

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

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

۱. دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲. دانشیار، پژوهشگاه هوشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳. استادیار، پژوهشگاه هوشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۱/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۹/۷/۸)

چکیده

در این مطالعه رخداد‌های مه تابشی و مه ناشی از کاهش ارتفاع کف ابر موسوم به مه CBL (Cloud-Base Lowering) از ۲۷ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۵ که در ایستگاه‌های هواشناسی فرودگاه‌های ارومیه، اراک، بوشهر، زاهدان، همدان و شهرکرد ثبت شده است، با استفاده از مدل میان مقیاس WRF شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، مدل میان مقیاس WRF با ۵ پیکربندی متفاوت و ۲۸ تراز قائم اجرا شد. سپس با به‌کارگیری چهار الگوریتم محاسبه دید افقی شامل SW99، FSL، G2009 و RUC روی پرونداد مدل، دید افقی محاسبه شد. بررسی نتایج نشان داد که مدل نمی‌تواند مقدار نم نسبی لایه مرزی و در نتیجه رخداد مه را شبیه‌سازی کند. با افزایش تعداد ترازهای قائم مدل در لایه ۲۰۰ متری مجاور سطح زمین، دیده شد که مهارت مدل در پیش‌بینی رخداد مه افزایش یافت و از ۶ مورد مه CBL و ۴ مورد مه تابشی به ترتیب ۵ و ۲ مورد رخداد مه پیش‌بینی شد. آزمایش‌های مختلف اهمیت تعداد ترازهای قائم در مجاورت سطح زمین و نقش آن در کیفیت پیش‌بینی مه را مشخص کرد. همچنین نتایج کلی نشان داد که کارایی مدل در پیش‌بینی مه CBL نسبت به مه تابشی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی، مه تابشی، مه CBL، مدل WRF، تراز قائم.

۱. مقدمه

<http://www.caem.wmo.int/moodle/mod/url/view.php?id=203>. نتایج یک دهه مطالعه روی سوانح هوایی توسط هیأت ایمنی حمل‌ونقل ملی آمریکا (US National Transportation Safety Board) نشان داده است که ارتفاع پایین ابر و دید کم، عامل ۲۰ درصد از سوانح هوایی هستند. ۶۸ درصد از این سوانح به دلیل رخداد مه است (گزارش NTBS از سوانح مرتبط با وضع هوا). اثر مه در صنعت هوانوردی هزینه‌ای بالغ بر صدها میلیون دلار به دلیل تأخیر و لغو پروازها به دنبال دارد (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۷). به عنوان مثال، فرودگاه بین‌المللی پودانگ شانگهای (Shanghai Pudong International Airport) در ساحل شرقی چین یکی از مراکز مهم حمل‌ونقل هوایی آسیا است، که ترافیک هوایی در زمستان و بهار در آنجا اغلب توسط مه فرارفتی (Advection fog) از دریای چین شرقی (ECS) مختل

وضع هوا، یکی از عناصر تأثیرگذار در ایمنی پرواز می‌باشد. خصوصیات جوی می‌تواند تأثیر مستقیم و غیرمستقیم در ایمنی پرواز و سامانه‌های هواپیما داشته باشد. کاهش دید ناشی از وجود مه، غبار و طوفان شن یا ماسه باعث می‌شود که ایمنی پرواز کاهش یابد و یا ممکن است با استفاده از فن‌آوری‌های نوین (سامانه‌ی نشستن به وسیله دستگاه ILS (Instrument Landing System)، رادار هواشناسی، سیستم‌های دید مصنوعی) نیز پرواز عملی نشود. بررسی خبرهای فرودگاهی نشان داد که هر سال حدود ۴۴۰ نفر در حوادث هوایی ناشی از دید کم کشته می‌شوند (تارنمای اداره هواشناسی ملی آمریکا به آدرس <https://www.weather.gov/safety/fog-flying>) و ۴۰ درصد از تأخیر پروازهای خطوط هوایی ناشی از دید کم در اثر مه بوده است (تارنمای سازمان هواشناسی جهانی به آدرس

پنج دسته تقسیم کردند. طبق این روش، مه به انواع مه تابشی، مه فرارفتی، مه بارانی، مه ناشی از کاهش ارتفاع کف ابر یا مه CBL (Cloud-Base Lowering) و مه تبخیر صبحگاهی دسته‌بندی می‌شوند (شکل ۱).

کاهش دید ناشی از رخداد مه، سامانه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای، دریایی و هوایی را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. از این رو شناخت شرایط شکل‌گیری و پیش‌بینی دقیق مه می‌تواند منجر به کاهش خسارات جانی و مالی شود. برای این منظور پژوهشگران زیادی در مناطق مختلف دنیا پدیده رخداد مه را از دیدگاه‌های مختلف بررسی کرده‌اند که در زیر به چند نمونه اشاره می‌شود.

اولین پیش‌بینی مه با یک مدل ۳ بعدی منطقه‌ای توسط بالارد و همکاران (۱۹۹۱) انجام شده است. این پژوهشگران از مدل میان مقیاس اداره هواشناسی انگلستان برای پیش‌بینی مه دریایی (haar) در سواحل شمال شرقی اسکاتلند استفاده کردند. آنها نشان دادند که پیش‌بینی دقیق مه به شرایط اولیه رطوبت و آب مایع ابر، رفتار واداشت همدیدی، پارامتری‌سازی فیزیکی، تفکیک مدل و دمای سطح دریا بستگی دارد.

بنگ و همکاران (۲۰۰۹) قابلیت مدل WRF (Weather Research and Forecast) (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸) در شبیه‌سازی مه و دید در فرودگاه‌های کره جنوبی را با استفاده از الگوریتم‌های محاسبه دید مختلف بررسی کردند. آنها ۴۸ مورد رخداد مه را در کره شبیه‌سازی کردند و با اصلاح ضرایب آماری الگوریتم‌های دید در مدل WRF، مهارت شبیه‌سازی مه و دید را با استفاده از روش رگرسیون خطی بین موارد دیدبانی و پیش‌بینی، بهبود دادند.

سینگ و همکاران (۲۰۱۸) برای پیش‌بینی دید در دشت‌های شمال هند از مدل NCUM (NCMRWF Unified Model) که در مرکز ملی پیش‌بینی انگلستان اجرا می‌شود، استفاده کردند. آنها نتایج حاصل از مدل را با تصاویر ماهواره و داده‌های دیدبانی گزارش متار مقایسه کردند و نتایج مدل را اصلاح کردند. این مطالعه نشان داد

می‌شود (یوان و چن، ۲۰۱۳). طبق مطالعات و بررسی ۳۲ ساله در آمریکا (از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳)، مه دومین عامل سوانح هوایی است و عامل اصلی ۱۱۲۲ سانحه هوایی مرگبار بوده است که باعث مرگ ۲۲۶۹ نفر در طول این مدت در آمریکا شده است (فالتز و اشلی، ۲۰۱۶).

در ایران نیز به علت وجود مه و دید کم ناشی از آن برخی از پروازها لغو شده، با تأخیر انجام شده و یا سقوط کرده‌اند. برای مثال در سال ۱۳۸۰ شرکت هواپیمای فراز قشم، تهران را به مقصد گرگان ترک کرد، ولی به علت دید کم ناشی از مه در حوالی ساری سقوط کرد و ۳۰ کشته به جای گذاشت (تارنمای شبکه ایمنی هوانوردی به آدرس <http://aviation-safety.net/database/record.php?id=20010517-0>).

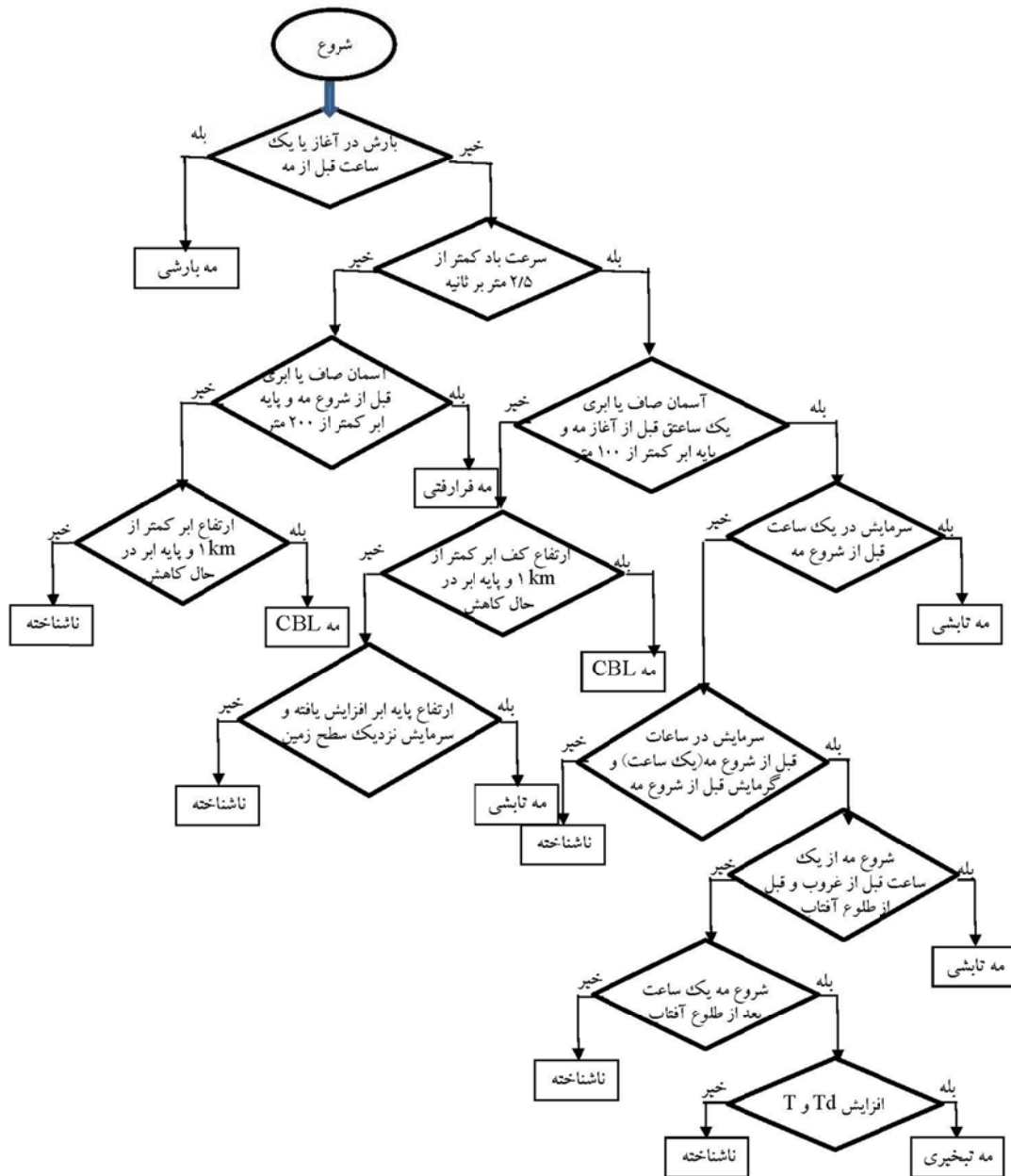
همچنین در سال ۱۳۸۹ پرواز تهران ارومیه به دلیل وجود مه در نزدیکی ارومیه سقوط کرد. این حادثه ۷۸ کشته داشت (تارنمای شبکه ایمنی هوانوردی به آدرس <http://aviation-safety.net/database/record.php?id=20110109-0>).

