پس‌پردازش برونداد مدل WRF برای تندی باد در تراز ده متری و دمای هوا در تراز دو متری با استفاده از روش پالایه کالمن غیرخطی

زهراء راستگو[1*]، مجید آزادی[2]، سهراب حجام[3]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

نویسنده مسئول مکاتبات: زهراء راستگو، بوشهر- خیابان شهید فکوری- مرکز تحقیقات اقلیمی و هواشناسی کاربردی استان

۲. استادیار پژوهش‌کده‌ی هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳.دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

Archive of SID

چکیده

در این پژوهش با استفاده از فرایند جدید " پالایه کالمن غیرخطی" مطابق الگوریتم ارائه شده توسط گالانیس (۲۰۰۶)، برونداد مستقیم مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا موسوم بهWRF در بازه‌های مختلف زمانی، ابتدا برای تندی باد در ارتفاع ده متری سطح زمین و سپس جهت ارزیابی کاربرد این روش و مقایسه نتایج، برای دمای هوا در ارتفاع دو متری سطح زمین در ۸ ایستگاه هواشناسی همدیدی استان بوشهر، مورد پس‌پردازش قرار گرفته است. کاربرد چند جمله‌ای‌هایی با مرتبه‌های مختلف (مرتبه ۱ تا ۱۰) به منظور استخراج مرتبه بهینه بر اساس بهترین عملکرد پالایه در بهبود پیش‌بینی مدل WRF برای تندی باد و دما در همه ایستگاه‌ها و در هر یک از بازه‌های پیش‌بینی آزمایش شدند. سپس نتایج به دست آمده برای همه ایستگاه‌ها در ساعت‌ها و بازه‌های مختلف پیش‌بینی با هم تلفیق و تحلیل‌های آماری بر روی این داده‌ها صورت گرفت.

نتایج نشان داد که جهت به دست آوردن پیش‌بینی‌های پالاییده، برای تندی باد - کمیتی با رفتار غیرخطی یا ناپیوسته - مدت آموزش بیشتری نسبت به دما که رفتاری خطی یا پیوسته دارد، باید در نظر گرفته شود. برای هر دو پارامتر تندی باد و دما، پس از اعمال پالایه میانگین خطاها به صفر یا نزدیک به صفر رسیدند که این نشان می‌دهد پالایه کالمن غیرخطی، خطای سامانمند مدل را تقریباً حذف کرده به طوری که خطاها به صورت تصادفی حول صفر توزیع شده‌اند. همچنین نتایج دلالت بر این دارند که جهت تصحیح پیش‌بینی مدل برای پارامتر تندی باد، چند جمله‌ای از مرتبه ۱ تا ۴ و برای پارامتر دما، چند جمله‌ای از مرتبه ۱ تا ۵ انتخاب مناسبی در همه بازه‌های پیش‌بینی است و هرگونه تلاش برای استفاده از مرتبه‌های بالاتر چند جمله‌ای، عملکرد کلّی پالایه را از مقادیر بهینه‌اش منحرف می‌کند.

کلید واژه ها: پالایه کالمن، پیش‌بینی عددی وضع هوا، پس‌پردازش، مدل WRF.

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۷-۴۴۸۷۸۹۲

Email: zhr_rastgoo@yahoo.com

www.SID.ir

مقدمه

مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP)[1] معمولاً در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی به ویژه پارامترهای نزدیک سطح زمین خطاهایی سامانمند را نشان می‌دهند. افزون بر این، این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی صریح برخی پدیده‌ها مانند احتمال وقوع رعد و برق و یا میزان دید نمی‌باشند.

عواملی همچون نقص در پراسنجی فرایندهای فیزیکی مختلف در مدل و عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی موفق پدیده‌های زیر شبکه‌ای به ایجاد خطای کلّی (شامل خطای سامانمند) در برونداد مدل منجر می‌شود. همچنین نادرستی‌هایی که در پیش‌بینی‌های مدل‌های NWP وجود دارد، ممکن است به علّت خطاهایی باشد که در تعیین شرایط اولیه و جانبی ایجاد می‌شود (گالانیس[2] و همکاران، ۲۰۰۶).

به منظور کاهش خطای سامانمند و بهبود نتایج مدل و همچنین کاربردی نمودن مدل‌ها، با کاربست روش‌های مختلف آماری و با ترکیب پیش‌بینی‌های مدل و دیدبانی‌های متناظر، برونداد مدل را پس‌پردازش می‌کنند، به گونه‌ای که پیش‌بینی‌ها به مقادیر دیدبانی متناظر به‌صورت نقطه‌ای نزدیک‌تر باشد. از میان روش‌های متداول پس‌پردازش می‌توان به روش آماره برونداد مدل (MOS)[3]، روش پیش‌یابی کامل (PPM)[4] و پالایه کالمن[5] اشاره کرد. روش MOS (گلان و لاری[6]، ۱۹۷۲) نوعی برازش خطی چند متغیره است که در آن رابطه بین دیدبانی و برونداد مدل به صورت خطی فرض ضرایب مربوطه محاسبه می‌شود. در این روش دیدبانی، پیش‌بینی‌شونده و پیش‌بینی مدل، پیش‌بینی‌کننده است. روش PPM (کلین[7] و همکاران، ۱۹۵۹) نیز مشابه روش MOS است با این تفاوت که دیدبانی‌ها یا داده‌های تحلیل شده پیش‌بینی‌کننده هستند و پیش‌بینی‌شونده‌ها نیز همان دیدبانی‌ها می‌باشند. محدودیت اصلی این دو روش لزوم دسترسی به داده‌های طولانی مدت است که همیشه در دسترس نیست. از میان روش‌هایی که نیاز به داده‌های طولانی مدت ندارند، پالایه کالمن (پریستلی[8]، ۱۹۸۱؛ گِلب[9]، ۱۹۷۴؛ کالمن و باسی[10]، ۱۹۶۱؛ کالمن، ۱۹۶۰) یکی از روش‌های متداول و موفق برای مسئله پس‌پردازش است. در این روش، مقدار پارامتر مورد نظر در گام اول پیش‌بینی و سپس تصحیح می‌شود. در عمل در پالایه کالمن دیدبانی‌ها بطور بازگشتی، با استفاده از ضریب‌های وزنی (که میانگین خطاهای پیش‌بینی را کمینه می‌کند) با پیش بینی‌های جدید ترکیب می‌شوند (گالانیس و همکاران، ۲۰۰۶).

یک تاریخچه طولانی از کاربرد موفقیت‌آمیز پالایه کالمن برای دمای هوا وجود دارد (کروشت[11]، ۲۰۰۴؛ گالانیس و آنادرانیستاکیس[12]، ۲۰۰۲؛ هملید[13]، ۱۹۹۵؛ آزادی و همکاران، ۱۳۸۵؛ فرجاد، ۱۳۸۸). اما کاربردشان روی پارامترهای هواشناسی با رفتار غیرخطی یا ناپیوسته (مثل تندی باد)، محدود بوده است. گالانیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ با ارائه یک روش غیرخطی تا حد زیادی این محدودیت را برطرف نمودند. آن‌ها از این روش برای تلفیق توابع چند جمله‌ای غیرخطی در یک الگوریتم پالایه

[1] Numerical Weather Prediction
[2]. Galanis
[3]. Model Output Statistics
[4]. Perfect Prognostic Method
[5]. Kalman Filter
[6]. Glahn and Lawry
[7]. Klein
[8]. Priestley
9. Gelb
[10]. Kalman and Bucy
[11]. Crochet
[12]. Anadranistakis
[13]. Homleid

Archive of SID

www.SID.ir

کالمن کلاسیک استفاده نمودند. روشی که در این پژوهش نیز ارائه شده، براساس تصحیح غیرخطی میانگین خطای پیش‌بینی (Bias) با استفاده از پالایه کالمن، مبتنی بر کار گالانیس و همکاران (۲۰۰۶) می‌باشد که به "پالایه کالمن غیرخطی" موسوم است.

