



Land-Water Interface Modeling Using a Two-Dimensional Shallow Water Model

مدل‌سازی تر و خشک‌شدن مرز در مدل دوبعدی جریان آب کم‌عمق

M. Shafieefar¹ and A. Valizadeh²

مهدی شفیعی فر^۱ و علیرضا ولی‌زاده^۲

Abstract

In this paper the H2D shallow water model is developed which employs terms like atmospheric pressure, wind stresses, tidal forces, and boundary friction status. Adding the algorithm of wetting and drying in boundary cells, along with the changing wind and pressure fields, a new model called Surge2D is developed. The numerical 2D model developed in this study estimates the shallow water currents. The land-water interface is treated as a moving boundary in which the flooding and draining rate depend on the both simulated current and the height of water in adjacent 'wet' cells. This ensures realistic and smoothly varying results. In this approach for the status of a boundary cell to change from dry to wet or wet to dry, the water level should become greater or less than a specified stage, respectively. Furthermore the fluid must cross the length of the boundary cell according to the flow velocity in the adjacent cell. The results of this model were compared to both analytical solutions and MIKE21 results. The result of the 2D model indicated an excellent agreement with the analytical solutions (differences less than 0.1%). This model is used to study the effects of Shahid Kalantary causeway on the current pattern and characteristics in Urmia Lake, in north-western Iran.

Keywords: Shallow water, Numerical model, Dry-wet boundary, Urmia Lake

چکیده

در این تحقیق مدل دوبعدی H2D که مدل جریان آب کم‌عمق است و ترمهای گرادین فشار جو، تنشهای باد، نیروی جزرومدی و اصطکاک کف و دیواره را دارد، توسعه داده شده و با اضافه کردن الگوریتم تر و خشک شدن مرزها، میدان باد و فشار متغیر و شبکه مستطیلی متغیر به آن، مدل جدید Surge2D تهیه شده است. الگوریتم مورد استفاده، هم سرعت جریان و هم ارتفاع آب را برای بررسی تغییر مرز به کار می‌برد. در این روش برای تغییر وضعیت یک المان مرزی از حالت خشک به تر یا برعکس، به ترتیب باید ارتفاع آب از یک مقدار حداقل بیشتر یا کمتر باشد و علاوه بر آن سیال آب با توجه به سرعتی که در المان مرزی دارد، طول المان را طی کند. در نتیجه مدل‌سازی واقعی‌تری نسبت به مدل‌های پیشین مثل Mike21 امکان‌پذیر است. نتایج اجرای مدل با حل‌های تحلیلی تفاوتی بسیار اندک، در حدود ۰/۱ درصد را نشان می‌دهند. این مدل برای بررسی تاثیر احداث میانگذر شهید کلانتری بر خصوصیات جریان در دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفته است و تغییرات الگوی جریان در دریاچه ارومیه پس از احداث میانگذر ارایه گردیده است.

کلمات کلیدی: آب کم‌عمق، مدل عددی، مرز خشک و تر، دریاچه ارومیه

تاریخ دریافت مقاله: ۹ آبان ۱۳۸۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۵ تیر ۱۳۸۷

1- Associate Professor, Dep. of Civil Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, shafiee@modares.ac.ir
2- Ph.D. Student, Dep. of Civil Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, valizada@modares.ac.ir

۱- استادیار بخش عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس.

۱- مقدمه

تأثیرات غیر منتظره‌ای بر محیط زیست، الگوی جریان و نحوه توزیع رسوب یا شوری در یک محیط آبی داشته باشد، در این تحقیق بررسی الگوی جریان در دریاچه ارومیه قبل و پس از احداث میانگذر شهید کلاتری و خشک و تر شدن مرزها در این دریاچه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تاریخچه تحقیق

مدل‌های دوبعدی انتگرال‌گیری شده در عمق از سال ۱۹۶۰ برای شبیه‌سازی جریان‌ات آب کم‌عمق شبیه مد طوفان و جزر و مد به کار برده می‌شوند. پیشرفتهای اخیر در تکنولوژی محاسباتی امکان استفاده از مدل‌های سه بعدی را فراهم کرده است. اما همچنان به دلیل اقتصادی بودن و دقت کافی مدل‌های دوبعدی، در بسیاری از شبیه‌سازیهای تراز آب و جریان از مدل‌های دوبعدی استفاده می‌شود. مدل‌های دوبعدی و سه بعدی تهیه شده تا دهه اخیر، توسط Hardy and Bode (1997) با هم مقایسه شده‌اند. افراد زیادی از جمله Hai and Guohng (1993), Li and Zhang (1996), Grimshow and Tang (1995), Dube et al. (1997) و Hubbert et al. (1999) مدل‌های هیدرودینامیکی مختلفی برای مدلسازی جریان‌های آب کم‌عمق تهیه کرده‌اند که در هیچ کدام از آنها به جز مورد آخر خشک و تر شدن مرزهای جریان در نظر گرفته نشده است.

روشهای مختلفی برای اعمال مرز متحرک در مدل‌های جریان دوبعدی افقی وجود دارد. اکثر این روشها تکنیک‌هایی به کار می‌برند که به وسیله آنها المان‌های شبکه بر اساس ارضای شرایط خاصی مرحله به مرحله به میدان حل اضافه یا کسر می‌شوند. فرض معمول در این روشها این است که مولفه‌های عمودی سرعت در مرز آب و خشکی صفر می‌باشند و المان‌های شبکه هنگامی تر در نظر گرفته می‌شوند که عمق آب به تراز توپوگرافی نقطه خشکی مجاور برسد. این روشها اغلب نتایج غیرواقعی و ناپایدار، مخصوصاً هنگامی که ابعاد المان‌ها افزایش می‌یابد، تولید می‌کنند (Bodine and Reid, 1984) و (Murty, 1990). در بعضی روشهای دیگر علاوه بر شرایط فوق، گرادیان سطح آب هم در نظر گرفته شده است (Flather and Heaps, 1979). مدل SLOSH که برای پیش‌بینی کاربردی مد طوفان تهیه شده است، تغییر مرزها و از سرگذری از روی مرزهای داخلی را نیز در نظر می‌گیرد. یکی از مهمترین تکنیکها این است که در هر گام زمانی، خشک یا تر بودن المان‌های مرز کنترل شود. این تکنیک مستقیماً به کار می‌رود و به راحتی قابل فهم است (Jelesnianski, 1992).

