مطالعه موردی اثر گوارد داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی و جوّ بالا بر برون‌داد بارش مدل WRF روی منطقه ایران

مجید آزادی[۱]، محمد رضا صوفیانی*[۲]، غلامعلی وکیلی[۳] و هوشنگ قائمی[۴]

[۱] دانشیار، پژوهشکده هواشناسی و علوم جوّ، تهران، ایران
[۲] کارشناس ارشد، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران
[۳] کارشناس ارشد پژوهشی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جوّ، تهران، ایران
[۴] استاد و مشاور، پژوهشکده هواشناسی و علوم جوّ، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۰۱)

چکیده

مسئله پیش‌بینی عددی وضع هوا یک مسئله مقدار مرزی-اولیه است. بنابراین، پیش‌بینی نیازمند دانستن شرایط اولیه جوّ است که البته باید بهترین برآورد ممکن از حالت جوّ باشد. مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا دارای خطاهایی هستند که بخشی از این خطاها ناشی از عدم قطعیت موجود در شرایط اولیه مدل است. در این مقاله که حاصل یک کار پژوهشی محدود است، تلاش می‌شود تأثیر استفاده از داده‌های دیدبانی سطح زمین و جوّ بالا از طریق فرایند داده‌گواری به منظور برآورد بهتری از شرایط اولیه جوّ و در نتیجه پیش‌بینی نشان داده شود. روش کار به این صورت بوده است که مدل عددی WRF (Weather Research and Forecasting) برای چهار سامانه بارشی برگزیده یک بار با استفاده از داده‌گواری و بار دیگر بدون استفاده از آن اجرا و برون‌داد هر حالت تا ۷۲ ساعت به‌طور متناظر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد داده‌گواری تأثیر مطلوبی بر برون‌داد بارش داشته و پیش‌بینی آن را بهبود داده است. از نظر کیفی و با روش درستی‌سنجی چشمی، الگوی بارش با استفاده از کشانش (nudging) شباهت بیشتری با الگوی بارش واقعی دارد. درستی‌سنجی آماری نیز که با استفاده از شاخص‌های ME و MAE (میانگین خطا و میانگین مطلق خطا) انجام شده است، نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های ME و MAE در حالتی که کشانش به‌کار رفته، به‌ترتیب به‌طور میانگین نسبت به حالت بدون کشانش، ۱۸ و ۱۵ درصد کمتر شده است.

واژگان کلیدی: مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا، داده‌گواری، کشانش، برون‌داد مدل، درستی‌سنجی، شاخص‌های آماری

* نگارنده رابط: mrsoofyani@gmail.com

۱ مقدمه

به‌طور کلی برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی دارای دو نوع خطا هستند، خطاهای سامانمند و ناسامانمند (پیشا)، (برای نمونه وارنر، ۲۰۱۱). خطاهای سامانمند به‌طور عمده مربوط به پارامترسازی نامناسب فرایندهای فیزیکی مدل مانند همرفت و تابش یا اختلاف در داده‌های کوهساری (توپوگرافی) و کاربری سطح زمین در مدل و واقعیت می‌شوند و خطاهای ناسامانمند بیشتر از خطای موجود در شرایط اولیه مدل ناشی می‌شوند. نخستین بار لورنتس (۱۹۶۳) دریافت که انجام تحلیل و تهیه شرایط اولیه با دقت بیشتر می‌تواند پیش‌بینی‌های عددی وضع هوا را تا حد زیادی بهبود بخشد. از آن زمان پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده و روش‌های متنوعی برای تولید شرایط اولیه با دقت بیشتر توسعه داده شده است. در حال حاضر مراکز عملیاتی پیش‌بینی وضع هوا شرایط اولیه لازم برای مدل‌های پیش‌بینی را از طریق تلفیق آماری دیدبانی‌ها و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت تهیه می‌کنند. این رهیافت به «داده‌گواری» موسوم است و هدف از انجام آن توسط تالاگرَند (۱۹۹۷) این‌گونه بیان شده است: «استفاده از همه اطلاعات و داده‌های دردسترس برای تعیین حالت شارش جوّی یا اقیانوسی با بیشترین دقت ممکن».

لیو و همکاران (۲۰۰۵) روش کشانش به سمت دیدبانی‌ها (Observation Nudging) را با اجرای هستهٔ ARW مدلWRF برای پیش‌بینی‌های میان‌مقیاسِ بهبود یافته ارزیابی و ابراز امیدواری کرده‌اند که در آینده روش‌های داده‌گواری توسعه پیدا کند. داوالیو و بوزی (۲۰۰۴) با اجرای مدل همراه داده‌گواری به روش پیوسته برای دو سامانه جوّی بسیار قوی نشان دادند که داده‌گواری علاوه بر بهبود بخشیدن به نتایج کلی پیش‌بینی بارش، بر پیش‌بینی بارش‌های بزرگ‌مقیاس بهتر از بارش‌های همرفتی تأثیر می‌گذارد. در گالوس و برچ (۲۰۰۶) نیز با بررسی بارش مدل WRF برای فصل گرم در آمریکا نشان داده‌اند که پیش‌بینی بارش مدل تابعی است از دینامیک، فیزیک و شرایط اولیه مدل و اثر هرکدام درموقعیت‌های مختلف، متفاوت است.

