نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و چهارم، شماره ۷۲، بهار ۱۴۰۳

حساسیت‌سنجی پارامترسازی‌های فیزیکی مدل WRF در شبیه‌سازی اقلیم شهری و کاهش جزیره گرمایی در شرایط پایدار جوی (مطالعه موردی: استان-های تهران و البرز)

دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۴ **پذیرش نهایی**: ۹۸/۴/۲

صفحات: ۴۷-۲۵

فهیمه شاکری: دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی شهری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران
Email: fa.shakeri145@yahoo.com
غلامعباس فلاح قالهری: دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران[۱]
Email: Ab_fa789@yahoo.com
هاشم اکبری: استادگروه مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه کانکوردیا، کبک، کانادا
Email: akbari@encs.concordia.ca
زهرا حجازی زاده: استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
Email: hedjazizadeh@yahoo.com

چکیده

در پژوهش حاضر حساسیت‌سنجی عناصر هواشناسی (نظیر میانگین دما، رطوبت نسبی و سرعت باد) به پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف در مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا (WRF) جهت شبیه‌سازی اقلیم شهر و تعدیل جزیره گرمایی شهری منطقه موردمطالعه، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت مطالعه مسائل زیست‌محیطی شهری از مدل تاج‌پوش شهری (UCM) به‌صورت جفت‌شده با مدل WRF استفاده شد. آزمایش‌های متعددی به‌منظور دستیابی به پیکربندی بهینه برای انجام شبیه‌سازی در بازه زمانی ۱۸-۲۱ آگوست ۲۰۱۶ با شرایط جوی پایدار در فصل تابستان اجرا شد. انتخاب مناسب‌ترین پیکربندی با کمترین خطا، به‌عنوان بستری مناسب برای شبیه‌سازی‌های اقلیم شهری جهت مطالعه راهکارهای تعدیل جزیره گرمایی شهری (UHI) مطرح می‌شود. افزایش بازتاب سطوح جهت کاهش UHI در دامنه اعمال گردید. جهت ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل و مقادیر مشاهداتی متناظر با آن از سه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شد. نتایج نشان داد در استان تهران، به‌طورکلی تمامی پیکربندی‌ها دمای هوا و سرعت باد را کمتر از مقدار واقعی و رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند. همچنین در استان البرز تمامی پیکربندی‌ها دمای هوا و سرعت باد را بیشتر از مقدار واقعی و رطوبت نسبی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند. با افزایش انعکاس سطوح شهری، میانگین دمای استان‌های تهران و البرز به ترتیب به میزان ۰/۶ و ۰/۲ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. سرعت باد مخصوصاً در نواحی شهری، مقداری افزایش می‌یابد. همچنین شاهد افزایش میانگین رطوبت نسبی (خصوصاً در نواحی شهری) در مناطق موردمطالعه خواهیم بود.

کلید واژگان: مدل WRF، مدل تک لایه شهری (UCM)، آلبیدو، پارامتر سازی فیزیکی.

۱. نویسنده مسئول: سبزوار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، گروه اقلیم‌شناسی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

مقدمه

شهرنشینی با تبدیل مناطق وسیعی از سطوح طبیعی به سطوح غیرقابل نفوذ، نتیجه رشد جمعیت و توسعه اقتصادی است که بر ویژگی‌های سطح زمین و تعامل زمین – فضا تأثیر می‌گذارد. با تغییر چشم‌انداز طبیعی توسط فعالیت‌های انسان‌ساخت، مبادلات انرژی سطح و جو تغییریافته و به‌تبع آن؛ اقلیم محلی، منطقه‌ای و حتی جهانی تحت تأثیر قرارگرفته است. یکی از ویژگی‌های سطح زمین که به دلیل شهرنشینی تغییریافته، میزان آلبیدو[1] (ضریب انعکاس) است که به‌عنوان نسبت انرژی خورشیدی منعکس‌شده از یک پهنه آبی یا سطح، به‌کل مقدار انرژی خورشیدی رسیده به آن تعریف‌شده است و محدوده آن بین ۰ (جذب کامل) تا ۱ (بازتاب کامل) است (زیو و همکاران، ۲۰۱۶). در بسیاری از کلان‌شهرها، درجه حرارت در مرکز شهر بالاتر از محیط غیرشهری پیرامون آن است. این پدیده جزیره گرمایی شهری (UHI[2]) نامیده می‌شود که به‌وضوح تحت شرایط پایدار جوی (آسمان صاف همراه با باد ملایم، کاهش رطوبت نسبی و بارش) تشکیل می‌شود (آدینا[3] و همکاران ۲۰۰۹؛ نورالزمان[4]، ۲۰۱۵). اخیراً پدیده جزیره گرمایی در تابستان به دلیل مشکلاتی نظیر شرایط عدم آسایش و تقاضای انرژی بالا مورد اهمیت قرار گرفته است (کوزاکا[5] و همکاران، ۲۰۰۴؛ هاشمی دره بادامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۹). مصالح مورداستفاده در بافت شهری نقش بسیار مهمی در تعادل حرارتی شهری ایفا می‌کند. یکی از دلایل مهم تشکیل UHI، استفاده از مصالح بتن و آسفالت در بافت شهری است که دارای ظرفیت گرمایی بالاست (اکبری و همکاران، ۲۰۱۶). اختلاف دمای یک شهر با نواحی مجاور آن در یک روز تابستانی گرم ممکن است به میزان ۲/۵ درجه سانتی‌گراد برسد که این امر منجر به افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی تقاضای برق شهری می‌شود (اکبری و همکاران، ۲۰۰۱). به‌منظور بهبود شرایط زندگی در محیط‌های شهری، راهکارهای متعددی در جوامع علمی جهت تعدیل دمای شهری و جزایر گرمایی شهری موردبحث قرارگرفته است؛ از جمله این راهکارها بام سبز، پیاده‌روهای نفوذپذیر، درختان سایه‌انداز، افزایش فضای سبز شهری و استفاده از مصالح ساختمانی با آلبیدوی بالا می‌باشد (اکبری و همکاران، ۱۹۹۷، ۲۰۰۱، ۲۰۰۹؛ آرنفیلد[6]، ۲۰۰۳؛ طاها[7]، ۱۹۹۷ الف و ب). کاهش انعکاس سطوح شهری (با ذخیره انرژی خورشیدی بیشتر و افزایش دمای شهر) منجر به تشکیل خرد اقلیم شهری می‌شود (بویر[8] و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش انعکاس سطوح شهری موجب می‌شود تا بخش قابل‌توجهی از تابش خورشیدی ورودی بازتاب شود (اکبری و همکاران،۲۰۱۶). مطالعات عددی و تجربی متعددی در گذشته برای تأیید تأثیر مثبت این استراتژی انجام شده است (جندقیان و اکبری،۲۰۱۸؛ هویساید[9] و همکاران، ۲۰۱۶؛

1. Albedo
2 Urban Heat Island
3. Adinna
4 Nuruzzaman
5 Kusaka
6 Arnfield
7 Taha
8 Bouyer
9 Heaviside

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

بالدینلی[1] و همکاران، ۲۰۱۵؛ روسی[2] و همکاران، ۲۰۱۵). جنبه صرفه‌جویی انرژی توسط سطوح دارای انعکاس بالا در یک چشم‌انداز جهانی توسط اکبری و همکاران (۲۰۰۹،۲۰۰۱) شبیه‌سازی‌شده است.

به‌منظور ارائه بهتر فرایندهای فیزیکی پیچیده مرتبط با شار گرما، تکانه و رطوبت در محیط شهری، مدل تاج‌پوش شهری (UCM[3]) به مدل میان‌مقیاس WRF[4] جفت می‌شود. هدف اصلی این مدل شهری، شبیه‌سازی بهتر شرایط مرزی پایین و ارائه‌ی پیش‌بینی دقیق‌تر دمای هوا در ارتفاع ۲ متری، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری، بارش، دمای سطحی، تابش موج‌کوتاه، تابش موج‌بلند و دیگر پارامترهای تعریف‌شده در مناطق شهری است (جندقیان و همکاران، ۲۰۱۸). این مدل تک لایه‌ای که از هندسه ساده‌شده مناطق شهری استفاده می‌کند، کمیت‌هایی همچون سایه‌اندازی ساختمان‌ها، بودجه تابشی دیوارها، بام‌ها، معابر و الگوی باد در منطقه شهری را محاسبه می‌کند و در اختیار مدل میان‌مقیاس قرار می‌دهد (کوزاکا و کیمورا[5]، ۲۰۰۴). مدل WRF که سامانه‌ای با فناوری به‌روز مدل‌سازی است و عمدتاً جهت شبیه‌سازی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بکار می‌رود، از انواع طرح‌واره‌های فیزیکی مانند طرح‌واره‌های لایه‌مرزی، همرفت، تابش، لایه سطحی، مدل سطح زمین، خردفیزیک، تابش طول‌موج بلند و طول‌موج کوتاه تشکیل‌شده است که هرکدام از این طرح‌واره‌ها از تقریب‌ها و روش‌های مختلفی برای پارامتر سازی فرایندهای گوناگون استفاده می‌کنند (ساسانیان و همکاران،۱۳۹۲)؛ بنابراین اولین تلاش در ایجاد یک مدل برای استفاده در یک منطقه مشخص، تعیین مناسب‌ترین پیکربندی برای شبیه‌سازی‌هاست و این پیکربندی منحصربه‌فرد بوده (کریگر[6] و همکاران، ۲۰۰۹) و به‌شدت به منطقه موردمطالعه، فصل سال و مقیاس زمانی و مکانی وابسته است و ضرورتاً قابل‌استفاده برای مناطق دیگر نیست. تحلیل و درک طرح‌واره‌های پارامتر سازی نقش مهمی در پیش‌بینی آب و هوایی عددی دارد. لازم به ذکر است که در انتخاب طرح‌واره‌ها نباید به‌طور مجزا به بررسی کارایی یک طرح‌واره پارامتر سازی پرداخت بلکه باید چگونگی برهم‌کنش متقابل آن با سایر طرح‌واره‌های فیزیکی منتخب را نیز مدنظر قرار داد (استنسراد[7]، ۲۰۰۷). گزینه‌های فیزیکی مدل WRF و جزئیات پارامتر سازی در تحقیقات اسکاماروک و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است. حساسیت‌سنجی پارامترهای هواشناسی (مانند دما و سرعت باد) با مجموعه‌ای از پارامترسازی‌های مختلف، محققان را قادر می‌سازد تا دقیق‌ترین پیکربندی را برای شبیه‌سازی اقلیم شهر انتخاب نمایند (جندقیان و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات گسترده‌ای جهت حساسیت‌سنجی طرح‌واره‌های پارامتر سازی مدل WRF در مناطق مختلف جهان انجام شده است. جندقیان و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی حساسیت‌سنجی پارامتر سازی فیزیکی در مدل WRF برای شبیه‌سازی‌های اقلیم شهری و کاهش جزیره گرمایی در مونترال پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، پیکربندی S06 که شامل طرح‌واره‌های WDM16 (خردفیزیک)، Grell 3D (همرفت)، MYG (لایه‌مرزی سیاره‌ای) و RRTMG (تابش) می‌باشد نسبت به سایر پیکربندی‌ها خطای کمتری دارد. همچنین با افزایش آلبیدوی سطوح در طول یک دوره بارانی در تابستان ۲۰۰۹؛ دمای هوا، رطوبت نسبی و بارش به ترتیب

1 Baldinelli
2 Rossi
3 Urban Canopy Model
4 The Weather Research and Forecasting model
5 Kusaka and Kimura
6 Krieger
7 Stensrud

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

به میزان ۰/۲ درجه سانتی‌گراد، ۲/۸ درصد و ۰/۲ میلی‌متر کاهش و سرعت باد به میزان ناچیز افزایش می‌یابد. داس[1] و همکاران (۲۰۱۵)، ونگ و سیمان[2] (۱۹۹۷)، کلوسو[3] و همکاران (۲۰۱۴) و بسیاری دیگر مسئله مطالعات حساسیت با استفاده از مدل WRF برای شبیه‌سازی‌های ریزمقیاس را مطرح نموده‌اند. در ایران نیز می‌توان به تحقیقات آزادی و همکاران (۱۳۸۲)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۷)، قادر و همکاران (۱۳۹۴)، لایقی و همکاران (۱۳۹۶)، ملکوتی و علی محمدی (۱۳۹۳)، ذوالجودی و همکاران (۱۳۹۲) اشاره نمود که مسئله مطالعات حساسیت با استفاده از مدل WRF برای شبیه‌سازی‌های ریزمقیاس را مطرح نموده‌اند. توسعه شهری شتاب‌یافته کلان‌شهرهایی نظیر تهران و کرج که طی دهه‌های گذشته صورت گرفته است، مشکلات زیست‌محیطی نظیر آلودگی هوا، افزایش دما، ترافیک و مصرف انرژی را به همراه داشته است. با توجه به نتایج تحقیقات (فانی، ۲۰۰۶؛ سمسار،۱۹۸۶؛ مدنی پور، ۱۹۹۸)؛ فرآیندهای رشد شهری تهران همواره تغییرات مکرر را تجربه نموده است. هرچند آهنگ رشد جمعیت در کلان‌شهر تهران طی دهه گذشته کاهش‌یافته است، اما جمعیت شهرهای استان البرز که در مجاورت این کلان‌شهر واقع‌شده است، کماکان رو به افزایش است (خسروی و قبادی،۱۳۹۳). در تحقیق حاضر عملکرد طرح‌واره‌های پارامتر سازی مختلف مدل WRF جفت شده با مدل تک لایه شهری (UCM) در شبیه‌سازی عددی عناصر هواشناسی (نظیر دمای هوا در ارتفاع دو متری، سرعت باد در ارتفاع ده متری و رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری) در استان‌های تهران و البرز طی شرایط جوی پایدار در فصل تابستان حساسیت‌سنجی شده است. همچنین جهت مقابله با پیامدهای نامطلوب پدیده جزیره گرمایی شهر، اثرات افزایش انعکاس سطوح با پارامترسازی‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت. استفاده از مدل شهری (UCM) در تجزیه‌وتحلیل تأثیرات شهرنشینی بر اقلیم منطقه‌ای امری ضروری است (لیائو[4] و همکاران، ۲۰۱۴). تاکنون در ایران پژوهشی به‌صورت جامع به بررسی اثرات افزایش آلبیدو با پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف مدل جفت شده WRF/UCM در حوزه منتخب، انجام نشده است.

