

تعیین مناطق هدف در پروژه‌های عملیاتی بارورسازی ابرها در ایران به کمک شبیه‌سازی پخش مواد باروری با استفاده از مدل پاشندگی HYSPLIT

منصوره سیدحسینی^۱، فاطمه مرادیان^۲، سرمد قادر^{۳*}، فرید گلکار^۴، و مسعود حاتم‌پور^۴

^۱ کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد، ایران
^۲ کارشناس ارشد هواشناسی، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد، ایران
^۳ دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۴ کارشناس الکترونیک، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹)

چکیده

تعیین مناطق تحت‌تأثیر مواد باروری (مناطق هدف) از موضوعات مهم در اجرای برنامه‌های استاندارد بارورسازی ابرها است. مدل پاشندگی HYSPLIT امکان شبیه‌سازی انتقال، پخش و نهشت عوامل باروری و تصویر کردن منطقه تحت‌تأثیر آنها را روی نقشه فراهم می‌کند؛ بنابراین در این پژوهش با تأمین داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل HYSPLIT به کمک اجرای مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF، نقش برخی از پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی منطقه هدف بررسی می‌شود. برای اطمینان از کیفیت داده‌های ورودی، داده‌های باد و دمای خروجی مدل WRF با اندازه‌گیری‌های ثبت‌شده به وسیله سنجنده‌های هواپیمای مورد استفاده در بارورسازی ابرها اعتبارسنجی و سپس تأثیرپذیری مدل پاشندگی در شبیه‌سازی محدوده پخش مواد باروری به ترتیب از دیدگاه پارامترسازی فیزیکی مدل WRF، تفکیک مکانی و زمانی داده‌های ورودی و تفکیک مکانی مدل HYSPLIT بررسی می‌شود. برای این منظور، مدل WRF با به‌کارگیری هشت ترکیب متفاوت از پارامترسازی فیزیکی برای سی‌وچهار پرواز بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۷ به‌اجراء آمد و محدوده پخش حاصل از آنها مقایسه شد. سپس مدل HYSPLIT برای چهار پرواز منتخب با داده‌های ورودی در سه تفکیک زمانی و دو تفکیک مکانی داده‌های هواشناسی ورودی و سه تفکیک مکانی مدل اجرا شد. نتایج، حاکی از حساسیت مدل HYSPLIT در شبیه‌سازی محدوده پخش مواد باروری به همه پارامترهای اعمال‌شده در این پژوهش است؛ البته میزان این حساسیت متفاوت است. نتایج مدل پاشندگی در ارتفاع پرواز هواپیمای باروری به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر انتخاب ترکیب پارامترسازی فیزیکی مدل WRF است؛ تغییر در پیکربندی پارامترسازی فیزیکی، در برخی موارد، تفاوت‌های معنی‌داری در محدوده پخش مواد باروری ایجاد می‌کند، اما در بیشتر موارد، افزایش تفکیک افقی داده‌های ورودی و افزایش تفکیک مکانی اجرای مدل HYSPLIT، تأثیر شایان‌توجهی در افزایش یا کاهش معنی‌دار در محدوده پخش مواد باروری نخواهد داشت و حساسیت مدل به تفکیک زمانی داده‌های ورودی نیز قابل‌چشم‌پوشی است.

واژه‌های کلیدی: بارورسازی ابرها، مدل HYSPLIT، مدل WRF، منطقه هدف، تفکیک مکانی و زمانی، پارامترسازی فیزیکی

۱ مقدمه

تغییر تدریجی اقلیم و کاهش چشمگیر بارش‌های جوئی، موجب گسترش و توسعه روش‌های تعدیل آب و هوا از قبیل بارورسازی ابرها در نقاط مختلف دنیا از جمله ایران شده است به طوری که از حدود بیست سال پیش تاکنون، اجرای این برنامه‌ها در کشور به تدریج گسترش فراوانی یافته است. در حال حاضر، قسمت عمده‌ای از مساحت ایران زیرپوشش بارورسازی ابرها یا بارورسازی ابرها (Cloud Seeding) به روش هوایی قرار دارد. عملیات بارورسازی ابرها در ایران با استفاده از هواپیمای باروری مجهز به حسگرهای مختلف اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی صورت می‌گیرد. در این روش، ترکیباتی از یدیدنقره به صورت پیروپاترون به بدنه هواپیما متصل و در موقعیت مناسب به درون ابر شلیک می‌شود. هواپیمای باروری، توان پرواز تا شش ساعت را دارد و در مجموع حامل ۳۸۴ پیروپاترون یدیدنقره است که در دو طرف بدنه هواپیما نصب می‌شوند. اندازه‌گیری‌هایی که با حسگرهای نصب‌شده روی هواپیما انجام و درون هواپیما حین پرواز به نمایش گذاشته می‌شوند و نیز پردازش‌های اجراشده روی محصولات مختلف رادارهای هواشناسی که در مرکز عملیات باروری روی زمین صورت گرفته است و به کمک تجهیزات مربوطه، به کارشناسان هواشناس حاضر در هواپیما مخابره می‌شوند؛ امکان بارورسازی سامانه ابری را در مکان و زمان مناسب فراهم می‌کنند. پیروپاترون‌ها پس از جدا شدن از بدنه هواپیما می‌سوزند و با پخش و انتشار دود حاوی مواد باروری، بر فرایندهای خردفیزیکی ابر تأثیر می‌گذارند و موجب افزایش بارش می‌شوند. مشخصات کامل زمان، ارتفاع از سطح زمین و دریا و مختصات دقیق جغرافیایی نقاط شلیک پیروپاترون‌ها به وسیله سیستم‌های ثبت اطلاعات درون هواپیما ثبت می‌شود و در اختیار کارشناسان جهت پردازش‌های بعدی قرار می‌گیرد.

یکی از ویژگی‌های اجرای برنامه‌های بارورسازی ابرها در هر منطقه، علاقه همه اعضای جامعه به اطلاع از میزان تأثیر اجرای برنامه بارورسازی ابرها یا ارزیابی برنامه است (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶). نظر به هزینه گزاف فناوری‌هایی که به روش مستقیم، تغییرات ایجاد شده در اثر اجرای بارورسازی ابرها را ارزیابی می‌کنند، ارزیابی این برنامه‌ها اغلب به کمک روش‌های آماری انجام می‌شود (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶). رایج‌ترین روش آماری جهت ارزیابی پروژه‌های عملیاتی بارورسازی ابرها که در آنها از تمامی فرصت‌های باروری جهت استحصال منابع آب جوئی استفاده می‌شود، روش وایازش تاریخی هدف/کنترل است (دنيس، ۱۹۸۰) که در ایران نیز اصلی‌ترین روش برای ارزیابی این برنامه‌ها محسوب می‌شود. در این روش، ابتدا یک معادله وایازش خطی چندمتغیره بین داده‌های بارش (برف یا رواناب) بلندمدت منطقه هدف و منطقه کنترل برقرار و مقدار بارش منطقه هدف در صورت انجام نشدن باروری، براساس بارش مشاهده‌ای در منطقه کنترل پیش‌بینی می‌شود (به منظور داشتن توزیع نرمال، بازه زمانی داده‌های بارش ترجیحاً بیشتر از سی سال است). مقایسه بارش پیش‌بینی - شده در منطقه هدف با بارش مشاهده‌ای در طول دوره باروری، تغییرات بارشی را تخمین می‌زند. این تغییرات بارشی به طور بالقوه می‌تواند به بارورسازی ابرها نسبت داده شود. در این روش، منطقه هدف منطقه‌ای است که بارورسازی ابرها در محدوده آن انجام می‌شود و باید قبل از آغاز باروری تعیین شود. منطقه یا مناطق کنترل نیز مناطقی هستند که در نزدیکی منطقه هدف قرار دارند و به طور آرمانی، از نظر هواشناسی مشابه منطقه هدف انتخاب می‌شوند و تحت تأثیر باروری آن پروژه یا دیگر پروژه‌های باروری نزدیک آن منطقه قرار ندارند (سپر و هیم‌باخ، ۲۰۰۵ الف، ب). در روش گفته شده، درجه همبستگی بین داده‌های هدف و کنترل، توانایی روش را

هدف و یا منطقه متأثر از مواد باروری که لازمه ارزیابی کمی موفقیت برنامه‌های افزایش بارش محسوب می‌شود، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مناطق کنترل و در نهایت کیفیت ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در ایران دارد و در سال‌های اخیر تلاش شده است تا با استفاده از آخرین پیشرفت‌های علمی روز، روش‌های تعیین آن بهبود یابد.

مطالعات نشان داده‌اند که تعیین منطقه متأثر از مواد باروری به کمک کنترل انتشار و پخش دود حاصل از سوختن باروری، می‌تواند روش مناسبی برای تعیین منطقه هدف به‌شمار آید. علاوه بر آن، بررسی نقش نتایج ارزیابی این برنامه‌ها در چرخه آب‌شناختی منطقه و بررسی اثرهای زیست‌محیطی مواد باروری نیز نیازمند آگاهی مناسب از محدوده انتقال، تأثیرگذاری و نهشت مواد آزادشده به درون ابرها است؛ بنابراین تعیین دقیق منطقه متأثر از مواد باروری موضوعی است که در دنیا اهمیت بسزایی در طراحی و اجرای برنامه‌های بارورسازی ابرها دارد و از ابتدا تاکنون تلاش شده است تا روش‌های دقیقی در تعیین آن معرفی شود. به همین دلیل در سی سال گذشته، با صرف هزینه‌های کلان و به‌کارگیری تجهیزات پیچیده اندازه‌گیری در پروژه‌های پژوهشی مهم تلاش شده است میزان انتقال و پخش افقی و قائم عوامل باروری هوابرد و زمینی و کمیّت اثرهای ناشی از بارورسازی ابرها تعیین شود (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶؛ ساپر و رینولدز، ۱۹۹۱ و ساپر، ۱۹۹۹). یکی از شیوه‌هایی که از همان ابتدای شروع عملیات بارورسازی ابرها برای رسیدن به این هدف استفاده شده است، به‌کاربردن مدل‌های پاشندگی است. از کارهای کلاسیک در این زمینه می‌توان به پژوهش میلی و همکاران (۱۹۶۹) اشاره کرد که در آن از یک مدل گوسی ساده استفاده شده است.

مدل Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)، یکی از مدل‌های پاشندگی است که در مطالعات انتقال و پاشندگی در علوم

برای بازشناختن سیگنال باروری از تغییرپذیری طبیعی بارش (مشکل سیگنال به نوفه) تعیین می‌کند (دنيس، ۱۹۸۰ و گریفیث و همکاران، ۱۹۹۱). علاوه بر این، انتخاب مناسب منطقه یا مناطق کنترل، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت ارزیابی دارد (دنيس، ۱۹۸۰)؛ زیرا اگر ایستگاه‌های کنترل در مناطقی انتخاب شوند که به‌نوعی تحت تأثیر بارورسازی ابرها قرار داشته باشند، در طول دوره باروری، بارش در آنها به‌عنوان بارش منطقه کنترل فرض می‌شود که اعمال شدن آن در محاسبات وایازش در دوره‌های بارور شده موجب بیش‌پیش‌بینی مقدار تخمین بارش منطقه کنترل می‌شود. این موضوع به‌نوبه خود موجب کاهش نسبت بارش مشاهده‌ای به بارش پیش‌بینی شده و به‌عبارت دیگر، کم برآورد کردن اثرهای باروری می‌شود (گریفیث و همکاران، ۲۰۱۵).

در ایران تأمین بودجه و مدیریت اجرای برنامه‌های افزایش بارش بر عهده دولت است؛ بنابراین هدف‌گذاری دولت نیز بر استحصال هرچه بیشتر منابع آب جوی است. علاوه بر این، نظر به عواملی همچون خشکسالی‌های گسترده، محدودیت امکانات اجرای عملیات بارورسازی ابرها و استفاده از تمامی فرصت‌های باروری و در بسیاری از موارد، پراکندگی مکان بارورسازی ابرها، محدوده اجرای باروری منطقه‌ای، متغیر و از نظر وسعت معمولاً قابل توجه است؛ از این رو برخلاف سایر نقاط دنیا که بخش خصوصی عهده‌دار تأمین بودجه چنین پروژه‌هایی است، امکان در نظر گرفتن منطقه‌ای کوچک و ثابت به‌عنوان منطقه هدف قبل از اجرای پروژه وجود ندارد و تعریف منطقه هدف در مقایسه با آن پروژه‌ها متفاوت است. در ایران، منطقه هدف به «منطقه متأثر از مواد باروری» اطلاق می‌شود که پس از پایان هر عملیات، با روش‌های علمی و معتبر تعیین می‌شود. پس بدیهی است که منطقه یا مناطق کنترل نیز بعد از تعیین منطقه هدف با توجه به معیارهای علمی مربوطه انتخاب شوند؛ بنابراین تعیین مناسب منطقه

شرکت مشاور وضع هوای آمریکای شمالی، اعتبار کاربرد این مدل را در تحلیل و تعیین پایداری سطوح پایین ارتفاعات ایالت یوتا، هم در زمان اجرای عملیات باروری زمینی و هم در فرایندهای پس‌پردازش به اثبات رسانده است. در این مطالعه، نتایج مدل‌سازی دود در یوتای مرکزی، همخوانی خوبی با فرضیات موجود درباره تأثیرگذاری پایداری ترمودینامیکی بر باروری زمینی نشان داد (یورتی و همکاران، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳). متخصصان این شرکت، همچنین از مدل HYSPLIT در شبیه‌سازی مسیر و پاشندگی دود مواد باروری آزادشده از ژنراتورهای زمینی یا فلرهای نصب‌شده روی هواپیما به‌منظور بررسی پایداری سطوح پایین برای هدف‌گیری مواد باروری استفاده کردند. آنها نشان دادند که پایداری سطوح پایین در بیشتر مناطق، عامل اصلی محدودکننده برای عملیات باروری زمینی محسوب نمی‌شود (یورتی و همکاران، ۲۰۱۳).

در مطالعه‌ای دیگر در منطقه سانتا‌باربارای کالیفرنیا، این مدل جهت بررسی پتانسیل استفاده از پنج سایت ژنراتور زمینی خودکار استفاده شد که نتیجه آن، انتخاب دو تا سه ژنراتور براساس تأثیرات قابل‌انتظار در منطقه هدف بود. علاوه‌برآن، با استفاده از مدل مذکور، نحوه پخش مواد و انتقال یک‌ساعته مواد باروری به منطقه هدف موردنظر، هم از ژنراتورهای زمینی و هم از فلرهای هوایی باروری در روزهای مختلف و مسیرهای مختلف باروری، تعیین و روی نقشه تصویر شد (گریفیث و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیق یادشده، برای بررسی امکان رویداد وارونگی هوا در صورت وجود سامانه‌های قابل‌باروری حاکم بر ارتفاعات ایالت کلرادو نیز از مدل HYSPLIT استفاده شد و مشخص شد که در اکثر موارد بارورنده، انتقال مواد باروری به مناطق هدف با موفقیت انجام شده است (گریفیث و همکاران، ۲۰۱۶). مرکز ملی تحقیقات

جوئی به‌کارمی‌رود و سامانه‌ای کامل برای محاسبه مسیرهای ساده یک بسته هوا تا شبیه‌سازی پیچیده پاشندگی و نهشت مواد محسوب می‌شود (دراکسلر و هس، ۱۹۹۸). این مدل محاسباتی که حاصل همکاری مشترک بین National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) و اداره هواشناسی استرالیا است، شامل الگوریتم‌های همرفت و معادلات به‌روزشده پاشندگی است (کیز و همکاران، ۲۰۱۶ و گریفیث و همکاران، ۲۰۱۶) و در سال‌های اخیر، کاربردهای فراوانی در تعدیل آب و هوا و علوم مرتبط یافته‌است.

یکی از رایج‌ترین کاربردهای HYSPLIT، مدل‌سازی خط سیر پس‌سو به‌منظور شناسایی منشأ جریان‌های هوایی و تعیین و وضع روابط بین منبع و دریافت‌کننده است (فلمینگ و همکاران، ۲۰۱۲). از این دسته پژوهش‌ها می‌توان به مطالعه انجام‌شده در منطقه کوئینزلند استرالیا اشاره کرد. در این مطالعه برای تعیین ویژگی‌های اقلیم‌شناختی پایه ابر و هسته میعان ابر و نیز مشخص کردن تأثیر هواویزهای پایه ابر بر خردفیزیک ابرها، رژیم ابرهای حاکم بر منطقه از نظر دریایی یا قاره‌ای بودن با اجرای مدل HYSPLIT روی ابرهای مختلف مشخص شد (تیسندرف و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهشگران این طرح همچنین در جنوب‌شرقی این منطقه، از مدل HYSPLIT جهت تعیین چگونگی تغییرات هواویزها از منطقه مبنا و غلظت طیف هواویزها از مناطق مبنای مختلف استفاده کردند (تیسندرف، ۲۰۱۰). آنها سپس با اجرای ۱۲۰ ساعته مدل، تأثیر توده‌های هوایی حاصل از جریان‌های دریایی و قاره‌ای را بر شرایط مختلف هواویزهای زمینی تعیین کردند که نتایج آن به‌کمک اندازه‌گیری‌های میدانی خردفیزیک ابر که با استفاده از هواپیمای تحقیقاتی- باروری انجام شده بود، اعتبارسنجی و تأیید شد (تیسندرف، ۲۰۱۳).

