

معرفی روش ابداعی دلیری (۱۴۰۲) جهت محاسبه بارش حداکثر محتمل (PMP)

فرهاد دلیری^{۱*}، ویجی پی سینگ^۲، علی خلیلی^۳

۱- مربی و مدیر بخش آب و محیط زیست شرکت آبسام (farhad.daliri@gmail.com)

۲- استاد تمام گروه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تگزاس، امریکا

۳- استاد تمام گروه مهندسی آبیاری و تکنولوژی دانشگاه تهران، ایران

پذیرش ۱۹ بهمن ۱۴۰۲

خلاصه

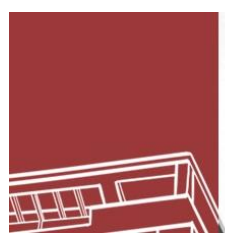
بارش حداکثر محتمل (PMP) جهت محاسبه سیل حداکثر محتمل (PMF) و سیل پروژه، طراحی سازه های هیدرولیکی بزرگ مانند سدها، محاسبات شکست هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، کنترل سیل نقاط حساس مانند نیروگاه های اتمی و نیرو در مهندسی عمران و آبخیزداری کاربرد دارد. سه روش عمده برآورد بارش حداکثر ممکن است بر مبنای مفاهیم فیزیک هواشناسی، روش های آماری و یا روش مهندسی معکوس پایه ریزی گردد. در مطالعه حاضر باتوجه به ضعف های روش آماری هرشفیلد که گراف های آن عمدتاً در ایالات متحده امریکا توسعه یافته و لذا اغلب، مقدار ضریب فراوانی (km) آن ممکن است در مناطق مختلف بسیار کوچک یا بزرگ برآورد شود مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین توسعه گراف های هرشفیلد برای هر منطقه خاص بسیار دشوار و وقت گیر بوده و نیاز به داده های طولانی مدت سری بارش حداکثر و میانگین می باشد. در مطالعه حاضر، بارش حداکثر ۲۴ ساعته ایستگاه سینوپتیک نهندان نزدیک شهر زابل با روش ابداعی دلیری (۱۴۰۲) به نام روش طیفی (Spectral method) با روش هرشفیلد (Hershfield, 1965) به عنوان روش استاندارد معرفی و ارزیابی شد. روش طیفی شامل محاسبه فاکتور فراوانی (km)، تدقیق فاکتور بر اساس آنالیز ریسک و عدم قطعیت، انتخاب توزیع مناسب احتمالاتی، و محاسبه ضریب تغییرات داده های منطقه مورد نظر می باشد. نتایج حاکی از آن است که روش طیفی دلیری (۱۴۰۲) ضمن برآورد منطقی مقادیر بارش حداکثر نسبت به روش هرشفیلد می تواند جهت پیش بینی سیلاب های حداکثر محتمل احتمالاتی (PMFs) نیز استفاده گردد. ضمناً مقدار بارش حداکثر روش هرشفیلد برای منطقه مطالعه باتوجه به شواهد تحقیق نسبتاً زیاد بود. لذا ضروری است مقدار PMP بر اساس دامنه احتمالاتی ضریب km تحت ریسک و عدم قطعیت محاسبه شود.

کلمات کلیدی: روش طیفی، روش هرشفیلد، آنالیز ریسک، بارش حداکثر محتمل (PMP)

۱. مقدمه

هیدرولوژیست ها یا هیدرومتئورولوژیست های خیره مقدار بارش حداکثر محتمل (PMP) و مشخصات توزیع زمانی رگبار (PMS) [1] را جهت پیش بینی سیلاب حداکثر محتمل (PMF) و مشخصات آن (حجم-زمان بندی ها-دی اوج)

* farhad.daliri@gmail.com



به منظور طراحی سازه های هیدرولیکی بزرگ و یا محافظت در برابر سیل های نادر و یا کنترل فرسایش خاک در پروژه های مهندسی آبخیز (آبخیزداری) یا عمران برآورد می کنند. لذا برآوردهای مناسب از PMP و عدم قطعیت های آن نیاز است [2].

