

اصلاح روابط شدت - مدت - فراوانی بارندگی در ایران

بیژن قهرمان و حمیدرضا آبخضر^۱

چکیده

داشتن شدت بارندگی در دوره‌های بازگشت مختلف برای بسیاری از مدل‌های هیدرولوژی الزامی است. روابط شدت - مدت - فراوانی بارندگی از زمان‌های قدیم در نقاط مختلفی از جهان بررسی شده است. در حال حاضر جدیدترین اطلاعات منحنی‌های شدت - مدت - تناوب بارندگی در ایران، مربوط به ۶۶ ایستگاه سازمان هواشناسی می‌باشد که در سال ۱۳۷۴ منتشر شده است. روابط جامع مقدار - مدت - تناوب بارندگی برای این اطلاعات به دست آمد.

نتایج به دست آمده تغییرات محسوسی را نسبت به تحقیقات پیشین در ایران نشان داد. این امر می‌تواند مربوط به تغییر پارامترهای توابع توزیع احتمال سری زمانی شدت‌های بارندگی به دلیل افزایش طول دوره آماری باشد. هم‌چنین روابطی برای برآورد مقدار عددی باران ساعتی ده ساله برای ایران از روی پارامترهایی چون میانگین باران سالانه و میانگین حداکثر بارش روزانه ارائه شد. چنین رابطه‌ای برای کل ایستگاه‌ها و هم‌چنین برای تقسیم‌بندی‌های مختلفی از ایستگاه‌ها (بر اساس مقدار باران سالانه، بر اساس تقسیم‌بندی ظاهری اقلیمی) به دست آمد. اعتبار کلیه روابط بر اساس ۸ ایستگاه مستقل که توزیع مکانی مناسبی در کشور داشتند، بررسی و نشان داده شد که در صورت انتخاب محدوده مناسبی برای ایستگاه، دقت روابط قابل قبول خواهد بود. هم‌چنین نشان داده شد که روابط قبلی برای برآورد باران ساعتی ده ساله در ایران دیگر کارایی ندارد.

واژه‌های کلیدی: شدت - مدت - فراوانی (IDF)، باران ساعتی ده ساله، ایران

مقدمه

به دست آورد. برای مناطق فاقد آمار از چنین روشی نمی‌توان استفاده کرد. در صورتی که تعدادی باران‌سنج ثابت در منطقه وجود داشته باشد، می‌توان با روش‌های متداول میان‌یابی، اطلاعات مورد نیاز را برای سایر نقاط فاقد باران‌سنج ثابت استخراج کرد. ولی عموماً این مقادیر توأم با خطا و نااطمینانی خواهد بود (۱۵ و ۱۹).

داشتن شدت بارندگی در احتمالات وقوع یا دوره‌های بازگشت مختلف برای بسیاری از مدل‌های هیدرولوژی و روش‌هایی که به خصوصیات از کمیت و کیفیت آب نیاز دارند، الزامی است. در صورت وجود باران‌سنج ثابت چنین اطلاعاتی را می‌توان با تحلیل فراوانی سری شدت‌های بارندگی در تداوم مورد نظر

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

$$R_t^T = 229t^{0.3}T^{0.18} \left(R_{1440}^2 \right)^{0.59} \quad [5]$$

فرری و فرو (۱۶) معادله ۱ را در نظر گرفتند و رابطه IDF به شکل رابطه ۶ را برای شرایط سیسلی و ساردینیا واقع در ایتالیا پیشنهاد نمودند:

$$R_t^T / R_{60}^T = At^B \quad [6]$$

که در آن A و B اعداد ثابت محلی هستند. فرو (۱۷) عملکرد رابطه ۶ را برای رابطه ۴ (۲۱) ارزیابی کرد و رابطه تجربی IDF زیر را به دست آورد:

$$R_t^T / R_{60}^T = (t/60)^s \quad [7]$$

که در آن s ضریبی است که تابع محل مورد بررسی است.

آلیلا (۱۰) رابطه مقدار-تداوم بارندگی را برای کانادا به شکل رابطه ۶ به دست آورد. بنابراین برخلاف یافته های بل (۱۲) نشان داد که باران های ۲ ساعتی به دوره بازگشت و موقعیت مکانی ایستگاه بستگی دارد. نامبرده از مقدار باران سالانه (MAP) برای نشان دادن موقعیت مکانی ایستگاه های باران سنجی استفاده کرد. رابطه مقدار- دوره بازگشت بارندگی در کانادا از شکل کلی زیر تبعیت می کند (۱۰):

$$R_t^T / R_t^{10} = c \ln(MAP) + d \quad [8]$$

که c و d پارامترهایی هستند که به طور خطی به لگاریتم دوره بازگشت بستگی دارند.

در ایران نخستین بررسی جامع روابط شدت-مدت- فراوانی بارندگی توسط قهرمان و سپاسخواه (۵) برای ۳۴ ایستگاه باران سنجی وابسته به سازمان هواشناسی (۷) صورت پذیرفت. نامبردگان رابطه پیشنهادی بل (۱۲) (رابطه ۱) را پذیرفته و ضرایب ثابت آن را برای شرایط محلی اصلاح نمودند. نسبت های مقدار-تداوم و مقدار-تناوب بارندگی در ایران تشابه خوبی را با سایر نقاط جهان نشان داد. قهرمان (۴) بر اساس اطلاعات جدیدتری از ۱۲۶ ایستگاه باران سنجی (۸) روابط قهرمان و سپاسخواه (۵) را تجدید نظر کرد و تشابه بهتری با نتایج جهانی به دست آورد. قهرمان (۱۸) نشان داد که بر خلاف نظریات بل (۱۲) نسبت های مقدار- دوره بازگشت در واقع تابعی از تداوم باران و نسبت های مقدار-تداوم تابعی

برای کاهش چنین ناطمینانی هایی، محققین معادلات تجربی شدت-مدت-فراوانی (IDF) را پیشنهاد کرده اند. بل (۱۲) رابطه زیر را برای محدوده تناوب ۲ تا ۱۰۰ سال و تداوم ۵ تا ۱۲۰ دقیقه بر اساس اطلاعات آمریکا به دست آورد:

$$R_t^T = [0.21 \ln(T) + 0.52] \cdot [0.54t^{0.25} - 0.5] \cdot R_{60}^{10} \quad [1]$$

که در آن R_t^T مقدار باران (میلی متر) در تناوب T (سال) و تداوم t (دقیقه) می باشد. نامبرده خطای استاندارد برآورد را بین ۵ تا ۷ درصد به دست آورد و استفاده از رابطه ۱ را برای سایر نقاط جهان از جمله استرالیا، آفریقای جنوبی، هاوایی، آلاسکا و پورتوریکو نیز توصیه نمود.

