

## کاربرد رادارهای هواشناسی باند X در برآورد میزان بارندگی در حوضه‌های کوچک

زهرا طوفانی نژاد<sup>۱\*</sup> - غلامعلی کمالی<sup>۲</sup> - میلاد علیزاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۳/۱

تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۱/۲۱

### چکیده

اطلاع از میزان واقعی ارتفاع بارندگی برای شبیه سازی وقایع هیدرولوژیک و پیش‌بینی وضعیت هوا امری بسیار مهم است. داده‌های راداری می‌توانند دید روشنی از تغییرات مکانی بارندگی در اختیار قرار دهد که به کمک این داده‌ها، تخمین شدت بارندگی در سطحی وسیع را امکان‌پذیر می‌سازد. سیستم رادارهای هواشناسی معمولاً با باندهای فرکانسی S، X و C کار می‌کند. از آنجایی که سیستم باند X به آنتن کوچکتری نسبت به سایر باندها نیاز دارد، برای نظارت حوضه‌های کوچک مناسب به نظر می‌رسد. البته شایان ذکر است که میزان بارندگی تخمین زده با رادار به دلیل وجود برخی خطاها مانند کلاتر زمین و تضعیف سیگنال‌های رادار در طول مسیر دارای مقداری خطا می‌باشد. در این مطالعه، توانایی سیستم راداری باند X در تخمین بارندگی در یک منطقه شهری در کشور هلند مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو ابتدا داده‌های راداری از خطاهای ناشی از کلاتر زمین و تضعیف سیگنال تصحیح شده و سپس شدت بارندگی از روی داده‌های اصلاح شده محاسبه شده است 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 می‌باشد، اما اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط رادار نیاز به اصلاح و واسنجی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** رادارهای هواشناسی زمینی، کلاتر زمین، تضعیف سیگنال، تخمین بارندگی

### مقدمه

سنج‌ها قابلیت اندازه‌گیری بارندگی منطقه‌ای را ندارند و این عدم دقت در تخمین میزان بارندگی یک منطقه وسیع به علت توزیع نامناسب مکانی آنها است (۱۵ و ۲۱).

ماهواره‌ها یکی از گزینه‌های مناسب برای مشاهده بارندگی در مقیاس‌های وسیع‌اند که اندازه‌گیری‌ها را با قدرت تفکیک زمانی و مکانی کم انجام می‌دهد. استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ماهواره‌ها برای مساحت‌های کوچک (کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر مربع) سخت است. به علاوه دقت بارندگی تخمین زده شده از این روش با کاهش مقیاس زمانی (مانند تبدیل ماهانه به روزانه) کم می‌شود (۳ و ۱۱).

رادارهای هواشناسی معایب باران‌سنج‌ها و ماهواره‌ها را ندارند. این رادارها توانایی اندازه‌گیری بارندگی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا در سطح وسیع را دارند. در این زمینه رادارهای هواشناسی دارای چندین مزیت نسبت به سایر وسایل اندازه‌گیری هستند (۱۸ و ۱۹). از جمله: (۱) توانایی پوشش مساحت‌های وسیع با قدرت تفکیکی زمانی و مکانی بالا و (۲) قابل استفاده به عنوان ورودی در مدل‌های پیش‌بینی و سیلاب. اما بارندگی منطقه‌های برآورد شده با رادارهای

در خیلی از کاربردهای هیدرولوژیک، برآورد بارندگی یک حوضه یکی از فاکتورهای اساسی در امر مدل سازی به حساب می‌آید. دقت و میزان واقعی بودن اندازه‌گیری‌های توزیع مکانی و زمانی بارندگی در کارهای هیدرولوژیک بسیار مهم است (۶، ۱۲، ۱۸، ۱۹، ۲۰).

بارندگی را می‌توان به سه روش اندازه‌گیری کرد: باران‌سنج‌ها، ماهواره‌های هواشناسی و رادارهای هواشناسی زمینی. سنتی‌ترین روش اندازه‌گیری میزان بارندگی در سطح زمین استفاده از باران‌سنج‌ها می‌باشد. ارزان قیمت بودن باران‌سنج‌ها و اندازه‌گیری مستقیم میزان تجمعی بارندگی در یک نقطه، از مزیت‌های آنها محسوب می‌شود. هرچند که این وسیله دارای معایبی نیز می‌باشد، از آن جمله در شدت‌های زیاد بارندگی دارای تخمین کم است و همچنین باران-

۱- کارشناس ارشد، پژوهشکده هواشناسی

(Email: zahra.toofani@asmerc.ac.ir)

\*- نویسنده مسئول :

۲- دانشیار پژوهشی هواشناسی کشاورزی، پژوهشکده هواشناسی

۳- دانشجوی کارشناسی گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

اصلی‌ترین مسئله در باند X است و باید از روی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط رادار که برای محاسبه شدت بارندگی استفاده می‌شود، حذف گردد (۱۶، ۱۴، ۱۰).