در این خصوص زانگ در سال ۲۰۲۱ [3] مفهوم عدم قطعیت را در شبیه سازی بارش-رواناب و بارش حداکثر محتمل استفاده کرد. میکوویچ و همکارانش [4] به اهمیت استفاده از مفهوم عدم قطعیت در محاسبه PMP بحث و اشاره کردند. اگرچه از نظر تعریف PMP، نمی توان برای آن مقدار دوره بازگشت معینی را مشخص نمود، با این وجود ممکن است بتوان به صورت تلویحی این فرض را نمود که مقدار PMP در هر منطقه خاص ممکن است به ریسک متناظری ارتباط داشته باشد. لذا باتوجه به تئوری ابهام ارائه شده توسط دلیری در سال ۱۳۹۳ [2] (در این مطالعه ریسک طیفی شامل ریسک های اصلی و فرعی می باشد) می توان قلمرو ریسک را از روی آنالیز فراوانی و دوره بازگشت متناظر آن آنالیز نمود. بر اساس تجارب گذشته عمدتاً "مقدار محاسبه شده بارش حداکثر در مواردی به دلایل پیچیدگی اندرکنش های اتمسفر در تشکیل بارش های حدی، اثرات تغییر اقلیم، خطای برآورد پارامتر و عدم کفایت داده ها از مقدار مشاهده شده کمتر بوده است [5],[6],[7],[8].

روش های محاسبات بارش حداکثر محتمل (PMP) می تواند در سه گروه اصلی ۱-آماري-۲-فيزيكي و ۳-مهندسي معكوس قرار بگيرد [2]. روش آماری هرشفیلد، ۱۹۶۵ [9] و انواع زیرمجموعه های آن به عنوان روش معروف که در مطالعه حاضر به عنوان روش استاندارد تلقی می شود قابل ذکر است. روش های فیزیکی شامل آنالیز داده های سینوپتیک، هیدرومتئورولوژیکی و هواشناسی فیزیکی بوده که می توان روش های جابجایی رگبار، محاسبات DAD، حداکثر سازی رطوبت، روش تعمیم، تفکیک رگبار و ترکیب هایی از آنها را به عنوان برخی از روش های عمده گروه دوم نام برد که با توجه به دقت- فاز مطالعه-شرایط اقلیمی منطقه و داده های موجود در طرح ممکن است انتخاب گردند. روش سوم شامل روش های هیدرولوژیکی و مهندسی معکوس بوده که روی سیلاب های نادر (Paleo Floods) مطالعه می کند [2]. در تمام روش های بالا عدم قطعیت هایی درگیر است. بطوریکه فرض یک حد بالای بارش حداکثر با ریسک صفر، واقعی نیست. مثال های متعددی در این خصوص در امریکا مشاهده شده است [10],[11].

اگرچه دلایل مستدل جهت ثابت کردن برتری روش های بالا نسبت به یکدیگر وجود ندارد و اغلب بر اساس شواهد محلی و تجارب هیدرولوژیست یا هیدرومتئورولوژیست می توان اظهار نظر کرد [2]، روش های آماری باتوجه به سادگی و عدم نیاز به محاسبات مهندسی به ویژه در فازهای شناخت طرح ممکن است قابل توصیه باشد [12] (WMO, 2009). [2]. با این وجود می بایست نتایج آماری در فازهای طراحی با سایر روش های مهندسی بالا به ویژه وقتی داده ها کوتاه مدت هستند نیز کنترل شود [2].

اگرچه روش آماری هرشفیلد (۱۹۶۵) معروف است اما باید توجه نمود نتایج این روش به دلیل اینکه مونوگراف ها و ضرائب فراوانی (km) آن اغلب در سطح ایالات امریکا توسعه یافته، باعث شده در بسیاری از موارد مقادیر بارش حداکثر برآوردی بالاتر یا پایین تر از مقدار واقعی منطقه مورد نظر محاسبه شود. لذا بر اساس مطالعات آقای سیگ و همکاران [13] می بایست مقدار حداقل ضریب مذکور از روش بارش حداکثر محتمل مالک (Own PMP) نیز کنترل شود. اما این روش نیز در صورتیکه داده های آماری کوتاه باشد فقط می تواند حد پایین ضریب km را برآورد کند. بر اساس نظر دلیری [2] و یک قاعده سرانگشتی جهت محاسبه آماری PMP حداقل ۲۰۰ داده مشاهداتی نیاز است. اگرچه در این حالت نیز محاسبه عدم قطعیت ها حیاتی است.

