶۰۰های مختلف ارتفاعی، از ۱۱ تصویر سنجنده Terra ماهواره MODIS استفاده شد و شرایط اولیه سطح برف در هر تراز ارتفاعی برای طوفان‌های ثبت شده در منطقه برآورد گردید. به منظور تعیین دما در طول طوفان از آمار اندازه‌گیری شده دما مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک که به صورت ۳ ساعته در ساعت‌های ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۱ به وقت گرینویچ در دسترس می‌باشد استفاده گردید. با بررسی روابط دما با ارتفاع در منطقه در دوره‌های سالانه، ماهانه و روزانه مشخص شد که نرخ کاهش دما با افزایش ارتفاع در منطقه از ۵/۵ درجه سانتیگراد در هوای مرطوب تا ۷/۵ درجه سانتیگراد در هوای خشک به ازای هر کیلومتر ارتفاع، متغیر می‌باشد. به منظور افزایش دقت، آهنگ کاهش دما نسبت به ارتفاع برای هر یک از طوفان‌ها به صورت جداگانه مد نظر قرار گرفت. برای تبدیل بارش به رواناب در سطح زیر حوضه‌ها، هیدروگراف خروجی بر اساس ترکیب هیدروگراف واحد هر زیرحوضه و توزیع زمانی بارش خالص بدست می‌آید. در این مطالعه از میان



شکل ۳- توپولوژی زیر حوضه‌ها و رودخانه‌های حوضه قمرود در محیط مدل بارش- رواناب

۲-۳- انتخاب وقایع مناسب برای واسنجی و

اعتبارسنجی مدل

به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از بین طوفان‌های بحرانی در منطقه، طوفان‌هایی که از نظر کمیت و کیفیت اطلاعات داده‌های پایه نسبتاً کامل بودند، انتخاب شدند. با مقایسه تاریخ رویدادهای ثبت شده، مشاهده می‌شود تنها در ایستگاه شادآباد در مجموع ۲ رویداد و برای ایستگاه امامزاده عبدالله... ۵ رویداد ثبت همزمان رگبار-سیلاب قابل شناسایی است. با توجه به اطلاعات ثبت شده سیلاب در

این ایستگاه‌ها و مقایسه با تاریخ‌های رویدادهای ثبت شده رگبار در ایستگاه‌های بارانسنجی هم-جوار این ایستگاه‌ها (سالاریه، کهک و سلفچگان) اقدام به انتخاب رویدادهای منتخب جهت استفاده در فرآیند کالیبراسیون مدل‌های بارش-رواناب شده است. جدول ۱ مشخصات و تاریخ وقوع طوفان‌های انتخابی برای مراحل واسنجی و اعتباریابی و نیز تداوم سیلاب ثبت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تاریخ بارش و سیلاب انتخاب شده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل

رویداد	تاریخ وقوع طوفان	مدت تداوم بارش (ساعت)	مدت تداوم سیلاب (ساعت)	ارتفاع تجمعی بارش (mm)	دبی پایه (m ³ /s)	دبی پیک سیلاب (m ³ /s)	ایستگاه هیدرومتری	نحوه استفاده
۱	۰۰:۰۰-۸۶/۱/	۷۲	۴۸	۳۳/۳	۱	۳/۷۵	امام زاده عبدالله	واسنجی
۲	۰۰:۰۰-۸۶/۱/۱۳	۴۸	۲۴	۲۱/۵	۲/۲	۳/۸۱	امام زاده عبدالله	واسنجی
۳	۰۰:۰۰-۸۶/۲/۷	۴۸	۲۴	۱۲/۵	۱/۵	۲/۳۹	امام زاده عبدالله	اعتبارسنجی
۴	۰۰:۰۰-۸۶/۲/۲۷	۴۸	۲۴	۱۲/۶	۳/۳	۶/۷۵	امام زاده عبدالله	واسنجی
۵	۰۰:۰۰-۸۸/۲/۹	۴۸	۲۴	۲۴	۰/۸۵	۱۶	امام زاده عبدالله	اعتبارسنجی
۶	۰۰:۰۰-۸۶/۲/۲۷	۴۸	۲۴	۱۲/۶	۷/۳	۱۰/۳	شادآباد	واسنجی
۷	۰۰:۰۰-۸۸/۲/۹	۴۸	حدود ۱۴۰	۲۴	۶/۸	۳۲	شادآباد	اعتبارسنجی

جهت تعیین دبی پایه رویدادها از داده‌های ثبت شده روزانه ایستگاه شادآباد، امامزاده عبدالله... و خروجی از سد ۱۵ خرداد استفاده شد. لازم به ذکر است توزیع زمانی بارندگی هر طوفان در هر زیر حوضه بر اساس مقادیر بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های ذکر شده و با فواصل زمانی یک ساعته تعیین گردید و با ترسیم چندضلعی‌های تیسن و با توجه به موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، زیر حوضه‌های محدوده پوشش هر ایستگاه از نظر توزیع مکانی نیز مشخص شد.