تأمین آنها، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا مانند مدل WRF (Weather Research and Forecasting Model) (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸ و ونگ و همکاران، ۲۰۱۰) است. برای مثال، چالا و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی با اجرای یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل WRF نشان دادند که خروجی مدل HYSPLIT در مدل میان‌مقیاس تحت تأثیر انتخاب طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای و طرح‌واره سطح زمین قرار دارد و همچنین نوع انتخاب پیکربندی مدل جوئی می‌تواند به‌طور چشمگیری بر غلظت شبیه‌سازی‌شده تأثیر گذارد. در این شبیه‌سازی‌ها، ترکیبات متفاوتی از طرح‌واره‌های مختلف پارامترسازی فرایندهای فیزیکی، لایه مرزی سیاره‌ای، پیش‌بینی رطوبت و دمای سطح زمین به‌کاررفته‌بود. در تحقیقی دیگر، نگان و همکاران (۲۰۱۵) برای فراهم شدن امکان اجرا در بازه‌های زمانی کوچک‌تر، مدل HYSPLIT را با مدل میان‌مقیاس WRF جفت کردند و نتایج اجرای مدل را که بازه زمانی خروجی و تفکیک مکانی یکسانی با WRF داشت، با آزمایش‌های مختلف ردیاب‌ها مقایسه و بررسی کردند (استین و همکاران، ۲۰۱۵).

در حال حاضر، با پیشرفت مدل‌های هواشناسی و پاشندگی و افزایش توان رایانه‌ها، امکان استفاده از مدل‌های پیچیده جفت شده پاشندگی-هواشناسی به‌صورت ناپایا (unsteady) برای تعیین منطقه تحت تأثیر مواد بارورسازی فراهم شده است؛ بنابراین در کار حاضر، از یک مدل جفت شده پاشندگی-هواشناسی جهت شبیه‌سازی انتقال و پخش مواد باروری استفاده شده که مدل پاشندگی مورد استفاده همان مدل HYSPLIT و مدل هواشناسی مورد استفاده مدل میان‌مقیاس WRF است. گفتنی است در جفت‌شدگی برون‌خط، خروجی شبیه‌سازی‌های مدل هواشناسی، به‌عنوان داده هواشناسی مدل پاشندگی به‌کارمی‌رود.

جوئی آمریکا از مدل HYSPLIT جهت دستیابی به کوهساری ریزمقیاس و میدان‌های باد برای تعیین پردازش تأثیرگذاری ژنراتورهای زمینی بارورکننده ابرها در بخشی از ارتفاعات کلرادو استفاده کرد و نشان داد که جریان‌های جنوب‌غربی نمی‌توانند مواد باروری را به‌طور مناسبی به منطقه هدف موردنظر برسانند (برید و همکاران، ۲۰۱۵).

در برخی مطالعات موردی با استفاده از داده‌های ریزمقیاس بارش و اندازه‌گیری‌های میدانی از قبیل ردیاب‌ها، خروجی مدل‌های عددی در تعیین پخش دود به‌ویژه روی سامانه‌های کوهستانی در رشته‌کوه‌های پیچیده اعتبارسنجی شده است (برای مثال، برید و همکاران ۲۰۱۴؛ زو و همکاران، ۲۰۱۳ الف، ب، ج و بروینتج و همکاران، ۱۹۹۵). در مطالعه دیگر، نتایج اجرای مدل پاشندگی HYSPLIT با مواد ردیاب آزمایش شده است (استین و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج به‌گونه‌ای بود که مرکز تحقیقات بیابانی برای تأیید نتایج تحلیل نمونه‌گیری‌های برف و تحلیل شیمیایی ردیاب‌ها در ایالت وایومینگ، از مدل HYSPLIT جهت تعیین دقیق انتقال مواد باروری استفاده کرد. اطلاعات ورودی این مدل، داده‌های هواشناسی حاصل از اجرای مدل عددی NAM (North American Mesoscale Forecast System) با تفکیک افقی سیزده کیلومتر بود (تایلی و همکاران، ۲۰۱۵). شایان ذکر است که شرکت مشاور وضع هوای آمریکای شمالی برای شبیه‌سازی انتقال و پخش مواد باروری زمینی و هوایی و استفاده از آن در مکان‌یابی ژنراتورهای زمینی یا ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها، به‌طور دائمی و مکرر از مدل پاشندگی HYSPLIT استفاده می‌کند که بیانگر اعتماد مراکز تحقیقاتی و عملیاتی به کارکرد این مدل است.

داده‌های هواشناسی، از داده‌های ورودی مهم مورد نیاز برای مدل‌های پاشندگی هستند که یکی از روش‌های

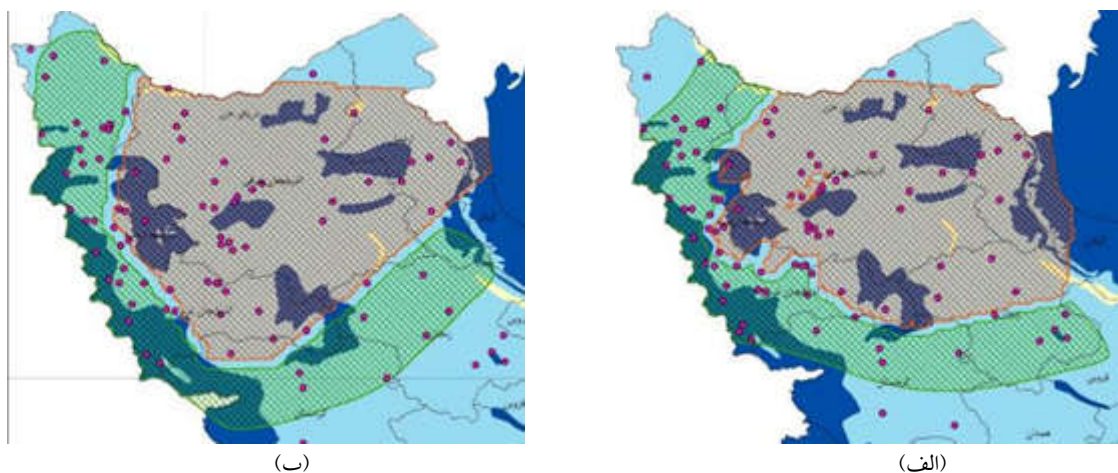
کوتاه‌تر باشد، به‌طور طبیعی همبستگی بین مناطق هدف و کنترل ضعیف‌تر خواهد شد؛ بنابراین ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در دنیا معمولاً به‌صورت ماهانه یا فصلی صورت می‌گیرد (دنيس، ۱۹۸۰ و موریسون و همکاران، ۲۰۰۷). در ایران نیز از روی هم‌اندازی مناطق هدف پروازهای انجام‌شده در هر ماه روی نقشه، موقعیت ماهیانه منطقه هدف (محدوده تأثیرگذاری مواد باروری در آن ماه) تعیین و براساس آن، منطقه کنترل به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که معیارهای لازم به‌ویژه اطمینان از آلوده نبودن به مواد باروری را برآورده کند. شکل ۱ نمونه‌هایی از مناطق هدف ماهیانه در پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. مطابق شکل، پس از تعیین مناطق هدف و کنترل، ایستگاه‌های با سابقه تاریخی واقع در این دو منطقه شناسایی و براساس رابطه وایزش بین آنها و بارش مشاهده‌ای ایستگاه‌های کنترل، تغییرات بارشی رخ داده در ایستگاه‌های هدف به‌صورت ماهیانه برآورد می‌شود. نکته مهم این است که چون در اغلب موارد، وسعت منطقه هدف قابل توجه است و ممکن است محدوده‌های اقلیمی متفاوتی را شامل شود، انتخاب ایستگاه‌های کنترل براساس نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیمی ایران صورت می‌گیرد. برای ایستگاه‌های منطقه هدف که در یک ناحیه اقلیمی قرار دارند، ایستگاه‌هایی از محدوده کنترل (هاشور سبز در شکل ۱) انتخاب می‌شوند که در همان ناحیه اقلیمی واقع و رابطه همبستگی خوبی با ایستگاه‌های هدف داشته باشند.

به‌منظور اطمینان بیشتر از انتخاب درست مناطق یا ایستگاه‌های کنترل، لازم است از تعیین مناسب و مطمئن منطقه هدف اطمینان حاصل کرد. به همین دلیل در کار حاضر، تأثیرپذیری مدل از پارامترهای مختلف مؤثر در شبیه‌سازی منطقه هدف - که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود - و تغییرات احتمالی روی داده در محدوده پخش مواد باروری تحت تأثیر تغییر این پارامترها سنجیده شده است.

نظر به اینکه استفاده از مدل پاشندگی HYSPLIT می‌تواند منجر به شناسایی موقعیت‌هایی شود که در آنها برای مثال منطقه کنترل به‌دلیل انتقال عوامل باروری به خارج از منطقه هدف، به این مواد آلوده شده است یا مواد باروری به‌طور مناسبی هدف‌گیری نشده‌اند (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶)؛ در پژوهش حاضر برای تعیین منطقه هدف از پروژه‌های بارورسازی ابرها در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ استفاده شد و تلاش شد تا عوامل مؤثر در شبیه‌سازی و تأثیر آنها در تعیین منطقه هدف، شناسایی و بررسی شوند. از آنجاکه به‌دلیل دسترسی نداشتن به داده‌های مشاهده‌ای کافی (با تفکیک زیاد)، امکان بررسی عملکرد مدل پخش وجود ندارد، بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های پخش به کمک مطالعات حساسیت‌سنجی ضروری است (مسکا و همکاران، ۱۹۹۸ و بیلک و یولیا، ۱۹۹۸). در این پژوهش کوشش شده است با بررسی میزان حساسیت خروجی مدل پاشندگی HYSPLIT به پارامترسازی فرایندهای فیزیکی به‌کاررفته در مدل WRF و نیز تأثیر تغییر پارامترهای مختلف داده‌های ورودی مانند تفکیک مکانی افقی و بازه زمانی خروجی مدل، نحوه عملکرد این مدل در شبیه‌سازی پخش مواد بارورسازی بررسی شود تا بتوان از نتایج آن جهت بهبود تعیین مناطق هدف و کنترل بهره جست.

۲ روش تحقیق

تحقیقات نشان داده‌اند محافظه‌کارانه‌ترین و معتبرترین تخمین از اثرهای باروری، در محدوده دو ساعت از زمان آغاز بارورسازی روی می‌دهد (دفلیس و همکاران، ۲۰۱۴). از این‌رو در فرایند ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در ایران، پس از پایان هر عملیات بارورسازی، حمل و پخش دو ساعته مواد آزادشده از سوختن پیروپاترون‌های شلیک‌شده در آن پرواز با استفاده از مدل پاشندگی HYSPLIT شبیه‌سازی و به‌عنوان منطقه هدف آن پرواز، روی نقشه کوهساری کشور تصویر می‌شود. هرچه فاصله نمونه‌گیری



شکل ۱. منطقه هدف و کنترل در پروژه بارورسازی ابرها در شمال‌غرب ایران روی نقشه تقسیمات اقلیمی در (الف) ژانویه ۲۰۱۵ و (ب) فوریه ۲۰۱۵. محدوده هاشورداد قرمزرنگ، منطقه هدف و منطقه هاشورداد سبزرنگ، منطقه کنترل است. نقاط قرمزرنگ، موقعیت ایستگاه‌هایی است که سابقه تاریخی دارند و در معادلات وایزش وارد می‌شوند.

و همکاران (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۴) از جمله طرح‌واره‌های پرکاربرد هستند. برای پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای نیز دو طرح‌واره YSU (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶) و MYJ (ملور و یامادا، ۱۹۸۲ و جانیک، ۲۰۰۲) در بیشتر موارد عملیاتی استفاده می‌شوند. برای پارامترسازی همرفت نیز طرح‌واره‌های کین-فریچ (کین و فریچ، ۱۹۹۰، ۱۹۹۳ و کین، ۲۰۰۴)، بتس-میلر-جانجیک (BMJ) (جانجیک، ۱۹۹۴، ۲۰۰۰؛ بتس، ۱۹۸۶ و بتس و میلر، ۱۹۸۶) و گرل-دونجی (گرل و دونجی، ۲۰۰۲) طرح‌واره‌های مطرح هستند. برای سطح زمین، دو طرح‌واره Noah LSM (چن و دادهیا، ۲۰۰۱) و MM5 5-layer LSM (دادهیا، ۱۹۹۶) بیشترین استفاده را دارند. برای لایه سطحی می‌توان به طرح‌واره‌های MM5 similarity و Eta similarity (جانجیک، ۱۹۹۶، ۲۰۰۲) اشاره کرد. برای تابش موج‌بلند، طرح‌واره‌های RRTM (مالور و همکاران، ۱۹۹۷) و GFDL (شوارزکوف و فلس، ۱۹۹۱) و برای تابش موج کوتاه نیز طرح‌واره‌های Dudhia (دادهیا، ۱۹۸۹) و GFDL پیشنهاد شده‌اند.

از آنجایی که برای تأمین داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای اجرای مدل HYSPLIT از داده‌های خروجی مدل هواشناسی WRF استفاده شده است، باید با انتخاب ترکیب‌های بیشتری از پارامترسازی فیزیکی ارائه‌شده در مدل WRF، ترکیب بهینه‌ای از این پارامترسازی‌ها به‌دست‌آید که امری بسیار دشوار است (تیان و همکاران، ۲۰۱۷). پارامترسازی فیزیکی موجود در مدل WRF مواردی همچون خردفیزیک، تابش موج‌بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت را شامل می‌شود. با توجه به اینکه هدف، شبیه‌سازی میدان‌های هواشناسی باد، دما و بارش است، برای ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها، تمامی پارامترسازی‌های فیزیکی مذکور اهمیت دارند. مطالعات نشان داده‌اند برای پارامترسازی فیزیکی مربوط به خردفیزیک، طرح‌واره‌های لین (لین و همکاران، ۱۹۸۳)، WSM6 (هونگ و همکاران، ۲۰۰۴) و لین و همکاران، ۱۹۸۳، WSM3 (هونگ و همکاران، ۲۰۰۴)، فریر (Ferrere) (راجرز و همکاران، ۲۰۰۱) و طرح‌واره تامپسون

جدول ۱. مشخصات هشت پیکربندی متفاوت مدل WRF در پژوهش حاضر

شماره ردیف پیکربندی	خردفیزیک	لایه مرزی سیاره‌ای	همرفت کومه‌ای	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح زمین
یک	WSM3	YSU	کین-فریچ	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
دو	Ferrier	MYJ	BMJ	GFDL	GFDL	Eta	Noah
سه	Ferrier	YSU	کین-فریچ	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
چهار	WSM6	MYJ	BMJ	RRTM	Dudhia	Eta	Noah
پنج	تامپسون (جدید)	YSU	BMJ	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
شش	WSM6	YSU	BMJ	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
هفت	تامپسون (جدید)	YSU	گرل-دونجی	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
هشت	تامپسون (جدید)	MYJ	گرل-دونجی	RRTM	Dudhia	Eta	Noah

جدول ۲. مشخصات پروازهای عملیات هوایی بارورسازی ابرها در مطالعه عملکرد مدل WRF در تأمین داده‌های هواشناسی مدل HYSPLIT و سنجش تأثیرپذیری شبیه‌سازی پخش مواد باروری از تفکیک افقی و زمانی داده‌های هواشناسی ورودی و تفکیک مکانی مدل HYSPLIT

شماره پرواز	سال آبی	تاریخ اجرا		منطقه عملیاتی	ساعت بلندشدن هواپیما	ساعت نشستن هواپیما	مدت پرواز	تعداد پروپاترون‌های دیدن‌قره
		(شمسی)	(میلادی)					
۱۶	۲۰۱۵	۹۳/۱۱/۸	۲۰۱۵/۰۱/۲۸	شمال‌غرب	۱۶:۳۵	۲۰:۰۰	۳:۲۵	۳۵۲
۲۹	۲۰۱۵	۹۳/۱۱/۲۳	۲۰۱۵/۰۲/۱۲	ایران مرکزی	۸:۳۷	۱۲:۰۰	۳:۲۳	۲۵۶
۳۰	۲۰۱۵	۹۳/۱۱/۲۳	۲۰۱۵/۰۲/۱۲	شمال‌غرب	۱۲:۲۸	۱۴:۴۸	۲:۲۰	۲۶۴
۸	۲۰۱۷	۹۵/۹/۱۲	۲۰۱۶/۱۲/۲	ایران مرکزی	۸:۳۲	۱۱:۴۷	۳:۱۵	۱۱۲

عملیات بارورسازی ابرها دارد (گریفیث و همکاران، ۲۰۱۶)، اما در پژوهش حاضر برای اطمینان از عملکرد مناسب این مدل در شبیه‌سازی پارامترهای باد و دما، نتایج اجرای مدل با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از حسگرهای نصب‌شده روی هواپیماهای باروری در موارد مطالعاتی انتخاب‌شده اعتبارسنجی می‌شود. گفتنی است در ایران حسگرهای متعددی روی هواپیماهای بارورسازی ابرها نصب شده‌اند: حسگرهای آب مایع و ذرات یخ داخل ابر، رطوبت‌سنج، دماسنج، فشارسنج ایستایی و دینامیک جو و حسگر ارتفاع‌سنج رادیویی. شکل ۲ موقعیت نصب این حسگرها را روی هواپیماهای باروری نشان می‌دهد. در این شکل، سیستم جمع‌آوری، پردازش و ثبت اطلاعات درون هواپیما نیز نشان داده شده است که حین پرواز این اطلاعات را در اختیار هواشناسان قرار می‌دهد.

به‌منظور انتخاب بهترین ترکیب از پارامترسازی‌های فیزیکی اشاره‌شده، در واقع باید از میان تعداد بسیار زیاد پیکربندی‌های متفاوتی که از ترکیب این پارامترسازی‌ها حاصل می‌شوند، پیکربندی‌های مناسب‌تر را انتخاب کرد. در بخش‌های مختلف این پژوهش، بنا بر نیاز از هشت پیکربندی متفاوت موجود در جدول ۱ استفاده شده که انتخاب آنها با توجه به پژوهش‌های گذشته صورت گرفته است (به‌عنوان مثال، کلارک و همکاران، ۲۰۰۹؛ آلیگو و همکاران، ۲۰۰۹؛ روئیز و همکاران، ۲۰۱۰؛ گالوس و برش، ۲۰۰۶؛ جانکوف و همکاران، ۲۰۰۵ و جانکوف و همکاران، ۲۰۰۷).