آقای زانگ و همکارانش [14] مقدار عدم قطعیت های PMP را به کمک روش دلتا و یک روش خودکار (Bootstrap) محاسبه کردند. آنها متوجه شدند مقدار بارش حداکثر محاسباتی با روش های مذکور از روش هرشفیلد کمتر بوده و باتوجه به شواهد محلی و سایر نتایج موجود، مناسب تر نیز می باشد. مقدار بهبود نتایج بر حسب درصد برای بارش های ۱ و ۶ و ۲۴ ساعته به ترتیب ۵۳,۸ و ۸۱ و ۷۲,۶ درصد گزارش شد.



روش دو نیم کردن منحنی نمایی هرشفیلد [15] در هند که باتوجه به بارش متوسط منطقه نقطه شکستی را روی منحنی نمایی هرشفیلد مشخص کرده و ضریب فراوانی را برای بارش‌های سالانه کمتر از ۷۵,۹ میلی‌متر به صورت یک عدد ثابت برای ضریب فراوانی معادل $km=16.7$ محاسبه می‌کند. همچنین روش منحنی پوش که اغلب به دلیل عدم پذیرش جهانی کمتر مورد توجه بودند قابل ذکر هستند [12]. در ایران آقای خلیلی در سال ۲۰۰۲ روش هرشفیلد را تبدیل به یک مدل ریاضی نمود [16] با اینکه این مدل با تقریب زیر دو درصد توانست روش هرشفیلد را شبیه یازی کند ولی می‌بایست برای هر دوره به ویژه جهت اثرات اقلیمی ضرائب آن بازسازی گردد. لذا اثر تغییر اقلیم در محاسبه PMP ضروری است. محققان مختلفی با مطالعه فیزیک جو و مدل‌های بزرگ مقیاس GCMs از جمله [5]، [6] و [7] نشان دادند مقدار بارش حداکثر در آینده ممکن است از ۲۰ تا ۴۴ درصد به دلیل تغییرات رطوبت اتمسفر و دینامیک تامین رطوبت منتقل شده به جو، در نقاط مختلف جهان و حدود ۱۸ تا ۲۷ درصد در جنوب ایران افزایش یابد. لذا روش هرشفیلد نمی‌تواند این تغییرات را در محاسبات خود لحاظ کند.

انتخاب یک ضریب فراوانی km که بتواند تعادل بین ضررهای اقتصادی ناشی از شکست پروژه و هزینه را تامین کند می‌تواند یک راهکار مناسب باشد [2]. لذا معرفی روش جدید بارش حداکثر طیفی (Spectral PMP) هدف اصلی مقاله حاضر می‌باشد. این روش می‌تواند برای بارش‌های n ساعته و در هرکجای دنیا بدون محدودیت استفاده شود. ضمناً این روش می‌تواند شرایط تغییر اقلیم را در نتایج لحاظ کند. اگرچه داده‌های کم می‌تواند به عنوان یک محدودیت جهت آنالیز فراوانی و تعیین ریسک متناظر در این روش نیز به نظر بیاید ولی به دلیل استفاده از ضرائب عدم قطعیت و ریسک می‌توان این محدودیت را نیز نادیده گرفت. به طور کلی اهداف مطالعه حاضر به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- معرفی روش محاسبه بارش حداکثر محتمل طیفی دلیری، ۱۴۰۲ (Daliri Spectral PMP Method, 2023)

- محاسبه بارش حداکثر ۲۴ ساعته در ایستگاه نهبندان نزدیک شهر زابل

- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش هرشفیلد و روش دو نیم کردن منحنی نمایی هرشفیلد

۲. مواد و روش‌ها

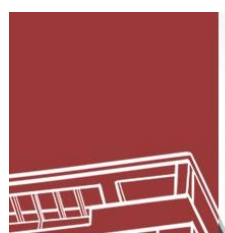
آماده‌سازی داده‌ها

ابتدا سری داده‌های حداکثر ۲۴ ساعته ایستگاه نهبندان (شکل ۱) از بدو تاسیس سال ۱۳۶۴ تا سال ۱۴۰۱ استخراج شد. بارش میانگین سالانه منطقه طی دوره مذکور حدود ۱۲۰ میلی‌متر گزارش شده است [17] و [18]. سپس مراحل آماده‌سازی داده‌ها جهت آنالیزهای بعدی به شرح زیر صورت گرفت [2]:



