

پس پردازش برون داد مدل MM5 برای دمای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین با استفاده از یک فیلتر کالمن ساده

مجید آزادی * سمیه جعفری ** ابراهیم میرزایی ** پروین عربلی **

* عضو هیئت علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو؛ پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۹۶۵، تهران
** کارشناس مرکز پیش بینی سازمان هواشناسی کشور؛ سازمان هواشناسی کشور، صندوق پستی ۴۶۱-۱۳۱۸۵، تهران

چکیده پیش بینی دمای سطح زمین با مدل های پیش بینی عددی وضع هوا دارای خطاهای سیستماتیک است که عمدتاً به دلیل پایین بودن تفکیک توپوگرافی و نیز نقص در پراسنجی پارامترهای فیزیکی مختلف در مدل می باشد. فیلتر کالمن روش مفیدی است که با یک الگوریتم ساده و نیاز به ورودی های کوتاه مدت، با ترکیب پیش بینی های مدل و دیدبانی ها، خطاهای سیستماتیک را تا حد بسیار خوبی کاهش می دهد. در این مقاله، فیلتر کالمن روی دماهای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین برای ۱۱۷ ایستگاه در ایران و به مدت ۱۲۰ روز اعمال شده که نتایج چهار ایستگاه در اینجا ارائه شده است. مدل مورد استفاده، مدل میان مقیاس منطقه ای MM5 و مدت آموزش فیلتر هفت روز انتخاب شد. بررسی آماری روی نتایج نشان داد که فیلتر کالمن برای روزهایی که خطای مدل زیاد یا متوسط بود، توانست پیش بینی مدل را تا حد قابل قبولی اصلاح کند؛ اما برای روزهایی که خطای مدل کم بود، کاربست فیلتر تأثیر چندانی در تصحیح خطا نداشت.

واژه های کلیدی - فیلتر کالمن - پس پردازش - دمای بیشینه و کمینه

۱- مقدمه

استفاده از مدل های پیش بینی عددی وضع هوا می تواند به پیش بینی هر چه صحیح تر وضعیت هوا کمک کند؛ اما، مدل ها در پیش بینی پارامترهای مختلف به ویژه پارامترهای نزدیک سطح زمین خطا دارند و نیز قادر به پیش بینی صریح برخی پدیده ها مانند احتمال وقوع رعد و برق یا میزان دید نمی باشند. عواملی همچون وجود نقص در پراسنجی فرایندهای فیزیکی مختلف در مدل و تعیین بودن آنها، عدم توانایی مدل در شبیه سازی موفق پدیده های زیر شبکه ای، استفاده از درون یابی نتایج مدل برای تعیین مقادیر مربوط به نقاطی که روی نقاط شبکه نیستند، توانا نبودن مدل در نمایش حقیقی پدیده های کوهساری در سطوح پایین، اثر عوامل موضعی و محلی و نیز محدودیت های ناشی از تفکیک مدل همگی می توانند به ایجاد خطا در خروجی مدل منجر شوند. از دلایل اختلاف پیش بینی مدل برای دما و دمای دیدبانی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مدل دمای میانگین سطحی را پیش بینی می کند و نه دمای نقطه ای.

- در بیشتر ایستگاه‌ها ارتفاع زمینی در مدل هموارتر از مقدار واقعی است؛ در صورتی که آهنگ افت دمای بی‌دررو در چند صد متری پایین جو برای هوای غیراشباع $9/78$ درجه سلسیوس در هر کیلومتر است و در نتیجه این اختلاف ارتفاع منجر به ایجاد خطا در پیش‌بینی دما می‌شود.
- طرحواره لایه مرزی Blackadar که در اجرای مدل استفاده شده است، لایه‌های دارای نمایه قائم دمای ابر بی‌دررو ایجاد نمی‌کند، درحالی که به ویژه در تابستان لایه‌های دارای نمایه قائم دمای ابر بی‌دررو گاهی در لایه مرزی اتفاق می‌افتد؛ هر چند که پایدار نیستند و سریع از بین می‌روند.
- خطاهای طرحواره پارامتری‌سازی مورد استفاده به ویژه در پارامتری‌سازی پوشش‌ابر و لایه مرزی نیز روز پیش‌بینی مدل مؤثرند.

با توجه به موارد فوق، برای کاربردی‌تر کردن خروجی‌های مدل، روش‌های مختلف پس‌پردازش داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که از میان آنها می‌توان به روش‌های آماره خروجی مدل (MOS)^۱، روش پیش‌یابی کامل (PPM)^۲ و فیلتر کالمن اشاره کرد. روش MOS [۴، ۱۱] نوعی برازش خطی چندگانه است که در آن رابطه بین دیدبانی و خروجی مدل به صورت خطی فرض و ضرایب مربوطه محاسبه می‌شود. در این روش دیدبانی (مثلاً دمای دو متری)، پیش‌بینی‌شونده و پیش‌بینی مدل (مثلاً ارتفاع ۷۰۰ میلی‌باری)، پیش‌بینی‌کننده است. اگر تمام شرایط مورد نیاز فراهم باشد روش MOS بهترین نتیجه را خواهد داد. روش PPM [۱۰] نیز مشابه روش MOS است با این تفاوت که دیدبانی‌ها یا داده‌های تحلیل‌شده (مثلاً ارتفاع ۷۰۰ میلی‌باری) پیش‌بینی‌کننده هستند و پیش‌بینی‌شونده‌ها نیز همان دیدبانی‌ها (مثلاً دمای دو متری) می‌باشند. این دو روش نیاز به داده‌های ورودی طولانی مدت (حداقل چند سال) دارند و مدل مورد استفاده باید در طی این مدت و نیز در مدت استفاده بدون تغییر باقی بماند. مشکل تغییر مدل‌ها در روش MOS با روش جدیدی که MOS تجدیدشونده^۳ [۱۴] نام دارد، برطرف شده است، اما هنوز مشکل داده‌های طولانی مدت پا برجاست.