تجربه نشان داده است مدل هواشناسی WRF توانایی خوبی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مفید در اجرای

جدول ۳. مشخصه‌های آماری محاسبه‌شده برای مقایسه دمای ثبت‌شده (درجه سانتیگراد) و دمای خروجی مدل WRF در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای با دو تفکیک مکانی ۳ و ۵ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای چهار پرواز منتخب هواپیمای باروری

شماره پرواز	تفکیک مکانی مدل WRF (کیلومتر)	میانگین خطای مطلق (m/s)	میانگین خطای نسبی (درصد)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب همبستگی
۸	۳	۱/۷	۲۲/۳۸	۱/۹۷	۰/۹۱
	۵	۱/۳۸	۱۸/۷۷	۱/۶۳	۰/۹۳
۱۶	۳	۰/۸۹	۸/۵۸	۱/۰۶	۰/۹۲
	۵	۰/۹۲	۸/۷۴	۱/۱۲	۰/۸۹
۲۹	۳	۱/۲۱	۲۰/۷۴	۱/۵	۰/۹۸
	۵	۱/۳۲	۲۲/۵۳	۱/۵۴	۰/۹۵
۳۰	۳	۲/۱۷	۱۲/۶۶	۲/۲۷	۱/۰
	۵	۲/۱۳	۱۲/۶۱	۲/۲۲	۱/۰

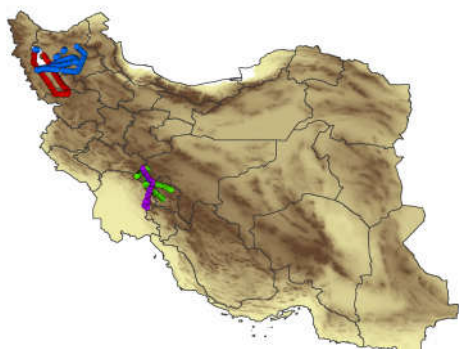


شکل ۲. حسگرهای نصب‌شده روی هواپیمای بارورسازی ابرها در ایران برای ثبت داده‌های هواشناسی هنگام اجرای عملیات بارورسازی ابرها

(انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶)؛ از این رو، بنا به اهمیت، این دو پارامتر در طول اجرای هر پرواز به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شدند. این داده‌های میدانی با تفکیک زمانی زیاد (یک ثانیه) ابزار بسیار باارزشی جهت سنجش عملکرد مدل هواشناسی WRF در شبیه‌سازی این میدان‌ها محسوب می‌شوند. به همین منظور، چهار پرواز عملیاتی بارورسازی ابرها در دو منطقه متفاوت از نظر شرایط اقلیمی و کوهساری انتخاب شد که سه عملیات باروری مربوط به

پارامترهای دما و باد، از اصلی‌ترین پارامترهای مورد توجه در عملیات بارورسازی ابرها هستند. آگاهی از دما برای تعیین سطح فعالیت عوامل معین بارورسازی ابرها و شناخت سرعت باد برای تعیین مقدار آب مایع ابر بسیار مفید است (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۱۶). پیچیدگی‌های جریان باد روی رشته‌کوه‌ها و درون ابرهای همرفتی در حال رشد و پیچیدگی‌های ابر، تزریق مواد بارورسازی ابرها و تعیین ریزش اثرهای بارورسازی ابرها را بسیار دشوار می‌سازد

نتایج آن در جدول‌های ۳ و ۴ ذکر شده است. نتایج، نشان از مطابقت قابل قبول داده‌های میدانی و خروجی‌های مدل WRF در موارد مطالعاتی انتخابی دارد که این نکته یافته‌های علمی قبلی را تأیید می‌کند. بررسی و تحلیل نمودارها و سنجه‌های آماری حاکی از این است که دقت مدل در شبیه‌سازی میدان دما نسبت به میدان باد بیشتر است. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود، نمودار داده‌های دما و باد اندازه‌گیری شده با هواپیما و خروجی مدل WRF در هر دو تفکیک ۳ و ۵ کیلومتر به‌ویژه در مورد دما به هم نزدیک هستند و داده‌های خروجی WRF علاوه بر اینکه روند تغییرات دما و باد طی پرواز را به‌خوبی حفظ می‌کنند، از لحاظ مقدار نیز همخوانی مناسبی دارند؛ هرچند نمی‌توان نقش نوفه‌های دستگاه‌های اندازه‌گیری را به‌ویژه در زمان گرفتار شدن هواپیما در تلاطم نادیده گرفت. بررسی سنجه‌های آماری نیز نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل در شبیه‌سازی این دو میدان است. همچنین می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که مدل در تفکیک مکانی ۳ کیلومتر، عملکرد بهتری نسبت به تفکیک مکانی ۵ کیلومتر دارد.



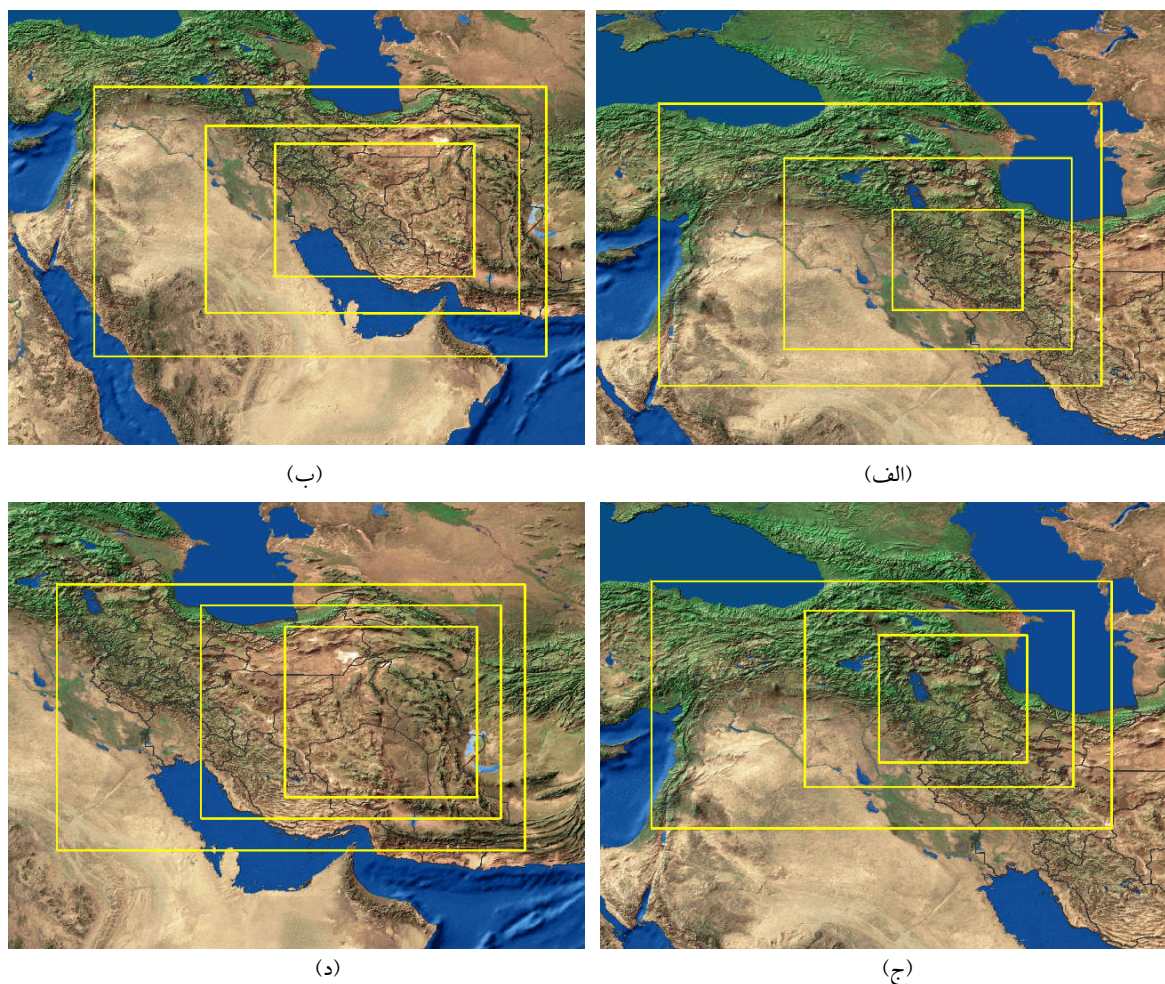
شکل ۳. محدوده عملیاتی بارورسازی ابرها برای پروژه ایران مرکزی و شمال‌غرب در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ و موقعیت نقاط شلیک پیروپاترون-های دیدنقره در پروازهای منتخب. نقاط آبی و قرمز، نقاط شلیک در پروازهای شماره ۱۶ و ۳۰ در منطقه شمال‌غرب کشور روی دریاچه ارومیه و استان‌های آذربایجان غربی و شرقی و نقاط سبز و بنفش، نقاط شلیک در پروازهای شماره ۲۹ و ۸ در مناطق مرکزی ایران در استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری هستند.

پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵ و عملیات دیگر مربوط به پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۷ است. جدول ۲ مشخصات این چهار پرواز و شکل ۳ موقعیت منطقه عملیاتی و نقاط شلیک پیروپاترون‌های دیدنقره در این چهار پرواز را نشان می‌دهد. ارتفاع پرواز در عملیات بارورسازی ابرها به ارتفاع پایه و قلّه و ضخامت ابرها و نوع باروری (باروری از روی ابر و درون ابر) بستگی دارد، اما با توجه به تجربه، ابرهای قابل باروری در ایران معمولاً ارتفاعی بین ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر از سطح دریا دارند؛ بنابراین برای تطابق داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله حسگرها در هر پرواز، از داده‌های خروجی مدل WRF استفاده می‌شود. این داده‌ها در همان ارتفاع پروازی شبیه‌سازی شده‌اند. برای هر چهار پرواز مذکور، مدل WRF با داده‌های FNL جهت تأمین شرایط اولیه و مرزی در دو تفکیک مکانی افقی ۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر و با پیکربندی ردیف چهار از جدول ۱ اجرا و جهت همخوانی بیشتر با داده‌های میدانی (با ثبت لحظه‌ای) خروجی-های مدل در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای ثبت شد. سپس داده-های دما و باد در ارتفاع پروازی هواپیمای باروری در مدت زمان پرواز از داده‌های خروجی مدل WRF استخراج و با داده‌های میدانی مقایسه شد.

جهت اجرای مدل WRF برای تفکیک افقی ۵ کیلومتر و ۳ کیلومتر، سه آشیانه به ترتیب با تفکیک افقی ۴۵، ۱۵ و ۵ کیلومتر و ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به تجارب گذشته در بررسی نمودارهای سری زمانی باد و دما در پروازهای عملیاتی بارورسازی ابرها، پیکربندی چهارم عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی باد و دما در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای دارد. برای نمونه، نمودار مقایسه‌ای این داده‌ها برای پرواز شماره ۲۹ در شکل-های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این، مشخصه‌های آماری میانگین خطای مطلق، میانگین خطای نسبی، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی داده‌های میدان-های دما و باد برای پروازهای منتخب محاسبه شدند که

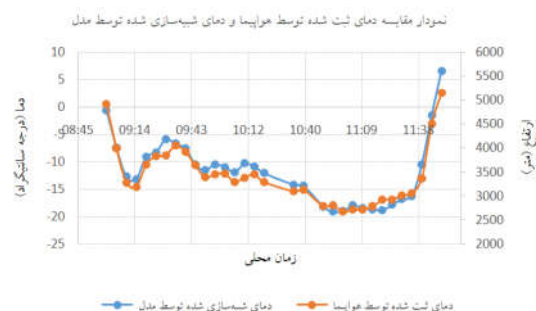
جدول ۴. مشخصه‌های آماری محاسبه‌شده برای مقایسه باد ثبت‌شده (متر بر ثانیه) و باد خروجی مدل WRF در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای با دو تفکیک مکانی ۳ و ۵ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای چهار پرواز منتخب هواپیمای باروری

شماره پرواز	تفکیک مکانی مدل WRF (کیلومتر)	میانگین خطای مطلق (m/s)	میانگین خطای نسبی (درصد)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب همبستگی
۸	۳	۳/۷۷	۱۴/۶۸	۴/۵۴	۰/۶۳
۱۶	۵	۴/۲۷	۱۶/۸۶	۵/۲۸	۰/۵۲
۲۹	۳	۵/۷۳	۳۴/۸۵	۶/۹۱	۰/۵۹
۳۰	۵	۶/۶۳	۳۷/۵۲	۷/۳۴	۰/۴۵
	۳	۴/۲۲	۱۴/۰۶	۵/۰۴	۰/۸۱
	۵	۴/۵۳	۱۴/۴۹	۵/۳۴	۰/۷۶
	۳	۵/۲۹	۴۴/۸۴	۶/۴۴	۰/۶۹
	۵	۵/۳۹	۴۷/۲۱	۶/۳۳	۰/۶۳

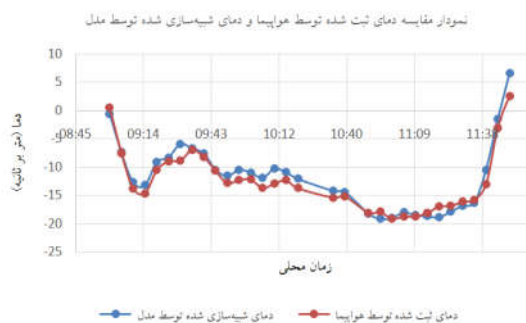


شکل ۴. موقعیت سه آشیانه در نظر گرفته‌شده برای اجرای مدل WRF با تفکیک افقی ۵ کیلومتر و ۳ کیلومتر. در تفکیک افقی ۵ کیلومتر، آشیانه‌های یک، دو و سه به ترتیب با فواصل شبکه‌ای ۱۵، ۴۵ و ۵ کیلومتر و در تفکیک افقی ۳ کیلومتر، به ترتیب با فواصل شبکه‌ای ۹، ۲۷ و ۳ کیلومتر هستند. شکل‌های (الف)، (ب)، (ج) و (د) به ترتیب آشیانه‌های پروژه‌های غرب، ایران مرکزی، شمال‌غرب و شرق کشور را نشان می‌دهند.

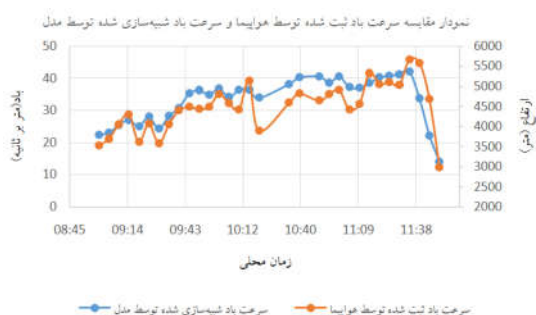
اهداف این پژوهش - که بررسی عوامل مختلف در مدل HYSPLIT جهت شبیه‌سازی منطقه هدف برای فراهم‌آوردن بستر مناسب جهت افزایش دقت آنها است - با انجام دادن چهار تحقیق جداگانه بر چهار پرواز بارورسازی ابرها شامل دو پرواز در مناطق مرکزی و دو پرواز در منطقه شمال‌غرب کشور، حساسیت مدل به پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی پاشندگی مواد باروری طبق دسته‌بندی ارائه‌شده در جدول ۵ ارزیابی شد. در بخش ۳، نتایج این ارزیابی توضیح داده می‌شود.