از آنجایی که رادارهای هواشناسی با باند X برای حوضه‌های کوچک مناسب است و در ایران چنین امکاناتی برای اینگونه حوضه‌ها (مانند حوضه استان گلستان) وجود ندارد، از این رو برای ارزیابی توانایی سیستم راداری باند X و همچنین برای اندازه‌گیری بارندگی در یک حوضه کوچک از اطلاعات یک حوضه کوچک واقع در کشور هلند استفاده شده است. هدف اصلی از این تحقیق امکان استفاده از رادارها با باند X برای برخی از حوضه‌های کوچک داخل کشور و امکان واسنجی داده‌های این نوع رادارها با باران‌سنج‌های این حوضه‌ها می‌باشد. به علاوه در این مطالعه اندازه‌گیری‌های راداری انجام شده با مقادیر ثبت شده توسط ۴ باران‌سنج نصب شده در منطقه برای بارندگی ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱ مقایسه می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های راداری و باران‌سنج در منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری‌های انجام شده با رادار X باندی که در دانشگاه Delft هلند نصب شده است با اندازه‌گیری‌هایی که از ۴ باران‌سنج نصب شده در منطقه به دست آمده، مقایسه شده است. بدین منظور از داده‌های بارندگی ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱ در جنوب غربی هلند استفاده شده است (شکل ۱). بیشترین شدت بارندگی لحظه‌ای ثبت شده توسط باران‌سنج‌ها ۳۵ میلی‌متر در ساعت و بیشترین شدت بارندگی لحظه‌ای محاسبه شده توسط رادار ۲۸/۲ میلی‌متر در ساعت است. هر یک از باران‌سنج‌ها مساحتی به شعاع ۲۰ سانتی‌متر را پوشش می‌دهند و دقت کاری آنها در حدود ۰/۲ میلی‌متر است. این باران‌سنج‌ها به منظور بررسی اندازه‌گیری‌های رادار در روی یک خط پشت سر هم نصب شده‌اند و در کل منطقه مورد مطالعه پراکنده نمی‌باشند. در این تحقیق از رادار SOLIDAR<sup>6</sup> که در باند X کار می‌کند و روی سقف دانشکده الکترونیک دانشگاه Delft هلند در ارتفاعی در حدود ۱۰۰ متری سطح زمین نصب شده، استفاده شده است. پرتو رادار دارای زاویه ۱/۷ درجه و طیف آن ۱۲۰ متر و آزمون آن ۱/۸۷۵ درجه است. این نوع رادار توانایی اندازه‌گیری شدت بارندگی تا فاصله ۱۵ کیلومتری از مرکز رادار را دارد و هر ۱۶ ثانیه یک بار یک تصویر از منطقه تحت پوشش خود تولید می‌کند (۱۰).

### آماده‌سازی داده‌های خام راداری

- حذف خطای کلاتر زمین از داده‌ها

هواشناسی با مشکل کیفیت داده‌ها مواجه است و این داده‌ها به منظور حذف خطاهایی مانند کلاتر زمین، پخش نامتعارف سیگنالها و مسدود شدن پرتوها می‌بایست اصلاح شوند (۱۲). یکی دیگر از معایب این روش، اندازه‌گیری غیر مستقیم شدت بارندگی می‌باشد. بدین منظور شدت بازتابش رادار<sup>۱</sup> (Z) باید به روشی مناسب (مانند رابطه مارشال-پالمر) به شدت بارندگی (R) تبدیل گردد (۱۳).

اخیراً علاقمندی محققین به رادارهایی که با طول موجهای کوتاه، حدود ۱-۵ سانتی‌متر، کار می‌کنند بیشتر شده است. به عنوان مثال به رادارهایی که با باندهای X و K توسط ماهواره‌ها کار می‌کنند (مانند TRMM<sup>2</sup> و GPM<sup>3</sup>) می‌توان اشاره کرد.

در چنین طول موج‌هایی، داده‌های خام راداری دارای خطاهای متفاوتی می‌باشد لذا قبل از استفاده از این داده‌ها باید آنها را اصلاح نمود. یکی از عوامل خطا کلاتر<sup>۴</sup> می‌باشد. کلاتر سیگنال‌های ناخواسته‌ای است که از بازتابش موانع غیر هواسنجی مانند کوه‌ها، ساختمان‌ها و کارخانجات صنعتی (کلاتر ثابت یا زمینی) و یا پرندوها، هواپیماها و ... (کلاتر متحرک) ایجاد شده است. چنین موانعی باعث می‌شوند که سیگنال‌ها به پشت آنها نرسند و هر آنچه در پشت این موانع قرار دارند از دید رادار دور بماند (۲، ۵ و ۱۲).

یکی دیگر از خطاهایی که می‌بایست از داده‌های خام راداری حذف شوند، خطای ناشی از تضعیف سیگنالها<sup>۵</sup> در مسیر بارش می‌باشد. زمانی که ذرات بارش انرژی دریافتی از آنتن را بازتاب می‌کنند، مقداری از انرژی در این رفت و برگشت از بین می‌رود و در حقیقت از قدرت سیگنال‌ها کاسته می‌شود. تضعیف سیگنال در طول موج‌های کوتاه از مشکلات اساسی هواشناسان و هیدرولوژیست‌ها می‌باشد. در بارندگی‌های سنگین، اطلاعات بازتاب می‌تواند از بخش‌های وسیعی از اسکن رادار ناپدید شود. بنابراین طول موجهای تضعیف شده باعث محدودیت کاربردی داده‌ها در اندازه‌گیری بارندگی می‌شود؛ به علاوه تضعیف سیگنال باعث کاهش حساسیت ردیابی بارش در بارندگی می‌شود. اما در فرکانس‌های بالا مانند باندهای C و S تضعیف سیگنال‌های راداری ناچیز و قابل اغماض است (۸).

