

حساسیت‌سنجی شبیه‌سازی عددی دو رخداد مه در فرودگاه اردبیل به طرحواره‌های لایه مرزی سیاره‌ای با استفاده از مدل WRF

راضیه پهلوان^{۱*}، محمد مرادی^۲، سحر تاج‌بخش^۳، مجید آزادی^۲ و مهدی رهنما^۳

^۱ دانشجوی دکترای هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲ دانشیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۳ استادیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱)

چکیده

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی دو رخداد مه فرارفتی و تابشی در فرودگاه اردبیل در ژانویه ۲۰۱۵ با استفاده از برون‌داد مدل میان مقیاس WRF و الگوریتم دید SW99 برای پیش‌بینی دید افقی انجام شد. برای بررسی حساسیت پیش‌بینی مه به طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای (PBL)، از ۶ طرحواره‌ی ACM2، MYJ، YSU، MYNN2.5، MYNN3 و QNSE استفاده شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی این دو رخداد مه به فرآیندهای لایه مرزی سیاره‌ای حساس است. همچنین به دلیل ارتباط پیش‌بینی مه به کمیت‌های دما، دمای نقطه شبنم، نم نسبی و سرعت باد، حساسیت شبیه‌سازی این متغیرها نیز به طرحواره‌های PBL مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی مه فرارفتی با بیشتر طرحواره‌های PBL با موفقیت انجام شد و طرحواره‌های ACM2، YSU و MYNN2.5 عملکرد بهتری در شبیه‌سازی مه فرارفتی داشتند. طرحواره QNSE در شبیه‌سازی مه فرارفتی موفق نبود. در شبیه‌سازی مه تابشی، بیشتر طرحواره‌های PBL قادر به شبیه‌سازی نم نسبی مورد نیاز برای تشکیل مه در زمان رخداد مه نبودند و چند ساعت قبل از شروع رخداد مه تابشی، مدل WRF با بیشتر طرحواره‌ها کاهش دید ناشی از رخداد مه را شبیه‌سازی کرد. به طور کلی طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی دما، دمای نقطه شبنم، نم نسبی و سرعت باد داشتند.

واژه‌گان کلیدی: مدل WRF، مه فرارفتی، مه تابشی، حساسیت‌سنجی، طرحواره PBL

۱ مقدمه

پروازها و حوادث هوانوردی است. تأخیر و لغو پرواز به دلیل کاهش دید ناشی از مه در صنعت هوانوردی باعث خسارت صدها میلیون دلار می‌شود (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع، مه دومین عامل جوی است که فعالیت‌های هوانوردی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین فرودگاه اردبیل در شمال غرب ایران در ارتفاع ۱۳۱۵ متر از تراز دریا واقع شده است. با توجه به موقعیت ویژه‌ی توپوگرافی و قرار داشتن این فرودگاه در غرب دریای خزر،

مه پدیده‌ای است که در اثر تعلیق قطرات آب مایع و یا کریستال‌های یخ در نزدیک سطح زمین رخ می‌دهد، به طوری که دید افقی به کمتر از یک کیلومتر برسد (لستر، ۲۰۰۷). شرایط دید کم ناشی از مه باعث ایجاد خسارت در حمل و نقل هوایی، دریایی و زمینی می‌شود (برگوت و همکاران، ۲۰۰۷؛ گالتپ و همکاران، ۲۰۰۷a؛ فو و همکاران، ۲۰۱۰؛ استولاکسی و همکاران، ۲۰۱۲). مه یکی از عوامل مهم در تأخیر و یا لغو

پانزدهم ژانویه از روی ایران عبور کرده است. مرکز این سامانه با هم فشار ۱۰۳۲ هکتوپاسکال در روز چهاردهم ژانویه در شمال غرب ایران و غرب دریای خزر قرار گرفته و ایستگاه اردبیل که با دایره قرمز رنگ در شکل ۱-الف مشخص شده را در بر گرفته است. این مرکز پرفشار در روز پانزدهم ژانویه به شمال شرق ایران جابجا شده است. فشار ایستگاه اردبیل اگر چه هنوز تحت تأثیر پشته فشاری این سامانه قرار دارد، ولی کاهش یافته است (شکل ۱-ب). در روز چهاردهم جهت جریان از روی دریای خزر به سوی ایستگاه اردبیل است و در روز پانزدهم این جریان معکوس می شود. الگوی ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز که در شکل های ۲-الف و ب نشان داده شده است، هماهنگ با الگوی فشاری تراز متوسط دریا تغییر کرده است. این تغییر به گونه ای است که مرکز پر ارتفاع ۱۵۶۰ ژئوپتانسیل متر در روز چهاردهم بیشتر مناطق مختلف ایران از جمله شمال غرب و شمال کشور را تحت تأثیر قرار داده و در روز پانزدهم به سوی شرق جابه جا شده است.

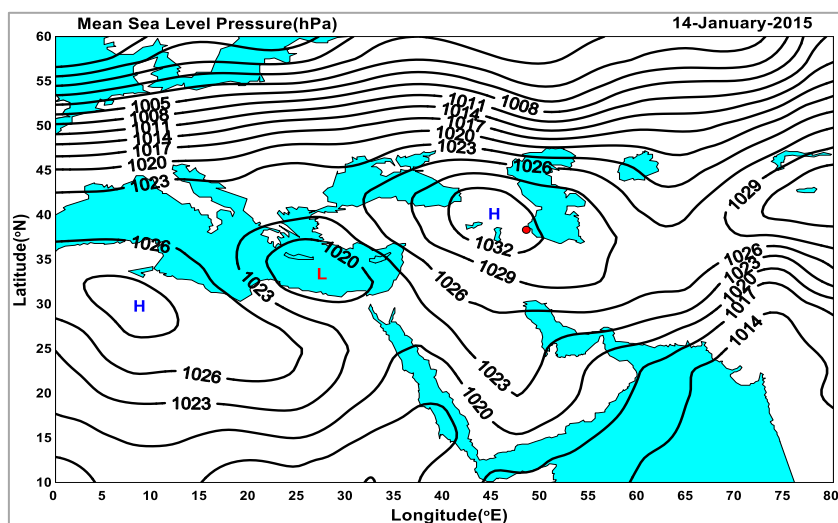
عوامل و شرایط لازم برای ایجاد مه وجود دارد. بر اساس مطالعات ۵ ساله صلاحی و محمدی (۱۳۹۰)، مه در فرودگاه اردبیل شامل انواع مه تابشی، جبهه ای و فرارفتی است. ترافیک هوایی در فرودگاه اردبیل اغلب توسط مه مختل می شود. دید کم ناشی از مه در این فرودگاه سبب تأخیر یا لغو پروازها شده و خسارت مالی زیادی را به دنبال دارد. پیش بینی دقیق مه در این فرودگاه برای ارائه خدمات حمل و نقل هوایی بهتر و کاهش لغو یا تأخیر پروازها و زیان اقتصادی بسیار مهم است. در این بخش ابتدا به طور خلاصه شرایط همدیدی موجود در زمان رخداد این دو مه و سپس پیکربندی های مدل WRF و الگوریتم دید مورد استفاده در پیش بینی این دو رخداد مه ارائه می شود. برای تحلیل همدیدی از داده های بازتحلیل (National NCEP Prediction Centers for Environmental Analysis) آدرس: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> استفاده شد. از بررسی الگوی فشار تراز متوسط دریا دیده می شود که از روز سیزدهم ژانویه ۲۰۱۵، ایران تحت تأثیر یک سامانه پرفشار بوده که به تدریج طی روزهای چهاردهم و

جدول ۱. نوع و زمان شروع و پایان رخداد های مه در فرودگاه اردبیل از ۱۳ تا ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵.

