شبیهسازی گردش آب در بنادر رودخانهای
با استفاده از مدلهای توربلانس صفر و دو معادلهای

حبیب حکیم زاده		استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

جزییات یک مدل عددی برای شبیه سازی جریان آشفته در درون بنادر رودخانهای مربعی شکل در این مقاله ارائه میشود. برای مدلسازی جریان توربلان از معادلات هیدرودینامیکی انتگرالگیری شده در عمق رینولدز استفاده شده است. برای گسستهسازی معادلات حاکم از روش تفاضلات محدود و برای حل آنها از روش نیمه ضمنی ADI و الگوریتم توماس استفاده شده است. در این پژوهش سعی بر این بوده است که با بکارگیری مدلهای صفر و دو معادلهای توربلانس (طول اختلاط و k-ε) و نیز شرایط مرزی بسته مختلف بتوان تا حد امکان بهشکل دقیق الگوی جریان در درون بنادر مزبور دست یافت.

کلمات کلیدی: **مدل عددی، بندر رودخانهای، شبیهسازی جریان، مدل توربلانس، شرط مرزی بسته**

Simulation of Water Circulation in River Harbours Using the Zero- and Two-Equation Turbulence Models

H. Hakimzadeh		Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

Abstract

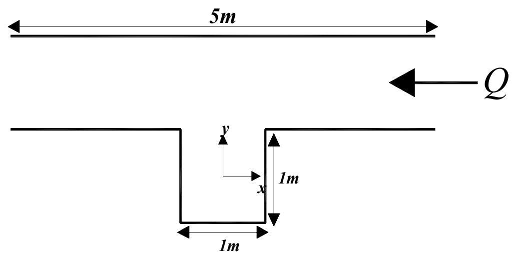
Details of a numerical model for simulation of the turbulent flow within a square river harbour are discussed. The turbulent flow has been modeled using the depth-integrated hydrodynamics Reynolds equations. The finite difference scheme has been used to discretize of the governing equations and they have been solved using the ADI method and Thomas algorithm. In the current study, we tried to apply the zero and two equation turbulence models (i.e. the mixing length and k-ε) and the different closed boundary conditions so that we can get the exact flow pattern within the harbour as far as possible.

Key words: Numerical Model, River Harbour, Flow Simulation, Turbulence Model, Closed Boundary Condition

۱- مقدمه

استفاده از راههای آبی مانند خورها و رودخانهها بهدلیل کم هزینه بودن آنها امری اجتنابناپذیر است. از طرف دیگر پهلوگیری کشتیها در سواحل طبیعی رودخانهها مشکلاتی را بهمراه دارد که عمدهترین آنها کافی نبودن عمق آب این نواحی برای آبخور کشتیها است. برای از بین بردن مشکلات مزبور حوضچههایی در امتداد ساحل رودخانهها ساخته میشوند که بهبنادر رودخانهای موسوم هستند. در گذشته نیز بنادری با اشکال و اندازههای مختلف ساخته شدهاند ولی بعدها معلوم شده است که این بنادر بهعلت لایگرفتگی یا رسوبگذاری در درون آنها پس از مدتی کارایی مطلوب خود را از دست میدهند و یا در بعضی از مواقع بیاستفاده باقی میمانند. بنابراین در صورتی که تدابیر لازم در طراحی و ساخت اینگونه بنادر اتخاذ نگردد علاوه بر هزینه زیاد ساخت آنها، هزینههای نگهداری آنها نیز افزایش خواهند یافت. این هزینهها شامل لایروبی درون حوضچه و دفع ضایعات رسوبی میباشد. از آنجا که نحوهٔ رسوبگذاری و لاینشینی در بنادر مزبور عمدتاً به شکل گردش آب موجود در درون آنها بستگی دارد که این گردش آب نیز بهواسطهٔ جریان دایمی موجود در رودخانه به وجود میآید، از اینرو ضرورت دارد که در ابتدا الگوی نسبتاً دقیق گردش آب در درون بنادر مزبور تعیین گردد و پس از آن مدل رسوب مناسبی مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعه بر روی الگوهای گردش آب در آزمایشگاه بهصورت گسترده توسط تعدادی از پژوهشگران انجام یافته است. از آن جمله میتوان به کارهای تحقیقی انجام یافته توسط Langendoen و دیگران [۱]، Jodan و Ragab [۲]، Jiang و Falconer [۳]، Nece [۴]، Kimura و Hosoda [۵] و نیز Zhou [۶] اشاره نمود. همچنین مطالعه بر روی کاهش لاینشینی و رسوبگذاری در درون بنادر مزبور توسط Van Schijndel و Kranenburg [۷] انجام گرفته است. در این مقاله دادههای تجربی گروه هیدرودینامیک دانشکده مهندسی عمران در دانشگاه دلفت (Delft) هلند مورد استفاده قرار گرفته است که این دادهها در مرجع [۸] آورده شده است. اندازهگیریهای مزبور بر روی یک جریان حفرهای دایمی و همگن با سطح آزاد در یک بندر مربعی شکل با ابعاد 1m×1m انجام گرفته است. جریان گردش آب ایجاد شده در این مدل بندر به واسطهٔ یک دبی ثابت رودخانه به مقدار 0.042 m^3/s بوجود میآید که در آن عمق آب برابر 0.11m و طول و عرض مدل رودخانه بهترتیب برابر 5m و 1m هستند. همچنین دیوارهای جانبی مدل بهصورت عمودی میباشند شکل (۱).



شکل ۱- طرح کلی مدل بندر و رودخانه

اختلاف سرعت بین رودخانه و بندر یک لایه اختلاط آشفتهای را بوجود میآورد که همراه با انتقال مِمنتم از رودخانه به درون بندر است. در شرایط آب کم عمق، عرض لایه اختلاط مزبور میتواند تا چندین برابر عمق موضعی آب گسترش یابد. در این حالت دو مقیاس طول برای توربلانس تمیز داده میشود که یکی از آنها به واسطهٔ اصطکاک بستر تولید میگردد و دومی مربوط به برش افقی در لایه اختلاط است که دارای مشخصه شبه دو بعدی است. انتقال ممنتم مزبور سبب بهوجود آمدن یک گردش آب در درون بندر میشود. از آنجا که مطالعات تجربی فراوانی بر روی این شکل از بندر انجام گرفته است این مطالعه موردی غالباً بهعنوان یک مبنا برای مقایسه در نظر گرفته میشود و بنابراین در ارزیابی نتایج عددی مدل تهیه شده در این کار پژوهشی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حاکم انتگرالگیری شده در عمق

معادلات دو بعدی حاکم بر جریان از انتگرالگیری معادلات سه بعدی رینولدز بر روی عمق بهدست میآیند. با فرض ناچیز بودن شتابهای قایم در مقایسه با شتاب ثقل زمین و با ترکیب معادلات رینولدز با معادله پیوستگی، میتوان بهترتیب زیر معادلات پیوستگی و ممنتم را در دو امتداد افقی x و y بهدست آورد [۹]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial UH}{\partial x}+\frac{\partial VH}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial UH}{\partial t}+\beta\left[\frac{\partial U^2H}{\partial x}+\frac{\partial UVH}{\partial y}\right]= f_cVH-gH\frac{\partial\zeta}{\partial x}+\frac{C_s\rho_aW_xW_s}{\rho}-\frac{gUV_s}{C^2} +\frac{\partial(-\overline{u'u'})H}{\partial x}+\frac{\partial(-\overline{u'v'})H}{\partial y} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial VH}{\partial t}+\beta\left[\frac{\partial UVH}{\partial x}+\frac{\partial V^2H}{\partial y}\right]= -f_cUH-gH\frac{\partial\zeta}{\partial y}+\frac{C_s\rho_aW_yW_s}{\rho}-\frac{gVV_s}{C^2} +\frac{\partial(-\overline{v'u'})H}{\partial x}+\frac{\partial(-\overline{v'v'})H}{\partial y} \quad (۳)$$