ویتلی و استنسراد (۲۰۱۰) اثر دیدبانی‌های فشار سطح زمین را روی پیش‌بینی شرایط بد جوّی با استفاده از سامانه همادی صافی کالمن (EnKF) برای مدل WRF بررسی کرده و نشان داده‌اند نتایج پیش‌بینی همادی بعد از داده-گواری برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت فشار سطح زمین به مراتب بهتر شده است. در مطالعه‌های دیگری که استافر و سیمن (۱۹۹۰ و ۱۹۹۴) ، استافر و همکاران (۱۹۹۱) و سیمن و همکاران (۱۹۹۵) انجام داده‌اند، روش واهلش نیوتنی برای کشانش به‌کار برده شده است. تحلیل نتایج همه این مطالعه‌ها نشان می‌دهد که در مقیاس همدیدی روش کشانش بهتر از داده‌گواری به روش متناوب کار می‌کند. همچنین استافر و سیمن (۱۹۹۴) و سیمن و همکاران (۱۹۹۵) نشان داده‌اند که کشانش به سمت دیدبانی در میان‌مقیاس موفق‌تر از کشانش به سمت تحلیل (Analyses Nudging) است. لسلی و همکاران (۱۹۹۸) نیز نشان داده‌اند که تأثیر کشانش به سمت دیدبانی شبیه اثر داده‌گواری همان داده‌ها در یک سامانهٔ وردشی چهاربُعدی (4DVAR) است که اولی کاملاً کاربردی است در حالی که دومی از نظر محاسباتی گران می‌باشد (وارنر، ۲۰۱۱).

در ایران نیز مطالعه‌های محدودی درباره داده‌گواری انواع داده‌های دیدبانی و تأثیر آن روی پیش‌بینی مدل‌ها انجام شده است؛ از جمله صفر و همکاران (۱۳۹۱) که با استفاده از داده‌های رادار برای منطقه تهران اثر فرایند داده‌گواری را روی بارش مطالعه کرده‌اند.

فرایند داده‌گواری به دو صورت «متناوب» و «پیوسته» انجام می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های داده‌گواری متناوب می‌توان به 3DVAR و از مهم‌ترین روش‌های داده‌گواری پیوسته می‌توان به 4DVAR و کشانش اشاره کرد. تفاوت

عمدهٔ این دو گروه از روش‌ها که درواقع به‌عنوان امتیاز روش‌های پیوسته نیز به‌حساب می‌آید در این است که در روش‌های متناوب از اطلاعات موجود در توزیع زمانی دیدبانی‌ها استفاده نمی‌شود، در حالی‌که در روش‌های پیوسته، توزیع زمانی داده‌ها در نظر گرفته می‌شود که خود می‌تواند به بهبود بیشتر نتایج کمک کند. در این مقاله نتایج پژوهشی که در آن داده‌گواری به شکل «پیوسته» انجام شده است، ارائه می‌شود که امید است با ادامهٔ پژوهش‌ها و عملیاتی شدن روش‌ها، در آینده به بهبود نتایج پیش‌بینی منجر شود.

پس از مقدمه در بخش دوم مبانی نظری داده‌گواری به روش کشانش توضیح داده می‌شود. بخش سوم به ارائه روش کار و تحلیل شرایط همدیدی سامانه‌های منتخب اختصاص دارد و نتایج پژوهش نیز در بخش چهارم آورده شده است. در این بخش ابتدا شرایط همدیدی پیش‌بینی شده توسط مدل و سپس درستی‌سنجی نتایج به دو روش مقایسه چشمی و ارزیابی امتیازهای آماری ارائه می‌شود.

۲ داده‌گواری

روش کشانش به سمت دیدبانی‌ها به‌منزله نوعی داده‌گواری پیوسته در مدل‌های میان‌مقیاس برای بهبود پیش‌بینی‌ها به‌کار می‌رود. اساس داده‌گواری بر استفاده از داده‌های سامانهٔ دیدبانی و تحلیل اطلاعات میان‌مقیاس برای بهبود پیش‌بینی است. داده‌گواری به روش واهلش نیوتنی (کشانش) با افزودن جملات غیرفیزیکی کشانش در معادلات پیش‌یابی انجام می‌شود. این کار باعث می‌شود در هر نقطه شبکه‌ای مقدار برون‌داد مدل به دیدبانی‌ها (در کشانش دیدبانی‌ها) نزدیک‌تر شود یا اگر از کشانش تحلیل استفاده می‌کنیم، مقدار برون‌داد مدل به تحلیل دیدبانی‌ها نزدیک‌تر شود. هر چه تفاوت برون‌داد مدل با مقادیر دیدبانی یا تحلیل بیشتر باشد، کشانش تأثیر قوی‌تری خواهد داشت. معادلهٔ زیر نمایی از جملات معادلهٔ پیش‌یابی را نشان می‌دهد (وارنر، ۲۰۱۱):

$$\frac{\partial f}{\partial t} = F(f,x,t) + \frac{f_{\text{obs}} - f}{\tau(f,x,t)} = F(f,x,t) + \mathrm{G}(f)\,\mathrm{W}(x,t)\varepsilon(f,x)(f_{\text{obs}} - f) \quad , \qquad (۱)$$

که f متغیر وابسته، F نشان‌دهندهٔ جملات فرایندهای فیزیکی، f_{obs} مقدار دیدبانی f است که در نقاط شبکه درون‌یابی شده و τ مقیاس زمانی واهلش می‌باشد. وزن جمله واهلش می‌تواند در سه قسمت جداگانه باشد و عامل تعیین‌کنندهٔ ارزش نسبی جمله فیزیکی در معادله، تابع G است. تابع W تأثیر زمانی و مکانی دیدبانی و ε عامل مربوط به کیفیت دیدبانی‌هاست. این معادله برای هر نقطه در یک گام زمانی کاربرد دارد.

