

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، تابستان ۱۳۹۷، صص ۱۵۲-۱۳۵

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۰ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

امکان‌سنجی کارایی رادار داپلر تبریز در پیش‌بینی بارش‌های شدید منجر به سیل (مطالعه‌ی موردی سیل فروردین ۱۳۹۶ آذرشهر)

محمد امیدفر^{۱*}

هاشم رستم‌زاده^۲

بهروز ساری‌صراف^۲

چکیده

پدیده‌ی سیل یکی از مخاطرات جوی است که فراوانی آن در شمال‌غرب ایران قابل توجه بوده و همه ساله خسارات جانی و مالی فراوانی بر مناطق مختلف وارد می‌کند. فناوری جدید رادار هواشناسی به دلیل دارا بودن مقیاس مناسب قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه‌ای، می‌تواند به عنوان یک ابزار سودمند سنجش از دور در کاهش خسارات وارده بسیار مفید و کارا باشد. هدف از پژوهش حاضر، امکان‌سنجی استفاده کاربردی از فناوری جدید رادار داپلر برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت پدیده‌ی سیل و اعلام هشدار به‌موقع به سازمان‌ها و ساکنان مناطق دارای احتمال وقوع سیل است. برای این منظور داده‌های ابر رادار داپلر تبریز که می‌تواند گسترش سه‌بعدی، سمت و سرعت حرکت و مقدار بارندگی حاصل از سلول‌های ابر بارشی را با دقت و مقیاس مناسب تشخیص دهد، انتخاب و زمان و مکان تشکیل، سمت و سرعت و ابعاد سلول‌های ابر بارشی در رویداد سیل روستای غله‌زار آذرشهر به‌طور دقیق مورد پایش قرار گرفت. نتایج نشان‌داد برآورد بارندگی شش ساعته رادار تبریز همبستگی بالایی با داده‌های متناظر ایستگاه‌های هواشناسی دارد، اما در حالت کلی رادار، مقدار بارندگی را کمتر

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).

E-mail:omidfarmohammad1355143@gmail.com

۲- استادیار آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استاد گروه آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

از ایستگاه‌های هواشناسی برآورد می‌کند. همچنین با توجه به قابلیت نفوذ به داخل ابر امواج رادار و دارا بودن قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب، بسته به محل تشکیل و سرعت توسعه‌ی سلول‌های ابر مولد بارش‌های شدید، می‌توان در محدوده‌ی دید رادار تبریز پدیده‌ی سیل را چند ساعت قبل تشخیص داده و در صورت هماهنگی سازمان‌های مربوطه و اعلام هشدار سریع، خسارات آن را به حداقل رساند.

کلمات کلیدی: رادار داپلر، سلول‌های ابر، سیل، بارش شدید، هشدار سریع، آذرشهر.

مقدمه

پدیده‌ی سیل یکی از مخاطرات جوی است که فراوانی آن در کشور ایران (از جمله منطقه‌ی شمال غرب) قابل توجه بوده و همه ساله خسارات جانی و مالی زیادی را بر ساکنان مناطق مختلف و اغلب روستایی که از طبقه‌ی محروم جامعه هستند وارد می‌کند. بنابراین مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی کارآیی داده‌های رادار در پایش سلول‌های ابر مولد بارش‌های رگباری شدید منجر به وقوع سیل و معرفی مناطقی از میدان دید رادار که پدیده‌های ابر شناختی آن با دقت و صحت بیشتری همراه است، انجام شد. علی‌رغم هزینه بالای نصب و راه‌اندازی رادار تبریز (بیش از ۳ میلیون دلار)، متأسفانه استفاده مناسب و کاربردی از آن انجام نشده است، لذا نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند نقطه‌ی شروعی برای استفاده از مزایای فراوان رادار داپلر و عملیاتی نمودن سامانه‌ی هشدار سریع هواشناسی برای انجام اقدامات و تدابیر لازم در جهت کاهش خسارات ناشی از پدیده‌ی مخرب سیل باشد. از فن‌آوری رادار، در هواشناسی برای پیش‌بینی بارش‌های شدید، تگرگ، سیل و همچنین نوع و مقدار این پدیده‌ها استفاده می‌شود (رسولی، ۱۳۹۰: ۲۳۱). در سال‌های اخیر، رادار داپلر برای افزایش کارایی پیش‌بینی وضع هوا به ابزاری بسیار ارزشمند تبدیل شده است (کاوینی و علیجانی، ۱۳۸۲: ۴۶۷).