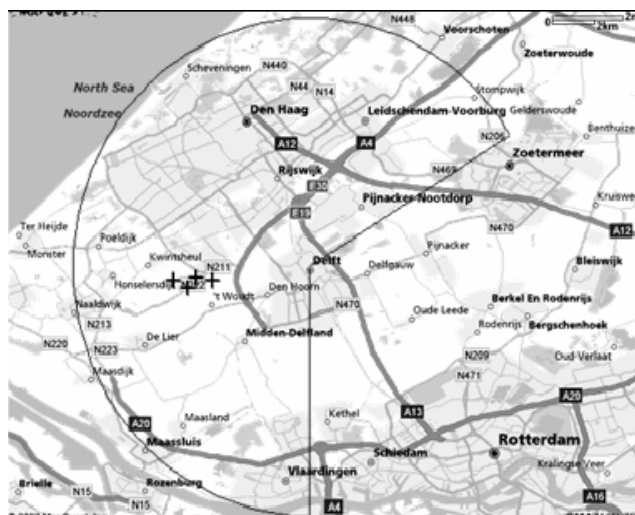
رادارهای باند X در طول موج‌های ۲/۵ تا ۴ سانتی‌متری کار می‌کنند. به دلیل کوچک بودن طول موج‌ها در این باند، این نوع رادارها بسیار حساس هستند و جزئیات ریزتری را می‌توانند آشکار سازند. از آنجایی که سیستم‌هایی که با باند X کار می‌کنند به آنتن‌هایی کوتاهتر نسبت به باندهای C و S نیاز دارند؛ برای پایش حوضه‌های هیدرولوژیک کوچک مناسب‌تر هستند. مسئله تضعیف سیگنال‌ها

- 1- Reflectivity factor
- 2- Tropical Rainfall Measuring Mission satellite
- 3- Global Precipitation Measurement satellite
- 4- Clutter
- 5- Attenuation

6- Solid-State Weather Surveillance Radar

تهیه این نقشه انتخاب حد آستانه عدم پذیرش است. در هنگام اندازه-گیری‌های وسیع با رادار این حد آستانه طوری باید انتخاب گردد که ۹۰٪ بازتاب‌های کلاترهای زمین از آن حذف گردد. هر سلول زیر مقدار حد آستانه حذف و مقادیر بالاتر از حد آستانه به عنوان کلاتر تعیین می‌شود.

حذف کلاتر زمین از داده‌های راداری یک پیش نیاز به منظور افزایش کیفیت و کمیت داده‌های راداری است. به منظور به حداقل رساندن میزان خطای ناشی از کلاتر زمین نیاز است که ابتدا نقشه کلاتر منطقه ترسیم گردد. راحت‌ترین راه برای تهیه این نقشه، استفاده از میانگین تصاویر راداری در شرایط خشک (بدون بارندگی) می‌باشد (نقشه میانگین کلاتر زمینی). سخت‌ترین و مهمترین قسمت در



(شکل ۱) - نقشه قسمت غربی هلند با حداکثر طیف رادارهای هواشناسی SOLIDAR X-band به همراه موقعیت ایستگاههای باران سنج (+)

برای استفاده از این فیلتر روی تصاویر داده‌های خام باید دو نکته را در نظر داشت (۵):

- ۱- تمام سلولهای نقشه کلاتر می‌بایست دارای یک وزن باشند. وزن سلول ۱ است اگر در آن کلاتر رخ نداده باشد. در غیر این صورت صفر است.
- ۲- فیلتر روی تمام قسمتهای تصویر حرکت نمی‌کند بلکه تنها روی قسمتهایی از تصاویر که کلاتر در آنها روی داده است، اثر می‌کند. یعنی این روش به موقعیت کلاترها بستگی دارد.

• تصحیح خطای تضعیف سیگنال‌ها

تضعیف سیگنال‌ها باعث محدودیت در اندازه‌گیری میزان بارندگی و همچنین کاهش میزان دقت اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط رادار به منظور حذف خطا، تضعیف سیگنال و افزایش میزان دقت بارش اندازه‌گیری شده می‌بایست تصحیح شود (۸ و ۱۴).

برای اصلاح و حذف خطا معمولاً فرض بر آن است که بین شدت بازتابش رادار (Z) و ضریب تضعیف سیگنال (k) یک رابطه توانی وجود دارد:

$$k = \alpha Z^\beta \quad (۱)$$

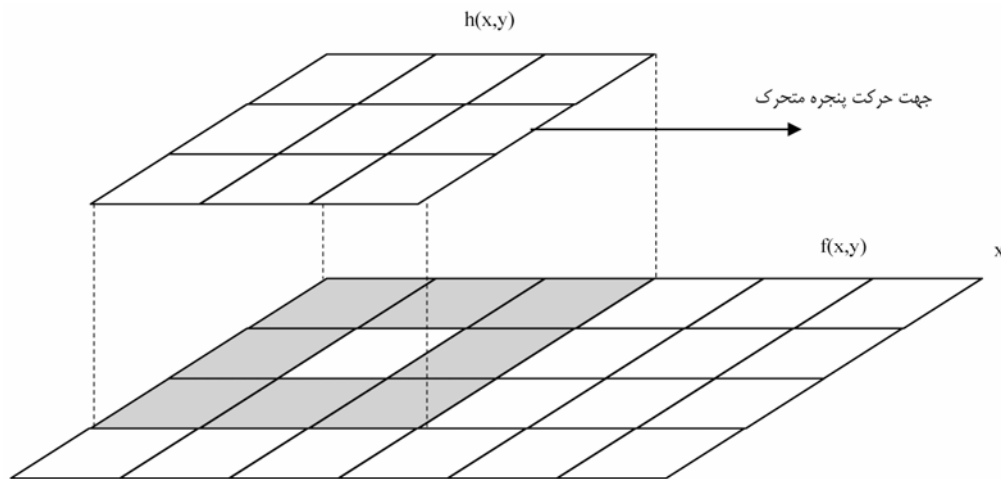
عیب این روش تهیه نقشه کلاتر، عدم نمایش دقیق کلاترها و باقی ماندن مقداری کلاتر به عنوان داده‌های واقعی در اندازه-گیری-های راداری و کاهش قابل توجه میزان دقت در محاسبات است که همه آنها به مقدار حد آستانه انتخابی بستگی دارد (۴).