روش تحقیق

معرفی مدل‌های مورداستفاده و اصلاح کاربری زمین

در این تحقیق عملکرد طرح‌واره‌های پارامتر سازی مختلف مدل WRF جفت شده با مدل شهری (UCM) در شبیه‌سازی وضعیت جوی و تعدیل جزیره گرمایی شهری در استان تهران و البرز ارزیابی شد. مدل پیشرفته تحقیقاتی WRF (ARW) نسخه ۳.۹.۱ برای این تحقیق مورداستفاده قرار گرفت. مدل WRF یک مدل غیرهیدرواستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک) برای شبیه‌سازی جو است که دارای کاربردهای عملیاتی و تحقیقاتی مختلف است. محدوده کاربرد این مدل بسیار وسیع است و گستره‌ای بین چند صد متر تا هزاران کیلومتر را پوشش می‌دهد (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸). مدل UCM که توسط کوزاکا و همکاران (۲۰۰۱) به مدل WRF اضافه گردید، قابلیت ساده‌سازی شرایط زمینی را دارد. برای بررسی بهتر فرایندهای فیزیکی شامل انتقال حرارت، تکانه و میزان بخارآب در محیط‌های شهری و در مقیاس‌های میانی از این مدل به‌صورت جفت

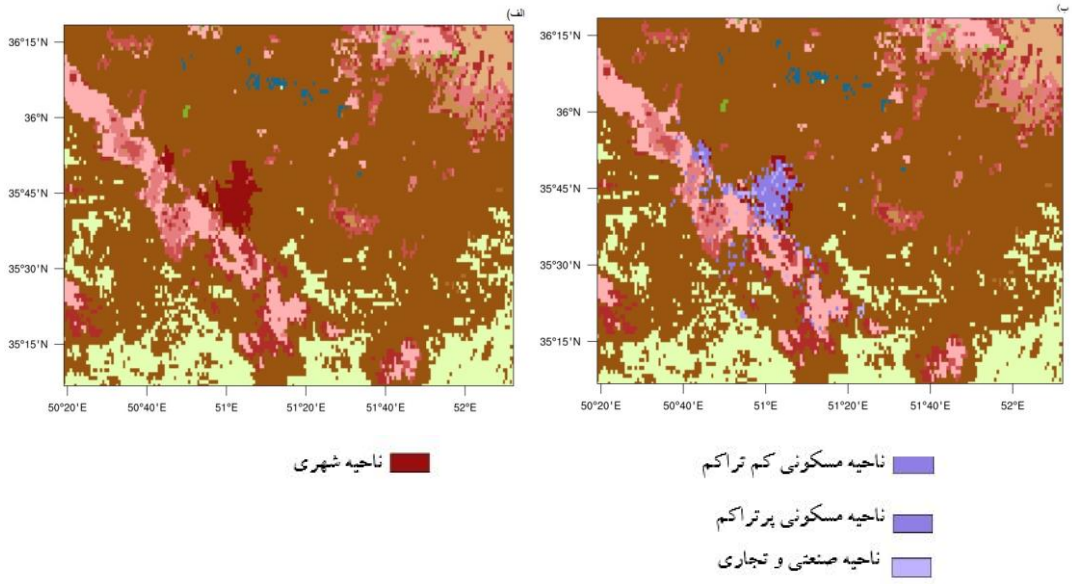
[1] Das
[2] Wang and Seaman
[3] Kolusu
[4] Liao

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

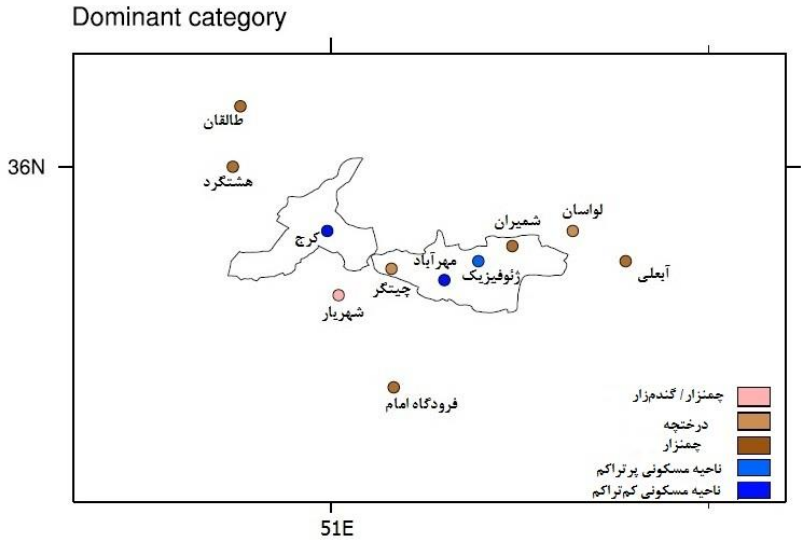
شده با مدل WRF استفاده می‌شود. کاربری زمین از اصلی‌ترین مواردی است که باید در شبیه‌سازی‌های مربوط به نواحی شهری مدنظر قرار گیرد (اصلانی،۱۳۹۲). با توجه به این نکته مدل WRF به‌صورت پیش‌فرض از داده‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری ایالات‌متحده (USGS[1]) با ۲۴ کلاس شامل یک کلاس شهری با تفکیک افقی ۳ دقیقه (تقریباً ۴/۵ کیلومتر) برای در نظر گرفتن کاربری‌های مختلف زمین با استفاده از تصاویر ماهواره ای استفاده می‌کند؛ اما این امکان میسر است که بتوان بر اساس منطقه موردمطالعه تعداد کاربری‌های مختلف را ارتقاء داد. در تمامی مدل‌های شهری نگارش شده، منطقه شهری بر اساس تراکم ساختمان‌ها و کاربری آن‌ها به سه کلاس تقسیم‌بندی شده است که عبارت‌اند از: ناحیه مسکونی کم‌تراکم، ناحیه مسکونی پرتراکم و ناحیه صنعتی و تجاری (کاملاً متراکم)؛ بنابراین لازم است جهت استفاده از مدل شهری UCM با تمام ظرفیت، پایگاه داده موجود را به‌منظور تشخیص ۳ کلاس شهری گسترش داده و طبقه‌بندی نماییم. جزئیات مربوط به این سه کلاس شهری و مدل شهری UCM در تحقیقات (کوزاکا و کیمورا، ۲۰۰۴) ارائه شده است. ازاین‌رو با تغییر کلاس‌های کاربری اراضی USGS به سه کلاس شهری مجزا با زبری‌های متفاوت (استفاده از توپوگرافی و کاربری اراضی واقعی‌تر در مدل)، سعی شد تا حدی تأثیر واقعی‌تر زبری در بروندادهای مدل بررسی شود. طول زبری در این آزمایش برای سه کلاس جمعیتی- ساختمانی کم‌تراکم، پرتراکم و ناحیه صنعتی، تجاری (کاملاً متراکم) به ترتیب ۸۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های ترمودینامیکی در این ۳ کلاس یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج کاربری اراضی، حاصل پیاده‌سازی روش‌های GIS بر روی نقشه تراکم شهری، شهرهای تهران و کرج با درجه تفکیک ۱/۲۰۰۰ سال ۲۰۰۵ سازمان نقشه‌برداری ایران می‌باشد شکل (۱). در این اجرا به‌منظور اصلاح توپوگرافی پیش‌فرض مدل، از داده‌های شبکه‌ای شده توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری نیروهای مسلح با تفکیک ۳ ثانیه استفاده‌شده است. برای این منظور ۳ کلاس آخر داده‌های کاربری اراضی از داده‌های USGS به کلاس‌های شهری اختصاص داده‌شده است (سلطان‌زاده و همکاران،۱۳۹۰)؛ بنابراین با اجرای داده‌های توپوگرافی و کاربری اراضی اصلاح‌شده (اجرای سه کلاسه) در مدل WRF، ایستگاه‌های ژئوفیزیک، مهرآباد و کرج در محدوده شهری قرار گرفته‌اند شکل (۲).

[1] United States Geological Survey

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]



شکل (۱). تفاوت کاربری اراضی در الف) اجرای مرجع با یک کلاس شهری ب) اجرای سه کلاسه برای حوزه شماره ۴ با تفکیک افقی ۱/۳۳ کیلومتر (مناطق قرمزرنگ در (الف) نمایانگر مناطق شهری در مدل می‌باشند).



شکل (۲). کاربری اراضی ایستگاه‌های موردمطالعه با اجرای سه کلاسه در حوزه چهارم.

حوزه محاسباتی مدل

حوزه محاسباتی از ۴ شبکه تودرتو با فواصل شبکه‌ای ۳۶، ۱۲، ۴ و ۱/۳۳ کیلومتر و تفکیک قائم ۳۵ ترازی تشکیل شده است. حوزه چهارم (با تفکیک ۱/۳۳ کیلومتر) به‌گونه‌ای انتخاب‌شده که کلیه ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه را پوشش دهد. گام زمانی انتگرال‌گیری برای حوزه بیرونی ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته‌شده است. برای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

تأمین شرایط آغازگری و مرزی شبیه‌سازی‌ها از داده‌های تحلیل FNL[1] با فاصله‌های زمانی ۶ ساعته و تفکیک افقی $1^\circ \times 1^\circ$ استفاده شده است. این داده‌ها در واقع پس پردازش شده داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی (GFS) می‌باشد (ملکوتی و علی محمدی، ۱۳۹۳).

سناریوها

یکی از راهکارهای تعدیل گرمایش شهری موردبررسی در پژوهش حاضر، استفاده از موادی با آلبیدو (ضریب انعکاس) بالا مانند پوشش‌های سفیدرنگ در سطوح شهری (مانند بام، دیوار و معابر) می‌باشد. ازاین‌رو جهت انجام مدل‌سازی دو حالت کلی در نظر گرفته شده است. در حالت اول که به‌اصطلاح اجرای مرجع مدل می‌باشد؛ مناطق موردمطالعه با شرایط موجود شبیه‌سازی می‌شوند؛ در این حالت ضریب انعکاس تمامی سطوح به میزان ۰/۲ تنظیم‌شده است که این مقدار به‌طورمعمول نشان‌دهنده میانگین آلبیدوی سطوح شهری با توجه به مقادیر ارائه شده توسط اکه[2] (۱۹۸۷) میباشد (۰/۰۵ تا ۰/۲ برای جاده‌های آسفالته، ۰/۱ تا ۰/۳۵ برای دیوارهای بتنی؛ ۰/۲ تا ۰/۴ برای دیوارهای آجری؛ ۰/۱ تا ۰/۳۵ برای بام‌های سفالی). این مقادیر کم، موجب انباشت گرمای بیش‌ازحد در مواد غیرقابل نفوذ می‌شوند که مستقیماً به گرمایش هوا کمک می‌کنند (اکبری و همکاران،۲۰۰۱). با توجه به تحقیقات (بالسامو[3]، ۲۰۱۲)، آلبیدوی سطوح در تمام طول روز ثابت نیست؛ انعکاس‌های متعدد و سایه‌اندازی‌ها ممکن است منجر به تغییر آن شود .بنابراین در حالت دوم که اجرای اصلاح‌شده نامیده می‌شود، انعکاس سطوح شهری (بام، دیوار و معابر)، در جدول مدل تاج پوشش شهری، برای بام و دیوار به میزان ۰/۸۰ (مرینی[4] و همکاران، ۲۰۱۶) و برای معابر ۰/۴۰ (پومرنتز و اکبری ۱۹۹۸)، در نظر گرفته شده است. افزایش آلبیدوی سطوح بر به‌روزرسانی متغیرهای سطح (دمای زمین و ویژگی‌های تاج پوشش شهری) در مدل سطح زمین مؤثر است. ازآنجایی‌که مدل سطح زمین تأمین‌کننده شرایط مرزی است، مدل لایه‌مرزی سیاره‌ای (PBL) نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (مرینی[5] و همکاران، ۲۰۱۶).