فیلتر کالمن [۳، ۸، ۹، ۱۳] روشی است که بدون نیاز به داده‌های ورودی طولانی مدت، با ترکیب پیش‌بینی‌های مدل و دیدبانی‌ها، خطاهای سیستماتیک را تصحیح می‌کند. در مقالات زیادی از فیلتر کالمن برای تصحیح دمای سطح زمین و پارامترهایی چون سرعت باد استفاده شده و رابطه‌ی خطای مدل با پارامترهای دیگر بررسی شده است، [۲، ۱۲]. در این مقاله ابتدا در بخش دوم، فیلتر کالمن به اختصار شرح داده می‌شود؛ در بخش سوم چگونگی اعمال این فیلتر بر روی پیش‌بینی مدل برای دمای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین برای ۱۱۷ ایستگاه کشور توضیح داده می‌شود؛ در بخش چهارم بررسی آماری نتایج به دست آمده و در بخش پنجم نتیجه‌ی بررسی‌ها ارائه می‌گردد.

۲- فیلتر کالمن ساده

از زمانی که کالمن در سال ۱۹۶۰ فیلتر کالمن را معرفی کرد تا امروز، این فیلتر به‌ویژه در سیستم‌های خودکار و نیز ناوبری، کاربردهای گسترده‌ای داشته و موضوع تحقیقات علمی بسیاری بوده است. به دلیل گستردگی موضوع، شرح کامل فیلتر کالمن از حوزه این مقاله خارج است و در این بخش به توضیح مختصری بسنده می‌کنیم. برای مطالعه بیشتر رجوع کنید به [۱، ۵، ۱۵].

فیلتر کالمن یک الگوریتم بازگشتی برای پردازش داده‌ها است که با کمک مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های ناقص و دارای نوفه، حالت سیستم دینامیکی را برآورد می‌کند. اساس این فیلتر جبر خطی و مدل مخفی مارکوف می‌باشد. سیستم

^۱ - Model Output Statistics

^۲ - Perfect Prog. Method

^۳ - Updateable MOS

دینامیکی مورد نظر به صورت یک زنجیره مارکوف مدلسازی شده که این زنجیره مارکوف با عملگرهای خطی پریشیده شده با نوفه گاوسی ساخته شده است. در این فیلتر، حالت سیستم با برداری از اعداد حقیقی نمایش داده می شود.

الگوریتم فیلتر کالمن، بهینه است؛ چرا که برای محاسبه‌ی مقدار متغیر بدون توجه به دقت اطلاعات ورودی از همه آنها استفاده و همه اندازه‌گیری‌های موجود را پردازش می‌کند؛ همچنین اطلاعات مربوط به دینامیک سیستم و دستگاه‌های اندازه‌گیری، نوفه‌های سیستم، خطاهای اندازه‌گیری، عدم قطعیت مدل‌های دینامیکی و هر اطلاعات موجود در مورد شرایط اولیه‌ی پارامتر مورد نظر را لحاظ می‌کند. این فیلتر مجموعه‌ای از معادلات ریاضی است که نوعی برآوردکننده پیش‌بینی - تصحیح‌کننده می‌باشد؛ بدین معنی که مقدار پارامتر مورد نظر در گام اول پیش‌بینی و سپس تصحیح می‌شود. با استفاده از فیلتر کالمن، کوواریانس خطای برآورد شده کمینه می‌شود.

فیلتر کالمن انواع مختلفی دارد؛ در « فیلتر کالمن ساده » که در اینجا استفاده شده، فرض بر این است که رابطه بین حالت نامعلوم متغیر در زمان t و حالت آن در زمان $t - 1$ یک رابطه خطی است؛ اگر این رابطه غیرخطی باشد، فیلتر از نوع « فیلتر کالمن توسعه یافته^۴ » می‌باشد.

فرض کنید x_t بردار مربوط به حالت نامعلوم سیستم در زمان t است که هدف، برآورد کردن آن می‌باشد. رابطه بین این حالت در زمان t و بردار حالت معلوم سیستم در زمان $t - 1$ با معادله زیر که « معادله سیستم » نام دارد، داده می‌شود:

$$x_t = F_t \cdot x_{t-1} + w_t \quad (1)$$

که در این رابطه w_t بردار نوفه فرایند و F_t ماتریسی است که حالت $t - 1$ ام بردار حالت را به حالت فعلی آن در زمان t مرتبط می‌کند و وابسته به زمان است.

اگر y_t حالت معلوم و اندازه‌گیری شده در زمان t باشد، رابطه آن با x_t به کمک معادله زیر است که « معادله اندازه‌گیری یا دیدبانی » نامیده می‌شود:

$$y_t = H_t \cdot x_t + v_t \quad (2)$$

که در این رابطه v_t بردار نوفه اندازه‌گیری و H_t ماتریسی است که حالت x را به اندازه‌گیری y در همان زمان مرتبط می‌کند و متغیر با زمان می‌باشد. w_t و v_t نوفه‌های سفید هستند، توزیع نرمال دارند و مستقل از هم می‌باشند؛ یعنی $E(w_s \cdot v_t) = 0$ ، $\forall s, t \in N$ ؛ همچنین هر یک از این نوفه‌ها برای زمان‌های مختلف مستقل از همند؛ یعنی $E(w_s \cdot w_t) = 0$ و $E(v_s \cdot v_t) = 0$ ، $\forall s \neq t$.