تشریح فرایند پالایه کالمن غیرخطی

هدف اصلی، شبیه‌سازی یک فرایند نامعلوم (بردار حالت) با زمان است که مقدار معلوم آن در زمان t_i در این مقاله با $x^t(t_i)$ مشخص شده است. y_i^O نیز به عنوان بردار دیدبانی در همان زمان به کار برده شده است. معادله‌های سیستم و دیدبانی که به ترتیب نشان‌دهنده تحول زمانی بردار حالت و ارتباط بردار حالت با دیدبانی متناظر می‌باشد، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$x^t(t_{i+1}) = M_i[x^t(t_i)] + \eta(t_i) \quad (۱)$$

$$y_i^O = H_i[x^t(t_i)] + \varepsilon_i \quad (۲)$$

ماتریس‌های M_i (عملگر معادله سیستم) و H_i (عملگر معادله دیدبانی) باید قبل از اعمال پالایه تعیین شوند. (گالانیس و همکاران، ۲۰۰۶).

پالایه کالمن یک روش بازگشتی برای برآورد بردار حالت نامعلوم X_t بر مبنای همه مقادیر دیدبانی تا زمان t_i می‌باشد. درگام اول، پیش‌بینی بردار حالت X و ماتریس کواریانس خطای آن یعنی ماتریس p، بر اساس مقادیر تحلیلی در گام زمانی t_{i-1} توسط معادلات پیش‌بینی محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} x^f(t_i) &= M_{i-1}[x^a(t_{i-1})] \ ; \\ p^f(t_i) &= M_{i-1} p^a(t_{i-1}) M_{i-1}^T + Q(t_{i-1}) \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آنها ماتریس Q، ماتریس کواریانس خطای فرایند $\eta(t_i)$ می‌باشد. در گام بعدی، وقتی دیدبانی جدید در زمان t_i یعنی y_i^O انجام می‌شود، می‌توان برآورد جدید بردار حالت یعنی $x^a(t_i)$ را با ترکیب اطلاعات قبلی از طریق "معادلات تصحیح‌کننده" زیر به‌روز کرد:

$$\begin{aligned} x^a(t_i) &= x^f(t_i) + K_i(y_i^o - H_i[x^f(t_i)]) ; \\ p^a(t_i) &= (I - K_i H_i) p^f(t_i) \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن‌ها ماتریس بهره کالمن، K_i با رابطه زیر داده می‌شود:

$$K_i = p^f(t_i) H_i^T [H_i p^f(t_i) H_i^T + R_i]^{-1} \quad (۵)$$

در معادله‌های فوق، ماتریس R_i، ماتریس کواریانس خطای اندازه‌گیری (ε_i) و $p^a(t_i)$ کواریانس خطای $x^a(t_i)$ در زمان t_i می‌باشد. بهره کالمن تنظیم می‌کند که پالایه چگونه خودش را با شرایط جدید و ممکن سازگار کند. از معادلات (۱) تا (۵) برای به‌روزرسانی الگوریتم کالمن از زمان t_{i-1} به t_i استفاده می‌شود. در روابط بعدی، m_i برونداد مستقیم مدل در زمان t_i است که به یک پارامتر هواسنجی مثل دما یا تندی باد برمی‌گردد و ما آن را در هر حالتی برآورد می‌کنیم. همچنین فرض می‌شود y_i^O خطای پیش‌بینی باشد که به صورت چند جمله‌ای از m_i تعریف می‌شود:

$$y_i^O = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot m_i + a_{2,i} \cdot m_i^2 + \cdots + a_{n-1,i} m_i^{n-1} + \varepsilon_i \quad (۶)$$

ضرایب $(a_{j,i}), j = 0,1,\cdots,n-1$ پارامترهایی هستند که باید به وسیله پالایه برآورد شوند و ε_i خطای غیر سامانمند و دارای تابع گوسی مربوط به فرآیند قبلی است. به این نکته نیز باید توجه کنیم که اگر چه y_i^O و ε_iدر معادله (۲) بردار هستند ولی در معادله (۶)، اسکالر هستند (گالانیس و همکاران، ۲۰۰۶).

در روابط بالا، $X(t_i)=[a_{o,i} \ \ a_{1,i} \ \ a_{2,i} \ \cdots \ a_{n-1,i}]^T$ بردار حالت، ماتریس دیدبانی $H_i = [1 \ \ m_i \ \ m_i^2 \ \ \ldots \ \ m_i^{n-1}]$ و

Archive of SID

www.SID.ir

ماتریس سیستم یعنی M_i نیز ماتریس همانی I_n می‌باشد. بنابراین معادله‌های دیدبانی و سیستم به شکل زیر درمی-آیند:

$$y_i^O = H_i[x^t(t_i)] + \varepsilon_i \qquad (۷)$$

$$x^t(t_{i+1}) = x^t(t_i) + \eta(t_i)$$

این برآورد شاید یک شکل خطی، با انتخاب مرتبه $n=2$ یا یک چندجمله‌ای با مرتبه‌ی دلخواه باشد (گالانیس و همکاران، ۲۰۰۶). به این ترتیب با بکارگیری این الگوریتم فرایند غیرخطی پالایه را مطالعه و در مقاله حاضر با استفاده از این الگوریتم، پیش‌بینی عددی تندی باد را که رفتار غیرخطی دارد، همچنین پیش‌بینی عددی دما (که رفتاری پیوسته دارد) را بررسی می‌کنیم. ماتریس‌های کواریانس $Q(t_i)$ و $R(t_i)$ به طور مشخص‌تری در بخش بعدی تعریف شده‌اند.

روش انجام کار

ابتدا مدل WRF با تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر برای یک دوره تقریبا نه ماهه (۱۵ اکتبر ۲۰۰۸ تا ۵ ژوییه ۲۰۰۹)، برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های ۵ روزه اجرا شد. شروع اجرا از 1200 UTC (۱۵:۳۰ به وقت محلی) هر روز و پایان اجرا ۵ روز بعد در ساعت 1200 UTC به مدت ۱۲۰ ساعت بود.

در مرحله بعد، پیش‌بینی مدل برای ۸ ایستگاه[1] در استان بوشهر هر ۶ ساعت یک بار محاسبه شد و پیش‌بینی تندی باد ده متری و دمای دو متری با کمک این بروندادها در ساعت‌های مختلف (0000, 0600, 1200, 1800 UTC[2]) و در بازه‌های مختلف (۶، ۱۲، ۱۸، ... و ۱۲۰ ساعته) به دست آمد. داده‌های دیدبانی دما و تندی باد متناظر با پیش‌بینی مدل، نیز از طریق مراجعه به اطلاعات دیدبانی ثبت شده در این ایستگاه‌ها در فاصله زمانی ۱۵ اکتبر ۲۰۰۸ تا ۵ جولای ۲۰۰۹ جمع آوری گردید. آنگاه برنامه کامپیوتری پالایه کالمن غیرخطی که الگوریتم آن را در بالا شرح دادیم، نوشته شد. سپس داده‌های مربوط به برونداد مدل و همچنین دیدبانی متناظر در این برنامه جایگذاری و برنامه به تفکیک ایستگاه‌ها، ساعت‌ها و بازه‌های مختلف پیش‌بینی اجرا گردید. از آنجا که اطلاعات کافی درباره دینامیک سیستم وجود ندارد و چگونگی ارتباط حالت‌ها با هم در زمان‌های مختلف مشخص نیست، بهتر است برای استفاده از پالایه کالمن غیرخطی ساده‌سازی‌هایی انجام شود. برای شروع و اجرای پالایه، به پیشنهاد گالانیس (۲۰۰۶) مقادیر اولیه $X_0 = 0$،

$$P_0 = \begin{pmatrix} 4 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 4 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 4 \end{pmatrix}$$

(یک مقدار نسبتاً بزرگ)، $R(t_0) = 6$ (یک برآورد نسبتاً بزرگ که به استقلال سریع از شرایط اولیه منجر می‌شود) و $Q(t_0) = I_n$ (ماتریس همانی با ابعاد برابر مرتبه پالایه مورد استفاده) انتخاب می‌شود.