پیکربندی مدل

به‌منظور نشان دادن فرآیندهای خردمقیاس در نواحی شهری، پارامتر سازی مناسبی باید انجام شود (مارتیلی[6] و همکاران، ۲۰۰۲). آزمایش‌های متعددی به‌منظور دستیابی به بهترین پیکربندی برای انجام شبیه‌سازی در مدل با تغییر دادن طرح‌واره‌ها انجام شد. در این مطالعه ۱۶ پیکربندی مختلف (اجرای مرجع) بر اساس طرح‌واره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای، تابش موج کوتاه و بلند، همرفت، لایه سطحی، مدل سطح زمین و خرد فیزیک برای بازه زمانی سه روزه (۲۱-۱۸ آگوست ۲۰۱۶) در فصل تابستان انتخاب شد (جدول ۱). لازم به ذکر است این پیکربندی‌ها در مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف از جمله جندقیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ لایقی و همکاران، ۱۳۹۶؛

[1] Final operational Global Analysis data
[2] Oke
[3] Balsamo
[4] Morini
[5] Morini
[6] Martilli

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

دیمیتروا[1]، ۲۰۱۴ صورت گرفته است. تمامی اجراها برای ۷۲ ساعت انجام شده است. روز اول در فرایند ارزیابی گنجانده نشده و به‌عنوان زمان تنظیم (spin up) لحاظ شده است و نتایج ۴۸ ساعت دوم برای آخرین حوزه با تفکیک افقی ۱/۳۳ کیلومتر مورد تحلیل قرار گرفته است. مقادیر شبیه‌سازی‌شده دمای هوای ۲ متری، سرعت باد ۱۰ متری و رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت و با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی منتخب در استان تهران و البرز مقایسه شد. در مرحله بعد ۱۶ پیکربندی مذکور با افزایش ضریب انعکاس (آلبیدو) مجدداً اجرا شد و نتایج دو حالت با یکدیگر مقایسه شدند. جهت مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقدار مشاهداتی متناظر با آن از دو شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شده است. مقدار این شاخص‌ها به ترتیب از روابط(۱ و ۲) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{RMSE} = \frac{\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Z^{*}(X_i) - Z(X_i)\right)^{2}}}{n} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

$$\mathrm{MBE} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(z^{*}(X_i) - z(X_i)\right)}{n} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط (۱ و ۲) ، $Z^{*}(X_i)$؛ مقدار برآورد شده و $Z(Xi)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر و n تعداد نقاط مشاهداتی است. هرچه میزان این شاخص‌ها کمتر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار است. ازآنجایی‌که مدل WRF برای جفت شدن با مدل تک لایه شهری (UCM) فقط با طرحواره NOAH سطح زمین قابل‌اجراست، بنابراین گزینه فیزیک سطح زمین برای تمام پیکربندی‌ها NOAH انتخاب شده است. با توجه به تحقیقات ونگ و سیمان (۱۹۹۷)، نیستانی و همکاران (۱۳۹۷)، (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸)؛ برای گام شبکه‌ای افقی کمتر از ۴ کیلومتر به تعیین طرحواره همرفت در تنظیمات نیاز نمی‌باشد زیرا هسته‌های همرفتی معمولاً توسط روابط پایه‌ای مدل و بدون نیاز به استفاده از طرحواره‌ها آشکارسازی می‌شود؛ بنابراین در این تحقیق طرحواره همرفت برای حوزه چهارم در نظر گرفته نشده است. همچنین جهت کاهش زمان شبیه‌سازی، مدل شهری فقط برای حوزه چهارم فعال گردید.

در پژوهش حاضر روزهای تابستانی انتخاب‌شده‌اند؛ زیرا انتظار می‌رود که نتایج تحقیق به‌عنوان بستری برای ارزیابی اثر راهکارهای تعدیل جزیره گرمایی شهری (نظیر استفاده از مواد بازتابنده) که در طول تابستان و شرایط آسمان صاف بسیار مؤثر می‌باشد؛ مورداستفاده قرار گیرد (اکبری و توچایی، ۲۰۱۴؛ هوشنگی و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین ملاک اصلی در تعیین بازه زمانی مطلوب، شرایط پایدار جوی می‌باشد که با توجه به مشاهدات رکوردهای هواشناختی و تحلیل شاخص‌های ارزیابی نمودار skew-t (شاکری، ۱۳۹۳) انتخاب شده‌اند.

[1] Dimitrova

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

نتایج

مقایسه خروجی مدل‌های عددی با مشاهدات، روشی قابل‌قبول جهت ارزیابی مدل است. بااین‌حال در تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، محدودیت‌هایی نظیر ابزار اندازه‌گیری، دقت داده‌های گزارش‌شده، داده‌های گمشده و مقایسه داده‌های نقطه‌ای (از ایستگاه‌های هواشناسی) با داده‌های متوسط منطقه‌ای (خروجی مدل) وجود دارد. در مقاله حاضر مجموع ۱۶ پیکربندی مختلف را ابتدا در حالت اجرای مرجع (ضریب انعکاس ۲۰٪ برای بام‌ها، دیوارها و معابر) شبیه‌سازی می‌نماییم. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های هواشناسی از طریق شاخص‌های اعتبارسنجی RMSE و MBE مقایسه شده است. در مرحله بعد این مجموع پیکربندی را برای اجرای اصلاح‌شده شبیه‌سازی می‌نماییم (ضریب انعکاس ۸۰٪ برای بام‌ها و دیوارها، انعکاس ۴۰٪ برای معابر). سپس نتایج هر دو حالت جهت نمایش اثرات افزایش انعکاس سطوح بر پارامترهای مذکور (دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی) مقایسه شده است.

دمای هوا

مقادیر دمای شبیه‌سازی‌شده مدل WRF با ۱۶ پیکربندی مختلف در بازه زمانی (۲۱-۱۸ اگوست ۲۰۱۶) با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی منتخب مقایسه شد. مقادیر شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) به‌ترتیب در جداول (۲ و ۳) ارائه شده است. با توجه به جداول (۲ و ۳)، کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در استان تهران (به میزان ۲/۱۵) مربوط به پیکربندی شماره ۴ و ۱۲ می‌باشد که متشکل از ترکیب طرحواره‌های Goddard و SBU-Ylin (خردفیزیک)؛ MYG (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG (تابش موج‌کوتاه) و Eta برای طرحواره لایه سطحی می‌باشد.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در استان تهران تقریباً تمامی پیکربندی‌ها (به‌جز ایستگاه آبعلی) دمای هوا را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند. کمترین مقدار میانگین خطای اریب (MBE)، نیز مربوط به پیکربندی شماره ۲، ۴، ۸ و ۱۲ می‌باشد. در استان البرز حداقل RMSE مربوط به پیکربندی شماره ۱۳ و پس‌ازآن ۴ و ۱۲ می‌باشد که متشکل از طرحواره‌های Goddard، SBU-Ylin و lin (خردفیزیک)؛ MYG و YSU (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D و Kain-Fritsch (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG و dudhia (تابش موج‌کوتاه)، Eta و MM5 برای طرحواره لایه سطحی است.

جدول (۱). پیکربندی‌های متفاوت مورد آزمایش در مدل WRF

شماره پیکربندی	خردفیزیک	لایه‌مرزی سیاره‌ای	همرفت کومه‌ای	تابش موج‌بلند	تابش موج‌کوتاه	لایه سطحی
۱	WDM	BouLac	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۲	Eta	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۳	WDM	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۴	Goddard	MYG	Grell 3D	RRTM	RRTMG	Eta
۵	Lin	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۶	Milbrandt-Yau	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۷	NSSL	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۸	WDM	MYG	Tiedtke	RRTMG	RRTMG	Eta
۹	WSM	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۱۰	Morrison	MYG	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	Eta
۱۱	Thompson	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۱۲	SBU-YLin	MYG	Grell 3D	RRTMG	RRTMG	Eta
۱۳	Lin	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	MM5
۱۴	Lin	MRF	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia	MM5
۱۵	Lin	MRF	Kain-Fritsch	RRTM	Goddard	MM5
۱۶	Lin	YSU	Kain-Fritsch	CAM	Dudhia	MM5

همچنین در این استان حداقل MBE مربوط به پیکربندی شماره ۱۰ و ۴ می‌باشد. در استان البرز اکثر پیکربندی-ها دمای هوا را بیشتر از مقدار واقعی (به‌جز ایستگاه طالقان) برآورد می‌نمایند. بیشترین مقدار خطا در شاخص آماری موردمطالعه در استان‌های تهران و البرز مربوط به پیکربندی شماره ۱۶ است که از طرح‌واره تابشی Dudhia برای موج‌کوتاه و CAM برای تابش موج‌بلند استفاده شده است. دمای پوسته به تابش موج‌کوتاه حساس است؛ در نتیجه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری به گزینه‌های انتخاب شده برای پارامتر سازی تابش حساس است (توچایی، ۲۰۱۵). با توجه به جدول مربوطه پارامترسازی RRTMG و RRTM نسبت به طرح‌واره CAM برای تابش موج‌بلند، پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. در استان تهران حداقل RMSE و MBE متعلق به مناطق حومه است. در استان البرز، ایستگاه کرج با توجه به کلیه سنجه‌های آماری نسبت به مناطق حومه همواره دارای کمترین خطاست. اختلاف دما بین دو حالت مرجع و اصلاح شده در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به این جدول، در استان تهران و البرز به ترتیب نتایج پیکربندی شماره ۱۵ و ۱۰ نشان‌دهنده کاهش دماهای بالاتر می‌باشد. میانگین اختلاف دما در استان تهران و البرز به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۲۰ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به شکل (۳) در استان‌های تهران و البرز با افزایش انعکاس سطوح، میانگین دمای هوا کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین مقدار کاهش دما در نواحیشهری به وقوع پیوسته است شکل (۳).

جدول (۲). مقادیر RMSE در شبیه‌سازی دمای هوای ۲ متری (°C) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

RMSE	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۴/۰۲	۱/۰۳	۱/۳۱	۲/۴۴	۱/۴۷	۳/۲۰	۱/۵۷	۲/۵۱	۲/۱۹	۲/۲۰	۲/۴۴	۲/۵۲	۲/۳۹
۲	۳/۸۷	۰/۹۶	۱/۴۸	۲/۴۶	۱/۴۰	۳/۳۳	۱/۶۰	۲/۲۹	۲/۱۷	۱/۶۹	۱/۵۸	۲/۸۱	۲/۰۳
۳	۳/۸۷	۰/۹۲	۱/۵۵	۲/۵۱	۱/۴۶	۳/۴۴	۱/۶۵	۲/۳۸	۲/۲۲	۱/۶۲	۱/۶۶	۲/۸۶	۲/۰۵
۴	۳/۸۲	۰/۸۳	۱/۴۷	۲/۴۷	۱/۴۰	۳/۴۱	۱/۵۱	۲/۳۱	۲/۱۶	۱/۶۴	۱/۴۹	۲/۸۰	۱/۹۸
۵	۳/۸۷	۰/۹۲	۱/۵۶	۲/۵۲	۱/۴۵	۳/۳۹	۱/۷۲	۲/۳۲	۲/۲۲	۱/۷۱	۱/۴۸	۲/۸۴	۲/۰۱
۶	۳/۸۸	۰/۹۲	۱/۴۱	۲/۴۸	۱/۴۳	۳/۳۶	۱/۶۶	۲/۴۰	۲/۱۹	۱/۵۹	۱/۵۲	۲/۸۳	۱/۹۸
۷	۳/۸۸	۰/۹۴	۱/۵۷	۲/۴۸	۱/۴۱	۳/۳۴	۱/۶۱	۲/۳۴	۲/۲۰	۱/۶۸	۱/۷۰	۲/۸۳	۲/۰۷
۸	۳/۹۵	۰/۹۷	۱/۳۹	۲/۵۱	۱/۴۶	۳/۳۵	۱/۵۵	۲/۳۸	۲/۱۹	۱/۶۸	۱/۸۶	۲/۶۸	۲/۰۷
۹	۳/۸۷	۰/۹۰	۱/۴۴	۲/۴۷	۱/۴۶	۳/۴۸	۱/۵۴	۲/۳۵	۲/۱۹	۱/۶۷	۱/۵۴	۲/۸۴	۲/۰۲
۱۰	۳/۴۰	۰/۸۹	۱/۹۸	۳/۴۲	۱/۵۵	۴/۲۴	۱/۷۶	۳/۰۱	۲/۵۳	۱/۳۵	۱/۷۷	۲/۹۲	۲/۰۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۱۱	۳/۸۷	۰/۸۶	۱/۵۶	۲/۴۴	۱/۴۳	۳/۴۰	۱/۵۸	۲/۳۵	۲/۱۹	۱/۷۲	۱/۵۵	۲/۸۹	۲/۰۵
۱۲	۳/۸۶	۰/۹۰	۱/۴۴	۲/۴۶	۱/۴۴	۳/۳۸	۱/۳۸	۲/۳۶	۲/۱۵	۱/۶۱	۱/۴۸	۲/۸۷	۱/۹۹
۱۳	۳/۳۵	۱/۵۷	۱/۴۴	۳/۷۶	۱/۷۶	۴/۲۸	۱/۹۴	۳/۵۳	۲/۷۰	۱/۲۶	۱/۱۸	۳/۰۴	۱/۸۲
۱۴	۳/۷۹	۱/۷۲	۱/۳۷	۳/۳۴	۱/۳۹	۳/۷۹	۱/۸۱	۳/۱۹	۲/۵۵	۱/۸۸	۱/۶۱	۳/۰۸	۲/۱۹
۱۵	۴/۲۵	۱/۲۰	۱/۰۵	۲/۵۹	۱/۳	۳/۱۸	۱/۴۸	۲/۵۱	۲/۲۰	۱/۶۰	۱/۳۱	۳/۱۷	۲/۰۳
۱۶	۲/۶۵	۳/۰۰	۲/۶۱	۵/۰۴	۲/۴	۵/۵۱	۲/۸۴	۴/۷۶	۳/۶۰	۱/۹۱	۲/۰۹	۳/۳۴	۲/۴۵
میانگین	۳/۷۶	۱/۱۶	۱/۵۴	۲/۸۴	۱/۵۱	۳/۶۳	۱/۷۰	۲/۶۹	۲/۳۵	۱/۶۸	۱/۶۴	۲/۸۹	۲/۰۷