بررسی مطالعات علمی منتشر شده در سطح جهان حاکیست فناوری رادارهای داپلری به طور گسترده‌ای در پایش بارش‌های رگباری و سیل‌آسا مورد استفاده قرار گرفته است. دونالدسون به اندازه‌گیری نیم‌رخ بازتاب رادار در بارش‌های شدید رگباری پرداخت. نتایج نشان‌داد افزایش بازتاب در تصویر مورد مطالعه متناسب با افزایش شدت بارش‌های رگباری است (دونالدسون، ۱۹۸۱: ۲۹۲). ناپ و استالکر به بررسی توفان‌های همرفتی چند سلولی به طور همزمان با استفاده از داده‌های رادار داپلر و شاخص‌های انرژی پتانسیلی سلول‌ها پرداختند (ناپ و استالکر، ۲۰۰۱: ۱۸۸). بیکو به بررسی یک ابر سلول^۱ بارشی رگباری با استفاده از رادارهای سیار و داده‌های سازی با قدرت تفکیک بالا پرداخت. نتایج نشان‌داد هسته‌های بازتابی در سلول مورد مطالعه، قبل از رشد کامل سبب ایجاد پژواک‌های چنگکی شکل می‌شود (بیکو، ۲۰۰۸: ۱۵۵). عالم‌گیر برآورد بارش‌های شدید کشور بنگلادش براساس رادار زمینی و ماهواره‌ای را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد در هنگام وقوع بارش‌های شدید و موسمی، رادار نسبت به باران‌سنج مقدار بارش را کمتر برآورد می‌کند (علم‌گیر، ۲۰۰۹: ۷). ویوکینیک و ناج داده‌های بارش روزانه و ساعتی رادار داپلر صربستان را با شبکه‌ی باران‌سنجی مقایسه نمودند. در این مطالعه دو سری داده‌های بارشی شامل: شدت بارش سطحی تک‌قطبی^۲ و شدت بارش سطحی دوقطبی^۳ با ۵ باران‌سنج مورد بررسی قرار گرفته و تفاوت معنی‌داری ما بین دو نوع داده‌های بارشی به دست نیامد (ویوکینیک و ناج، ۲۰۱۶: ۱).

منابع علمی موجود در رابطه با مطالعه‌ی بارش‌های رگباری شدید توسط رادار، در ایران بسیار اندک است. به عنوان نمونه طوفانی‌نژاد در تحقیقی کاربرد رادارهای هواشناسی باند X در برآورد میزان بارندگی حوضه‌های کوچک در منطقه‌ی شهری هلند را مطالعه نمود. نتایج نشان‌داد که داده‌های راداری برای مقایسه، ابتدا نیاز به اصلاح و واسنجی دارند (طوفانی‌نژاد، ۱۳۸۷: ۵۷). خسروی و شکیبا امکان‌سنجی پیش‌بینی وقوع بارش

1- Super cell

2- Surface Rainfall Intensity (SRI)

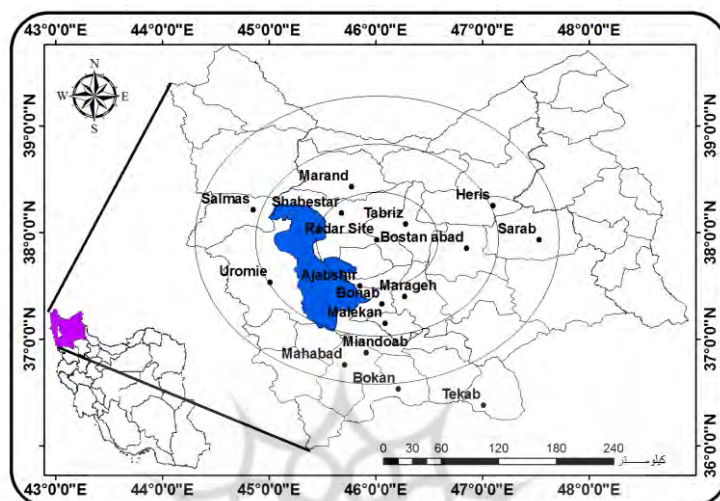
3- Dual Pole Surface Rainfall Intensity(DPSRI)

سیل آسا به کمک مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی توانایی بیشتری نسبت به مدل‌های آماری دارد (خسروی و شکیبا، ۱۳۹۰: ۱). کریم‌خانی و ارکیان طوفان‌های تندری همراه با بارش‌های سیل‌آسای منطقه‌ی شمال غرب را بررسی نمود. بخش عمده این طوفان‌های تندری سیلاب ساز از نوع تک سلولی و چند سلولی بودند که پس از حرکت و ادغام با یکدیگر به سلول‌های مختلط تبدیل شدند (کریم‌خانی و ارکیان، ۱۳۹۳: ۲۵۷).

با کنکاش در میان پژوهش‌های انجام یافته در زمینه کاربرد فن‌آوری رادار در شناسایی پدیده‌های جوی مشخص گردید پژوهش‌های متعددی در خارج از کشور برای مطالعه‌ی شرایط جوی انجام شده است. اما در کشور ایران، شبکه‌ی ملی رادار اغلب در نیمه غربی کشور، به تعداد محدودی نصب و راه‌اندازی شده و به دلیل اینکه اطلاعات تولیدی آن‌ها اغلب به سختی در دسترس بوده و متخصصان علمی محدودی تربیت شده‌اند، پژوهش‌های اندکی انجام شده است. با توجه به اهمیت پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت در پایش سلول‌های همرفتی در شمال غرب ایران و وجود آرشیو ده ساله داده‌های رادار، ضرورت انجام مطالعه‌ی حاضر تبیین می‌شود.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از شمال غرب ایران است که در فاصله‌ی برد مؤثر امواج رادار تبریز قرار دارد. این محدوده شامل استان‌های آذربایجان غربی و شرقی و نیمه شمالی استان اردبیل می‌باشد. با توجه به توان امواج رادار، برد مؤثر آن تا شعاع ۲۵۰ کیلومتر قابل استفاده است. البته به دلیل وجود ارتفاعات سهند و سبلان، نیمه‌ی جنوبی استان اردبیل و نواحی جنوبی و جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی در نقطه‌ی کور رادار قرار دارند. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی محدوده دید رادار، در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱) نقشه‌ی محدوده‌ی جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه، به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و برد موثر امواج رادار با فواصل ۵۰ کیلومتری نسبت به رادار تبریز