در فیلتر کالمن ابتدا پیش‌حالت t ($x_{t/t-1}$) که براساس مقدار متغیر از $t = 0$ تا $t - 1$ است و نیز پیش‌برآورد کوواریانس خطا ($P_{t/t-1}$) محاسبه می‌شود:

$$x_{t/t-1} = F_t \cdot x_{t-1} \quad (3)$$

$$P_{t/t-1} = F_t \cdot P_{t-1} \cdot F_t^T + Q \quad (4)$$

⁴ - EKF(Extended Kalman Filter)

که در آن Q کوواریانس خطای فرایند (w_t) می باشد؛ دو معادله فوق را « معادله های پیش بینی » می نامند. وقتی دیدبانی جدید در زمان t (y_t) انجام می شود، می توان برآورد حالت جدید (x_t) را با ترکیب خطی از پیش برآورد $x_{t/t-1}$ و خطای پیش بینی؛ یعنی $(y_t - H_t \cdot x_{t/t-1})$ به روز کرد:

$$x_t = x_{t/t-1} + K_t (y_t - H_t \cdot x_{t/t-1}) \quad (5)$$

که در آن ماتریس بهره کالمن⁵، K_t ، با رابطه زیر داده می شود:

$$K_t = \frac{P_{t/t-1} \cdot H_t}{H_t \cdot P_{t/t-1} \cdot H_t^T + R} \quad (6)$$

در رابطه بالا، R کوواریانس خطای اندازه گیری (v_t) می باشد. بهره کالمن چگونگی تنظیم فیلتر را با شرایط جدید تعیین می کند. کوواریانس خطای x_t نیز از معادله زیر به دست می آید:

$$P_t = (I - H_t \cdot K_t) P_{t/t-1} \quad (7)$$

سه معادله بالا، « معادلات تصحیح کننده » نامیده می شوند و از آنها برای به روزرسانی فیلتر کالمن از زمان $t - 1$ به t استفاده می شود.

برای شروع و اجرای فیلتر، باید مقادیر اولیه x_0 و P_0 به فیلتر داده شود؛ x_0 خطای سیستماتیک اولیه است و می توان ابتدا آن را صفر در نظر گرفت. P_0 نیز واریانس اولیه است که مقدار ابتدایی آن بزرگ فرض می شود. مقدار اولیه این پارامترها مهم نیست؛ زیرا خیلی زود و پس از چند تکرار به مقدار درستشان میل می کنند. اما تعیین بردارهای v_t و w_t مهم است و مقدار آنها می تواند خروجی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد؛ اینکه بعد از تغییرات زیاد در داده های ورودی، فیلتر کالمن با چه سرعتی با وضعیت هوایی جدید تطبیق می کند، به نسبت w_t/v_t بستگی دارد. انتخاب درست این مقادیر باعث پایداری نتایج می شود و داده های اندازه گیری شده با خطای زیاد در یک روز، خطای بزرگی در خروجی ایجاد نمی کند.

۳- روش کار

از آنجایی که اطلاعات کافی درباره دینامیک سیستم وجود ندارد و چگونگی ارتباط حالت ها با هم در زمان های مختلف مشخص نیست، بهتر است برای استفاده از فیلتر کالمن ساده سازی هایی انجام شود. هدف، پس پردازش دمای بیشینه و کمینه است. بردار حالت یک ماتریس 2×1 است که سطر اول آن دمای بیشینه و سطر دوم آن دمای کمینه است. ماتریس های F_t و H_t ثابت و برابر با یک ماتریس یکانی I ، 2×2 فرض می شوند. v_t و w_t نیز بردارهای 2×1 با میانگین صفر خواهند بود. مقدار اولیه x_0 ، $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ و واریانس اولیه P_0 ، $\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}$ در نظر گرفته شد؛ همانطور که پیش از این اشاره شد انتخاب

⁵ - Kalman Gain

این دو مقدار اولیه تأثیری در نتیجه ندارد. بردار y_t اختلاف بین مقدار مدل و مقدار دیدبانی و بردار x_t خطای سیستماتیک است که محاسبه خواهد شد.

مدت آموزش فیلتر، هفت روز انتخاب شد که همانطور که در زیر شرح داده می‌شود از این عدد برای محاسبه ماتریس‌های Q و R نیز استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که فیلتر برای مدت آموزش هفت تا بیست روز اجرا شد که چون نتایج تفاوت قابل توجهی نداشت، عدد هفت انتخاب شد؛ هر چند انتخاب بازه زمانی مناسب برای این محاسبه به آزمایش‌های بیشتری نیازمند است.

مشکل‌ترین قسمت در اجرای فیلتر کالمن، تعیین ماتریس‌های 2×2 ، Q و R می‌باشد؛ روش‌های مختلفی برای محاسبه این دو مقدار مورد استفاده قرار گرفته است، [۶]. در این مقاله، ابتدا این دو ماتریس ثابت فرض شد، $R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ و

$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ و سپس با توجه به مقادیر به دست آمده برای x_t ‌های مربوط به هفت روز قبل و با کمک معادلات سیستم و دیدبانی (۱) و (۲) و با فرض $n = 7$ ، با استفاده از معادله‌های زیر [۲] کوواریانس خطا (Q و R) محاسبه و با توجه به مقادیر جدید، فیلتر مجدداً اجرا شد:

$$Q_{jj} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(w_{t-i; j1} - \left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} w_{t-i; j1}}{n} \right) \right)^2 \quad j = 1, 2 \quad (8)$$

به‌طور مشابه

$$R_{jj} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(v_{t-i; j1} - \left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} v_{t-i; j1}}{n} \right) \right)^2 \quad j = 1, 2 \quad (9)$$

به منظور تصحیح، مقدار به دست آمده برای x_t به مقدار مدل مربوط به زمان $t + 1$ اضافه شد:

برآورد فیلتر برای زمان (t) + خروجی مدل برای زمان ($t + 1$) = پیش‌بینی تصحیح‌شده برای زمان ($t + 1$)