شکل ۱- موقعیت ایستگاه نهبندان در محدوده مطالعاتی و شهر زابل

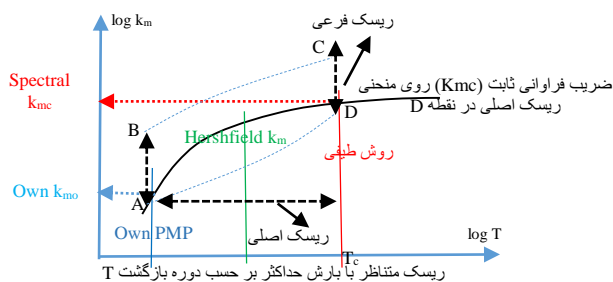
- ✓ کنترل ایستایی و استقلال سری
- ✓ بررسی همگنی داده‌ها و آزمون جرم مضاعف
- ✓ آنالیز روند سری



✓ بررسی مقادیر حدی و ضرائب تغییرات (CV)

روش طیفی دلیری (۱۴۰۲)

روش بارش حداکثر محتمل طیفی (Spectral PMP, 2023) که در سال ۱۴۰۲ توسعه یافته بر اساس بررسی رفتار تغییرات ضریب فراوانی k_m نسبت به ریسک یا احتمال وقوع بارش حداکثر روی کاغذ لوگ-لوگ مشابه شکل ۲ پایه ریزی شده است.



شکل ۲ - شماتیک آنالیز ریسک طیفی جهت محاسبه ضرائب k_m متناظر با دوره بازگشت T

همانطور که از شکل ۲ نیز مشخص است dk_m/dT روی منحنی ریسک طیفی اصلی در نقطه D نزدیک به صفر می‌شود. این نقطه وقتی معادله دیفرانسیلی ۱ حاکم شود نقطه خم شدگی یا عطف D (Inflection point) نامیده شد.

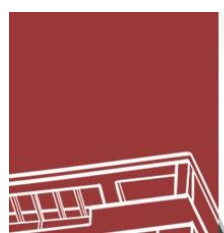
$$if T \rightarrow \infty : \frac{dk_m}{dT} \cong 0 \quad (1)$$

در این حالت مقدار k_m برای مقادیر بیشتر، دارای ریسک‌های بسیار نادر و کوچکتر می‌شود. لذا می‌توان مقدار متناظر k_m آن را معادل ضریب فراوانی مبنا یا ضریب فراوانی ثابت (k_{mc}) معادل مختصات (T_c, k_{mc}) Point D در روش طیفی لحاظ نمود (شکل ۲). جهت محاسبه مقدار ریسک فرعی ارزش بارش حداکثر محتمل در محل نقطه D می‌توان از روش‌های مختلف آنالیز عدم قطعیت مانند شبیه‌سازی مونت کارلو، استفاده از دامنه احتمالاتی توزیع‌ها در حدود اعتماد معین، عدم قطعیت‌های مربوط به خطای داده‌ها، پارامتر، برآورد و .. استفاده نمود. در این مطالعه جهت تعیین مختصات نقطه C و مقدار ریسک فرعی از رابطه زیر استفاده شد:

$$Lunc_{adj} = 1 + \frac{CV}{2} \quad (2)$$

رابطه ۲ مقدار عدم قطعیت گرده ای (Lump uncertainty) [2] موجود در ارزش PMP در محل D را با یک ضریب افزایشی اصلاح می‌کند. سپس مقدار ضریب فراوانی (k_m) اصلاح شده به دست می‌آید. ضریب تغییرات نیز از نسبت انحراف معیار سری به میانگین آن محاسبه شود ($CV = S/\bar{X}_n$).

ارزش مقدار ضریب فراوانی در نقطه B مشابه نقطه C محاسبه می‌گردد. جهت محاسبه مقدار ضریب فراوانی در محل A می‌توان روش بارش حداکثر محتمل مالک (Own PMP, 2018) که توسط سینگ و همکارانش ارائه شده است به شرح زیر استفاده نمود [19]. در روش مالک (Own PMP) پس از آماده‌سازی داده‌ها، می‌بایست مشابه روش هرشفیلد (۱۹۶۵) تمامی تدقیق‌های روش هرشفیلد مانند تدقیق سری داده‌ها برای میانگین و انحراف سری باتوجه به مشاهده داده‌های نادر در سری، اندازه سری، فواصل برداشت آمار سری، و اثرات تیپ رگبار [1] و ضریب کاهش سطح توزیع مکانی [2] (در این مطالعه برای مساحتی معادل ۲۵ کیلومتر مربع با مرکزیت ایستگاه سینوپتیک نهبندان محاسبات انجام شد. لذا دو تدقیق آخر مربوط به زمان و مکان نیاز نیست) صورت بگیرد. در این روش معادله فراوانی هرشفیلد به شکل معادله ۳ تغییر کرده و جهت برآورد مقدار k_m حد پایین از روی سری زمانی موجود استفاده شد. سپس باتوجه به



