مدلسازي عددي سه بعدي گردش آب در بندر رودخانهاي
با استفاده از مدلهاي توربلانس صفر و دو معادلهاي

حبيب حكيمزاده
استاديار دانشكده مهندسي عمران، دانشگاه صنعتي سهند

چكيده

در اين مقاله جزئيات نتايج عددي مدل انتگرالگيري شده در لايهها در مورد بندر رودخانهاي مربعي شكل با استفاده از دو مدل توربلانس صفر و دو معادلهاي مورد بحث قرار ميگيرد. براي مدلهاي توربلانس صفر و دو معادلهاي به ترتيب مدلهاي تعديل يافته طول اختلاط و انتگرالگيري شده در عمق k-ε براي محاسبه ضرايب ويسكوزيتهگردابي افقي مورد استفاده قرار گرفتند. براي محاسبه ويسكوزيته گردابي قائم نيز از دو مدل توزيع سهموي و مدل انتگرالگيري شده در لايه k-ε استفاده گرديد. مدل تهيه شده براي پيشبيني جريان در درون رودخانه و بندر مورد مطالعه به كار برده شد و نتايج مختلف به دست آمده از مدل عددي و تجربي به صورت گرافيكي با يكديگر مقايسه گرديدند. بررسي عمومي نتايج عددي نشان داد كه مدل توربلانس صفر معادلهاي، مقادير عددي كمتري براي مؤلفههاي سرعت جريان آب در درون بندر رودخانهاي پيشبيني مينمايد، حال آنكه مدل توربلانس دو معادله اي، مقادير عددي منطقي براي مؤلفههاي جريان مزبور پيشبيني مينمايد كه اين مقادير با دادههاي آزمايشگاهي مطابقت نسبتاً خوبي از خود نشان ميدهند. همچنين نتايج عددي مربوط به پروفيل قايم مؤلفههاي افقي سرعت نيز نشانگر توانايي مدل k-ε در پيشبيني دادههاي تجربي مربوط به آنها است.

كلمات كليدى: مدلهاي عددي، جريان سه بعدي، تفاضل محدود، بندر رودخانهاي، مدلهاي توربلانس.

3D Numerical Modelling 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

In this paper details of the numerical model results of the layer integrated model for the square river harbour, using the zero- and two-equation turbulence models are discussed. For the zero- and two-equation turbulence models, the modified mixing length and depth integrated k-ε models were deployed to calculate the horizontal eddy viscosity coefficients, respectively. Likewise, the parabolic distribution and layer integrated k-ε models were used to determine the vertical eddy viscosity. The model was applied for prediction of flow within the river and harbour and the various numerical model and experimental results were then compared graphically with each other. General study of the numerical model results showed that the zero-equation model has predicted small values for the velocity components within the harbour, whereas the two-equation model has predicted reasonable values for the flow components and these values were relatively in good agreement with the experimental results. Also, the numerical model results of the vertical profile of horizontal velocity components have shown the capability of the k-ε turbulence model in predicting the experimental data.

Key words: Numerical models, Three-dimensional flow, Finite difference, River harbour, Turbulence models.

۱- مقدمه

مسائل مربوط به رسوبگذاري و لاينشيني در درون بنادر بسته ساحلي رودخانه اي از موضوعات تحقيقي روز دنيا به شمار ميآيد زيرا كه سالانه هزينههاي زيادي صرف رسوبزدايي و حمل رسوبات از محل بنادر مزبور ميگردد. براي پي بردن به پديده لاينشيني در درون بنادر مزبور ابتدا لازم است كه الگوي نسبتاً دقيق گردش آب، در لايههاي مختلف آب درون بنادر مزبور يافته شود و سپس با اجراي مدل رسوب، نحوه انتقال رسوب به درون بندر و مقدار انباشت مواد رسوبي در آن يافته شود. در اين مقاله به بررسي مدل عددي سه بعدي تهيه شده براي شبيهسازي جريان و گردش آب در رودخانه و بندر با بكارگيري دو مدل توربلانس مختلف پرداخته شده و نتايج عددي به صورت گرافيكي ارائه خواهند شد.

ساخت نخستين مدلهاي عددي سه بعدي به طور تقريبي از دهه ۱۹۸۰ ميلادي آغاز شده و پس از آن به تدريج با بالا رفتن ظرفيت حافظه، ذخيره و سرعت پردازش رايانهها، تحقيقات در اين خصوص افزايش يافته است. از جمله كارهاي تحقيقي انجام يافته در اين زمينه ميتوان به مطالعات Raithby و ديگران [۱]، Myong و Kobayashi [۲]، Huang و Spaulding [۳]، Lin و Falconer [۴] اشاره نمود. همچنين در ارتباط با مدلسازي گردش آب در بنادر به صورت سه بعدي ميتوان كارهاي تحقيقي انجام گرفته توسط غياثي [۵]، Lu و Wai [۶]، Bijvelds و همكاران ايشان [۷] را نام برد. در ارتباط با مطالعات تجربي انجام يافته در اين زمينه نيز ميتوان به كارهاي تحقيقي انجام يافته توسط Langendoen و ديگران [۸]، Jodan و Regab [۹] و نيز Nece [۱۰] اشاره نمود.

اختلاف سرعت بين رودخانه و بندر يك لايه اختلاط آشفتهاي را به وجود ميآورد كه همراه با انتقال اندازه حركت (ممنتم) از رودخانه به درون بندر است. در شرايط آب كم عمق، عرض لايه اختلاط مزبور ميتواند تا چندين برابر عمق موضعي آب گسترش يابد. در اين حالت دو مقياس طول براي توربلانس تميز داده ميشود كه يكي از آنها به واسطه اصطكاك بستر توليد ميگردد و دومي مربوط به برش افقي در لايه اختلاط است كه داراي مشخصه شبه دو بعدي است. انتقال اندازه حركت (ممنتم) مزبور سبب به وجود آمدن يك گردش آب در درون بندر ميشود. از آنجا كه مطالعات تجربي فراواني بر روي اين شكل از بندر انجام گرفته است اين مطالعه موردي غالباً به عنوان يك مبنا براي مقايسه در نظر گرفته ميشود و بنابراين در ارزيابي نتايج عددي مدل تهيه شده در اين كار پژوهشي مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات هيدروديناميك حاكم انتگرال‌گيري شده در لايه‌ها

به طور كلي معادلات حاكم براي توصيف جريانهاي آشفته غيردايمي و تراكمناپذير براساس معادلات سه بعدي رينولدز بيان ميگردند كه با در نظر گرفتن فرض پايهاي نظريه آب كم عمق به صورت زير در ميآيند:

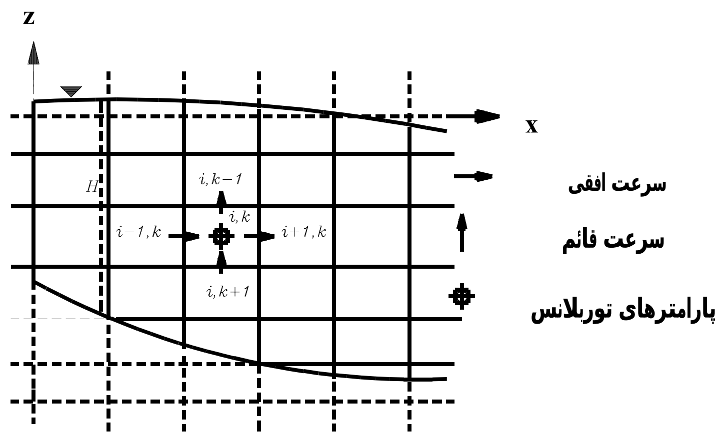
$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial uu}{\partial x}+\frac{\partial uv}{\partial y}+\frac{\partial uw}{\partial z}=f_c v-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial(-\overline{u'u'})}{\partial x}+\frac{\partial(-\overline{u'v'})}{\partial y}+\frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial vu}{\partial x}+\frac{\partial vv}{\partial y}+\frac{\partial vw}{\partial z}=-f_c u-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial(-\overline{v'u'})}{\partial x}+\frac{\partial(-\overline{v'v'})}{\partial y}+\frac{\partial(-\overline{v'w'})}{\partial z} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g=0 \qquad (۴)$$

كه در آن t = زمان، u، v و w = مؤلفههاي سرعت متوسط زماني در جهتهاي x، y و z، p = فشار، ρ = دانسيته آب، f_c = شتاب كوريوليس، g = شتاب ثقل، $(-\overline{u'u'})$ و عبارات نظير آنها تنشهاي رينولدز هستند. در اين پژوهش، معادلات حاكم بر جريان سه بعدي رودخانه و بندر از انتگرالگيري معادلات كلي رينولدز بر روي يك شبكهبندي نامنظم در امتداد قايم به دست ميآيند، به عبارت ديگر ضخامت لايهها در جهت قايم يكسان نيست. شبكهبندي نامنظم در امتداد قايم داراي اين مزيت است كه موقيعتهاي بستر و سطح آزاد با دقت بالايي نشان داده ميشوند. شمايي از لايهها و موقيعتهاي نسبي متغيرها در صفحه x-z در شكل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- سيستم مختصات براي معادلات انتگرالگيري شده در لايهها

همانگونه که از روي شکل مشاهده ميگردد سه نوع لايه بالايي، مياني و پاييني در شبکهبندي در نظر گرفته شدهاند. سطح آزاد و توپوگرافي بستر با لايههاي بالايي و پاييني نشان داده ميشوند که ضخامت آنها با مختصات x و y تغيير ميکند. به طور عکس لايههاي مياني داراي ضخامت يکنواخت يا غيريکنواخت هستند.

اکنـون با در نظر گرفتن سيستم مختصات نشان داده شده در شکل (۱)، نخست معادلات حاکم بر جرم و اندازه حرکت بر روي لايه k ام (k=1,2,3,…,K) انتگرالگيري ميشوند. بدين ترتيب فرم ديفرانسيلي معادله پيوستگي براي لايه k به صورت زير در ميآيد:

$$w_{k-1/2} = -\sum_{k=k}^{K}\left\{\frac{\partial(\bar{u}\Delta z)}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{v}\Delta z)}{\partial y}\right\} \qquad (۵)$$

که در آن $w_{k-1/2}$ مؤلفه سرعت قايم در فصل مشترک $k-1/2$، Δz = ضخامت لايه، $\bar{u}$ و $\bar{v}$ به ترتيب مؤلفههاي سرعت متوسط در لايهها در جهتهاي x و y هستند. بر روي سطح آب، شرط سينماتيک سطح آزاد به صورت زير نوشته ميشود [۴]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\sum_{k=1}^{K}\left\{\frac{\partial(\bar{u}\Delta z)}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{v}\Delta z)}{\partial y}\right\}=0 \qquad (۶)$$

که در آن ζ = تراز آب است.

اکنـون بـه طـور مـشابه بـا در نظـر گـرفتن $q_{lx}=\bar{u}\,\Delta z$ و $q_{ly}=\bar{v}\,\Delta z$ که در آنها q_{lx}, q_{ly} مؤلفههـاي شـار جريـان در لايههـا در امتـدادهاي x و y هـستند، معـادلات انـدازه حرکـت (ممنتم) انتگرالگيري شده در لايهها در صفحه افقي بـا در نظـر گرفتن تقريب بوسينسک بـراي تنـشهاي رينولـدز در صفحـه افقـي به ترتيب زير بـه دست ميآيند [۴]:

$$\left.\frac{\partial q_{lx}}{\partial t}\right|_k+\left[\beta_l\left(\frac{\partial \bar{u}q_{lx}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}q_{lx}}{\partial y}\right)\right]_k=$$
$$\left.f_c q_{ly}\right|_k-g\Delta z\left.\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right|_k+$$
$$\left\{\frac{\partial}{\partial x}\nu_{th}\Delta z\left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\nu_{th}\Delta z\left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right]\right\}_k$$
$$+(w\bar{u})_{k+1/2}-(w\bar{u})_{k-1/2}$$
$$+[(-\overline{u'w'})|_{k-1/2}-(-\overline{u'w'})|_{k+1/2}] \qquad (۷)$$

$$\left.\frac{\partial q_{ly}}{\partial t}\right|_k+\left[\beta_l\left(\frac{\partial \bar{u}q_{ly}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}q_{ly}}{\partial y}\right)\right]_k=$$
$$-\left.f_c q_{lx}\right|_k-g\Delta z\left.\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right|_k+$$
$$\left\{\frac{\partial}{\partial x}\nu_{th}\Delta z\left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\nu_{th}\Delta z\left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right]\right\}_k$$
$$+(w\bar{v})_{k+1/2}-(w\bar{v})_{k-1/2}$$
$$+[(-\overline{v'w'})|_{k-1/2}-(-\overline{v'w'})|_{k+1/2}] \qquad (۸)$$

که در آنها داریم: $\beta_l = \frac{\int_{k+1/2}^{k-1/2} u^2 dz}{\bar{u}^2 \Delta z}$ ضریب تصحیح ممنتم و v_{th} ویسکوزیته گردابي افقي است. مقادير تنشهاي رينولدز در صفحات قايم نيز با استفاده از تقريب بوسينسك به واسطه ويسكوزيته گردابي قايم ν_{tv} و گراديان سرعتهاي متناظر يافته ميشوند.

اکنون ميتوان با استفاده از شرط سينماتيك سطح آزاد و قاعده لايب نيتز بر روي لايه سطح آزاد (جايي که k=1 است)، عبارتهاي $(w\bar{u})_{k-1/2}$ و $(w\bar{v})_{k-1/2}$ را حذف کرد. در موقعيت بستر، عبارتهاي $(w\bar{u})_{k+1/2}$ و $(w\bar{v})_{k+1/2}$ به دليل شرط مرزي غيرلغزشي صفر ميگردند.

۳- مدلهاي توربلانس

در اين پژوهش از نظريه ويسكوزيته گردابي که به صورت گسترده به کار برده ميشود براي محاسبه تنشهاي رينولدز استفاده شده است. به علاوه، ويسكوزيته گردابي افقي بر روي عمق ثابت فرض گرديده است و مقدار آن برابر ويسكوزيته گردابي عمق متوسط قرار داده شده است [۴]. از اينرو براي مدل صفر معادلــهای توربلانس، مقدار ويسكوزيته گردابي افقي ميتواند با استفاده از پيشنهاد Fischer تعيين گردد [۱۱]:

$$\nu_{th} = 0.15 U_* H \qquad (۹)$$

که در آن U_* = سرعت برشي و H = عمق کلي جريان است. به طور مشابه، ويسكوزيته گردابي قايم از روي توزيع درجه دوم اين پارامتر تعيين ميگردد [۱۲]:

$$\nu_{tv} = \kappa u_* (z+h)\left(1-\frac{z+h}{H}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن h = تراز متوسط آب و κ = ضريب Von Karman که برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته مي شود.