۴- اجرا

در این قسمت چگونگی استفاده از فیلتر کالمن ساده برای پس‌پردازش خروجی مدل MM5⁶ (یک مدل منطقه‌ای میان‌مقیاس) مربوط به دمای بیشینه و کمینه در دومتری سطح زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل با داده‌های GFS⁷ آغازگری و با فاصله شبکه‌ای ۳۰ کیلومتر، برای ۱۲۰ روز (از ۱۷ نوامبر ۲۰۰۵ تا ۱۶ مارس ۲۰۰۶) اجرا شد. جزئیات بیشتر

⁶ - PSU/NCAR Mesoscale Model

⁷ -Global Forecast System

پیکربندی مدل در [۱۶] داده شده است. شروع اجرا از UTC^۸ ۱۲ هر روز تا ۱۰۲ ساعت بعد بود. به کمک درونیابی دوخطی^۹ خروجی مدل برای ایستگاه‌ها هر سه ساعت یکبار محاسبه شد و بیشینه و کمینه‌ی دما با کمک این خروجی‌ها به دست آمد؛ بدیهی است که برای به دست آوردن نتایج بهتر، باید خروجی مدل با فاصله زمانی یک ساعته استخراج شود. برای اعمال فیلتر کالمن با حذف ۱۲ ساعت اول، نخستین دماهای بیشینه و کمینه (مربوط به یک روز) انتخاب شدند؛ بدین ترتیب پیش‌بینی مدل برای دمای کمینه تقریباً ۱۵ ساعته و برای دمای بیشینه تقریباً ۲۷ ساعته بود. با فرض‌های بخش قبل، فیلتر کالمن بر روی پیش‌بینی مدل برای دماهای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین مربوط به ۱۱۷ ایستگاه کشور اعمال شد که به دلیل محدود بودن حجم مقاله، تنها نتایج پس‌پردازش پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه‌ی چهار ایستگاه تهران (مهرآباد)، سنندج، اراک و خرم‌آباد ارائه شده است. در صورتی که برای بعضی روزها مقدار دیدبانی گزارش نشده بود، داده‌های آن روز حذف شد و در محاسبات وارد نگردید.

برخی امتیازهای آماری محاسبه شده برای چهار ایستگاه مذکور در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. برای هر ایستگاه خطای میانگین (اریبی)، خطای مطلق میانگین، انحراف معیار متناظر با هر خطا و نیز ریشه مربعی میانگین مجذور خطا محاسبه شده است. همچنین، احتمال پیش‌بینی موفق با توجه به معیار تعریف‌شده به وسیله مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت اروپا^{۱۰} (پیش‌بینی موفق \Leftrightarrow خطای مطلق میانگین کمتر از ۲ درجه سلسیوس) برای ایستگاه‌ها ارائه شده است. امتیاز مهارتی فیلتر کالمن نیز با رابطه زیر به دست آمده است:

$$\text{امتیاز مهارتی} = 1 - \frac{\text{خطای مطلق میانگین فیلتر کالمن}}{\text{خطای مطلق میانگین مدل MM5}}$$

در شکل‌های ۱ و ۲ نمودارهای مربوط به تغییرات دماهای بیشینه و کمینه در مدت ۱۲۰ روز برای پیش‌بینی مدل، دمای تصحیح‌شده با فیلتر کالمن و نیز مقادیر دیدبانی برای چهار ایستگاه نامبرده ارائه شده است. همچنین فراوانی خطای مطلق پیش‌بینی مدل و دمای تصحیح‌شده با فیلتر کالمن در شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، فیلتر کالمن توانسته است خطای میانگین، خطای مطلق میانگین و ریشه مربعی میانگین مجذور خطا برای دمای بیشینه را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد؛ اگر چه در انحراف از معیار خطا و انحراف از معیار خطای میانگین تغییر چندانی ایجاد نشده است. همچنین احتمال پیش‌بینی موفق از حدود ۶ درصد برای مدل به حدود ۶۰ درصد پس از کاربست فیلتر کالمن رسیده است. امتیاز مهارتی فیلتر کالمن برای این چهار ایستگاه مقدار قابل‌قبولی است. اگر در شکل ۱ به نمودارهای مربوط به دمای بیشینه این چهار ایستگاه توجه کنیم، می‌بینیم که پیش‌بینی مدل برای آنها در تمام روزها یا برآورد اضافی و یا نقصانی بوده است و بیشتر روزهای خطای مدل زیاد است. در جدول ۲ هم که مربوط به دمای کمینه است، نتایج مشابه است؛ البته برای دو ایستگاه خرم‌آباد و سنندج امتیاز مهارتی حدود ۳۰ درصد است و کاهش ریشه مربعی میانگین مجذور خطا نیز قابل‌توجه نیست. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، خطای مدل برای دمای کمینه این دو شهر کم است.

⁸ - Universal Time Coordinated

⁹ - bilinear interpolation

¹⁰ - ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts)

از شکل‌های ۱ و ۲ چنین برمی‌آید که مدل و کالمن برای روزهایی که دمای هوا نسبت به روزهای قبل تغییر زیادی داشته، موفق نبوده‌اند، (در شکل‌ها، تعدادی از این روزها با پیکان مشخص شده‌اند).

۵- نتایج و جمع‌بندی

در این مقاله دمای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین پیش‌بینی شده با مدل MM5 مربوط به ۱۱۷ ایستگاه در سطح کشور به وسیله فیلتر کالمن ساده پس‌پردازش و نتایج تحلیل شد. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که خطای مدل با توجه به فصل و نیز موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه متفاوت است. برای بیشتر شهرها پیش‌بینی مدل در تمام روزها برآورد نقصانی و یا اضافی است؛ یعنی در تمام روزها خطا مثبت یا در تمام روزها منفی می‌باشد؛ در حالی که پس از اعمال فیلتر کالمن این برآورد برای بعضی روزها اضافی و برای برخی دیگر نقصانی می‌شود که این مطلب در کاهش قابل ملاحظه خطای میانگین (نزدیک به صفر) که اریبی را اندازه‌گیری می‌کند، مشهود است. از طرفی ریشه مربعی میانگین مجذور خطا (RMSE) پاشندگی خطا را اندازه‌گیری می‌کند و هر چند کاهش آن پس از اعمال فیلتر قابل توجه است ولی با صفر فاصله دارد و بیانگر وجود برآورد اضافی و نقصانی می‌باشد.