چن (۱۴) بر اساس اطلاعات میان یابی شده شیکاگو، رابطه زیر را پیشنهاد نمود و خطای برآورد ۸ درصدی را گزارش کرد:

$$R_t^T = \frac{a_1 R_{60}^{10} \log[10^{(2-x)} T^{(x-1)}] \cdot t}{60(t + b_1)^{c_1}} \quad [2]$$

که در آن x نسبت باران ۱۰۰ ساله به ۱۰ ساله و a_1, b_1, c_1 پارامترهای مکانی در تبیین رابطه شدت بارندگی (رابطه ۳، I: شدت بارندگی حسب میلی متر در ساعت) می باشند.

$$I = \frac{a_1}{(t + c_1)^{b_1}} \quad [3]$$

کوتیاری و گارد (۲۱) استفاده از رابطه ۲ را برای شرایط هندوستان ارزیابی نمود و خطای ۵۰٪ را به دست آورد. از این رو رابطه زیر را پیشنهاد نموده اند:

$$R_t^T = C \frac{T^{0.2}}{t^{0.71}} \left(R_{1440}^2 \right)^{0.33} \left(\frac{60}{t} \right) \quad [4]$$

که در آن C یک پارامتر مکانی و R_{1440}^2 باران ۲۴ ساعته ۲ ساله می باشد. نامبردگان با انتخاب مناسب C خطای برآورد ۱۸٪ درصد را برای هندوستان و حداکثر خطای برآورد ۳۰٪ و ۲۵٪ را به ترتیب برای سری لانکا و آمریکا به دست آوردند. رابطه ۴ خطای برآورد ۲۰ درصدی را برای توسکانی ایتالیا در برداشت و تغییر رابطه ۴ به ۵ نیز از خطای برآورد ۲۰ درصدی نکاست (۲۲):

شده است. در این گزارش اطلاعات ۶۶ ایستگاه مجهز به باران‌سنج ثبات مختوم به سال ۱۹۹۳ تجزیه و تحلیل شده است و منحنی‌های IDF بر اساس تابع توزیع احتمال گامای دو پارامتری گزارش شده است. بررسی تابع توزیع احتمال گاما موضوع این مقاله نیست. بنابراین در ادامه مقاله به آن پرداخته نخواهد شد. با این وجود اصول نظری این تابع توزیع را می‌توان در بوبی و اشکر (۱۳) یافت. در جدول ۱ مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها ارائه شده است. مقادیر حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته، باران سالانه و تعداد روزهای بارانی در سال‌های مختلف متناظر با ایستگاه‌های فوق از سالنامه‌های آماری سازمان هواشناسی کشور استخراج گردید.

از لحاظ نظری یک منحنی IDF از بی‌نهایت نقطه متناظر با دوره‌های مختلف بازگشت و مدت‌های مختلف تداوم بارش تشکیل شده است. با این وجود در کارهای مهندسی با مقادیر مشخصی از این دو متغیر مستقل سروکار داریم. تهیه دسته منحنی‌های IDF در یک محل، نیاز به آمار طولانی مدتی از رگبارهای ثبت شده در آن محل دارد. به همین دلیل تلاش‌های فراوانی برای بازسازی چنین دسته منحنی‌هایی در مناطقی که وجود ندارد به عمل می‌آید. برای این منظور غالباً یک نقطه کلیدی از IDF انتخاب می‌شود و سپس اولاً این نقطه کلیدی توسط متغیرهای مستقلی که با سهولت بیشتری قابل تهیه باشد برآورد شده، ثانیاً نسبت‌هایی بین سایر نقاط IDF با این نقطه کلیدی پیدا می‌کنند و ثالثاً مجموعه IDF را شبیه‌سازی می‌نمایند. بررسی‌های مرسوم در جهان، R_{60}^{10} را به عنوان نقطه کلیدی معرفی کرده است (۱۰ و ۱۲). بنابراین در این بررسی نیز به همین صورت عمل می‌شود. با این وجود ممکن است بتوان پایه‌های نظری برای این انتخاب در نظر گرفت. نظر به تمایز باران‌های کوتاه مدت و بلند مدت (۲ ساعت؛ بل (۱۲))، انتخاب یک ساعت به عنوان نمادی برای باران‌های کوتاه مدت جذاب به نظر می‌آید. از طرف دیگر غالباً به دلیل طول دوره آماری محدود، احتمالاً ۱۰ سال بیشترین

از دوره بازگشت هستند. بنابراین نمی‌توان R_t^T / R_{60}^{10} را به صورت حاصل ضرب R_t^T / R_{60}^{10} و R_t^T / R_t^T در نظر گرفت. نامبرده رابطه کلی زیر را برای روابط IDF ایران پیشنهاد کرد:

$$R_t^T / R_{60}^{10} = \alpha t^\beta T^\gamma \quad [9]$$

علاوه بر روابط مقدار - تداوم - تناوب، دانستن مقدار عددی باران ساعتی ۱۰ ساله نیز مورد نیاز است. قهرمان و سپاسخواه (۶) بر اساس اطلاعات قدیمی (۷) رابطه‌ای به شکل زیر برای کل کشور ایران ارائه نمودند:

$$R_{60}^{10} = e^{0.8153} \left(R_{1440}^2 \right)^{1.1374} (\text{MAP})^{-0.3072} \quad [10]$$

که در آن R_{1440}^2 میانگین حداکثر بارش روزانه می‌باشد. عزیزاده (۳) داده‌های باران‌نگاری ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد را به منظور بررسی روابط شدت - مدت - تناوب بارندگی‌ها در دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۵۴ مورد بررسی قرار داد. نامبرده تفاوت ۱۴+ درصدی را با رابطه ۱۰ گزارش نمود و عنوان کرد که این اختلاف ممکن است به دلیل تفاوت در طول دوره آماری در این دو بررسی (۳ و ۶) باشد. وزیر (۹) براساس اطلاعات تا سال ۱۳۷۰، ایران را به نواحی هفت‌گانه تقسیم‌بندی کرد و برای هر ناحیه رابطه‌ای به شکل رابطه ۱۱ ارائه نمود:

$$R_{60}^{10} = \left(\alpha - \beta \text{Ln} \left(R_{1440}^2 \right) \right) R_{1440}^2 \quad [11]$$

در حال حاضر جدیدترین اطلاعات منحنی‌های شدت - مدت - تناوب بارندگی مربوط به ۶۶ ایستگاه سازمان هواشناسی است که در سال ۱۳۷۴ منتشر شده (۲) و اطلاعات رگبارها را تا سال ۱۹۹۳ تجزیه و تحلیل کرده است. هدف از این بررسی به‌دست آوردن (الف): روابط جامع مقدار - مدت - تناوب بارندگی و (ب): مقدار عددی باران ساعتی ۱۰ ساله بر اساس جدیدترین اطلاعات برای کشور ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور تخمین روابط شدت - مدت - تناوب بارندگی در ایران و برآورد مقدار عددی باران ساعتی ۱۰ ساله از منحنی‌های IDF گزارش شده توسط سازمان هواشناسی کشور (۲) استفاده