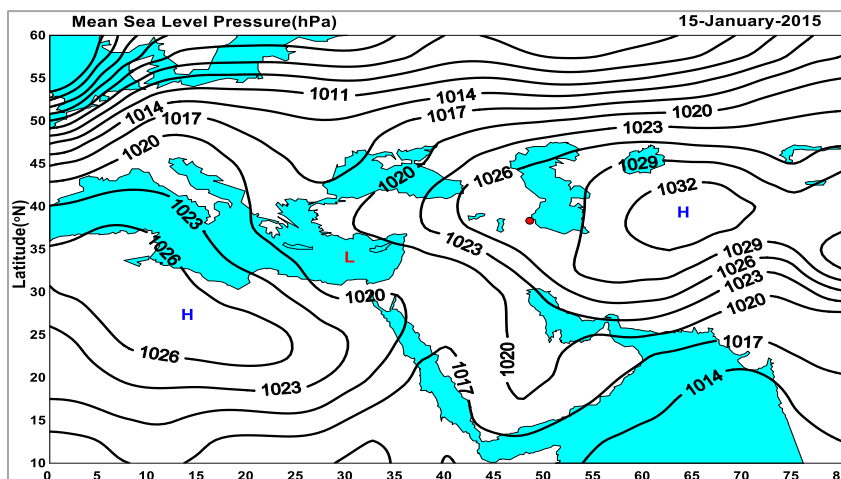
| شماره مه | نام فرودگاه | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | ساعت شروع مه (گرینویچ) | زمان پایان مه (گرینویچ) | نوع مه |
|----------|-------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------|
| ۱ | اردبیل | ۳۸/۳۳ | ۴۸/۴۲ | ساعت ۱۶ روز ۲۰۱۵/۰۱/۱۳ | ساعت ۰۶ روز ۲۰۱۵/۰۱/۱۴ | فرارفتی |
| ۲ | اردبیل | ۳۸/۳۳ | ۴۸/۴۲ | ساعت ۱۷ روز ۲۰۱۵/۰۱/۱۴ | ساعت ۰۰ روز ۲۰۱۵/۰۱/۱۵ | تابشی |

داده های دیدبانی فرودگاه، جهت باد در ساعت ۱۴ گرینویچ روز ۱۳ دسامبر، شرقی شده که باعث انتقال هوای بخش جنوبی پرفشار سرد روی منطقه و کاهش دما (در حد ۱۰ درجه) و رسیدن دما به دمای نقطه شبنم و تشکیل مه شده است. در این تحقیق برای شبیه سازی دو رخداد مه مورد مطالعه، از نسخه 3.9.1 مدل WRF با نداشت لمبرت استفاده شد. تفکیک افقی برای حوزه اول و دوم به ترتیب ۱۲ و ۴ کیلومتر انتخاب شد (شکل ۳). از نتایج آشیانه داخلی برای پیش بینی رخداد مه در این مطالعه استفاده شد. با توجه به اهمیت تفکیک قائم زیاد

از بررسی نم نسبی ترازهای زیرین جو دیده می شود که نم نسبی در ایستگاه تحت بررسی در روزهای ذکر شده بین ۷۰ تا ۹۰ درصد برآورد شده است (شکل های ۲-الف و ب). بررسی این حالت موردی نشان داد که وجود مرکز پرفشار و پشته آن در روی ایران و در نتیجه ماندگاری هوای سرد، نبود ابر، رخداد تابش شبانه زمین و نیز نم نسبی کافی در سطح زمین که در اثر جریان های شمالی بخش شرقی مرکز پرفشار به ایستگاه مورد مطالعه انتقال یافته است، شرایط مناسبی را برای ایجاد مه تابشی و فرارفتی در اردبیل فراهم کرده است. همچنین با توجه به



(الف)

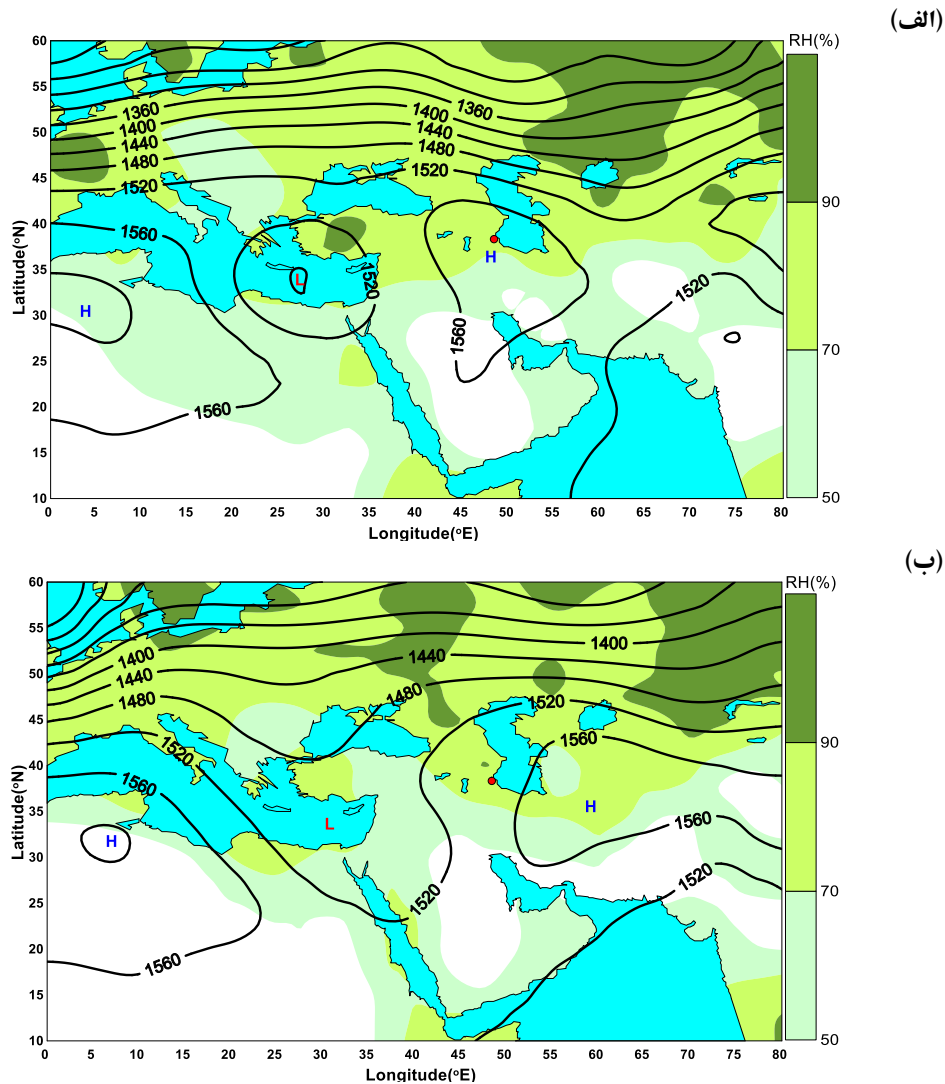


(ب)

شکل ۱- فشار تراز متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ الف) ۱۴ ژانویه و ب) ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵. فاصله هم فشارها ۳ هکتوپاسکال است.