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نقشه‌های سطح زمین و سطح ۵۰۰ هکتو پاسکال و داده‌های برآوردی بارش شش ساعته ایستگاه‌های هواشناسی برای تحلیل وضعیت سینوپتیکی منطقه‌ی مورد مطالعه از سازمان هواشناسی دریافت شد. همچنین برای تشخیص میزان ناپایداری محلی، نقشه‌های جو بالای دو ایستگاه فرودگاهی: تبریز و ایروان (در کشور ارمنستان) برای بررسی شدت ناپایداری محلی از سایت اینترنتی معتبر دانشگاه ایومینگ اخذ شد. سپس داده‌های متنوع هیدرولوژی، بازتابی و سمت و سرعت باد رادار داپلر تبریز از آرشیو اداره کل هواشناسی تبریز دریافت و بعد از صحت‌سنجی برای پایش رویداد سیل مورد استفاده قرار گرفت.

تصاویر رادار تبریز در وبگاه سازمان هواشناسی به صورت برخط^۱، موجود بوده و در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت جوی و تحقیقات هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1- Online

داده‌های متنوعی توسط رادار تولید می‌شوند که تعداد آن‌ها به بیش از پنجاه نوع می‌رسد. داده‌های مذکور بر اساس ضریب بازتاب امواج بازگشتی که توسط معادله رادار به توان برگشتی مربوط می‌شود تولید می‌گردند. معادله رادار توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود که در این رابطه Z_e ضریب بازتاب، p توان بازگشتی، r فاصله از رادار و c ، a و k ضرایب ثابت هستند که به مشخصات دستگاه رادار بستگی دارند:

$$P_r \equiv Ca^2(r) \frac{|k^2|}{r^2} Z_e \quad \text{رابطه‌ی (۱) (رینهارت، ۱۹۹۷: ۶۵)}$$

در رابطه‌ی (۱) Z_e یک متغیر هواشناسی است که به وسیله‌ی تعداد و اندازه‌ی ذرات در حجم، مشخص می‌شود که در محدوده‌ی بسیار کوچک برای مه رقیق برابر با $(\frac{mm^6}{m^3})$ ۰/۰۰۱، تا مقادیر بسیار بزرگ در حدود $(\frac{mm^6}{m^3})$ ۱۰۰۰۰۰۰ (تگرگ) قرار دارد. لذا بهتر است دامنه‌ی وسیع تغییرات، فشرده‌سازی شود. برای این منظور فاکتور بازتابش لگاریتمی رادار برحسب واحد دسی‌بل^۱ بکار می‌رود. از میان داده‌های خروجی رادار تیریز مشخصات داده‌های بکار رفته در این پژوهش به اختصار توضیح داده شده‌اند:

- داده‌های حداکثر بازتاب^۲ از نتایج بازتاب اسکن حجمی با چند زاویه‌ی ارتفاعی مختلف و زاویه‌ی سمت ۳۶۰ درجه تولید و بعد از پردازش روی صفحه‌ی گرافیکی نشان داده می‌شود که حاوی اطلاعات مربوط به نمایش حداکثر ارتفاع و چگالی درون ابر می‌باشد. این نوع داده در شناسایی و ردیابی سلول‌های بارشی بسیار مفید است.

- داده‌های برآورد بارندگی^۳ تجمعی سطح زمین^۳ از تجمیع داده‌های برآوردی شدت بارش سطحی در محدوده‌ی زمانی تعریف شده محاسبه می‌شود و بازه‌ی زمانی آن قابل تنظیم است. مقدار R (شدت بارش) وابستگی مستقیم به Z داشته و نتایج مطالعات نشان می‌دهد بهترین رابطه مابین این دو کمیت به صورت توانی از R است:

1- DBZ

2- Maximum Display(MAX)

3- Surface Rainfall Intensity

$$Z = aR^b \quad (\text{رینهارت، ۱۹۹۷: ۱۵۷})$$

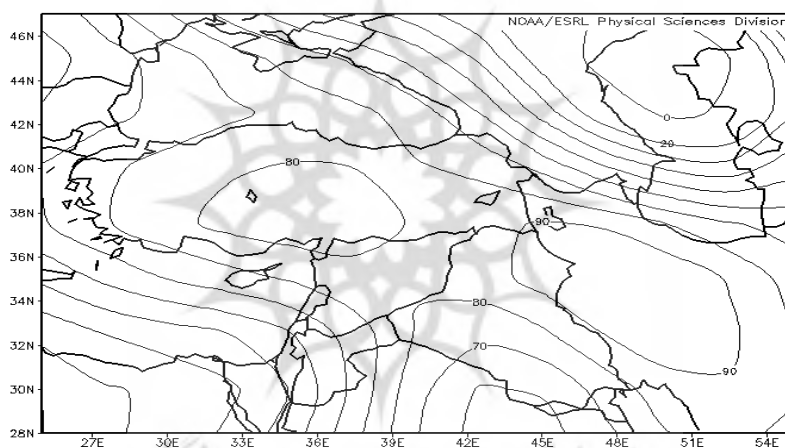
در رابطه‌ی (۲) واحد اندازه‌گیری شدت بارندگی برحسب میلی‌متر بر بوده و ضرایب a و b اعداد ثابتی هستند که نسبت به موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه و نوع بارش‌ها متفاوت هستند. بهترین روش واسنجی ضرایب مذکور، استفاده از داده‌های درازمدت حاصل از رادار و باران‌سنج است. با توجه به این‌که داده‌های برآوردی بارش ایستگاه‌های هواشناسی حداقل از هر شش ساعت گزارش می‌شوند، برای مقایسه با رادار، داده‌های بارش تجمعی رادار نیز توسط نرم افزار رادار^۱ در بازه‌ی شش ساعته تولید و مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای پایش دقیق سیل، از ابتدای روز، داده‌ی حداکثر بازتاب رادار با گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای مورد بررسی دقیق قرار گرفته و براساس این تصاویر زمان و مکان شکل‌گیری، مسیر حرکت، اوج فعالیت و در نهایت میرایی سلول بارشی مولد سیل، مورد پایش قرار گرفت.