مه به شرایطی گفته می‌شود که قطره‌های آب یا بلورهای یخی موجود در هوا دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش دهند (لستر، ۲۰۰۷). وقوع مه، به عوامل متعدد جوی بستگی دارد و در زمان و مکان‌های مختلف شرایط شکل‌گیری آن متفاوت است؛ همچنین مه انواع متفاوتی دارد. بسته به عامل ایجادکننده مه، دسته‌بندی‌های گوناگونی برای رخداد این پدیده در نظر گرفته شده است. اولین دسته‌بندی جامع نوع مه که توسط ویلت (۱۹۲۸) صورت گرفت و سپس توسط بایرز (۱۹۵۹) اصلاح شد، از ۱۱ نوع مه تشکیل شده است. این دسته‌بندی بر اساس ساز و کارهای شکل‌گیری مه و وضعیت هوای همراه با مه ایجاد شده است. جورج (۱۹۵۱) با استناد به موضوعات عملی مرتبط با مه، دسته‌بندی ساده‌تری از شش نوع مه را ارائه داد. سپس تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) با توجه به داده‌های ساعتی دیدبانی، انواع مه را به

رخداد مه، نتیجه قابل‌قبولی به‌دست نمی‌دهد. آنها همچنین دریافتند که استفاده از طرح‌واره پیچیده‌تر RUC در مدل WRF نسبت به طرح‌واره (Soil STD Thermal Diffusion)، نتایج بهتری را در بر دارد. این پژوهشگران با ارزیابی شبیه‌سازی‌ها به این نکته پی بردند که برون‌داد سامانه جفت شده در ساعت‌های ششم و یازدهم از شروع پیش‌بینی، معتبرتر است.

که پیش‌بینی دید حاصل از مدل، شاخص خوبی برای تعیین منطقه جغرافیایی رخداد مه و همچنین شدت آن می‌باشد.

بارتوک و همکاران (۲۰۱۲) با جفت کردن مدل‌های PAFOG و WRF، تعداد ۸۴ مورد رخداد مه را در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ در امارات متحده عربی شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که این سامانه در بعضی موارد در برآورد



شکل ۱. الگوریتم دسته‌بندی انواع مه (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

رومن کسکان و همکاران (۲۰۱۹) با مدل‌های عددی WRF و HARMONIE یک‌ماه هشت‌روزه را که در شمال اسپانیا رخ داده بود را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش پیکربندی هر دو مدل تا حد امکان شبیه به هم تنظیم شد. آنها دریافتند که هر دو مدل در پیش‌بینی مه تابشی نسبت به مه CBL، موفقیت کمتری داشتند.

تردیف (۲۰۰۷) با مقایسه دو حالت شبیه‌سازی مه با مدل یک‌بعدی COBEL، یکی با ۲۱ و دیگری با ۵ تراز قائم از سطح زمین تا ارتفاع ۲۵۰ متری جو، نشان داد که شبیه‌سازی با تفکیک قائم بیشتر، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. در مدل با تفکیک قائم کمتر، آهنگ سرمایش ضعیف‌تری دیده می‌شود زیرا مدل با ترازهای قائم کم نمی‌تواند سرمایش تابشی در جو نزدیک زمین را در چند متر پایین آن در اوایل شب، شبیه‌سازی کند (تردیف، ۲۰۰۷). پیش‌بینی توسط مدل با تفکیک قائم بیشتر باعث افزایش قابل قبول مقدار آب ابر (LWC) و در نتیجه عمیق شدن مه می‌شود (تردیف، ۲۰۰۷).

فیلیپ و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر تفکیک قائم را در پیش‌بینی مه با مدل AROME (Applications of Research to Operations at Mesoscale) برای یک حالت موردی در فرودگاه شارل دوگل فرانسه بررسی کردند. آنها دریافتند که تفکیک قائم اثر زیادی بر شبیه‌سازی آغاز مه دارد و جت شبانه و آشفته‌گی ایجاد شده توسط برش باد در بالای لایه مرزی شبانه، با تفکیک بیشتر قائم قابل شبیه‌سازی است.

یانگ و گائو (۲۰۱۶) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش تفکیک قائم مدل در لایه مرزی، شبیه‌سازی مه دریایی بهبود می‌یابد. این بهبود به دلیل شبیه‌سازی بهتر LWC در بالای لایه مه است. یانگ و همکاران (۲۰۱۹) حساسیت شبیه‌سازی مه دریایی را به ارتفاع پایین‌ترین تراز مدل بررسی کردند. با توجه به اینکه پایین‌ترین تراز مدل محل تبادل انرژی بین سطح زمین و لایه مرزی سیاره‌ای است، آنها به این نتیجه رسیدند که تنظیم ارتفاع ۸ متر برای پایین‌ترین تراز مدل، باعث شبیه‌سازی بهتر مه

می‌شود.

تاجبخش و همکاران (۱۳۹۷) شرایط مه در دو فرودگاه مهرآباد تهران و شهید هاشمی نژاد مشهد را از دیدگاه همدیدی بررسی کردند و با استفاده از دو روش تجربی ساندرس (Saunders) و کراداک-پریچارز (Cradock, Prichars) دمای نقطه مه با داده‌های واقعی و پیش‌بینی را تعیین کردند. این پژوهشگران با به کارگیری ارزیابی به روش اریبی، نشان دادند که روش ساندرس در ۷۵ درصد حالات با رخداد مه در فرودگاه‌های یادشده همخوانی دارد. این ارزیابی برای روش کراداک-پریچارز به ۶۵ درصد کاهش یافت. برون‌دادهای مدل پیش‌بینی عددی WRF نیز مطالعه شد و ارزیابی نتایج، صحت کمتری را (۵۰ درصد) نشان داد. بررسی الگوهای همدیدی در حالت‌های موردی آشکار کرد که پرفشار قوی با مقادیر حداقل ۱۰۲۰ هکتوپاسکال در نوار شمالی ایران همراه با فرارفت هوای سرد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بادهای شمالی و نم ویژه ۶ تا ۸ گرم بر کیلوگرم در رخداد مه مؤثر بوده است.

جابری و همکاران (۱۳۹۷) کاهش دید ناشی از مه و بارش را با استفاده از مدل WRF در منطقه تهران در یک حالت موردی، بررسی کردند. آنها از چهار روش SW99، FSL، AFWA و UPP1 استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی نشان داد که استفاده از روش‌های SW99، AFWA، UPP1 نتوانست به خوبی روند کاهش دید را نشان دهد ولی روش FSL تا حدی برای پیش‌بینی کاهش دید به‌ویژه در مه مناسب است. آنها عنوان کردند که پیش‌بینی دید در زمان پدیده برف به مقادیر دیدبانی نزدیک‌تر است و در شرایط مه دقت کمتری دارد.

از آنجا که مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا برای شبیه‌سازی درست مه، مخصوصاً برای مقاصد عملیاتی مشکل دارند (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹) و علی‌رغم همه پژوهش‌های پیشین در مورد شبیه‌سازی مه، پیش‌بینی رخداد مه هنوز یک چالش برای مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا است (وندرولد و همکاران، ۲۰۱۰، رومن

سازمان هواشناسی کشور گرفته شد شامل دید افقی، رطوبت نسبی، دما، دمای نقطه شبنم، سمت و سرعت باد، ارتفاع پایه و مقدار پوشش ابر، فشار هوا و وضعیت هوای حاضر است.

با استفاده از داده‌های دید، وضعیت هوای حاضر و درصد رطوبت نسبی، روزهایی که دید افقی به‌علت وجود مه کمتر از ۱۰۰۰ متر بود، از سری داده‌ها جدا شد. از میان این روزها، رخداد مه ۲۷ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۵ به‌دلیل گستردگی و اهمیت پیش‌بینی، برای بررسی انتخاب شد. در این بازه زمانی در ایستگاه‌های هواشناسی فرودگاه‌های ارومیه، اراک، بوشهر، زاهدان، همدان و شهرکرد در ساعت‌های مختلف مه ثبت شده است. با استفاده از الگوریتم تردیف و راسموسن، نوع مه نیز در روزهای انتخابی برای فرودگاه‌های تحت‌بررسی تعیین شد. بر اساس این الگوریتم، مه تابشی، مه بارشی، مه فرافتنی، مه تبخیری و مه CBL قابل تشخیص می‌باشد. در جدول ۱، نوع و ساعت شروع و خاتمه مه در فرودگاه‌های تحت‌بررسی نشان داده شده است.

کسکان و همکاران، ۲۰۱۶، ژو و همکاران، ۲۰۱۲، استینولد و همکاران، ۲۰۱۵)، از این رو صحت پیش‌بینی رخداد این پدیده همچنان در پرده ابهام باقی‌مانده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در کشور، بیشتر شامل بررسی آماری و یا پیش‌بینی با استفاده از روش تجربی است و تاکنون تعداد پژوهش‌ها برای پیش‌بینی مه با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا، در کشور بسیار کم بوده است. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی رخداد مه با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF می‌باشد. برای این منظور رخداد مه اواخر دسامبر ۲۰۱۵ در سطح ایران بررسی می‌شود.

۲- داده‌ها و روش کار

در پژوهش حاضر سعی شده است یک رخداد چندروزه‌ی مه که چند فرودگاه را در کشور تحت‌تأثیر قرار داده است، به‌طور موردی مطالعه شود. برای انتخاب این حالت موردی، داده‌های دیدبانی حاصل از گزارش‌های متار در فرودگاه‌های ایران در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۱۷ بررسی شد. این داده‌های ساعتی که از

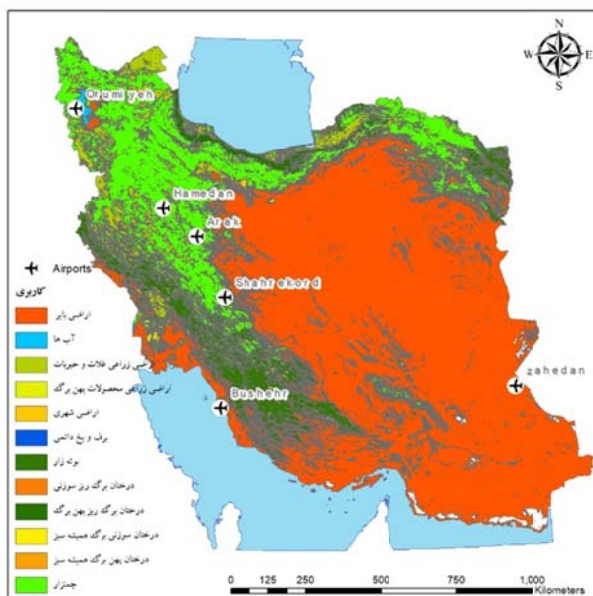
جدول ۱. روزهای همراه با مه در فرودگاه‌های مختلف کشور از ۲۷ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۵.