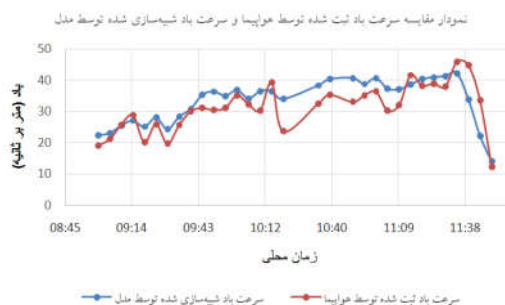
شکل ۵. نمودار مقایسه دمای اندازه‌گیری‌شده (درجه سانتیگراد) به وسیله حسگرهای هواپیمای باروری و خروجی ۵ دقیقه‌ای مدل WRF با تفکیک افقی ۳ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای پرواز شماره ۲۹ (۱۲ فوریه ۲۰۱۵) در فلات مرکزی ایران



شکل ۷. نمودار مقایسه دمای اندازه‌گیری‌شده (درجه سانتیگراد) به وسیله حسگرهای هواپیمای باروری و خروجی ۵ دقیقه‌ای مدل WRF با تفکیک افقی ۵ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای پرواز شماره ۲۹ (۱۲ فوریه ۲۰۱۵) در فلات مرکزی ایران



شکل ۶. نمودار مقایسه سرعت باد اندازه‌گیری‌شده (متر بر ثانیه) به وسیله حسگرهای هواپیمای باروری و خروجی ۵ دقیقه‌ای مدل WRF با تفکیک افقی ۳ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای پرواز شماره ۲۹ (۱۲ فوریه ۲۰۱۵) در فلات مرکزی ایران



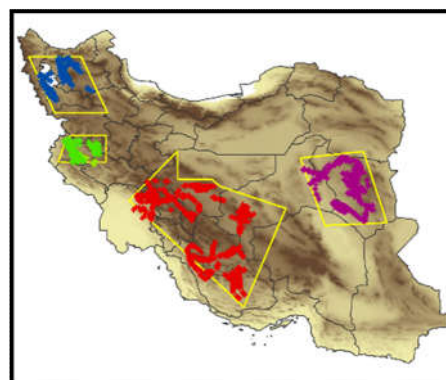
شکل ۸. نمودار مقایسه سرعت باد اندازه‌گیری‌شده (متر بر ثانیه) به وسیله حسگرهای هواپیمای باروری و خروجی ۵ دقیقه‌ای مدل WRF با تفکیک مکانی ۵ کیلومتر در ارتفاع پروازی برای پرواز شماره ۲۹ (۱۲ فوریه ۲۰۱۵) در فلات مرکزی ایران

پس از اطمینان از عملکرد قابل قبول مدل WRF در تأمین داده‌های هواشناسی مدل HYSPLIT، نقاط شلیک پیروپاترون‌های باروری به‌عنوان منبع آلودگی فرض شد و با استفاده از این مدل، پاشندگی جوی (انتقال و پخش) مواد سوخته‌شده از این منابع در مدت دو ساعت پس از انتشار، شبیه‌سازی و محدوده پخش شبیه‌سازی‌شده روی نقشه کوهساری کشور در محیط GIS (Geographic Information System) تصویر شد. به‌منظور دستیابی به

جدول ۵. دسته‌بندی حالت‌های مختلف داده‌های خروجی مدل WRF و اطلاعات شبیه‌سازی شده با اجرای مدل HYSPLIT از نظر تفکیک مکانی و زمانی

بازه زمانی خروجی مدل‌های HYSPLIT و WRF	تفکیک مکانی افقی مدل HYSPLIT	تفکیک مکانی افقی مدل WRF	منطقه جغرافیایی
۵ دقیقه			
۱۰ دقیقه	۰/۰۵ کیلومتر		
۲۰ دقیقه			
۵ دقیقه			
۱۰ دقیقه	۰/۰۲۵ کیلومتر	۵ کیلومتر	
۲۰ دقیقه			
۵ دقیقه			۱- شمال غرب کشور (پروازهای ۱۶ و ۳۰)
۱۰ دقیقه	۰/۰۱۷ کیلومتر		
۲۰ دقیقه			
۵ دقیقه			
۱۰ دقیقه	۰/۰۳ کیلومتر		۲- مناطق مرکزی کشور (پروازهای ۲۹ از پروژه سال ۲۰۱۵ و پرواز ۸ از پروژه سال ۲۰۱۷)
۲۰ دقیقه			
۵ دقیقه			
۱۰ دقیقه	۰/۰۱۵ کیلومتر	۳ کیلومتر	
۲۰ دقیقه			
۵ دقیقه			
۱۰ دقیقه	۰/۰۱ کیلومتر		
۲۰ دقیقه			

حل عددی معادلات حاکم بر جو و خطای پارامترسازی فیزیکی است. استفاده از ترکیبات مختلف پارامترسازی فیزیکی می‌تواند راه مؤثری در تعیین عدم قطعیت‌ها باشد (کالنی، ۲۰۰۳). به منظور بررسی نقش این عدم قطعیت‌ها در تعیین منطقه هدف، تأثیرپذیری مدل پاشندگی HYSPLIT در شبیه‌سازی محدوده پخش مواد باروری از دیدگاه پارامترسازی فیزیکی به کاررفته در مدل WRF ارزیابی شد. به این منظور، مدل میان‌مقیاس WRF برای کلیه پروازهای سال ۲۰۱۷ - که در مجموع، سی و چهار پرواز بارورسازی در نقاط مختلف کشور در شرایط متفاوت اقلیمی بود (شکل ۹) - با هشت پیکربندی (ترکیب طرح‌واره) مندرج در جدول ۱ به‌اجرا درآمد و وسعت پخش مواد باروری در هر کدام از ترکیب‌ها برای تمامی پروازها روی نقشه ترسیم و سپس بررسی و تحلیل شد. درباره انتخاب و نحوه ترکیب طرح‌واره‌های فیزیکی منتج به پیکربندی‌های مندرج در این جدول، مطالبی در ابتدای این بخش بیان شده است.



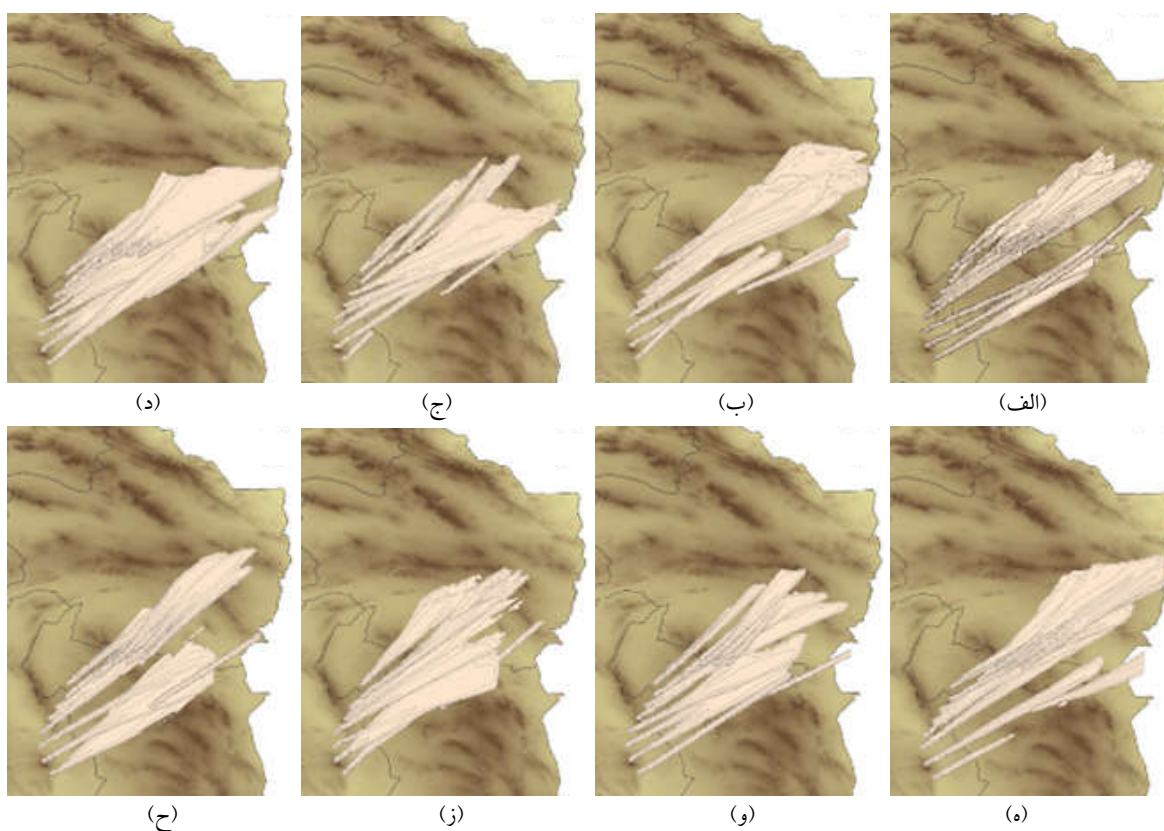
شکل ۹. موقعیت چهار محدوده عملیاتی پروژه‌های بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۷ و نقاط شلیک پیروپاترون‌ها در این محدوده‌ها. محدوده‌های عملیاتی با رنگ زرد و نقاط شلیک با رنگ‌های بنفش، قرمز، سبز و آبی به ترتیب برای پروژه‌های شرق، مرکز، غرب و شمال غرب کشور نشان داده شده است.

۳ نتایج

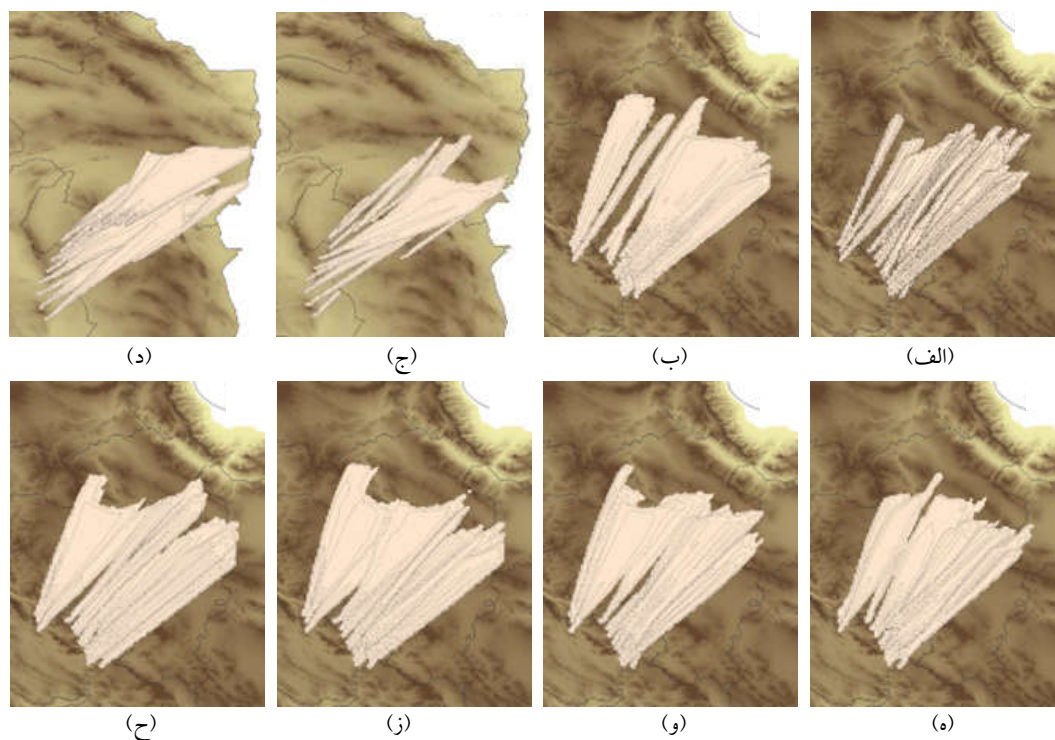
۳-۱ سنجش تأثیرپذیری شبیه‌سازی از پارامترسازی-های فیزیکی متفاوت به کاررفته در مدل WRF بخشی از عدم قطعیت‌های مدل‌های عددی، ناشی از خطای مربوط به الگوریتم‌های به کاررفته در مدل‌های جوّی برای

مقایسه محدوده پخش مواد باروری در این تصاویر دیده می‌شود که الگوی محدوده پخش هیچ دو پیکربندی مندرج در جدول ۱ یکسان نیست؛ در برخی از تصاویر، این تفاوت چشمگیر و در برخی جزئی است. نکته قابل توجه اینکه تأثیرپذیری مدل از این هشت پیکربندی از یک پرواز به پرواز دیگر متفاوت است و می‌توان آن را به تفاوت در شرایط هواشناسی نسبت داد، به طوری که در برخی از پروازها، الگوی پخش در پیکربندی‌های مختلف، تفاوت قابل توجهی دارد ولی در پروازهای دیگر، به هم نزدیک هستند؛ برای نمونه شکل ۱۳-الف تفاوت جزئی و شکل ۱۳-ب تفاوت زیاد محدوده پخش مواد باروری را در هشت پیکربندی به تفکیک رنگ برای پرواز شماره ۳۱ در تاریخ ۲ فوریه و پرواز شماره ۳۷ در تاریخ ۱۷ فوریه سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. این پروازها روی مناطق شرق کشور انجام شده‌اند.

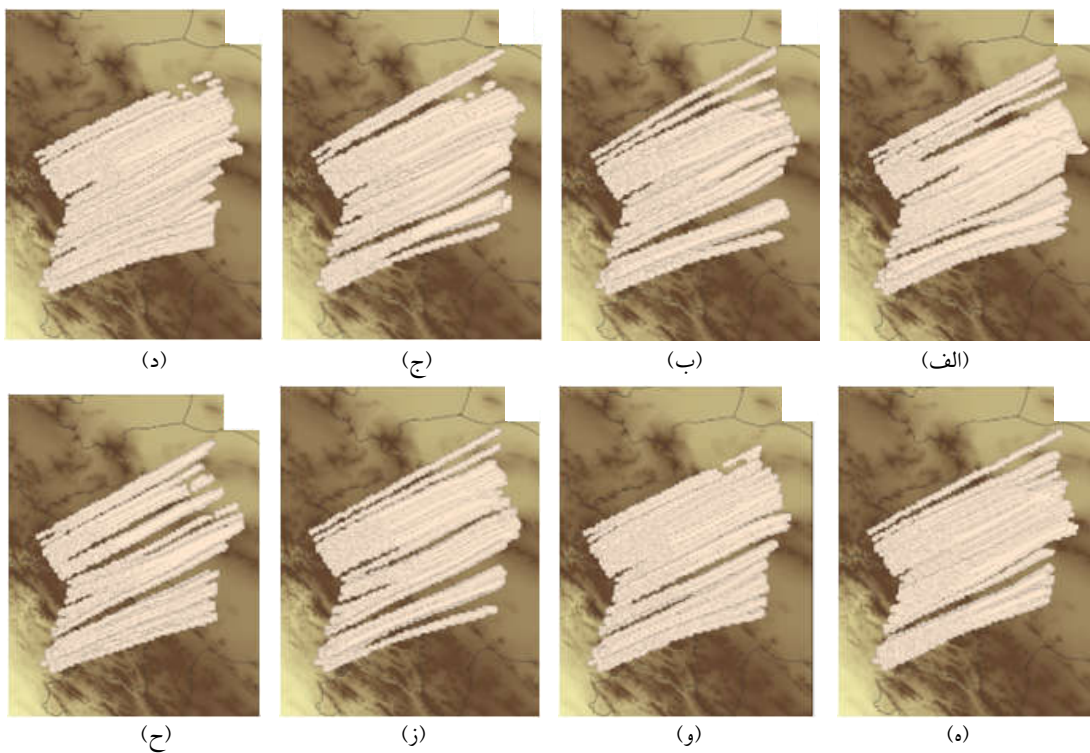
شکل ۱۰ محدوده‌های پخش و انتقال مواد باروری را طی دو ساعت پس از شلیک پیروپاترون‌های یدیدنقره در پرواز شماره ۳۸ که در منطقه شرق کشور انجام شده است، با هشت ترکیب‌بندی مختلف طرح‌واره‌های فیزیکی نشان می‌دهد. شکل ۱۰-الف منطقه پخش را براساس ترکیب پارامترسازی فیزیکی (پیکربندی) مطابق با ردیف اول جدول ۱ و شکل ۱۰-ب منطقه پخش و انتقال مواد باروری را براساس پیکربندی ردیف دوم این جدول شبیه‌سازی می‌کند. شکل-های ۱۰-ج تا ۱۰-ح نیز شبیه‌سازی‌های منطقه هدف مربوط به پیکربندی‌های ردیف سوم تا هشتم جدول مذکور هستند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ همانند شکل ۱۰، شبیه‌سازی محدوده‌های پخش و انتقال مواد باروری را در هشت پیکربندی مختلف مطابق جدول ۱ به ترتیب برای پرواز شماره ۳۳ در منطقه غرب و پرواز شماره ۸ در مناطق مرکزی ایران نشان می‌دهند. با



شکل ۱۰. محدوده پخش مواد باروری با استفاده از داده‌های پیکربندی‌های تعریف‌شده در پرواز شماره ۳۸ در منطقه شرق کشور روی استان‌های خراسان جنوبی و رضوی. تصاویر (الف) تا (ح) به ترتیب مربوط به پیکربندی‌های شماره ۱ تا ۸ هستند.



شکل ۱۱. محدوده پخش مواد باروری با استفاده از داده‌های پیکربندی‌های تعریف‌شده در پرواز شماره ۳۳ در منطقه غرب کشور در استان‌های کردستان، زنجان، کرمانشاه و همدان. تصاویر (الف) تا (ح) به ترتیب مربوط به پیکربندی‌های شماره ۱ تا ۸ هستند.



شکل ۱۲. محدوده پخش مواد باروری با استفاده از داده‌های پیکربندی‌های تعریف‌شده در پرواز شماره ۸ در منطقه مرکزی کشور روی استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان. تصاویر (الف) تا (ح) به ترتیب مربوط به پیکربندی‌های شماره ۱ تا ۸ هستند.

