شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای تعیین الگوی جریان

محمدعلی توفیقی[۱]، مصطفی زین‌الدینی[۲]، علی‌اصغر گلشنی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- استادیار مرکز ملی اقیانوس‌شناسی

چکیده

دریاچه ارومیه دارای ویژگی‌های خاص طبیعی، هیدرودینامیکی و زیست محیطی است که آن را از سایر دریاچه‌های جهان متمایز می‌سازد. احداث میانگذر شهید کلانتری در این دریاچه می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر رژیم طبیعی آن داشته باشد. تغییر احتمالی شرایط زیست محیطی، تغییر در هیدرولیک و گردش طبیعی آب و ... از جمله اثرات ساخت میانگذر بر ویژگی‌های دریاچه هستند. مطالعه الگوی جریان در دریاچه ارومیه از اهمیت خاصی برخوردار است و چنین مطالعه‌ای می‌تواند به عنوان مبنایی برای سایر مطالعات وابسته تلقی شود.

در این تحقیق، مدل‌سازی هیدرودینامیک دریاچه توسط نرم‌افزار MIKE21 به صورت دوبعدی در سطح انجام شده و الگوی جریان دریاچه در یک‌سال شاخص در شرایط متعارف محیطی تعیین شده است. سپس تاثیر نسبی تعدادی از عوامل بوجود آورنده جریان بررسی شده است. مشاهده شده است که، مدل دوبعدی به لحاظ بدست دادن نتایج نزدیک به واقعیت مقادیر سرعت و تراز دریاچه مدل مناسبی برای هیدرودینامیک دریاچه ارومیه است. همچنین در شرایط متعارف، باد اصلی‌ترین عامل بوجود آورنده جریان است و برای بدست آوردن پارامترهای طراحی وابسته به جریان در دریاچه توجه به آن ضروری است.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، هیدرودینامیک، هیدرولیک، نرم‌افزار MIKE21

Two-dimensional simulation of Urmia Lake hydrodynamics for indicating the flow regime

Abstract

The Urmia Lake has distinctive nature, hydrodynamic and environmental properties that single out that from the other lakes in the world. Construction of Shahid Kalantari causeway can cause significant effects on natural regime of the lake. It may affect on environmental biology, hydraulic, water circulation regime and … .

This paper deals with hydrodynamics of the lake. Two-dimensional surface simulation has been done with MIKE21 program. Flow regime and relative effects of parameters influencing that has been investigated. Results from this model when simulating normal condition, has been found to present a good correlation with field data as level fluctuations and velocity range. For that it seems that using 2D model for hydrodynamic is suitable but calibration with field data is needed for its approval.

This model shows that the wind input as the main environmental parameter influencing the flow regime in the Lake and for that it is important object for defining design parameters.

Keywords: Urmia (oroomieh/oromieh/orumyeh) Lake / numerical modeling / hydraulic / hydrodynamic / MIKE21 software

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

۱ـ مقدمه

دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۵۰۰ کیلومترمربع در شمال غربی کشور قرار گرفته و حوضه آبریز آن ۳/۲۱ درصد سطح ایران را شامل می‌شود. طول دریاچه بطور متوسط ۱۳۵ کیلومتر و عرض آن بین ۱۵/۵ تا ۶۰ کیلومتر و عمق متوسط آن درمناطق عمیق ۶ متر تخمین زده می‌شود. بر این اساس حجم متوسط آن بین ۱۲ الی ۳۳ میلیارد مترمکعب به ترتیب در زمان‌های کم‌آبی و پرآبی برآورد می‌شود [۱]. این دریاچه از سال ۱۳۵۸ با احداث میانگذری شرقی‌غربی به دو بخش شمالی (۳۸ درصد) و جنوبی (۶۲ درصد) تقسیم شده و درحال حاضر تنها یک آبگذر ۱۲۵۰ متری ارتباط طرفین را برقرار می‌کند. مطالعه الگوی جریان در دریاچه ارومیه از اهمیت خاصی برخوردار است و چنین مطالعه‌ای می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای سایر مطالعات وابسته، مانند مطالعات کیفیت آب و محیط زیست دریاچه، در نظر گرفته شود. در ۱۵ سال اخیر این مطالعات با احداث میانگذر و اثر آن بر الگوی جریان دریاچه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

۲ـ مروری بر مطالعات گذشته

به‌طور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه هیدرولیک و هیدرودینامیک دریاچه ارومیه را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود. یک گروه مطالعاتی که به‌منظور تعیین جنبه‌های طراحی میانگذر احداثی صورت گرفته و از سال ۱۳۷۱ بیشتر به آن توجه شده است [۲و۳و۴]. بخش دیگر تحقیقات به‌صورت پایان‌نامه‌های دانشگاهی یا مقالات علمی در نشریات و همایش‌ها ارائه شده‌اند [۵و۶و۷]. به‌لحاظ روش برخورد با مساله هیدرودینامیک و شبیه‌سازی دریاچه معمولاً دو دید کلی مطرح بوده است. یکی مدل‌هایی که فقط بیلان آبی دریاچه را مد نظر قرار داده‌اند و به دلیل ورود درصد عمده ورودی آب رودخانه‌ها به جنوب (حدود ۸۶ درصد)، عبور یک‌طرفه آب از جنوب به شمال دریاچه را محتمل دانسته و نتیجه‌گیری‌هایی مبتنی بر آن داشته‌اند و دیگری مطالعاتی که مدل‌سازی بر اساس معادلات بنیادی حاکم بر جریان (مانند پیوستگی و ممنتم) و تحلیل عددی مساله با در نظر گرفتن فرضیات و ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است. در اینجا فرضیات و نتایج تعدادی از این مطالعات به‌طور مختصر بیان می‌شود.

در مجموعه مطالعاتی که بین سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۷۳ انجام شده جنبه‌های مختلف هیدرولیک و هیدرودینامیک دریاچه مورد بررسی قرار گرفته و چگونگی تاثیر میانگذر بر تغییر شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی آب دریاچه در بخش‌های شمالی و جنوبی آن ارزیابی شده است. در این مطالعات وزش باد به عنوان عامل تعیین کننده در شکل‌گیری الگوی جریان تلقی شده و داده‌های باد حداکثر با دوره بازگشت ۵۰ ساله و دبی متوسط و سیلابی رودخانه‌های مهم با حالات ترکیبی مختلفی به مدل ساخته شده با نرم‌افزار MIKE21 اعمال شده است. نتایج ارائه شده توسط این مطالعات بیشتر جنبه‌های طراحی میانگذر را بیان می کند [۴].