پس از آنکه نقشه کلاتر تهیه گردید، خطای کلاتر زمین را می‌توان به دو روش از روی داده‌های خام راداری حذف نمود:

روش اول: کم کردن نقشه کلاتر از تصاویر راداری  
روش دوم: استفاده از یک فیلتر است که برای حذف سلول‌هایی که در آن کلاتر رخ داده است می‌توان استفاده نمود.

روش اول ساده‌تر است که در این روش میزان کلاتر زمین از مقدار واقعی تصویر کم می‌شود (۵).

در روش دوم هر یک از سلول‌هایی که در آن کلاتر رخ داده است نادیده گرفته می‌شود و مقداری جدید برای سلول مورد نظر به روش میانگین‌گیری وزنی از سلولهای سالم اطراف آن سلول که در داخل فیلتر واقع شده‌اند، محاسبه می‌گردد. زمانی که از فیلتر استفاده می‌شود، سلولی که در آن کلاتر رخ داده است در مرکز قرار می‌گیرد و متوسط مقدار سلول‌های اطراف که در محدوده فیلتر واقع شده‌اند جایگزین مقدار قبلی سلول کلاتری می‌شود (شکل ۲). اندازه پنجره فیلتر به اندازه بزرگی فیلتر بستگی دارد و اندازه آن می‌تواند با افزایش اندازه کلاتر افزایش یابد.



(شکل ۲) - طریقه اثر گذاری فیلتر بر تصویر خام.  $h(r,s)$  نقشه وزنی کلاتر زمین و  $f(x,y)$  تصویر اصلی

مربع خطا<sup>۴</sup> (RMSE) برای مقایسه نتایج استفاده شده است.

### نتایج و بحث

همانطور که قبلاً اشاره شد، به منظور افزایش دقت نتایج حاصل از رادار، حذف خطای کلاتر زمین یک پیش نیاز مهم می‌باشد. بنابراین ابتدا می‌بایست نقشه کلاتر زمین ایجاد گردد. در این مطالعه مقدار ۲۵ dBZ به عنوان حد آستانه انتخاب شد. در شکل ۳ نقشه کلاتر منطقه نشان داده شده است که در آن مناطق سفید نشانگر پدیده کلاتر است و مناطق سیاه عاری از کلاتر هستند.

هنگامی که نقشه کلاتر منطقه در دسترس باشد اصلاح و حذف خطای کلاتر آسانتر می‌شود. در این مطالعه از دو روش مطرح شده در بند قبل برای حذف این خطا استفاده شده است. در روش اول، که ساده ترین روش است، از عمل تفاضل استفاده می‌شود و نقشه کلاتر از تصاویر برداشت شده توسط رادار کم می‌شود. اما در روش دوم اثر سلولهای اطراف بر سلولی که در آن کلاتر رخ داده است در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از یک فیلتر ۳ در ۳ استفاده شده است. مزیت این روش نسبت به روش اول در این است که اساس کار در این روش موقعیت کلاترها است در حالی که روش اول هم به موقعیت و هم به شدت کلاتر وابسته است. وابستگی به شدت کلاتر خود عاملی برای خطا است زیرا مقدار شدت کلاتر در شرایط مختلف آب و هوایی و زمانی متغیر است. به عنوان مثال میزان بازتابش از یک ساختمان تر با میزان بازتابش از یک ساختمان خشک متفاوت است. تفاوت این دو روش در شکل ۴ بهتر قابل درک می‌باشد. همانطور که از شکل ۴ بر می‌آید مقادیر پیکسل‌ها در روش اول در اکثر مناطق بیشتر از روش دوم است.

که در آن پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  به فرکانس و توزیع اندازه قطرات<sup>۱</sup> بستگی دارد (۸ و ۱۸).

### تبدیل شدت بازتابش رادار به شدت بارندگی

گام بعدی بعد از اصلاح سیگنال‌های دریافتی توسط رادار، تبدیل شدت بازتابش رادار به شدت بارندگی به منظور مقایسه با میزان واقعی بارندگی است.

همانطور که قبلاً اشاره شد رابطه مارشال - پالمر برای اکثر مطالعات استفاده می‌شود. به نظر می‌آید که این رابطه برای بارندگی چینه‌ای<sup>۲</sup> در انگلستان بسیار خوب جواب می‌دهد (۷)، اما برای کشور هلند مناسب نمی‌باشد زیرا شکل توزیع اندازه قطرات متغیر است. البته این امر کاملاً مشهود است که در هنگام تبدیل شدت بازتابش رادار به میزان شدت بارندگی، نتایج دارای خطا باشد، زیرا ضرایب به تغییرات طبیعی DSD حساس هستند و همچنین میزان خطای کلاتر نیز می‌تواند در این میزان خطا تاثیرگذار باشد.

رابطه واسنجی شده مارشال - پالمر برای اقلیم هلند به صورت زیر ارائه شده است (۹):

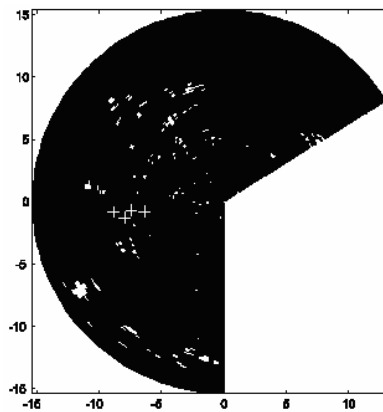
$$Z=171R^{1.73} \quad (2)$$

### مقایسه نتایج حاصل از رادار با باران‌سنج‌های نصب شده در منطقه

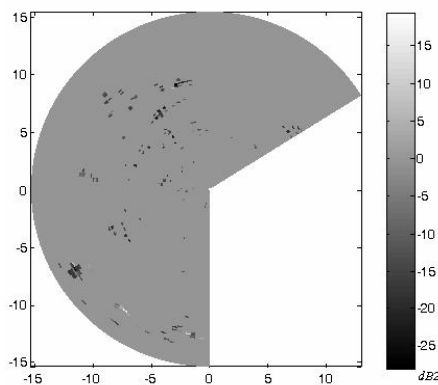
هدف از این مطالعه بیان میزان اختلاف بین میزان بارندگی اندازه گرفته شده با باران‌سنج‌ها و میزان محاسبه شده توسط رادار می‌باشد. بدین منظور از روابط آماری حداقل انحراف<sup>۳</sup> (MBE) و جذر میانگین