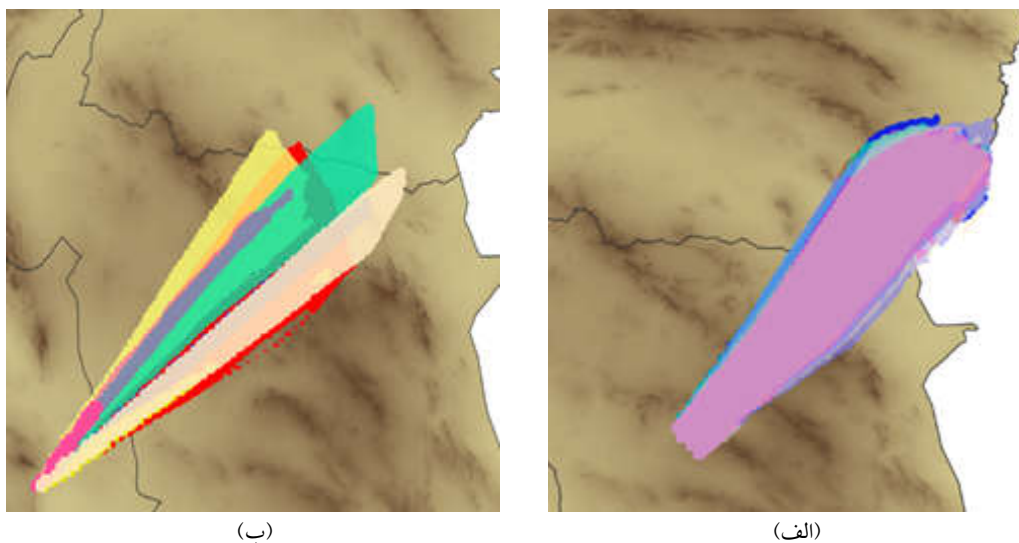
همکاران، ۲۰۱۶). در واقع یکی از پارامترهایی که شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های دینامیکی به آن حساسیت نشان می‌دهد، تفکیک شبکه محاسباتی مورد استفاده در مدل هواشناسی است (چالا، ۲۰۰۸). تفکیک افقی داده‌های ورودی، نقش قابل توجهی در نحوه شبیه‌سازی پخش آلودگی در مدل پاشندگی HYSPLIT دارد (دراکسلر و همکاران، ۲۰۱۳)؛ از این رو در این پژوهش تلاش شد در شبیه‌سازی پخش مواد باروری، حساسیت مدل به تفکیک افقی داده‌های ورودی بررسی شود. به این منظور، مدل WRF برای چهار پرواز منتخب از میان پروازهای عملیاتی بارورسازی ابرها انجام شده در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ با دو تفکیک افقی ۳ و ۵ کیلومتر (تفکیک مورد استفاده در داخلی‌ترین حوزه محاسباتی) به‌اجرا درآمد و نقشه محدوده شبیه‌سازی شده پخش مواد باروری حاصل از اجرای مدل پاشندگی HYSPLIT با استفاده از این داده‌های ورودی، در محیط GIS روی هم‌اندازی و مقایسه شد. مشخصات پروازهای منتخب در جدول ۲ و موقعیت نقاط شلیک، در شکل ۳ ارائه شده است.

نمونه‌ای از نقشه‌های مقایسه‌ای و تفاوت محدوده منطقه هدف برای پروازهای شماره ۸ و ۲۹ در مناطق مرکزی ایران در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مقایسه مناطق هدف پروازهای منتخب در این دو تفکیک افقی نشان داد که تفاوت‌ها در محدوده پخش در هر پرواز یا حتی بخش‌های مختلف یک پرواز با هم متفاوت است، اما در بیشتر موارد، گسترش عرضی محدوده پخش در حالت تفکیک افقی ۵ کیلومتر بیشتر از محدوده پخش با داده‌های ورودی با تفکیک افقی ۳ کیلومتر است. هرچه فاصله از منبع بیشتر شود، محدوده پخش با تفکیک افقی ۳ کیلومتر وسیع‌تر از محدوده پخش با تفکیک افقی ۵ کیلومتر می‌شود و نسبت به آن انحراف جزئی نشان می‌دهد.

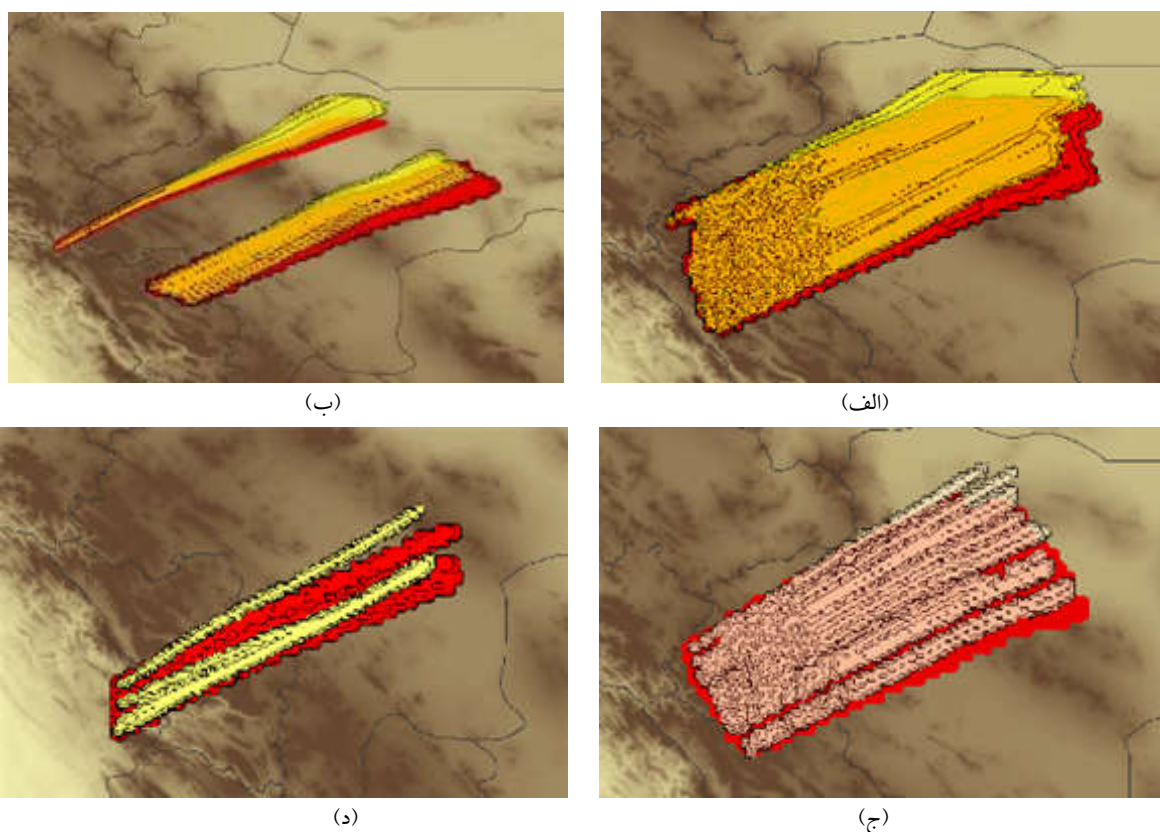
به‌طور خلاصه مقایسه وسعت مناطق پخش مواد باروری در پروازهای مختلف بیانگر این است که تعیین منطقه هدف در هر پرواز در تمام مناطق اقلیمی زیرپوشش در ایران، به انتخاب پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف شامل خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت کومه‌ای، تابش طول موج کوتاه و بلند، لایه سطحی و سطح زمین حساس است. بررسی‌ها نشان می‌دهند تغییرات وسعت محدوده پخش مواد باروری معمولاً در طرفین منطقه هدف روی می‌دهد و در بالادست منطقه هدف این تغییرات قابل توجه نیست. علاوه بر این، تغییرات مذکور از پروازی به پرواز دیگر متفاوت است و در برخی موارد، چشمگیر و در برخی دیگر قابل چشم‌پوشی است. با توجه به این موضوع، به‌نظر می‌رسد برای تعیین منطقه هدف لازم است شبیه‌سازی پخش برای هر هشت پیکربندی جدول ۱ اجرا و در صورت مشاهده تفاوت‌های چشمگیر حتی در یک پرواز از میان پروازهای انجام شده در یک ماه، از در نظر گرفتن منطقه کنترل در کناره‌های منطقه هدف چشم‌پوشی شود و ترجیحاً فقط ایستگاه‌های کنترل واقع در بالادست منطقه هدف انتخاب شوند. در صورت کم بودن حساسیت مدل به تغییر ترکیب پارامترسازی فیزیکی، می‌توان با رعایت فاصله مطمئن برای انتخاب ایستگاه‌های کنترل در طرفین منطقه هدف اقدام کرد.

۲-۳ سنجش تأثیر پذیری شبیه‌سازی پخش مواد باروری از تفکیک افقی داده‌های هواشناسی ورودی

بر اساس تحقیقات به‌عمل آمده، دقت شبیه‌سازی دود به‌ویژه در مناطق کوهستانی و رشته‌کوه‌هایی که کوهساری پیچیده دارند، به اندازه فواصل شبکه حساسیت زیادی دارد و هرچه اندازه شبکه کوچک‌تر باشد، پیش‌بینی‌های بهتری از این موقعیت‌ها حاصل می‌شود (گریفیث و



شکل ۱۳. تفاوت شبیه‌سازی محدوده پخش مواد باروری با مدل پاشندگی HYSPLIT حاصل از اجرای هشت ترکیب‌بندی از پارامترسازی‌های فیزیکی در مدل هواشناسی WRF. شکل (الف) مربوط به پرواز شماره ۳۱ در تاریخ ۲ فوریه ۲۰۱۷ و شکل (ب) مربوط به پرواز شماره ۳۸ در تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۱۷ در منطقه شرق کشور، در استان‌های خراسان جنوبی و رضوی است.



شکل ۱۴. محدوده پخش مواد باروری در دو تفکیک افقی مختلف ۵ و ۳ کیلومتر در بخش‌هایی از نقاط شلیک در مناطق مرکزی ایران در پروازهای شماره ۸ و ۲۹ روی استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری. شکل‌های (الف) و (ب) مربوط به پرواز ۲۹ و شکل‌های (ج) و (د) مربوط به پرواز ۸ هستند.

هرچه اندازه شبکه کوچکتر باشد، پیش‌بینی‌های بهتری از انتقال و پخش مواد حاصل می‌شود؛ موارد گفته‌شده نشان‌دهنده اطمینان بیشتر به منطقه هدفی است که در تعیین آن از داده‌های با تفکیک افقی ۵ کیلومتر استفاده شده است.

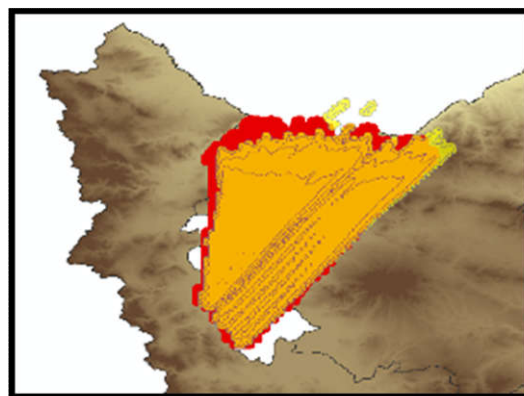
با توجه به اینکه در ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها تلاش می‌شود از ایستگاه‌های واقع در پایین‌دست یا طرفین منطقه کنترل صرف‌نظر شود، تغییر در تفکیک افقی داده‌های ورودی نقش قابل‌توجهی در انتخاب ایستگاه‌های کنترل پروژه نخواهد داشت و با در نظر گرفتن هزینه‌های محاسباتی اجرای مدل، انتخاب تفکیک ۵ کیلومتر برای داده‌های ورودی مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. در صورت کمبود ایستگاه‌های کنترل و لزوم استفاده از ایستگاه‌های طرفین منطقه هدف، انتخاب ایستگاه‌ها باید با احتیاط و با فاصله مطمئنی از مرز منطقه هدف صورت گیرد. در زمینه انتخاب ایستگاه‌های منطقه هدف به نظر می‌رسد صرف‌نظر کردن از ایستگاه‌های واقع در مرزهای منطقه هدف، انتخاب بهتری باشد؛ گرچه کنترل فواصل اطمینان و انجام دادن آزمایش‌های آماری، دید بهتری از وجود تغییرات بارشی در اثر بارورسازی ابرها در این نوع ایستگاه‌ها ارائه خواهد داد.

۳-۳ سنجش تأثیرپذیری شبیه‌سازی پخش مواد باروری از تفکیک مکانی در مدل HYSPLIT

در این قسمت، برای هر چهار پرواز منتخب، مدل HYSPLIT با تفکیک مکانی در سه حالت برابر، دوسوم و یک‌سوم تفکیک افقی داده‌های هواشناسی ورودی به‌اجرا درآمد و نتایج مقایسه شد (شکل‌های ۱۷ و ۱۸). بررسی و مقایسه محدوده پخش مواد باروری در مناطق مرکزی و شمال‌غرب کشور نشان داد:

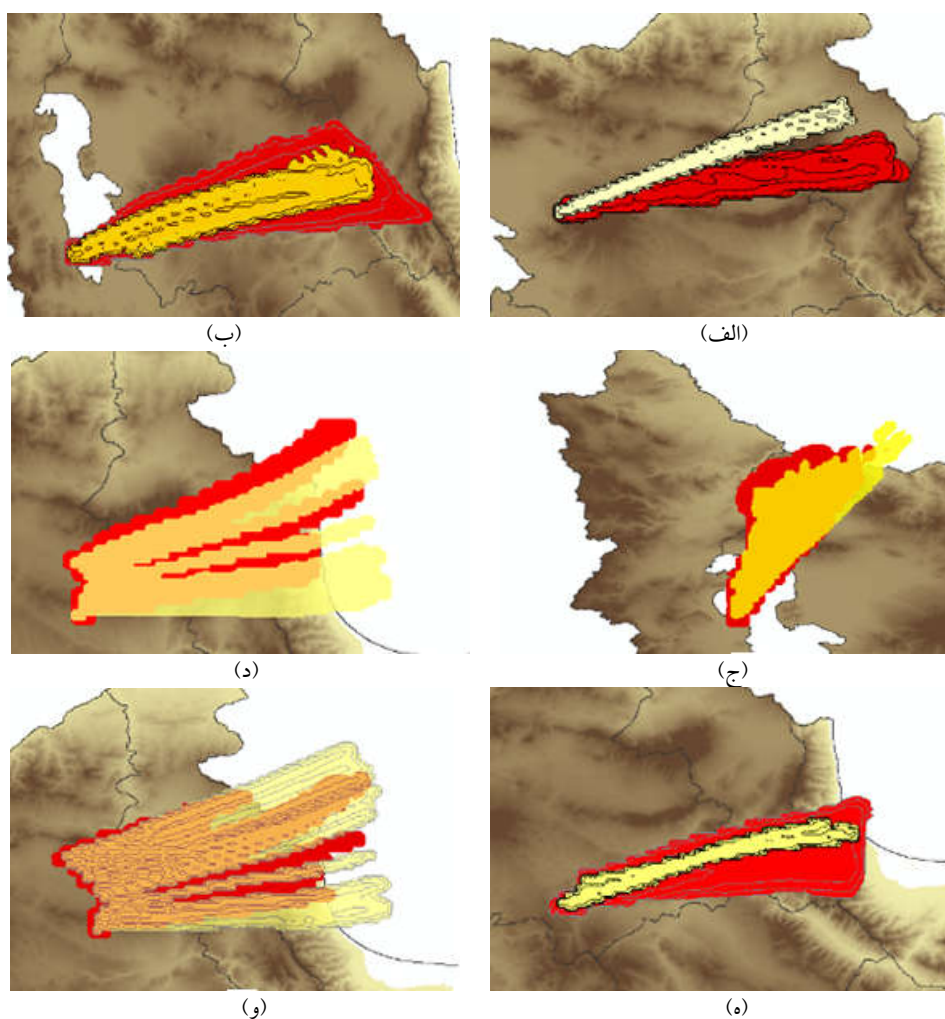
الف. محدوده پخش با بیشتر شدن تفکیک مکانی اجرای مدل HYSPLIT، روند کاهشی دارد، اما تفاوت

شکل ۱۵ مقایسه دو تفکیک افقی را در بخش‌های مختلف پرواز شماره ۳۰ در منطقه شمال‌غرب نشان می‌دهد که حاکی از نزدیکی مناسب بین تفکیک افقی ۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر است به طوری که آشفتگی و بی‌نظمی در محدوده پخش بین این دو، چندان دیده نمی‌شود و فقط در موارد اندکی، محدوده پخش در حالت تفکیک افقی ۵ کیلومتر به میزان کمی، بزرگ‌تر از محدوده پخش در تفکیک افقی ۳ کیلومتر است. در پرواز شماره ۱۶ در همین منطقه، انحراف محدوده پخش در تفکیک افقی ۳ کیلومتر نسبت به تفکیک افقی ۵ کیلومتر بسیار چشمگیر و در برخی موارد، امتداد و گسترش طولی دوساعته مواد باروری در این دو تفکیک افقی به میزان قابل‌توجهی متفاوت است (شکل ۱۶).