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱	آبادان	۳۰°-۲۲'	۴۸°-۱۵'	۶/۶	۳۴	زرقان	۲۹°-۴۷'	۵۲°-۴۳'	۱۵۹۶
۲	آباده	۳۱°-۱۱'	۵۲°-۴۰'	۲۰۳۰	۳۵	زنجان	۳۶°-۴۱'	۴۸°-۲۷'	۱۶۲۰
۳	آبعلی	۳۵°-۴۵'	۵۱°-۵۳'	۲۴۶۵/۲	۳۶	سبزوار	۳۶°-۱۲'	۵۷°-۴۳'	۹۷۷/۶
۴	اراک	۳۴°-۶'	۴۹°-۴۶'	۱۷۰۸	۳۷	سد درود زن	۳۰°-۱۳'	۵۲°-۲۶'	۱۶۲۰
۵	اردبیل	۳۸°-۱۵'	۴۸°-۱۷'	۱۳۴۹	۳۸	سقز	۳۶°-۱۵'	۴۶°-۱۶'	۱۵۲۲/۸
۶	ارومیه	۳۷°-۳۲'	۴۵°-۵'	۱۳۱۲/۵	۳۹	سمنان	۳۵°-۳۳'	۵۲°-۳۳'	۱۱۷۱
۷	اصفهان	۳۲°-۳۷'	۵۱°-۴۰'	۱۵۹۰	۴۰	سنندج	۳۵°-۲۰'	۴۷°-۰۰'	۱۳۷۳/۴
۸	اهواز	۳۱°-۲۰'	۴۸°-۴۰'	۲۲/۵	۴۱	سیرجان	۲۹°-۲۸'	۵۵°-۴۱'	۱۷۳۹/۴
۹	ایرانشهر	۲۷°-۱۲'	۶۰°-۴۲'	۵۹۱/۱	۴۲	شاهرود	۳۶°-۲۵'	۵۵°-۲'	۱۳۴۵/۳
۱۰	ایلام	۳۳°-۳۸'	۴۶°-۲۵'	۱۳۶۳/۴	۴۳	شرق اصفهان	۳۲°-۴۰'	۵۱°-۵۲'	۱۶۰۰/۷
۱۱	بابلسر	۳۶°-۴۳'	۵۲°-۳۹'	-۲۱	۴۴	شهر کرد	۳۲°-۲۰'	۵۰°-۵۱'	۱۹۹۰/۸
۱۲	بجنورد	۳۷°-۲۸'	۵۷°-۲۰'	۱۰۹۱	۴۵	شیراز	۲۹°-۳۳'	۵۲°-۳۶'	۱۴۹۱
۱۳	بم	۲۹°-۶'	۵۸°-۲۱'	۱۰۶۶/۹	۴۶	طبرس	۳۳°-۳۶'	۳۶°-۵۵'	۷۱۱
۱۴	بندر انزلی	۳۷°-۲۸'	۴۹°-۲۸'	-۲۶/۲	۴۷	فسا	۲۸°-۵۴'	۵۲°-۴۳'	۱۲۸۸/۳
۱۵	بندر عباس	۲۷°-۱۳'	۵۶°-۲۲'	۱۰	۴۸	قاراخیل قائمشهر	۳۶°-۲۷'	۵۲°-۵۳'	۱۴/۷
۱۶	بندر لنگه	۲۶°-۳۵'	۵۴°-۵۰'	۱۴/۲	۴۹	قزوین	۳۶°-۱۵'	۵۰°-۰۰'	۱۲۷۸/۳
۱۷	بوشهر	۲۸°-۵۹'	۵۰°-۵۰'	۱۹/۶	۵۰	کاشان	۳۳°-۵۹'	۵۱°-۲۷'	۹۸۲/۳
۱۸	بیرجند	۳۲°-۵۲'	۵۹°-۱۲'	۱۴۹۱	۵۱	کبوتر آباد	۳۲°-۳۱'	۵۱°-۵۱'	۱۵۴۵
۱۹	تبریز	۳۸°-۸'	۴۶°-۱۷'	۱۳۶۴	۵۲	کاخ سعد آباد	-	-	-
۲۰	تربت حیدریه	۳۵°-۱۶'	۵۹°-۱۳'	۱۴۵۰/۸	۵۳	کرج	۳۵°-۵۶'	۵۰°-۵۸'	۱۳۱۲/۵
۲۱	تهران (مهرآباد)	۳۵°-۴۲'	۵۱°-۲۱'	۱۱۹۱	۵۴	کرمان	۳۰°-۱۵'	۵۶°-۵۸'	۱۷۵۳/۸
۲۲	جاسک	۲۵°-۳۸'	۵۷°-۴۶'	۴/۸	۵۵	کرمانشاه	۲۴°-۱۹'	۴۷°-۷'	۱۳۲۲
۲۳	جزیره ابوموسی	۲۵°-۵۰'	۵۴°-۵۰'	۶/۶	۵۶	گرگان	۳۶°-۵۱'	۵۴°-۱۶'	۱۳/۳
۲۴	جزیره کیش	۲۶°-۳۰'	۵۳°-۵۹'	۳۰	۵۷	گلمکان	۳۶°-۲۹'	۵۹°-۸'	۱۱۷۶
۲۵	چاه بهار	۲۵°-۱۷'	۶۰°-۳۷'	۷	۵۸	مراغه	۳۷°-۲۴'	۴۶°-۱۶'	۱۴۷۷/۷
۲۶	خرم آباد	۳۳°-۲۹'	۴۸°-۲۲'	۱۱۲۵	۵۹	مشهد	۳۶°-۱۶'	۵۹°-۳۸'	۹۹۰
۲۷	خوی	۳۸°-۳۳'	۴۴°-۵۸'	۱۱۰۷	۶۰	مهاباد	۳۶°-۴۶'	۴۵°-۴۳'	۱۳۸۵
۲۸	دزفول	۳۲°-۲۴'	۴۸°-۲۳'	۱۴۳	۶۱	میناب	۲۷°-۷'	۵۷°-۶'	۲۷
۲۹	دوشان تپه	۳۵°-۴۱'	۵۱°-۲۱'	۱۲۱۸	۶۲	نوشهر	۳۶°-۳۹'	۵۱°-۳۰'	-۲۰/۹
۳۰	دوگنبدان	۳۰°-۲۰'	۵۰°-۵۰'	۷۰۹	۶۳	همدان	-	-	-
۳۱	رامسر	۳۶°-۵۴'	۵۰°-۴۰'	-۲۰	۶۴	همدان فرودگاه	۳۴°-۵۱'	۴۸°-۳۲'	۱۷۴۹
۳۲	رشت	۳۷°-۱۵'	۴۹°-۳۶'	-۶/۹	۶۵	همدان نورژه	۳۵°-۱۲'	۴۸°-۴۱'	۱۶۷۹/۷
۳۳	زابل	۳۱°-۱۳'	۶۱°-۲۹'	۴۸۹/۲	۶۶	یزد	۳۱°-۵۴'	۵۴°-۲۴'	۱۲۳۰/۲

نتایج و بحث

نسبت‌های مقدار - مدت باران در دوره‌های مختلف بازگشت (DDR) در هر مدت تداوم، نسبت‌های مقدار باران با مدت‌های مختلف بارش به مقدار بارش ساعتی در دوره‌های مختلف بازگشت (۲ الی ۱۰۰ سال) تغییرات چشم‌گیری ندارد. جدول ۳ مقایسه‌ای بین این نسبت‌ها با دو مطالعه قبلی در ایران و در جدول ۴ مقایسه‌ای در تداوم‌های ۱۵، ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه با سایر نقاط جهان به عمل آمده است. میانگین نسبت‌های مقدار - مدت باران در بررسی اخیر نسبت به بررسی‌های قبلی در ایران در مدت‌های بارش کمتر از ۶۰ دقیقه کاهش و در مدت‌های بارش بیشتر از ۶۰ دقیقه افزایش یافته است. چنین تغییری باعث شده است که تفاوت با مقادیر جهانی افزایش یابد. ولی از طرف دیگر ضریب تغییرات در بررسی اخیر نسبت به سایر بررسی‌های قبلی کاهش محسوسی را نشان می‌دهد.