بحث و نتایج

رویداد بارندگی ۲۵ فروردین ۱۳۹۶ یکی از شدیدترین بارندگی‌های روی داده در منطقه‌ی شمال غرب کشور بود که موجب جاری شدن سیل در چندین منطقه گردیده و بیشترین آمار خسارات جانی و مالی آن از روستای غله‌زار آذرشهر و شهر ارومیه گزارش گردید.

در شکل (۲) نقشه‌های سطح زمین منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. در نقشه‌ی سطح زمین زبانه پرفشار که مرکز آن در کشور روسیه قرار دارد، با گرادیان نسبتاً ضعیفی از روی ارتفاعات رشته‌کوه البرز تا نواحی مرکزی منطقه‌ی مورد مطالعه گسترش یافته و با توجه به محل خطوط هم‌فشار که از نواحی خشک مرکزی کشور به سمت شمال غرب کشیده شده است؛ انتظار انتقال رطوبت قابل توجهی از این زبانه پرفشار وجود ندارد.

در نقشه‌ی ۵۰۰ سطح هکتو پاسکال (شکل ۲)، ناوه‌ی عمیقی در حال حرکت شرق سو می‌باشد. اما ناوه‌ی مذکور در دو نقطه از هم گسسته و به دو ناوه‌ی تقریباً جدا از هم تبدیل شده که قوی‌ترین قسمت آن در کشور روسیه قرار دارد. مرکز ناوه‌ی دوم روی دریای سرخ قرار داشته و جهت کنتورها نشان‌دهنده‌ی این است که منبع اصلی دریافت رطوبت، بیشتر از دریای سرخ بوده و دریای مدیترانه نقش کمتری دارد. لذا با توجه به وضعیت موجود در نقشه‌های سینوپتیکی، مراکز پیش‌بینی تهران و تبریز انتظار فعالیت قابل توجهی از این سامانه در شمال غرب نداشته و خطریه صادر نشده بود.

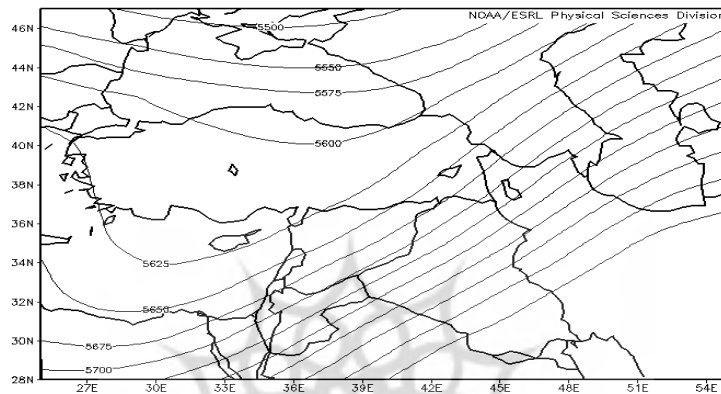


شکل (۲) نقشه‌ی سطح زمین ساعت ۱۲ گرینویچ

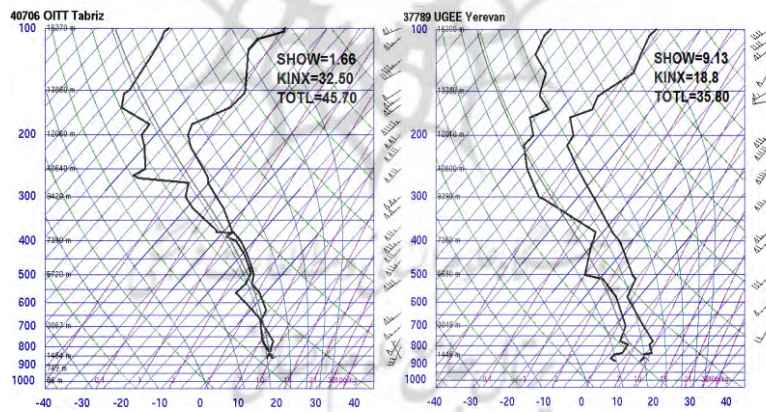
شکل (۴) نقشه‌های جو بالای دو منطقه‌ی: ایستگاه ایروان و تبریز که به ترتیب در موقعیت‌های شمال و مرکز منطقه‌ی مورد مطالعه قرار دارند، نشان داده شده است. براساس این نمودارها رطوبت زیادی در ایستگاه تبریز نسبت به ایروان تا ارتفاعات بالاتری گسترش یافته، همچنین با توجه به شاخص‌های ناپایداری، شدت ناپایداری محلی در ایستگاه تبریز نسبت به ایروان بیشتر است. مقدار شاخص (KINX)^۱ که

1- K Index

نشان‌دهنده‌ی شدت ناپایداری همرفتی و احتمال وقوع توفان تندری است، در شهر تبریز ۳۲/۵ و ایروان ۱۸/۸ می‌باشند.



