

ارزیابی و بهبود عدم قطعیت های موجود در داده های رادار اهواز با تاکید بر کالیبراسیون رابطه Z-R

علی محمد آخوندعلی

گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

فریدون رادمش

گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

سید یحیی میرزائی

دانشجوی دکتری گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

محمد رضا شریفی

گروه عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۱۱

Yahya2010@yahoo.com

چکیده

رادارهای هواشناسی توان اندازه گیری شدت بارش با تفکیک مکانی و زمانی مناسب را دارا می باشند. این ابزار بارش را به طور غیر مستقیم و با تبدیل داده های بازتابش رادار به شدت بارش، توسط یک تابع انتقال انجام می دهند. این تابع به عنوان رابطه Z-R و مبتنی بر استدلال نظری به فرم $Z = aR^b$ شناخته می شود. در این مطالعه با استفاده از روش ها مختلف کالیبراسیون، رابطه Z-R رادار اهواز برای بارش های رگبار، روزانه و میانگین روزانه کالیبره گردید. همچنین با بهره گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و معادلات ارتفاع نمونه برداری رادار، حداقل زاویه ارتفاعی رادار اهواز محاسبه شد. بر اساس نتایج آماری کلیه روش های کالیبراسیون روابط $Z = 166R^{1.7}$ برای میانگین بارش روزانه و $Z = 48R^2$ برای بارش روزانه، به عنوان معادلات بهینه از میان تمامی روش ها جهت تبدیل بازتابش رادار به بارش تعیین گردید همچنین حداقل زاویه ارتفاعی آنتن رادار جهت حذف کامل اثر برخورد پرتوی رادار با ارتفاعات، برابر با ۰/۶۴۴ برآورد شد.

کلمات کلیدی: رادار هواشناسی اهواز، عدم قطعیت داده های رادار، زاویه ارتفاعی آنتن رادار، GIS، کالیبراسیون رابطه Z-R

مقدمه

ارسال موج الکترو مغناطیس، میزان بازگشت موج را پس از برخورد موج به قطرات آب باران اندازه گیری می کنند. این موج بازگشتی که با عنوان Z در مطالعات رادار شناخت می شود با یک تابع انتقال توانی، به عنوان تخمینی از مقادیر شدت بارش مورد استفاده می گیرد. مسلماً استفاده از امواج الکترومغناطیس برای اندازه گیری غیر مستقیم بارش همواره با خطاهایی مواجه می باشد. خطاهای موجود در رادارهای هواشناسی را می توان به دو گروه کلی تقسیم کرد: خطاهای گروه اول مربوط به اندازه گیری قدرت موج الکترومغناطیس دریافتی بوده و عموماً ناشی از سخت افزار رادار و محدودیت های توپوگرافی می باشد که با تغییر در ابزار کنترلی رادار همچنین تغییر در زوایای آنتن قابل رفع می باشند. اما نوع دوم خطاهای رادار مربوط به ضرایب معادله تبدیل موج الکترومغناطیس دریافتی به بارش معادل (رابطه Z-R) می باشد که در فرایند تصحیح این ضرایب از داده های رادار به همراه داده های باران نگارهای زمینی همچنین ابزار اندازه گیری پراکنش قطر ذرات باران استفاده می گردد (Steiner et al 1999; Ulbrich and Miller, 2001; Lee and Zawadzki, 2006). فرایند بهبود خطای معادله Z-R به کالیبراسیون رادار معروف می باشد. با توجه به اینکه ضرایب این معادله به صورت پیش فرض به نرم افزار های رادار اعمال می گردد. لذا به دلیل تفاوت های اقلیمی مناطق تحت پوشش رادار این ضرایب همواره نیاز به اصلاح دارند. بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد در بازه زمانی سال های ۱۹۵۰ تا کنون محققان زیادی در

بارش یکی از مهمترین مولفه های چرخه هیدرولوژی در طبیعت است که تمامی چرخه از آن متأثر می باشد. همواره کیفیت اندازه گیری داده های بارش به عنوان یکی از چالش های مهم در مطالعات منابع آب می باشد. زیرا به دلیل تنوعی شرایط اقلیمی و توپوگرافیکی همچنین محدودیت های اقتصادی ایجاد یک شبکه استاندارد با پوشش مناسب و دقت کافی در یک حوضه آبریز وجود ندارد. بر این اساس همواره محققان در پی استفاده از روش های مبتنی بر اندازه گیری غیر مستقیم بارش یا سنجش از دور بوده اند که با حفظ میزان دقت اندازه گیری، محدوده وسیعی را تحت پوشش خود قرار دهد. در چند دهه اخیر رادارهای هواشناسی پتانسیل زیادی برای بهبود کیفیت داده های بارش ایجاد نموده اند (Uijlenhoet, 2001; Gray and Larsen, 2004; Lombardo et al 2006; Uijlenhoet et al 2006). این ابزار قابلیت تولید داده های بارش با تفکیک مکانی کمتر از ۵۰۰ متر مربع و تفکیک زمانی زیر ۱۵ دقیقه را در سطح وسیع تا شعاع ۲۵۰ دارا بوده و به دلیل پوشش وسیعی مکانی معایب باران سنج ها را نداشته همچنین در مقایسه با ماهواره ها هزینه های اولیه پایین تری دارند (طوفانی نژاد، ۱۳۸۸). با توجه به ویژگی های مکانی و زمانی داده های رادار می توان از آنها در پیش بینی های کوتاه مدت و طول مدت مدل های هیدرولوژیکی خصوصاً مدل های هیدرولوژیکی توزیعی استفاده کرد (Collier, 1996; Linsley et al 1988). بررسی مکانیسم کلی رادارهای هواشناسی نشان می دهد این ابزار با

این واحد جدید به نام dBZ، مخفف دسی بل می‌باشد. مارشال و پالمر در سال ۱۹۴۸ نشان داد اگر اثرات باد، تلاطم و اثر متقابل قطره باران در یک بارش در نظر گرفته نشود می‌توان شدت باران R (برحسب میلی متر در ساعت) را با داشتن توزیع اندازه قطرات باران N(D) و سرعت سقوط ذرات به صورت زیر محاسبه کرد (رابطه ۷).

$$R = p_w \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 V(D) N(D) dD \quad \text{رابطه ۷}$$

مقایسه دو رابطه ۴ و ۷ نشان می‌دهد عامل توزیع اندازه قطرات باران در هر دو این روابط بر مقادیر Z و R متاثر است.

$$Z \propto D^6 \quad R \propto D^{3.7}$$

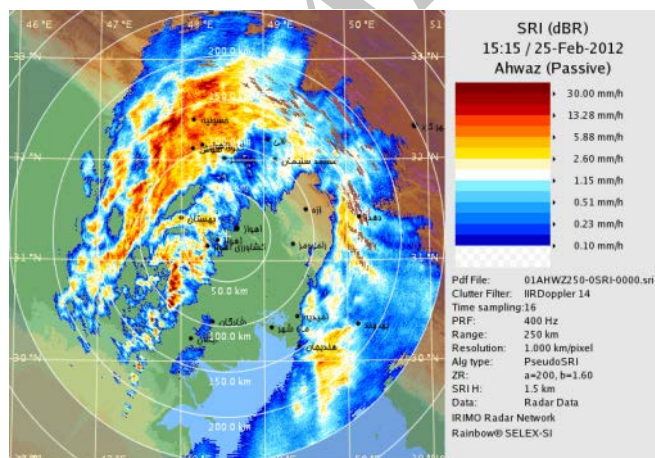
با توجه به وابستگی هر دو عامل به توزیع اندازه قطرات باران N(D)، یک رابطه غیر خطی بین میزان بارندگی و عامل بازتاب قابل تخمین می‌باشد (رابطه ۸).

$$Z = A \cdot R^b \quad \text{رابطه ۸}$$

رابطه ۸ به نام رابطه Z-R نامیده می‌شود. در این رابطه a و b ضرایبی هستند که متناسب با شرایط اقلیمی و مکانی متغیر می‌باشند. بر اساس مطالعات مارشال و پالمر ۱۹۵۵ که بر روی طیف وسیعی از داده‌های رادار موجود در دنیا صورت گرفت، معادله $Z = 200R^{1.6}$ بیشترین تطابق را با شرایط اقلیمی میانگین مناطق مختلف دنیا نشان می‌دهد (Marshall, et al 1955). لذا این رابطه طی پنجاه سال گذشته یکی از پرکاربردترین معادله در بین هیدرولوژیست‌های رادار بوده است (Smith and Krajewski; 1993). ماحصل اعمال رابطه Z-R در نرم افزار رادارهای هواشناسی محصولی به نام شاخص شدت بارندگی سطحی یا SRI می‌باشد که بیشترین کاربرد را در مطالعات هیدرولوژیکی دارد. این شاخص شدت بارندگی را در یک ارتفاع ثابت از سطح زمین برحسب میلی متر بر ساعت برآورد می‌کند (شکل ۱).

محدوده مورد مطالعه و جمع آوری داده ها

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق محدوده عملیاتی رادار اهواز به شعاع ۲۵۰ کیلومتری از موقعیت رادار می‌باشد. این محدوده تقریباً تمام مرز جغرافیایی استان خوزستان را پوشش می‌دهد. رادار هواشناسی اهواز به عنوان اولین رادار هواشناسی کشور در ایستگاه کشاورزی ام الطمیر اهواز و در موقعیت جغرافیایی $32^{\circ} 33' 48''$ و $48^{\circ} 14' 31''$ واقع شده است. مشخصات عمومی رادار اهواز در (جدول ۱) ارائه گردیده است.