۲-۴- تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیل

محتمل با استفاده از روش مونت کارلو

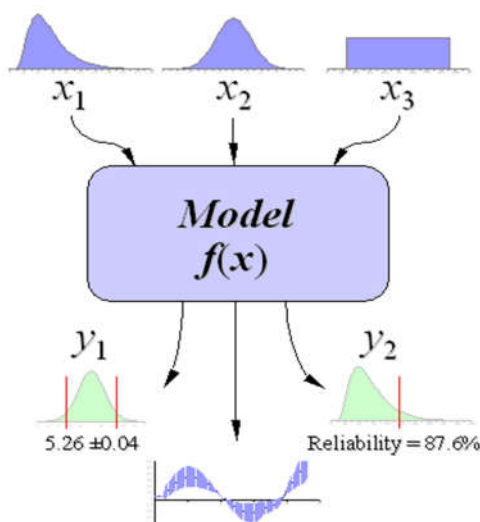
در برآورد حداکثر سیل محتمل، تحلیل حساسیت شرایط اولیه و پارامترهای مدل بارش-رواناب شامل: زمان تاخیر شروع بارندگی، ضریب حداکثر ذخیره آب در برف، دمای تفکیک برف و باران، گرایان دما، سرعت حرکت موج در رودخانه و شرایط رطوبت اولیه حوضه به منظور بررسی

نحوه تغییرات هیدروگراف حداکثر سیل محتمل و تعیین دامنه عدم قطعیت آن بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور در این مطالعه از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. اساس کار روش شبیه‌سازی مونت کارلو تولید اعداد تصادفی است. بدین صورت که هر متغیر با استفاده از اعداد تصادفی تولید شده و تابع توزیع احتمالاتی مربوط به آن، شبیه‌سازی و تولید شده و سپس متناظر با آنها خروجی هر مدل یا معادله محاسبه می‌گردد. این عمل بارها تکرار می‌شود سپس با استفاده از داده‌های خروجی تولید شده به تجزیه و تحلیل میزان و نحوه تغییرات نتایج مدل یاد شده پرداخته می‌شود و میزان عدم قطعیت پارامتر خروجی نیز از طریق محاسبه شاخص‌های آماری و یا تعیین تابع توزیع آن بیان می‌گردد (Eckhardt et al., 2003). در شکل ۴ به طور شماتیک مراحل روش شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور تعیین دامنه عدم قطعیت نتایج نشان داده شده است.

است، بیشتر می‌گردد. بنابراین می‌توان با پذیرش خطایی در تخمین میانگین داده‌های خروجی تعداد یا دفعات تکرار فرایند شبیه‌سازی را تعیین نمود. خطای تخمین میانگین جامعه آماری به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$e = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

دقت و صحت نتایج به دست آمده از روش مونت‌کارلو تابعی از تعداد دفعات شبیه‌سازی و همچنین دقت و صحت تابع توزیع احتمالاتی پارامتر ورودی می‌باشد. از مهمترین مباحث در این روش تعیین اندازه نمونه مورد نیاز در شبیه‌سازی یک سیستم است. این مساله به وسیله تکرار فرآیند شبیه‌سازی (افزایش تعداد نمونه‌ها) می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. بدین صورت که با افزایش تعداد نمونه‌ها میزان همگرایی میانگین داده‌های خروجی به سمت عددی خاص که همان میانگین واقعی جامعه آماری



شکل ۴- مراحل روش شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور تعیین دامنه عدم قطعیت نتایج

با ساخت مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصات کنترلی در مدل HEC-1 برای هر یک از طوفان‌های انتخاب شده برای واسنجی، شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب ابتدا با مقادیر اولیه انجام شد و عملکرد مدل در مقایسه هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری امامزاده عبدالله و شادآباد بررسی گردید. سپس با ترکیب روش دستی سعی و خطا و اتوماتیک در نرم افزار WMS، فرآیند واسنجی برای هر یک از طوفان‌ها تکمیل شد. در جدول ۲ مقادیر شاخص‌های نش ساتکلیف (NS)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، خطای زمان و دبی اوج و حجم رواناب هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی آورده شده است. مقایسه بین هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهده‌ای وجود دارد.

