مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هشتم، شماره بیست و دوم، زمستان ۱۳۹۸
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۳
تاریخ بازنگری اولیه مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴
صفحات: ۷۴ - ۵۹

پیش‌بینی بارش‌های سنگین غرب کشور بر اساس برآوردهای رادار هواشناسی با استفاده از روش Z-R

فرشاد صفرپور[۱]، جواد خوشحال دستجردی[۲*]، سید ابوالفضل مسعودیان[۳]

چکیده

میزان بارش اندازه‌گیری شده توسط رادار با میزان بارش دریافت شده در سطح زمین تفاوت دارد. این اختلاف علل متعددی دارد که برخی از آن‌ها به ماهیت رادار و برخی دیگر به شرایط آب و هوایی هر منطقه مربوط می‌شود. در نتیجه برای تعیین میزان بارش‌های دریافتی در سطح زمین از داده‌های حاصل از رادار، باید داده‌های رادار را بر اساس داده‌های زمینی تصحیح کرد. پیوند میان بارش و بازتابندگی رادار نمایی است از $Z = aR^b$. اگر مقادیر ضرایب این مدل درست انتخاب نشوند برآورد مقدار بارش توسط رادار با اشتباه همراه می‌شود. اندازه و توزیع چکه‌های بارش اثر زیادی بر مقادیر ضرایب این مدل دارد. دامنه‌ی وردش در ضرایب این مدل بسیار زیاد است. دراین پژوهش از داده‌های رادار کرمانشاه به عنوان نماینده غرب کشور استفاده شد. ایتدا بارش‌های ۱۲ تا ۱۳ آذر سال ۱۳۹۵ و ۲۲ تا ۲۴ بهمن سال ۱۳۹۶ ایستگاه‌های کرمانشاه، سرپل ذهاب، قصرشیرین، اسلام‌آباد، کنگاور، روانسر، سنقر، گیلان‌غرب، جوانرود، هرسین، سومار و تازه‌آباد که در محدوده‌ی ۳۰ تا ۱۰۰ کیلومتری رادار کرمانشاه جا گرفته‌اند، بررسی شد. در بارش اول برای هریک از نقاط مورد مطالعه، زاویه‌ی ارتفاع بهینه‌ی پرتو انتخاب و رابطه‌ی مربوط به آن نقطه استخراج و ضرایب تصحیح بدست آمد. با استفاده از این رابطه مقدار بارش برآوردی رادار از ۳۵ درصد به ۹۷ درصد افزایش یافت و میانگین مجموع بارش برآورد شده رادار از ۹/۲ به ۳۰/۱ میلی-متر رسید که از میانگین واقعی فقط ۴ میلی‌متر کم‌تر است. در بارش دوم، با استفاده از داده‌های بارش تمام نقاط مورد مطالعه، فقط یک معادله استخراج شد و ضرایب تصحیح رادار به دست آمد. نتایج برآورد بارش رادار به این روش نیز با تقریب خوبی مورد قبول بود و میانگین مجموع بارش برآورد رادار از ۱۱/۳ به ۲۹/۵ میلی‌متر افزایش یافت که ۶ میلی‌متر از مقدار واقعی کم‌تر بود. اگر ضرایب رادار برای مناطق مختلف به درستی تصحیح شوند، می‌توان بارش‌ها را پیش‌بینی و از وقوع حوادث غیرمترقبه جلوگیری کرد.

واژگان کلیدی: رادار هواشناسی، برآورد بارش، کالیبره کردن، غرب ایران.

[۱]- دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان farshadclima2008@gmail.com
[۲]- دانشیار، آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان(نویسنده مسئول) j.khoshhal@geo.ui.ac.ir
[۳]- استاد، آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان porcista@yahoo.com

مقدمه

برآورد الگوهای (مدلسازی) رفتار بارش، از بنیادهای اصلی در تحقیقات مکانی اقلیمی محسوب می‌شود (قالهری فلاح و کدخدا، ۱۳۹۵). بارش‌های غرب کشور همانند سایر مناطق کوهستانی عمدتا کوه‌بارشی (اوروگرافیک) و رگباری می‌باشد. پیش‌بینی بارش‌های رگباری از لحاظ شدت، مقدار و تداوم به روش‌های معمول، اغلب به طور دقیق میسر نبوده و به پیش‌بین‌های بسیار خبره و آشنا به شرایط محلی نیاز دارد. این امر منجر به سیلاب‌های شدید، مخرب و گاهی فاجعه‌بار در این مناطق می‌گردد. امروزه رادارهای هواشناسی می‌توانند به عنوان ابزاری بسیار ارزشمند برای پیش‌بینی بارش‌های رگباری در اختیار متخصصان پیش‌بینی قرار گیرند، به شرطی که با شرایط محلی سنجه‌سازی گشته و در طی زمان و با تغییرات آب و هوایی واسنجی شوند. هدف تحقیق حاضر نیز سنجه‌سازی رادار هواشناسی کرمانشاه با شرایط استان مذکور است تا متخصصان پیش‌بینی با به کار گیری این رادار بتوانند ویژگی‌های بارش را قبل از وقوع آن پیش‌بینی کرده، هشدارهای لازم را به مردم و مسئولان داده و از خسارات به مساکن، ابنیه‌های تاریخی، تاسیسات شهری و روستایی، مزارع، انسان و حیوانات تا حد ممکن جلوگیری نمایند.

پیش‌بینی بارش‌ها به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از پیش‌بینی همدید، پیش‌بینی ترمودینامیک، پیش‌بینی ماهواره‌ای و پیش‌بینی راداری. در سه روش نخست، اولاً مقدار، زمان و مکان دقیق بارش امکان‌پذیر نیست و دوماً فواصل زمانی بین دیده‌بانی‌ها حداقل ۶ و یا ۱۲ ساعت خواهد بود. اصلی‌ترین علت پایین بودن دقت پیش‌بینی مقدار و مکان بارش نیز به چیدمان و فواصل زیاد ایستگاه‌های زمینی و قدرت تفکیک پایین آن‌ها مربوط می‌شود که در اثر آن بسیاری از سرزمین‌های واقع در بین جایگاه‌ها قابل رویت نبوده و در نظر گرفته نخواهد شد؛ اما در پیش‌بینی راداری محل دقیق و میزان بارش نقاط کم‌مساحت هم تا حدود زیادی امکان‌پذیر است. زیرا قدرت تفکیک رادار بالا بوده و نیز به علت نفوذ پرتوهای آن در درون ابرها و اندازه‌گیری مقدار رطوبت در داخل طبقات آن‌ها، رادار به سرعت و با دقت بالا می‌تواند محل و میزان بارش‌های ناشی از ابرهای مختلف را برآورد و محاسبه کند.

میزان بارش اندازه‌گیری‌شده توسط رادار با میزان بارش دریافت شده در سطح زمین تفاوت دارد. این اختلاف علل متعددی دارد که برخی از آن‌ها به ماهیت رادار و برخی دیگر به شرایط آب‌وهوایی هر منطقه و ویژگی‌های سطح زمین مربوط می‌شود (چرستدوالو و میشل[1]، ۲۰۰۴). امروزه رادارهای هواشناسی برای اندازه‌گیری شدت بارش در مناطق نسبتاً وسیع و با درجه‌ی تفکیک مکانی و زمانی مناسب بکار می‌روند. معادله‌ی رادار هواشناسی پیوند بین توان دریافتی توسط رادار و ویژگی‌ها و فاصله‌ی هدف تا رادار را بیان می‌کند. با استفاده از معادله زیر می‌توان مقادیر چکه‌های بارش را محاسبه کرد:

$$\overline{P_r} = C\frac{|K|^2}{r^2}Z \qquad (۱)$$

1- Christodoulous and Michael

$\overline{P_r}$ میانگین پژواک (بر حسب وات) دریافتی از چکّه باران‌هایی که در فاصله‌ی r کیلومتری رادار هستند، C ثابت رادار، $|K|^2$ ضریبی که به ثابت دی‌الکتریک آب ($0.93 \approx$) وابسته می‌باشد و Z ضریب بازتابندگی رادار برحسب میلی-متر بر مترمکعب است. مقدار C، وابسته به مشخصات فنی رادار و $|K|^2$ و Z وابسته به ویژگی‌های بارش هستند(یوجلنهوت[1]، ۲۰۰۱). با ثابت در نظر گرفتن $|K|^2$ آب رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$P_r = c\frac{Z_e}{r^2} \qquad (۲)$$

Z_e ضریب بازتابندگی رادار است که به تعداد و اندازه چکه‌های بارش بستگی دارد (لی و زاداوسکی[2]، ۲۰۰۵).