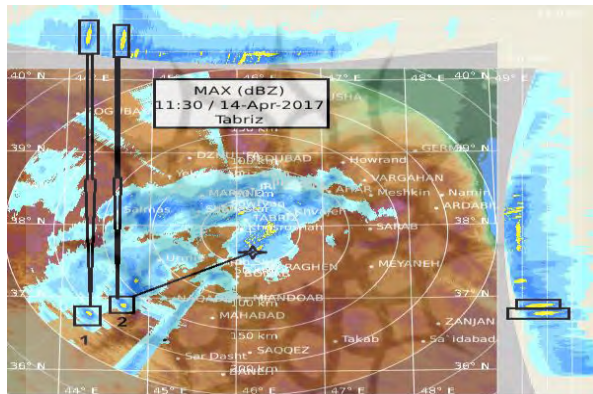
شکل (۳) نقشه‌ی سطح ۵۰۰ هکتو پاسکال ساعت ۱۲ گرینویچ



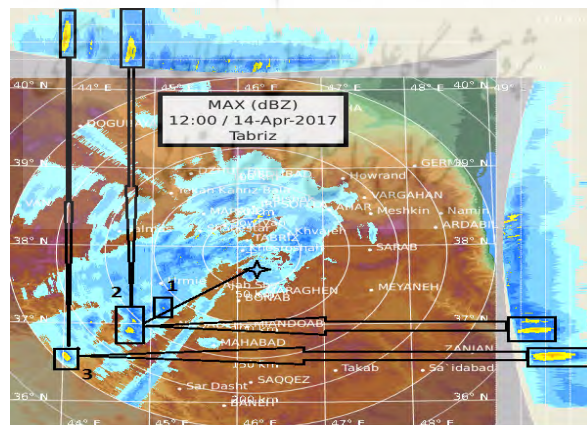
شکل (۴) نقشه‌های جو بالای ایستگاه‌های: تبریز و ایروان در ساعت ۱۲ گرینویچ

برای پایش رخداد سیل، داده‌های حداکثر بازتاب از زمان ورود سلول‌های مولد سیل به دقت بررسی و مشاهده گردید اولین ورود دو سلول همرفتی مرتفع با ارتفاع بیش از ۶ کیلومتر به محدوده‌ی دید رادار، در زمان ۱۱:۳۰ گرینویچ اتفاق افتاد (شکل ۵). سلول‌های

مذکور در فاصله‌ی شعاعی ۱۷۰ و ۲۰۰ کیلومتری جنوب غربی رادار قرار داشتند که با توجه به دو دلیل زیر سلول‌های مذکور از وضعیت ظاهری‌شان، بسیار قوی‌تر هستند. داده‌های ساعت ۱۲ گرینویچ (شکل ۶) نشان می‌دهد در فاصله‌ی نیم ساعت سلول‌ها، در حدود ۳۰ کیلومتر در جهت جنوب‌غربی، به محل سیل نزدیک‌تر شده‌اند. علاوه بر آن سلول قوی دیگری با ارتفاع بالای ۱۰ کیلومتری، در فاصله ۲۵۰ کیلومتری رادار از غرب آذربایجان غربی در حال ورود به کشور می‌باشد.

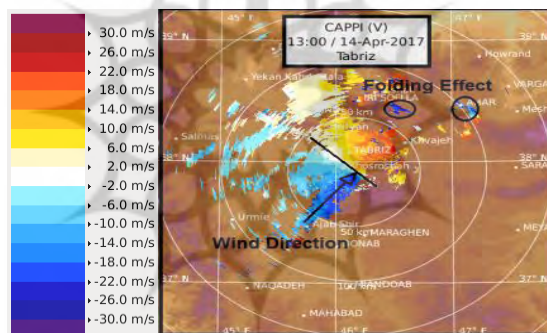


شکل (۵) داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۱:۳۰ گرینویچ



شکل (۶) داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۲ گرینویچ

در داده‌های سمت و سرعت باد رادار (شکل ۷)، سرعت‌های منفی (آبی‌رنگ) به معنی نزدیک شدن ابر به رادار و سرعت‌های مثبت (قرمز رنگ) به معنی دور شدن از رادار می‌باشند. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است جهت غالب حرکت سلول‌ها در تمام مراحل، جنوب‌غربی (در حدود ۲۰۰ الی ۲۴۰ درجه) بوده و در اغلب موارد با توجه به این‌که سرعت حرکت سامانه‌ی بارشی بیشتر از ۳۰ متربرثانیه است، اثر فولدینگ^۱ (معکوس شدن رنگ در سرعت‌های بالا) اتفاق افتاده است. با توجه به سرعت و جهت حرکت محاسبه شده در شکل‌های (۶ و ۷) هر دو نشان‌دهنده‌ی سرعت بالا بوده که با توجه به این مسئله، لزوم هماهنگی سریع سازمان‌های ذیربط، مخصوصاً شهرهایی که در مسیر حرکت سلول‌ها تأیید می‌شود.