که در آن e خطای تخمین میانگین، و n تعداد دفعات تکرار شبیه‌سازی می‌باشد. معادله (۱) نشان می‌دهد که برای رسیدن به نتایج واقع‌گرایانه‌تر باید تعداد تکرارهای شبیه‌سازی زیاد باشد و این در حالی است که افزایش اندازه نمونه شبیه‌سازی شده باعث کاهش همگرایی به سمت یک تابع توزیع احتمال صحیح می‌شود (Martz et al., 1983). بنابراین این توصیه می‌گردد که برای رسیدن به نتایج خوب آماری تعداد اعضای نمونه در شبیه‌سازی بین ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ انتخاب شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل بارش -

رواناب

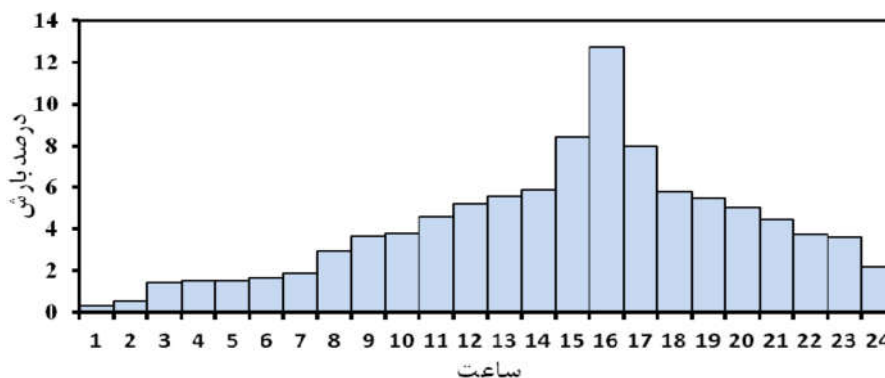
جدول ۲- مقادیر شاخص‌های عملکرد مدل HEC-1 در دوره واسنجی و اعتبار سنجی

شماره رویداد	مرحله	NS	RMSE (m ³ /s)	خطای برآورد حجم سیلاب (%)	خطای برآورد پیک سیلاب (%)	خطای برآورد زمان اوج سیلاب (%)
۱	واسنجی	۰/۴۱	۱/۲	۱۸	۱	۶
۲	واسنجی	۰/۵۲	۰/۸۱	۳	۸	۰
۳	اعتبار سنجی	۰/۳۹	۱/۳	۱۲	۷	-۶
۴	واسنجی	۰/۵۴	۰/۹	۱۰	۲	-۷
۵	اعتبار سنجی	۰/۶۱	۲/۵	۸	۸	-۷
۶	واسنجی	۰/۳۴	۱۳/۲	۲۷	۹	-۵
۷	اعتبار سنجی	۰/۶۳	۲/۸	۳	۱۱	-۵

۳-۲- برآورد حداکثر بارش محتمل (PMP)

برآورد PMP در این مطالعه براساس روش سینوپتیکی انجام گرفته است. بدین منظور از میان طوفان‌های بیشینه-سازی شده، طوفان ۱۱ فروردین ۱۳۸۸ به عنوان طوفان بحرانی یک روزه در منطقه مطالعاتی شناسایی شد. مقادیر بحرانی PMP در تداوم یک روزه و با ضریب بیشینه سازی رطوبت معادل ۱/۸ درصد، برابر با ۶۶/۹ میلیمتر به دست آمد. توزیع زمانی بارش PMP به دو صورت در قالب تحلیل حساسیت در نظر گرفته شد. در حالت اول توزیع زمانی PMP مشابه توزیع زمانی طوفان ۹ فروردین ۱۳۸۸ شده منظور گردید. در حالت دوم نیز با توجه به تعداد کم وقایع ثبت شده در منطقه مطالعاتی، الگوی زمانی PMP با استفاده از روش بلوک‌های متناوب برآورد گردید. روش بلوک‌های متناوب از جمله روش‌های مناسب برای برآورد الگوی زمانی PMP می‌باشد که استفاده از آن در راهنمای (FERC, 2001) برای محاسبه PMF توصیه شده است. در

این روش حداکثر بارش در گام‌های برداشت شده (مثلاً ۲۴ ساعته) در نسبت زمانی خاصی (ضریب اوج‌گیری) از تداوم موردنظر (۵۰ تا ۶۷ درصد تداوم PMP) قرار می‌گیرد و مقدار بارش در گام‌های باقیمانده در دو طرف حداکثر چیده می‌شود. این چیدمان به صورت تناوبی و کاهشی از گام زمانی ماقبل حداکثر شروع می‌شود. به این ترتیب هیتوگرافی به وجود خواهد آمد که حداکثر عمق بارش در نیمه دوم آن (بسته به ضریب اوج‌گیری مورد استفاده) رخ داده و در طرفین آن به تدریج کاهش می‌یابد. ضریب اوج‌گیری بر اساس شرایط منطقه و تحلیل بارش‌های حداکثری به وقوع پیوسته در منطقه و همچنین بر مبنای توصیه (FERC, 2001) حدود ۶۷ درصد را در نظر گرفته شد. در شکل ۵ هیتوگراف بارندگی ۲۴ ساعته ساخته شده به روش بلوک‌های متناوب با ضریب اوج‌گیری ۶۷٪ نشان داده شده است.