کشانش یک روش کاربردی مفید است که با پیشرفت روش‌های دیدبانی و یقین به اینکه وارد کردن داده‌های دیدبانی برون‌داد مدل را به‌طور محسوسی بهبود می‌بخشد، مورد توجه روزافزون قرار گرفته است. این روش داده‌گواری به‌ویژه در آشکارسازی پدیده‌های بزرگ‌مقیاس، پدیده‌های با شدت غیرواقعی را یا پالایش می‌کند یا از شدت آنها می‌کاهد. به‌این‌ترتیب، به‌طور نسبی مقادیر پارامترهای هواشناختی نیز تعدیل می‌شود و نتایج واقعی‌تری از برون‌داد مدل حاصل می‌شود. درواقع، کشانش روشی است برای وادار کردن مدل به سازگاری بیشتر با داده‌های دیدبانی. بنابراین، دیدبانی‌های سطح زمین اعم از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی، کشتی‌ها، متار و سایر موارد در همان گام نخست اجرای مدل تأثیر خود را می‌گذارد و با بهبود شرایط اولیه، نتایج دقیق‌تری به دست خواهد آمد. مهم‌ترین داده‌های دیدبانی که تأثیر زیادی بر کارایی کشانش دارند، داده‌های میدان‌های دما، باد و بخارآب (رطوبت) هستند. روشن است هرچه شبکه دیدبانی متراکم‌تر باشد، کشانش بهتر اثر خواهد کرد و

خطای مدل کمتر خواهد بود.

روش کشانش به سمت دیدبانی مزیت‌های فراوانی دارد: از نظر محاسباتی کارآمد و منسجم است و به مدل امکان پذیرش داده‌ها را به‌صورت پیوسته (نه متناوب) می‌دهد. همچنین با استفاده از داده‌گواری تأثیرات دینامیکی مدل را به شکل کامل‌تری می‌توان لحاظ کرد به گونه‌ای که تمام ویژگی‌های میان‌مقیاس و پدیده‌های محلی و واداشته (مانند ابرهای همرفتی) را نیز شامل شود در حالی که ساختار مدل را بیهوده پیچیده نمی‌کند. البته باید به این نکته توجه کرد که با استفاده از کشانش ممکن است گردش‌هایی در مدل توسعه داده شود که به دلیل اینکه داده‌ها در مقیاس همدیدی هستند، اثر منفی روی این گردش‌ها و در نتیجه برون‌داد مدل گذاشته شود (وارنر، ۲۰۱۱).

۳ مشخصات مدل و روش کار

مدل استفاده شده در این پژوهش WRF-ARW (Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF) (اسکاماروک و همکاران،۲۰۰۵؛ میکالیکس و همکاران ۲۰۰۱) مدلی ناآب‌ایستا (غیرهیدروستاتیک) با مختصات فشاری سیگما (σ) و شبکهٔ جابه‌جا شدهٔ آراکاوا-C است که برای مقاصد کاربردی و پژوهشی طراحی شده است. این مدل در بخش هواشناسی میان‌مقیاس و خردمقیاس (Mesoscale and Microscale Meteorology, MMM) و مرکز ملی پژوهش‌های جوّی آمریکا (NCAR, National Center for Atmospheric Research) توسعه یافته است.

حوزه انتخاب شده دارای تفکیک افقی ۲۱ کیلومتر و در محدودهٔ عرض جغرافیایی ۲۶ تا ۴۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۳۴ تا ۶۴ درجه شرقی و زمان اجرا از شروع مدل به مدت ۷۲ ساعت بوده است. به‌منظور مقایسه و بررسی تأثیر داده‌گواری، مدل یک بار بدون داده‌گواری و بار دیگر با استفاده از داده‌گواری اجرا شده است. شایان گفتن است که انجام داده‌گواری به‌صورت کشانش از امکانات سامانه مدل‌سازی WRF است که در این پژوهش از آن استفاده شده است. شرایط اولیه و مرزی از داده‌های GFS در بازه‌های سه‌ساعته و با تفکیک افقی یک درجه گرفته شده است. طرحواره‌های فیزیکی استفاده شده برای اجرای مدل در جدول ۱ آمده‌اند.

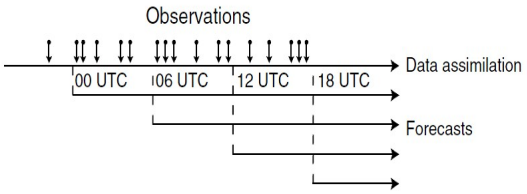
جدول ۱. پیکربندی فیزیک مدل.