ردیف	نام ایستگاه	ساعت شروع مه (گرینویچ)	ساعت پایان مه (گرینویچ)	نوع مه
۱	ارومیه	ساعت ۰۴ روز ۲۹/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۶ روز ۲۹/۱۲/۲۰۱۵	CBL
۲		ساعت ۱۷ روز ۳۰/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۹ روز ۳۱/۱۲/۲۰۱۵	CBL
۳	اراک	ساعت ۲۳ روز ۲۷/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۸ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	CBL
۴		ساعت ۲۲ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۱۱ روز ۳۰/۱۲/۲۰۱۵	CBL
۵	بوشهر	ساعت ۰۳ روز ۲۷/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۵ روز ۲۷/۱۲/۲۰۱۵	تابشی
۶		ساعت ۰۳ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۶ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	تابشی
۷	زاهدان	ساعت ۲۰ روز ۲۹/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۶ روز ۳۰/۱۲/۲۰۱۵	CBL
۸	همدان	ساعت ۰۴ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۶ روز ۲۹/۱۲/۲۰۱۵	تابشی
۹		ساعت ۱۵ روز ۲۹/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۱ روز ۳۰/۱۲/۲۰۱۵	تابشی
۱۰	شهرکرد	ساعت ۱۵ روز ۲۷/۱۲/۲۰۱۵	ساعت ۰۸ روز ۲۸/۱۲/۲۰۱۵	CBL

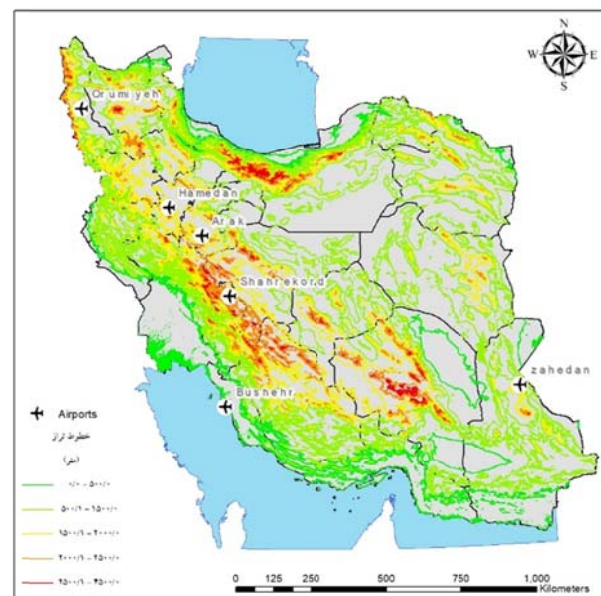
سرد و پایدار روی آب گرم تر حرکت کرده و اشباع شده و مه تبخیری یا مه بخار یا دود دریایی ایجاد می‌شود (آرنز و هنسان، ۲۰۱۸). مه CBL در اثر سرمایش قسمت پایین لایه مرزی و کاهش ارتفاع پایه ابر استراتوس ایجاد می‌شود (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

در این مطالعه ابتدا شرایط همیدی حاکم بر کشور در روزهای ۲۷ تا ۳۰ دسامبر به‌طور کلی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه با تنظیم مدل WRF بر اساس مطالعات پیشین (لین و همکاران، ۲۰۱۷؛ رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۶؛ آزادی و همکاران، ۱۳۸۲؛ لایقی و همکاران، ۱۳۹۶) رخدادهای مه ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ شبیه‌سازی شد. این پیکربندی‌ها در جدول ۲ آمده است که در آن اعداد بالای هر ستون نشان‌دهنده شماره پیکربندی و تعداد تراز قائم است. برای نمونه ۲۸-۲ بیانگر پیکربندی شماره ۲ با ۲۸ تراز قائم است.

موقعیت ایستگاه‌های فرودگاهی مورد مطالعه روی نقشه توپوگرافی در شکل ۲-الف و موقعیت آن ایستگاه‌ها روی نقشه کاربری اراضی در شکل ۲-ب نشان داده شده است. مه تابشی در شب‌های صاف و آرام و زمانی با وجود باد بسیار ملایم رخ می‌دهد (کسکان و همکاران، ۲۰۱۹). زمین، گرمایی که در طول روز کسب کرده است را در طول شب از دست می‌دهد و زمین و هوای مجاور آن سرد می‌شود و زمانی که هوای مجاور زمین اشباع شود، مه تشکیل می‌شود. مه بارشی یا مه جبهه‌ای در جلوی جبهه گرم و پشت جبهه سرد با تبخیر قطرات باران و در نتیجه اشباع هوای مجاور زمین رخ می‌دهد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۸). مه فرارقتی به دلیل جابه‌جایی و حرکت افقی هوای گرم و مرطوب دریا روی منطقه خنک ساحلی به وجود می‌آید (لین و همکاران، ۲۰۱۷). مه تبخیری یک نوع مه فرارقتی است و زمانی شکل می‌گیرد که هوای



(ب)



(الف)

شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های فرودگاهی مورد مطالعه روی الف) نقشه توپوگرافی و ب) نقشه کاربری اراضی.

جدول ۲. پیکربندی‌های استفاده شده برای مدل WRF.

شماره پیکربندی-تعداد تراز قائم						عنوان طرح‌واره	ردیف
۳۲-۵	۳۲-۴	۳۲-۳	۳۲-۲	۳۲-۱	۲۸-۲		
WDM6-class	T	L	L	L	L	میکرو فیزیک ابر	۱
MYNN2.5	Y	A	Y	Y	Y	طرح‌واره‌ی لایه مرزی سیاره‌ای	۲
RR	RG	RR	RG	RR	RG	طرح‌واره‌ی تابش طول‌موج بلند	۳
D	D	D	D	D	D	طرح‌واره‌ی تابش طول‌موج کوتاه	۴
N	N	N	N	N	N	طرح‌واره‌ی فیزیک سطح	۵
Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	طرح‌واره‌ی لایه‌ی سطحی	۶

L: طرح‌واره‌ی لین و همکاران (۱۹۸۳)، T: طرح‌واره‌ی تامسون (تامسون و همکاران، ۲۰۰۸)، WDM6-class: طرح‌واره‌ی WRF double-moment sixclass (لیم و هونگ، ۲۰۱۰)، Y: طرح‌واره‌ی YSU (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)، A: طرح‌واره‌ی ACM2 (پلیم، ۲۰۰۷)، MYNN2.5: طرح‌واره‌ی ملور-یامادا-ناکانیشی-نینو (ناکانیشی و نینو، ۲۰۰۴)، RG: طرح‌واره‌ی RRTMG (ایاکونو و همکاران، ۲۰۰۸)، RR: طرح‌واره‌ی RRTM (ملور و همکاران، ۱۹۹۷)، D: طرح‌واره‌ی داهیا (۱۹۸۹)، N: طرح‌واره‌ی نوا (تواری و همکاران، ۲۰۰۴) و Mo: طرح‌واره‌ی مونین ابوخوف (ابوخوف، ۱۹۷۱)

کیلومتر به‌دست آمد. با توجه به اینکه مطالعات قبلی بر اهمیت تفکیک قائم بالا برای حل فرآیندهای اصلی تشکیل مه تأکید کرده‌اند (استینولد و همکاران، ۲۰۱۵)، مشابه رومن کسکان و همکاران (۲۰۱۹)، از سطح زمین تا ۲۰۰ متری ۱۱ تراز و در کل ۳۲ تراز قائم در مدل WRF در نظر گرفته شد. سپس مدل با پیکربندی‌های متفاوت اجرا شد. با انجام این تغییر در تراز قائم، مدل مهارت تشخیص رطوبت و مه را در برخی از موارد پیدا کرد. به‌منظور مقایسه برون‌داد مدل در دو حالت با ۲۸ و ۳۲ تراز قائم، برون‌داد پیکربندی ۲ که بهترین پیکربندی از نظر تشخیص مه در میان پیکربندی‌های با ۲۸ تراز قائم بود نیز مورد بررسی قرار گرفت.

پس از اجرای مدل، برای محاسبه دید در این مطالعه از ۴ الگوریتم محاسبه دید افقی شامل SW99 (استولینگا و وارنر، ۱۹۹۹)، FSL (دوران و همکاران، ۱۹۹۹)، G2009 (گالپ و همکاران، ۲۰۰۹) و RUC (بنجامین و همکاران، ۲۰۰۴) استفاده شده است که در ادامه به‌طور خلاصه معرفی می‌شوند.

برای شبیه‌سازی مه تابشی و مه CBL، مدل WRF با پنج پیکربندی متفاوت استفاده شد و سپس ۴ الگوریتم محاسبه دید بر برون‌داد مدل اعمال شد تا بهترین پیکربندی و الگوریتم تشخیص این‌گونه مه‌ها مشخص شود. در این تحقیق، نگارش 3.9.1 مدل WRF با نگاشت لمبرت، تفکیک آشیانه‌های ۱۶ و ۴ کیلومتر به‌کار گرفته شد. به‌دلیل بررسی حساسیت شبیه‌سازی مه به طرح‌واره‌های مختلف در مدل WRF در مطالعات قبلی (برای نمونه: لین و همکاران، ۲۰۱۷)، و ندرولد و همکاران، ۲۰۱۰ و رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۲)، پیکربندی‌های مدل در این مطالعه بر اساس مطالعات لین و همکاران (۲۰۱۷) و رومن کسکان و همکاران (۲۰۱۶) انتخاب شدند (جدول ۲). بررسی و تحلیل نتایج نیز با توجه به کار رومن کسکان و همکاران (۲۰۱۹) صورت گرفت. ابتدا تعداد ترازهای قائم مدل، ۲۸ تراز انتخاب شد. مقدار محتوای آب مایع ابر یا LWC (Liquid Water Content) در برون‌داد مدل در همه پیکربندی‌ها صفر و یا بسیار ناچیز بود و در نتیجه دید محاسبه شده با این LWC، بسیار زیاد و بیش از ۱۰

$$VIS_{G2009} = 0.87706 / (LWC \times N_d)^{0.49034} \quad (۸)$$

$$N_d = -0.071 T + 2.213 T + 141.56 \quad (۹)$$

۴-۲. الگوریتم RUC

در این الگوریتم، دید از رابطه رطوبت نسبی حاصل می‌شود (رابطه ۱۰).

$$VIS_{RUC} = 60 e^{-2.5 \times \frac{RH-15}{80}} \quad (۱۰)$$

پس از محاسبه مقدار دید با استفاده از ۴ الگوریتم محاسبه دید افقی ذکر شده، این مقادیر دید به دست آمده در هر شهر از ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۲۷ دسامبر ۲۰۱۵ تا ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۳۱ دسامبر ۲۰۱۵ با مقادیر دید دیدبانی مقایسه شد. سپس برای مواردی که مدل قادر به پیش‌بینی مه در یک ایستگاه بود، شاخص‌های درستی‌سنجی شامل آهنگ برخورد H و امتیاز تهدید متوازن ETS که بر اساس جدول توافقی بارش به دست می‌آیند، استفاده شد. برای محاسبه این شاخص‌ها به تابع احتمال مشترک پیش‌بینی-دیدبانی و تشکیل جدول توافقی (۲×۲) نیاز است. با فرض اینکه پیش‌بینی و دیدبانی به ترتیب با Y و O نشان داده شوند، جدول توافقی (۲×۲) به صورت جدول ۳ تشکیل داده می‌شود. در این جدول O_1 تعداد دیدبانی‌های مثبت (رخداد پدیده)، O_2 تعداد دیدبانی‌های منفی (عدم رخداد پدیده)، Y_1 تعداد پیش‌بینی‌های مثبت (رخداد پدیده)، Y_2 تعداد پیش‌بینی‌های منفی (عدم رخداد پدیده)، a بسامد رخداد پدیده و پیش‌بینی آن، b بسامد عدم رخداد پدیده و پیش‌بینی آن، c بسامد رخداد پدیده و عدم پیش‌بینی آن و d بسامد عدم رخداد پدیده و عدم پیش‌بینی آن است، شاخص‌های آماری برای درستی‌سنجی شامل آهنگ برخورد (H) و امتیاز تهدید متوازن (ETS) در جدول ۴ آمده است.

۱-۲. الگوریتم SW99

این الگوریتم از مجموع چهار رابطه شامل ضرایب کاهش دید ناشی از آب مایع ابر، آب باران، یخ ابر و برف برای محاسبه ضریب کاهش دید کل β استفاده شده (رابطه ۱) و حاصل آن در رابطه ۲ قرار می‌گیرد تا میزان دید بر حسب کیلومتر به دست آید. ضرایب کاهش دید نیز با غلظت جرمی (mass concentration) آب ابر (C_{cw})، آب باران (C_{rw})، یخ ابر (C_{ci}) و برف (C_{sn}) مرتبط است (روابط ۳ تا ۶).

$$\beta = \beta_{cw} + \beta_{rw} + \beta_{ci} + \beta_{sn} \quad (۱)$$

$$VIS_{SW99} = -\ln(0.02)/\beta \quad (۲)$$

$$\beta_{cw} = 144.7 C_{cw}^{0.88} \quad (۳)$$

$$\beta_{rw} = 1.1 C_{rw}^{0.75} \quad (۴)$$

$$\beta_{ci} = 163.9 C_{ci}^{1.00} \quad (۵)$$

$$\beta_{sn} = 10.4 C_{sn}^{0.78} \quad (۶)$$

۲-۲. الگوریتم FSL

در این الگوریتم، دید با استفاده از رطوبت نسبی و اختلاف بین دما و دمای نقطه شبنم و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$VIS_{FSL} = 1.609 \times 6 \times (T - T_d) / RH^{1.75} \quad (۷)$$

که در آن RH رطوبت نسبی و $T - T_d$ اختلاف بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم است. ضریب $1/6.09$ نیز به منظور تبدیل واحد دید از مایل به کیلومتر به کار می‌رود.