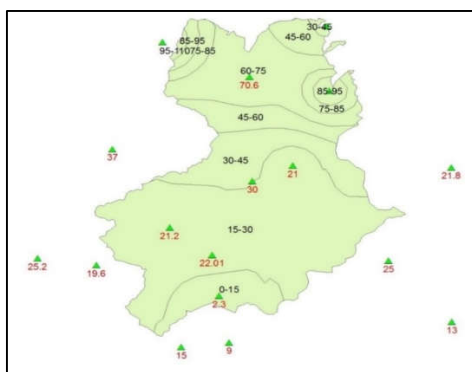
شکل ۵- هیتوگراف بارندگی ۲۴ ساعته به روش بلوک-های متناوب با استفاده از ضریب اوجگیری ۰.۶۷٪

می-گردد. در رویکرد دوم برآورد PMF با توجه به مدل بارش رواناب توسعه یافته و با هدف تحلیل عدم قطعیت و تعیین حدود بالا و پایین هیدروگراف PMF با استفاده از روش مونت کارلو دنبال گردید. در این رویکرد تعیین حدود PMF بر مبنای ترکیب-های بحرانی مختلف از نظر عواملی مانند توزیع زمانی و مکانی بارش، جهت حرکت طوفان، دمای تفکیک باران و برف، آهنگ کاهش دما نسبت به ارتفاع و نحوه روندیابی در شبکه رودخانه می-باشد.

توزیع مکانی PMP نیز بر اساس مطالعات انجام شده در مطالعات حداکثر بارش محتمل حوضه به صورت شکل ۶ در نظر گرفته شد. همچنین بحرانی-ترین توزیع مکانی PMP در طی فرآیند آنالیز حساسیت شناسایی گردید.

۳-۳- برآورد حداکثر سیل محتمل (PMF)

به منظور برآورد حداکثر سیل محتمل در این مطالعه دو رویکرد کلی مد نظر قرار گرفت. در رویکرد اول از روش آماری و با توجه به ارتباط بین مقادیر بارش حداکثر و دبی حداکثر لحظه ای سیلاب در دوره برگشت-های مختلف، مقادیر PMF متناظر با حداکثر بارش محتمل (PMP) برآورد



شکل ۶-توزیع مکانی PMP در منطقه مطالعاتی

متناظر دبی حداکثر لحظه ای در ایستگاه های شادآباد و باران حداکثر یک روزه منطقه مطالعاتی در دوره بازگشت-های مختلف محاسبه و با توجه به برازش معادله مناسب بین مقادیر مذکور، دبی حداکثر لحظه ای برای PMP منطقه مورد مطالعه بدست می-آید. در جدول ۳ مقدار دبی حداکثر لحظه-ای و بارش متناظر آن در دوره بازگشت-های مختلف و در

۳-۳-۱- برآورد حداکثر سیل محتمل (PMF)

با استفاده از روش آماری

با توجه به محدودیت داده-ای در محاسبه حداکثر باران محتمل، یکی از رویکردهای در نظر گرفته شده در این مطالعه رویکرد آماری می-باشد. بدین صورت که مقادیر

