

کنترل کیفی داده‌های رادار هواشناسی با استفاده از ساختار افقی و قائم برگشت پذیری

محمود صفر^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*} و یحیی گلستانی^۳

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۸)

چکیده

رادارهای هواشناسی قابلیت نمونه‌برداری از جو با تفکیک زمانی و مکانی بالا دارند و بسته به نوار بسامد مورد استفاده، دارای کاربردهای متنوع در علوم جوّی با مقیاس‌های مکانی گوناگون هستند. شبکه رادار هواشناسی ایران در نوارهای بسامدی C و S از قابلیت تشخیص قطرات باران و تعیین میزان بارش برخوردار است. داده‌های رادار هواشناسی دارای نوفه‌های متنوعی است که استفاده مطمئن و پیوسته از آنها مشروط به حذف این نوفه‌ها است. اصلاح داده‌های زمینه علاوه بر از بین بردن نوفه‌های مختلف، میدان‌های اندازه‌گیری شده را نیز به صورت مطلوبی تصحیح می‌کند. مورد مطالعاتی پژوهش حاضر، رادار هواشناسی تهران است که از سمت شمال غرب متاثر از انتشار امواج مزاحم نوار C است که پهنه بزرگی از منطقه را کاملاً اشباع کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده رفع مناسب نوفه‌های ناشی از کلاترهای ثابت و انتشار ناهمگون امواج راداری و همچنین نوفه‌های نقطه‌ای و محلی است. صافی به کار رفته، نوفه این منطقه را نیز به خوبی کاهش داده و در نتیجه کیفیت داده‌ها را اصلاح کرده است. میزان کارایی صافی‌ها بستگی به تنظیم آستانه حساسیت آنها دارد که بنا به کاربرد داده‌ها تنظیم پذیر است.

واژه‌های کلیدی: رادار هواشناسی تهران، نوار C، نوار S، بارش، نوفه، برگشت‌پذیری

۱ مقدمه

رادارهای هواشناسی به علت داشتن تفکیک زمانی-مکانی مناسب، دارای قدرت تشخیص و تعیین موقعیت پدیده‌های کوچک‌مقیاس و زیر مقیاس شبکه نظیر همرفت هستند و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، امکان تعقیب و تفکیک مناطق بارشی را با دقت بالا فراهم می‌کنند (روزن‌فیلد و همکاران، ۱۹۹۵؛ اشتیتر و همکاران، ۱۹۹۹؛ زمیک، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵). هم‌چنین این رادارها در بررسی خطوط بارش همرفتی و فرایندهای دینامیکی مربوط به همرفت مانند ناپایداری متقارن نقش زیادی داشته و یکی از ابزارهای بسیار مهم در پیش‌بینی مسیر حرکت پیچندها محسوب می‌شوند.

استفاده از داده‌های رادار هواشناسی به‌عنوان داده‌های ورودی در مدل‌های عددی پیش‌بینی جو، مدل‌های آب-شناختی (هیدرولوژی) و مدل‌های انتقال آلودگی مورد ارزیابی و اجرای عملی قرار گرفته است (رزا و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰؛ زاپا و همکاران، ۲۰۱۰). شرط استفاده از این داده‌ها اطمینان از درستی آنها و عدم وجود نوفه‌های مختلف در داده‌ها است (گلستانی و همکاران، ۱۹۹۵؛ برینگی و همکاران، ۱۹۹۱). نوفه‌هایی که درستی داده‌ها را زیر سوال می‌برند از منابع متنوع ناشی می‌شوند. دسته اول خطاها که مربوط به مشخصات فنی رادار است، عبارتند از: الف) نوفه سخت‌افزاری رادار حاصل از مقاومت گرمایی قطعات الکترونیکی، دقت آنتن، دقت در پردازش سیگنال (جیکت و همکاران، ۲۰۰۴)، ب) خطاهای نامرتب با پدیده‌های جوئی نظیر اختلال الکترومغناطیسی ناشی از تابش خورشید، گسیلنده‌های ریزموج (microwave) ساخت بشر و تضعیف به‌علت خیس بودن و یا یخ‌زدگی پوشش آنتن (Antenna radome) (جرمن و جوس، ۲۰۰۴؛ هوبرت، ۲۰۰۳)، ج) انتشار ناهمگون باریکه رادار به‌دلیل گرادیان دما و رطوبت و هم‌چنین بازتابش‌های

ناشی از حرکت پرندگان و حشرات (ببینگتون و همکاران، ۲۰۰۷).

دسته دوم از خطاها مربوط به راهبرد پویس (اسکن) راداری، هندسه باریکه رادار و درونیایی داده‌ها (خطای ناشی از خمیدگی باریکه راداری در زاویه تابش کمتر از ۱/۲ درجه نسبت به افق به‌علت خمیدگی زمین) می‌باشد. به‌عنوان مثال هرچه فاصله شعاعی نمونه‌گیری از رادار بیشتر باشد، به‌علت بازتر شدن زاویه باریکه آنتن، این خطا بزرگ‌تر می‌شود. از سوی دیگر، برخورد باریکه با موانع سخت کوهساری (توپوگرافی) و یا انسداد به‌دلیل ساختمان‌ها و درخت‌ها نیز جزء خطاهای داده راداری است (بیچ و همکاران، ۲۰۰۷).

دسته سوم خطاها ناشی از چگونگی رفتار یک پدیده جوئی در مقایسه با هندسه باریکه راداری است. برای نمونه، زمانی که گستره فضایی بارش کوچک باشد و یا زمانی که بارش در ارتفاعی پایین‌تر از پوشش راداری رخ دهد، پژواک آن تمام باریکه را پر نمی‌کند. دسته چهارم خطاها اختصاص به پدیده‌های جوئی دارد که به‌صورت مستقیم داده‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند و شامل این موارد هستند: الف) تضعیف ناشی از فازهای مختلف بارش (باران، برف، برف در حال ذوب، تگرگ) و هم‌چنین تضعیف به‌علت طول موج و توان رادار، به‌خصوص در نوارهای بسامدی C و X، که باعث فروتخمین بارش می‌شود، ب) تعیین رابطه بین بارش و برگشت‌پذیری راداری که به‌علت تاثیر بحرانی اندازه قطره‌ها بر روی این پارامتر بسیار حساس است، ج) نوع بارش همرفتی و یا پوشنی (شالک و همکاران، ۲۰۰۴).