تنظیم (Spin up) در نظر گرفته شد. شرایط اولیه و مرزی از سامانه پیش‌بینی جهانی (GFS) با تفکیک ۰/۵ درجه گرفته شد. با تغییر طرحواره PBL در پیکربندی‌های مدل WRF (همان‌طور که در جدول ۲ ارائه شده است)، شش پیکربندی متفاوت برای اجرا ایجاد شد. در این مطالعه از الگوریتم SW99 استوئلینگا و وارنر، (۱۹۹۹) برای تخمین دید افقی با استفاده از برودادهای مدل WRF برای تخمین دید WRF (معدلات ۱ و ۲) استفاده

برای حل فرآیندهای لایه مرزی (فیلیپ و همکاران، ۲۰۱۶؛ پهلوان و همکاران، ۱۳۹۹؛ کلژک و همکاران، ۲۰۱۴؛ تردیف، ۲۰۰۴)، شبیه به مطالعه رومن کسکان و همکاران (۲۰۱۹) و پهلوان و همکاران (۱۳۹۹)، ۱۱ تراز قائم در لایه ۲۰۰ متر نزدیک زمین و در مجموع ۳۲ تراز قائم سیگما در نظر گرفته شد. مدل WRF برای ۷۲ ساعت با شروع از ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۲ ژانویه ۲۰۱۵ اجرا شد و ۱۲ ساعت اول به عنوان زمان



شکل ۲. الگوی ارتفاع (ژئوپتانسیل متر) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و نم نسبی (درصد) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ الف) ۱۴ ژانویه و ب) ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵. فاصله پرندهای ارتفاع ۴۰ ژئوپتانسیل متر است.

از هوآب‌ها و یا هواویزها بستگی دارد (بر اساس غلظت هسته‌های چگالش ابر و نم نسبی). پس از محاسبه مقدار دید افقی به صورت ساعتی با اعمال الگوریتم دید SW99 روی برونداد مدل با هر یک از پیکربندی‌ها از ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۲ ژانویه ۲۰۱۵ تا ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵ (به مدت ۷۲ ساعت)، مقادیر دید افقی با مقادیر دید مشاهداتی به صورت ساعتی مقایسه شد

کردیم. این الگوریتم اثر خاموشی (extinction) نور ناشی از هوا و آب‌ها (hydrometeors) را در نظر می‌گیرد. که در آن β

$$VIS_{SW99} = -\ln(0.02)/\beta \quad (1)$$

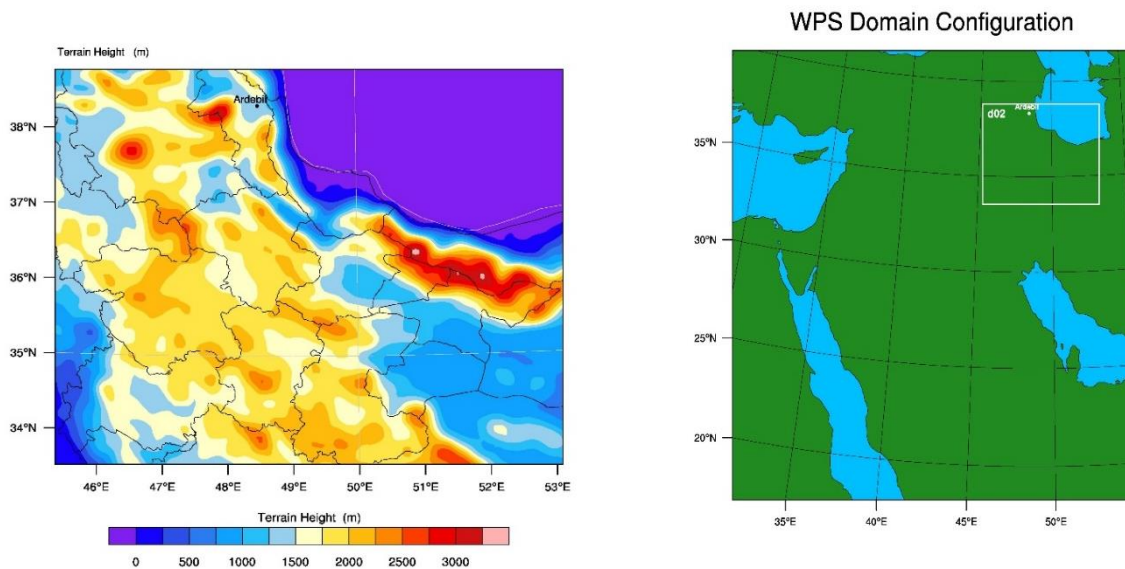
$$\beta = \beta_{cw} + \beta_{rw} + \beta_{ci} + \beta_{sn} \quad (2)$$

ضریب انقراض حجمی برای هر گونه‌ی آب، از جمله قطرات آب درون ابر، یخ، باران، برف است که به غلظت هر یک

آزمایشات حساسیت‌سنجی و نتایج

لایه مرزی پایین‌ترین بخش جو است که کمیت‌های فیزیکی در آن، آشفتگی زیاد و آمیختگی قائم را نشان می‌دهند. ویژگی‌های این لایه نقش مهمی در تشکیل و تکامل مه دارد. در این مطالعه حساسیت نتایج شبیه‌سازی مه به شش طرحواره‌ی YSU (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)، MYJ (یانچ، ۱۹۹۴)، (Asymmetric Convective Model, version 2) ACM2 (پلیم، ۲۰۰۷) YNN2.5(-) Melor-Yamada-Nakanishi.2.5- (ناکانیشی و نینو، ۲۰۰۴)، MYNN3 (ناکانیشی و نینو، ۲۰۰۶) و (Quasi-Normal Scale Elimination) QNSE (سوکوریانسکی و همکاران، ۲۰۰۵) بررسی شد. سایر تنظیمات فیزیکی مدل برای هر شش پیکربندی یکسان بوده و در جدول ۲ آمده است. طرحواره لایه سطحی متناسب با طرحواره PBL در نظر گرفته شد. در حالت کلی، طرحواره لایه سطحی به طرحواره Monin-Obukhov (مونین و ابوخوف، ۱۹۵۴) تنظیم شد ولی در زمانی که طرحواره‌های MYNN2.5، QNSE و

MYNN3 برای PBL به کار برده شد، به ترتیب از طرحواره‌های MYNN (ناکانیشی، ۲۰۰۱)، QNSE (سوکوریانسکی و همکاران، ۲۰۰۵) و MYNN برای طرحواره لایه سطحی استفاده شد. طرحواره‌های YSU و ACM2 طرحواره‌های بستار مرتبه اول هستند، در حالی که MYJ، MYNN2.5 و QNSE طرحواره‌های بستار مرتبه ۱/۵ انرژی جنبشی آشفته هستند. همچنین MYNN3 طرحواره بستار مرتبه دوم است. پس از اجرای مدل با شش پیکربندی و اعمال الگوریتم دید SW99 روی برونداد مدل، دید افقی در هر ساعت از اجرا به دست آمد. با توجه به شکل ۴ برای اولین رخداد مه از بین سه طرحواره MYJ، YSU و ACM2، طرحواره MYJ مدت زمان کمتری از مه را پیش‌بینی کرده و پس از چند ساعت از شروع مه، پیش‌بینی با این طرحواره خطا داشته است که با نتایج لین و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. با این وجود طرحواره QNSE در شبیه‌سازی مدت زمان رخداد مه ضعیف‌تر از طرحواره MYJ عمل کرده است.



شکل ۳. الف) دو آشیانه تو در تو که در شبیه‌سازی WRF با تفکیک افقی ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب برای آشیانه بیرونی و داخلی استفاده شد. ب) ناهمواری زمین (متر). فرودگاه اردبیل در شکل نشان داده شده است.