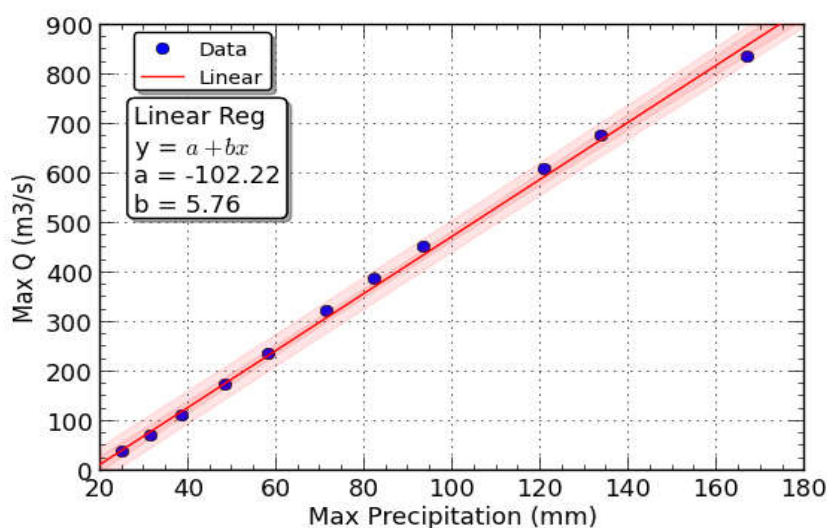
در ایستگاه شادآباد به ازای مقادیر بارش متناظر آن هست. لذا با کاربرد رابطه مذکور و جایگذاری مقدار حداکثر باران محتمل در منطقه ۱۰۲ میلی‌متر (مطابق با شکل ۶) در محدوده مطالعاتی، مقدار PMF برابر با ۴۸۵/۸ متر مکعب در ثانیه برآورد می‌گردد.

شکل ۷ معادله رگرسیونی بین بارش و بده حداکثر آورده شده است.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد معادله خطی برازش داده شده بر مقادیر حداکثر بارش و دبی حداکثر لحظه با دقت قابل قبولی قادر به برآورد مقادیر دبی حداکثر

جدول ۳- مقادیر باران و دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه شاد آباد در دوره بازگشت های مختلف

دوره بازگشت	بارش		دبی	
	انحراف معیار	بازه ۹۵ درصد اطمینان	دبی حداکثر لحظه ای	انحراف معیار
۱۰۰۰۰	۱۶۷	۲۵۵-۸.۷۸	۸۳۴	۳۲۷
۲۰۰۰	۱۳۴	۱۹۸-۵.۷۰	۶۷۶	۲۵۵
۱۰۰۰	۱۲۱	۱۷۶-۷.۶۶	۶۰۸	۲۲۵
۲۰۰	۵.۹۳	۱۳۰-۱.۵۷	۴۵۲	۱۵۶
۱۰۰	۴.۸۲	۱۱۲-۷.۵۲	۳۸۶	۱۲۷
۵۰	۷.۷۱	۴.۹۵-۱.۴۸	۳۲۰	۱۰۰
۲۰	۳.۵۸	۰.۷۵-۶.۴۱	۲۳۵	۶.۶۶
۱۰	۵.۴۸	۶.۶۰-۳.۳۶	۱۷۲	۲.۴۴
۵	۸.۳۸	۱.۴۷-۴.۳۰	۱۱۱	۴.۲۶
۳	۵.۳۱	۵.۳۷-۴.۲۵	۷.۷۰	۱.۱۸
۲	۳.۲۵	۰.۳۰-۶.۲۰	۸.۳۷	۸.۱۳



شکل ۷- معادله رگرسیون خطی و باند ۹۵ درصد اطمینان برازش داده شده بین دبی حداکثر لحظه ای و بارش حداکثر

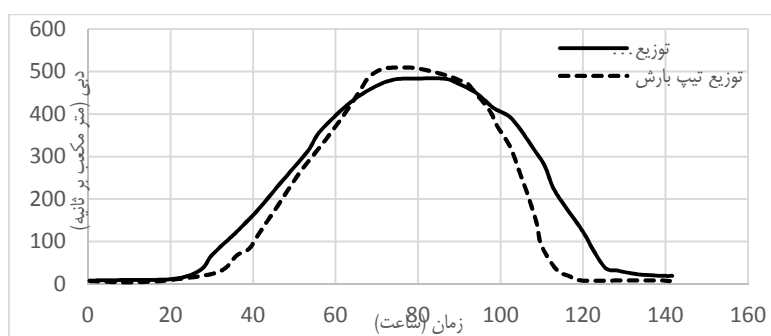
حاصل از مرحله واسنجی برای کاهش اثرات برونیابی از سیل‌های عادی به سیلاب‌های استثنایی یا حدی می‌باشد. در این مطالعه به منظور تعدیل مدل برای شبیه سازی شرایط PMF، بر اساس توصیه دستورالعمل شماره ۶۴۷ دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا (۱۳۹۲)، زمان تمرکز زیر حوضه‌ها به میزان ۳۳ درصد مقادیر واسنجی شده کاهش یافت. همچنین علاوه بر کاهش زمان تمرکز زیرحوضه‌ها، ضریب K روندیابی ماسکینگام نیز به همان نسبت کاهش یافت.