بر اساس رابطه عمومی (۶) ضرایب ثابت A و B در محدوده‌های مختلفی از تداوم بارش ارزیابی شد. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد. گرچه این معادله فاقد ترم ثابت بخش DDR رابطه بل (۱۲) است، ولی اضافه کردن چنین ترم ثابتی، ضریب تعیین را در محدوده‌های مختلفی از مدت بارش کمتر از ۱٪ بهبود بخشید. از طرف دیگر نحوه تطابق رابطه ۷ بر روی اطلاعات ایران مورد بررسی قرار گرفت. روابط رگرسیونی نشان داد که حاصل $(\frac{1}{\sqrt{6}})^4$ برای این معادله برای چهار محدوده تداوم مختلف بارش (جدول ۵ را ببینید) به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۷، ۰/۹۵ و ۱ می‌باشد. بنابراین با دقت قابل قبولی می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در این صورت نمای B در رابطه ۶ با نمای s در رابطه ۷ مساوی خواهد بود. آلیلا (۱۰) نمای s را برای اطلاعات کانادا ($t < 60 \text{ min}$)، ۰/۳۹۳ به دست آورد و تفاوت آن را با مقادیر محاسبه شده در سایر نقاط دنیا (۰/۳۸۶) برای سیسیلی ایتالیا، ۰/۳۴۵ برای ساردینی ایتالیا، ۰/۴۵۱ برای آمریکا و ۰/۲۹۰ برای هندوستان ناشی از تفاوت‌های اقلیمی و یا تغییراتی در نمونه‌برداری مکانی و زمانی دانست. با این حال

دوره بازگشتی باشد که برآورد آن با خطای استاندارد بالایی توأم نباشد. بنابراین بل (۱۲) نشان داد که استفاده از R_{60}^2 به جای R_{60}^{10} منجر به خطای استاندارد بیشتری شده است. به منظور محاسبه نسبت‌های مقدار - مدت باران در دوره‌های بازگشت ۲ الی ۱۰۰ سال (DDR)، برای دوره‌های مختلف بازگشت، میانگین نسبت مقدار باران در هر تداوم به مقدار باران یک ساعته ملاک عمل قرار گرفت (۴، ۵، ۱۲). از طرف دیگر نسبت‌های مقدار باران در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال به دوره بازگشت پایه ۱۰ سال در مدت‌های مختلف بارش (از ۱۰ دقیقه تا ۹ ساعت) (DFR) محاسبه گردید.

غالباً می‌توان R_{60}^{10} را از سایر پارامترهایی که با سهولت بیشتری به دست می‌آیند (مثلاً MAP، R_{1440}^2) توسط معادلات رگرسیونی محاسبه کرد (۶). چنین روابطی را ممکن است بتوان برای کل کشور یا برای هر ناحیه به طور جداگانه تهیه کرد. گرچه روش‌های بسیاری برای ناحیه‌بندی و تعیین نواحی همگن از نقطه نظر هیدرولوژی در منابع موجود است، ولی ما هیچ روش علمی را برای این منظور برای رگبارها پیدا نکردیم. روش‌های موجود یا بر اساس تفاوت در میزان باران سالانه (۱۰) و یا بر اساس تفاوت‌های ظاهری اقلیمی (۹) است. به نظر می‌رسد هر دو معیار از این نقطه نظر که هم باران سالانه و هم اقلیم به احتمال زیاد می‌تواند ویژگی‌هایی از باران‌های کوتاه مدت را کنترل کند، استوار می‌باشد.

به منظور بررسی اعتبار روابط رگرسیونی لازم است که از اطلاعات مستقلی استفاده شود که در به دست آوردن این روابط رگرسیونی وارد نشده بودند. برای این منظور از اطلاعات ۸ ایستگاه باران‌سنج ثابت وابسته به وزارت نیرو (قرارداد منعقد بین دفتر استاندارد صنعت آب کشور و مهندسین مشاور آب پوی) که توزیع مکانی مناسبی در کل کشور داشتند و از آمار مناسب‌تری نیز برخوردار بودند، استفاده شد. در جدول ۲ مشخصات این ایستگاه‌ها به همراه اطلاعات مورد نیاز ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های به کار رفته در بررسی اعتبار مدل‌های برآورد باران ساعتی ده ساله

نام	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	متوسط باران سالانه (میلی متر)	متوسط حداکثر باران روزانه (میلی متر)	باران ساعتی ده ساله (میلی متر)	تعداد سال‌های آماری
باغملک	۴۹°۵۲'	۳۱°۳۳'	۶۷۵	۷۲۳/۳	۷۷/۵۴	۲۴/۹۶	۲۶
رشت	۴۹°۳۶'	۳۷°۱۵'	۳	۱۳۲۵/۹	۱۰۰/۱۷	۳۴/۸	۲۱
زاینده رود	۵۰°۴۴'	۳۲°۴۴'	۲۱۶۰	۲۲۷/۳	۳۳/۲۰	۱۶/۶۳	۲۸
سپید دشت	۴۸°۵۳'	۳۳°۱۳'	۹۷۰	۹۰۱/۶	۶۵/۹۸	۱۸/۵۳	۱۹
سرخس	۶۱°۱۰'	۳۶°۳۲'	۲۷۵	۲۳۷/۲	۲۷/۳۴	۱۱/۷۵	۲۴
کمپ ارومیه	۴۵°۰۲'	۳۷°۳۲'	۱۳۸۱	۴۳۹/۹	۳۸/۸۷	۱۵/۱۱	۱۳
گناباد	۵۸°۴۰'	۳۴°۲۰'	۱۱۱۵	۲۳۹/۶	۲۴/۶۵	۱۱/۰۰	۲۴
ورمهنگ کامیاران	۴۵°۵۳'	۳۴°۴۸'	۱۴۲۰	۶۵۴/۶	۵۵/۹۸	۱۸/۹۲	۱۸

جدول ۳. مقایسه نسبت مقدار باران در مدت‌های مختلف بارش به مقدار باران یک ساعته با تحقیقات قبلی در ایران