آزمایش‌هایی که در طول موج ۱۰ سانتی‌متری رادار انجام شد، نشان داد که توان بدست آمده از بازتابش چکه‌های بارش با ضریب بازتابندگی رادار، با توان ششم قطر چکه‌های بارش متناسب است و این تناسب در برآورد شدت بارش تا فاصله ۱۰۰ کیلومتری رادار مفید است (مارشال و آلبرتو[3]، ۲۰۰۲). این تناسب بر چندین فرض استوار است: ۱- واسنجی رادار عالی انجام شده باشد، ۲- پخش از رابطه ریلی پیروی کند، ۳- پرتو رادار دستخوش تضعیف نشود، ۴- مانعی در برابر پرتوهای راداری نباشد و ۵- انتشار پرتوها دستخوش ناهنجاری نشود (باتان[4]، ۱۹۷۳).

در رابطه با برآورد بارش توسط رادار و صحت‌سنجی داده‌های رادار در ایران و جهان پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. پژوهش محمدیها، معماریان و ریحانی‌پروری (۱۳۹۲) در واسنجی برآورد بارش رادار هواشناسی تهران نشان داد که مقادیر برآورد بارش رادار از مقادیر بارش باران‌سنج‌ها کم‌تر است. که این ناسازگاری میان رادار و باران‌سنج‌ها در اوج شدت بارش بیش‌تر است. نتایج این پژوهش نشان داد که با تصحیح ضرایب رادار در هر نقطه و درهر فصل، برآورد بارش رادار به مقدار درست نزدیک‌تر می‌شود.

مکوندی (۱۳۸۹)، به منظور ارزیابی دقت تخمین بارندگی رادار، داده‌های رادار هواشناسی تبریز را واسنجی کرد. نتایج تحقیق نشان داد که ضرایب پیش‌فرض رادار برای پیش‌بینی بارش مناسب نیست. وی برای برآورد بهتر بارش، مقدار a و b را به ترتیب ۱۸/۶ و ۱/۱۹ برای رادار تبریز پیشنهاد کرد.

همچنین طوفانی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۷)، توانایی سیستم راداری باند x در تخمین بارندگی در یک منطقه شهری در کشور هلند را مورد بررسی قرار دادند. برای این کار ابتدا داده های راداری از خطاهای ناشی از کلاتر زمین و تضعیف سیگنال تصحیح شده و سپس شدت بارندگی از روی داده‌های اصلاح شده را محاسبه کردند و در نهایت نتایج حاصله با میزان شدت بارندگی ثبت شده توسط ۴ باران‌سنج موجود در منطقه مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که روند سری زمانی نتایج راداری مطابق روند سری زمانی داده‌های ثبت شده توسط بارانسنج‌ها می باشد، اما اندازه-گیری‌های انجام شده توسط رادار نیاز به اصلاح و واسنجی دارد.

1 - Uijlenhoet
2 - Lee and Zawadzki
3 - Michela and Alberto
4 - Battan

آمیتای و همکاران[1] (۲۰۰۲) برای واکاوی ناتوانی رادار هواشناسی در برآورد بارش در کشور کره جنوبی، داده‌های نخست رادار و داده‌های تصحیح شده رادار و داده‌های بدست‌آمده به روش کریجینگ را در مدل‌های آب‌شناسی آزمایش کردند و به این دست‌آورد رسیدند که داده‌های تصحیح شده رادار به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. اوریم و هالمن[2] (۲۰۰۸) داده‌های برآورد شده رادار برای یک دوره ۱۰ ساله و در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲و ۲۴ ساعته و با درجه تفکیک ۲,۴ کیلومتر مربع در هلند را واکاوی کردند. همچنین اوریم و بیشاند[3] (۲۰۰۹) به کمک رادار هواشناسی، بارش‌های سنگین هلند را در یک دوره ۱۱ ساله واکاوی کردند و منحنی شدت-مدت- فراوانی را برای بازه زمانی ۱۵ دقیقه تا ۲۴ ساعته خطایابی کردند.

مایکلا و همکاران[4] (۲۰۰۸) در واکاوی داده‌های راداری و داده‌های زمینی در ایتالیا نتیجه گرفتند که تراکم بسیار خوب یک شبکه‌ی باران‌سنج هم نمی‌تواند به خوبی رادار جزئیات بارش‌های همرفتی را نشان دهد. اسمیت و کراجوسکی[5] (۲۰۰۲) دامنه وردش a از چند ده تا چند صد و دامنه وردش b بین ۱ تا ۳ در نظر گرفته‌اند. مارشال و گان[6] (۱۹۵۵) پیوند نزدیکی برای مقادیر بارش بین ۱ تا ۵۰ میلی‌متر بر ساعت را برای رابطه $Z - R$ بیان کرده و باور دارند استفاده از این رابطه برای انواع بارش‌های مختلف مفید است.

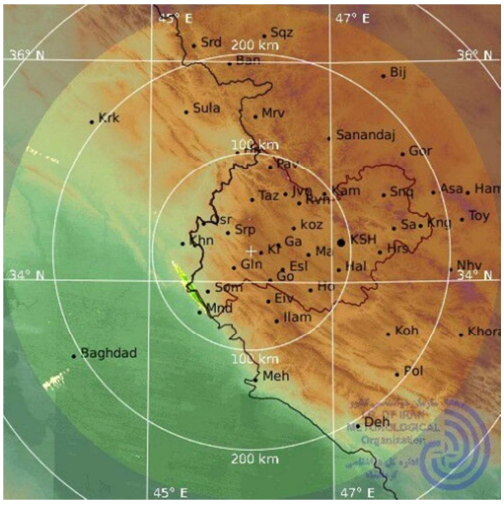
با در نظر گرفتن نتایج پژوهش‌های فوق این پژوهش قصد دارد ضرایب رادار کرمانشاه که بطور پیش‌فرض a=200 و b=1.6 است را تصحیح نماید تا مقدار برآورد بارش به مقدار دقیق‌تر نزدیک شود. با توجه به آن‌چه گفته شد، مسئله اصلی این پژوهش عبارت خواهد بود از این‌که در غرب کشور چه رابطه و یا روابطی بین بارش‌های اندازه‌گیری شده توسط رادار و بارش‌های اندازه‌گیری شده توسط باران‌سنج‌های زمینی وجود دارد تا بتوان با اعمال این رابطه و یا روابط بر روی داده‌های ناشی از رادار، به سرعت بارش‌هایی را که بر روی زمین فرو خواهد ریخت را برآورد نمود.

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش برای تصحیح ضرایب، از داده‌های باران سنج‌هایی که در محدوده‌ی فاصله‌ی افقی بین ۳۰ تا ۱۰۰ کیلومتری رادار کرمانشاه قرار دارند، استفاده شد. پس ازکنترل کیفی و کمّی بارش‌ها، داده‌های بارشی ۱۰ ایستگاه (کرمانشاه، سرپل‌ذهاب، قصرشیرین، اسلام‌آباد، کنگاور، روانسر، سنقر، گیلان‌غرب، هرسین و تازه‌آباد) که موقعیت و فاصله‌ی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است، انتخاب شد و دیگر ایستگاه‌ها به دلیل نبود پیوستگی آماری و نبود دقت باران‌سنج و مسدود شدن پرتو رادار و .... برای این پژوهش مناسب نبودند. برای این کار ابتدا در نرم‌افزار متلب یک شبکه مختصات جغرافیایی که در محدوده رادار کرمانشاه بود، ایجاد شد که هر پیکسل آن یک کیلومتر مربع بود. بنابراین یک ماتریس ۸۰۰*۸۰۰ برای داده‌های رادار ایجاد شد. دو رخداد بارشی بازه زمانی ۱۲ تا ۱۳ آذر سال ۱۳۹۵

1 - Amitai et al
2 - Overeem and Holleman
3 - Overeem and Buishand
4 - Michela et al
5 - Smith and Krajewski
6 - Marshall and Gunn

و ۲۲ تا ۲۴ بهمن سال ۱۳۹۶ که دارای گستره‌ی افقی بیش‌تر و همچنین شدت و مقدار خوبی بودند برای این پژوهش برگزیده شدند. تمامی ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه دارای داده‌های بارشی ۱۰ دقیقه‌ای بودند. داده‌های رادار کرمانشاه در بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای بود. به کمک نرم‌افزار Rainbow (نرم‌افزاری برای تبدیل داده‌های خام رادار به نگاره و فراورده‌های راداری است و در حال حاضر فقط سازمان هواشناسی کشور از آن بهره می‌برد). نخست مقدار بازتابندگی رادار در زمان‌های مشخصی که بارش رخ داده بود یادداشت کرده و با مقدار بارش بدست آمده از باران-سنج مطابقت شد. پس از بدست آوردن مقادیر تازه ضرایب رادار، به کمک نرم‌افزار، نخست شدت بارش سطحی و سپس مجموع بارش یک ساعته آن بدست آمد. از آنجا که مقادیر و شدت بارش رادار بر حسب میلی‌متر بر ساعت است، مقادیر بارش باران‌سنج‌ها نیز به میلی‌متر بر ساعت تبدیل شد. برای برگزیدن ضرایب a و b و واسنجی رادار، داده‌های بارشی باران‌سنج و مقدار بازتابندگی Z، مورد نیاز است که از باران‌سنج‌های زمینی و رادار به دست آمد.