نوع طرحواره	نام طرحواره
خُردفیزیک	لین و همکاران
تابش طول موج بلند	آرآرتی‌ام
تابش طول موج کوتاه	گودارد شرت
لایه سطح زمین	مانین – اوباخوف
مدل یکپارچه Noah land-surface	land-surface
لایه مرزی	ملر- یامادا-یانیچ تی کی ای
همرفت	کین-فریش (اتا جدید)

اُساری و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای نشان دادند که مدل WRF در تفکیک‌های مکانی حدود ۲۰ کیلومتر، به حدود ۱۲ ساعت زمان برای تنظیم (spin up) نیاز دارد. منظور از spin up زمانی است که معمولاً طول می‌کشد تا داده‌های برون‌داد مدل پس از آن قابل استفاده شود و به فاصله شبکه‌ای و گام زمانی بستگی دارد. به‌همین منظور و برای به‌دست آوردن پیش‌بینی spin up شده در این پژوهش از روش داده‌گواری پیوسته در چرخهٔ شش‌ساعته (شروع گرم) استفاده کردیم (وارنر، ۲۰۱۱). با توجه به اینکه از شروع عملیات اجرای مدل حدود شش ساعت باید صبر کرد تا برون‌داد مدل تولید شود، بنابراین این روش قابلیت عملیاتی شدن نیز دارد. روش پیوسته در بیشتر سامانه‌های عملیاتی داده‌گواری در دنیا به کار می‌رود. یافته‌ها حاکی از این است که در مقیاس همدیدی روش داده‌گواری پیوسته بهتر از روش داده‌گواری متناوب است. شکل ۱ نمایی از داده‌گواری پیوستهٔ استفاده شده در این

پژوهش را نشان می‌دهد.

ابتدا مدل WRF برای تاریخ‌های چهارم ژانویه، دوم فوریه، بیستم نوامبر و بیست‌وسوم نوامبر ۲۰۱۴ به مدت ۷۲ ساعت اجرا و الگوهای بارندگی ترسیم شد. سپس داده‌های دیدبانی همدیدی سطح زمین و ترازهای بالا (رادیوگمانه) را که کنترل کیفی شده‌اند برای تاریخ‌های مورد نظر در شروع هر اجرا به مدت ۶ ساعت در اختیار مدل قرار داده و مدل را اجرا کردیم. درنهایت برون‌داد مدل WRF رسم شده است. شایان گفتن است اگر داده‌های دیدبانی کنترل کیفیت نشده و داده‌های خارج از محدوده استاندارد هر پارامتر از فایل مورد نظر خارج نشده باشند، اجرای مدل به مشکل برخورد می‌کند.

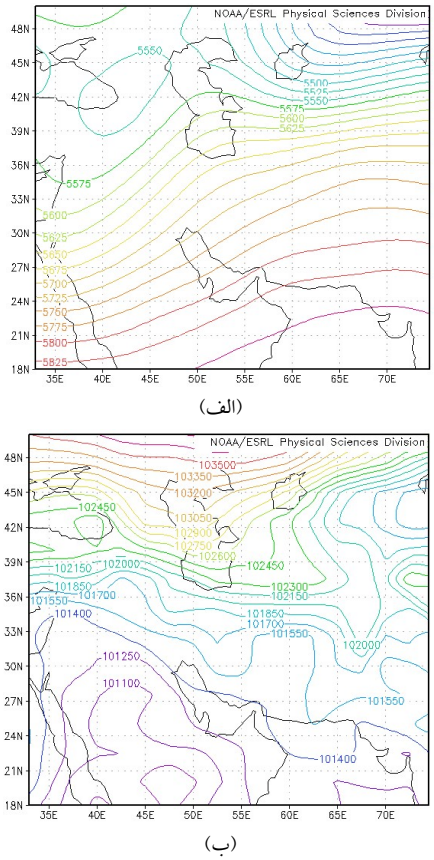


شکل ۱. نمایی از فرایند داده‌گواری پیوسته، پیکان‌های قائم نشان‌دهنده زمان انجام داده‌گواری برای دیدبانی‌های دردسترس و پیکان‌های افقی نشان‌دهنده انتگرال‌گیری مدل است (وارنر، ۲۰۱۱).

به‌منظور مقایسه چشمی الگوهای بارش ۲۴ ساعته برون‌داد مدل در دو حالت اجرای مرجع و اجرای در حالت کشانش به سمت دیدبانی‌ها، باید الگوی بارش ۲۴ ساعته برای هر تاریخ را به‌عنوان الگوی مرجع ترسیم کنیم. همچنین با استفاده از داده‌های بارش ۲۴ ساعته گزارش شده در ایستگاه‌های همدیدی کشور الگوی بارش ۲۴ ساعته را رسم می‌کنیم. در ادامه برای نمونه سامانهٔ تاریخ بیست‌وسوم نوامبر ۲۰۱۴ را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

- **تحلیل همدیدی**

برای تحلیل همدیدی باید مجموعه نقشه‌های همدیدی سطح زمین و ترازهای بالاتر را به‌طور دقیق بررسی کنیم. برای نمونه، تصویر میانگین روزانه دو مورد از این نقشه‌ها برای روز ۲۴ نوامبر ۲۰۱۴ در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب ارائه شده که یکی مربوط به ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و دیگری فشار سطح زمین است. در تاریخ ۲۳ نوامبر ۲۰۱۴ در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، محور یک جریان جتی روی جنوب غرب ایران قرار دارد که سرعت باد در مرکز آن ۱۳۰ نات است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ناوهٔ عمیقی روی شمال روسیه دیده می‌شود که محور اصلی آن تا دریای سرخ ادامه دارد و محور ضعیف‌تر دیگری از آن روی نوار غربی ایران کشیده شده است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز مانند تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، کم‌ارتفاع عمیقی روی شمال روسیه قرار دارد که محور آن تا نیمه شمالی ایران را دربرمی‌گیرد.