۳-۲. الگوریتم G2009

در الگوریتم G2009، دید از رابطه مستقیم غلظت تعداد قطرات یا N_d (droplet number concentration) و از رابطه ۸ به دست می‌آید. N_d نیز از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

جدول ۳. جدول توافقی (۲×۲).

	O ₁	O ₂	
Y ₁	a	b	a + b
Y ₂	c	d	c + d
	a + c	b + d	n = a + b + c + d

جدول ۴. شاخص آماری آهنگ برخورد و امتیاز تهدید متوازن وابسته به جدول توافقی (۲×۲).

بازهی تغییرات	رابطه	کمیت
صفر تا یک: یک برای پیش‌بینی کامل و صفر برای پیش‌بینی کاملاً نادرست	$H = a/(a+c)$	آهنگ برخورد (H)
صفر تا یک: یک برای پیش‌بینی کامل و صفر برای پیش‌بینی کاملاً نادرست	$ETS = a-hits_{random}/(a+b+c-hits_{random})$ $hits_{random}=(a+b)(a+c)/(a+b+c+d)$	امتیاز تهدید متوازن (ETS)

۳. نتایج و بحث
 اثرگذار هستند از داده‌ها جدا شده و در جدول ۵ آمده است. این داده‌ها به‌صورت میانگین برای هر رخداد مه به‌صورت جداگانه در طول مدت مه محاسبه شده‌اند.

در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی که از ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ گزارش مه داشته‌اند استفاده شد. کمیت‌های اصلی و مهم که در تشکیل مه

جدول ۵. کمیت‌های اصلی دیدبانی در تحلیل مه برای هر کدام از رخداد‌های مه جدول ۱.

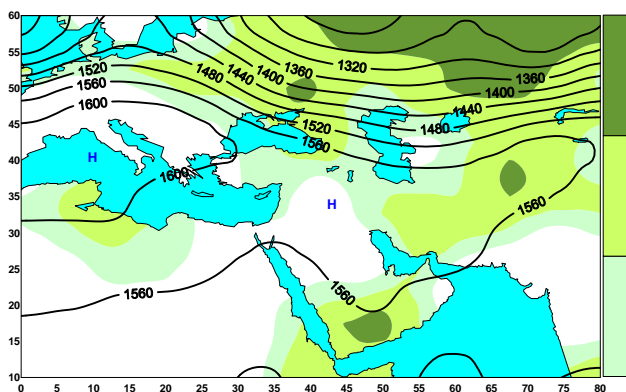
ردیف	نام ایستگاه	نوع مه	مدت زمان مه (ساعت)	دمای دو متری (°C)	نقطه شبنم دو متری (°C)	نم نسبی (%)	سرعت باد ۱۰ متری (m/s)
۱	ارومیه	CBL	۳	-۹	-۹/۳۳	۹۷/۳۳	۲/۶۷
۲	اراک	CBL	۱۶	-۶/۷۵	-۷/۳۱	۹۵/۳۸	۱/۳۱
۳	اراک	CBL	۹	-۴/۲۹	-۴/۴۳	۹۸/۸۶	۰/۵۷
۴	اراک	CBL	۱۳	-۴	-۴/۲۱	۱۰۰	۱/۰۳
۵	بوشهر	تابشی	۲	۱۲/۳۳	۱۱/۶۷	۹۵/۳۳	۰/۶۷
۶	بوشهر	تابشی	۳	۱۲/۷۵	۱۲/۲۵	۹۸/۵	۱/۲۴
۷	زاهدان	CBL	۱۰	۲/۷۳	۲/۷۳	۱۰۰	۱/۶۴
۸	همدان	تابشی	۱۶	-۷/۵۳	-۸/۲۹	۹۳/۸۸	۰/۹۴
۹	همدان	تابشی	۱۰	-۶/۵۸	-۷/۰۸	۹۶	۰/۶۷
۱۰	شهرکرد	CBL	۱۷	-۷/۳۹	-۸	۰/۳۳	۹۵/۱۱

در این بخش ابتدا تحلیل کوتاهی بر شرایط همدیدی حاکم بر منطقه انجام می‌شود و سپس برون‌داد مدل WRF مورد بررسی قرار می‌گیرد.

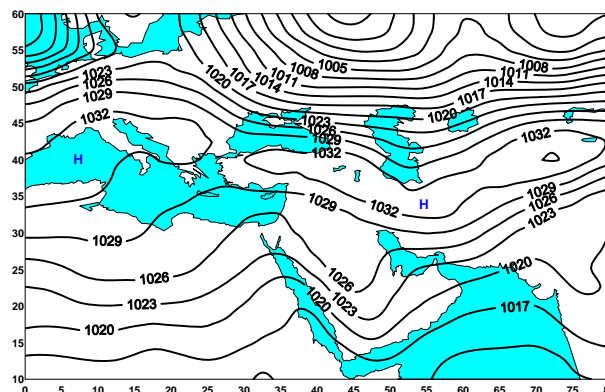
۱-۳. تحلیل همدیدی

برای تحلیل شرایط آب‌وهوایی رخداد مه، سعی شد تا با نگاهی کوتاه به وضعیت همدیدی روز ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵، این شرایط بررسی شود. از بررسی نقشه میدان فشار سطح متوسط دریا در روز بیست‌وهفتم دسامبر دیده می‌شود که در سراسر مدار ۳۷ درجه شمالی دو مرکز پرفشار ۱۰۳۲ هکتوپاسکال قرار گرفته است. یکی از مراکز پرفشار روی دریای مدیترانه و دومی در مرکز ایران است (شکل ۳-الف) که پشته‌های آن به‌صورت مداری به

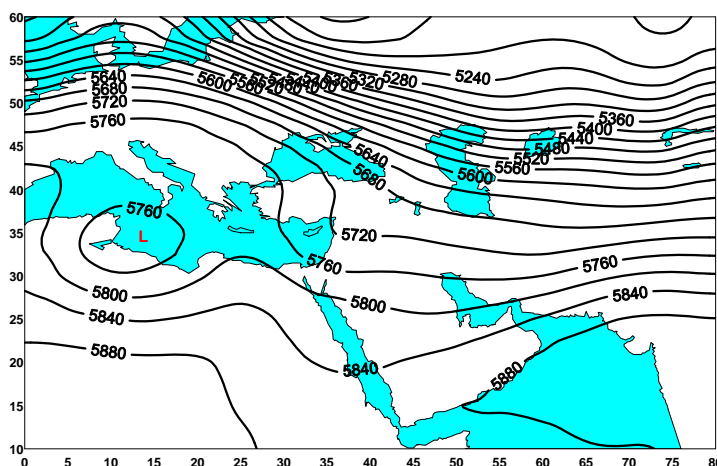
شرق و غرب امتداد یافته است. هماهنگ با این الگو، در این محدوده، در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز پرفشار قرار دارد که مرکز آن در روی دریای مدیترانه است و پشته آن در راستای مداری به‌سوی شرق امتداد یافته است. ایران تحت‌تأثیر این پشته فشاری قرار گرفته است. در این روز میزان نم نسبی این تراز در نوار شمالی و نوار غربی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد است و در بقیه نقاط بین ۷۰ تا ۹۰ درصد می‌باشد (شکل ۳-ب). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال این روز دیده می‌شود که یک کم‌فشار بریده در جنوب ایتالیا و یک ناوه کم‌عمق در شرق دریای مدیترانه قرار دارد که می‌تواند برخی مناطق غربی و مرکزی ایران را تحت‌تأثیر قرار دهد. در روی ایران جریان‌ها مداری است (شکل ۳-ج).



(ب)



(الف)

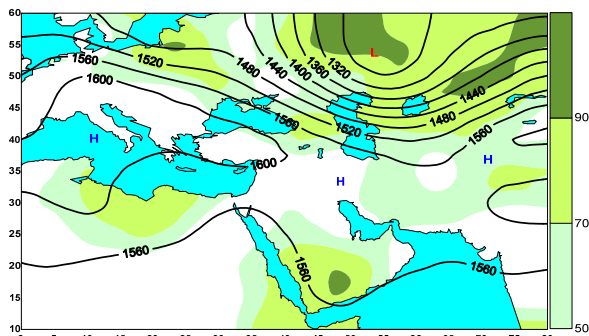


(ج)

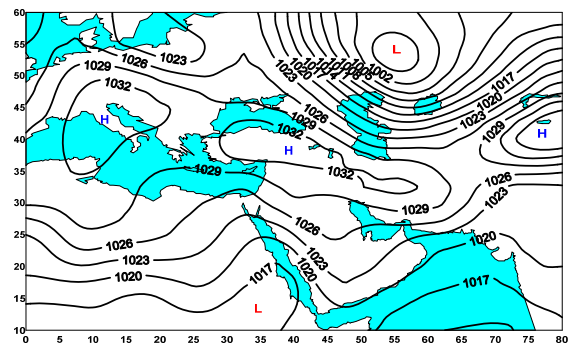
شکل ۳. الف) فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال، ب) الگوی ارتفاع (ژئوپتانسیل متر) و نم نسبی (درصد) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و ج) الگوی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ارتفاع ژئوپتانسیل متر در ساعت ۰۰۰۰ گرنویچ مورخ ۲۷ دسامبر ۲۰۱۵. فاصله هم‌فشارها ۳ هکتوپاسکال و فاصله پهندهای ارتفاع ۴۰ ژئوپتانسیل متر است.

بارشی کمی داشته است (شکل ۴۳-ج). در روز بیست‌ونهم دسامبر، کم‌فشار بریده در روی قبرس قرار گرفته است و در اثر حرکت چرخندی، در سطح زیرین ناوه فشاری ایجاد شده است. این ناوه فشاری با بخش شمالی ناوه وارون دریای سرخ ترکیب شده است و یک سامانه کم‌فشار بارشی ایجاد کرده است. در روی ایران همچنان مرکز پرفشار ۱۰۳۲ هکتوپاسکال در نیمه غربی ایران قرار دارد و بقیه نقاط کشور نیز تحت تأثیر پشته فشاری این سامانه است (شکل ۵-الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز ایران تحت تأثیر پشته ارتفاعی قرار دارد. نم نسبی در این روز در نوار جنوبی و نوار غربی ایران کمتر از ۵۰ درصد و در بقیه نقاط بین ۵۰ تا ۷۰ درصد است (شکل ۵-ب). در اثر فعالیت چرخندی کم‌فشار بریده روی قبرس نیز یک پشته ارتفاع کم‌عمق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شرق دریای مدیترانه ایجاد شده است (شکل ۵-ج).