شکل ۱. نمونه ای از برآورد شاخص SRI در رادار اهواز

ارتباط با توسعه فناوری رادار و روش‌های بهبود کیفیت داده‌های بارش رادار فعالیت نموده‌اند. عموماً مطالعات اولیه رادار متمرکز بر تعیین روابط بازتابش رادار و توزیع اندازه ذرات باران می‌باشد که حاصل این مطالعات منجر به برآورد رابطه نمایی Z-R گردید (Marshall and Palmer, 1948). این رابطه تاکنون در بسیاری از مطالعات رادار دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از روش‌های آماری از جمله اصلاح ضریب اریبی و آماره RMSE جهت کاهش خطاهای موجود در رابطه Z-R در فرایند کالیبراسیون رادار در طیف وسیعی از مناطق دنیا مورد استفاده گرفته و باعث ایجاد تنوعی از ضرایب معادله Z-R در ایستگاه‌های مختلف گردید (Steiner et al., 1999; Uijlenhoe, 2001; Seed et al., 2002; Mapiam, 2008; Ramli, 2011). همچنین اصلاح خطاهای ناشی از کلاتر زمین و پرتوهای مسدود شده بر روی داده‌های بارش رادار و بررسی اثرات توپوگرافیکی محل استقرار رادار و محدوده تاثیر رادار از دیگر مطالعات انجام شده بر روی رادارهای هواشناسی می‌باشند (طوفانی نژاد ۱۳۸۸). لذا در این پژوهش سعی شده تا با بررسی و اصلاح برخی از عوامل تاثیرگذار بر رادار از جمله زاویه ارتفاعی آنتن و ضرایب معادله تبدیل Z-R قطعیت داده‌های رادار اهواز جهت استفاده در سایر مطالعات افزایش یابد.

معادلات رادار

مکانیسم کلی تمامی رادار هواشناسی شامل ارسال موج الکترومغناطیس و تحلیل موج برگشتی پس از برخورد به هدف می‌باشد. قدرت موج الکترو مغناطیس دریافتی تابعی از σ ، سطح مقطع موج برگشتی از هدف، λ طول موج، P_t قدرت موج الکترومغناطیسی ارسالی و g قدرت گیرندگی آنتن رادار می‌باشد (رابطه ۱).

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \theta_0^2 h}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \sum_{Vol} \sigma_i \quad \text{رابطه ۱}$$

در صورتیکه اندازه ذرات موجود در مسیر موج رادار از طول موج رادار کوچک تر باشد، σ_i متناسب با توان ششم قطر خواهد بود (رابطه ۲) (Battan, 1973).

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6 \quad \text{رابطه ۲}$$

در این معادله K ثابت دی الکترونیک آب و D قطر ذرات می‌باشد. بررسی توزیع اندازه قطرات باران در حجم نمونه رادار نشان می‌دهد این مقدار برابر با مجموع توان ششم قطر ذرات باران می‌باشد که به آن فاکتور بازتابش رادار نیز گفته می‌شود (رابطه ۳ و ۴).

$$Z = \sum_{Vol} D_i^6 \quad \text{واحد } \frac{mm^6}{m^3} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) \cdot D^6 dD \quad \text{رابطه ۴}$$

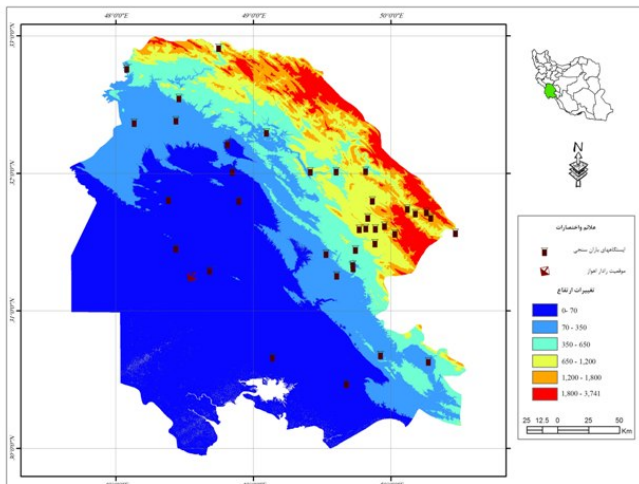
در این رابطه $N(D)dD$ نشان دهنده متوسط تعداد قطرات باران با قطرهای کروی به ازای هر واحد حجم هوا است. با جایگزینی روابط فوق در رابطه ۱ مشخص می‌گردد قدرت موج دریافتی متاثر از فاکتور بازتابش رادار همچنین فاصله ذره تا رادار می‌باشد (رابطه ۵).

$$\bar{P}_r = C \frac{|K|^2}{r^2} Z \quad \text{رابطه ۵}$$

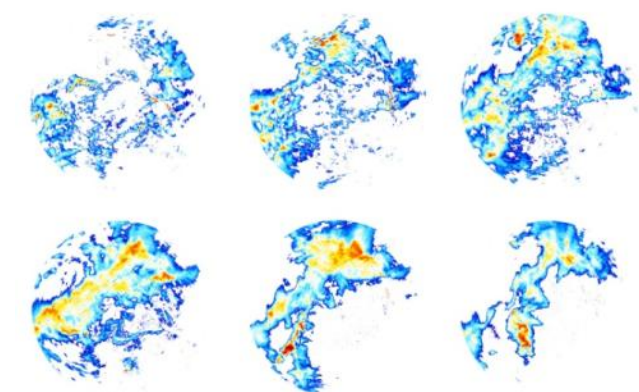
بر اساس رابطه ۵ تمام خواص رادار در ضریب C و تمام خواص قطرات باران در K و Z نهفته می‌باشد. استفاده از فاکتور بازتاب رادار Z (mm^6/m^3) به دلیل مقادیر بسیار بزرگ آن، راحت نبوده. لذا با استفاده از مقیاس لگاریتمی به جای مقیاس خطی معادله Z به شکل زیر تغییر می‌یابد. (Battan 1973).

$$Z_{Log} = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{Z_{Liner}}{L mm^6/m^3} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

شاخص های CCPI و SRI بر مبنای $Z = 200R^{1.6}$ تبدیل گردید (شکل ۴) و در نهایت باتوجه به موقعیت ایستگاههای بارانگار مقادیر متناظر هر بارش ۱۵ دقیقه از روی تصویر رادار استخراج و در مجموع ۵۵۰۰ داده بارش-رادار با تفکیک ۱۵ دقیقه تولید گردید.



شکل ۳. نقشه محدوده مطالعاتی تغییرات ارتفاعی و موقعیت بارانگارهای مورد استفاده



شکل ۴. داده‌های توزیعی بارش رادار اهواز در بارش ۲۰۱۱/۱۱/۱۹

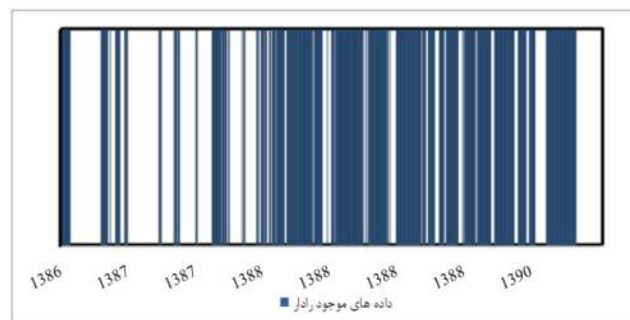
عدم قطعیت در تخمین بارش رادار

پوشش وسیع ناحیه ای، قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب بخشی از مزایای رادارهای هواشناسی می‌باشد که باعث شده این ابزارها مورد توجه محققان هیدرولوژی قرار گیرد. اما همواره در بهره‌گیری از رادار باید مزایای آنها در کنار خطاهای موجود در آنها مورد بررسی قرار گیرد زیرا عدم توجه و شناخت کافی از خطاها و عوامل ایجاد کننده آنها باعث افزایش عدم قطعیت در داده‌های بارش برآورد شده با این ابزار خواهد شد (Kitchen et al, 1994; Anagnostou et al, 1999; Vignal et al, 2001; Brandes et al, 2004; Holleman, 2007). به طور کلی می‌توان خطاهای موجود در رادارهای هواشناسی را به دو مجموعه کلی شامل: خطاهایی موجود در فرایند اندازه‌گیری بازتابش و خطاهای موجود در فرایند تبدیل مقادیر بازتابش به شدت بارش تفکیک کرد (Jordan, 2000).

جدول ۱. مشخصات رادار اهواز

مشخصات رادار اهواز	
موقعیت جغرافیایی	اهواز - ام طمیر
مدل رادار	Metro 1500s
کشور سازند	آلمان
باند فرکانس رادار	S (توصیه شده برای بارش های رگباری).
توان ارسالی رادار	۷۵۰ کیلووات
ارتفاع رادار	۲۴ متر
برد آنتن	۲۵۰ کیلومتر شعاعی
قطر آنتن و گنبد	۸/۵ و ۱۱/۶۵ متر
زاویه چرخش افقی	۰ تا ۳۶۰ درجه
زاویه چرخش عمودی	۲- تا ۹۰ درجه
فرکانس عملیاتی	۲/۷-۲/۹ گیگاهرتز
فرستنده رادار اهواز	کلی ستورن مدل TXS 1500
پردازشگر دیجیتال سیگنال	پردازشگر دیجیتالی مدل Aspen DRX
نرم افزار رادار	Rainbow5 شرکت Gematronik

جهت انجام این تحقیق از دو گروه داده شامل: داده‌های بارش ایستگاه‌های مجهز به بارانگار و داده‌های بازتابش رادار هواشناسی اهواز استفاده گردید. داده‌های بازتابش رادار اهواز در بازه زمانی سال های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۲ با تفکیک مکانی ۵۰۰*۵۰۰ متر و تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه ای در قالب اسکن حجمی اتمسفر با فرمت Raw Data از سازمان هواشناسی کل کشور اخذ گردید. (شکل ۲) وضعیت کمی داده‌های رادار اهواز را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. وضعیت کمی داده‌های رادار اهواز