بسیاری از فعالیتهای تجاری و اقتصادی دریایی در مناطق کم‌عمق فلات قاره و نزدیک ساحل انجام می‌پذیرد. از جمله این فعالیتها می‌توان به استخراج و حمل نفت و فرآورده‌های نفتی اشاره کرد که موجب افزایش روزافزون آلودگیهای نفتی می‌گردد. استفاده از مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی حرکت (پخش و انتقال) و توزیع غلظت ذرات نفت در آبهای نواحی ساحلی اهمیت زیادی دارد. یک مدل پخش و انتقال نفت، نیازمند استفاده از مدلی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان است که به وسیله آن تغییرات سطح آب و سرعتهای جریان در منطقه مورد مطالعه قابل پیش‌بینی باشد. در این راستا استفاده از مدل‌های دوبعدی و سه بعدی مفید می‌باشد. مدل‌های دوبعدی جریان آب کم‌عمق، با توجه به کم‌هزینه بودنشان نسبت به مدل‌های سه بعدی رواج بیشتری دارند. اما اکثر این مدل‌ها تغییرات مرز خشک و تر را به خوبی در نظر نمی‌گیرند. از آنجایی که هنگام بالا آمدن سطح آب، قسمتی از خشکی‌های مجاور با آب پوشانیده می‌شوند و هنگام پایین رفتن سطح آب دوباره خشک می‌شوند، برای پیش‌بینی‌های با دقت بالا، طراحی‌های ساحلی، کاربردهای مهندسی و جاهایی که دقت زیادی نیاز است، استفاده از مدل‌هایی که خشک و تر شدن مرز را با اعمال یک مرز خشک و تر (dry-wet boundary) در نظر می‌گیرند، الزامی می‌باشد (Hubbert and MacInnes, 1999).

هرچند مرزهای خشک و تر پیچیده، با استفاده از تکنیکهای المان محدود یا از روشهای تفاضل محدود منطبق بر مرز قابل محاسبه می‌باشند، ولی این روشها دارای هزینه محاسباتی بالا بوده و به طور کلی استفاده از آنها مشکلتر از روشهای استاندارد تفاضل محدود روی یک شبکه مستطیلی می‌باشد. در نتیجه غالباً از روشهای تفاضل محدود همراه با شبکه‌های مستطیلی در مباحث اقیانوس‌شناسی استفاده می‌شود (Matthews et al., 1995).

در این تحقیق روشی جدید و آسان برای اعمال مرز خشک و تر در مدل شبیه‌سازی جریان‌های دریایی معرفی می‌شود. پس از معرفی مدل H2D - که اساس مدل جدید را تشکیل می‌دهد- و معادلات حاکم و روش حل آنها، نحوه اعمال مرز خشک و تر در مدل جدید Surge2D تشریح می‌گردد. سپس صحت‌سنجی مدل صورت می‌گیرد. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل با نتایج حل تحلیلی میدان باد و فشار مقایسه می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده از اجرای مدل بر روی دریاچه ارومیه با نتایج مشابه که از حل با نرم‌افزار Mike21 حاصل شده است، مقایسه می‌گردد. از آنجایی که احداث بسیاری از سازه‌ها و تاسیسات دریایی، مانند میانگذرها، می‌تواند

که q_x ، q_y مؤلفه‌های دبی به ترتیب در جهات x و y و p فشار
 اتمسفر، $d = h + \eta$ عمق کلی آب، h عمق آب در تراز ایستایی،
 η نوسان تراز سطح آب، ρ چگالی آب، t زمان، g شتاب جاذبه
 زمین، f پارامتر کوریولیس ($f = 2\omega \cos \phi$)؛ ω سرعت زاویه‌ای
 چرخش زمین ($\omega = \frac{2\pi \text{radian}}{24 \text{ hour}}$)، ϕ عرض جغرافیایی، τ تنش
 برشی که زیرنویس‌های x و y جهت تنش برشی، زیرنویس‌های s
 و b محل تنش برشی (سطح یا کف) و زیرنویس 1 بیانگر اصطکاک
 جانبی ناشی از آشفتگی است. تنش‌های برشی از روابط زیر محاسبه
 می‌شوند (Hubbert et al., 1999):

$$(\tau_{xs}, \tau_{ys}) = \rho a c d |W| (W_x, W_y) \quad (4)$$

$$(\tau_{xb}, \tau_{yb}) = \frac{\rho f d}{8d^2} Q (q_x, q_y) \quad (5)$$

$$\tau_1 = \rho \left(\varepsilon_y \frac{\partial q_x / d}{\partial y} + \varepsilon_x \frac{\partial q_y / d}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ρ_a چگالی هوا است که برای هوای مرطوب دریا در تحقیق حاضر
 برابر با ۱/۲۹۷ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمکعب در نظر گرفته شده است.
 c_d ضریب دراگ باد که از روابط مختلف به دست می‌آید. W
 سرعت کلی باد، W_x و W_y مؤلفه‌های سرعت باد در جهات x و y ،
 Q دبی کلی، f_d ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ، ε_y ، ε_x
 ضرایب لزجت گردابه‌ای در جهات x و y که در اینجا با هم مساوی
 در نظر گرفته شده‌اند.

در مدل H2D معادلات فوق بر روی شبکه حل آراکاوای C
 (Smith, 1987) که یک شبکه مستطیلی با ابعاد المان متغیر
 می‌باشد (شکل ۱)، با استفاده از روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی
 (روش Crank-Nicolson) پیشرو در زمان و مرکزی در مکان حل
 می‌شوند. در این روش با شکستن معادله پیوستگی به دو معادله
 مجزا و با استفاده از تکنیک حل جاروی دوطرفه (double sweep)
 که نیاز به حل یک ماتریس بزرگ را برطرف می‌کند - می‌توان به
 راحتی و در زمان کوتاهی معادلات را حل نمود. در این مدل، به دلیل
 استفاده از شبکه مستطیلی با ابعاد المان متغیر، امکان افزایش دقت
 در مناطق خاص، با ریز کردن ابعاد شبکه وجود دارد. ترمهای گرادیان
 فشار جو متغیر، تنشهای باد ناشی از یک میدان باد متغیر و خشک و
 تر شدن مرزها و شبکه با ابعاد المان متغیر به مدل H2D که
 نیروهای جزر و مدی، نیروی کوریولیس، اصطکاک کف و اصطکاک
 جانبی را در نظر می‌گیرد، اضافه شده است.