شکل ۲. نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب ژئوپتانسیل‌متر (الف) و فشار سطح زمین برحسب پاسکال (ب) برای روز ۲٤ نوامبر ۲۰۱٤.

بنابراین مناطق شمالی، دامنه‌های البرز و نیمهٔ غربی ایران تحت تأثیر این کم‌ارتفاع قرار دارند. در نقشهٔ سطح زمین نواحی شمالی تحت تأثیر سامانهٔ پرفشار و نوار غربی متأثر از ناوهٔ کم‌فشار موجود در مرکز ایران است. بنابراین در این روز در سواحل دریای خزر و مناطقی از غرب و جنوب غرب ابرناکی و بارندگی و وزش باد و در مناطق جنوبی بارش پراکنده پیش‌بینی می‌شود.

در بیست‌وچهارم نوامبر ۲۰۱۴ محور جت که سرعت باد در مرکز آن ۱۲۰ نات است در نیمهٔ جنوبی ایران قرار دارد و در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نواحی شمالی و نوار غربی ایران تحت تأثیر ناوه‌ای است که روی کشور ترکیه و دریای سیاه قرار دارد. همچنین در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال کم‌ارتفاع موجود در روز قبل کمی جلوتر آمده و غرب ایران را تحت پوشش خود قرارداده است. در الگوی سطح زمین نیز نواحی شمالی تحت تأثیر ناوهٔ پرفشار روی روسیه و مناطقی از غرب و جنوب غرب ایران متأثر از ناوهٔ کم‌فشار روی کشور عربستان است. مناطق جنوبی ایران نیز تحت تأثیر کم‌فشار مستقر بر جنوب شرق کشور است. بنابراین در روز دوم در سواحل غربی دریای خزر ابرناکی، بارندگی و وزش باد و در مناطقی از غرب، جنوب غرب و جنوب بارش پراکنده پیش‌بینی می‌شود. در تاریخ ۲۵ نوامبر ۲۰۱۴ همچنان محور جت با سرعت باد ۱۲۰ نات در جنوب ایران قرار دارد و در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نواحی شمالی و نوار غربی ایران تحت تأثیر ناوهٔ موجود روی دریای مدیترانه است. همچنین در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال سامانهٔ کم‌ارتفاع موجود در غرب ایران، نوار غربی و به‌ویژه جنوب غرب و نواحی جنوبی ایران را تحت تأثیر خود قرار داده است. در الگوی سطح زمین نواحی شمالی تحت نفوذ ناوهٔ پرفشار واقع بر کشور روسیه و مناطقی از غرب و جنوب غرب و مناطق جنوبی ایران متأثر از ناوهٔ کم‌فشاری است که روی کشور عربستان قرار دارد. بنابراین در روز سوم در سواحل غربی دریای خزر و جنوب غرب و مناطقی از جنوب کشور ابرناکی، بارندگی و وزش باد و در مناطقی از غرب کشور بارش پراکنده دور از انتظار نبوده است.

۴ نتیجه‌گیری

- تحلیل همدیدی برون‌داد مدل

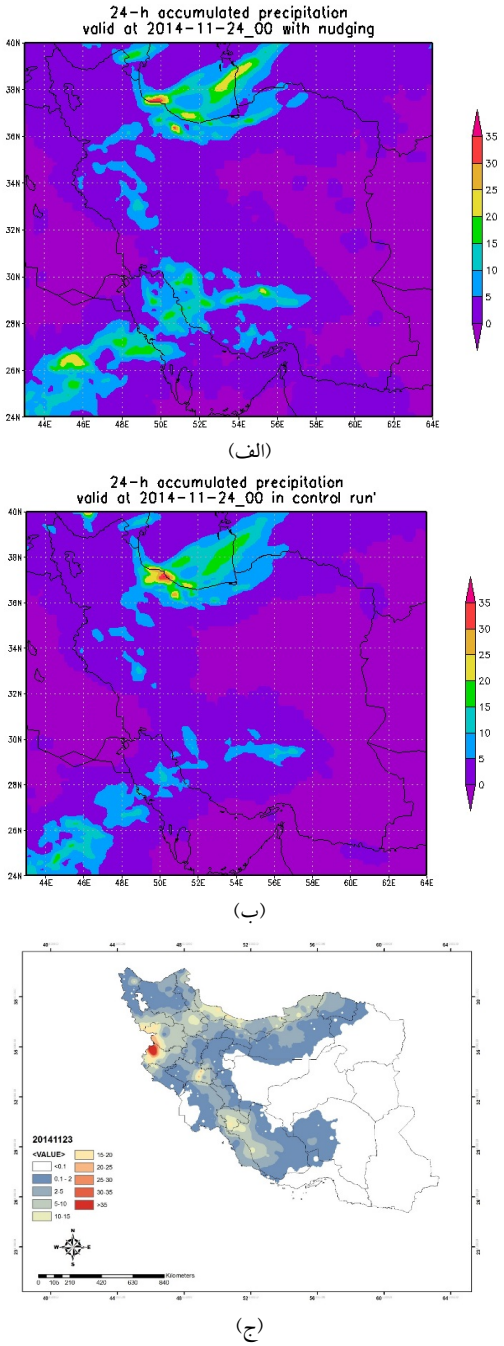
از دیدگاه تحلیل همدیدی، طبق بررسی‌های انجام شده روی برون‌داد مدل پیش و پس از کاربست کشانش، تفاوت آشکاری بین الگوهای همدیدی در ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال و نیز سطح زمین مشاهده نمی‌شود و این الگوها مشابه هم هستند.