بر اساس پیاده سازی موقعیت ایستگاه باران نگار وزارت نیرو در محدوده تاثیر رادار (شکل ۳)، ایستگاههای ایدنک، رکعت نعل کنان، سد شهید عباسپور، ایزه، سد کارون ۳، پاچی رامهرمز، باغ ملک، بارانگرد، کارون ۴، دلی بختیار، پای پل، جلوگیر، سد شهدا بهبهان، سوسن، عبدالخان، کمپ جراحی، دهملا، اهواز، عرب حسن اسد، شوشتر، اندیکا (تنگ دولاب)، گتوند، سد دز، لالی-بند سرخی و سد تنظیمی ذفول انتخاب و در بازه زمانی مشابه با بازه زمانی داده‌های رادار، داده‌هایی بارش ثبت شده در این ایستگاه‌ها اخذ گردید. این داده شامل مقادیر رگبارهای ثبت شده با تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه ای می‌باشند. پس از اخذ داده‌های بارانگار و رادار، کلیه داده‌های بر اساس زمان وقوع تنظیم و در نهایت ۳۹ رخدادهای رگبار برای ۲۵ ایستگاه بارنگاری انتخاب شد. سپس داده‌های خام رادار متناظر با رگبار های انتخابی با استفاده از نرم افزار Rainbow5 به

خطاهایی موجود در فرایند اندازه گیری بازتابش رادار

خطای میرایی پرتو رادار

قدرت پرتو رادار با ارتعاش ذرات موجود در اتمسفر و جذب توسط آب ضعیف می شود. حساسیت پرتوی رادار به میرایی بستگی به طول موج ارسالی توسط رادار و شدت بارش دارد. به طور کلی، پدیده میرایی موج برای رادارهای باند X و C به ترتیب مشکلات شدیدی ایجاد می کند اما این پدیده در مورد رادارهای باند S به دلیل طول موج این رادارها مشکل خاصی ایجاد نمی نماید. این پدیده ممکن است در اثر پوشش محافظ رادار نیز صورت گیرد که در شرایط مختلف بارش اثر این پوشش بر میرایی موج رادار تغییر می کند (Hitschfeld, 1954).

خطای ارتفاع نمونه بردار

ارتفاع پرتو رادار متأثر از زاویه ارتفاعی آنتن همچنین انحنای کره زمین و انکسار پرتوی رادار توسط جو افزایش می یابد (Doviak and Zmic, 1984). براین اساس، رادارها شدت بارش را در سطوحی بالاتر از سطح زمین تخمین می زند و میزان بارش تخمین زده شده توسط رادار متأثر از عواملی چون وجود قطعات یخ در تراز بالای اتمسفر، رشد قطرات باران، تبخیر قطرات در مسیر سقوط و وجود تلاطمات بالا روند و افقی با میزان بارش باران برآورد شده در سطح زمین متفاوت می باشد (Austin, 1984). این خطا با کاهش زاویه ارتفاعی رادار قابل کاهش می باشد اما کاهش بیش از حد زاویه ارتفاعی آنتن باعث برخورد پرتو رادار با ارتفاعات و ایجاد پدیده کلاتر زمین خواهد شد (Kitchen, 1994). جهت تعیین زاویه ارتفاع آنتن همچنین ارتفاع پرتو رادار در زوایای مختلف می توان از رابطه ۹ استفاده کرد.

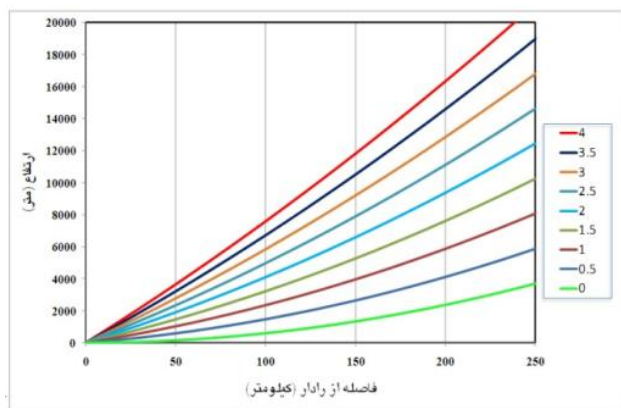
رابطه ۹
$$h = \sqrt{r^2 + (k_e R_e)^2} + 2rk_e R_e \sin\theta - k_e R_e$$
 در این رابطه r فاصله به رادار، θ زاویه ارتفاعی پرتوی رادار، R_e شعاع کره زمین و k_e مقدار ثابت مربوط به شکست پرتوی رادار در اتمسفر می باشد.

خطای پرتوهای مسدود شده رادار

برخورد پرتو رادار به اشیاء ثابت سطح زمین به عنوان یکی از عوامل ایجاد خطا در رادار محسوب می شود. این اثر بسته به عامل ایجاد کننده خود با عناوین مختلفی از جمله کلاتر زمین (Ground clutter)، انتشار ناهنجار پرتو (Anomalous propagation) و پرتوهای مسدود شده (Beam blocking) بیان می گردد (Kitchen, 1994). پدیده کلاتر زمین زمانی رخ می دهد که بخشی از پرتو رادار با زاویه ارتفاعی پائین به زمین های مرتفع برخورد کنند که در این صورت بخش قابل ملاحظه ای از موج به آنتن برگشت می کند. انتشار ناهنجار پرتو حاصل شکست پرتو رادار و انحنای آن به سمت زمین به دلیل تفاوت در چگالی لایه ای اتمسفری می باشد (Van Vleck, 1947). پرتوی رادار در برخورد با زمین به طور کامل و یا بخش از آن مسدود می گردد. این پدیده باعث کاهش قدرت موج برگشتی و خطا در برآورد بارش می گردد. کلاتر زمین، انتشار غیر عادی و پرتوهای مسدود شده توسط استراتژی های نسبتاً ساده می تواند به طور قابل ملاحظه ای کاهش و یا حذف گردند، برای مثال می توان با افزایش زاویه ارتفاعی پرتوی رادار بخش عمده ای از این گونه خطاها را حذف کرد اما افزایش زاویه ارتفاعی پرتوی رادار ممکن است باعث افزایش خطاهای مربوط به ارتفاع نمونه برداری گردد (Andrieu, 1997; Gabella, 1998). بنابراین تعیین بهینه زاویه ارتفاعی یکی از عوامل مهم در کاهش خطا رادار می باشد.

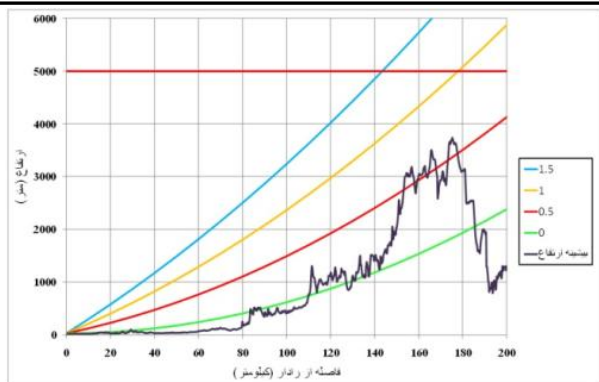
بهبود خطاهای رادار اهواز در فرایند اندازه گیری بازتابش

بررسی عوامل ایجاد کنند خطا در فرایند اندازه گیری بازتابش رادار اهواز نشان می دهد پدیده میرایی موج در رادارهای باند S با فرکانس عملیاتی ۲/۷-۲/۹ گیگاهرتز تأثیر چندانی ندارد (Hildebrand 1978) براین اساس رادار اهواز با خطاهای مربوط به میرایی موج مواجه نمی باشد. اما از میان خطاهای موجود خطای نمونه برداری ارتفاعی و خطاهای حاصل از برخورد پرتو به زمین (پدیده کلاتر زمین، انتشار ناهنجار پرتو و پرتوهای مسدود شده) که حاصل تغییرات زاویه ارتفاعی آنتن می باشند به عنوان مهمترین عوامل ایجاد کننده خطا محسوب می گردند. در رادارهای هواشناسی مقادیر زاویه ارتفاعی آنتن در محاسبات هیدرولوژیکی به صورت پیش فرض در بازه ۰/۵ الی ۲/۵ تنظیم می گردد. لذا لازم است زاویه ارتفاعی مناسب برای هر ایستگاه رادار به صورت اختصاصی و متناسب با موقعیت رادار و تغییرات ارتفاعی منطقه محاسبه و به رادار اعمال گردد. در همین راستا مقادیر تغییرات ارتفاعی پرتوی رادار اهواز با استفاده از رابطه ۹ و در زوایای ارتفاعی صفر تا ۴ درجه و در محدوده برد رادار (۰ الی ۲۵۰ کیلومتر) محاسبه و نمودار آن ترسیم گردید (شکل ۵).

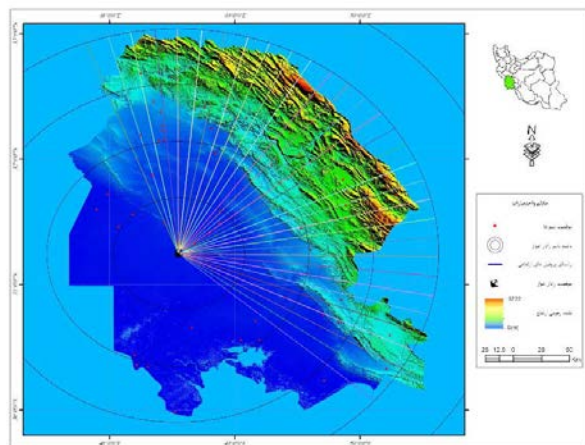


شکل ۵. تغییرات ارتفاعی پرتوی رادار اهواز در زوایای ۰ الی ۴ درجه

براساس نتایج افزایش فاصله از رادار اهواز به همراه افزایش زاویه ارتفاعی باعث افزایش ارتفاع پرتو رادار شده است این افزایش ارتفاع برای ایستگاه های رادار واقع شده در مجاورت ارتفاعات از جمله رادار اهواز بسیار مناسب می باشد زیرا در این مناطق با فاصله گرفتن از بخش های مسطح به تدریج ارتفاع روندی افزایشی به خود گرفته و این افزایش می تواند منطبق بر روند افزایشی پرتور رادار در یکی از زوایای ارتفاعی باشد و باعث کاهش احتمال برخورد پرتو رادار با ارتفاعات گردد. استراتژی اساسی برای تعیین زاویه ارتفاعی رادار اهواز حذف کامل و یا به حداقل رسیدن خطاهای حاصل از برخورد پرتو رادار با ارتفاعات (پدیده کلاتر زمین و پرتوهای مسدود شده) و از طرفی جلوگیری از افزایش ارتفاع نمونه برداری رادار می باشد. در این راستا ابتدا نقشه راقومی ارتفاع استان خوزستان با استفاده از نرم افزار ArcGIS تولید و با توجه به پراکنش ارتفاعات منطقه در راستای های آزیموتی ۳۴۵ تا ۱۲۵ درجه (فواصل ۵ درجه) شبکه ای شامل ۳۱ پروفیل ارتفاعی به مرکزیت رادار اهواز تعیین گردید (شکل ۶).