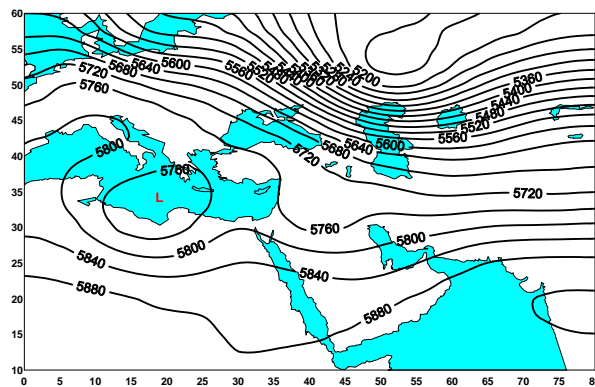
از بررسی میدان فشار سطح متوسط دریا در روز بیست‌وهشتم دسامبر که در شکل ۴-الف نشان داده شده است، دیده شد که مرکز پرفشار ۱۰۳۲ هکتوپاسکال در مرکز ایران قرار دارد و بقیه نقاط کشور تحت تأثیر پشته فشاری این سامانه است. از الگوی ارتفاع و نم نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال این روز (شکل ۴-ب) دیده می‌شود که پشته ارتفاع ناشی از پراارتفاع روی دریای مدیترانه همچنان ایران را تحت تأثیر قرار داده است. نم نسبی این تراز در روی ایران نسبت به روز قبل کاهش یافته است. به طوری که در نیمه غربی کمتر از ۵۰ درصد و در نیمه شرقی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد برآورد شده است. از بررسی میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده شد که ناوه کم‌عمق شرق دریای مدیترانه به سوی شرق حرکت کرده است که چون گردان ارتفاع مناسبی ندارد و نیز نتوانسته است پشته فشاری و ارتفاعی سطوح زیرین را تضعیف کند، فعالیت



(ب)

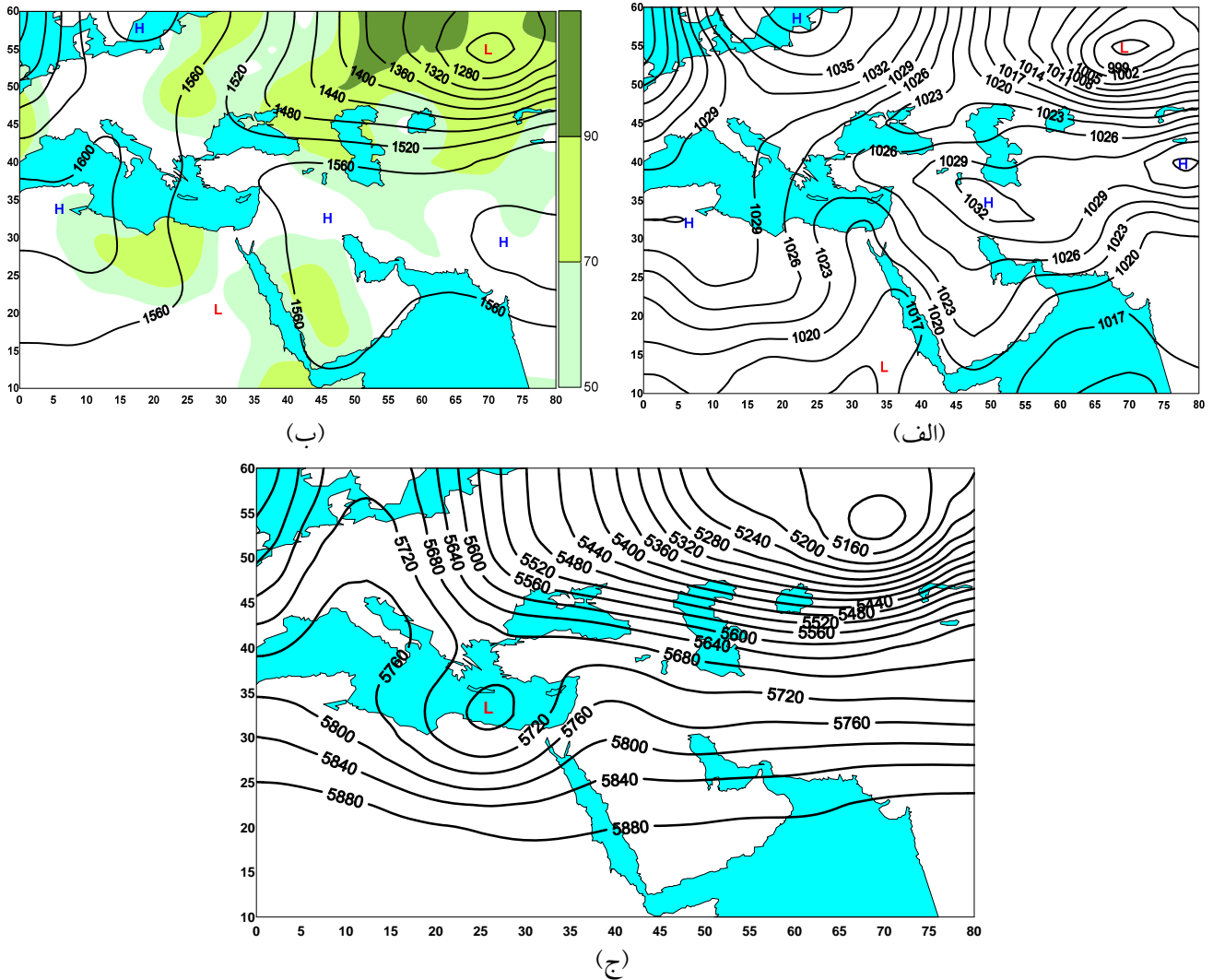


(الف)



(ج)

شکل ۴. الف) فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال، ب) الگوی ارتفاع (ژئوپتانسیل متر) و نم نسبی (درصد) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و ج) الگوی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ارتفاع ژئوپتانسیل متر در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ ۲۸ دسامبر ۲۰۱۵. فاصله هم‌فشارها ۳ هکتوپاسکال و فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ ژئوپتانسیل متر است.

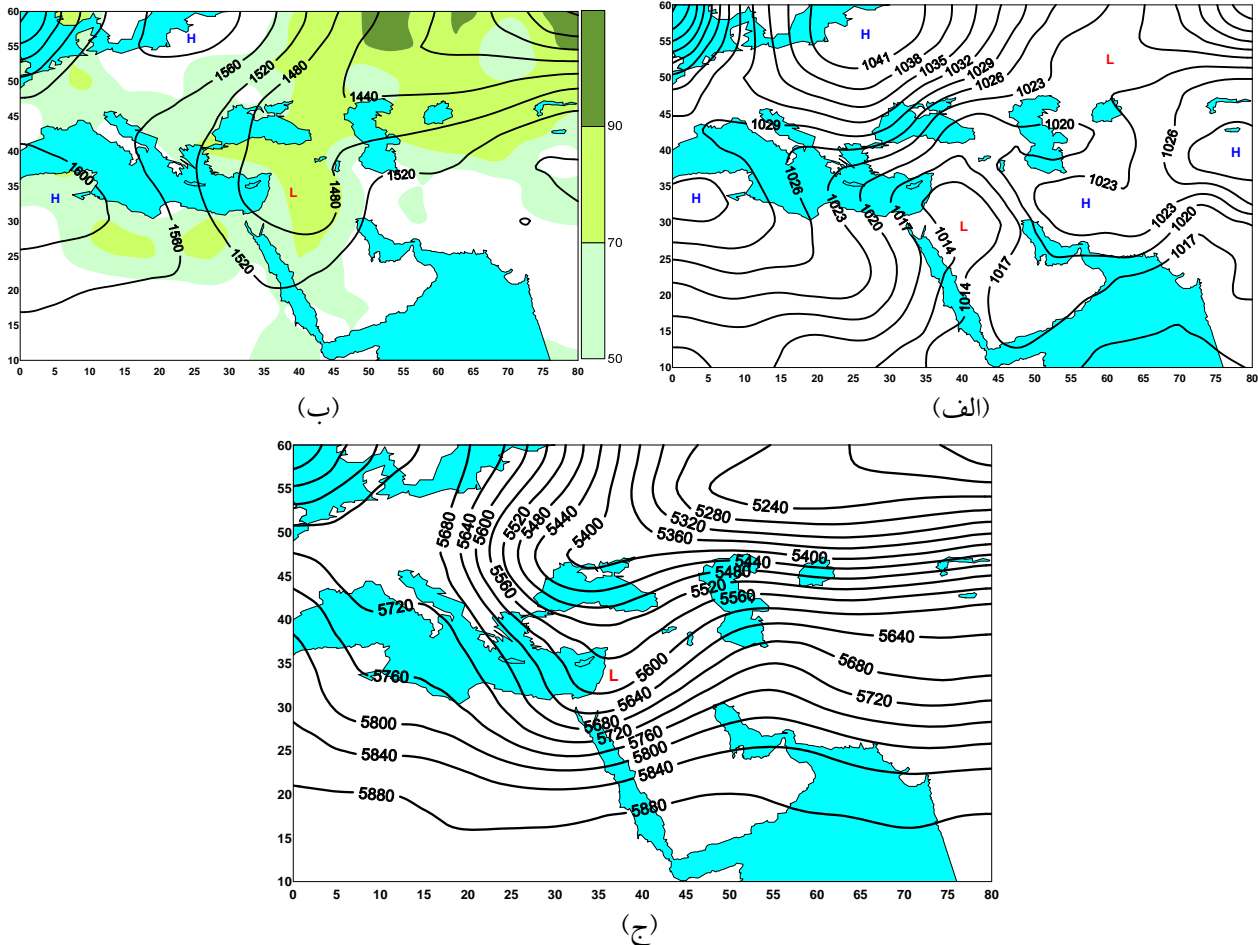


شکل ۵. الف) فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال، ب) الگوی ارتفاع (ژئوپتانسیل متر) و نم نسبی (درصد) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و ج) الگوی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ارتفاع ژئوپتانسیل متر در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ مورخ ۲۹ دسامبر ۲۰۱۵. فاصله هم فشارها ۳ هکتوپاسکال و فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ ژئوپتانسیل متر است.

(شکل ۶- الف، ب و ج).

بررسی این حالت موردی نشان داد که با یک موج کم دامنه با فعالیت بارشی ضعیف از منطقه غرب و مرکز ایران عبور کرده و شرایط ایجاد مه CBL را در این مناطق مهیا کرده است. پس از استقرار مرکز پرفشار و پشته آن در روی ایران و در نتیجه ماندگاری هوای سرد، نبود ابر و رخداد تابش شبانه زمین سبب شده است تا شرایط مناسبی برای ایجاد مه تابشی فراهم شود.

در روز سی ام دسامبر، کم فشار بریده باز شده و یک ناوه ارتفاعی در شرق دریای مدیترانه ایجاد کرده است. این سامانه سبب شده است تا ناوه ارتفاعی و فشاری در ترازهای زیرین در شرق آن دریا ایجاد شود و یک سامانه بارشی مناسب ایجاد کند. این سامانه با نم نسبی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد، به سوی عراق حرکت می کند و مناطق مختلف نوار غربی ایران را تحت تأثیر قرار می دهد. سایر نقاط ایران همچنان تحت تأثیر پشته فشاری و ارتفاعی قرار دارد



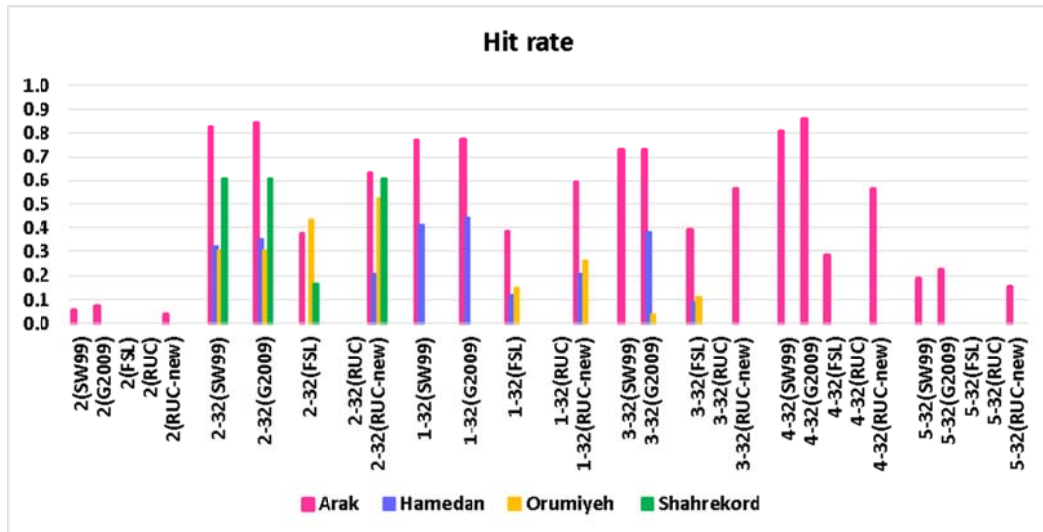
شکل ۶. الف) فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال، ب) الگوی ارتفاع (ژئوپتانسیل متر) و نم نسبی (درصد) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و ج) الگوی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ارتفاع ژئوپتانسیل متر در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵. فاصله هم‌فشارها ۳ هکتوپاسکال و فاصله پهندهای ارتفاع ۴۰ ژئوپتانسیل متر است.

