

جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای، شماره ۱۸، بهار ۱۳۹۵  
وصول مقاله: ۱۳۹۴/۲/۱۷  
تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۰/۶  
صفحات: ۱۶۸ - ۱۵۳

## شبیه‌سازی نقش دریای خزر بر وقوع بارش‌های منطقه‌ای در سواحل جنوبی دریای خزر

میثم کارخانه<sup>۱</sup>، دکتر عباس مفیدی<sup>۲</sup>، دکتر آذر زرین<sup>۳</sup>

### چکیده

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های سواحل جنوبی این دریاست. جهت شبیه‌سازی میزان نقش دریای خزر بر وقوع بارش‌های منطقه‌ای، از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4 که با یک مدل دریاچه جفت گردیده، استفاده شد. مدل با استفاده از داده‌های جوی NCEP/NCAR و در دو حالت مرجع (وجود دریای خزر) و شرایط حذف دریاچه برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که با حذف دریای خزر بیشترین میزان تغییر بارش، در سواحل جنوبی این دریا به وقوع می‌پیوندد. حذف دریای خزر سبب کاهش میزان بارش به‌ویژه در مناطق واقع در محدوده جنوب غرب و جنوب دریا می‌شود. در عین حال، میزان تأثیر دریای خزر بنا به فصل سال متفاوت خواهد بود، به طوری که بالاترین میزان تأثیر منطقه‌ای دریای خزر به ترتیب در فصول پاییز و زمستان و کمترین میزان آن در فصل بهار مشاهده می‌شود. یافته‌های تحقیق بیانگر آن است که در صورت حذف دریای خزر، به واسطه افزایش کشال سطحی، از شدت باد با جهت شمالی بر روی منطقه کاسته خواهد شد. تحلیل وضعیت باد شمالی بر روی دریا مبین آن است که میزان نقش و تأثیر منطقه‌ای دریای خزر تابعی از شدت باد بر روی دریا است. بر این اساس، دریای خزر در زمان وقوع بادهای شدیدتر نقش منطقه‌ای بیشتر و گسترده‌تری در قیاس با زمان وقوع بادهایی با شدت کمتر دارد. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که با حذف دریای خزر، به واسطه حذف منابع گرمایی و رطوبتی آب دریا، از مقادیر نم و یژه، تبخیر از سطح دریا و شارگرمای نهان، به‌طور محسوسی کاسته می‌شود. این فرآیند در نهایت منجر به کاهش بارش در سواحل جنوبی دریای خزر می‌گردد. اعتبار سنجی بارش‌های شبیه‌سازی شده، ارب‌های منفی و مثبت کوچکی را به ترتیب برای ماه‌های پاییزی و برخی از ماه‌های بهاری نشان می‌دهد، اما در کل، نتایج قابل قبول بوده و مدل RegCM4 توانسته است روند و مقدار بارش‌های ماهانه را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

کلید واژگان: دریای خزر، سواحل جنوبی دریای خزر، بارش، دمای سطح آب دریا، مدل اقلیمی RegCM4، مدل دریاچه.

## مقدمه

بارش بارزترین عنصر اقلیمی در سواحل جنوبی دریای خزر است. سواحل جنوبی دریای خزر برخلاف سایر مناطق ایران بیشینه بارش سالانه خود را در ابتدای فصل پاییز تجربه می‌نماید (مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۳۲). وقوع بارش‌ها در کرانه‌های جنوبی دریای خزر ناشی از برهمکنش پیچیده عوامل محلی و عوامل مقیاس منطقه‌ای است (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۷۸). در میان عوامل مؤثر بر بارش‌های خزری، نقش دریای خزر به‌عنوان بزرگترین پیکره آبی داخل خشکی‌ها غیرقابل انکار است. شکل و فیزیک منحصربه‌فرد دریای خزر، در کنار گسترش نصف‌النهاری و گستردگی جغرافیایی آن و موقعیت جغرافیایی ایده آل این دریا در ارتباط با سامانه‌های برون حاره، نقش منطقه‌ای و محلی این دریا را از هر پیکره آبی بسته‌ای بیشتر نموده تا بدانجا که می‌توان اقلیم منحصربه‌فرد سواحل جنوبی دریای خزر را حاصل همسایگی این منطقه با پیکره آبی خزر دانست. از منظر اقلیمی نیز علت بیشینه بارش در سواحل جنوبی دریای خزر نسبت به سایر نواحی اقلیمی ایران به نقش محلی دریای خزر نسبت داده می‌شود (خلیلی، ۱۳۵۰: ۳۹؛ علیجانی، ۱۳۷۲: ۸۶؛ مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۳۲؛ ۱۳۹۱: ۱۷۸). چنین نقشی حاصل برهمکنش جو و دریا در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی است که در دوره سرد سال امکان وقوع بارش در سواحل خزری را فراهم می‌آورد. از این رو مطالعه نقش دریای خزر بر اقالیم محلی و منطقه‌ای در گرو شناسایی نحوه برهمکنش جو و دریا در محدوده دریای خزر است.

بررسی نقش محلی دریاچه‌ها در وقوع بارش‌های ساحلی همواره مورد توجه پژوهشگران علوم جو بوده است؛ زیرا این دریاچه‌ها در تعدیل توده‌های هوا و ریزش‌های جوی پیرامون خود در مقیاس محلی و منطقه‌ای دارای نقش برجسته‌ای هستند. برخی از دریاچه‌ها حتی در سردترین ماه‌های سال نیز یخ نمی‌زنند و یک منبع گرما و رطوبت برای جو منطقه پیرامون خود محسوب می‌گردند. از سویی به جهت نبود داده‌های مشاهداتی و یا کوچک بودن مقیاس بسیاری از

پدیده‌های جوی و اقلیمی منشأیافته از برهمکنش جو و دریا، مطالعه اثر دریاها و دریاچه‌ها بر اقلیم منطقه‌ای بسیار دشوار است؛ به همین جهت از اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، مدل‌های اقلیمی متعددی به‌منظور شناسایی نحوه برهمکنش هوا و دریا توسعه یافته‌اند تا علاوه بر درک رفتار جو در مقیاس محلی و منطقه‌ای، امکان ارائه پیش‌بینی‌های فصلی را نیز فراهم نمایند. یکی از این مدل‌های اقلیمی، مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM است. مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM از جمله مدل‌های عددی مرکز بین‌المللی مطالعات فیزیک نظری عبدالسلام (ICTP)<sup>۱</sup> است که در سال‌های اخیر در حکم ابزار توانمندی در مطالعات منطقه‌ای اقلیم مورد توجه بسیاری از محققین علوم جو قرار گرفته است (پال و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۳۹۵؛ الگی یوندی و همکاران، ۲۰۱۱: ۵). مدل فوق‌قادر است فرآیندهای اقلیمی را با مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف شبیه‌سازی نماید. با توجه به این که مدل RegCM از یک هسته دینامیکی قوی برخوردار بوده و در عین حال قابلیت جفت شدن با مدل‌های متعددی چون مدل دریاچه، مدل غبار و مدل کاربری اراضی را داراست؛ به همین خاطر، مطالعات متعددی با بهره‌گیری از این مدل اقلیمی در خارج و داخل کشور صورت گرفته که در ذیل به تعدادی از این مطالعات که در راستای تحقیق حاضر هستند، اشاره می‌شود. بوزکورت و لطفی سن<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) در مقاله‌ای با استفاده از مدل اقلیمی RegCM تأثیر بالا رفتن دمای دریاهای اطراف ترکیه را به اندازه ۲°K بر وقوع بارش‌های این شبه جزیره بررسی نمودند. شبیه‌سازی نشان داد که بارندگی شبه جزیره آناتولی رابطه مستقیم با دمای سطح آب دریاهای اطراف این شبه جزیره دارد، بدین ترتیب که افزایش دمای سطح آب دریاهای اطراف ترکیه به‌خصوص مدیترانه شرقی باعث افزایش بارندگی در شبه جزیره آناتولی و خود این دریاها می‌شود. سلطانزاده و همکاران (۱۳۸۶) در راستای شناسایی نقش رشته کوه‌های زاگرس بر سامانه‌های عبوری از ایران، در یک دوره زمانی

1 - International Center for Theoretical Physics

2 - Bozkurt and Lutfi sen

نیز دارد (واوروس و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۴۸؛ نوتارو و همکاران، ۲۰۱۳a: ۷۸۹؛ ۲۰۱۳b: ۱۹۹۰)، مطالعه نقش دریای خزر بر وقوع بارش‌های منطقه خزری را به نحو مطلوب‌تری به انجام رساند. از این رو هدف اصلی تحقیق حاضر آن است که در یک شبیه‌سازی دینامیکی و با انجام ریزگردانی مناسب، نقش دریای خزر را در وقوع بارش‌های منطقه خزری به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار دهد. در عین حال پژوهش حاضر سعی دارد به این پرسش نیز پاسخ گوید که «مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4 در پیوند با یک مدل دریاچه به چه میزان می‌تواند در شناسایی نقش دریای خزر بر بارش‌های سواحل جنوبی آن کارایی داشته باشد؟»

### مواد و روش‌ها

بررسی نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های سواحل جنوبی این دریا با استفاده از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4 به انجام رسید. در این مطالعه با توجه به هدف اصلی و سؤالات تحقیق داده‌های زیر مورد استفاده قرار گرفت و مراحل زیر در نظر گرفته شد:

#### – داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به دو بخش اصلی شامل داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل تقسیم می‌شود:

#### ✓ داده‌های ایستگاهی

برای انجام مطالعات توصیفی اولیه، داده‌های بارش ایستگاههای سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور در مقیاس روزانه و ماهانه در یک دوره ده ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۶) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱).

#### ✓ داده‌های مورد استفاده در بخش مدلسازی

##### داده‌های ورودی در مقیاس جهانی

داده‌های شرایط مرزی ثانویه شامل داده‌های جوی NCEP/NCAR با قدرت تفکیک افقی ۲/۵ درجه است که در مقیاس زمانی ۶ ساعته برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مورد استفاده قرار گرفته است (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶: ۴۳۷). این داده‌ها شامل: ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه مداری باد (U)، مؤلفه نصف النهاری باد (V)، دمای هوا و سرعت

سه ماهه حساسیت مدل RegCM3 را مورد آزمون قرار دادند. در شبیه‌سازی انجام شده، محققان مدل را در وضعیت با رشته کوه و بدون آن اجرا نمودند و دریافتند که با حذف رشته کوه‌های زاگرس، میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش پیدا می‌کند، ولی بارش در کل محدوده شبیه‌سازی شده تقریباً ثابت می‌ماند. باباییان و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی حساسیت مدل RegCM3 نسبت به طرحواره‌های مختلف بارش همرفتی از جمله گرل، کو و امانوئل دریافتند که طرحواره گرل در مقایسه با دو طرحواره دیگر توانمندی خوبی برای شبیه‌سازی بارش در کل کشور دارد. در طی چند دهه گذشته مطالعات بی‌شماری سازوکار وقوع بارش‌های خزری را مورد بررسی قرار داده‌اند و تئوری‌های متعدد و متفاوتی در رابطه با نحوه وقوع بارش‌های خزری ارائه گردیده است (خلیلی، ۱۳۵۰: ۳۹؛ قشقایی، ۱۳۷۵: ۲۰؛ علیجانی، ۱۳۷۲: ۸۶؛ خوشحال‌دستجردی، ۱۳۷۶: ۳۰؛ یوسفی، ۱۳۸۲: ۱۵؛ مرادی، ۱۳۸۳: ۷۷؛ مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۳۲؛ ۱۳۹۱: ۱۷۸؛ جانبازقبادی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۴)، اما علیرغم تمامی مطالعات انجام شده، هنوز به این پرسش کلیدی که «نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های سواحل جنوبی آن چیست؟» پاسخی جامع داده نشده است. به نظر می‌رسد مهمترین مسئله در تبیین نقش دریای خزر بر بارش سواحل جنوبی و به‌طور کلی بر اقلیم منطقه‌ای، نبود داده‌های مناسب از شرایط فیزیکی دریای خزر و به تبع آن نبود امکان آشکارسازی نحوه برهمکنش جو و دریا در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی است؛ بنابراین، این نیاز وجود دارد که نقش دریای خزر به‌عنوان یک پیکره آبی بزرگ بر وقوع بارش‌های سواحل جنوبی آن با انجام شبیه‌سازی‌های دینامیکی و ریزگردانی داده‌ها مشخص گردد. از آنجایی که در مطالعات اقلیمی ایران هنوز نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های خزری یک بحث باز تلقی می‌گردد، در این راستا تحقیق حاضر بر آن است با بهره‌گیری از طرحواره‌های همرفتی و دینامیکی و با استفاده از نسخه‌ای جدید از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM که امکان جفت شدن با یک مدل دریاچه تکامل یافته را

بین‌المللی فیزیک نظری عبدالسلام گرفته شد.

### داده‌های خروجی مدل

پس از اجرای مدل، داده‌های خروجی با فرمت NetCDF و برای دوره زمانی سه ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵) در قالب سه دسته فایل اصلی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت:

- **داده‌های خروجی جوی:** مؤلفه مداری باد، مؤلفه نصف النهاری باد، دمای هوا، امگا، نم و ویژه، نسبت آمیزه بخار آب ابر در ۱۸ تراز فشاری، فشار سطحی، مجموع بارش، دمای سطحی، رطوبت خاک و رواناب که مجموع این داده‌ها دارای قدرت تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر و در بازه زمانی ۶ ساعته هستند.

قائم برای ۱۷ تراز فشاری و فشار سطحی و همچنین رطوبت نسبی برای ۸ تراز است. داده‌های شرایط مرزی اولیه (داده‌های سطحی) مورد استفاده در این تحقیق، شامل داده‌های توپوگرافی، عمق آب دریاها و دریاچه‌ها، داده‌های کاربری اراضی، رطوبت و بافت خاک است که با قدرت تفکیک افقی ۳۰ ثانیه توسط سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) تهیه گردیده است. علاوه بر آن داده‌های دمای سطح آب دریا (SST) اخذ شده از اداره ملی جو و اقیانوس آمریکا (NOAA) به صورت هفتگی و با قدرت تفکیک افقی ۱ درجه (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۶۱۰) به‌عنوان داده‌های ورودی برای اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفت. تمامی داده‌های فوق از پایگاه داده مرکز

جدول ۱. نام و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک سواحل جنوبی دریای خزر

ایستگاه	آستارا	انزلی	رشت	رامسر	نوشهر	بابلسر	قائم شهر	گرگان
عرض جغرافیایی	۳۸°-۲۵'	۳۷°-۲۸'	۳۷°-۱۲'	۳۶°-۵۴'	۳۶°-۳۹'	۳۶°-۴۳'	۳۶°-۲۷'	۳۶°-۵۱'
طول جغرافیایی	۴۸°-۵۲'	۴۹°-۲۸'	۴۹°-۳۹'	۵۰°-۴۰'	۵۱°-۳۰'	۵۲°-۳۹'	۵۲°-۵۳'	۵۴°-۱۶'

### - روش‌ها

#### ✓ مراحل انجام مدل‌سازی

هدف از مدل‌سازی رقومی مشخص کردن نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های سواحل جنوبی آن و ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی نقش این دریا است. در این راستا از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4.1 که با یک مدل دریاچه جفت شده، استفاده شد (گیورگی و همکاران، ۲۰۱۲: ۸). برای این منظور ابتدا داده‌های بارش ایستگاهی و داده‌های شبکه‌بندی شده جوی در یک دوره زمانی ده ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۶) جهت تعیین سال یا سال‌های نمونه مورد پردازش قرار گرفت. با توجه به این که جریان باد با جهت شمالی بر روی دریای خزر نقش ویژه‌ای در بارش‌های سواحل جنوبی آن دارد (خلیلی، ۱۳۵۰: ۳۹؛ علیجانی، ۱۳۷۲: ۸۶؛ براتی و عاشوری، ۱۳۸۶: ۶۲؛ مفیدی و همکاران ۱۳۸۶: ۱۳۲) و همچنین از آنجایی که ساختار و خصوصیات باد بر روی دریا نقش ویژه‌ای در بر همکنش جو و دریا ایفا می‌کند؛ وضعیت متوسط روزانه مؤلفه باد نصف‌النهاری در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر و مجموع بارش‌های

- **داده‌های خروجی مدل دریاچه:** این داده‌ها شامل فشار سطح زمین، دما در سطح زمین، مجموع بارش، بارش برف، شارگرمای محسوس، شارخالص انرژی مادون قرمز، شار انرژی جذب شده خورشیدی، آلودگی سطحی، شارموج بلند پایین سو، تابش مستقیم موج کوتاه خورشیدی، آلودگی سطحی انتشار یافته، تابش موج کوتاه خورشیدی، میزان تبخیر، ضخامت یخ شناور، ضخامت برف و دمای سطح آب دریا است. داده‌ها دارای قدرت تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر و در بازه زمانی روزانه تولید گردید.

- **داده‌های خروجی سطحی:** این داده‌ها شامل دمای سطحی زمین، دما در ارتفاع ۲ متری، نم و ویژه ۲ متری، بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، بارش برف، شارگرمای محسوس در سطح، انرژی جذب شده خورشیدی، بارش همرفتی، حداکثر و حداقل دما در سطح، حداکثر و حداقل دما در ارتفاع ۲ متری، حداکثر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، کمترین فشار سطحی، آلودگی سطحی تابش مستقیم موج کوتاه خورشیدی، آلودگی سطحی انتشار یافته و تابش موج کوتاه خورشیدی است. داده‌ها از قدرت تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر و بازه زمانی ۶ ساعته برخوردار هستند.

بنابراین، از مدل جوی RegCM4 جفت شده با یک مدل دریاچه که بتواند شرایط برهمکنش جو و دریاچه را شبیه‌سازی کند، استفاده شده است. مدل در وهله اول اصطلاحاً در حالت «کنترل» یا «در شرایط مرجع» به اجرا در آمد. در این مرحله مدل RegCM4.1 به گونه‌ای با مدل دریاچه جفت گردید که تمامی شرایط سطحی، از جمله پوشش سطح زمین (Land Cover)، شکل طبیعی و اولیه خود را حفظ نماید. شکل ۱-۲ محدوده در نظر گرفته شده به همراه نقشه پوشش سطحی را در اجرای مرجع نشان می‌دهد. برای محاسبه شارهای سطحی گرما، رطوبت و تکانه، مدل دریاچه به شکل برهمکنشی (Interactive) با مدل RegCM4.1 جفت گردیده است. این مدل نسخه تصحیح شده و تکامل یافته از مدل دریاچه یک بُعدی در شرایط موازنه انرژی، توسعه یافته توسط هاستتler و بارتلین (۱۹۹۰) محسوب می‌گردد. در مدل دریاچه، شارهای گرما، رطوبت و تکانه بر اساس داده‌های ورودی هواشناسی و دمای سطح دریاچه و آلبدو محاسبه می‌شوند (شکل ۲). در این مدل گرما به‌طور عمودی از طریق تلاطم و اختلاط همرفتی بین لایه‌های مدل دریاچه منتقل می‌گردد (هاستتler و همکاران، ۱۹۹۳: ۵۰۴۵؛ اسمال و همکاران، ۱۹۹۹: ۶۵۸۳). مدل در شرایط مرجع برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ به اجرا درآمد.

#### اجرای مدل در شرایط حذف دریاچه

در این مرحله، مدل RegCM4.1 پس از حذف دریای خزر از داده‌های پوشش سطحی (شکل ۱-۲)، با مدل دریاچه جفت گردیده است. لازم به توضیح است که در مدل‌های دینامیکی و در فرایند شبیه‌سازی، این امکان وجود دارد که برای درک میزان نقش و اثر یک پدیده خاص بر کل فرایندهای جوی در حال وقوع، آن پدیده را از داده‌های ورودی حذف و یا بر اساس هدف تحقیق اصلاح نموده و سپس با حفظ سایر شرایط به مدل اجازه دهیم که معادلات دینامیکی خود را در قالب طرحواره‌های مختلف بر روی داده‌های ورودی اعمال نماید. بر این اساس، در اجرای دوم مدل که یک اجرای شبیه‌سازی محسوب می‌گردد، پیکره دریای خزر از داده‌های پوشش سطحی

روزانه در سواحل جنوبی دریا در دوره ده ساله مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن این نکته که داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی هر چقدر از نظر زمانی نزدیک‌تر به زمان حاضر باشند، از کیفیت و دقت بیشتری برخوردارند و درصد بیشتری از واقعیت‌های محیطی زمان حال از نظر تغییر اقلیم و تغییرات زیست محیطی را نشان می‌دهند؛ بنابراین، بر اساس بررسی شرایط بارشی و مؤلفه باد نصف‌النهاری و همچنین با در نظر گرفتن افزایش میزان دقت و صحت داده‌های جدیدتر، در نهایت سه سال ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ که شرایط مناسبی از نظر الگوی گردشی جو در ترازهای زیرین داشته و در عین حال از شرایط بارشی مناسبی برخوردار بوده‌اند، برای انجام شبیه‌سازی و اجرای مدل در نظر گرفته شد.

#### ✓ توصیف تجربه

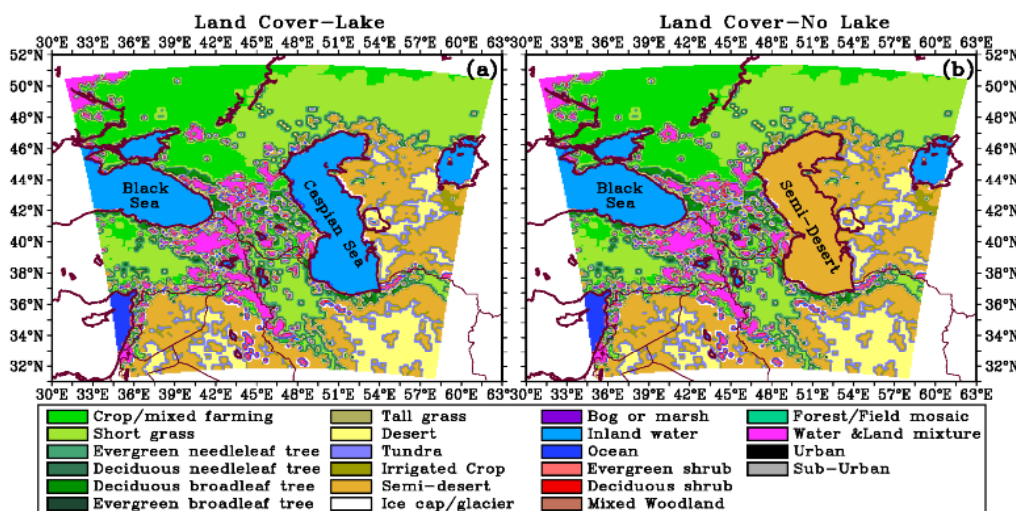
در این تحقیق مدل RegCM4.1 با تعداد ۱۱۰ گام شبکه در راستای عرض جغرافیایی، ۱۱۲ گام شبکه در راستای طول جغرافیایی و ۱۸ تراز در راستای قائم در دستگاه سیگما که بالاترین تراز به‌طور پیش فرض دارای فشار ۵ میلی بار بوده، اجرا شد. عرض مرکزی ۳۰°، ۴۱° شمالی و طول مرکزی ۳۰°، ۴۶° شرقی در نظر گرفته شد و برای آن که مدل بتواند جزئیات بیشتری را با قدرت تفکیک بالاتر نشان دهد، قدرت تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر انتخاب گردید. سیستم تصویر انتخابی، سیستم تصویر لامبرت است که برای عرض‌های میانه مناسب است. برای آن که مدل بتواند با ویژگی‌های دریاچه به خوبی تطبیق پیدا کند، زمان شروع اجرای مدل از دوره گرم سال و از ابتدای ماه سپتامبر در نظر گرفته شد که بدین ترتیب یک دوره تطبیق (Spin-up) ۴ ماهه برای اجرای مدل لحاظ گردید. گام زمانی داده‌های خروجی برای داده‌های جوی و داده‌های سطحی ۶ ساعت و برای داده‌های دریاچه ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. در اجرای مدل از طرحواره‌های کومولوس، طرحواره همرفت آرکاو-شوبرت و طرحواره بارش بزرگ مقیاس استفاده شد.

#### اجرای مدل در شرایط مرجع

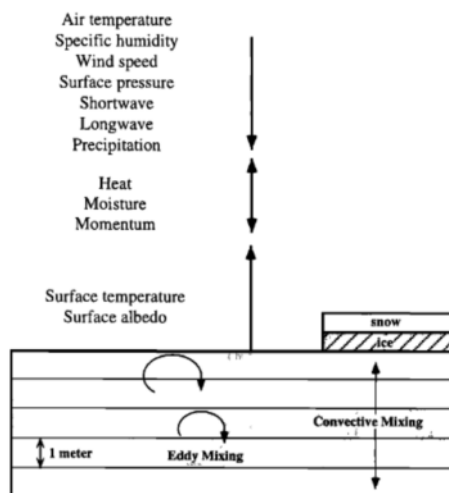
از آنجایی که هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی نقش دریای خزر در وقوع بارش‌های منطقه خزری است؛

ورودی که شامل توپوگرافی، نوع پوشش سطح زمین، دمای سطح دریا، داده‌های جوی و دیگر متغیرهاست، برای منطقه مورد نظر با قدرت تفکیک افقی و عمودی مورد درخواست برش خورده و تولید می‌گردند. در اجرای شبیه‌سازی، پس از این مرحله، پوشش سطحی واقعی دریای خزر با پوشش سطحی نیمه بیابانی جایگزین گردید. علت انتخاب سرزمین‌های نیمه بیابانی نیز به خاطر همخوانی با پوشش سرزمین‌های اطراف دریاچه به خصوص شرق دریای خزر است (شکل ۱-ب). بدین ترتیب مدل یکبار دیگر در شرایط حذف دریای خزر به اجرا در آمد. در اجرای شبیه‌سازی نیز مدل برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ اجرا شد.

ورودی حذف گردیده و به جای آن یک پوشش نیمه بیابانی جایگزین گردید (شکل ۱-ب). بدین ترتیب در اجرای شبیه‌سازی، معادلات و طرحواره‌های مدل، پوشش سطحی نیمه بیابانی را برای محاسبات خود لحاظ نموده‌اند. نحوه انجام شبیه‌سازی به شرح زیر است: قبل از اجرای مدل، دو مرحله پیش پردازش وجود دارد که انجام آن ضروری است. اولین مرحله، فراهم آوردن و آماده سازی داده‌های ورودی مدل، شامل برش داده‌های جهانی اعم از داده‌های توپوگرافی، پوشش سطحی، دمای سطح آب دریا، داده‌های جوی از نظر مکانی و زمانی و تعیین محدوده اصلی مورد درخواست برای اجرای مدل است. بدین ترتیب با اجرای مرحله اول، فایل‌های بخش



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه همراه با اطلاعات پوشش سطحی با تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر. (a) پوشش سطحی در اجرای مرجع (با دریاچه). (b) پوشش سطحی در شرایط حذف دریاچه. راهنمای نقشه نام و رنگ اختصاص یافته به هر یک از پوشش‌های سطح زمین را نشان می‌دهد. (منبع: نگارندگان)



شکل ۲: تصویری شماتیک از مدل دریاچه (منبع: اسمال و همکاران، ۱۹۹۹).

## ✓ تحلیل خروجی‌های مدل

با استفاده از داده‌های بارش دوره ۳ ساله، مقادیر متوسط بارش فصلی به تفکیک برای شرایط مرجع و شرایط حذف دریای خزر برای هر فصل به صورت نقشه تهیه شد. در عین حال صحت سنجی داده‌های بارش مدل، با بهره‌گیری از داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک رشت و مقایسه آن با داده‌های بارش خروجی مدل برای همان مختصات در مقیاس روزانه و ماهانه به انجام رسید.

در ادامه و جهت انجام مطالعات دقیق‌تر در رابطه با نقش دریای خزر بر روی بارش‌های سواحل جنوبی آن، تعداد ۳۰ روز با آستانه شدت باد زیاد (۳۰ کیلومتر در ساعت و بالاتر) و ۳۰ روز با آستانه شدت باد متوسط (حدفاصل ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر در ساعت) از روزهای پاییزی دوره مطالعه، که در عین حال منطقه خزری هم زمان بارش را تجربه نموده است، استخراج شد. لازم به ذکر است که آستانه‌های سرعت یاد شده بر اساس مطالعه سرعت متوسط منطقه‌ای باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی کل دریای خزر حاصل گردیده است. دلیل انتخاب فصل پاییز نیز نقش بسیار مهمی است که این دوره از سال در بارش‌های سواحل جنوبی دریای خزر دارد. از آنجایی که هدف این قسمت از مطالعه فراهم نمودن درک مناسب‌تری از ویژگی‌های فیزیکی، ترمودینامیکی و همچنین ساختار منطقه‌ای گردش جو در منطقه خزری در زمان وقوع بادهای شدید و متوسط بوده است، به همین جهت روزهایی انتخاب گردید که در عین حال جهت باد غالب در ترازهای زیرین جو بر روی دریای خزر شمالی بوده است. متغیرهای استفاده شده در این مرحله عیناً مشابه متغیرهای به‌کار گرفته شده در بخش بررسی‌های فصلی بوده و شرایط غالب در اجرای مرجع و بدون دریاچه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در این مرحله از تحقیق، جهت شناسایی میزان نقش دریای خزر بر بارش‌های خزری، با معیار قرار دادن آستانه‌های شدت باد، وضعیت بارش، مؤلفه باد نصف‌النهاری، دمای سطحی، شارگرمای محسوس، نم ویژه، تبخیر و بارش در شرایط مرجع و بدون دریاچه مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی یادشده، نحوه برهمکنش دریا و جو در منطقه خزری و

همچنین ساختار فیزیکی و ترمودینامیکی دریای خزر در زمان تسلط بادهای شمالی بر روی آن را به نمایش می‌گذارد. برای بهتر نشان دادن نقش دریای خزر، تمامی نقشه‌ها از تفاضل‌گیری بین وضعیت حاکم در اجرای بدون دریاچه و اجرای مرجع تهیه گردیده‌اند.

## نتایج و بحث

### - بررسی بارش‌های فصلی در سواحل جنوبی

#### دریای خزر

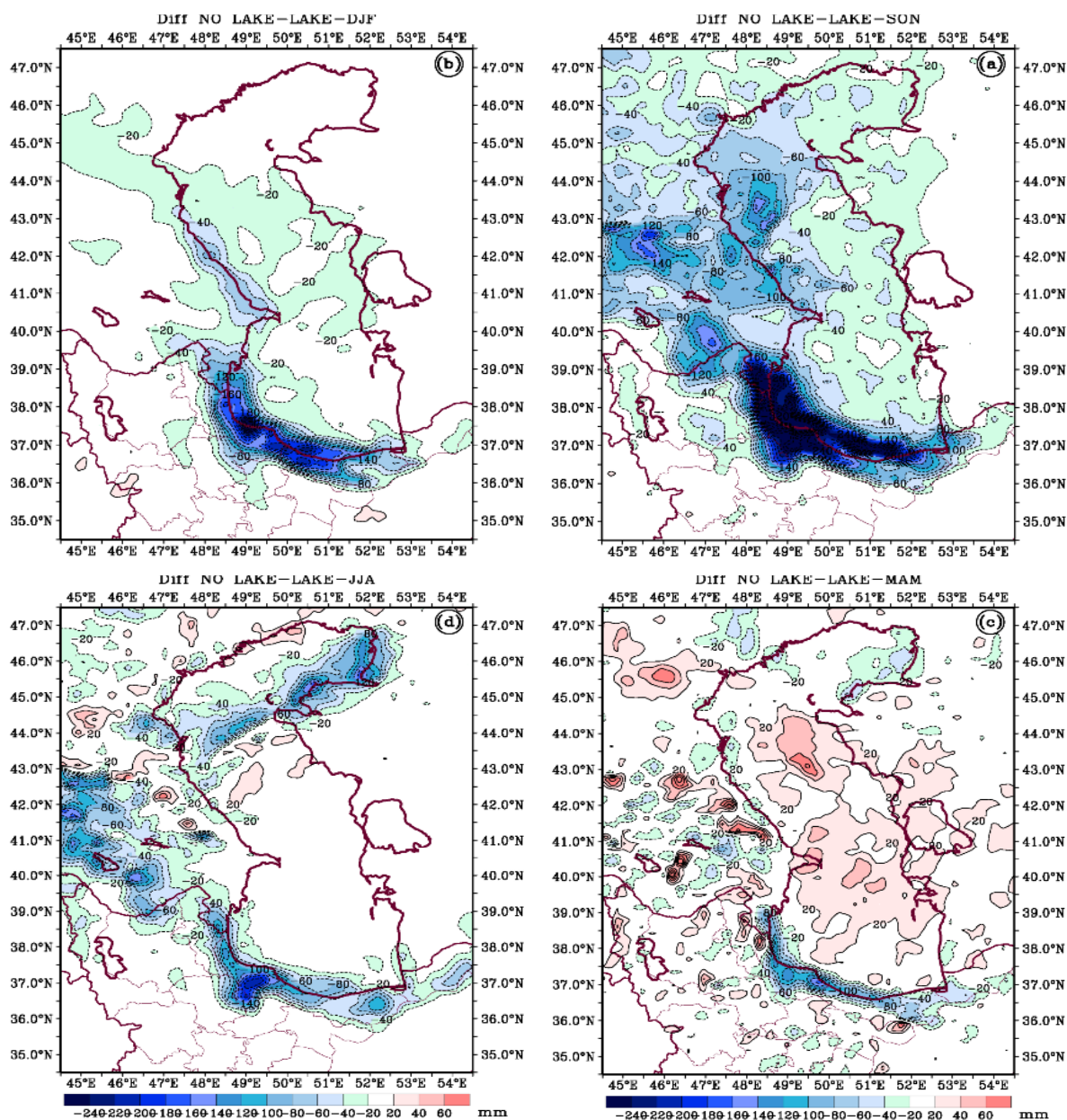
برای بررسی و مشخص کردن نقش و تأثیر دریای خزر بر وقوع بارش‌های سواحل جنوبی آن، مدل در دو حالت یعنی شرایط مرجع (با دریاچه) و شرایط حذف دریای خزر به اجرا در آمد. در این بخش به منظور نشان دادن نقش دریای خزر در شبیه‌سازی انجام شده، وضعیت بارش منطقه‌ای در شرایط حذف دریای خزر در قیاس با شرایط مرجع با انجام تفاضل‌گیری مورد بررسی قرار گرفت تا تغییرات زمانی و مکانی بارش حاصل از تفاضل‌گیری بیانگر نقش دریای خزر بر بارش‌های منطقه باشد. با تفاضل‌گیری بارش‌های فصلی، آن‌چنان که شکل ۳-a نشان می‌دهد، در صورت حذف دریای خزر، کاهش عمومی را در میزان بارش فصل پاییز بر روی کل منطقه خزری شاهد خواهیم بود. در این میان، میزان کاهش بارش در حاشیه جنوبی دریای خزر از آستارا تا شرق گرگان چشمگیرتر از سایر مناطق بوده، به طوری که به شکل کمربند پیوسته‌ای از بیشینه مقادیر منفی (بیشینه کاهش بارش) در منطقه خودنمایی می‌کند. به‌طور کلی با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، مقدار کاهش بارش در منطقه آستارا و تالش به میزان ۲۴۰ تا ۳۲۰ میلی متر، در منطقه رشت-انزلی و ارتفاعات البرز غربی به ترتیب حدود ۳۴۰، ۲۶۰ تا ۲۰۰ میلی متر، در منطقه چالوس - نوشهر و ارتفاعات البرز مرکزی به ترتیب حدود ۲۴۰، ۱۶۰ و ۲۰ میلی متر، و در سواحل جنوب شرق دریای خزر از منطقه بابلسر، بابل و قائم شهر تا گرگان حدود ۲۶۰، ۱۴۰ و ۱۰۰ میلی متر کاهش یافته است. همچنین مقدار بارش‌ها در شمال غرب ایران بالاتر از عرض ۳۹ درجه شمالی در منطقه پارس آباد اردبیل،

۱۰۰ میلی متر، در منطقه بابلسر، قائمشهر و ساری به ترتیب حدود ۶۰، ۸۰ و ۴۰ میلی متر و در منطقه گرگان حدود ۲۰ میلی متر خواهد بود. نکته جالب توجه شکل یاد شده، افزایش مقادیر بارش منطقه‌ای (هرچند به شکل محدود)، در بخش‌هایی از منطقه خزری پس از حذف دریای خزر در فصل بهار است. شاید بتوان افزایش بارش یاد شده در بخش‌های میانی و همچنین برخی از مناطق خشکی واقع در شمال و شرق این دریا را بدین شکل تبیین نمود که با حذف دریای خزر، دیگر دمای سطح آب دریای خزر (سرمايش سطحی در بهار)، به‌عنوان یک سازوکار در جهت کاهش بارش منطقه‌ای عمل نخواهد نمود.

کلیبر، اهر و جلغا در استان آذربایجان شرقی ۴۰ تا ۱۲۰ میلی متر کاهش یافته است. تفاضل‌گیری‌ها بیانگر آن است که منطقه ارتفاعات قفقاز و سواحل غربی دریای خزر پس از سواحل جنوبی بیشترین مقادیر کاهش بارش را در فصل پاییز تجربه می‌کند. نکته جالب توجه آنکه، مناطق واقع در جانب شمالی و شرقی دریای خزر، تفاوت محسوس و قابل‌ذکری را در صورت حذف دریای خزر در بارش‌های پاییزی خود تجربه نخواهند نمود. الگوی یاد شده می‌تواند نقش بسیار مهم جریانات شمال-شمال شرقی در وقوع بارش‌های پاییزی منطقه خزری را بازگو نماید. به نظر می‌رسد وجود و یا عدم وجود این تیپ از جریانات و برهمکنش آن با دریای خزر در ماهیت بارش‌های پاییزی بخش‌های شرقی و شمالی دریای خزری تأثیری نداشته باشد.

شکل ۳-۵ وضعیت متوسط بارش‌های فصل زمستان را با تفاضل‌گیری بارش بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع نشان می‌دهد. همچون الگوی پاییزی بیشینه مقادیر کاهش بارش به شکل کمربند پیوسته‌ای در سواحل جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، مقدار بارش در منطقه آستارا و دامنه شرقی تالش حدود ۱۸۰ تا ۲۲۰ میلی متر، در منطقه انزلی و رشت حدود ۲۴۰ میلی متر، در منطقه چالوس - نوشهر و دامنه شمالی و جنوبی البرز میانی حدود ۲۰۰ تا ۲۲۰ میلی متر، در منطقه بابلسر و قائم شهر حدود ۸۰ تا ۱۴۰ میلی متر، در منطقه ساری حدود ۶۰ و گرگان حدود ۲۰ میلی متر کاهش یافته است. همچنین مقدار بارش در سواحل غربی دریای خزر از عرض ۴۰ درجه شمالی به بالا بین ۴۰ تا ۱۰۰ میلی متر کاهش یافته است. شکل ۳-۵ وضعیت متوسط بارش‌های فصل بهار را پس از انجام تفاضل‌گیری نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در صورت حذف دریای خزر، مقدار بارش در این فصل نیز به شکل کمربندی در سواحل جنوبی دریای خزر کاهش پیدا خواهند نمود. مقدار کاهش در منطقه آستارا و دامنه‌های شرقی ارتفاعات تالش بین ۲۰ تا ۴۰ میلی متر، در منطقه انزلی و رشت و ارتفاعات البرز غربی تا ۱۰۰ میلی متر، در منطقه نوشهر-چالوس و دامنه شمالی البرز مرکزی حدود





شکل ۳: تفاوت بارش فصلی در منطقه خزری حاصل از تفاضل‌گیری بارش بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع. شکل‌ها با متوسط‌گیری مجموع بارش فصلی برای یک دوره سه ساله (۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵) تهیه شده‌اند. (a) پاییز، (b) زمستان، (c) بهار و (d) تابستان.

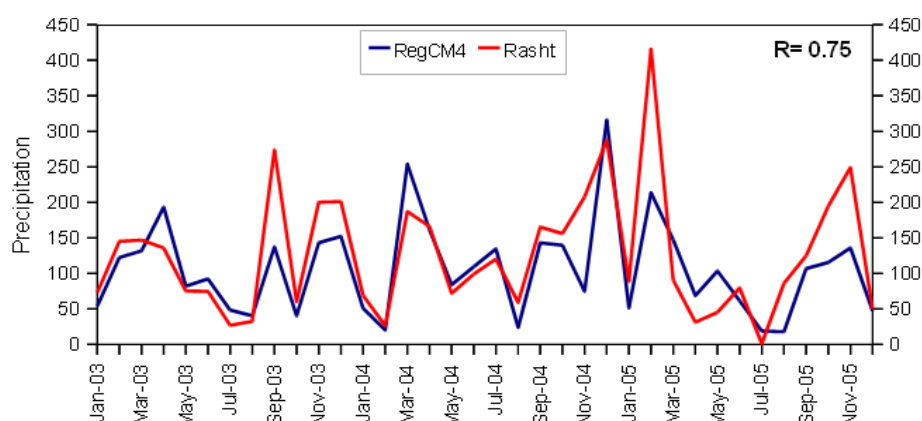
منبع: نگارندگان

هسته‌های کاهشی دیگری نیز در شمال دریای خزر و ارتفاعات قفقاز در غرب دریای خزر مشاهده می‌شود. به منظور اعتبار‌سنجی مقادیر بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4، با توجه به نبود داده‌های رقومی بارش با کیفیت و ارزش بالا از منطقه مورد مطالعه، از داده‌های بارش ایستگاهی (داده‌های نقطه‌ای) برای انجام اعتبار‌سنجی استفاده شد. به همین جهت داده‌های بارش خروجی مدل در نزدیک‌ترین نقطه شبکه به ایستگاه

شکل ۳-d تفاضل‌گیری بارش‌های فصلی را برای فصل تابستان نشان می‌دهد. در این شکل نیز با حذف دریای خزر، بارش به شکل کمربند پیوسته همراه با هسته‌های کمینه در سواحل جنوبی دریای خزر کاهش یافته است. مقدار بارش در منطقه آستارا و ارتفاعات تالش حدود ۱۰۰ میلی‌متر، در منطقه رشت و انزلی و ارتفاعات البرز غربی بین ۱۰۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، در منطقه نوشهر-چالوس ۸۰ میلی‌متر، در منطقه ساری ۸۰ میلی‌متر و در منطقه گرگان ۶۰ میلی‌متر کاهش پیدا نموده است.

پیوسته در ایستگاه رشت دارد. به‌طوریکه میزان همبستگی داده‌ها به ۰/۷۵ بالغ می‌گردد. اگر چه مدل برای ماه‌های پاییزی (سپتامبر تا نوامبر) و برخی از ماه‌های بهاری به ترتیب اریب‌های منفی (بارش کمتر) و مثبت (بارش بیشتر) کوچکی را نشان می‌دهد؛ اما در کل، نتایج قابل قبول بوده و در واقع مدل توانسته است روند و مقدار بارش‌های ماهانه را به خوبی شبیه‌سازی نماید (شکل ۴).

سینوپتیک رشت با داده‌های بارش ماهانه به ثبت رسیده در ایستگاه رشت برای سال‌های شبیه‌سازی شده (۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵) مقایسه گردید. شکل ۴ مجموع بارش ماهانه در مختصات ایستگاه رشت را برای سه سال یاد شده نشان می‌دهد. مقایسه دو نمودار (دو خط قرمز و آبی)، بیانگر آن است که به‌طور کلی مقادیر و روند بارش ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل، انطباق خوبی با بارش بوقوع



شکل ۴: مجموع بارش ماهانه برآورد شده توسط مدل (خط آبی) و بارش در ایستگاه رشت (خط قرمز) برای دوره مورد مطالعه.

منبع: نگارندگان

تفکیک در زمان تسلط بادهای شمالی با شدت زیاد و بادهای شمالی با شدت متوسط برای مؤلفه نصف‌النهاری باد، دمای سطح زمین، شارگرمای محسوس، تبخیر، نم ویژه و بارش، مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

#### ✓ مؤلفه نصف‌النهاری باد

شکل ۵-a وضعیت متوسط مؤلفه نصف‌النهاری باد را در تراز ۹۱۰ هکتوپاسکال پس از تفاضل‌گیری شرایط حذف دریا با شرایط مرجع و در حالتی که بر روی منطقه خزری بادهای شمالی شدید غلبه دارند، نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در زمان وقوع بادهای شمالی شدید، با حذف دریای خزر، شدت باد شمالی به‌طور محسوسی بر روی کل دریا کاهش می‌یابد (مقادیر مثبت بیانگر تضعیف باد شمالی است). در این رابطه بیشینه کاهش شدت باد در نیمه جنوبی و غربی دریا مشاهده می‌گردد. به‌طوری که در منتهی‌الیه جنوب غربی دریا میزان کاهش شدت باد به ۸ تا ۱۰ کیلومتر در ساعت بالغ می‌شود. شکل ۵-b وضعیت یاد شده را در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت

#### - بررسی خصوصیات فیزیکی دریای خزر در زمان وقوع بادهای شمالی شدید و متوسط پاییزه

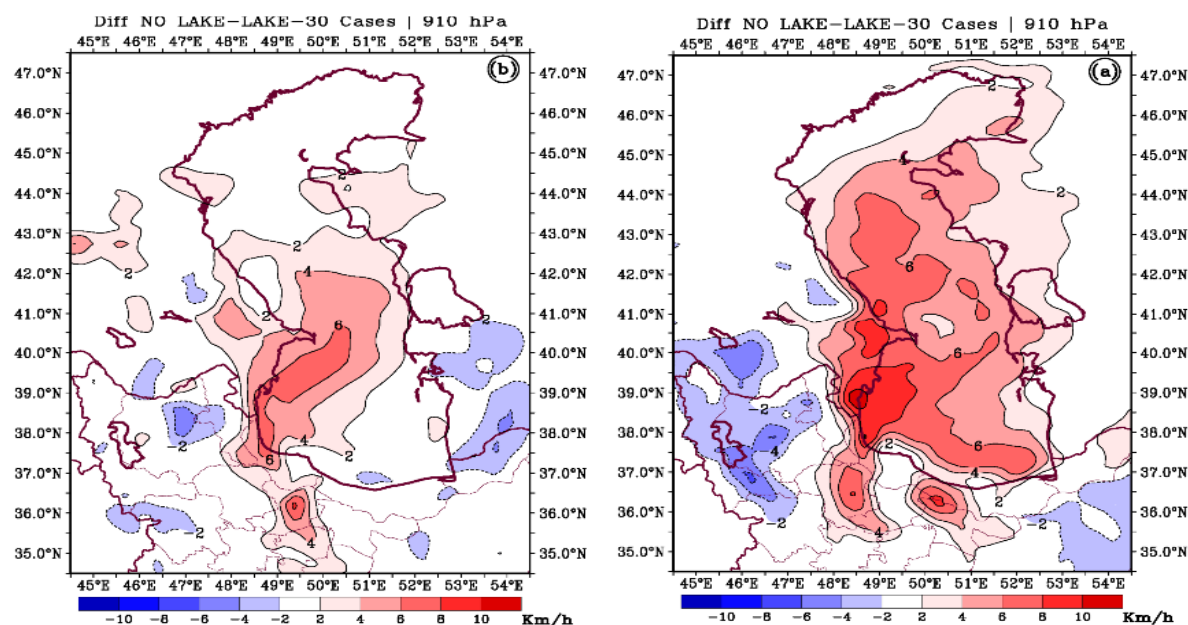
در این بخش، نقش دریای خزر بر بارش‌های منطقه خزری از طریق مطالعه برخی از متغیرهای فیزیکی مهم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در سرتاسر این بخش خصوصیات فیزیکی دریای خزر و نقش منطقه‌ای آن با این شروط مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت که بارش در منطقه خزری به وقوع پیوسته و درعین حال به‌طور هم زمان بادهای شمالی با شدت‌های متوسط و یا زیاد بر روی دریای خزر تسلط داشته‌اند. این معیارها بر این اساس لحاظ گردید که یک پیکره آبی آن هم در مقیاس زمانی روزانه، عمدتاً از طریق فرارفت افقی هوا مناطق حاشیه‌ای را از خود متأثر می‌سازد. برای این منظور تعداد ۳۰ روز دارای باد شمالی با شدت زیاد و تعداد ۳۰ روز باد شمالی با شدت متوسط از فصل پاییز انتخاب گردید. بدین ترتیب در این بخش، نقشه‌های حاصل از تفاضل‌گیری بین شرایط حذف دریا و شرایط مرجع به

محسوس بر روی دریا و افزایش قابل ملاحظه آن را بر سواحل جنوبی و جنوب غربی در پی خواهد داشت. مقایسه دو شکل ۶-ا و ۶-ب نیز که به ترتیب برای بادهای شمالی با شدت زیاد و متوسط تهیه گردیده‌اند، بیانگر آن است که تغییرات شدت باد شمالی، از طریق تغییر در برهمکنش فیزیکی بین دریا و هوا میزان شار گرمای محسوس را بر روی دریای خزر تغییر می‌دهد؛ به عبارتی، حذف دریای خزر در زمان تسلط بادهای شمالی شدیدتر اثرات منطقه‌ای گسترده‌تری را در مقادیر شار گرمای محسوس، در قیاس با زمان تسلط بادهای با شدت کمتر، به همراه دارد. به این ترتیب که میزان شارگرمای محسوس در زمان وقوع بادهای شدید بر روی نیمه غربی دریا تا مقدار ۶۰ وات بر مترمربع کاهش و بر روی سواحل جنوب غربی تا حدود ۵۰ وات افزایش می‌یابد. در مقابل، حذف دریای خزر همراه با تسلط بادهای شمالی با شدت کمتر، موجب افزایش شارگرمای محسوس بر روی کل منطقه، از جمله سطح دریای خزر می‌گردد. در این شرایط بیشینه گرمایش در ساحل جنوب غربی دریای خزر با بیشینه ۷۰ وات بر متر مربع مشاهده می‌شود (شکل ۶-ب).

متوسط نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن شکل ۵-ب و مقایسه آن با شکل ۵-ا، با کاهش شدت باد شمالی میزان نقش و تأثیر منطقه‌ای دریای خزر نیز کاهش می‌یابد؛ به عبارتی، میزان نقش و تأثیر منطقه‌ای دریای خزر تابعی از شدت باد بر روی دریای خزر است. بر این اساس، با حذف دریای خزر در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط، مقادیر عددی ناهنجاری بادهای کمتر بوده و در عین حال بادهای در یک گستره فضایی کوچکتر و محدودتری ناهنجاری را تجربه می‌کنند. بدین ترتیب دریای خزر در زمان وقوع بادهای شدیدتر نقش منطقه‌ای بیشتر و گسترده‌تری در قیاس با زمان وقوع بادهای با شدت کمتر دارد. نتیجه کلی این که، هر چقدر شدت باد شمالی در ترازهای زیرین جو بر روی دریای خزر کاهش یابد، میزان تأثیرگذاری منطقه‌ای دریای خزر نیز کاهش خواهد یافت.

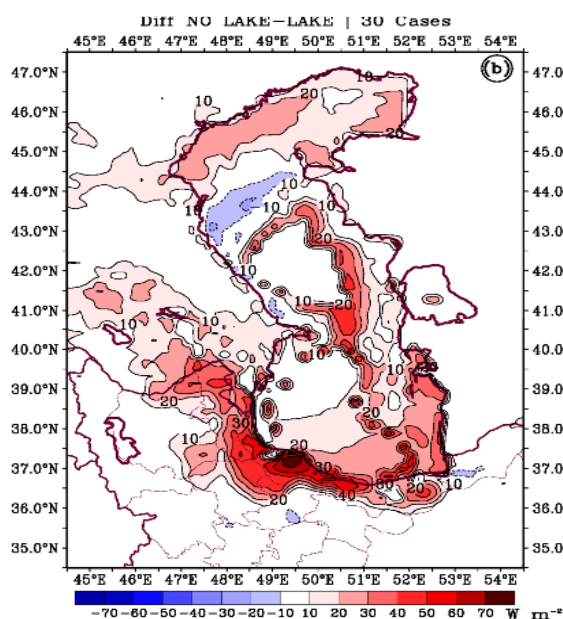
#### ✓ شارگرمای محسوس

شکل ۶ وضعیت متوسط شارگرمای محسوس حاصل از تفاضل‌گیری بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع را نشان می‌دهد. بررسی شکل مبین آنست که حذف دریای خزر، کاهش چشمگیر مقادیر شارگرمای

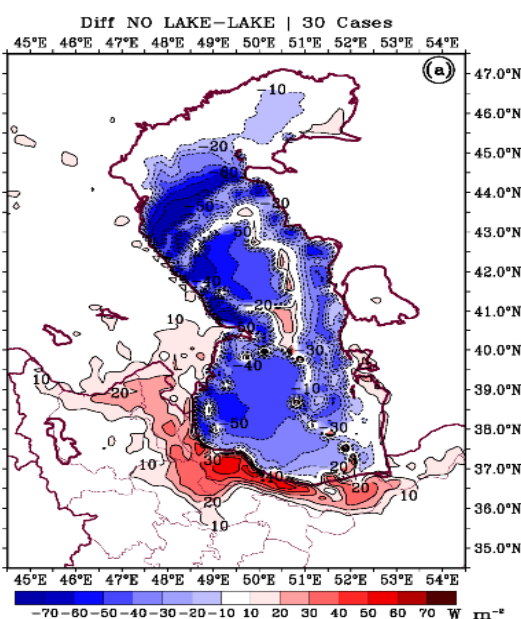


شکل ۵: وضعیت متوسط مؤلفه نصف‌النهاری باد (Km/h)، تفاضل‌گیری شده بین شرایط حذف دریا و شرایط مرجع در تراز ۹۱۰ ه. پ. (a) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط. (منبع: نگارندگان)

طریق تغییر در بر همکنش فیزیکی بین دریا و هوا میزان دمای سطحی را بر روی دریا تغییر خواهد داد. به این ترتیب که بخش اعظم دریای خزر در زمان وقوع بادهای شدید، کاهش دمایی بیش از  $7^{\circ}\text{C}$  را تجربه می‌کند. این در حالی است که در زمان تسلط بادهای با شدت کمتر، کاهش عمومی دما بر روی دریا به‌طور متوسط حدود  $4^{\circ}\text{C}$  بوده و بیشینه کاهش بر روی دریا به حدود  $7^{\circ}\text{C}$  بالغ می‌گردد.



✓ **دمای سطح زمین**  
 شکل ۷ وضعیت متوسط دمای سطح زمین حاصل از تفاضل‌گیری بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که حذف دریای خزر، کاهش مشخص و چشمگیر میزان دما بر روی دریای خزر را در پی خواهد داشت. مقایسه دو شکل ۷-a و ۷-b نیز که به ترتیب برای بادهای شمالی با شدت زیاد و متوسط تهیه گردیده‌اند، بیانگر آن است که تغییرات شدت باد شمالی از



شکل ۶: وضعیت متوسط شارگرمای محسوس ( $\text{W}/\text{m}^2$ )، تفاضل‌گیری شده بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع. (a) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط. (منبع: نگارندگان)

شدید بیش از زمان تسلط بادهای با شدت کمتر است. در زمان تسلط بادهای شدید، بیشینه کاهش تبخیر در حوضچه جنوبی خزر حدود ۲ تا ۳ کیلوگرم برمتر مربع بیشتر از زمانی است که بادهای ضعیف‌تر بر روی دریا تسلط دارند (شکل ۸-a و ۸-b).

#### ✓ نم ویژه

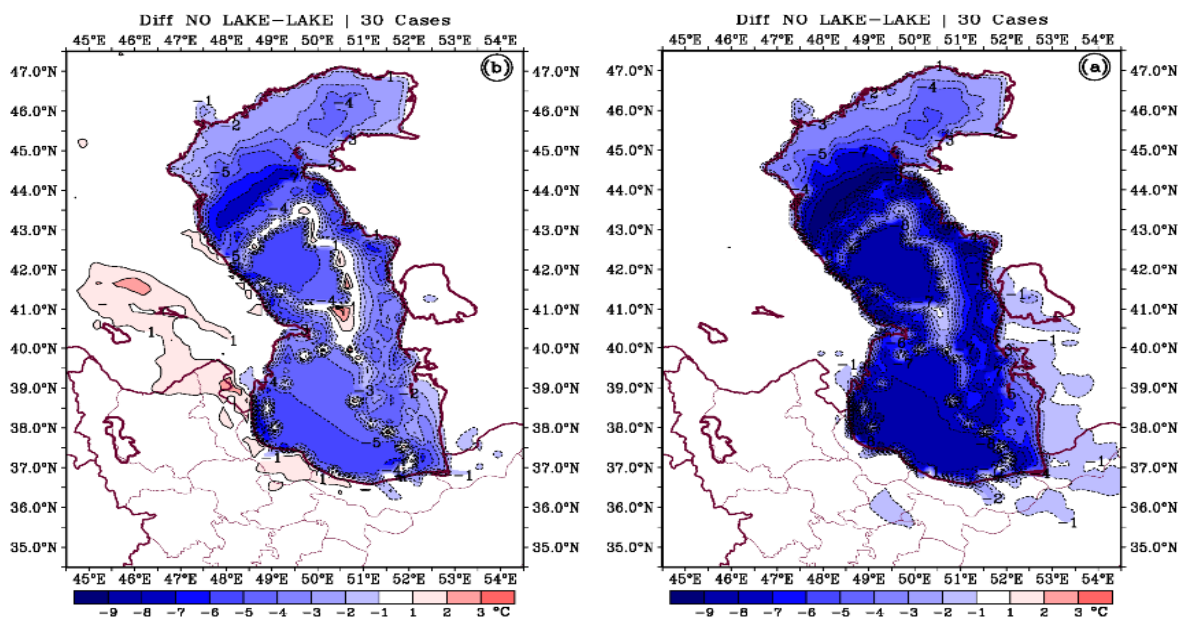
شکل ۹ متوسط نم ویژه حاصل از تفاضل‌گیری شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع را در زمان وقوع بادهای شدید و کم شدت نشان می‌دهد. همچون سایر متغیرهای مورد بررسی، مقادیر متوسط نم ویژه نیز با حذف دریای خزر بر روی دریا و مناطق اطراف آن کاهش

#### ✓ میزان تبخیر از سطح دریا

شکل ۸ وضعیت متوسط تبخیر از سطح دریا حاصل از تفاضل‌گیری بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع را نشان می‌دهد. شکل مبین آن است که حذف دریای خزر، کاهش چشمگیر مقدار تبخیر از سطح دریا را در پی خواهد داشت. مقایسه دو شکل ۸-a و ۸-b نیز که به ترتیب برای بادهای شمالی با شدت زیاد و متوسط تهیه گردیده‌اند، بیانگر آن است که بادهای شمالی شدیدتر در قیاس با بادهای شمالی کم شدت‌تر به نسبت بیشتری تبخیر از سطح دریا را افزایش می‌دهند؛ به همین دلیل، پس از حذف دریای خزر، ناهنجاری‌های منفی مقادیر تبخیر از روی دریا در زمان تسلط بادهای

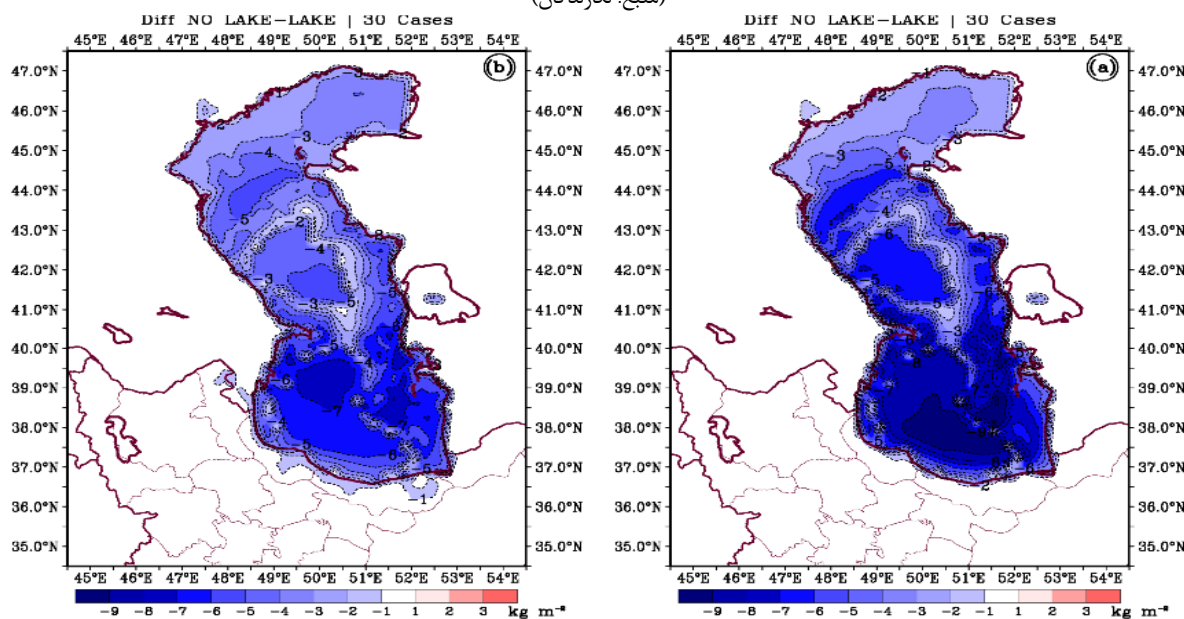
متأثر می‌گردد. مقایسه شکل ۹ با شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به خوبی مؤید این واقعیت است. در مقابل، تغییرات شدت باد بر روی دریای خزر، در قیاس با سایر متغیرهای مورد مطالعه، تغییرات کوچکتری را در مقادیر نم ویژه و الگوی فضایی توزیع آن موجب می‌شود (شکل ۹-a و ۹-b).

یافته است. در قیاس با متغیرهایی چون دما، تبخیر و شار گرمای محسوس، با حذف دریای خزر، نم ویژه در یک محدوده وسیع‌تر و به شکل گسترده‌تری کاهش را تجربه می‌کند؛ به عبارتی دیگر، در مقایسه با متغیرهای فوق الذکر، نم ویژه در مقیاس افقی گسترده‌تری از دریای خزر



شکل ۷: وضعیت متوسط دمای سطح زمین (°C) تفاضل گیری شده بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع. (a) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط.

(منبع: نگارندگان)



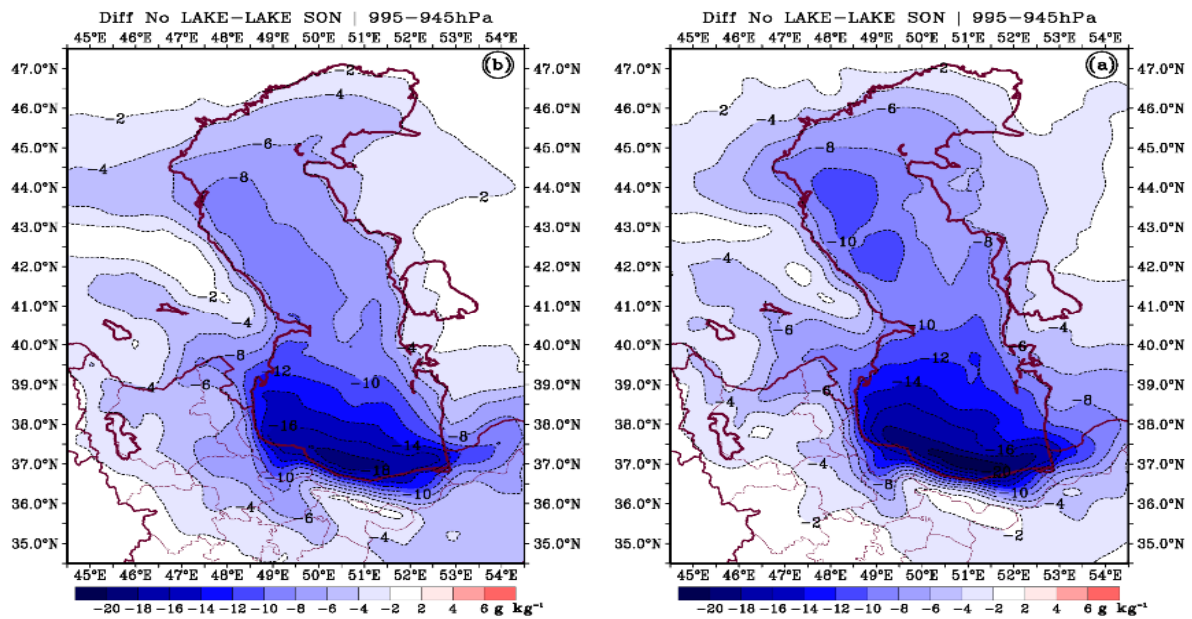
شکل ۸: وضعیت متوسط میزان تبخیر از سطح دریا (Kg/m<sup>2</sup>)، تفاضل گیری شده بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع. (a) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط.

(منبع: نگارندگان)

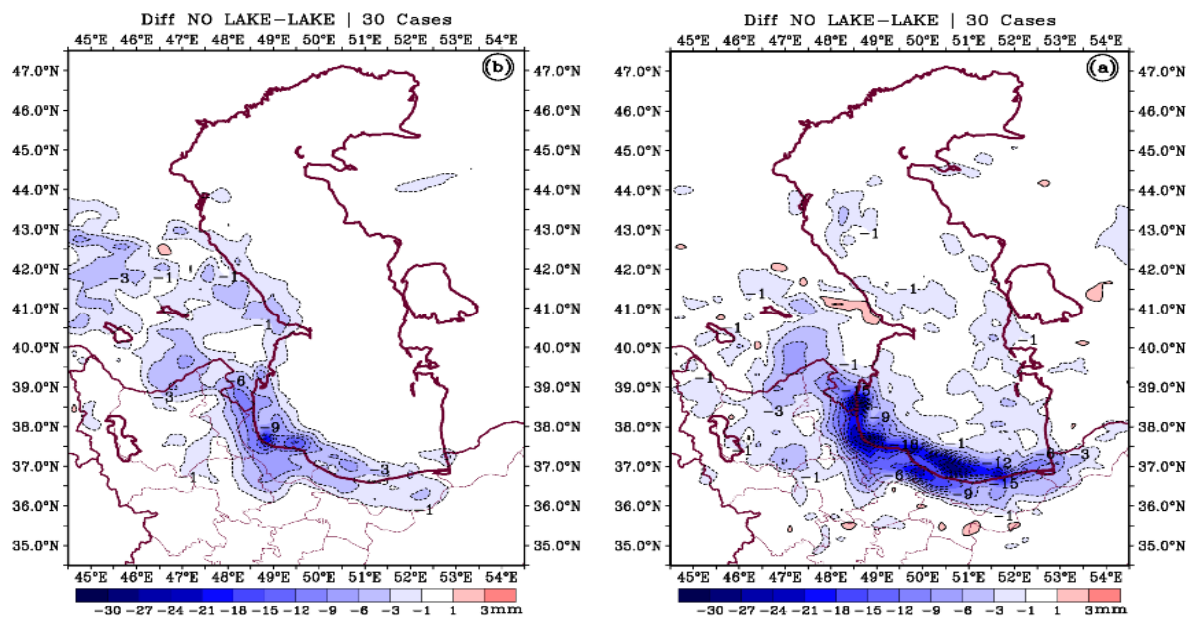
✓ بارش

شکل ۱۰ وضعیت متوسط بارش حاصل از تفاضل‌گیری بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع را در زمان وقوع بادهای شمالی شدید و کم شدت نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۰-a و ۱۰-b به وضوح بیانگر آن هستند که مقدار بارش و الگوی فضایی توزیع آن در سواحل جنوبی دریای خزر با تغییرات شدت باد بر روی این دریا در ارتباط است. به طوری که با افزایش شدت باد بر روی

دریا، بر شدت و گستردگی وقوع بارش در مناطق واقع در جنوب، جنوب غرب و غرب دریا افزوده می‌شود. نتیجه کلی آن که، با حذف دریای خزر یک کاهش عمومی در مقادیر بارش مناطق واقع در قطعات‌های جنوبی و غربی دریا به وقوع خواهد پیوست. بیشینه کاهش در سواحل جنوبی دریای خزر و در حدفاصل سواحل مرکزی مازندران تا آستارا مشاهده می‌گردد.



شکل ۹: وضعیت متوسط نم و ویژه (g/kg) تفاضل‌گیری شده بین شرایط حذف دریای خزر و شرایط مرجع. (a) وضعیت متوسط نم و ویژه در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط نم و ویژه در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط. (منبع: نگارندگان)



شکل ۱۰: وضعیت متوسط بارش (mm) تفاضل‌گیری شده بین شرایط حذف دریا و شرایط مرجع. (a) وضعیت متوسط بارش در زمان وقوع بادهای شمالی شدید. (b) وضعیت متوسط بارش در زمان وقوع بادهای شمالی با شدت متوسط. (منبع: نگارندگان)

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه نحوه تأثیر دریای خزر بر بارش‌های منطقه‌ای با استفاده از مدل اقلیمی RegCM4 جفت شده با مدل دریاچه مورد بررسی قرار گرفت. بررسی انجام شده نتایج زیر را در پی داشته است:

- یافته‌های مدل‌سازی بارش فصلی برای سواحل جنوبی دریای خزر نشان می‌دهد که با تفاضل‌گیری شرایط حذف دریای خزر از شرایط مرجع، بارش به شکل کمربند پیوسته‌ای در تمامی مناطق واقع در حاشیه جنوبی دریای خزر از آستارا تا شرق گرگان و ارتفاعات تالش و البرز کاهش پیدا می‌کند.

- نتایج بیانگر آن است که وجود دریای خزر بیش از هر جایی بر ویژگی‌های بارشی سواحل جنوبی آن تأثیرگذار است؛ چرا که بیشترین میزان کاهش بارش پس از حذف دریای خزر مربوط به ساحل جنوبی آن است. همچنین میزان تأثیرگذاری دریای خزر بنا به فصل سال متفاوت است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که دریای خزر بیشترین میزان تأثیر منطقه‌ای خود را به ترتیب در فصول پاییز و زمستان بر مناطق اطراف خود بر جای می‌گذارد. در مقابل، نقش منطقه‌ای دریای خزر در فصل بهار و تابستان به حداقل میزان خود می‌رسد. در عین حال، در صورت حذف دریای خزر مناطق واقع در محدوده سواحل جنوب غرب و جنوب دریا بیش از هر جای دیگر با کاهش بارش مواجه خواهند شد.

- یافته‌های تحقیق همچنین مبین آن است که مناطق واقع در جانب شمالی و شرقی دریای خزر، تفاوت محسوس و قابل‌ذکری را در صورت حذف دریای خزر در بارش‌های خود تجربه نخواهند نمود. مشاهده بیشینه تأثیر دریای خزر بر بارش‌های سواحل جنوبی و جنوب غربی و کمینه تأثیر بر سواحل شمالی و شرقی، حکایت از آن دارد که میزان تأثیرگذاری منطقه‌ای دریای خزر بیش از هر چیزی با رژیم باد در مقیاس منطقه‌ای در ارتباط است. بر این اساس استقرار جریانات شمالی و تغییرات شدت آن، بیشترین تأثیر منطقه‌ای دریا را بر بارش‌های سواحل جنوبی و جنوب غربی به همراه دارد.

- به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی، بارش ماهانه ایستگاه رشت با بارش خروجی مدل مقایسه شد. نتایج نشان دهنده آن است که به‌طور کلی مدل مقدار و روند بارش‌های ماهانه را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. اگر چه مدل برای ماه‌های پاییزی و برخی از ماه‌های بهاری به ترتیب اریب‌های منفی و مثبت کوچکی را نشان می‌دهد، اما در کل، نتایج قابل قبول بوده و در واقع مدل RegCM4 توانسته است روند و مقدار بارش‌های ماهانه را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

- نتایج شبیه‌سازی انجام شده بیانگر آن است که بارش و توزیع فضایی آن در منطقه خزری به‌طور آشکاری از وضعیت جریان هوا بر روی دریای خزر تبعیت می‌نماید. نتایج بررسی خصوصیات فیزیکی دریای خزر در زمان وقوع بادهای شدید و متوسط پاییزه، نشان می‌دهد که تغییرات شدت باد شمالی از طریق تغییر در برهمکنش فیزیکی بین دریا و هوا، میزان نقش و تأثیر فیزیکی دریای خزر را تغییر می‌دهد. به عبارتی حذف دریای خزر در زمان تسلط بادهای شمالی شدید، اثرات منطقه‌ای گسترده‌تری را در قیاس با زمان تسلط بادهای با شدت کمتر به همراه خواهد داشت. یافته‌ها نشان دهنده آن است که حذف دریای خزر، با کاهش شدت باد شمالی، شارگرمای محسوس، دمای سطح زمین، تبخیر از سطح دریا و در نهایت کاهش مقادیر نم و یخه و بارش همراه خواهد بود. نتیجه کلی این که هر چقدر شدت باد شمالی در ترازهای زیرین جو بر روی دریای خزر کاهش یابد، میزان تأثیرگذاری منطقه‌ای دریای خزر نیز کاهش خواهد یافت.

## منابع

- باباییان، ایمان؛ کریمیان، مریم؛ مدیریان، راحله؛ حبیبی نوخندان، مجید (۱۳۸۶). شبیه‌سازی بارش ماه‌های سرد سال ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ با استفاده از مدل اقلیمی RegCM، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۵۵، صص ۷۲-۵۵.
- براتی، غلامرضا؛ عاشوری، فاطمه (۱۳۸۶). طراحی الگوهای هم‌مدیدی شدیدترین بادهای کرانه‌های جنوبی دریای خزر (سال‌های ۱۳۶۸-۱۳۶۶)، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۲، صص ۸۰-۶۲.
- جان‌بازقبادی، غلامرضا؛ مفیدی، عباس؛ زرین، آذر (۱۳۹۰). شناسایی

- (2011). Regional Climatic Model RegCM User Manual version 4.1, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 32 pp.
- Giorgi, F; Coppola, E; Solmon, F; Mariotti, L; Sylla, M. B; Bi, X; Elguindi, N; Diro, G. T; Nair, V; Giuliani, G; Turuncoglu, U. U; Cozzini, S; Guttler, I; O'Brien, T.A; Tawfik, A.B; Shalaby, A; Zakey, A.S; Steiner, A.L; Stordal, F; Sloan, L.C; Brankovic, C (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains, *Climate Res.*, 52, 7-29. Doi:10.3354/cr01018.
- Hostetler, S.W; and Bartlein, P.J (1990). Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon, *Water Resour. Res.*, 26, 2603-2612.
- Hostetler, S.W; Bates, G.T; Giorgi, F (1993). Interactive coupling of a lake thermal model with a regional climate model, *J. Geophys. Res.* 98, 5045-5057.
- Kalnay, E; Kanamitsu, M; Kistler, R; Collins, W; Deaven, D; Gandin, L; Iredell, M; Saha, S; White, G; Woollen, J; Zhu, Y; Leetmaa, A; Reynolds, R; Chelliah, M; Ebisuzaki, W; Higgins, W; Janowiak, J; Mo, K.C; Ropelewski, C; Wang, J; Jenne, R; and Joseph, D (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Notaro, M; Holman, K; Zarrin, A; Fluck, E; Vavrus, E; and Bennington, V (2013a). Influence of the Laurentian Great Lakes on Regional Climate, *J. Climate*, 26, 789-804. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00140.1>
- Notaro, M; Zarrin, A; Vavrus, E; and Bennington, V (2013b). Simulation of Heavy Lake-Effect Snowstorms across the Great Lakes Basin by RegCM4: Synoptic Climatology and Variability, *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1990-2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-11-00369.1>
- Pal, J.S; Giorgi, F; Bi, X; Elguindi, N; Solmon, F; Rauscher, S.A; Gao, X; Francisco, R; Zakey, A; Winter, J; Ashfaq, M; Syed, F.S; Sloan, L.C; Bell, J.L; Diffenbaugh, N.S; Karmacharya, J; Konaré, A; Martinez, D; da Rocha, R.P; and Steiner, A.L (2007). Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCM4, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1395-1409.
- Reynolds, R.W; Rayner, N.C; Smith, T.M; Stokes, D.C; Wang, W (2002). An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate, *J. Climate*, 15, 1609-1625.
- Small, E; Sloan, LC; Hostetler, S; Giorgi, F (1999). Simulating the water balance of the Aral Sea with a coupled regional climate-lake model, *J. Geophys. Res.*, 104 (D6), 6583-6602.
- Vavrus, S; Notaro, M; Zarrin, A (2013b). The Role of Ice Cover in Heavy Lake-Effect Snowstorms over the Great Lakes Basin as Simulated by RegCM4. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 148-165. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-12-00107.1>
- الگوهای هم‌دید بارش‌های شدید زمستانه در سواحل جنوبی دریای خزر، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، شماره ۲۲ (۲)، صص ۳۳-۴۰.
- خلیلی، علی (۱۳۵۰). منشأ بارندگی کرانه‌های خزری، نیوار، شماره فروردین، صص ۳۹-۴۶.
- خوشحال‌دستجردی، جواد (۱۳۷۶). تحلیل و ارائه مدل‌های سینوپتیک کليما تولوژی برای بارش‌های بیش از صد میلیمتر در سواحل جنوبی دریای خزر، رساله دکتری جغرافیای طبیعی، استاد راهنما دکتر هوشنگ قائمی، دانشگاه تربیت مدرس.
- سلطانزاده، ایمان؛ احمدی گیوی، فرهنگ؛ ایران نژاد، پرویز (۱۳۸۶). بررسی سه ماه تأثیر رشته کوه‌های زاگرس بر جریان‌های میان مقیاس منطقه شرق زاگرس با استفاده از مدل منطقه RegCM، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳۳ (۱)، صص ۳۱-۵۰.
- علیجانی، بهلول (۱۳۷۲). مکانیزم صعود و بارندگی ایران، *مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تربیت معلم*، دوره جدید (۱)، صص ۸۵-۱۰۱.
- قشقایی، قاسم (۱۳۷۵). بررسی اثر فرابار سیبری بر بارش‌های پیئیزی سواحل جنوبی خزر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، استاد راهنما دکتر بهلول علیجانی، دانشگاه تربیت معلم.
- مرادی، حمیدرضا (۱۳۸۳). نقش دریای خزر در شرایط بارشی سواحل شمال کشور، *مجله علوم و فنون دریایی ایران*، دوره دوم ۲-۳، صص ۷۷-۸۸.
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر؛ جانبازقبادی، غلامرضا (۱۳۸۶). تعیین الگوی هم‌دید بارش‌های شدید وحده پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳۳ (۳)، صص ۱۵۴-۱۳۱.
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر؛ جانبازقبادی، غلامرضا (۱۳۹۱). تبیین علل کاهش یافتن مقدار و شدت بارش‌های زمستانه در قیاس با بارش‌های پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳۸ (۱)، صص ۲۰۳-۱۷۷.
- یوسفی، حسن (۱۳۸۲). زمانبندی ورود پرفشار سیبری به سواحل جنوبی دریای خزر و تأثیر سینوپتیکی آن بر بارش‌های پاییزی منطقه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی (گرایش اقلیم‌شناسی)، استاد راهنما دکتر قاسم عزیزی، دانشگاه تهران.
- Bozkurt, D; Lutfi sen, D (2011). Precipitation in the Anatolian peninsula: Sensivity to increased SST in the surrounding seas. *Climate Dyn.*, 36, 711-726.
- Elguindi, N; Bi, X; Giorgi, F; Nagarajan, B; Pal, J; Solmon, F; Rauscher, S; Zakey, A; and Giuliani, G