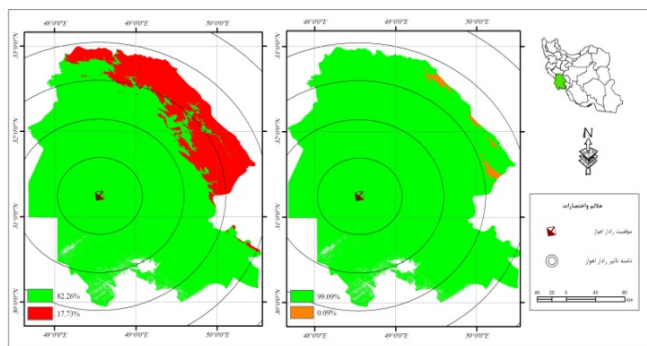


شکل ۸. اعمال پروفیل‌های ارتفاعی بیشینه بر نمودار زوایای ارتفاعی آنتن رادار اهواز



شکل ۶. راستای انتخابی جهت تهیه پروفیل ارتفاعی از منطقه

سپس با استفاده از نرم افزار Global Mapper تغییرات ارتفاعی در راستای این ۳۱ پروفیل برآورد و نمودار این تغییرات بر نمودار تغییرات زوایای ارتفاعی آنتن رادار اعمال گردید (شکل ۷) و در نهایت جهت تهیه نمودار ارتفاعی بیشینه، مقادیر حداکثر ارتفاع تمامی پروفیل‌ها در فواصل طولی مشخص از رادار محاسبه و مقادیر حاصله به عنوان تغییرات بیشینه ارتفاع منطقه در مقابل فاصله از رادار ترسیم گردید (شکل ۸)



شکل ۹. نقشه مناطق متأثر از انسداد پرتو رادار در زوایای ارتفاعی صفر (تصویر چپ) و زاویه ۰/۵ درجه (تصویر راست)

بر این اساس جهت انتخاب زاویه ارتفاعی مناسب جهت حذف کامل پرتوهای مسدود شده مقادیر ارتفاع و فاصله از رادار در تمامی پیک‌های بالاتر از زاویه ارتفاعی ۰/۵ درجه تعیین و با استفاده از معادله Doviak and Zmic 1984 مقدار زاویه ارتفاعی برای فواصل ۰ الی ۲۵۰ کیلومتری از رادار محاسبه گردید (جدول ۲)

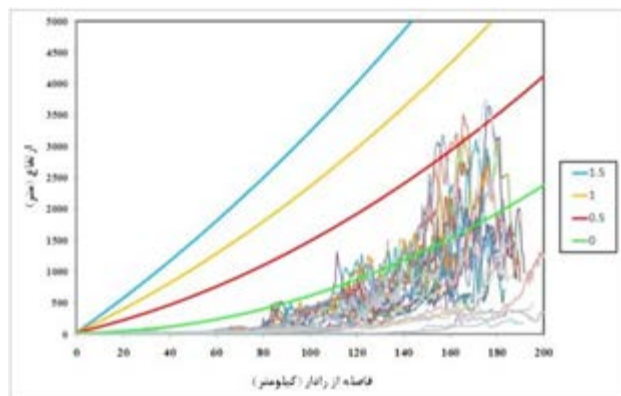
جدول ۲. مشخصات پیک‌های بالاتر از زاویه ارتفاعی ۰/۵

زاویه ارتفاعی	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	پیک
۰/۶۲۵	۳۷۴۰/۳۶۱	۱۷۵۱۰۰	۱
۰/۶۴۴	۳۵۰۹/۲۱۰	۱۶۵۸۶۰	۲
۰/۶۲۵	۳۱۸۶/۳۸۸	۱۵۶۸۷۰	۳

با بررسی زوایای ارتفاعی حاصله و اعمال آنها بر نمودار ارتفاعی منطقه، زاویه ارتفاعی ۰/۶۴۴ به عنوان زاویه حداقل بهینه جهت حذف کامل پرتوهای مسدود شده برآورد گردید (شکل ۱۰). بررسی زوایای ارتفاعی صفر، ۰/۵ و ۰/۶۴۴ درجه نشان می‌دهد تزار نمونه برداری رادار در این زوایا به ترتیب ۵۳۶، ۱۴۹۷ و ۱۷۷۳ متر بالاتر از میانگین ارتفاع منطقه می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. مشخصات زوایای ارتفاعی صفر الی ۰/۶۴ رادار اهواز

زاویه ارتفاعی	۰/۵	۰/۶۴	۰
میانگین ارتفاع نمونه‌گیری (متر)	۱۴۹۷/۲۱	۱۷۷۳/۸۹	۵۳۶/۱۹
درصد محدوده پرتوی‌های مسدود شده	۰/۹	۰	۱۷/۷۴
درصد محدوده بدون تاثیر	۹۹/۱۰	۱۰۰	۸۲/۲۶



شکل ۷. اعمال پروفیل‌های ارتفاعی بر نمودار زوایای ارتفاعی آنتن رادار اهواز

بررسی (شکل ۸) نشان می‌دهد پرتوی رادار در دو زاویه ارتفاعی صفر و ۰/۵ درجه با پروفیل ارتفاعی بیشینه برخورد داشته و این موضوع بدین معنی است که در این زوایا رادار اهواز با پدیده پرتوهای مسدود شده رادار مواجه و تخمین پدیده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در این زوایا با خطا همراه می‌باشد. جهت تعیین محدوده و درصد مناطق متأثر از این پدیده، مقادیر ارتفاع و فاصله از رادار در محل برخورد تعیین و با استفاده از نرم افزار GIS و مدل رقومی ارتفاع استان، موقعیت و درصد مناطق متأثر از پرتوهای مسدود شده تعیین گردید (شکل ۹ و جدول ۳).

نتایج نشان می‌دهد در زاویه ارتفاعی صفر درجه بیش از ۱۷/۷۴ درصد از ارتفاعات استان خوزستان باعث مسدود شدن پرتو رادار خواهند شد و این مقدار در زاویه ارتفاعی ۰/۵ درجه به کمتر از ۱ درصد کاهش پیدا می‌کند.

et al 1999). لذا جهت کاهش محاسبات، در روش نموداری مقادیر پارامتر b ثابت و برابر با $1/6$ فرض و رابطه نهایی در این روش به صورت:

$$Z = \frac{a_0}{m^b} R^b \quad \text{رابطه ۱۱}$$

بیان می‌گردد (Seed et al 2002). جهت انجام کالیبراسیون به روش نموداری از داده‌های ۳۹ رگبار (با تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه) در ۲۵ ایستگاه بارانسنجی مجهز به باران‌نگار همچنین داده‌های بارش رادار محاسبه شده با معادله پیش فرض $Z = 200R^{1.6}$ استفاده شد. پس از پیاده سازی داده‌ها و برازش خط رگرسیونی مقدار شیب این خط برابر با 0.667 برآورد گردید (شکل ۱۱). با اعمال مقدار شیب خط رگرسیونی مطابق رابطه ۱۱ بر پارامتر a رابطه $Z-R$ به شکل زیر اصلاح گردید.

$$Z = 382.23R^{1.6} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

پس از اصلاح رابطه، مقادیر بارش رادار با معادله جدید محاسبه و نمودار پراکنش داده‌های رادار در مقابل داده‌های ایستگاه‌های بارانسنجی ترسیم گردید. نمودار نشان می‌دهد شیب خط رگرسیونی برازش شده بر این داده‌ها برابر ۱ و منطبق بر خط ۴۵ درجه است (شکل ۱۲) که نشان دهنده بهبود داده‌های بارش رادار می‌باشد. جهت بررسی دقیق‌تر نتایج و مقایسه آن با رابطه پیش فرض رادار از آماره‌های خطا شامل میانگین خطا، میانگین مطلق خطای و ریشه میانگین مربع خطا استفاده گردید (جدول ۴).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - G_i) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

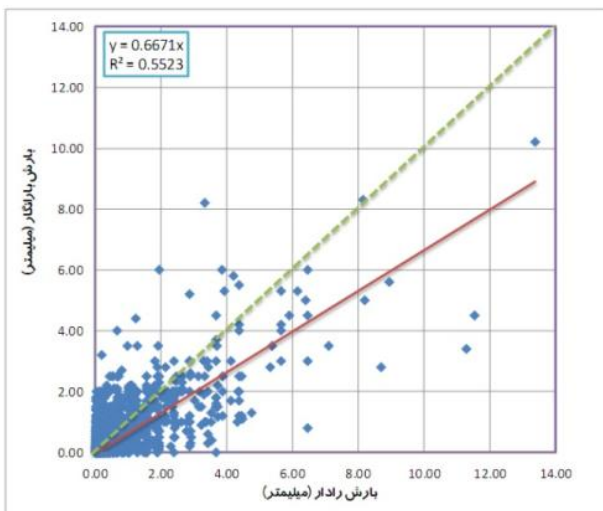
میانگین مطلق خطای

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - G_i| \quad \text{رابطه ۱۴}$$

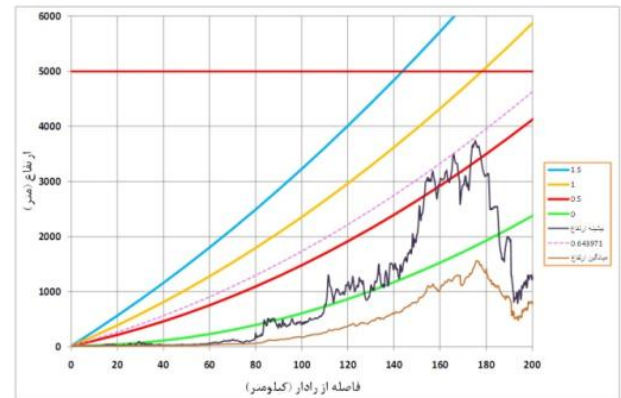
ریشه میانگین مربع خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

بررسی آماره‌های خطا نشان می‌دهد استفاده از روش نموداری در داده‌های رگبار باعث بهبود خطای RMSE داده‌های رادار محاسبه شده با رابطه جدید در مقایسه با رابطه پیش فرض رادار شده است.