شکل ۱: موقعیت و محدوده جغرافیایی مورد مطالعه

رابطه $Z-R$

شدت بارش از رابطه(۴) بدست می‌آید که در آن V(D) تابع تندی حدی فروافتادن چکه‌های باران در هوای آرام بر حسب متر بر ثانیه و D قطر معادل چکه‌های باران بر حسب میلی‌متر است. ساده‌ترین و رایج‌ترین شکل این تابع، رابطه‌ی توانی (۵) است (لی و زاداوزکی، ۲۰۰۵).

$$R = 6\pi \times 10^{-4} \int_{D_{min}}^{D_{max}} V_D D^3 N_D \, dD \qquad (۳)$$

$$V(D) = CD^{\gamma} \qquad (۴)$$

بجز ذرات با قطر کوچک، دیدبانی‌های تجربی را می‌توان با رابطه عمومی (۶) برازش کرد که در آن D قطر چکه‌ها و N_D تعداد چکه‌ها که قطر آنها بین D و $D+dD$ در واحد حجم است و N_0 تعداد چکه‌های بارش برای قطر مساوی ۰٫۸ میلی‌متر است.

$N_{\mathrm{D}} = \mathrm{N}_0 \mathrm{e}^{-\Lambda \mathrm{D}}$ برای هر شدت بارش مقدار Λ از رابطه(۷) و برحسب میلی‌متر بر ساعت بدست می‌آید.و R شدت بارش بر حسب میلی‌متر بر ساعت است (زاوادسکی[1]، ۱۹۸۸).

$$\Lambda = 41R^{-0.21} \quad (۵)$$

یکی از اولین گزارش‌های اندازه‌گیری بارش توسط رادار، گزارش مارشال در سال ۱۹۴۷ بود. که رابطه تجربی را بر پایه پیوند بین فاکتور بازتابندگی Z و مقدار بارش R بصورت رابطه نمایی $Z = aR^b$ پیشنهاد کرد. a و ضرایبی هستند که ممکن است از یک فصل به فصل دیگر متفاوت باشند (جدول ۱) (یوجلنهوت[2]، ۱۹۹۹).

جدول ۱: ضرایب α و β در رابطه $Z = \alpha R^{\beta}$ بدست آمده از واکاوی رابطه‌یی بارش رادار و مقادیر N_0 و μ ضرایب اشعه گاما توزیع چکه-های بارش و مقادیر مطابقت داده‌شده ضرایب ε و δ در رابطه $\mathrm{D}_0 - R$ از رابطه $\mathrm{D}_0 = \varepsilon R^{\delta}$ و تعیین ارتباط بین شدت بارش R و قطر چکه‌های بارش D *(یولبریچ[3]، ۱۹۸۳)*

منبع		δ	ε	N_0	μ	β	α
Wexler 1948	**بارش‌های کوهستانی**	0.23	0.08	4.27×10^4	-0.27	1.53	208
Ramana.M and Gupta 1959		0.28	0.055	9.82×10^3	-1.03	1.64	109
Blanchard 1953		0.31	0.031	1.59×10^4	-1.39	1.71	31
Jones 1956	**بارش با طوفان رعد وبرق**	0.16	0.13	2.05×10^5	1.63	1.37	486
Blanchard 1953		0.18	0.101	1.24×10^6	1.01	1.41	290
Savaramakrishnan 1961		0.18	0.09	2.46×10^4	1.01	1.41	219
Fujiwara 1965		0.2	0.118	7.05×10^4	0.4	1.46	450
Jones 1956	**بارش گسترده و فراگیر**	0.11	0.114	6.4×10^{10}	4.65	1.25	313
Atlas and Chmela 1957		0.18	0.11	7.53×10^5	1.01	1.41	255
Fujiwara 1965		0.21	0.082	1.96×10^5	.18	1.48	205
Marshall and palmer 1948		0.26	0.077	7.24×10^4	-0.79	1.6	220
Jones 1956	**رگبارها**	0.1	0.129	9.2×10^{10}	5.04	1.34	380
Fujiwara 1965		0.16	0.106	7.54×10^6	1.63	1.37	300
Imai 1960		0.22	0.081	1.09×10^5	-0.01	1.5	200
Muchnik		0.3	0.69	1.31×10^3	-1.34	1.7	204
Foote 1966		0.35	0.095	9.13×10^1	-1.79	1.81	520
Higgs 1952		0.8	0.013	1.29×10^0	-3.42	2.87	126

برآورد نادرست بارش رادار مربوط به توزیع اندازه چکه‌های بارش است که بسیار متغیر است و همچنین به انتخاب نادرست رابطه Z-R بستگی دارد و دلایلی مانند واسنجی سخت افزار، پدیده‌های هواشناسی، جداسازی پرتوها، زمان-بندی درست و .... در برآورد نادرست بارش رادار تاثیر گذار هستند (زاوادوسکی، ۱۹۸۴). برای اعتبار بخشیدن و بهینه کردن برآورد مقدار بارش با داده‌های رادار، فاصله کمتر از رادار مهم است. ارزیابی اندازه‌گیری مقدار بارش درفاصله-های دورتر از رادار، باید مورد مطالعه‌ی بیش‌تری قرار گیرد(رایزکوف و چور[4]، ۲۰۰۳). پژوهش‌های زیادی برای درک اثرات خصوصیات فیزیکی مراحل توزیع اندازه چکه‌های بارش و تاثیر آن بر رابطه‌ی Z-R توسط محققین صورت

1 - Zawadzki
2 - Uijlenhoet
3 - Ulbrich
4 - Ryzhkov and Schuur

گرفته تا داده‌های مشکوک رادار کم‌تر شود و مقدار برآورد بارش رادار به مقدار واقعی نزدیک‌تر شود (یوجلنهوت، ۲۰۰۱).

واکاوی نقش تاخیر زمانی در برآورد بارش رادار با رابطه Z-R برای بازتابش کم، متوسط و زیاد نشان داد که بیش-ترین اختلاف بارش اندازه‌گیری شده برای چکه‌ی بارش با قطر یک میلی‌متر و در ارتفاع ۱۰۷۶ متری و برای بازتابش کم، ۱۰ درصد است واختلاف برآورد بارش برای بازتابش متوسط بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است و برای بازتابش زیاد حدود ۶ درصد است. اندازه‌گیری‌های انجام شده بین داده‌های باران‌سنج و رادار باند S, K برای واکاوی نقش زمان و ارتفاع در برآورد بارش نشان داد که مقدار اختلاف بازتابندگی تا ارتفاع ۵۰۰ متری، 1 dB است و با افزایش ارتفاع این اختلاف بیشتر می‌شود. باد و توزیع اندازه چکه‌های بارش، اختلاف بازتابندگی را بیش‌ترمی‌کنند. با توجه به تغییرات زیاد ضرایب a , b در رابطه Z-R، در ۹۵٪ موارد مشاهده شده است که این ضرایب از یک توفان به توفان دیگر فرق می‌کند. توزیع اندازه چکه‌های بارش در ارتفاع مختلف با هم اختلاف دارد و استفاده از یک رابطه Z-R برای برآورد بارش، مقدار خطا را بیش‌تر می‌کند (توکای و همکاران[1]، ۲۰۰۸).

نتایج و بحث

الف) بارش ۱۲ و ۱۳ آذر ماه ۱۳۹۵:

به منظور برگزیدن پیوند بین بازتابندگی رادار و شدت بارش در این بازه‌ی زمانی برای تمامی ایستگاه‌های این پژوهش، زاویه‌های مختلف پرتو ارسالی رادار اندازه‌گیری شد و مقدار بازتابندگی بدست آمد. بازتابندگی رادار برای زاویه‌های پرتو رادار با مقادیر ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴، ۰,۵، ۰,۶، ۰,۸، ۱,۱ درجه و همچنین پرتو ارتفاع ثابت ۰,۲ و ۰,۵ کیلومتر رادار برای ۱۲ ایستگاه بدست آمد. و مقدار بارش باران‌سنج در همان بازه زمانی نیز بدست آمد. و سپس در سیستم دستگاه مختصات، معادله خط و ضریب R^2، بازتابندگی با مقدار بارش ایستگاه‌های زمینی بدست آمد. بنابراین برای هر ایستگاه، ۹ معادله خط و ۹ جفت ضرایب مختلف بدست آمد. با استفاده از ضرایب بدست آمده، شدت و مجموع بارش رادار برآورد شد. نتایج بدست برای هر یک از ایستگاه‌ها متفاوت بود. با توجه به مقادیر بارش برآورد شده رادار و جایگاه و دوری ایستگاه‌ها از مرکز رادار، برای هر ایستگاه، زاویه پرتو بهینه به گونه‌ای انتخاب شد که بهترین برآورد بارش، بیش‌ترین همبستگی و کم‌ترین مقدار مربعات خطا را داشته باشد (جدول ۲).