حذف نوفه‌های فوق در تشخیص الگوی سامانه‌ها، هم از نظر کیفی و هم کمی تاثیر بسزایی دارد که اصلی‌ترین آنها، کاهش خطای محاسبه مقادیر بارش سطحی حاصل از داده‌های راداری و ایستگاه‌های باران‌سنجی است

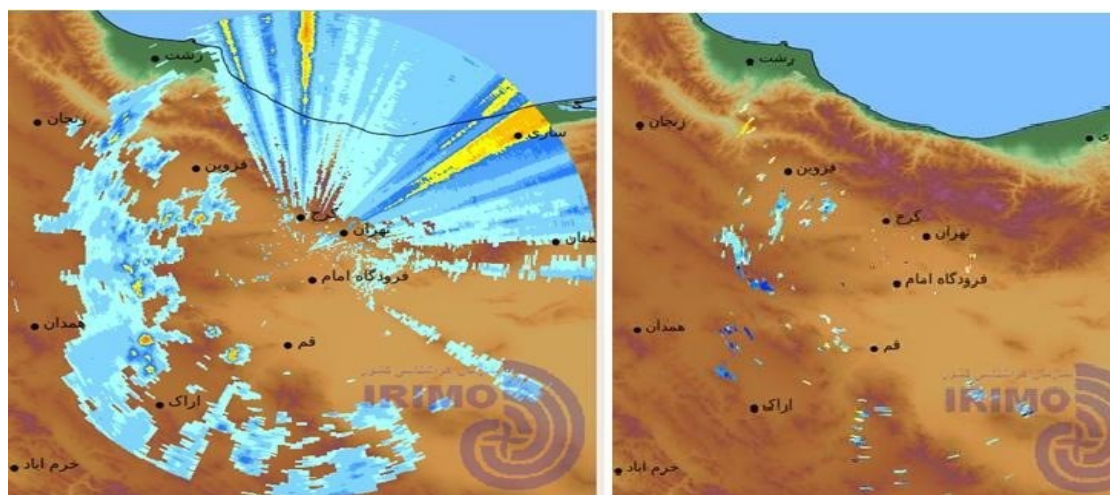
شرقی-شمالی، درستی این داده‌ها را با شبهه مواجه کرده است.

به صورت کلی، برطرف کردن خطاهای شرح داده شده در محصولات راداری از سه راه امکان‌پذیر است (اشتیگر و اسمیت، ۲۰۰۲): ۱) مکان‌یابی مناسب و نصب رادار در منطقه‌ای که کمترین تداخل و مانع طبیعی در مسیر انتشار امواج وجود داشته باشد، ۲) انجام اصلاحات و طراحی مدارها و سامانه‌های سخت‌افزاری که با استفاده از صافی، در مرحله ریزموج نوفه‌های ناخواسته را حذف کنند و هم-چنین طراحی نرم‌افزارهایی که داده‌های پایه خروجی گیرنده را مورد ارزیابی و اصلاح قرار دهند، ۳) طراحی نرم‌افزاری برای رفع خطاهای ایجادشده بر روی داده‌های نهایی رادار مانند برگشت‌پذیری قائم و یا افقی.

راهکارهای اول و دوم ذکرشده در فوق، نیازمند انتخاب مناسب ملزومات سخت‌افزاری و مکان نصب رادار است که معمولاً با دقت انجام می‌پذیرد؛ ولی در شرایطی که بعد از نصب رادار اختلالات الکترومغناطیسی رخ دهد، مهم‌ترین اقدام ضروری و قابل اجرا، استفاده از راهکار سوم یعنی اصلاح داده‌های خروجی رادار است. لازم به

هریسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ ملنیکوف و همکاران، ۲۰۰۳؛ ایلماز و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از داده‌های راداری کنترل کیفی شده همراه با در نظر گرفتن کوهساری و ناهمواری‌ها باعث افزایش دقت اندازه‌گیری‌های مکانی بارش سطحی توسط رادار می‌شود (جاس و وسلی، ۱۹۹۰)؛ یعنی، نه تنها برگشت‌پذیری راداری حاصل از بارش باید تحلیل شود، بلکه شرایط کوهساری منطقه نیز باید در محاسبات لحاظ شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که انجام کنترل کیفی بر روی یک رادار را نمی‌توان مبنای کلی برای تمام شبکه راداری در نظر گرفت و لازم است بررسی خصوصیات هر ایستگاه (سایت) راداری به-طور جداگانه انجام گیرد (اینفالت و همکاران، ۲۰۱۰).

شکل ۱ نمونه داده‌های برگشت‌پذیری افقی و سرعت شعاعی حاصل از رادار هواشناسی تهران تحت تاثیر شدید نوفه را نشان می‌دهد. این تصاویر راداری مربوط به ساعاتی قبل از وزش توفان شدید دوازدهم خردادماه ۱۳۹۳ در شهر تهران است. وجود هسته‌های همرفتی بسیار قوی به-صورت هلالی در شمال‌غرب، غرب و جنوب‌غرب مشخص می‌باشد، در حالی که وجود نوفه در بخش



(ب)

(الف)

شکل ۱. (الف) نمایه سرعت شعاعی در ساعت UTC ۱۰۴۵ روز ۲ ژوئن ۲۰۱۴. وجود گردبادان شدید باد در جنوب‌غرب تهران مشهود است؛ (ب) نمایه برگشت‌پذیری افقی رادار تهران در ساعت UTC ۱۰۱۵ همان روز.

رادار در مدل‌های پیش‌بینی عددی جو و ایجاد یک سامانه پیش‌پردازشی راداری برای تشخیص، تعقیب و اعلام اختلال پدیده‌های حدی جو به‌طور مؤثر است. با توجه به لزوم استفاده از داده‌های مطمئن و عاری از نوفه‌های مختلف در مراحل بعدی از پژوهش جامع، ضرورت داشت ابتدا داده‌های خام راداری به روشی بومی و متناسب با نوع نوفه‌های موجود کنترل کیفی و اصلاح شوند.