که در آنها ζ= تغییرات سطح آب از تراز مبناء، t= زمان، x,y = مختصات کارتزین در سطح افقی، U,V= مؤلفههای سرعت عمق متوسط در جهات x و y، H= عمق کلی، β = ضریب تصحیح ممنتم، f_c = ضریب کوریولیس ($=2\varpi\sin\phi$)، که در آن ϖ = سرعت چرخش زمین و ϕ= عرض جغرافیایی زمین)، g = شتاب ثقل زمین، C_s = ضریب مقاومت هوا - آب، ρ_a = جرم مخصوص هوا، ρ = جرم مخصوص آب، W_x,W_y= مؤلفههای سرعت باد در جهات x و y، W_s= سرعت باد، C = ضریب زبری شزی، V_s= سرعت عمق متوسط آب و $-\overline{u_i'u_j'}$ = تنشهای رینولدز.

اگر پروفیل سرعت جریان در عمق آب لگاریتمی فرض شود در آن صورت مقدار ضریب تصحیح ممنتم به فرم زیر در میآید:

$$\beta=1+\frac{g}{\kappa^2C^2} \quad (۴)$$

که در آن κ = ثابت وون کارمن (0.4=). مقدار ضریب شزی نیز از معادلهٔ کلبروک - وایت محاسبه میشود:

$$C=-\sqrt{32g}\log_{10}\left[\frac{k_s}{14.84H}+\frac{1.255C}{R_e\sqrt{2g}}\right] \quad (۵)$$

که در آن k_s = اندازه زبری ماسه معادل نیکورادزه که مقدار آن از روی دادههای تجربی برابر 4.05mm قرار داده شد و R_e = عدد رینولدز.

در این پژوهش از پارامترهای مربوط به باد و شتاب کوریولیس صرفنظر شده است و برای یافتن مقادیر تنشهای رینولدز از تقریب بوسینیسک استفاده شده است:

$$-\overline{u_i'u_j'}=\bar{\nu}_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\bar{k}\delta_{ij} \quad (۶)$$

که در آن $\bar{\nu}_t$ = ویسکوزیته گردابی متوسط در عمق، $\bar{k}$ = انرژی سینتیک توربلانس و δ_{ij} = دلتای کرونکر که برای $i=j$ برابر یک و برای $i\neq j$ برابر صفر است. در این بررسی برای یافتن مقدار ویسکوزیته گردابی از مدل طول اختلاط ساده از نوع مدلهای صفر معادلهای و مدل k-ε از نوع مدلهای دو معادلهای استفاده شده است. در استفاده از مدل طول اختلاط، معادله مربوط به توزیع ویسکوزیته گردابی بر روی عمق انتگرالگیری شده است که فرم کالیبره شده آن به صورت زیر در میآید [۱۰]:

$$\bar{\nu}_t=0.15U_*H \quad (۷)$$

که در آن U_* = سرعت اصطکاک بستر.

در مورد مدل توربلانس دو معادلهای k-ε، از فرم انتگرالگیری شده در عمق معادلات انرژی سینتیک توربلانس و نرخ هدر رفت آن بهصورت زیر استفاده شده است [۱۱]:

$$\frac{\partial\bar{k}H}{\partial t}+\frac{\partial\bar{k}UH}{\partial x}+\frac{\partial\bar{k}VH}{\partial y}= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\bar{\nu}_tH}{\sigma_k}.\frac{\partial\bar{k}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\bar{\nu}_tH}{\sigma_k}.\frac{\partial\bar{k}}{\partial y}\right) +\bar{\nu}_tH\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2\right] +c_kU_*^3-\bar{\varepsilon}H \quad (۸)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon} H}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\varepsilon} UH}{\partial x}+\frac{\partial \bar{\varepsilon} VH}{\partial y}=$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\bar{v}_t H}{\sigma_\varepsilon}.\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\bar{v}_t H}{\sigma_\varepsilon}.\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y}\right)$$
$$+c_{1\varepsilon} c_\mu \bar{k} H\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2\right]$$
$$+c_\varepsilon \frac{U_*^4}{H}-c_{2\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}} H \qquad (۹)$$

که در آنها $\bar{k} =$ انرژی سینتیک توربلانس عمق متوسط، $\bar{\varepsilon} =$ نرخ اتلاف انرژی مزبور، $\sigma_k,\sigma_\varepsilon,c_\mu,c_{1\varepsilon},c_{2\varepsilon}=$ ضرایب ثـابت،

$\sigma_\varepsilon = 1.22 \quad , c_\mu = 0.09 \ , c_{1\varepsilon} = 1.44 \quad , c_{2\varepsilon} = 1.92$

$\sigma_k = 1.0$ ، $C_f =$ ضریب اصطکاک $(= gC^{-2})$،

$c_k = C_f^{-1/2}$ و $c_\varepsilon = 3.6 c_{2\varepsilon} c_\mu^{1/2} C_f^{-3/4}$.

بنابراین در استفاده از مدل k-ε، مقدار ویسکوزیته گردابی از رابطهٔ زیر بهدست میآید:

$$\bar{v}_t = c_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}} \qquad (۱۰)$$

۳- روش عددی

همانگونه که میدانیم حل معادلات (۱) تا (۳) بهصورت تحلیلی و بار در نظر گرفتن شرایط مرزی تنها برای حالتهای بسیار ساده و خاص و با فرضیات ساده کننده زیاد امکانپذیر میباشد. بنابراین امروزه با دسترسی به کامپیوترهای با سرعت بالای پردازش دادهها، همواره سعی بر این است که از یک روش عددی مناسب استفاده بشود. همانطوریکه پیش از این بیان گردید برای گسستهسازی معادلات حاکم بالا از روش تفاضلات محدود استفاده گردید که شامل یک شبکهبندی متناوب برای مکان بوده و در آن مقادیر عمق و سرعت در وسط اضلاع شبکه و تغییرات تراز آب و پارامترهای توربلانس در مرکز شبکه قرار داده شدهاند. اندازهٔ شبکههای مربعی انتخاب شده 25mm*25mm بوده و از اینرو با توجه به ابعاد مدل بندر و رودخانه، میدان محاسباتی شامل 82*200 شبکه میباشد.