در مورد مدل توربلانس دو معادلهاي، ضريب ويسكوزيته گردابي افقي با استفاده از معادلات انتگرالگيري شده در عمق k-ε مي تواند محاسبه گردد [۱۳]:

$$\frac{\partial \bar{k} H}{\partial t} + \frac{\partial \bar{k} U H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{k} V H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\bar{\nu}_{th} H}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial \bar{k}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\bar{\nu}_{th} H}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial \bar{k}}{\partial y}\right) + \bar{\nu}_{th} H\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2\right] + c_k U_*^3 - \bar{\varepsilon} H \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon} H}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varepsilon} U H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\varepsilon} V H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\bar{\nu}_{th} H}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\bar{\nu}_{th} H}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y}\right) + c_{1\varepsilon} c_\mu \bar{k} H\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2\right] + c_\varepsilon \frac{U_*^4}{H} - c_{2\varepsilon}\frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}} H \qquad (۱۲)$$

که در آن $\bar{k}$ انرژي سينتيك توربلانس عمق متوسط، $\bar{\varepsilon}$ = نرخ هدررفت متوسط در عمق انرژي سينتيك، U,V = مؤلفههاي عمق متوسط سرعت جريان در امتدادهاي x و y، $c_\varepsilon = 3.6 c_{2\varepsilon} c_\mu^{1/2} (f/2)^{-3/4}$، $c_k = (f/2)^{-1/2}$، $\bar{\nu}_{th} = c_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}}$، f = ضريب اصطكاك دارسي و $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_\mu, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$ ضرايب ثابت هستند. همچنين با فرض $\hat{k} = \frac{1}{\Delta z}\int_{k+1/2}^{k-1/2} k dz$ ، ميتوان ويسكوزيته گردابي قايم را با استفاده از فرم انتگرالگيري شده در لايه معادلات k-ε به دست آورد [۱۴]:

$$\left.\frac{\partial \hat{k}\Delta z}{\partial t}\right|_k + \left(\frac{\partial \hat{k} q_{lx}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{k} q_{ly}}{\partial y}\right)_k + (w\hat{k})_{k-1/2} - (w\hat{k})_{k+1/2} = \left(\frac{\hat{\nu}_{tv}}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial \hat{k}}{\partial z}\right)_{k-1/2} - \left(\frac{\hat{\nu}_{tv}}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial \hat{k}}{\partial z}\right)_{k+1/2} + \hat{P}\Delta z - \hat{\varepsilon}\Delta z \qquad (۱۳)$$

$$\left.\frac{\partial\hat{\varepsilon}\Delta z}{\partial t}\right|_k + \left(\frac{\partial\hat{\varepsilon}q_{lx}}{\partial x} + \frac{\partial\hat{\varepsilon}q_{ly}}{\partial y}\right)_k + (w\hat{\varepsilon})_{k-1/2} - (w\hat{\varepsilon})_{k+1/2} = \left(\frac{\hat{\nu}_{tv}}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial\hat{\varepsilon}}{\partial z}\right)_{k-1/2} - \left(\frac{\hat{\nu}_{tv}}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial\hat{\varepsilon}}{\partial z}\right)_{k+1/2} + c_{1\varepsilon}\frac{\hat{\varepsilon}}{\hat{k}}\hat{P}\Delta z - c_{2\varepsilon}\frac{\hat{\varepsilon}^2}{\hat{k}}\Delta z \qquad (۱۴)$$

که در آنها داریم:

$$\hat{P} = \hat{\nu}_{tv}\left[\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial\overline{v}}{\partial z}\right)^2\right] \qquad (۱۵)$$

$$\hat{\nu}_{tv} = c_\mu\frac{\hat{k}^2}{\hat{\varepsilon}} \qquad (۱۶)$$

جزئیات کـامل مـدلهاي تـوربلانس توسط Rodi ارائه شده است [۱۵].

۴- شرايط مرزي

همانگونه که پیش از این بیان گردید لایههاي سطحي و بستر دو لایه مهم در معادلات هیدرودینامیك انتگرالگیري شده در لایه هستند. در غیاب وزش باد، تنش برشي در سطح آزاد صفر میگردد. در مورد لایه بستر عبارت زیر به طور عموم براي تعریف تنش برشي بستر مورد استفاده قرار میگیرد:

$$\left.(-\overline{u'w'})\right|_{-h} = \nu_{tv}\frac{\partial\overline{u}}{\partial z} = u_*^2 \qquad (۱۷)$$

که در آن $\rho\left.(-\overline{u'w'})\right|_{-h}$= تنش برشي بستر و u_* = سرعت برشي بستر میباشد. با فرض پروفیل لگاریتمي سرعت، عبارت زیر براي تنش برشي بستر به دست میآید [۴]:

$$\left.(-\overline{u'w'})\right|_{-h} = \overline{u}(\overline{u}^2 + \overline{v}^2)^{1/2}\left[2.5\ln\left(\frac{30d}{k_s}\right)\right]^{-2} \qquad (۱۸)$$

که در آن d = ضخامت لایه بستر و k_s = طول معادل زبري بستر است. همچنین تنش برشي به دست آمده براي معادلات انتگرال‌گیري شده در لایهها میتواند در محاسبات معادلات انتگرالگیري شـده در عمق مورد استفاده قرار بگیرد. به طور عکس، زمانـي کـه تنها يك لایه وجود دارد تنش برشي بستر بـه فرم معادله دارسي بیان میگردد که در آن ضریب اصطکاك با استفاده از معادله کلبروك-وایت محاسبه مي شود.

همچنین در مورد مدل توربلانس k-ε، مقادیر انرژي سینتیك توربلانس و نرخ هدررفت آن در مجاورت دیوارها و بستر از روي روابط پیشنهاد شده توسط Rodi به ترتیب زیر به دست آمدهاند [۱۵]:

$$k_w = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} \qquad (۱۹)$$

$$\varepsilon_w = \frac{u_*^3}{\kappa z_c} \qquad (۲۰)$$

که در آن z_c= فاصله مرکز نخستین شبکه از دیوار یا بستر میباشد. در مورد شرایط مرزي باز جریان رودخانه نیز میتوان بر پایه پیشنهاد Demuren و Rodi مقادیر پارامترهاي مزبور را به ترتیب زیر به دست آورد [۱۶]:

$$k_d = 0.004u_d^2 \qquad (۲۱)$$

$$\varepsilon_d = c_\mu^{3/4}\,\frac{k_d^{3/2}}{0.09b} \qquad (۲۲)$$

که در آن u_d= سرعت جریان ورودي و b= عرض جریان ورودي است. براساس پیشنهاد دیگر Rodi [۱۵] در روش جایگزین میتوان مقادیر پارامترهاي فوق را در مرزهاي باز برابر صفر قرار داد.