۲ داده‌های راداری

اگرچه رادارهای هواشناسی از لحاظ سامانه‌ای همانند سایر رادارهای تپ (پالس) دوپلری عمل می‌کنند، ولی برای پردازش سیگنال‌های برگشتی و استخراج داده‌ها و محصولات هواشناسی آنها از الگوریتم‌های متفاوتی استفاده می‌شود. به‌طور کلی در این رادارها، پارامتر اولیه که مبنای محاسبه محصولات ثانویه می‌باشد، برگشت‌پذیری است. این پارامتر براساس اندازه‌گیری‌های حاصل از توان برگشتی، مقطع راداری اهداف هواشناسی و پارامترهای سامانه‌ای رادار به‌دست می‌آید که به‌صورت خلاصه طبق رابطه زیر بیان می‌شود (اتلس، ۱۹۹۰):

$$Z = \frac{1024 \ln(2)}{c\pi^3} \left[\frac{\lambda^2}{P_r \tau G^2 \Theta \Phi} \right] \left[\frac{\bar{P}_r}{K^2} r^2 \right]. \quad (1)$$

این رابطه از سه بخش تشکیل شده که بخش اول ضرایب ثابت است. بخش دوم مربوط به مشخصات سامانه‌ای رادار است که شامل λ طول موج رادار، τ طول زمان ارسال تپ رادار، P_r توان فرستنده رادار، G بهره آنتن رادار، Θ و Φ به‌ترتیب اندازه پهنای باریکه در راستاهای قائم و افقی آنتن می‌باشد. بخش سوم معرف مشخصات پدیده جوئی است که در آن P_r متوسط توان برگشتی از پدیده جوئی، r فاصله مورب (مستقیم) بین آنتن و پدیده جوئی و K ثابت اتلاف پدیده موجود (برف، یخ، آب و ...) در طول موج راداری هستند. به‌طور معمول، پس از محاسبه

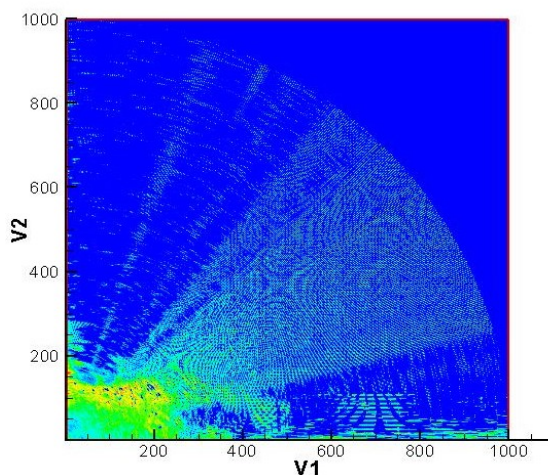
سوم یعنی اصلاح داده‌های خروجی رادار است. لازم به ذکر است که به‌کار بردن داده‌های پایه راداری $I \& Q$ درصد اطمینان به خروجی پالاینده‌های نرم‌افزاری را افزایش می‌دهد؛ اما در صورت عدم دسترسی به این نوع داده‌ها، استفاده از داده‌های پردازش‌شده اولیه dBZ رایج است. شایان توجه است که در این پژوهش نیز به‌علت عدم دسترسی به داده‌های دوپلری یا محصولات چندپارامتری راداری، تنها داده‌های dBZ مورد استفاده قرار گرفته است.

کنترل کیفی داده‌ها در رادارهای چندپارامتری با استفاده از متغیرهایی نظیر سرعت شعاعی داپلری، برگشت‌پذیری افقی - قائم، برگشت‌پذیری تفاضلی و ضریب همبستگی، امکان تصحیح میدان‌های سنجش را به‌صورت مطلوبی فراهم می‌آورد؛ ولی در سامانه‌های راداری تک‌قطبشی، پردازش‌ها باید بر مبنای داده‌های برگشت‌پذیری قطبش افقی صورت گیرد که روش‌های مختلفی برای اطمینان از صحت داده‌های پالایش شده وجود دارد.

استفاده از گرادیان‌های افقی و قائم برگشت‌پذیری و هم‌چنین تشخیص ساختار قائم پدیده با مقایسه این داده‌ها در یک زاویه قائم تابشی (tilt) یکی از روش‌های پالایش داده‌های نامناسب از میدان داده‌های راداری است (اشتینر و اسمیت، ۲۰۰۲). هرچند آزمایش گرادیان قائم بین زاویه‌های تابش قائم $0/5$ و $0/7$ درجه نسبت به افق در فواصل نزدیک به محل رادار تقریب مناسبی از ساختار قائم به‌دست می‌دهد، ولی در فاصله‌های بیش از ۱۰۰ کیلومتر رفتار غیرخطی امواج ریزموج در مسیر پیمایش، به‌علت تغییرات غیرخطی ضریب شکست جو و هم‌چنین خمیدگی سطح زمین، باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود.

لازم به ذکر است که این مقاله حاوی نتایج مرحله اول از پژوهشی جامع در خصوص استفاده عملی از داده‌های

نوار C بوده (گلستانی و همکاران، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰) و به صورت پیش فرض در ۳۶۰ درجه و در راستای شعاعی به هزار بازه ۲۵۰ متری تقسیم شده است. شکل ۲ اولین مرحله از کدگشایی داده‌های راداری را در ربع اول پوشش ۰/۵ درجه در ساعت UTC ۲۳۳۰ روز ۳۱ مارس سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد.



شکل ۲. کدگشایی داده‌های راداری در ربع اول پوشش ۰/۵ درجه در ساعت UTC ۲۳۳۰ روز ۳۰ مارس سال ۲۰۰۹.