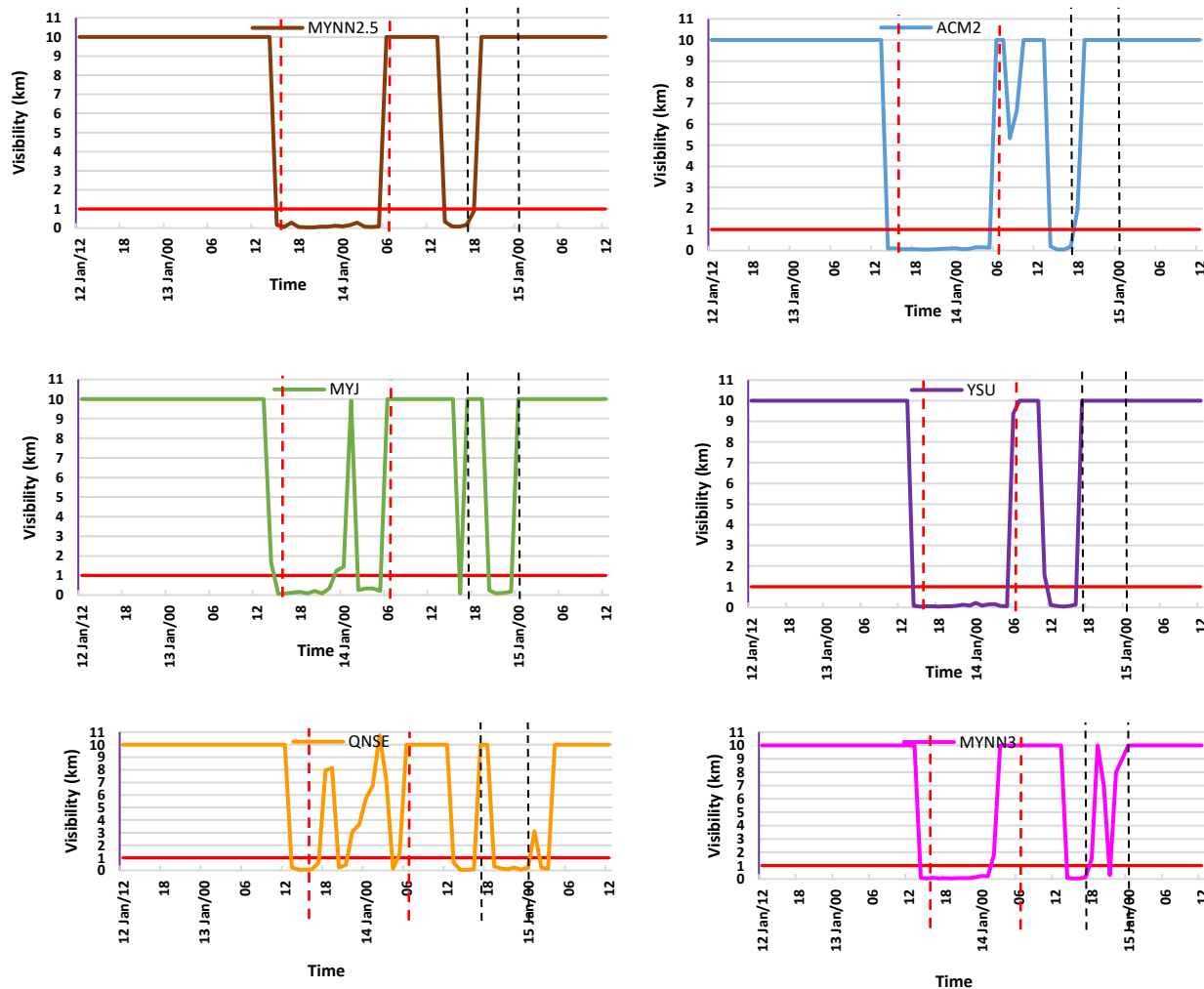
جدول ۲. پیکربندی های مدل WRF مورد استفاده در این مطالعه

| شماره | خرد فیزیک | لایه مرزی سیاره ای | تابش موج بلند | تابش موج کوتاه | سطح زمین | لایه سطحی |
|-------|------------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|
| ۱ | WSM6-class (Hong and Lim, 2006) | ACM2 (Pleim, 2007) | RRTM (Mlawer et al., 1997) | Dudhia (Dudhia, 1989) | NOAH LSM (Tewari et al., 2004) | Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) |
| ۲ | WSM6-class | MYNN2.5 (Nakanishi and Niino, 2004) | RRTMG | Dudhia | NOAH LSM | MYNN (Nakanishi, 2001) |
| ۳ | WSM6-class | QNSE (Sukoriansky et al., 2005) | RRTMG | Dudhia | NOAH LSM | QNSE (Sukoriansky et al., 2005) |
| ۴ | WSM6-class | YSU (Hong et al., 2006) | RRTMG | Dudhia | NOAH LSM | Monin-Obukhov |
| ۵ | WSM6-class | MYJ (Janjic, 1994) | RRTMG | Dudhia | NOAH LSM | Monin-Obukhov- Janjic (Janjic, 1996) |
| ۶ | WSM6-class | MYNN3 (Nakanishi and Niino, 2006) | RRTMG | Dudhia | NOAH LSM | MYNN (Nakanishi, 2001) |

را نیز در قبل از زمان رخداد مه دوم نشان داده است. برای بررسی بهتر، مقایسه شبیه سازی دما، دمای نقطه شبنم و نم نسبی در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین با شش پیکربندی ارائه شده در جدول ۲ با مدل WRF انجام شد. شکل های ۵-الف و ۵-ب نشان می دهند که دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع دو متری در زمان آغاز مه فرارفتی به تغییر طرحواره های PBL حساس هستند و در هنگام خاتمه مه فرارفتی، شبیه سازی ها به مشاهدات نزدیک بوده و به تغییر طرحواره های PBL حساس نیستند که با نتایج مطالعه لین و همکاران (۲۰۱۷) هم خوانی دارد.

همه طرحواره ها خاتمه زودتر رخداد اول مه را نسبت به دیدبانی نشان می دهند. این موضوع برای طرحواره MYNN3 بیشتر از بقیه طرحواره ها مشهود است. همچنین همه طرحواره ها آغاز زودتر رخداد مه را نسبت به دیدبانی نشان می دهند که این مورد برای طرحواره QNSE بیشتر مشهود است.