پیش از این شرایط مرزي بسته مختلفي در پیشبیني الگوي دو بعدي گردش جریان آب در درون بنادر جزر و مدي و رودخانهاي به کار گرفته شده است [۱۷ و ۱۸]، در این پژوهش تنـها شرط مرزي معمول عدم لغزش در مورد دیوارها و بستر بـه کار گرفته شده است. در مورد شرایط مرزي باز شرط مرزي جریان در قسمت بالا دست و شرط مرزي جریان آزاد در قسمت پایین دست مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]. براي گسستهسازي معادلات انتگرالگیري شده در عمق و لایه ها نیز از روش تفاضلات محدود استفاده شده است. جزئیات بیشتر

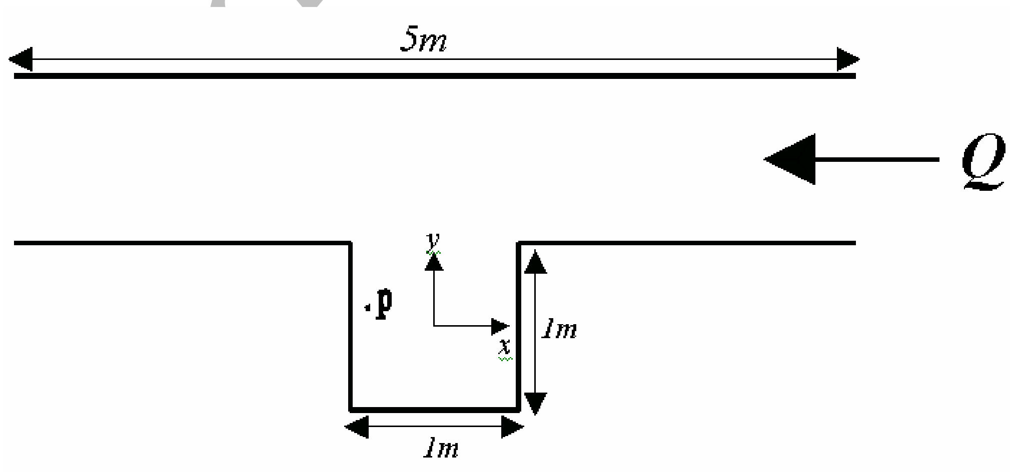
مدل عددي و معادلات گسستهسازي شده و روش حل معادلات در مرجع [۴] آورده شده است.

۵- ميدان محاسباتي و شرايط جريان

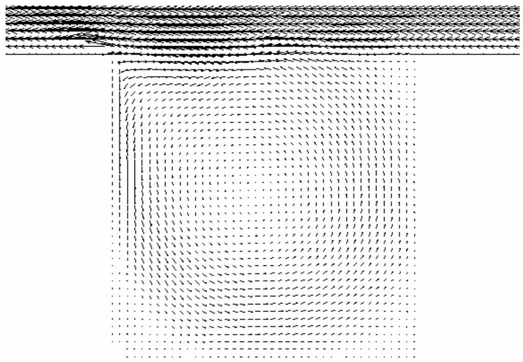
در اين بخش جزئيات كاربرد مدل عددي براي بندر رودخانهاي مورد مطالعه مورد بحث قرار ميگيرد (شكل ۲). طول و عرض مدل آزمايشگاهي بندر رودخانه مربعي شكل ۱ متر و طول مدل رودخانه بندر ۵ متر در نظر گرفته شده است [۷]. شبكههاي مورد استفاده براي شبكهبندي ميدان محاسباتي از نوع منظم و مربعي شكل بوده و ابعاد آنها ۲/۵cm × ۲/۵cm ميباشند. بنابراين تعداد شبكههاي مورد استفاده در طول و عرض ميدان محاسباتي به ترتيب برابر ۲۰۰ و ۸۲ هستند. دبي جريان موجود در مدل آزمايشگاهي بندر و رودخانه برابر ۰/۰۴۲ مترمكعب در ثانيه و عمق آب برابر ۱۱ سانتيمتر بوده است. بنابراين براي دستيابي به جزئيات بيشتر تغييرات سرعت در عمق تعداد ۱۰ لايه در امتداد قايم انتخاب گرديد كه ضخامت لايه نخست ۲/۵ سانتيمتر، لايههاي مياني ۱ سانتيمتر و لايه كف برابر ۵ ميليمتر قرار داده شدهاند. مقدار زبري معادل نيكورادزه k_s از روي دادههاي تجربي برابر ۴/۰ ۵ ميليمتر قرار داده شد [۷].

۶- نتايج مدل عددي و مقايسه آنها با نتايج تجربي

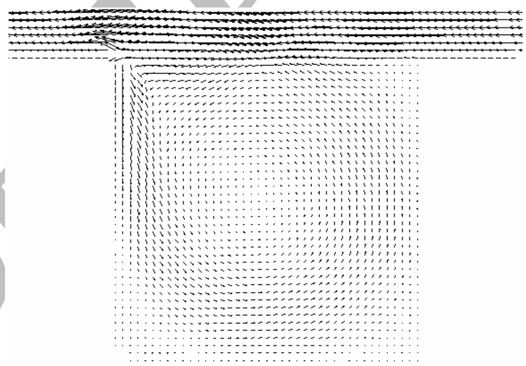
مدل عددي سه بعدي تهيه شده در اين پژوهش با در نظر گرفتن دادههاي مربوط به مدل فيزيكي و براي شرايط مرزي جريان ذكر شده در بخش قبلي اجرا گرديد. دبي ورودي به رودخانه در قسمت بالادست به طور تدريجي مطابق يك منحني سينوسي افزايش داده شد و پس از رسيدن به مقدار معين ثابت نگه داشته شد. نتايج مدل عددي با بكارگيري مدلهاي توربلانس صفر و دو معادلهاي به صورت گرافيكي استخراج گرديد. شكل (۳ الف) نتايج گرافيكي مربوط به گردش آب پيشبيني شده توسط مدل عددي را با استفاده از مدل توربلانس صفر معادلهاي طول اختلاط براي لايه سطحي (نخست) در درون بندر رودخانهاي نشان ميدهد. از بررسي اين شكل مشاهده ميشود كه الگوي گردش آب پيشبيني شده تقريباً با نتايج مدل عددي دو بعدي تطابق دارد و مركز سلول گردش آب در قسمت مركزي بندر قرار گرفته است. به طور مشابه شكل (۳ ب) نتايج گرافيكي مربوط به گردش آب پيشبيني شده توسط مدل عددي را با استفاده از مدل توربلانس صفر معادلهاي براي لايه كفي (دهم) در درون بندر رودخانهاي نشان ميدهد. از مقايسه عمومي نتايج مربوط به اين لايه با نتايج متناظر لايه سطحي مشاهده ميشود كه تغيير چنداني در الگوي گردش آب در عمق جريان حاصل نشده است و آشفتگي ايجاد شده در موقعيت بستر به خوبي توانسته است به لايه سطحي انتقال يابد. همچنين مقايسه كيفي دو شكل مزبور نشان ميدهد كه جريان آب رودخانه در لايه سطحي بسيار بيشتر از لايه كفي است.