۳ پیش پردازش و نوبه‌ها

پیش پردازش داده‌های برگشتی موجود در فایل‌های XML شامل درستی‌سنجی داده‌های دوتایی (باینری) با توضیحات آن در بخش اول XML است تا از درستی داده‌ها اطمینان نسبی حاصل گردد. برای این کار، ابتدا داده‌ها در پنجره‌های بیشینه و کمینه تعریف شده مورد آزمایش قرار گرفته و سپس اطلاعات مکانی آنها بررسی می‌شود تا از عدم جایجایی داده‌ها در یاخته‌های مجاور اطمینان یافت. در ادامه، درون‌یابی داده‌ها براساس میانگین وزنی انجام می‌گیرد، به طوری که در راستای زاویه‌ای به ۱۴۴۰ بازه تقسیم می‌شوند. یعنی یک دایره که نشان‌دهنده کل حوزه تحت پوشش منطقه است به ۱۴۴۰ زاویه تقسیم شده و داده‌های موجود در ۳۶۰ زاویه قبلی به صورت وزنی

کمیت Z براساس رابطه (۱)، مقدار آن با استفاده از رابطه زیر به مقیاس لگاریتمی تبدیل می‌شود:

$$dBZ = 10 \log \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3} \right). \quad (2)$$

وجود توان ششم طول در مخرج رابطه (۲)، به علت رابطه برگشت پذیری با توان ششم قطر ذرات اندازه‌گیری شده در نوار بسامدی رادار است. لازم به ذکر است که کمیت برگشت پذیری برای هر دو نوع قطبش افقی و قائم راداری محاسبه می‌شود که مقادیر آن می‌تواند به درک بهتری از پدیده موجود و جلوگیری از تشخیص اشتباه کمک کند. یکی از پارامترهای کمکی ثانویه که با استفاده از رادارهای با قابلیت دو قطبش به دست می‌آید، برگشت پذیری تفاضلی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z_{DR} = \frac{Z_H}{Z_V}, \quad (3)$$

که Z_V و Z_H به ترتیب برگشت پذیری افقی و قائم راداری و Z_{DR} نسبت این دو مقدار است که نشان‌دهنده نسبت تقارن پدیده جوئی رصد شده و در نتیجه فاز یخی-آبی می‌باشد. از داده‌های راداری به دو منظور کلی می‌توان استفاده کرد. اول آن که با به کار بردن روابط موجود می‌توان محصولات نهایی هواشناسی را برای ارزیابی و تایید پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت فراهم کرد. هدف دوم آن که با استفاده از داده‌های پایه مانند برگشت پذیری و برگشت پذیری تفاضلی و هم چنین سامانه داده‌گویی مدل‌های عددی، به تصحیح پیش‌بینی‌های میان مدت بارش پرداخت.

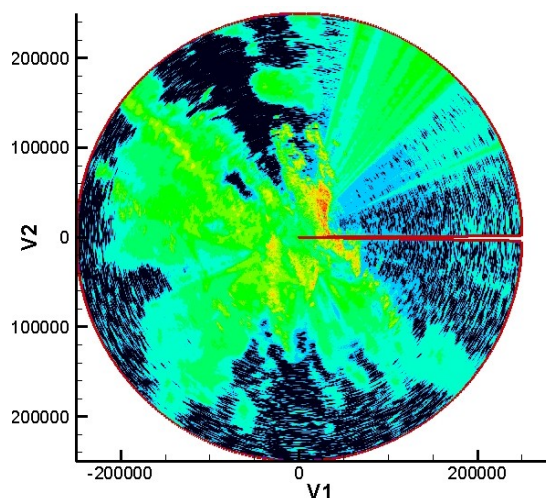
داده‌های به کار رفته در این پژوهش شامل داده‌های رادار هواشناسی تهران است که یک رادار چند پارامتری

۴ الگوریتم به کار رفته و روش پردازش همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، به علت وجود محدودیت‌های فنی، در این پژوهش فقط از داده‌های افقی dBZ استفاده شده است. در مرحله اول، تمام یاخته‌های تصویری (1000×1440) یاخته تصویری رادار مورد آزمون ارزیابی قرار می‌گیرند. بدین معنی که با استفاده از بانک داده‌های ۲۴ ساعته، میزان میانگین تمام یاخته‌های تصویری ارزیابی شده و در صورتی که در تمامی پوشش‌ها (360° پوشش در یک شبانه‌روز) مقدار میانگین برگشت‌پذیری در یک یاخته تصویری بیش از حد مشخص شده باشد، آن یاخته تصویری به‌عنوان یاخته مستعد نوفه ارزیابی می‌شود.

در مرحله دوم، کل مساحت تحت پوشش رادار به بازه‌های مساحتی مساوی تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، به علت بازشدگی زاویه باریکه رادار با دور شدن از آنتن، برای بررسی پدیده‌ها در هر فاصله باید از الگوریتمی استفاده کرد که مساحت بسته‌های نمونه‌برداری از اطلاعات راداری نسبت به فاصله تغییری نداشته و با تقریب خوبی مساوی باشند. بدین‌منظور، ابتدا با استفاده از روابط موجود (سوشر و همکاران، ۲۰۰۹)، مساحت باریکه رادار نسبت به فاصله و زاویه محاسبه شده و با پهنه‌بندی منطقه تحت پوشش رادار به بازه‌های ۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۱۵۰ و ۱۵۰-۲۵۰ کیلومتری، بسته‌های نمونه‌برداری با مساحت‌های تقریباً مساوی تشکیل می‌گردد که مساحت هر بازه تقریباً ۱۵ کیلومتر مربع است. سپس میانگین میزان برگشت‌پذیری در این بسته‌ها محاسبه شده و با تعریف یک آستانه حساسیت، مناطق دارای نوفه نقطه‌ای مشخص و حذف می‌شوند.

در مرحله سوم، هر نقطه از داده‌های راداری با مکان هم-تراز و در زاویه تابش بالایی خود مقایسه می‌شود. طبق شکل ۵، باریکه‌های آنتن بسته به فاصله از سطح و در فواصل دورتر از ۱۰۰ کیلومتر، رفتار غیرخطی دارند که

در مکان‌های جدید درون‌یابی می‌شوند، به نحوی که داده‌های هر مکان به‌طور خطی و وزن‌دار به ۴ نقطه پیرامون خود بستگی دارد. در این مرحله، داده‌های راداری با دقت مناسب و قابل قبول به دست می‌آیند. شکل ۳ نمونه تصحیح شده شکل ۲ ولی برای کل حوزه است.

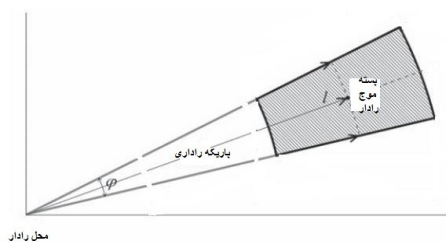


شکل ۳. مانند شکل ۲ ولی برای کل حوزه با درون‌یابی داده‌ها (مقادیر واقع بر محورها فاصله از مرکز بر حسب متر است).