1 -Tokay et al

جدول ۲: معادله خط و ضرایب a , b و برگزیدن رابطه Z-R رادار برای بارش ۱۲ تا ۱۳ آذر ۱۳۹۵

ایستگاه	معادله خط	مقدار R2	مشاهدات	مقدارa	مقدارb	رابطه Z-R
کرمانشاه	Y=1.2379 X + 1.516	R2=0.7407	18	32	1.22	Z=32×R1.22
سرپل	Y=1.0549 X + 1.2955	R2=0.9295	25	23	1.16	Z=23×R1.16
قصرشیرین	Y=1.271 X + 1.4922	R2=0.8484	27	30	1.17	Z=30×R1.17
اسلام آباد	Y=1.271 X + 1.4922	R2=0.8484	24	31	1.27	Z=31×R1.27
کنگاور	Y=1.1166 X +1.5768	R2=0.7873	155	38	1.12	Z=38×R1.12
روانسر	Y=1.048 X + 1.7183	R2=0.8782	11	52	1.05	Z=52×R1.05
سنقر	Y= 1.175 X + 1.7639	R2=0.9172	11	58	1.18	Z=58×R1.18
گیلانغرب	Y=1.0458 X + 1.2955	R2=0.8372	18	34	1.17	Z=33×R1.24
هرسین	Y=1.1249 X + 1.3552	R2=0.8324	23	24	1.21	Z=38×R1.17
تازه آباد	Y=1.1541 X + 1.3235	R2=0.8654	16	13	1.16	Z=36×R1.08

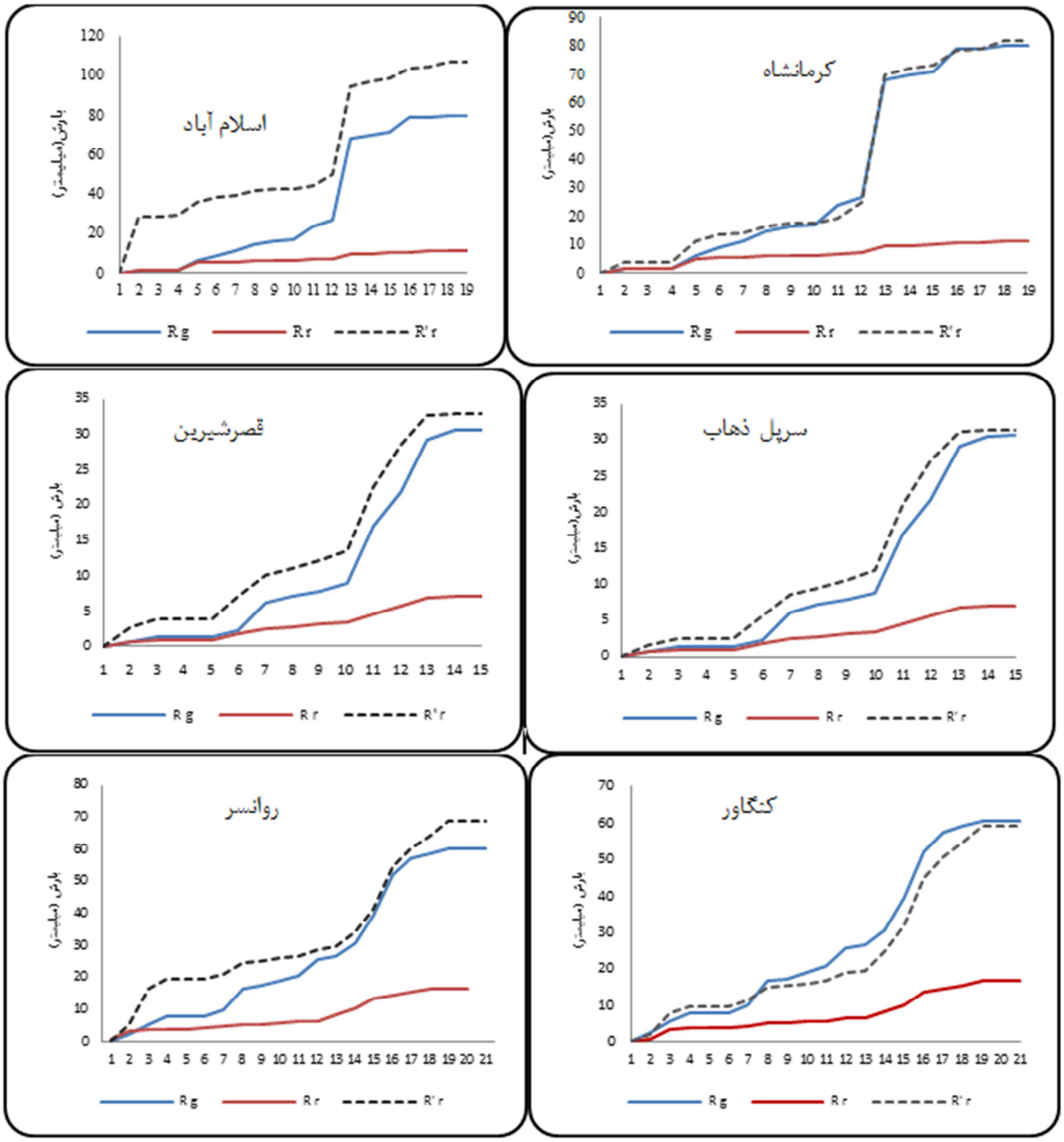
پس از انتخاب بهترین ضرایب تصحیح شده a,b و با جایگزینی مقادیر این ضرایب در معادله رادار و به کمک نرم‌افزار، نخست شدت بارش و سپس مجموع بارش ساعتی برای تمامی ایستگاه‌ها برآورد شد و نمودار بارش تجمعی آنها ترسیم شد. نمودار مقایسه‌ای مجموع بارش ساعتی رادار قبل از تصحیح ضرایب (R_r) و بعد از تصحیح ضرایب و واسنجی رادار ($\acute{R}_r$) و مجموع بارش باران سنج(R_g)، در نگاره‌های شماره ۳ و ۷ به نمایش گذاشته شده است.

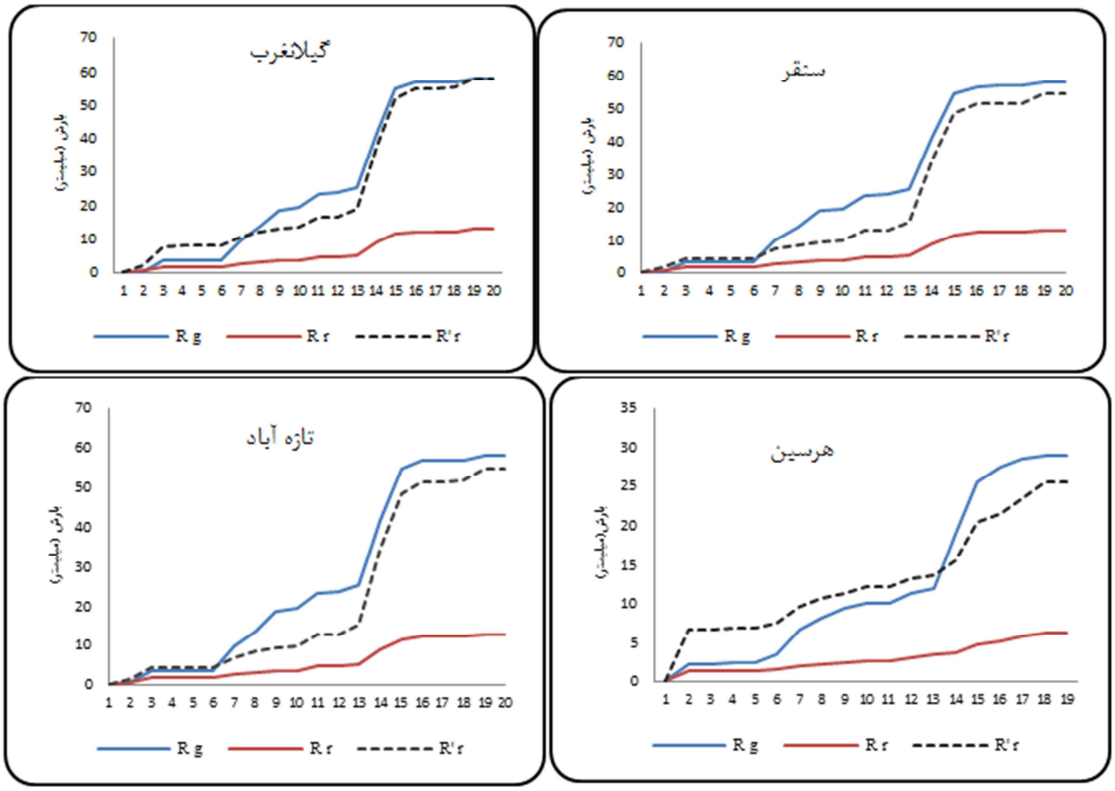
با تصحیح ضرایب a , b رادار و برآورد مجدد مجموع بارش ساعتی دیده شد که مقدار و شیوه وردش بارش در حد پذیرفتنی به واقعیت نزدیک می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳: مقدار بارش برآورد شده رادار قبل و بعد از تصحیح ضرایب و بارش باران‌سنج مربوط به بارش ۱۲ تا ۱۳ آذر ۱۳۹۵