برای حل معادلات حاکم بر جریان از روش نیمه ضمنی ADI (Alternating Direction Implicit) و الگوریتم توماس (Thomas) استفاده شده است. در این روش هر گام زمانی به دو نیم گام تقسیم میگردد. در نیم گام نخست، مشتقات و جملههای شامل U و ζ از معادلات (۱) و (۲) به فرم ضمنی تقریبزده میشوند در حالی که عبارات شامل V بهصورت صریح بیان میگردند. از این رو با حل دو معادله (۱) و (۲) مقادیر مجهول U و ζ در نیم گام نخست معلوم میگردند. بهطور مشابه در نیم گام دوم، مشتقات و جملههای شامل V و ζ از معادلات (۱) و (۳) به فرم ضمنی تقریبزده میشوند درحالیکه مقادیر ضمنی قبلی برای U بهصورت صریح بیان میگردند. بدین ترتیب در نیم گام دوم با حل دو معادله (۱) و (۳) مقادیر مجهول V و ζ یافته میشوند. معادلات تفاضلی در مکان و زمان بهصورت تفاضل مرکزی بیان میگردند که در آنها عبارات مربوط به شتابهای انتقالی و پخش توربلان به واسطهٔ تکرار بهصورت مرکزی در میآیند. روش تفاضل محدود مورد استفاده دارای هیچگونه محدودیتی از نظر پایداری نیست گرچه با اجرای چندین آزمایش عددی معلوم شد که با فراتر رفتن عدد کورانت $(Cr = \sqrt{gH}\Delta t / \Delta x)$ از مقدار هشت، از دقت روش به سرعت کاسته میشود.

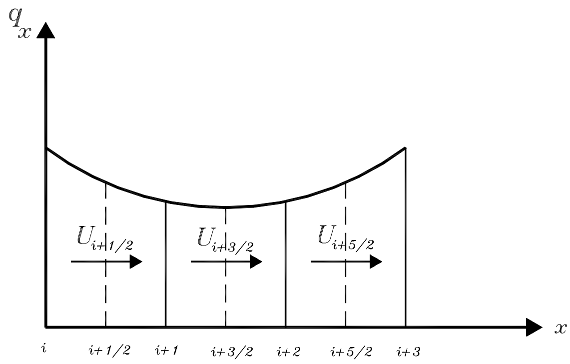
همچنین از آنجا که عبارات مربوط به شتابهای انتقالی در معادلات ممنتم در مدلسازی گردش آب درون بنادر مزبور نقش بسیار مهمی دارند و نیز بهمنظور حداقل نمودن مقدار ویسکوزیته مصنوعی، گسستهسازی عبارات مزبور با استفاده از درونیابی غیرخطی (Third Order Upwind) انجام گرفته است. بنابراین در استفاده از روش مزبور و با توجه به شکل (۲)، فرم گسسته عبارت مربوط بهشتابهای انتقالی در جهت x از معادلات هیدرودینامیکی در نقطه $i+2$ از شبکه موردنظر بهصورت زیر در میآید [۱۲]:

$$\left(\frac{\partial U q_x}{\partial x}\right)_{i+2} = \frac{(Uq_x)_{i+5/2}-(Uq_x)_{i+3/2}}{\Delta x} \qquad (۱۱)$$

که با در نظر گرفتن $q_x = UH$ و $q_y = VH$، داریم:

$$q_x\big|_{i+5/2} = \lambda_1(q_x\big|_{i+3}+q_x\big|_{i+2})-\lambda_2(q_x\big|_{i+3}-2q_x\big|_{i+2}+q_x\big|_{i+1})$$
$$q_x\big|_{i+3/2} = \lambda_1(q_x\big|_{i+2}+q_x\big|_{i+1})-\lambda_2(q_x\big|_{i+2}-2q_x\big|_{i+1}+q_x\big|_{i})$$

که در آنها $\lambda_1 = 1/2$ و $\lambda_2 = 1/6$ است.



شکل ۲- نمایش تفاضل محدود برای درون یابی غیر خطی

با کاربرد این روش برای شتابهای انتقالی، فرم تفاضلی معادله ممنتم در جهت x می تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$
\begin{aligned}
&q_x\Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \\
&q_x\Big|_{i+1/2,j}^{n-1/2} - \frac{\beta\lambda_1\Delta t}{\Delta x}\left[\begin{array}{l} U'\Big|_{i+1,j}^{n}\left(q'_x\Big|_{i+3/2,j}^{n} + q'_x\Big|_{i+1/2,j}^{n}\right) \\ -U'\Big|_{i,j}^{n}\left(q'_x\Big|_{i+1/2,j}^{n} + q'_x\Big|_{i-1/2,j}^{n}\right)\end{array}\right] \\
&-\frac{\beta\lambda_1\Delta t}{\Delta x}\left[\begin{array}{l} U'\Big|_{i+1/2,j+r}^{n}\left(q_y\Big|_{i+1,j+1/2}^{n} + q_y\Big|_{i+j+1/2}^{n}\right) \\ -U'\Big|_{i+1/2,j+s}^{n}\left(q_y\Big|_{i+1,j-1/2}^{n} + q_y\Big|_{i,j-1/2}^{n}\right)\end{array}\right] \\
&+\frac{\beta\lambda_2\Delta t}{\Delta x}\left[U'\Big|_{i+1,j}^{n}\nabla^2 q'_x\Big|_{i+1,j}^{n} - U'\Big|_{i,j}^{n}\nabla^2 q'_x\Big|_{i,j}^{n}\right] \\
&+\frac{\beta\lambda_2\Delta t}{\Delta x}\left[\begin{array}{l} U'\Big|_{i+1/2,j+r}^{n}\nabla^2 q_y\Big|_{i+1/2,j+1/2}^{n} \\ -U'\Big|_{i+1/2,j+s}^{n}\nabla^2 q_y\Big|_{i+1/2,j-1/2}^{n}\end{array}\right] \\
&-\frac{g\Delta t}{2\Delta x}H_x\Big|_{i+1/2,j}^{n}\left[\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + \zeta_{i+1,j}^{n-1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}\right] \\
&-\Delta t\,\frac{g.\left(U_{i+1/2,j}^{n+1/2} + U_{i+1/2,j}^{n-1/2}\right)}{2C^2}\sqrt{U^2+V^2}\Big|_{i+1/2,j}^{n} \\
&+\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\bar{\nu}_t H\Big|_{i+1/2,j}^{n}\left[\begin{array}{c} U'_{i+3/2,j} + U'_{i-1/2,j} + U'_{i+1/2,j+1} \\ +U'_{i+1/2,j-1} - 4U'_{i+1/2,j}\end{array}\right]
\end{aligned}
$$

(۱۲)

که در آن $n =$ شمارهٔ گام زمانی، $\Delta x =$ اندازهٔ شبکه، $r = (-V/|V|)_{i+1/2,j+1/2}$ ، $s = (V/|V|)_{i+1/2,j-1/2}$ و داریم:

$$
\nabla^2 q'_x\Big|_{i+1,j} = \begin{cases} q'_x\Big|_{i+3/2,j} - 2q'_x\Big|_{i+1/2,j} + q'_x\Big|_{i-1/2,j} & ifU \ge 0 \\ q'_x\Big|_{i+5/2,j} - 2q'_x\Big|_{i+3/2,j} + q'_x\Big|_{i+1/2,j} & ifU < 0 \end{cases}
$$

$$
\nabla^2 q'_x\Big|_{i,j} = \begin{cases} q'_x\Big|_{i+1/2,j} - 2q'_x\Big|_{i-1/2,j} + q'_x\Big|_{i-3/2,j} & ifU \ge 0 \\ q'_x\Big|_{i+3/2,j} - 2q'_x\Big|_{i+1/2,j} + q'_x\Big|_{i-1/2,j} & ifU < 0 \end{cases}
$$

$$
\nabla^2 q_y\Big|_{i+1/2,j+1/2} = \begin{cases} q_y\Big|_{i+1,j+1/2} - 2q_y\Big|_{i,j+1/2} + q_y\Big|_{i-1,j+1/2} & ifU \ge 0 \\ q_y\Big|_{i+2,j+1/2} - 2q_y\Big|_{i+1,j+1/2} + q_y\Big|_{i,j+1/2} & ifU < 0 \end{cases}
$$

$$
\nabla^2 q_y\Big|_{i+1/2,j-1/2} = \begin{cases} q_y\Big|_{i+1,j-1/2} - 2q_y\Big|_{i,j-1/2} + q_y\Big|_{i-1,j-1/2} & ifU \ge 0 \\ q_y\Big|_{i+2,j-1/2} - 2q_y\Big|_{i+1,j-1/2} + q_y\Big|_{i,j-1/2} & ifU < 0 \end{cases}
$$