تعیین دامنه تغییرات PMF به ازای ترکیب‌های مختلف از شرایط بحرانی در زمان وقوع PMP در قالب آنالیز حساسیت نتایج حاصل از مدل تعدیل یافته بارش و رواناب در شرایط شبیه سازی سیلاب حاصله از PMP انجام گرفت. به منظور بررسی حساسیت PMF به توزیع زمانی بارش، نتایج توزیع مشاهده‌ای طوفان فروردین ۱۳۸۸ به عنوان مبنای PMP یک روزه و نیز توزیع تیپ حاصل از بلوک‌های متناوب شبیه‌سازی و مقایسه گردید. شکل ۸ ترتیب هیدروگراف‌های حاصل از توزیع مشاهده‌ای طوفان فروردین ۱۳۸۸ و توزیع تیپ را نشان می‌دهند. مقایسه هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که توزیع تیپ شرایط بحرانیتری را ایجاد می‌کند. همچنین مقادیر دبی اوج و حجم رواناب حاصل از توزیع مشاهده‌ای و توزیع تیپ در جدول ۴ آمده است.

۳-۳-۲ برآورد حداکثر سیل محتمل (PMF)

با استفاده از روش شبیه سازی

مقادیر سیل‌های حداکثر تخمینی با استفاده از روش شبیه‌سازی سیلاب ناشی از PMP، به طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از فرض‌های در نظر گرفته شده در مورد شرایط رطوبتی خاک، ذخیره سطحی، بیلان برفی و دبی پایه است. به طور کلی برای یک سیل بزرگ، شرایط فرضی پیشین مربوط به واقعه هواشناختی اصلی (PMP) باید شدید فرض شود اما نه ضرورتاً حداکثر. براساس مطالعات انجام شده در دره تنسی (Newton, 1983)، طوفان پیشین (و همچنین بیلان برفی در بعضی از مناطق) بر اساس تحلیل فراوانی طوفان‌های گذشته به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. در روش پیشنهادی دیگر، شرایط هیدرولوژیکی، متئورولوژیکی و سطح مخزن براساس شرایط متوسط متناظر با فصل وقوع طوفان اصلی فرض می‌شود. در این مطالعه نیز از همین روش برای برآورد شرایط اولیه (پیشین) هواشناسی و هیدرولوژیکی برآورد PMF استفاده گردید و همچنین آنالیز حساسیت مقادیر اولیه به منظور بررسی نحوه تغییرات هیدروگراف PMF مورد توجه قرار گرفت. از طرفی از آنجا که معمولاً سیل‌های استفاده شده در فرآیند واسنجی بسیار کوچکتر از سیلاب PMF می‌باشند، لذا شرایط حاکم در حوضه در زمان وقوع سیل PMF با شرایط حاکم در زمان وقوع سیل‌های کوچکتر متفاوت خواهد بود. این موضوع حاکی از ضرورت تعدیل پارامترهای مدل بارش - رواناب



شکل ۸- هیدروگراف PMF حاصل از توزیع زمانی مشاهده ای و تیپ

جدول ۴- مشخصات هیدروگراف PMF حاصل از توزیع زمانی مشاهده‌ای و توزیع تیپ

توزیع بارش	دبی پیک (متر مکعب بر ثانیه)	حجم سیلاب (میلیون متر مکعب)	زمان پیک (ساعت)
مشاهده‌ای	۴۸۳/۲	۱۱۴/۸	۷۹
بلوک متناوب	۵۰۸/۸	۹۸/۷	۷۳

2003). دامنه تغییرات و نوع توابع توزیع شرایط اولیه و پارامترهای مدل بارش-رواناب به منظور تحلیل حساسیت و دامنه عدم قطعیت هیدروگراف حداکثر سیل محتمل بر اساس میزان تغییرات آنها در منطقه و به استناد مطالعات انجام شده قبلی به صورت جدول ۵ در نظر گرفته شده است. تعداد شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور حصول همگرایی نیز ۵۰۰۰ نمونه در نظر گرفته شد.