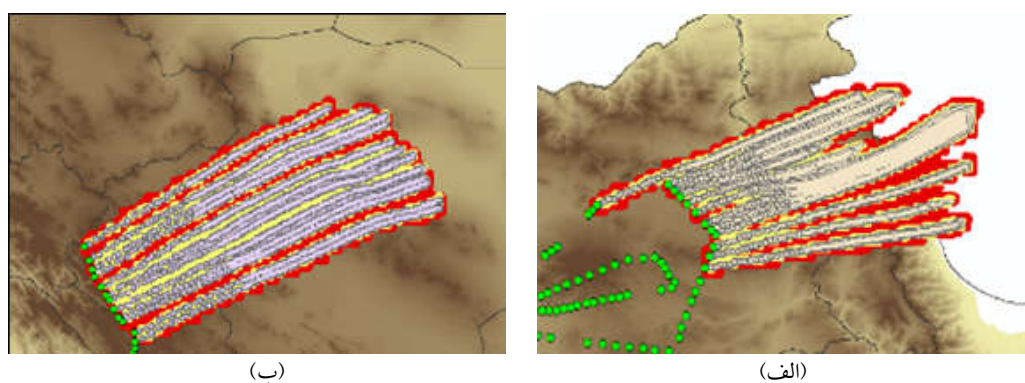


شکل ۱۵. محدوده پخش مواد باروری در دو تفکیک افقی مختلف ۵ و ۳ کیلومتر در بخشی از نقاط شلیک در منطقه شمال‌غرب کشور در پرواز شماره ۳۰ روی استان‌های آذربایجان غربی و شرقی

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که نتایج اجرای مدل HYSPLIT به تفکیک افقی داده‌های ورودی حساس است، اما این حساسیت از قاعده معینی پیروی نمی‌کند و در برخی موارد، بسیار ناچیز و در برخی دیگر، بسیار چشمگیر است. به نظر می‌رسد تفاوت بودن نتایج از روزی به روز دیگر، نشان‌دهنده تأثیر شرایط جوی در میزان این حساسیت است. با وجود اینکه براساس یافته‌های علمی،



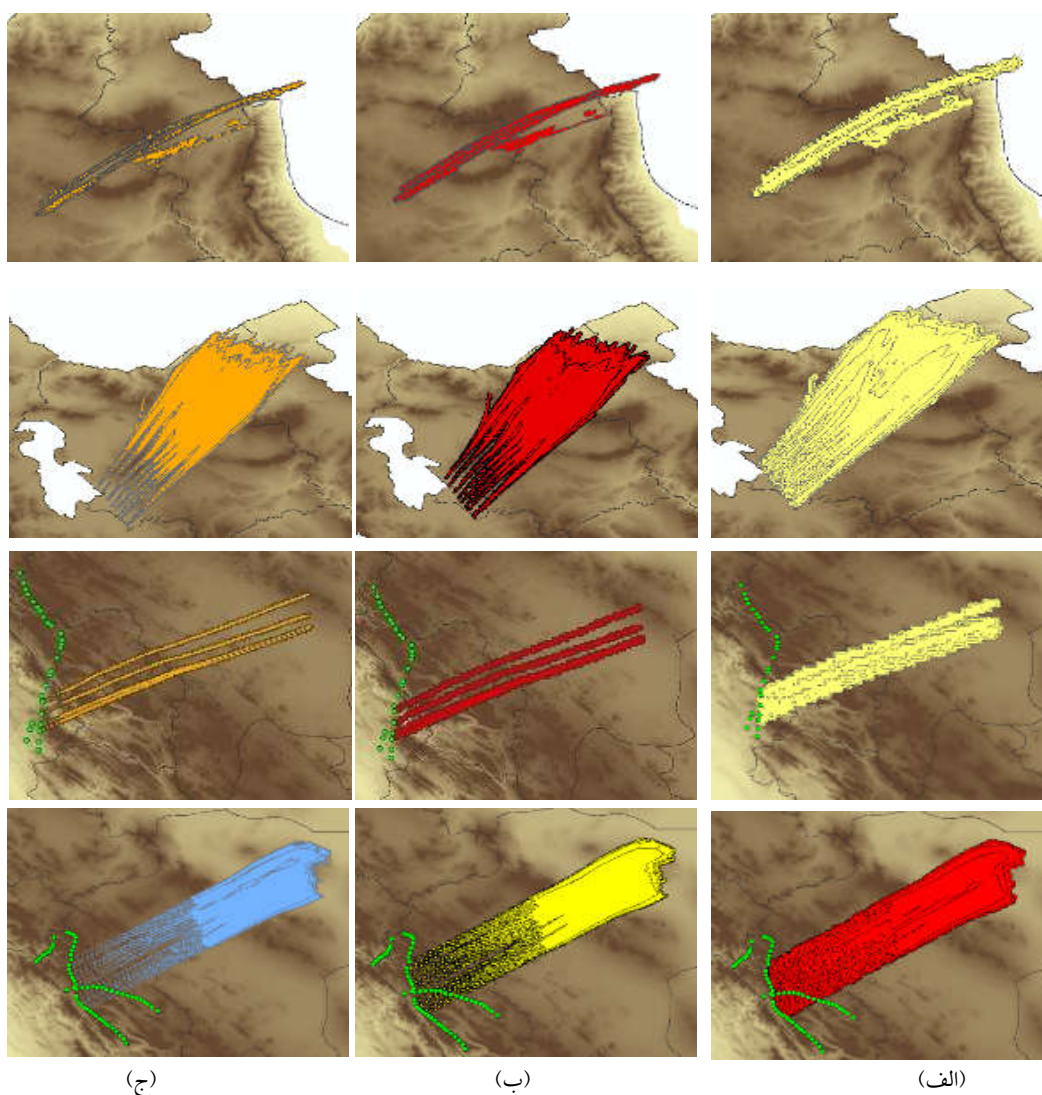
شکل ۱۶. (الف) تا (و) محدوده پخش مواد باروری در دو تفکیک افقی مختلف ۵ و ۳ کیلومتر در بخش‌هایی از نقاط شلیک در منطقه شمال غرب کشور در پرواز شماره ۱۶ روی دریاچه ارومیه و استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل. رنگ قرمز، محدوده پخش مواد در تفکیک افقی ۵ کیلومتر را نشان می‌دهد و رنگ زرد روشن، نشان‌دهنده شبیه‌سازی پخش مواد در تفکیک افقی ۳ کیلومتر است.



شکل ۱۷. تغییرات جزئی در پخش مواد باروری در سه تفکیک مکانی مختلف مدل HYSPLIT در (الف) پرواز شماره ۱۶ در منطقه شمال غرب روی استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل و (ب) پرواز شماره ۸ در مناطق مرکزی ایران روی استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری. رنگ قرمز، محدوده پخش در تفکیک مکانی برابر با تفکیک افقی مدل WRF، محدوده زردرنگ، تفکیک مکانی دوسوم داده ورودی و رنگ نقره‌ای، محدوده پخش مواد در تفکیک مکانی یک‌سوم داده ورودی است. نقاط سبزرنگ، نقاط شلیک پیروپاترون‌های یدیدنقره هستند.

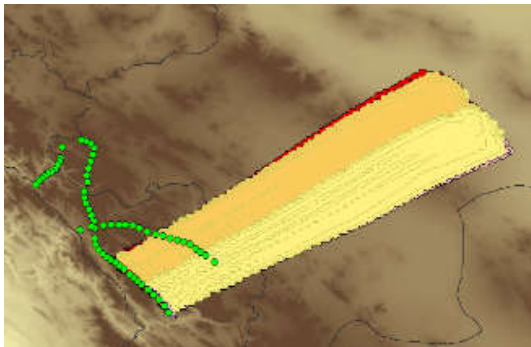
ب. محدوده کلی پخش مواد باروری در تمام حالت‌ها تقریباً مشابه است، ولی محدوده پخش در نزدیکی منبع انتشار، در تفکیک مکانی کمتر یعنی تفکیک مکانی برابر با تفکیک افقی داده‌های ورودی، یکپارچه‌تر و وسیع‌تر است و ضریب اطمینان بیشتری را در تعیین منطقه هدف به کاربر القا می‌کند.

آن بسیار جزئی است به طوری که محدوده پخش در تفکیک مکانی مشابه با تفکیک افقی داده‌های ورودی، با محدوده شبیه‌سازی شده در تفکیک مکانی دوسوم و یک‌سوم تفکیک افقی داده‌های ورودی در پروازهای منتخب تطابق زیادی دارد.



شکل ۱۸. نحوه پخش مواد باروری با توجه به نسبت تفکیک مکانی مدل پاشندگی HYSPLIT به تفکیک افقی داده‌های حاصل از اجرای مدل WRF. در ستون (الف) تفکیک مکانی مدل پاشندگی برابر با تفکیک داده‌های هواشناسی ورودی است. در ستون (ب) تفکیک مکانی مدل پاشندگی برابر با دوسوم تفکیک داده‌های هواشناسی ورودی و در ستون (ج) تفکیک مکانی مدل پاشندگی برابر با یک‌سوم تفکیک داده‌های هواشناسی ورودی است. تصاویر در ردیف‌های اول تا چهارم نیز به ترتیب مربوط به پرواز شماره ۱۶ روی استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل، پرواز شماره ۳۰ روی دریاچه ارومیه و استان آذربایجان شرقی و پروازهای شماره ۸ و ۲۹ روی استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری است.

پخش مواد باروری در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای و ۲۰ دقیقه‌ای در سه پرواز ۸، ۲۹ و ۳۰ همخوانی خوبی با هم نشان داد. در شکل ۲۰، نمونه‌ای از محدوده پخش مواد باروری در پروازهای ۸ و ۳۰ نشان داده شده است. در بخش‌هایی از پرواز شماره ۱۶ در منطقه شمال‌غرب (شکل ۲۱)، مقدار اندکی جابه‌جایی در منطقه پخش دیده می‌شود و در چند مورد دیگر، مجموع مناطق پخش در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، کمی وسیع‌تر از محدوده پخش در بازه زمانی ۲۰ دقیقه‌ای متناظر با آن است. در بسیاری از موارد (شکل ۲۲)، با افزایش تفکیک مکانی مدل از ۵ کیلومتر به ۳ کیلومتر، تفاوت محدوده پخش بین این دو بیشتر است.



شکل ۱۹. محدوده پخش مواد باروری با داده‌های ورودی مدل پاشندگی در دو تفکیک زمانی ۱۰ دقیقه و ۵ دقیقه در بخشی از پرواز شماره ۲۹ روی استان‌های اصفهان و چهارمحال‌وبختیاری. محدوده قرمز رنگ که به دلیل همپوشانی در زیر دو رنگ دیگر قرار دارد، تصویر محدوده پخش مواد باروری در بازه ۱۰ دقیقه‌ای است و دو محدوده نارنجی‌رنگ و کرم‌رنگ، منطقه پخش مواد باروری در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای متناظر با آن هستند. نقاط سبز رنگ، نقاط شلیک پروپاترون‌های یدیدنقره هستند.

برای سنجش حساسیت به تفکیک زمانی، بررسی محدوده پخش مواد باروری در بخش‌های مختلف هر چهار پرواز منتخب نشان داد:

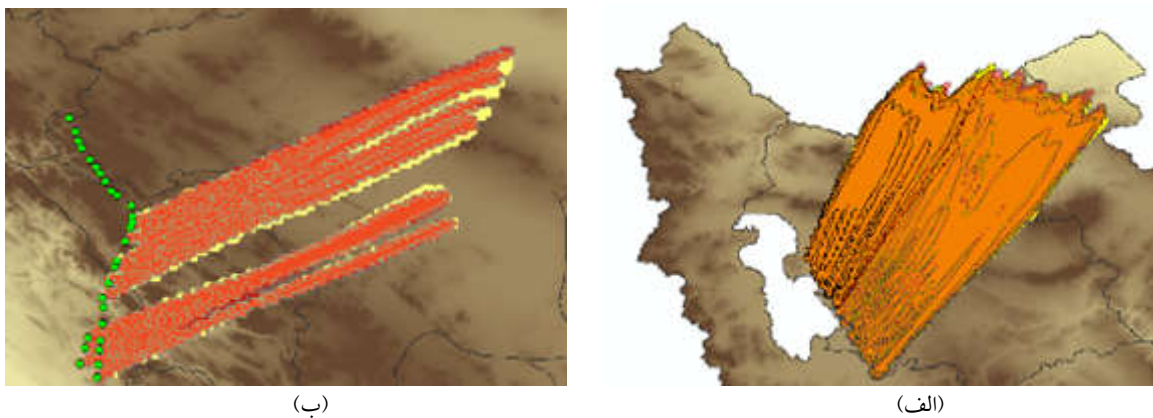
الف. وقتی تفکیک افقی داده‌های ورودی ۳ کیلومتر است، تفاوت محدوده پخش بین یک بخش ۲۰ دقیقه‌ای با دو بخش ۱۰ دقیقه‌ای متناظر آن یا یک بخش ۱۰

در مجموع، از این سنجش حساسیت می‌توان دریافت هرچه تفکیک مکانی مدل HYSPLIT به تفکیک افقی داده‌های ورودی نزدیک‌تر باشد، محدوده پخش یکپارچه‌تر است و ضریب اطمینان بیشتری در تعیین منطقه هدف دارد. اگر این تفکیک مکانی کوچک‌تر شود و از تفکیک افقی داده‌های ورودی فاصله بگیرد، محدوده پخش به میزان بسیار جزئی کاهش می‌یابد.

۳-۴ سنجش تأثیرپذیری شبیه‌سازی پخش مواد باروری از تفکیک زمانی داده‌های ورودی مدل HYSPLIT

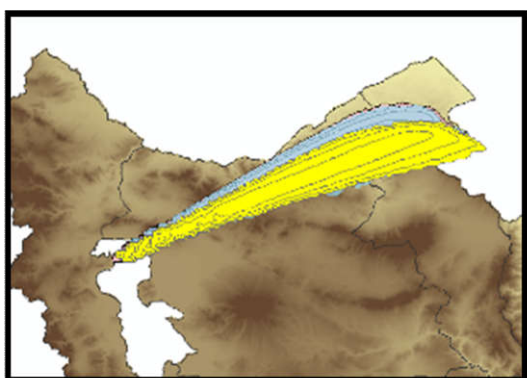
برای سنجش تأثیرپذیری از تفکیک زمانی، داده‌های خروجی حاصل از اجرای مدل WRF با دو تفکیک افقی ۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر برای چهار پرواز منتخب، پس از حذف زمان آموزش مدل، در سه بازه زمانی خروجی ۵ دقیقه‌ای، ۱۰ دقیقه‌ای و ۲۰ دقیقه‌ای ثبت و زمان‌های شلیک این پروازها براساس این سه بازه زمانی دسته‌بندی شدند. سپس نحوه پخش مواد حاصل از سوختن مواد پیروتکنیک در این سه بازه زمانی در مدل HYSPLIT شبیه‌سازی و پس از به‌تصویر درآمدن روی نقشه، تحلیل و بررسی شدند. گفتنی است در بسیاری از پروازها، شلیک مواد باروری به‌صورت پیوسته است که در برخی پروازها تا ۳۰ دقیقه و بیشتر به طول می‌انجامد؛ بنابراین نقاط شلیک این پروپاترون‌ها باید با بازه‌های زمانی موردنظر تفکیک و جداسازی شوند و شبیه‌سازی‌های پخش براساس این تفکیک داده‌ها صورت پذیرد.

نتایج بررسی‌ها نشان داد در تمام این چهار پرواز، در هر دو حالت تفکیک افقی ۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر، مجموع محدوده پخش مواد باروری در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای به محدوده پخش مواد باروری در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای متناظر با آن نزدیک است که در شکل ۱۹، نمونه‌ای از آن در پرواز شماره ۲۹ دیده می‌شود. محدوده



شکل ۲۰. محدوده پخش مواد باروری در دو تفکیک زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و ۵ دقیقه‌ای در (الف) پرواز شماره ۳۰ روی دریاچه ارومیه و استان آذربایجان شرقی (ب) پرواز شماره ۸ روی استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری. محدوده زردرنگ که به دلیل همپوشانی در زیر قرار گرفته است، تصویر محدوده پخش در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و محدوده قرمز رنگ محدوده پخش در بازه زمانی ۲۰ دقیقه‌ای است.

تعیین منطقه هدف به‌نظر می‌رسد؛ چون علاوه بر تفکیک افقی ۳ کیلومتر، در تفکیک افقی ۵ کیلومتر هم حالت میانه‌ای از خود نشان می‌دهد. انتخاب تفکیک افقی داده‌های ورودی بین ۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر در این

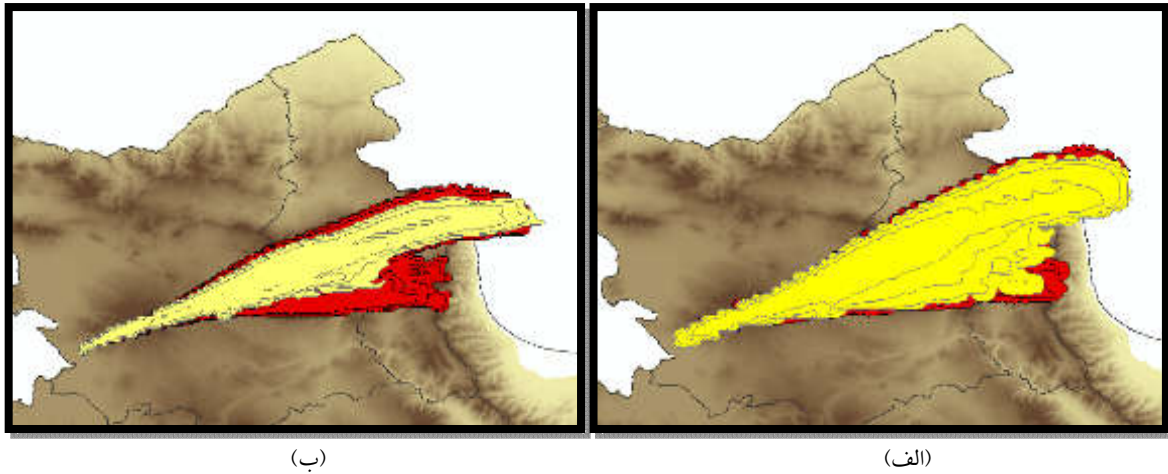


شکل ۲۱. تفاوت محدوده پخش بین داده‌های ورودی با تفکیک زمانی ۲۰ دقیقه‌ای و ۱۰ دقیقه‌ای در بخشی از پرواز شماره ۱۶ روی دریاچه ارومیه و استان آذربایجان شرقی. منطقه زردرنگ، محدوده پخش مواد در بازه ۲۰ دقیقه‌ای و محدوده آبی و قرمز، منطقه پخش مواد در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای است (که محدود قرمز توسط دو محدوده دیگر پوشانده شده است). در بازه زمانی ۲۰ دقیقه‌ای، محدوده پخش به سمت پایین جابه‌جا شده است.

دقیقه‌ای با دو بخش ۵ دقیقه‌ای متناظرش، بیشتر است. در این تفکیک افقی، در برخی موارد این تفاوت‌ها بسیار زیاد است در حالی که وقتی تفکیک افقی داده‌های ورودی ۵ کیلومتر است، تفاوت محدوده پخش بسیار اندک است. به عبارت دیگر، هرچه تفکیک مکانی داده‌های ورودی بیشتر شود، حساسیت مدل HYSPLIT به تفکیک زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و ۲۰ دقیقه‌ای و همچنین ۵ دقیقه‌ای و ۱۰ دقیقه‌ای بیشتر می‌شود. به این ترتیب، در حالت تفکیک مکانی ۳ کیلومتر نسبت به تفکیک مکانی ۵ کیلومتر، مدل حساسیت بیشتری به تفکیک زمانی نشان می‌دهد.