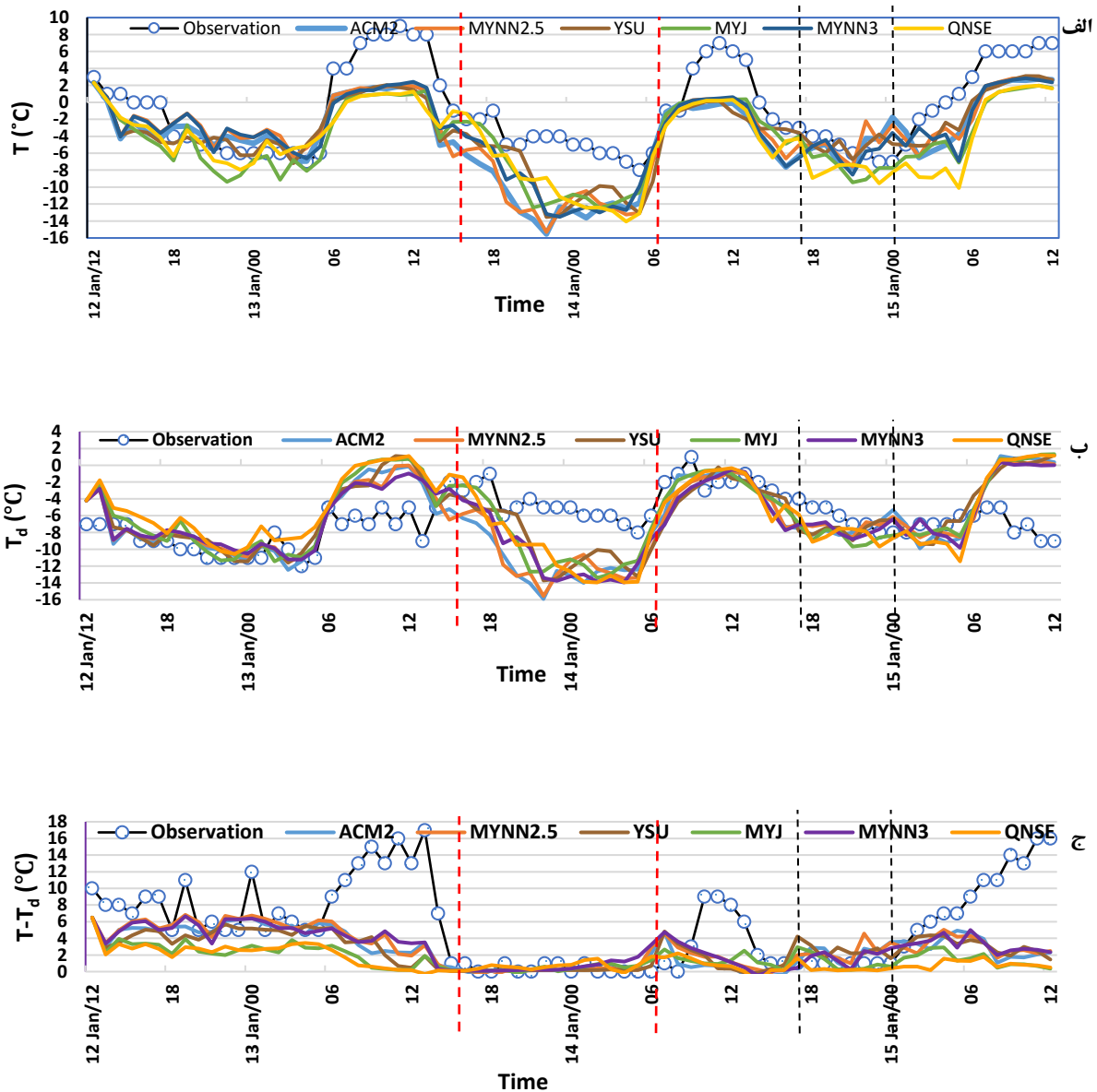
در مورد رخداد دوم مه که از نوع تابشی است، همه طرحواره ها به جز QNSE کاهش دید افقی ناشی از رخداد مه را چند ساعت زودتر شبیه سازی کرده اند. ولی طرحواره QNSE این کاهش دید افقی را در زمان رویداد مه ولی با مدت زمان کوتاه تر شبیه سازی کرده است. البته این طرحواره یک کاهش دید افقی



شکل ۴. سری زمانی دید افقی محاسبه شده بر حسب کیلومتر با استفاده از الگوریتم دید SW99 روی برون داد مدل WRF از ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۲ ژانویه تا ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵ در فرودگاه اردبیل با شش طرحواره PBL. برای نمایش دید افقی نامحدود در شکل، دید نامحدود ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. خط چین های قائم قرمز و مشکی به ترتیب زمان شروع و خاتمه مه اول و دوم را نشان می دهند (طبق جدول ۱). خط قرمز افقی نشان دهنده دید افقی یک کیلومتر است.

نسبت به طرحواره های دیگر عملکرد ضعیف تری در شبیه سازی دما و دمای نقطه شبنم از خود نشان می دهد. همچنین از بین سه طرحواره MYJ، YSU و ACM2، برای شبیه سازی دما و دمای نقطه شبنم، دو طرحواره YSU و ACM2 بهتر از طرحواره MYJ عمل می کنند که با نتایج مطالعه لین و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد.

همچنین دما و دمای نقطه شبنم در شروع و در طول مدت رخداد مه تابشی (دومین رخداد مه) به طرحواره های PBL حساس هستند و پس از اتمام رخداد مه، شبیه سازی همه طرحواره ها تقریباً با هم یکی می شود و البته از داده دیدبانی فاصله می گیرند. در واقع شکل گیری و توسعه مه تابشی به شرایط دینامیکی (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹). طرحواره QNSE



شکل ۵. سری زمانی (الف) دما، (ب) دمای نقطه شبنم و (ج) اختلاف دما و دمای نقطه شبنم شبیه سازی شده و دیدبانی متناظر در ارتفاع دو متری از سطح زمین بر حسب درجه سانتیگراد از ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۲ ژانویه تا ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵ در فرودگاه اردبیل با طرحواره های PBL متفاوت. خط چین های قائم قرمز و مشکی به ترتیب زمان شروع و خاتمه مه اول و دوم را نشان می دهند (طبق جدول ۱).

طرحواره های PBL دیده می شود. شبیه سازی $T-T_d$ با طرحواره های مختلف در زمان مه تابشی، دارای اریبی مثبت است. وجود این اریبی مثبت، به دلیل عدم توانایی مدل در شبیه سازی سرمایش تابشی واقعی مرتبط با شرایط مه تابشی در سطح زمین است (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹). در واقع

شکل ۵-ج اختلاف دما و دمای نقطه شبنم ($T-T_d$) را نشان می دهد. با توجه به شکل در زمان رخداد مه اول که از نوع فرارفتی است، طرحواره های مختلف به خوبی قادر به شبیه سازی اختلاف دما و دمای نقطه شبنم هستند ولی در زمان رخداد مه دوم که از نوع تابشی است، حساسیت شبیه سازی $T-T_d$ به

دیدبانی، از میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. MAE و RMSE از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (۴)$$

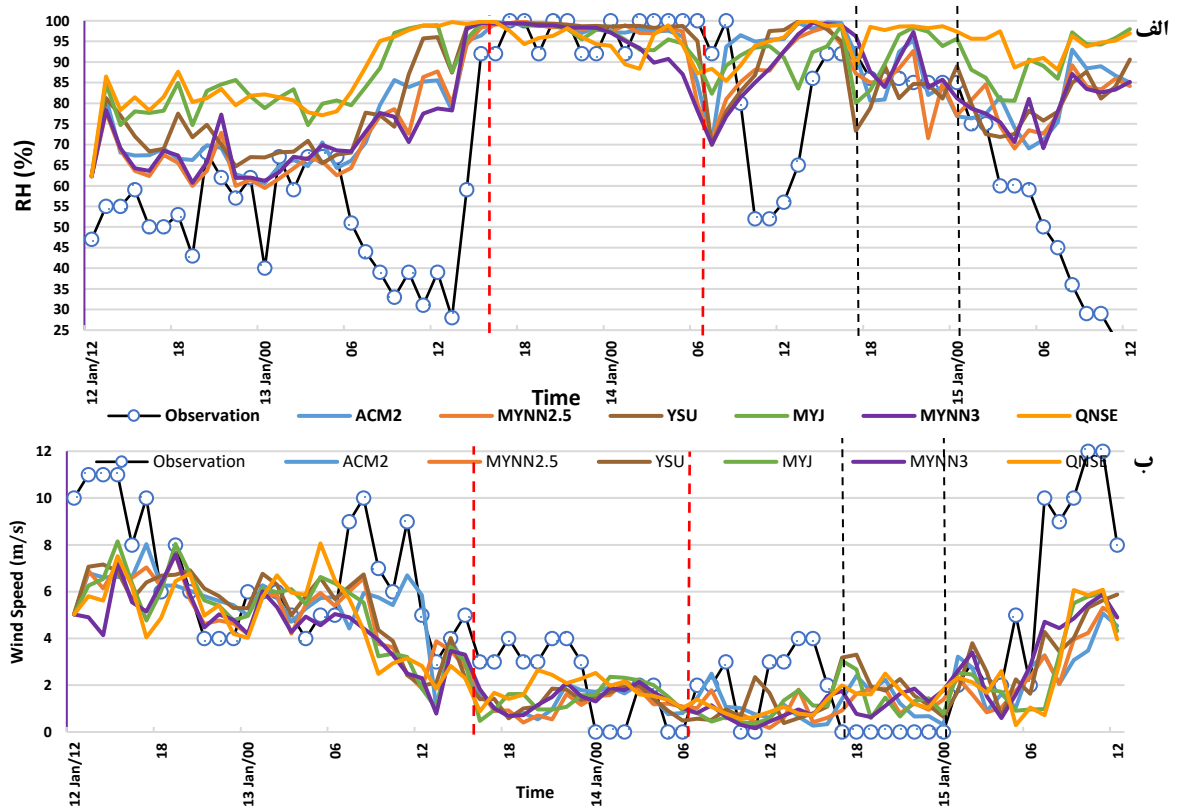
که در آن، M_i و O_i به ترتیب خروجی مدل و دیدبانی و مربوط به مولفه نام است و N تعداد جفت‌های مدل دیدبانی در ساعات مختلف شبیه‌سازی است. RMSE یکی از روش‌های آماری متداول برای اندازه‌گیری عملکرد شبیه‌سازی است که بیانگر انحراف میانگین مقدار شبیه‌سازی شده از مقدار مشاهداتی است. به طور کلی RMSE کوچکتر نشان دهنده دقت شبیه‌سازی بالاتر است. جدول ۴، مقادیر MAE و RMSE را برای T-Td، نم نسبی و سرعت باد شبیه‌سازی شده توسط مدل میان مقیاس WRF با شش طرحواره PBL را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴، طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی نم نسبی و T-Td داشته‌اند. در مورد شبیه‌سازی باد، طرحواره‌های MYNN2.5، QNSE و MYJ عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند دارد