تداوم بارش (دقیقه)	بررسی حاضر		قهرمان (۴)		قهرمان و سپاسخواه (۵)	
	میانگین	ضریب تغییرات	میانگین	ضریب تغییرات	میانگین	ضریب تغییرات
۱۵	۰/۴۹*	۰/۰۷*	۰/۶۲	۰/۲۰	۰/۶۹	۰/۳
۳۰	۰/۷۰	۰/۰۳	۰/۷۹	۰/۱۲	۰/۸۵	۰/۲۱
۴۵	۰/۸۵**	۰/۰۱۳**	۰/۹۰	۰/۰۸	۰/۹۳	۰/۰۹
۱۲۰	۱/۳۲	۰/۰۳۶	۱/۲۶	۰/۱۳	۱/۲۱	۰/۱۴
۱۸۰	۱/۵۵	۰/۰۴۳	۱/۴۶	۰/۱۹	۱/۳۵	۰/۲۱
۲۴۰	۱/۷۴	۰/۰۴۷	۱/۶۴	۰/۲۴	۱/۵۱	۰/۲۶
۳۰۰	۱/۹۱	۰/۰۴۱	۱/۸۰	۰/۲۶	۱/۵۷	۰/۲۷
۳۶۰	۲/۰۴	۰/۰۳۹	۱/۹۵	۰/۲۶	۱/۷۴	۰/۲۶
۴۲۰	۲/۲۸	۰/۰۳	۲/۲۴	۰/۲۷	۲/۰۱	۰/۲۵

*: میان‌بایی شده از مقادیر نظیر در تداوم‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه‌ای

** : میان‌بایی شده از مقادیر نظیر در تداوم‌های ۴۰ و ۵۰ دقیقه‌ای

بررسی قبلی در ایران برای محدوده تداوم بیشتر از ۲ ساعت کاهش و برای محدوده تداوم کمتر از ۲ ساعت افزایش یافته است (جدول ۷).

نسبت‌های DFR علاوه بر این که تابعی از دوره بازگشت هستند، تغییر سیستماتیکی نیز با مدت تداوم بارش از خود نشان دادند. این تغییرات برای دوره‌های بازگشت کمتر از ۱۰ سال صعودی و برای دوره‌های بازگشت بیشتر از ۱۰ سال نزولی است (شکل ۱). با این وجود برای دو محدوده متمایز تداوم باران می‌توان مقدار ثابتی برای آن در نظر گرفت (شکل ۱).

نتایج وی در سطح ۵ درصد اطمینان با نتایج مربوط به ایتالیا و آمریکا تفاوت معنی‌داری نداشت. بر اساس جدول ۵ اطلاعات ایران به نتایج مربوط به آمریکا نزدیکی بیشتری دارد.

نسبت‌های مقدار - دوره بازگشت باران (DFR)

در جدول ۶ نسبت‌های مقدار باران در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال به دوره بازگشت پایه ۱۰ سال در محدوده تداوم ۲ تا ۲ ساعت با سایر مطالعات انجام شده مقایسه شده است. جدول فوق موید تشابه نسبی در نواحی با شرایط آب و هوایی مختلف می‌باشد. با این وجود ضریب تغییرات برآوردها نسبت به

جدول ۴. مقایسه نسبت‌های $\frac{R_t^T}{R_{60}^T}$ به دست آمده برای ایران با سایر نقاط دنیا

تداوم بارش (دقیقه)									نام کشور
۱۲۰			۳۰			۱۵			
c	b	a	c	b	a	c	b	a	
-	۰/۰۳۶	۱/۳۲	-	۰/۰۳	۰/۷	-	۰/۰۷	۰/۴۹	ایران - بررسی حاضر
۴/۵	۰/۱۳	۱/۲۶	۱۲/۸	۰/۱۲	۰/۷۹	۲۶/۵	۰/۲	۰/۶۲	ایران (۴)
۸/۳	۰/۱۴	۱/۲۱	۲۱/۴	۰/۲۱	۰/۸۵	۴۰/۸	۰/۳۰	۰/۶۹	ایران (۵)
۵/۳	۰/۰۶۴	۱/۲۵	۱۲/۸	۰/۰۵۱	۰/۷۹	۱۶/۳	۰/۰۷	۰/۵۷	آمریکا (۱۲)
۶/۱	۰/۰۴۸	۱/۲۴	۱۱/۴	۰/۰۳۸	۰/۷۸	۱۶/۳	۰/۰۷	۰/۵۷	استرالیا (۱۲)
۱/۵	۰/۰۷۷	۱/۳۰	۱۲/۸	۰/۱۰۱	۰/۷۹	۱۲/۲	۰/۱۰۹	۰/۵۵	شوروی (۲۰)
۹/۱	۰/۱۴۲	۱/۲۰	۱۱/۴	۰/۰۹	۰/۷۸	۱۴/۳	۰/۰۷۱	۰/۵۶	عربستان سعودی (۲۰)
۰	N.A. *	۱/۳۲	۱۰/۰	N.A. *	۰/۷۷	۲۰/۴	N.A. ***	۰/۵۹	سیسیلی ایتالیا (۱۶)
۳/۰	N.A. *	۱/۲۸	۱۴/۳	N.A. *	۰/۸۰	۲۸/۶	N.A. ***	۰/۶۳	ساردینیا ایتالیا (۱۶)
۷/۶	N.A. *	۱/۲۲	۱۷/۱	N.A. *	۰/۸۲	۳۶/۷	N.A. ***	۰/۶۷	هندوستان (۱۶)
۱۸/۲	N.A. *	۱/۰۸**	۱۴/۳	N.A. *	۰/۸۰	۲۰/۴	N.A. ***	۰/۵۹	کانادا (۱۰)
۱۰/۶	N.A. *	۱/۱۸***							

* : MAP کمتر یا مساوی ۱۲۰۰ میلی‌متر

** : MAP بیشتر از ۱۲۰۰ میلی‌متر

*** : گزارش نشده است.

b: ضریب تغییرات

c: درصد تفاوت

جدول ۵. ضرایب ثابت رابطه (۶) برای نسبت‌های DDR ایران

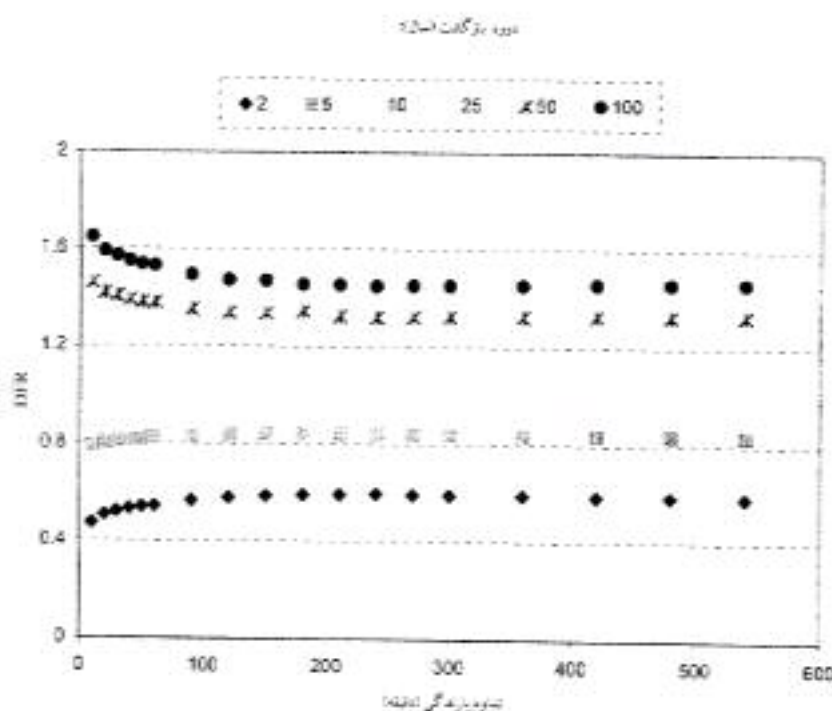
خطای استاندارد	ضریب تعیین	B	A	محدوده مدت تداوم باران t (ساعت)
۰/۰۴۱۹	۰/۹۸۲	۰/۴۹۵۲	۰/۱۲۹۹	≤ 1
۰/۰۴۰۸	۰/۹۸۸	۰/۴۷۷۸	۰/۱۳۷۲	≤ 2
۰/۰۴۵۶	۰/۹۹۲	۰/۴۳۶۱	۰/۱۵۸۹	≤ 9
۰/۰۳۵۷	۰/۹۵۴	۰/۳۹۳۷	۰/۲۰۰۹	$2 < t \leq 9$