لازم به توضیح است که شیار موجود در سمت راست شکل ۳ به علت مسطح کردن مخروط پوشش راداری به دایره است و در نتیجه عدم تغییر در اندازه واقعی داده‌ها ایجاد گردیده و در واقع داده‌ای از دست نرفته است. از آنجا که در این مرحله بررسی کمی میزان بازتاب مد نظر نمی‌باشد، در هیچ‌کدام از شکل‌ها نوار اندازه‌گیری مشخص نشده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، داده‌های راداری دارای نوفه‌های فراوان بوده که منشاء هر کدام متفاوت است. داده‌های موجود از چهار منشاء عمده نوفه متاثر می‌باشند که عبارتند از: نوفه‌های نقطه‌ای (speckle) و محدود، نوفه حاصل از RFI در ناحیه شمال شرق رادار، نوفه‌های ناشی از کلاترهای ثابت و نوفه‌های ناشی از انتشار ناهمگون امواج به علت گرادیان‌های قائم قوی رطوبت و دما.

در زاویه کجی بالایی این نقطه اطلاعاتی موجود نباشد، داده‌های زاویه کجی 0.5° درجه نوفه تلقی و حذف شوند. هم‌چنین در این مرحله، گرادیان قائم برگشت‌پذیری آزمایش می‌شود؛ اگر مقدار آن کمتر از 10 dBZ بر درجه باشد، پدیده جوئی در نظر گرفته می‌شود (لی و همکاران، ۱۹۹۵؛ اشتینر و اسمیت، ۲۰۰۲).

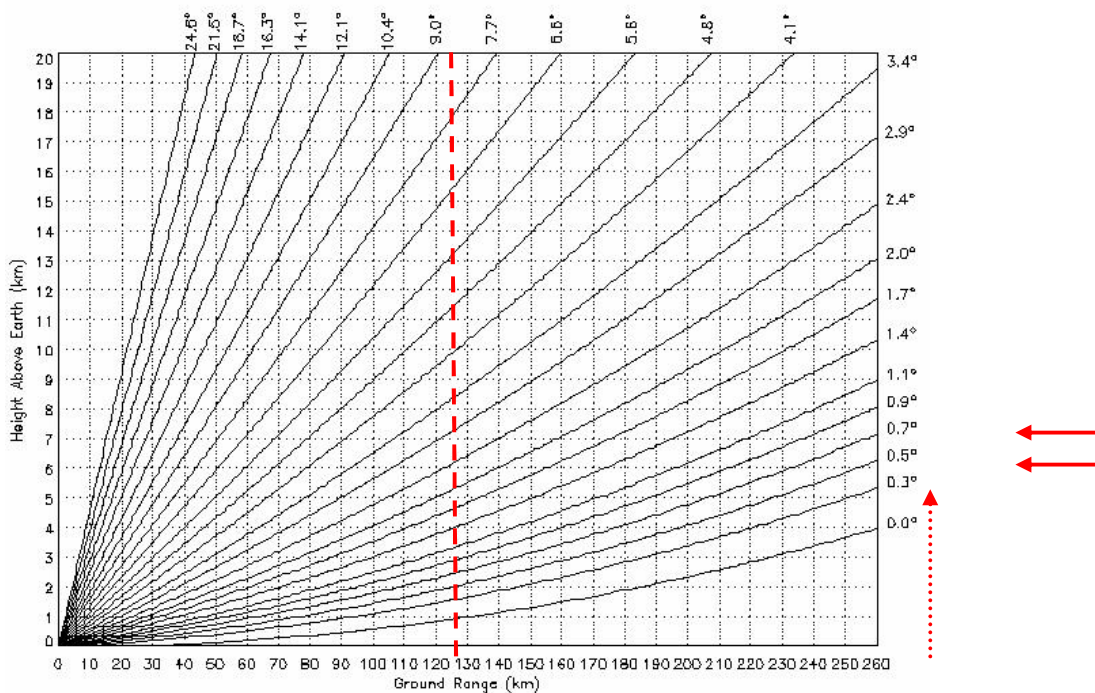
در مرحله چهارم، وجود ساختارهای مورب در راستای قائم آزمایش می‌شود؛ بدین نحو که در هر زاویه کجی، هر نقطه حاوی داده با هشت نقطه همجوار و متناظر خود با زاویه کجی بالایی مقایسه شده تا در صورت وجود ساختاری مشابه، داده‌ها به صورت نادرست حذف نشوند. بدین منظور، علاوه بر انجام مقایسه مرحله سوم، یک بازه حساسیت‌سنجی نیز در نظر گرفته شده تا داده‌ها به صورت کامل آزمایش شوند. در این مرحله، افزون بر آزمایش نقطه‌به‌نقطه در دو زاویه کجی، میانگین بسته‌ها در دو زاویه کجی نیز با هم مقایسه می‌شود تا به طور کامل وجود یک ساختار امتداد یافته در راستای قائم کشف گردد.



محل رادار

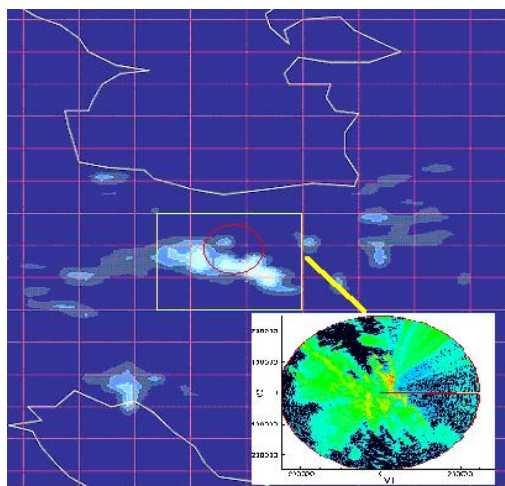
شکل ۴. هندسه باریکه آنتن نسبت به فاصله از مرکز.