۴ بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق حساسیت شبیه‌سازی یک مه فرارفتی و یک مه تابشی در ژانویه ۲۰۱۵ در فرودگاه اردبیل به شش طرحواره‌ی لایه مرزی MYJ، YSU، ACM2، MYNN2.5، MYNN3 و QNSE در مدل WRF مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور حساسیت شبیه‌سازی دید افقی (محاسبه شده با اعمال الگوریتم دید SW99 روی برون‌داد مدل) و همچنین حساسیت شبیه‌سازی نم نسبی در ارتفاع دو متری، سرعت باد در ارتفاع ۱۰

بیشتر طرحواره‌ها در ساعاتی قبل از شروع مه دوم، مقدار صفر یا نزدیک به صفر را برای T-Td شبیه‌سازی کرده‌اند. همچنین در ساعات قبل از شروع مه اول و پس از پایان مه دوم حساسیت شبیه‌سازی T-Td به طرحواره PBL زیاد است. طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی اختلاف دما و دمای نقطه شبنم دارند. شکل ۶- الف سری زمانی نم نسبی شبیه‌سازی شده و دیدبانی متناظر در ارتفاع دو متری از سطح زمین (بر حسب درصد) را با طرحواره‌های مختلف PBL نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی نم نسبی دارند. همچنین همه طرحواره‌ها به جز طرحواره MYJ در زمان رخداد مه اول و در ساعاتی قبل از شروع مه دوم، مقدار ۱۰۰ درصد یا نزدیک به ۱۰۰ درصد را برای نم نسبی شبیه‌سازی کرده‌اند. به عبارت دیگر همه طرحواره‌ها به جز MYJ قادر به شبیه‌سازی اولین رخداد مه بوده و دومین رخداد مه را نیز زودتر شبیه‌سازی کرده‌اند. همچنین در ساعات قبل از شروع مه اول و پس از پایان مه دوم حساسیت شبیه‌سازی نم نسبی به طرحواره PBL زیاد است.

شکل ۶-ب، سری زمانی سرعت باد شبیه‌سازی شده و دیدبانی متناظر در ارتفاع ده متری از سطح زمین (بر حسب متر بر ثانیه) را با طرحواره‌های مختلف PBL نشان می‌دهد. طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی سرعت باد دارند که با نتایج محمدپور و همکاران (۱۳۹۴) همخوانی دارد. همچنین غیر از زمان رخداد مه اول، در بقیه زمان‌ها شبیه‌سازی سرعت باد به طرحواره PBL حساس است. در ساعات آغازین و ابتدایی رخداد مه اول نیز شبیه‌سازی سرعت باد با دیدبانی اختلاف زیادی برای برآورد میزان خطای شبیه‌سازی T-Td، نم نسبی و سرعت باد توسط مدل میان مقیاس WRF با شش طرحواره PBL در مقایسه با مقادیر



شکل ۶. سری زمانی (الف) نم نسبی بر حسب درصد و (ب) سرعت باد شبیه سازی شده و دیدبانی مناظر در ارتفاع ده متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه از ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۲ ژانویه تا ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۱۵ ژانویه ۲۰۱۵ در فرودگاه اردبیل با طرحواره های PBL متفاوت. خط چین های قائم قرمز و مشکی به ترتیب زمان شروع و خاتمه مه اول و دوم را نشان می دهند (طبق جدول ۱).

جدول ۴. مقادیر MAE و RMSE برای T-Td، نم نسبی و سرعت باد شبیه سازی شده توسط مدل میان مقیاس WRF با شش طرحواره PBL

| ACM2 | MYNN2.5 | QNSE | YSU | MYJ | MYNN3 | PBL طرحواره |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | | | | | | نوع متغیر و شاخص خطا |
| ۳/۷۴ | ۳/۶۰ | ۴/۷۱ | ۳/۸۲ | ۴/۴۶ | ۳/۵۷ | MAE (T-Td) |
| ۵/۵۴ | ۵/۳۲ | ۶/۶۳ | ۵/۷۰ | ۶/۳۸ | ۵/۲۱ | RMSE (T-Td) |
| ۱۹/۰۳ | ۱۸/۱۷ | ۲۷/۴۹ | ۱۹/۶۹ | ۲۵/۲۶ | ۱۸/۷۳ | MAE (RH) |
| ۲۵/۶۹ | ۲۴/۲۹ | ۳۲/۸۴ | ۲۶/۶۱ | ۳۱/۱۸ | ۲۳/۹۵ | RMSE (RH) |
| ۱/۶۷ | ۱/۸۴ | ۱/۷۰ | ۱/۵۸ | ۱/۷۸ | ۱/۶۱ | MAE (Wind) |
| ۳/۵۶ | ۴/۰۸ | ۳/۷۲ | ۳/۱۲ | ۳/۹۲ | ۳/۲۲ | RMSE (Wind) |

متری، دما، دمای نقطه شبنم و اختلاف آنها در ارتفاع دو متری به عنوان شاخص‌هایی برای شبیه‌سازی مه بررسی شدند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دید افقی در زمان رخداد مه فرارفتی توسط بیشتر طرحواره‌های PBL با موفقیت انجام شد. طرحواره‌های ACM2، YSU و MYNN2.5 عملکرد بهتری در شبیه‌سازی مه فرارفتی داشتند. طرحواره QNSE در شبیه‌سازی دید افقی در زمان مه فرارفتی موفق نبود. شبیه‌سازی دید افقی در زمان رخداد مه تابشی توسط بیشتر طرحواره‌های PBL موفق نبود و در واقع بیشتر طرحواره‌های PBL، رخداد مه تابشی را زودتر از زمان دیدبانی این مه تابشی شبیه‌سازی کردند. مقادیر پیش‌بینی دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع دو متری در زمان شروع مه فرارفتی به تغییر طرحواره‌های PBL حساس بودند و در هنگام از بین رفتن مه فرارفتی شبیه‌سازی با بیشتر طرحواره‌های PBL مورد مطالعه با داده‌های مشاهداتی نزدیک بود. در واقع دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع دو متری شبیه‌سازی شده به تغییر طرحواره‌های PBL حساس نبودند که با نتایج مطالعه لین و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. در زمان رخداد مه تابشی، حساسیت شبیه‌سازی T-Td به طرحواره‌های PBL دیده شد. شبیه‌سازی T-Td در زمان رخداد مه تابشی دارای ارزیابی مثبت است که به دلیل عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی سرمایش تابشی واقعی مرتبط با شرایط مه تابشی در سطح زمین است (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به شاخص‌های MAE و RMSE، طرحواره‌های QNSE و MYJ نسبت به طرحواره‌های دیگر عملکرد ضعیف‌تری در شبیه‌سازی T-Td و نم نسبی داشتند. در مورد شبیه‌سازی باد، طرحواره‌های QNSE، MYNN2.5 و MYJ عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند.