شكل ۲- طرح كلي مدل بندر و رودخانه

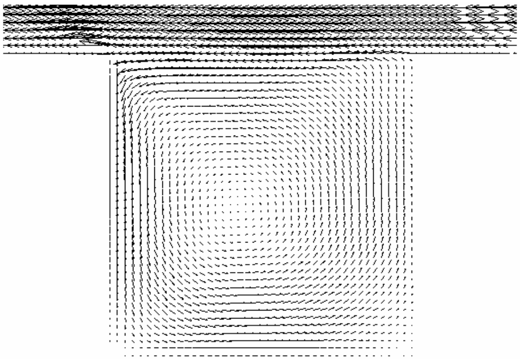


شکل ۳ الف- الگوي گردش آب در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط درلايه سطحي

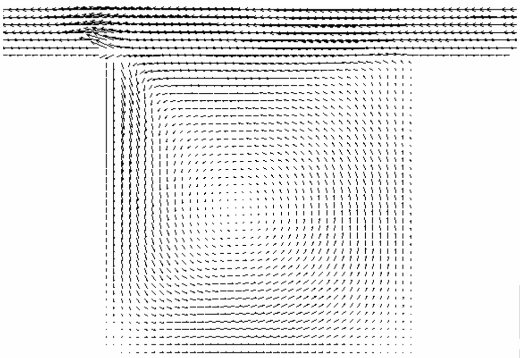


شکل ۳ ب- الگوي گردش آب در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط در لايه کفي

شکل (۴ الف) نتايج گرافيکي مربوط به گردش آب پيش‌بيني شده توسط مدل عددي را با استفاده از مدل توربلانس دو معادلهاي k-ε براي لايه سطحي (نخست) در درون بندر رودخانهاي نشان مي‌دهد. مقايسه نتايج گرافيکي مربوط به اين مـدل تـوربلانس با نتايج متناظر پيشين شکل (۳ الف) نشان ميدهد کـه هماننـد مدل عـددي دو بعدي انتـگرالگيري شده در عمق [۱۹] با بکارگيري مدل توربلانس دو معادلهاي گستردگي سلول گردش آب به سمت ديوارهها و تقارن به وجود آمده در سلول بيشتر ميگردد. شکل (۴ ب) نيز نتايج گرافيکي مربوط به گردش آب پيشبيني شده توسط مدل عددي را با استفاده از مدل توربلانس دو معادلهاي k-ε براي لايه کفي (دهم) در درون بندر رودخانهاي نشان ميدهد. مقايسه عمومي نتايج گرافيکي به دست آمده از مدل توربلانس دو معادلهاي براي دو لايه سطحي و کفي نيز نشان ميدهد که همانند حالت پيشيـن الگــوي گردش آب در درون بندر در عمق جريان حفظ



شکل ۴ الف- الگوي گردش آب در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε در لايه سطحي

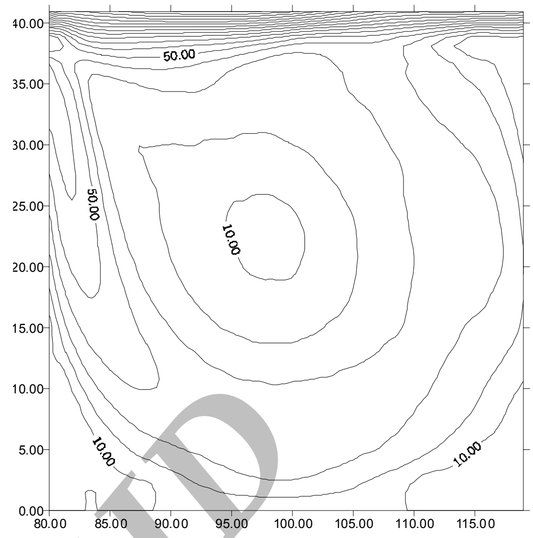


شکل ۴ ب- الگوي گردش آب در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε در لايه کفي

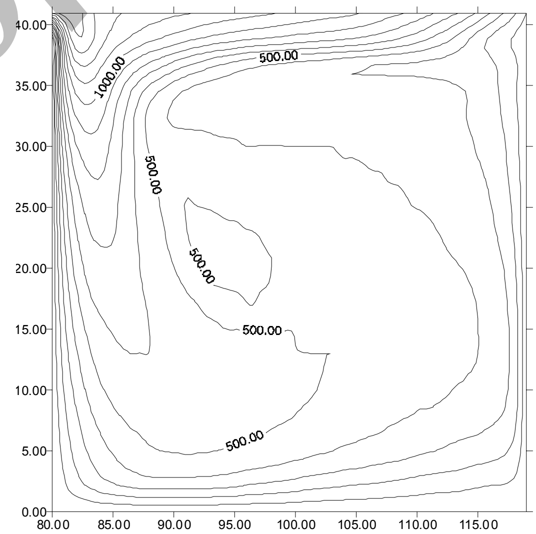
شده است. به عبارت ديگر آشفتگي ايجاد شده در کف به سطح آب انتقال پيدا کرده است.

بار ديگر مقايسه کيفي اين دو شکل نشان ميدهد که جريان آب در لايه سطحي رودخانه بسيار بيشتر از لايه کفي است. همچنين در استفاده از اين مدل براي کاهش زمان کامپيوتري موردنياز از توزيع سهموي ويسکوزيته گردابي عمودي نيز استفاده گرديد و تغييرات چنداني در نتايج پيشبيني شده ملاحظه نگرديد.

همچنين نتايج ويسکوزيته گردابي افقي پيشبيني شده در درون بندر نيز با استفاده از مدلهاي توربلانس صفر و دو معادلهاي به صورت گرافيکي به ترتيب در شکلهاي (۵ و ۶) نشان داده شدهاند.

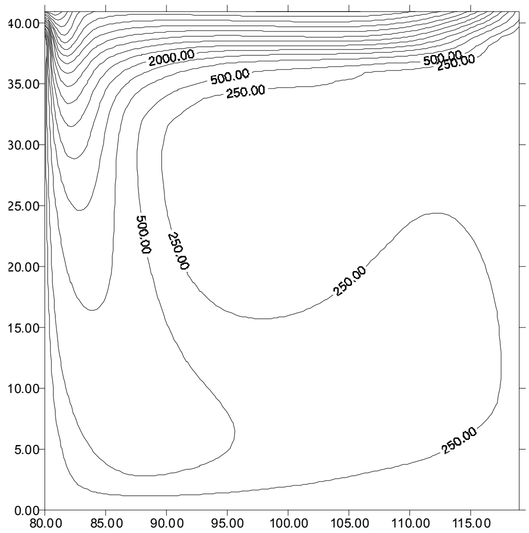


شکل ۵ - توزیع ویسکوزیته گردابی افقی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس طول اختلاط (برحسب میلیمترمربع بر ثانیه)

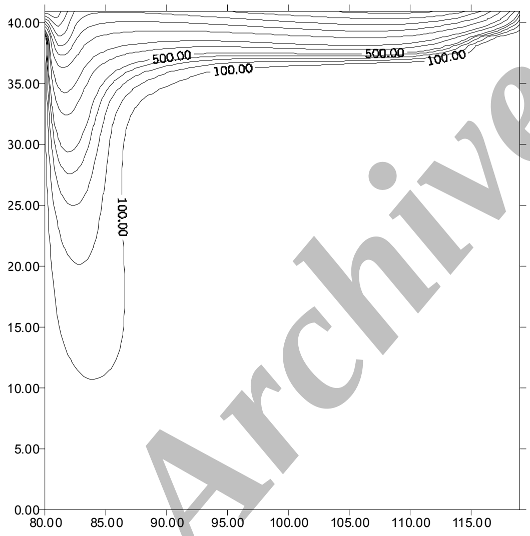


شکل ۶ - توزیع ویسکوزیته گردابی افقی در درون بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε (برحسب میلیمترمربع بر ثانیه)