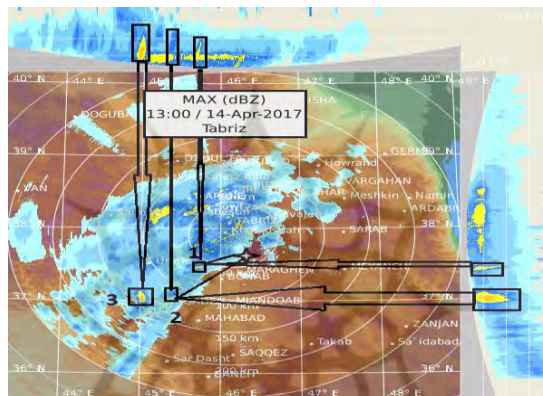


شکل (۷) داده‌های سمت و سرعت باد رادار در زمان وقوع سیل، به همراه مقیاس رنگی

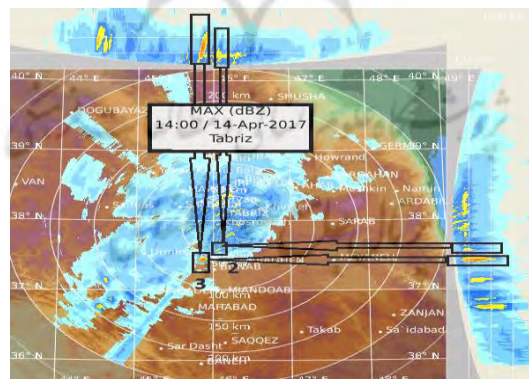
داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۳ (شکل ۸) نشان می‌دهد در مدت یک ساعت سلول‌های مورد مطالعه به اندازه‌ی ۵۰ کیلومتر در جهت شمال شرقی ضمن حرکت، در مسیر خود تضعیف شده و گسترده‌ی آن نیز کاهش یافته است. در این حالت ابرهای همرفتی (مولد سیل) به ابرهای پوششی (بارش یکنواخت) تبدیل شده‌اند. ابعاد سلول همرفتی سوم نشان می‌دهد از سلول‌های قبلی بزرگ‌تر و قوی‌تر بوده و شدت بارندگی آن بیشتر است. در این زمان فاصله‌ی سلول مورد نظر با محل سیل در حدود

1- Folding Effect

۱۰۰ کیلومتر است. داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۴ (شکل ۹) نشان می‌دهد سرعت سلول در این زمان افزایش یافته و در مدت یک ساعت فاصله‌ی تقریبی ۸۰ کیلومتر را طی نموده است. همچنین با توجه به ناپایداری محلی شدید اطراف تبریز شدت بارش‌های سلول مذکور شدیداً افزایش یافته و با تبدیل رنگ هسته‌ی سلول از رنگ زرد به قرمز، ناپایداری محلی همرفتی را تقویت نموده است.



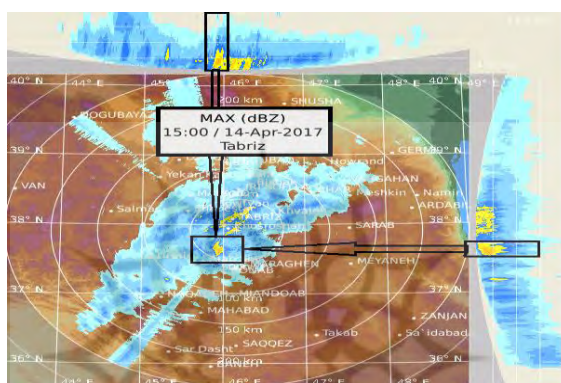
شکل (۸) داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۳ گرینویچ



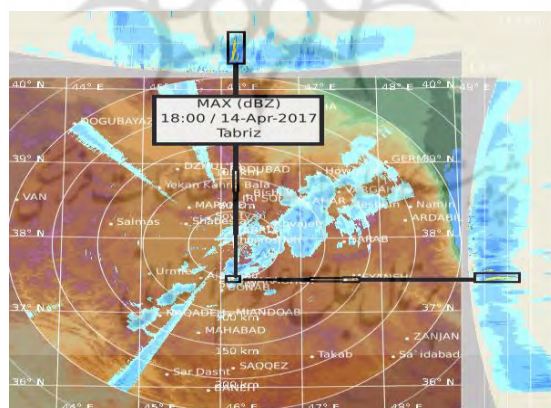
شکل (۹) داده‌های حداکثر بازتاب رادار ساعت ۱۴ گرینویچ

بررسی داده‌های حداکثر بازتاب ساعت ۱۵ و ۱۸ (شکل ۱۰ و ۱۱) نشان‌دهنده‌ی تضعیف تدریجی سلول بارشی در این مدت بوده و از نظر ابعاد کوچک‌تر شده است. در

ساعت ۱۸ تقریباً بیشتر بارش‌های منطقه قطع شده و سامانه بارشی در حال خروج از منطقه است. لذا در هنگام تضعیف کامل سامانه نیز لازم است مجدداً به سازمان‌های مربوطه اطلاع‌رسانی شود که فعالیت سامانه کاهش یافته تا در مناطقی که حادثه‌ای روی نداده از حالت آماده‌باش خارج شوند.