علی‌رغم این که نتیجه‌گیری‌های این مطالعه تنها بر اساس دو رخداد مه است، نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد انتخاب طرحواره PBL مناسب در یک مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا برای پیش‌بینی موفقیت آمیز رخداد مه مهم است. عدم قطعیت

در پارامتری سازی فیزیکی مدل می‌تواند نقشی اساسی در پیش‌بینی عددی مه داشته باشد. بنابراین استفاده از سامانه پیش‌بینی همدادی (به عنوان مثال، ژو و دو، ۲۰۱۰ و راپرسون، ۲۰۱۲) می‌تواند روش خوبی برای بهبود پیش‌بینی مه باشد.

۵ منابع

پهلوان، ر.، مرادی، م.، تاج بخش، س.، آزادی، م.، رهنما، م.، ۱۳۹۹، پیش‌بینی عددی چند رخداد مه تابشی و CBL با استفاده از مدل WRF روی برخی مناطق ایران: مطالعه موردی، ۲۷ تا ۳۱ دسامبر سال ۲۰۱۵، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۶۱-۵۸۲.

صلاحی، ب.، محمدی، س.، ۱۳۹۰، تحلیل همدید و آماری مه‌های فرودگاه اردبیل و ارائه‌ی ساعات مناسب پروازی: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۷، ۶۹-۹۲.

لایقی، ب.، قادر، س.، علی اکبری بیدختی، ع.، آزادی، م.، ۱۳۹۶، حساسیت‌سنجی شبیه‌سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱، ۱-۱۹.

محمدپورینجاه، م.، ملکوتی، ح.، بهمنی جلالی، ه.، ۱۳۹۴، حساسیت‌سنجی مدل پیش‌بینی و تحقیقات جوی WRF به پارامترسازی‌های لایه مرزی به منظور مطالعه انرژی باد در منطقه جاسک: شانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، کرمانشاه، دانشگاه رازی.

Anderson, J. L., 1996, Selection of initial conditions for ensemble forecasts in a simple perfect model framework: *Journal of Atmospheric Science*, **53**, 22-36.

Bang, C. H., Lee, J. W. and Hong, S.Y., 2009, Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model: *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **24**, 92-101.

Bari, D., Bergot, T. and El Khelifi, M., 2015, Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1894-1905, doi: 10.1002/qj.2494.

- Golding, B. W., 1993: A study of the influence of terrain on fog development. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2529–2541, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2529:ASOTIO>2.0.CO;2.
- Guedalia, D. and Bergot, T., 1994, Numerical forecasting of radiation fog. Part II: A comparison of model simulation with several observed fog events: *Monthly Weather Review*, **122**, 1231–1246.
- Gultepe, I., Muller, M.D. and Boybeyi, Z., 2006, A new warm fog parameterization scheme for numerical weather prediction models: *Journal of Applied Meteorology*, **45**, 1469–1480.
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S. C., et al., 2007a, Fog research: A review of past achievements and future perspectives: *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1121–1159, doi:10.1007/s00024-007-0211-x.
- Gultepe, I., Pagowski, M. and Reid, J., 2007b, Using surface data to validate a satellite based fog detection scheme: *Weather and Forecasting*, **22**, 444–456.
- Gultepe, I., Pearson, G., Milbrandt, J., Hansen, B., Platnick, S., Taylor, P., Gordon, M., Oakley, J. and Cober, S., 2009, The Fog Remote Sensing and Modeling Field Project. *Bulletin of The American Meteorological Society*, **90**, 341–359.
- Gultepe, I. and Milbrandt, J. A., 2010, Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility: *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 36–46, doi: 10.1175/2009JAMC1927.1.
- Gultepe, I., Zhou, B., Milbrandt, J., Bott, A., Li, Y., Heymsfield, A.J., Ferrier, B., Ware, R., Pavolonis, M., Kuhn, T., Gurka, J., Liu, P. and Cermak, J., 2015, A review on ice fog measurements and modeling: *Atmospheric Research*, **151**, 2–19. 10.1016/j.atmosres.2014.04.014
- Gultepe, I., Milbrandt, J.A., Zhou, B., 2017, Marine Fog: A Review on Microphysics and Visibility Prediction. In Koračin D. and Dorman C. Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations, Modeling, and Forecasting. Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45229-6_7
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, S., Gharabaghi, B., Feltz, W., Temimi, M., Dimri, A.P., Dietz, S., França, G., Almeida, M., Albuquerque, F., Pu, Z., Kneringer, P. and Thobois, L., 2019, A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology: *Pure and Applied Geophysics*. **176**. 1869–1921. 10.1007/s00024-019-02168-6.
- Hong, S.Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment
- Bieringer, P., Donovan, M., Robasky, F., Clark, D. and Hurst, J., 2006, A characterization of NWP ceiling and visibility forecasts for the terminal airspace: *12th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*.
- Bergot, T. and Guedalia, D., 1994, Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests: *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1218–1230, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122,1218:NFORFP.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122,1218:NFORFP.2.0.CO;2).
- Bergot, T., Terradellas, E., Cuxart, J., Mira, A., Liechti, O., Mueller, M. and Nielsen, N.W., 2007, Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog: *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 504–521, <https://doi.org/10.1175/JAM2475.1>.
- Bott, A., and Trautmann, T., 2002, PAFOG—A new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds: *Atmos. Res.*, **64**, 191–203, doi: 10.1016/S0169-8095(02)00091-1.
- Clark, P.A. and Hopwood, W.P., 2001, One-dimensional site-specific forecasting of radiation fog. Part I: Model formulation and idealized sensitivity studies: *Meteor. Appl.*, **8**, 279–286, <https://doi.org/10.1017/S1350482701003036>.
- Creighton, G., Kuchera, E., Adams-Selin, R. et al., 2014, AFWA Diagnostics in WRF. [Accessed 10 July 2017 at http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/AFWA_Diagnostics_in_WRF.pdf].
- Doran, J. A., Roehr, P. J., Beberwyk, D. J., et al., 1999, The MM5 at the Air Force Weather Agency—New products to support military operations: *The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, NOAA/NWS, Dallas, Texas.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model: *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077–3107, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Fernando, H., Gultepe, I., Dorman, C., Pardyjak, E., Wang, Q., Hoch, S., Richter, D., Creegan, E., Gabersek, S., Bullock, T., Hocut, C., Chang, R., Alappattu, D., Dimitrova, R., Flagg, D., Grachev, A., Krishnamurthy, R., Singh, D., Lozovatsky, I. and Fernando, H., 2020, C-FOG: Life of Coastal Fog: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **10.1175/BAMS-D-19-0070.1**.
- Fu, G., Li, P. Y., Crompton, J. G., et al., 2010, An observational and modeling study of a sea fog event over the Yellow Sea on 1 August 2003: *Meteor. Atmos. Phys.*, **107**, 149–159, doi:10.1007/s00703-010-0073-0.