در مورد شهرهایی که پیش‌بینی مدل برای آنها در تعدادی از روزها برآورد نقصانی و در تعدادی اضافی داشت؛ کاربست فیلتر کالمن تصحیح قابل ملاحظه‌ای به وجود نیاورد.

به طور کلی، در مواردی که خطای سیستماتیک، متوسط یا خیلی بالا بود، فیلتر کالمن بسیار موفق نشان داد؛ اما در مواردی که مقدار مدل به مقدار دیدبانی خیلی نزدیک بود، فیلتر کالمن نتوانست به خوبی خطاها را تصحیح کند؛ زیرا نبود خطای سیستماتیک به طور جدی چارچوبی را که فیلتر عمل می‌کند، محدود می‌نماید.

مراجع

- 1- Brown, R. G., and Hwang, P. Y., Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 1992.
- 2- Galanis, G., and Anadranistakis, M., "A one-dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts," Meteorol. Appl. 9, pp. 437-441, 2002.
- 3- Gelb, A., Applied Optimal Estimation, MIT Press, 1974.
- 4- Glahn, H. R., and Lowry D. A., "The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecasting," J. Appl. Meteor., 11, pp. 1203-1211, 1972.
- 5- Grewal, Mohinder S., and Andrews Angus P., Kalman Filtering Theory and Practice, Upper Saddle River, NJ USA, Prentice Hall, 1993.
- 6- Homleid, M., "Diurnal corrections of short-term surface temperature forecasts using the kalman filter," Weather and Forecasting, 10, pp. 689-707, 1995.
- 7- Jacobs, O. L. R., Introduction to Control Theory, 2nd Edition, Oxford University Press, 1993.
- 8- Kalman, R. E., "A new approach to linear filtering and prediction problems," Trans. ASME, Ser. D. 82, pp. 34-45, 1960.
- 9- Kalman, R. E. and Bucy R. S., "New results in linear filtering and prediction problems," Trans. ASME, Ser. D. 83, pp. 95-108, 1961.
- 10- Klein, W. H., Lewis B. M., and Enger I., "Objective Prediction of five-day mean temperature during winter," J. Meteor., 16, pp. 672-682, 1959.
- 11- Marzban, C., Sandgathe S., and Kalnay E., "MOS, Perfect Prog and Reanalysis," Monthly Weather Review, 2005.
- 12- Persson, A., "Kalman filtering a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts," Lectures and Papers presented at the WMO Training Workshop on the Interpretation of NWP Products in Terms of Local Weather Phenomena and Their Verification, Wageningen, The Netherlands, WMO, pp. XX-27-XX-32, 1991.
- 13- Priestley, M. B., "Spectral Analysis and Time Series," Academic Press, pp. 807-815, 1981.

14- Ross, G., "Model output statistics using an updatable scheme," Proc. 11th Conf. on Probability and Statistics in Atmospheric Science, Monterey, CA, Amer. Meteor. Soc., pp. 93-97, 1989.

15- Sorenson, H. W., "Least-Squares estimation from Gauss to Kalman," IEEE Spectrum, Vol. 7, pp. 63-68, 1970.

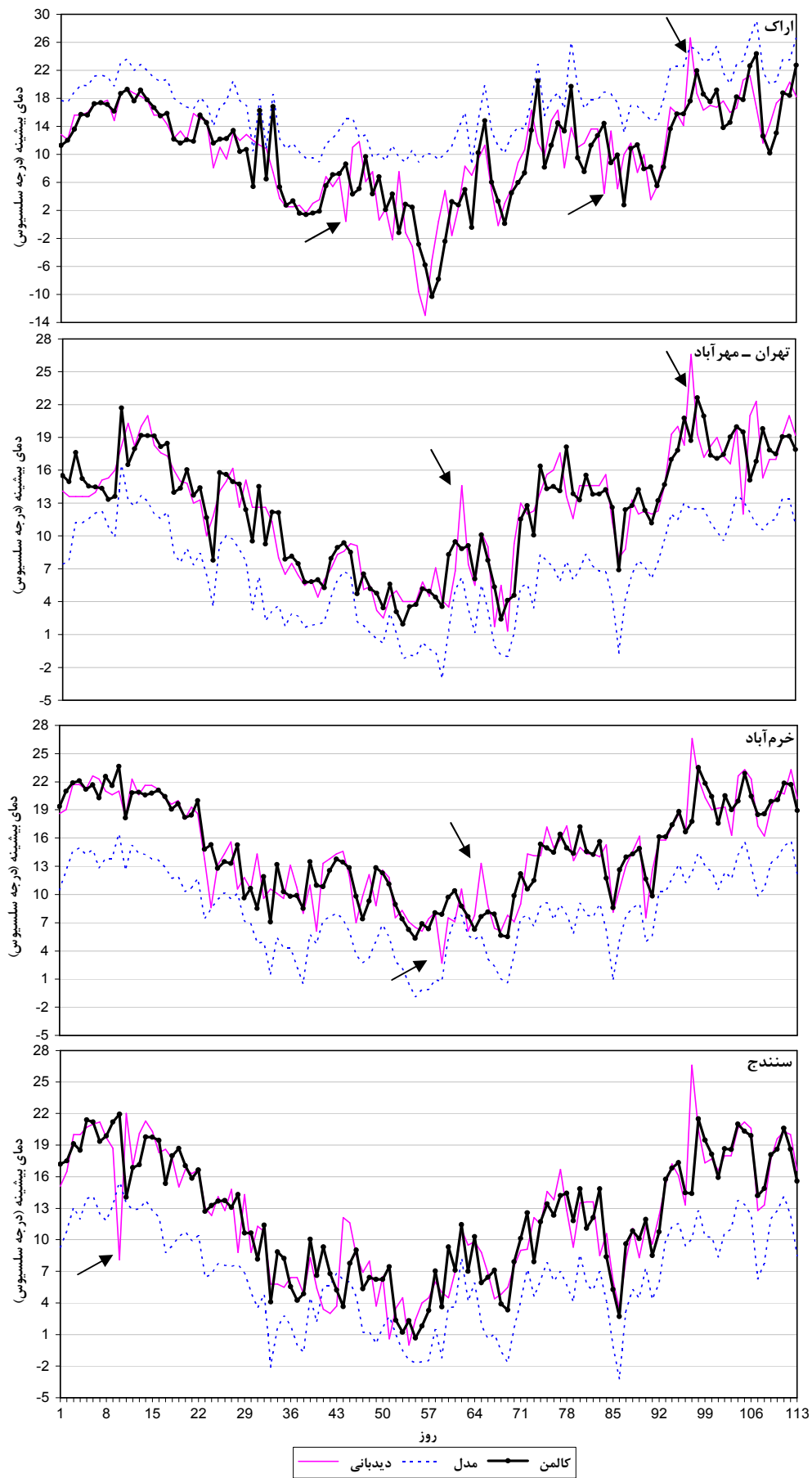
۱۶- وظیفه، احد، م. آزادی، م. مزرعه فراهانی، بررسی اثر تغییر تفکیک افقی مدل منطقه‌ای محدود MM5 در شبیه‌سازی یک سامانه کم‌فشار سینوپتیکی بر روی ایران، نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، شیراز، ایران، ۱۳۸۳.