ایستگاه	بارش باران-سنج (میلی-متر)	بارش برآوردرادار قبل از تصحیح ضرایب (میلی-متر)	بارش برآورد رادار بعد از تصحیح ضرایب (میلی‌متر)	بارش برآوردرادار قبل از تصحیح (درصد)	بارش برآورد رادار بعد از تصحیح ضرایب (درصد)
کرمانشاه	۲۷,۹	۷,۲	۲۶,۵	٪۲۱	٪۱۲۲
سرپل	۳۰,۹	۱۰,۴	۲۷,۶	٪۱۴	٪۱۳۳
قصرشیرین	۶۰,۴	۱۶,۵	۵۵	٪۲۷	٪۱۱۴
اسلام آباد	۴۷,۸	۱۲,۸	۴۶,۹	٪۲۲	٪۱۰۰
کنگاور	۳۰,۷	۷,۱	۲۹,۹	٪۲۳	٪۱۰۷
روانسر	۴۳,۳	۹,۸	۳۹,۸	٪۲۶	٪۱۱۶
سنقر	۱۹,۵	۶,۱	۱۸	٪۳۲	٪۹۲
گیلانغرب	۳۲,۲	۱۰,۳	۳۳,۱	٪۲۵	٪۱۱۲
هرسین	۲۹,۶	۶,۴	۳۰,۳	٪۲۳	٪۱۰۵
تازه آباد	۵۴,۳	۱۹,۶	۵۱,۹	٪۱۹	٪۱۱۴

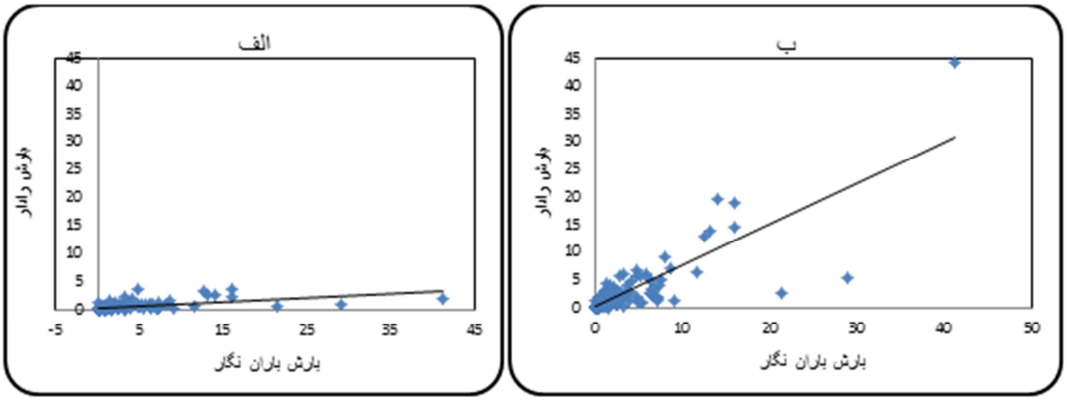
مقادیر برآورد شده بارش که پس از تصحیح دوباره ضرایب رادار برای ساعات نخست بارش بدست آمد در اغلب ایستگاه‌ها روند و مجموع بارش منطقی‌تری را نشان داد (شکل ۳). که این دیدگاه را تقویت می‌کند که توزیع اندازه چکه‌ها بارش نه تنها درفصول مختلف و بارش‌های مختلف با هم فرق دارد بلکه در داخل یک بارش هم می‌تواند متفاوت باشد.





شکل ۲: بارش تجمعی ایستگاه‌ها. R_r بارش برآورد رادار قبل از تحصیح ضرایب، $\acute{R}_r$ بارش برآورد رادار بعد از تصحیح ضرایب و R_g بارش باران‌سنج

مجموع بارش کلی که رادار کرمانشاه (قبل از واسنجی) برآورد می‌کند از مقدار واقعی بارش بسیار کم‌تر است و این ناسازگاری در مواردی که مقدار مجموع و شدت بارش زیاد است، چشم‌گیر است. در این پژوهش با تصحیح ضرایب رادار این ناسازگاری به میزان قابل توجه‌ای کاهش یافته است. در چهار ایستگاه کرمانشاه، اسلام آباد، قصرشیرین و سرپل مقدار برآورد بارش رادار بیش‌تر از ۹۰ درصد مقدار واقعی بود و در سایر ایستگاه‌ها مقدار برآورد بارش رادار، تنها چند درصد بیش‌تر از مقدار واقعی بود. که با توجه به گستره منطقه‌ای که رادار فرآیند اندازه‌گیری بارش را در هر اسکن انجام می‌دهد و مقایسه آن با مقادیر برآورد بارش قبل از تصحیح، این ناسازگاری قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه می‌توان مقادیر برآورد بارش رادار کرمانشاه را پس از واسنجی، در حد قابل قبول درنظر گرفت. بطور میانگین با تصحیح ضرایب رادار، مقدار برآورد بارش رادار از ۲۴ درصد به ۹۶ درصد مقدار واقعی افزایش یافت. و میانگین مجموع بارش از ۱۱،۸ میلی‌متر به ۳۵،۴ میلی‌متر رسید که از مقدار میانگین واقعی بارش ۶ میلی‌متر کمتر بود (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار پراکنش مقایسه بارش باران سنج ومقدار برآورد رادار الف) قبل از واسنجی ب) بعد از واسنجی

ب) بارش ۲۲ تا ۲۴ بهمن ماه ۹۶:

در این بخش از پژوهش بارش روز ۲۲ تا ۲۴ بهمن ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از داده‌های بارش زمینی تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه و مقدار فاکتور بازتابندگی رادار Z، یک معادله کلی برای رادار بدست آمد (نگاره ۵). چون برای محاسبه معادله خط و ضرایب تصحیح رادار از داده‌های بارش ایستگاه‌های مختلف استفاده شد، برای گزینش استقلال داده‌ها، آزمون دوربین-واتسون در سطح معنی داری ۹۵ درصد، بین داده‌های بازتابندگی و بارش انجام گرفت و استقلال داده‌ها تایید شد (جدول ۴).

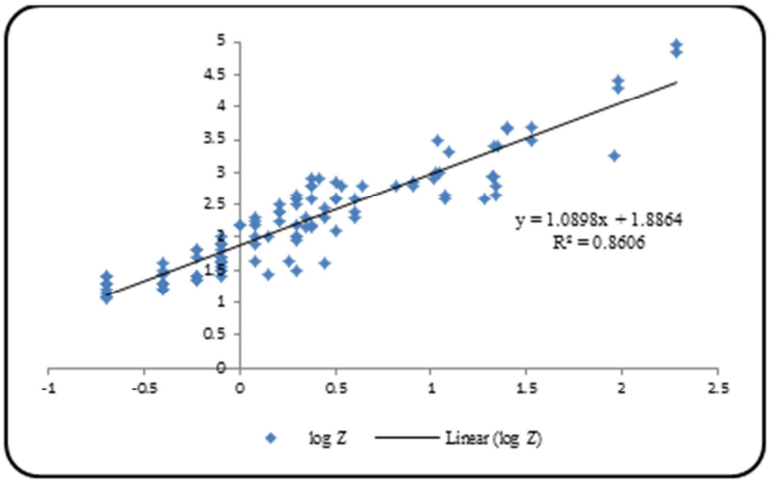
جدول ۴: آزمون آماری دروبین-واتسون برای گزینش استقلال داده‌ها

تحلیل رگرسیون	
Multiple R	۰/۹۲۷
R Square	۰/۸۶۰
Adjusted R Square	۰/۸۵۹
Standard Error	۰/۳۰۷
Observations	۱۱۲