معادله ۴ و پارامترهای تدقیق شده انجراف معیار (S_{adj}) و میانگین سری (\bar{X}_{adj})، نتایج آنالیز فراوانی بهترین توزیع، مقدار T متناظر آن محاسبه و مختصات نقطه $PointA(T, k_{mo})$ روی شکل ۲ مشخص می‌گردد.

$$k_{mo} = \frac{\bar{X}_m - \bar{X}_{n-m}}{S_{n-m}} \quad (3)$$

$$PMP_{x-hour} = \bar{X}_{adj} + k_{mo} S_{adj} \quad (4)$$

مقدار PMP طراحی را صرفاً می‌توان معادل ضریب فراوانی نقطه D و یا آنالیز سطح ریسک محدوده ABCD در شکل ۲ به عنوان ارزش بهینه PMP طیفی محاسبه نمود.

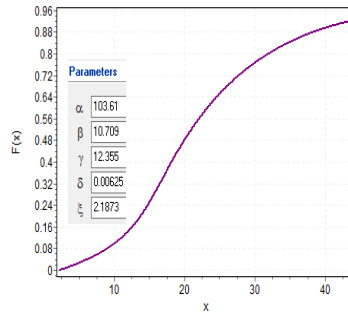
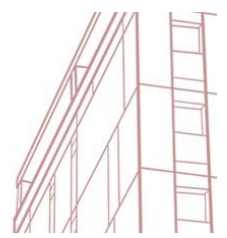
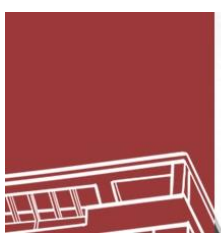
نکته کلیدی در روش طیفی، محاسبه و انتخاب توزیع آماری مناسب است. اگرچه دوره بازگشت توزیع های آماری در مفهوم PMP منطبق ندارد، با این وجود می‌توان به صورت تلویحی مقدار ریسک متناظر با احتمال وقوع مربوط به دوره بازگشت معین را به کمک آنالیز فراوانی محاسبه نمود [20]، [2]. در این خصوص علاوه بر استفاده از معیارهای مرسوم انطباق توزیع های تجربی و تئوری (چشمی-حداقل خطای مربعات)، می‌بایست دنباله انتهایی (Heavy tail) سری داده ها را نیز ارزیابی نمود. زیرا در اینجا مقادیر با احتمال کم مورد توجه است. همچنین اگرچه مقدار ریسک، معادل حاصلضرب تلفات در احتمال وقوع آن است در مطالعه حاضر، ریسک، متناظر با احتمال وقوع لحاظ شده است.

در این مطالعه بهترین توزیع از بین بیش از ۵۰ توزیع آماری مرسوم در هیدرولوژی و هواشناسی، به کمک چندین معیار شامل معیار بهترین برازش (GOF)، آزمون اسمیرونوف-کلموگروف (K-S)، آزمون اندرسون-درلین (A-D) و آزمون شیپرو-وایلک (S-W)، و کای-اسکور (C-S) جهت بررسی درستی فرض انطباق توابع استفاده شد [21]. علاوه بر آزمون های مذکور، آزمون دنباله مقادیر حد به کمک نمودار لوگ-لوگ، تابع حد متوسط (MEF)، نسبت هیل (HRP) و آماره جکسون جهت انتخاب بهترین توزیع های احتمالاتی در سطح معنی دار ۰,۰۵ بررسی شد. همچنین از معیارهای کلاسیک آزمون همچون معیار آکائیک (AIC)، و معیار بایزین (BIC) جهت انتخاب و بررسی مضاعف کلاس و رفتار دنباله انتهایی استفاده شد. ارزش پارامترهای توزیع ها نیز از روش های حداکثر احتمال (ML)، گشتاور L و گشتاور وزنی برآورد و سپس بهترین روش محاسبه پارامتر به کمک نتایج معیارهای مذکور انتخاب شد. همچنین جهت مقایسه نتایج از رابطه زیر به عنوان عدم قطعیت استاندارد بهره گرفته شد:

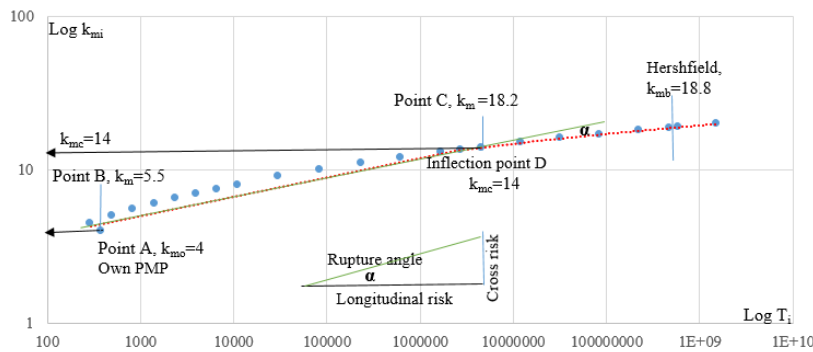
$$U_s = \frac{k_{mHershfield} - k_{m-other methods}}{k_{mHershfield}} \quad (5)$$

۳. نتایج و بحث

بهترین روش محاسبه پارامتر توزیع ها روش ML و بهترین توزیع فراوانی، توزیع وکیبی (Wakeby) تعیین شد. لذا باتوجه به تابع توزیع تجمعی توزیع وکیبی (شکل ۳) که جهت محاسبه مقدار T های متناظر با km کاربرد دارد، و معادلات ۱ الی ۴ مختصات چهار نقطه ABCD در شکل ۱ تعیین و شکل ۴ ترسیم و نتایج در جدول ۱ خلاصه شد.



شکل ۳ - تابع توزیع تجمعی وکیبی (Wakeby)

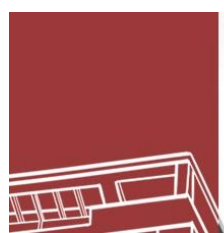
شکل ۴ - منحنی ریسک طیفی جهت برآورد ضرائب فراوانی k_m روش طیفی دلیری، ۱۴۰۲

جدول ۱ - مقایسه برآورد PMP با روش طیفی - روش هرشفیلد و روش دو نیم شده منحنی هرشفیلد

Methods	Point D Spectral method	Point C Spectral method	Point B Spectral method	Point A Own method	Hershfield method as standard method	Splitted method for comparison
k_m	۱۴	۱۸,۲	۵,۵	۴	۱۸,۸	۱۶,۷
U_s % relative to Hershfield	۲۵	۳,۲	۷۰,۷	۷۸,۷	۰	۱۱
U_s % relative to Splitted method	۱۶,۲	-۸,۹	۶۷	۷۶	-۱۲,۶	۰
PMP _{2th} (mm)	۲۳۸,۱	۳۰۱,۷	۱۰۹,۴	۸۶,۷	۳۱۰,۸	۲۷۸,۹
T (Years)	$۴,۵ \times 10^6$	$۴,۵ \times 10^6$	۳۸۵	۳۸۵	۴۷۶×10^6	$۶۹,۵ \times 10^6$

اگر چهار نقطه ABCD در شکل ۴ به یکدیگر وصل شوند می توان قلمرو ریسک و عدم قطعیت PMP محدوده ایستگاه نهپندان را تا شعاع ۲۵ کیلومترمربع را از روی مقادیر ضرائب k_m آن محاسبه نمود. مقادیر فراوانی k_m این نقاط به ترتیب معادل ۴ برای حد پایین از روش مالک، ۵,۵ به عنوان ریسک فرعی نقطه A از معادله ۲، ۱۸,۲ از معادله ۲ به عنوان ریسک فرعی نقطه D و ۱۴ به عنوان ضریب فراوانی ایستا مربوط به ریسک اصلی نسبت به نقطه A می باشد. همچنین می توان PMP بهینه را بر مبنای مساحت ریسک مجاز، آنالیز خسارت و معیارهای بلایا تعیین نمود [19].