بررسي اين نتايج در درون بندر نشان ميدهد که توزيع به دست آمده از دو مدل توربلانس، تفاوت قابل ملاحظهاي دارند و نتايج مدل توربلانس k-ε با نتايج به دست آمده توسط Bijvelds و همکاران ايشان [۷] همخواني خوبي دارند. شکلهاي (۷ الف و ب) نيز نتايج گرافيکي به دست آمده از مدل عددي مربوط بـه انرژي



شکل ۷ الف - توزیع انرژي سينتيك توربلانس در بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε (برحسب میلیمترمربع بر مجذور ثانیه)



شکل ۷ ب- توزیع نرخ هدررفت انرژي سينتيك توربلانس در بندر با استفاده از مدل توربلانس k-ε (برحسب میلیمترمربع بر مکعب ثانیه)

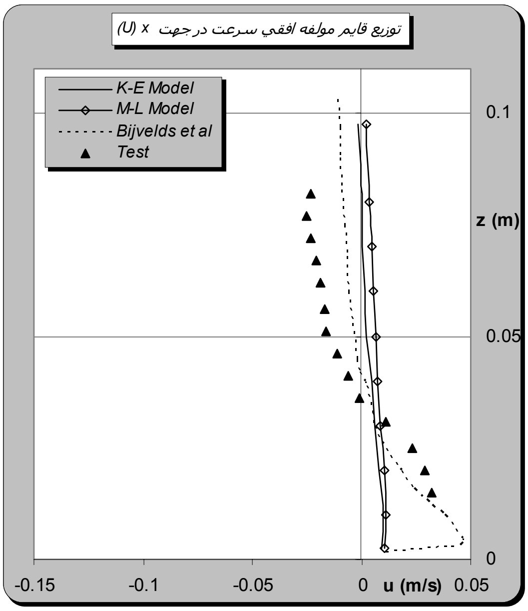
سينتيك توربلانس و نرخ هدررفت آن را با استفاده از مدل توربلانس k-ε در درون بندر نشان مي دهند.

بار ديگر مقايسه توزيع پيشبيني شده براي انرژي سينتيك توربلانس در استفاده از مدل k-ε با نتايج به دست آمده از مدل Bijvelds و همکاران ايشـان [۷] مطابقت بسيـــار خوبـي را نشان

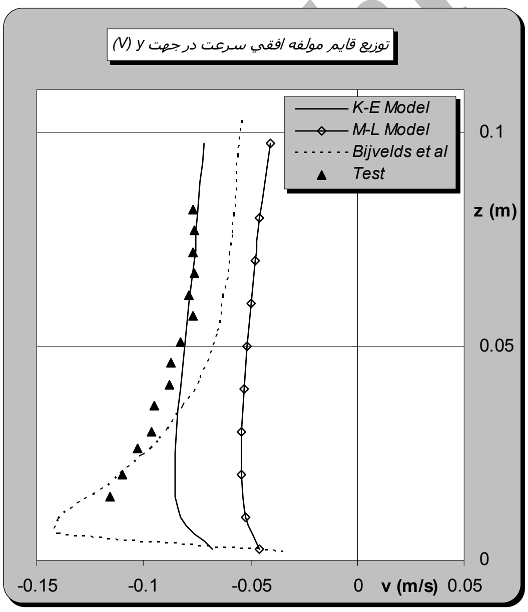
ميدهد.

همانگونه که پيش از اين بيان گرديد براي ارزيابي نتايج عددي پيش بيني شده توسط مدل، اين نتايج با دادههاي آزمايشگاهي دانشكده مهندسي عمران دانشگاه دلفت هلند [۸ و ۲۰] مقايسه گرديدند که در اين قسمت به بررسي آنها پرداخته ميشود. در اين قسمت به مقايسه برخي از پروفيلهاي سرعت به دست آمده با نتايج تجربي پرداخته مي شود.

نخست بر روي شكلهاي (۸ الف و ب)، به بررسي پروفيلهاي قايم مؤلفههاي افقي سرعت جريان آب در امتدادهاي x و y در نقطه P که به فاصله ۴۰ سانتيمتر از فصل مشترك رودخانه و بندر و ۱۰ سانتيمتر از ديوار كناري سمت چپ بندر قرار دارد، پرداخته شده است. از روي مقايسه كلي نتايج به دست آمده از مدل با نتايج آزمايشگاهي مشاهده ميشود که نتايج به دست آمده از مدل طول اختلاط کمتر از مقادير متناظر آزمايشگاهي است و اين مدل به طور عموم نتوانسته است نتايج تجربي را به خوبي پيشبيني نمايد. ولي در مورد مدل توربلانس k-ε مشاهده ميشود به جز در قسمتهاي مربوط به نزديكيهاي بستر نتايج عددي مربوط به اين مدل مطابقت نسبتاً خوبي را با نتايج تجربي از خود نشان ميدهند. همچنين در اين قسمت به منظور مقايسه كمي نتايج به دست آمده از مدل عددي تهيه شده با نتايج ساير پژوهشگران، نتايج مربوط به Bijvelds و همكاران ايشان [۷] نيز بر روي شكلهاي مزبور آورده شده است. با مقايسه پروفيلهاي قايم مؤلفه افقي سرعت آب در امتداد x با دادههاي تجربي ميتوان مشاهده نمود که مدل تهيه شده توسط Bijvelds و همكاران ايشان مقادير تجربي در نزديكي بستر به طور منطقي بيشتر پيشبيني نموده است. در حاليكه مدل عددي تهيه شده حاضر نتوانسته است مقادير تجربي را بخوبي شبيهسازي نمايد. به طور عكس با بررسي دقيق پروفيلهاي قائم مؤلفه افقي سرعت آب در امتداد y با دادههاي تجربي ميتوان مشاهده نمود که مدل تهيه شده توسط Bijvelds و همكاران ايشان مقادير تجربي در نزديكي سطح آزاد را کمتر و در مجاورت بستر بيشتر پيشبيني نموده است. حال آنکه مدل عددي تهيه شده حاضر با بكارگيري مدل توربلانس k-ε با دو مقياس طول متفاوت توانسته است مقادير تجربي را به جز در مجاورت بستر به خوبي شبيهسازي نمايد. همچنين سري ديگري از آزمايشات عددي نشان داد که در بكارگيري مدل توربلانس k-ε، استفاده از معادله ۱۰ براي ويسكوزيته گردابي قايم زمان محاسبات را بسيار كاهش میدهد ولی تفاوت قابل ملاحظهاي در نتايج عددي مربوط به پروفيلهاي قايم مؤلفههاي افقي سرعت به وجود نميآورد.



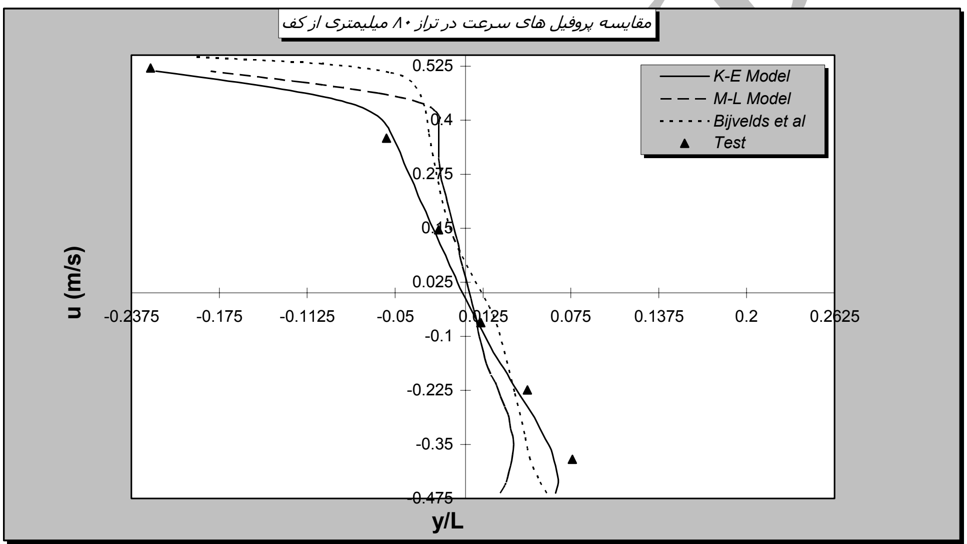
شكل ۸ الف - مقايسه نتايج عددي پروفيل قائم مؤلفه افقي سرعت آب در امتداد x با دادههاي تجربي



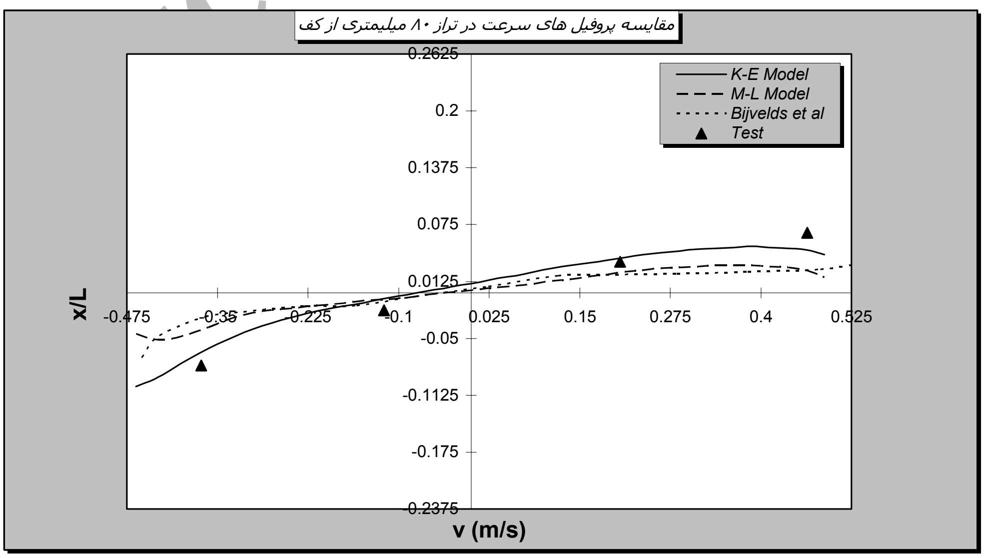
شكل ۸ ب - مقايسه نتايج عددي پروفيل قائم مؤلفه افقي سرعت آب در امتداد y با دادههاي تجربي

همچنين مقايسه پروفيلهاي سرعت پيشبيني شده توسط مدل در چهار تراز مختلف آب (به عبارت ديگر در ترازهاي ۸۰ ، ۶۰، ۴۰ و ۱۵ ميليمتـري از بستر) با نتايج اندازهگيري سـرعت جريان در دو امتداد افقي صورت گرفته است كه در اين قسمت بـه بررسي دو نمونه از اين مقايسهها پرداخته ميشود. شـكلهاي (۹ الف و ب) مقايسه نتايج عددي به دست آمده از مدلهاي مختلف را بـا مقاديـر تجربـي براي پروفيل افقي سرعت جريان آب در درون بندر بر روي دو محور x و y و در تراز آب ۸۰ ميليمتري از كف را نشـان ميدهد كـه در آنـها L طول و عرض مدل بنـدر رودخانهاي است.

بررسي اين شكلها نيز نشان ميدهد كه همانند پروفيل قائم سرعت نتايج عددي پيشبيني شده توسط مدل طول اختلاط كمتر از مقادير متناظر تجربي است و مدل توربلانس k-ε توانسته است مقادير تجربي را به خوبي پيشبيني نمايد. بار ديگر به منظور مقايسه كمي نتايج به دست آمده از مدل عددي تهيه شده با نتايج ساير پژوهشگران، نتايج مربوط به Bijvelds و همكاران ايشان [7] نيز بر روي شكلهاي مزبور آورده شده است.



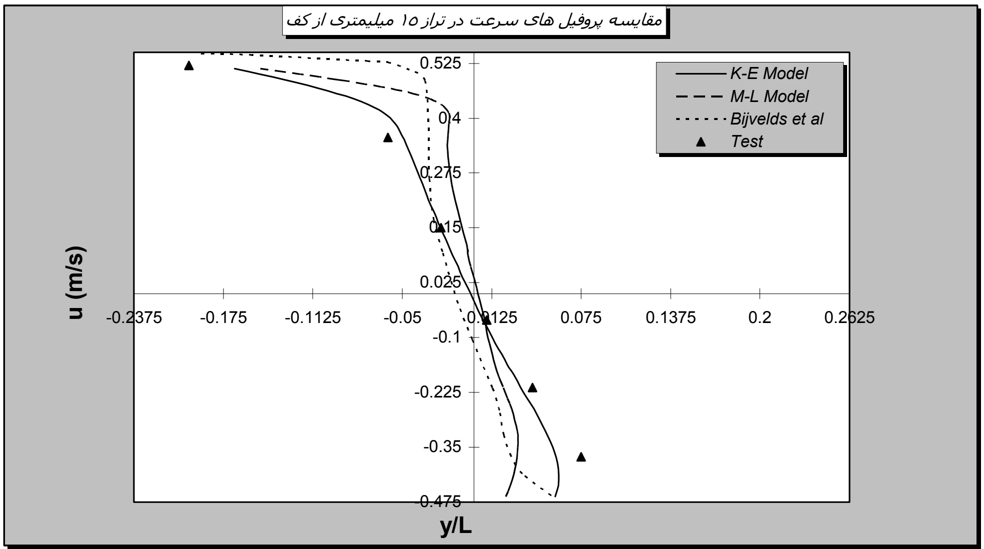
شكل ۹ الف – مقايسه نتايج عددي پروفيل افقي سرعت آب در امتداد x با دادههاي تجربي در تراز ۸۰ ميليمتري از كف