شکل (۱۰) داده‌های حداکثر بازتاب ساعات ۱۵ گرینوچ



شکل (۱۱) داده‌های حداکثر بازتاب ساعات ۱۸ گرینوچ

پایش ساعتی سلول‌های مولد سیل: در جدول (۱) ابعاد سه بعدی و موقعیت سلول‌های بارشی مولد سیل با استفاده از داده‌های رادار استخراج شده‌اند:

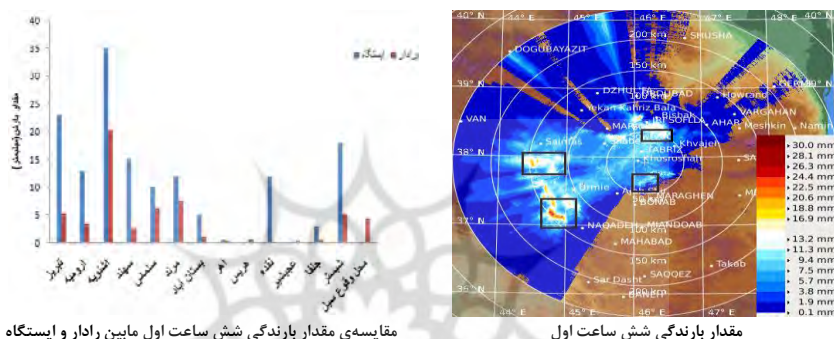
جدول (۱) موقعیت، ابعاد تقریبی و ارتفاع قائم سلول‌های مولد سیل نسبت به محل وقوع

نام سلول	محل سیل (km)	گسترش قائم سلول (km)	مساحت تقریبی سلول (km ²)	فاصله تا محل سیل (km)	گسترش قائم سلول (km)	مساحت تقریبی سلول (km ²)	فاصله تا محل سیل (km)	گسترش قائم سلول (km)	مساحت تقریبی سلول (km ²)	فاصله تا محل سیل (km)	گسترش قائم سلول (km)	مساحت تقریبی سلول (km ²)	فاصله تا محل سیل (km)	گسترش قائم سلول (km)	مساحت تقریبی سلول (km ²)
۱ سلول	۱۷۰	۶	۴۹	۱۲۰	۶	۹	۶۰	۵	۳۵	۰	-	-	-	-	-
۲ سلول	۲۰۰	۶	۲۵	۱۶۰	۸	۸۰	۱۰۰	۶	۹	۱۰	۶	۳۵	۰	-	-
۳ سلول	-	-	-	۲۴۰	۱۱	۵۰	۱۵۰	۸	۸۴	۵۰	۱۰	۹۰	۱۰	۱۲	۹۰

بررسی ۶ ساعته بارندگی: با توجه به این که در ایستگاه‌های هواشناسی مقدار بارندگی حداقل از هر ۶ ساعت گزارش می‌شود، برای مقایسه مقادیر برآوردی رادار با ایستگاه‌ها، با قرار دادن داده‌های خام در نرم افزار رادار برآورد بارش تجمعی با بازه زمانی تولید و با مقادیر گزارش شده ایستگاه‌ها مقایسه شد.

بررسی روزانه بارندگی: شکل (۱۴) داده‌های برآوردی بارش تجمعی روزانه رادار تبریز در روز وقوع سیل را نشان می‌دهد. در این شکل با وجود این که مقدار بارندگی حداقل در چهار منطقه بیش از ۳۰ میلی‌متر گزارش شده، اما پدیده‌ی سیل فقط در دو منطقه که با شماره‌ی ۱ و ۲ مشخص شده، روی داده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر شمال تبریز و جنوب غرب ارومیه است که در هر دو منطقه، علی‌رغم این که ناحیه‌ی بارش سنگین نسبت به منطقه‌ی آذرشهر از وسعت و شدت بیشتری برخوردار است، اما در شمال تبریز سیل روی نداده و هیچ‌گونه تلفات انسانی گزارش نشده است، در صورتی که در منطقه‌ی آذرشهر متأسفانه بیش از ۱۰ نفر فقط در پل زیرگذر ورودی شهر، جان خود را از دست داده و تعداد قابل توجهی نیز در روستای پایین دست آذرشهر جان خود را ازدست دادند. این مسئله نشان می‌دهد؛ وقوع سیل به عوامل زیادی بستگی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها، می‌توان به نوع سلول‌های بارشی منطقه از نظر جوششی یا همرفتی (با بارش

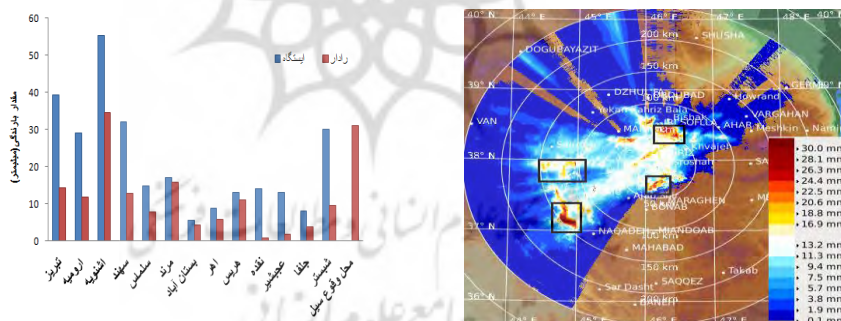
شدید و کوتاه‌مدت) و پوششی اشاره نمود که خوشبختانه داده‌های خروجی رادار قابلیت تشخیص نوع و ابعاد سلول‌های بارشی را با دقت قابل قبولی دارند، که این امتیاز رادار می‌تواند در صورت استفاده به هنگام و پیش‌بینی سیل خسارات جانی و مالی را کاهش دهد.