1- Drop Size Distribution (DSD)  
2- stratiform  
3- Mean Bias Error

4- Root Mean Squared Error



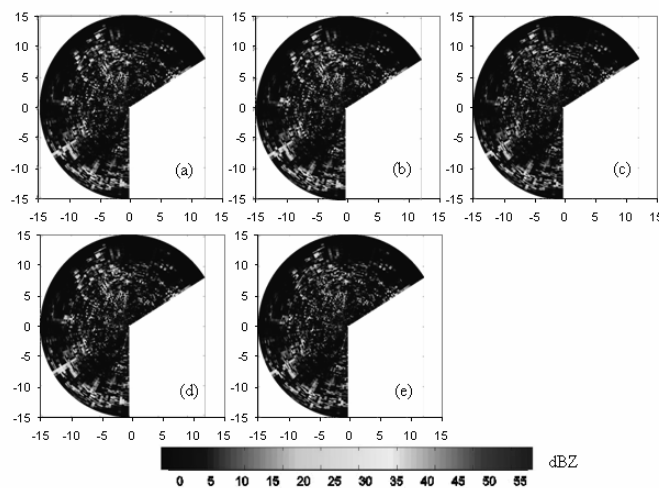
(شکل ۳) - نقشه کلاتر زمینی منطقه به همراه موقعیت ایستگاههای باران سنجی (+)



(شکل ۴) - نمایش تفاوت دو روش تصحیح کلاتر (روش دوم - روش اول) در زمان ۱۴:۴۳:۱۲ روز ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱

بازتابش راداری بعد از تصحیح خطای کلاتر زمین به دو روش است و تصاویر چهارم و پنجم بازتابش راداری بعد از اصلاح خطاها را نشان می‌دهند.

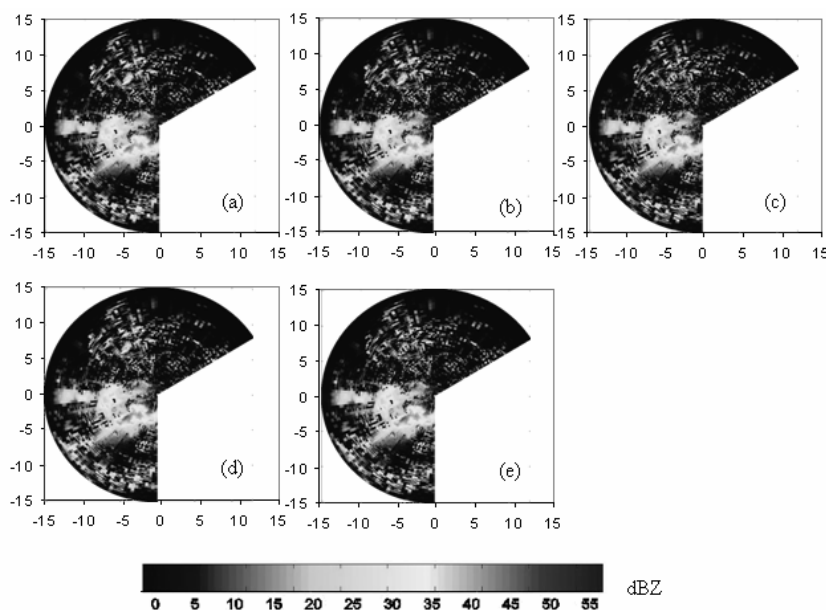
بعد از حذف خطای کلاتر می‌بایست خطای تضعیف سیگنال را نیز حذف نمود. شکل‌های ۵ و ۶ مراحل تصحیح خطا در دو گام زمانی متفاوت را نشان می‌دهد. در هر یک از شکل‌ها تصویر اول بازتابش تصحیح نشده رادار را نشان می‌دهد و تصاویر دوم و سوم بیانگر



(شکل ۵) - نمایش مراحل اصلاح تصویر خام راداری در زمان ۱۴:۴۳:۱۲ در روز ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱: (a) تصویر خام حاصل از رادار، (b و c) تصویر حاصله بعد از حذف خطای ناشی از کلاتر به دو روش، (d و e) تصویر نهایی بعد از حذف خطای تضعیف سیگنالها

شدت بارندگی، به منظور مقایسه نتایج با میزان واقعی بارندگی است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، از رابطه ۲ برای این تبدیل استفاده شده است. شکل ۷ تصویر شدت بارندگی منتج شده از شدت بازتابش راداری کاملاً اصلاح شده را نشان می‌دهد. به منظور تشخیص میزان عدم قطعیت در میزان بارندگی برآورد شده، شدت بارندگی محاسبه شده توسط رادار با نتایج باران‌سنج‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

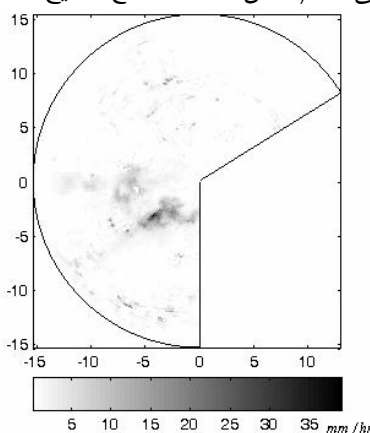
از مقایسه تصاویر b و d و همچنین c و e در شکل ۵ به این نتیجه می‌توان رسید که تفاوت چندانی بین این تصاویر وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت که اثر تضعیف سیگنال‌ها در بارندگی‌هایی با شدت کم محسوس نمی‌باشد (۱۷). اما در شکل ۶ که شدت بارندگی زیادتر از سایر زمان‌ها می‌باشد، اثر اصلاح تضعیف سیگنال کاملاً مشهود است. مرحله بعدی، بعد از حذف خطاها، تبدیل شدت بازتابش رادار به