شکل ۱۱. پراکنش داده ای بارش رادار در مقابل داده‌های بارش ایستگاه های زمینی (بر مبنای $Z = 200R^{1.6}$)



شکل ۱۰. زاویه ارتفاعی بهینه جهت حذف پدیده پرتوهای مسدود شده

خطاهای فرایند تبدیل بازتابش به شدت بارش

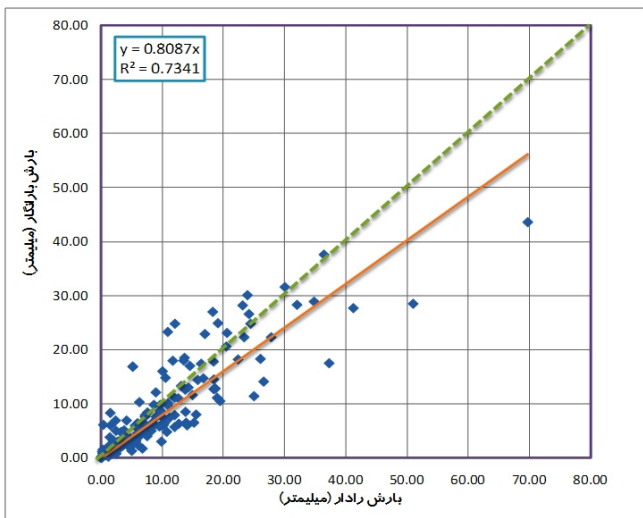
رادارها اندازه‌گیری شدت بارش را به طور غیر مستقیم و با استفاده از تابع تبدیل بازتابش رادار به شدت بارش انجام می‌دهند. این تابع تبدیل با عنوان رابطه $Z-R$ و متنی بر استدلال نظری به فرم $Z = aR^b$ بیان می‌شود (Seed et al 2002). پارامترهای رابطه $Z-R$ بسته به توزیع اندازه و سرعت قطرات باران متغیری باشد. بنابراین با توجه به تنوع بارش‌ها، برای برآورد دقیق مقدار بارش توسط رادار، نیاز به یک رابطه پویا $Z-R$ با ضرایب متغیر a و b می‌باشد. عموماً در اکثر ایستگاه‌های رادار از جمله رادار اهواز از ضرایب محاسباتی پیش فرض مارشال-پالمیر ۱۹۵۵ برای تابع تبدیل استفاده می‌گردد ($Z = 200R^{1.6}$). استفاده از این تابع بنا به شرایط اقلیمی محدوده رادار، احتمال ایجاد خطا در داده‌های بارش محاسباتی را افزایش می‌دهد. براین اساس لازم است این ضرایب متناسب با شرایط اقلیمی هر رادار اصلاح گردد. به طور کلی جهت کالیبراسیون ضرایب رادار سه روش توسط محققان توصیه شده است که شامل: روش توزیع اندازه قطرات باران (DSD)، روش‌های آماری (TMM) و روش تطبیق احتمالاتی (PMM) (Rosenfeld et al 1993) می‌باشند. از میان روش‌های مذکور روش‌های آماری بیش از سایر روش‌ها مورد توجه محققان رادار می‌باشد زیرا در این روش از داده‌های باران سنج‌های ثابت موجود در محدوده رادارها استفاده می‌گردد و نیاز به تولید داده جدید نمی‌باشد. روش‌های آماری کالیبراسیون رادار نیز خود شامل سه روش: نموداری، روش تعدیل ضریب اریبی (Bias) و روش حداقل مجذور مربعات خطا (RMSE) می‌باشند که در روش‌های نموداری و تعدیل ضریب اریبی پارامتر b رابطه $Z-R$ ثابت ولی در روش حداقل مربعات خطا روابط بهینه بر اساس تغییر در هر دو پارامتر معادله $Z-R$ برآورد می‌گردند

کالیبراسیون به روش نموداری

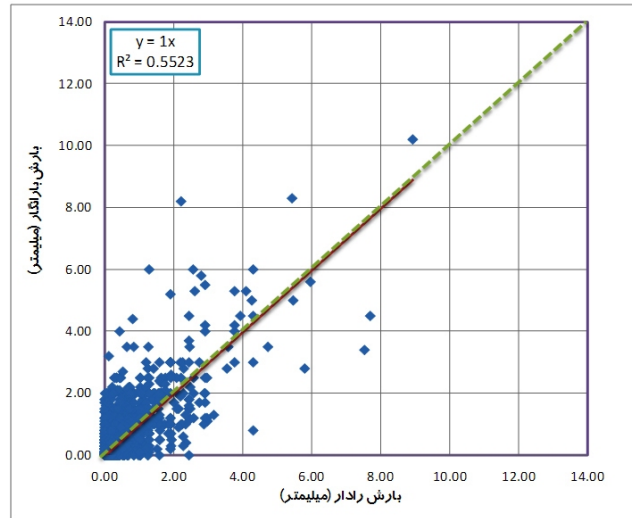
کالیبراسیون نموداری رادار براساس ترسیم نمودار پراکنش داده‌های بارش برآورد شده از رادار و باران سنج‌ها و برازش خط رگرسیونی بر این نمودار می‌باشد. در این روش مقادیر شیب خط برازش شده تخمین و با استفاده از رابطه ۱۰ ضریب جدید برای پارامتر a محاسبه می‌گردد.

$$a_1 = \frac{a_0}{m^b} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

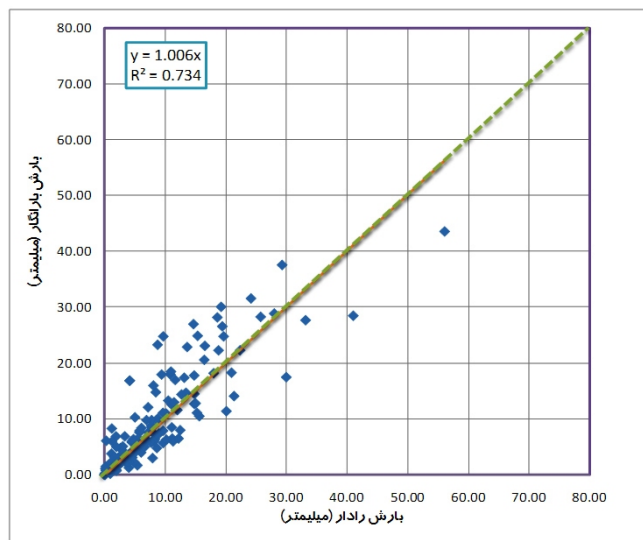
در این رابطه a_1 مقدار تصحیح شده پارامتر a (رادار)، a_0 مقدار اولیه پارامتر a و M شیب خط برازش شده بر داده‌های باران سنج‌ها و باران حاصل شده از رابطه اولیه $Z-R$ می‌باشد. نتایج بررسی بسیاری از محققان نشان می‌دهد مقادیر پارامتر b در فرایند کالیبراسیون نیاز به تغییراتی مشابه پارامتر a ندارد (Steiner



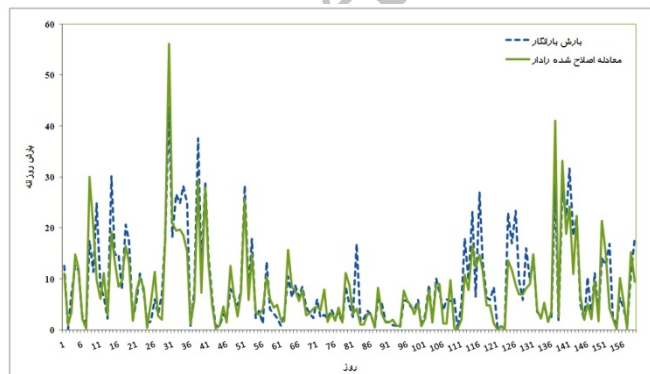
شکل ۱۳. پراکنش داده‌های بارش روزانه رادار در مقابل داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی بر مبنای $Z = 200R^{1.6}$



شکل ۱۲. پراکنش داده‌های بارش رادار اصلاح شده در مقابل داده‌های بارش ایستگاه زمینی بر مبنای $Z = 382.23R^{1.6}$
جدول ۴. مقادیر آماره‌های خطای معادله پیش فرض و معادله کالیبره شده



شکل ۱۴. پراکنش داده‌های بارش روزانه رادار در مقابل داده‌های بارش ایستگاه زمینی بر مبنای $Z = 281R^{1.6}$



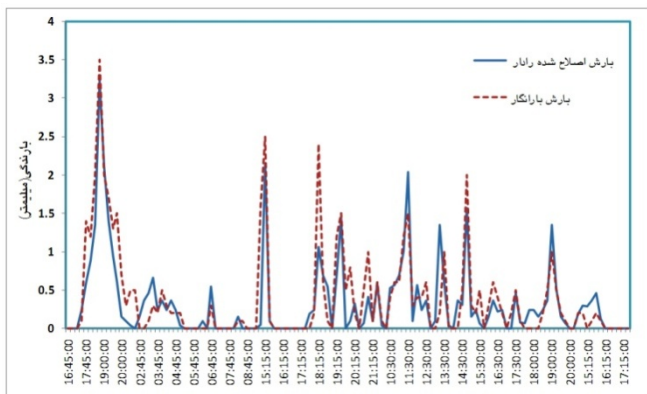
شکل ۱۵. تغییرات روزانه بارش ایستگاه‌های زمینی و بارش رادار با استفاده از رابطه $Z = 281R^{1.6}$ به روش نموداری