مقایسه مقدار بارندگی شش ساعت اول مابین رادار و ایستگاه

مقدار بارندگی شش ساعت اول

شکل (۱۲) مقایسه بارش برآوردی شش ساعته رادار تریز با ایستگاه‌های هواشناسی



شکل (۱۳) بارش تجمعی روزانه‌ی رادار به همراه نمودار فراوانی داده‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

با توجه به فراوانی قابل‌توجه پدیده‌ی سیل در منطقه‌ی شمال‌غرب کشور و پیامدها و خسارات فراوان جانی و مالی حاصل از این پدیده‌ی مخرب جوی، در این پژوهش به منظور بررسی امکان پیش‌بینی پدیده‌ی سیل و پایش سلول‌های ابر مولد بارندگی رگباری

شدید توسط فناوری جدید رادار داپلر، از داده‌های هیدروولوژی رادار در گام‌های زمانی مختلف (۶ و ۲۴ ساعته)، داده‌های حداکثر بازتاب رادار (برای پایش ابعاد سه‌بعدی و موقعیت سلول‌های بارشی) و داده‌های سمت و سرعت باد برای تعیین سرعت و مسیر حرکت و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده گردید. در مناطق کوهستانی، از جمله منطقه‌ی مورد مطالعه در زمان ناپایداری وجود کوه‌های مرتفع به دلیل صعود اروگرافیک، در مدت زمان نسبتاً کوتاهی، موجب ایجاد و یا تشدید ناپایداری شده و بارش‌های رگباری شدیدی تولید می‌کند که در نقشه‌های سینوپتیک میان‌مقیاس این پدیده با توجه به مقیاس کوچک بودن قابل تشخیص و پیش‌بینی نیستند. نتایج نشان داد رادار داپلر با توجه به دارا بودن دقت کافی ابزار بسیار سودمندی برای شناسایی، سنجش تغییرات ابعاد ارتفاعی، گسترش سطحی و زمان و مسیر حرکت سلول‌های مولد سیل و بارش‌های رگباری شدید بوده و می‌تواند در صورت هماهنگی مناسب با سازمان‌های مرتبط چند ساعت قبل از وقوع پدیده سیل به عنوان ابزار سیستم هشدار سریع عمل نموده و مزایای بسیار زیادی در جهت کاهش خسارات داشته باشد. البته رادار نسبت به ایستگاه‌ها، بارندگی را کمتر برآورد می‌کند. این نقیصه می‌تواند ناشی از سنجش بارش در ارتفاع بالاتر از سطح زمین بوده و با اعتبارسنجی تنظیم شود.

منابع

- طوفانی‌نژاد، زهرا؛ علیزاده، مهدی و غلامعلی کمالی (۱۳۸۷)، کاربرد رادارهای هواشناسی باند X در برآورد میزان بارندگی در حوضه‌های کوچک، مجله‌ی آب و خاک، شماره‌ی ۲۳(۱)، صص ۵۷-۷۶.
- محمدی‌ها، امیر (۱۳۹۲)، ارزیابی برآوردهای رادار هواشناسی تهران از کمیت بارشی به روش Z-R برای سه رویداد بارش سال‌های (۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱)، مجله‌ی فیزیک زمین و فضا، دوره‌ی ۳۹، شماره ۲، ۱۳۹۲، صص ۲۰۴-۱۸۷.
- کاویانی، مسعود و بهلول علیجانی (۱۳۸۵)، مبانی آب و هواشناسی، انتشارات سمت، چاپ دوازدهم.
- کریم‌خانی، محمود و فروزان ارکیان (۱۳۹۳)، بررسی شدت، مدت و نوع طوفان‌های تندری منجر به سیلاب در آذربایجان شرقی با استفاده از تصاویر رادار تبریز، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص ۲۵۷-۲۶۱.
- Byko, Z., Murkowski, P. & Richardson, Y. (2009), **Descending reflectivity cores in super cell thunderstorms observed by mobile radars and in a high-resolution numerical simulation**, *Weather and forecasting*, 24: PP.155-186.
- Buyukbas, E., (2006), **Training Material Radar Systems Instrument and Observation Methods**, *World Meteorological Organization*, Antalya, Turkey, PP. 29.
- Donaldson, R. (1981), **Radar reflectivity profiles in thunderstorm**, *Journal of Meteorology*, Vol. 18, P. 292.
- Clift, G., (1985), **Use of Radars in Meteorology**, WMO, No. 625, Geneva, Switzerland.
- Egana, J., S. Gaztelumendi, S., Palacio, V., Gelpi, I., Otxoa de Alda, K., Hernandez, R., Maruri, M. (2012), **Using Euskalmet Radar data for analysis of a persistent precipitation case**, *The European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Barcelona, Spain.

- Hohl, R., Schiesser, H. (2002), **The use of radars to estimate hail damage to automobiles, An exploratory study in Switzerland, Atmospheric Research**, Vol. 61, PP. 215-238.
- Knupp, K., Stalker, J. (2002), **A Method to Identify Convective Cells within Multi cell Thunderstorms from Doppler Radar Data, Monthly Weather Review**, Vol. 130, PP. 188.
- Marshall, J., Palmer, W. (1948), **Distribution of rain drops with size**, J. Meteorology, Vol. 5, PP.165-166.
- Rinehart, R. (1997), **Radar for meteorology**, University of North Dakota, Rinehart Publications, United State of America, Third Edition, PP. 440.
- Sun, X., Mein, R.G., Keenan, T.D., Elliott, J.F. (2000), **Flood estimation using radar and rain gauge data**, Journal of Hydrology, Vol. 239, PP. 4-18.