آزمون دروبین-واتسون	
Alpha	۰/۰۵
D-stat	۱/۴۹۸
D-lower	۱/۶۷۳
D-upper	۱/۷۰۹
sig	yes

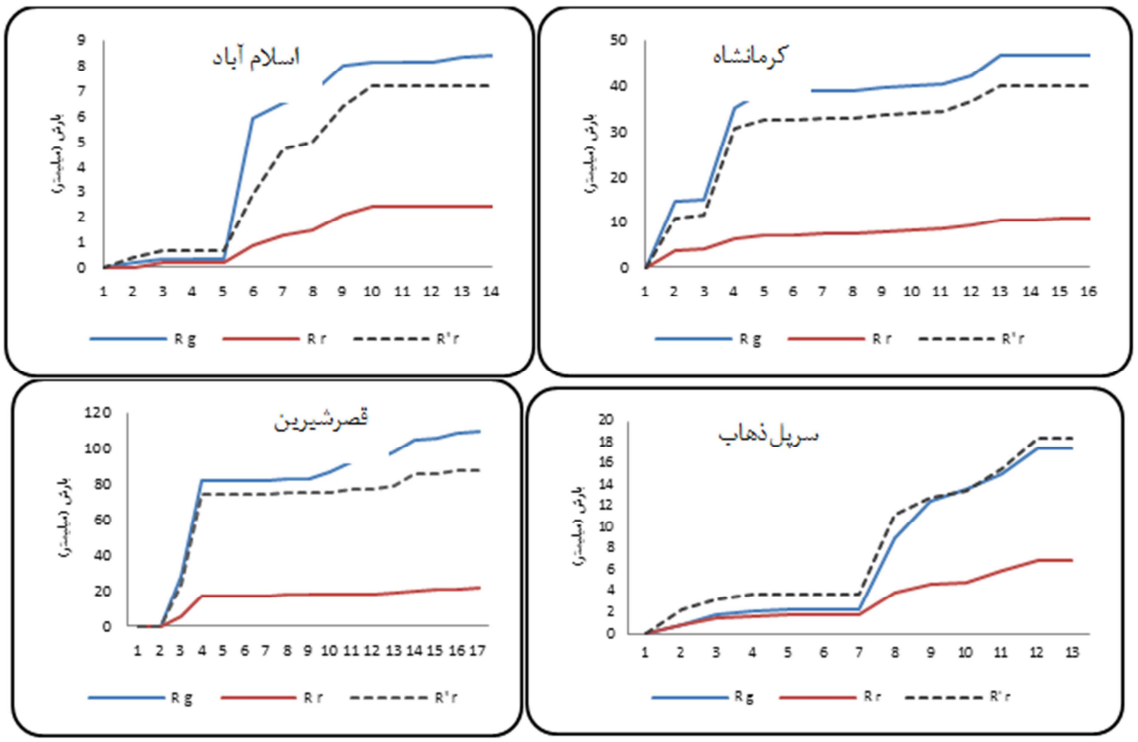
ANOVA				**Alpha**	۰/۰۵	
	df	***SS***	***MS***	***F***	***p-value***	***sig***
Regression	۱	۶۴/۱۳	۶۴/۱۳	۶۷۸/۸۸۸	۷/۱۳E-۴۹	yes
Residual	۱۱۰	۱۰/۳۹	۰/۰۹۴			
Total	۱۱۱	۷۴/۵۲				

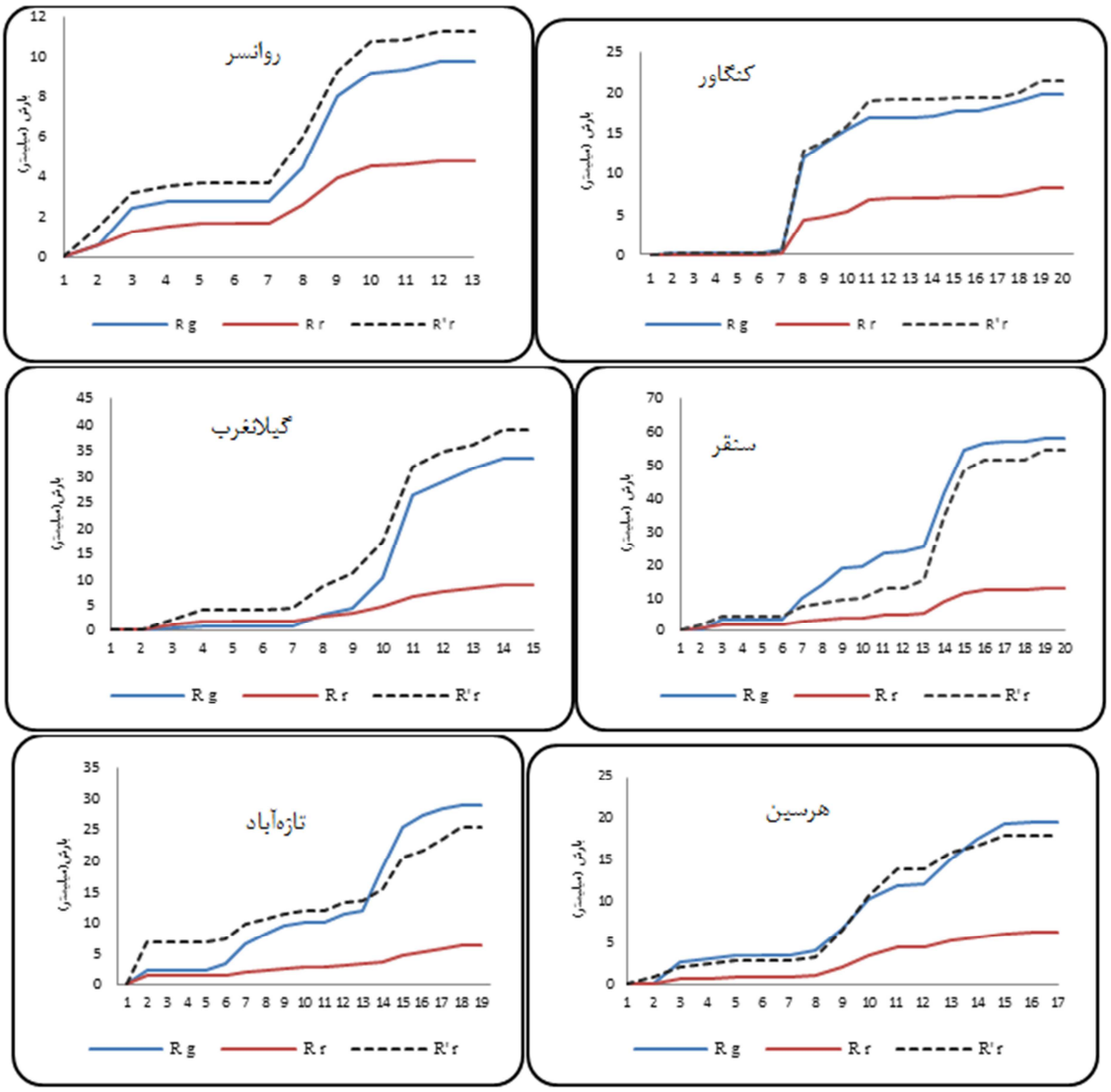
	coeff	***std err***	***t stat***	***p-value***	***lower***	***upper***
Intercept	۱/۸۸۶	۰/۰۳۲	۵۸/۸۹۲	۵/۱٤E-۸۵	۱/۸۲۲	۱/۹۴۹
0	۱/۰۸۹	۰/۰۴۱	۲۶/۰۵۵	۷/۱۳E-۴۹	۱/۰۰۶	۱/۱۷۲



شکل ۴: معادله خط و مقدار R2 مربوط به بارش ۲۲ تا ۲۴ بهمن ماه $Y = 1.0898\,X + 1.886496$ ،$a = 77$ $b = 1.09$

با جایگزینی ضرایب a , b در رابطه اصلی رادار، نخست شدت بارش استخراج و سپس مجموع بارش ساعتی برای تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه برآورد شد. نمودار بارش تجمعی و مقایسه آن با مقادیر قبل از تصحیح به تفکیک هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۵ ترسیم گردیده است.



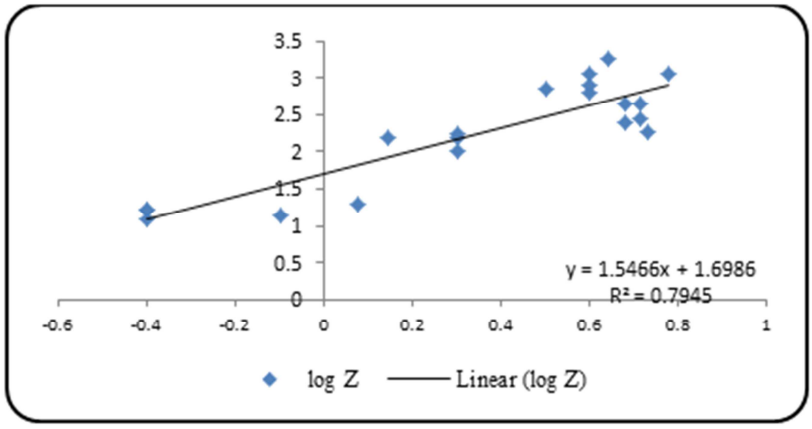


شکل ۵: بارش تجمعی ایستگاه‌ها. R_r بارش برآورد رادار قبل از تحصیح ضرایب، $\acute{R}_r$ بارش برآورد رادار بعد از تصحیح ضرایب و R_g بارش باران‌سنج

نکته مهم در برآورد بارش توسط رادار مربوط به مجموع کلی بارش است که در اغلب برنامه‌ریزی‌های کشور و بخصوص در زمینه پیش‌بینی سیل، هیدرولوژی و کشاورزی از اهمیت خاصی برخوردار است. در پیش‌بینی رخداد سیل آگاهی از شدت و اندازه بارش بسیار ضروری و مهم است.