- درستی‌سنجی آماری نتایج

در این پژوهش فرایند درستی‌سنجی به دو روش مقایسهٔ چشمی و مقایسه امتیازهای آماری سنجه‌های میانگین خطا (ME, Mean Error) و میانگین مطلق خطا (MAE, Mean Absolute Error) انجام شده است.

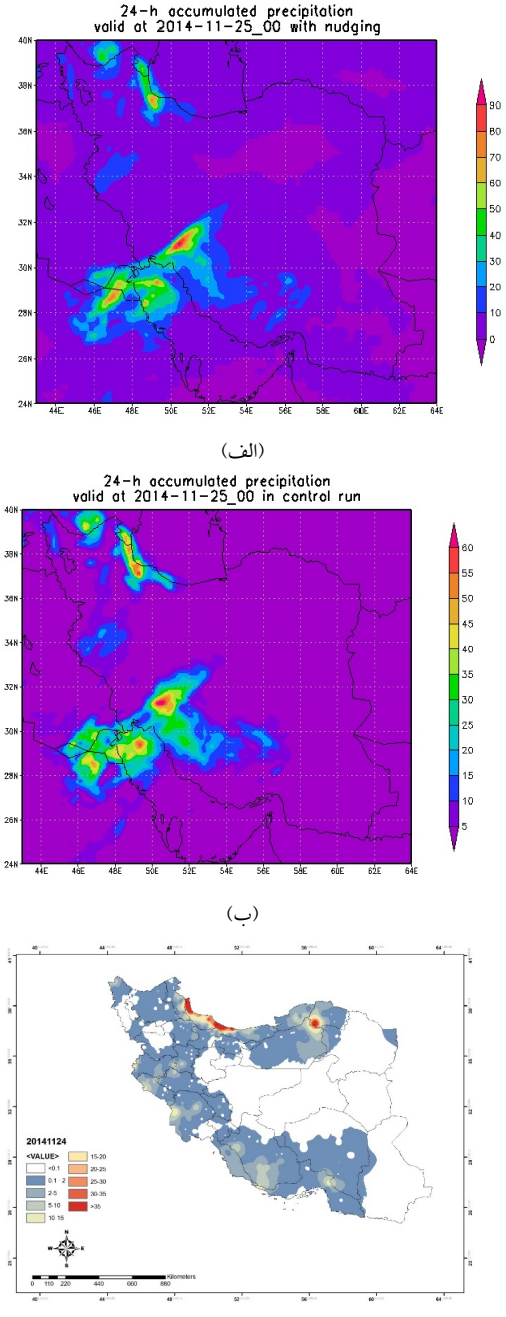
۴-۱ مقایسه چشمی

همان‌طور که از الگوهای ترسیم شده برای دیدبانی و اجرای مدل در دو حالت با و بدون کشانش دیده می‌شود (شکل‌های ۳ تا ۵)، برای روز ۲۳ نوامبر ۲۰۱۴ در الگوی ترسیم شده از دیدبانی‌ها، هسته بارش روی استان کرمانشاه با بیش از ۳۵ میلی‌متر و روی استان‌های گیلان و کهگیلویه‌وبویراحمد با بیش از ۱۵ میلی‌متر دیده می‌شود در حالی‌که نقشه ترسیم شده از برونداد مدل WRF تا پیش از کاربست کشانش، تنها هسته بارش را روی گیلان با بیش از ۳۵ میلی‌متر بارش نشان می‌دهد. اما پس از کاربست کشانش هم روی گیلان و هم روی کهگیلویه‌وبویراحمد بارش‌ها بسیار نزدیک‌تر به مقادیر دیدبانی (بیش از ۳۵ میلی‌متر برای گیلان و بیش از ۱۵ میلی‌متر برای کهگیلویه‌وبویراحمد) پیش‌بینی شده است.

