

پایش کم‌فشاری‌های جوی و تأثیر آن‌ها بر تراز آب دریای خزر

نگین حاتمی باورساد^۱، داریوش منصوری^{۲*}، محمدرضا خلیل‌آبادی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد اقیانوس‌شناسی فیزیکی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور neginbavarsad70@gmail.com
^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، گروه اقیانوس‌شناسی فیزیکی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور mansoury@modares.ac.ir
^۳ دکترای فیزیک دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز rezakhalilabadi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۳۰

چکیده

در این تحقیق کم‌فشاری‌های جوی، منشأ و مسیر چرخنده‌های جوی ایجادشده بر دریای خزر در سال ۲۰۱۵ بررسی می‌شود. سپس سرعت جابه‌جایی چرخنده‌های جوی و تغییرات تراز آب ناشی از کم‌فشاری جوی و باد در فصل‌های مختلف سال تحلیل می‌شود. در این تحقیق از داده‌های تراز ثبت‌شده در ایستگاه‌های بندر امیرآباد، بندرانزلی، فریدون‌کنار و نیز داده‌های میانگین فشار تراز آب و باد از سایت ECMWF با گام زمانی ۶ ساعته و دقت ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی استفاده گردید و برای سال ۲۰۱۵ داده‌های تراز آب با داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌ها، صحت‌سنجی شده و سپس منشأ و سرعت جابه‌جایی چرخنده‌های جوی و تراز آب ناشی از کم‌فشاری جوی و باد بررسی شده است. از نتایج این تحقیق می‌توان به تغییرات غالب تراز آب در مناطق شرقی خزر جنوبی ناشی از کم‌فشاری جوی و در مناطق غربی این حوضه، ناشی از باد اشاره کرد. به‌عنوان نمونه در ۱۶ آگوست در ایستگاه انزلی تغییرات تراز ناشی از کم‌فشاری جوی و باد به ترتیب ۱/۶ و ۲/۴ سانتی‌متر و در ۵ آوریل در ایستگاه امیرآباد این مقادیر به ترتیب ۱/۵ و ۰/۵ سانتی‌متر است. همچنین می‌توان به منشأ کم‌فشاری‌های جوی در ماه‌های فوریه و می از مناطق شمال‌غربی خزر و در ماه‌های آگوست و نوامبر از غرب و جنوب‌غربی این حوضه اشاره کرد. سرعت جابه‌جایی چرخند جوی در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب ۱۵/۸، ۵/۳، ۳ و ۹/۸ متر بر ثانیه است.

واژه‌های کلیدی: تراز آب، کم‌فشار جوی، باد، دریای خزر

۱. مقدمه

سمت نواحی اطراف به‌سوی ناحیه کم‌فشار آغاز شود، آنگاه به چنین حرکت هوایی، چرخند یا سیکلون گفته می‌شود. بدیهی است که در چنین شرایطی، حرکت هوا به سمت مرکز چرخند تحت تأثیر نیروی کریولیس قرار خواهد گرفت [۲]. مراکز فشاری با توجه به ماهیت و علت اصلی شکل‌گیری، به دو دسته حرارتی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. مراکز فشار حرارتی تابع شدت تابش خورشید و به دنبال آن تابع عرض جغرافیایی و فصل سال هستند. به همین دلیل مراکز پرفشار حرارتی در عرض‌های بالا و در دوره سرد سال تشکیل شده، درحالی‌که مراکز کم‌فشار حرارتی در عرض‌های پایین و

آشفته‌گی سطح تراز دریا به هنگام عبور چرخند جوی معلول دو علت است. علت اول شدت وزش بادهای است که با وارد کردن تنش بر سطح آب باعث انتقال تکانه به سطح آب شده و علت دوم، تغییرات فشار هواست که باعث آشفته‌گی سطح تراز دریا می‌شود. این اثر که اغلب با عنوان «اثر وارونگی فشار» شناخته می‌شود، با توجه به رابطه فشار هیدروستاتیک بیان می‌کند که به ازای هر میلی بار افت/افزایش فشار هوا روی سطح دریا، ارتفاع سطح آب یک سانتی‌متر افزایش/کاهش می‌یابد [۱]. اگر در یک منطقه، فشار هوا در آن ناحیه کاهش یافته باشد و حرکت هوا از

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دریای خزر است. این دریا بین دو قاره آسیا و اروپا واقع شده است و در عرض جغرافیایی 35° تا 48° شمالی و طول جغرافیایی 46° تا 55° شرقی قرار گرفته است، به طوری که از سوی کشورهای جمهوری اسلامی ایران، ترکمنستان، قزاقستان، روسیه و جمهوری آذربایجان احاطه شده است. با توجه به شکل ۱ دریای خزر را می توان بر اساس شرایط فیزیکی، جغرافیایی و توپوگرافی به سه بخش تقسیم کرد [۵]: خزر شمالی (NCB^۲)، خزر میانی (MCB^۳) و خزر جنوبی (SCB^۴). مساحت خزر شمالی، ۸۰۰۰۰ کیلومتر مربع است. حجم آبی در حدود ۴۰۰ کیلومتر مکعب، کمتر از ۱٪ حجم کل آب خزر در این بخش قرار دارد و میانگین عمق آن ۵ متر و بیشینه عمق آن ۱۵ متر است. خزر میانی مساحتی در حدود ۱۳۸۰۰۰ کیلومتر مربع دارد. حجم آب در این بخش ۲۶۵۰۰ کیلومتر مکعب است که ۳۳/۹٪ از حجم کل آب دریا در این بخش قرار دارد. محدوده خزر جنوبی، مرز جنوبی خزر میانی تا کرانه های ساحل ایران است. مساحت این حوضه در حدود ۱۶۸۰۰۰ کیلومتر مربع است. عمیق ترین نقطه دریای خزر در این حوضه است. بیش ترین عمق در این قسمت ۱۰۲۵ متر و متوسط آن ۳۲۵ متر است [۶]. از مطالعات انجام شده در این زمینه می توان به تأثیر عبور چرخندهای هواشناسی بر نوسانات سطح آب در کانال قشم اشاره کرد. در این مطالعه داده های تراز آب از سازمان نقشه برداری ایران و داده های هواشناسی از سازمان هواشناسی گرفته شد، سپس با استفاده از نرم افزار تسک^۵ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از نتایج آن می توان به یک تا دو روزه بودن دوره تناوب خیزاب چرخند جوی در کانال قشم اشاره کرد. همچنین بررسی های آماری نشان می دهند که کانال قشم بیشتر تحت تأثیر چرخندهایی قرار می گیرد که از جنوب یا جنوب شرق وارد منطقه می شوند که این چرخندها با حرکت به سمت شمال ضعیف می شوند. چرخندهایی که از سمت شمال غرب وارد خلیج فارس می شوند به ندرت به تنگه هرمز و کانال قشم می رسند [۷]. همچنین در تحقیقی دیگر بررسی اثرات پدیده های هواشناسی بر تراز آب در شمال غربی خلیج فارس مورد مطالعه قرار گرفت که تجزیه و تحلیل داده های تراز سطح دریا، گرفته شده

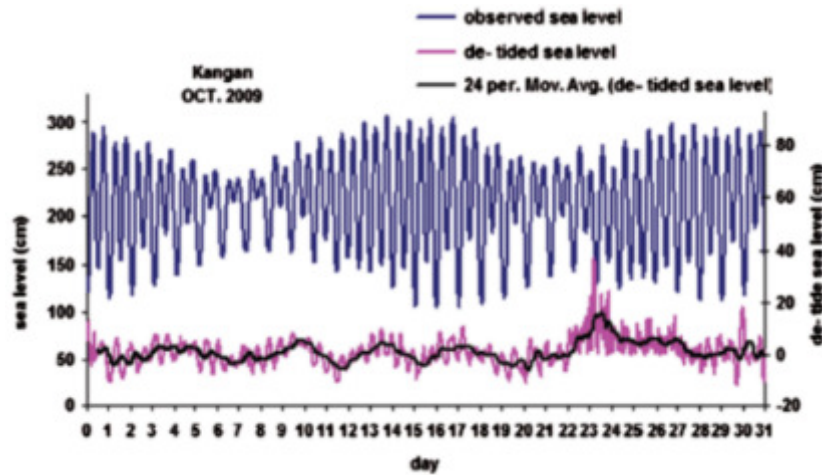
اغلب در دوره گرم سال مشاهده می شوند. به عبارت دیگر؛ این مراکز فشار ریشه در خصوصیات حرارتی زمین دارند و به نسبت فاصله از سطح زمین، از شدت آن ها کاسته می شود و در نهایت در ارتفاع تقریباً ۱۵۰۰ متری از سطح زمین محو می شوند. مراکز فشار دینامیکی، مراکزی هستند که در ایجاد آن ها برخلاف مراکز فشار حرارتی، توزیع دمایی روی کره زمین به عنوان عامل غیرمستقیم دخالت دارد. این مراکز فشاری از الگوی گردش جوی تبعیت می کنند و در ارتباط با گردش هوا در ترازهای بالای تروپوسفر در مقیاس های زمانی روزانه تا سالانه شکل می گیرند [۳]. تراز آب در محیط های مختلف آبی، مانند اقیانوس ها، دریاها، دریاچه ها، خلیج ها، خورها، رودخانه ها، مناطق دور از ساحل و نزدیک به ساحل، به دلیل رویداد پدیده های مختلف دائماً در حال تغییر است. این پدیده ها که بیشتر ماهیت موجی دارند، تحت تأثیر عوامل گوناگون متشکل از یک یا چند نیروی مولد - که منشأ نجومی، هواشناسی و زمین شناسی دارند - یک یا چند نیروی تداوم بخش مانند کشش سطحی، گرانی و کریولیس، یک یا چند نیروی بازدارنده (اصطکاک بستر، جانبی و درونی) و شرایط جغرافیایی حوضه (شکل، توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی) شکل می گیرند [۴].



شکل ۱. مشخصات جغرافیایی دریای خزر [۶]

که بخش شمال غربی خلیج فارس بیشترین تأثیرپذیری را از نوسانات غیر جزرومدی دارد. همچنین با مقایسه گزارش‌های دو ایستگاه بندرعباس و کنگان می‌توان به تأثیر بالای نوسانات غیر جزرومدی اشاره کرد [۸].

از ایستگاه‌های کنگان (به صورت نیم‌ساعته) نشان داد که در ماه اکتبر (سال ۲۰۰۹) نوسانات غیر جزرومدی مشاهده می‌شود (شکل ۲). در این تحقیق با بررسی پدیده‌های هواشناسی در ۱۶-۱۷ و ۲۴-۲۵ اکتبر این نتیجه حاصل شد



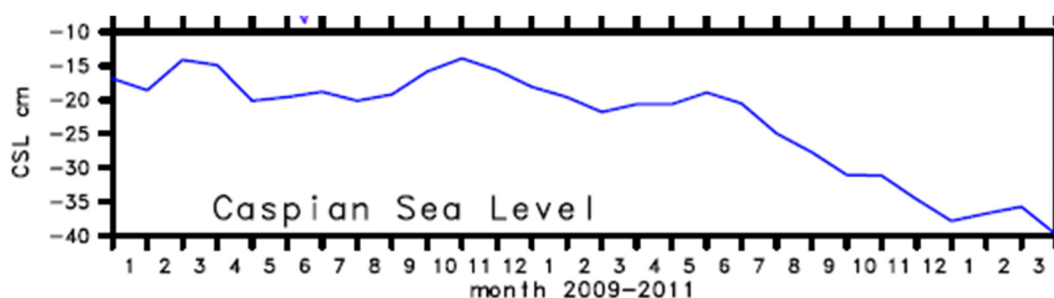
شکل ۲. مقایسه نوسانات غیر جزر و مدی و مشاهده ای برای ایستگاه کنگان در ماه اکتبر سال ۲۰۰۹ [۸]

بررسی بارش و تبخیر رودخانه ولگا و اثر آن روی تراز آب دریای خزر است [۱۱]. از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به تغییرات فصلی گردش، تراز آب و برهم‌کنش هوا و دریا به وسیله ابرایو و همکارانش در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد. مدل مورد استفاده در این مطالعه مدل مش^۸ است. از نتایج این مطالعه می‌توان به جریان سه‌بعدی، تبخیر، گرمای نهان، گرمای محسوس و تغییرات تراز آب دریای خزر اشاره کرد. همچنین میانگین مجذور مربعات مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری از ۱/۴ سانتی‌متر در ایستگاه باکو به ۳ سانتی‌متر در ایستگاه کراسنودسک تغییر می‌کند [۱۲]. از مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به بررسی معادلات تراز سطح آب و کاربرد آن در دریای مدیترانه اشاره کرد که در این تحقیق شکل معادلات تراز آب دریا برای هر منطقه یا هر حوضه بسته یا اقیانوسی، بر اساس معادله‌های بقای جرم با اثر تراکم‌پذیری و معادله حالت در نظر گرفته شده است. معادله‌های میانگین تراز آب دریا (ام.اس.ال.ای)^۹ شامل ترم شناوری شاره و جرم شاره است که روی حرکت‌های سطحی تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه ام.اس.ال.ای برای مدت ده سال از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸ برای دریای مدیترانه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه

اقتصادی و زاهدی در سال ۱۳۹۰ به مطالعه عوامل تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب خزر جنوبی پرداخت. در این تحقیق چگونگی تغییرات تراز دریا با استفاده از اطلاعات پارامترهای بارندگی، تبخیر و دما مشخص و برای پنج ایستگاه ساحل شمال ایران شامل بابلسر، رامسر، نوشهر، آستارا و انزلی مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج این مطالعه می‌توان به کاهش دما و تبخیر در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ و افزایش دما و تبخیر در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ اشاره کرد [۹].

همچنین در تحقیقی دیگر سلطان^۶ و همکارانش در سال ۱۹۹۵ طی یک دوره ۱۱ ساله در سواحل جنوبی خلیج فارس تغییر تراز میانگین دریا را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها دامنه مؤلفه سالانه تغییرات تراز میانگین سطح دریا ۱۱/۳ سانتی‌متر است و وابستگی تراز دریا به چگالی، دما کم و سهم عمده تغییرات تراز دریا ناشی از فشار هواست [۱۰]. از دیگر مطالعات انجام‌شده می‌توان به تغییر تراز آب دریای خزر بر اثر گردش‌های جوی با استفاده از مدل ام.پی.آی.ام^۷ به وسیله آرپه و لروی در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به نقش مهم بارش در فصل تابستان بر تراز آب دریای خزر اشاره کرد. همچنین از سایر نتایج این تحقیق

شدید اروپایی روسیه بر دریای خزر انجام پذیرفت. شکل ۳ میانگین ماهانه تغییرات تراز آب دریای خزر را برای سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ نشان می‌دهد؛ که با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که سطح تراز آب در حال کاهش است (اعداد تراز در این نمودار باید به عدد ۲۷- اضافه شود). همچنین از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به افت بارش در ماه ژوئیه سال ۲۰۱۰ در منطقه رودخانه ولگا اشاره نمود که باعث افزایش تبخیر در این منطقه و کاهش تراز آب دریای خزر می‌شود [۱۴].



شکل ۳. میانگین ماهانه تغییرات تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ [۱۴]

۲. مواد و روش‌ها

داده‌های باد و فشار هوا از سایت ECMWF^۱ که از سوی مرکز مطالعات پیش‌بینی آب‌وهوای اروپا تهیه و تنظیم شده، برای سال ۲۰۱۵ با مقیاس مکانی ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی و گام زمانی ۶ ساعته دریافت شد. داده‌های فشار هوا از سایت ECMWF، مربوط به ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال است، بنابراین مراکز فشار در این تحقیق از نوع فشار دینامیکی هستند. همچنین داده‌های تغییرات تراز آب دریای خزر نیز از داده‌های ثبت‌شده در طول سواحل دریای خزر در ایستگاه‌های انزلی، فریدون‌کنار و امیرآباد از مرکز تحقیقات آب دریای خزر گردآوری شد. برای ترسیم و تحلیل این داده‌ها، از نرم‌افزار پای فررت^{۱۱} استفاده شده است. پای فررت محیطی برای تجزیه و تحلیل مجموعه‌ای از داده‌ها که حجم بسیار بالا و پیچیده‌ای دارند، طراحی شده است. این نرم‌افزار بیشتر برای نیازهای اقیانوس‌شناسان و هواشناسان طراحی و تولید شده است. این برنامه روی سیستم عامل‌های یونیکس و مک نیز اجرا شده است. نرم‌افزار پای فررت در سال ۲۰۱۲ به

تغییرات آنومالی چگالی کوچک‌تر از مقدار ثابت چگالی و معادله حالت برای چگالی به صورت خطی و با ضریب ثابت در نظر گرفته شد، این نتیجه حاصل شد که مقدار ام.اس.ال.ای به دست آمده از منطقه در مدل شبیه‌سازی شده بیانگر ۳-۲ سانتی‌متر خطا در مقادیر ام.اس.ال.ای است [۱۳].

همچنین، خشک‌سالی سال ۲۰۱۰ روسیه بر تراز آب دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق به مطالعه هیدرولوژیکی دریای خزر و رودخانه ولگا پرداخته شد. این مطالعه برای دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۰ و با تأکید بر خشک‌سالی

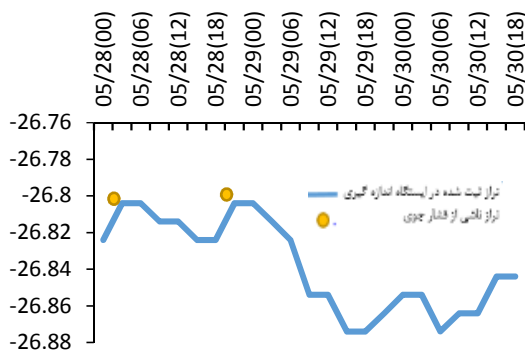
از مطالعاتی که اخیراً در زمینه تراز آب دریای خزر صورت گرفته می‌توان به اندازه‌گیری بلندمدت و فصلی تراز آب دریای خزر با استفاده از ماهواره و اندازه‌گیری ارتفاع‌سنجی توسط چن و همکارانش در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد. در این مطالعه با ثبت داده‌های ارتفاع‌سنجی برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ مشاهده می‌شود که سطح تراز آب با نرخ در حدود ۲۰ برابر از سطح آب‌های جهانی پایین‌تر بوده، همچنین نوسانات فصلی نیز از میانگین تراز آب‌های آزاد بیشتر است [۱۵]. تغییرات سطح دریا ناشی از عوامل متفاوتی است که بعضی از آن‌ها مانند ال‌نینو و لائینو می‌توانند اثرات مهمی بر آب‌وهوای کره زمین و شرایط زیست‌محیطی آن بگذارند. این پدیده‌ها به نوبه خود زندگی مردم را به شدت تهدید می‌کنند. بنابراین دیده‌بانی سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها می‌تواند بشر را از بروز چنین پدیده‌هایی باخبر سازد تا آمادگی مقابله با آن‌ها را به دست آورد و خود را از خطرهای احتمالی نجات بخشد.

۳. نتایج و بحث

در این تحقیق با توجه به اینکه مطالعه تغییرات تراز آب به صورت کوتاه‌مدت مورد مطالعه قرار گرفته است؛ بنابراین از سایر عوامل که کمترین تأثیرگذاری را در کوتاه‌مدت روی تراز آب دارند، شامل دبی رودخانه‌ها، تبخیر، بارندگی و ... صرف نظر شده و به دو عامل اصلی باد و میانگین فشار تراز آب پرداخته شده است. پس از گرفتن داده‌های باد و میانگین فشار تراز آب دریای خزر از سایت و رسم شکل‌ها برای سال ۲۰۱۵ پارامترهایی از جمله تعداد وقوع کم‌فشاری جوی به صورت فصلی، مکان کم‌فشاری‌های جوی، منشأ و مسیر حرکت چرخند جوی و اثر کم‌فشاری‌های جوی و باد بر روی تراز آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳-۱ اعتبارسنجی داده‌ها

برای اعتبارسنجی مقایسه‌ای بین کم‌فشاری‌های جوی و تراز ایستگاه موردنظر در زمان کم‌فشاری جوی نیز انجام شد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار تراز آب دریا را برای روزهای قبل و بعد از وقوع کم‌فشاری جوی در ماه‌های می (ایستگاه انزلی) و نوامبر (ایستگاه فریدون‌کنار) را نشان می‌دهند.



شکل ۴. تغییرات تراز آب دریای خزر برای روزهای ۲۸ تا ۳۰ می در ایستگاه انزلی

نقاط نارنجی‌رنگ مشخص شده روی نمودارها زمان وقوع کم‌فشاری جوی را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۷ با شکل ۴ مشاهده می‌شود که در روز ۲۹ مه (ساعت ۱۸) در ایستگاه انزلی کم‌فشاری جوی رخ می‌دهد؛ که در روز ۲۹ مه تغییر تراز ناشی از فشار هوا و باد به ترتیب ۱ و ۴ سانتی‌متر است. همچنین با توجه به شکل ۹ (ب) و ۴ برای ایستگاه فریدون‌کنار

نسخه پای فررت بر اساس برنامه پایتون توسعه یافت [۱۶]. داده‌ها با قالب‌های نت‌سی‌دی اف^۲، ASCII و binary در این نرم‌افزار قابل اجرا هستند [۱۷]. با استفاده از داده‌های باد و فشار هوای اخذ شده از بانک داده‌های ECMWF، شکل‌های توزیع باد و میانگین فشار سطحی مربوط به دریای خزر برای مدت یک سال به صورت ۶ ساعته رسم شد. همچنین برای ترسیم مناطقی که در آن کم‌فشاری رخ داده است از نرم‌افزار سورفر^{۱۳} استفاده به عمل آمد. سپس پارامترهایی از جمله تعداد وقوع کم‌فشاری‌های جوی به صورت فصلی، مکان کم‌فشاری‌های جوی، منشأ، مسیر حرکت، سرعت جابه‌جایی چرخند جوی و مناطقی که وقوع کم‌فشاری جوی در آن محتمل‌تر است، بررسی شد. با استفاده از سری زمانی داده‌های ثبت شده تراز آب دریای خزر در ایستگاه‌های انزلی، فریدون‌کنار و امیرآباد، میزان تغییرات تراز ناشی از کم‌فشار جوی و باد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای محاسبه تغییرات تراز ناشی از کم‌فشار جوی و باد، ابتدا در دو حالت کم‌فشاری و حالت معمول فشار هوا یادداشت شد. اختلاف فشار این دو حالت برحسب هکتوپاسکال است. با توجه به قانون هیدروستاتیکی فشار که به ازای هر یک میلی‌بار (هر میلی‌بار برابر است با یک هکتوپاسکال) کاهش فشار باعث افزایش یک سانتی‌متری تراز آب دریا می‌شود، تراز ناشی از فشار هوا محاسبه شد. همچنین برای محاسبه تغییر تراز ناشی از باد، با توجه به داده‌های موجود از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، اختلاف مقدار تراز برای دو حالت یادشده محاسبه شد. همچنین با توجه به اینکه در این مطالعه تغییرات تراز آب به صورت کوتاه‌مدت مورد مطالعه قرار گرفته است، از سایر عوامل که کمترین تأثیرگذاری را در کوتاه‌مدت بر روی تراز آب دارند، شامل دبی رودخانه‌ها، تبخیر، بارندگی و ... صرف نظر شده است؛ بنابراین با کم کردن مقدار تراز ناشی از کم‌فشاری جوی مقدار تراز باقی‌مانده را به باد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در کوتاه‌مدت بر تراز آب است، اختصاص داده شد.

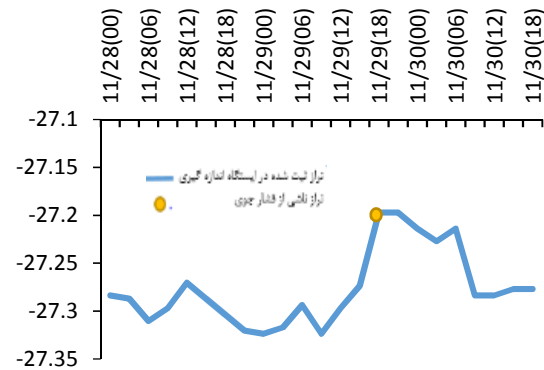
این نتیجه حاصل شد که بیشترین تعداد کم‌فشاری‌های جوی در جنوب و جنوب شرقی خزر جنوبی قرار دارند. البته در مناطق غربی خزر میانی و قسمت‌هایی از شرق حوضه شمالی نیز کم‌فشاری‌های جوی رخ می‌دهد، ولی فراوانی آنها نسبت به حوضه جنوبی بسیار کمتر است.



شکل ۷. مرکز نقاط کم‌فشاری جوی در سه حوضه دریای خزر برای سال ۲۰۱۵

از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به بررسی و مطالعه منشأ و مسیر حرکت کم‌فشاری‌های جوی بر دریای خزر برای ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر اشاره کرد. در این مطالعه ابتدا منشأ و مسیر حرکت کم‌فشاری جوی، سپس به بررسی کم‌فشاری جوی بر دریای خزر پرداخته شده است. شکل ۸ کم‌فشاری‌های جوی را برای روز ۴ فوریه (سال ۲۰۱۵) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ سیستم کم‌فشاری جوی از غرب حوضه میانی و با جهت ۱۰/۲ درجه وارد دریای خزر می‌شود که می‌توان سرعت جابه‌جایی چرخند جوی را با محاسبه مراکز دو کم‌فشاری جوی محاسبه کرد. با توجه به شکل‌های ۸ (الف) (ساعت صفر روز ۴ فوریه) و ۸

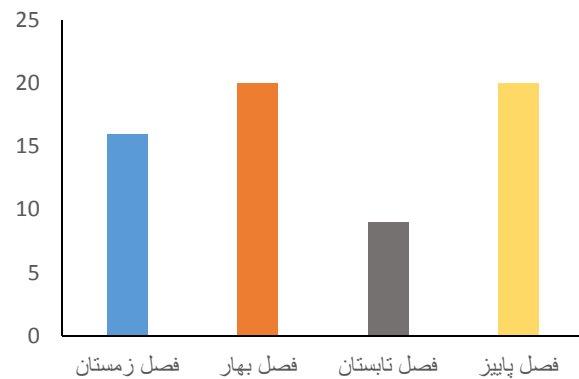
نیز در روز ۲۹ نوامبر ساعت ۱۸ کم‌فشاری جوی مشاهده می‌شود که تغییر تراز ناشی از فشار جو و باد به ترتیب ۴/۵ و ۱/۵ سانتی‌متر است.



شکل ۵. تغییرات تراز آب دریای خزر برای روزهای ۲۸ تا ۳۰ نوامبر در ایستگاه فریدونکنار

۲-۳ نتایج

شکل ۶ نمودار فصلی تعداد کم‌فشاری‌های جوی را در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که با توجه به این شکل و با بررسی زمان و مکان رخدادهای کم‌فشاری جوی این نتیجه حاصل شد که اغلب کم‌فشاری‌های جوی در فصل بهار و پاییز رخ می‌دهند.

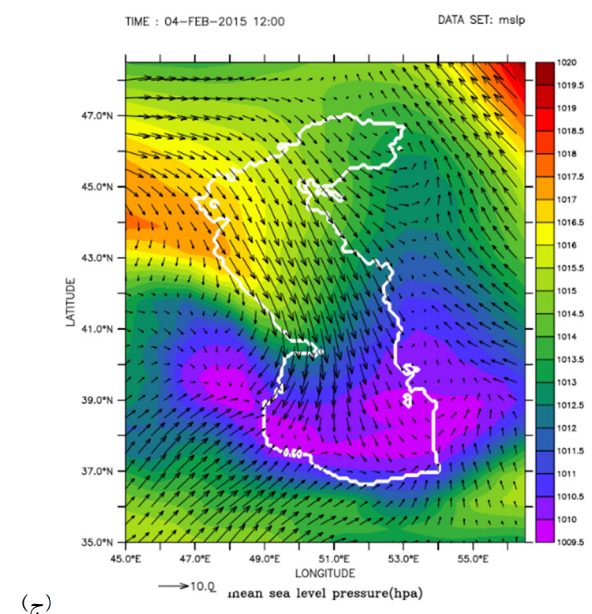
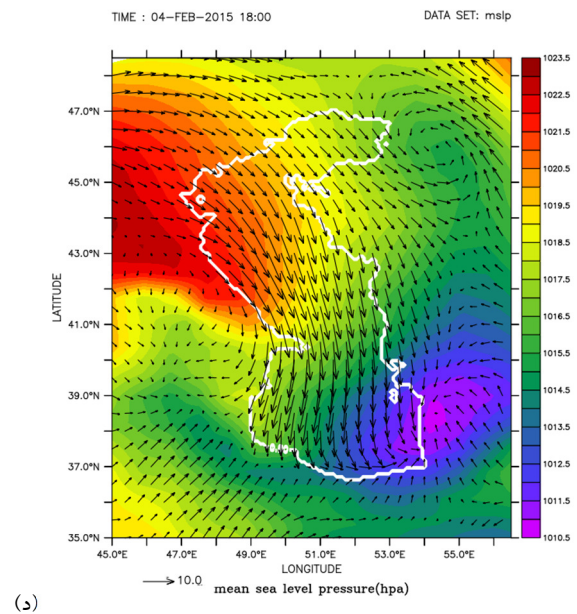
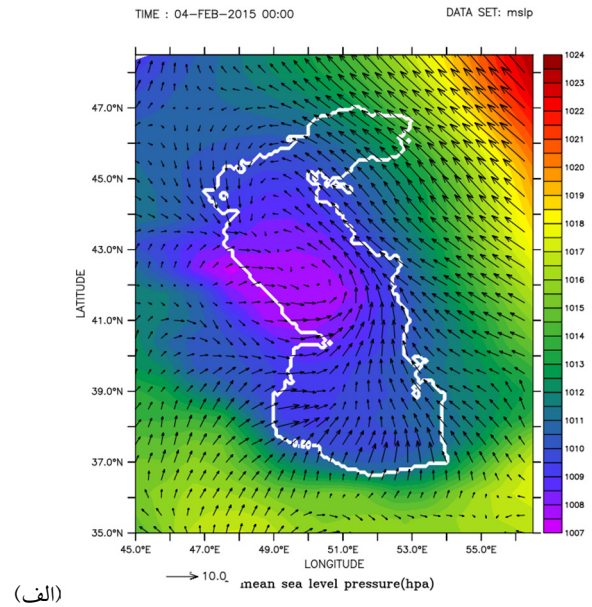
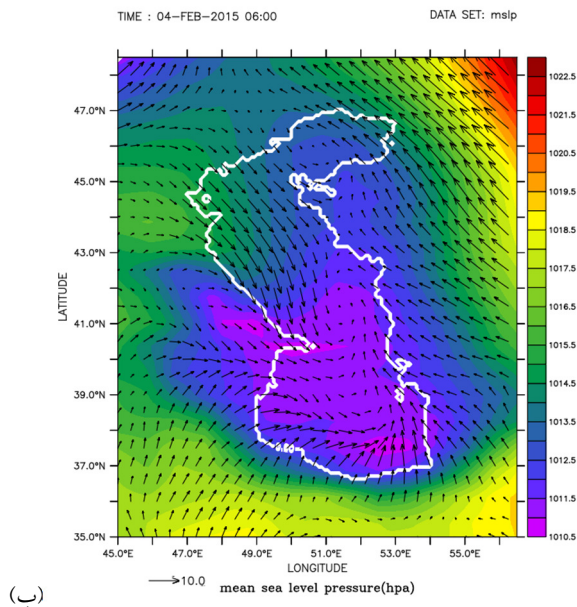


شکل ۶. نمودار فصلی تعداد کم‌فشاری‌های جوی برای سال ۲۰۱۵

مرکز نقاط کم‌فشاری جوی در هر سه حوضه دریای خزر برای سال ۲۰۱۵ با شکل ۷ نمایش داده شده است. با بررسی مناطقی که در آن کم‌فشاری‌های جوی رخ داده است و با توجه به طول و عرض جغرافیایی مراکز کم‌فشاری جوی، برای سال ۲۰۱۵ و با استفاده از نرم‌افزار سورفر، محل وقوع کم‌فشاری‌های جوی در هر سه حوضه دریای خزر رسم شد.

بیشینه مقدار کم‌فشاری جوی در جنوب شرقی و شمال غربی خزر جنوبی مشاهده می‌شود. در ساعت ۱۲ روز ۴ فوریه بر شدت سیستم کم‌فشاری جوی در خزر جنوبی افزوده شده که بیشترین تأثیر را بر سواحل جنوب غربی خزر جنوبی (سواحل انزلی و آستارا) و قسمت‌هایی از مرکز و کل سواحل شرقی دارد (شکل ۸ ج). این سیستم کم‌فشاری جوی با سرعتی در حدود ۵/۷ متر بر ثانیه و با جهت ۲۶/۵ درجه از شرق خزر جنوبی خارج می‌شود (شکل ۸ د).

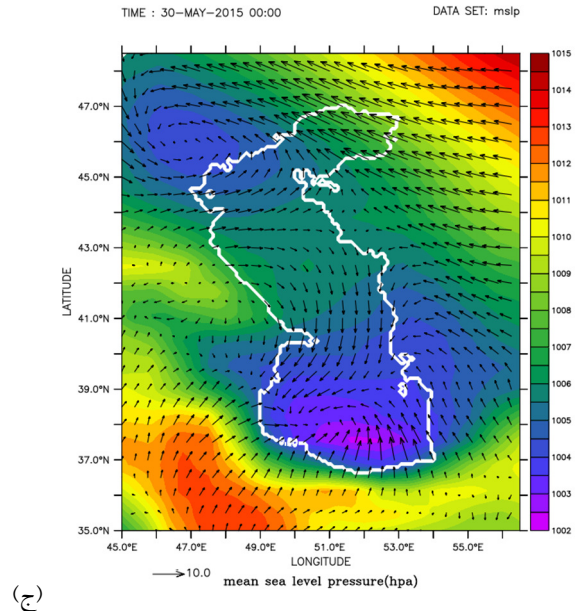
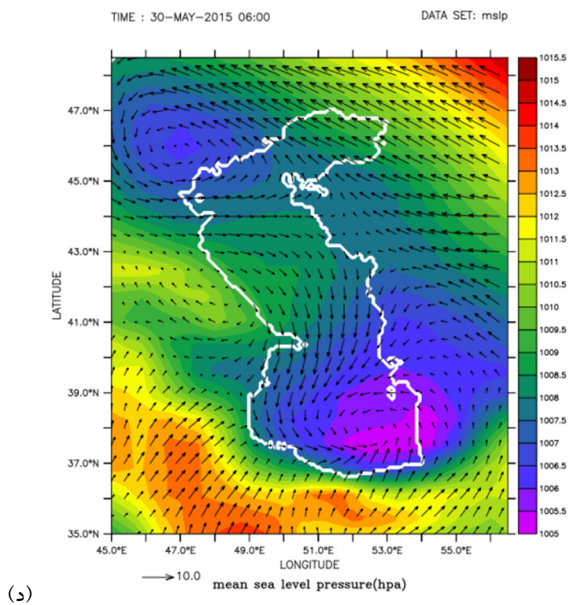
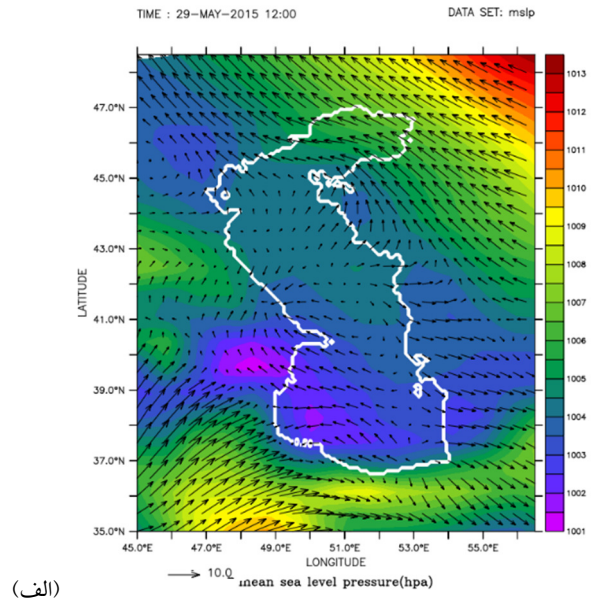
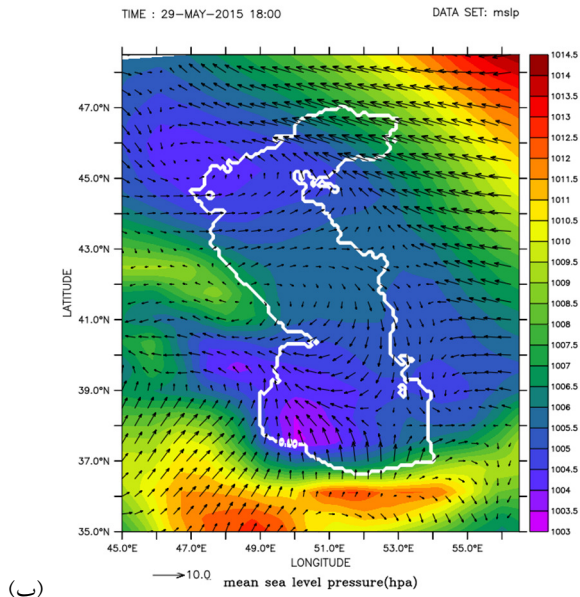
(ب) (ساعت ۶، روز ۴ فوریه) فاصله مراکز کم‌فشاری جوی ۳۴۲ کیلومتر و مدت زمان حرکت کم‌فشاری جوی نیز ۶ ساعت است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جابه‌جایی چرخند جوی ۱۵/۸ متر بر ثانیه است. این سیستم کم‌فشاری جوی در ساعت ۶ صبح روز ۴ فوریه (سال ۲۰۱۵) تمامی مناطق خزر جنوبی و قسمت‌هایی از جنوب خزر میانی را در بر می‌گیرد.



شکل ۸. سیستم کم‌فشار جوی در روز ۴ فوریه (سال ۲۰۱۵)

از گذشت ۶ ساعت سیستم کم فشاری جوی در راستای سواحل جنوبی و به سمت شرق در حرکت بوده (شکل ۹ ج) و در ساعت صفر روز ۳۰ مه مناطق مرکزی این حوضه را تحت تأثیر قرار می دهد. این سیستم کم فشاری جوی با سرعتی در حدود ۵/۳ متر بر ثانیه و با جهت ۱۶/۶ درجه به سمت نواحی شرقی در حرکت است (شکل ۹ د).

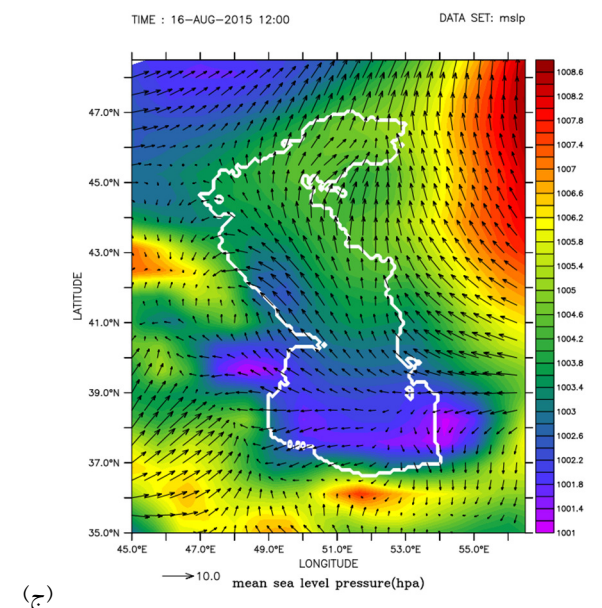
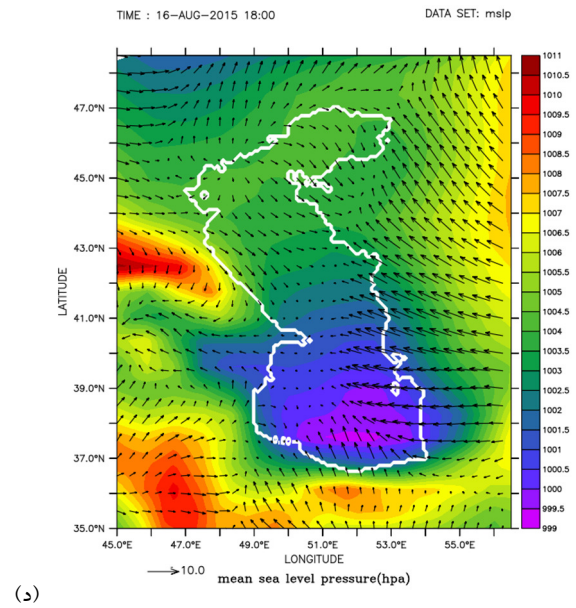
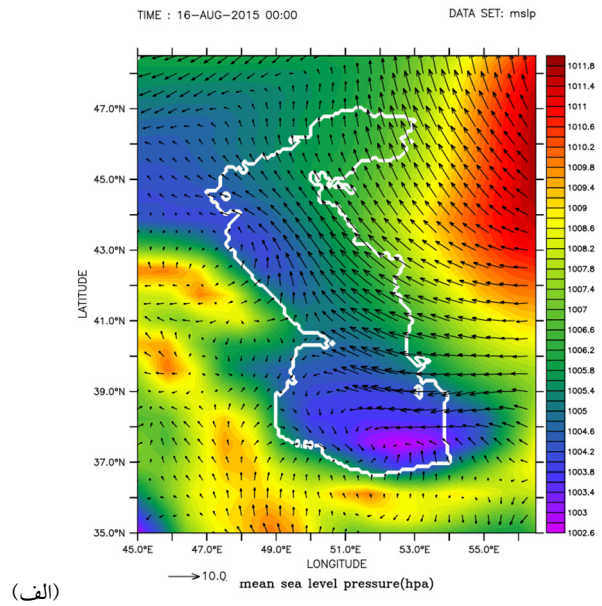
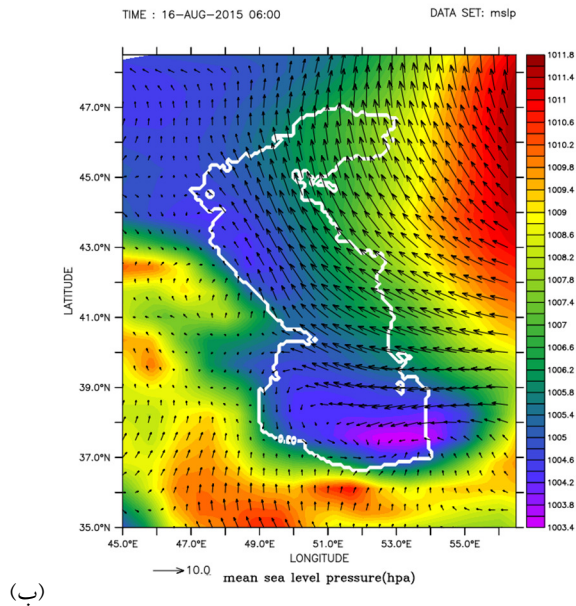
شکل ۹ کم فشارهای جوی را بر خزر جنوبی در روزهای ۲۹ و ۳۰ می سال ۲۰۱۵ را نشان می دهد. با توجه به این شکل سیستم کم فشاری جوی در ساعت ۱۲ روز ۲۹ می در خارج از مرزهای شمال غربی حوضه جنوبی در حال شکل گیری است (شکل ۹ الف). این سیستم کم فشاری جوی با سرعت ۱۱/۶ متر بر ثانیه و با جهت ۴۸/۴ درجه به سمت نواحی جنوب غربی خزر جنوبی در حرکت است (شکل ۹ ب). پس



شکل ۹. سیستم کم فشار جوی در روزهای ۲۹ و ۳۰ می (سال ۲۰۱۵)

حرکت است (شکل ۱۰ ب). شدت این کم‌فشاری جوی در مناطق شرقی خزر جنوبی کاهش یافته (شکل ۱۰ ج)، سپس با سرعت ۳ متر بر ثانیه و جهت ۳۰ درجه به سمت مرکز خزر جنوبی حرکت می‌نمایند (شکل ۱۰ د).

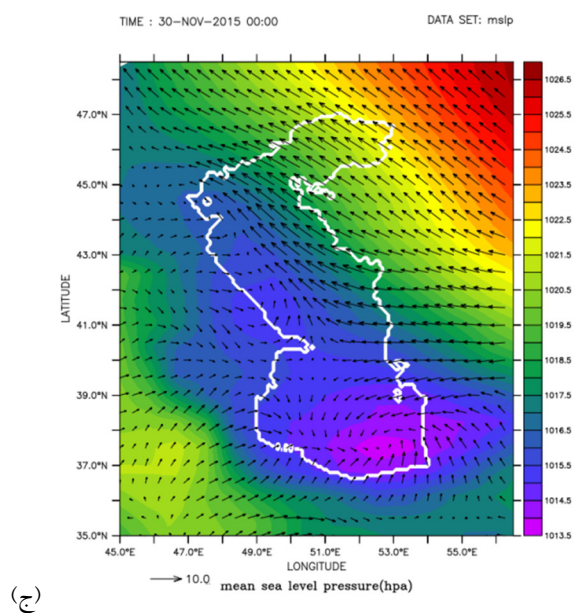
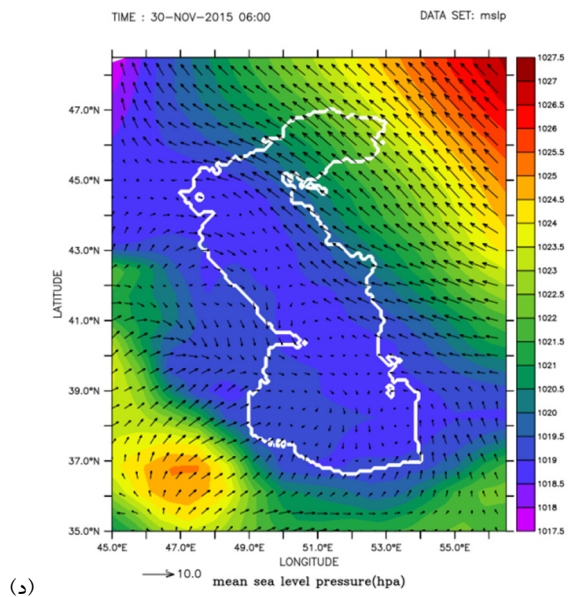
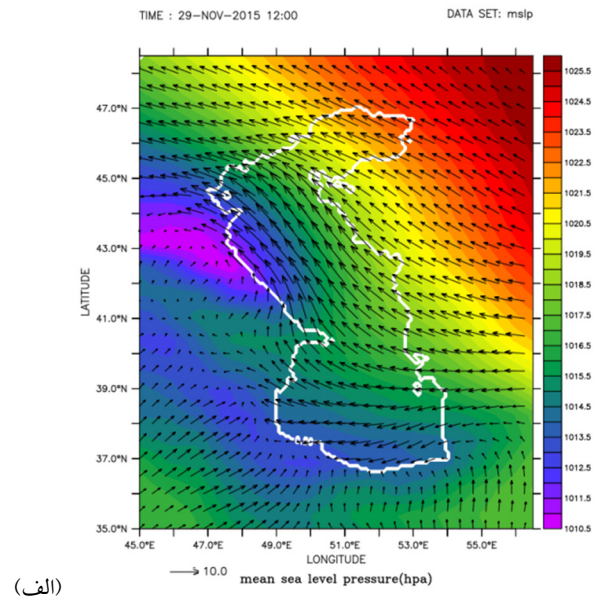
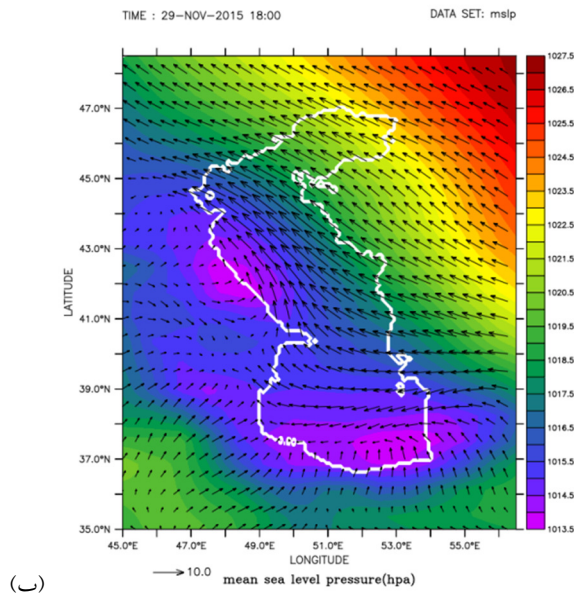
شکل ۱۰ سیستم کم‌فشاری جوی را در روز ۱۶ آگوست سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. در ساعت صفر روز ۱۶ آگوست سیستم کم‌فشاری جوی در جنوب شرقی خزر جنوبی در حال تشکیل است (شکل ۱۰ الف). این سیستم کم‌فشاری جوی با سرعت ۵/۳ متر بر ثانیه و جهت ۱۶/۶ درجه به سمت شرق در حال



شکل ۱۰. سیستم کم‌فشار جوی در روز ۱۶ آگوست (سال ۲۰۱۵)

نوامبر سیستم کم فشاری جوی دیگری نیز در سواحل جنوب شرقی خزر جنوبی در حال شکل گیری است (شکل ۱۱ ب). در ساعت صفر روز ۳۰ نوامبر فقط در جنوب شرقی خزر جنوبی کم فشاری جوی مشاهده می شود (شکل ۱۱ ج)؛ پس از گذشت ۶ ساعت این سیستم کم فشاری جوی در این منطقه از بین می رود (شکل ۱۱ د).

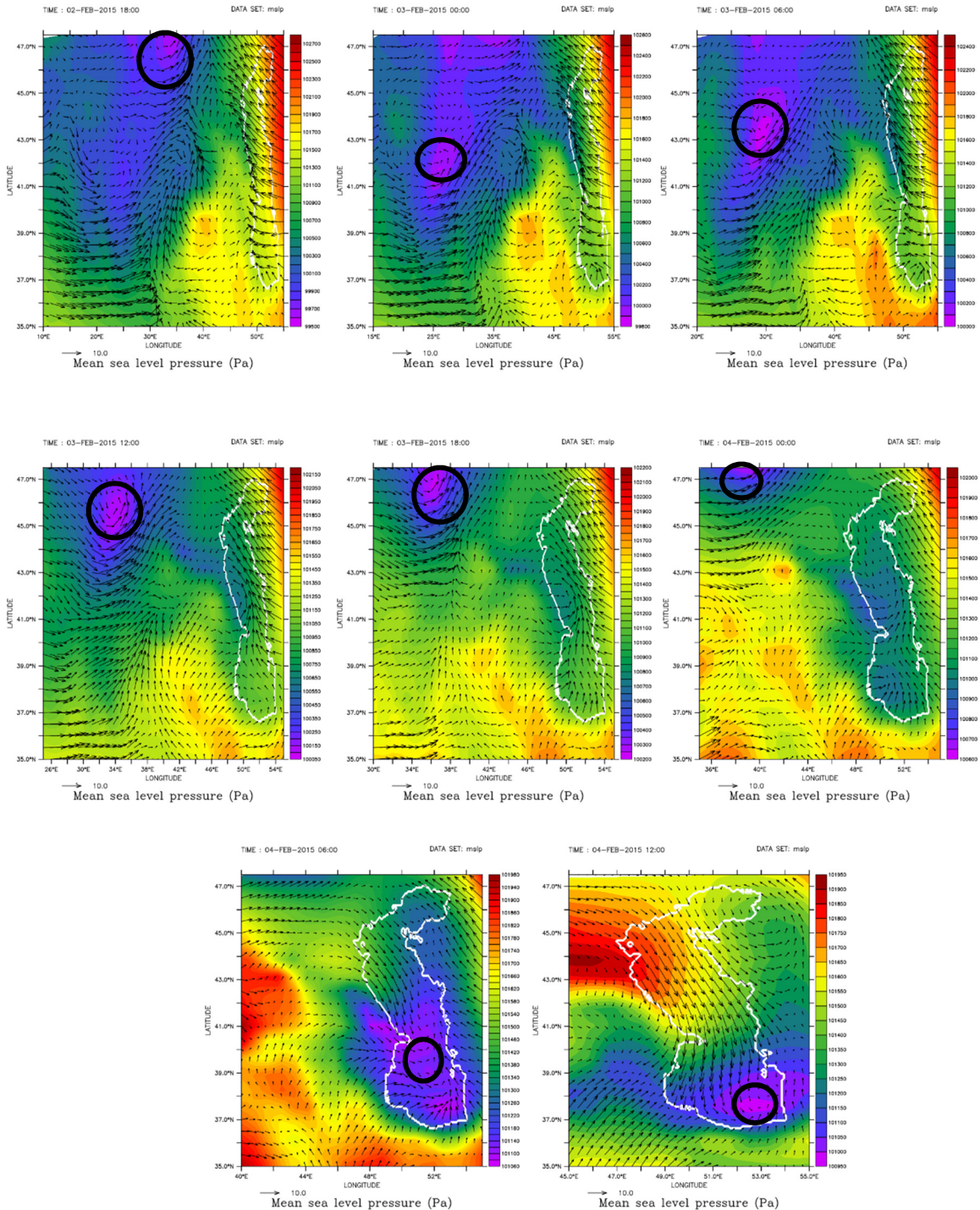
شکل ۱۱ سیستم کم فشاری جوی را برای روزهای ۲۹ و ۳۰ نوامبر در سال ۲۰۱۵ نشان می دهد. مطابق شکل ۱۱ الف سیستم کم فشاری جوی در ساعت ۱۲ روز ۲۹ نوامبر از منطقه شمال غربی حوضه میانی وارد حوضه دریای خزر می شود که سرعت این کم فشاری جوی ۹/۸ متر بر ثانیه و جهت آن ۵۱ درجه است. پس از گذشت ۶ ساعت در ساعت ۱۸ روز ۲۹



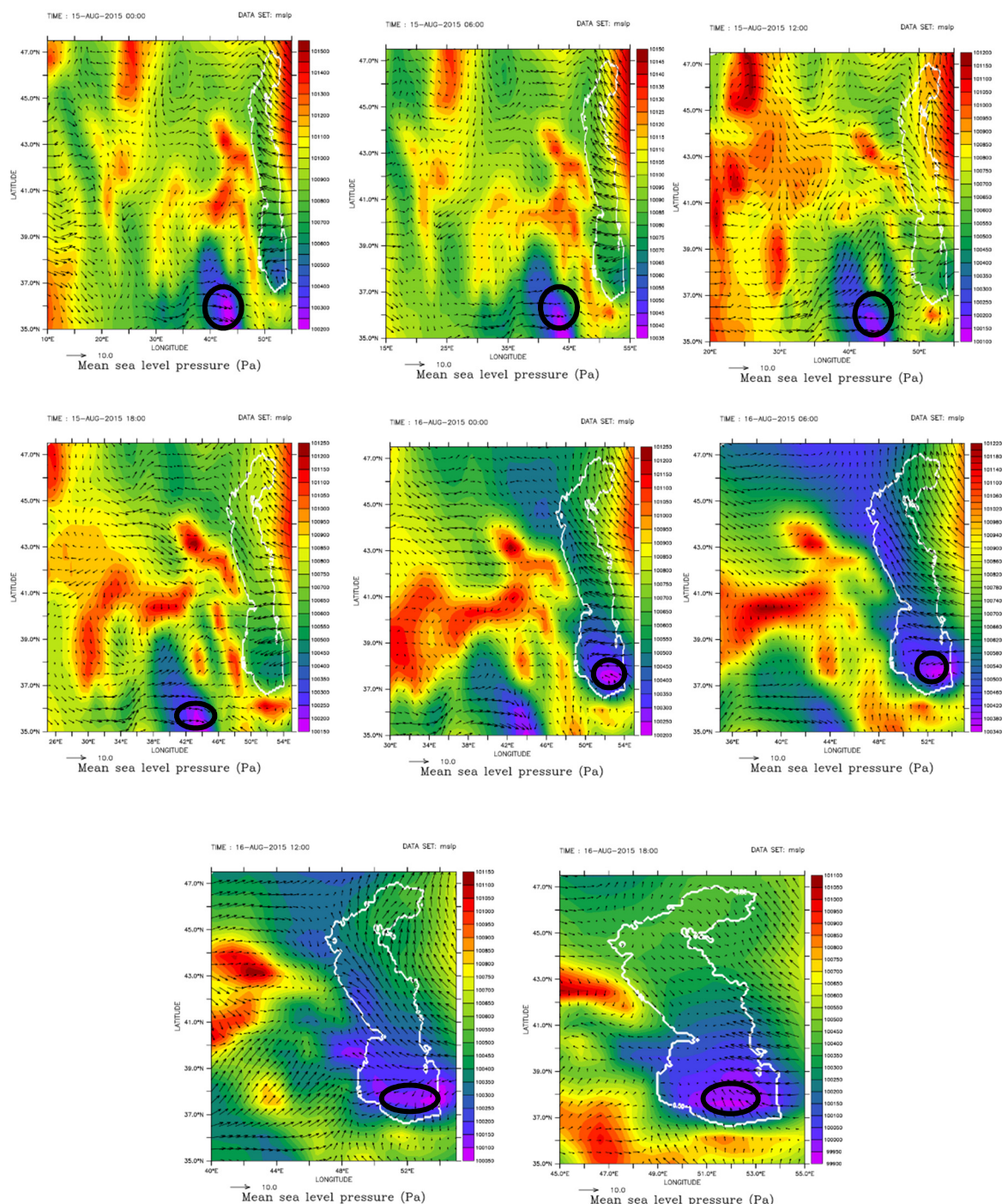
شکل ۱۱. سیستم کم فشار جوی در روزهای ۲۹ و ۳۰ نوامبر (سال ۲۰۱۵)

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که منشأ کم‌فشاری جوی در روز ۱۶ آگوست (سال ۲۰۱۵) از مناطق جنوب‌غربی دریای خزر است.

شکل ۱۲ رهگیری منشأ کم‌فشاری جوی در روز ۴ فوریه (سال ۲۰۱۵) را نشان می‌دهد که با توجه به این شکل این سیستم کم‌فشاری جوی از مناطق شمال‌غربی دریای خزر در حال شکل‌گیری است.



شکل ۱۲. رهگیری منشأ کم‌فشاری جوی در روزهای ۲ تا ۴ فوریه (سال ۲۰۱۵)

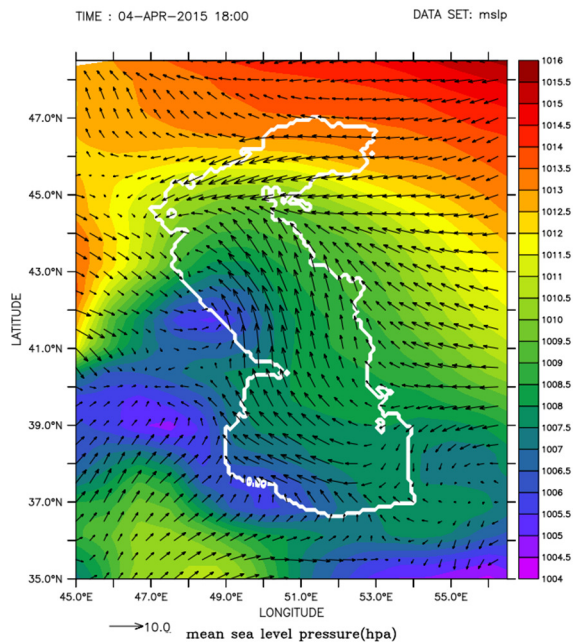


شکل ۱۳. رهگیری منشأ کم‌فشاری جوی در روزهای ۱۵ تا ۱۶ آگوست (سال ۲۰۱۵)

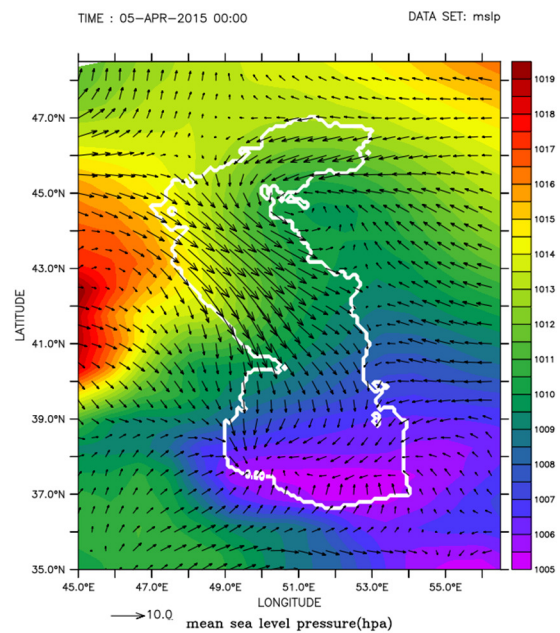
به ترتیب 1005 hpa و $1006/5 \text{ hpa}$ است که اختلاف فشار این دو حالت $1/5 \text{ hpa}$ است. با توجه به اینکه هر یک میلی بار کاهش فشار باعث افزایش یک سانتی متری تراز آب دریا و تراز ناشی از فشار هوا می‌شود. همچنین برای محاسبه تغییر تراز ناشی از باد، با توجه به داده‌های موجود از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مقدار تراز برای دو حالت گفته‌شده به ترتیب

همچنین از نتایج اصلی این مطالعه می‌توان به تغییرات تراز آب دریای خزر بر اثر دو عامل کم‌فشاری‌های جوی و باد در ایستگاه‌های ساحلی ایران که شامل ایستگاه‌های انزلی و امیرآباد برای سال ۲۰۱۵ مطابق جدول (۱) اشاره کرد. به‌عنوان نمونه ایستگاه امیرآباد در سال ۲۰۱۵ در دو حالت کم‌فشاری (شکل ۱۴) و حالت معمول (شکل ۱۵) فشار هوا

۲۶/۹۹ m و ۲۶/۹۷m- است. اختلاف تراز در این دو حالت ۲ سانتی‌متر است؛ بنابراین از ۲ سانتی‌متر تغییر تراز ۱/۵ سانتی‌متر ناشی از فشار هوا و ۰/۵ سانتی‌متر ناشی از باد است.



شکل ۱۵. ایستگاه امیرآباد بدون کم‌فشاری



شکل ۱۴. ایستگاه امیرآباد در حالت کم‌فشاری

جدول ۱. تغییرات تراز آب دریای خزر ناشی از فشار هوا و باد در ایستگاه‌های ساحلی خزر جنوبی در سال ۲۰۱۵

| افزایش تراز آب ناشی از باد (cm) | افزایش تراز آب ناشی از کم‌فشاری (cm) | تراز آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه (m) | فشار (hpa) | زمان وقوع | ایستگاه |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|------------|------------|------------------|
| ۱ | ۱ | -۲۶/۹۹۴ | ۱۰۰۹/۵ | ۲۰۱۵/۰۲/۰۴ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۶/۹۷۴ | ۱۰۱۰/۵ | ۲۰۱۵/۰۲/۰۳ | بدون کم‌فشاری |
| ۴ | ۱ | -۲۶/۸۷۴ | ۱۰۰۳/۵ | ۲۰۱۵/۰۵/۲۹ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۶/۸۲۴ | ۱۰۰۴/۵ | ۲۰۱۵/۰۵/۲۸ | بدون کم‌فشاری |
| ۲/۴ | ۱/۶ | -۲۷/۰۱۷ | ۱۰۰۳/۴ | ۲۰۱۵/۰۸/۱۶ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۷/۹۷۷ | ۱۰۰۵ | ۲۰۱۵/۰۸/۱۵ | بدون کم‌فشاری |
| ۰/۵ | ۲/۵ | -۲۷/۲۲ | ۱۰۱۳/۵ | ۲۰۱۵/۱۱/۲۹ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۷/۲۵ | ۱۰۱۶ | ۲۰۱۵/۱۱/۲۷ | بدون کم‌فشاری |
| ۰/۵ | ۱/۵ | -۲۶/۹۹ | ۱۰۰۵ | ۲۰۱۵/۰۴/۰۵ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۶/۹۷ | ۱۰۰۶/۵ | ۲۰۱۵/۰۴/۰۴ | بدون کم‌فشاری |
| ۵/۵ | ۱/۵ | -۲۷/۲۱۷ | ۱۰۱۴ | ۲۰۱۵/۱۱/۲۹ | در حالت کم‌فشاری |
| | | -۲۷/۲۸۷ | ۱۰۱۵/۵ | ۲۰۱۵/۱۱/۲۷ | بدون کم‌فشاری |

۴. نتیجه‌گیری

تصاویر باد و میانگین فشار تراز آب مربوط به دریای خزر برای مدت یادشده به صورت ۶ ساعته رسم شد. پس از رسم تصاویر پارامترهایی از جمله: تعداد وقوع کم‌فشاری جوی به صورت فصلی، مکان کم‌فشاری‌های جوی، منشأ و مسیر

داده‌های موردنیاز این تحقیق که شامل داده‌های باد و میانگین فشار تراز آب‌اند، از بانک داده‌های ECMWF با گام زمانی ۶ ساعته و دقت ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی برای سال ۲۰۱۵ دریافت شد. سپس با استفاده از کدهای نرم‌افزار پای‌فرتر

[۴] چگینی وحید. نظریه‌های موج. انتشارات شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری؛ ۱۳۷۷.

[5] Naderi Beni A, Lahijani H, Mousavi Harami R, Arpe K, Leroy S, Marriner N. & Reimer P. Caspian sea-level changes during the last millennium. historical and geological evidence from the south Caspian Sea. *Climate of the Past*. 2013; 9(4): 1645-65.

[6] Vogt M, Payne M, Lachkar Z, Gruber N, Salmanmahiny A, & Hosseini S. Biogeographic classification of the Caspian Sea. *Biogeosciences*. 2014; 11(22): 6451.

[۷] حیدری مهناز. تأثیر عبور چرخندهای هواشناسی بر نوسان سطح آب در کانال قشم [پایان‌نامه]. تهران: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ ۱۳۹۰.

[8] Khalilabadi M. The effect of meteorological events on sea surface height variations along the northwestern Persian Gulf. *Current Science*. 2016; 110(11): 2138-2141.

[۹] اقتصادی شه‌میر، زاهدی رفیعه. مطالعه عوامل تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب خزر جنوبی. *مجله علوم و فنون دریایی*. ۱۳۹۰؛ ۱۰(۳): ۴-۱۳.

[10] Sultan SA, Ahmad F, Elghribi NM, Al-Subhi AM. An analysis of Arabian Gulf monthly mean sea level. *Continental Shelf Research*. 1995 Jan 1; 15(11-12): 1471-82.

[11] Arpe K, Leroy SA. The Caspian Sea Level forced by the atmospheric circulation, as observed and modelled. *Quaternary international*. 2007 Oct 1; 173: 144-52.

[12] Ibrayev RA, Özsoy E, Schrum C, Sur HI. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science*. 2010 Mar 1; 6(1): 311-29.

[13] Pinaridi N, Bonaduce A, Navarra A, Dobricic S, Oddo P. The Mean Sea Level Equation and Its Application to the Mediterranean Sea. *Journal of Climate*. 2014 Jan 1; 27(1): 442-7.

[14] Arpe K, Leroy S, Lahijani H, Khan V. Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level. *Hydrology and earth system science*. 2012; 16: 19-27.

[15] Chen JL, Wilson CR, Tapley BD, Save H, Cretaux JF. Longterm and seasonal Caspian Sea level change from satellite gravity and altimeter measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017 Mar 1; 122(3): 2274-90.

حرکت چرخند جوی و اثر کم‌فشاری‌های جوی و باد بر تراز آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به منشأ کم‌فشاری‌های جوی در ماه‌های فوریه و مه از مناطق شمال‌غربی خزر و در ماه‌های آگوست و نوامبر از غرب و جنوب‌غربی این حوضه اشاره کرد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به وقوع کم‌فشاری‌های عمده جوی در دو فصل بهار و پاییز اشاره کرد. همچنین جهت عمده ورود سیستم‌های کم‌فشاری جوی به دریای خزر از غرب و شمال-غربی حوضه میانی است. همچنین با توجه به جدول (۱) در مناطق شرقی خزر جنوبی فشار هوا و در مناطق غربی این حوضه، باد بیشترین تأثیر را دارد. به‌عنوان نمونه در ۵ آوریل سال ۲۰۱۵ در ایستگاه امیرآباد که فشار هوا ۱۰۰۵ هکتوپاسکال است، مقدار تراز ناشی از فشار هوا و باد به ترتیب ۱/۵ و ۰/۵ سانتی‌متر است. همچنین سرعت جابه‌جایی چرخند جوی در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب ۱۵/۸، ۵/۳، ۳ و ۹/۸ متر بر ثانیه است. با بررسی این تصاویر اغلب کم‌فشاری‌های جوی از شمال‌غربی حوضه میانی و غرب خزر جنوبی وارد دریای خزر می‌شوند (شکل‌های ۱۰ الف، ۱۱ الف و ۱۴ الف) که اغلب مسیر حرکت آن‌ها به سوی شرق حوضه میانی و جنوب شرقی خزر جنوبی است (شکل‌های ۱۱ ج و ۱۴ ج). همچنین چرخندهای جوی اغلب در سواحل جنوب حوضه جنوبی دریای خزر رخ می‌دهند ولی سواحل شرقی به دلیل مسطح بودن سواحل خشکی آن، بیشتر تحت تأثیر رویدادهای کم‌فشاری جوی قرار می‌گیرند.

مراجع

[۱] خلیل‌آبادی محمدرضا، سرانجام بهادر. مبانی دینامیک اقیانوس‌ها. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ ۱۳۹۱.

[۲] ناظم‌السادات سیدمحمد جعفر. مبانی هوا و اقلیم‌شناسی. مرکز نشر دانشگاهی؛ ۱۳۸۸.

[۳] مفیدی عباس، زرین آذر. تحلیلی بر ماهیت و ساختار مراکز پرفشار و کم‌فشار. *مجله رشد آموزش زمین‌شناسی*. ۱۳۸۵؛ ۴۷: ۵۴-۵۸.

پی‌نوشت

1. inverse barometer effect
2. North Caspian Basin(NCB)
3. Middle Caspian Basin(MCB)
4. South Caspian Basin(SCB)
5. TASK
6. Sultan
7. Max Planck Institute for Meteorology(MPIM)
8. Model for Enclosed Sea Hydrodynamics(MESH)
9. Mean Sea Level Equation(MSLE)
10. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
11. Pyferret
12. Netcdf
13. Surfer

[16] Hankin S, Callahan J, Manke A, O'brien K, Wei Y. FERRET User's guide Version 5.8. NOAA/PMEL; 2004.

[17] Oey L, Chang YL, Lin YC, Chang MC, Xu F, Lu HF. ATOP-The advanced Taiwan Ocean Prediction System based on the mpiPOM. Part1: Model Descriptions, Analysis and Results, Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences. 2012;24(1):137-58.