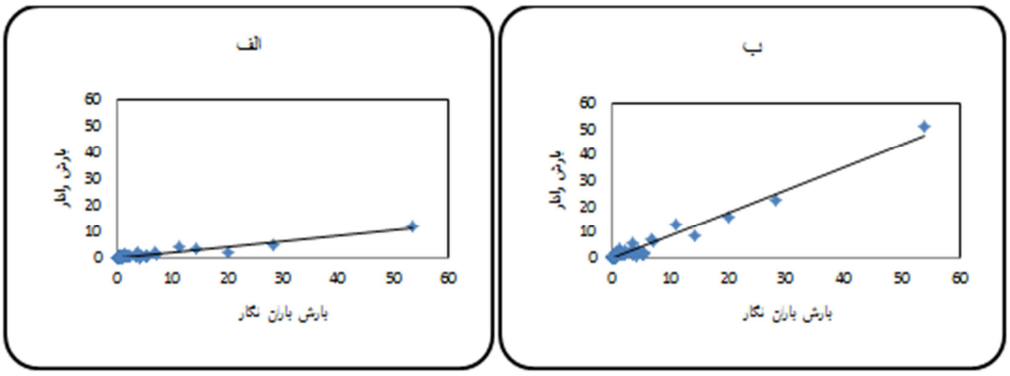
نکته‌ای که در بیشتر نمودارهای بارشی ایستگاه‌ها دیده می‌شود، این است که هرچند که روند و مجموع بارش برآورد شده پس از تصحیح ضرایب و واسنجی رادار تا حدود زیادی بهبود یافته است ولی مقادیر برآورد شده رادار در ساعات

نخستین بارش، بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط باران‌سنج بود. که موجب افزایش مجموع بارش برآورد شده در قیاس با مجموع باران‌سنج شد. چون این خطا در بیش‌تر ایستگاه‌ها دیده شد، این گمانه که ممکن است اندازه و توزیع چکه‌های بارش در گام نخست بارش با گام بعدی آن متفاوت باشد، تقویت کرد. بنابراین برای واکاوی و حل این چالش، بارش در تمامی ایستگاه‌ها به دو بخش تقسیم شد و برای بخش اول بارش که ناسازگاری بیش‌تری بین بارش برآورد رادار و باران‌سنج وجود داشت یک معادله خط مشترک و مقدار ضرایب a,b برای تمامی ایستگاه‌ها دوباره بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۶: برگزیدن معادله خط و ضرایب برای بخش اول بارش مورخ ۲۲ تا ۲۴ بهمن ماه ۹۶ a=50 و b=1.55

در شکل (۷) پراکنش داده‌های بارش برآورد شده رادار قبل و بعد از واسنجی با مقدار بارش باران‌سنج نشان داده شده است، به طوری که در این نگاره می‌توان دید دقت برآورد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.



شکل ۷: نمودار پراکنش مقایسه بارش باران سنج ومقدار برآورد رادار الف) قبل از واسنجی ب) بعد از واسنجی

به طوری که در نگاره‌های مربوط به بارش‌های مورد بررسی دیده می‌شود، مقایسه مجموع بارش ساعتی رادار در قبل و بعد ازتصحیح ضرایب و واسنجی، با مقادیر بارش باران‌سنج ایستگاه‌های مورد مطالعه، نشان می‌دهد که در بیشتر

ایستگاه‌ها داده‌های مجموع بارش برآورد شده و روند وردش بارش رادار پس از تصحیح ضرایب، هماهنگی مناسبی با داده‌های بارش باران‌سنج دارد. البته در دو ایستگاه سرپل و قصرشیرین مقدار برآورد بارش رادار با ناسازگاری بیش-تری همراه است که البته با توجه به مجموع کم بارش در این دو نقطه، این مقدار خطا در نمودار بارش تجمعی آنها نمود بیش‌تری دارد.

نتیجه‌گیری

داده‌های بارش برآورد شده رادار در دو نمونه از بارش‌های سنگین استان کرمانشاه در این پژوهش نشان داد که مقدار ضرایب تصحیح رادار برای هر بارش فرق می‌کند. همچین مقادیر ضرایب برای هر بارش با توجه به موقعیت جغرافیایی و فاصله از رادار نیز فرق می‌کند. همچنین برای یک نقطه خاص و برای یک بارش هم ممکن است این ضرایب مختلف باشد. مقادیر بدست آمده ضرایب رادار در این پژوهش با آنچه که به عنوان پیش‌فرض در معادله رادار آمده است متفاوت بود که در نتیجه برآورد بارش توسط رادار بسیار کم‌تر از مقدار بارش باران‌سنج بود که پس از واسنجی، این ناسازگاری کم‌تر و مقدار برآورد بارش به واقعیت نزدیک‌تر شد. به طور کلی واسنجی برآورد بارش رادار هواشناسی کرمانشاه نشان داد که مقادیر برآورد بارش رادار از مقادیر بارش باران‌سنج‌ها کم‌تر است. که این ناسازگاری میان رادار و باران‌سنج‌ها در اوج شدت بارش بیش‌تر است. و این یافته‌ها با نتایج پژوهش محمدیها و همکاران (۱۳۹۲) که رادار هواشناسی تهران را واسنجی کرده بودند، نیز هماهنگی دارد. آنها نیز برای کم کردن ناسازگاری ضرایب a,b رابطه لگاریتمی رادار ($Z = aR^b$) را برای بارش‌های این منطقه تصحیح کرده که پس از تصحیح، مقادیر بارش برآورد شده رادار، نسبت به داده‌های زمینی، از ۴۰٪ قبل از تصحیح به ۹۰٪ بعد از تصحیح رسید. و این پژوهش نشان داد که با تصحیح ضرایب رادار در هر نقطه و درهر فصل، برآورد بارش رادار به مقدار درست نزدیک‌تر می‌شود و اگر کارشناسان و مسئولان رادار کرمانشاه از فرمول‌های به دست آمده در این پژوهش استفاده کنند، می‌توانند قبل از وقوع بارش، پیش‌بینی دقیق انجام دهند و هشدارهای لازم را به ادارات و سازمان‌های مربوطه صادر نمایند تا از وقوع حوادث ناشی از بارش‌های سنگین جلوگیری به عمل آید. این پژوهش نشان داد که چنانچه زاویه پرتو ارسالی رادار به دقت انتخاب شود و برای هر نقطه زمینی با توجه به فاصله آن از رادار، یک معادله و ضرایب تصحیح جداگانه برای واسنجی رادار بدست آید، آنگاه نتایج برآورد بارشی رادار به مقدار واقعی بارش بسیار نزدیک می‌شود. چون بدست آوردن زاویه ارتفاع پرتوی مناسب برای هر ایستگاه و محاسبه ضرایب مربوط به آن نقطه، کار سخت و دشوار و زمان‌بری بوده و چنانچه تعداد نقاط مورد مطالعه بیش‌تر باشد بر دشواری کار افزوده خواهد شد، لذا می‌توان با استفاده از داده‌های بارشی تمام نقاط مورد مطالعه و باتابندگی رادار، یک معادله کلی استخراج و ضرایب تصحیح را بدست آورده و رادار را واسنجی کرد. هرچند که در این روش اندکی از دقت داده‌های بارش برآورد شده کم می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که با این روش هم می‌توان بارش رادار را تا حد قابل اعتمادی برآورد کرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود که برای هر منطقه کشور ایران که تحت پوشش رادار هواشناسی است، ضرایب معادله رادار محاسبه گردد تا با استفاده از آن‌ها بتوان بارش‌ها را به طور دقیق پیش‌بینی کرد و هشدارهای لازم را به مراکز مختلف داد.

منابع

اسکولین، مریل، (۱۳۹۲). مقدمه‌ای بر سیستم رادار، ترجمه سهیلی‌فرد و آقابابایی. انتشارات ادبستان (ویرایش سوم).

قالهری فلاح غلامعباس؛ کدخدا الهام (۱۳۹۶). ارزیابی ساختار مکانی بارش نیم قرن اخیر دشت مشهد، مجله ژئوهیدرولوژی، ۳(۱۱)، ۵۷-۳۹.

طوفانی‌نژاد، زهرا، کمالی، غلامعلی، علیزاده، میلاد (۱۳۸۸)، کاربرد رادارهای هواشناسی باند X در برآورد میزان بارندگی در حوضه‌های کوچک، مجله آب و خاک، ۲۳(۱)، ۶۷-۵۷.

محمدیها احمد؛ معماریان محمد؛ ریحانی‌پروری محمد (۱۳۹۲). ارزیابی برآوردهای رادار هواشناسی تهران از کمیت بارش به روش Z-R برای سه رویداد بارش سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۲)، ۲۰۴-۱۸۷.

مکوندی، هامون. (۱۳۸۹)، کالیبراسیون رادار هواشناسی با استفاده از داده‌های باران‌سنج خودکار به منظور ارزیابی دقت تخمین بارندگی رادار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر محمد موسوی، رشته مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

Amitai, E., Wolff, D.B., Marks, D.A., Silberstein, D.S., (2002), Radar rainfall estimation; lessons learned from the NASA / TRMM validation program, Proceedings of ERAD publication series, 1, 255-260.

Battan, L.J., (1973), Radar observation of the atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago, pp. 324.