جدول (۳). مقادیر MBE در شبیه‌سازی دمای هوای ۲ متری (°C) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

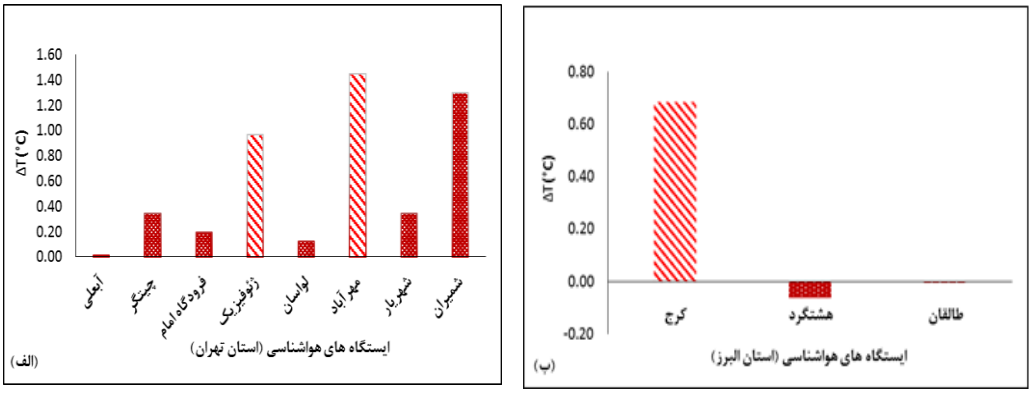
MBE	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۳/۹۰	-۰/۳۲	-۰/۱۱	-۱/۸۹	-۰/۱۴	-۲/۵۴	-۰/۲۵	-۱/۴۶	-۰/۳۵	۱/۶۶	۱/۶۶	-۰/۶۰	۰/۹۱
۲	۳/۷۵	۰/۴۶	-۰/۵۵	-۱/۵۴	۰/۰۶	-۲/۴۹	-۰/۲۴	-۰/۸۹	-۰/۱۸	۰/۹۱	۱/۰۳	-۰/۶۰	۰/۴۵
۳	۳/۷۵	۰/۴۴	-۰/۶۱	-۱/۷۳	۰/۰۸	-۲/۶۲	-۰/۲۲	-۰/۸۷	-۰/۲۲	۰/۸۹	۱/۰۹	-۰/۶۱	۰/۴۶
۴	۳/۷۴	۰/۴۴	-۰/۵۲	-۱/۵۷	۰/۱۱	-۲/۵۳	-۰/۱۷	-۰/۹۰	-۰/۱۸	۰/۹۲	۰/۹۹	-۰/۶۲	۰/۴۳
۵	۳/۷۵	۰/۴۵	-۰/۵۸	-۱/۶۸	۰/۰۶	-۲/۴۹	-۰/۲۱	-۰/۸۹	-۰/۲۰	۱/۰۴	۰/۹۵	-۰/۶۵	۰/۴۵
۶	۳/۷۶	۰/۴۸	-۰/۵۸	-۱/۶۵	۰/۰۳	-۲/۵۱	-۰/۲۴	-۰/۹۸	-۰/۲۱	۰/۹۱	۰/۹۵	-۰/۶۶	۰/۴۵
۷	۳/۷۷	۰/۴۸	-۰/۶۱	-۱/۶۳	۰/۰۹	-۲/۵۰	-۰/۲۰	-۰/۹۷	-۰/۲۰	۰/۸۸	۱/۱۰	-۰/۶۱	۰/۴۶
۸	۳/۷۹	۰/۵۳	-۰/۴۶	-۱/۶۳	۰/۱۰	-۲/۵۴	-۰/۳۰	-۰/۸۹	-۰/۱۸	۱/۰۱	۱/۳۳	-۰/۴۷	۰/۶۲
۹	۳/۷۵	۰/۳۹	-۰/۶۱	-۱/۶۸	۰/۰۷	-۲/۵۸	-۰/۱۹	-۰/۹۱	-۰/۲۲	۰/۹۷	۰/۹۸	-۰/۵۹	۰/۴۵
۱۰	۳/۲۶	-۰/۳۲	-۱/۵۲	-۲/۶۸	-۰/۵۱	-۳/۵۷	-۰/۸۸	-۱/۹۳	-۱/۰۲	۰/۳۶	۰/۹۳	-۰/۹۱	۰/۱۳
۱۱	۳/۷۴	۰/۴۴	-۰/۵۴	-۱/۵۷	۰/۰۵	-۲/۵۷	-۰/۱۹	-۱/۰۰	-۰/۲۱	۰/۹۵	۱/۰۴	-۰/۶۸	۰/۴۴
۱۲	۳/۷۶	۰/۴۷	-۰/۵۶	-۱/۶۵	۰/۱۰	-۲/۵۴	-۰/۰۶	-۰/۹۶	-۰/۱۸	۰/۹۳	۱/۰۳	-۰/۶۵	۰/۴۴
۱۳	۳/۱۷	-۱/۴۳	-۱/۲۱	-۳/۱۷	-۱/۲۷	-۳/۶۷	-۱/۵۰	-۲/۷۹	-۱/۴۸	-۰/۳۲	-۰/۵۴	-۱/۲۱	۰/۶۹
۱۴	۳/۶۵	-۱/۴۳	-۱/۰۸	-۲/۸۲	-۰/۷۵	-۳/۲۴	-۱/۲۷	-۲/۴۱	-۱/۱۷	-۱/۲۲	-۱/۲۲	-۰/۶۴	-۱/۰۳
۱۵	۴/۱۱	-۰/۶۸	-۰/۴۳	-۱/۹۶	-۰/۲۱	-۲/۵۵	-۰/۶۹	-۱/۴۹	-۰/۴۹	-۰/۵۷	-۰/۵۹	-۰/۱۸	-۰/۴۵
۱۶	۲/۴۴	-۲/۸۱	-۲/۴۱	-۴/۵۱	-۲/۱۱	-۴/۹۸	-۲/۳۸	-۴/۰۳	-۲/۶۰	-۱/۴۲	-۱/۶۶	-۱/۸۶	-۱/۶۵
میانگین	۳/۶۳	-۰/۱۵	-۰/۷۷	-۲/۰۹	-۰/۲۷	-۲/۸۷	-۰/۵۶	-۱/۴۶	-۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۵۸	-۰/۷۲	۰/۱۲

جدول (۴). تفاضل دمای هوای ۲ متری (°C) بین دو حالت مرجع و اصلاح‌شده با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

ΔT	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۲۳	۱/۲۷	۰/۰۴	۱/۶۸	۰/۱۷	۱/۳۸	۰/۶۳	۰/۸۰	-۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۲۵
۲	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۶۸	۰/۰۸	۱/۳۷	۰/۴۱	۱/۳۳	۰/۵۸	۰/۷۸	-۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۲۳
۳	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۷۹	۰/۱۰	۱/۳۱	۰/۴۸	۱/۳۵	۰/۵۶	۰/۷۰	-۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۲۰
۴	-۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۹۳	۰/۱۶	۱/۳۲	۰/۴۸	۱/۳۵	۰/۵۹	۰/۷۲	-۰/۲۰	-۰/۰۲	۰/۱۷
۵	-۰/۰۱	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۰۸	۱/۴۳	۰/۴۲	۱/۲۷	۰/۵۴	۰/۷۵	-۰/۱۰	-۰/۰۳	۰/۲۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۶	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۱۴	۰/۷۵	۰/۰۸	۱/۴۱	۰/۳۴	۱/۲۳	۰/۵۴	۰/۸۲	-۰/۱۸	-۰/۰۵	۰/۲۰
۷	۰/۰۴	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۸۳	۰/۱۲	۱/۳۶	۰/۴۲	۱/۲۲	۰/۵۶	۰/۷۰	-۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۲۲
۸	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۱/۱۰	۰/۱۲	۱/۲۶	۰/۱۸	۱/۳۰	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۲۰
۹	۰/۰۲	۰/۲۷	۰/۲۰	۰/۸۹	۰/۱۲	۱/۵۰	۰/۳۶	۱/۲۸	۰/۵۸	۰/۷۷	-۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۱۹
۱۰	۰/۰۳	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۸۸	۰/۱۵	۱/۲۲	۰/۴۷	۱/۳۷	۰/۶۱	۰/۶۶	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۲۶
۱۱	-۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۲۶	۰/۸۳	۰/۱۰	۱/۲۹	۰/۴۴	۱/۱۲	۰/۵۵	۰/۸۱	-۰/۰۹	-۰/۰۵	۰/۲۳
۱۲	-۰/۰۲	۰/۳۷	۰/۱۰	۰/۸۹	۰/۱۰	۱/۴۱	۰/۶۴	۱/۲۸	۰/۶۰	۰/۷۹	-۰/۰۷	-۰/۰۶	۰/۲۲
۱۳	۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۳۰	۱/۱۱	۰/۲۲	۱/۶۴	۰/۱۰	۱/۳۲	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۰۷	-۰/۱۱	۰/۱۶
۱۴	۰/۰۲	۰/۴۰	۰/۱۴	۱/۱۸	۰/۱۶	۱/۶۰	۰/۲۱	۱/۳۳	۰/۶۳	۰/۵۰	-۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۶
۱۵	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۱۵	۱/۴۴	۰/۱۲	۱/۶۷	۰/۱۵	۱/۴۰	۰/۶۷	۰/۴۲	-۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۴
۱۶	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۱۴	۱/۲۰	۲۲	۱/۶۹	۰/۱۶	۱/۲۳	۰/۶۳	۰/۶۴	-۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۲۳
میانگین	۰/۰۱	۰/۳۴	۰/۲۰	۰/۹۷	۰/۱۲	۱/۴۵	۰/۳۴	۱/۳۰	۰/۵۹	۰/۶۸	-۰/۰۶	-۰/۰۱	۰/۲۰



شکل (۳). اختلاف دمای هوای ۲ متری (حالت مرجع- اصلاح‌شده) در ایستگاه‌های هواشناسی منطقه موردمطالعه

سرعت باد

سرعت باد به‌طورمعمول در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. اثرات گذرای سرعت باد بر دمای هوا پیچیده است؛ افزایش سرعت باد منجر به افزایش انتقال گرمای همرفتی و به‌تبع آن کاهش دمای پوسته زمین می‌شود (توچایی، ۲۰۱۵). مقادیر شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) به‌ترتیب در جداول (۵ و ۶) ارائه شده است. با توجه به جداول (۵ و ۶) ، کمترین مقدار RMSE در استان تهران (به میزان ۱/۴۴) مربوط به پیکربندی شماره ۱۴ می‌باشد که متشکل از ترکیب طرح‌واره‌های Lin (خردفیزیک)؛ MRF (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Kain-Fritsch (همرفت)؛ RRTM (تابش موج‌بلند)، Dudhia (تابش موج‌کوتاه) و MM5 برای طرح‌واره لایه سطحی می‌باشد. بیشترین مقدار خطا نیز مربوط به پیکربندی ۴ و ۱۱ می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود تقریباً تمامی پیکربندی‌ها سرعت باد را در نواحی شهری و روستایی کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

کمترین مقدار میانگین خطای اریب (MBE)، مربوط به پیکربندی ۸، ۱۵، ۱۴ و ۱۱ می‌باشد. بیشترین مقدار خطا نیز مربوط به پیکربندی ۱۶ است. در استان البرز حداقل RMSE مربوط به پیکربندی شماره ۱۶ می‌باشد که متشکل از طرح‌واره‌های Lin (خردفیزیک)؛ YSU (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Kain-Fritsch (همرفت)؛ CAM (تابش موج‌بلند)، Dudhia (تابش موج‌کوتاه) و MM5 برای طرح‌واره لایه سطحی است. بیشترین مقدار خطا نیز مربوط به پیکربندی ۱۲ می‌باشد. همچنین حداقل MBE مربوط به پیکربندی ۱ و ۱۶ می‌باشد. با توجه به جدول ۵ در استان تهران و البرز سرعت باد پیش‌بینی شده در مناطق شهری (کرج، ژئوفیزیک و مهرآباد) نسبت به مناطق حومه (به‌استثنای ایستگاه شمیران) دارای حداقل خطاهای آماری است.