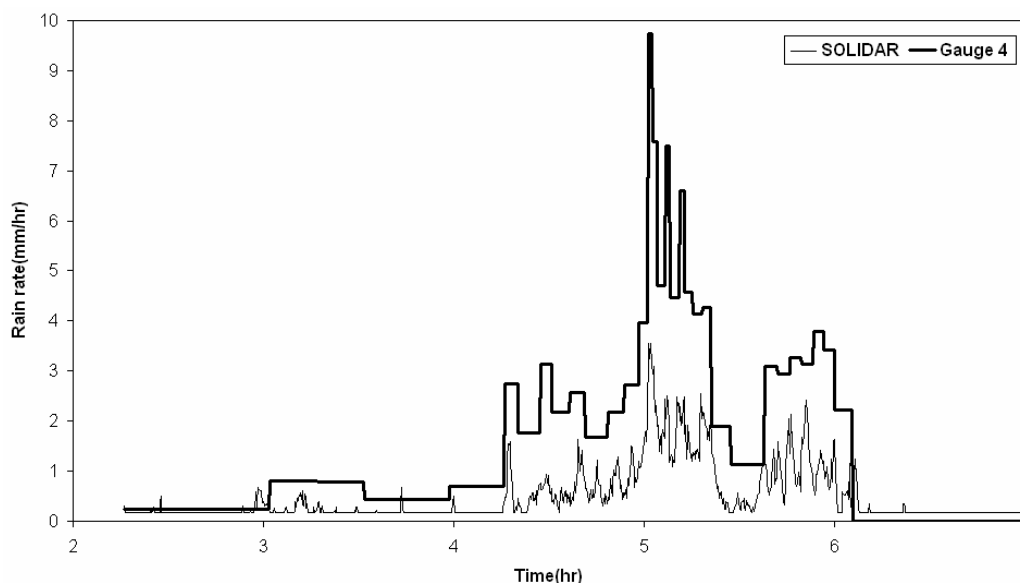
(شکل ۶) - نمایش مراحل اصلاح تصویر خام راداری در زمان ۲۳:۲۸:۱۶ در روز ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱ (a) تصویر خام حاصل از رادار، (b و c) تصویر حاصله بعد از حذف خطای ناشی از کلاتر به دو روش، (d و e) تصویر نهایی بعد از حذف خطای تضعیف سیگنالها

۸. هرچند که در بعضی موارد تفاوت‌هایی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده است که این اختلافات می‌تواند ناشی از عدم اصلاح صحیح خطاها و یا به علت خطای واسنجی باشد.

مقایسه میزان بارندگی برآورد شده با رادار با داده‌های ۴ باران‌سنج نصب شده در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که نتایج راداری از روند مقادیر اندازه‌گیری شده توسط باران‌سنج‌ها تبعیت می‌کند (شکل ۷)



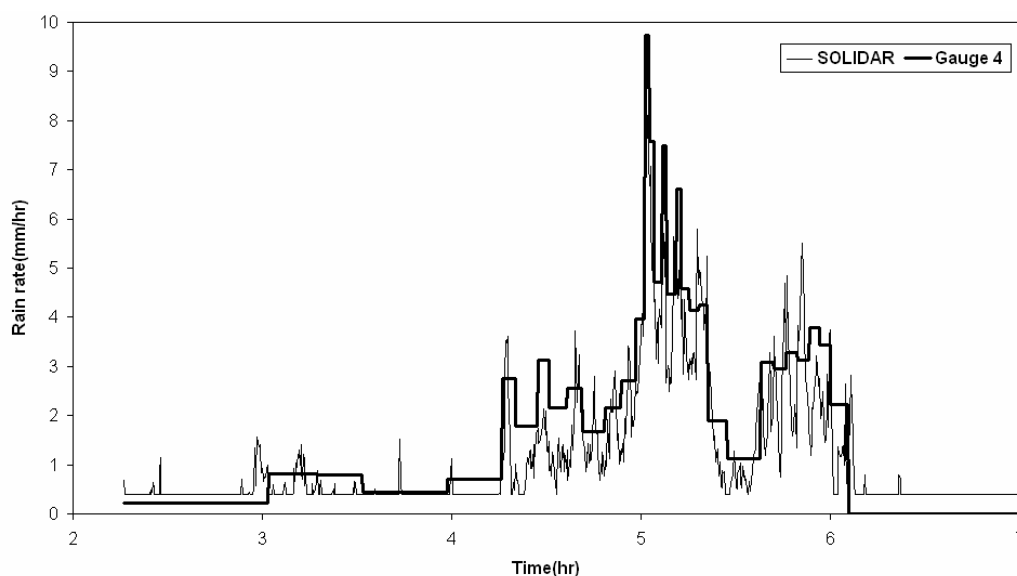
(شکل ۷) - تصویر شدت بارندگی حاصل از تبدیل داده‌های راداری بعد از اصلاح و خطاها در زمان ۲۳:۲۸:۱۶ در روز ۱۹ دسامبر ۱۹۹۱ (بر مبنای روش دوم اصلاح کلاتر)



(شکل ۸) - سری زمانی شدت بارندگی اندازه‌گیری شده توسط باران‌سنج شماره ۴ و داده‌های محاسبه شده توسط رادار در موقعیت همان ایستگاه

مربوط به اصلاح خطای واسنجی رادار است. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است نتایج بعد از واسنجی بهبود پیدا کرده است.