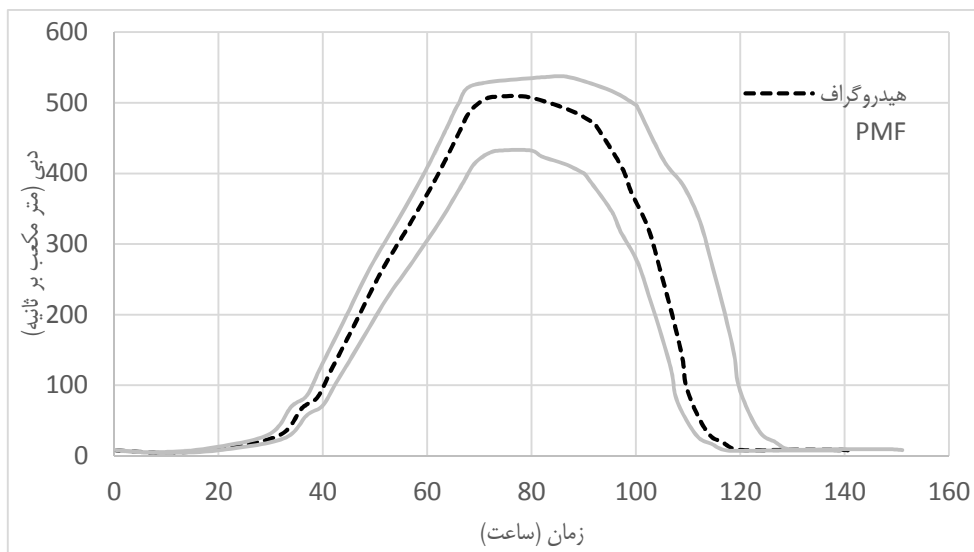
تحلیل حساسیت شرایط اولیه و پارامترهای مدل بارش-رواناب شامل: زمان تاخیر شروع بارندگی، ضریب حداکثر ذخیره آب در برف، دمای تفکیک برف و باران، گرادیان دما، سرعت حرکت موج در رودخانه و شرایط رطوبت اولیه حوضه نیز به منظور بررسی نحوه تغییرات هیدروگراف حداکثر سیل محتمل و تعیین دامنه عدم قطعیت آن انجام گردید. بدین منظور از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و با در نظر گرفتن توزیع تیپ بارش استفاده شد (Eckhardt et al.,

جدول ۵- دامنه تغییرات و نوع توابع توزیع شرایط اولیه و پارامترهای مدل بارش-رواناب

پارامتر	دامنه تغییرات	توزیع آماری
شرایط رطوبت اولیه	۳۰٪- تا ۳۰٪	یکنواخت
ضریب حداکثر ذخیره آب در برف	۱۰٪- تا ۱۰٪	یکنواخت
دمای تفکیک برف و باران	۱۰٪- تا ۱۰٪	یکنواخت
گرادیان دما و بارش	۱۰٪- تا ۱۰٪	یکنواخت
سرعت حرکت موج در رودخانه	۵٪- تا ۵٪	یکنواخت

حجم هیدروگراف-های حد بالا، حد پایینی میانگین PMF نیز در جدول ۶ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان دبی اوج هیدروگراف در بازه ای بین ۴۳۲ تا ۵۳۶ متر مکعب بر ثانیه متغیر می باشد این در حالی است که زمان اوج هیدروگراف در بازه ای بین ۷۸ تا ۸۶ ساعت برآورد می گردد.

نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف PMF به روش مونت کارلو در شکل ۹ نشان داده شده است. حدود بالا و پایینی ۹۵ درصد اطمینان هیدروگراف-های PMF شبیه‌سازی شده در مرحله آنالیز حساسیت به عنوان دامنه محتمل وقوع حداکثر سیلاب حوضه قمرود شناسایی گردید. شرایط بین دو حد بالایی و پایینی می‌تواند به عنوان PMF منطقه استفاده شود. مقادیر دبی اوج، زمان اوج و



شکل ۹- حدود بالا، پایین و میانگین PMF حوضه پایین دست سد پانزده خرداد

جدول ۶- مقادیر دبی اوج، زمان اوج و حجم هیدروگراف های حد بالا، حد پایین و میانگین PMF حوضه پایین دست سد پانزده خرداد

مشخصه	حد پایین ۹۵٪ اطمینان	میانگین	حد بالای ۹۵٪ اطمینان
حجم هیدروگراف (میلیون متر مکعب)	۷۹۶۷	۹۹۰۰۳	۱۲۴۶۵
دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه)	۴۳۲۶۸	۵۰۸۸۳	۵۳۶۸۱
زمان اوج (ساعت)	۷۸	۷۴	۸۶

۴- جمع بندی

مطالعه حاضر به منظور برآورد و تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیلاب محتمل (PMF) در پایین دست حوضه آبریز قمرود انجام گرفت. بدین منظور برآورد PMF با استفاده از دو رویکرد آماری و شبیه سازی انجام گرفت و تحلیل عدم قطعیت نتایج نیز با توجه به عدم قطعیت شرایط اولیه و پارامترهای مورد استفاده در مدل شبیه سازی با استفاده از روش مونت کارلو انجام گرفت. نتایج حاصله از این مطالعه به شرح زیر قابل ارائه می باشد:

- ارزیابی تاثیر الگوهای مختلف بارش بر مشخصات هیدروگراف سیل نشان می دهد که توزیع تیپ بلوک های متوالی با ضریب اوج گیری ۶۷٪ شرایط بحرانی تری را ایجاد می کند. در این شرایط مقادیر دبی اوج و حجم رواناب حاصل از توزیع بلوک های متوالی حدود ۵ درصد

بیشتر و در مقابل زمان اوج هیدروگراف به میزان ۶ ساعت کمتر است.