جدول (۵). مقادیر RMSE در شبیه‌سازی سرعت باد ۲ متری (m/s) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

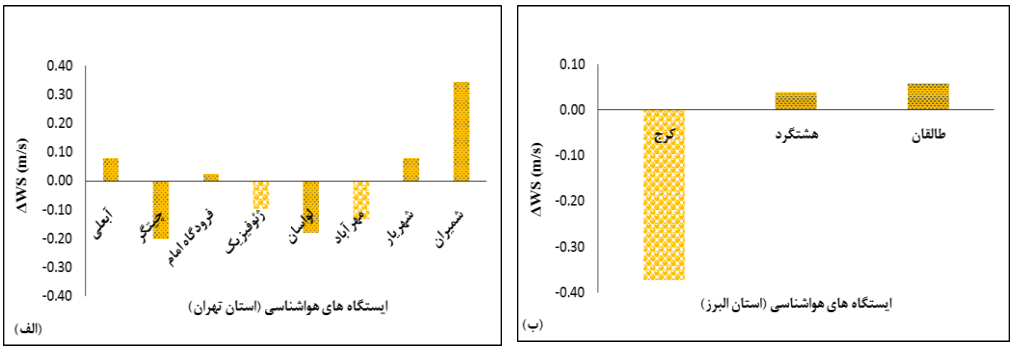
RMSE	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۱/۹۸	۱/۷۵	۲/۳۱	۱/۰۳	۲/۴۷	۱/۵۹	۱/۷۰	۱/۳۵	۱/۷۷	۱/۴۶	۱/۰۳	۲/۷۰	۱/۷۳
۲	۲/۳۴	۲/۱۵	۱/۲۱	۱/۴۷	۲/۱۱	۱/۳۲	۱/۳۵	۱/۶۵	۱/۷۰	۱/۱۰	۱/۳۷	۳/۸۱	۲/۰۹
۳	۲/۳۶	۲/۲۶	۱/۴۶	۱/۳۱	۲/۱۷	۱/۵۷	۱/۵۱	۱/۵۸	۱/۷۸	۱/۳۸	۱/۱۵	۳/۷۲	۲/۰۸
۴	۲/۴۵	۲/۳۳	۱/۳۴	۱/۴۹	۲/۴۲	۱/۶۰	۱/۵۴	۱/۴۴	۱/۸۳	۱/۳۵	۱/۲۹	۳/۷۳	۲/۱۲
۵	۲/۲۹	۲/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۰	۲/۴۳	۱/۴۳	۱/۵۸	۱/۴۴	۱/۷۷	۱/۰۰	۱/۴۱	۳/۸۱	۲/۰۷
۶	۲/۴۰	۲/۱۴	۱/۲۷	۱/۳۹	۲/۲۸	۱/۴۶	۱/۴۸	۱/۴۹	۱/۷۴	۱/۱۰	۱/۳۶	۳/۷۶	۲/۰۷
۷	۲/۳۹	۲/۱۵	۱/۴۱	۱/۴۴	۲/۱۸	۱/۵۱	۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۷۳	۱/۲۶	۱/۳۷	۳/۷۳	۲/۱۲
۸	۲/۵۱	۲/۲۱	۱/۲۰	۱/۳۳	۲/۴۰	۱/۳۵	۱/۲۶	۱/۶۱	۱/۷۳	۱/۱۵	۱/۱۸	۳/۶۹	۲/۰۱
۹	۲/۴۱	۲/۲۳	۱/۳۲	۱/۴۱	۲/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۳	۱/۶۳	۱/۸۰	۱/۱۲	۱/۳۶	۳/۶۳	۲/۰۴
۱۰	۲/۳۱	۱/۸۶	۱/۱۷	۱/۳۵	۲/۳۹	۱/۲۰	۱/۶۵	۱/۳۰	۱/۶۵	۱/۲۰	۱/۱۶	۳/۲۳	۱/۸۶
۱۱	۲/۴۵	۲/۲۴	۱/۲۷	۱/۴۹	۲/۴۳	۱/۷۱	۱/۶۱	۱/۵۶	۱/۸۴	۱/۲۱	۱/۳۴	۳/۷۰	۲/۰۸
۱۲	۲/۳۸	۲/۱۷	۱/۳۵	۱/۳۷	۲/۱۳	۱/۲۹	۱/۳۸	۱/۴۲	۱/۶۸	۱/۴۵	۱/۴۰	۳/۷۲	۲/۱۹
۱۳	۱/۷۰	۱/۴۱	۲/۰۶	۱/۰۰	۲/۲۱	۱/۵۳	۱/۷۶	۰/۹۰	۱/۵۷	۱/۳۰	۰/۹۸	۲/۸۳	۱/۷۰
۱۴	۱/۶۶	۱/۰۹	۱/۷۲	۰/۶۸	۲/۲۰	۱/۱۹	۲/۲۱	۰/۷۷	۱/۴۴	۱/۲۰	۱/۰۵	۳/۰۰	۱/۷۵
۱۵	۱/۹۱	۱/۰۶	۱/۷۳	۰/۸۸	۲/۲۱	۱/۲۹	۲/۱۷	۰/۹۹	۱/۵۳	۱/۰۰	۱/۲۶	۳/۶۳	۱/۹۶
۱۶	۱/۸۶	۱/۰۰	۱/۸۰	۰/۸۱	۲/۴۳	۱/۳۷	۱/۸۲	۰/۸۲	۱/۴۹	۱/۱۴	۰/۹۷	۲/۱۹	۱/۴۳
میانگین	۲/۲۱	۱/۸۹	۱/۵۰	۱/۲۴	۲/۳۱	۱/۴۳	۱/۶۱	۱/۳۴	۱/۶۹	۱/۲۱	۱/۲۳	۳/۴۳	۱/۹۶

جدول (۶). مقادیر MBE در شبیه‌سازی سرعت باد ۲ متری (m/s) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

MBE	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۰/۵۱	۰/۲۸	-۰/۶۳	۰/۰۱	-۱/۷۲	-۱/۲۹	-۰/۳۳	۰/۱۲	-۰/۳۸	-۰/۶۰	-۰/۴۵	۰/۸۹	-۰/۰۵
۲	۱/۴۵	۰/۹۸	-۰/۲۴	۰/۳۰	-۱/۵۸	-۰/۵۳	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۱۶	-۰/۱۸	۰/۵۰	۲/۰۹	۰/۸۰
۳	۱/۵۲	۰/۸۴	-۰/۴۸	۰/۴۰	-۱/۶۰	-۰/۶۶	-۰/۱۵	۰/۶۴	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۳۱	۲/۳۵	۰/۸۹

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۴	۱/۴۰	۰/۹۰	-۰/۱۷	۰/۴۱	-۱/۷۳	-۰/۶۴	۰/۱۶	۰/۶۴	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۳۶	۲/۰۴	۰/۸۱
۵	۱/۴۳	۱/۱۱	-۰/۴۹	۰/۵۲	-۱/۷۶	-۰/۶۴	۰/۱۶	۰/۷۲	۰/۱۳	-۰/۱۰	۰/۳۷	۲/۲۸	۰/۸۵
۶	۱/۴۱	۱/۲۹	-۰/۳۶	۰/۶۱	-۱/۶۷	-۰/۶۷	-۰/۰۴	۰/۵۷	۰/۱۴	-۰/۱۲	۰/۴۴	۲/۱۲	۰/۸۱
۷	۱/۵۰	۱/۳۴	-۰/۲۲	۰/۵۲	-۱/۷۰	-۰/۶۷	۰/۰۱	۰/۶۵	۰/۱۸	-۰/۰۳	۰/۳۴	۲/۲۰	۰/۸۴
۸	۱/۳۱	۰/۸۲	-۰/۶۶	۰/۵۵	-۱/۶۹	-۰/۶۶	-۰/۱۸	۰/۷۷	۰/۰۳	-۰/۲۰	۰/۲۰	۲/۳۶	۰/۷۹
۹	۱/۴۵	۱/۰۵	-۰/۲۸	۰/۵۷	-۱/۸۰	-۰/۶۱	۰/۰۷	۰/۶۳	۰/۱۴	-۰/۱۴	۰/۳۵	۲/۲۱	۰/۸۱
۱۰	۱/۲۸	۰/۶۷	-۰/۴۴	۰/۳۲	-۱/۸۶	-۰/۷۹	-۰/۳۴	۰/۴۹	-۰/۰۸	-۰/۴۰	۰/۱۷	۱/۹۵	۰/۵۷
۱۱	۱/۱۸	۱/۰۲	-۰/۰۹	۰/۴۳	-۱/۸۱	-۰/۹۱	۰/۱۱	۰/۴۷	۰/۰۵	-۰/۲۱	۰/۵۶	۲/۲۸	۰/۸۸
۱۲	۱/۴۷	۱/۰۳	-۰/۶۳	۰/۴۹	-۱/۶۲	-۰/۵۴	۰/۱۳	۰/۶۷	۰/۱۳	-۰/۱۲	۰/۲۳	۲/۱۶	۰/۷۶
۱۳	۰/۵۲	۰/۱۵	-۱/۰۱	۰/۲۰	-۱/۸۰	-۱/۱۷	-۰/۶۲	۰/۳۴	-۰/۴۲	-۰/۲۲	-۰/۳۵	۱/۵۵	۰/۳۳
۱۴	۰/۶۸	-۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۱۴	-۱/۷۹	-۰/۹۳	۱/۰۲	۰/۲۸	-۰/۰۵	-۰/۲۵	-۰/۲۵	۲/۱۷	۰/۵۶
۱۵	۰/۹۴	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۳۷	-۱/۷۲	-۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۴۲	۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۳۵	۲/۷۴	۰/۷۹
۱۶	۰/۳۳	-۰/۲۱	-۰/۹۲	۰/۰۲	-۲/۱۸	-۱/۰۰	-۰/۹۷	-۰/۰۷	-۰/۶۳	-۰/۵۰	-۰/۴۲	۱/۳۵	۰/۱۴
میانگین	۱/۱۵	۰/۷۰	-۰/۳۸	۰/۳۷	-۱/۷۵	-۰/۷۹	۰/۰۲	۰/۴۹	-۰/۰۲	-۰/۱۹	۰/۱۳	۲/۰۵	۰/۶۶



شکل (۴). اختلاف سرعت باد ۲ متری (حالت مرجع- اصلاح‌شده) در ایستگاه‌های هواشناسی مناطق موردمطالعه

به طور کلی در استان البرز، میانگین سرعت باد بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است. اختلاف سرعت باد بین دو حالت مرجع و اصلاح‌شده در جدول (۷) ارائه شده است. با توجه به این جدول، بیشترین افزایش سرعت باد در استان‌های تهران و البرز به ترتیب مربوط به پیکربندی ۱۱، ۱۰ و ۱۲ می‌باشد. شکل (۴) نتایج مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی در دامنه موردنظر را نشان می‌دهد. نتایج گویای آن است که با افزایش انعکاس سطوح، میزان سرعت باد خصوصاً در نواحی شهری رو به افزایش است؛ بنابراین افزایش انعکاس سطوح منجر به افزایش سرعت باد می‌شود که به‌تبع آن دمای هوا کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

جدول (۷). اختلاف سرعت باد دومتری (m/s) بین دو حالت مرجع و اصلاح‌شده با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

Δs	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۰/۰۲	-۰/۲۸	۰/۱۰	-۰/۰۹	۰/۰۰	-۰/۳۸	۰/۱۹	۰/۱۲	-۰/۰۴	-۰/۳۵	-۰/۲۴	۰/۱۷	-۰/۱۴
۲	۰/۲۳	-۰/۲۵	-۰/۰۵	-۰/۰۸	۰/۰۰	-۰/۰۴	-۰/۳۸	۰/۲۶	-۰/۰۴	-۰/۵۱	۰/۱۴	-۰/۱۳	-۰/۱۷
۳	۰/۲۷	-۰/۴۳	۰/۳۶	۰/۰۱	-۰/۰۲	-۰/۱۷	۰/۶۸	۰/۲۹	۰/۱۲	-۰/۳۳	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۱۱
۴	-۰/۰۶	-۰/۳۳	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۱۸	-۰/۰۶	-۰/۰۹	۰/۳۸	-۰/۰۴	-۰/۳۷	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۱۴
۵	۰/۲۰	-۰/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۲۱	-۰/۱۸	-۰/۱۱	-۰/۰۶	۰/۴۳	-۰/۰۲	-۰/۶۰	-۰/۱۲	۰/۱۷	-۰/۱۹
۶	-۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۱	-۰/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۰۳	-۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۱
۷	۰/۳۱	۰/۰۴	-۰/۱۴	-۰/۰۳	-۰/۱۴	-۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۳۹	۰/۰۷	-۰/۱۱	۰/۲۰	-۰/۰۹	۰/۰۰
۸	-۰/۱۴	-۰/۴۱	۰/۳۲	-۰/۰۴	-۰/۳۵	-۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۳۷	-۰/۰۳	-۰/۵۳	۰/۰۱	۰/۰۳	-۰/۱۶
۹	۰/۲۵	-۰/۱۰	-۰/۰۲	-۰/۰۸	-۰/۳۱	-۰/۰۲	-۰/۰۸	۰/۳۷	۰/۰۰	-۰/۴۲	۰/۰۲	۰/۲۰	-۰/۰۷
۱۰	۰/۰۲	-۰/۵۴	۰/۲۳	۰/۱۴	-۰/۴۳	-۰/۲۷	۰/۰۱	۰/۲۸	-۰/۰۷	-۰/۵۹	-۰/۰۶	-۰/۰۱	-۰/۲۲
۱۱	-۰/۰۶	-۰/۲۵	-۰/۳۲	۰/۰۱	-۰/۳۵	-۰/۴۰	۰/۰۴	۰/۲۰	-۰/۱۴	-۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱۹	-۰/۰۱
۱۲	۰/۲۹	-۰/۱۴	۰/۴۸	-۰/۰۵	-۰/۰۸	-۰/۰۵	-۰/۱۵	۰/۳۸	۰/۰۸	-۰/۵۳	-۰/۲۴	۰/۱۱	-۰/۲۲
۱۳	-۰/۰۲	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۲۱	-۰/۱۸	۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۴۱	-۰/۰۲	-۰/۲۰	-۰/۱۴	۰/۰۲	-۰/۱۱
۱۴	۰/۰۳	-۰/۲۱	-۰/۱۳	-۰/۲۳	-۰/۱۹	-۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۵۵	-۰/۰۳	-۰/۴۰	۰/۱۵	۰/۰۴	-۰/۰۷
۱۵	-۰/۰۲	-۰/۱۷	-۰/۰۳	-۰/۴۱	-۰/۱۶	-۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۴۰	-۰/۰۳	-۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۰۸
۱۶	۰/۰۰	-۰/۰۹	-۰/۲۵	-۰/۲۰	-۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۴۱	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۲
میانگین	۰/۰۸	-۰/۲۰	۰/۰۲	-۰/۱۰	-۰/۱۸	-۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۴	-۰/۰۱	-۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۰۶	-۰/۰۹