ب. کمترین حساسیت مدل پاشندگی، به تفکیک افقی داده‌های مدل در حالت تفکیک زمانی ۵ دقیقه‌ای روی می‌دهد. به بیان دیگر، هرچه تفکیک زمانی بیشتر شود، تأثیر تفکیک مکانی افقی داده‌های ورودی کمتر احساس می‌شود.

با توجه به بررسی‌های فوق، انتخاب ۱۰ دقیقه‌ای، انتخاب بهتری در فرایند شبیه‌سازی پخش مواد باروری و



شکل ۲۲. تفاوت قابل توجه محدوده پخش مواد باروری پرواز شماره ۳۰ روی دریاچه ارومیه و استان آذربایجان شرقی در تفکیک زمانی ۵ دقیقه‌ای و ۱۰ دقیقه‌ای وقتی تفکیک افقی داده‌های ورودی افزایش می‌یابد. تفکیک افقی در (الف) ۵ کیلومتر و در (ب) ۳ کیلومتر است.

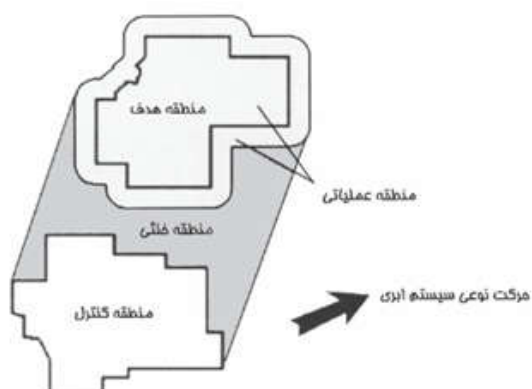
در منابع علمی (دنيس، ۱۹۸۰) به آنها اشاره شده است. در بیشتر پروژه‌های عملیاتی در مناطق مختلف دنیا با توجه به امکانات و روش باروری، «محدوده اجرای عملیات بارورسازی ابرها» - که همان منطقه هدف در فرایند ارزیابی است - معمولاً کوچک و ثابت فرض می‌شود (شکل ۲۳) و منطقه بالادست آن از نظر جهت جریان باد غالب، منطقه کنترل نامیده می‌شود. در بررسی‌های پژوهش حاضر، در دو مورد مشاهده شد که مواد باروری درست در جهت عکس باد غالب منطقه پخش شده و انتقال یافته‌اند. شکل‌های ۲۴-الف و ۲۴-ب، تصاویری را از پخش و انتقال مواد باروری در پرواز شماره ۸۲ در تاریخ ۲۵ مارس ۲۰۱۷ و پرواز شماره ۸۳ در تاریخ ۲۶ مارس ۲۰۱۷ در منطقه شمال غرب نشان می‌دهند. باد غالب در این منطقه جنوب غربی است، اما مواد باروری در جهت شمال شرق انتشار یافته‌اند. به عبارتی، منطقه کنترل در معرض گسترش قابل توجه مواد باروری است و این امر موجب می‌شود وایزش تاریخی بین هدف و کنترل به نتایج گمراه کننده‌ای برسد؛ چون ایستگاه‌هایی که در

تفکیک زمانی، نسبت به سایر بازه‌های زمانی، کمتر عامل محدودکننده در این زمینه به‌شمار می‌آید. علاوه بر آن، با توجه به نکاتی همچون زمان بر بودن اجرای مدل WRF، آماده‌سازی مشخصات نقاط شلیک در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای، شبیه‌سازی‌ها در مدل HYSPLIT و پردازش‌های بعدی آنها از جمله پردازش‌های تصویری جهت ترسیم منطقه هدف نهایی؛ انتخاب بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، نتیجه مطلوب و قابل قبولی، هم از نظر اجرا و مدیریت داده‌ها و هم از نظر کیفیت نهایی منطقه هدف به‌دنبال دارد.

۴ دستاورد جانبی

پژوهش حاضر که برای سنجش حساسیت مدل پاشندگی HYSPLIT به پارامترهای مختلف هواشناسی و مدل اجرا شد، این واقعیت را آشکار کرد که نتایج ارزیابی آماری ماهانه یا فصلی پروژه‌هایی که از مدل‌های پخش، برای بررسی انتشار و پخش مواد باروری استفاده نکرده‌اند، دچار عدم قطعیت دیگری می‌شود که علاوه بر عدم قطعیت‌های ذاتی روش وایزش هدف/کنترل است که

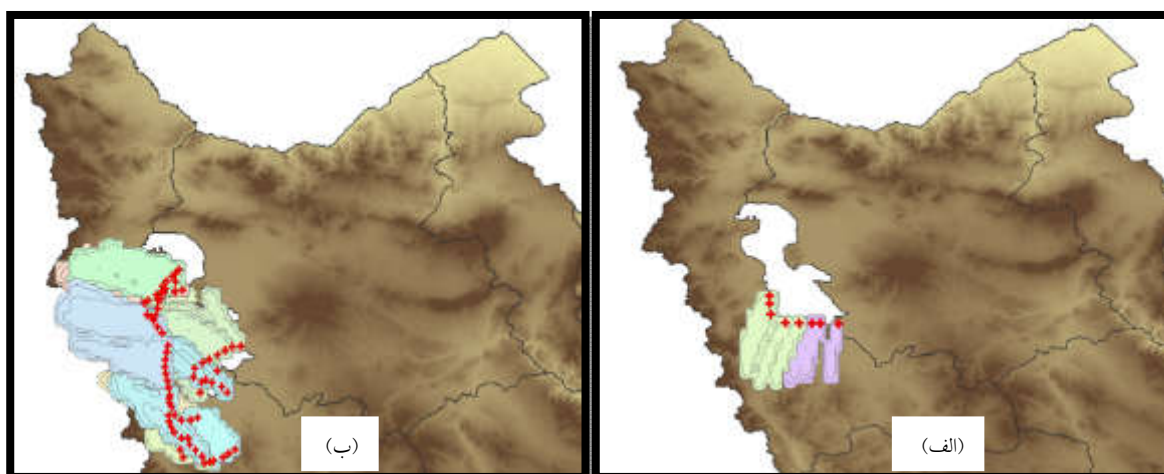
و ۲۶-ب، تصویر بارش روزانه ایستگاه‌های هم‌میدی واقع در منطقه هدف و مناطق مجاور را در روزهای ۲۵ و ۲۶ مارس ۲۰۱۷ نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها، بیشترین بارش در منطقه، در محدوده پخش مواد باروری است که در واقع همان مرکز تقریبی چرخند است.



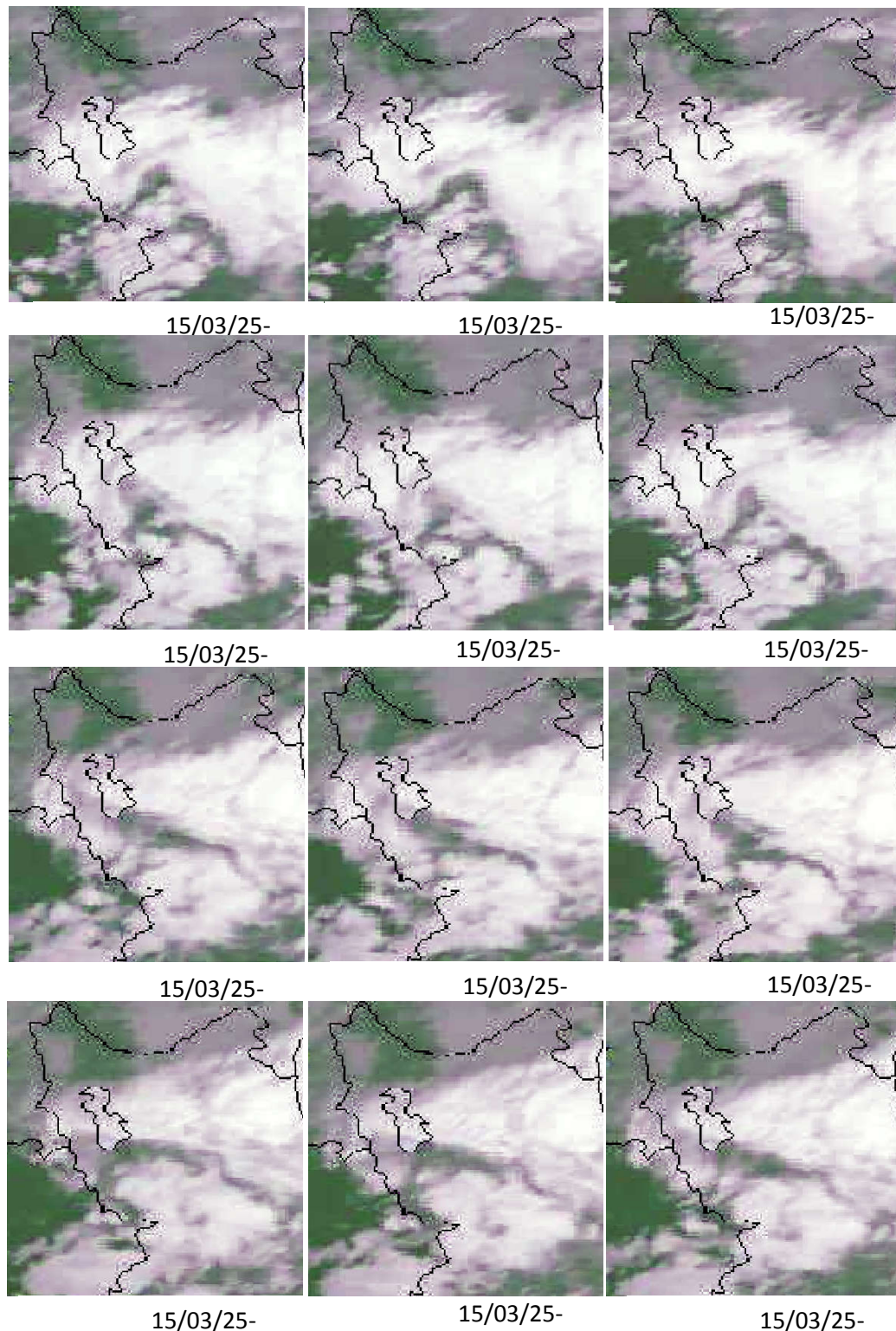
شکل ۲۳. تعیین منطقه هدف و کنترل قبل از اجرای پروژه به‌ویژه در روش وایزش تاریخی هدف/کنترل (انجمن مهندسان عمران آمریکا، ۲۰۰۴).

منطقه کنترل در محاسبات وارد شده‌اند، در عمل هدف باروری بوده‌اند. همان‌طور که در بخش مقدمه به‌طور کامل توضیح داده شد، این موضوع به‌طور بالقوه می‌تواند منجر به برآورد کمتر از میزان واقعی تأثیر بارورسازی ابرها شود.

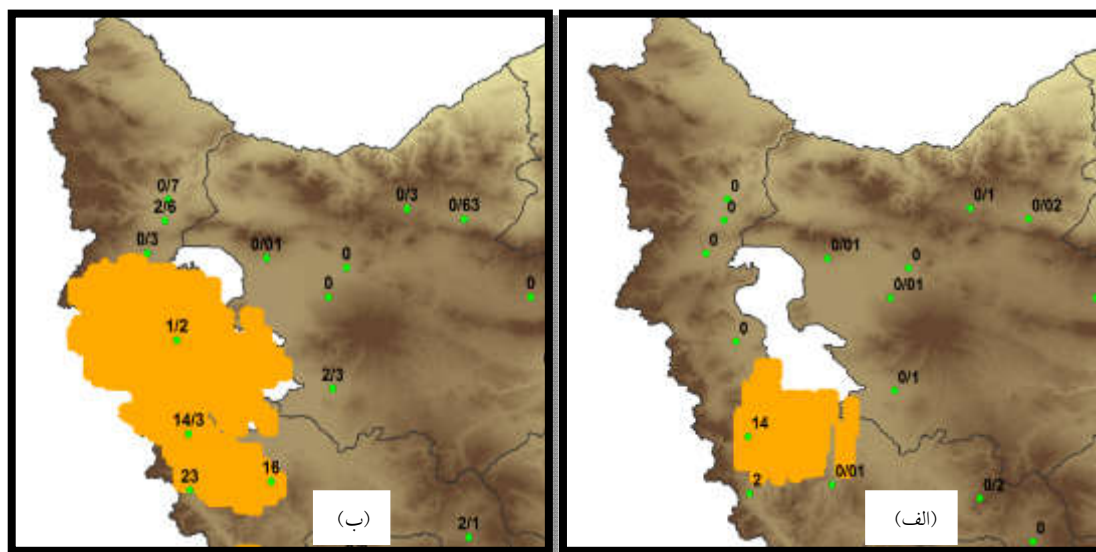
برای تأیید اطمینان بیشتر از صحت شبیه‌سازی محدوده پخش مواد باروری در دو پرواز گفته‌شده، تصاویر ماهواره متئوست در تاریخ ۲۵ مارس ۲۰۱۷، از زمان اولین تریق مواد باروری تا چند ساعت پس از آن بررسی شد. این تصاویر به‌صورت نیم‌ساعته دریافت می‌شود. اولین شلیک پیروپاترون در پرواز شماره ۸۲، در ساعت ۱۷:۵۰ و آخرین شلیک مواد باروری در ساعت ۱۹:۵۰ به وقت گرینویچ صورت گرفته است. شکل ۲۵ تصاویر متوالی دریافت‌شده از ساعت ۱۸ تا ۲۳:۳۰ را نشان می‌دهد که زمین مرجع شده و در محیط GIS سازگارسازی شده است. با بررسی تصاویر، دیده می‌شود چون عملیات بارورسازی روی یک چرخند انجام شده است، مواد باروری در جهت عکس باد غالب منطقه پخش شده‌اند. شکل‌های ۲۶-الف



شکل ۲۴. پخش و انتقال مواد باروری روی دریاچه ارومیه و آذربایجان غربی در (الف) پرواز شماره ۸۲ در تاریخ ۲۵ مارس ۲۰۱۵ (ب) پرواز شماره ۸۳ در تاریخ ۲۶ مارس ۲۰۱۵. مطابق شکل، مواد باروری برخلاف جهت باد غالب منطقه (جهت جنوب‌غربی) پخش شده و انتقال یافته‌اند.



شکل ۲۵. تصاویر پیوسته ماهواره متنوست با توالی نیم‌ساعته از سیستم ابرناکی حاکم بر منطقه شمال‌غرب کشور در روز ۲۵ مارس ۲۰۱۵. در این روز، اولین زمان شلیک و آخرین زمان شلیک مواد باروری در پرواز شماره ۸۲ به ترتیب در ساعات ۱۷:۵۰ و ۱۹:۵۰ به وقت گرینویچ بوده است. تصاویر فوق، وضعیت حرکت سامانه ابری را پس از شلیک پیروپاترون‌های باروری نشان می‌دهد. مطابق شکل، مواد در جریان حرکت چرخند قرار گرفته و در خلاف جهت باد غالب منطقه حرکت کرده‌اند. مناطق کنترل و هدف با توجه به جهت باد غالب در منطقه، ثابت در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲۶. میزان بارش ایستگاه‌های همدیدی در منطقه هدف و مناطق مجاور آن روی دریاچه ارومیه و استان آذربایجان غربی (الف) در پرواز شماره ۸۲ در تاریخ ۲۵ مارس ۲۰۱۵ (ب) در پرواز شماره ۸۳ در تاریخ ۲۶ مارس ۲۰۱۵. مطابق شکل، بیشترین بارش در منطقه، در محدوده پخش مواد باروری است.