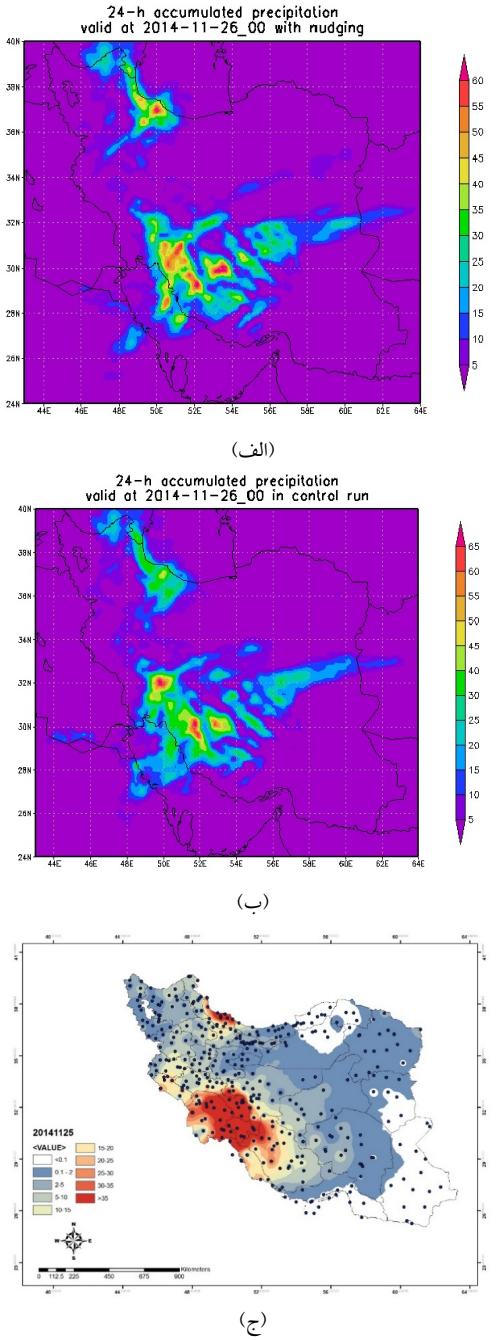


شکل ۳. بارش ۲٤ ساعته مدل WRF با استفاده از کشانش (الف)، بدون کشانش (ب) و بارش واقعی (ج) در روز ۲۳ نوامبر ۲۰۱٤.

برای روز ۲۴ نوامبر ۲۰۱۴ در الگوی ترسیمی از داده‌های دیدبانی، هسته‌های بارش روی سواحل غربی دریای خزر و استان خراسان شمالی با بیش از ۳۵ میلی‌متر و روی استان‌های خوزستان و فارس با بیش از ۱۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود. برونداد مدل WRF برای همین روز، هسته‌های بارش را روی سواحل غربی دریای خزر بیش از ۵۵ میلی‌متر، روی استان فارس بیش از ۳۰ میلی‌متر و روی کهگیلویه‌وبویراحمد بیش از ۵۵ میلی‌متر به دست داده



شکل ٤. بارش ۲٤ ساعته مدل WRF با استفاده از کشانش (الف)، بدون کشانش (ب) و بارش واقعی (ج) در روز ۲٤ نوامبر ۲۰۱٤.



شکل ۵. بارش ۲۴ ساعته مدل WRF با استفاده از کشانش (الف)، بدون کشانش (ب) و بارش واقعی همراه با پراکندگی ایستگاه‌های همدیدی کشور (ج) در روز ۲۵ نوامبر ۲۰۱۴.

است. با کاربست روش کشانش مقدار بارش در سواحل غربی دریای خزر مشابه برونداد مدل WRF اما برای استان فارس بیش از ۲۰ میلی‌متر و برای کهگیلویه‌وبویراحمد بیش از ۸۰ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. همین‌طور در روز ۲۵ نوامبر ۲۰۱۴ در الگوی بارشی حاصل از مقادیر دیدبانی، هسته‌های بارش روی استان‌های گیلان، خوزستان، کهگیلویه‌وبویراحمد و چهارمحال‌وبختیاری بیش از ۳۵ میلی‌متر و در الگوی ترسیمی از اجرای WRF، هسته‌های بارش روی استان‌های فارس و چهارمحال‌وبختیاری با بیش از ۶۰ میلی‌متر دیده می‌شود. با کاربست کشانش هسته‌های بارش روی استان‌های گیلان، کهگیلویه‌وبویراحمد و فارس با بیش از ۵۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. بنابراین به‌طور کلی دیده می‌شود که پراکندگی و مقادیر بارش پس از کاربست روش کشانش، تطابق بیشتری با دیدبانی‌ها پیدا می‌کند.

۴-۲ ارزیابی امتیازها

با استفاده از امتیازهای آماری میانگین خطا (ME) و میانگین مطلق خطا (MAE) مقادیر دقت برون‌داد بارش مدل در دو حالت مذکور مقایسه شده‌اند. میانگین‌های به دست آمده برای خطاها با میانگین‌گیری خطا روی تمام ایستگاه‌های همدیدی هواشناسی کشور به‌دست آمده است. میانگین این امتیازها برای چهار سامانهٔ مورد مطالعه در تاریخ‌هایی که پیشتر گفته شد، در جدول ۲ آورده شده است. سطر آخر این جدول برحسب درصد و بقیه اعداد نشان‌دهنده میانگین خطا (ME و MAE) و برحسب میلی‌متر است. به‌طور کلی همان‌گونه که انتظار می‌رفت و نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد اعمال روش‌های داده‌گواری بیشترین تأثیر را روی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت (۲۴ و ۴۸ ساعته) دارد و بعد از آن به‌تدریج اثر داده‌گواری روی بهبود نتایج کم می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود مقادیر ME و MAE برای برون‌داد مدل در حالت اجرای کشانش به سمت دیدبانی‌ها کمتر از حالت اجرای مرجع شده است. مقدار کاهش میانگین خطا با استفاده از کشانش به سمت دیدبانی‌ها برای روزهای اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۵، ۳۴

جدول ۲. مقایسه میانگین امتیازهای آماری میانگین خطا و میانگین مطلق خطای بارش برحسب میلیمتر و درصد کاهش خطا برای چهار سامانه مورد مطالعه.