- عدم قطعیت شرایط اولیه و پارامترهای مدل بارش-رواناب نقش مهمی در عدم قطعیت هیدروگراف حداکثر سیل دارا می باشند که با در نظر گرفتن عدم آنها بند ۹۵ درصد اطمینان دبی اوج هیدروگراف در بازه ای بین ۴۳۲ تا ۵۳۶ متر مکعب بر ثانیه متغیر می باشد.

- روش ترکیبی مونت کارلو و شبیه سازی هیدرولوژیکی رویکرد مناسبی جهت تحلیل عدم قطعیت ناشی از شرایط اولیه، داده های ورودی و مدل سازی حداکثر سیل محتمل می باشد و جهت افزایش اطمینان پذیری و کاهش ریسک مطالعات حداکثر سیل محتمل در شرایط کمبود داده توصیه می گردد.

منابع

1. Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M., Marino, M.A., 2005, Case study: Application of multicriteria decision making to urban water supply. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 131 (4), pp. 326–335.
2. Ajami, N. K., Duan, Q., Gao, X., & Sorooshian, S., 2006, Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrometeorology*, 7(4), pp. 755-768.
3. Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G., 2015, Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), pp. 2247-2260.
4. ASTER, G., 2009, Validation Team: ASTER Global DEM Validation—Summary Report. METI & NASA, 28.
5. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1998, *Applied hydrology*, McGraw-Hill book company.
6. Eckhardt, K., Breuer, L., & Frede, H. G., 2003, Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, 273(1), pp. 164-176.
7. Fathian, H., 2010, Uncertainty analysis for amount and spatial-temporal distribution of precipitation in flood forecasting. *Journal of sciences and watershed management engineering of Iran*. 13(4), pp. 1-14.
8. FERC Hydropower PMF Guide, 2001, Determination of the Probable Maximum Flood. Chapter VIII.
9. Hamed, k., Rao, A.R., 1999, *Flood frequency analysis*. CRC press
10. Høybye, J., & Rosbjerg, D., 1999, Effect of input and parameter uncertainties in rainfall-runoff simulations. *Journal of Hydrologic Engineering*. 4(3), pp. 214-224.
11. Iran ministry of Energy (department of engineering and technical standards of water and waste water), 2013, Instruction of calculation methods of PMF. Report No. 647.
12. Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., & Muir-Wood, R., 2014, Flood risk and climate change. *Global and regional perspectives*. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), pp. 1-28.
13. Lester B. Lave, Daniel Resendiz-Carrillo, Francis C. McMichael., 1990, Safety goals for high-hazard dams: Are dams too safe? , *Water Resources Research*. 26 (7), pp. 1383–1391.
14. Martz, H. F., & Duran, B. S., 1985, a comparison of three methods for calculating lower confidence limits on system reliability using binomial component data. *IEEE Transactions on Reliability*, 34(2), pp. 113-120.
15. Maskey, S., Guinot, V., Price, R. K., 2003, Propagation of precipitation uncertainty through a flood forecasting model. *International Association of Hydrological Sciences, Publication*, (282), pp. 93-100.
16. Maskey, S., Guinot, V., & Price, R. K., 2004, Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modeling: a fuzzy set approach. *Advances in Water Resources*, 27(9), pp. 889-898.
17. Micovic, Z., Schaefer, M. G., & Taylor, G. H., 2015, Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 521, pp. 360-373.
18. Newton, D. W., 1983, Realistic assessment of maximum flood potentials. *ASCE*, 109(6), pp. 905-918.
19. Paimazd, Sh., Saeid Morid, Hoshang Ghaemi, 2006, Probable maximum flood calculation, in lacking of statistical datasets. *Scientific Journal of Agriculture*, 29 (4), pp. 33-44.
20. Rahman, A. et al., 2013, a study on selection of probability distributions for at-site flood frequency analysis in Australia. *Natural Hazards*, 69 (3), pp. 1803-1813.
21. Safavi, H., 2009, *Hydrology engineering*. 2th edition of book, Arkan-e-Danesh publishers, Isfahan, Iran.
22. Woodbury, M.S., Eberlein, D. T., Pansic, N., 1994, Minimizing the probable maximum flood. *Civil engineering (New York)*, 64 (6).