مقدار PMP نقطه ای منطقه طرح در محل ایستگاه نهپندان به شعاع ۲۵ کیلومتر مربع صرفاً بر اساس ضریب فراوانی نقطه D به ارزش $k_m=14$ معادل ۲۳۸,۱ میلیمتر برآورد شد. خطای استاندارد عدم قطعیت روش طیفی در نقطه D نسبت به روش هرشفیلد از معادله ۵ معادل ۲۵ درصد محاسبه شد. این ارزش برای نقطه C با ریسک کمتر معادل



۳,۲ درصد محاسبه شده است. لذا نتایج روش پیشنهادی طیفی دلیری (۱۴۰۲) توانسته است نسبت به نتایج روش استاندارد هرشفیلد رقابت کند. ضمناً روش طیفی می‌تواند مقادیر احتمالاتی PMP را تولید کرده که در محاسبات پیش بینی سیلاب احتمالاتی (Ensemble flood forecasting) کاربرد دارد.

بر اساس مطالعات [15] که روش دو نیم کردن منحنی نمای هرشفیلد در هند را توسعه دادند، مقدار ضریب فراوانی منطقه در محل ایستگاه نهبندان معادل ۱۶,۷ به دست آمد. لذا به نظر می‌آید روش هرشفیلد مقدار km را در منطقه طرح کمی بیشتر برآورد می‌کند و لذا روش طیفی پیشنهادی حتی مناسب تر نیز می‌باشد. این نتایج بارها گزارش شده که روش هرشفیلد ممکن است نتایج بالاتر یا پایین تری نسبت به واقعیت منطقه ارائه کند [12] (WMO, 2009) و لذا می‌بایست از داده‌های خاص هر منطقه جهت محاسبات PMP استفاده نمود [19].

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر یک روش جدید آماری ساده جهت محاسبه PMP به نام روش طیفی معرفی و آزمون شد. مشخص شد که روش شناسی و منطق روش طیفی حداقل در یک ایستگاه نتایج قابل قبولی نسبت به روش استاندارد هرشفیلد ارائه کرده است. اگرچه بررسی‌های بیشتر در سایر ایستگاه‌های کشور و دنیا می‌تواند توانمندی یا ضعف‌های پنهان این روش را بیشتر نمایان کند. علاوه بر این، روش طیفی می‌تواند چندین km به منظور مطالعه آنالیز طیفی سیلاب در مطالعات پیش بینی سیل احتمالاتی (EFS) ارائه نماید. ضمناً روش طیفی محدودیتی جهت استفاده در سایر نقاط دنیا ندارد زیرا از داده‌های هر منطقه خاص جهت تعیین ضریب km استفاده می‌کند و لذا تغییرات اقلیمی (Climate change) را نیز می‌توان در محاسبات به روز شده و یا پیش بینی شده بارش‌ها وارد محاسبات PMP نمود.

اهمیت روش‌های آزمون انتخاب توزیع فراوانی در روش طیفی تاکید می‌شود. زیرا نتایج مناسب روش طیفی به انتخاب درست توزیع فراوانی به ویژه روش‌هایی که دنباله توزیع‌ها (به ویژه دنباله راست) را بهتر درک می‌کنند بستگی دارد. از نظر نویسنده در مناطق نیمه خشک با ضریب تغییرات حدود ۰,۵ از نظر هیدرولوژیکی و قضاوت کارشناسی حداقل داده مورد نیاز جهت محاسبات آنالیز فراوانی روش طیفی حدود ۳۰ سال می‌باشد [2].

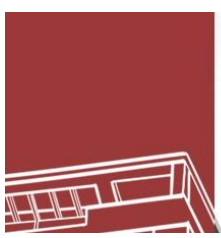
در تحقیق حاضر باتوجه به شکل ۴ دو پارامتر جدید به نام زاویه گردش α (Rupture angle) و نقطه عطف D (Turning point) نیز شناسایی شد. به نظر می‌رسد این پارامترها می‌تواند ریسک‌های اصلی و فرعی و دیگر ناهنجاری‌های PMP را که اساساً تحت تاثیر قوانین فیزیک جو می‌باشند توجیه کنند. زاویه α و محل D روی شکل ۴ ممکن است به عنوان پارامترهای جدید عدم قطعیت شناسایی شوند. لذا مطالعات بیشتری روی این پارامترها پیشنهاد می‌گردد.