از هر ستون، رخداد مه را پیش‌بینی کرده است. با توجه به این شکل، از بین ۶ مه CBL و ۴ مه تابشی، ۵ مه CBL و ۲ مه تابشی پیش‌بینی شده است. بنابراین در این مطالعه، مدل در پیش‌بینی مه CBL کارآیی بیشتری داشته است. در واقع مدل، مه بوشهر و زاهدان را تشخیص نداده است.

این می‌تواند به این دلیل باشد که در سطح زمین با ناهمواری پیچیده، یک مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا با تفکیک بالا می‌تواند نتایج قابل‌قبولی را ارائه دهد، زیرا شرایط ایجاد مه محدود به یک حوضه بسته و باد کوه به دشت است که هوای نسبتاً سرد را با خود به پایین حوضه می‌آورد (مولر و همکاران، ۲۰۱۰ و کوسارت و جیمنز، ۲۰۱۱)، ولی در مناطق با سطح زمین صاف این سازوکار ساده وجود ندارد و پیش‌بینی مه را با چالش بیشتری مواجه

۲-۳. تحلیل برون‌داد مدل

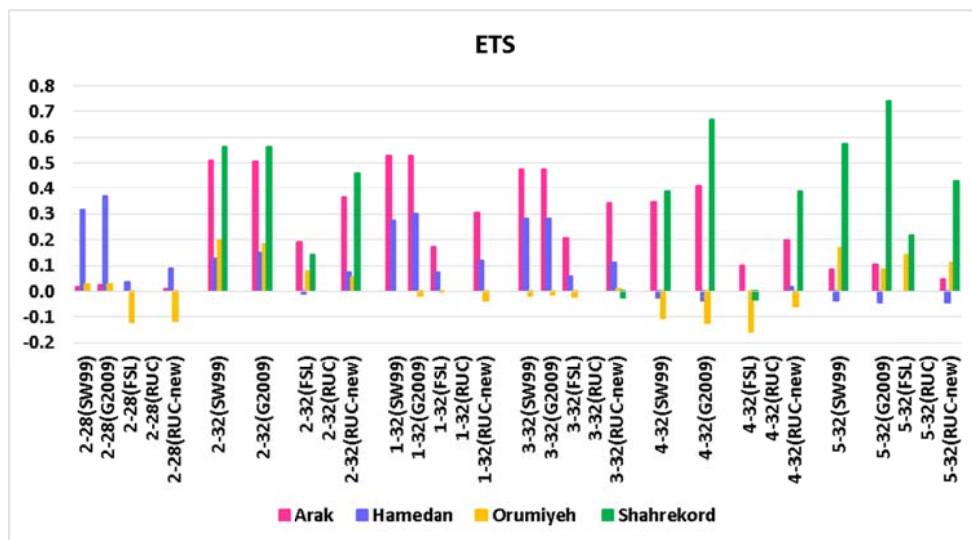
در این تحقیق برای شبیه‌سازی مه تابشی و مه CBL، مدل WRF با پنج پیکربندی متفاوت استفاده شد و سپس ۴ الگوریتم محاسبه دید بر برون‌داد مدل اعمال شد تا بهترین پیکربندی و الگوریتم تشخیص این‌گونه مه‌ها مشخص شود. جدول ۶ تعداد پیش‌بینی‌های درست برای هر رخداد مه از جدول ۵ (با توجه به شماره ردیف) با استفاده از پیکربندی‌های مدل و الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. هر ستون در جدول ۶ نشان‌دهنده شماره طرح واره، تعداد تراز قائم و نام الگوریتم محاسبه دید افقی است. برای نمونه 2-32(G2009) یعنی پیکربندی شماره ۲ با ۳۲ تراز قائم و الگوریتم محاسبه دید G2009. خانه‌های رنگی نشان می‌دهند که مدل با کدام الگوریتم و طرح‌واره



شکل ۷. آهنگ برخورد برای پیکربندی‌ها و الگوریتم‌های دید مختلف برای روزهای همراه با مه از ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ در شهرهای اراک، همدان، ارومیه و شهرکرد. محور افقی نشان‌دهنده شماره طرح‌واره، تعداد تراز قائم و نام الگوریتم محاسبه دید افقی است.

شهر همدان بیشتر از مهارت مدل با پیکربندی ۲-۳۲ و با همان الگوریتم‌های دید است. شایان گفتن است که مهارت مدل با پیکربندی‌های ۱-۳۲ و ۳-۳۲ برای پیش‌بینی مه شهر همدان نیز خوب است. همچنین ETS الگوریتم محاسبه دید افقی RUC که با همه پیکربندی‌ها صفر است، با اصلاح الگوریتم به RUC-new، بهبود قابل توجهی می‌یابد. با توجه به شکل، پیکربندی ۲ با ۳۲ تراز در راستای قائم، بهترین پیکربندی و الگوریتم‌های دید SW99 و G2009 بهترین الگوریتم‌های دید برای این مورد رخداد مه هستند.

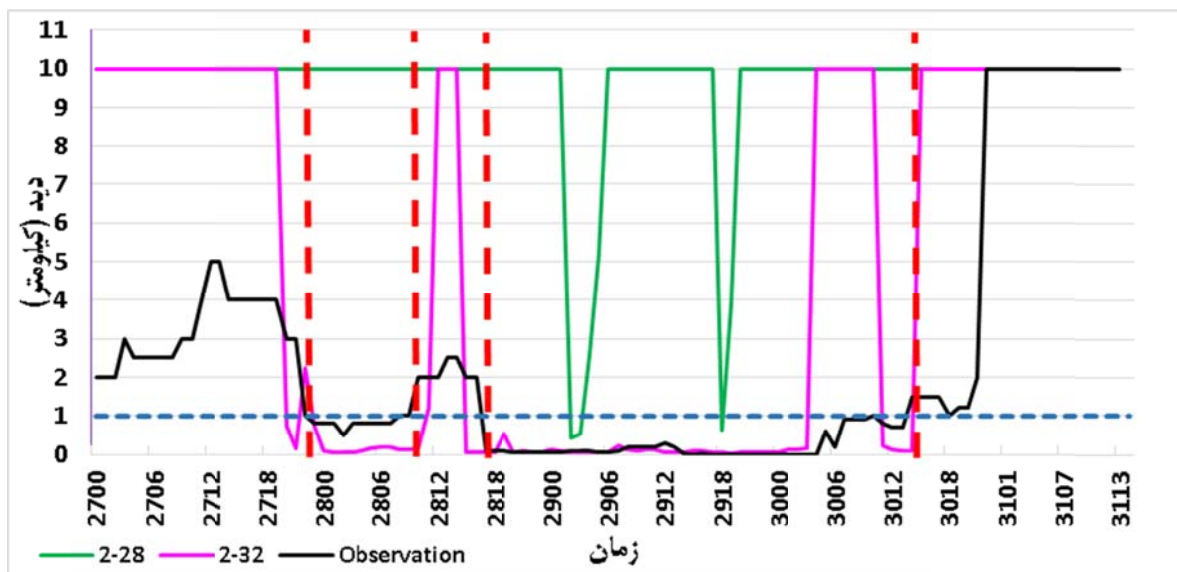
شکل ۸ شاخص درستی سنجی امتیاز تهدید متوازن را برای پیکربندی‌ها و الگوریتم‌های دید مختلف در روزهای همراه با مه از ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ در شهرهای اراک، همدان، ارومیه و شهرکرد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ETS از مقادیر ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰ به ترتیب برای پیش‌بینی مه در شهرهای اراک، ارومیه و شهرکرد با پیکربندی ۲-۲۸ به مقادیر بسیار بهتر و قابل قبول ۰/۵، ۰/۲ و ۰/۵۶ برای پیش‌بینی مه با پیکربندی ۲-۳۲ تغییر کرده است. البته مهارت مدل با پیکربندی ۲-۲۸ و با الگوریتم‌های دید SW99 و G2009 برای پیش‌بینی مه



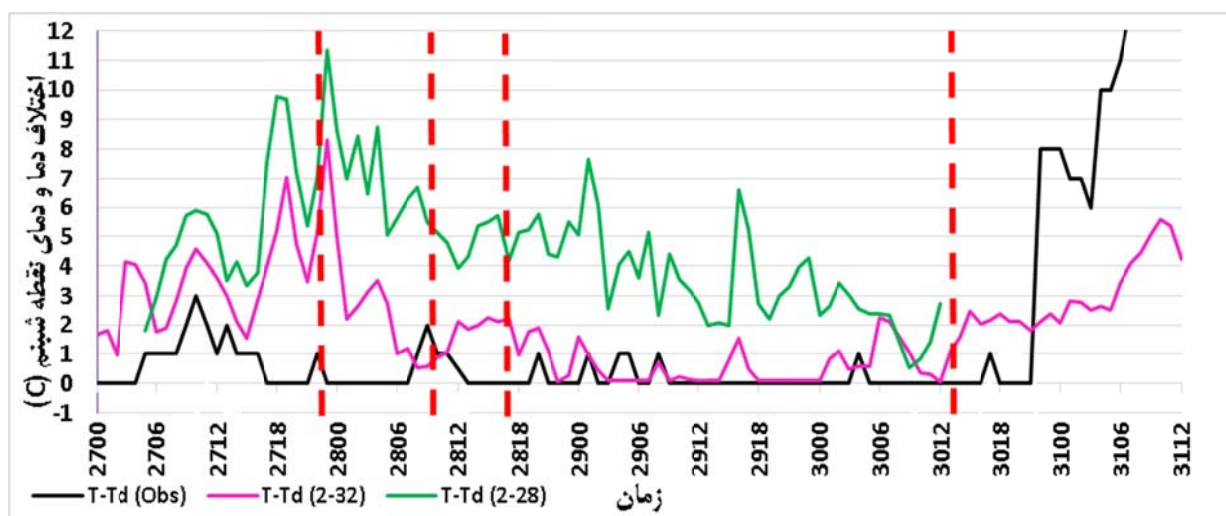
شکل ۸. شاخص درستی سنجی امتیاز تهدید متوازن برای پیکربندی‌ها و الگوریتم‌های دید مختلف در روزهای همراه با مه از ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ در شهرهای اراک، همدان، ارومیه و شهرکرد. محور افقی نشان‌دهنده شماره طرح‌واره، تعداد تراز قائم و نام الگوریتم محاسبه دید افقی است.

شکل ۱۰ مقدار اختلاف دما و دمای نقطه شبنم از برون داد مدل با پیکربندی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲ را با دیدبانی مقایسه می‌کند. با توجه به شکل، با افزایش تراز قائم جو در لایه مرزی، بهبود قابل توجهی حاصل شده است. شکل ۱۱ مقدار نم نسبی دیدبانی را با برون داد مدل با پیکربندی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲ مقایسه می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار نم نسبی از برون داد مدل با پیکربندی ۲-۳۲، هماهنگی خوبی با داده‌های دیدبانی دارد.