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 382.23R^{1.6}$
ME	۰/۰۴۷	-۰/۰۸۷
MAE	۰/۲۵۱	۰/۲۱۹
RMSE	۰/۵۴۱	۰/۴۴۷
MBE	۰/۸۸	۱/۳۲

به دلیل اینکه ارتفاع اندازه‌گیری رادار به طور معمول ۱ تا ۲ کیلومتر بالاتر از سطح زمین می‌باشد ممکن قطرات سنجش شده توسط رادار در این ارتفاع پس از ۵ تا ۱۰ دقیقه در باران سنج سقوط کنند. بنابراین ارتفاع و تلاطمات باد در اتمسفر می‌تواند تاثیر زیادی بر تفاوت داده‌های رادار و باران سنج‌ها ایجاد نماید. برای اساس برای بهبود مقایسه می‌توان از متوسط مکانی و زمانی داده‌ها نیز جهت کالیبراسیون استفاده کرد. به طور معمول علاوه بر داده‌های رگبار، داده‌های تجمعی از اطلاعات رادار و سایر سنجنده‌های بارش برای کالیبراسیون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر این اساس علاوه بر داده‌های رگبار (تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه) از داده‌های بارش روزانه و داده‌های میانگین روزانه نیز جهت کالیبراسیون رادار اهواز استفاده گردید. پس از ترسیم نمودار پراکنش داده‌های بارش روزانه در مقابل بارش رادار، مقدار شیب خط رگرسیونی برای این داده‌ها برابر ۰/۸۰۸ برآورد گردید (شکل ۱۳). با اعمال مقدار شیب بر رابطه ۱۱ معادله جدید Z-R برای این داده‌های به صورت $Z = 281R^{1.6}$ اصلاح و نمودار پراکنش آنها ترسیم گردید (شکل ۱۴). آماره‌های خطای به همراه نمودار زمانی داده‌های بارش روزانه و داده‌های روزانه محاسبه شده با رابطه جدید در (جدول ۵ و شکل ۱۵) نمایش داده شده است.

جدول ۵. مقادیر آماره‌های خطا معادل پیش فرض و معادله کالیبره شده برای داده‌های بارش روزانه $Z = 281R^{1.6}$

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 281R^{1.6}$
ME	۱/۰۹۰	-۰/۸۴۰
MAE	۳/۲۱۹	۲/۸۹۰
RMSE	۵/۲۳۵	۴/۴۵۲
MBE	۰/۸۹۲	۱/۱۰۳



شکل ۱۶. تغییرات مقادیر بارش ایستگاه شوشتر و بارش رادار اصلاح شده با استفاده از رابطه $Z = 247.43R^{1.6}$ به روش ضریب اریبی

علاوه بر رگبار مقادیر ضریب اریبی برای داده‌های بارش روزانه و میانگین روزانه نیز محاسبه گردید. مقادیر این ضریب برای بارش‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۸۹۲ و ۰/۹۰۱ می‌باشد. با اعمال این مقادیر در رابطه ۲۰ روابطه کالیبره شده برای این داده‌ها ایجاد گردید. (جدول ۷، ۸، ۹) مقادیر آماره‌های خطا برای این معادلات را نمایش می‌دهد.

$Z = 240.2R^{1.6}$	بارش روزانه
$Z = 236.3R^{1.6}$	میانگین بارش روزانه

جدول ۷. مقادیر آماره‌های خطا معادله پیش فرض و معادله کالیبره شده رگبار از روش تعدیل ضریب اریبی

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 243.95R^{1.6}$
ME	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰
MAE	۰/۲۵۱	۰/۲۳۱
RMSE	۰/۵۴۱	۰/۴۸۹
MBE	۰/۸۸	۱/۰۰

جدول ۸. مقادیر آماره‌های خطا معادله پیش فرض و معادله کالیبره شده بارش روزانه از روش تعدیل ضریب اریبی

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 240.2R^{1.6}$
ME	۱/۰۹۰	-۰/۰۰۰
MAE	۳/۳۱۹	۲/۹۱۷
RMSE	۵/۲۳۵	۴/۶۰۹
MBE	۰/۸۹۲	۱/۰۰۰

جدول ۹. مقادیر آماره‌های خطا معادله پیش فرض و معادله کالیبره شده میانگین بارش روزانه از روش تعدیل ضریب اریبی

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 236.3R^{1.6}$
ME	۰/۸۶۵	۰/۰۰
MAE	۱/۷۰۶	۱/۲۴۵
RMSE	۱/۰۴۸	۱/۵۹۰
MBE	۰/۹۰۱	۱/۰۰۰

در صورتی که محاسبه شیب با استفاده از میانگین بارش روزانه صورت گیرد روابط ۱۶ و ۱۷ این مقادیر را برآورد خواهند کرد.

$$\bar{G}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_{ij} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\bar{R}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{ij} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

در این رابطه g_{ij} مقدار بارش روزانه ثبت شده در هر باران سنج، r_{ij} مقدار بارش روزانه ثبت شده در پیکسل تصویر رادار متناظر با موقعیت باران سنج، N تعداد باران سنج‌های مورد استفاده در منطقه و \bar{G}_j میانگین بارش روزانه باران سنج‌ها و \bar{R}_j میانگین بارش روزانه رادار می‌باشد.

مقدار شیب خط رگرسیونی برآورد شده برای داده‌های میانگین بارش روزانه برابر ۰/۸۷۷ و پارامتر a اصلاح شده مطابق رابطه ۱۰ برابر ۲۴۶/۶۹ می‌باشد. رابطه ۱۸، رابطه کالیبره شده برای داده‌های میانگین بارش روزانه می‌باشد. همچنین در (جدول ۶) خصوصیات آماری معادله جدید ارائه گردیده است.

$$Z = 246.69R^{1.6} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

جدول ۶. مقادیر آماره‌های خطا معادله پیش فرض و معادله کالیبره شده برای داده‌های میانگین بارش روزانه

پارامترهای آماری	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 246.69R^{1.6}$
ME	۰/۸۶۵	-۰/۲۱۰
MAE	۱/۷۰۶	۱/۲۱۷
RMSE	۲/۰۴۸	۱/۵۶۹
MBE	۰/۹۰۱	۱/۲۰۷

کالیبراسیون به روش تعدیل ضریب اریبی

در کالیبراسیون رادار به روش تعدیل ضریب اریبی ملاک، کاهش خطای مجموع بارش محاسباتی رادار و مجموع خطای بارش مشاهداتی بارانسنج می‌باشد. این روش کالیبراسیون به روش Storm total Adjustment نیز معروف می‌باشد و با رابطه زیر تشریح می‌گردد (Krajewski and Smith, 2002).

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad \text{رابطه ۱۹}$$

در این رابطه G و R به ترتیب می‌تواند شامل مقادیر بارش بارانسنج‌ها و رادار در قالب داده‌های رگبار، ساعتی، روزانه و یا میانگین بارش روزانه تمامی ایستگاه باشد. با محاسبه این ضریب و اعمال آن بر معادله رادار و با فرض ثابت بودن پارامتر b می‌توان معادله جدیدی برای تخمین بارش از داده‌های رادار برآورد کرد (رابطه ۲۰).

$$Z = aB^{-b} R^b \quad \text{رابطه ۲۰}$$

با استفاده از رابطه ۱۹ مقدار ضریب اریبی برای داده‌های بارش رادار اهواز محاسبه گردید. مقدار این پارامتر برای داده‌های رگبار تولید شده از رابطه پیش فرض رادار برابر با ۰/۸۸۳ می‌باشد که نشان دهنده تخمین بالاتر بارش توسط رادار نسبت به ایستگاه‌های بارانسنجی می‌باشد. براین اساس و با اعمال این ضریب در رابطه ۲۰ معادله جدید $Z-R$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$Z = 243.95R^{1.6} \quad \text{بارش رگبار}$$

(شکل ۱۶) تغییرات بارش ایستگاه شوشتر و بارش رادار تولید شده با رابطه $Z = 247.43R^{1.6}$ را نمایش می‌دهد.