جدول ۶. مقایسه DFR برای میانگین دوام تا ۲ ساعت با سایر مطالعات انجام شده

دوره بازگشت (سال)					مرجع
۱۰۰	۵۰	۲۵	۵	۲	
۱/۵۴۷۹	۱/۳۸۹۶	۱/۱۷۲۳	۰/۸۱۶۴	۰/۵۳۳۴	بررسی حاضر
۱/۵۹۰۳	۱/۴۱۲۸	۱/۲۳۸۳	۰/۸۱۳۲	۰/۵۳۰۷	قهرمان (۴)
۱/۶۳۱	۱/۴۳۴	۱/۲۴۴	۰/۸۰۵	۰/۵۲۵	قهرمان و سپاسخواه (۵)
۱/۴۶۰	۱/۳۱۰	۱/۱۷۰	۰/۸۵۰	۰/۶۳۰	آمریکا (۱۲)
۱/۵۰۰	۱/۳۳۰	۱/۱۸	۰/۸۵۰	۰/۶۵۰	استرالیا (۱۱)
۱/۳۸۱	۱/۳۳۸	۱/۱۹۴	۰/۸۴۶	۰/۶۱۴	نیوزیلند (۲۳)

جدول ۷. مقایسه ضریب تغییرات DFR در ایران با مطالعه قبلی در محدوده‌های مختلف تداوم باران

دوره بازگشت (سال)										محدوده
۱۰۰		۵۰		۲۵		۵		۲		تداوم
مطالعه حاضر		مطالعه حاضر		مطالعه حاضر		مطالعه حاضر		مطالعه حاضر		بارش
قهرمان (۴)		قهرمان (۴)		قهرمان (۴)		قهرمان (۴)		قهرمان (۴)		(ساعت)
۰/۰۱۰۰	۰/۰۳۵۶	۰/۰۰۸۰	۰/۰۲۷۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۷۰	۰/۰۱۹۴	۰/۰۲۷۰	۰/۰۶۲۰	≤ ۲
۰/۰۱۱	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲۰۰	۰/۰۰۵۵	> ۲



شکل ۱. تغییرات سیستماتیک نسبت‌های DFR با مدت تداوم

جدول ۸. مقایسه ضرایب ثابت معادله ۱۲ با تحقیقات قبلی در ایران

محدوده تداوم باران (ساعت)						پارامتر
> ۲			≤ ۲			
بررسی حاضر: ۱۳۸۲	قهرمان(۴): ۱۳۷۵	قهرمان و سپاسخواه(۵): ۱۳۶۹	بررسی حاضر: ۱۳۸۲	قهرمان(۴): ۱۳۷۵	قهرمان و سپاسخواه(۵): ۱۳۶۹	
۰/۵۵۶۵	۰/۴۹۹۸	۰/۴۹۹۸	۰/۴۶۰۸	۰/۴۴۱۱	۰/۴۰۵۵	α_1
۰/۱۹۴۸	۰/۲۲۲۴	۰/۲۲۹۳	۰/۲۳۴۹	۰/۲۴۹۵	۰/۲۶۳۶	α_2
۰/۸	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۴۴	α_3
۰/۹۹۷۴	-	-	۰/۹۹۷۲	-	-	ضریب تعیین
۰/۰۱۸۲	-	-	۰/۰۲۲۲	-	-	خطای استاندارد

جدول ۹. رابطه ریاضی برآورد بارندگی ساعتی ده ساله برای محدوده‌های مختلفی از میانگین بارندگی سالانه

شاخص‌های آماری		رابطه پیشنهادی	حدود بارندگی سالانه (میلی متر)	شماره گروه
P	Adj R ²			
-	-	رابطه‌ای قابل برازش نیست	MAP < ۱۰۰	۱
۰/۰۰۹۹	۰/۴۳۳	$P_{60}^{10} = e^{-6.84} \cdot MAP^{1.33} \cdot (R_{1440}^2)^{0.854}$	۱۰۰ < MAP < ۲۰۰	۲
۰/۰۰۱۱	۰/۴۲۲	$P_{60}^{10} = e^{-0.924} (R_{1440}^2)^{1.07}$	MAP < ۲۰۰	۳
۰/۰۰۷۲	۰/۳۹۵	$P_{60}^{10} = e^{-0.0963} (R_{1440}^2)^{0.864}$	۲۰۰ < MAP < ۳۰۰	۴
-	-	رابطه‌ای قابل برازش نیست	۳۰۰ < MAP < ۵۰۰	۵
-	-	رابطه‌ای قابل برازش نیست	۵۰۰ < MAP < ۷۰۰	۶
۰/۰۱۱۶	۰/۲۹۶	$P_{60}^{10} = 1.66 + 0.0201 \text{ MAP} + 0.157 (R_{1440}^2)$	۳۰۰ < MAP < ۷۰۰	۷
۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۶	$P_{60}^{10} = e^{2.78} \cdot MAP^{-0.617} \cdot (R_{1440}^2)^{1.09}$	۷۰۰ < MAP	۸

جدول ۱۰. رابطه ریاضی برآورد بارندگی ساعتی ده ساله در مناطق مختلف جغرافیایی ایران (بر اساس شکل ۲)

شاخص‌های آماری		رابطه پیشنهادی	نام منطقه	شماره منطقه
P	Adj R ²			
-	-	رابطه‌ای قابل برازش نیست	شمال شرقی	۱
< ۰/۰۰۰۱	۰/۷۹۱	$P_{60}^{10} = 9.99 + 0.212 (R_{1440}^2)$	شمال	۲
-	-	رابطه‌ای قابل برازش نیست	شمال غربی	۳
۰/۰۰۳	۰/۸۰۷	$P_{60}^{10} = e^{2.49} \cdot MAP^{-0.633} \cdot (R_{1440}^2)^{1.16}$	جنوب غربی	۴
۰/۰۸۶۲	۰/۳۷۱	$P_{60}^{10} = e^{0.392} \cdot (R_{1440}^2)^{0.589}$	غرب کویر	۵
< ۰/۰۰۰۱	۰/۶۴۱	$P_{60}^{10} = e^{-0.993} \cdot (R_{1440}^2)^{1.06}$	کویر و جنوب	۶