ناشی از تصحیح خطای خمیدگی زمین و تغییر گرادیان شکست جوئی است (بج و همکاران، ۲۰۰۷). همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، اختلاف ارتفاعی بین باریکه‌های 0.5° و 0.7° درجه در فاصله‌ای که باریکه‌ها رفتار خطی دارند، بسیار کمتر از یک کیلومتر است؛ در حالی که در انتهای باریکه (۲۵۰ کیلومتری) به حدود یک کیلومتر می‌رسد و ارتفاع خود باریکه 0.5° درجه در انتهای مسیرش در حدود ۶ کیلومتری از سطح آنتن است. در این مرحله، یک نقطه دارای زاویه کجی (tilt) 0.5° درجه با نقطه متناظر دارای زاویه کجی 0.7° درجه نیز بررسی می‌شود تا در صورتی که در فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از آنتن،

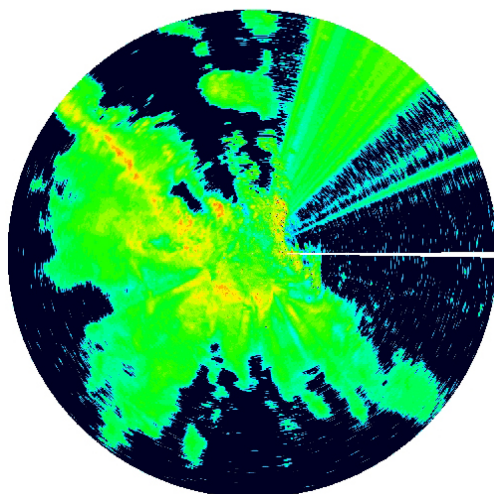


شکل ۵. مسیر انتشار امواج رادار با زوایای تابش مختلف. محور افقی فاصله از آنتن و محور قائم ارتفاع از آنتن است. مقادیر واقع در سمت چپ و بالای شکل زوایای معمول پوشش راداری در بررسی حجمی منطقه است

نشان‌دهنده داده‌های بارش در ساعت UTC ۲۲۳۰ همان-روز است که توسط رادار فعال ماهواره TRMM از منطقه مورد بررسی به دست آمده و تا حد زیادی طیف و ساختار داده‌های رادار زمین پایه تهران را تایید می‌کند. داده‌های راداری این سامانه (شکل ۳) تا حدودی نشان‌دهنده ساختارهای بارشی است، ولی ساختار خط بارش همرفتی آن بارز نیست که علت آن، وجود نوفه در کل میدان بارشی رادار و اشباع داده‌های راداری است. داده‌های راداری که نوفه زمینه آن در مرحله پیش پردازش حذف شده است، به صورت شکل ۸ می‌باشد.



شکل ۷. داده‌های راداری TRMM در ساعت UTC ۲۲۳۰ روز ۳۰ مارس سال ۲۰۰۹.



شکل ۸. مانند شکل ۳ ولی با حذف نوفه زمینه.

در مرحله آخر، بافت افقی داده‌ها از لحاظ سازگاری و پیوستگی آزمایش می‌شود. در این مرحله، برای هر بسته داده‌ای، تفاوت بین داده هر نقطه با نقاط مجاور به دست می‌آید و در صورتی که این تفاوت در بازه‌ای قابل قبول باشد، این نقطه به عنوان جزئی از یک ساختار افقی پذیرفته می‌شود. این بازه مقداری است که گرادیان‌های بسیار قوی و نامعقول را حذف کرده و ساختارهای جوئی معمول را می‌پذیرد. در این مورد باید دو مسئله را در نظر گرفت؛ اول آن که این مرحله لبه‌های سامانه را نسبت به میدان زمینه متمایزتر می‌کند و دوم این که مناطق دارای مقادیر نامعقول در یک پهنه تقریباً یکنواخت را به عنوان اثر انتشار ناهمگون حذف می‌کند.

تمامی مراحل بالا در شکل ۶ به صورت نمودار گردش کار نشان داده شده است.

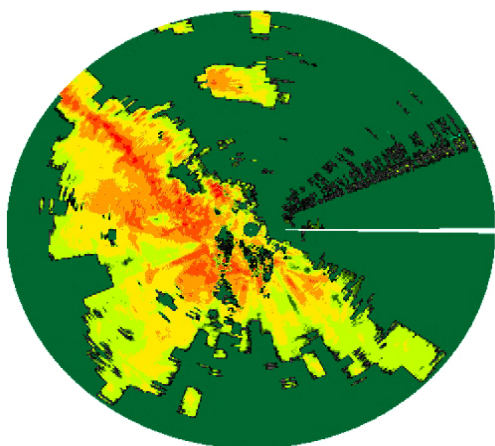


شکل ۶. مراحل مختلف پالایش نوفه‌های راداری.

۵ بررسی موردی

برای آزمایش مراحل الگوریتم شرح داده شده در فوق، یک سامانه خط تندوزه که در ساعت UTC ۲۲۳۰ روز ۳۰ مارس سال ۲۰۰۹ از فراز منطقه تهران عبور کرده، انتخاب شده است. علت انتخاب این سامانه، وجود ساختارهای بارشی پوشنی و همرفتی در آن است (شکل ۳). شکل ۷

اصلاح داده‌های زمینه، علاوه بر از بین بردن نوفه‌های مختلف، میدان‌های اندازه‌گیری شده را نیز به صورت مطلوبی تصحیح و بارز نموده است. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۱۰، خصوصیات نوار بارشی به‌خوبی مشخص است. وجود نوار بارش همرفتی در بین پهنه بارش پوشنی و وجود لبه همرفتی در حال رشد در لبه جلویی و هم‌چنین نوار همرفتی میرا در پشت نوار همرفتی بالغ، کاملاً بیانگر یک نوار بارش است.

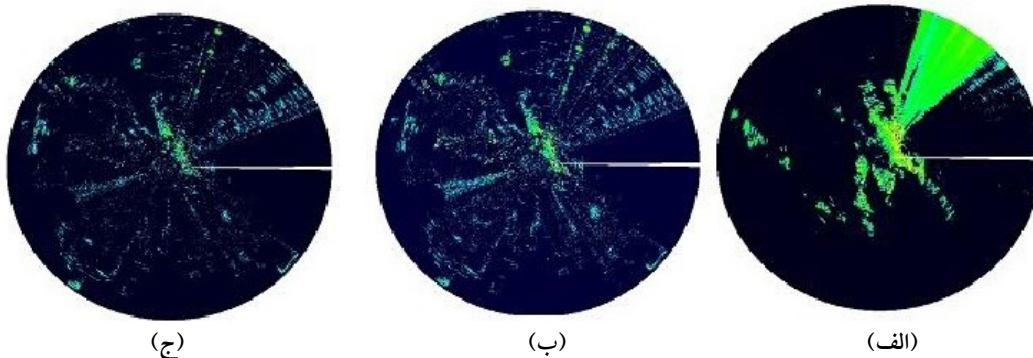


شکل ۱۰. خروجی صافی طیفی پس از حذف نوفه‌های محلی با حساسیت متوسط.