رطوبت نسبی

رطوبت نسبی تابع محتوای رطوبت، دمای هوا و فشار سطحی است؛ بنابراین عدم دقت در پیش‌بینی دمای هوا، بر پیش‌بینی رطوبت نسبی مؤثر واقع می‌شود (توچایی،۲۰۱۵). رطوبت نسبی خروجی استاندارد مدل WRF نیست؛ بنابراین در پژوهش حاضر این متغیر با توجه به رابطه (۳) محاسبه‌شده است:

$$\frac{RH}{100} \quad \text{رابطه (۳)} \quad \varepsilon_s$$

در رابطه (۳)، RH معرف رطوبت نسبی برحسب درصد، e فشار بخار هوا و es فشار بخار اشباع در دمای T است. برای محاسبه فشار بخار اشباع در دمای T از فرمول تتن[1] به شرح رابطه (۴) استفاده شده است:

$$e_s = e_0 \times exp\left[\frac{b\times(T-T_1)}{T-T_2}\right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

[1] TeTen

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

در رابطه (۴)، $e_0 = 0.611\ kpa$، $b = 17.2694$، $T_1 = 273.16\ K$ و $T_2 = 35.86\ K$ است. در رابطه (۴) از دما برحسب واحد کلوین استفاده می‌شود (فلاح قالهری، ۱۳۹۳).

مقادیر شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) متغیر رطوبت نسبی به ترتیب در جداول(۸ و ۹) ارائه شده است. با توجه به جداول (۸ و ۹)، کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در استان تهران، متعلق به پیکربندی شماره ۱ و ۱۴ می‌باشد که متشکل از ترکیب طرحواره‌های WDM و Lin (خردفیزیک)؛ BouLac و MRF (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D و Kain-Fritsch (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG و Dudhia (تابش موج‌کوتاه) Eta و MM5 برای طرحواره لایه سطحی می‌باشد. کمترین مقدار میانگین خطای اریب (MBE)، مربوط به پیکربندی شماره ۱ و ۱۶ می‌باشد. با توجه به جدول (۹) تمامی پیکربندی‌ها در استان تهران، رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند (۵٪). در استان البرز حداقل RMSE مربوط به پیکربندی شماره ۱۲ و ۱۵ می‌باشد که متشکل از طرحواره‌های WDM، SBU-Ylin و lin (خردفیزیک)؛ MYG و MRF (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D،Tiedtke و Kain-Fritsch (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG و Goddard (تابش موج‌کوتاه)، Eta و MM5 برای طرحواره لایه سطحی می‌باشد. همچنین در این استان حداقل MBE مربوط به پیکربندی شماره ۷، ۱۲ و ۲ می‌باشد.

با توجه به جدول (۹) در استان البرز تمامی پیکربندی‌ها رطوبت نسبی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند. بیشترین مقدار خطا در تمامی شاخص‌های آماری موردمطالعه در استان تهران، مربوط به پیکربندی ۵ و ۱۶ و در استان البرز مربوط به پیکربندی شماره ۱۶ می‌باشد (به‌جز شاخص MBE که بیشترین خطا را مربوط به پیکربندی شماره ۱ می‌داند) که متشکل از طرحواره‌های WDM و Lin (خردفیزیک)؛ MYG، BouLac و YSU (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D و Kain-Fritsch (همرفت)؛ CAM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG و Dudhia (تابش موج‌کوتاه)، Eta و MM5 برای طرحواره لایه سطحی می‌باشد. در استان تهران و البرز حداقل MBE و RMSE متعلق به مناطق حومه است.

جدول (۸). مقادیر RMSE در شبیه‌سازی رطوبت نسبی دو متری (٪) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

RMSE	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۱۳/۲۳	۵/۳۸	۷/۳۴	۶/۵۱	۸/۲۸	۹/۵۶	۶/۸۷	۶/۳۳	۷/۹۴	۷/۲۵	۱۰/۹۷	۱۳/۱۳	۱۰/۴۵
۲	۱۰/۷۰	۵/۴۳	۱۳/۹۶	۸/۳۹	۱۱/۱۹	۱۱/۷۴	۸/۱۵	۸/۰۵	۹/۷۰	۷/۲۳	۶/۶۴	۱۳/۵۰	۹/۱۲
۳	۱۰/۳۸	۵/۵۳	۱۴/۱۲	۹/۰۴	۱۰/۸۵	۱۱/۶۶	۸/۵۲	۸/۷۴	۹/۸۶	۷/۱۹	۷/۰۹	۱۳/۶۴	۹/۳۰
۴	۱۰/۸۱	۵/۳۲	۱۳/۲۸	۸/۴۴	۱۰/۵۰	۱۱/۵۰	۷/۶۷	۸/۲۳	۹/۴۷	۷/۲۵	۵/۹۷	۱۳/۳۴	۸/۸۵
۵	۱۰/۹۸	۵/۳۳	۱۳/۷۲	۹/۳۲	۱۱/۳۷	۱۱/۵۱	۱۵/۳۳	۸/۵۸	۱۰/۷۷	۷/۴۳	۶/۱۴	۱۳/۵۴	۹/۰۴
۶	۱۰/۹۷	۵/۵۰	۱۲/۶۵	۸/۵۸	۱۰/۹۷	۱۱/۶۰	۸/۱۳	۸/۶۰	۹/۶۳	۶/۹۸	۶/۰۹	۱۳/۵۳	۸/۸۷
۷	۱۰/۵۰	۵/۵۴	۱۵/۱۶	۸/۶۷	۱۱/۱۳	۱۱/۵۷	۸/۳۸	۸/۲۷	۹/۹۰	۶/۵۲	۶/۷۱	۱۳/۴۱	۸/۸۸
۸	۱۰/۰۸	۴/۶۹	۱۱/۵۸	۷/۹۹	۸/۹۳	۹/۸۴	۷/۷۶	۷/۳۹	۸/۵۳	۶/۹۰	۷/۳۶	۱۲/۵۶	۸/۹۴

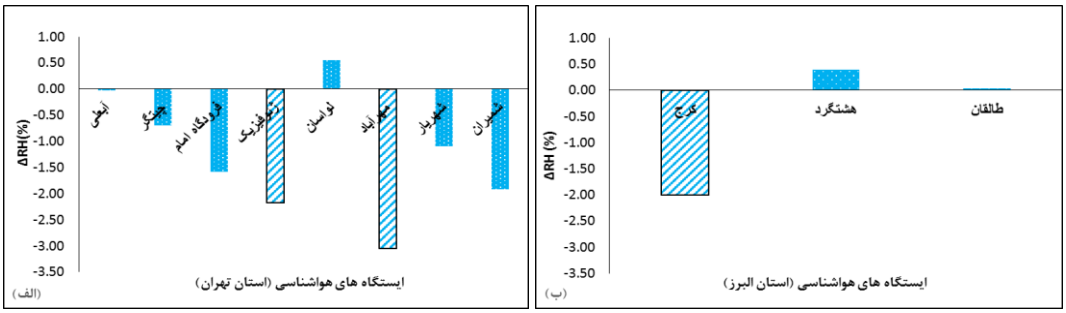
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۹	۱۰/۶۹	۵/۳۵	۱۳/۲۹	۸/۹۸	۱۰/۷۲	۱۲/۴۵	۷/۶۸	۸/۳۶	۹/۶۹	۶/۸۴	۶/۲۰	۱۳/۴۷	۸/۸۴
۱۰	۱۱/۱۳	۵/۱۴	۱۲/۶۶	۷/۷۳	۹/۸۰	۹/۷۱	۸/۲۶	۸/۵۲	۹/۱۲	۶/۶۹	۸/۴۲	۱۴/۸۳	۹/۹۸
۱۱	۱۰/۷۷	۵/۲۹	۱۴/۸۹	۸/۷۵	۱۰/۳۸	۱۱/۲۷	۸/۲۶	۸/۴۵	۹/۷۶	۷/۴۸	۶/۱۰	۱۳/۵۶	۹/۰۵
۱۲	۱۰/۵۷	۵/۳۰	۱۳/۹۲	۹/۲۹	۱۰/۹۹	۱۲/۱۱	۷/۶۶	۹/۱۶	۹/۸۷	۶/۸۰	۵/۳۶	۱۳/۲۰	۸/۴۵
۱۳	۱۱/۹۰	۵/۹۳	۷/۳۶	۶/۶۳	۱۳/۳۷	۱۰/۳۶	۷/۹۲	۷/۱۰	۸/۸۲	۷/۳۳	۷/۱۷	۱۳/۹۴	۹/۴۸
۱۴	۹/۵۲	۵/۶۰	۱۰/۷۰	۶/۱۰	۸/۲۰	۹/۶۰	۸/۱۲	۶/۱۱	۷/۹۹	۷/۱۸	۵/۱۰	۱۸/۸۴	۱۰/۳۸
۱۵	۹/۹۶	۵/۳۸	۷/۰۷	۸/۳۵	۹/۷۶	۱۱/۳۹	۵/۳۶	۷/۴۰	۸/۰۹	۵/۹۵	۵/۲۶	۱۴/۲۲	۸/۴۸
۱۶	۱۱/۷۱	۸/۱۵	۹/۵۷	۹/۰۶	۱۰/۹۸	۱۱/۹۶	۱۱/۲۱	۸/۴۶	۱۰/۱۴	۱۰/۹۸	۹/۶۳	۱۵/۱۹	۱۱/۹۴
میانگین	۱۰/۸۷	۵/۵۵	۱۱/۹۵	۸/۲۴	۱۰/۴۶	۱۱/۱۱	۸/۴۶	۷/۹۸	۹/۳۳	۷/۲۵	۶/۸۹	۱۳/۹۹	۹/۳۸

جدول (۹). مقادیر MBE در شبیه سازی رطوبت نسبی (٪) با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

MBE	آبعلی	چینتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۶/۴۴	۰/۱۷	-۰/۵۲	۴/۵۰	۵/۶۵	۶/۷۳	-۳/۲۱	۱/۸۴	۲/۷۰	-۵/۶۹	-۷/۱۱	-۲/۶۰	-۵/۱۳
۲	۴/۱۰	۱/۰۳	۸/۱۷	۶/۵۳	۸/۸۳	۱۰/۱۱	۳/۲۲	۵/۱۶	۵/۸۹	-۱/۰۵	۰/۲۴	-۱/۱۹	-۰/۶۷
۳	۳/۶۰	۱/۱۱	۸/۳۸	۷/۲۰	۸/۷۳	۱۰/۲۶	۳/۳۰	۵/۶۵	۶/۰۳	-۱/۲۲	-۰/۲۲	-۰/۷۸	-۰/۷۴
۴	۴/۴۲	۰/۸۸	۷/۳۹	۶/۵۰	۸/۳۸	۱۰/۱۱	۲/۶۸	۵/۵۸	۵/۷۴	-۱/۸۴	۰/۶۱	-۱/۱۱	-۰/۷۸
۵	۴/۳۶	۱/۰۴	۷/۹۲	۷/۲۶	۹/۰۰	۱۰/۰۷	۷/۴۵	۵/۵۷	۶/۵۸	-۲/۰۴	۰/۵۳	-۱/۱۸	-۰/۹۰
۶	۴/۳۷	۱/۱۶	۷/۵۹	۶/۷۲	۸/۸۵	۱۰/۱۰	۳/۴۵	۵/۶۴	۵/۹۹	-۱/۴۷	۰/۳۱	-۱/۱۴	-۰/۷۷
۷	۳/۸۴	۱/۱۱	۷/۸۵	۶/۸۴	۹/۱۴	۱۰/۱۱	۳/۲۷	۵/۳۵	۵/۹۴	-۰/۹۵	۰/۰۹	-۱/۱۱	-۰/۶۶
۸	۳/۵۱	۰/۱۹	۶/۶۷	۵/۶۸	۷/۰۰	۸/۵۵	۳/۰۵	۴/۳۸	۴/۸۸	-۲/۰۹	-۱/۲۱	-۲/۴۲	-۱/۹۱
۹	۴/۱۹	۱/۰۷	۸/۱۲	۷/۰۰	۸/۷۰	۱۰/۸۴	۲/۹۶	۵/۳۳	۶/۰۳	-۱/۴۰	۰/۴۷	-۱/۳۴	-۰/۷۶
۱۰	۴/۲۲	۰/۵۱	۷/۱۵	۵/۶۰	۷/۲۶	۸/۶۷	۲/۱۳	۴/۰۰	۴/۹۴	-۲/۲۰	-۳/۹۸	-۴/۳۷	-۳/۵۲
۱۱	۴/۱۶	۱/۰۶	۸/۱۶	۶/۴۵	۸/۴۰	۹/۸۷	۳/۱۲	۵/۱۸	۵/۸۰	-۱/۵۴	-۰/۲۱	-۰/۴۱	-۰/۷۲
۱۲	۴/۰۸	۰/۹۸	۸/۲۵	۷/۳۳	۸/۹۷	۱۰/۶۸	۳/۱۰	۵/۸۶	۶/۱۶	-۱/۰۵	۰/۲۰	-۱/۱۰	-۰/۶۵
۱۳	۵/۳۱	۳/۳۲	۰/۹۷	۳/۹۱	۱۱/۲۷	۵/۹۶	۲/۰۶	۳/۹۵	۴/۵۹	-۲/۴۱	-۰/۲۷	-۱/۰۳	-۱/۲۴
۱۴	۱/۲۲	۲/۴۹	۵/۷۰	۴/۸۳	۶/۷۹	۶/۸۰	۱/۵۳	۳/۲۰	۴/۰۷	-۱/۴۰	۰/۴۲	-۹/۴۱	-۳/۴۶
۱۵	۰/۴۷	۳/۳۸	۴/۳۲	۷/۴۵	۷/۷۳	۹/۳۹	۱/۸۶	۵/۲۷	۴/۹۸	-۱/۵۰	-۰/۳۲	-۶/۹۰	-۲/۹۱
۱۶	۵/۳۴	۲/۷۷	۰/۵۰	۱/۴۵	۸/۲۸	۳/۸۵	-۱/۲۳	۰/۸۲	۲/۷۲	-۵/۳۳	-۰/۴۸	۰/۶۷	-۱/۷۱
میانگین	۳/۹۸	۱/۳۹	۶/۰۴	۵/۹۵	۸/۳۱	۸/۸۸	۲/۴۲	۴/۵۵	۵/۱۹	-۲/۰۷	-۰/۶۸	-۲/۲۱	-۱/۶۶