Hu and Kot (1997) روشی به کار بردند که به جای استفاده از
 مرز پله‌ای، آنگونه که در مدل‌های پیشین استفاده شده است، مرز را
 به صورت مورب (oblique) در نظر می‌گیرد. این روش نه تنها مرز
 خشک و تر را با دقت بیشتری تخمین می‌زند، بلکه با استفاده
 از فرمول‌های میانبایی، سرعت‌های نزدیک مرز را هم با دقت زیادی
 محاسبه می‌نماید. با وجود این مزایا، برنامه نویسی این روش
 مشکلتر از روشهای دیگر است. در یک مدل دوبعدی جدیدتر، به
 منظور تعیین تغییرات مرز، علاوه بر شرط تراز آب، از سرعت
 جریان در المان‌های مجاور مرز هم استفاده شده و نتایج خوبی به
 دست آمده است (Hubbert, 1999). براساس تکنیک finite-slot
 (Guo and Chungjin, 2002) تمام میدان محاسباتی با استفاده از
 بالاترین تراز آب ممکن مشخص می‌شود و نواری بین حداکثر تراز
 آب و حداقل تراز آب ممکن به وجود می‌آید که در آن عمق آب به
 صورت مصنوعی، همواره مثبت در نظر گرفته می‌شود (حتی در
 المانهای خشک)، بنابراین کل قلمرو حل ثابت است. ایراد این روش
 این است که یک سری المان اضافی باید در حل در نظر گرفته شوند
 که مقداری هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد، اما در کل برنامه
 نویسی و استفاده از آن آسان است. (Patrick et al. 2002). برای
 مدلسازی ازسرگذری (run-up) از یک الگوریتم تر و خشک شدن
 مرز استفاده کردند که باز هم برای تغییر مرز فقط شرط ارتفاع آب را
 به کار می‌برد.

۳- معرفی مدل تهیه شده

معادلات حاکم بر مدل H2D که توسط Maa (1990) ارائه شده،
 معادلات آب کم‌عمق می‌باشند که در آنها شتابهای قائم نادیده گرفته
 می‌شوند (امواج سطحی با پریود کوتاه و جریان حول موانع در نظر
 گرفته نمی‌شوند)، کف بستر صلب و نفوذناپذیر و چگالی آب
 یکنواخت فرض می‌شود. معادلات انتگرال‌گیری شده در عمق به
 شکل زیر می‌باشند:

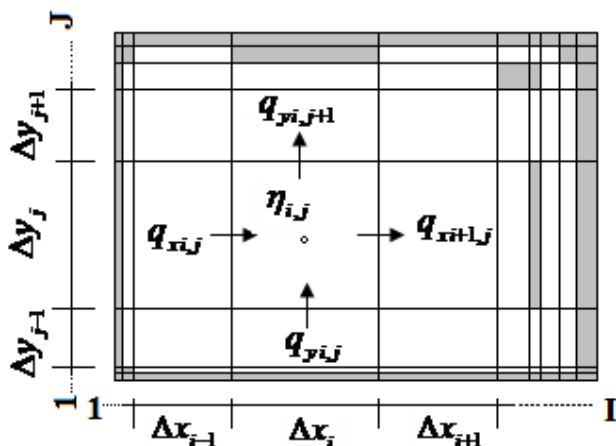
$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = - \frac{\partial q_x q_y / d}{\partial y} - \frac{\partial q_x^2 / d}{\partial x} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d}{\rho} \frac{\partial \tau_1}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{xs} - \tau_{xb}) + f q_y$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = - \frac{\partial q_x q_y / d}{\partial x} - \frac{\partial q_y^2 / d}{\partial y} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{d}{\rho} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{ys} - \tau_{yb}) - f q_x$$



شکل ۱- شبکه حل مدل تفاضل محدود؛ سلول‌های خاکستری مرزهای خشکی و سلول‌های سفید محیط تر را نشان می‌دهند.

$$\Delta'x_i = \Delta t \times u_i + \Delta'x_i \quad (9)$$

$$u_{i+1} = \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_{i+1} + \Delta x_i} \times u_i \quad (10)$$

$$u_{i+1} = \frac{-\Delta x_i \times u_{i-1} + u_i (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})}{\Delta x_{i-1}} \quad (11)$$

$$\eta_{i+1} = \left[\frac{u_{i+1}}{2 \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta t} - u_{i+1}} \right] \times \eta_i \quad (12)$$

سرعت در نقطه‌ای که جدیداً به شبکه حل اضافه شده است، با برون‌یابی از نقاط مجاور بدست می‌آید (معادلات ۱۰ و ۱۱) و معادله پیوستگی برای به دست آوردن عمق آب در گره جدید حل می‌شود (معادله ۱۲).

اگر $\Delta'x_i > \Delta x_i$ و $\eta_i + z_i > z_{i+1}$ باشد، آنگاه سرعت در سلول تر جدید یا با درون‌یابی بین سلول مرزی خشک و سلول تر قبلی از رابطه (۱۰) و یا با برون‌یابی از دو سلول تر قبلی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید. و تراز سطح آب از حل معادله پیوستگی ساده شده و با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

برای بررسی خشک شدن مرز (شکل ۲-ب)، اگر ارتفاع سیال در نقطه ارتفاعی مجاور مرز کمتر از یک مقدار دلخواه شود (\mathcal{E}) و فاصله تجمعی طی شده توسط سیال به اندازه طول المان باشد، فرض می‌شود که المان خشک شده است. در این صورت ارتفاع و سرعت آن مساوی صفر منظور شده، از شبکه حل خارج شده و مرز به نقطه سرعتی تر مجاور تغییر مکان می‌یابد.

۴- الگوریتم خشک و تر شدن مرزها

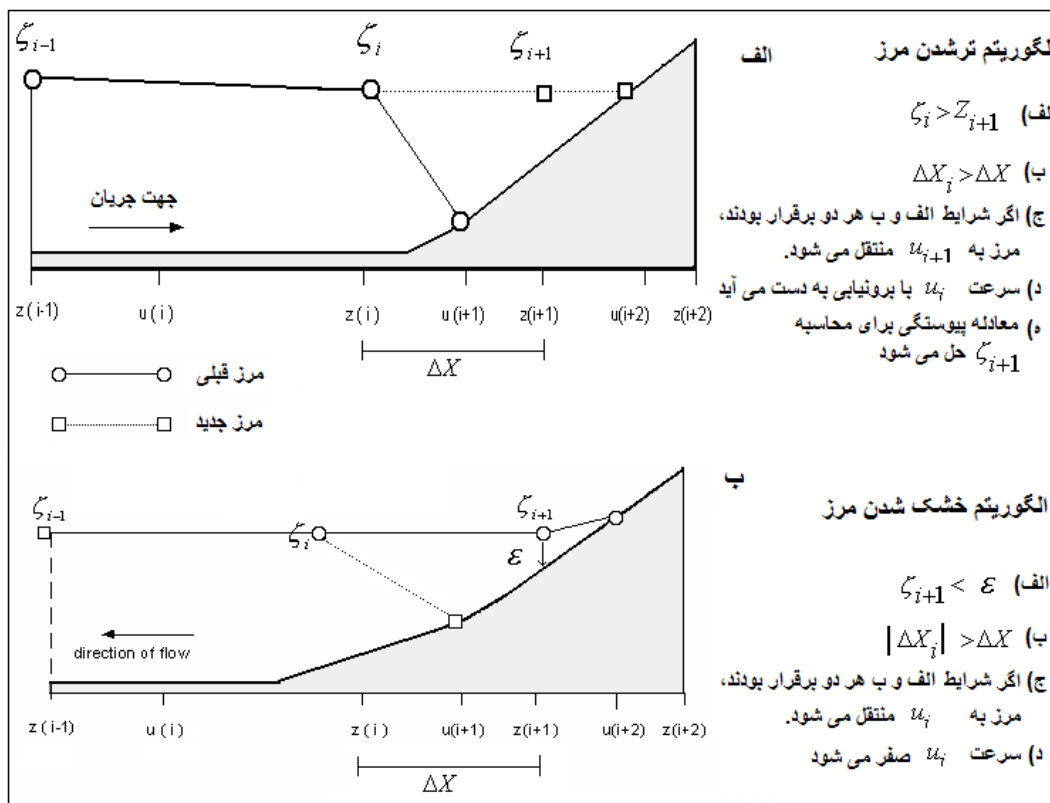
در تحقیق حاضر برای مدل کردن خشک و تر شدن مرزها، علاوه بر ارتفاع آب، مسافت طی شده توسط سیال نیز در نظر گرفته می‌شود. روش کار به این گونه است که اضافه شدن یا حذف شدن یک المان به شبکه حل، به صورت یکباره صورت نمی‌پذیرد، بلکه طی چند گام زمانی انجام می‌شود و در نتیجه نوسانات عددی ناشی از خشک یا تر شدن لحظه‌ای یک المان، در مدل به وجود نمی‌آید. با فرض اینکه سرعت در مرزها صفر است، قدم اول محاسبه مسافتی است که سیال در هر گام زمانی می‌تواند در جهات x و y بپیماید. سرعت در اولین گره شبکه که در سمت چپ گره مرزی i قرار دارد به عنوان سرعت مورد استفاده در محاسبه مسافت طی شده توسط مرز به کار برده می‌شود (اشکال ۲ الف و ب). بنابراین مسافت طی شده برابر است با:

$$\Delta x_{i,j}^n = \Delta x_{i,j}^{n-1} + \Delta t \times \begin{cases} u_{i-1,j}^n & u > 0 \\ u_{i,j}^n & u < 0 \end{cases} \quad (7)$$

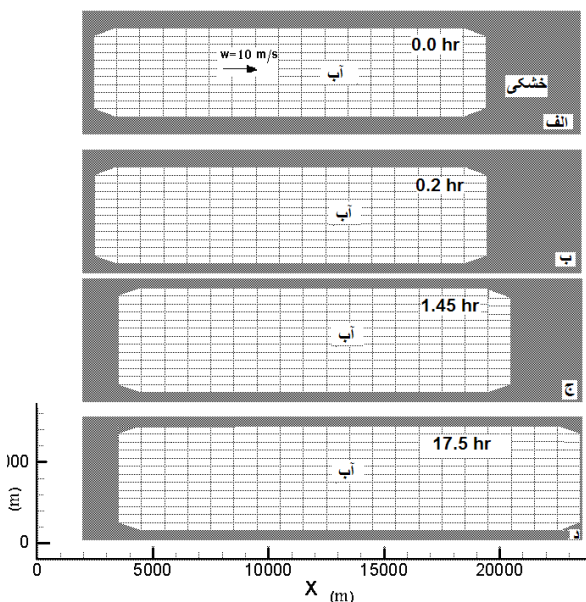
$$\Delta y_{i,j}^n = \Delta y_{i,j}^{n-1} + \Delta t \times \begin{cases} v_{i,j-1}^n & v > 0 \\ v_{i,j}^n & v < 0 \end{cases} \quad (8)$$

که $\Delta x_{i,j}^{n-1}$ و $\Delta y_{i,j}^{n-1}$ مسافت‌هایی هستند که آب در گام زمانی قبلی طی کرده است. در معادلات فوق، انتخاب‌های اول برای سیل‌گرفتنی در جهت مثبت x و y (یا خشک شدن در جهت منفی x و y) به کار می‌رود.

آزمون تر و خشک شدن خط ساحلی در جهات x و y به صورت مجزا انجام می‌گیرد. اگر ارتفاع آب در اولین گره سمت دریا، به ارتفاع توپوگرافی اولین گره سمت خشکی آن برسد (شکل ۲-الف) و فاصله تجمعی طی شده در جهت مذکور به محل تقاطع شبکه برسد، آنگاه یک نقطه تر جدید به شبکه محاسباتی اضافه می‌شود.



شکل ۲- الگوریتم پیشروی مرز تر در خشکی (الف) و خشک شدن مرز (ب) (Hubbert et al., 1999)



شکل ۳- تغییر مرزها در اثر وزش باد در یک حوضچه با جداره‌های شیبدار در مدل Surge2D؛ المان‌های تیره خشک و المان‌های روشن تر می‌باشند.

۵- بررسی نتایج

با اضافه کردن الگوریتم تر و خشک شدن مرز به مدل H2D و انجام بررسی‌های مختلف، بخشی از نتایج به دست آمده برای مدل جدید که با نام Surge2D معرفی می‌شود، به صورت زیر می‌باشد:

۵-۱- مرز متحرک

برای تعیین قابلیت مدل در اعمال مرز متحرک، یک حوضچه مستطیلی در نظر گرفته شده است که دیواره‌های بالا و پایین آن قائم و دیواره‌های سمت راست و چپ آن شیبدار می‌باشند (شکل ۳-الف). در اثر وزش باد ثابت با سرعت 10 m/s به مدت 18 ساعت تغییرات مرز مطابق اشکال (۳-ب تا ۳-د) می‌باشد. در این شکل محدوده تیره محدوده خشکی و محدوده روشن محدوده آب را مشخص می‌کند. همانگونه که در شکل مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان محدوده تر از سمت چپ به سمت راست پیشروی می‌کند. یعنی قسمتهای سمت چپ محدوده تر خشک می‌شوند و قسمتهای خشک سمت راست تر می‌شوند. و بدین ترتیب مرز خشکی در دو طرف چپ و راست تغییر مکان می‌دهند.

۵-۲- صحت‌سنجی مدل

۵-۲-۱- مقایسه با حل تحلیلی میدان باد و فشار

در صورتی که محیطی مستطیل شکل با مرزهای بسته و شیب بستر صفر در نظر گرفته شود، می‌توان به کمک روش‌های تحلیلی پروفیل سطح آب را در اثر وزش باد محاسبه کرد. در این حالت به دلیل بسته بودن مرزها هیچگونه جریان ورودی یا خروجی در سیستم وجود ندارد. در اثر وزش باد، بعد از گذشت زمان لازم برای رسیدن سیستم به یک حالت پایدار استاتیکی، کلیه جریان‌های داخلی صفر خواهند شد و می‌توان ترم‌های مربوط به سرعت را در معادله مومنتم در جهت x حذف کرد و معادله مومنتم در جهت y نیز خودبخود حذف می‌شود. بعد از رسیدن سیستم به حالت پایدار، معادله پیوستگی خودبخود ارضا می‌شود، زیرا تمام ترم‌های آن برابر صفر می‌گردند. بنابراین تنها معادله باقیمانده، معادله مومنتم در جهت x ، پس از حذف ترم‌های اضافی به صورت زیر می‌باشد (ولیزاده، ۱۳۸۱):

$$g \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\tau_x''}{\rho h} \quad (13)$$

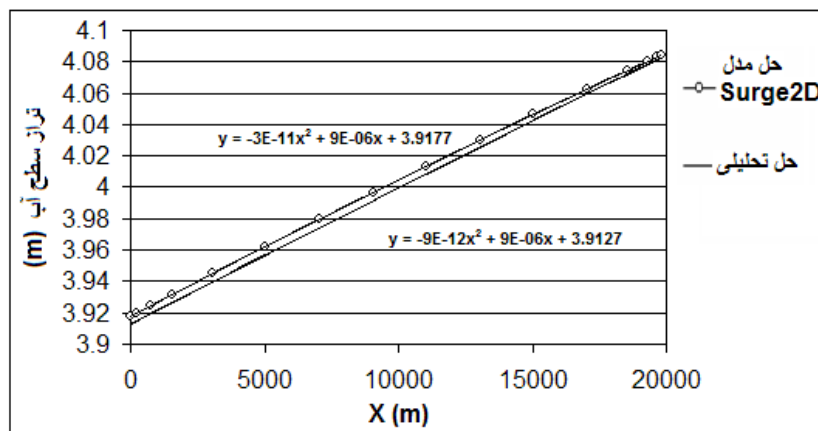
به دلیل وزش باد در جهت x ، معادله یک‌بعدی فوق به آسانی قابل حل تحلیلی است. به منظور حل این مساله یک مستطیل به طول ۱۹۹۰۰ و عرض ۴۵۰۰ متر در نظر گرفته شده که باد با سرعت ثابت ۱۰ m/s به مدت ۱۱ ساعت روی آن می‌وزد. پس از ۹ ساعت نوسانات عددی خیلی کم شده و سطح آب با گذشت زمان ثابت می‌ماند. ضریب دراگ سطح ۰/۰۲۶، چگالی هوا ۱/۲۹۵ Kg/m³ و چگالی آب ۱۰۰۰ Kg/m³ در نظر گرفته شده است (ولیزاده، ۱۳۸۱). مقایسه حل تحلیلی و نتایج مدل نشان می‌دهد که مدل حاضر تراز سطح آب را در حدود ۰/۱ درصد بیشتر از حل تحلیلی محاسبه می‌کند (شکل ۴) و از حل مشابه برای گرادیان فشار نیز اختلاف نتایج مدل با حل تحلیلی بسیار ناچیز است (کمتر از ۰/۰۹ درصد).

۵-۲-۲- مقایسه با نتایج نرم‌افزار Mike21

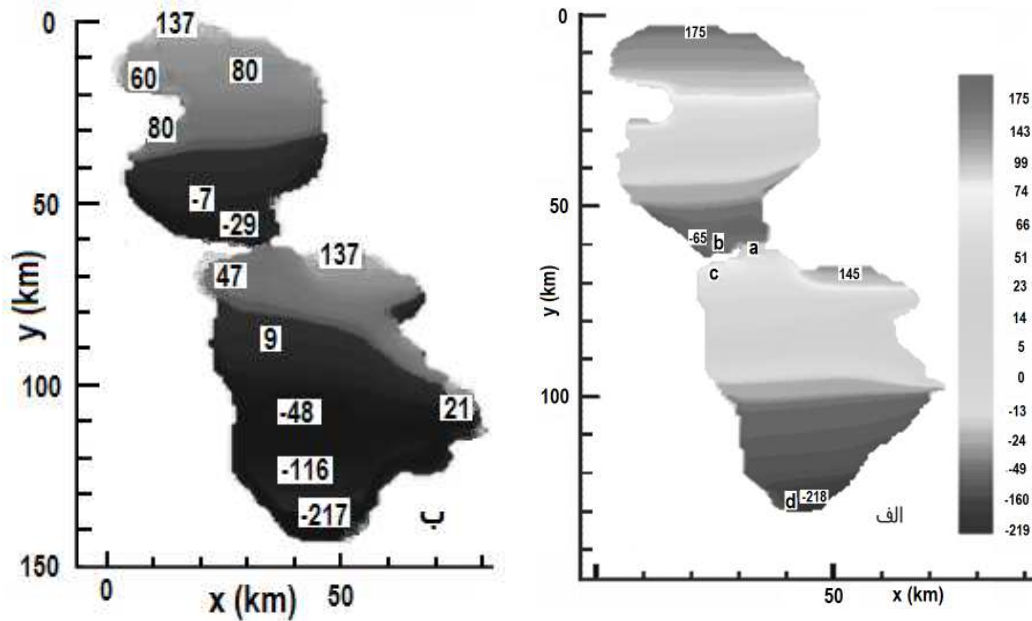
به منظور بررسی عملکرد و میزان کارایی مدل تهیه شده در مسایل عملی، تأثیر میدان باد روی دریاچه ارومیه با این مدل بررسی شد و نتایج آن با نتایج مشابه که از حل با نرم‌افزار Mike21 به دست آمده است مقایسه گردید.

در هر دو مدل شبکه یکنواخت مربع با ابعاد یک کیلومتر، گام زمانی ۳۰ ثانیه، مدت زمان وزش باد یکنواخت ۶ ساعت در جهت جنوب به شمال و سرعت باد ۲۳ m/s که باد پنجاه‌ساله منطقه می‌باشد، در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی دریاچه ارومیه شامل تعیین مرزهای محدوده و توپوگرافی بستر با استخراج مختصات و رقوم تعدادی از نقاط قرار گرفته بر روی مرز و داخل محدوده داخل دریاچه از روی نقشه‌های توپوگرافی تعیین گردید. با توجه به اینکه تبخیر و بارش تأثیر تقریباً یکنواختی بر روی تغییر تراز سطح آب در نقاط مختلف دریاچه دارند و عملاً باعث افزایش یا کاهش موضعی سطح آب نمی‌شوند و همچنین در طولانی مدت میزان آب ورودی به دریاچه تقریباً با میزان آب خروجی برابر است، در مدت ۶ ساعت که برای شبیه‌سازی استفاده شده است، از تأثیر ترم‌هایی نظیر تبخیر، بارش، نفوذ و ورودی‌های دریاچه، بر تغییر سطح آب، در مقایسه با تأثیر باد، صرف‌نظر می‌گردد.

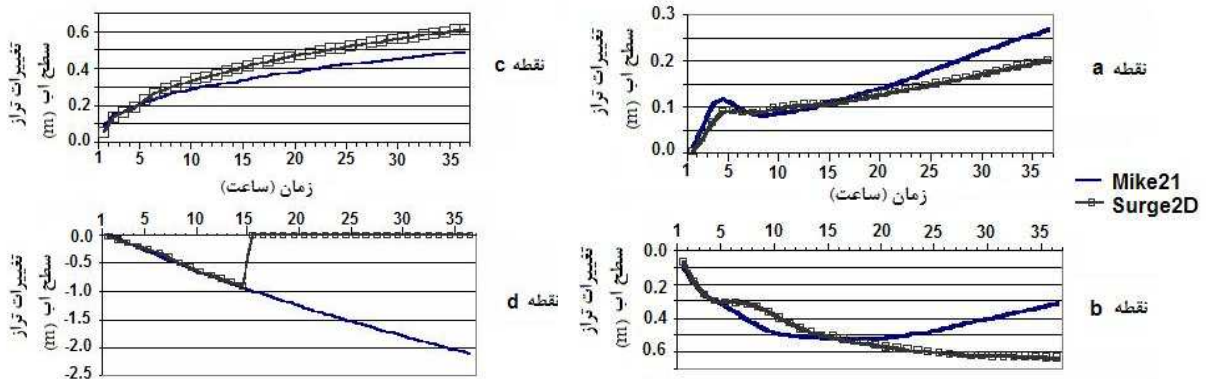
نتایج مدل Surge2D و نرم‌افزار Mike21 که به شکل بردارهای سرعت، خطوط جریان و تغییرات سطح آب می‌باشند، با هم مقایسه گردید و همخوانی خوبی بین نتایج دو مدل در حالت کلی مشاهده شد. نمونه‌ای از این مقایسه را می‌توان در اشکال ۵-الف و ۵-ب مشاهده نمود که خطوط هم‌تراز سطح آب را پس از ۶ ساعت نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل Surge2D با حل تحلیلی در یک حوضچه بسته (تنها نیروی وارد بر سیستم نیروی باد است).



شکل ۵- نمودار خطوط هم‌ارتفاع سطح آب در دریاچه ارومیه (برحسب سانتی‌متر)؛ الف) حل مدل Surge2D، ب) نرم‌افزار Mike21. نقاط a, b, c, d در شکل الف برای مقایسه سطح آب در شکل ۵ انتخاب شده‌اند.



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل Surge2D با نتایج نرم‌افزار Mike21 برای تغییرات تراز سطح آب در نقاط مشخص شده در شکل ۵- الف.

صفر نشان می‌دهد. زیرا مدل Surge2D بعد از خشک شدن نقطه d و رسیدن عمق آب به صفر آن را از محاسبات خارج می‌کند و این مسأله حل مدل Surge2D را واقعی‌تر از مدل Mike21 نشان می‌دهد. همانگونه که ذکر شد شرط تغییر مرز خشکی هم ارتفاع آب و هم سرعت جریان در المان مرزی را در نظر می‌گیرد. در این صورت تغییرات مرزها کمتر، ارتفاع آب حدود ۷/۵ درصد و ماکزیمم دبی نزدیک به ۱۰ درصد بیشتر از هنگامی است که فقط از شرط ارتفاع آب برای تغییر مرز استفاده می‌شود.

با مقایسه این دو شکل دیده می‌شود که نتایج این دو مدل از نظر کیفی شباهت نسبتاً نزدیکی به هم دارند. همچنین شکل ۶ مقایسه کمی نتایج در چند نقطه خاص مشخص شده در شکل (۵- الف) را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، نزدیکی خوبی بین نتایج دو مدل وجود دارد. از مقایسه کمی نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار Mike21 و Surge2D، مشخص می‌شود که این نتایج به طور متوسط حدود ۱۸ درصد با هم اختلاف دارند. در چهارمین نمودار شکل ۶ که مربوط به نقطه d می‌باشد، دیده می‌شود که پس از مدتی نتایج حاصل از مدل Surge2D تراز سطح آب را

مدل Surge2D در دو حالت بر روی دریاچه ارومیه اجرا گردیده است: یک حالت زمانی که از شبکه ریز به فواصل ۱۵۰ متر استفاده گردیده و حالت دوم که از شبکه درشت به فواصل ۴۵۰ متر استفاده شده که فقط در محل میانگذر شبکه ریز شده ۱۵۰ متری به کار برده شده است. نتایج حالت یک با حالت دو اختلاف بسیار ناچیزی را نشان داده است. و این به این معنی است که به جای استفاده از یک شبکه ریز پرهزینه می‌توان از قابلیت مدل در ریز کردن شبکه در مناطق خاصی بهره برد و هزینه محاسبات را کاهش داد.

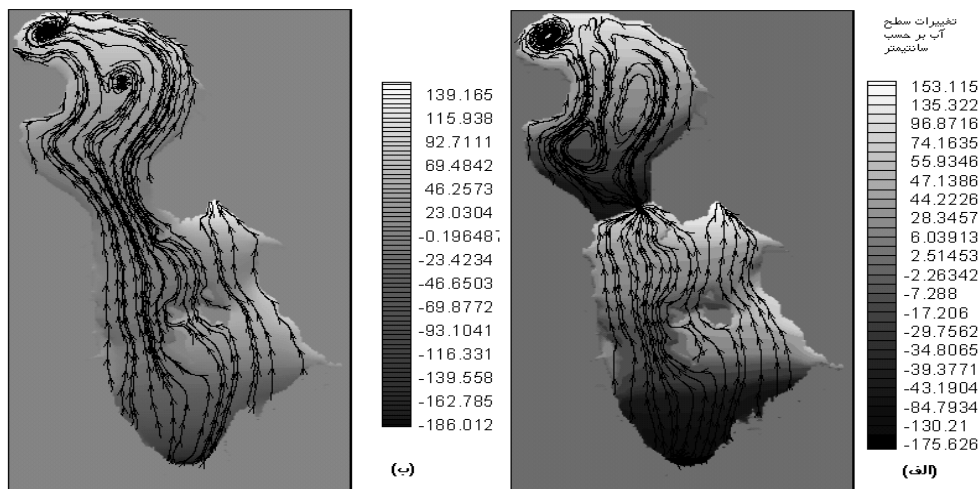
۵-۳- بررسی تاثیر احداث میانگذر بر الگوی جریان در دریاچه ارومیه

پروژه احداث میانگذر دریاچه ارومیه یکی از پروژه‌های بزرگ ملی می‌باشد که در سالهای اخیر بحثهای زیادی روی مباحث سازه‌ای و محیط زیستی آن شده است. در حال حاضر یک بازشدگی ۱۲۵۰ متری در سمت شرقی این میانگذر وجود دارد که امکان عبور آب و وجود جریان بین قسمت جنوبی و شمالی دریاچه را فراهم می‌کند. در اینجا شرایط دریاچه در حالت طبیعی (قبل از احداث میانگذر) و بعد از احداث میانگذر بررسی شده، و شرایط هیدرودینامیکی دریاچه در هر دو حالت مقایسه شده است. با توجه به اینکه در محل احداث میانگذر نیاز به دقت بیشتری وجود دارد، ابعاد شبکه در این محل ۱۵۰ متر و در بقیه مناطق ۴۵۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۷). باد در نظر گرفته شده، باد ثابت با سرعت ۲۳ m/s می‌باشد که به مدت ۶ ساعت در جهت جنوب به شمال روی دریاچه می‌وزد. برای تحلیل این مساله از گام زمانی یک دقیقه استفاده شده است. از تحلیل نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که تراز حداکثر و حداقل سطح آب در حالات طبیعی و بعد از احداث

میانگذر (شکل ۷-الف و ۷-ب) تفاوت چندانی ندارند و برای شکلهای الف و ب مقادیر حداکثر به ترتیب ۱۵۳ و ۱۳۹ سانتیمتر و مقادیر حداقل به ترتیب ۱۷۵- و ۱۸۶- سانتیمتر می‌باشند. اما الگوی جریان و محل حداکثر و حداقل تراز آب پس از احداث میانگذر به طور کلی تغییر می‌کند و دریاچه تقریباً به صورت دو دریاچه مجزا عمل می‌کند که الگوی چرخش آب با توجه به شکل ۷-الف در قسمت شمالی دریاچه تغییر می‌کند. با توجه به اینکه حجم اصلی آب شیرین ورودی به دریاچه از قسمت جنوبی آن وارد می‌شود، انتظار می‌رود درصد شوری در نیمه شمالی دریاچه پس از احداث میانگذر افزایش یابد. همچنین تغییر در الگوی جریان و افزایش سرعت جریان در نقاطی مانند محل احداث پل میانگذر و به وجود آمدن چرخشهای با شعاع کوچکتر می‌تواند بر روی نحوه توزیع رسوب و یا شوری دریاچه تاثیرگذار باشد که بررسی دقیقتر این موضوع نیازمند تحقیق و مطالعه بیشتری باشد.

۶- خلاصه و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر، یک مدل عددی برای حل معادلات متوسط‌گیری شده در عمق آب توسعه داده شده است. ترمهای گرادیان فشار جو متغیر، تنشهای باد ناشی از میدان باد متغیر، تغییرات مرز خشک و تر و شبکه با ابعاد المان متغیر به مدل H2D که مرزهای باز جزرو مدی، مرزهای باز با دبی معلوم، مرزهای بسته، نیروی کوریولیس، اصطکاک کف و اصطکاک جانبی را در خود دارد، اضافه شده است. پس از بررسی میزان اثر هر کدام از ترمهای فوق مشخص شد که مدل به خوبی توانایی مدل کردن اثر هر یک از این ترمها را داراست و می‌تواند به عنوان مدل هیدرودینامیک در یک مدل انتشار نفت به کار برده شود.



شکل ۷- مقایسه خطوط جریان در دریاچه ارومیه: (الف) بعد از احداث میانگذر. (ب) حالت طبیعی

- Impact Studies”, *J. Coastal Research*, 15(1), pp. 168-185.
- Jelesnianski, C. P., Chen, J., and Shaffer, W.A. (1992), “SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes”, *Technical Report NWS*, 48, NOAA.
- Li, Y.S. and Zhang, M.Y. (1996), “A Semi-Implicit 3-D Hydrodynamic Model Incorporating the Influence of Flow –Dependent Eddy Viscosity, Bottom Topography and Wave-Current Interaction”, *Applied Ocean Research*, 18, pp. 173-185.
- Maa, J.P.Y. (1990), “An Efficient Horizontal Two-Dimensional Hydrodynamic Model”, *J. Coastal Engineering*, 14, pp. 1-18.
- Matthews, K., Noye, J. and Bills, P. (1996), “A New Method for Numerical Representation of the Land-Water Boundary in lake Circulation Models”, *Applied Mathematical Modelling*, 20(August), pp. 562-571.
- Murty, T.S., Flather, R.A. and Henry, R.F. (1986), “The Storm Surge Problem in the Bay of Bengal”, *Progressive Oceanography*, 16, pp. 195-233.
- Patrick, J.L., Wu, T.R. and Liu, P.L.F. (2002), “Modeling wave runup with depth-integrated equations”, *J. Coastal Engineering*, 46, pp. 89-107.
- Reid, R. O., and Bodine, B.R. (1968), “Numerical Model for Storm Surges in Galveston Bay”, *J. Waterw. Coastal Eng. Div. Proc. Am. Soc.*, 94, pp. 33-57.
- Smith, G.D. (1978), “Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Method”, *Oxford University Press.*, UK, 350 p.
- Sorenson, R.M., (1997), “*Basic Coastal Engineering*”, 2nd edition, Hall and Chapman, Ny.
- Tang, Y.m., Holloway, P. and Grimshaw, R. (1997), “A Numerical Model of Storm Surge Generated by Tropical Cyclone Jane”, *J. of Physical Oceanography*, 27, pp. 963-976.
- Weiyang, T., (1992), *Shallow Water Hydrodynamics*, Water & Power press, Beijing, China.
- Zangh, M.Y. and Li, Y.S. (1996), “The Dynamic Coupling of a Third- Generation Wave Model and a 3D Hydrodynamic Model Through Boundary Layers”, *Continental Shelf Research*, 17(10), pp. 1141-1170.
- نتایج نشان داده است در نظر گرفتن تغییرات مرز آب و خشکی تاثیر زیادی روی برآورد تغییرات سطح آب و سرعت جریان دارد. در صورت اعمال شرط مربوط به سرعت، نواحی تر و خشک شده کمتر می‌شوند. نتایج اجرای مدل برای شرایط دریاچه ارومیه نشان داده است اعمال این شرط تغییرات سطح آب را حدود ۷/۵ درصد افزایش می‌دهد. از بررسی الگوی جریان در دریاچه ارومیه نتیجه می‌شود که احداث میانگذر باعث تغییر الگوی جریان و تغییر محل وقوع حداقل و حداکثر تغییر در تراز سطح آب و همچنین تغییر سرعت‌های جریان می‌شود که می‌تواند بر روی نحوه توزیع رسوب و یا شوری دریاچه تاثیر گذار باشد.

۷- مراجع

ولی‌زاده، علیرضا (۱۳۸۱)، "تهیه مدل عددی پیش‌بینی پدیده مد طوفان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.

Bode, L. and Hardy, T.A. (1997), “Progress and Recent Developments in Storm Surge Modeling”, *J. Hydraulic Engineering*, 123(4), pp. 315-331.

Dube, S.K., Sinha, A.D., Murty, T.S. and Bahulayan, N. (1997), “Storm Surge in the Bay of Bengal and Arabian Sea: the Problem and its Prediction”, *KMAUSAM*, 48(2), pp. 283-304.

Flather R.A., Proctor, R. and Wolf, J. (1991), “Oceanographic Forecast Models”, *Computer Modelling in the Environmental Sciences, Proceedings of a conference* organised by the NERC in association with the Environmental Mathematics Group of the IMA. BGS, Keyworth: Clarendon Press, pp.15-30.

Guo, Q.C. and Chungjin, Y. (2002), “Modeling Non-uniform Suspended Sediment Transport in Alluvial Rivers”, *J. Hydraulic Engineering*, 128(9), pp. 839-847.

Hai P. and Guohong, F. (1993), “An Alternating Direction Implicit (ADI) Numerical Method for Two-Dimensional Hydrodynamic Equations”, *Acta Oceanology Sinica*, 14(1), pp. 1-13.

Hu, S., and Kot, S.C. (1997), “Numerical Model of Tides in Pearl River Estuary with Moving Boundary”, *J. Hydraulic Engineering*, 123(1), pp. 21-29.

Hubbert, G. D. and McInnes, K. L. (1999), “A Storm Surge Inundation Model for Coastal Planning and