در نخستین تکرار معادله مزبور همراه با معادله پیوستگی به طور ضمنی با استفاده از الگوریتم توماس حل می‌شوند و عبارات با علامت پریم بهصورت صریح در گام زمانی $n-1/2$ بیان می‌شوند. در تکرار دوم و تکرارهای بعدی، این عبارات با متوسطگیری از مقادیر متغیرهای محاسبه شده در گام زمانی قبلی و در انتهای تکرار نخست بهصورت مرکزی در تراز زمانی n بیان می‌شوند. عملیات مشابهی برای معادله ممنتم در جهت y و معادله پیوستگی در نیم گام دوم انجام می‌شود.

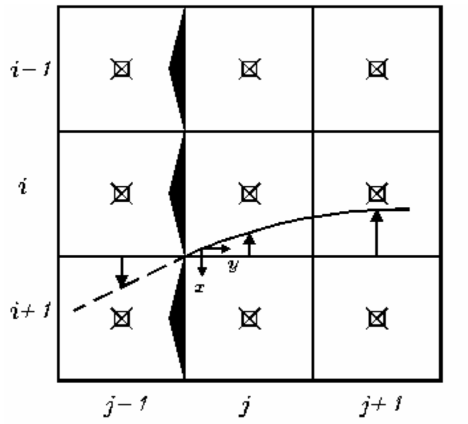
همچنین گسستهسازی معادلات انرژی سینتک توربلانس (۸) و نرخ اتلاف انرژی مزبور(۹) بهروش مشابهی انجام گرفت و معادلات تفاضلی بهدست آمده در دو نیم گام زمانی متوالی با استفاده از الگوریتم توماس حل گردیدند. در ارتباط با گسستهسازی شتابهای انتقالی موجود در این معادلات نیز همانند عبارات متناظر در معادلات ممنتم تمهیدات ویژهای بهکار گرفته شد [۱۳].

۴- شرایط مرزی

در مدل عددی مرزهای جریان رودخانه بهصورت مرزهای باز جریان در نظر گرفته شدهاند، دبی رودخانه برابر $0.042 m^3/s$ قرار داده شده است و مقادیر ویسکوزیته گردابی، انرژی سینتیک توربلانس و نرخ اتلاف آن در این مرزها بر اساس فرضیات جریان آزاد برابر صفر منظور شدهاند [۱۱]. همچنین در مدل عددی تهیه شده، تأثیر شرایط مرزی بسته مختلف (از قبیل بدون لغزش، نیمه لغزشی و لغزش نسبی) در پیشبینی شکل گردش آب و پروفیلهای سرعت در درون مدل بندر، مورد مطالعه قرار گرفته است، شکل (۳).

این شرایط با توجه به شکل (۳) بهطور خلاصه عبارتند از:

الف - شرط بدون لغزش: این شرط بر اساس فرضی است که در آن سیال بهدلیل داشتن خاصیت چسبندگی به دیوار می‌چسبد.



شکل ۳- نمادگذاری تفاضل عددی برای نمایش مرز بسته

بنابراین مقدار سرعت بر روی دیوار صفر بوده و در نقطهای موهومی (fictitious point) از شبکه مورد نظر در خارج از دیوار با در نظر گرفتن تغییرات خطی بهصورت زیر بهدست میآید:

$$U_{i+1/2,j-1} = -U_{i+1/2,j} \qquad (۱۳)$$

ب- شرط نیمه لغزشی: در این حالت با ترکیب قوانین اصطکاک درجهٔ دوم و ویسکوزیته نیوتن مربوط به تنش برشی دیوار رابطه زیر بهدست می‌آید:

$$\tau_w = \frac{\rho g}{C^2} U^2 = \rho \nu_t \frac{\partial U}{\partial y} \qquad (۱۴)$$

بنابراین از روی معادلهٔ (۱۴) داریم:

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\sqrt{g}}{C} \frac{U}{\sigma H} \qquad (۱۵)$$

که سپس با استفاده از تفاضل محدود پسرو در مرز پایینی و تفاضل محدود پیشرو در مرز بالایی خواهیم داشت:

$$U_{i+1/2,j-1} = U_{i+1/2,j} \left[1 - \frac{\sqrt{g}}{C} \frac{\Delta y}{\sigma H} \right] \qquad (۱۶)$$

که در آن Δy = طول شبکه عمود بر دیوار و σ = ضریب ویسکوزیته گردابی. با جایگذاری مقادیر معلوم و یک مقدار متوسط برای ضریب شزی می‌توان دریافت که:

$$U_{i+1/2,j-1} \approx 0.916 U_{i+1/2,j}$$

پ- شرط لغزش نسبی: این شرط براساس فرضی است که در آن پروفیل سرعت در مجاورت دیوار از قانون توان یک هفتم بهصورت زیر تبعیت می‌کند:

$$U(y) = U_{i+1/2,j+n} \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^{1/7} \qquad (۱۷)$$

همچنین مقدار سرعت در نقطهای از شبکه در خارج از دیوار می‌تواند بهصورت ضریبی از مقدار متناظر در درون نشان داده شود:

$$U_{i+1/2,j-1} = \alpha U_{i+1/2,j} \qquad (۱۸)$$

بنابراین با مساوی قرار دادن مشتق مرتبه دوم معادله (۱۷) با تفاضل مرکزی عبارت متناظر آن،

$$\frac{U_{i+1/2,j+1} - 2U_{i+1/2,j} + \alpha U_{i+1/2,j}}{\Delta y^2} = -\frac{6U_{i+1/2,j}}{49(\Delta y/2)^2} \qquad (۱۹)$$

مقدار ضریب α بهصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha \approx 0.340$$

جزییات کامل نحوه استخراج شرایط مرزی مزبور در مرجع [۱۴]بیان گردیده است. از بررسی شرایط مرزی بسته فوق می‌توان چنین استنباط نمود که شرط مرزی بدون لغزش یک مقدار بسیار بزرگی را برای تنش برشی دیوار پیشبینی می‌کند. بهطور عکس، شرط مرزی نیمه لغزشی یک مقدار بسیار اندکی را برای تنش برشی دیوار بهوجود می‌آورد. در حالیکه شرط مرزی لغزش نسبی یک مقدار متوسط بین آندو را بهدست می‌دهد. باید توجه داشت که از نقطهنظر فیزیکی شرط مرزی عدم لغزش برای مرزهای جامد معتبرتر است ولی این شرط نیز نمی تواند مقداری برای نقطهای موهومی از شبکه متناظر در خارج از دیوار بهدست دهد و عملاً تصور چنین جریانی در آنجا ممکن نیست.

همچنین در مورد مدل k-ε، به منظور محاسبه مقادیر انرژی سینتیک توربلانس $(\bar{k})$ و نرخ اتلاف آن $(\bar{\varepsilon})$ در مجاورت دیوار از قانون عمومی دیوار بهصورت زیر استفاده شده است:

$$\bar{k}_w = \frac{U_*^2}{c_\mu^{1/2}} \qquad (۲۰)$$

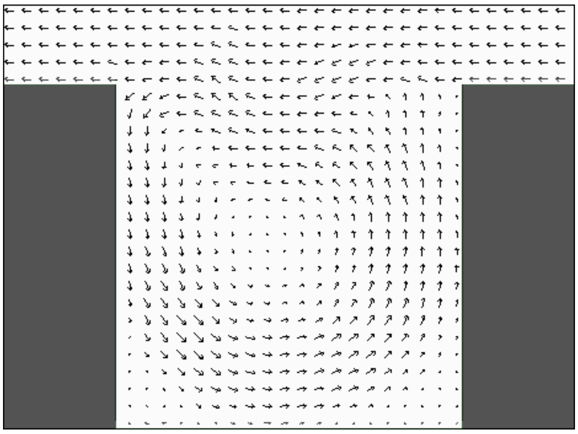
$$\bar{\varepsilon}_w = \frac{U_*^3}{\kappa z_c} \qquad (۲۱)$$

که در آن $z_c =$ فاصله از دیوار می باشد. جزییات کامل مربوط به کاربرد این مدل در منابع [۱۳] و [۱۵] آورده شده است.

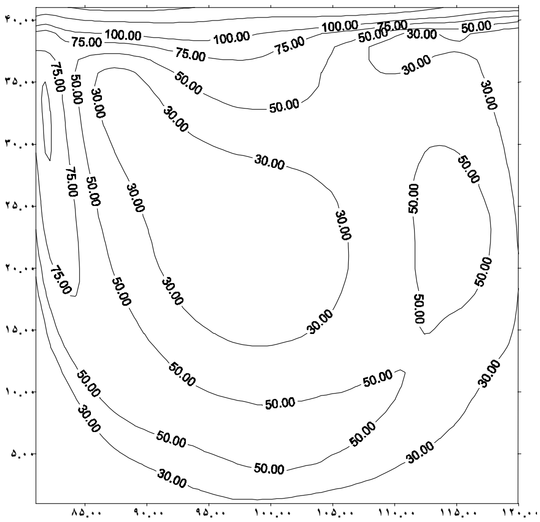
۵- نتایج مدل عددی و مقایسه آنها با مقادیر تجربی

در این بخش به بررسی نتایج کاربرد مدل عددی تهیه شده و مقایسهٔ آنها با دادههای آزمایشگاهی پرداخته شده است. همانطوریکه پیش از این بیان گردید در مرحله نخست این پژوهش بهمنظور کاهش زمان کامپیوتری از مدل صفر معادلهای توربلانس استفاده شده است ولی برای پیشبینی دقیقتر پروفیلهای جریان، شرایط مرزی بسته مختلف به کار گرفته شدهاند. در مدل عددی، دبی جریان در مرزهای باز از مقدار صفر آغاز شده و بر روی یک منحنی سینوسی در طی مدتی معین (زمان کالیبراسیون) تا یک مقدار مشخص (دبی رودخانه) افزایش یافته و پس از آن ثابت نگه داشته شده است. بنابراین یک سلول گردش آب در درون بندر رودخانهای مورد مطالعه سریعاً شکل گرفته و تثبیت می گردد.

بهطور کلی از روی نتایج مدل عدی معلوم شد که با کاربرد شرایط مرزی بسته مختلف همراه با مدل صفر معادلهای توربلانس تنها یک سلول گردش آب در درون بندر پیشبینی میشود. نتایج بهدست آمده از مدل عددی به صورت گرافیکی در شکلهای جداگانه برای شرایط مرزی بسته مختلف نشان داده شده است. شکل (۴) الگوی گردش آب و توزیع ویسکوزیته گردابی را در درون بندر رودخانهای با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط و شرط مرزی بدون لغزش نشان میدهد. از روی شکل (۴ الف) برای شرط مرزی بدون لغزش (یا غیر لغزشی) میتوان مشاهده نمود که مقادیر سرعت جریان در مجاورت دیوارها کمتر پیشبینی شده است و دلیل آن را میتوان چنین بیان نمود که با کاربرد شرط مرزی غیر لغزشی در مدل عددی، یک مقدار بزرگی برای تنش برشی دیوار پیش بینی شده است.



شکل ۴ الف- الگوی گردش آب



شکل ۴ ب- توزیع ویسکوزیته گردابی (بر حسب mm²/s)

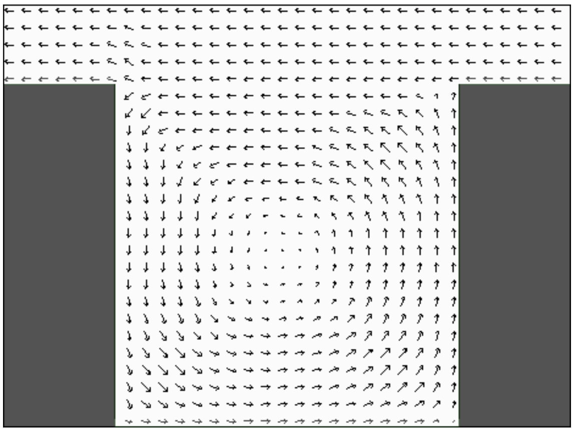
شکل ۴ - نتایج مدل عددی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط و شرط مرزی بسته غیر لغزشی

همچنین دیده میشود که سلول گردش آب در این مورد از حالت تقارن خارج شده و اندکی بهدیوار سمت چپ بندر متمایل شده است. بهطور عکس از روی شکل (۵ الف) با کاربرد شرط مرزی بسته نیمه لغزشی میتوان مشاهده نمود که مقادیر سرعت جریان در مجاورت دیوارها بیشتر پیشبینی شده است و سلول گردش آب تقریباً کل مساحت حوضچه بندری را پوشش داده است و بهشکل نسبتاً متقارنی در حوضچه گسترده شده است.

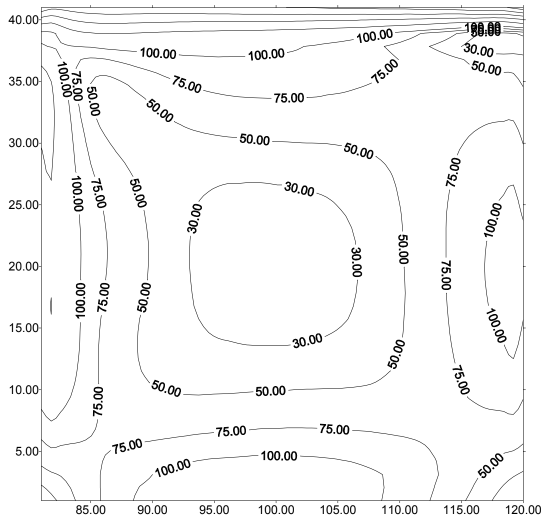
علت گستردگی جریان مزبور را میتوان چنین بیان داشت که در این حالت با کاربرد شرط مرزی نیمـه لغزشی در مدل عددی،

یک مقدار کوچکی برای تنش برشی دیوار به وجود آمده است که تقریباً معادل با شرط لغزشی آزاد است.

همچنین توزیع ویسکوزیته گردابی در درون حوضچه بندری برای شرایط مرزی بسته غیر لغزشی و نیمه لغزشی به ترتیب در شکلهای (۴ ب) و (۵ ب) نشان داده شدهاند. از بررسی شکل (۴ ب) دیده میشود که همانند شکل گردش جریان در درون بندر رودخانهای، توزیع ویسکوزیته گردابی نیز به تبع از آن به دیوار سمت چپ کشیده شده است. در حالیکه کشیدگی مزبور



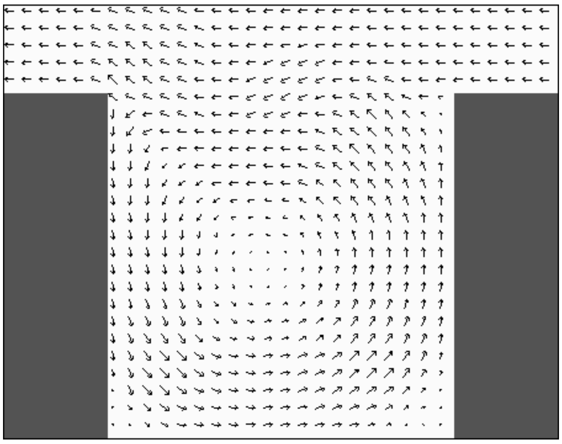
شکل ۵ الف - الگوی گردش آب



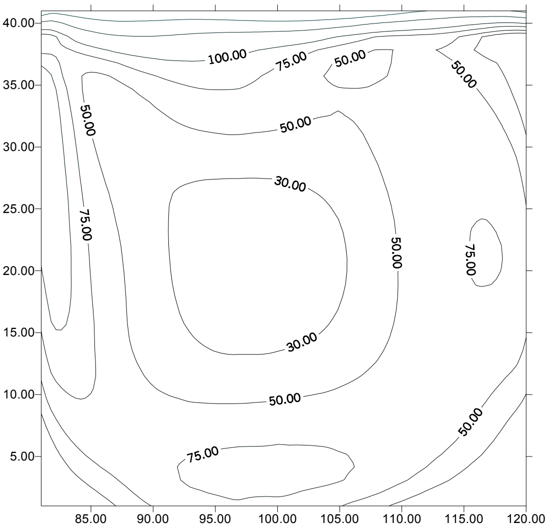
شکل ۵ ب - توزیع ویسکوزیته گردابی (بر حسب mm^2/s)

شکل ۵ - نتایج مدل عددی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط و شرط مرزی بسته نیمه لغزشی

در شکل (۵ ب) کمتر بوده و مقادیر ویسکوزیته گردابی در مجاورت مرزهای جامد بیشتر است. ولی از بررسی شکل (۶ الف) میتوان دریافت که پیشبینی مقادیر سرعت جریان در مجاورت دیوارها منطقی است و بنابراین میتوان نتیجه گرفت که با کاربرد شرط مرزی بسته لغزش نسبی در مدل عددی یک مقدار مناسبی برای تنش برشی دیوار پیشبینی گردیده است. توزیع ویسکوزیته گردابی نیز برای شرط مرزی بسته لغزشی نسبی در شکل (۶ ب) نشان داده شده است.



شکل ۶ الف - الگوی گردش آب

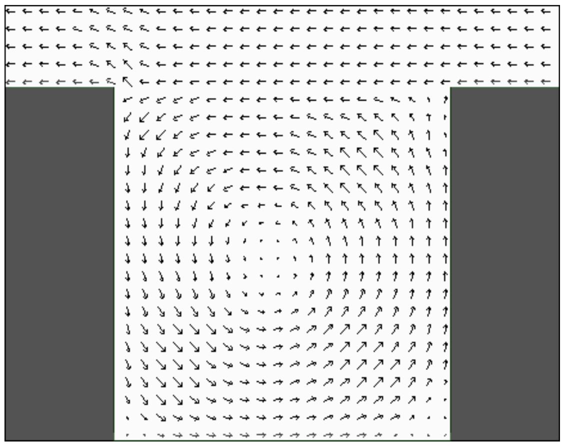


شکل ۶ ب - توزیع ویسکوزیته گردابی (بر حسب mm^2/s)

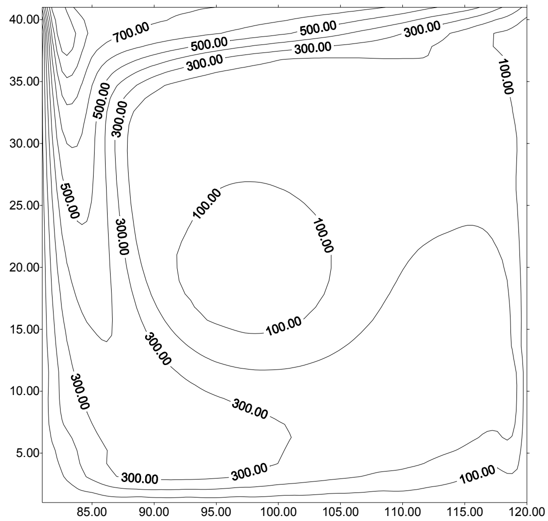
شکل ۶ - نتایج مدل عددی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط و شرط مرزی بسته لغزش نسبی

سرانجام نتایج مدل عددی مربوط بهکاربرد مدل توربلانس k-ε و شرط مرزی غیر لغزشی در شکل (۷) نشان داده شده است. با بکارگیری این مدل توربلانس برخلاف مدل طول اختلاط بهدلیل استفاده از قانون عمومی دیوار کاربرد شرط مرزی معمول غیر لغزشی نتایج منطقی‌تری را بهدست می‌دهد.

از مقایسهٔ نتایج کاربرد مدل k-ε و مدل طول اختلاط می‌توان دریافت که شکل گردش آب در درون بندر تغییر چندانی نداشته است ولی نتایج عددی پیش بینی شده ا زمدل k-ε از دقت بالایی برخوردار هستند.



شکل ۷ الف- الگوی گردش آب



شکل ۷ ب- توزیع ویسکوزیته گردابی (بر حسب mm^2/s)

شکل۷- نتایج مدل عددی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε و شرط مرزی بسته غیر لغزشی

همچنین توزیع ویسکوزیته گردابی نیز در مقایسه با مدل توربلانس طول اختلاط بهویژه از نظر مقادیر عددی بهطور قابل ملاحظهای تغییر یافته است.

سپس به منظور ارزیابی نتایج مدل عددی، ابتدا نتایج حاصل از کاربرد مدل توربلانس طول اختلاط و شرایط مرزی بسته مختلف با یکدیگر و با مقادیر تجربی مقایسه شدهاند. شکلهای (۸) و (۹) پروفیلهای سرعت پیشبینی شده از مدل و آزمایش را بر روی دو محور اصلی عمود بر هم بندر نشان می‌دهند.

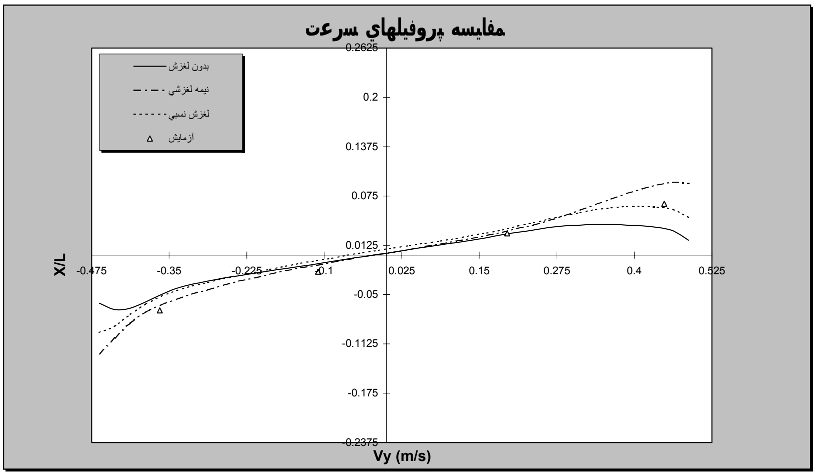
از بررسی این شکلها معلوم می‌شود که شرط مرزی بسته لغزش نسبی پیشبینی دقیقتری را نسبت به سایر شرایط انجام داده است و نتایج عددی مدل در این حالت مطابقت بیشتری با نتایج تجربی دارند.

سرانجام مقایسه نتایج عددی مربوط به هر دو مدل توربلانس صفر معادلهای طول اختلاط (با شرط مرزی بسته لغزش نسبی) و دو معادلهای k-ε (با شرط مرزی بسته غیر لغزشی) با مقادیر تجربی بر روی دو محور اصلی عمود برهم بندر در شکلهای (۱۰) و (۱۱) صورت گرفته است.

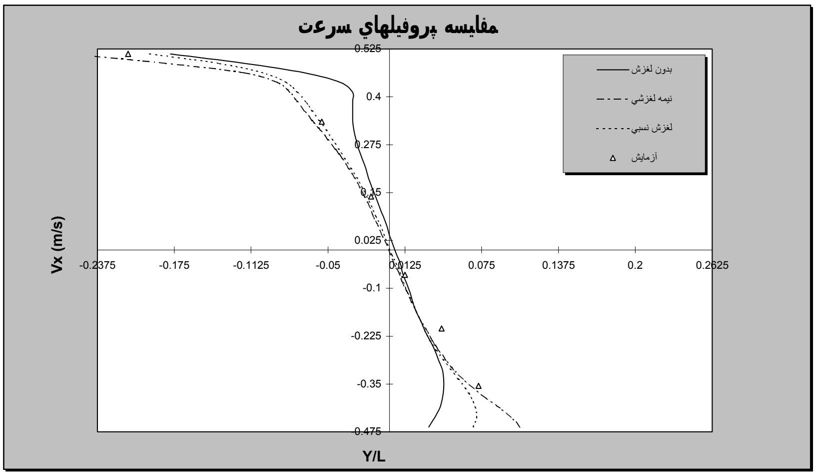
از بررسی این شکلها در حالت کلی می‌توان مشاهده نمود که نتایج عددی پیشبینی شده هر دو مدل توربلانس برای مقادیر مؤلفههای سرعت جریان در درون بندر مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی بهدست دادهاند. ولی نتایج عددی بهدست آمده از مدل k-ε تطابق بیشتری را با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند.

همچنین در ارتباط با مقایسه نتایج مدل عددی برای مؤلفههای سرعت سایر نقاط درونی بندر با دادههای تجربی، این مقایسه بهعلت نبود مقادیر اندازهگیری شده در آن نقاط ممکن نگردید.

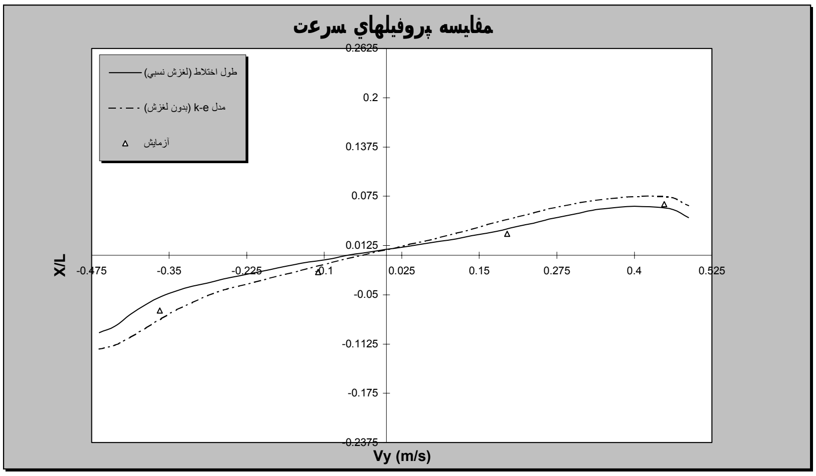
علاوه بر این، بهدلیل فقدان دادههای تجربی مربوط به عمق جریان، مقایسه این ارقام مقدور نبود و تغییر عمق محسوسی در نتایج عددی میدان جریان مشاهده نگردید. نمونه دیگری از نتایج کاربرد شرایط مرزی بسته مزبور برای بنادر مستطیلی شکل با نسبت ابعاد ۱/۴ و ۴/۱ (به ترتیب با ابعاد 2.16m*0.54m و 0.54m*2.16m) در مرجع [۹] و نیز برای بنادر مربعی شکل (با ابعاد 1.08m*1.08m) در مرجع [۱۶] آورده شده است.



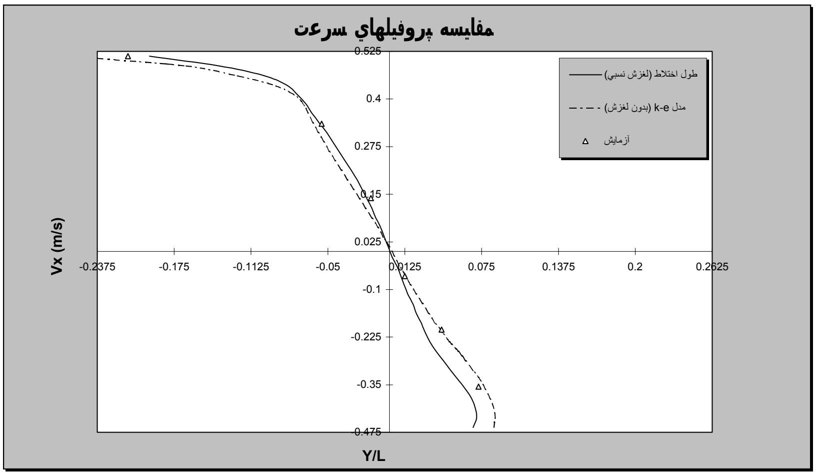
شکل ۸- مقایسهٔ پروفیلهای سرعت حاصل از مدل توربلانس طول اختلاط و شرایط مرزی بسته مختلف بر روی محور x



شکل ۹- مقایسهٔ پروفیلهای سرعت حاصل از مدل توربلانس طول اختلاط و شرایط مرزی بسته مختلف بر روی محور y



شکل ۱۰- مقایسهٔ پروفیل های سرعت حاصل از مدلهای توربلانس و شرایط مرزی بسته مختلف بر روی محور x



شکل ۱۱- مقایسة پروفیل های سرعت حاصل از مدلهای توربلانس و شرایط مرزی بسته مختلف بر روی محور y

۶- نتیجه گیری

در این مقاله جزییات بخشی از یک برنامه تحقیقی برای پیشبینی دقیقتر سلول گردش آب ناشی از یک جریان رودخانه در دورن مدل بندر رودخانهای ارائه شده است. در این برنامه تحقیقی ابتدا بهمنظور کاهش زمان کامپیوتری، برای محاسبه مقادیر ویسکوزیته گردابی از یک مدل توربلانس صفر معادلهای (مدل ساده طول اختلاط) استفاده شده است. در مرحله بعد برای دستیابی بهنتایج عددی دقیقتر از مدل توربلانس k-ε استفاده شده است. ولی از آنجا که استفاده از مدلهای توربلانس دو معادلهای k-ε مستلزم حل دو معادله دیفرانسیل اضافی در هر نیم گام زمانی است، از اینرو زمان محاسبات کامپیوتری تقریباً تا حدود سه برابر افزایش مییابد. همچنین در مدل عددی برای نمایش مرزهای بسته (مانند دیوارها) شرایط مختلفی بکار گرفته شدهاند. مزیت مدل طول اختلاط نسبت به سایر مدلها در این است که با کمترین زمان کامپیوتری ممکن، پیشبینی نسبتاً دقیقی از میدان جریان حاصل میشود. نتایج عددی بهدست آمده از مدل تهیه شده نشان داد که کاربرد شرط مرزی غیر لغزشی در مدل به پیشبینی مقادیر عددی کمتری برای سرعت جریان در مجاورت دیوارهای درون بندر منتهی میشود در صورتیکه عکس این حالت برای شرط مرزی بسته نیمه لغزشی اتفاق میافتد. ولی کاربرد شرط مرزی لغزش نسبی در مدل به پیشبینی منطقیتر مقادیر عددی مزبور میانجامد که از روی مقایسه نتایج مدل عددی با دادههای تجربی میتوان به این موضوع پی برد. بنابراین درمدلسازی چنین جریانها و جریانهای ناشی از جزر و مد در بنادر میتوان چنین بیان داشت که در صورت استفاده از مدل توربلانس صفر معادلهای، برای پیشبینی دقیقتر گردش آب در درون حوضچههای بندری بررسی دقیق شرایط مرزی بسته مختلف توصیه میشود. در مورد مدل توربلانس دو معادلهای k-ε بهدلیل استفاده از قانون عمومی دیوار کاربرد شرط مرزی معمول غیر لغزشی نتایج منطقیتری را بهدست میدهد. همچنین از بررسی شکلهای مربوط به توزیع ویسکوزیته گردابی معلوم میگردد که نحوة شکلگیری این پارامتر مهم توربلانس در درون حوضچه بندری بستگی بهنوع مدل توربلانس و شرط مرزی بسته مورد استفاده دارد. از آنجا که توزیع پارامتر مزبور نقش بسیار مهمی در مدلسازی اجزای کیفی آب ایفا میکند - زیرا در حالت کلی مقدار ضریب پخش در معادلات اجزای کیفی از روی مقدار ویسکوزیته گردابی تعیین میگردد- از اینرو یافتن مقدار و توزیع دقیق آن نیز حائز اهمیت است.

سرانجام از مقایسه نتایج عددی کاربرد مدل k-ε و مدل طول اختلاط میتوان دریافت که با وجود نزدیک بودن مقادیر سرعتهای جریان در درون بندر برای هر دو مدل، توزیع ویسکوزیته گردابی بهدست آمده از مدل k-ε در مقایسه با مدل طول اختلاط بهویژه از نظر مقادیر عددی بهطور قابل ملاحظهای تغییر پیدا کرده و اثر گردابه بزرگ موجود در دورن بندر بر روی

آن کاملاً مشهود است که این امر به پیشبینی دقیقتر توزیع اجزای کیفی آب و مواد رسوبی درون بندر رودخانهای میانجامد.

تشکر و قدردانی

مدل عددی ارائه شده در این مقاله قسمتی از یک برنامه تحقیقی است که اعتبار آن توسط دانشگاه صنعتی سهند تأمین شده است و بدینوسیله از مساعدت و زحمات اعضای محترم شورای پژوهشی دانشگاه نهایت تشکر و قدردانی بهعمل میآید.

مراجع

[1] Langendoen, E.J., Kranenburg, C. and Booij, R., (1994). [Flow Patterns and Exchange of Matter in Tidal Harbours], Journal of Hydraulic Research., Vol. 32, No.2, pp. 259-270.

[2] Jordan, S.A. and Ragab, S.A., (1994). [On the Unsteady and Turbulent Characteristics of the Three-Dimensional Shear-Driven Cavity Flow], Journal of Fluid Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 116, No.3, pp. 439-449.

[3] Jiang, J.X. and Falconer, R.A., (1985). [The Influence of Entrance Conditions and Longshore Currents on Tidal Flushing and Circulation in Model Rectangular Harbours], Proceedings of International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England, pp. 65-74.

[4] Nece, R.E., (1984). [Planform Effects on Tidal Flushing of Marinas], Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 110, No.2, pp. 251-269.

[5] Kimura, I. and Hosoda, T., (1997). [Fundamental Properties of Flow in Open Channels with Dead Zone], Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No.2, pp. 98-107.

[6] Zhou, J.G., (1995). [Velocity-Depth Coupling in Shallow-Water Flows], Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No.10, pp. 717-724.

[7] Van Schijndel, S.A.H. and Kranenburg, C., (1998). [Reducing the Siltation of a River Harbour], Journal of Hydraulic Research., Vol. 36, No.5, pp. 803-814.

[8] Bijvelds, M.D.J.P., Kranenburg, C. and Stelling, G.S., (1999). [3D Numerical Simulation of Turbulent Shallow-Water Flow in Square Harbour], Journal of Hydraulic Engineering., Vol. 125, No.1, pp. 26-31.

[9] Falconer, R.A. and Hakimzadeh, H., (1995). [Numerical modelling of secondary tide induced circulation in rectangular harbours with large aspect ratios], Proceedings of Third International Conference on Planning, Design and Operation of Marinas, ed. W.R. Blain, Computational Mechanics Publications, pp. 109-118.

[10] Fischer, H.B., (1973). [Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing in Open Channel Flow], Annual Review of Fluid Mechanics, 5, pp. 59-78.

[11] Rodi, W., (1984). [Turbulence Models and their Application in Hydraulics], IAHR, Second Edition, Delft, The Netherlands, pp. 1-104.

[12] Leonard, B.P., (1981). [A Survey of Finite Differences with Upwinding for Numerical Modelling of the Incompressible Convective Diffusion Equation], Computational Technique in Transient and Turbulent Flow, eds. C.Taylor and K.Morgan, Pineridge Press, Swansea, Vol. 2, pp. 1-35.

[13] Hakimzadeh, H., (2001). [Numerical Modelling of Cavity Flow in a Square Harbour Using the k-ε Turbulence Model], Proceedings of International Conference on Hydraulic Structures, Volume 3, Shahid Bahonar University of Kerman Publications, pp. 31-40.

[14] Hakimzadeh, H., (1997). [Turbulence Modelling of Tidal Currents in Rectangular Harbours], PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK.

[15] Hakimzadeh, H. and Falconer, R.A., (1997). [Turbulence Modelling of Secondary Tide Induced Circulation in Rectangular Harbours], Proceedings of 27th IAHR Congress, Iowa Institute of Hydraulic Research, Part-b, pp. 785-790.

[16] Li, C.W. and Falconer, R.A., (1995). [Depth Integrated Modelling of Tide Induced Circulation in a Square Harbours], Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No.3, pp. 321-332.