در جدول ۸ هم‌چنین مقایسه‌ای بین ضرایب به دست آمده برای معادله ۱۲ در این بررسی با تحقیقات قبلی در ایران به عمل آمده است. این جدول مشخص می‌سازد که پارامترهای معادله ۱۲ به طور سیستماتیک در طی زمان تغییر کرده‌اند

جدول ۸ ضرایب ثابت معادله ای به فرم زیر (ترم RDF فرمول بل، (۱۲)) را در دو محدوده کلی تداوم باران کمتر و بیشتر از ۲ ساعت نشان می‌دهد:

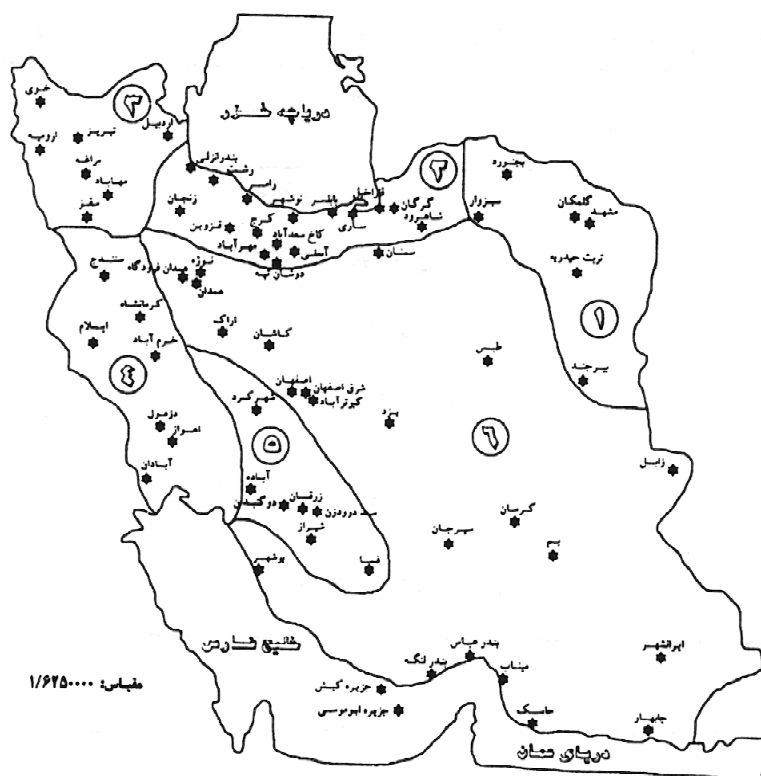
$$R_t^T / R_t^{10} = \alpha_1 + \alpha_2 \ln(T - \alpha_3) \quad [12]$$

جدول ۱۱. بررسی اعتبار روابط برآورد باران ساعتی ده ساله در ایران

ایستگاه	رابطه ۱۴	تقسیم بندی بر مبنای باران سالانه	تقسیم بندی بر مبنای خصوصیات ظاهری اقلیم	رابطه ۱۰ (نقل از مرجع ۶)
باغملک	۸/۱	۲۷/۵	۱۶/۴	۶۸/۹
رشت	-۶/۷	-۱۶/۸	-۱۰/۲۷	۳/۴
زاینده رود	-۱۲/۲	۲۹/۰	-۸/۷	۳۷/۸
سپید دشت	۲۹/۵	۲۵/۷	۱۳/۱	۷۶/۹
سرخس	۷/۹	۳۴/۸	۵/۱*	۵۴/۴
کمپ ارومیه	۸/۳	۹/۹	۱۸/۳**	۴۸/۲
گناباد	۷/۰	۳۱/۶	۰/۶	۴۶/۱
ورمهنگ کامیاران	۱۲/۶	۲۴/۸	۱۲/۱	۵۸/۶
متوسط قدر مطلقها	۱۱/۵	۲۵/۰	۱۰/۶	۴۹/۳

*: سرخس در ناحیه ۱ قرار دارد ولی برای این ناحیه رابطه معنی داری وجود ندارد. با توجه به خصوصیات اقلیمی به ناحیه ۶ منتسب شد. در صورت استفاده از ناحیه ۲ درصد تفاوت به ۳۴/۳ می‌رسید.

** : انتساب به ناحیه ۴ . استفاده از ناحیه ۲ تفاوت چندانی نداشت (۲۰/۶ درصد).



شکل ۲. تقسیم بندی شماتیک منطقه‌ها

سالانه زیاد (بیشتر از ۷۰۰ میلی متر) ضعیف می باشند. از این رو جدای از چنین تقسیم بندی، تلاش شده از نواحی مجاور هم که به نظر می رسد از نظر اقلیمی نیز تشابهاتی با هم داشته باشند، استفاده شود. شکل ۲ این تقسیم بندی شماتیک را نشان می دهد. روابط به دست آمده برای این حالت در جدول ۱۰ ارائه شده است. افزایش بهبود نسبی در خصوصیات رگرسیون در مقایسه با حالت قبل استنتاج می شود. با این وجود به نظر می رسد که هنوز نمی توان به طور کامل به چنین ناحیه بندی هایی اطمینان کامل داشت. در شرایط عدم اطمینان (نواحی ۱، ۳ و تا حدی ۵) پیشنهاد می شود که از رابطه (۱۴) استفاده می شود.

ب) بررسی اعتبار روابط به دست آمده

اعتبار رابطه ۱۴، تقسیم بندی بر مبنای باران سالانه و تقسیم بندی بر مبنای خصوصیات ظاهری اقلیم و هم چنین عملکرد رابطه ۱۰ (نقل از مرجع ۶) برای ایستگاه های انتخابی (جدول ۲) بررسی شد. نتایج به دست آمده در جدول ۱۱ خلاصه شده است. این جدول مشخص می سازد که رابطه ۱۰ کارایی مفید خود را از دست داده است. افزایش طول دوره آماری ایستگاه ها منجر به ثبات بیشتر و تغییر در پارامترهای توابع توزیع احتمال می شود. بنابراین نتایج جدید به دست آمده بر اساس تقسیم بندی بر مبنای خصوصیات ظاهری اقلیم قابل اعتمادتر است. از طرف دیگر سایر روش های مورد بررسی از دقت نسبی قابل قبولی برخوردارند. با این حال توصیه می شود که از روش تقسیم بندی بر مبنای باران سالانه استفاده نشود.

نتیجه گیری

روابط داخلی رگبارها در ایران با جدیدترین آمار در دسترس بررسی و تصحیحات لازم نسبت به پژوهش های پیشین ارائه شد. برآورد باران ساعتی ده ساله، که کلیدی ترین پارامتر در منحنی های شدت - مدت - فراوانی است، با نگرش های مختلفی انجام شد. گرچه در حال حاضر برای بعضی از محدوده های مختلف امکان برقراری یک رابطه معنی دار وجود

(سال های تحقیقات ۱۳۶۹، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۲ می باشد؛ تنها مورد خلاف پارامتر α_3 و برای $t > 2$ ساعت می باشد).