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]



شکل (۵). اختلاف رطوبت نسبی دو متری (حالت مرجع- اصلاح‌شده) در ایستگاه‌های هواشناسی استان‌های تهران و البرز

اختلاف رطوبت نسبی بین دو حالت مرجع و اصلاح‌شده در جدول (۱۰) ارائه شده است. با توجه به جدول (۱۰)، در استان‌های تهران و البرز، افزایش انعکاس سطوح شهری منجر به افزایش رطوبت نسبی می‌گردد.

در استان تهران بیشترین افزایش مربوط به پیکربندی شماره ۱۳ و ۱۴ می‌باشد در استان البرز به‌استثناء پیکربندی شماره ۱۵ که نشان‌دهنده کاهش رطوبت نسبی است؛ بیشترین افزایش رطوبت نسبی مربوط به پیکربندی شماره ۱ و ۱۶ است. میانگین اختلاف رطوبت نسبی در استان تهران و البرز به ترتیب ۱/۲۵- و ۰/۵۲- درصد به‌دست‌آمده است. با توجه به شکل (۵) در استان‌های تهران و البرز با افزایش انعکاس سطوح شهری، بیشترین افزایش رطوبت نسبی در نواحی شهری به وقوع پیوسته است.

جدول (۱۰). اختلاف رطوبت نسبی ۲ متری (٪) بین دو حالت مرجع و اصلاح‌شده با ۱۶ پیکربندی مختلف در مدل WRF

Δr	آبعلی	چیتگر	فرودگاه امام	ژئوفیزیک	لواسان	مهرآباد	شهریار	شمیران	میانگین	کرج	هشتگرد	طالقان	میانگین
۱	۰/۲۲	-۰/۴۱	-۲/۲۲	-۱/۸۹	۰/۰۹	-۳/۵۶	-۱/۰۶	-۱/۱۰	-۱/۲۴	-۳/۲۸	-۰/۴۰	-۰/۱۰	-۱/۲۶
۲	۰/۲۷	-۰/۳۶	-۱/۹۲	-۳/۶۰	۱/۱۳	-۲/۶۹	-۱/۲۲	-۲/۱۶	-۱/۳۲	-۱/۸۱	۰/۸۸	-۰/۳۵	-۰/۴۳
۳	-۰/۲۷	-۰/۳۶	-۰/۵۱	-۱/۱۶	۰/۷۶	-۲/۸۳	-۱/۵۶	-۱/۷۹	-۰/۹۶	-۱/۶۱	۰/۹۱	۰/۲۸	-۰/۱۴
۴	۰/۴۴	-۰/۳۴	-۲/۰۸	-۱/۰۸	۰/۷۲	-۲/۱۶	-۱/۸۵	-۱/۶۵	-۱/۰۰	-۲/۴۵	۱/۶۱	-۰/۰۳	-۰/۲۹
۵	۰/۳۷	-۰/۲۳	۰/۱۷	-۲/۱۳	۱/۵۱	-۲/۹۳	-۰/۹۰	-۱/۲۸	-۰/۶۸	-۲/۰۱	۰/۱۴	-۰/۳۰	-۰/۷۲
۶	۰/۳۴	-۰/۱۷	-۲/۳۶	-۱/۱۲	۱/۲۰	-۲/۹۴	-۰/۶۱	-۱/۵۷	-۰/۹۱	-۲/۳۸	۰/۸۷	-۰/۲۱	-۰/۵۷
۷	-۰/۶۴	-۰/۴۱	-۱/۸۸	-۱/۴۳	۱/۳۳	-۲/۵۰	-۱/۵۹	-۱/۶۵	-۱/۱۰	-۱/۹۳	۰/۹۳	-۰/۷۶	-۰/۵۸
۸	-۰/۰۸	-۰/۵۹	-۲/۲۸	-۱/۸۶	۰/۱۶	-۲/۵۸	-۰/۸۳	-۱/۴۳	-۱/۱۹	-۱/۲۳	-۰/۰۳	۰/۱۴	-۰/۳۷
۹	۰/۳۰	-۰/۲۴	-۱/۳۷	-۱/۵۳	۱/۱۰	-۳/۰۶	-۱/۳۴	-۱/۹۶	-۱/۰۱	-۲/۱۷	۱/۲۶	-۰/۲۶	-۰/۳۹
۱۰	-۰/۰۹	-۰/۳۶	-۳/۰۸	-۱/۰۵	۰/۳۳	-۲/۱۰	-۰/۸۹	-۱/۵۹	-۱/۱۰	-۱/۲۸	-۰/۶۵	-۰/۱۲	-۰/۶۹
۱۱	۰/۱۱	-۰/۵۸	-۱/۲۱	-۴/۲۰	۰/۹۰	-۳/۲۷	-۱/۷۰	-۱/۶۲	-۱/۴۵	-۲/۴۰	۰/۳۲	۰/۱۱	-۰/۶۶
۱۲	۰/۱۳	-۰/۵۱	-۱/۲۵	-۰/۹۹	۱/۴۷	-۲/۳۸	-۱/۷۱	-۱/۴۵	-۰/۸۳	-۱/۹۰	۰/۷۹	-۰/۱۵	-۰/۴۲
۱۳	-۰/۶۹	-۱/۱۱	-۳/۰۱	-۳/۷۶	-۰/۲۸	-۴/۲۳	-۰/۶۱	-۲/۷۰	-۲/۰۵	-۱/۴۶	-۰/۲۶	۰/۲۲	-۰/۵۰
۱۴	-۰/۳۱	-۱/۷۰	-۰/۵۲	-۳/۶۵	-۰/۷۹	-۴/۷۰	-۰/۷۲	-۳/۶۶	-۲/۰۱	-۱/۰۱	۰/۰۵	-۰/۱۸	-۰/۳۸
۱۵	-۰/۰۱	-۱/۲۹	-۰/۵۶	-۲/۲۴	-۰/۲۳	-۳/۲۴	-۰/۰۳	-۳/۲۲	-۱/۳۵	-۰/۸۰	-۰/۱۱	۲/۱۱	۰/۴۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

۱۶	-۰/۵۴	-۲/۴۷	-۱/۱۸	-۳/۰۷	-۰/۵۷	-۳/۶۵	-۰/۹۴	-۱/۸۹	-۱/۷۹	-۴/۳۰	۰/۰۷	۰/۲۶	-۱/۳۳
میانگین	-۰/۰۳	-۰/۷۰	-۱/۵۸	-۲/۱۷	۰/۵۵	-۳/۰۵	-۱/۱۰	-۱/۹۲	-۱/۲۵	-۲/۰۰	۰/۴۰	۰/۰۴	-۰/۵۲

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا (WRF) به‌صورت جفت شده با مدل تک لایه شهری (UCM)، با ترکیب‌های مختلف طرح‌واره‌های پارامتر سازی (۱۶ پیکربندی مختلف) در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی (نظیر دمای هوای ۲ متری، سرعت باد ۱۰ متری و رطوبت نسبی ۲ متری) در استان تهران و البرز مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. بازه زمانی سه‌روزه (۱۸-۲۱ آگوست ۲۰۱۶) همراه با شرایط جوی پایدار در فصل تابستان انتخاب شد. حوزه محاسباتی از ۴ شبکه تودرتو با فواصل شبکه‌ای ۳۶، ۱۲، ۴ و ۱/۳۳ کیلومتر تشکیل‌شده است. حوزه چهارم (با تفکیک ۱/۳۳ کیلومتر) به‌گونه‌ای انتخاب شده است که کلیه ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه را پوشش دهد. در استان تهران، به‌طورکلی تمامی پیکربندی‌ها، دمای هوا و سرعت باد را کمتر از مقدار واقعی و رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند. در استان البرز تمامی پیکربندی‌ها دمای هوا و سرعت باد را بیشتر از مقدار واقعی و رطوبت نسبی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند.

در بررسی دمای ۲ متری در استان تهران، پیکربندی شماره ۴ و ۱۲ که متشکل از ترکیب طرح‌واره‌های Goddard و SBU-Ylin (خردفیزیک)؛ MYG (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG (تابش موج‌کوتاه) و Eta برای طرح‌واره لایه سطحی می‌باشد، نسبت به سایر پیکربندی‌ها عملکرد بهتری دارد. در استان البرز حداقل RMSE به ترتیب مربوط به پیکربندی شماره ۱۳، ۴ و ۱۲ می‌باشد که متشکل از طرح‌واره‌های Goddard، SBU-Ylin و lin (خردفیزیک)؛ MYG و YSU (لایه‌مرزی سیاره‌ای)؛ Grell3D و Kain-Fritsch (همرفت)؛ RRTM و RRTMG (تابش موج‌بلند)، RRTMG و dudhia (تابش موج‌کوتاه)، Eta و MM5 برای طرح‌واره لایه سطحی می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پارامتر سازی RRTMG و RRTM نسبت به طرح‌واره CAM برای تابش موج‌بلند، پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد؛ بنابراین دمای تراز ۲ متری مدل حساسیت بیشتری به طرح‌واره تابش طول‌موج بلند نشان می‌دهد. سلطان‌زاده (۱۳۹۰) نیز به این نتیجه دست‌یافت که طرح‌واره CAM موفق عمل نمی‌کند. در استان تهران طرح‌واره لایه سطحی Eta نسبت به MM5 عملکرد بهتری دارد. در استان البرز نیز سنجه آماری MBE عملکرد طرح‌واره Eta را بهتر از MM5 می‌داند. میانگین اختلاف دما (حالت مرجع- اصلاح‌شده) در استان تهران و البرز به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۲۰ درجه سانتی‌گراد است. در استان‌های تهران و البرز، با افزایش انعکاس سطوح شهری، دما کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش دما در نواحی شهری به وقوع پیوسته است.

در بررسی سرعت باد در استان تهران، پیکربندی ۱۴ و در استان البرز پیکربندی ۱۶ بهتر از سایر ترکیبات می‌باشد. شارن و همکاران، ۱۹۹۷ نشان دادند که تحت شرایط باد ضعیف، نیمرخ پخش تلاطمی به پارامتر سازی PBL حساس است، ازاین‌رو با توجه به نتایج آزمون حساسیت، طرح‌واره‌های غیر محلی MRF و YSU نسبت به طرح‌واره‌های محلی (MYJ) برای پارامتر سازی لایه‌مرزی در پیش‌بینی سرعت باد عملکرد بهتری دارند. میانگین اختلاف سرعت باد (حالت مرجع - اصلاح‌شده) در استان تهران و البرز به ترتیب ۰/۰۱- و ۰/۰۹- متر بر ثانیه به‌دست‌آمده است. در استان‌های تهران و البرز با افزایش انعکاس سطوح شهری، میزان سرعت باد خصوصاً در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

نواحی شهری به میزان کمی رو به افزایش است؛ بنابراین افزایش انعکاس سطوح منجر به افزایش سرعت باد می‌گردد که به‌تبع آن دمای هوا کاهش می‌یابد؛ که با نتایج مطالعات جندقیان و همکاران، (۲۰۱۸) مطابقت دارد. در بررسی رطوبت نسبی در استان تهران، پیکربندی ۱۴ و ۱ و در استان البرز پیکربندی ۸، ۱۲ و ۱۵ بهتر از سایر ترکیبات می‌باشند. به نظر می‌رسد که ترکیب طرح‌واره غیر محلی YSU (لایه‌مرزی) همراه با CAM (تابش موج‌بلند) در پیش‌بینی رطوبت نسبی عملکرد ضعیفی دارند (پیکربندی شماره ۱۶) و این متغیر به طرح‌واره‌های خردفیزیک نسبت به دیگر طرح‌واره‌ها حساسیت بیشتری دارد. همچنین با توجه به نتایج آزمون حساسیت؛ در روزهای آرام و پایدار طرح‌واره‌های همرفت تأثیر بسیار ناچیزی در شبیه‌سازی‌ها دارد. میانگین اختلاف رطوبت نسبی (حالت مرجع - اصلاح‌شده) در استان تهران و البرز به ترتیب ۱/۲۵- و ۰/۵۲- درصد می‌باشد. در استان‌های تهران و البرز، افزایش انعکاس سطوح شهری منجر به افزایش رطوبت نسبی می‌گردد که بیشترین افزایش مربوط به نواحی شهری است که با نتایج مطالعات پیشین (جندقیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ جندقیان و اکبری، ۲۰۱۸) مطابقت دارد.