مدت آموزش پالایه نیز ۱۵۰ روز انتخاب شد که همانطور که در ادامه آمده است، از این عدد برای محاسبه ماتریس‌های R و Q استفاده می‌شود. شایان گفتن است که دوره‌های آموزش از ۷ روز تا ۱۵۰ روز آزمایش شدند و نتایج به دست آمده نشان داد که ۱۵۰ روز زمان مناسبی برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های پالاییده می‌باشد (یک قسمت از این آزمایشات را در بخش بعدی در قالب

[1] ایستگاه همدیدی فرودگاهی دریایی جزیره خارک، همدیدی دریایی بندربوشهر ،همدیدی فرودگاهی بندربوشهر ، همدیدی دریایی بندر دیّر، همدیدی فرودگاهی جم، همدیدی برازجان، همدیدی تکمیلی بندر دیلم و همدیدی فرودگاهی بندر عسلویه

[2] Universal Time Coordinated

Archive of SID

www.SID.ir

جدول و نمودار آورده‌ایم).

در مرحله بعد کاربرد چند جمله‌ای‌هایی با مرتبه‌های مختلف (مرتبه ۱ تا ۱۰) به منظور استخراج مرتبه بهینه بر اساس بهترین عملکرد پالایه در بهبود پیش‌بینی مدل WRF برای تندی باد در همه ایستگاه‌ها و در هر یک از ساعت‌های پیش‌بینی آزمایش شدند. سپس نتایج به دست آمده برای همه ایستگاه‌ها در ساعت‌ها و بازه‌های مختلف پیش‌بینی با هم تلفیق و تحلیل‌های آماری بر روی این

برخی سنجه‌های آماری محاسبه شده و تحلیل‌های آماری در این پژوهش بر اساس روابط زیر صورت می‌گیرد که در این روابط $obs(i)$ مقدار دیدبانی شده در زمان i، $for(i)$ مقدار پیش‌بینی مستقیم مدل یا پیش‌بینی بهبود یافته (با کاربرد پالایه) و k اندازه نمونه را مشخص می‌کند.

B میانگین خطای پیش‌بینی[1] (اریبی[2]) و MAE[3] مقدار میانگین خطای مطلق پیش‌بینی است.

$$MAE = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left| for(i) - obs(i)\right|$$

$$B = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left(for(i) - obs(i)\right)$$

داده‌ها صورت گرفت. مشکل‌ترین قسمت در اجرای پالایه کالمن، تعیین ماتریس‌های R و Q می‌باشد. در این تحقیق مقدار این دو ماتریس ابتدا ثابت فرض شده است ($R(t_0)=6$ و $Q(t_0)=I_n$). با توجه به مقادیر به دست آمده برای X_t های مربوط به ۱۵۰ روز قبل (مدت آموزش پالایه) و با کمک معادلات سیستم و دیدبانی و با فرض n=۱۵۰ ، واریانس‌های $Q(t_i)$ و $R(t_i)$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q(t_i) \equiv \frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=0}^{n-1}\left(\left(\left(x^t(t_{i+1}) - x^t(t_i)\right) - \left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1}\left(x^t(t_{i+1}) - x^t(t_i)\right)}{n-1}\right)\right)\right)^2 \qquad (۸)$$

$$R(t_i) \equiv \frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=0}^{n-1}\left(\left(\left(y_i^o - H_i[x^t(t_i)]\right) - \left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1}\left(y_i^o - H_i[x^t(t_i)]\right)}{n-1}\right)\right)\right)^2 \qquad (۹)$$

حال با توجه به مقادیر جدید R و Q، پالایه را با اعمال مرتبه‌های مختلف دوباره اجرا می‌کنیم و مقادیر جدید X_t را به دست می‌آوریم.

به منظور تصحیح، مقدار به دست آمده برای X_t را به مقدار مدل مربوط به زمان $t+1$ اضافه می‌کنیم:

پیش‌بینی تصحیح شده در زمان $(t+1)$ = برونداد مدل برای زمان $(t+1)$ + برآورد پالایه برای زمان t

امتیاز مهارتی (Score Skill) پالایه کالمن غیرخطی در هر مرتبه‌ای نیز با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{امتیاز مهارتی} = 1 - \frac{\text{مقدار } MAE \text{ پس از اعمال پالایه کالمن}}{\text{مقدار } MAE \text{ برای برونداد مدل WRF}}$$

نتایج و بحث

• تعیین دوره آموزش مناسب

همانطور که در بخش قبلی گفته شد، دوره زمانی برای برآورد ماتریس‌های R و Q، بعد از انجام یک سلسله آزمایشات، ۱۵۰ روز انتخاب شد. بدین صورت که الگوریتم پالایه کالمن غیرخطی در مرتبه‌های مختلف به

[1] Mean Error
[2]. Bias
[3]. Mean Absolute Error

Archive of SID

www.SID.ir

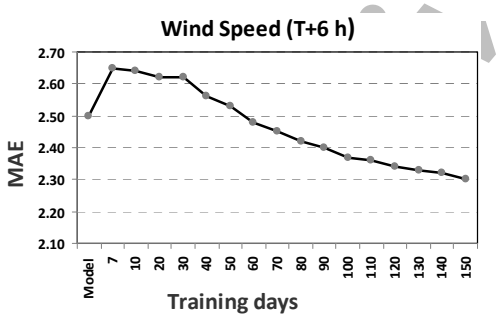
تفکیک بازه پیش‌بینی (۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته) و دوره‌های آموزش ۷، ۱۰، ۲۰، ... و۱۵۰ روز آزمایش و اجرا گردید. آنگاه خطای مطلق میانگین (MAE) نتایج حاصل از اعمال پالایه در مرتبه‌های مختلف و برونداد مستقیم مدل به تفکیک دوره آموزش و بازه پیش‌بینی محاسبه و مقایسه شد. یک قسمت از این آزمایشات برای تندی باد در شکل‌های (۱. الف) تا (۱. د) ارائه شده است. در این شکل‌ها، MAE برونداد مستقیم مدل با میانگین MAE مربوط به پالایه کالمن مرتبه ۱ تا ۴ در بازه‌های مختلف پیش‌بینی و دوره‌های آموزشی مختلف مقایسه شده است.آنچه که از این شکل‌ها استنباط می‌شود این است که در تمام بازه‌های پیش‌بینی، MAE پالایه با دوره آموزشی ۱۵۰ روز کمترین مقدار را نسبت به MAE مدل دارد.