۵. قدردانی

از شرکت مهندس مشاور آبسام (www.absam.ir) که هزینه‌های این تحقیق را به عهده گرفت تقدیر می‌گردد.

۶. مراجع

۱. دلیری، فرهاد، خلقی، مجید. (۱۳۸۸). "بررسی اهمیت تیپ رگبار و گیرش اولیه در تعیین دبی اوج سیلاب"، مجله تحقیقات انجمن منابع آب ایران و SID، گزارش فنی، 5 (۳): ۲۰-۱۹.
۲. دلیری، ف. (۱۳۹۳). "مدلسازی آب و محیط زیست" - کنترل سیل. تامین آب. مدیریت آب زیرزمینی. مناطق شهری و روستایی. محاسبات عددی. ادیت دوم. چاپ آبسام.



3.Zhang, Yu., and Singh, VP. (2021). “Quantifying Uncertainty of Probable Maximum Flood.” *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 26, Issue 12.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002142).

4.Micovic, Z., Schaefer, M.G. and Taylor, G.H. (2015). “Uncertainty analysis for Probable Maximum Precipitation estimates.” *Journal of Hydrology*, Vol. 521.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.033>.

5.Sarkar, S., and Maity, R. (2020). “Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change.” *MethodsX* 7, 1009004.

6.Seo, M., Kim, S., Kim, H., Shin, J.Y., and Heo, J.H. (2023). “Evaluation of Statistical PMP Considering RCP Climate Change Scenarios in Republic of Korea.” *Water* 15, 1756.

<https://doi.org/10.3390/w15091756>.

7.Kunkel, K.E., Karl, T.R., Easterling, D.R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., and Hennon, P. (2013). “Probable maximum precipitation and climate change,” *Geophys. Res. Lett.* 40, 1402–1408, [doi:10.1002/grl.50334](https://doi.org/10.1002/grl.50334).

8.Benson, MA. (1973). “Thoughts on the Design of Design Floods.” *Floods and Droughts, Proc 2nd Intern Symp in Hydrology*.7–33.

9.Hershfield, D.M. (1965). “Method for Estimating Probable Maximum Precipitation.” *American Water Works Association*. 57(8): 965–972.

10. Dooge, JCI. (1986). “Looking for Hydrologic Laws.” *Water Res.*;22(9): 46S–58S.

11. Dawdy, DR., and Lettenmaier, DP. (1987). “Initiative for Risk-based Flood Design.” *ASCE J Hydraul Eng.*;113(8):1041–1051.

12. World Meteorological Organization. (2009). “Manuel on Estimation of Probable Maximum Precipitation.” WMO–No 1045, Geneva, Switzerland.

13. Singh, A., Singh, VP and Byrd, AR. (2018). “Computation of probable maximum precipitation and its uncertainty.” *Int J Hydro.* 2(4): 504–514.

[doi: 10.15406/ijh.2018.02.00118](https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00118).

14. Zhang, Yu., Singh, VP., and Byrd, AR. (2018). “Basin-Scale Statistical Method for Probable Maximum Precipitation with Uncertainty Analysis.” *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 24, No. 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001759](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001759).

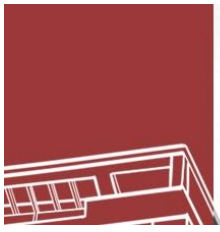
15. Subharthi, S., Maity, R. (2020). “Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change.” *MethodsX* 7 (2020) 100904.

[doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124806](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124806).

16. Khalili, A. (2002). “Report of Iran's statistical PMP project, Iranian Meteorological Organization., 177 pp.

17. Daliri, F. (2022). “Flood simulation of Shour and Bandan basins.” UNESCO, Iran Environmental Org. Tech. report, Absam EPC Co.

18. Daliri, F. (2023). “Socio-hydraulic simulation of flood of Shour and Bandan basins.” UNESCO, Iran Environmental Org. Technical report. Absam EPC Co.



19. Singh, A., Singh, VP., and Byrd, AR. (2018). "Risk analysis of probable maximum precipitation estimates." *Int J Hydro.* 2(4):411–422.

20. فرهاد دلیری. حسن سیدسراجی. ۱۴۰۲. اصول آب و هواشناسی دینامیک، چاپ اول. ۱۵۰ص. (www.Absam.ir).