خطاهای واسنجی می‌توانند اثر بسیار زیادی بر میزان بارندگی برآورد شده داشته باشند. بنابراین بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط رادار یک اصلاح دیگر هم باید اعمال گردد که آن اصلاح،



(شکل ۹) - سری زمانی شدت بارندگی اندازه‌گیری شده توسط باران‌سنج شماره ۴ و داده‌های محاسبه شده بعد از اعمال ضریب واسنجی توسط رادار در موقعیت همان ایستگاه

می‌کند. جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج آماری سری‌های زمانی داده‌های راداری و باران‌سنجی را نشان می‌دهد و ضریب همبستگی این داده‌ها

در یک نگاه دقیقتر، نتایج حاصل از رادار نشان می‌دهد که میزان تجمعی بارندگی قبل و بعد از واسنجی کمترین میزان ثبت شده توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی، است که میانگین اختلافات خطا نیز تأییدی بر این امر است (جدول ۱). اما همانطور که در نمودارها قابل مشاهده است نتایج راداری از روند داده‌های باران‌سنجی تبعیت

در جدول ۲ محاسبه شده است.

همانطور که انتظار می‌رفت نتایج آماری نیز نتایج قبلی را که مقادیر برآورد شده بعد از اعمال ضریب واسنجی بهبود پیدا کرده است را تأیید می‌کند.

از آنجایی که مقادیر ضریب همبستگی بعد از واسنجی در موقعیتهای باران سنج‌ها کم است و شدت بارندگی محاسبه شده توسط

رادار در زمان‌هایی که بارندگی وجود ندارد بی‌معنی می‌باشد، مقادیر برآورد شده توسط رادار در زمان‌هایی که باران سنج‌ها عدد صفر را ثبت کرده‌اند برای محاسبه ضریب همبستگی حذف شدند. در این حالت همانطور که در جدول ۲ قابل مشاهده است نتایج بهبود و مقادیر افزایش می‌یابد.

(جدول ۱) - نتایج آماری سریهای زمانی داده‌های راداری و باران سنجی

داده‌ها	RMSE	MBE	
داده‌های اصلی	۲/۳۴	-۱/۲۲	ایستگاه اول
داده‌ها بعد از واسنجی	۲/۳۵	-۰/۷۷	
داده‌های اصلی	۲/۷۶	-۱/۳۱	ایستگاه دوم
داده‌ها بعد از واسنجی	۲/۵۱	-۰/۸۷	
داده‌های اصلی	۲/۳۷	-۱/۱	ایستگاه سوم
داده‌ها بعد از واسنجی	۲/۱۵	-۰/۳۹	
داده‌های اصلی	۲/۳۲	-۱/۰۵	ایستگاه چهارم
داده‌ها بعد از واسنجی	۲/۱۲	-۰/۲۸	

(جدول ۲) - ضریب همبستگی سری‌های زمانی داده‌های راداری با داده‌های باران سنجی

داده‌های اصلی	داده‌ها بعد از حذف مقادیر صفر	
۰/۲۲	۰/۵۳	ایستگاه اول
۰/۴۴	۰/۷	ایستگاه دوم
۰/۵۳	۰/۷۷	ایستگاه سوم
۰/۵۳	۰/۷۱	ایستگاه چهارم

## جمع بندی

به منظور بهبود میزان بارندگی برآورد شده توسط رادار ابتدا داده‌ها باید در برابر خطاهای کلاتر زمین و تضعیف سیگنال‌ها اصلاح شوند. سپس شدت بارندگی با استفاده از یک رابطه توانی ساده محاسبه گردد. برای حذف خطای کلاتر ابتدا می‌بایست نقشه کلاتر زمین تهیه شود و سپس بر اساس این نقشه می‌توان به دو روش مجزا، کلاتر را از روی داده‌های راداری حذف نمود. مقایسه این دو روش نشان می‌دهد که روش استفاده از فیلتر به دلیل آنکه تنها به موقعیت کلاتر بستگی دارد بهتر از روش تفاضلی است که به شدت کلاتر نیز وابسته است. زیرا شدت کلاتر یک مقدار متغیری است که بسته به شرایط زمانی تغییر می‌کند. هرچند که به دلیل عدم وجود داده‌های باران-سنجی در موقعیت‌های کلاتر، هیچ مدرکی برای اثبات این مطلب وجود ندارد.

حذف خطای تضعیف سیگنال‌ها برای افزایش کیفیت نتایج برآورد شده توسط رادارهای باند X امر مهمی است. تحلیل نتایج نشان

می‌دهد که این خطا در شدت بارندگی‌های کم اثر چندانی ندارد ولی اثر آن در شدت‌های زیاد بارندگی بسیار زیاد است.

ارزیابی میزان دقت شدت بارندگی برآورد شده توسط رادار، یکی از مهمترین مراحل کاری می‌باشد. به منظور تشخیص میزان عدم قطعیت در مقادیر برآورد شده، نتایج حاصله با مقادیر ثبت شده توسط باران‌سنج‌های نصب شده در منطقه مورد مقایسه قرار گرفت. سری زمانی شدت بارندگی و بارندگی تجمعی برای داده‌های راداری و باران‌سنج‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نمودارهای سری زمانی داده‌های راداری و باران‌سنجی نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده توسط رادار و مقادیر ثبت شده توسط باران‌سنج‌ها هر دو دارای یک روند هستند. اما در کل نتایج راداری مقادیر کمتری را نسبت به داده‌های باران‌سنجی برآورد کرده است که این امر می‌تواند به دلیل حذف ناقص خطاهای کلاتر و تضعیف سیگنال‌ها و یا عدم حذف سایر خطاهای موثر بر داده‌ها باشد. البته عدم استفاده از رابطه بهینه شده در تبدیل شدت بازتابش راداری به شدت بارندگی و همچنین



نقطه موجود است.