- physics: Its design and verification: *Boundary-Layer Meteorol.*, **112**, 1–31. doi:10.1023/B:BOUN.0000020164.04146.98.
- Nakanishi, M. and Niino, H., 2006, An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog: *Bound.Layer Meteor.*, **119**, 397–407, doi:10.1007/s10546-005-9030-8.
- Philip, A., Bergot, T., Bouteloup, Y. and Bouyssel, F., 2016, The impact of vertical resolution on fog forecasting in the kilometeric-scale model AROME: A case study and statistics: *Weather and Forecasting*, **31**, 1655-1671, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0074.1>.
- Pithani, P., Ghude, S., Prabha, T., Karipot, A., Hazra, A., Kulkarni, R., Chowdhuri, S., Resmi, E.A., Konwar, M., Murugavel, P., Safai, P., Chate, D., Tiwari, Y., Jenamani, R. and Rajeevan, M., 2019a, WRF model sensitivity to choice of PBL and microphysics parameterization for an advection fog event at Barkachha, rural site in the Indo-Gangetic basin, India: *Theoretical and Applied Climatology*. **136**, 1099–1113, <https://doi.org/10.1007/S00704-018-2530-5>.
- Pithani, P., Ghude, S., Naidu, C.V., Kulkarni, R., Steeneveld, G.J., Sharma, A., Prabha, T., Chate, D., Gultepe, I., Jenamani, R.K. and Rajeevan, M., 2019b, WRF model Prediction of a dense fog event occurred during Winter Fog Experiment (WIFEX): *Pure and Applied Geophysics*. **176**, 1827-1846, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2053-0>.
- Pleim, J.E., 2007, A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1383–1395, <https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>
- Rémy, S., Pannekoucke, O., Bergot, T. et al., 2012, Adaptation of a particle filtering method for data assimilation in a 1D numerical model used for fog forecasting: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 536–551, doi: 10.1002/qj.v138.663.
- Román-Cascón, C., Yague, C., Sastre, M., Maqueda, G., Salamanca, F. and Viana, S., 2012, Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau: *Adv. Sci. Res.*, **8**, 11–18, <https://doi.org/10.5194/asr-8-11-2012>.
- Román - Cascón, C., Steeneveld, G.J., Yagüe, C., Sastre, M., Arrillaga, J.A. and Maqueda, G., 2016, Forecasting radiation fog at climatologically contrasting sites: evaluation of statistical methods and WRF: *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **142**(695), 1048–1063.
- Roman-Cascón, C., Yagüe, C., Steeneveld, G. J., Morales, G., Arrillaga, J.A., Sastre, M., Maqueda, G., 2019, Radiation and cloud-base lowering fog of entrainment processes: *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341, <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hong, S.-Y. and Lim, J.-O. J., 2006, The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) : *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129–151.
- Janjic, Z.I., 1994, The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes: *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927–945, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122%3c0927:TSMECM%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122%3c0927:TSMECM%3e2.0.CO;2)
- Jones, R.H., 1965). Optimal estimation of initial conditions for numerical prediction. *Journal of Atmospheric Science*, **22**, 658–663.
- Kleczek, M.A., Steeneveld, G.J. and Holtslag, A.A.M., 2014, Evaluation of the weather research and forecasting mesoscale model for GABLS3: Impact of boundarylayer schemes, boundary conditions and spin-up: *Boundary-Layer Meteorology*, **152**, 213–243, <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9925-3>.
- Lester, P., 2007, Aviation weather: *Jeppesen Pub. U.S.A.*
- Li, Y. P. and Zheng, Y. X., 2015, Analysis of atmospheric turbulence in the upper layers of sea fog: *Chinese J. Oceanol. Limnol.*, **33**, 809–818, doi: 10.1007/s00343-015-4030-0.
- Lin, C.-Y., Zhang, Z., Pu, Z. and Wang, F., 2017, Numerical simulations of an advection fog event over the Shanghai Pudong Airport with the WRF model: *Journal of Meteorological Research*, **31**, 874–889.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. and Clough, S.A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663–16682, <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. and Clough, S.A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663–16682, <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.
- Monin, A. S., and Obukhov, A.M.F., 1954, Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere: *Contribution of Geophysical Institute of the Academy of Sciences of the USSR*, **151**, 163–187.
- Nakanishi, M., 2001, Improvement of the Mellor–Yamada Turbulence Closure Model based on large-eddy simulation data. *Boundary-Layer Meteor.* **99**, 349–378.
- Nakanishi, M. and Niino, H., 2004, An improved Mellor–Yamada level-3model with condensation

- weather prediction model forced with a single profile: *Meteor. Appl.*, **16**, 129–141, doi: 10.1002/met.v16:2.
- Tardif, R., 2004, On the impact of vertical resolution in the numerical forecasting of fog. *Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*.
- Tardif, R., 2007, The impact of vertical resolution in the explicit numerical forecasting of radiation fog: A case study: *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1221–1240, doi: 10.1007/s00024-007-0216-5.
- Tardif, R. and Rasmussen, R.M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the New York City region: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**, 1141–1168, <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>.
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca. R.H., 2004, Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model: *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, pp. 11–15.
- Van der Velde, I.R., Steeneveld, G.J., Schreur, B.G.J.W. and Holtslag, A.A.M., 2010, Modeling and Forecasting the Onset and Duration of Severe Radiation Fog under Frost Conditions: *Monthly Weather Review*, **138(11)**, 4237–4253, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3427.1>
- Von Glasow, R. and Bott, A., 1999, Interaction of radiation fog with tall vegetation: *Atmos. Environ.*, **33**, 1333–1346, doi:10.1016/S1352-2310(98)00372-0.
- Wilkinson, J.M., Porson, A.N., Bornemann, F.J., Weeks, M., Field, P.R. and Lock. A.P., 2013, Improved microphysical parametrization of drizzle and fog for operational forecasting using the Met Office Unified Model: *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **139(671)**, 488–500.
- Zhou, B. and Du, J., 2010, Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system: *Weather Forecasting*, **25**, 303–322.
- events: Observational analysis and evaluation of WRF and HARMONIE: *Atmospheric Research*, **229**, 190–207.
- Roquelaure, S. and Bergot, T., 2007, Seasonal sensitivity on COBEL-ISBA local forecast system for fog and low clouds: *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 1283–1301.
- Ryerson, W.R., 2012, Toward improving short-range fog prediction in data-denied areas using the Air Force Weather Agency mesoscale ensemble: *Ph.D. thesis, Naval Postgraduate School*, 225 pp. [Available online at <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA567345>.]
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3; NCAR Tech. Note (NCAR/TN-475+STR). *National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA*; p. 125.
- Steeneveld, G.J., Ronda, R. J. and Holtslag, A.A.M., 2015, The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models: *Bound. Layer Meteor.*, **154(2)**, 265–289, <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9973-8>.
- Stoelinga, M.T. and Warner T.T., 1999, Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event: *J. Appl. Meteor.*, **38**, 385–404, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2).
- Stolaki, S., Pytharoulis, I. and Karacostas, T., 2012, A study of fog characteristics using a coupled WRF–COBEL model over Thessaloniki airport, Greece: *Pure Appl. Geophys.*, **169**, 961–981, doi: 10.1007/s00024-011-0393-0.
- Sukoriansky, S., Galperin, B. and Perov, V., 2005, Application of a new spectral model of stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice: *Bound.-Layer Meteor.*, **117**, 231–257, <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- Tang, Y. M., Capon, R., Forbes, R., et al., 2009, Fog prediction using a very high resolution numerical