در تحقیقی در سال ۱۳۸۱ با فرض باد به‌عنوان اصلی‌ترین عامل جریان‌ساز، از روش عددی در یک مدل دوبعدی سطحی بر اساس معادلات پیوستگی و ممنتم، در تعیین ویژگی‌های گردش آب ناشی از باد در دریاچه ارومیه استفاده شده است. از نتایج این مطالعه می‌توان به کم اثر بودن ضریب اصطکاک باد در سرعت جریان و تبعیت الگوی جریان از باد اشاره کرد [۵].

در تحقیق دیگری در سال ۱۳۸۳ با در نظر گرفتن آمار ۱۰ ساله رودخانه‌های آجی‌چای، سیمینه‌رود و زرینه‌رود همچنین نوسانات تراز دریاچه و استخراج آمار به‌صورت میانگین فصلی و استخراج باد غالب فصلی از آمار سی‌ساله باد، الگوی فصلی جریان به کمک نرم‌افزار MIKE21(HD) در دو حالت بدون میانگذر و وجود یک میانگذر فرضی شرقی غربی و بدون در نظر گرفتن جزایر دریاچه بدست آمده است. در نتیجه این تحقیق احداث میانگذر در الگوی جریان موثر بوده و الگوی جریان فصلی بیشتر در جهت وزش باد غالب تشکیل شده است [۸].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

در مجموعه مطالعات دیگری که بیشتر به منظور تعیین پارامترهای طراحی و بررسی روش‌هایی برای نزدیک نمودن شرایط دریاچه به قبل از احداث میانگذر صورت گرفته هیدرودینامیک دریاچه در چندین حالت هندسی مختلف برای میانگذر، مورد مطالعه قرار گرفته است.

با تحلیل نتایج مدل‌های هندسی لزوم ایجاد باز شدگی اضافی برای تامین ارتباط بین آب شمال و جنوب دریاچه بررسی شده همچنین پارامترهای طراحی نظیر ترازهای آب و سرعت‌های جریان در شرایط حدی تعیین شده است.

مدل عددی استفاده شده در مطالعات هیدرودینامیک، مدل HD از نرم‌افزار MIKE21 می‌باشد. در این مدل‌سازی تنها از شرایط باد یک جهته برای تحلیل جریان استفاده شده که الگوهای جریان به صورت فرضی و در امتداد وزش باد تشکیل شده است [۲].

۳ـ اهداف شبیه‌سازی

مرور مطالعات قبلی بیانگر آن است که این مطالعات عمدتاً بر اساس اهداف خاص طراحی انجام شده‌اند و به این دلیل اطلاعات ورودی آن‌ها (مثلا باد) عمدتاً بر اساس شرایطی بالاتر از شرایط واقعی در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌های قبلی به دلیل کمبود اطلاعات میدانی فاقد مستندات کافی واسنجی و صحت‌سنجی هستند. در تحقیق اخیر برای بررسی وضعیت جریان در دریاچه و خصوصاً در آبگذر موجود در میانگذر دریاچه شبیه‌سازی برای بررسی شرایط معمول دریاچه در یک زمان مشخص و بر مبنای اطلاعات محیطی آن زمان انجام می‌شود. سپس تاثیر هر یک از عوامل ایجاد کننده جریان بر الگوی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی در تصمیم‌گیری در مورد اهمیت و انتخاب پارامترها برای در نظر گرفتن شرایط بحرانی دریاچه و محاسبات طراحی مبتنی بر جریان کاربرد خواهد داشت.

۴ـ روش کار

مدل‌سازی دوبعدی می‌تواند هم در سطح و هم در مقطع دریاچه بکار برده شود. گستردگی سطح دریاچه و پراکندگی مصب رودخانه‌های ورودی به آن و همچنین تغییرات سرعت جریان در محدوده میانی و مجاورت بازشو نسبت به کناره‌ها و نیز وجود برخی جزیره‌های میانی در دریاچه به صورت مرزهای خشک داخلی مواردی هستند که برای منظور نمودن آنها در مطالعه می‌بایست از مدل دوبعدی در سطح استفاده شود. ضمن اینکه میزان عمق آب دریاچه نسبت به ابعاد مسطحاتی آن به اندازه کافی کوچک است که در شرایط کلی بتوان جریان در دریاچه را به صورت جریان آب کم‌عمق منظور نمود و مشاهده الگوی جریان در سطح با این مدل امکان‌پذیر می‌شود.

معیارهای مختلفی را می‌توان برای انتخاب دوره مدل‌سازی در نظر گرفت. برای مشاهده تغییرات سالانه جریان در دریاچه مدل‌سازی یک‌سال شاخص مد نظر قرار می‌گیرد. از آنجایی که هدف این تحقیق شبیه‌سازی دریاچه در شرایط متعارف دریاچه می‌باشد. معیارهایی مانند حداکثر شباهت گلباد سالانه برای سال شاخص به گلباد متوسط دوره آماری، حداکثر شباهت بین ورودی سالانه رودخانه‌ها و ورودی متوسط رودخانه‌ها به دریاچه یا حداکثر هماهنگی بین تبخیر، بارندگی و ورودی‌های رودخانه‌ها با تراز آب دریاچه مورد توجه قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه تعیین تاثیر نسبی هر یک از عوامل جریان‌ساز مانند تبخیر و بارش و دبی رودخانه‌ها نیز به‌عنوان بخشی از این تحقیق مد نظر است معیار حداکثر هماهنگی بین آمار تبخیر و بارندگی و ورودی رودخانه‌ها با تراز آبی دریاچه که به نوعی بهترین بیلان آبی دریاچه را نشان می‌دهد مناسب‌تر به نظر می‌رسد. بنابراین سال‌های ۵۸-۱۳۵۷ و ۶۶-۱۳۶۵ و ۷۶-۱۳۷۵ که بررسی آماری اطلاعات آن‌ها بهترین همخوانی داده‌ها را نشان می‌دهد [۳] می‌توانند برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شوند.