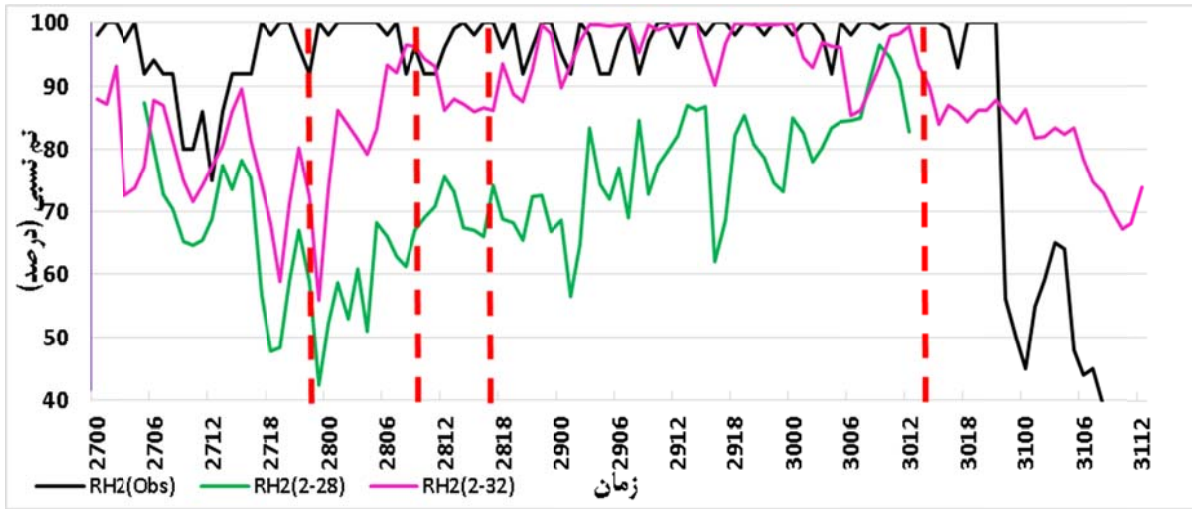
در ادامه برای نمونه چند مورد از نمودارهای تغییرات دید، نم نسبی و اختلاف دما و دمای نقطه شبنم ایستگاه اراک مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۹ مقدار دید محاسبه شده با الگوریتم SW99 از برون داد مدل با پیکربندی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲ را با دیدبانی مقایسه می‌کند. برای رسم این شکل، دیده‌های بیشتر از ۱۰ کیلومتر را ۱۰ قرار داده‌ایم. خط چین‌های قرمز محدوده مه را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مقایسه دید دیدبانی ایستگاه اراک با مقدار دید بر حسب کیلومتر با استفاده از الگوریتم محاسبه دید SW99 از برون داد مدل با پیکربندی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲. محور افقی نشان‌دهنده تاریخ و ساعت است.



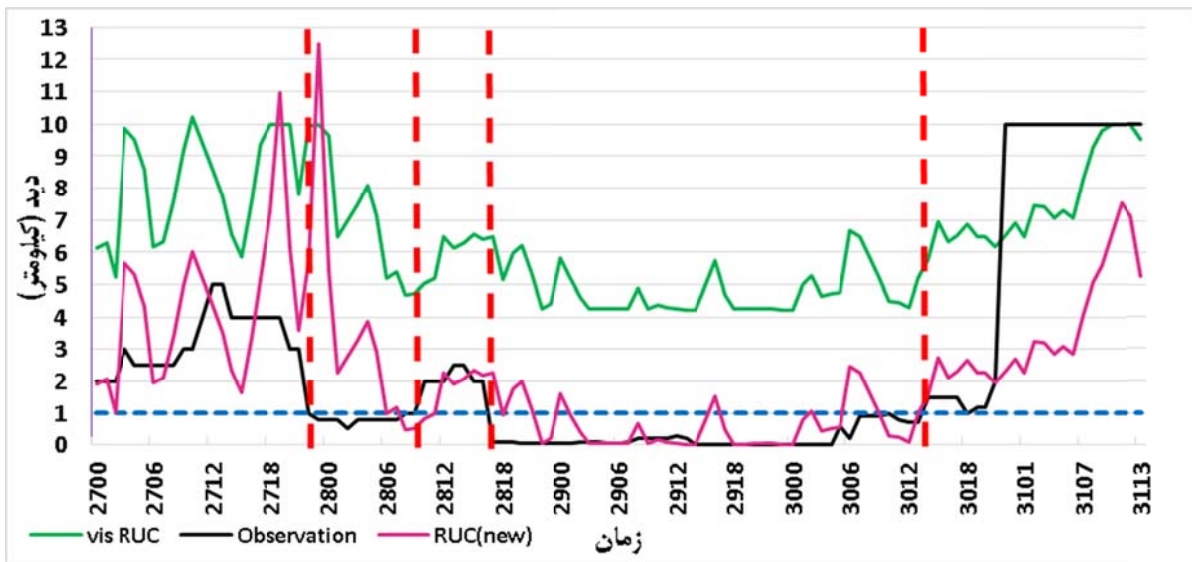
شکل ۱۰. مقایسه مقدار اختلاف دما و دمای نقطه شبنم دیدبانی با برون داد مدل با پیکربندی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲ در ایستگاه اراک. محور افقی نشان‌دهنده تاریخ و ساعت است.



شکل ۱۱. مقایسه مقدار نم نسبی دیدبانی با برون‌داد مدل با پیش‌بینی‌های ۲-۲۸ و ۲-۳۲ در ایستگاه اراک. محور افقی نشان‌دهنده تاریخ و ساعت است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با حذف اریبی، الگوریتم محاسبه دید اصلاح شده قادر به پیش‌بینی مه شده است.

شکل ۱۲ نیز مقدار دید محاسبه شده با الگوریتم محاسبه دید RUC و RUC-new از برون‌داد مدل با پیش‌بینی‌های ۲-۳۲ را با دیدبانی مقایسه می‌کند.



شکل ۱۲. مقایسه دید دیدبانی ایستگاه اراک با مقدار دید بر حسب کیلومتر با استفاده از الگوریتم محاسبه دید RUC و RUC-new از برون‌داد مدل با پیش‌بینی‌های ۲-۳۲. محور افقی نشان‌دهنده تاریخ و ساعت است.

۴. نتیجه گیری

پیش‌بینی مه به‌عنوان یک کمیت هواشناسی از جنبه‌های گوناگون از جمله ترافیک هوایی، زمینی و دریایی دارای اهمیت است. در مقاله حاضر دید افقی از ۲۷ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۱۵ در فرودگاه‌های ارومیه، اراک، بوشهر، زاهدان، همدان و شهرکرد، با استفاده از چهار الگوریتم محاسبه دید افقی شامل SW99، FSL، G2009 و RUC روی برونداد مدل میان مقیاس WRF با ۵ پیکربندی مختلف به‌دست آمد. در مرحله اول، مدل WRF با ۲۸ تراز در راستای قائم استفاده شد. در این حالت نتایج نشان داد که مدل WRF قادر به شبیه‌سازی رطوبت نبوده و مهارت قابل‌قبولی در پیش‌بینی رخداد مه ندارد، به‌گونه‌ای که بیشترین تعداد صحیح پیش‌بینی رخداد مه ۲ مورد از ۱۰ مورد بوده است. در مرحله دوم با افزایش ترازهای قائم در لایه مرزی به ۳۲ تراز، مهارت مدل در پیش‌بینی مه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت که با نتایج مطالعات قبلی همخوانی دارد (تردیف، ۲۰۰۷). در این حالت، بیشترین تعداد صحیح پیش‌بینی رخداد مه ۶ مورد از ۱۰ مورد بوده است. علت این امر آن است که در مدل با تفکیک قائم کمتر، آهنگ سرمایه‌شده ضعیف‌تری دیده می‌شود و در واقع مدل با ترازهای قائم کم نمی‌تواند سرمایه‌شده تابشی در جو نزدیک زمین را در چند متر پایین آن در اوایل شب، شبیه‌سازی کند. پیش‌بینی توسط مدل با تفکیک قائم بیشتر باعث افزایش قابل‌قبول مقدار آب ابر (LWC) و در نتیجه عمیق شدن مه می‌شود. (تردیف، ۲۰۰۷).

در ارزیابی پیکربندی‌ها، پیکربندی شماره ۲ و در بین الگوریتم‌های محاسبه دید، الگوریتم‌های SW99 و G2009 در پیش‌بینی دید بهتر از بقیه عمل کردند. شایان گفتن است که در مطالعات مختلف الگوریتم‌های محاسبه دید دیگری بهترین نتایج را در پیش‌بینی مه داشته‌اند (ازتانر و همکاران ۲۰۱۴)، بارتوک و همکاران (۲۰۱۲)، بنگ و همکاران (۲۰۰۹) و جابری و همکاران (۱۳۹۷)، اگرچه در بیشتر پژوهش‌ها از الگوریتم SW99 برای

محاسبه دید به‌جهت پیش‌بینی مه استفاده شده است (رومن کسکان و همکاران ۲۰۱۹)، گالتپ و میلرانت (۲۰۰۷) و برگوت (۲۰۰۷). همچنین پس پردازشگر مدل میان مقیاس آمریکای شمالی (North American Mesoscale Model)، دید را با استفاده از الگوریتم sw99 محاسبه می‌کند (گالتپ و همکاران، ۲۰۲۰). در این مطالعه موردی مدل WRF توانست از ۶ مه CBL، ۵ مه و از ۴ مه تابشی، ۲ مه را پیش‌بینی کند. بنابراین کارایی مدل در پیش‌بینی مه CBL بیشتر از پیش‌بینی مه تابشی بوده است. در واقع شکل‌گیری و توسعه مه تابشی به شرایط دینامیکی نزدیک سطح زمین (مانند باد، دما و آشفتگی) حساس است (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹). از طرف دیگر وقتی تشکیل مه تابشی تحت تأثیر ناهم‌واری محلی شکل نگرفته باشد (مانند مه تابشی بوشهر که در منطقه‌ای هموار رخ داده است)، مدل‌های پیش‌بینی عددی برای شبیه‌سازی آن مشکل دارند (مولر و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین با مقایسه مقادیر دمای شبیه‌سازی شده و دیدبانی در ارتفاع دو متری، ملاحظه شد که دمای شبیه‌سازی شده، مخصوصاً برای مه تابشی فرآینش‌یابی شده است. پژوهش‌های پیشین نیز بیانگر وجود اریبی مثبت در پیش‌بینی دما در ارتفاع دو متری در شرایط مه تابشی است که وجود این اریبی مثبت، به‌دلیل عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی سرمایه‌شده تابشی واقعی مرتبط با شرایط مه تابشی در سطح زمین است (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹).

در بررسی مقادیر رطوبت و دما در برونداد مدل WRF، مشخص شد که این مقادیر از روز دوم شبیه‌سازی همخوانی بیشتری با دیدبانی دارند، که به‌علت زمان اسپین آپ (Spin Up) مدل است. این موضوع با مطالعات پیشین هم‌همانگ است (رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به اینکه عدم قطعیت در پارامتری‌سازی فیزیکی مدل نقش مهمی در پیش‌بینی مه دارد (لین و همکاران، ۲۰۱۷)، بنابراین پیش‌بینی مه با استفاده از یک سامانه همادی ممکن است روش خوبی برای بهبود پیش‌بینی مه

برخی روش‌های تجربی (فرودگاه‌های تهران و مشهد)، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۴، ۳۷۹-۳۹۵.

جابری، پ.، ثابت قدم، س. و قادر، س.، ۱۳۹۷، پیش‌بینی عددی کاهش دید افقی در منطقه تهران: مطالعه موردی، هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۷، تهران.

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

باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود پیش‌بینی رخداد انواع مه با استفاده از پارامتری‌سازی‌های فیزیکی متفاوت در مدل انجام شود.

مراجع

آزادی، م.، رضازاده، پ.، میرزایی، ا. و وکیلی، غ.، ۱۳۸۲، پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران، مطالعه مقایسه‌ای پارامتری‌سازی‌های فیزیکی، هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، تبریز، ایران.

