



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University  
Vol. 7, No. 26, Summer 2026



## Modeling Sea Surface Temperature Using the WRF Numerical Model: Application in a Coastal Arid Region (Case Study: Northern Coasts of the Persian Gulf)

Hamid Abbaspour<sup>1</sup>, Esmail Abbasi<sup>2\*</sup>, Hana Etemadi<sup>3\*</sup>, Iman Rousta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Master of Science in Marine Environment, Faculty of Nano and Biological Sciences and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran, Email: hamid.sku@gmail.com

<sup>2</sup> Assistant professor of Environment Department, Persian Gulf Research Institute, Persian Gulf University, Bushehr, Iran, Email: Esmail.abbasi@pgu.ac.ir\*

<sup>3</sup> Assistant professor of Environment Department, Persian Gulf Research Institute, Persian Gulf University, Bushehr, Iran, Email: H.etemadi@pgu.ac.ir

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran, Email: irousta@yazd.ac.ir

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

### Article history:

Received:  
Accepted:

### Keywords:

Numerical simulation  
Parameterization scheme  
Meteorological buoy  
Statistical validation  
Persian Gulf

### ABSTRACT

Climate change, as one of the most pressing challenges of the twenty-first century, has profoundly affected marine and coastal ecosystems, particularly coastal drylands. Rising sea surface temperatures (SST), the increased frequency of extreme climate events, and intensified thermal stresses are among the key consequences of this global phenomenon. In this context, the application of downscaling numerical models such as the Weather Research and Forecasting (WRF) model offers a novel approach for SST modeling in these environmentally sensitive regions. The Persian Gulf, recognized as one of the world's most significant coastal dryland ecosystems, is characterized by high annual evaporation, elevated salinity, shallow depth, and strong seasonal temperature fluctuations, rendering it particularly vulnerable to climate change. The primary objective of this study is to identify the most optimal configuration of physical parameterization schemes within the WRF model for simulating SST in the Persian Gulf. SST observational data were obtained from the Iran Meteorological Organization. The WRF model was executed using eight distinct configurations, and the model outputs were validated using the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean absolute percentage error (MAPE). The results indicated that Configuration No. 5, which comprises the WSM 5-class microphysics, RRTM longwave radiation, Dudhia shortwave radiation, the Revised MM5 Monin Obukhov surface layer scheme, the Unified Noah land surface model, the YSU planetary boundary layer scheme, and the Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme, exhibited the lowest error metrics and the highest correlation coefficient (0.985), and was therefore identified as the optimal configuration. The RMSE values for spring, summer, autumn, and winter were calculated as 0.036°C, 0.012°C, 0.028°C, and 0.011°C, respectively. Based on these findings, the WRF model outputs can serve as a suitable, high-precision alternative to the Bushehr meteorological buoy data for a range of applications, including climate change monitoring, fisheries management, the protection of coral reefs against bleaching induced by global warming, and the prediction of extreme temperature events in this coastal dryland region.

**Cite this article:** Abbaspour, H., Abbasi, E., Etemadi, H., Rousta, I. (2026). Modeling Sea Surface Temperature Using the WRF Numerical Model: Application in a Coastal Arid Region (Case Study: Northern Coasts of the Persian Gulf). *Journal of the Climate Change research*, 7 (26), 51-70.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: [10.30488/ccr.2026.581093.1334](https://doi.org/10.30488/ccr.2026.581093.1334)



## مدلسازی دمای سطح آب دریا با استفاده از مدل عددی WRF؛ کاربرت در یک خشکبوم ساحلی (مطالعه موردی: سواحل شمالی خلیج فارس)

حمید عباسپور<sup>۱</sup>، اسماعیل عباسی<sup>۲</sup>، هانا اعتمادی<sup>۳</sup>، ایمان روستا<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد محیط زیست دریا، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

رایانامه: hamid.sku@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه محیط زیست، پژوهشکده خلیج فارس دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، رایانامه: Esmail.abbasi@pgu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه محیط زیست، پژوهشکده خلیج فارس دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، رایانامه: H.etemadi@pgu.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران، رایانامه: iroosta@yazd.ac.ir

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                         | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۵/۲/۲۰</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۵/۳/۱۵</p> <p><b>واژه‌های کلیدی:</b> شبیه سازی عددی، طرحواره، بویه هواشناسی، اعتبارسنجی آماری، خلیج فارس</p> | <p>تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های برجسته قرن حاضر، پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی، به ویژه خشکبوم‌های ساحلی، داشته است. افزایش دمای سطح دریا، وقوع رویدادهای حدی اقلیمی و تشدید تنش‌های دمایی از جمله پیامدهای این پدیده جهانی محسوب می‌شوند. در این راستا، به‌کارگیری مدل‌های عددی مقیاس‌کاهی نظیر WRF، رویکردی نوین برای مدل‌سازی دمای سطح دریا در چنین مناطق حساسی به شمار می‌رود. خلیج فارس به عنوان یکی از مهمترین خشکبوم‌های ساحلی جهان، با ویژگی‌هایی نظیر تبخیر سالانه بالا، شوری زیاد، عمق کم و نوسانات شدید دمایی فصلی، از آسیب‌پذیری اکولوژیک ویژه‌ای در برابر تغییرات اقلیمی برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی مناسب‌ترین پیکربندی طرحواره‌های فیزیکی مدل WRF جهت شبیه‌سازی دمای سطح آب دریا در خلیج فارس می‌باشد. داده‌های دمای سطح دریا از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. مدل WRF با هشت پیکربندی متفاوت اجرا و خروجی‌ها با استفاده از شاخص‌های MAE، RMSE و MAPE اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد پیکربندی شماره ۵ شامل WSM 5class، RRTM، Dudhia، Revised MM5، Monin-Obukhov، Unified Noah، YSU و Kain-Fritsch با کمترین میزان خطا و بالاترین ضریب همبستگی (۰/۹۸۵) به عنوان ترکیب بهینه شناسایی گردید. مقادیر RMSE برای فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۰/۰۰۳۶، ۰/۰۰۱۲، ۰/۰۰۲۸ و ۰/۰۰۱۱ درجه سلسیوس محاسبه شد. بر اساس یافته‌ها، خروجی مدل WRF می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب و با دقت بالا برای داده‌های بویه هواشناسی بوشهر در مطالعات پایش تغییرات اقلیمی، مدیریت شیلات، حفاظت از صخره‌های مرجانی در برابر سفیدشدگی ناشی از گرمایش جهانی و پیش‌بینی رویدادهای حدی دمایی در این خشکبوم ساحلی مورد استفاده قرار گیرد.</p> |

**استناد:** عباسپور، حمید؛ عباسی، اسماعیل؛ اعتمادی، هانا؛ روستا، ایمان (۱۴۰۵). مدلسازی دمای سطح آب دریا با استفاده از مدل عددی WRF؛ کاربرت در یک خشکبوم ساحلی (مطالعه موردی: سواحل شمالی خلیج فارس). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۶)، ۷۰-۵۱.



## مقدمه

دمای سطح دریا<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی در سامانه اقلیم زمین و از اجزای کلیدی برهم‌کنش میان جو و اقیانوس به شمار می‌رود. این پارامتر از طریق تنظیم تبادل انرژی، رطوبت و مومنتوم میان سطح دریا و جو، نقشی تعیین‌کننده در فرآیندهای جوی و دریایی ایفا می‌کند. تغییرات زمانی و مکانی دمای سطح دریا می‌تواند بر شدت تبخیر، توزیع شارهای گرمای محسوس و نهان، ساختار لایه مرزی جو، پایداری ترمودینامیکی اتمسفر و شکل‌گیری گردش‌های محلی و منطقه‌ای اثر بگذارد (Chelton & Xie, 2010; Small et al., 2008). به همین دلیل، بازنمایی دقیق این متغیر در مدل‌های پیش‌بینی عددی هوا و اقلیم منطقه‌ای برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه فرآیندهای جو-دریا و کاهش عدم قطعیت خروجی مدل‌ها اهمیت زیادی دارد. در اغلب مدل‌های عددی، دمای سطح دریا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شرایط مرزی پایین در نظر گرفته می‌شود و هرگونه خطا یا عدم قطعیت در بازنمایی آن می‌تواند بر کیفیت شبیه‌سازی متغیرهای جوی اثر گذاشته و دقت نتایج مدل را کاهش دهد (Skamarock et al., 2008). اگرچه در بسیاری از مطالعات اقلیمی و علوم دریایی، تغییرات دمای سطح دریا بیشتر از منظر پیامدهای محیطی و اکولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است، در مطالعات مدل‌سازی عددی، اهمیت دمای سطح دریا عمدتاً به نقش آن در تنظیم فرآیندهای فیزیکی سامانه جو-دریا و کنترل تبادل انرژی و رطوبت بازمی‌گردد. این متغیر به‌طور مستقیم بر انتقال گرما، رطوبت، ساختار لایه مرزی و شرایط پایداری جو اثر می‌گذارد و در نتیجه می‌تواند بر رفتار سامانه‌های جوی در مقیاس‌های مختلف تأثیرگذار باشد (Small et al., 2008). بنابراین، بازنمایی دقیق دمای سطح دریا نه تنها برای شناخت تغییرپذیری اقلیمی، بلکه برای افزایش دقت مدل‌های عددی و بهبود قابلیت اعتماد شبیه‌سازی‌های جوی و دریایی ضروری است.

در سال‌های اخیر، افزایش ناهنجاری‌های دمای سطح دریا و رخدادهایی نظیر امواج گرمایی دریایی توجه پژوهشگران را بیش از پیش به پایش و مدل‌سازی دمای سطح دریا جلب کرده است. امواج گرمایی دریایی به دوره‌هایی از افزایش غیرعادی و پایدار دمای سطح دریا گفته می‌شود که ممکن است از چند روز تا چند ماه تداوم یابد و از طریق تغییر در برهم‌کنش‌های جو-دریا، شرایط اقلیمی منطقه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد (Hobday et al., 2016). با وجود اهمیت این رخدادها، در مطالعات مدل‌سازی عددی تمرکز اصلی بر توان مدل‌ها در بازنمایی دقیق الگوهای زمانی و مکانی دمای سطح دریا و بازتولید تغییرات مشاهده‌شده قرار دارد؛ زیرا هرگونه خطا در شبیه‌سازی این متغیر می‌تواند بر بازنمایی سایر مؤلفه‌های جوی و دریایی نیز اثرگذار باشد (Oliver et al., 2021). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در سامانه‌های پایش و مشاهده، اندازه‌گیری مستقیم دمای سطح دریا همچنان با محدودیت‌هایی همراه است. داده‌های ماهواره‌ای اگرچه پوشش زمانی و مکانی گسترده‌ای ارائه می‌کنند، اما در مناطق ساحلی، نیمه‌بسته و کم‌عمق، به‌ویژه در شرایط ابرناکی یا ناهمگنی شدید سطحی، همواره قادر به بازنمایی دقیق تغییرات دمای نیستند. علاوه بر این، داده‌های حاصل از شناورها و ایستگاه‌های اندازه‌گیری مثل بویه‌ها دریایی نیز معمولاً از پوشش مکانی محدود برخوردارند و امکان پایش پیوسته تغییرات دمای سطح دریا را در تمامی مناطق فراهم نمی‌کنند. از سوی دیگر، مدل‌های گردش عمومی جو و اقلیم هرچند در مقیاس جهانی عملکرد مطلوبی دارند، به دلیل تفکیک مکانی نسبتاً درشت، اغلب در بازنمایی فرآیندهای محلی و ویژگی‌های خاص مناطق ساحلی و نیمه‌بسته با محدودیت مواجه‌اند (Giorgi & Mearns, 1999). در پاسخ به این محدودیت‌ها، استفاده از مدل‌های منطقه‌ای و روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی در مطالعات اقلیمی و هواشناسی گسترش یافته است. این رویکرد امکان انتقال اطلاعات مدل‌های بزرگ‌مقیاس به مقیاس‌های منطقه‌ای با قدرت تفکیک بالاتر را فراهم می‌کند و

---

1. Sea Surface Temperature (SST)

می‌تواند ناهمگنی‌های محلی، ویژگی‌های سطحی و فرآیندهای کوچک‌مقیاس را با دقت بیشتری بازنمایی کند (Giorgi & Mearns, 1999). از این میان، مدل WRF به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های مزومقیاس غیرهیدرواستاتیک، در طیف گسترده‌ای از مطالعات شامل پیش‌بینی عددی هوا، اقلیم منطقه‌ای، شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های جو-دریا و مدل‌سازی محیط‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفته است (Skamarock et al., 2008). همین‌طور قابل ذکر است که یکی از چالش‌های اساسی در کاربرد مدل‌های گردش عمومی جو، وسعت دامنه محاسباتی آنهاست. به دلیل تغییرات توپوگرافی و اقلیمی در این دامنه وسیع، استفاده مستقیم از خروجی مدل‌های جهانی در مقیاس ایستگاهی امکان‌پذیر نیست و ناسازگاری مقیاس میان اطلاعات موجود و نیاز پژوهشگران پدیدار می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). به منظور رفع این مشکل، روش‌های موسوم به «مقیاس‌کاهی» توسعه یافته‌اند که امکان تولید سناریوهای اقلیمی با وضوح منطقه‌ای را فراهم می‌سازند. مقیاس‌کاهی فرایندی است که داده‌های با قدرت تفکیک پایین مدل‌های سیاره‌ای را به اطلاعاتی با دقت مکانی بالاتر تبدیل کرده و شناسایی فرایندهای کوچک‌مقیاس و منطقه‌ای را میسر می‌سازد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۶). این روش‌ها به دو دسته اصلی مقیاس‌کاهی دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که هر دو رویکرد آماری و دینامیکی، عملکرد مدل‌های جهانی را در مقیاس منطقه‌ای بهبود می‌بخشند (هوشیار و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به حساسیت اکوسیستم‌های ساحلی به تغییرات اقلیمی و نیاز به داده‌های با دقت بالا در این مناطق، استفاده از روش مقیاس‌کاهی دینامیکی با مدل‌های میان‌مقیاس ضروری می‌باشد. از جمله ابزارهای پیشرفته مقیاس‌کاهی دینامیکی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به مدل عددی میان‌مقیاس WRF اشاره کرد که قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا را دارا می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل WRF، انعطاف‌پذیری آن در انتخاب طرحواره‌های فیزیکی است. این مدل امکان استفاده از گزینه‌های مختلف برای فرآیندهایی نظیر ریزفیزیک ابر، انتقال تابشی، لایه مرزی سیاره‌ای، لایه سطحی، فرآیندهای سطح زمین و پارامترسازی همرفت را فراهم می‌سازد. با وجود مزایای این انعطاف‌پذیری، انتخاب طرحواره‌های فیزیکی یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در خروجی مدل به شمار می‌رود؛ زیرا ترکیب‌های مختلف این طرحواره‌ها می‌توانند به بازنمایی‌های متفاوتی از متغیرهای جوی و سطحی منجر شوند (Powers et al., 2017). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که دقت شبیه‌سازی متغیرهای سطحی در WRF تا حد زیادی به نحوه پیکربندی فیزیکی مدل وابسته است. برای نمونه، Pan et al. (2018) نشان دادند که انتخاب طرحواره‌های مختلف می‌تواند تفاوت محسوسی در بازنمایی دمای نزدیک سطح، رطوبت، میدان باد و سایر متغیرهای سطحی ایجاد کند. نتایج این مطالعات همچنین بیانگر آن است که هیچ ترکیب فیزیکی ثابتی وجود ندارد که در همه مناطق و شرایط اقلیمی عملکرد بهینه‌ای داشته باشد؛ بلکه کارایی هر طرحواره به ویژگی‌های اقلیمی، شرایط سطحی و فرآیندهای غالب منطقه بستگی دارد. افزون بر این، برهم‌کنش میان جو و سطح دریا در محیط‌های ساحلی و دریایی، به دلیل وجود ناهمگنی‌های حرارتی و دینامیکی، نسبت به محیط‌های خشکی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. تغییرات مکانی دمای سطح دریا می‌تواند گرادیان‌های حرارتی محلی ایجاد کند و از طریق تاثیر بر شدت تبخیر، انتقال رطوبت و ساختار لایه مرزی، بر توسعه گردش‌های مزومقیاس و ویژگی‌های ترمودینامیکی جو اثر بگذارد. در چنین شرایطی، عملکرد مدل‌های منطقه‌ای تا حد زیادی به نحوه بازنمایی تبادلات سطحی و انتخاب مناسب طرحواره‌های فیزیکی وابسته است؛ به‌ویژه طرحواره‌های لایه سطحی و لایه مرزی سیاره‌ای که نقش مستقیمی در محاسبه شارهای گرما و رطوبت میان جو و دریا ایفا می‌کنند (Small et al., 2008).

(Warner et al., 2010). یافته‌های مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کارایی پیکربندی‌های فیزیکی مدل WRF در مناطق مختلف جغرافیایی و اقلیمی یکسان نیست و نمی‌توان یک ترکیب ثابت از طرحواره‌ها را برای تمامی شرایط محیطی مناسب دانست. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که طرحواره‌هایی که در شبیه‌سازی سامانه‌های جوی بر فراز خشکی عملکرد رضایت‌بخشی دارند، الزاما در محیط‌های ساحلی و دریایی نتایج مشابهی ارائه نمی‌کنند؛ زیرا بازنمایی تبادل گرما و رطوبت، ساختار لایه مرزی و شدت برهم‌کنش‌های جو-دریا به ویژگی‌های منطقه‌ای وابستگی زیادی دارد (Powers et Pan et al., 2018; al., 2017). این تفاوت‌ها ضرورت انجام ارزیابی‌های منطقه‌محور برای انتخاب مناسب‌ترین پیکربندی‌های فیزیکی WRF در مدلسازی دمای سطح دریا را برجسته می‌سازد. در این میان، خلیج فارس به‌عنوان پهنه‌ای نیمه‌بسته با ویژگی‌هایی همچون عمق نسبتا کم، تبخیر شدید، شوری بالا و نوسانات حرارتی قابل توجه، از جمله محیط‌های پیچیده برای شبیه‌سازی دمای سطح دریا محسوب می‌شود. این شرایط می‌تواند حساسیت مدل‌های عددی به انتخاب طرحواره‌های فیزیکی را افزایش داده و موجب تشدید خطاهای مرتبط با بازنمایی دمای سطح دریا شود. با وجود اهمیت منطقه‌ای خلیج فارس، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌های مبتنی بر WRF عمدتا بر متغیرهای جوی، بارش، سامانه‌های همرفتی و رخداد‌های حدی متمرکز بوده‌اند و ارزیابی نظام‌مند حساسیت پیکربندی‌های فیزیکی WRF برای شبیه‌سازی دمای سطح دریا در محیط‌های نیمه‌بسته و گرم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزون بر این، نتایج مطالعات موجود درباره عملکرد طرحواره‌های فیزیکی در مناطق مختلف همواره یکسان نبوده و نوعی وابستگی منطقه‌ای در کارایی آن‌ها مشاهده می‌شود؛ موضوعی که انتخاب یک پیکربندی بهینه و قابل اتکا را به چالشی مهم تبدیل کرده است. اما به‌طور کلی باید اشاره کرد که پژوهش‌های اخیر بهینه‌سازی پیکربندی WRF را مخصوصا برای

پدیده‌های حدی جو و اقلیم تایید کرده‌اند. به‌طور مثال Wang et al. (2025) از چهار طرحواره لایه مرزی، QNSE را برای تغییرات زمانی و MYJ را برای کمترین خطا در حوضه سیچوان معرفی کردند. Purnama et al. (2023) حساسیت طرحواره‌های لایه مرزی را در جریان‌های مختلف با WRF-LES ارزیابی کردند و یک پیکربندی بسیار بهینه را برای آن منطقه معرفی نمودند. Tiwari & Bush (2025) مناسب‌ترین ترکیب طرحواره‌ها را برای مناطق تپه‌ای ناگالند شناسایی کردند. Wang et al. (2026) اثرات میکروفیزیک ابر را بر بارش‌های حدی فلات تبت بررسی نمودند. مجموع این مطالعات تأکید دارند که انتخاب بهینه طرحواره‌های فیزیکی و داده‌های شرایط مرزی، نقشی تعیین‌کننده در دقت پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی ایفا می‌کند.

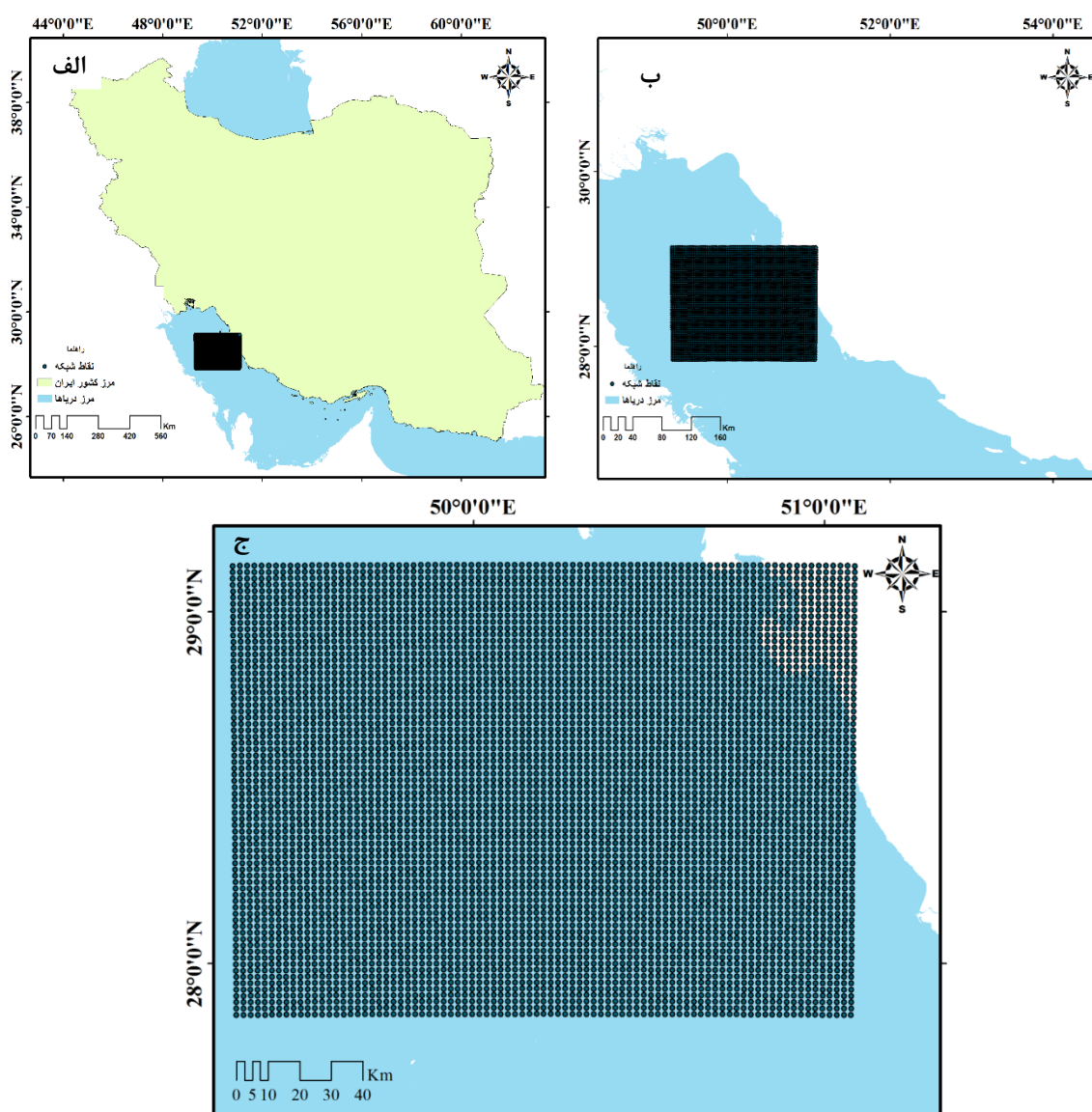
بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی حساسیت پیکربندی‌های فیزیکی مدل WRF در شبیه‌سازی دمای سطح دریا در خلیج فارس انجام شده است تا ضمن بررسی میزان اثرگذاری طرحواره‌های مختلف، مناسب‌ترین ترکیب فیزیکی برای بازنمایی دقیق‌تر دمای سطح دریا در این منطقه شناسایی شود و در نهایت به عنوان یک جایگزین مناسب برای بویه‌های هواشناسی که از محدودیت‌های زیادی برخوردار هستند مورد استفاده قرار گیرد. همین‌طور انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند علاوه بر کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های اقلیم منطقه‌ای و پیش‌بینی‌های عددی، درک بهتری از عملکرد WRF در محیط‌های دریایی و نیمه‌بسته فراهم آورد.

### منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس، آبراهی نیمه‌بسته و یک خشکبوم در آسیای غربی، میان ایران و شبه‌جزیره عربستان واقع شده و از طریق تنگه هرمز به دریای عمان متصل می‌شود. این خلیج با مساحتی حدود ۲۴۰۰۰۰ کیلومتر مربع و طول تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر، سومین خلیج بزرگ جهان محسوب می‌گردد. عمق

میانگین اقیانوسی ۳۵ گرم در کیلوگرم شده است (Rasoulpour et al., 2024). بر اساس کنوانسیون لندن (۱۹۷۳)، خلیج فارس به دلیل آسیب‌پذیری بالای اکولوژیک، به عنوان منطقه ویژه شناخته شده است. قابل ذکر است طبق طبقه‌بندی UNEP، خشک‌بوم‌ها به عنوان مناطقی تعریف می‌شوند که شاخص خشکی (نسبت میانگین بارندگی سالانه به تبخیر و تعرق بالقوه) کمتر از ۰.۶۵ است و شامل مناطق نیمه‌مرطوب، نیمه‌خشک، خشک و فراخشک می‌شود (Nicholson., 2001).

متوسط آن ۳۵ متر و حداکثر عمق از ۱۰۰ متر فراتر نمی‌رود (Mahpeykar & Khalilabadi, 2021). به دلیل تنگی گلوگاه هرمز، گردش آب در این حوضه کند بوده و تجدید آب آن با تأخیر صورت می‌پذیرد. خلیج فارس دارای آب‌وهوایی بسیار گرم است. میانگین تبخیر سالانه حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر برآورد می‌شود که به مراتب بیشتر از مجموع آب ورودی رودخانه‌ها (۱۵۰-۴۶۰ میلی‌متر) و نزولات جوی (۷۰-۱۰۰ میلی‌متر) می‌باشد. این شرایط باعث افزایش شوری آب به بیش از ۴۰ گرم در کیلوگرم نسبت به

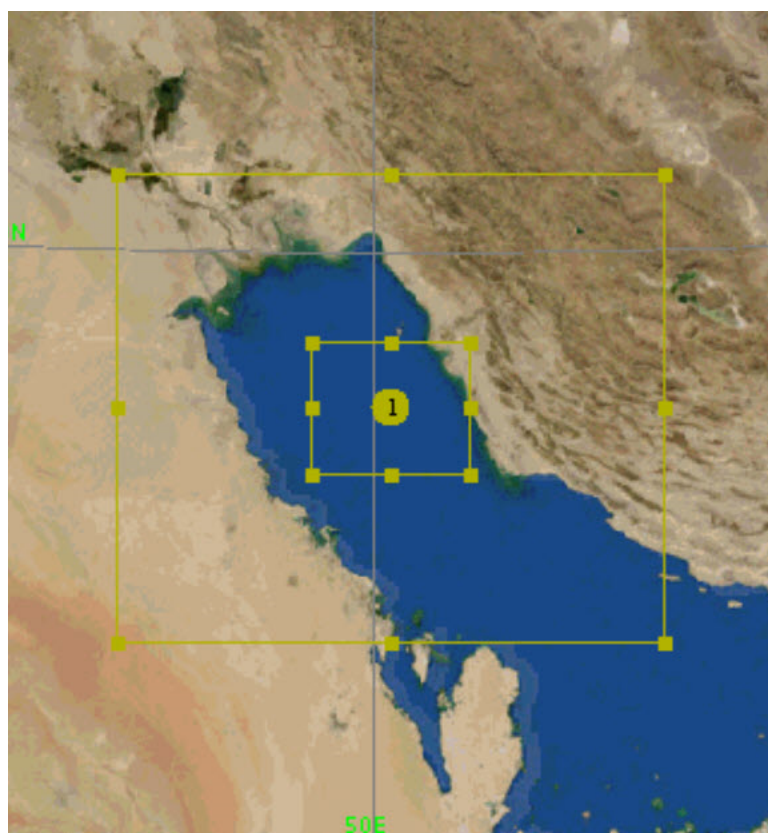


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی خلیج فارس (الف)، منطقه مدل‌سازی شده (ب) و نقاط شبکه‌بندی شده مدل (ج)



**داده‌ها و روش‌ها:** ارزیابی و صحت‌سنجی هر مدل عددی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای با تفکیک بالا انجام می‌شود. در این مطالعه از داده‌های بویه هواشناسی بوشهر واقع در محدوده خلیج فارس به مختصات  $28/8279$  عرض شمالی و  $50,7452$  طول شرقی استفاده شد. در این مطالعه از دو دامنه تلسکوپی جهت شبکه‌بندی استفاده شده است. شرایط مرزی اولیه جهت مدلسازی منطقه‌ای در درون شبکه مذکور انجام پذیرفت. شکل شماره یک پوشش مکانی

منطقه مدلسازی شده هر دو دامنه انتخابی را نشان می‌دهد. داده‌هایی که برای ایجاد شرایط اولیه و مرزی در شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه به کار رفته از نوع FNL است که دارای تفکیک  $1 \times 1$  درجه بوده و برای هر ۶ ساعت در دسترس می‌باشد. این داده‌ها توسط سامانه داده‌گواری جهانی تولید می‌شوند که به صورت پیوسته داده‌های دیده‌بانی جهانی را از سامانه تله متری جهانی و منابع دیگر برای تحلیل‌های گوناگون دریافت می‌دارد.



شکل ۲: دامنه‌های انتخابی جهت مدلسازی

همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، دامنه اول ( $N_x * N_y: 100 * 85$ ) با قدرت تفکیک افقی ۶ کیلومتر و در نقطه‌ای با مختصات مرکزی عرض  $28$  درجه و  $50$  دقیقه شمالی و طول  $50$  درجه و  $19$  دقیقه شرقی، دامنه دوم ( $N_x * N_y: 65 * 55$ ) با قدرت تفکیک افقی دو کیلومتر در نظر گرفته شده است. دامنه دوم با نسبت بزرگنمایی  $1:3$  و روش آشیانه‌سازی دوطرفه two-way nesting به دامنه اول متصل گردید. هر

کدام از دامنه‌های انتخابی مناطق جغرافیایی متفاوتی را در بر گرفته است بطوریکه دامنه دوم بخش‌های شمالی خلیج فارس و محل استقرار بویه هواشناسی را در بر می‌گیرد. مدل برای چهار روز که هر روز نماینده یک فصل از سال می‌باشد اجرا شد. در واقع انتخاب روزها به گونه‌ای بوده است که علاوه بر پوشش فصول مختلف بتوان خروجی مدل را صحت‌سنجی نمود. این نکته از این جهت حائز اهمیت بود که داده‌های بویه از

سری زمانی چندان مناسبی برخوردار نبود، به همین جهت سعی شده است روزهای انتخابی جهت مدل‌سازی دارای تقارن زمانی با داده‌های بویه باشد. همین‌طور پارامتر مورد بررسی در این مطالعه دمای سطح دریا می‌باشد. روزهای مورد بررسی شامل ۳۰ آوریل سال ۲۰۰۹ یا ۱۰ اردیبهشت سال ۱۳۸۸ به عنوان نماینده فصل بهار، ۰۱ جولای سال ۲۰۰۹ یا ۱۰ تیرماه سال ۱۳۸۸ به عنوان نماینده فصل تابستان، ۰۱ نوامبر سال ۲۰۰۹ یا ۱۰ آبان ماه سال ۱۳۸۸ به عنوان نماینده فصل پاییز و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ یا ۱۰ دی ماه سال ۱۳۸۸ به عنوان نماینده فصل زمستان می‌باشد. قابل ذکر است این مطالعه تنها بر اساس چهار روز انتخابی انجام شده و برای تعمیم نتایج به کل سال، نیاز به شبیه‌سازی دوره‌های طولانی‌تر (حداقل یک ماه کامل از هر فصل) است که به عنوان یکی از محدودیت‌های این مطالعه باید در نظر گرفت.

زمان شروع اجرای مدل در تمامی روزها ۰۰ و زمان خاتمه مدل ساعت ۲۳ به وقت UTC می‌باشد. ساعت‌های اولیه شبیه‌سازی به عنوان دوره اسپین‌آپ در نظر گرفته شده و از تحلیل نهایی حذف گردید. گام‌های زمانی در تمامی دامنه‌ها یک ساعته در نظر گرفته شده است. در واقع مدل WRF در این پژوهش برای تعدادی از روزها که داده‌های آن از قبل توسط ایستگاه‌های موجود جمع‌آوری شده است اجرا و سپس اقدام به صحت‌سنجی خروجی‌ها گرفته شد. مدل عددی تحقیقاتی WRF که با هسته دینامیکی پیشرفته ARW استفاده می‌شود (Skamarock et al., 2008)، در چند سال گذشته توسعه یافته است. این مدل، هسته‌های دینامیکی چندگانه، یک سیستم همانندسازی داده متغیر سه بعدی و یک نرم‌افزار برای

محاسبات موازی و توسعه‌پذیری سیستم را شامل می‌شود. مدل WRF در اکثر سیستم‌های لینوکس، می‌تواند اجرا شود (مزیدی و همکاران، ۱۳۹۴). هسته اصلی مدل شامل چندین برنامه مقدماتی اجرایی یعنی ideal.exe و real.exe و نیز یک برنامه انتگرال‌گیری عددی wrf.exe و یک برنامه برای انجام آشیانه‌سازی یک سوپه ndown.exe است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۰).

**پیکربندی مدل:** پیکربندی فیزیکی مدل براساس جدول ۱ صورت گرفته است. با توجه به تعداد بالای طرحواره‌های فیزیکی، در این پژوهش سعی شده است بعد از اجرای مدل در حالات مختلف (۸ حالت) به کمک روش‌های اعتبارسنجی بهترین طرحواره‌ها به لحاظ دقت انتخاب گردد. هرچند گزینه‌های فیزیکی دیگری نیز جهت اجرای مدل موجود می‌باشد اما به دلیل گستردگی و حجم بالای کار، در تحلیل حساسیت مدل قابلیت عملی بودن را دارا نیست. همین‌طور به دلیل اینکه موارد دیگر (گزینه‌های فیزیکی) با توجه به اینکه از اهمیت کمتری در ارتباط با تاثیرگذاری بر پارامترهای مورد بررسی برخوردار هستند در این مطالعه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. اما به منظور اطمینان از صحت‌سنجی مدل و ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی از شاخص‌های خطاسنجی میانگین خطای مطلق، میانگین درصد مطلق خطا و جذر میانگین مربع خطا استفاده شد.

**اعتبارسنجی خروجی‌های مدل:** به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی خروجی مدل از روش‌های مختلف‌ممثل میانگین خطای مطلق، میانگین درصد مطلق خطا، جذر میانگین مربع خطا و ضریب همبستگی استفاده شده است.



جدول ۱: پیکربندی‌های مختلف مدل

| Model Configuration | Micro physics option         | Longwave radiation option | Shortwave radiation option | Surface layer option             | Land surface option             | Boundary layer option           | Cumulus option                |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1                   | WSM 3class simple ice scheme | RRTM scheme               | Dudhia scheme              | PX scheme                        | Unified Noah land surface model | YSU scheme                      | Kain Fritsch (new Eta) scheme |
| 2                   | Lin et al. scheme            | RRTM scheme               | Goddard short wave         | Revised MM5 Monin Obukhov scheme | Unified Noah land surface model | Mellor Yamada Janjic TKE scheme | Grell Devenyi ensemble scheme |
| 3                   | WSM 3class simple ice scheme | RRTM scheme               | Dudhia scheme              | PX scheme                        | thermal diffusion scheme        | YSU scheme                      | Grell Devenyi ensemble scheme |
| 4                   | Lin et al. scheme            | RRTM scheme               | Goddard short wave         | PX scheme                        | Unified Noah land surface model | Mellor Yamada Janjic TKE scheme | Grell Devenyi ensemble scheme |
| 5                   | WSM 5class scheme            | RRTM scheme               | Dudhia scheme              | Revised MM5 Monin Obukhov scheme | Unified Noah land surface model | YSU scheme                      | Kain Fritsch (new Eta) scheme |
| 6                   | WSM 5class scheme            | RRTM scheme               | Goddard short wave         | PX scheme                        | Unified Noah land surface model | Mellor Yamada Janjic TKE scheme | Grell Devenyi ensemble scheme |
| 7                   | Ferrier (new Eta)            | RRTM scheme               | Goddard short wave         | PX scheme                        | Unified Noah land surface model | Mellor Yamada Janjic TKE scheme | Grell Devenyi ensemble scheme |
| 8                   | WSM 5class scheme            | RRTM scheme               | Dudhia scheme              | PX scheme                        | Unified Noah land surface model | Mellor Yamada Janjic TKE scheme | Grell Devenyi ensemble scheme |

مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه فوق  $A_t$  داده‌های مشاهداتی و  $F_t$  داده‌های پیش‌بینی می‌باشد.

۳. جذر میانگین مربع خطا: مقدار این آزمون به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}}$$

در رابطه فوق  $A_t$  داده‌های مشاهداتی و  $F_t$  داده‌های پیش‌بینی می‌باشد. مزیت استفاده از RMSE مانند MAE این است که مقدار خطا را بر حسب همان یکا و مقیاس کمیت مورد سنجش بیان می‌کند.

۱. میانگین خطای مطلق: آزمون میانگین خطای مطلق از طریق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n}$$

این کمیت میانگین مقدار خطا را بدون جهت خطا (مثبت یا منفی) نشان می‌دهد و برای برآورد کامل مقدار آن صفر است. در رابطه فوق  $A_t$  داده‌های مشاهداتی و  $F_t$  داده‌های پیش‌بینی می‌باشد.

۲. میانگین درصد مطلق خطا

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n} \times 100$$

میانگین درصد مطلق خطا یکی از معمول‌ترین روش‌ها می‌باشد که جهت اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی یک

۴. ضریب همبستگی: فرمول ضریب همبستگی پیرسون که معمولاً با  $r$  نشان داده می‌شود، به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

در رابطه فوق:

$x_i$  و  $y_i$  = مقادیر متغیرهای اول و دوم برای مشاهده  $i$ -ام،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  = میانگین حسابی متغیرهای  $x$  و  $y$  و  $n$  = تعداد جفت داده‌ها

### نتایج و بحث

**اجرای مدل:** در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی دمای سطح آب دریا بر روی خلیج فارس و در محل استقرار بویه هواشناسی با استفاده از مدل WRF پرداخته شده است. در واقع مدل WRF اولین مدل پیش‌بینی جوی است که هم پیش‌بینی اجرایی و هم نیازهای تحقیقاتی جوی - اقیانوسی را برآورده می‌سازد. همچنین در این پژوهش از نسخه ۱،۹،۳ مدل WRF استفاده شده است.

در این مدل طرحواره‌های فیزیکی مختلف برای پارامترسازی حرکت‌های کومه‌ای، لایه سطحی، لایه مرزی، انتقال تابشی و غیره در نظر گرفته شده است (Skamarock et al., 2008). در این پژوهش مدل با دو دامنه تو در تو اجرا شد، که دامنه کوچکتر دقیقاً محل استقرار بویه هواشناسی جهت اعتبارسنجی نتایج را پوشش می‌دهد. دامنه اول ( $N_x \times N_y$ : 100\*85) با قدرت تفکیک افقی ۶ کیلومتر و در نقطه‌ای با مختصات مرکزی عرض ۲۸ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و طول ۵۰ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی، دامنه دوم ( $N_x \times N_y$ : 65\*55) با قدرت تفکیک افقی دو کیلومتر در نظر گرفته شده است. هر کدام از دامنه‌های انتخابی مناطق جغرافیایی متفاوتی را در بر گرفته است بطوریکه دامنه دوم بخش‌های شمالی خلیج فارس و محل استقرار بویه هواشناسی را در بر می‌گیرد.

نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که پیکربندی شماره ۵ براساس هر سه آزمون آماری دارای کمترین میزان خطا جهت شبیه‌سازی دمای

سطح آب دریا است (جدول ۲). در حقیقت جهت شبیه‌سازی این پارامتر طرحواره‌های لایه مرزی و لایه سطحی مهمترین طرحواره‌ها می‌باشند که محتمل‌ترین حالات این طرحواره‌ها جهت اجرای مدل در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول ۲ قابل مشاهده است، مقادیر شاخص میانگین خطای مطلق برای ۳۰ آوریل سال ۲۰۰۹ به عنوان نماینده فصل بهار برابر با ۰،۰۵ می‌باشد. مقدار این شاخص برای اول جولای سال ۲۰۰۹ به عنوان نماینده فصل تابستان، اول نوامبر سال ۲۰۰۹ به عنوان نماینده فصل پاییز و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ به عنوان نماینده فصل زمستان به ترتیب برابر با ۰،۰۲، ۰،۰۴ و ۰،۰۱ می‌باشد. همینطور مقدار شاخص میانگین درصد مطلق خطا برای نماینده‌های چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر با ۰،۱۱۲، ۰،۰۶۲، ۰،۰۸۶ و ۰،۰۳۱ می‌باشد. مقادیر شاخص جذر میانگین مربع خطا نیز برای ۳۰ آوریل سال ۲۰۰۹ برابر با ۰،۰۳۶، برای روز اول جولای سال ۲۰۰۹ برابر با ۰،۰۱۲، برای روز اول نوامبر سال ۲۰۰۹ برابر با ۰،۰۲۸ و برای روز ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ برابر با ۰،۰۱۱ می‌باشد.

قابل ذکر است مقادیر همبستگی برای تمامی روزهای مدل‌سازی شده حدود ۹۸ درصد می‌باشد. در واقع مقدار این شاخص برای نماینده چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان نیز به ترتیب برابر با ۰،۹۸۵، ۰،۹۹۳، ۰،۹۸۷ و ۰،۹۹۵ است.

در پیکربندی شماره ۵، میکروفیزیک بر روی WSM 5class طول موج بلند بر روی RRTM طول موج کوتاه بر روی Dudhia لایه سطحی بر روی Revised MM5 Monin Obukhov سطح خشکی بر روی Unified Noah land surface model لایه مرزی سیاره‌ای بر روی YSU و کومولوس بر روی Kain Fritsch (new Eta) تنظیم گردیده است. در واقع جهت مدل‌سازی هر پارامتر جوی و اقیانوسی نیاز به پیکربندی مناسب می‌باشد که این پیکربندی مناسب از طریق اجرای مدل در حالات مختلف قابل استخراج است. البته قابل ذکر است که نوع پیکربندی مدل وابستگی زیادی به مشخصات

بررسی شده است. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی بارش باران به طرحواره‌های همرفت وابستگی زیاد، به طرحواره لایه مرزی زمین، نسبتاً وابسته بوده و وابستگی آن به طرحواره‌های میکروفیزیکی بسیار کم است.

مکانی پارامتر مورد مطالعه دارد. Afandi et al., 2014. Laifang مطالعه‌ای را به منظور بهبود توانایی WRF در پیش‌بینی بارش‌های تابستانه در جنوب‌شرقی ایالات متحده انجام دادند. در این مطالعه تأثیر طرحواره‌های فیزیکی و قدرت تفکیک افقی بر دقت پیش‌بینی‌ها

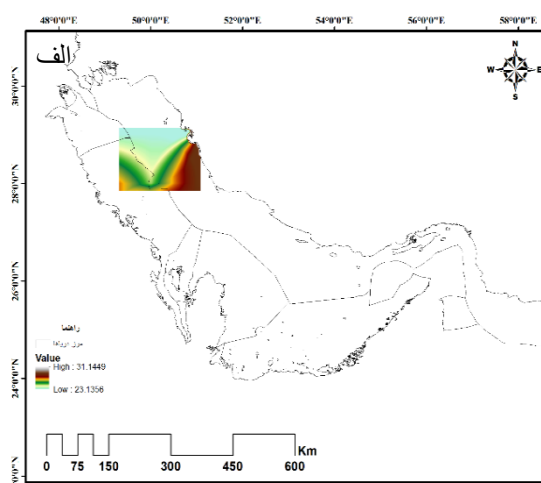
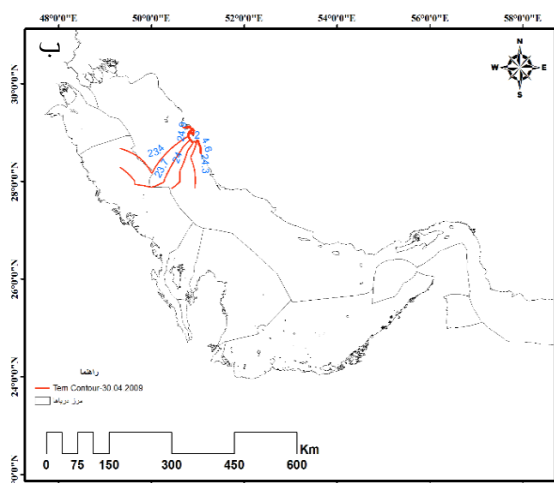
جدول ۲: نتایج اعتبارسنجی پارامتر دمای سطح آب دریا (مشاهداتی) با مقدار مدلسازی شده با قدرت تفکیک ۲ کیلومتر

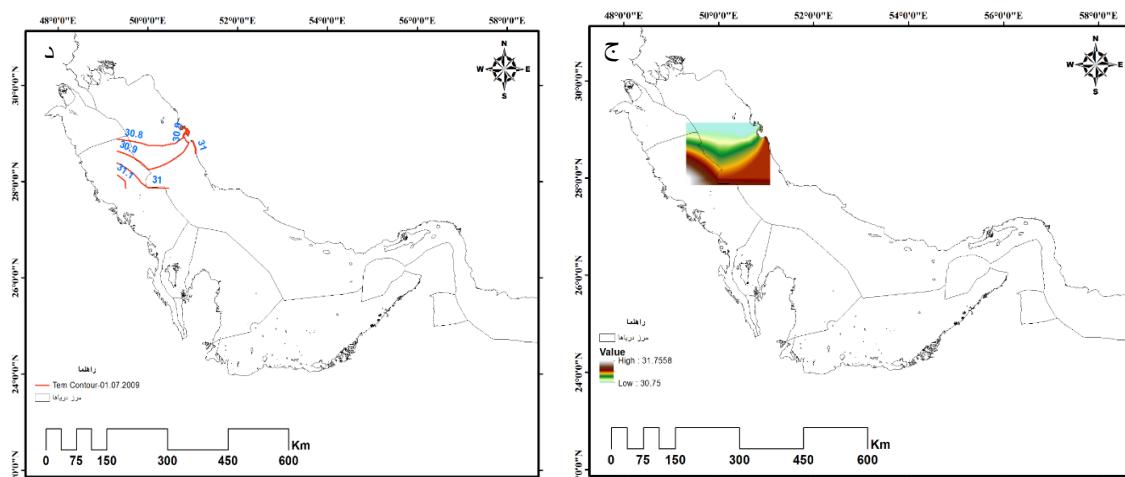
| تاریخ      | آزمون آماری | میانگین خطای مطلق (MAE) | میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) | جذر میانگین مربع خطا (RMSE) |
|------------|-------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ۲۰۰۹/۰۴/۳۰ | ۰,۰۵        | ۰,۱۱۲                   | ۰,۰۳۶                        |                             |
| ۲۰۰۹/۰۷/۰۱ | ۰,۰۲        | ۰,۰۶۲                   | ۰,۰۱۲                        |                             |
| ۲۰۰۹/۱۱/۰۱ | ۰,۰۴        | ۰,۰۸۶                   | ۰,۰۲۸                        |                             |
| ۲۰۰۹/۱۲/۳۱ | ۰,۰۱        | ۰,۰۳۱                   | ۰,۰۱۱                        |                             |

دریا را برای اول جولای سال ۲۰۰۹ در محل استقرار بویه هواشناسی حدود ۳۱ درجه سانتی گراد نمایش می‌دهد (شکل ۴ ج و د).

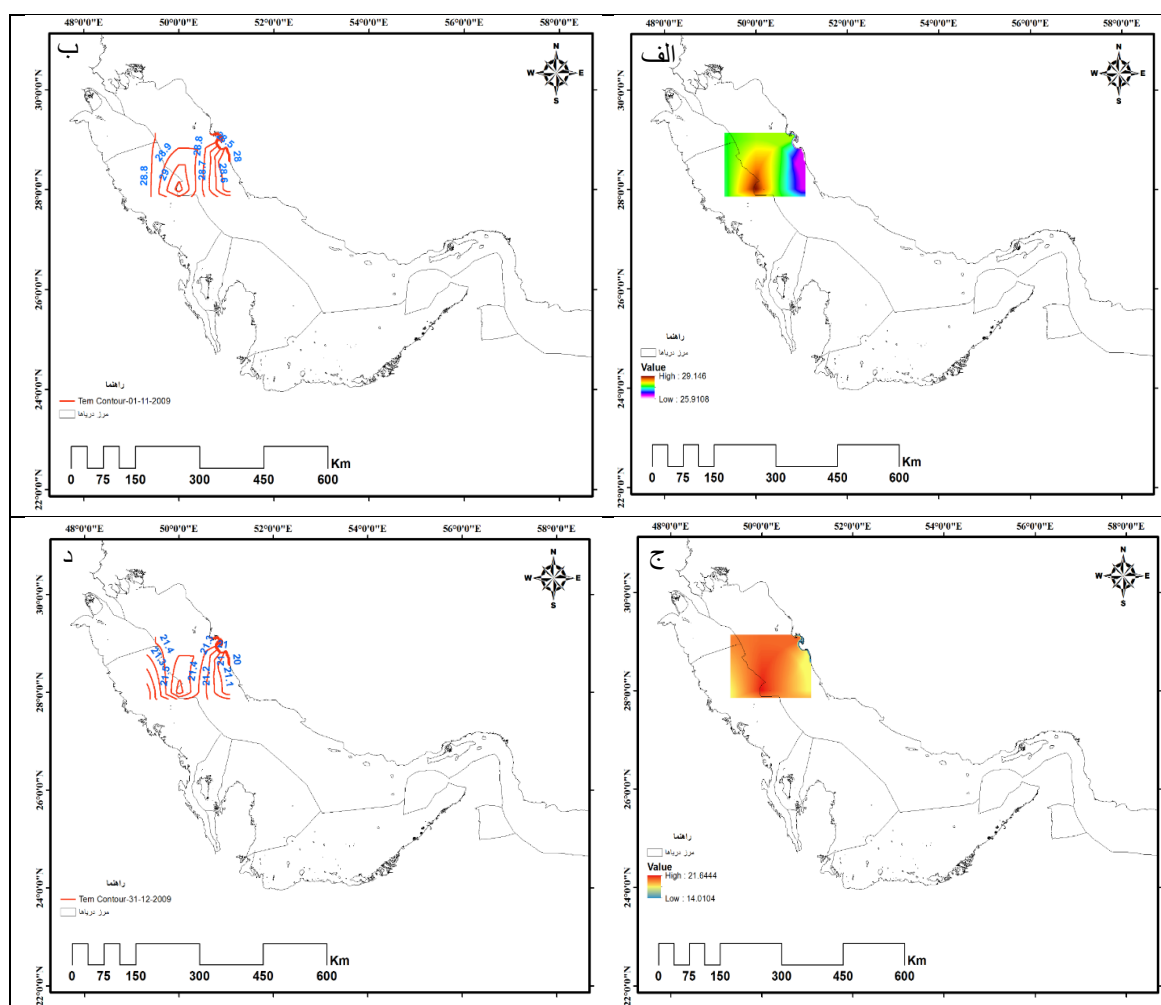
مقدار این پارامتر برای نماینده فصل پاییز یعنی اول نوامبر سال ۲۰۰۹ و در محل استقرار بویه هواشناسی بوشهر حدود ۲۹ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است (شکل ۵ الف و ب) و برای نماینده فصل زمستان یعنی ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ حدود ۲۱ درجه سانتی گراد می‌باشد (شکل ۵ ج و د).

خروجی‌های مدل: شکل‌های ۴ (الف، ب، ج و د) و ۵ (الف، ب، ج و د) خروجی مدل مربوط به روزهای ۳۰ آوریل سال ۲۰۰۹، یک جولای سال ۲۰۰۹، یک نوامبر سال ۲۰۰۹ و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ الف و ب (روز ۳۰ آوریل سال ۲۰۰۹) قابل مشاهده است در محل استقرار بویه مقادیر دما حدود ۲۴ درجه سانتی گراد می‌باشد که با نزدیک شدن به ساحل بر مقادیر دمایی افزوده می‌شود. خطوط هم‌دما مقادیر دمای سطح آب





شکل ۴- خروجی مدل مربوط به روز ۳۰ آوریل و ۱ جولای سال ۲۰۰۹ در محدوده مورد مطالعه: الف) پیکسل دمایی ۳۰ آوریل، ب) خطوط هم دما، ۳۰ آوریل ج) پیکسل دمایی ۱ جولای و د) خطوط هم دما ۱ جولای



شکل ۵- خروجی مدل مربوط به روز ۱ نوامبر و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۰۹ در محدوده مورد مطالعه: الف) پیکسل دمایی ۱ نوامبر، ب) خطوط هم دما، ۱ نوامبر ج) پیکسل دمایی ۳۱ دسامبر و د) خطوط هم دما ۳۱ دسامبر

با دقت بسیار بالایی بازتولید کند. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای فصول مختلف بین ۰۰۱۱ تا ۰۰۳۶ درجه سلسیوس و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) بین ۰۰۳۱ تا ۰۰۸۶ درصد محاسبه گردید. نکته قابل توجه آنکه پایین‌ترین میزان خطا RMSE (برابر ۰۰۱۱ درجه سلسیوس) در فصل زمستان (نماینده ۳۱ دسامبر ۲۰۰۹) مشاهده شد. این یافته را می‌توان به پایداری بیشتر شرایط جوی در فصل زمستان، کاهش تلاطم سطحی و همچنین یکنواختی نسبی دمایی در این فصل نسبت داد. در مقابل، بالاترین میزان خطا RMSE (برابر ۰۰۳۶ درجه سلسیوس) در فصل بهار ثبت گردید که احتمالاً به دلیل گذار از شرایط سرد به گرم و افزایش ناپایداری‌های جوی - اقیانوسی در این فصل می‌باشد (Cavallo et al., 2016). این میزان دقت نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در بازتولید تغییرات زمانی و مکانی SST در شرایط اقلیمی منحصربه‌فرد خلیج فارس است که با ویژگی‌هایی نظیر تبخیر بسیار بالا، شوری زیاد و نوسانات شدید دمایی همراه می‌باشد.

پیکربندی شماره ۵ که در این پژوهش به عنوان ترکیب بهینه معرفی گردید، شامل طرحواره‌های میکروفیزیک WSM 5class، تابش طول بلند RRTM، تابش طول کوتاه Dudhia، لایه سطحی Revised MM5 Monin-Obukhov، سطح خشکی Unified Noah، لایه مرزی سیاره‌ای YSU و کومولوس Kain-Fritsch (new Eta) می‌باشد. هر یک از این طرحواره‌ها نقشی خاص در شبیه‌سازی دقیق فرایندهای فیزیکی حاکم بر ناحیه ساحلی خلیج فارس ایفا می‌کنند. انتخاب طرحواره میکروفیزیک WSM 5class به دلیل توانایی آن در شبیه‌سازی فرایندهای تشکیل ابر و بارش در مقیاس‌های متوسط، عملکرد مناسبی در شرایط نیمه‌خشک و گرمسیری منطقه داشته است. طرحواره‌های تابشی RRTM و Dudhia نیز با دقت بالایی در محاسبه شارهای تابشی ورودی و خروجی، گرمایش و سرمایش ناشی از ابرها را شبیه‌سازی می‌کنند. عملکرد برتر طرحواره لایه مرزی YSU در این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین

اندازه‌گیری مستقیم دمای سطح دریا به کمک روش‌های میدانی و ایستگاه‌های بویه، علیرغم دقت نسبتاً مطلوب، با محدودیت‌های ساختاری متعددی مواجه است. پراکندگی مکانی محدود، گسستگی زمانی داده‌ها، هزینه‌های بالای راه‌اندازی و نگهداری، و همچنین صعب‌العبور بودن بخش‌هایی از پهنه‌های آبی از جمله مهم‌ترین چالش‌های فراروی این روش‌ها محسوب می‌شوند (صفری و همکاران، ۱۳۹۳؛ Benali et al., 2012). به عبارت دیگر، اگرچه ایستگاه‌های بویه به عنوان مرجع طلایی اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی آب شناخته می‌شوند، اما پوشش مکانی بسیار محدود آنها (به ویژه در پهنه‌های آبی گسترده) و هزینه‌های سرسام‌آور نصب و راه‌اندازی، امکان ایجاد شبکه پایش متراکم را عملاً غیرممکن ساخته است. این محدودیت، پژوهشگران را به سمت استفاده از روش‌های جایگزین از جمله مدل‌سازی عددی و داده‌های ماهواره‌ای سوق داده است. دمای سطح آب به عنوان یکی از کمیت‌های کلیدی در مطالعات اقیانوس‌شناسی و هواشناسی، نقش مستقیمی در مبادلات حرارتی، حرکات توده‌های آب و تبادلات گازی بین اقیانوس و جو ایفا می‌کند (Emrey et al., 2001). به بیان دقیق‌تر، SST نه تنها یک پارامتر فیزیکی ساده نیست، بلکه به عنوان یک متغیر کنترلی در فرایندهای جوی-اقیانوسی عمل می‌کند که بر شار گرما، رطوبت و اندازه حرکت بین دو محیط تأثیر می‌گذارد. بنابراین، دسترسی به داده‌های SST با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب، یک نیاز راهبردی در مطالعات اقلیمی، هواشناسی دریایی، زیست‌محیطی و شیلات محسوب می‌شود.

نتایج اعتبارسنجی مدل در پژوهش حاضر نشان داد که خروجی‌های مدل WRF با پیکربندی شماره ۵ از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی برابر با ۰۰۹۸۵ به دست آمد. این میزان همبستگی نشان‌دهنده رابطه خطی قوی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است و بیانگر آن است که مدل WRF قادر است نوسانات زمانی و مکانی SST را

رشد آبیان دارد. به‌طور خاص، گونه‌های پلاژیک (نظیر تن ماهیان و ساردین‌ها) نسبت به گونه‌های کفزی حساسیت بیشتری به تغییرات دمایی نشان می‌دهند (Hiscock et al., 2004). تغییرات SST می‌تواند زمان و مکان تخم‌ریزی، مسیرهای مهاجرت و حتی نسبت جنسی جمعیت‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. دسترسی به داده‌های SST با دقت بالا و قدرت تفکیک زمانی مناسب (روزانه یا ساعتی) می‌تواند به مدیران شیلات در تعیین مناطق مستعد صید، پیش‌بینی میزان صید در فصول مختلف و تدوین راهبردهای مدیریت پایدار کمک شایانی نماید. در حوزه پایش صخره‌های مرجانی، خلیج فارس میزبان برخی از مقاوم‌ترین جوامع مرجانی جهان است که توانسته‌اند خود را با نوسانات شدید دمایی (تا بیش از ۳۵ درجه سلسیوس در تابستان) وفق دهند. با این حال، افزایش دمای سطح آب در دهه‌های اخیر، همراه با رویدادهای مکرر سفیدشدگی منجر به مرگ و میر گسترده و کاهش پوشش مرجانی در بسیاری از نقاط خلیج فارس شده است. داده‌های SST حاصل از مدل WRF با دقت RMSE کمتر از ۰.۰۴ درجه سلسیوس می‌تواند ابزاری بسیار مؤثر برای پایش این پدیده، شناسایی نقاط داغ حرارتی و پیش‌بینی رویدادهای تنش حرارتی چند روز تا چند هفته زودتر باشد. در حوزه پیش‌بینی هواشناسی دریایی، Roman-Cascon et al. (2022) نشان دادند که گرادیان دمایی بین خشکی و دریا، نیروی محرکه اصلی سامانه‌های نسیم ساحلی است. این نسیم‌ها نقش مهمی در تعدیل دمای سواحل، حمل و پراکنش آلاینده‌های جوی، تشکیل مه صبحگاهی و حتی وقوع بارش‌های کوتاه مدت تابستانی ایفا می‌کنند. در منطقه خلیج فارس به دلیل وجود منابع عظیم هیدروکربنی و صنایع پتروشیمی در نواحی ساحلی، آلودگی هوا یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی محسوب می‌شود؛ بنابراین شبیه‌سازی دقیق SST از اهمیت ویژه‌ای برای مدلسازی دقیق نسیم ساحلی و به تبع آن پیش‌بینی کیفیت هوا برخوردار است (Wu et al., 2025) نشان دادند که استفاده از شرایط مرزی پویا برای SST و طول زبری،

در سایر مناطق ساحلی و خشک همسو است. Wang et al. (2025) چهار طرحواره لایه مرزی (YSU، MYJ، QNSE و ۲MYNN) را در حوضه سیچوان ارزیابی کردند و دریافتند که عملکرد طرحواره‌ها وابسته به منطقه بوده و باید به صورت محلی اعتبارسنجی شوند. در محیط ساحلی فراخشک و کم‌عرض این مطالعه، YSU به عنوان بهینه‌ترین گزینه شناسایی شد. انتخاب طرحواره کومولوس Kain-Fritsch به عنوان برترین طرحواره در این پژوهش، با نتایج Pennelly et al. (2014) در آلبرتا مطابقت دارد. این طرحواره از طریق رویکرد جابه‌جایی بسته‌ای، به خوبی قادر به شبیه‌سازی همرفت عمیق در مناطق گرم و مرطوب خلیج فارس می‌باشد. نکته حائز اهمیت آنکه وابستگی نتایج به انتخاب طرحواره مناسب، لزوم اجرای آزمایش‌های حساسیت متعدد برای هر منطقه جدید را گوشزد می‌کند و نشان می‌دهد که نمی‌توان یک پیکربندی واحد را به همه مناطق تعمیم داد.

خشکبوم ساحلی خلیج فارس با ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر نیمه‌بسته بودن، عمق کم (متوسط ۳۵ متر)، تبخیر سالانه بالا (حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر که به مراتب بیشتر از مجموع ورودی رودخانه‌ای و بارش است)، شوری زیاد (بیش از ۴۰ گرم در کیلوگرم در مقایسه با میانگین اقیانوسی ۳۵ گرم در کیلوگرم) و نوسانات شدید دمایی فصلی (از ۱۶ درجه سلسیوس در زمستان تا ۳۵ درجه سلسیوس در تابستان)، یکی از آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های آبی جهان محسوب می‌شود. Rasoulpour et al. (2024) ترکیب این عوامل، محیطی اکولوژیک با شرایط حدی ایجاد کرده است که در آن موجودات زنده در آستانه تحمل فیزیولوژیک خود زندگی می‌کنند. در چنین شرایطی، هر گونه تغییر جزئی در SST می‌تواند پیامدهای گسترده و گاه غیرقابل‌جبرانی بر ساختار و عملکرد اکوسیستم داشته باشد. داده‌های SST شبیه‌سازی شده با مدل WRF می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در این منطقه داشته باشد. در حوزه مدیریت شیلات و ذخایر آبیان، دمای سطح دریا تأثیر مستقیمی بر توزیع، مهاجرت، تولیدمثل و



طرحواره‌های فیزیکی را در شبیه‌سازی فرایندهای جوی-اقیانوسی تأیید می‌کنند.

### نتیجه گیری

دمای سطح دریا به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در تعامل اقیانوس-جو، نقش محوری در مطالعات اقلیم‌شناسی، هواشناسی دریایی و اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کند. این متغیر فیزیکی بر انتقال شارهای گرمای نهان و محسوس بین اقیانوس و جو تأثیر مستقیم داشته و رفتار لایه مرزی سیاره‌ای را تحت الشعاع قرار می‌دهد. در شرایط تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، روند افزایشی SST در حوضه‌های نیمه‌بسته مانند خلیج فارس تشدید یافته و پیامدهایی نظیر افزایش بسامد و شدت امواج گرمایی دریایی، سفیدشدگی گسترده مرجان‌ها و تغییر در الگوی پراکنش آبزیان را به همراه داشته است. از این رو، دسترسی به داده‌های SST با دقت بالا و قدرت تفکیک مکانی-زمانی مناسب، برای پیش‌بینی و سازگاری با این پدیده‌ها ضروری می‌باشد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های عددی میان‌مقیاس نظیر WRF با پیکربندی بهینه طرحواره‌های فیزیکی، می‌تواند جایگزینی مناسب برای داده‌های مشاهده‌ای محدود در مناطق دور از ساحل باشد. در پژوهش حاضر، قابلیت مدل عددی WRF در شبیه‌سازی دمای سطح آب خلیج فارس به عنوان یک خشکبوم ساحلی حساس از نظر اقلیمی با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی سازمان هواشناسی کشور (چهار روز شاخص از فصول مختلف سال ۱۳۸۸) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی آماری نشان داد که خروجی مدل WRF از دقت بالایی برخوردار بوده و همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مقدار ۰٫۹۸۵ را نشان می‌دهد که حاکی از تطابق بسیار قوی است. این یافته با نتایج مطالعات پیشین در سایر نقاط جهان مبنی بر کارایی بالای مدل WRF در شبیه‌سازی SST در صورت استفاده از پیکربندی فیزیکی بهینه همسو است (Laviola da Silva et al., 2025). چنین دقتی، امکان استفاده از خروجی‌های مدل را برای ارزیابی

دقت شبیه‌سازی باد ساحلی را تا ۳۵ درصد بهبود می‌بخشد. این یافته لزوم استفاده از داده‌های SST با به‌روزرسانی مکرر در مدل‌های پیش‌بینی جوی منطقه را تأکید می‌کند.

به منظور ارزیابی جایگاه نتایج این پژوهش، مقایسه‌ای با مطالعات مشابه در سایر نقاط جهان صورت گرفت. Laviola da Silva et al. (2025) در اقیانوس اطلس جنوب‌غربی نشان دادند که افزایش قدرت تفکیک SST، خطای باد مدل را تا ۰٫۵ متر بر ثانیه کاهش می‌دهد که اهمیت شرایط مرزی دقیق SST را آشکار می‌سازد. Matsuzaki et al. (2021) در خلیج ایسه ژاپن نشان دادند که بهبود داده‌های SST، به ویژه در ماه‌های سرد سال، دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد که با بهترین عملکرد مدل در فصل زمستان در پژوهش حاضر همخوانی دارد. Zhang & Smith (2018) در سواحل غربی هند نشان دادند که SST نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری همرفت فراساحلی دارد. Coulibaly (2016) در سواحل غرب آفریقا نشان داد که تغییرات SST نقشی کلیدی در تعیین عمق و سرعت نسیم‌های ساحلی ایفا می‌کند. Karagiorgos et al. (2023) در مطالعه‌ای بر روی مدیترانه و طوفان Ianos نشان دادند که استفاده از کوپلینگ دوسویه اقیانوس-اتمسفر (NEMO-WRF) نسبت به مدل اتمسفری تنها با SST ثابت، نقش حیاتی در شبیه‌سازی شارهای گرمایی سطحی و شدت چرخندها دارد. نتایج آنان نشان داد که سردشدگی سطح دریا تا ۵ درجه سلسیوس در مسیر چرخند، موجب کاهش شار آنتالپی تا ۶۰۰ وات بر متر مربع و تضعیف سرعت باد تا بیش از ۵ متر بر ثانیه می‌گردد. Mulero-Martínez et al. (2022) در خلیج کادیز با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره Sentinel-3 به ارزیابی سرعت باد خروجی مدل WRF پرداختند. آن‌ها نشان دادند که داده‌های ماهواره‌ای با دقت بالا RMSE می‌توانند ابزاری مؤثر برای ارزیابی مکانی مدل‌های عددی در مناطق پیچیده دریایی باشند. این یافته‌ها اهمیت مدلسازی دقیق SST و انتخاب مناسب

روندهای بلندمدت SST تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، شناسایی نقاط داغ حرارتی و پیش‌بینی رویدادهای حدی دمایی در این خشک‌بوم ساحلی راهبردی فراهم می‌آورد.

پیکربندی شماره ۵ به عنوان بهینه‌ترین ترکیب طرحواره‌ها شناسایی گردید که شامل میکروفیزیک WSM 5class، تابش طول بلند RRTM، تابش طول کوتاه Dudhia، لایه سطحی Revised MM5 Monin Obukhov، مدل سطح خشکی Unified Noah، لایه مرزی سیاره‌ای YSU و طرحواره کومولوس Kain Fritsch (new Eta) می‌باشد. ارزیابی شاخص‌های خطا برای این پیکربندی عملکرد قابل توجهی را نشان داد. میانگین خطای مطلق (MAE) برای فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۰٫۰۵، ۰٫۰۲، ۰٫۰۴ و ۰٫۰۱، درجه سلسیوس، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) به ترتیب ۰٫۱۱۲، ۰٫۰۶۲، ۰٫۰۸۶ و ۰٫۰۳۱، درصد و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۰٫۰۳۶، ۰٫۰۱۲، ۰٫۰۲۸ و ۰٫۰۱۱ درجه سلسیوس به دست آمد.

مقادیر بسیار پایین شاخص‌های خطا (به ویژه RMSE زیر ۰٫۰۴ درجه سلسیوس در تمام فصول) دقت فوق‌العاده مدل WRF در شبیه‌سازی SST خلیج فارس را تأیید می‌کند. این میزان دقت در مقایسه با مطالعات مشابه در سایر مناطق جهان - از جمله پژوهش Laviola da Silva et al (2025) در اقیانوس اطلس جنوب‌غربی مطابقت قابل قبولی داشته و نشان‌دهنده کارایی بالای پیکربندی به کار گرفته شده در شرایط اقلیمی منحصر به فرد خلیج فارس است. کارایی برتر طرحواره YSU در لایه مرزی سیاره‌ای با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در مناطق ساحلی دیگر همخوانی دارد. همچنین، عملکرد مطلوب ترکیب Kain Fritsch و WSM 5class در منطقه مورد مطالعه، حساسیت بالای شبیه‌سازی SST به انتخاب صحیح طرحواره‌های کومولوس و میکروفیزیک را نشان می‌دهد.

با توجه به نیمه‌بسته بودن خلیج فارس، عمق کم (متوسط ۳۵ متر)، تبخیر سالانه بالا (۱۴۰۰ میلی‌متر)

و آسیب‌پذیری اکولوژیک این پهنه آبی (Rasoulpour et al., 2024) تولید داده‌های SST با دقت مکانی و زمانی بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. داده‌های ماهواره‌ای رایگان به دلیل قدرت تفکیک پایین و مدل‌های سیاره‌ای نیز به دلیل وسعت شبکه محاسباتی، قادر به تأمین این نیاز با دقت لازم نیستند. نتایج این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که خروجی‌های مدل WRF با پیکربندی بهینه (پیکربندی شماره ۵) می‌تواند به عنوان جایگزینی بسیار مناسب، قابل اعتماد و با دقت بالا برای داده‌های بویه هواشناسی بوشهر و به‌طور کلی برای پهنه آبی خلیج فارس مورد استفاده کاربران در مطالعات هواشناسی دریایی، شیلات، زیست‌محیطی و تغییر اقلیم قرار گیرد. جهت‌گیری‌های آینده پژوهش باید شامل تکرار اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SST با قدرت تفکیک بالا، پیاده‌سازی یک سیستم مدل‌سازی کاملاً جفت‌شده اتمسفر-اقیانوس، و ارزیابی حساسیت پیکربندی بهینه به سناریوهای تغییر اقلیم باشد. همچنین با وجود نتایج قابل قبول حاصل از ارزیابی پیکربندی‌های مختلف مدل WRF در شبیه‌سازی دمای سطح دریا، لازم است به برخی محدودیت‌های پژوهش نیز اشاره شود. در این مطالعه، به‌منظور کنترل پیچیدگی مدل‌سازی و محدود کردن تعداد منابع عدم قطعیت، برخی طرحواره‌های فیزیکی به‌ویژه طرحواره تابش بلندموج در اغلب پیکربندی‌ها ثابت نگه داشته شدند و تمرکز اصلی بر ارزیابی ترکیب‌های منتخب شامل ریزفیزیک، لایه مرزی، لایه سطحی، همرفت و بخشی از طرحواره‌های تابش کوتاه‌موج قرار گرفت. از آنجا که فرآیندهای تابشی نقش مهمی در تراز انرژی سطحی، تبادل حرارتی جو-دریا و بازنمایی دمای سطح دریا دارند، انتظار می‌رود تغییر در گزینه‌های تابشی، به‌ویژه طرحواره‌های طول موج کوتاه و طول موج بلند، بر نتایج شبیه‌سازی دمای سطح دریا اثرگذار باشد. از این‌رو، ارزیابی جامع حساسیت مدل WRF نسبت به مجموعه کامل طرحواره‌های تابشی و همچنین بررسی برهم‌کنش آن‌ها با سایر پیکربندی‌های فیزیکی در محیط‌های

نیمه‌بسته‌ای مانند خلیج فارس، می‌تواند به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم پژوهش‌های آینده مدنظر قرار گیرد. در نهایت، پژوهش حاضر با موفقیت نشان داد که مدل عددی WRF با پیکربندی بهینه (پیکربندی شماره ۵) می‌تواند به عنوان جایگزینی با دقت بالا، مقرون‌به‌صرفه و عملیاتی برای داده‌های پراکنده بویه‌های هواشناسی در شبیه‌سازی دمای سطح آب دریا در سواحل شمالی خلیج فارس مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

۱. احمدی، محمود؛ لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ و آزادی، مجید. (۱۳۹۵). مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های LARS و RegCM4 در شبیه‌سازی و پس‌پردازش داده‌های سالانه دما و بارش خراسان بزرگ (اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۵(۹۸)، ۱۷۰-۱۵۷.
۲. آزادی، مجید؛ شیرغلامی، محمدرضا؛ حجام، سهراب؛ و صحراپیان، فاطمه. (۱۳۹۰). پس‌پردازش برونداد مدل WRF برای بارندگی روزانه در ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۷(۴)، ۷۱-۸۱.
۳. صفری، آوریده؛ همایونی، سعید؛ خزایی، حمیدرضا؛ و صفا، سعید. (۱۳۹۳). برآورد عمق آب‌های ساحلی به کمک تصاویر سنجنش از دور فراطیفی. *نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و مطالعات مکانی*، ۶(۱)، ۹-۱.
۴. موسوی، سیده محبوبه؛ زرین‌آذر، عباس؛ مفیدی، عباس؛ و حسینی، سیده فاطمه. (۱۳۹۶). بررسی ارتباط بین فراوانی وقوع توفان‌های تندری و روند دما در شهر مشهد. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۲(۳)، ۷۴-۸۷.
۵. هوشیار، محمود؛ سبجانی، بهروز؛ و حسینی، سید اسعد. (۱۳۹۷). چشم‌انداز تغییرات دماهای حداکثر ارومیه با استفاده از ریزگردانی آماری خروجی مدل CanESM2. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۲(۶۳)، ۳۰۵-۳۲۵.
6. Benali, A., Carvalho, A. C., Nunes, J. P., Carvalhais, N., & Santos, A. (2012). Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sens. Environ.*, 124, 108-121.
7. Cavallo, S. M., Berner, J., & Snyder, C. (2016). Diagnosing model errors from time-averaged tendencies in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Monthly Weather Review*, 144(2), 759-779.
8. Chelton, D. B., & Xie, S. P. (2010). Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales. *Oceanography*, 23(4), 52-69. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.05>
9. Coulibaly, A. (2016). *Observational and numerical study of mesoscale land and sea breezes along the Guinea coast of West Africa* (Doctoral dissertation).
10. Emery, W. J., Castro, S. L., Wick, G. A., Schluessel, P., & Donlon, C. (2001). Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 2773-2786.
11. Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
12. Hiscock, K., Southward, A., Tittley, I., & Hawkins, S. (2004). Effects of changing temperature on benthic marine life in Britain and Ireland. *Aquat. Conserv.*, 14(4), 333-362.
13. Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuyssen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
14. Karagiorgos, J., Samos, I., Vervatis, V., Sofianos, S., & Flocas, H. (2023). The impact of ocean-atmosphere coupling on the prediction of Mediterranean cyclones: A case study of Mediane Ianos. *Environ. Sci. Proc.*, 26(1), 60. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026060>
15. Laifang, L., Wenhong, L., & Jiming, J. (2014). Improvements in WRF simulation skills of southeastern United States summer rainfall: Physical parameterization and horizontal resolution. *Clim. Dyn.*, 43(7-8), 2077-2091.

16. Laviola da Silva, M. B., Barreto, F. T. C., de Jesus, L. C., Lacerda, K. C., Pereira, M. M. R., Marques Filho, E. P., & Chacaltana, J. T. A. (2025). Impact of SST resolution on WRF model performance for wind field simulation in the southwestern Atlantic. *Meteorology*, 4(4), 32. <https://doi.org/10.3390/meteorology4040032>
17. Mahpeykar, O., & Khalilabadi, M. R. (2021). Numerical modelling the effect of wind on water level and evaporation rate in the Persian Gulf. *Int. J. Coast. Offshore Environ. Eng.*, 6(1), 47-53.
18. Matsuzaki, Y., Fujiki, T., Kawaguchi, K., Inoue, T., & Iwamoto, T. (2021). Application of the WRF model to the coastal area at Ise Bay, Japan: Evaluation of model output sensitivity to input data. *Coast. Eng. J.*, 62(4), 1-17.
19. Mulero-Martinez, R., Román-Cascón, C., Mananes, R., Izquierdo, A., Bruno, M., & Gomez-Enri, J. (2022). The use of Sentinel-3 altimetry data to assess wind speed from the Weather Research and Forecasting (WRF) model: Application over the Gulf of Cadiz. *Remote Sens.*, 14(16), 4036. <https://doi.org/10.3390/rs14164036>
20. Nicholson, S. E. (2011). *Dryland climatology*. Cambridge University Press.
21. Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W., & Sen Gupta, A. (2021). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13, 313–342. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>
22. Pan, L., Liu, Y., Knierel, J. C., Delle Monache, L., & Roux, G. (2018). Evaluations of WRF sensitivities in surface simulations with an ensemble prediction system. *Atmosphere*, 9(3), 106. <https://doi.org/10.3390/atmos9030106>
23. Pennelly, C., Reuter, G., & Flesch, T. (2014). Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmos. Res.*, 135, 172–192.
24. Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., & Duda, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
25. Purnama, D. R., Haryanto, Y. D., Qomariyatzamzami, L. N., Zakir, A., & Sosaidi, D. S. (2023). Sensitivity of rainfall to microphysics and cumulus parameterization schemes over West Kalimantan during Borneo vortex. In S. Lestari et al. (Eds.), *Proceedings of the INCREASE 2023* (Springer Proceedings in Physics, Vol. 305). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-0740-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0740-9_17)
26. Rasoulpour, S., & Akbari, H. (2024). Development of desalination plants within the semi-enclosed Persian Gulf. *Appl. Water Sci.*, 14, 199. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02251-x>
27. Roman-Cascon, C., Mulero-Martínez, R., Bruno, M., Izquierdo, A., Yagüe, C., Álvarez, O., Gómez-Enri, J., Mañanes, R., & Adame, J. A. (2022). Coastal-breeze simulation with the WRF model: Analysing the sensitivity to land/sea surface temperature changes. In *EMS Annual Meeting 2022*. EMS2022-199.
28. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). *A description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
29. Small, R. J., deSzoek, S. P., Xie, S. P., O'Neill, L., Seo, H., Song, Q., Cornillon, P., Spall, M., & Minobe, S. (2008). Air–sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3–4), 274–319. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>
30. Tiwari, U., & Bush, A. B. G. (2025). Significance of cloud microphysics and cumulus parameterization schemes in simulating an extreme flood-producing precipitation event in the central Himalaya. *Atmosphere*, 16(3), 298. <https://doi.org/10.3390/atmos16030298>

31. Wang, Q., Zeng, B., Chen, G., & Li, Y. (2025). Simulation performance of planetary boundary layer schemes in WRF v4.3.1 for near-surface wind over the western Sichuan Basin: A single-site assessment. *Geosci. Model Dev.*, 18(5), 1769-1784. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-1769-2025>
32. Wang, Y., Duan, Q., Zhao, Y., Chen, L., & Li, Y. (2026). Effects of cloud microphysics on the simulation of extreme precipitation over the Tibetan Plateau region. *Atmos. Res.*, 327, 108366.
33. Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. (2010). Development of a coupled ocean atmosphere wave sediment transport modeling system. *Ocean Modelling*, 35(3), 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010>
34. Wu, C., Wang, N., Zhao, Y., Dong, X., & Huang, W. (2025). Enhancing coastal wind simulation in the WRF model: Updates in sea surface temperature and roughness length through dynamic boundary conditions. *Dyn. Atmos. Oceans*, 110, 101542. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2025.101542>
35. Zhang, G., & Smith, R. B. (2018). Numerical study of physical processes controlling summer precipitation over the Western Ghats region. *J. Clim.*, 31(8), 3099-3115.