Christodoulous. C. MichaelidesS M. G., (2004), Prediction of rainfall rate based on weather radar measurements. International Joint Conference on Neural Networks, (IEEE Cat. No.04CH37541).

Gunn, R. and Kinzer, G.D., (1949), The terminal velocity of fall forwater droplets in stagnant air. J. Meteorol., 6, 243–248.

Hagen, M., Yuter, S., (2002), Relations between radar reflectivity, Liquid-water content, and rainfall rate during the MAP SOP, J.R Meteoral, Sol, 129, 477-493.

Lee, G., Seed, A.W., Zawadzki, I., (2007), Modeling the variability of drop size distributions in space and time. Journal of Climate and AppliedMeteorology, 46 (6), 742–756.

Lee, G., Zawadzki, I., (2005), Variability of drop size distributions: time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation. Journal of Applied Meteorology, 44(2), 241–255.

Lee.G.W., Zawadazki. I., (2004), Variability of drop size distribution: Noise and Noise filtering in disdrometric data; Journal of applied meteorology, 44, 634-652.

Marshall, J.S., Hitschfeld, W. and Gunn, K.L.S., (1955), Advancesin radar weather. Adv. Geophys., 2, 1–56.

Overeem, A. Buishand, T. A. and Holleman, I., (2009), Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency using weather radar, Water Resources Research, 45, 1-15.

Overeem, A., Holleman, I., Buishand, A., (2008), Derivation of a 10-Year Radar-Based Climatology of Rainfall, Journal of Applied Meteorology and Climatology. 48, 1448-1463.

Pedersen, l., Jensen, N.E., Madsen, H., (2010), Calibration of Local Area Weather Radar—Identifying significant factors affecting the calibration; Atmospheric Research, 97,129–143.

Smith, J.A., Krajewski, W.F., (2002), Radar hydrology: rainfall estimation. Advance in Water Resources, 25, 1387-1394.

Tokay, A., Hartmann. P, Battaglia. A., (2008), A Field Study of Reflectivity and Z–R Relations Using Vertically Pointing Radars and Disdrometers, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26,1120-1134.

Uijlenhoet, R., (2001), Raindrop size and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology, Hydrology and Earth SystemSciences, 5 (4), 615–627.

Uijlenhoet, R., Stricker, J. N. M., (1999), Dependence of rainfall on drop size, J. ofHydrology, 217, 157-163.

Wang G., Liu L., Ding Y., (2012), Improvement of Radar Quantitative Precipitation Estimation Based on Real-Time Adjustments to Z-R Relationships and Inverse Distance Weighting Correction Schemes, Advances in Atmospheric, 29(3), 575-584.

Research Article

Forecast of Heavy Rainfall in West of Iran According to Weather Radar Estimates Using the Z-R method

Farshad Safarpour[1], Javad Khoshhal Dastjerdi*[2], Abolfazl Masoodian[3]

Received: 03-05-2018 Revised: 13-10-2018 Accepted: 15-12-2018

Abstract

The amount of precipitation measured by the radar is different from the amount of precipitation received on the ground. The difference has many causes, some of which are related to the nature of the radar and others to the climate of each region. As a result, radar data needs to be corrected and defined based on terrestrial data to determine the amount of ground-level rainfall received from the radar data. Weather radar used for estimation of rain in the large areas. The relationship between rain and reflectivity radar is exponential $Z = aR^b$. Radar estimated rainfall amount is incorrect if the coefficients of this model are wrong. Drop size and distribution of rainfall is effective on the coefficient of this model. The change in the coefficients of this model is very high. In this study, to calibrate radar data, rain from 2 to 3 December 2016 and 11 to 13 February 2018 at the stations, Kermanshah, Eslamabad, Sarpol, Ghasre Shirin, Harsin, Javanroud, Tazabad, Songhor, Ravansar, Ghilan Gharb and Soumar at distance of 30 to 100 kilometers from Kermanshah's radar are investigated. In the first rain, using soft Rainbow for each of the stations and radar beam elevation angle optimization and correction factors relating to the extraction station, respectively. With this relationship, the radar rainfall estimates from 31 percent to 96 percent Increased and the average total rainfall from 8.9 to 32.4 millimeter increased an average radar rainfall estimated only 1 millimeter less than actual rain by gauge. In the second rain, using data from all stations, only one equation and correction factors were obtained. The results rainfall radar will be accepted at this stage, good approximation, and the average estimate rainfall radar from 9.6 to 23.5 millimeter increased those 4 millimeters less than the actual amount by gauge. If radar coefficients are corrected correctly for different areas, precipitation can be predicted and prevented from occurring unexpected events.

Keywords: Weather Radar, rainfall estimation, calibration, West of Iran.

[1]- Ph.D student of Climatology, Isfahan University, Isfahan, Iran
[2]*- Associate Professor of Climatology, Isfahan University, Isfahan, Iran Email: j.khoshhal@geo.ui.ac.ir
[3]- Professor of Climatology, Isfahan University, Isfahan, Iran

References

References (in Persian)

Ghalhari Fallah, G., Kadkhoda, E., (2017), The Evaluation of the Spatial Structure of Mashhad Plain Precipitation in the Last Half-Century, Hydrogeomorphology, 3(11). 39-57. [In Persian]
Makvandi, H., (2010), Meteorological radar calibration using automatic rain gauge data to evaluate the precision of radar rainfall estimation, Master's Thesis, Supervisor: Dr. Mohammad Mousavi, Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]
Mohammadiha, A., Meamarian, M., Reyhani Parvari, M., (2013), Estimation of Tehran weather radar of precipitation quantity by Z-R method for three precipitation events of 2010 and 2011, Journal of Physics of Earth and Space, 3(2), 187-204. [In Persian]
Scolin, M. (2013), Introduction to radar system, Translation by Soheilifard, Mohammad Reza and Aghababaei Majid, Adabestan Publishing (Third edition). [In Persian]
Tufaninejad, Z., Kamali, G., Alizadeh, M., (2009), Application of X-ray meteorological radars in estimating rainfall in small basins, Water and Soil Journal, 23 (1), 67-57. [In Persian]

References (in English)

Amitai, E., Wolff, D.B., Marks, D.A., Silberstein, D.S., (2002), Radar rainfall estimation; lessons learned from the NASA / TRMM validation program, Proceedings of ERAD publication series, 1, 255-260.
Battan, L.J., (1973), Radar observation of the atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago, pp. 324.
Christodoulous. C. MichaelidesS M. G., (2004), Prediction of rainfall rate based on weather radar measurements. International Joint Conference on Neural Networks, (IEEE Cat. No.04CH37541).
Gunn, R. and Kinzer, G.D., (1949), The terminal velocity of fall forwater droplets in stagnant air. J. Meteorol., 6, 243–248.
Hagen, M., Yuter, S., (2002), Relations between radar reflectivity, Liquid-water content, and rainfall rate during the MAP SOP, J.R Meteoral, Sol, 129, 477-493.
Lee, G., Seed, A.W., Zawadzki, I., (2007), Modeling the variability of drop size distributions in space and time. Journal of Climate and AppliedMeteorology, 46 (6), 742–756.
Lee, G., Zawadzki, I., (2005), Variability of drop size distributions: time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation. Journal of Applied Meteorology, 44(2), 241–255.
Lee.G.W., Zawadazki. I., (2004), Variability of drop size distribution: Noise and Noise filtering in disdrometric data; Journal of applied meteorology, 44, 634-652.
Marshall, J.S., Hitschfeld, W. and Gunn, K.L.S., (1955), Advancesin radar weather. Adv. Geophys., 2, 1–56.
Overeem, A. Buishand, T. A. and Holleman, I., (2009), Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency using weather radar, Water Resources Research, 45, 1-15.
Overeem, A., Holleman, I., Buishand, A., (2008), Derivation of a 10-Year Radar-Based Climatology of Rainfall, Journal of Applied Meteorology and Climatology. 48, 1448-1463.
Pedersen, l., Jensen, N.E., Madsen, H., (2010), Calibration of Local Area Weather Radar—Identifying significant factors affecting the calibration; Atmospheric Research, 97,129–143.
Smith, J.A., Krajewski, W.F., (2002), Radar hydrology: rainfall estimation. Advance in Water Resources, 25, 1387-1394.
Tokay, A., Hartmann. P, Battaglia. A., (2008), A Field Study of Reflectivity and Z–R Relations Using Vertically Pointing Radars and Disdrometers, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26,1120-1134.
Uijlenhoet, R., (2001), Raindrop size and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology, Hydrology and Earth SystemSciences, 5 (4), 615–627.
Uijlenhoet, R., Stricker, J. N. M., (1999), Dependence of rainfall on drop size, J. ofHydrology, 217, 157-163.
Wang G., Liu L., Ding Y., (2012), Improvement of Radar Quantitative Precipitation Estimation Based on Real-Time Adjustments to Z-R Relationships and Inverse Distance Weighting Correction Schemes, Advances in Atmospheric, 29(3), 575-584.