تاج‌بخش، س.، مرادی، م.، محمدپور پنجاه، م. و رشیدزاد، م.، ۱۳۹۷، پیش‌بینی رخداد مه به کمک

- Ahrens, C. D. and Henson, R., 2018, *Meteorology today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 12th Edition. Cengage Learning.
- Bang, C., Lee, J. W. and Hong, S.Y., 2009, Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model. *Journal of Korean society for atmospheric environment*, 24, 92-101.
- Ballard, S. P., Golding, B. W. and Smith, R. N. B., 1991, Mesoscale model experimental forecasts of the Haar of northeast Scotland. *Monthly Weather Review*, 119, 2107-2123.
- Bartok, J., Bott, A. and Gera, M., 2012, Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region. *Boundary-Layer Meteorology*, 145(3), 485-506.
- Benjamin, S. G., Devenyi, D., Weygandt, S. S., Brundage, K. J., Brown, J. M., Grell, G. A., Kim, D., Schwartz, B. E., Smirnova, T. G., Smith, T. L. and Manikin, G. S., 2004, An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 495-518.
- Bergot, T., 2007, Quality assessment of the Cobel-Isba numerical forecast system of fog and low clouds. *Pure appl. geophys.*, 164 (2007), 1265-1282.
- Byers, H. R., 1959, *General Meteorology*. McGraw-Hill.
- Cuxart, J. and Jiménez, M.A., 2011, Deep radiation fog in a wide closed valley: study by numerical modeling and remote sensing. *Pure Appl Geophys.*, 169, 911-926.
- Doran, J. A., Rohr, P. J., Beberwyk, D. J., Brooks, G. R., Gayno, G. A., Williams, R. T., Lewis, J. M. and Lefevre, R. J., 1999, TheMM5at the AF Weather Agency—New products to support military operations. Preprints, Eighth Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 115-119.
- 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.
- Fultz, A. J. and Ashley, W. S., 2016, Fatal weather related general aviation accidents in the United States. *Physical Geography*, 37(5), 291-312, DOI: 10.1080/02723646.2016.1211854
- George, J. J., 1951, Fog. *Compendium of Meteorology*, T. F. Malone, Amer. Meteor. Soc., 1179-1189.
- Gultepe, I. and Milbrandt, J., 2007, Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project. *Pure Appl. Geophys.*, 164, 1161-1178.
- Gultepe, I., Hansen, B., Cober, S. G., Pearson, G., Milbrandt, J. A., Platnick, S. and Oakley, J. P., 2009, The fog remote sensing and modeling field project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 341-359.
- Gultepe, I., Milbrandt, J. and Zhou, B., 2017, Marine Fog: A review on microphysics challenges and advancements in observations, modeling, and forecasting, (Chapter 7). In: Koracin, D. and Dorman, C., *Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations, Modeling, and Forecasting*, Springer Atmospheric Science., 7.345-7.394.
- Gultepe, I., Heymsfield, A. J. and Gallagher, M., 2020, Arctic ice fog: its microphysics and prediction (Chapter 4). In: Kokhanovsky, A. and Tomasi, C., *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere*, Springer Polar Sciences., 6.361-6.414.
- Hong, S. Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318-2341.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J.,

- Shephard, M. W., Clough, S. A. and Collins, W. D., 2008, Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103.
- Lester, J. F., 2007, Aviation weather, Jepson Pub. U.S.A.
- Lin, Y.L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092.
- Lin, C.Y., Zhang, Z.F., Pu, Z.X. and Wang, F., 2017, Numerical simulations of an advection fog event over Shanghai Pudong International Airport with the WRF model. *J. Meteor. Res.*, 31(5), 874–889.
- Lim, K. S. S. and Hong, S. Y., 2010, Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 1587–1612.
- 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.
- Muller, M. D., Masbou, M. and Bott, A., 2010, Three-dimensional fog forecasting in complex terrain. *Q J R Meteorol Soc.*, 136, 2189–2202.
- Nakanishi, M. and Niino, H., 2004, An improved Mellor–Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, 1–31.
- Obukhov, A. M., 1971, Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorology.*, 2 (1), 7-29.
- Oztaner, Y.B., Unal, A. and Kindap, T., 2014, Comparative analysis of fog prediction algorithms via use of WRF model over istanbul, 14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 06 – 10 October 2014, Prague, Czech Republic.
- Philip, A., Bergot, T., Bouteloup, Y. and Bouyssel, F., 2016, The impact of vertical resolution on fog forecasting in the kilometer-scale model AROME: A case study and statistics. *Weather and Forecasting.*, 31(1), 1655–1671.
- 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.
- Roman-Cascón, C., Yagüe, 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.
- Román-Cascón, C., Steeneveld, G. J., Yague, C., Sastre, M., Arrillaga, J. A. and Maqueda, G., 2016, Forecasting radiation fog at climatologically contrasting sites: Evaluation of statistical methods and WRF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 1048–1063, doi: 10.1002/qj.2016.142.issue- 695.
- Roman-Cascón, C., Yagüe, C., Steeneveld, G. J., Morales, G., Arrillaga, J.A., Sastre, M. and Maqueda, G., 2019, Radiation and cloud-base lowering fog events: Observational analysis and evaluation of WRF and HARMONIE. *Atmospheric Research.*, 229, 190–207.
- Singh, A., George, J. P. and Iyengar, G. R., 2018, Prediction of fog/visibility over India using NWP Model. *Journal of Earth System Science.*, 127-153.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W. and 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., 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, 265–289, doi: 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, doi: 10.1175/1520-0450(1999)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2.
- 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.
- Tardif, R. and Rasmussen, R. M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. And Climatology.*, 46, 1141-1168, doi:10.1175/JAM2516.1.
- Tardif, R. and Rasmussen, R. M., 2008, Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York city region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology.*, 47, 1681–1703.
- Tewari, M., Chen, J., 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, 11–15.
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M. and Hall, W. D., 2008, Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.
- Van der Velde, I., Steeneveld, G., 2010, Wichers Schreur, B. and Holtslag, A., Modeling and

- forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions. *Monthly Weather Review.*, 138, 4237–4253.
- Willett, H. C., 1928, Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 56, 435–468.
- Yang, Y. and Gao, S., 2016, Sensitivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over the Yellow Sea. *Acta Meteorol. Sin.*, 74 (6), 974–988, <https://doi.org/10.11676/qxxb2016.062>.
- Yang, Y., Hu, X. M., Gao, S. and Wang, Y., 2019, Sensitivity of WRF simulations with the YSU PBL scheme to the lowest model level height for a sea fog event over the Yellow Sea. *Atmospheric Research.*, 215 (2019), 253–267.
- Yuan, X. and Chen, Z. H., 2013, Statistics and monitoring analysis of advection fog at Shanghai Pudong Airport. *J. Meteor. Sci.*, 33, 95–101, DOI:10.3969/2012jms.0149
- Zhou, B., Du, J., Gulpepe, I. and DiMego, G., 2012, Forecast of low visibility and fog from NCEP: Current status and efforts. *Pure and Applied Geophysics.*, 169, 895–909.

پیوست

Table. The WRF model configuration.

Configuration Number – vertical levels	Microphysics	PBL	Longwave	Shortwave	Land surface	sf_sfclay_physics
2-28	Lin et al. (Lin et al., 1983)	YSU (Hong et al., 2006)	RRTMG (Iacono et al., 2008)	Dudhia (Dudhia, 1989)	NOAH LSM (Tewari et al., 2004)	Monin-Obukhov (Obukhov, 1971)
1-32	Lin et al.	YSU	RRTM	Dudhia	NOAH LSM	Monin-Obukhov
2-32	Lin et al.	YSU	RRTMG	Dudhia	NOAH LSM	Monin-Obukhov
3-32	Lin et al.	ACM2 (Pleim, 2007)	RRTM (Mlawer et al., 1997)	Dudhia	NOAH LSM	Monin-Obukhov
4-32	Thompson (Thompson et al., 2008)	YSU	RRTMG	Dudhia	NOAH LSM	Monin-Obukhov
5-32	WDM6-class (Lim et al., 2010)	MYN2.5 (Nakanishi and Niino, 2004)	RRTM	Dudhia	NOAH LSM	Monin-Obukhov

Numerical prediction of several radiation and CBL fog events over Iran using the WRF model for late December 2015

Pahlavan, R.¹, Moradi, M.², Tajbakhsh, S.³, Azadi, M.² and Rahnama, M.³

1. Ph.D. Student, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

2. Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

(Received: 4 April 2020, Accepted: 29 Sep 2020)

Summary

In this study it has been attempted to simulate the occurrence of radiation and CBL fog during late December 2015 in Orumiyeh, Arak, Bushehr, Zahedan, Hamedan and Shahrekord airports, using the mesoscale WRF model.

To simulate radiation and CBL fogs, the output of the WRF model with five different configurations as presented in table 1 was used, and then four visibility calculation algorithms were applied to the output of the model to find the best configuration and visibility calculation algorithm for the prediction of the considered fog events. The WRF model version 3.9.1 with Lambert conformal projection, using two nested domains with 16-km and 4-km grid spacing was used for the simulation. Based on the results of some previous studies (e.g. Lin et al., 2017; Van der Velde et al., 2010; Roman-Cascón et al., 2012), because of the sensitivity of the fog prediction to cloud microphysics, planetary boundary layer and long-wave radiation schemes, five different configurations of the WRF model with varying physical parametrization schemes were implemented.

In the first series of experiments, the five mentioned configurations of the model were run using 28 vertical levels. Then four horizontal visibility calculation algorithms including SW99 (Stoelinga and Warner, 1999), FSL (Doran et al., 2009), G2009 (Gultepe et al., 2009) and RUC (Benjamin et al., 2004) were applied on the model output to calculate the horizontal visibility separately for each model output and for six synoptic stations in the domain. It is seen that, since the amount of liquid water content (LWC) of the cloud with all model configurations is zero or nearly zero, the calculated horizontal visibility was much greater than 10 km for all stations. In general, the model showed poor results for the simulation of relative humidity in the boundary layer and thus the occurrence of fog.

Since some previous studies (e.g. Yang and Gao, 2016; Philip et al., 2016; Tardif, 2007) have emphasized the importance of high vertical resolution to resolve the main fog formation processes, in the next series of experiments the number of vertical levels in the model was increased from 28 to 32, such that 11 vertical levels were considered from the ground level up to 200 m above ground. The model was then implemented with the same five configurations as in the first experiments. Examining the results revealed that the model found the skill of recognizing moisture and fog in most cases, and predicted 5 out of 6 cases of CBL and 2 out of 4 cases of radiation fogs. For the verification the outputs for the predictions of fog events the calculated visibilities were compared with the verifying observational data and hit rate and equitable threat score were calculated. The evaluation indicated that the configuration 2 with 32 vertical levels combined with SW99 and G2009 algorithms performed better for the prediction of visibility for stations considered here. It can also be said that increasing the number of vertical levels close to the surface is of great importance in improving the quality of fog forecasting, because high vertical resolution is required to realistically represent the vertical structure and magnitude of the radiative cooling in the first few meters of the atmosphere, and thus obtain more accurate forecasts of radiation fog. Using high vertical resolution in simulations, results in an acceptable increase of liquid water content (LWC) and thus improves the accuracy of fog prediction. The results also show that the model's skill to predict CBL fog is higher than that of radiation fog in this case study. By comparing the simulated and observational two meter temperature values, it was observed that the simulated air temperature is overestimated, especially for the radiation fog. Previous researches have also shown a positive bias in predicted air temperature at two-meter height in radiation fog conditions, which is probably due to the inability of the model to simulate the actual radiative cooling associated with fog conditions in the first few meters of the atmosphere (Roman-Cascón et al., 2019).

Keywords: Numerical Prediction, Radiation fog, CBL fog, WRF Model, Vertical levels .

* Corresponding author:

azadi68@hotmail.com