۳. نسبت های مقدار - تداوم - دوره بازگشت باران (DDFR)

با انتخاب $t = 60$ دقیقه در رابطه ۱۲ و اعمال پارامتر حاصله مقدار باران ساعتی ۱۰ ساله (R_{60}^{10}) در رابطه ۶ رابطه کلی DDFR ایران به دست می آید:

$$R_t^T = At^B [\alpha_1 + \alpha_2 \ln(T - \alpha_3)] R_{60}^{10} \quad [13]$$

که ضرایب A ، B ، α_1 ، α_2 ، α_3 برای محدوده های مختلف تداوم باران در جداول ۴ و ۷ ارائه شده است. کاربرد معادله (۱۳) نیاز به در اختیار داشتن باران ساعتی ۱۰ ساله (R_{60}^{10}) دارد.

۴. برآورد باران ساعتی ۱۰ ساله

قهرمان و سپاسخواه (۵) سه پارامتر مستقل میانگین حداکثر باران روزانه، میانگین باران سالانه و تعداد روزهای بارانی را برای برآورد باران ساعتی ده ساله به کار بردند، ولی نتیجه گرفتند که تنها دو متغیر اول تاثیر معنی داری دارند (رابطه ۱۰). آمار در دسترس جدید نیز مجدداً این موضوع را تأیید کرد به طوری که تعداد روزهای بارانی تنها ۱۳٪ از واریانس R_{60}^{10} را پیش بینی کرد. با این وجود تحلیل واریانس و تحلیل رگرسیون نشان داد که وجود میانگین باران سالانه بهبود معنی داری بر آمارهای رگرسیون ایجاد نکرد (۱). از این رو مناسب ترین مدل برای کل ایستگاه های ایران برای این منظور رابطه ۱۴ می باشد:

$$R_{60}^{10} = e^{0.291} (R_{1440}^2)^{0.694} \quad (\text{Adj}R^2 = 0.49, P < 0.0001) \quad [14]$$

که در آن R_{1440}^2 میانگین حداکثر باران روزانه است.

الف) تقسیم بندی ایستگاه ها

جدول ۹ محدوده های مختلف برای برآورد باران ساعتی ۱۰ ساله را نشان می دهد. این روابط به جز برای محدوده باران

ندارد، ولی با قضاوت کارشناسی می‌توان از محدوده‌های مجاور و یا از رابطه سراسری ۱۴ استفاده کرد. نویسندگان بر این باورند که هنوز پارامترهای اصلی چنین روابطی تثبیت نشده‌اند. بنابراین با گذشت زمان و فراهم شدن آمار با کیفیت و کمیت مناسب‌تر، لزوم به دست آوردن روابط جدیدتر وجود خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

۱. آبخضر، ح. ر. ۱۳۸۰. بررسی ناحیه‌ای منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی ایستگاه‌های باران سنج ثابت کشور. سمینار کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲. سازمان هواشناسی کشور. ۱۳۷۴. روابط شدت - مدت - فراوانی بارندگی در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران. وزارت راه و ترابری، مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی، تهران.
۳. عزیزاده، ا. ۱۳۷۳. روابط شدت - مدت - تناوب بارندگی در مشهد. مجله علوم و صنایع کشاورزی ۸ (۱): ۵۵-۶۶.
۴. قهرمان، ب. ۱۳۷۵. رابطه به روز شده شدت - مدت - تناوب بارندگی در ایران با استفاده از باران یک ساعته ده ساله. مجله دانش کشاورزی ۶: ۱۳-۳۰.
۵. قهرمان، ب. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۶۹الف. تخمین رابطه شدت - مدت - تناوب بارندگی در ایران با استفاده از باران یک ساعته ده ساله. مجموعه مقالات سومین کنگره بین‌المللی مهندسی راه و ساختمان ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز ۵: ۷۳-۵۵.
۶. قهرمان، ب. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۶۹ب. تخمین باران یک ساعته ده ساله برای تعیین روابط شدت - مدت - تناوب بارندگی در ایران. مجموعه مقالات سومین کنگره بین‌المللی مهندسی راه و ساختمان ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز ۵: ۳۵-۵۳.
۷. وزیری، ف. ۱۳۶۳. تجزیه و تحلیل رگبارها و تعیین منحنی‌های شدت - مدت مناطق مختلف ایران. مجتمع دانشگاهی مهندسی، واحد طرح و تحقیقات جهاد دانشگاهی، گروه آب، تهران.
۸. وزیری، ف. ۱۳۷۰. تجزیه و تحلیل رگبارها در نقاط مختلف ایران. جهاد دانشگاهی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، واحد طرح و تحقیقات، تهران.
۹. وزیری، ف. ۱۳۷۱. تعیین روابط منطقه‌ای بارندگی‌های کوتاه مدت در ایران. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
10. Alila, Y. 2000. Regional rainfall depth-duration-frequency equations for Canada. *Water Resour. Res.* 36(7):1767-1778.
11. Bell, F.C. 1964. Rainfall depth - duration - frequency maps of South Wales and Victoria. Bulletin NO. 8, Water Research Foundation of Australia.
12. Bell, F.C. 1969. Generalized rainfall depth-duration-frequency relationships. *J. Hydraul. Div., ASCE* 95(1): 311-327.
13. Bobee, B. and F. Ashkar. 1991. The Gamma Family and Derived Distribution Applied Hydrology. Water Resource Pub. Littleton, Colorado, USA.
14. Chen, C.L. 1983. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *J. Hydraul. Eng., ASCE* 109(12): 1603-1621.
15. Diaconis, P. and B. Efron. 1983. Computer intensive methods in statistics. *Scientific America* 248(5):116-130.
16. Ferreri, G.B. and V. Ferro. 1990. Short duration rainfalls in Sicily. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 116(3):430-435.
17. Ferro, V., 1993. Comment on "Rainfall intensity-duration-frequency formula for India" by U.C. Kothiyari and R.J. Garde. *J. Hydrol. Eng. ASCE* 119(8):960-962.
18. Ghahraman, B. 1995. A general dimensionless rainfall depth-duration-frequency relationship. *Iran Agric. Res.* 14:217-235.
19. Hershfield, D.M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States. Technical. Paper. 40, U.S. Weather Bureau Washington, D.C.

20. Jones, K.R.O., Berney, D.P. Carr and E.C. Barrett. 1981. Arid Zone Hydrology for Agricultural Derelopment. FAO Irrigation and Drainage Paper, NO. 37, FAO, Rome, Italy, 271 pp.
21. Kothyari, U.C. and R.J. Garde. 1992. Rainfall intensity-duration-frequency formula for India, J. Hydraul. Eng. ASCE 118(2):323-326.
22. Pagliara, S. and C. Viti. 1993. Comments on 'Rainfall intensity-duration-frequency formula for India' by U.C. Kothyari and R.J. Garde. J. Hydraul. Eng. ASCE 119(8):962-966.
23. Tomlinson, A.I. 1980. The Frequency of High Intensity Rainfalls in New Zealand. Part 1. Water and Soil Technical Publication NO. 19, National Water and Soil Coservation, Wellington, New Zealand.