همچنین مشاهده می‌شود که برای پیش‌بینی‌های با برد کمتر (مثل ۶ ساعته یا ۲۴ ساعته)، دوره آموزش کمتری جهت به دست آوردن پیش‌بینی‌های پالاییده نیاز هست ولی با افزایش برد پیش‌بینی، دوره آموزش بیشتری نیاز هست تا پیش‌بینی‌های پالاییده به دست آید. به عبارت دیگر با افزایش برد پیش‌بینی، دقت پیش‌بینی مدل نیز کمتر می‌شود. بر همین اساس دوره آموزش ۱۵۰ روز برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های پالاییده در همه بازه‌های پیش‌بینی انتخاب مناسبی است.

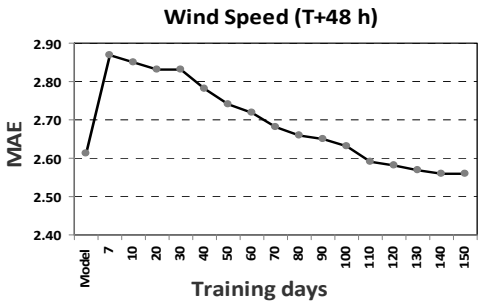
چنین آزمایشاتی برای دمای دو متری نیز انجام و مشاهده شد که نتایج آزمایشات برای دوره‌های آموزش ۷، ۱۰، ۲۰، ....و ۱۵۰ روز تفاوت چندانی با هم ندارند؛ امّا جهت یکسان‌سازی نتایج با نتایج تندی باد، دوره آموزش همان ۱۵۰ روز انتخاب شد.

شکل ۱. میانگین خطای مطلق برونداد مستقیم مدل و نتایج حاصل از اعمال پالایه کالمن غیرخطی برای تندی باد بر حسب فواصل زمانی مختلف جهت برآورد ماتریس‌های R و Q برای پیش‌بینی‌های (الف) ۶ ساعته، (ب) ۲۴ ساعته، (ج) ۴۸ ساعته، (د) ۱۲۰ ساعته

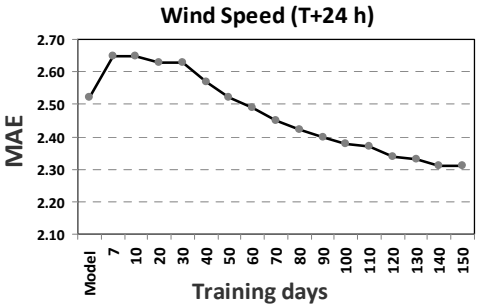
(الف)



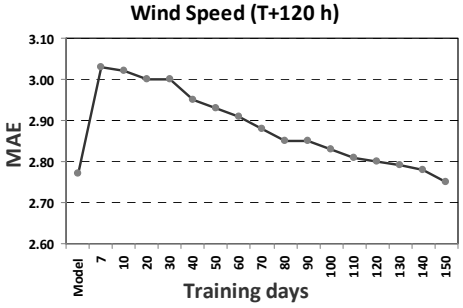
(ج)



(ب)



(د)



Archive of SID

www.SID.ir

• **تعیین مرتبه بهینه**

عملکرد کلّی پالایه کالمن غیرخطی، در جدول‌های ۱ و ۲ برای پارامتر تندی باد و در جدول‌های ۳ و ۴ برای پارامتر دمای هوا، به تفکیک مرتبه چند جمله‌ای مورد استفاده و بازه‌های مختلف پیش‌بینی بر اساس میانگین خطا (B) و میانگین خطای مطلق (MAE) در مقابل مقادیر متناظر آن از برونداد مستقیم مدل WRF ارائه شده است.

همان طور که در جدول‌های ۱ و ۳ مشاهده می‌شود، خطای میانگین در همه مرتبه‌های پالایه به صفر یا نزدیک به صفر رسیده است[۱].

این مقادیر نشان می‌دهند که پالایه کالمن غیرخطی توانسته است خطای سامانمند مدل را بدون توجه‌به نوع آن (underestimate یا overestimate)، تقریباً حذف کند. همچنین با مقایسه MAE برونداد مستقیم مدل WRF و پالایه‌های کالمن که در جدول های ۲ و ۴ ارائه شده است، نتیجه می‌گیریم که به طور کلّی در همه بازه‌های پیش‌بینی، پالایه کالمن مرتبه ۱ تا ۴ جهت تصحیح برونداد مستقیم مدل WRF برای تندی باد و پالایه کالمن مرتبه ۱ تا ۵ جهت تصحیح برونداد مستقیم مدل WRF برای دمای هوا انتخاب مناسبی است.

زیرا MAE پالایه در این مرتبه‌ها مقداری کمتر از MAE برونداد مدل دارد. علاوه بر این در شکل ۲، نمودار میانگین خطای مطلق (مقادیر روی محور عمودی سمت راست شکل ۲) مؤید این مطلب است که هرگونه تلاش برای استفاده از چندجمله‌ای‌های با مرتبه بالاتر از ۴ برای تندی باد، منجر به بهبود بیشتر در عملکرد پالایه نمی‌شود؛ می‌کند.

علاوه بر این با مقایسه MAE برونداد مستقیم مدل در شبانه‌روز اوّل[۲] پیش‌بینی در جدول ۲ و همچنین در شکل ۳، می‌توان گفت MAE برونداد مدل برای پارامتر تندی باد، در هنگام ظهر (مانند پیش‌بینی ۲۴ ساعته که در ساعت 1200 UTC و به وقت محلی در ساعت ۱۵:۳۰ انجام می‌شود) کمتر از MAE برونداد مدل در صبحگاه یا هنگام شب (مانند پیش‌بینی ۱۲ ساعته که در ساعت 0000 UTC و به وقت محلی در ساعت ۳:۳۰ انجام می‌شود) می‌باشد.

دلیل این امر این است که در هنگام صبح بیشتر، پدیده‌های محلی در تغییرات باد و حتی دما تأثیرگذار هستند که مدل در شبیه‌سازی این پدیده‌ها موفقیت کمتری دارد. ولی در هنگام ظهر بیشتر، پدیده‌های بزرگ مقیاس چگونگی تغییرات پارامترهای هواشناسی را در سطح زمین تعیین می‌کنند که مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی آن‌ها موفقیت بیشتری دارد. در نتیجه بطور کلی میانگین خطای مطلق پیش‌بینی مدل‌های NWP در هنگام ظهر کاهش می‌یابد.

طول دوره پیش‌بینی نیز در موفقیت پالایه در جهت بهبود پیش‌بینی‌های مدل تأثیر بسزایی دارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که اگر چه در پیش‌بینی‌های با برد کمتر (مانند پیش‌بینی‌های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعته) اعمال پالایه‌های کالمن تا مرتبه ۵ نیز جهت تصحیح برونداد مستقیم مدل برای تندی باد توانسته مؤثر واقع شود، ولی هرچه زمان پیش‌بینی بیشتر می‌شود این اثر کمرنگ می‌شود تا جایی

[۱] علت وجود تغییر غیرعادی در میانگین خطای پیش‌بینی ۱۲۰ ساعته با اعمال پالایه کالمن مرتبه ۹ (۳/۶۰) در جدول ۱ نسبت به دیگر موارد این جدول که مقدار صفر یا نزدیک به صفر دارند، همچنین میانگین خطای غیر عادی برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته با اعمال پالایه کالمن مرتبه ۶ (۳/۳۰-) در جدول ۳، می‌تواند مربوط به ناپایداری در پالایه کالمن غیرخطی با مرتبه بالا یا مربوط به روابط ریاضی باشد و نمی‌توان علت فیزیکی خاصی برای این مورد بیان کرد. انحراف و تغییر غیر عادی مشابه در جدول‌های ۲ و ۴ و در نمودارهای شکل ۲ که با توجه به مقادیر میانگین درج شده در سطر آخر جدول‌های ۱ و ۲ رسم شده‌اند، نیز نمایان است.