در این تحقیق شبیه‌سازی دریاچه به صورت دوبعدی در سطح و برای دوره یک‌ساله از مهرماه ۱۳۶۵ تا پایان شهریور ۱۳۶۶ انجام شده است.

۴ـ ۱ـ مدل دوبعدی MIKE21

MIKE21 که توسط موسسه DHI[1] تهیه شده نرم‌افزاری است برای مدل‌سازی دوبعدی جریان‌های با

[1] Danish Hydraulic Institute

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

سطح آزاد که امکان شبیه‌سازی هیدرولیک و پیش‌بینی پدیده‌ها در دریاچه‌ها، سواحل، خلیج‌ها و نواحی دریایی که در آنها لایه‌بندی جریان قابل صرف‌نظر (فرض همگنی در عمق) است، را دارا می‌باشد. ساختار این مدل برای هیدرولیک سواحل و اقیانوس‌شناسی، هیدرولیک محیطی، فرایند رسوب و امواج طراحی شده است. در این نرم‌افزار سه مدل هیدرولیک دریایی تعریف شده است: مدل‌های (HD) و مدل (NHD) با روش تفاضل محدود در حل معادلات حاکم و مدل (HD-FM) که از روش المان محدود در حل معادلات استفاده می‌کند.

در مدل‌سازی هیدرودینامیک می‌توان عوامل زیر را در نظر گرفت :

۱ـ ممنتم موجود و وارد شده به محیط ۲ـ تنش اصطکاکی کف ۳ـ تنش اصطکاکی باد در سطح ۴ـ گرادیان‌های فشار جو ۵ـ نیروهای کوریولیس ۶ـ لزجت ۷ـ جریان‌های ایجاد شده توسط موج ۸ـ چشمه و چاه‌ها (مانند رودخانه‌ها) ۹ـ تبخیر و بارش ۱۰ـ تر و خشک شدن مرزها

معادلات حاکم در این نرم‌افزار به‌صورت زیر هستند:

(۱)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=\frac{\partial d}{\partial t}$$

(۲)

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right]-\Omega q_fVV_x+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}(p_a)=0$$

(۳)

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy})+\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy})\right]+\Omega p_fVV_y+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial y}(p_a)=0$$

که در آن:

$h(x,y,t)$ = (d-ζ بر حسب متر) = عمق آب و $d(x,y,t)$ = تغییرات عمق با زمان و $\zeta(x,y,t)$ = تراز سطح آب و $p,q(x,y,t)$ = شار جریان در جهت x و y بر حسب $(m^3/s/m)=(uh,vh)$ که در آن u و v سرعت‌های جهت x و y متوسط‌گیری شده در عمق هستند و C = مقاومت شزی $(m^{\frac{1}{2}}/s)$ و g = شتاب جاذبه (m/s^2) و f= ضریب اصطکاک باد و $V,V_x,V_y(x,y,t)$ = سرعت باد و مولفه‌های آن در جهت‌های x,y (m/s) و $\Omega(x,y)$ = پارامتر کوریولیس وابسته به عرض جغرافیایی (s^{-1}) و $p_a(x,y,t)$ = فشار اتمسفر $(kg/m/s^2)$ و ρ_w = دانسیته آب (kg/m^3) و x,y = مختصات (m) و t = زمان (s) و $\tau_{xx},\tau_{xy},\tau_{yy}$ = مولفه‌های تنش برشی می‌باشند.

خروجی‌های مدل در میدان حل مساله شامل تراز آب و تغییرات سرعت متوسط در عمق است که به صورت گرافیکی یا جداولی در نقاط مورد نظر قابل دریافت می‌باشد. همچنین اطلاعات لازم برای اجرای سایر مدول‌هایی که مدل هیدرودینامیک اساس آن است تهیه می شود [۱۱و۱۲].

۴ـ۲ـ شرایط مرزی و اولیه

عوامل در نظر گرفته شده برای تحلیل دریاچه عبارتند از:

ـ تراز متوسط دریاچه در سال شاخص برابر ۱۲۷۵/۶۱۷ متر (از سطح دریاهای آزاد) از آمار تراز دریاچه که توسط وزارت نیرو به‌صورت متوسط ماهیانه ارائه می‌شود [۹].

ـ تغییرات زمانی باد به‌صورت ۳ ساعته از ایستگاه سینوپتیک ارومیه [۱۶] به دلیل نزدیک بودن به دریاچه و کمتر بودن عوارض طبیعی نسبت به سایر ایستگاه‌های اطراف دریاچه پس از تصحیحاتی مانند اختلاف تراز محل اندازه‌گیری و دریاچه و تصحیح اطلاعات از خشکی به دریا طبق توصیه‌های موجود [۱۵]. لازم به توضیح است که ایستگاه بادسنجی در دریاچه مستقر نیست [۲و۳] و مقایسه اندازه‌گیری سرعت و جهت باد ایستگاه ارومیه با اندازه‌گیری انجام شده در نزدیکی میانگذر [۴] در ساعات مشابه، اختلاف قابل توجهی خصوصا در جهت وزش باد نشان می‌دهد و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

لازم است برای کارهای دقیق‌تر اندازه‌گیری در محل دریاچه صورت گیرد. تا بدست آمدن چنین اطلاعاتی، استفاده از اطلاعات ایستگاه ارومیه و تصحیحات متداول که می‌تواند تا حدودی بیانگر نمونه‌ای از الگوی باد منطقه باشد اجتناب ناپذیر است.

ـ تغییرات زمانی بارش موثر (تبخیر- بارندگی) به‌صورت متوسط ماهیانه (اطلاعات از ایستگاه‌های تبخیر و باران‌سنجی مجاور دریاچه (آباجوسفلی و شرفخانه) برداشت شده‌اند [۳]).

ـ تغییرات زمانی دبی ۲۱ رودخانه مهم دریاچه که بیشترین حجم آب ورودی به دریاچه را تامین می‌نمایند به‌صورت آمار متوسط ماهیانه (اطلاعات از اندازه‌گیری ایستگاه‌های مستقر در رودخانه‌ها و با تصحیح و همبستگی آماری تهیه شده‌اند [۳]).

ـ برای هیدروگرافی دریاچه از داده‌های مرجع [۲] که کامل‌ترین اطلاعات موجود در این زمینه است و تراز مبنای آن برابر ۱۲۷۵ متر از سطح دریاهای آزاد می‌باشد استفاده شده است.

ـ ابعاد بازشو میانگذر در سال مبنا از نمودار پیشرفت عملیات پروژه میانگذر برابر ۲۱۱۰ متر تعیین شده است.

ـ میدان حل مساله کل دریاچه با در نظر گرفتن ۴ جزیره بزرگ جنوبی (کبودان، اشک، اسپیر و آرزو) که برای مدل‌سازی از شبکه‌های مربعی با بعد ۴۵۰ متر استفاده شده است.

ـ آب دریاچه با توجه به محدودیت مدل، همگن فرض شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری دانسیته آب دریاچه [۱۴] اختلاف مقدار آن را در بخش عمده‌ای از دریاچه کمتر از ۰/۰۱ گرم‌درسانتیمترمکعب نشان می‌دهد. (در بهار و در سطح عمومی دریاچه حداکثر دانسیته مقدار ۱/۱۴۶ در شمال و حداقل آن به مقدار ۱/۱۳۸ گرم‌درسانتیمترمکعب در مرکز و جنوب‌شرق اعلام شده است [۱۴].)

ـ در این مطالعه از اثر موج در ایجاد جریان صرفنظر شده است.

ـ گام زمانی اجرای مدل ۱۲۰ ثانیه متناسب عدد کورانت ۳ و گام زمانی برداشت اطلاعات هر ۱/۳۳ روز می‌باشد.

شکل ۱ـ دریاچه ارومیه

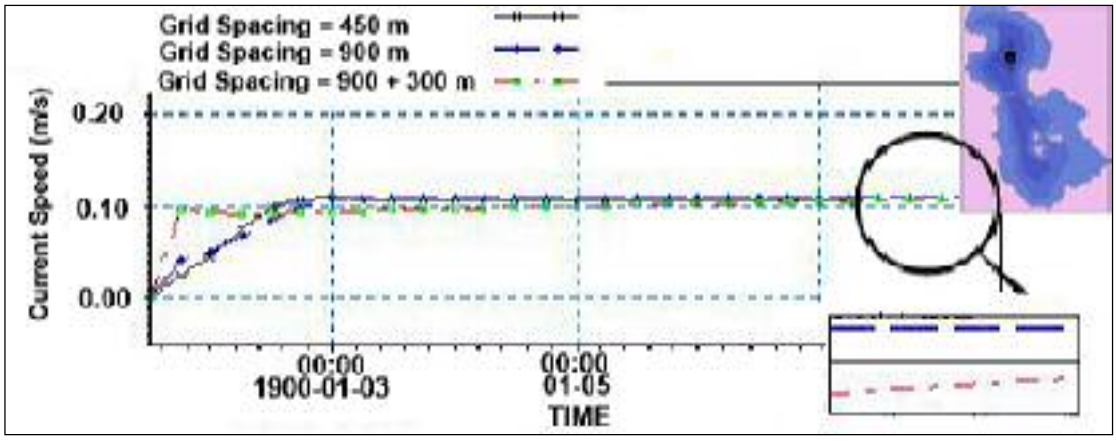
۴ـ۳ـ تحلیل حساسیت مدل

معمولاً برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی، مدل ساخته شده با توجه به اطلاعات موجود برای یک دوره زمانی تهیه و اجرا شده و پس از تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف آن و نزدیک شدن نتایج به واقعیت، مدل برای دوره زمانی دیگری اجرا و نتایج حاصل با اطلاعات میدانی موجود در آن دوره مقایسه و دقت یا عدم دقت مدل تعیین می‌شود [۱۳و۱۲]. در این تحقیق با توجه به کمبود اطلاعات میدانی مناسب برای کالیبراسیون مدل ساخته شده، استفاده از کلیه داده‌های در دسترس در این زمینه مورد توجه بوده و در نزدیک کردن مدل ساخته شده به واقعیت، تحلیل حساسیت پارامترهای موثر در محدوده مجاز نرم‌افزار و سعی و خطا مدنظر قرار گرفته است. در واقع هدف اصلی در این بخش بدست آوردن پارامترهای لازم برای مدل‌سازی، با اعتماد قابل قبول بوده است. سرعت جریان در نقاط مختلف دریاچه در مدل هیدرودینامیک، معیار حساسیت سنجی پارامترها درنظر گرفته شده و به دلیل کوتاه بودن دوره زمانی استفاده شده برای حساسیت‌سنجی از بارش موثر و دبی رودخانه‌ها صرفنظر شده است. در این تحقیق، علاوه بر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

استفاده از روش مطالعات گذشته که معمولاً تحلیل حساسیت برای یک باد ثابت انجام شده، استفاده از سرعت باد متغیر ماه ژوئیه (خردادماه) نیز مدنظر قرار گرفته است. الگوی باد این ماه مشابه‌ترین الگوی باد به دوره مدل‌سازی می‌باشد که با ترسیم گلباد هشت جهته ماهانه آن سال و مقایسه با گلباد کلی باد آن بدست آمده است. این تحلیل‌ها برای باد ثابت ۱۵/۳۷ متر بر ثانیه با جهت ۱۷۰ درجه مطابق ماکزیمم باد دوره مدل‌سازی در زمان‌های یک هفته‌ای و برای باد متغیر، دو ماهه صورت گرفته است. بررسی آمار ۳۰ ساله باد در ایستگاه ارومیه میانگین باد غالب فصلی را در بهار ۳/۶ m/s با جهت شرقی، تابستان ۴/۱ m/s با جهت شمال‌شرقی، پاییز۲/۶m/s با جهت جنوب‌غربی و زمستان ۳/۱ m/s با جهت غربی نشان می‌دهد. همچنین حداکثر تداوم یک باد ۹ ساعت تعیین شده است [۷]. بنابراین مقدار سرعت باد و مدت زمان اجرای در نظر گرفته شده برای تحلیل حساسیت در این حدود مناسب به‌نظر می‌رسد. لازم به ذکر است این مدل جریان دوبعدی با باد ثابت بالای ۱۵ متر بر ثانیه، پس از ۴ روز (حدود ۳۰۰۰ گام زمانی ۱۲۰ ثانیه‌ای با عدد کورانت ۳) در دریاچه ارومیه به ثبات نسبی می‌رسد و پس از آن مقادیر سرعت حاصل از مدل‌ها تغییرات جزئی خواهد داشت.

مقادیر سرعت جریان در دریاچه، حاصل از مدل تحلیل حساسیت، برای محدوده وسیعی از دریاچه کنترل شده است. نمودار شکل۲ نمونه‌ای از کنترل حساسیت مدل برای ابعاد شبکه محاسباتی در نقطه نمونه در شمال دریاچه را نشان می‌دهد. جدول۱ خلاصه نتایج تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.



شکل۲ـ تحلیل حساسیت ابعاد مختلف شبکه در نقطه نمونه در شمال دریاچه برای باد ثابت (این پارامتر در مدل HD (شبکه ۴۵۰ و ۹۰۰ متری) اثر ۱درصدی در تغییر سرعت دارد (در شبکه کوچکتر سرعت بیشتر بدست می‌آید). در مدل NHD (شبکه ترکیبی ۹۰۰ و ۳۰۰ متر در اطراف میانگذر) نیز کمتر از ۱ درصد نسبت به HD سرعت جریان کاهش می‌یابد، در هر حال شمای کلی نمودار یکسان است.)

جدول۱ـ نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای کالیبراسیون در مدل دوبعدی دریاچه ارومیه

پارامتر تحلیل حساسیت	حدود تغییرات در نرم‌افزار	حداکثر تاثیر مشاهده شده در سرعت جریان (درصد)	
		باد ثابت	*باد متغیر*
پارامتر لزجت گردابی (بی‌بعد)	0.25 ~ 1	0.3	0.3
ابعاد شبکه محاسباتی بین ۳۰۰ متر تا ۹۰۰ متر	آزاد با توجه به پایداری مدل	1	1
عدد مانینگ ($m^{1/3}/s$)	20 ~ 40	1	1
ضریب شزی ($m^{1/2}/s$)	30 ~ 50	50	55
ضریب اصطکاک باد و آب (بی‌بعد)	0 ~ 0.005	20	300

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

همانطور که در این جدول دیده می‌شود در محدوده وزش بادهای دریاچه در سال مبنا (حداکثر ۱۵/۳۷ متربرثانیه) و در نقاط مختلف مشاهده می‌شود که در مدل‌های HD و NHD دوبعدی، ضریب لزجت گردابی، مقاومت بستر به‌صورت عدد مانینگ و ابعاد مش در مقادیر سرعت جریان تاثیر کمی دارند. مدل‌ها نسبت به ضریب شزی برای مقاومت بستر بسیار حساسند. ضریب اصطکاک باد نیز نقش عمده‌ای در تغییر سرعت جریان دارد. البته مقدار ۰/۰۰۵، ضریب حداکثر قابل اعمال به مدل است و محدوده توصیه شده این ضریب بین۰ تا ۰/۰۰۲۶ برای بادهای با سرعت کمتر از ۳۰ متربرثانیه می‌باشد. در این محدوده تاثیر تغییر این ضریب در سرعت جریان، در حالت باد ثابت کمتر از ۱ درصد و در حالت باد متغیر تا ۱۵۰ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج تاثیر ضریب اصطکاک باد و آب در سرعت جریان با تحقیق اشاره شده در مرجع [۵] که در شرایط باد ثابت حساسیت سنجی شده همخوانی نتایج را نشان می‌دهد.

بنابراین برای تعیین مقادیر نزدیک به واقعیت این پارامترها، کالیبراسیون مدل با مقایسه اندازه‌گیری‌های همزمان سرعت باد و جریان در دریاچه لازم به نظر می‌رسد. ضمن اینکه ورود این پارامترها به‌صورت متغیر در سطح دریاچه به‌جای مقدار ثابت در کل دریاچه می‌تواند در نتایج کار تاثیر داشته باشد. با توجه به شرایط فوق و کمبود اطلاعات میدانی مناسب، برای انتخاب مقادیر این پارامترها درمدل‌سازی جریان، استفاده از توصیه‌های سازنده نرم‌افزار و مقادیر توصیه شده در نظر گرفته شد.

بنابراین در این تحقیق در مدل‌های HD و NHD، از مانینگ ($m^{1/3}/sec$) ۳۲ برای مقاومت بستر؛ به دلیل حساسیت کمتر مدل نسبت به ضریب شزی؛ (لازم به ذکر است که کالیبراسیون مدل مشابه با کمک اطلاعات همزمان سرعت باد و جریان در مرجع [۴] مقدار ۳۹ را برای این ضریب تعیین نموده که با کنترل تاثیر تغییر آن بین ۳۲ تا ۳۹ در مدل تحقیق حاضر و کم تاثیر بودن، از توصیه DHI استفاده شد.) و تغییرات متناسب با سرعت باد [۱۱] برای ضریب اصطکاک باد و آب که مطابق توصیه‌ها منطقی‌تر از یک ضریب ثابت به‌نظر می‌رسد، استفاده شده است.

۵ـ نتایج شبیه‌سازی

خروجی‌های مدل برای سال شاخص برای نقاط مختلف دریاچه کنترل شده است. نتایج بدست آمده از ابتدای May تا انتهای April (در زمان همگرا شدن مدل‌ها) برای دو نقطه نمونه در شکل‌های۳ تا ۶ نشان داده شده است.

بررسی تغییرات سرعت در سراسر دریاچه نتایج زیر را نشان می‌دهد:

۱ـ سرعت متوسط‌گیری شده جریان در بخش عمده‌ای از دریاچه کمتر از ۰/۲ متر برثانیه بدست می‌آید. این مقدار در نزدیکی بازشو میانگذر به حدود ۱ متر بر ثانیه می‌رسد و ماکزیمم سرعت در دریاچه در این نقطه دیده می‌شود. این سرعت با محدوده سرعت‌های جریان اندازه‌گیری شده در نزدیکی میانگذر در سال ۱۹۹۱ [۴] که در شرایط وزش باد با سرعتی مشابه بدست آمده، انطباق قابل قبولی نشان می‌دهد.

۲ـ جهت عمومی جریان جز در سواحل، کناره‌های میانگذر و نزدیک جزایر جنوبی، به‌صورت شمال و جنوب بدست می‌آید.

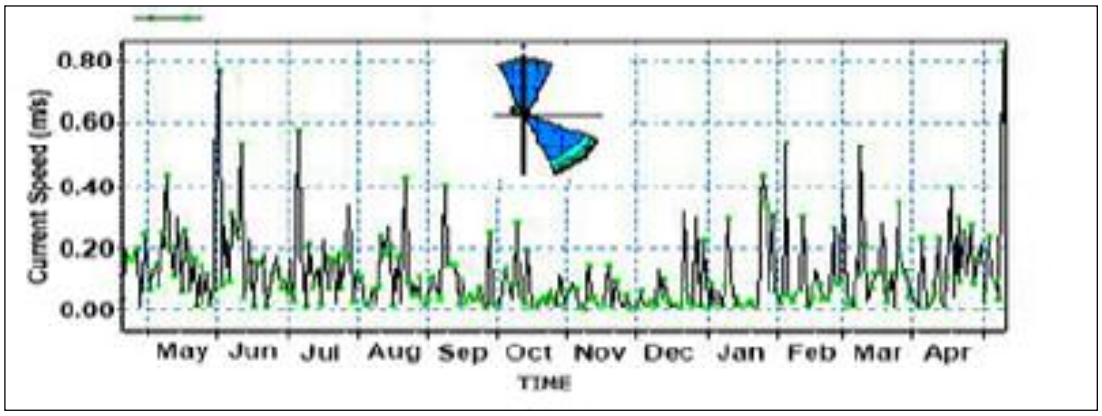
۳ـ سرعت جریان در فاصله زمانی اواسط ماه اکتبر (مهرماه) تا اواسط ماه دسامبر (آذرماه) به کمترین مقادیر خود می‌رسد. در واقع تغییرات سرعت جریان متناسب با تغییرات سرعت باد بدست می‌آید.

۴ـ نمودار شکل۶ نشان می‌دهد در ماه‌های May، Nov، Dec، Feb جهت جریان غالب در آبگذر بیشتر به سمت شمال و سایر ماه‌ها به سمت جنوب شرقی است. این موضوع خلاف تصور جریان عمومی جنوب به شمال به دلیل دبی ورودی بیشتر در جنوب دریاچه است.

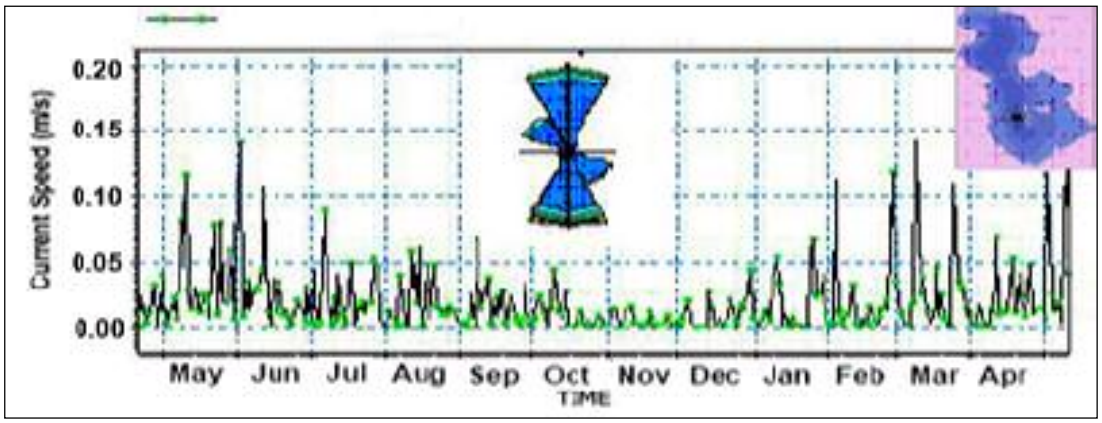
۵ـ تغییرات تراز حاصل از محاسبات مشابه تغییرات تراز اندازه‌گیری شده در دریاچه [۹] بدست می‌آید. اختلاف موجود بین دو نمودار که در حد ۲۰ سانتی‌متر است بیشتر به‌دلیل فرض تراز متوسط دریاچه (تراز اولیه ۱۲۷۵/۶۱۷ متر) برای ابتدای محاسبات می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

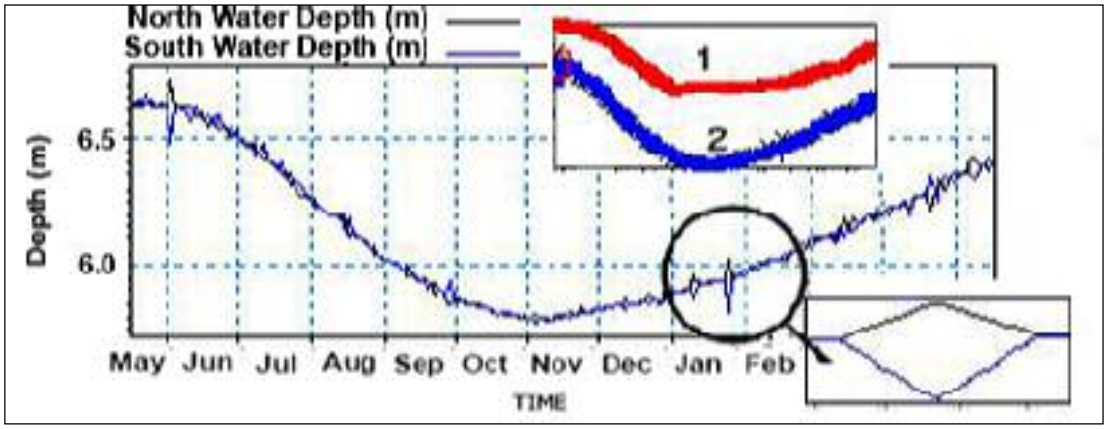
همچنین در مواقعی از سال اختلاف ترازی بین شمال و جنوب دریاچه دیده می‌شود. این اختلاف حداکثر در مدت ۴ روز و به مقدار حداکثر ۲۰ سانتی‌متر است. در این نوسانات تراز، بیشتر ماه‌ها تراز بیشتر در جنوب و در ماه‌های Jun، Jan و ابتدای May تراز شمال بیشتر دیده می‌شود. بیشتر بودن تراز جنوب دریاچه در اکثر زمان‌های سال با توجه به ورود درصد بیشتر دبی رودخانه‌ها به این قسمت دریاچه منطقی به نظر می‌رسد.



شکل۳ـ نمودار سرعت و گل‌جریان برای نقطه مرکزی بازشوی آبگذر دریاچه (حداکثر سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه و جهت عمومی جریان شمال و جنوب‌شرقی می‌باشد.)



شکل۴ـ نمودار سرعت و گل‌جریان برای نقطه مرکزی در جنوب دریاچه (حداکثر سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه و جهت عمومی جریان شمال و جنوب می‌باشد.)



شکل۵ ـ نمودار تغییرات عمق آب در مدل HD. در قسمت بالای نمودار تغییرات تراز در سال مبنا از اندازه‌گیری در دریاچه ارومیه (1) و محاسبه (2) مقایسه شده است. در سمت راست بزرگنمایی اختلاف تراز دریاچه بین شمال و جنوب دیده می‌شود. (نقاط انتخاب شده، در نقاطی با عمق اولیه ۶ متر نسبت به تراز مبنای ۱۲۷۵ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارند. به‌عبارت دیگر عدد ۶ در محور قائم متناظر تراز ۱۲۷۵ می‌باشد.)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

۶ـ عوامل موثر بر جریان و تاثیر نسبی آن در دریاچه ارومیه

در مطالعات گذشته عوامل جریان‌ساز در دریاچه ارومیه به‌صورت تخلیه آب رودخانه‌ها، اختلاف درجه حرارت و شوری آبهای ورودی (غلظت)، تبخیر، باد، جریان آب چشمه‌های کف دریاچه بیان شده‌اند[۴و۹]. در این قسمت می‌خواهیم تاثیر هر یک از عوامل فوق را در شرایط متعارف محیطی (حالت معمول دریاچه در سال مبنا)، بر روی مدل دوبعدی بررسی نماییم. اثر دبی رودخانه‌ها، تبخیر و باد در مدل ساخته شده قابل تحلیل هستند و به دلیل نبود اطلاعات کافی میدانی، اثر اختلاف حرارت آب‌های ورودی و چشمه‌های کف دریاچه را ـ علیرغم اینکه امکان مدل کردن آنها در MIKE21 وجود دارد ـ نمی‌توان مورد بررسی قرار داد. همچنین به دلیل فرض همگنی در این مدل تاثیر اختلاف غلظت دیده نمی‌شود. به این منظور مدل‌های ساده شده‌ای به‌صورت زیر تهیه و اجرا گردیدند:

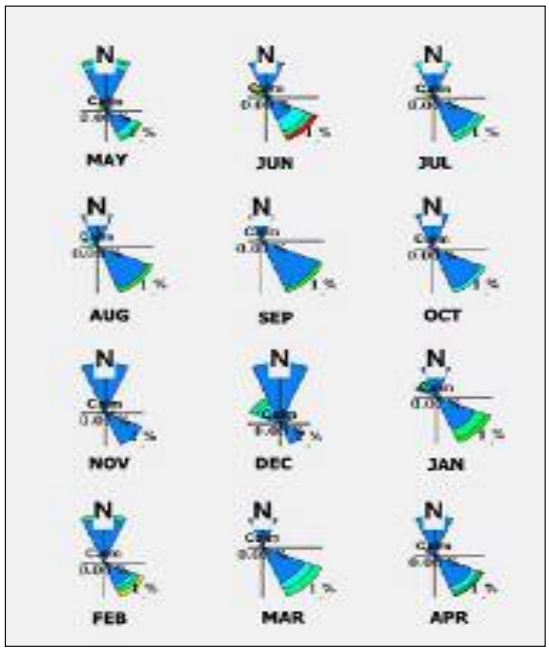
۱ـ مدل بدون رودخانه‌ها با اثر باد و بارش موثر

۲ـ مدل بدون باد با اثر رودخانه‌ها و بارش موثر

۳ـ مدل بدون بارش موثر با اثر باد و رودخانه‌ها

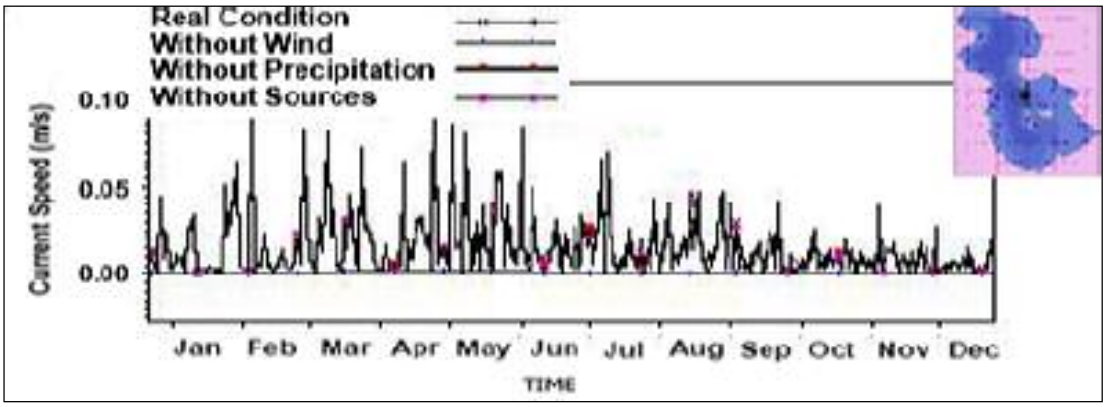
مقایسه نتایج سرعت حاصل از این مدل‌ها برای یکسال در حالت متعارف محیطی دریاچه در یک نقطه نمونه در جنوب دریاچه در شکل‌های۷ و ۸ نشان داده شده است. نمودار تغییرات سرعت در نقاط دیگر نیز نتایج مشابهی دارد.

این نمودارها نشان می‌دهند که عمده‌ترین عامل ایجاد جریان در دریاچه ارومیه باد است. به‌صورتی که با حذف باد و وجود عوامل دیگر حداکثر سرعت جریان در نقطه نمونه به ۱ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. جریاناتی در اثر تبخیر و دبی رودخانه‌ها ایجاد می‌شوند که نوسانات آن نسبت به سرعت ناشی از باد ناچیز است. اثر دبی رودخانه‌ها و بارش موثر در دریاچه را نمی‌توان بطور واضح مشاهده کرد و تغییرات نمودار با وجود یا نبود آنها بسیار نزدیک به نمودار تغییرات حالت واقعی با اثر کل عوامل جریان‌ساز بدست می‌آید.



شکل۶ ـ نمودار گل‌جریان ماهانه برای مرکز بازشو در سال مبنا از مدل دوبعدی HD

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]



شکل ۷ـ مقایسه تغییرات سرعت برای عوامل مختلف بوجود آورنده جریان در یک‌سال نمونه (خطی که در زیر به‌صورت افقی مشاهده می‌شود نمودار تغییرات سرعت جریان در مدل بدون سرعت باد است. این نمودار تغییرات جزئی دارد و حداکثر سرعت در آن به ۱ میلی‌متر برثانیه می‌رسد.)

۷ـ نتیجه‌گیری

۱ـ در شرایط متعارف محیطی سرعت جریان حاصل از مدل در محدوده بازشو میانگذر ماکزیمم مقدار را دارد. این پدیده با توجه به کم‌عرض شدن مجرا و روابط پیوستگی توجیه‌پذیر تلقی می‌شود.

۲ـ مدل‌سازی دوبعدی HD جهت عمومی جریان را به‌صورت شمال و جنوب برای بخش عمده‌ای از دریاچه نشان می‌دهد.

۳ـ در مدل دوبعدی، جهت عمومی جریان در بازشو میانگذر، شمال و جنوب‌شرقی دیده می‌شود.

۴ـ تغییرات تراز دریاچه بدست آمده از مدل دوبعدی با تغییرات تراز واقعی دریاچه همخوانی مناسبی دارد.

۵ـ بر اساس نتایج شبیه‌سازی، در شرایط متعارف عمده‌ترین عامل نوسان جریان در دریاچه ارومیه باد است گرچه جریاناتی نیز تحت تاثیر تبخیر و دبی رودخانه‌ها ایجاد می‌شوند که نوسانات آن نسبت به سرعت ناشی از باد ناچیز است.

۶ـ در این مطالعه به دلیل عدم امکان مدل استفاده شده و فرض همگنی در آن، از اختلاف دانسیته آب ورودی به دریاچه و آب دریاچه، همچنین از اختلاف دانسیته آب دریاچه در مناطقی که آب شیرین جریان دارد و می‌تواند عامل ایجاد جریان در چنین مکان‌هایی باشد صرفنظر شده است. همچنین اثر موج در جریان بررسی نشده است. در نظر گرفتن این دو موضوع در مطالعات بعدی پیشنهاد می‌گردد.

با توجه به تشابه تغییرات تراز حاصل از محاسبات و تراز واقعی دریاچه و محدوده سرعت بدست آمده از مدل و اندازه‌گیری در دریاچه به نظر می‌رسد استفاده از مدل دوبعدی برای مدل‌سازی جریان در سطح دریاچه بتواند به لحاظ مقدار سرعت نتایج مناسب و نزدیک به واقعیت ایجاد کند. البته اندازه‌گیری همزمان باد و جریان برای کالیبراسیون چنین مدلی ضروری است. همچنین به دلیل تاثیر نسبی باد به‌عنوان عامل اصلی ایجاد جریان در شرایط متعارف محیطی دریاچه، حالات بحرانی این پارامتر می‌تواند ایجاد کننده بحرانی‌ترین حالت جریان در دریاچه باشد.

۸ـ تشکر و قدردانی

از جناب آقای مهندس نویدی مجری محترم طرح شهید کلانتری و جناب آقای مهندس برهانی مدیرعامل محترم شرکت خدمات مدیریت ایرانیان که با در اختیار دادن نتایج برخی مطالعات قبلی صورت گرفته در دریاچه ارومیه کمک شایانی در انجام این تحقیق داشته‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم.

۹ـ مراجع

1-Jabbarloo Shabestari (2003). The Urmia Lake. Naghsh-e-mehr. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]

2-Sadra Company (2003). Hydrodynamic & hydraulic and environmental investigation report (Design & construction of the Oromieh Lake causeway).Rev 2

3-Tarh-e-Noandishan Consulting Company (Feb 2004). Formal investigations of hydraulic in the Urmia Lake. (In Persian)

4-Ab-Niroo Consulting Company (1995). Hydraulic report (Primary investigations of Shahid Kalantari highway in the Urmia Lake). Vol. 5 (In Persian)

5-Abrari R (2003). Water Circulation in the Urmia Lake. MS thesis. Tarbiat Modares University. (In Persian)

6-Modaresi V (2002). Considering the hydrodynamic behavior of the Urmia Lake related to the Shahid Kalantari Highway. Water & Sewerage journal. Vol. 38. pp 65-72. (In Persian)

7-Fllah A (2004). Indicating the wave regime and water flow in the Urmia Lake by Mike21 model. MS thesis. Tarbiat Modares University. (In Persian)

8-Papers of the Urmia Lake causeway seminar (2003). Tehran University. (In Persian)

9-Alikhani M (1997). Fluctuations of water level & salinity in the Urmia Lake. MS thesis. Amirkabir University. (In Persian)

10-DHI (2003). MIKE 21 Coastal Hydraulics and Oceanography Hydrodynamic Module Scientific Documentation.

11-DHI (2003). MIKE 21 Coastal Hydraulics and Oceanography Nested Hydrodynamic Module Reference Manual Addendum to MIKE 21 HD Reference Manual.

12-Hansen Ian (September 2001). 3Dimensional hydrodynamic modeling of Maracaibo system. Venezuela. Proceeding XXIX IAHR congress. Beijing. China.

13-MOFFATT & NICHOL Engineers (Jan 2005). Hydrodynamic modeling tools and techniques. South bay salt pond restoration project

14-Daneshvar & Ashasi Sarkhabi (1994). Investigation of physical and chemical properties of water in the Urmia Lake. Environment journal. Vol. 17; pp.32-43. (In Persian)

15-US. Army (1984). shore protection manual.

16-www.wheather.ir (Iranian metrological organization website)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.4.4.4]