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان‌دهنده آن است که تعیین مناسب‌ترین پیکربندی برای شبیه‌سازی‌ها به موقعیت جغرافیایی منطقه، فصل سال و مقیاس زمانی و مکانی وابسته است و قابل‌تعمیم به مناطق دیگر با ویژگی‌های متفاوت نخواهد بود. تحقیقات کریگر و همکاران، ۲۰۰۹ و استنسراد، ۲۰۰۷ نیز مؤید این مطلب می‌باشند. با توجه به تحقیقات اکبری و همکاران (۲۰۰۱)، برای هر ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش دما، ممکن است تقاضای برق ۲ تا ۴ درصد افزایش یابد. به‌عبارت‌دیگر اگر اقدامات کاهشی (نظیر افزایش انعکاس سطوح شهری) به‌منظور تعدیل اثرات گرمایش شهری انجام شود؛ ۲۰ درصد انرژی که برای تهویه مطبوع مورداستفاده قرار می‌گیرد می‌تواند ذخیره شود. همچنین این امر منجر به بهبود شرایط آسایش و مقابله با گرمایش جهانی می‌گردد. نتایج این تحقیق می‌تواند توسط سیاست‌مداران و مدیران در زمینه مدیریت شهری مانند ساخت‌وسازهای مناطق شهری، کیفیت هوا و مدیریت مصرف انرژی مورداستفاده قرار گیرد.

منابع

اصلانی، رضا. (۱۳۹۲). **بررسی تأثیر استفاده از فناوری بام خنک بر روی پتانسیل جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی کلان‌شهر تهران)**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر خسرو اشرفی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران.

آزادی، مجید؛ رضازاده، پرویز؛ میرزایی، ابراهیم؛ وکیلی، غلامعلی. (۱۳۸۲). **پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه‌ای پارامتری ساری‌های فیزیکی**، هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، تبریز، دانشگاه تبریز، انجمن فیزیک ایران.

خسروی، محمود؛ قبادی، اسدالله. (۱۳۹۳). **تبیین جایگاه سامانه بام سبز در تعدیل جزیره حرارتی شهر نمونه موردی: کرج**. دو فصلنامه پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری. **(۴)**:۷۸-۶۷.

هاشمی دره بادامی، سیروس؛ درویشی بلورانی، علی؛ علوی پناه، کاظم؛ ملکی، محمد؛ بیات، رضا. (۱۳۹۸). **تحلیل تغییرات جزیره حرارتی سطوح شهری در روز و شب با استفاده از محصولات چند زمانه سنجنده مادیس (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، **۵۲**: ۱۲۸-۱۱۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

ساسانیان، سوزان؛ آزادی، مجید؛ عسگری شیرازی، حسن؛ میرزایی حاجی باغلو، ابراهیم. (۱۳۹۴). **ارزیابی عملکرد مدل WRF با نه پیکربندی فیزیکی مختلف برای پیش‌بینی بارش زمستانه جنوب غرب ایران**. مجله علمی و ترویجی نیوار، **(۹۱-۹۰)**:۲۶-۱۵.

سلطان‌زاده، ایمان. (۱۳۹۰). **بررسی مشاهداتی و شبیه‌سازی عددی الگوی باد و گردش‌های میان‌مقیاس روی یک منطقه شهری با توپوگرافی پیچیده (تهران)**، رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

شاکری، فهیمه. (۱۳۹۳). **تحلیل شاخص‌های ناپایداری هنگام وقوع پدیده تگرگ در شهرستان مشهد**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: محمد سلیقه، دانشگاه خوارزمی.

فلاح قالهری، غلامعباس.(۱۳۹۳). **اصول و مبانی هواشناسی**. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه حکیم سبزواری، ۹۰۲.

قادر، سرمد؛ یازجی، دانیال؛ سلطان‌پور، محسن؛ نعمتی، محمدحسین. (۱۳۹۴). **به‌کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده‌شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج‌فارس**، مجله هیدروفیزیک، **۱(۱)**: ۴۱-۵۴.

کرمی، مختار؛ زندی، رحمان؛ طاهری، جلال. (۱۳۹۹). **مکان‌یابی جزایر حرارتی و انطباق آن با تصاویر ماهواره‌ای بر اساس مدل تاپسیس در شهر مشهد**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۵۶: ۹۲-۷۵

گودرزی، لیلا؛ بنی حبیب، محمدابراهیم؛ غفاریان، پروین. (۱۳۹۷). **ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کن)**. پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، **۲۵ (۱)**:۲۴۲-۲۲۹.

لایقی، بهزاد؛ قادر، سرمد؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی؛ آزادی، مجید. (۱۳۹۶). **حساسیت‌سنجی شبیه سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج‌فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی**. مجله ژئوفیزیک ایران، **۱۱(۱)**: ۱۹-۱.

ذوالجودی، مجتبی؛ قاضی میر سعید، مژگان؛ سیفری، زهرا. (۱۳۹۲). **بررسی صحت و دقت طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF و ارزیابی پیش‌بینی بارش در ایران‌زمین**. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۸، **(۲)**:۱۹۴-۱۸۷.

ملکوتی، حسین؛ علی محمدی، مهریار. (۱۳۹۳). **مطالعه حساسیت شدت و مسیر توفان گونو به پارامترسازی‌های شارهای سطحی مدل Advanced Hurricane WRF**. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی.(**۹**): ۱۱۲-۹۷.

Adinna E, Christian E.I., Okolie A.T. 2009. **Assessment of urban heat island and possible adaptations in Enugu urban using landsat-ETM**, Journal of Geography and Regional Planning, **2(2):** 30-36.

Akbari H, Touchaei A.G. 2014. **Modeling and labeling heterogeneous directional reflective roofing materials**. Solar Energy Materials & Solar Cells, **124:** 192–210.

Akbari H, Kolokotsa D. 2016. **three decades of urban heat islands and mitigation technologies research**, Energy Build,**133:** 834–842.

Akbari H, Pomerantz M, Taha H. 2001. **Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas**. Solar Energy, **70(3):** 295–310.

Akbari H, Bretz S, Kurn D.M, Hanford J. 1997. **Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs**. Energy and Buildings, **25 (2):** 117-126.

Akbari H, Menon S, Rosenfeld A. 2009. **Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2**, Climatic Change, **94 (3-4):** 275-286.

Arnfield A.J. 2003. **Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island**, International Journal of Climatology, **23 (1):** 1-26.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

Baldinelli G, Bonafoni S, Anniballe R, Presciutti A, Gioli B, Magliulo V. 2015. **Spaceborne detection of roof and impervious surface albedo: Potentialities and comparison with airborne thermography measurements**, Solar Energy, **113:** 281–294.

Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, Boussetta S, Brun E, Cloke H.L, Dee D.P, Dutra E, Pappenberger F, DeRosnay P, Sabater J.M, Stockdale T, Vitart F. 2012. **ERA-Interim/Land: A Global Land-Surface Reanalysis Based on ERA-Interim Meteorological Forcing**. ECMWF: Reading, UK.

Bouyer J, Musy M, Huang Y, Athamena K. 2009. **mitigating urban heat island effect by urban design: forms And materials**. Paper presented at the Proceedings of the 5th urban research symposium, cities and climate change: responding to an urgent agenda, Marseille.

Das M.K, Chowdhury Md.A.M, Das S. 2015. **Sensitivity Study with Physical Parameterization Schemes for Simulation of MCS Associated with Squall Events**, International Journal of Earth and Atmospheric Science, **2(2):** 20-36.

Fanni Z. 2006. **Cities and urbanization in Iran after the Islamic revolution**, Cities, **23(6):** 407–411.

Greene J.S, Kalkstein L.S, Kim K.R, Choi Y.J, Lee D.G. 2016. **The application of the European heat wave Of 2003 to Korean cities to analyze impacts on heat-related mortality**, International Journal of. Biometeorology, **60:** 231–243.

Heaviside C, Tsangari H, Paschalidou A, Vardoulakis S, Kassomenos P, Georgiou K.E, Yamasaki E.N. 2016. **Heat-related mortality in Cyprus for current and future climate scenarios**, Science of the Total Environment. **569–570:** 627–633.

Hooshangi H, Akbari H, Touchaei A.G. 2016. **measuring solar reflectance of variegated flat roofing materials using quasi-Monte Carlo method**. Energy and Buildings, **114:** 234-240.

Howard L. 1833. **the climate of London, deduced from meteorological observations, made in the metropolis, and at various places around it**." 2nd ed., Harvey and Darton, **vols. 1–3** London, UK

Jandaghian Z, Akbari H. 2018. **the Effect of Increasing Surface Albedo on Urban Climate and Air Quality: A Detailed Study for Sacramento, Houston, and Chicago**, Climate, **6(19):**1-21, Doi: 10.3390/cli6020019

Jandaghian Z, Touchaei G.A, Akbari H. 2018. **Sensitivity analysis of physical parameterizations in WRF for urban climate simulations and heat island mitigation in Montreal**. Urban Climate, **24:** 577–599.

Kolusu S., Seshagirirao K, Prasanna V, Preethi B. 2014. **Simulation of Indian summer monsoon intraseasonal oscillations using WRF regional atmospheric model**. International Journal of Earth and Atmospheric Science, **1:** 35-53.

Krieger J.R, Zhang J, Atkinson D. E, Zhang X, Shulski M. D. 2009. **Sensitivity of WRF model forecasts to different physical parameterizations in the Beaufort sea region**. 8th Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes. P.1- 2.

Kusaka H, Kimura F. 2004. **coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case**. Journal of Meteorological Society of Japan, **82(1):** 67–80.

Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, Kimura F. 2001 **a simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models**. Boundary Layer Meteorology, **101 (3):** 329–358.

Liao J, Wang T, Wang X, Xie M, Jiang Z, Huang X, Zhu J. 2014. **Impacts of different urban canopy schemes In WRF/Chem on regional climate and air quality in Yangtze River Delta**, China. Atmospheric Research,**146:** 226 -243.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]

Madanipour A. 1998. **Tehran: The Making of a Metropolis**, John Wiley & Sons, London, UK.

Martilli A, Clappier A, Rotach M. 2002. **an urban surface exchange parameterisation for mesoscale models**. Boundary-Layer Meteorology. **104:** 261–304.

Morini E, Touchaei A. Castellani G. B, Rossi F, Cotana F. 2016. **The Impact of Albedo Increase to Mitigate the Urban Heat Island in Terni (Italy) Using the WRF Model**. Sustainability, **8 (999):** 1-14, doi: 10.3390/su8100999.

Nuruzzaman M.d. 2015. **Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review**. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, **3(2):** 67-73. doi: 10.11648/j.ijema.20150302.15

Oke T.R. 1987. **Boundary Layer Climates**, 2nd ed.; Methuen: London, UK; New York, NY, USA, p. 452.

Pomerantz M, Akbari H. 1998. **Cooler Paving Materials for Heat Island Mitigation, Proceedings of the 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, United States, **9:** 135.

Rossi F, Bonamente E., Nicolini A, Anderini E, Cotana F. 2015. **A carbon footprint and energy consumption Assessment methodology for UHI-affected lighting systems in built areas**. Energy and Buildings, **114:** 96–103.

Semsar M. 1986. **Tehran Eine Stadtgeographische Studie**, Springer, Vienna, Austria.

Sharan M, Gopalakrishnan S.G. 1997. **Comparative evaluation of eddy exchange coefficients for strong and weak wind stable boundary layer modeling**. Journal of applied meteorology, **36:** 545-559.

Skamarock W.C, Klemp J.B, Dudhia J, Gill D.O, Barker D.M, Wang W, Powers J.G. 2008. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA.

Stensrud D. J. 2007. **Parameterization Schemes: Keys to understanding numerical weather prediction models**. Cambridge University Press, pp.459

Taha H. 1997a. **modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin**. Atmospheric Environment, **31(11):** 1667-1676.

Taha H. 1997b. **urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat.** Energy and Buildings, **25(2):** 99-103.

Touchaei A.G. 2015. **Characterizing the Effect of Increasing Albedo on Urban Meteorology and Air Quality in Cold Climates, a Case Study for Montreal**, PhD. Dissertation, the Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University Montreal, Quebec, Canada.

U.S. Geological Survey. USGS 2006. **The National Land Cover Database.** Accessed at: http://landcover.usgs.gov/usgslandcover.php; 05/25/2014.

Wang W, Seaman N.L. 1997. **A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale Model**. Monthly Weather Review.**125:** 252-278.

Xu X, Gregory J, Kirchain R. August 1st, 2015. t**he Impacts of Surface Albedo on Climate and Building Energy Consumption: Review and Comparative Analysis**. Transportation Research Board 95th Annual Meeting.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.4.7]
[DOI: 10.52547/jgs.24.72.25]