جدول ۱ - امتیازهای آماری محاسبه شده برای دمای بیشینه در دو متری سطح زمین مربوط به چهار ایستگاه کشور

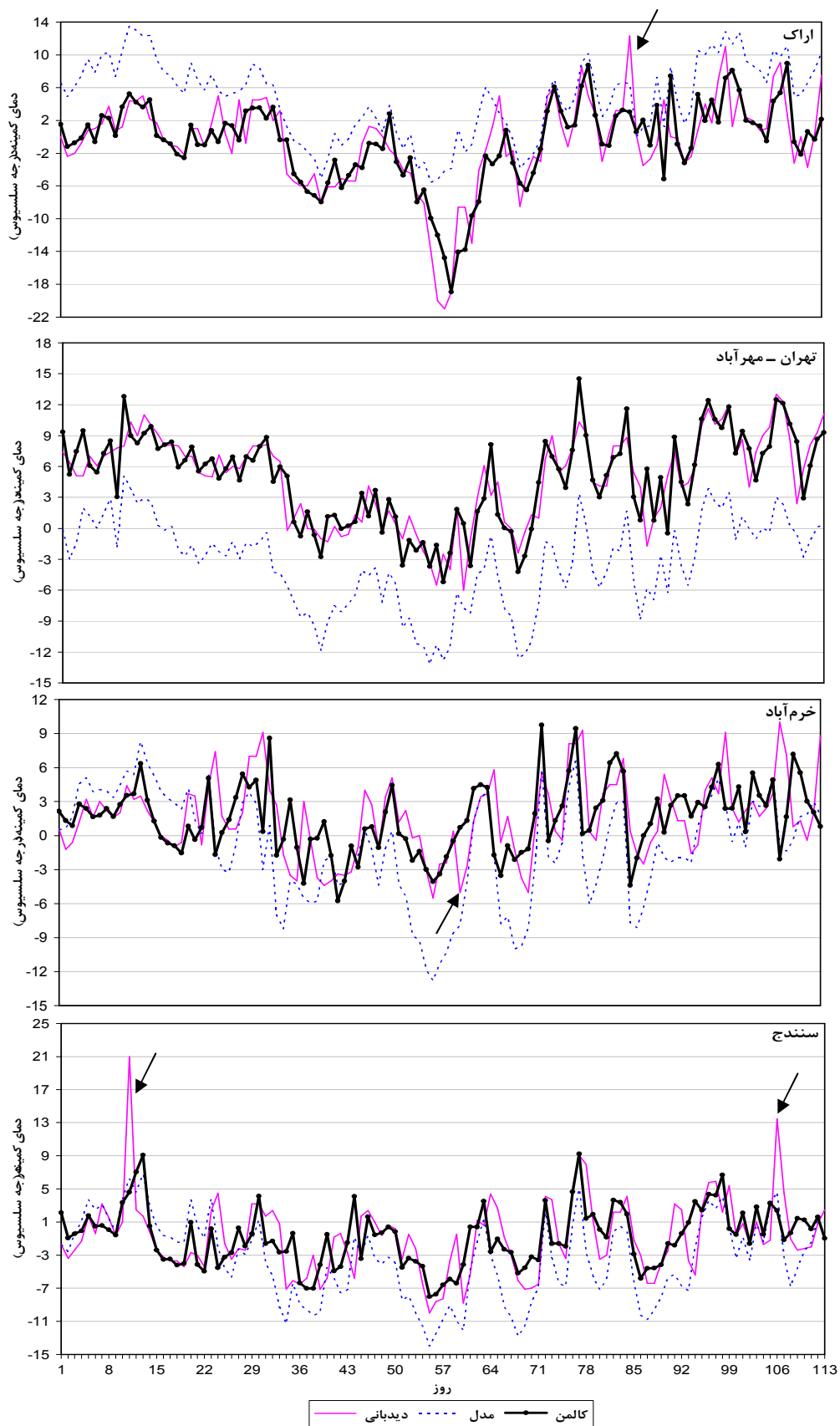
امتیاز مهارتی	احتمال پیش‌بینی موفق	ریشه مربعی میانگین مجذور خطا (RMSE)	انحراف از معیار خطای مطلق	انحراف از معیار خطا	خطای مطلق میانگین	خطای میانگین	امتیاز آماری		نام ایستگاه
							MM5	کالمن	
۰/۵۶	۰/۰۶	۷/۶۲	۳/۸۰	۳/۸۹	۶/۶۱	۶/۵۶	MM5	اراک	
	۰/۴۹	۳/۹۱	۲/۵۹	۳/۹۰	۲/۹۳	-۰/۰۱	کالمن		
۰/۶۷	۰/۰۶	۶/۱۶	۲/۳۶	۲/۴۲	۵/۶۸	-۵/۶۶	MM5	تهران - مهرآباد	
	۰/۶۵	۲/۴۴	۱/۵۷	۲/۴۴	۱/۸۷	۰/۰۰	کالمن		
۰/۷۳	۰/۰۶	۶/۵۷	۲/۲۱	۲/۲۳	۶/۱۹	-۶/۱۸	MM5	خرم‌آباد	
	۰/۶۶	۲/۲۷	۱/۵۳	۲/۲۷	۱/۶۸	۰/۰۲	کالمن		
۰/۶۷	۰/۰۴	۶/۲۲	۲/۱۳	۲/۸۴	۵/۸۵	-۵/۵۳	MM5	سنندج	
	۰/۶۸	۲/۹۲	۲/۱۹	۲/۹۳	۱/۹۴	۰/۰۱	کالمن		