[۲] منظور پیش‌بینی‌های ۶ ساعته تا ۲۴ ساعته است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. میانگین خطای برونداد مستقیم مدل و پالایه‌های کالمن برای تندی باد

Bias of Direct Model Output and Kalman filters for Wind Speed											
Forecast Period	Model	kal 1	kal 2	kal 3	kal 4	kal 5	kal 6	kal 7	kal 8	kal 9	kal 10
T+6 h	۱/۸۷	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۱۵
T+12 h	۱/۷۸	-۰/۱۰	-۰/۰۴	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۵
T+18 h	۱/۷۳	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۷
T+24 h	۱/۷۳	-۰/۰۱	-۰/۱۱	-۰/۱۱	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۴	۰/۱۰
T+48 h	۱/۷۶	-۰/۰۲	-۰/۱۷	-۰/۱۸	-۰/۱۵	-۰/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۰۸
T+72 h	۱/۴۷	-۰/۰۳	-۰/۱۱	-۰/۱۲	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۱
T+96 h	۱/۸۰	۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
T+120 h	۱/۶۵	۰/۰۰	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۰	۳/۶۰	۰/۰۱
Average	۱/۶۸	-۰/۰۱	-۰/۱۰	-۰/۱۰	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۷۰	۰/۰۱

جدول ۲. میانگین خطای مطلق برونداد مستقیم مدل و پالایه‌های کالمن برای تندی باد

MAE of Direct Model Output and Kalman filters for Wind Speed											
Forecast Period	Model	kal 1	kal 2	kal 3	kal 4	kal 5	kal 6	kal 7	kal 8	kal 9	kal 10
T+6 h	۲/۵۰	۲/۱۸	۲/۳۲	۲/۳۷	۲/۳۵	۲/۳۷	۲/۴۷	۲/۶۰	۲/۶۴	۲/۶۵	۲/۷۰
T+12 h	۲/۷۰	۲/۳۰	۲/۴۳	۲/۵۱	۲/۴۸	۲/۵۴	۲/۶۹	۲/۷۳	۲/۷۴	۲/۷۵	۲/۷۵
T+18 h	۲/۷۷	۲/۴۷	۲/۶۹	۲/۷۱	۲/۷۳	۲/۷۵	۲/۸۲	۲/۸۶	۲/۸۸	۲/۸۹	۲/۹۶
T+24 h	۲/۵۲	۲/۱۴	۲/۳۲	۲/۳۷	۲/۴۱	۲/۴۸	۲/۶۱	۲/۶۵	۲/۶۶	۲/۷۹	۲/۸۶
T+48 h	۲/۶۱	۲/۵۰	۲/۵۲	۲/۵۷	۲/۶۳	۲/۷۱	۲/۸۱	۲/۸۵	۲/۸۷	۲/۸۸	۲/۸۸
T+72 h	۲/۴۷	۲/۴۷	۲/۴۳	۲/۴۱	۲/۴۵	۲/۵۴	۲/۶۷	۲/۷۳	۲/۷۵	۲/۷۹	۲/۸۰
T+96 h	۲/۷۷	۲/۶۷	۲/۶۱	۲/۶۱	۲/۶۳	۲/۷۵	۲/۸۳	۲/۸۷	۲/۸۸	۲/۸۹	۳/۰۰
T+120 h	۲/۷۷	۲/۷۹	۲/۷۵	۲/۷۷	۲/۸۱	۲/۸۶	۲/۹۴	۳/۰۱	۳/۰۳	۶/۵۳	۳/۰۷
Average	۲/۶۳	۲/۵۱	۲/۵۳	۲/۵۵	۲/۵۹	۲/۶۷	۲/۷۷	۲/۸۲	۲/۸۴	۳/۵۸	۲/۹۲

جدول ۳. میانگین خطای برونداد مستقیم مدل و پالایه‌های کالمن برای دمای دو متری

Biases of direct model output and Kalman filters for Temperature							
Forecast period	model	kal 1	kal 2	kal 3	kal 4	kal 5	kal 6
T+6h	-۱/۰۷	-۰/۸۰	۰/۱۰	-۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۱	*****
T+12h	-۰/۱۳	-۰/۵۶	-۰/۱۷	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۲	*****
T+18h	۰/۳۴	-۰/۸۷	-۰/۲۵	-۰/۱۰	-۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱
T+24h	-۱/۵۲	-۰/۴۶	-۰/۱۲	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲
T+48h	-۱/۶۰	-۰/۴۵	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲
T+72h	-۱/۴۷	-۰/۲۷	-۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۳/۳۰
T+96h	-۱/۴۳	-/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
T+120h	-۱/۲۴	-۰/۱۸	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۰	-۰/۰۵
Average	-۱/۴۵	-۰/۲۹	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۶۸

www.SID.ir

جدول ۴. میانگین خطای مطلق برونداد مستقیم مدل و پالایه‌های کالمن برای دمای دو متری

MAE of direct model output and Kalman filters for Temperature							
Forecast period	**model**	**kal 1**	**kal 2**	**kal 3**	**kal 4**	**kal 5**	**kal 6**
T+6h	۱/۸۶	۱/۸۲	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۵۷	۱/۵۹	*****
T+12h	۱/۹۴	۲/۰۱	۱/۹۱	۱/۷۵	۱/۸۷	۱/۹۷	*****
T+18h	۲/۴۰	۱/۸۷	۱/۷۴	۱/۷۳	۱/۸۳	۱/۹۰	۱/۷۹
T+24h	۲/۷۸	۱/۸۱	۱/۷۳	۱/۸۲	۱/۹۰	۱/۹۶	۲/۱۵
T+48h	۲/۸۰	۱/۹۵	۱/۹۵	۲/۰۳	۲/۰۸	۲/۱۲	۲/۰۳
T+72h	۲/۸۰	۲/۰۰	۲/۰۷	۲/۱۶	۲/۲۴	۲/۲۹	۶/۱۰
T+96h	۲/۹۳	۲/۲۶	۲/۴۳	۲/۴۹	۲/۵۲	۲/۵۵	۲/۴۵
T+120h	۳/۱۳	۲/۱۶	۲/۱۷	۲/۲۴	۲/۲۹	۲/۳۲	۳/۷۵
Average	**۲/۹۵**	**۲/۰٤**	**۲/۰۷**	**۲/۱۵**	**۲/۲۱**	**۲/۲۵**	**۳/۳۰**

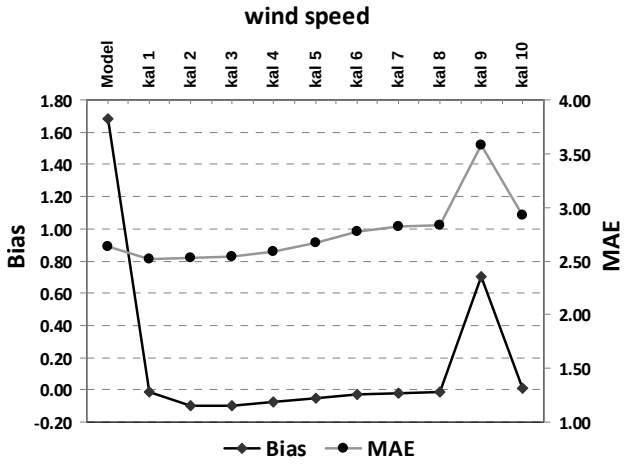
که در پیش‌بینی‌های ۱۲۰ ساعته حتی اعمال پالایه کالمن مرتبه ۴ نیز جهت تصحیح برونداد مستقیم مدل بی‌تأثیر است.