کالیبراسیون به روش حداقل مجذور مربعات خطا

در این روش فرایند کالیبراسیون با اعمال تغییرات بر هر دو پارامتر های a و b انجام می‌گیرد و ملاک انتخاب بهینه کمترین میزان خطای $RMSE$ محاسباتی می‌باشد. در روش حداقل مجذور مربعات می‌توان از سایر آماره های از جمله ضریب اریبی نیز جهت بهبود کالیبراسیون استفاده کرد. در این حالت روابطی که تولید ضریب اریبی برابر با ۱ (مجموع بارش رادار برابر با بارش بارانسنج) نموده اند تفکیک و رابطه برتر بر اساس پائین ترین مقدار $RMSE$ انتخاب می‌گردد. در عمومی حالت این روش کالیبراسیون، معیار انتخاب رابطه بهینه، حداقل مجذور مربعات خطای داده‌های رادار و بارش در بین تمامی معادلات بر آورد شده مبتنی بر تغییر a و b می‌باشد. در طی رساله خود مشخص کرد رنج تغییرات پارامتر a بین ۳۱-۵۰۰ و تغییرات b در محدوده ۱/۱ الی ۲ می‌باشد (Chumchean, 2004). بر این اساس در این تحقیق با تغییر در هر دو پارامتر a و b (در محدوده ۳۰-۵۰۰ و ۱/۱ الی ۲/۱) روابط $Z-R$ برآورد و مقادیر بازتابش رادار با استفاده از این روابط به بارش تبدیل و فرایند انتخاب مدل بهینه از میان این روابط مبتنی بر دو سناریو تعیین گردید. در سناریو اول مقادیر آماره $RMSE$ برای بارش‌های حاصل از تمامی توابع تبدیل $Z-R$ محاسبه و در نهایت رابطه بهینه بر اساس حداقل خطای $RMSE$ مشخص گردید. (جدول ۱۰، ۱۱ و ۱۲) روابط تولید کننده بارش رادار با حداقل خطای $RMSE$ را نمایش می‌دهد که از میان این روابط، روابط $Z = 166R^2$ ، $Z = 165R^{1.7}$ و $Z = 48R^2$ به ترتیب برای داده‌های رگبار، میانگین بارش روزانه و بارش روزانه دارای پایین‌ترین خطای $RMSE$ در میان تمامی روابط $Z-R$ محاسبه شده می‌باشد. در سناریو دوم جهت انتخاب رابطه بهینه، آماره ضریب اریبی برای تمامی بارش‌ها محاسبه و روابط $Z-R$ ایجاد کننده ضریب اریبی ۱ ($B=1$) از میان این روابط تفکیک شد. آماره خطای $RMSE$ برای این روابط محاسبه و در نهایت از میان روابط منتخب رابطه دارای پایین‌ترین خطا به عنوان بهترین معادله $Z-R$ انتخاب گردید. (جدول ۱۳، ۱۴ و ۱۵) روابط $Z-R$ ایجاد کننده ضریب اریبی ۱ و مقدار خطای $RMSE$ هر یک از این روابط را نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج، روابط $Z = 143R^2$ ، $Z = 164R^{1.7}$ و $Z = 50R^2$ به ترتیب برای داده‌های رگبار، میانگین بارش روزانه و بارش روزانه دارای پایین‌ترین خطای $RMSE$ در میان تمامی روابط $Z-R$ با ضریب اریبی برابر ۱ می‌باشند.

نتیجه گیری

بررسی عوامل ایجاد کننده عدم قطعیت در داده‌های بارش رادار اهواز نشان داد پدیده میرایی موج در مورد رادار اهواز به دلیل فرکانس عملیاتی ۲/۷-۲/۹ این رادار (باند S) تاثیر چندانی بر کاهش کیفیت داده‌های رادار ندارد.

پدید جذب و برخورد پرتوی رادار با ارتفاعات از جمله عوامل مهم در کاهش کیفیت داده‌های رادار اهواز می‌باشد که در این بررسی با توجه به مقاطع توپوگرافیکی ترسیم شده و معادلات ارتفاع نمونه برداری رادار، زاویه ارتفاعی ۰/۶۴۴ به عنوان زاویه حداقل بهینه جهت حذف کامل پدیده پرتوهای مسدود شده رادار بر آورد گردید. بر اساس نتایج کالیبراسیون رادار به روش نموداری روابط $Z = 382.23R^{1.6}$ ، $Z = 281R^{1.6}$ و $Z = 246.69R^{1.6}$ به ترتیب برای رگبارها، بارش‌های روزانه و میانگین بارش روزانه به عنوان معادلات بهینه برآورد گردید. بررسی این روابط نشان می‌دهد بارش‌های تولید شده مبتنی بر این روابط دارای مقادیر خطای $RMSE$ پائین‌تری در مقایسه با رابطه پایه ($Z = 200R^{1.6}$) می‌باشند (جدول ۴، ۵ و ۶).

در کالیبراسیون رادار به روش تعدیل ضریب اریبی، معادلات بهینه به ترتیب برای رگبارها، بارش‌های روزانه و میانگین بارش روزانه برابر با: $Z = 243.95R^{1.6}$ ، $Z = 240.2R^{1.6}$ و $Z = 236.3R^{1.6}$ برآورد گردید.

مقایسه نتایج آماری دو روش کالیبراسیون نموداری و تعدیل ضریب اریبی نشان می‌دهد روش نموداری در مجموع باعث کاهش بیشتر خطای $RMSE$ نسبت به کالیبراسیون به روش تعدیل ضریب اریبی می‌گردد (جدول ۱۶).

بررسی همزمان نتایج آماری تمامی روش‌های کالیبراسیون رادار و مقایسه آنها با رابط پیش فرض رادار $Z = 200R^{1.6}$ نشان می‌دهد (جدول ۱۶) تمامی تکنیک‌های مورد استفاده در این تحقیق باعث بهبود کیفیت داده‌های بارش رادار در مقایسه با رابطه اولیه شده است، بنابراین تمامی روابط نهایی انتخاب شده در انتهای هر روش کالیبراسیون صلاحیت لازم جهت استفاده در رادار را در مقایسه با معادله اولیه خواهد داشت. اما از میان این روش‌ها روش حداقل مجذور مربعات خطا مبتنی بر تغییر هر دو پارامتر a و b در مقایسه با سایر روش‌ها نتایج بهتری را ایجاد می‌نماید. بررسی نتایج تمامی روش‌های کالیبراسیون استفاده شده نشان می‌دهد، روابط $Z = 166R^2$ برای بارش رگبار، $Z = 48R^2$ جهت بارش روزانه و رابطه $Z = 165R^{1.7}$ برای میانگین بارش روزانه، دارای پایین‌ترین مقادیر خطا در مقایسه با سایر روش‌های کالیبراسیون می‌باشد و در نهایت این روابط به عنوان روابط بهینه از میان تمامی روش‌های کالیبراسیون انتخاب گردید (جدول ۱۶).

سپاسگزاری

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند ضمن تشکر از همکاری سازمان هواشناسی کشور و سازمان آب و برق خوزستان از زحمات آقایان مهندس عقبا، مهندس گلچین، مهندس ریحانی، مهندس سلطانی و مهندس محرایی نژاد قدردانی نمایند.

 جدول ۱۰. روابط بهینه و رابطه نهایی $Z-R$ برای داده‌های رگبار بر اساس حداقل $RMSE$

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2	b=2.1
آماره های خطا	$630R^{1.4}$	$480R^{1.5}$	$382R^{1.6}$	$305R^{1.7}$	$246R^{1.8}$	$201R^{1.9}$	$166R^2$	$138R^{2.1}$
ME	-۰/۰۴۷	-۰/۱۳۰	-۰/۰۸۷	-۰/۰۶۸	-۰/۰۵۲	-۰/۰۳۷	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۳
MAE	۰/۲۵۱	۰/۲۲۸	۰/۲۱۹	۰/۰۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۹	۰/۲۲۲	۰/۲۲۵
RMSE	۰/۵۴۱	۰/۴۶۸	۰/۴۴۷	۰/۴۴۱	۰/۴۳۷	۰/۴۳۵	۰/۴۳۵	۰/۴۳۷
MBE	۰/۸۸	۱/۵۸	۱/۳۲	۱/۲۴	۱/۱۷	۱/۱۲	۱/۰۸	۱/۰۴
R^2	۰/۵۵۲۳	۰/۵۰۸۳	۰/۵۳۴۰	۰/۵۶۴۴	۰/۵۷۱۶	۰/۵۷۴۸	۰/۵۷۵۰	۰/۵۷۲۸

جدول ۱۱. روابط بهینه و رابطه نهایی Z-R برای داده‌های روزانه بر اساس حداقل RMSE

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2	b=2.1	
آماره های خطا	$200R^{1.6}$	$710R^{1.4}$	$444R^{1.5}$	$281R^{1.6}$	$179R^{1.7}$	$115R^{1.8}$	$74R^{1.9}$	$48R^2$	$32R^{2.1}$
ME	1.090	-۰/۵۹۲	-۰/۱۸۲	-۰/۸۴۰	-۰/۵۳۸	-۰/۲۸۴	-۰/۰۴۴	۰/۱۵۵	۰/۲۲۷
MAE	3.219	۳/۱۹۵	۳/۰۰۷	۲/۸۹۰	۲/۸۲۶	۲/۸۱۷	۲/۸۶۴	۲/۹۳۳	۲/۹۹۴
RMSE	5.235	۴/۹۵۶	۴/۶۶۶	۴/۴۵۲	۴/۳۰۴	۴/۲۱۳	۴/۱۶۷	۴/۱۵۹	۴/۱۷۹
MBE	0.892	۱/۲۱۵	۱/۱۵۱	۱/۱۰۳	۱/۰۶۴	۱/۰۳۳	۱/۰۰	۰/۹۸۳	۰/۹۷۵
R ²	0.734	۰/۶۷۱	۰/۷۰۸	۰/۷۳۴	۰/۷۵۲	۰/۷۶۲	۰/۷۶۷	۰/۷۶۸	۰/۷۶۶

جدول ۱۲. روابط بهینه و رابطه نهایی Z-R برای داده‌های میانگین بارش روزانه بر اساس حداقل RMSE

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2	
آماره های خطا	$200R^{1.6}$	$558R^{1.4}$	$370R^{1.5}$	$247R^{1.6}$	$165R^{1.7}$	$111R^{1.8}$	$75R^{1.9}$	$51R^{1.9}$
ME	۰/۸۶۵	-۰/۶۴۸	-۰/۴۱۱	-۰/۲۱۰	-۰/۰۳۱	۰/۱۱۶	-۰/۲۳۸	۰/۳۳۰
MAE	۱/۷۰۶	۱/۲۹۱	۱/۱۹۷	۱/۲۱۷	۱/۲۵۹	۱/۳۱۴	۱/۳۷۷	۱/۴۸۵
RMSE	۲/۰۴۸	۱/۸۳۱	۱/۶۶۰	۱/۵۶۹	۱/۵۴۹	۱/۵۸۵	۱/۶۵۷	۱/۷۵۳
MBE	۰/۹۰۱	۱/۰۹۰	۱/۰۵۵	۱/۰۲۷	۱/۰۰۴	۰/۹۸۶	-۰/۹۷۱	۰/۹۶۰
R ²	۰/۹۱۴	۰/۸۸۱	-۰/۹۰۲	۰/۹۱۴	۰/۹۱۵	۰/۹۱۱	-۰/۹۰۳	۰/۸۹۲