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که داده‌های راداری نیاز به اعمال ضریب واسنجی و حذف خطاها دارند اما به دلیل آنکه تعدادی از این خطاها به راحتی قابل حذف شدن نیستند بر نتایج راداری اثر می‌گذارند. ولیکن زمانی که داده‌ها اصلاح شوند و خطاها تا حد امکان حذف گردد، نتایج با مقادیر ثبت شده توسط باران‌سنج‌ها قابل مقایسه می‌شود.

استفاده از ضریب واسنجی نادرست نیز در این برآورد کم، تاثیرگذار است.

مزیت داده‌های راداری نسبت به داده‌های باران‌سنجی در این است که داده‌های راداری منطقه وسیعی را پوشش می‌دهد و همچنین در گام‌های زمانی کوتاه‌تری داده‌ها ثبت می‌شود. که این امر باعث افزایش دید تحلیل‌گر در زمینه تغییرات مکانی بارندگی می‌شود. همانطور که در این مطالعه نیز قابل مشاهده است داده‌های راداری برای کل منطقه موجود است اما داده‌های باران‌سنجی برای تنها ۴

## منابع

- Berne, A. and Uijlenhoet, R. (2006), Quantitative analysis of X-band weather radar attenuation correction accuracy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 419–425.
- Chrisman, J. N., Rinderknecht, D. M., and Hamilton R. S. (1995). WSR-88D Clutter Suppression and Its Impact On Meteorological Data Interpretation. WSR-88D Operational Support Facility Operations Training Branch Norman, OK 73072.
- 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.
- Gabella, M. and Notarpietro, R. (2002). Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ERAD Conference*, Delft, The Netherlands: pp.305–311.
- Gerstner, T., Meetschen, D., Crewell, S., Griebel, M. and Simmer, C. (2002). Case Study: Visualization of Local Rainfall from Weather Radar Measurements, *Joint EUROGRAPHICS - IEEE TCVG Symposium on Visualization*: pp. 1-7.
- 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.
- Harrison, D. L., Driscoll, S. J. and Kitchen, M. (2000) Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques, *Meteorol. Appl.*, 6:135-144.
- Hitschfeld, W. and Bordan, J. (1954). Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteorology* 11: 58–67.
- Leijnse, H. (2007), *Hydrometeorological Application of Microwave Links: Measurement of Evaporation and Precipitation*. Ph.D. thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- Ligthart, L.P. and Nieuwkerk, L.R. (1990), An X-band solid- state FM-CW weather radar, *IEE Proceedings* 137: 418-426.
- 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* 7: 127–130.
- Marshall, J.S. and Palmer, W.Mck. (1948), The distribution of raindrops with size, *J. Meteorol.*, 165–166.
- Park, S.G., Maki, M., Iwanami, K., Misumi, R. and Bringi, V.N. (2004), Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation and Estimation of Rainfall at X-band Wavelength, *Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, Melbourne, Australia.
- Piman, T., Babel, M. S., Gupta, A.D. and Weesakul, S. (2007), Development of a window correlation matching method for improved radar rainfall estimation, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 4: 523–554.
- Rahimi, A. R., Holt, A. R., Upton, G.J.G., Krämer, S., Redder, A. and Verworn, H-R. (2006). Attenuation calibration of an X-band weather radar using a microwave link, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 23: 395-405.
- Uijlenhoet, R., Stricker, J.N.M. and Russchenberg, H.W.J. (1997). Application of X- and S-band radars for rain rate estimation over an urban area. *Phys. Chem. Earth* 22: 259-264.
- 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.* 3: 2385–2436.
- Uijlenhoet, R. (2001). Raindrop size distributions and radar reflectivity–rain rate relationships for radar hydrology, *Hydrology and Earth System Sciences* 5: 615–627.

- 20- Vaes, G., Willems, P. and Berlamont, J. (2001). Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water* 3: 107–112.
- 21- Wesson, S.M. and Pegram, G.G.S. (2006). Improved radar rainfall estimation at ground level. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6: 323–342.



## Use of high-resolution X-band weather radar for areal rainfall estimation in small catchments

Z.Toofani nejad<sup>1\*</sup> – GH. Kamali<sup>2</sup> – M. Alizadeh<sup>3</sup>

### Abstract

Obtaining reliable precipitation observations is important for hydrological simulations and weather forecasting. Radar data can provide insight in the spatial variation of precipitation and can also detect large areas of rain and estimate rainfall rates. Weather radar systems nearly always operate in S-, C- or X-band. Since X-band systems require smaller antennas than those at C- or S- band, they are particularly suitable for monitoring small hydrological working. However, radar rainfall estimation can be prone to errors because of attenuation and ground clutter. In this study, the potential of X-band radar systems for rainfall estimation over an urban area in the Netherlands was discussed. A methodology was presented for removing ground clutter and attenuation from X-band radar measurements and finally measurements of rainfall from radar were compared against measurements from 4 tipping bucket rain gauges for a rainfall event. In general, the analysis demonstrated that the radar follows the general trend of the rain gauge measurements but the radar measurements need to be calibrated and corrected for errors.

**Key word:** Ground base radar, Ground clutter, Attenuation, Rainfall estimation

---

1 - Master, Atmospheric Science and Meteorological Research Center(\* - Corresponding author Email: [zahra.toofani@asmerc.ac.ir](mailto:zahra.toofani@asmerc.ac.ir))  
2- Asso Meteor Research Institute, Atmospheric Science and Meteorological Research Center  
3- S.Bc Student of Ferdowsi University of Mashhad