جدول ۲ - امتیازهای آماری محاسبه شده برای دمای کمینه در دو متری سطح زمین مربوط به چهار ایستگاه کشور

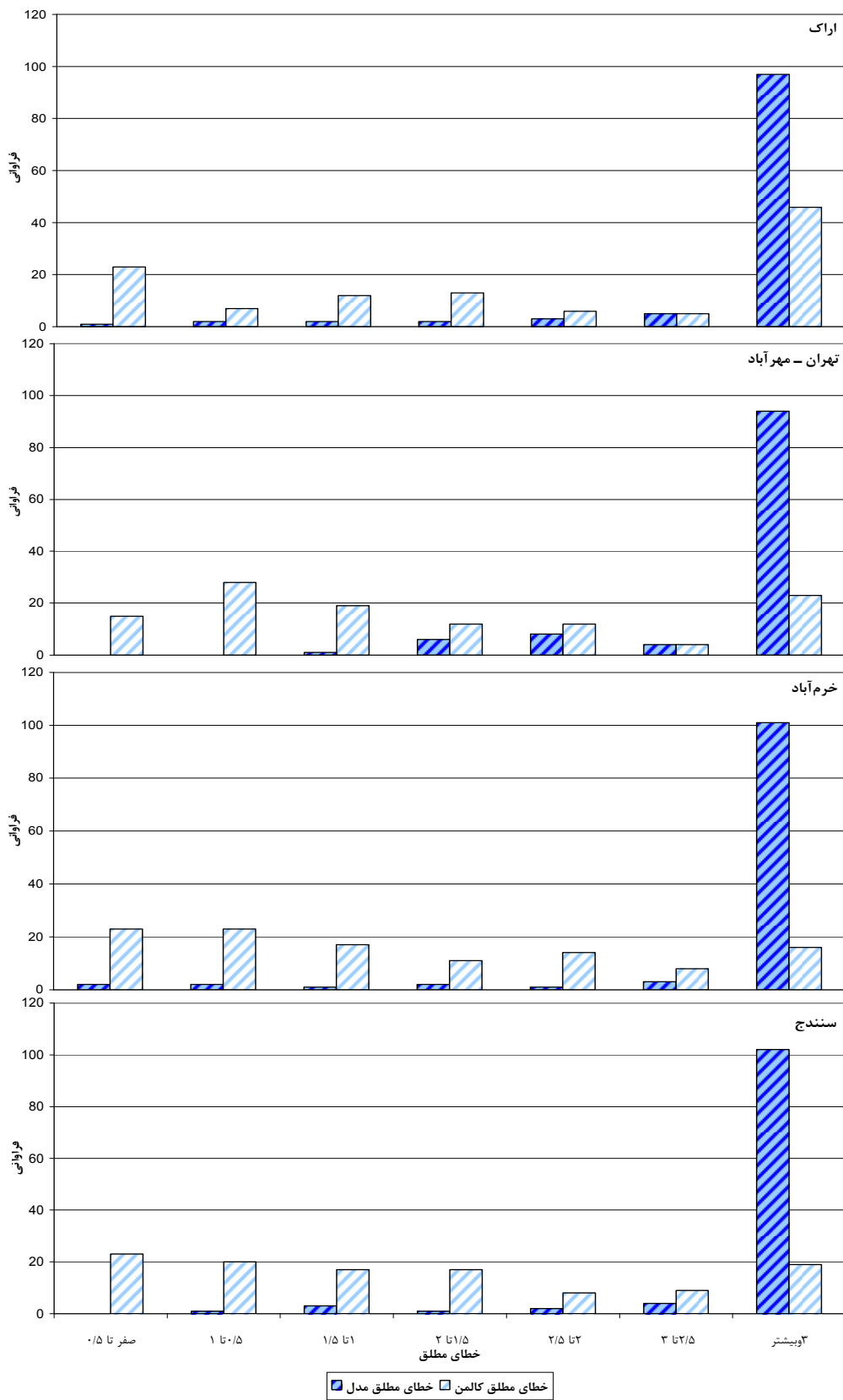
امتیاز مهارتی	احتمال پیش‌بینی موفق	ریشه مربعی میانگین مجذور خطا (RMSE)	انحراف از معیار خطای مطلق	انحراف از معیار خطا	خطای مطلق میانگین	خطای میانگین	امتیاز آماری		نام ایستگاه
							MM5	کالمن	
۰/۵۸	۰/۱۴	۶/۳۷	۳/۲۰	۳/۵۳	۵/۵۰	۵/۳۰	MM5	اراک	
	۰/۵۷	۳/۱۴	۲/۰۹	۳/۱۱	۲/۳۳	-۰/۰۱	کالمن		
۰/۷۹	۰/۰۱	۸/۴۹	۲/۰۸	۲/۰۸	۸/۲۴	-۸/۲۴	MM5	تهران - مهرآباد	
	۰/۶۶	۲/۲۸	۵/۱۱	۲/۲۹	۱/۷۲	۰/۰۱	کالمن		
۰/۳۵	۰/۳۶	۴/۷۷	۲/۹۵	۴/۰۶	۳/۷۵	-۲/۵۱	MM5	خرم‌آباد	
	۰/۵۲	۳/۳۱	۲/۲۳	۳/۳۲	۲/۴۴	-۰/۰۱	کالمن		
۰/۳۲	۰/۲۴	۴/۷۸	۲/۷۴	۳/۹۶	۳/۹۳	-۲/۷۰	MM5	سنندج	
	۰/۵۱	۳/۷۳	۲/۶۱	۳/۷۳	۲/۶۸	-۰/۰۵	کالمن		