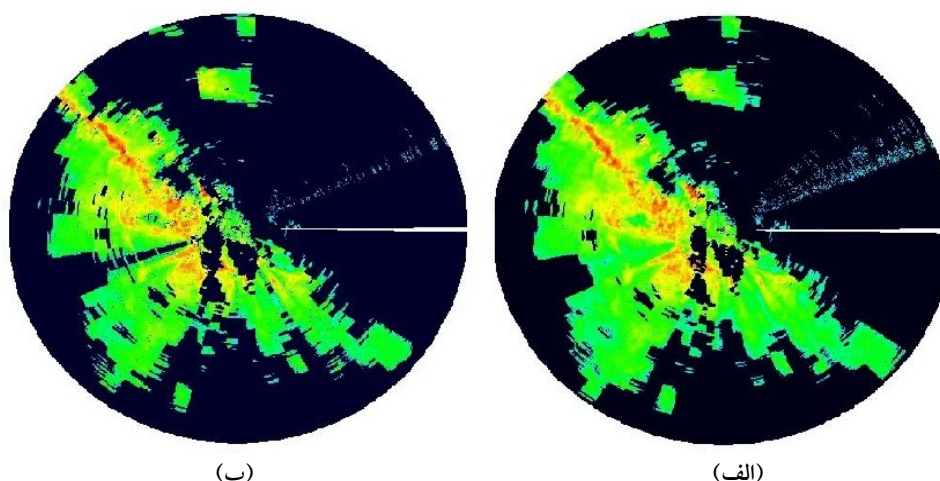
توجه به این نکته مهم است که رفع این نوفه‌ها بستگی زیادی به تنظیم آستانه حساسیت صافی‌ها دارد. برای مثال، نتایج مربوط به استفاده از دو آستانه متوسط و زیاد در شکل ۱۱ ارزیابی و مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که

در مرحله دوم، داده‌های پیش‌پردازش شده برای تحلیل طیفی و مقایسه با داده‌های ۲۴ ساعت قبل رادار به-منظور تفکیک موانع انتشار امواج راداری و هم‌چنین حذف کلاترهای زمین، از صافی نرم‌افزاری عبور داده می‌شود. الگوی صافی و خروجی تحلیل طیفی داده‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، صافی فوق فقط نقاطی که داده‌های دائم در آن وجود دارد را با سه سطح حساسیت نشان می‌دهد. پس از این مرحله، نوفه‌های نقطه‌ای و محدود صاف شده که نتیجه آن به صورت شکل ۸ است. با توجه به شکل، نه تنها اصلاحات زیادی در میدان‌های سنجشی رادار صورت گرفته است، بلکه الگوی خط تندوزه نیز به مراتب واضح‌تر و ساختار این سامانه مشخص شده است. از سوی دیگر، مناطق قابل توجهی، چه در داخل و چه در خارج از منطقه بارشی، به‌عنوان نوفه شناسایی و حذف شده‌اند.

پس از آزمایش گرادیان‌های قائم و یکپارچگی بافت برگشت‌پذیری، نمایه افقی میدان برگشت‌پذیری به صورت شکل ۹ درمی‌آید. این شکل نشان‌دهنده رفع نوفه‌های تداخل الکترونیکی در مناطق شمال‌شرق، نوفه مربوط به سد کردن انتشار امواج در منطقه جنوب‌غرب و جنوب-شرق، حذف کلیه کلاترهای کوهساری و هم‌چنین برطرف کردن اثرات انتشار ناهمگون امواج بر اثر گرادیان‌های شدید رطوبتی و دمایی در درون پهنه بارشی است.



شکل ۹. صافی طیفی طراحی شده با سه سطح حساسیت: (الف) زیاد، (ب) متوسط و (ج) کم.



شکل ۱۱. خروجی نهایی داده‌های رادار هواشناسی تهران در ساعت UTC ۲۳:۳۰ روز ۳۰ مارس سال ۲۰۰۹ با اعمال: (الف) حساسیت متوسط و (ب) حساسیت زیاد.

نقطه‌ای و محلی است. رادار تهران از سمت شمال غرب متأثر از انتشار امواج نوار C است که پهنه بزرگی از این منطقه را کاملاً اشباع کرده و در محاسبات عددی خطاهای بزرگی را باعث می‌شود (صفر و همکاران، ۱۳۹۱). صافی به کار رفته در پژوهش حاضر نوفه این منطقه را نیز به‌طور مناسبی کاهش داده و کیفیت داده‌ها را بهبود داده است. میزان کارایی صافی‌ها بستگی به تنظیم آستانه حساسیت آنها دارد که انتخاب این آستانه باید بنابه کاربرد داده‌ها انجام شود.

منابع

صفر، م.، احمدی گیوی، ف.، و محب‌الحجه، ع.، ۱۳۹۱، بررسی اثر گوارد داده‌های رادار در مدل عددی ARPS در شبیه‌سازی بارش حاصل از سامانه همدیدی ۳۱ مارس ۲۰۰۹ در منطقه تهران: مجله ژئوفیزیک ایران، ۶(۳)، ۹۴-۱۱۲.

American Meteorological Society, 2001, Radar Calibration and Validation Specialty Meeting: Albuquerque, New Mexico, U.S.A., 13-14 January 2001.

Atlas, D., 1990, Radar in Meteorology: American Meteorological Society, Boston, 806pp.

حساسیت صافی به گرادیان قائم و بافت افقی میدان اندازه‌گیری شده برای آستانه زیاد (شکل ۱۱-ب بیشتر از آستانه متوسط (شکل ۱۱-الف) است. لازم به ذکر است که با بررسی عوارض و کوهساری و هم‌چنین شدت و گستردگی نوفه‌های موجود در منطقه و نیز کاربردی که از این داده‌ها مورد نظر است، این آستانه‌ها باید به‌صورت بهینه انتخاب شوند.