به عبارت دیگر با افزایش زمان پیش‌بینی، دقت مدل نیز کمتر می‌شود. در شکل‌های ۴ و ۵، با مقایسه مقادیر میانگین امتیاز مهارتی کاربست پالایه کالمن غیرخطی در بازه‌های پیش‌بینی ۲۴ تا ۱۲۰ ساعته به تفکیک مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده (۱، ۲، ... و ۵) نتیجه می‌گیریم که برای پارامتر تندی باد، کاربرد چندجمله‌ای مرتبه ۱ یا به عبارتی اعمال پالایه کالمن خطی و برای پارامتر دمای هوا کاربرد چندجمله‌ای‌های مرتبه ۱ و ۲ بیشترین تأثیر را در جهت بهبود و تصحیح پیش‌بینی مدل دارد.

البته این نتیجه، بر اساس مقدار میانگین است و یک نتیجه جامع و قابل تعمیم به همه بازه‌های پیش‌بینی نیست. زیرا برای پارامتر دمای هوا مطابق شکل ۷، در بعضی بازه‌های پیش‌بینی مانند پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته پالایه کالمن مرتبه ۲ و در برخی دیگر مثل پیش‌بینی‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعته پالایه کالمن مرتبه ۳، مرتبه بهینه هست.

برای پارامتر تندی باد نیز مطابق شکل ۶، در پیش‌بینی‌های با برد طولانی‌تر مثل پیش‌بینی‌های ۷۲ و ۹۶ ساعته، کاربرد چندجمله‌ای مرتبه ۳ و در پیش‌بینی ۱۲۰ ساعته کاربرد چندجمله‌ای مرتبه ۲ بهترین عملکرد را دارد.

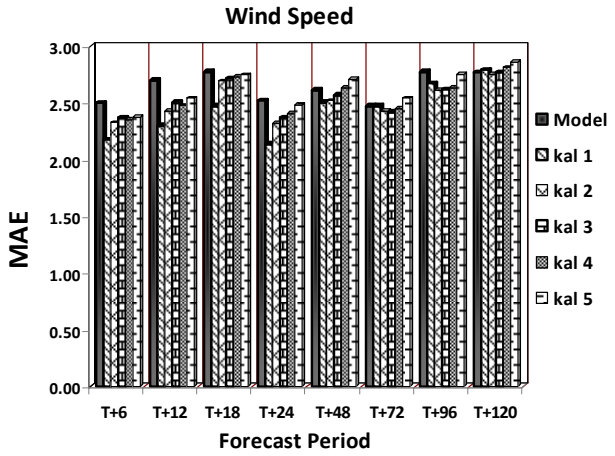
ضمن اینکه به دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌های انتخاب شده مورد مطالعه در این پژوهش نمی توان یک نتیجه‌گیری کلی کرد که پالایه کالمن مرتبه ۱ دارای بهترین عملکرد می‌باشد و فقط می‌توان نتیجه گرفت که



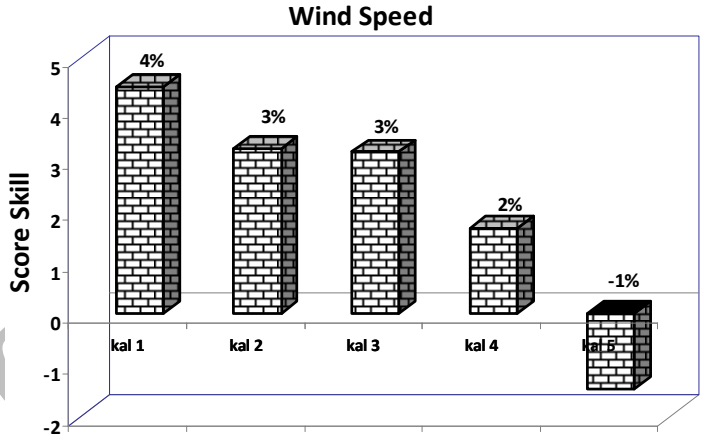
شکل ۲. میانگین خطا (Bias) و میانگین خطای مطلق پیش‌بینی(MAE) مدل WRF و پالایه‌های کالمن برای تندی باد

Archive of SID

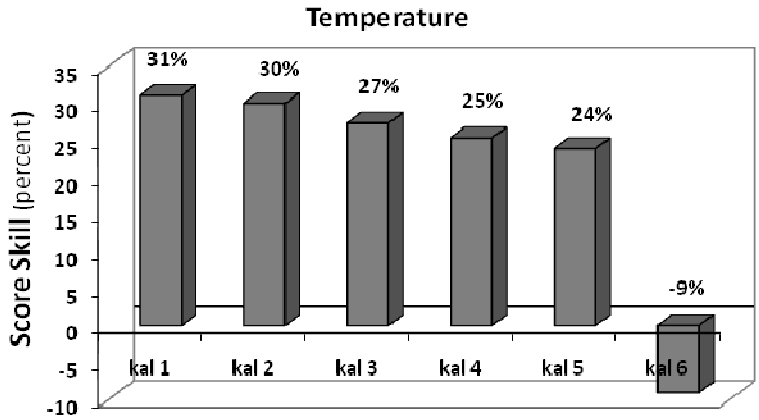
www.SID.ir



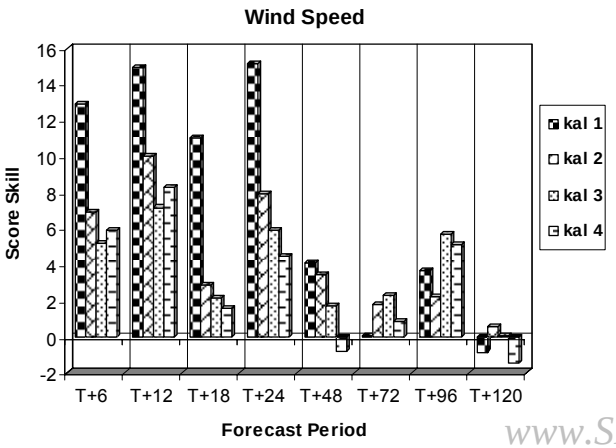
شکل ۳. میانگین خطای مطلق برونداد مستقیم مدل WRF و پالایه‌های کالمن برای تندی باد در بازه‌های مختلف پیش‌بینی



شکل ۴. میانگین امتیاز مهارتی کاربست پالایه کالمن غیرخطی در بازه‌های پیش‌بینی ۲۴ تا ۱۲۰ ساعته به تفکیک مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده برای تندی باد

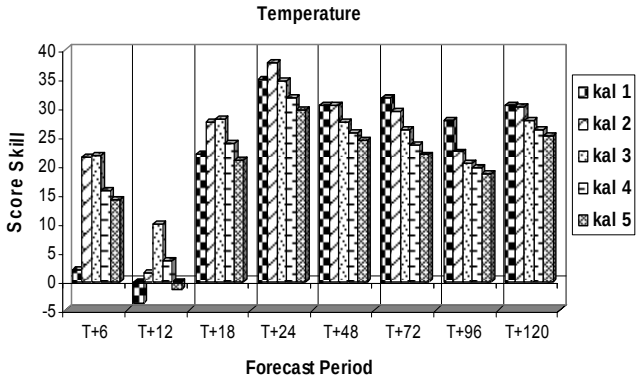


شکل ۵. میانگین امتیاز مهارتی کاربست پالایه کالمن غیرخطی در بازه‌های پیش‌بینی ۲۴ تا ۱۲۰ ساعته به تفکیک مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده برای پارامتر دمای دو متری