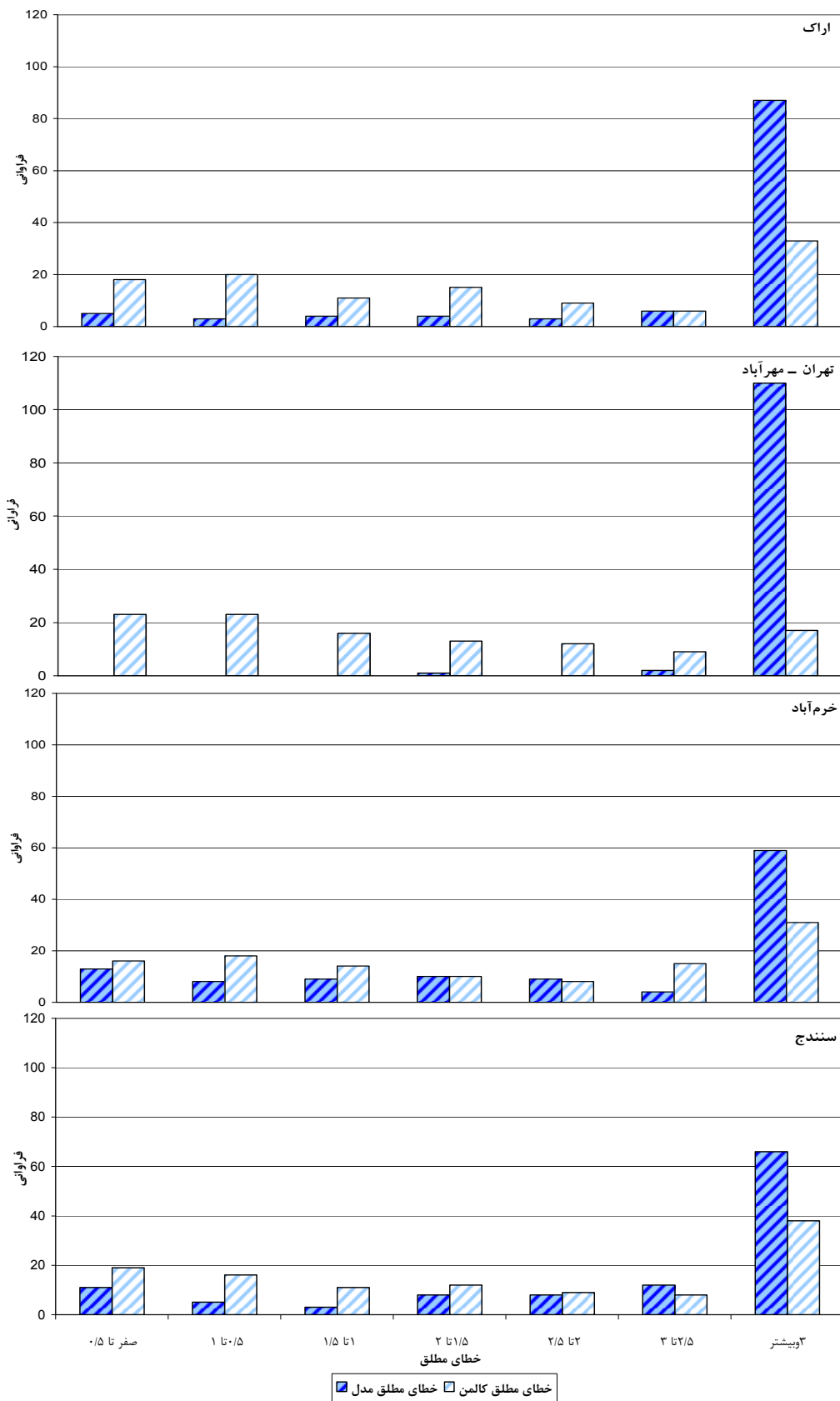
شکل ۱. مقایسه دمای بیشینه در دو متری سطح زمین بین خروجی مدل، مقدار دیدبانی و خروجی کالمن برای چهار ایستگاه ایران.



شکل ۲. مقایسه دمای کمینه در دو متری سطح زمین بین خروجی مدل ، مقدار دیدبانی و خروجی کالمن برای چهار ایستگاه ایران.



شکل ۳. مقایسه فراوانی خطای مطلق مدل و کالمن مربوط به دمای بیشینه دو متری سطح زمین برای چهار ایستگاه ایران.



شکل ۴. مقایسه فراوانی خطای مطلق مدل و کالمن مربوط به دمای کمینه دو متری سطح زمین برای چهار ایستگاه ایران.