	میانگین خطا (ME)			میانگین مطلق خطا (MAE)		
	روز اول	روز دوم	روز سوم	روز اول	روز دوم	روز سوم
WRF	۱/٤۹	٤/۷۱	۲/٤۲	٤/۱۷	٦/۷٥	۱۰/٥۲
WRF & Nudging	۱/۲۷	۳/۰۷	۲/۲۷	۳/٦٤	٥/۰٦	۹/۷۰
درصد کاهش خطا	۱٥	۳٤	٦	۱۲	۲٥	۸

و ۶ درصد شده است. همچنین مقدار میانگین مطلق خطا با کاربرد این روش در روزهای اول تا سوم به‌ترتیب ۱۲، ۲۵ و ۸ درصد کاهش داشته است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با استفاده از داده‌گواری به روش کشانش به سمت دیدبانی‌ها، به طور کلی خطاهای ناشی از شرایط اولیه مدل تا حد زیادی کاهش یابد.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به مطالعه موردی اثر کاربست یکی از روش‌های داده‌گواری پیوسته موسوم به «کشانش به سمت دیدبانی‌ها» بر بهبود برون‌داد داده‌های بارش سامانه مدل-سازی WRF پرداخته شده است. کارایی و دقت روش با استفاده از مقایسه امتیازهای آماری میانگین خطا و میانگین مطلق خطا روی برون‌داد مقادیر بارش حاصل از مدل در دو حالت با و بدون کشانش با مقادیر متناظر بارش تمام ایستگاه‌های همدیدی هواشناسی کشور به‌دست آمده است. با تحلیل نتایج، کاربست این روش تا حد قابل قبولی در بهبود نتایج موفق نشان می‌دهد؛ به‌ویژه اینکه کاربست این روش داده‌گواری بیشترین بهبود را روی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت (۲۴ و ۴۸ ساعته) دارد و بعد از آن به تدریج اثر داده‌گواری روی بهبود نتایج کم می‌شود. شایان گفتن است با اینکه سایر پژوهش‌ها معمولاً اثر بهبود داده‌گواری را تا ۲۴ ساعت نشان می‌دهند(گاویناداکاتی و چانراسکار،۲۰۱۱ و اسریناس و همکاران ،۲۰۱۲) امادر پژوهش حاضر، در هر چهار مورد مطالعه شده، اثرات بهبود آن روی نتایج تا ۴۸ ساعت دیده می‌شود که این موضوع اهمیت زیادی در بخش مدیریت منابع آب دارد و مزیتی برای عملیاتی شدن آن در مراکز پیش‌بینی به شمار می‌رود. از طرفی با توجه به اینکه کاربست کشانش روی پیش‌بینی بارشِ سامانه‌های کلاسیک انجام شده است، احتمالاً می‌تواند روی بهبود پیش‌بینی سایر کمیت‌های هواشناختی مانند دما، رطوبت و باد نیز تأثیرگذار باشد و موضوعی قابل بررسی است.

منابع

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

Davalio, S., and Buzzi, A., 2004, A nudging scheme for assimilation of precipitation data into a mesoscale model: Wea. Forecasting, **19**, 855–871.

Gallus Jr., W. A., and Bresch, J. F., 2006, Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts: Mon. Wea. Rev., **134**, 2632–2641.

Liu, Y., and co-authors, 2005, Implementation of observation-nudging based FDDA into WRF for supporting ATEC test operations: 2005

Stauffer, D. R., and Seaman, N. L., 1994, Multi-scale four dimensional data assimilation: J. Appl. Meteor., **33**, 416–434.

Stauffer, D. R., Seaman, N. L., and Binkowski, F. S., 1991, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model, Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer: Mon. Wea. Rev., **119**, 734–754.

Talagrand, O., 1997, Assimilation of observations, an introduction: J. Met. Soc. Japan Special Issue, **75,** 1B, 191–209.

Warner, T. T., 2011, Numerical Weather and Climate Prediction: Cambridge University Press, Cambridge, 550 pp.

Wheatley, D., and Stensrud, D., 2010, The impact of assimilating surface pressure observations on severe weather events in a WRF mesoscale system: Mon. Wea. Rev., **138**, 1673–1694.

Govindankutty, M., and Chandrasekar, A., 2011, Impact of assimilation of ATOVS temperature and humidity and SSM/I total precipitable water on the simulation of monsoon depression: Natural Hazards, **59**(3), 1647–1669.

Srinivas, C. V., Yesubabu, V., Hari Prasad, K. B. R. R., Venkatraman, B., and Ramakrishna, S. V. S., 2012, Numerical simulation of cyclonic storms FANOOS NARGIS with assimilation of conventional and satellite observations using 3-DVAR: Natural Hazards, **63**(2), 867–889.

WRF Users Workshop, Boulder, Colorado, June 2005.

Lorenz, E. N., 1963, The mechanics of vacillation: J. Atmos. Sci., **20**, 448–465.

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., and Skamarock, W., 2001, Development of a next generation regional weather research and forecast model; Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, 269–276.

Osuri, K. K., Mohanty, U. C., Routray, A., Mohapatra, M., and Niyogi, D., 2013, Real-time track prediction of tropical cyclones over the North Indian Ocean using the ARW model: J. Appl. Meteor. Climatol., **52**, 2476–2492, doi:10.1175/JAMC-D-12-0313.1.

Seaman, N. L, Stauffer, D. R., and Lario-Gibbs, A. M., 1995, A multi-scale four-dimensional data assimilation system applied in the San Joaquin Valley during SARMAP, Part I: Modeling design and basic performance characteristics: *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1739–1761.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G., 2005, A description of the Advanced Research WRF. Version 2: NCAR Tech. Note NCAR/TN-4681STR, 94 pp.

Stauffer, D. R., and Seaman, N. L., 1990, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model, Part I: Experiments with synoptic-scale data: Mon. Wea. Rev., **118**, 1250–1277.