شکل ۶. امتیاز مهارتی کاربست پالایه کالمن غیرخطی به تفکیک مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده و بازه‌های مختلف پیش‌بینی برای تندی باد

www.SID.ir



شکل ۷. امتیاز مهارتی کاربست پالایه کالمن غیرخطی به تفکیک مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده و بازه‌های مختلف پیش‌بینی برای دمای دو متری

پالایه کالمن غیرخطی خطای سامانمند در برونداد مدل را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

بررسی و تحلیل نتایج حاصل از اعمال پالایه به تفکیک ایستگاه

میانگین امتیاز مهارتی (بر حسب درصد) کاربست پالایه کالمن غیرخطی در مرتبه‌های ۱ تا ۴ برای پارامتر تندی باد[1] و در مرتبه‌های ۱ تا ۵ برای دمای دو متری به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است. با توجه به این مقادیر، اعمال پالایه کالمن غیرخطی جهت تصحیح پیش‌بینی‌های مدل WRF برای ایستگاه‌هایی که امتیاز مهارتی مثبت دارند موفق بوده است. امّا کاربرد این پالایه جهت تصحیح پیش‌بینی مدل برای ایستگاه‌هایی که امتیاز مهارتی منفی دارند، نه تنها تأثیری در تصحیح پیش‌بینی‌ها ندارد که حتی منجر به درصد بزرگی از ناپایداری‌ها در نتایج می‌شود. علاوه بر این مقادیر ستون آخر جدول ۵ برای پارامتر تندی باد، نشان می‌دهد که کاربست پالایه کالمن غیرخطی در جهت و ۱۴ درصد بهبود) بهترین و برای ایستگاه خارک (با امتیاز مهارتی ۱۶- درصد) بدترین عملکرد را نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارد. همچنین با توجه به مقادیر ستون آخر جدول ۶ برای پارامتر دمای هوا، کاربست پالایه کالمن غیرخطی در جهت تصحیح پیش‌بینی مدل برای ایستگاه خارک (با امتیاز مهارتی ۶۲ درصد) بهترین و برای ایستگاه جم (با امتیاز مهارتی ۱۳- درصد) بدترین عملکرد را نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشته است. چنین کارکرد متفاوت پالایه برای ایستگاه‌های مذکور را می‌توان با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ که خطای میانگین مدل را به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی نشان می‌دهد، توضیح داد.

در شکل ۸، خط‌چین سیاه رنگ(———) خطای میانگین برونداد مدل (تندی باد) مربوط به ایستگاه خارک است که در بازه‌های پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸، .... و ۱۲۰ ساعته، مقادیری نزدیک به صفر و کمتر از یک دارد. همچنین خط نقطه‌چین سیاه‌رنگ (·····) و خط ممتد سیاه‌رنگ (— —) به ترتیب میانگین خطای مدل (تندی باد) مربوط به ایستگاه‌های جم و دیلم است که برای پیش‌بینی‌های ۲۴،

[1] برای مثال عدد ۱۵ در جدول ۵ که امتیاز مهارتی کاربست پالایه برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته در ایستگاه برازجان است؛ از میانگین ۴ عدد ۱۳،۱۹،۲۱و۹ به دست آمده که هرکدام از این اعداد از راست به ترتیب امتیاز مهارتی کاربست پالایه در مرتبه‌های ۱ تا ۴ برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته برای همین ایستگاه است.

Archive of SID

www.SID.ir

تصحیح پیش‌بینی مدل برای ایستگاه‌های جم و دیلم (با ۱۵ مثبت نسبتاً بزرگی هستند. با توجه به مطلب گفته شده در پاراگراف قبلی- که اعمال روش پالایه کالمن غیرخطی جهت پس‌پردازش و تصحیح پیش‌بینی مدل برای تندی باد در ایستگاه جم، بهترین و در ایستگاه جزیره خارک، بدترین عملکرد را داشته است - نتیجه می‌گیریم در مواردی که خطای میانگین برونداد مدل برای تندی باد از ابتدا مقدار صفر یا نزدیک به صفر را دارد (ایستگاه خارک در شکل ۸)، کاربرد پالایه جهت تصحیح آن ناموفق است. در مقابل هر اندازه که قدر مطلق خطای میانگین برونداد مدل برای تندی باد، بیشتر باشد (ایستگاه جم در شکل ۸)، اعمال پالایه در جهت تصحیح و بهبود برونداد مستقیم مدل با موفقیت بیشتری همراه است. با توجه به شکل ۹، این نتیجه برای دمای هوا نیز تأیید می‌شود. خطای میانگین پیش‌بینی مدل برای دمای هوا در ایستگاه جم (دارای کمترین امتیاز مهارتی در جدول ۶) در بازه‌های پیش‌بینی ۲۴ ساعته تا ۱۲۰ ساعته، مقادیری نزدیک به صفر دارد. اما ایستگاه خارک که بالاترین امتیاز مهارتی در میان سایر ایستگاه‌ها (۶۲ درصد در جدول ۶) دارد، قدر مطلق خطای میانگین برونداد مدل (دمای هوا) برای آن در بازه‌های پیش‌بینی ۲۴ ساعته تا ۱۲۰ ساعته مقادیری بین ۳ و ۵ می‌باشند که نسبت به دیگر مقادیر در شکل ۹ بزرگتر هستند.

۴۸، .... و ۱۲۰ ساعته مقادیری بین ۲ و ۳ دارد که مقادیر

جدول ۵. امتیاز مهارتی پالایه کالمن غیرخطی برای تندی باد به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی

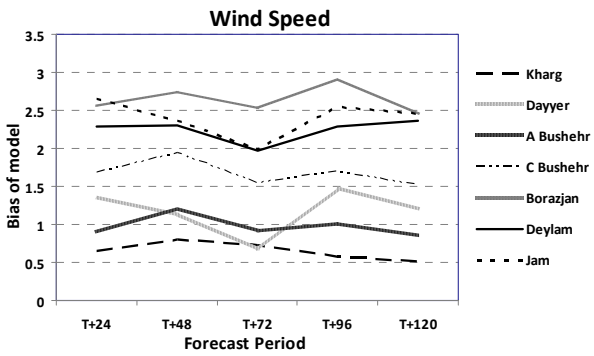
Score Skill for wind speed						
Station Name	**T+24**	**T+48**	**T+72**	**T+96**	**T+120**	**Average**
Borazjan	۱۵	۱۰	۱۱	۱۲	۲	۱۰
Jam	۲۲	۱۹	۱۰	۱۴	۸	۱۵
Deylam	۱۲	۱۱	۱۱	۲۱	۱۷	۱٤
Kharg	-۹	-۱۸	-۱۴	-۱۹	-۲۰	-۱٦
Dayyer	۳	-۱۳	-۱۴	-۲	-۱۰	-۷
A Bushehr	-۶	-۴	-۳	-۵	-۶	-۵
C Bushehr	۴	-۳	-۱۲	۴	-۴	-۲

جدول ۶ . امتیاز مهارتی پالایه کالمن غیرخطی برای دمای دو متری به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی

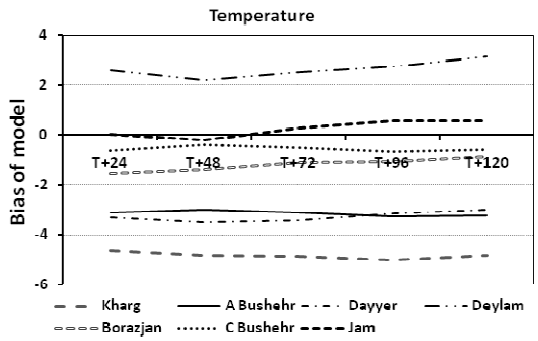
Score Skill for temperature						
Station Name	**T+24**	**T+48**	**T+72**	**T+96**	**T+120**	**Average**
Borazjan	۱۸	۸	-۴	۵	۶	۷
Jam	-۱۹	-۱۲	-۱۵	-۱۸	۱	-۱۳
Deylam	۲۸	۷	۱۳	۰	۲۵	۱۵
Kharg	۶۴	۶۲	۶۲	۵۹	۶۴	٦۲
Dayyer	۲۲	۲۶	۲۱	۱۸	۱۳	۲۰
A Bushehr	۵۶	۴۵	۴۷	۴۴	۴۲	٤۷
C Bushehr	۶	-۸	-۴	-۱۳	-۵	-۵

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۸. خطای میانگین برونداد مستقیم مدل برای تندی باد به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی



شکل ۹. خطای میانگین برونداد مستقیم مدل برای دمای دو متری سطح زمین به تفکیک ایستگاه و بازه پیش‌بینی

بنابراین برای هر دو پارامتر دما و تندی باد، وقتی خطای میانگین برونداد مدل (خطای سامانمند) مقدار صفر یا مقادیری خیلی نزدیک به صفر دارد، اعمال پالایه کالمن غیرخطی جهت تصحیح پیش‌بینی مدل نتیجه نمی‌دهد.

اما در مواردی که قدر مطلق خطای میانگین برونداد مدل (خطای سامانمند) متوسط یا خیلی بالا بود، اعمال پالایه بسیار موفق نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

در این پژوهش تندی باد ده متری و دمای دو متری سطح زمین، برونداد مستقیم مدل WRF در بازه‌های پیش‌بینی ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۴۸، .....و۱۲۰ ساعته[1] با روش پالایه کالمن غیرخطی پس‌پردازش و نتایج حاصل از اجرای پالایه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که جهت به دست آوردن پیش‌بینی‌های پالاییده برای تندی باد - کمیّتی با رفتار غیرخطی یا ناپیوسته - مدت آموزش بیشتری نسبت به دما که رفتاری خطی یا پیوسته دارد، باید در نظر گرفته شود.

برای هر دو پارامتر تندی باد و دمای هوا در همه بازه‌های پیش‌بینی پس از اعمال پالایه، میانگین خطای مدل به صفر یا نزدیک به صفر رسید. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با اعمال پالایه کالمن غیرخطی، خطای سامانمند مدل حذف می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که جهت تصحیح پیش‌بینی مدل برای پارامتر تندی باد، چندجمله‌ای از مرتبه ۱ تا ۴ و برای پارامتر دما، چندجمله‌ای از مرتبه ۱ تا ۵ انتخاب مناسبی در همه بازه‌های پیش‌بینی است و هرگونه تلاش برای استفاده از مرتبه‌های بالاتر چندجمله‌ای[2]، منجر به بهبود بیشتر در حساسیت پالایه نمی‌شود در مقابل عملکرد کلّی پالایه را از مقادیر بهینه‌اش منحرف می‌کند.

برای هر دو پارامتر دما و تندی باد، به طور کلّی در مواردی که قدر مطلق خطای سامانمند (میانگین) مدل متوسط یا خیلی بالا بود، اعمال پالایه کالمن غیرخطی در تصحیح پیش‌بینی‌ها موفق نشان داد. امّا در مواردی که مقدار مدل به مقدار دیدبانی خیلی نزدیک بود یا به عبارتی خطای سامانمند مدل دارای مقدار صفر یا مقادیری خیلی نزدیک به صفر بود، پالایه کالمن غیرخطی نتوانست به خوبی خطاها را تصحیح کند. زیرا نبود خطای سامانمند

[1] متناظراً از راست در ساعات دیدبانی 1800UTC، 0000، 0600، 1200، 1200، ... ، 1200

[2] برای تندی باد مرتبه بزرگتر از ۴ و برای دما مرتبه‌ی بزرگتر از ۵

Archive of SID

www.SID.ir

به طور جدّی چارچوبی را که پالایه عمل می‌کند، محدود می‌نماید.کارکرد پالایه کالمن غیرخطی برای پس‌پردازش و تصحیح پیش‌بینی تندی باد – برونداد مستقیم مدل WRF– بسیار ضعیف و در برخی موارد منفی بود که این نتیجه، از یک طرف بیشتر ناشی از ناپیوستگی پارامتر تندی باد با زمان است، از طرف دیگر ممکن است به علّت اثرات پدیده‌های کوچک‌مقیاس در لایه مرزی بر پیش-بینی تندی باد ده متری باشد که مدل در پیش‌بینی آن‌ها موفق نبوده است و از پس‌پردازش نیز انتظار اصلاح و رفع این مشکل نمی‌رود. اما از آنجا که دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی در مقایسه با باد خوش رفتارتر است، اعمال پالایه کالمن غیرخطی به طور قابل ملاحظه-ای باعث بهبود و تصحیح پیش‌بینی‌های دما – برونداد مستقیم مدل WRF – می‌شود.

منابع

۱. آزادی، م.، س.جعفری، ا.میرزایی، پ.عربلی، ۱۳۸۵: پس‌پردازش پیش‌بینی مدل MM5 برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از فیلتر کالمن، دهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، دانشگاه یزد.

۲. فرجاد، م.، ۱۳۸۸: بررسی پیش‌بینی دمای مدل MM5 در تراز ۲ متری با گام زمانی ۳ ساعت با استفاده از دیدبانی‌های استاندارد و پس‌پردازش بوسیله پالاینده کالمن، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد هواشناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

3. Crochet, P., 2004: **Adaptive Kalman filtering of 2-m temperature and 10-m wind-speed forecasts in Iceland.** Meteor.Appl. 11,173-187.

4. Galanis, G., Louka, P., Katsafados, P., Kallos, G., Pytharoulis, I., 2006: **Applications of Kalman filter based on non-linear functions to numerical weather predictions.** Ann. Geophys.24, 2451-2460.

5. Galanis, G., and Anadranistakis, M., 2002: **A one-dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts**, Meteoral. Appl. 9, pp.473-441.

6. Gelb, A., 1974: **Applied Optimal Estimation**, MIT Press, 374pp.

7. Glahn, H. R., and Lowry D.A., 1972: **The use of Model Output (MOS) in objective weather forecasting**. J. Appl.Meteor., 11, 1203-1211.

8. Homleid, M., 1995: **Diurnalcorrections of short-term surface temperature forecast using the Kalman filter**, Weather and Forecasting, 10, pp.689-707.

9. Kalman, R.E., 1960: **A new approach to linear filtering and Prediction Problems**, Trans. ASME, Ser. D.82 ,PP.34-45.

10. Kalman, R.E. and Bucy R. S., 1961: **New results in linear filtering and Prediction Problems,** Trans. ASME, Ser. D.83 ,PP.95-108.

11. Klein, W.H., Lewis B. M., and Enger I., 1959: **Objective Prediction of five-day mean temperature during winter**, J. Meteor., 16, PP.672-682.

12. Priestley, M. B.,1981: **Spectral Analysis and Time Seriers**,Academic Press,pp.807-815.

Archive of SID

www.SID.ir