۶ نتیجه‌گیری

کنترل کیفی و تصحیح داده‌های راداری به‌علت کاربردهای گوناگون آن و استفاده روزافزون از اطلاعات حاصل از این سنجنده بسیار ضروری و حائز اهمیت است. فرایند کنترل کیفی داده‌ها طیف وسیعی از صافی‌ها را دربرمی‌گیرد که پاسخ‌های متناسب با کاربرد مورد نظر را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، علاوه بر استفاده از ساختارهای قائم و افقی میدان اندازه‌گیری شده برگشت پذیری به‌منظور فوق، از محاسبات طیفی نیز برای رفع خطاهای داده‌ای موجود استفاده شده است. نتایج محاسبات نشان‌دهنده رفع مطلوب نوفه‌های ناشی از کلاترهای ثابت و پخش ناهمگون و هم‌چنین نوفه‌های

- correction techniques: *Meteor. Appl.*, **7**, 135–144.
- Hubbert, J. C., Bringi, V. N., and Brunkow, D., 2003, Studies of the polarimetric covariance matrix: Part I: Calibration methodology: *J. Atmos. Ocea. Tech.*, **20**(5), 696–706.
- Joss, J., and Wessels, H., 1990, Ground clutter suppression for weather radar data: COST Tech. Rep. 73/WD/130, 6 pp.
- Lee, R., Della Bruna, G., and Joss, J., 1995, Intensity of ground clutter and echoes of anomalous propagation and its elimination: Reprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 651–652.
- Melnikov, V. M., Zrnić, D. S., Doviak, R. J., and Carter, J. K., 2003, Calibration and performance analysis of NSSL's polarimetric WSR-88D: National Severe Storm Laboratory.
- Rosenfeld, D., Amitai, E., and Wolff, D. B., 1995, Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields: *J. Appl. Meteor.*, **34**, 198–211.
- Rossa, A., Bruen, M., Frühwald, D., Macpherson, B., Holleman, I., Michelson, D., and Michaelides, S., 2005, Use of Radar Observations in Hydrological and NWP Models. COST Action 717: Final Report, COST Office, Luxembourg.
- Rossa, A., Haase, G., Keil, C., Alberoni, P., Ballard, S., Bech, J., Germann, U., Pfeifer, M., and Salonen, K., 2010, Propagation of uncertainty from observing systems into NWP: COST-731 Working Group 1: *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 145–152.
- Šalek, M., Cheze, J.-L., Handwerker, J., Delobbe, L., and Uijlenhoet, R., 2004, Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. COST Action 717: Final Report, COST Office, Luxembourg.
- Steiner, M., Smith, J. A., Burges, S. J., Alonso, C. V., and Darden, R. W., 1999, Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation: *Water Resour. Res.*, **35**, 2487–2503.
- Steiner, M., and Smith, J. A., 2002, Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of non-precipitation echoes in radar data: *J. Atmos. Ocea. Tech.*, **19**, 673–686.
- Szturc, J., Ośródk, K., and Jurczyk, A. 2009, Quality index scheme for 3D radar data volumes: Proceedings of 34th Conference on Bebbington, D., Rae, S., Bech, J., Codina, B., and Picanyol, M., 2007, Modeling of weather radar echoes from anomalous propagation using a hybrid parabolic equation method and NWP model data: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **7**, 391–398.
- Bech, J., Gjertsen, U., and Haase, G., 2007, Modeling weather radar beam propagation and topographical blockage at northern high latitudes: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **133**, 1191–1204.
- Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Meischner, P., Hubbert, J., and Golestani, Y., 1991, Polarimetric radar signature of precipitation at S and C bands: Special issue of IEE proceedings on radar clutter and multipath propagation (part F), **138**(2), 109–119.
- Einfalt, T., Szturc, J., and Ośródk, K., 2010, The quality index for radar precipitation data: A tower of Babel: *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 139–144.
- Gekat, F., Meischner, P., Friedrich, K., Hagen, M., Koistinen, J., Michelson, D. B., and Huuskonen, A., 2004, The state of weather radar operations, networks and products: In: *Weather radar. Principles and advanced applications*, P. Meischner, (Ed.), 1–51, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany.
- Germann, U., and Joss, J., 2004, Operational measurement of precipitation in mountainous terrain: In: *Weather radar. Principles and advanced applications*, P. Meischner, (Ed.), 52–77, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany.
- Golestani, Y., Chandrasekar, V., and Keller, J., 1995, Dual polarized staggered PRT scheme for weather radars: Analysis and applications: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33**(2), 239–246.
- Golestani, Y., Noorian, A. M., and Hudak, D. R., 1999, Preliminary Studies for the Deployment of Weather Radar Network in the Islamic Republic of Iran: 29th International Conference on Radar Meteorology, Montreal, Canada.
- Golestani, Y., Noorian, A. M., and Hudak, D. R., 2000, Design considerations for the two C- and one S-band Doppler weather radars in the Islamic Republic of Iran: *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, 991–994.
- Harrison, D. L., Driscoll, S. J., and Kitchen, M., 2000, Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and

- Vehviläinen, B., Germann, U., and Rossa, A., 2010, Propagation of uncertainty from observing systems and NWP into hydrological models: COST-731 Working Group 2: Atmos. Sci. Lett., **11**, 83–91.
- Zmic, D. S., 2005, Calibrating differential reflectivity on the WSR-88D. Part I: NSSL Report, May 2005.
- Zmic, D. S., 2007: Calibrating differential reflectivity on the WSR-88D. Part II: NSSL Report, April 2007.
- Radar Meteorology AMS, 5–9 October, Williamsburg, VA.
- Yilmaz, K., Hogue, T., Hsu, K., Sorooshian, S., Gupta, H., and Wagener, T., 2005, Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting: J. Hydrometeor., **6**, 497–517.
- Zappa, M., Beven, K. J., Bruen, M., Cofiño, A. S., Kok, K., Martin, E., Nurmi, P., Orfila, B., Roulin, E., Schröter, K., Seed, A., Szturc, J.,