۵ نتیجه‌گیری

ارزیابی شد. نتایج سنجش حساسیت مدل پاشندگی HYSPLIT به نحوه و محدوده انتقال و پخش دوساعته مواد باروری در دوره‌های زمانی و اقلیم‌های متفاوت موجود در ایران در پروازهای متعدد بارورسازی نشان داد: الف. انتخاب‌های متفاوت پیکربندی مدل جوی از دیدگاه پارامترسازی فیزیکی، به‌طور بالقوه می‌تواند در برخی موارد به‌گونه چشمگیری بر وسعت منطقه شبیه‌سازی شده تأثیر گذارد؛ بنابراین در انتخاب ایستگاه‌های کنترل بایستی تا حد ممکن از طرفین مناطق هدف چشم‌پوشی کرد و هنگام مواجهه با کمبود درخور توجه ایستگاه‌های کنترل، نه تنها بایستی احتیاط کرد تا فاصله مطمئنی از مرزهای جانبی منطقه هدف رعایت شود، بلکه در صورت انتخاب ایستگاه‌هایی در طرفین، می‌بایست به کمک روش‌های آماری یا ابزارهای دیگر، از آلوده نبودن این ایستگاه‌ها به مواد باروری اطمینان حاصل کرد. ب. نتایج اجرای مدل HYSPLIT به تفکیک افقی داده‌های ورودی حساس است، اما حساسیت آن در تعیین منطقه هدف و کنترل در ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها به‌گونه‌ای است که در صورت وجود تراکم و

یکی از پیش‌نیازهای ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در ایران و نیز پردازش اثرهای زیست‌محیطی و آب-شناختی حاصل از برنامه‌های افزایش بارش، آگاهی از منطقه انتقال، پخش و تأثیرگذاری مواد باروری است. استفاده از مدل‌های جفت شده پاشندگی-هواشناسی همچون مدل جفت شده HYSPLIT و WRF یکی از روش‌های دستیابی به این آگاهی است. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از داده‌های باد و دمای ثبت شده توسط هواپیمای بارورسازی ابرها، نشان داد داده‌های مدل هواشناسی WRF که ورودی مدل HYSPLIT هستند، از دقت قابل‌قبولی برخوردارند. نظر به نبود داده‌های مشاهده‌ای کافی جهت پردازش عملکرد مدل پاشندگی، در پژوهش حاضر برای تعیین عدم قطعیت‌ها در شناسایی منطقه هدف عملیات بارورسازی ابرها در ایران، حساسیت مدل مطالعه شد. به همین منظور، حساسیت مدل HYSPLIT به بهترین ترکیب‌ها از پارامترسازی فیزیکی مدل WRF و نیز تفکیک افقی و زمانی داده‌های هواشناسی ورودی و تفکیک مکانی مدل پاشندگی

مواد باروری می‌تواند در جهت خلاف جهت باد غالب منطقه صورت پذیرد. این امر موجب اطمینان از آلوده نبودن منطقه کنترل به مواد باروری می‌شود که ملاحظه اصلی در انتخاب منطقه یا مناطق کنترل است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مرکز ملی تحقیقات و مطالعات بارورسازی ابرها و دانشگاه تهران به واسطه حمایت از این کار پژوهشی تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2004, Standard Practice for the Design and Operation of Precipitation Enhancement Project, ASCE/EWRI Standard 42-04, Reston, VA, 63p.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016, Guidelines for Cloud Seeding to Augment Precipitation, Third Edition, ISBN 978-0-7844-1411-8 (print).
- Aligo, E. A., Gallus, W. A., and Segal, M., 2009, On the impact of WRF model vertical grid resolution on midwest summer rainfall forecasts: *Weather Forecasting*, **24**, 575–594.
- Betts, A. K., and Miller, M. J., 1986, A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets: *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **112**, 693–709.
- Breed, D., Rasmussen, R., Weeks, C., Boe, B., and Deshler, T., 2014, Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP): *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **53**, 282–299.
- Breed, D., Axisa, D., Liu, C., and Feng, X., 2015, An evaluation of seeding effectiveness in the central Colorado Mountains River Basins weather modification program: Research Applications Laboratory of the National Center for Atmospheric Research (RAL/NCAR).
- Bruintjes, R. T., Clark, T. L., and Hall, W. D., 1995, The dispersion of tracer plumes in mountainous regions of central Arizona: Comparisons between observations and

پراکنش مناسب و کافی در بالادست منطقه هدف، تغییر در تفکیک افقی داده‌های ورودی نقش چشمگیری در انتخاب ایستگاه‌های کنترل پروژه نخواهد داشت؛ زیرا در ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها تلاش می‌شود از ایستگاه‌های واقع در پایین‌دست یا طرفین منطقه هدف صرف نظر شود، اما با توجه به اینکه حساسیت شبیه‌سازی پخش مواد به تفکیک افقی داده‌های ورودی، نقش شایان توجهی در میزان حساسیت مدل به تفکیک زمانی این داده‌ها دارد و هرچه تفکیک زمانی بیشتر شود، تأثیر تفکیک مکانی افقی داده‌های ورودی کمتر احساس می‌شود؛ به نظر می‌رسد انتخاب تفکیک مکانی ۵ کیلومتر می‌تواند در مجموع، میزان حساسیت‌های مدل را در شبیه‌سازی تا حد قابل‌قبولی کاهش دهد و احتیاط‌های لازم را در زمینه محدوده منطقه هدف و انتخاب ایستگاه‌های کنترل در صورت نبود ایستگاه کافی در بالادست آن منطقه اعمال کند. شایان ذکر است در صورت اعمال تفکیک افقی ۵ کیلومتر، کنترل فواصل اطمینان و اجرای آزمایش‌های آماری، دید بهتری از وجود تغییرات بارشی در اثر بارورسازی ابرها در ایستگاه‌های واقع در مرز منطقه هدف ارائه خواهند داد.

ج. افزایش تفکیک مکانی مدل HYSPLIT نقش قابل توجهی در بهبود منطقه هدف پروازهای باروری ندارد و تنها یکنواختی منطقه پخش مواد را کاهش می‌دهد؛ بنابراین انتخاب تفکیک مکانی مدل HYPLIT مطابق با تفکیک افقی داده‌های هواشناسی ورودی، گزینه مناسبی محسوب می‌شود.

در پایان، با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده در این پژوهش، حتی در پروژه‌هایی که مناطق هدف و کنترل، ثابت و کوچک است و قبل از اجرای بارورسازی ابرها تعیین می‌شوند نیز تعیین نحوه انتقال مواد باروری و ترسیم مناطق پخش مواد بارورسازی ابرها، یکی از پیش‌نیازهای ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها است؛ چون پخش

- Research, **104–105**, 1–39, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.09.009.
- Gallus, W. A., and Bresch, J., 2006, Comparison of impacts of wrf dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts: *Monthly Weather Review*, **134**, 2632–2641.
- Grell, G. A., and Devenyi, D., 2002, A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques: *Geophysical Research Letters*, **29**(14), Article 1693.
- Griffith, D. A., Thompson, J. R., and Risch, D. A., 1991, A winter cloud seeding program in Utah. WMA: *Journal of Weather Modification*, **23**(1), 27–34.
- Griffith, D. A., Yorty, D. P., and Beall, S. D., 2015, Target/control analyses for Santa Barbara County's operational winter cloud seeding program. WMA: *Journal of Weather Modification*, **47**, 10–25.
- Griffith, D. A., Beall, S. D., Yorty, D. P., 2016, Feasibility/design study for a winter cloud seeding program in the Upper Cuyama River Drainage, California, North American Weather Consultants, Inc. Report No. WM 16-8, Project No. 15-376.
- Griffith, D. A., and Solak, M., 2016, San Gabriel mountains cloud seeding draft program report, North American weather consultants, Inc, Report No. WM 16-1, Los Angeles Department of Public Works Contract No. 003343.
- Griffith, D. A., Ward, S. M., and Yorty, D. P., 2016, Analysis of ice detector observations at Mount Crested Butte, Colorado during the 2014-2015 winter season: *Journal of Weather Modification*, **48**.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., and Chen, S. H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation: *Monthly Weather Review*, **132**, 103–120.
- Hong, S. Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes: *Monthly Weather Review*, **134**, 2318–2341.
- Janjic, Z. I., 1994, The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes: *Monthly Weather Review*, **122**, 927–945.
- Janjic, Z. I., 1996, The surface layer in the NCEP Eta Model: Eleventh conference on numerical weather prediction, Norfolk, VA, modeling results: *Journal of Applied Meteorology*, **34**, 971–988.
- Challa, V. S., Indrcanti, J., Baham, J. M., Patrick, C., Rabarison, M. K., Young, J. H., Hughes, R., Swanier, S. J., Hardy, M. G., and Yerramilli, A., 2008, Sensitivity of atmospheric dispersion simulations by HYSPLIT to the meteorological predictions from a meso-scale model, Published online: 24 September 2008 © Springer Science+Business Media B.V. 2008.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation: *Monthly Weather Review*, **129**, 569–585.
- Clark, A. J., Gallus, W. A., Xue, M., and Kong, F., 2009, A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles: *Weather Forecasting*, **24**, 1121–1140.
- DeFelice, T. P., Golden, J., Griffith, D., Woodley, W., Rosenfeld, D., Breed, D., Solak, M., and Boe, B., 2014, Extra area effects of cloud seeding - An updated assessment: *Atmospheric Research*, **135–136** (2014) 193–203.
- Dennis, A. S., 1980, *Weather modification by cloud seeding: International Geophysics Series*, **24**, Academic Press, New York.
- Draxler, R. R., and Hess, G. D., 1998, An overview of the Hysplit_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition: *Australian Meteorological Magazine*, **47**, 295–308.
- Draxler, R. R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., and Taylor, A., 2013, HYSPLIT4 USER'S GUIDE, Version 4, file:///C:/Home/Hysplit4/html/index.htm [4/19/2013 9:29:29 AM].
- Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5: Preprints, 6th Annual MM5 Users Workshop, Boulder, CO.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model: *Journal of Atmospheric Sciences*, **46**, 3077–3107.
- Fleming, Z. L., Monks, P. S., and Manning, A. J., 2012, Review: Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition: *Atmospheric*

- Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave: *Journal of Geophysical Research*, **102**(D14), 16663–16682.
- Milly, G. H., Ball, J. T., and Spiegler, D. B., 1969, A numerical experiment on the spatial distribution of cloud seeding nuclei: *Journal of Applied Meteorology*, **8**(1), 83-91.
- Morrison, A., Siems, S., Manton, M., Nazarov, A., Denholm, J., 2007, An Overview of Current Cloud Seeding Research in Australia and an Analysis of the Tasmanian Cloud Seeding Operations from 1964 to 2005 and An Analysis of Cloud Seeding Operations Over Tasmania from 1964 to 2005: *Applied Meteorology and Climate*, **48**, 1267-1280.
- Mosca, S., Graziani, G., Klug, W., Bellasio, R., and Bianconi, R., 1998, A statistical methodology for the evaluation of long-range dispersion models: An application to the ETEX exercise: *Atmospheric Environment*, **32**, 4307–4324, doi:10.1016/S1352-2310(98)00179-4.
- Ngan, F., Stein, A., and Draxler, R., 2015, Inline coupling of WRF–HYSPLIT: Model development and evaluation using tracer experiments: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **54**, 1162–1176, doi:10.1175/JAMC-D-14-0247.1.
- Pielke, R. A., and Uliasz, M., 1998, Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models—limitations and strengths: *Atmospheric Environment*, **32**, 1455–1466, doi:10.1016/S1352-2310(97)00140-4.
- Ruiz, J. J., Saulo, C., and Nogués-Paegle, J., 2010, WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: validation against surface variables: *Monthly Weather Review*, **138**, 3342–3355.
- Rogers, E., Black, T., Ferrier, B., Lin, Y., Parrish, D., and DiMego, G., 2001, Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. NWS Tech. Procedures Bull. 488, 15 pp.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., and Powers, J., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN–475+STR, 19–23 August, American Meteorological Society, Boston, MA, 354–355.
- Janjic, Z. I., 2000, Comments on "Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models": *Journal of Atmospheric Sciences*, **57**, 3686.
- Janjic, Z. I., 2002, Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model: NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.
- Jankov, I., Gallus, W. A., Segal M., Shaw, B., Koch, S. E., 2005, The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall: *Weather Forecasting*, **20**, 1048–1060.
- Jankov, I., Gallus, W. A., Segal, M., Shaw, B., and Koch, S. E., 2007, Influence of initial conditions on the WRF–ARW model QPF response to physical parameterization changes: *Weather Forecasting*, **22**, 501–519.
- Kalnay, E., 2003, *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*: Cambridge, Cambridge University Press, 341 pp.
- Keyes, C. G., Bomar, G. W., DeFelice, T. P., Griffith, D. A., and Langerud, D. W., 2016, *Guidelines for Cloud Seeding to Augment Precipitation, Third Edition*, American Society of Civil Engineering (ASCE) Manuals and Reports on Engineering Practice No. 81. ISBN. 9780784414118.
- Kain, J. S., and Fritsch, J. M., 1990, A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization: *Journal of Atmospheric Sciences*, **47**, 2784–2802.
- Kain, J. S., and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in Emanuel, K. A., and Raymond, D. J., eds., *The representation of cumulus convection in numerical models*: American Meteorology Society, 246 pp.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update: *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 170–181.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model: *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 1065–1092.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**, 851–875.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., and Clough, S. A., 1997,

- WRF multiphysics ensemble: Natural Hazards and Earth System Science, **17**, 563–579.
- Tilley, J. S., David, R., and McDonough, F., 2015, On the utility of HYSPLIT trajectories driven by operational NWP analyses and forecasts for evaluating and forecasting cloud seeding plume pathways and targeting effectiveness: 95th American Meteorological Society Annual Meeting.
- Yorty, D., Weston, W., Solak, M., and Griffith, D., 2012, Low-level atmospheric stability during icing periods in Utah, and implications for winter ground-based cloud seeding: *Journal of Weather Modification*, **44**, 48-68.
- Yorty, D., Weston, W., Solak, M., and Griffith, D., 2013, Low-level stability during winter storms in the UINTA basin of Utah: Potential impacts on ground-based cloud seeding, North American Weather Consultants, David Yorty, Warren Weston: *Journal of Weather Modification*, **45**.
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J., 2010, User's guide for the advanced research WRF (ARW) version 3.2, NCAR (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., and Blestrud, D., 2013a, AgI cloud seeding effects as seen in WRF simulations. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 1433–1457.
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., and Blestrud, D., 2013b, AgI cloud seeding effects as seen in WRF simulations. Part II: 3D real case simulations and sensitivity tests: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 1458–1476.
- Xue, L., Chu, X., Rasmussen, R., Breed, D., Boe, B., and Geerts, B., 2013c, The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain, Part 2: WRF large-eddy simulations versus observations: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1342–1361.
- Schwarzkopf, M. D., and Fels, S. B., 1991, The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computations of infrared cooling rates and fluxes. *J. Geophys. Res.*, **96**, 9075-9096.
- Stein, A. F., Draxler, R., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., and Ngan, F., 2015, NOAA'S HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System: American Meteorological Society.
- Super, A. B., and Reynolds, D. W., 1991, The feasibility of enhancing stream flow in the Sevier River Basin of Utah by seeding winter mountain clouds: Bureau of Reclamation, USDI, Denver Federal Center, Denver, CO.
- Super, A. B., 1999, Summary of the NOAA/Utah atmospheric modification, program: 1990–1998: *Journal of Weather Modification*, **31**, 51–75.
- Super, A. B., and Heimbach, J. A., 2005a, Randomized propane seeding experiment: Wasatch Plateau, Utah: *Journal of Weather Modification*, **37**, 35-66.
- Super, A. B., and Heimbach, J. A., 2005b, Final Report on Utah cloud seeding experimentation using propane during the 2003/04 winter: Utah Division of Water Resources report to Bureau of Reclamation, March, 2005, 114 pp.
- Tessendorf, S. A., Arnold, C., Brintjes, R. T., Axisa, D., Peter, J., Wilson, L., Siems, S., Manton, M., May, P. T., and Stone, R., 2009, A characterization of cloud base aerosol and associated microphysics in southeast Queensland: American Geophysical Union, Fall Meeting 2009.
- Tessendorf, S. A., 2010, Overview of the Queensland cloud seeding research program: *Journal of Weather Modification*, **42**, 33–48.
- Tessendorf, S. A., 2013, Aerosol characteristics observed in southeast Queensland and implications for cloud microphysics: *Journal of Geophysical Research: atmosphere*, **118**, 2858–2871, doi:10.1002/jgrd.50274.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M., and Manning, K., 2004, Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis: *Monthly Weather Review*, **132**, 519–542.
- Tian, J., Liu, J., Yan, D., Li, C., Yu, F., 2017, Numerical rainfall simulation with different spatial and temporal evenness by using a

Determining Target and Control Areas in Operational Cloud Seeding Programs over Iran by Dispersion Simulation of Seeding Materials Using HYSPLIT Model

Mansoureh Seyedhasani¹, Fateme Moradian², Sarmad Ghader^{3*}, Farid Golkar², and Masoud Hatampour⁴

¹M.Sc. in the Environmental Engineering, National Cloud Seeding Research Center, Yazd, Iran

²M. Sc. in the Meteorology, National Cloud Seeding Research Center, Yazd, Iran

³Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴M. Sc., Electronics Engineer, National Cloud Seeding Research Center, Yazd, Iran

(Received: 05 February 2018, Accepted: 19 June 2018)

Summary

Determination of affected area by seeding agents, the so-called target area, is an essential requirement for evaluation of cloud seeding projects. The most conservative and credible estimates of seeding effects were obtained from control matches drawn from outside the operational target within 2 hours of the time that each unit was seeded initially (DeFelice et al., 2014). A coupled modeling system consisting of the mesoscale WRF model and the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT), provides capability to simulate the transportation and dispersion of seeding materials and to characterize target area on the map.

This study is devoted to sensitivity analysis of simulated dispersion patterns to several parameters including different configuration based on physical parameterizations used in WRF model, horizontal and temporal resolution of WRF and spatial resolution of HYSPLIT, to determine the most probable dispersion patterns.

Since temperature and wind parameters are the most important parameters in cloud seeding operations, they are measured instantaneously at 1-second intervals at the flight height of the airplane during each flight and therefore, they are very valuable data to assess the performance of the WRF model in simulating these fields. Hence, at first the WRF model outputs such as temperature and wind are validated by data measured by the airplane. Results indicate that there is an acceptable agreement between field data and WRF outputs that are going to be used as input data for dispersion model.

In this study, eight configurations of the WRF model based on different physical parameterization schemes are used for 34 flights in cloud seeding project in 2015 and HYSPLIT model is run by these types of input data and resulting target area are compared on the map. Then, HYSPLIT model is run for four selected seeding operations according to three temporal and two horizontal resolutions of input data in addition to three spatial resolutions of HYSPLIT model and the transport of seeding plumes is characterized on the geographical map.

The results indicate that dispersion model is sensitive to all mentioned parameters. Also, in most cases, dispersion model results at the flight height of cloud seeding aircraft are significantly influenced by the input data provided by the WRF model. In addition, the dispersion model results are less sensitive to other parameters. Furthermore, when the spatial resolution of the HYSPLIT model is close to the horizontal resolution of the input meteorological data provided by the WRF model, affected area of seeding agents is more integrated and therefore there is a greater degree of certainty in determining the target area.

Keywords: cloud seeding, HYSPLIT model, WRF model, target area, temporal and spatial resolution, physical parameterization

*Corresponding author: