

## مطالعه اندرکنش الگوی امواج دریاچه ارومیه و جاده میان‌گذر با استفاده از مدل‌های هواشناسی و دینامیک سیالات محاسباتی

مهران داداش‌زاده<sup>۱</sup>، جواد پارسا<sup>۲</sup>، علیرضا مجتهدی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های دریایی، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: mehrandadashzadeh1@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده کشاورزی گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: javadparsa2000@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: concciv@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۲۱

\* نویسنده مسؤول

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۲۴

### چکیده

دریاچه ارومیه به عنوان یکی از با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران در طی سال‌های اخیر دچار افت تراز شدیدی شده است. در این خصوص، تحولات کلیماتولوژیک کلان در شمال‌غرب ایران و همچنین دخالت عوامل انسانی به عنوان دلایل اصلی در این زمینه مطرح می‌باشند. با توجه به موارد مطرح شده و با تغییر شرایط جریان در این دریاچه، لزوم بررسی دقیق وضعیت هیدرودینامیک آن بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو در این مطالعه، با هدف بررسی وضعیت هیدرودینامیکی، به شبیه‌سازی و بررسی امواج در دریاچه پرداخته شده است. برای این منظور از مدل عددی MIKE21 SW بهره گرفته شده است. برای داده‌های باد، با توجه به عدم دقت کافی داده‌های موجود، از نتایج مدل ECMWF و اجرای مدل WRF بهره گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های باد حاکی از بهبود قابل توجه پیش‌بینی‌های مدل WRF نسبت به مدل ECMWF بوده و نتایج آن به عنوان داده‌های نهایی باد برای اجرای مدل موج مدنظر قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که جهت شمال-شمال‌غرب و نیز جهت جنوب‌شرق، عموماً دو جهت غالب برای طوفان‌ها در سطح دریاچه می‌باشند. بررسی وضعیت امواج شبیه‌سازی شده نیز حاکی از آن است که رشد امواج از وضعیت سرعت باد پیروی نموده و وضعیت امواج کاملاً وابسته به عمق می‌باشد. علاوه بر این، احداث میان‌گذر در میانه دریاچه بر روی میدان امواج (بویژه در اطراف میان‌گذر) تأثیرگذار بوده و محدوده آرامی در پشت میان‌گذر در جهت مخالف باد شکل می‌گیرد. نتایج حاصل از مطالعات الگوی فیزیک امواج تحت اثر تنش ناشی از وزش باد در دریاچه می‌تواند به عنوان پایه‌ای جهت تولید داده‌های لازم برای انجام سایر مطالعات وابسته مانند مطالعات هیدرودینامیک جریان، کیفیت آب و محیط‌زیست دریاچه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، جاده میان‌گذر، مدل‌سازی هیدرودینامیکی، مدل‌های هواشناسی، شبیه‌سازی امواج.

## ۱. مقدمه

دریاچه ارومیه با مساحت تقریبی متغیر ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومترمربع و با ارتفاع متوسط ۱۲۷۵ متر از سطح دریاهای آزاد یکی از بلندترین و پرآب‌ترین دریاچه‌های داخلی و دائمی کشور می‌باشد. تراز توده آبی این دریاچه طی سال‌های اخیر به شدت کاهش یافته است. تحولات کلیماتولوژیک کلان از جمله کاهش میزان نزولات آسمانی، افزایش تبخیر و تعرق در اثر افزایش متوسط درجه حرارت در شمال‌غرب کشور، به همراه دخالت عوامل انسانی از قبیل سدسازی، تغییر کاربری اراضی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی به عنوان دلایل اصلی در این زمینه مطرح می‌گردند (Delju و همکاران، ۲۰۱۳؛ Zoljoodi و Didevarasl، ۲۰۱۴؛ Soudi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Khazaei و همکاران، ۲۰۱۹). از طرفی اجرای پروژه‌های متعدد عمرانی از جمله احداث میان‌گذر موجب اعمال تغییرات در شرایط هیدرودینامیکی طبیعی دریاچه شده است (Zeinoddini و همکاران، ۲۰۰۹؛ Zeinoddini و همکاران، ۲۰۱۳). از این‌رو، در شرایط حاضر بررسی دقیق وضعیت هیدرودینامیک این دریاچه امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مهم‌ترین عوامل هیدرودینامیکی در محیط‌های آبی مانند دریاچه ارومیه، امواج و نحوه انتشار آن‌ها هستند (Zhen-Gang، ۲۰۰۷). امواج ناشی از باد به دلیل انرژی بالایی که دارند، از اهمیت فراوانی برخوردار بوده و تأثیر آن‌ها در هر گونه فعالیت ساحلی و فراساحلی در آب‌های آزاد، مانند دریاها و اقیانوس‌ها و نیز آب‌های بسته، مانند دریاچه‌ها و مخازن سدها باید مدنظر قرار گیرد. اطلاعات امواج می‌تواند بر اساس اندازه‌گیری، مشاهدات و نتایج حاصل از مدل عددی و تجربی باشد. از آنجایی که در دریاچه ارومیه اطلاعات دقیقی از اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات برای دوره‌های بلند مدت زمانی وجود ندارد، نتایج حاصل از مدل عددی می‌تواند برای این منظور استفاده شود. در سال‌های گذشته مطالعاتی در زمینه وضعیت هیدرودینامیک دریاچه ارومیه انجام شده است، با این حال توجه چندانی به وضعیت امواج در این دریاچه نشده است. در مطالعات شرکت صدرا (۱۳۸۲) با استفاده از مدل عددی دو بعدی، امواج ناشی از باد شکل گرفته در دریاچه ارومیه در اثر وزش بادهای حدی ۱۰۰ ساله در هشت جهت اصلی برای حالت قبل و بعد از میان‌گذر شبیه‌سازی گردید. در این مطالعات همچنین شبیه‌سازی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای بررسی

چرخش آب، سرعت‌های جریان در شرایط مختلف و حداکثر مقادیر خیزاب با استفاده از مدل HD نرم افزار MIKE21 انجام شد. شفیع‌فر و همکاران (۱۳۸۴) در پژوهشی با استفاده از مدل طیفی عددی SWAN به بررسی اثر تغییرات گام زمانی در مدل‌های پیش‌بینی امواج در دریاچه ارومیه پرداختند. این محققین از اطلاعات باد ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک ارومیه به‌عنوان ورودی مدل موج استفاده کرده و با اجرای مدل عددی در حالات نسل اول، دوم و سوم تأثیر تغییر گام زمانی محاسبات را بر روی نتایج خروجی مدل بررسی نمودند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مدل عددی موج در حالت نسل سوم نسبت به تغییرات گام زمانی حساس‌تر از مدل‌های نسل اول و دوم است. بختیاری و زین‌الدینی (۲۰۱۱) به بررسی اثرات متقابل موج با الگوی جریان و رژیم‌های شوری در حوضه‌های آبی شور مانند دریاچه ارومیه پرداختند. به منظور مدل‌سازی عددی کوپل موج-جریان از مدل MIKE21/3 استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل کوپل در مقایسه با فقط مدل جریان تطابق بهتری با داده‌های میدانی ارائه داده است. همچنین، در نظر گرفتن توام موج با جریان، باعث ایجاد تغییرات مهمی در میدان سرعت و جهت جریان، نوسانات سطح آب و الگوهای شوری شده است. همچنین زین‌الدینی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به ارزیابی تأثیر امواج ناشی از باد بر الگوی جریان و شوری دریاچه ارومیه پرداختند. در این مطالعه از مدل عددی MIKE برای شبیه‌سازی جریان‌های دریاچه استفاده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، در نظر گرفتن امواج ناشی از باد بر الگوی زمانی و مکانی جریان و شوری تأثیرگذار است. جدیدالاسلام و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی متوسط نیروی امواج برای یک دوره ۱۵ ساله در دریای اژه پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی از مدل نسل سوم امواج طیفی و از نرم افزار MIKE21 SW استفاده کردند. همچنین، برای مدل‌سازی میدان باد نیز از مدل ECMWF استفاده شد. نتایج برای هر سه نوع آنالیز زمانی حاکی از آن است که متوسط ارتفاع و نیروی امواج برای قسمت میانی و جنوبی دریا بیشتر از قسمت شمالی است. سیریشا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از نرم‌افزار MIKE21 و ماژول SW به شبیه‌سازی امواج در منطقه اقیانوس آرام پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر قابلیت مناسب مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی امواج در مناطق عمیق و کم‌عمق می‌باشد. فونسکا و همکاران (۲۰۱۷) نیز از مدل‌های موج طیفی نسل سوم MIKE21 BW، SWAN و STWAVE برای

می‌شود که در دستگاه مختصات کارتزین به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد.

معادله (۱)

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

که در آن  $C_x$  و  $C_y$  به ترتیب سرعت‌های انتشار در جهت‌های  $x$  و  $y$  و  $C_\sigma$  و  $C_\theta$  سرعت‌های انتشار در فضای  $\sigma$  و  $\theta$  هستند. جمله  $S$  نیز تعادل طیف چگالی کنش، جمله مربوط به چشمه‌ها و چاهک‌ها از جملات چگالی انرژی است که نشان‌دهنده اثرات تولید، استهلاک و اندرکنش غیرخطی امواج است. مدل‌های مختلف عناصر متفاوتی را برای جمله چشمه و چاه در معادله فوق در نظر می‌گیرند. در مدل MIKE21 SW، علاوه بر انرژی ورودی باد (تولید موج در اثر باد)، اندرکنش غیرخطی امواج و سفیدک رأس موج (شکست موج در آب عمیق)، پارامترهای مربوط به آب کم‌عمق از قبیل اصطکاک بستر و شکست موج ناشی از کاهش عمق نیز در جمله  $S$  در نظر گرفته می‌شوند.

جهت ساخت فایل شبکه‌بندی در این مطالعه سعی شده است بهینه‌ترین اندازه و تعداد شبکه در میدان محاسباتی مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا نسبت به اندازه شبکه محاسباتی، تحلیل حساسیت صورت می‌گیرد. این شبکه‌بندی دارای ابعاد ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر در نقاط مختلف بوده است. همچنین در مدل‌های اجرا شده بر اساس مشخصات حل عددی معادلات، مقدار گام زمانی محاسبات بین ۰/۱ تا ۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- انتخاب میدان باد ورودی

به منظور شبیه‌سازی میدان باد، در ابتدا از مدل هواشناسی ECMWF استفاد شد. مقایسه مقادیر سرعت باد مدل ECMWF با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی نشان داد که مقادیر سرعت باد مدل ECMWF در بسیاری از موارد دست پایین گزارش شده است. به منظور تهیه ورودی‌های دقیق‌تر برای اجرای مدل عددی، شبیه‌سازی میدان باد دو بعدی بر روی کل دریاچه با استفاده از حل‌کننده دینامیکی ARW و مدل هواشناسی WRF (نسخه ۳-۷-۱) انجام گرفت. در این مطالعه، مدل‌سازی با استفاده از یک شبکه افقی منظم با دقت ۴ کیلومتر در محدوده

شبیه‌سازی خصوصیات موج در آب‌های کم‌عمق سواحل کشور پرتغال استفاده نمودند و نتایج حاصله را با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند. سودی و همکاران (۲۰۱۹) با هدف بررسی تأثیرات خشکسالی بر رفتار هیدرودینامیکی و توزیع شوری در دریاچه ارومیه، به شبیه‌سازی این پارامترها با استفاده از مدل MIKE3-FM پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از شبیه‌سازی رضایت‌بخش پارامترهای مورد نظر با مدل ذکر شده می‌باشد.

شایان ذکر است در همه مطالعات پیشین انجام یافته بر روی دریاچه ارومیه، با نادیده انگاشتن تغییرات مکانی مشخصات باد و فشار هوا، از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ارومیه به صورت یکنواخت در مکان استفاده شده است. در حالی که در مطالعه حاضر با استفاده از میدان باد متغیر در زمان و مکان (WRF)، که توسط داده‌های سینوپتیک در چند ایستگاه مورد ارزیابی قرار گرفته است، به تحلیل امواج برای شرایط مختلف پرداخته شده است. در ادامه وضعیت امواج در شرایط مختلف دریاچه و اثر وجود میان‌گذر، با تعریف سناریوهای مختلفی بر اساس سه تراز مختلف آب دریاچه و نیز وجود و عدم وجود میان‌گذر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱- برپایی مدل موج طیفی

در مطالعه حاضر، از مدل عددی نسل سوم MIKE21 SW برای شبیه‌سازی امواج استفاده شده است. این مدل عددی تخمین‌های نسبتاً دقیقی از پارامترهای موج در نواحی ساحلی، خورها و دریاها تحت شرایط مشخص باد، بستر و جریان ارائه می‌کند (DHI Water and Environment, ۲۰۰۷). مدل MIKE21 SW بر پایه معادله تعادل کنش موج همراه با در نظر گرفتن اثرات چشمه‌ها (منابع افزایش انرژی موج) و چاهک‌ها (منابع کاهش انرژی موج) بنا نهاده شده است.

در این مدل همانند همه مدل‌های طیفی- عددی موج حتی اگر پدیده‌های غیرخطی حاکم باشند، برای توصیف امواج از طیف چگالی کنش به جای طیف چگالی انرژی استفاده می‌شود. زیرا در حضور جریانات تعادل چگالی انرژی حفظ نمی‌شود. در مدل MIKE21 SW تولید و تغییر شکل طیف موج همانند اکثر مدل‌های طیفی عددی با معادله تعادل طیف چگالی کنش توصیف

دریاچه ارومیه و نیز با ۳۸ تراز عمودی انجام شده است. مقایسه نتایج مدل‌های باد با اندازه‌گیری‌های ایستگاه سینوپتیک، نشان از بهبود قابل توجه پیش‌بینی‌های مدل WRF نسبت به مدل ECMWF داشته و از آن به عنوان داده‌های نهایی باد برای اجرای مدل‌های موج استفاده می‌گردد.

## ۳-۲ تحلیل حساسیت و واسنجی ضرایب مدل

در اجرای مدل‌های عددی موج، نتایج به عوامل مختلف از جمله اندازه شبکه محاسباتی، تعداد تقسیمات زاویه‌ای، دقت حل معادلات عددی، تغییرات تراز سطح آب، اندرکنش سه‌گانه امواج، ضرایب شکست موج و زبری بستر، ضرایب سفیدک رأس موج وابسته است. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های عددی، ابتدا باید عواملی که نتایج مدل به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد شناسایی شده و در ادامه با استفاده از این عوامل نسبت به کالیبراسیون مدل عددی اقدام نمود. برای انجام تحلیل حساسیت‌ها، امواج ناشی از باد در محدوده دریاچه برای یک طوفان مشخص نمونه (۱۹۸۷/۸/۳۰ - ۱۹۸۷/۸/۲۴) و با استفاده از میدان باد WRF شبیه‌سازی می‌گردد. از میان پارامترهای بررسی شده، پارامترهای تعداد تقسیمات زاویه‌ای طیف، دقت روش محاسباتی و اندرکنش سه‌گانه امواج تأثیر چندانی بر روی خروجی نتایج در دریاچه ارومیه نداشته و در واسنجی مدل نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. کاهش اندازه شبکه محاسباتی تا حد معینی در دقت نتایج تأثیرگذار بوده و بیشتر از آن، تنها باعث افزایش هزینه محاسباتی می‌گردد.

این پارامتر نیز یک پارامتر واسنجی نبوده و باید ابعاد مش به صورت بهینه انتخاب شوند تا گسسته‌سازی مکانی روی نتایج تأثیرگذار نباشد. تغییرات تراز سطح آب نیز به شدت بر روی نتایج اثرگذار بوده و لازم است از مقدار واقعی تراز آب برای دوره مدل‌سازی با توجه به اندازه‌گیری‌ها استفاده گردد. این مورد نیز جزو پارامترهای واسنجی به شمار نمی‌آید. اندرکنش چهارگانه امواج نیز بر روی نتایج تأثیرگذار بوده و لازم است در مدل در حالت فعال باقی بماند. این موضوع یکی از نقاط قوت مدل‌های نسل سوم طیفی است. ضرایب شکست موج، زبری بستر و سفیدک رأس موج نیز هر کدام تا حدی بر روی نتایج اثرگذار بوده و می‌توانند به عنوان پارامترهای اصلی در روند واسنجی مدل مورد استفاده قرار گیرند.

برای انجام واسنجی ضرایب مدل، از داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای استفاده شده است. این داده‌ها مربوط به مشاهدات ماهواره‌های آلتیمتری هستند. این ماهواره‌ها بر روی مسیرهای خاص حرکت نموده و داده‌های باد و موج را بر روی مسیرهای مورد نظر ثبت می‌کنند (Scharroo و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی فاصله زمانی عبور از یک منطقه خاص در این ماهواره‌ها بسیار طولانی بوده و بین ۳ تا ۲۵ روز برای ماهواره‌های مختلف متغیر است. بنابراین امکان استفاده و مقایسه این داده‌ها با نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت سری زمانی پیوسته وجود ندارد. بنابراین این مقایسه‌ها به صورت نقطه‌ای و برای یک لحظه خاص (لحظه عبور ماهواره از روی آن نقطه) انجام می‌شود. از این رو، تعدادی از داده‌های ماهواره‌ای در نقاط مختلف دریاچه و برای دوره‌های زمانی مختلف انتخاب و مدل‌سازی با استفاده از مقادیر مختلف ضرایب زبری بستر و سفیدک رأس موج انجام می‌گردد. سپس نتایج این مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه و برای آن‌ها شاخص‌های خطا محاسبه می‌شود. در نهایت ضرایبی که به کمترین خطا در نتایج می‌انجامد، به عنوان ضرایب نهایی انتخاب می‌گردند. این مقادیر برای اجرای مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نتایج واسنجی ضرایب مدل

ضرایب شکست موج	ضریب زبری بستر	ضرایب سفیدک رأس موج
$\alpha$	$k_n$	$C_{dis}$
۱	۰/۸	۲
		۰/۸

لازم به ذکر است که مقدار این ضرایب تنها بر اساس مقایسه با داده‌های ماهواره‌ای انتخاب نشده است، بلکه نتایج تحقیقات قبلی نظیر مطالعات شبیه‌سازی امواج دریاهای ایران (ISWM) (۱۳۸۷) و مطالعات پایش و شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور (۱۳۹۴) در انتخاب مقادیر منطقی برای ضرایب فوق در نظر گرفته شده‌اند.

## ۴-۲ ارزیابی وضعیت امواج برای سناریوهای مختلف

به منظور بررسی وضعیت امواج در شرایط مختلف دریاچه، سناریوهایی بر اساس تراز آب دریاچه و نیز وجود و عدم وجود میان‌گذر تعریف شده و مدل‌ها بر اساس این سناریوها اجرا می‌گردند. بررسی تاریخچه تغییرات تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در دریاچه (اطلاعات تغییرات تراز آب ثبت شده توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۹۳ به

### ۳-۱/ ارزیابی نتایج مدل برای طوفان‌های جنوب‌شرقی

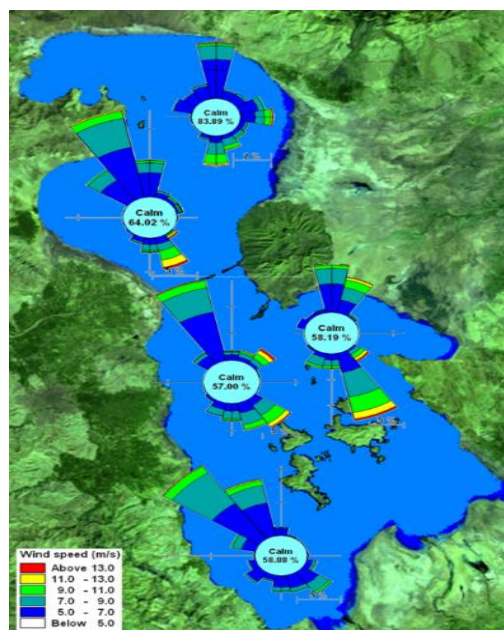
وضعیت امواج شبیه‌سازی شده در زمان شکل‌گیری یک طوفان نمونه جنوب‌شرقی به شمال‌غربی در شکل ۲ (الف و ب) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تراز سطح آب در این مدل برابر با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده در زمان وقوع طوفان (۱۲۷۳/۷ متر) می‌باشد. با توجه به شکل، وضعیت رشد امواج نیز از تغییرات سرعت باد پیروی نموده و با افزایش سرعت باد و تداوم آن برای مدت چند ساعت، امواج نیز رشد بیشتری پیدا کرده‌اند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود وضعیت امواج کاملاً وابسته به عمق بوده و در نواحی ساحلی و مجاورت جزایر درون دریاچه، ارتفاع موج کاهش یافته است. برای بررسی اثر احداث میان‌گذر در میانه دریاچه نیز مدلی بدون در نظر گرفتن وجود میان‌گذر برای طوفان فوق اجرا شده است. شکل ۲ (ج و د) وضعیت ارتفاع و جهت امواج شبیه‌سازی شده را برای حالت عدم وجود میان‌گذر و برای طوفان مورد اشاره نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که در اثر احداث میان‌گذر در میانه دریاچه، طول موجگاه در راستای وزش باد کاهش یافته و محدوده آرامی درست در پشت میان‌گذر در سواحل شمالی آن شکل گرفته است. ارتفاع و پریود امواج در قسمت شمالی دریاچه در حالت وجود میان‌گذر به ترتیب به حداکثر ۱/۴ متر و ۴/۴ ثانیه می‌رسد؛ این در حالی است که در صورت عدم وجود میان‌گذر مقدار ارتفاع و پریود امواج در این قسمت به ترتیب حداکثر ۱/۴۵ متر و ۴/۵ ثانیه است. با توجه به شکل‌ها، در ناحیه بازشدگی، رشد امواج ادامه یافته و امواج با ارتفاع بلند از قسمت جنوبی دریاچه به قسمت شمالی آن منتشر می‌شوند. همانطوری که از نتایج ارائه شده در شکل ۲ مشهود است تأثیر میان‌گذر بر وضعیت امواج، محدود به یک فاصله معینی از میان‌گذر بوده و هر چقدر فاصله از میان‌گذر بیشتر می‌گردد از اثر وجود میان‌گذر بر امواج کاسته می‌شود. بیشترین ارتفاع امواج در بخش شمالی دریاچه در نواحی میانی این بخش شکل می‌گیرند؛ لذا میان‌گذر تأثیر کمی (در حد ۰/۰۵ متر) بر حداکثر ارتفاع امواج در این بخش می‌گذارد.

برای ارزیابی کمی نتایج، در دو نقطه نمونه در شمال و جنوب دریاچه سری زمانی ارتفاع، جهت و پریود امواج برای طوفان فوق و در دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر استخراج شده و در شکل‌های ۳ و ۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که در

مدت ۵۰ سال) نشان می‌دهد که متوسط تراز سالیانه دریاچه حداکثر حدود ۱۲۷۸ و حداقل حدود ۱۲۷۰ متر بوده است. تراز اکولوژیک دریاچه نیز حدود ۱۲۷۴ متر است. بنابراین اجرای مدل‌ها برای سه تراز فوق صورت می‌پذیرد. از سوی دیگر جهت ارزیابی تأثیر وجود و یا عدم وجود میان‌گذر بر میزان ارتفاع امواج، لازم است شبیه‌سازی‌ها برای این دو حالت نیز انجام شود. بنابراین در نهایت ۶ سناریو برای حالت‌های با و بدون وجود میان‌گذر و برای هر یک از آن‌ها در سه تراز کم‌آبی (۱۲۷۰ متر)، تراز اکولوژیک (۱۲۷۴ متر) و تراز پرآبی (۱۲۷۸ متر) در نظر گرفته شده و مدل‌ها برای این ۶ سناریو اجرا می‌گردند.

### ۳. نتایج و بحث

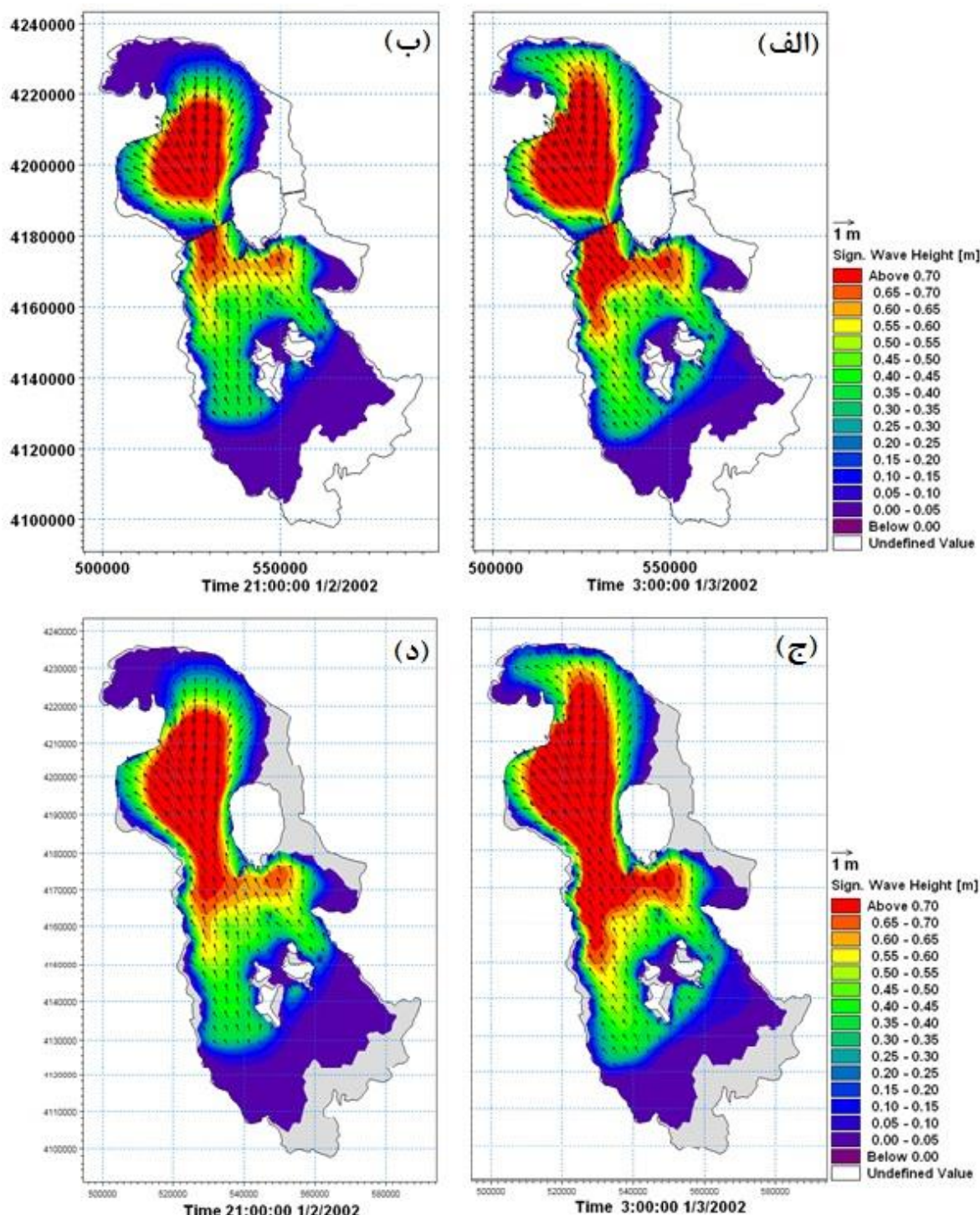
در این بخش به بررسی وضعیت امواج در کل دریاچه بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده پرداخته می‌شود. برای این منظور نتایج شبیه‌سازی‌ها برای سال‌ها و دوره‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و وضعیت امواج بر اساس آن‌ها بررسی شده است. نتایج ارزیابی میدان باد WRF نشان می‌دهد که عموماً دو جهت غالب برای طوفان‌ها در سطح دریاچه وجود دارد (شکل ۱): جهت شمال/شمال‌غرب به جنوب شرق و نیز جهت جنوب‌شرق به شمال‌غرب. با توجه به شکل، بادهای جنوب‌شرقی قوی‌تر از بادهای شمال‌غربی هستند.



شکل ۱: گلباد حاصل از نتایج میدان باد WRF در چند نقطه بر روی سطح دریاچه ارومیه

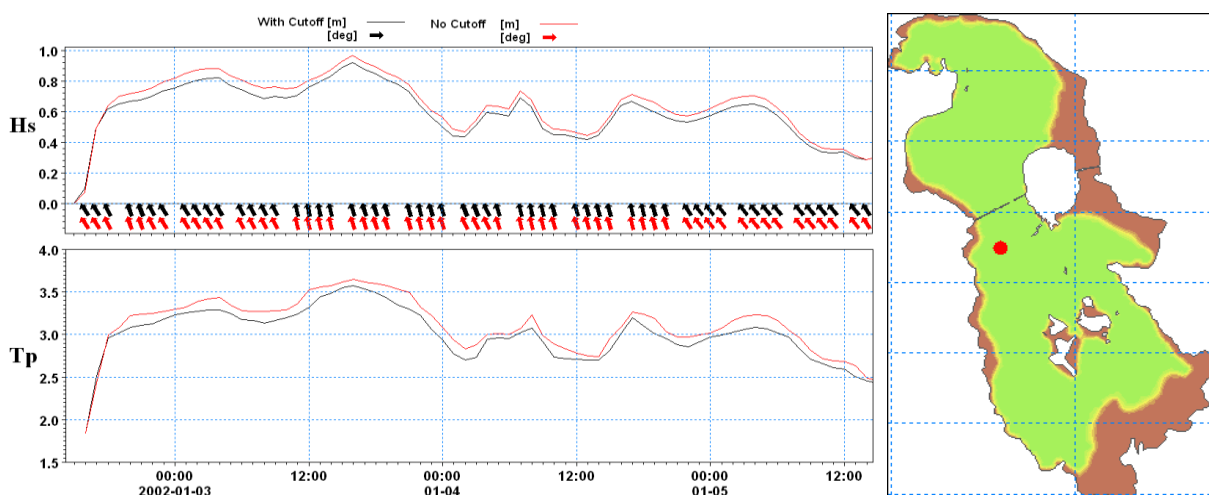
میان‌گذر ارتفاع امواج از ۱/۰ متر به ۰/۴ متر و پریود امواج از ۳/۶ ثانیه به ۲/۵ ثانیه کاهش یافته است. همچنین امواج در نقطه شمالی میان‌گذر در حالت وجود آن متأثر از امواج عبوری از میان‌گذر بوده و جهت آن بر خلاف جهت باد غالب، عمدتاً شرق به غرب است.

شکل‌ها دیده می‌شود، برای طوفان‌های جنوب‌شرقی به شمال‌غربی احداث میان‌گذر تأثیر کمی بر روی نتایج در قسمت جنوبی آن داشته (حداکثر ۰/۵٪) و امواج به رشد خود ادامه داده و به خاکریز میان‌گذر برخورد می‌کنند. این درحالی است در شمال

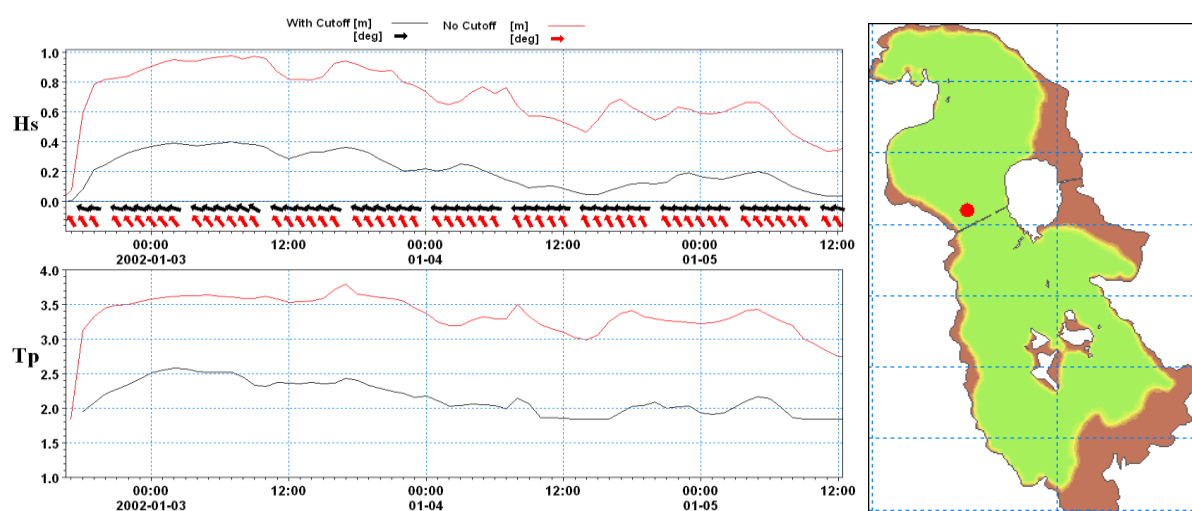


شکل ۲: ارتفاع و جهت امواج شبیه‌سازی شده در زمان شکل‌گیری یک طوفان نمونه جنوب‌شرقی به شمال‌غربی، الف و ب) برای حالت وجود میان‌گذر، ج و د) برای حالت عدم وجود میان‌گذر





شکل ۳: مقایسه سری زمانی امواج برای دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر در نقطه‌ای در جنوب میان‌گذر دریاچه



شکل ۴: مقایسه سری زمانی امواج برای دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر در نقطه‌ای در شمال میان‌گذر دریاچه

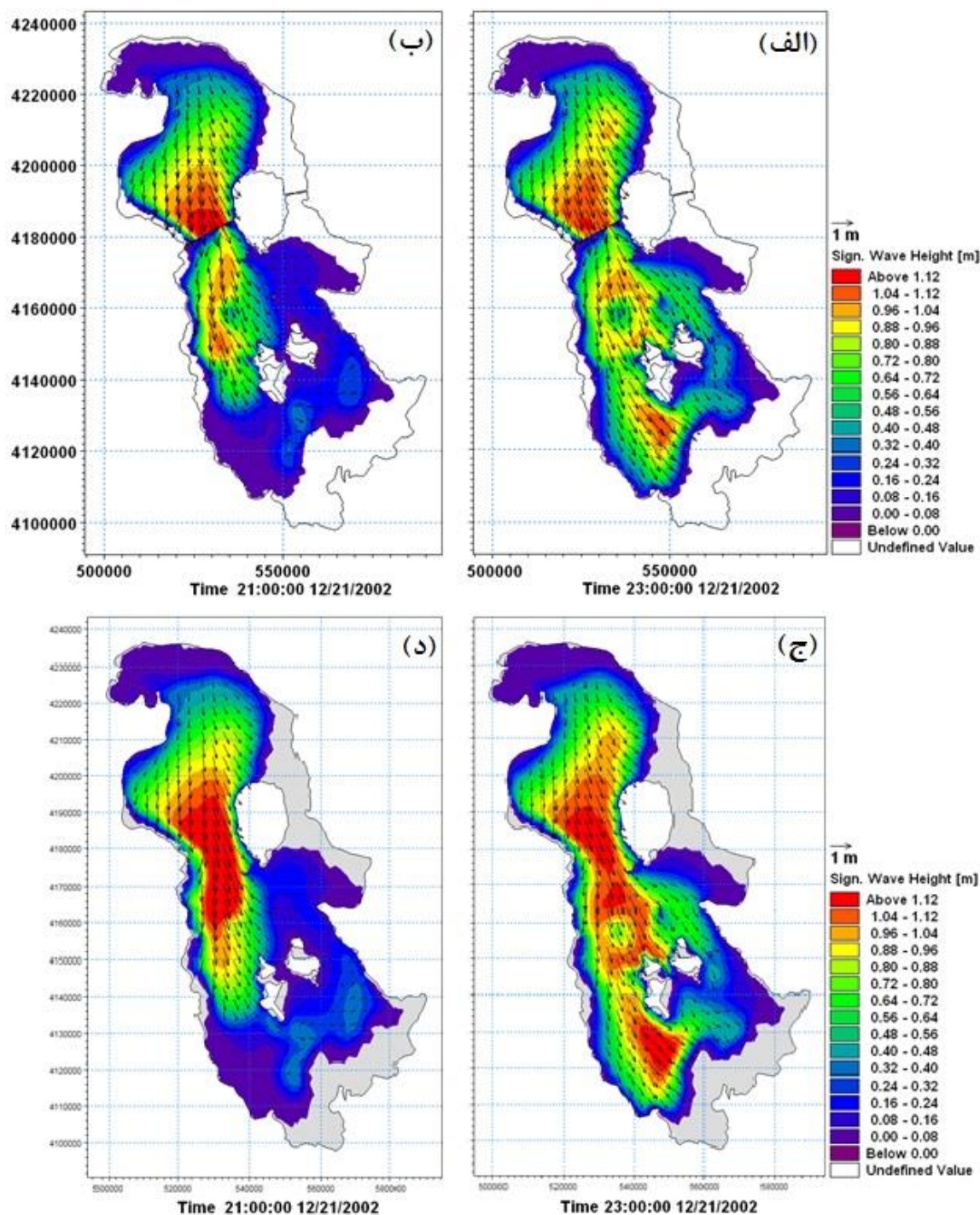
۵ (ج و د) وضعیت ارتفاع و جهت امواج شبیه‌سازی شده را برای حالت عدم وجود میان‌گذر و برای طوفان مورد اشاره نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که در اثر احداث میان‌گذر در میانه دریاچه، طول موجگاه در راستای وزش باد کاهش یافته و محدوده آرامی درست در پشت میان‌گذر و در سواحل جنوبی آن شکل گرفته است. ارتفاع و پریود امواج در حالت وجود میان‌گذر به ترتیب به حداکثر ۱/۲ متر و ۴ ثانیه می‌رسد؛ این در حالی است که در صورت عدم وجود میان‌گذر مقدار ارتفاع و پریود امواج در این قسمت به ترتیب حداکثر ۱/۳۵ متر و ۴/۴ ثانیه است. با توجه به شکل‌ها، در ناحیه بازشدگی، رشد امواج ادامه یافته و امواج با ارتفاع بلند از دهانه بازشدگی از قسمت شمالی به قسمت جنوبی دریاچه منتشر می‌شوند. برای ارزیابی

### ۳-۲/ ارزیابی نتایج مدل برای طوفان‌های شمال غربی

شکل ۵ (الف و ب) شبیه‌سازی امواج متناظر در زمان شکل‌گیری یک نمونه از این دست طوفان‌ها را نشان می‌دهد. برای این نوع از طوفان‌ها وزش بادهای شدید از شمال دریاچه شروع شده و به تدریج به سمت جنوب آن انتشار می‌یابد. در این شکل، توسعه امواج از شمال به جنوب دریاچه به دنبال افزایش سرعت باد به خوبی دیده می‌شود. همچنین، در این شکل اثرات کاهش عمق در نقاط مختلف دریاچه و نیز اثرات میان‌گذر و بازشدگی آن به خوبی قابل رویت است. مانند حالت قبل، برای بررسی اثر احداث میان‌گذر در میانه دریاچه، مدلی بدون در نظر گرفتن وجود میان‌گذر نیز برای طوفان فوق اجرا شده است. شکل

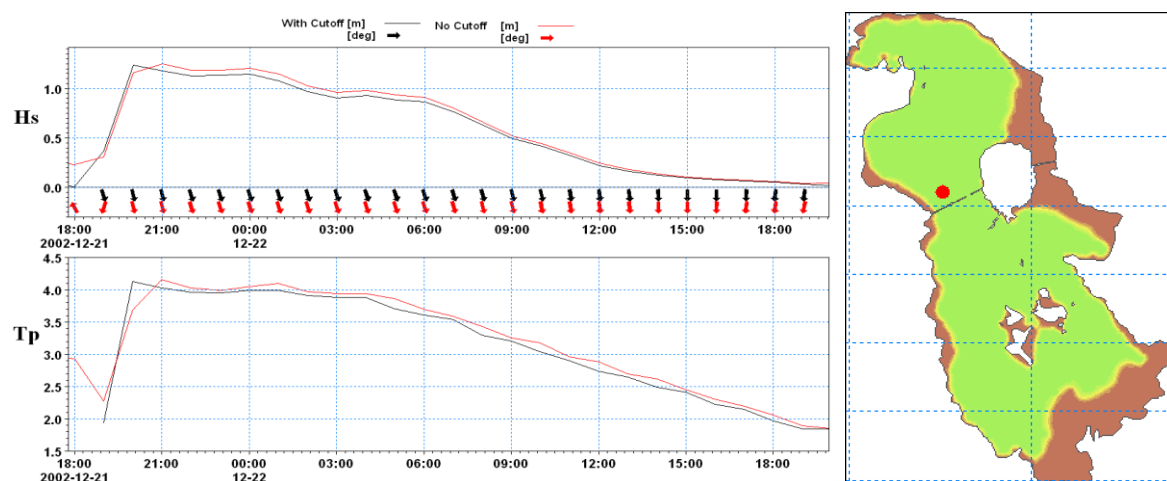
جنوب‌شرقی احداث میان‌گذر تأثیر کمی بر روی نتایج در قسمت شمالی آن داشته (حداکثر ۰/۵٪) و امواج به رشد خود ادامه داده و به جبهه شمالی خاکریز میان‌گذر برخورد می‌کنند. این درحالی است که در جنوب میان‌گذر ارتفاع امواج از ۱/۲۵ متر به ۰/۹ متر و پریرود امواج از ۴/۳ ثانیه به ۳/۴ ثانیه کاهش یافته است.

کمی نتایج، در دو نقطه نمونه در شمال و جنوب دریاچه سری زمانی ارتفاع، جهت و پریرود امواج برای طوفان فوق و در دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر استخراج شده و در شکل‌های ۶ و ۷ با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، برای طوفان‌های شمال‌غربی به

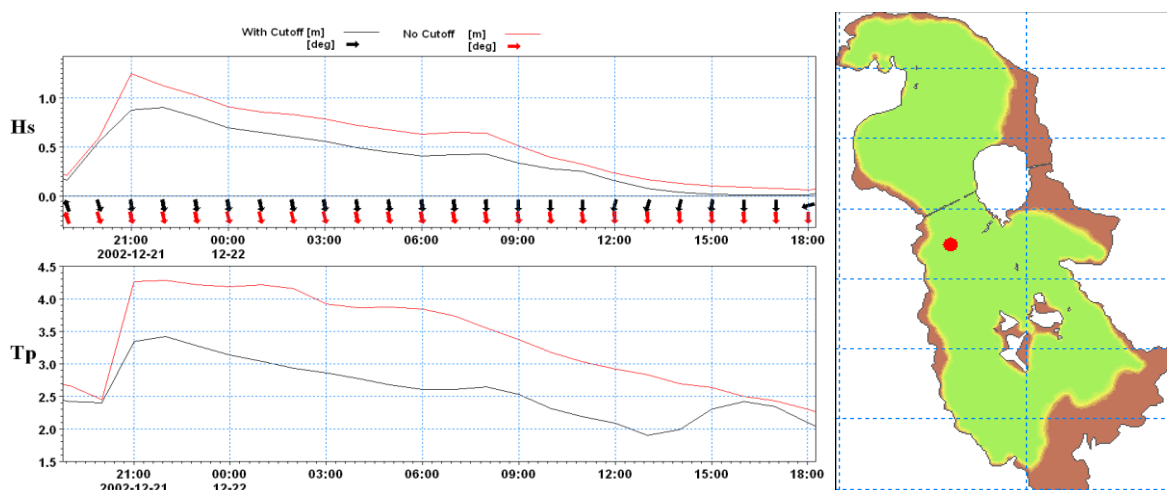


شکل ۵: ارتفاع و جهت امواج شبیه‌سازی شده در زمان شکل‌گیری یک طوفان نمونه شمال‌غربی به جنوب‌شرقی، الف و ب) برای حالت وجود میان‌گذر، ج و د) برای حالت عدم وجود میان‌گذر





شکل ۶: مقایسه سری زمانی امواج برای دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر در نقطه‌ای در شمال میان‌گذر دریاچه



شکل ۷: مقایسه سری زمانی امواج برای دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر در نقطه‌ای در جنوب میان‌گذر دریاچه

وجود میان‌گذر و در سه تراز مختلف تعریف و مدل‌های مربوطه اجرا شدند. ارزیابی گلبادهای بر روی دریاچه نشان می‌دهد که رژیم باد در سال‌های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

به عنوان نمونه شکل ۸ مقایسه گلباد حاصل از میدان باد WRF را در سه سال مختلف و برای یک نقطه در میان دریاچه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رژیم باد در سال‌های مختلف تغییر چندانی نداشته است. بنابراین می‌توان فرض نمود که اجرای مدل‌ها برای مدت یکسال نمونه، در بردارنده انواع رژیم‌های مختلف باد خواهد بود. بنابراین میدان باد سال نمونه ۲۰۰۲ برای اجرای سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده و در ادامه، نتایج برای انجام شبیه‌سازی‌ها در این سال ارائه می‌گردد.

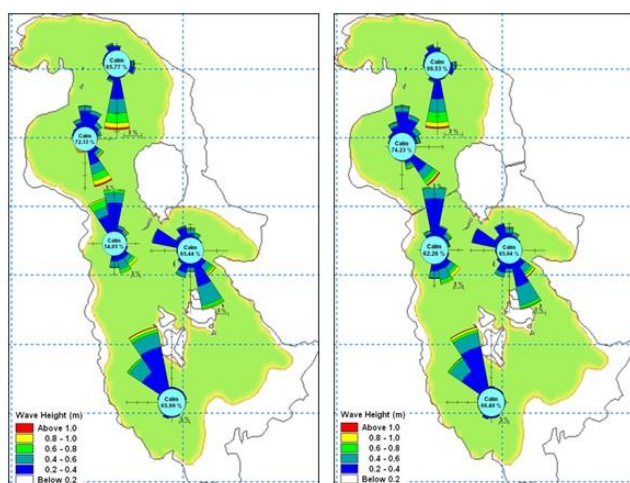
در حالت کلی، با توجه به عمق کمتر نواحی جنوبی نسبت به نواحی شمالی دریاچه انتظار می‌رود در صورت وقوع طوفان با سرعت باد برابر، به دلیل عمق بیشتر، امواج بلندتری در نواحی شمالی تشکیل گردد. از سوی دیگر همانطور که اشاره شد، بادهای جنوب‌شرقی قوی‌تر از بادهای شمال‌غربی بوده و احتمال وقوع طوفان‌های با سرعت باد بالا از جهت جنوب‌شرقی بیشتر از جهت شمال‌غربی است. این موضوع نیز سبب افزایش ارتفاع امواج در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی خواهد شد.

### ۳-۳/ ارزیابی نتایج برای سناریوهای مختلف

همانطور که اشاره شد، جهت بررسی وضعیت امواج در شرایط مختلف دریاچه، ۶ سناریو برای حالت‌های با و بدون

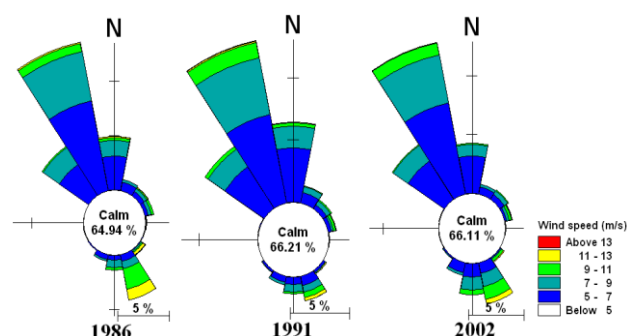
حالت به ترتیب ۰/۸ متر و ۳/۲ ثانیه بوده است. این مقادیر برای حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر تقریباً یکسان بوده است. نواحی جنوبی در حالت کم‌آبی تقریباً خشک بوده و ارتفاع امواج در بخش‌های محدود دارای آب نیز بسیار پایین است (زیر ۰/۲ متر).

گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نقاط مختلف دریاچه در حالت تراز اکولوژیک (تراز ۱۲۷۴ متر) و برای حالت با و بدون میان‌گذر در شکل ۱۰ ترسیم شده است. با توجه به شکل، امواج غالب در نقاط مختلف دریاچه در راستای شمال‌غرب به جنوب‌شرق و بالعکس هستند. حداکثر ارتفاع و پریود امواج در نواحی شمالی دریاچه در حالت تراز اکولوژیک برابر ۱/۴ متر و ۴/۲۵ ثانیه با وجود میان‌گذر و ۱/۴۵ متر و ۴/۳۵ ثانیه بدون وجود آن بوده است. در نواحی جنوبی دریاچه و برای این حالت، حداکثر ارتفاع و پریود امواج و با وجود میان‌گذر به ترتیب ۱/۲۵ متر و ۳/۷۵ ثانیه و بدون وجود آن ۱/۳۲ متر و ۳/۹ ثانیه بوده است. وجود میان‌گذر اثر خود را بر روی گل‌موج مناطق نزدیک به آن به خوبی نشان می‌دهد.



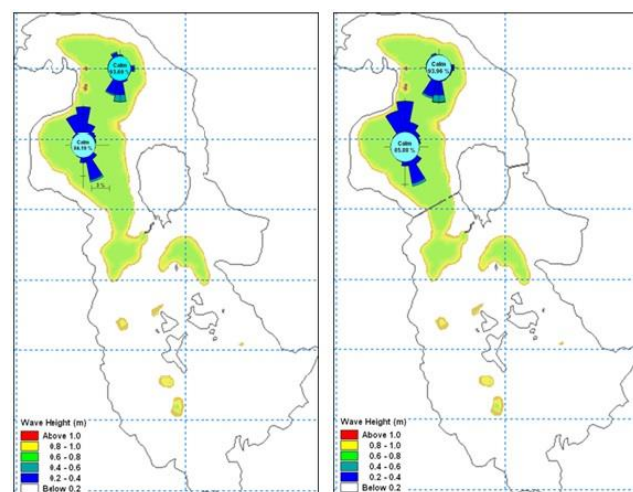
شکل ۱۰: گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نقاط مختلف دریاچه در حالت تراز اکولوژیک و برای حالت با و بدون میان‌گذر

گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نقاط مختلف دریاچه در حالت پربابی (تراز ۱۲۷۸ متر) و برای حالت با و بدون میان‌گذر در شکل ۱۱ ترسیم شده است. با توجه به شکل، امواج غالب در نقاط مختلف دریاچه در راستای شمال‌غرب به جنوب‌شرق و بالعکس هستند. حداکثر ارتفاع و پریود امواج در نواحی شمالی دریاچه برای این حالت و با وجود میان‌گذر به ترتیب ۱/۵۷ متر و



شکل ۸: مقایسه گلباد حاصل از میدان باد WRF را در سه سال مختلف و برای یک نقطه در میان دریاچه

برای ارزیابی امواج تولید شده بر روی سطح دریاچه در طی سناریوهای مختلف، گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای نقاط مختلف دریاچه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها را در نقاط مختلف دریاچه در حالت کم‌آبی (تراز ۱۲۷۰ متر) و برای حالت با و بدون میان‌گذر نشان می‌دهد.



شکل ۹: گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نقاط مختلف دریاچه در حالت کم‌آبی و برای حالت با و بدون میان‌گذر

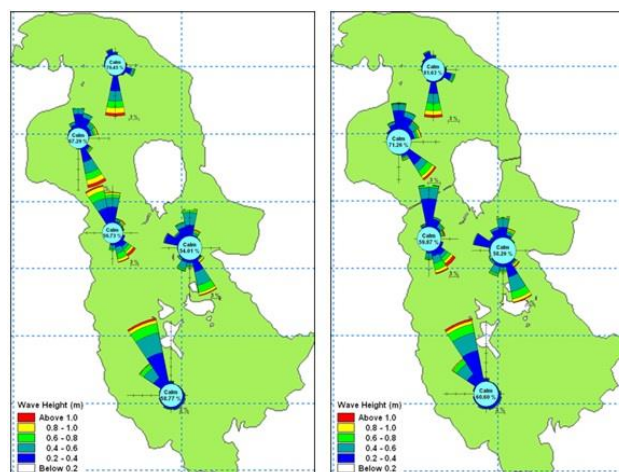
با توجه به شکل، امواج غالب در نقاط مختلف دریاچه در راستای شمال‌غرب به جنوب‌شرق و بالعکس هستند. علاوه بر جهت غالب میدان باد، جهت غالب گل‌موج‌ها در هر یک از نقاط نشان‌دهنده جهتی است که طول موجگاه مناسب در آن جهت منتهی به نقطه مورد نظر موجود بوده و باد فرصت و فاصله کافی برای انتقال انرژی به سطح آب را در آن جهت داشته است. حداکثر ارتفاع و پریود امواج در نواحی شمالی دریاچه برای این

شده، پارامترهای تعداد تقسیمات زاویه‌ای طیف، دقت روش محاسباتی و اندرکنش سه‌گانه امواج تأثیر چندانی بر روی خروجی نتایج در دریاچه ارومیه نداشته و در واسنجی مدل نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. کاهش اندازه شبکه محاسباتی تا حد مشخصی در دقت نتایج تأثیرگذار بوده و بیشتر از آن تنها باعث افزایش هزینه محاسباتی می‌گردد. این پارامتر نیز یک پارامتر واسنجی نبوده و باید ابعاد مش به صورت بهینه انتخاب شوند تا گسسته‌سازی مکانی روی نتایج تأثیرگذار نباشد. تغییرات تراز سطح آب نیز به شدت بر روی نتایج تأثیرگذار بوده و لازم است از مقدار واقعی تراز آب برای دوره مدل‌سازی با توجه به اندازه‌گیری‌ها استفاده گردد. ضرایب شکست موج، زبری بستر و سفیدک رأس موج نیز هر کدام تاحدی بر روی نتایج اثرگذار بوده و به عنوان پارامترهای اصلی در روند واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. واسنجی ضرایب مدل نیز به کمک داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای انجام گرفته است.

در ادامه به ارزیابی نتایج کلی مدل برای دریاچه ارومیه پرداخته شده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که عموماً دو جهت غالب برای طوفان‌ها در سطح دریاچه وجود دارد: از جهت جنوب‌شرق به شمال‌غرب و جهت شمال-شمال‌غرب به جنوب‌شرق. بررسی وضعیت امواج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که رشد امواج از وضعیت سرعت باد پیروی نموده و با افزایش سرعت باد و تداوم آن برای مدت چند ساعت، امواج نیز به توسعه‌یافتگی لازم می‌رسند. همچنین، وضعیت امواج کاملاً وابسته به عمق بوده و در نواحی ساحلی و مجاورت جزایر درون دریاچه، ارتفاع موج کاهش می‌یابد. علاوه بر این، احداث میان‌گذر در میانه دریاچه بر روی میدان امواج (بویژه در اطراف میان‌گذر) تأثیرگذار بوده و محدوده آرامی درست در پشت میان‌گذر در جهت مخالف باد شکل می‌گیرد.

در ادامه شبیه‌سازی‌ها برای ۶ سناریو مختلف برای حالت‌های با و بدون وجود میان‌گذر و برای هر یک از آن‌ها در سه تراز پربابی، اکولوژیک و کم‌آبی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با بالا رفتن تراز سطح آب، به دلیل افزایش عمق، ارتفاع و پریود امواج نیز افزایش یافته و از حداکثر ارتفاع ۰/۸ متر و پریود ۳/۲ ثانیه در تراز ۱۲۷۰ به ۱/۵۷ متر و ۴/۵ ثانیه در تراز ۱۲۷۸ می‌رسد. همچنین اثر وجود میان‌گذر با افزایش تراز آب و در نتیجه افزایش طول موجگاه بیشتر نمود پیدا می‌کند. در تراز ۱۲۷۸ متر، ارتفاع و پریود امواج برای حالت وجود میان‌گذر به ترتیب

۴/۵ ثانیه بوده است. این مقادیر برای حالت عدم وجود میان‌گذر به ترتیب ۱/۶۷ متر و ۴/۷۷ ثانیه بوده است. حداکثر ارتفاع و پریود امواج در نواحی جنوبی نیز برابر ۱/۵۳ متر و ۴/۲ ثانیه با وجود میان‌گذر و ۱/۶۶ متر و ۴/۳۶ ثانیه بدون آن بوده است. در این حالت نیز، تأثیر میان‌گذر بر مشخصات امواج و جهت انتشار آن‌ها در محدوده نزدیک به میان‌گذر کاملاً مشهود است.



شکل ۱۱: گل‌موج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نقاط مختلف دریاچه در حالت پربابی و برای حالت با و بدون میان‌گذر

نتایج اجرای مدل هم برای دو طوفان نمونه انتخاب شده و هم برای سال نمونه ۲۰۰۲ حاکی از آن است که تأثیر میان‌گذر بر مشخصات امواج عمدتاً در نواحی نزدیک میان‌گذر روی می‌دهد و با افزایش فاصله از میان‌گذر، از تأثیر آن بر مشخصات امواج کاسته می‌شود. لذا به عنوان نتیجه‌ای مهم از تحقیق حاضر، می‌توان گفت وجود میان‌گذر احداثی در دریاچه ارومیه در نواحی نزدیک به میان‌گذر چشمگیر بوده و به تبع آن، تأثیر آن بر روی جریان و شرایط رسوب‌گذاری در نواحی نزدیک میان‌گذر نیز بیشتر خواهد بود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، بررسی وضعیت امواج در دریاچه ارومیه می‌باشد. برای این منظور در ابتدا داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان از بهترین و مناسب‌ترین منابع موجود انتخاب و از مدل طیفی MIKE21 SW به عنوان مدل نهایی بهره گرفته شده است. سپس به تحلیل حساسیت نتایج مدل نسبت به پارامترهای مختلف پرداخته شده است. از میان پارامترهای بررسی

Comparing the Performance of Spectral Wave Models for Coastal Areas. *Journal of Coastal Research*, 332: 331–346. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00200.1>

Jadidoleslam, N.; Özger, M.; Ağırlioğlu, N. 2016. Wave power potential assessment of Aegean Sea with an integrated 15-year data. *Renewable Energy*, 86: 1045–1059. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.022>

Khazaei, B.; Khatami, S.; Alemohammad, S.H.; Rashidi, L.; Wu, Ch.; Madani, K.; Kalantari, Z.; Destouni, G.; Aghakouchak, A. 2019. Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. *Journal of Hydrology*, 569, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.004>

Scharroo, R.; Leuliette, E.W.; Lillibridge, J.L. et al. 2013. RADS: Consistent multi-mission products. In *Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry*, Venice, 20–28 September 2012, ESA SP-710, 20, ESA, Noordwijk.

Sirisha, P.; Sandhya, K.G.; Balakrishnan Nair, T.M.; Venkateswara Rao, B. 2017. Evaluation of wave forecast in the north Indian Ocean during extreme conditions and winter monsoon. *Journal of Operational Oceanography*, 10(1): 79–92. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1276424>

Soudi, M.; Ahmadi, H.; Yasi, M.; Hamidi, S.A. 2018. Assessment of main findings on Urmia Lake research and restoration efforts. *Water Utility Journal*, 19: 1–10.

Soudi, M.; Ahmadi, H.; Yasi, M.; Sibilla, S.; Fenocchi, A.; Hamidi, S.A. 2019. Investigation over the capability of MIKE 3 flow model FM to simulate the hydrodynamics and salinity distribution of hypersaline lakes: Lake Urmia (Iran) as case study. *Coastal Engineering Journal*, 61(4): 486–501. <https://doi.org/10.1080/21664250.2019.1636474>

Zeinoddini, M.; Bakhtiari, A.; Ehteshami, M. 2013. Wave-

برابر ۱/۵۷ متر و ۴/۵ ثانیه بوده، در حالی که این مقادیر برای حالت عدم وجود میان‌گذر به ترتیب ۱/۶۷ متر و ۴/۷۷ ثانیه بدست آمده است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد وجود میان‌گذر در نواحی نزدیک به آن بسیار چشمگیر بوده و به تبع آن، انتظار می‌رود هیدرودینامیک جریان و الگوی رسوب‌گذاری در این نواحی نیز بیشتر باشد.

## منابع

سازمان بنادر و دریانوردی. ۱۳۸۷. مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران (جلد اول: دریای خزر، جلد دوم: خلیج فارس و دریای عمان). سازمان بنادر و دریانوردی، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، تهران.

سازمان بنادر و دریانوردی. ۱۳۹۴. پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمال کشور. اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، <http://irancoasts.pmo.ir/fa/pg3/phase5>

شفیعی فر، م.؛ منتصری، ح.، ۱۳۸۴. بررسی اثر تغییرات گام زمانی در مدل‌های پیش‌بینی امواج دریاچه ارومیه. نشریه مهندسی دریا، سال دوم، شماره ۱.

صدرا، ۱۳۸۲. مطالعات هیدرولیک و هیدرودینامیک و بررسی‌های زیست‌محیطی (طراحی و ساخت میان‌گذر دریاچه ارومیه). جلد ۲، تهران، ایران.

Bakhtiari, A.; Zeinoddini, M. 2011. Wave-Current Coupling Effects on Flow and Salinity Circulations and Stratification in Saline Basins. *Procedia Environmental Sciences*, 10(B): 1293–1301. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.207>

Delju, A.H.; Ceylan, A.; Piguet, E.; Rebetez, M. 2013. Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1-2): 285–296. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0651-9>

DHI Water and Environment. 2007. User guide for MIKE 21 (estuarine and coastal hydraulics and oceanography, hydrodynamic module). Scientific documentation. DHI Water and Environment, Hørsholm.

Fonseca, R.B.; Gonçalves, M.; Guedes Soares, C. 2017.

- Great Lakes Research, 35(1), 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2008.08.001>
- Zhen-Gang Ji. 2007. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes and Estuaries. John Wiley & Sons.
- Zoljoodi, M.; Didevarasl, A. 2014. Water-Level Fluctuations of Urmia Lake: Relationship with the Long-Term Changes of Meteorological Variables (Solutions for Water-Crisis Management in Urmia Lake Basin). Atmospheric and Climate Sciences, 4, 358-368. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.43036>
- flow coupling effects on spatiotemporal variations of flow and salinity in a large hypersaline marine system: Lake Urmia, Iran. Limnology, 14, 77-95. <https://doi.org/10.1007/s10201-012-0389-1>
- Zeinoddini, M.; Bakhtiari, A.; Ehteshami, M. 2015. Long-term impacts from damming and water level manipulation on flow and salinity regimes in Lake Urmia, Iran. Water and Environment Journal, 29(1), 71-87. <https://doi.org/10.1111/wej.12087>
- Zeinoddini, M.; Tofighi, M.A.; Vafae, F. 2009. Evaluation of dike-type causeway impacts on the flow and salinity regimes in Urmia Lake, Iran. Journal of