جدول ۱۳. روابط بهینه و رابطه نهایی Z-R برای داده‌های رگبار بر اساس ضریب اریبی ۱ (B=1) و شرط حداقل RMSE

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2	b=2.1	
آماره های خطا	$200R^{1.6}$	$332R^{1.4}$	$283R^{1.5}$	$244R^{1.6}$	$212R^{1.7}$	$185R^{1.8}$	$162R^{1.9}$	$143R^2$	$117R^{2.1}$
ME	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
MAE	۰/۲۵۱	۰/۲۴۶	۰/۲۳۷	۰/۲۳۱	۰/۲۲۸	۰/۲۲۶	۰/۲۲۷	۰/۲۲۸	
RMSE	۰/۴۵۱	۰/۵۸۱	۰/۵۲۶	۰/۴۸۹	۰/۴۶۴	۰/۴۵۰	۰/۴۴۲	۰/۴۳۸	
MBE	۰/۸۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	
R ²	۰/۵۵۲۳	۰/۵۰۸۳	۰/۵۳۴۰	۰/۵۵۲۳	۰/۵۶۴۴	۰/۵۷۱۶	۰/۵۷۴۸	۰/۵۷۵۰	

جدول ۱۴. روابط بهینه و رابطه نهایی Z-R برای داده‌های بارش روزانه بر اساس ضریب اریبی ۱ (B=1) و شرط حداقل RMSE

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2	b=2.1	
آماره های خطا	$200R^{1.6}$	$541R^{1.4}$	$360R^{1.5}$	$240.2R^{1.6}$	$161.3R^{1.7}$	$109R^{1.8}$	$73R^{1.9}$	$50R^2$	$34R^{2.1}$
ME	۱/۰۹۰	-۰/۰۰۶	-۰/۰۱۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۴	-۰۰۸۰	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۳
MAE	۳/۲۱۹	۳/۱۸۲	۳/۰۲۷	۲/۹۱۷	۲/۸۶۱	۲/۸۵۰	۲/۸۷۰	۲/۹۰۵	۲/۹۶۴
RMSE	۵/۲۳۵	۵/۵۲۸	۴/۹۸۱	۴/۶۰۹	۴/۳۶۸	۴/۲۲۹	۴/۱۶۸	۴/۱۶۲	۴/۱۹۴
MBE	۰/۸۹۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
R ²	۰/۷۳۴	۰/۶۷۱	۰/۷۰۸	۰/۷۳۴	۰/۷۵۲	۰/۷۶۲	۰/۷۶۷	۰/۷۶۸	۰/۷۶۶

جدول ۱۵. روابط بهینه و رابطه نهایی Z-R برای داده‌های بارش میانگین روزانه بر اساس ضریب اریبی (B=1) و شرط حداقل RMSE

معادله پایه	b=1.4	b=1.5	b=1.6	b=1.7	b=1.8	b=1.9	b=2
آماره های خطا	$495R^{1.4}$	$341.5R^{1.5}$	$236.3R^{1.6}$	$164R^{1.7}$	$114R^{1.8}$	$79.4R^{1.9}$	$55R^2$
ME	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۳
MAE	۱/۴۴۸	۱/۳۲۱	۱/۲۴۵	۰/۲۶۴	۱/۲۹۲	۱/۳۸۳	۱/۴۹۰
RMSE	۲/۰۱۳	۱/۷۳۶	۱/۵۹۰	۱/۵۵۰	۰/۵۸۸	۱/۶۷۴	۱/۷۸۶
MBE	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
R ²	۰/۸۸۳	۰/۹۰۴	۰/۹۱۴	۰/۹۱۶	۰/۹۱۲	۰/۹۰۴	۰/۸۹۳

جدول ۱۶. نتایج نهایی روش‌های مختلف کالیبراسیون داده‌های رادار اهواز

معادله پایه	ضرایب a و b متغیر		ضریب a متغیر و b ثابت	
	روش حداقل RMSE	ضریب اریبی ۱	روش نموداری	تعدیل ضریب اریبی
داده‌های رگبار	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 166R^2$	$Z = 143.5R^2$	$Z = 243.95R^{1.6}$
RMSE	۰/۵۴۱	۰/۴۳۵	۰/۴۳۸	۰/۴۸۹
بارش روزانه	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 48R^2$	$Z = 49.7R^2$	$Z = 240.2R^{1.6}$
RMSE	۵/۲۳۵	۴/۱۵۹	۴/۱۶۲	۴/۶۰
میانگین بارش روزانه	$Z = 200R^{1.6}$	$Z = 165R^{1.7}$	$Z = 164R^{1.7}$	$Z = 236.3R^{1.6}$
RMSE	۲/۰۴۸	۱/۵۴۹	۱/۵۵۰	۱/۵۹۰

منابع

- طوفانی نژاد، ز.، کمالی، غ.، علیزاده، م.، ۱۳۸۸، کاربرد رادارهای هواشناسی باند X در برآورد میزان بارندگی در حوضه های کوچک، مجله آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۱، ص ۶۷-۵۷
- Anagnostou. EN, Krajewski. WF, Smith JA, 1999, Uncertainty quantification of mean-areal radar rainfall estimates, J Atmos Oceanic Technol, Vol: 16, p206-15
- Andrieu. H., and J.D. Creutin., 1995, Identification of vertical profiles of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method, J. Appl. Meteorol, Vol: 34, p 225-239
- Austin. P.M., 1987, Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall, Mon, Weather Rev., Vol: 115, p 1053-1070
- Battan. L.J. 1973, Radar observation of the atmosphere, University of Chicago Press, Chicago.
- Brandes. E. A., G. F. Zhang., and J. Vivekanandan., 2004, Drop size distribution retrieval with polarimetric radar: Model and application, J Appl Meteorol, Vol: 43, p 461-475
- Chumchean. S., 2004, Improved Estimation of Radar Rainfall for Use in Hydrological Modelling. Ph.D. thesis, University of New South Wales
- Collier. C. G., 1996, Applications of weather radar systems: A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Doviak. R.J., and D.S. Zmic., 1984, Doppler radar and weather observations, Academic Press, Orlando, Florida, U.S.A .
- Gabella. M., and G. Perona., 1998, Simulation of the orographic influence on weather radar using a geometric-optics approach, J. Atmos. Oceanic Tech., Vol: 15, No: 6, p1485-1494.
- Gray W. and Larsen. H., 2004, Radar Rainfall Estimation in the New Zealand Context, Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Melbourne, Australia.
- Hildebrand. P.H., 1978, Iterative correction for attenuation of 5 cm radar, J. Appl. Meteorol., Vol: 17, p 508-514
- Hitschfeld. W., and Bordan, J., 1954, Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths, J. Meteorology Vol: 11, p 58-67
- Holleman. I., 2007, Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates. Meteorol Appl, Vol: 14, p 195-203
- Jordan. P.W., 2000, Effect on flood modeling of rainfall variability and radar rainfall measurement error, Unpublished PhD thesis, Faculty of Engineering, Monash University, Clayton, Victoria.
- Kitchen. M., R. Brown, and A. Davies., 1994, Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation, Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol: 120, p 231- 254
- Krajewski. WF, Smith. JA, 2002, Radar hydrology: rainfall estimation, Adv. Water Resour, Vol: 25: p 1387-1394

- Lee. G., and L. Zawadzki., 2006, Radar calibration by gage, disdrometer, and polarimetry: Theoretical limit caused by the variability of drop size distribution and application to fast scanning operational radar data, *J. Hydrol*, Vol:328,p 83-97
- Linsley., R.K., Kohler. M.A and Paulhus. J.L.H., 1988, *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, London, UK.
- Lombardo. F., Napolitano. F., Russo. F., Scialanga. G., Baldini. L. and Gorgucci. E., 2006, Rainfall estimation and ground clutter rejection with dual polarization weather radar, *Advances in Geosciences*, Vol: 7, p: 127-130
- Mapiam. P., 2008, Climatological Z-R relationship for radar rainfall estimation in the upper Ping river basin, *ScienceAsia*, Vol: 34, p 215-222
- Marshall. J.S., and W. Palmer., 1948, The distribution of raindrops with size. *J.Meteorol*, Vol: 5, p 165-166
- Ramli. S., 2011, Radar Hydrology: New Z/R Relationships for Klang River Basin, Malaysia, *International Conference on Environment Science and Engineering*, Vol: 8, p 248-251
- Rosenfeld. D., Wolff. D. B., and Atlas, D., 1993, General probability matched relations between radar reflectivity and rain rate, *J.Appl. Meteorol.*, Vol:32,p 50-72
- Seed. A.W., Sirivardena. L., Sun. X., Jordan. P., Elliott. J., 2002, On the calibration of Australian weather radars, *Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report, 02/7*,p 40
- Smith. J.A., Krajewski. W.F., 1991, Estimation of mean field bias of radar rainfall estimates, *J. Appl. Meteorol*, Vol: 30, p 397-411
- Steiner. M., Smith. JA. Burges. SJ. Alonso CV., Darden RW., 1999, Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. *Water Resour Res*, Vol: 35, p 2487-503
- Uijlenhoet. R., 2001, Raindrop size distributions and radar reflectivity rain rate relationships for radar hydrology, *Hydrology Earth System*, Vol: 5, p: 615-627
- Uijlenhoet. R., Wielen. S.H., van der and Berne. A., 2006, Uncertainties in rainfall retrievals from ground based weather radar: overview, case study, and simulation experiment, *Hydrol. Earth Syst, Sci. Discuss*, Vol: 3, p 2385- 2436
- Ulbrich. C.W. and N.E. Miller., 2001, Experimental test of the effects of Z-R law variations on comparison of WSR-88D rainfall amounts with surface rain gauge and disdrometer data. *Weather Forecast*. Vol: 16, p 369-374
- Van Vleck. JH, 1947, Absorption of microwaves by oxygen. *Phys, Rev*. Vol: 71, p 413-24
- Vignal. B, Krajewski.WF, 2001, Large-sample evaluation of two methods to correct range-dependent error for WSR-88D rainfall estimates, *J. Hydrometeorol*, Vol: 2, p 490-504