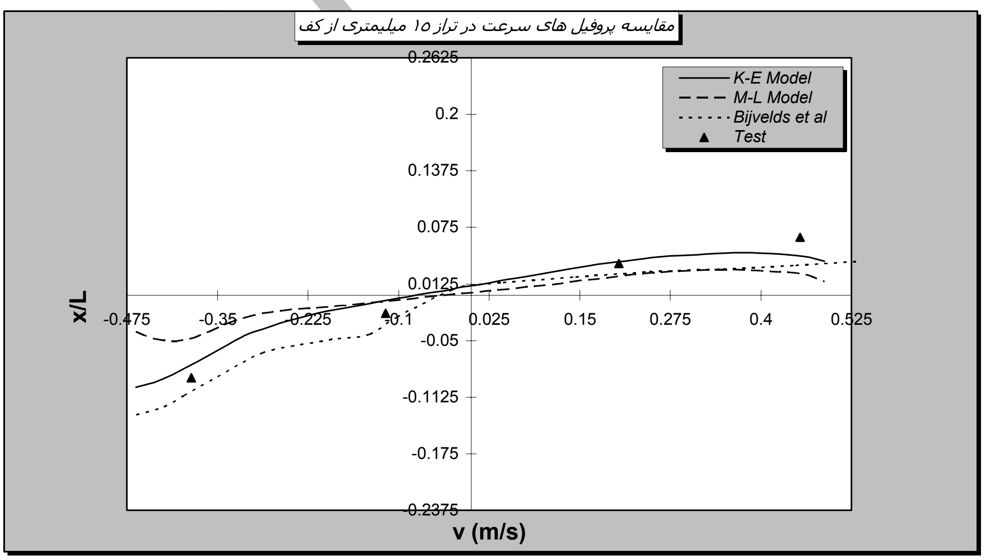
شكل ۹ ب – مقايسه نتايج عددي پروفيل افقي سرعت آب در امتداد y با دادههاي تجربي در تراز ۸۰ ميليمتري از كف

همچنين از بررسي اين شكلها ميتوان مشاهده نمود كه نتايج عددي به دست آمده به واسطه مدل توربلانس k-ε همخواني منطقي تر و بهتري را با نتايج تجربي به دست ميدهند.

نمونه ديگري از مقايسههاي مشابه انجام گرفته براي تراز ۱۵ ميليمتري از كف در شكلهاي (۱۰ الف و ب) نشان داده شده است. بار ديگر بررسي اين شكلها نشان ميدهد كه نتايج عددي پيشبيني شده توسط مدل طول اختلاط كمتر از مقادير تجربي بوده و مدل توربلانس k-ε توانسته است مقادير تجربي را به خوبي پيشبيني نمايد.



شكل ۱۰ الف - مقايسه نتايج عددي پروفيل افقي سرعت آب در امتداد x با دادههاي تجربي در تراز ۱۵ ميليمتري از كف



شكل ۱۰ ب - مقايسه نتايج عددي پروفيل افقي سرعت آب در امتداد y با دادههاي تجربي در تراز ۱۵ ميليمتري از كف

در اين قسمت نيز آزمايشات عددي نشان داد كه در استفاده از مدل توربلانس k-ε ، بكارگيري معادله ۱۰ براي ويسكوزيته گردابي قايم به جاي معادلههاي (۱۳ و ۱۴) زمان محاسبات را كاهش داده و تفاوت قابل ملاحظهاي نيز در نتايج عددي مربوط به پروفيلهاي افقي سرعت به وجود نمیآورد. همچنين مقايسه عمومي نتايج عددي و تجربي در لايههاي مختلف آب نيز نشان ميدهد كه آشفتگي ايجاد شده در كف به سطح آب گسترش يافته و تقريباً حفظ شده است و به طور كلي نتايج پيشبيني شده توسط مدل توربلانس k-ε در مقايسه با نتايج تجربي مطابقت خوبي را در همه ترازهاي آب از خود نشان دادهاند.

۷- نتيجه گيري

در اين مقاله جزئيات نتايج مدل عددي سه بعدي تهيه شده براي پيشبيني گردش آب در لايههاي مختلف تراز آب در بندر رودخانهاي مربعي شكل آورده شده است. در اين بررسي براي محاسبه ويسكوزيتههاي گردابي افقي و عمودي از دو مدل توربلانس صفر و دو معادلهاي استفاده گرديده است. در مورد مدل توربلانس k-ε سعي بر اين بوده است كه با توجه به طبيعت غيرهمگن بودن آشفتگي جريان در امتدادهاي قائم و افقي از دو مدل آشفتگي با مقياسهاي متفاوت استفاده گردد. براي اين منظور مدل انتگرالگيري شده در عمق k-ε براي محاسبه ويسكوزيته گردابي افقي و مدل انتگرالگيري شده در لايه k-ε با اندكي تغيير براي محاسبه ويسكوزيته گردابي قايم مورد استفاده قرار گرفتند.

مدل عددي تهيه شده با بكارگيري هر دو مدل توربلانس به خوبي توانست گردش آب به وجود آمده در درون بندر آزمايشگاهي را پيشبيني نمايد، با اين وجود نتايج عددي مربوط به استفاده از مدل توربلانس دو معادلهاي بسيار منطقيتر بودند. همچنين مقايسه پروفيلهاي قايم و افقي مؤلفههاي سرعت جريان پيشبيني شده توسط مدل عددي با نتايج تجربي متناظر نشان دهنده توانايي كارآمد مدل توربلانس دو معادلهاي k-ε در پيشبيني نتايج آزمايشگاهي بود.

مراجع

[1] Raithby, G.D., Elliott, R.V. and Hutchinson, B.R. (1988) "Prediction of Three-Dimensional Thermal Discharge Flows", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No.7, pp. 720-737.

[2] Myong, H.K., and Kobayashi, T. (1991) "Prediction of Three-Dimensional Developing Turbulent Flow in a Square Duct With an Anisotropic Low-Reynolds-Number K-ε Model", Journal of Fluid Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 113, pp. 608-615.

[3] Huang, W. and Spaulding, M. (1995) "3D Model of Estuarine Circulation and Water Quality Induced by Surface Discharges", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No.4, pp. 300-311.

[4] Lin, B. and Falconer, R.A. "Three-Dimensional Layer Integrated Modelling of Estuarine Flows with Flooding and Drying", Estuarine, Coastal and Shelf Science, Academic Press Ltd (1997).

[5] Ghiassi, R. (1995) "Three Dimensional Coastal Flow Modelling Using the Finite Volume Method", PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK.

[6] Lu, Q. and Wai, W.H. (1996) "An Efficient Splitting Method With FEM and FDM for 3-D Hydrodynamic Computations", Proceedings of Second International Conference on Hydrodynamics, Eds. A.T. Chwang, J.H.W. Lee & D.Y.C. Leung, Volume 2, pp. 697-702.

[7] 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.

[8] Langendoen, E.J., Booij, R., and Kranenburg, C., (1994). "Flow patterns and exchange of matter in tidal harbours", Journal of Hydraulic Research., Delft, The Netherlands, 32(2), 259-270.

[9] Jodan, S.A. and Regab, 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.

[10] 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.

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

[12] Rodi, W. "Elements of the Theory of Turbulence", in Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book, eds. Abbott and Price, E and F N Spon Ltd., London, pp. 45-59 (1993).
[13] Falconer, R.A. and Li, G. "Numerical Modelling of Tidal Eddies in Coastal Basins with Narrow Entrance Using k-ε Turbulence Model", in Mixing and Transport in the Environment, eds. K.J. Beven, et. al., John Wiley & Sons Ltd., London, pp. 325-350 (1994).
[14] Hakimzadeh, H. (1997) "Turbulence Modelling of Tidal Currents in Rectangular Harbours", PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK.
[15] Rodi, W. (1984) "Turbulence Models and their Application in Hydraulics", IAHR, Second Edition, Delft, The Netherlands, pp. 1-104.
[16] Demuren, A. and Rodi, W. (1983) "Three-Dimensional Calculation of Side Discharge into Open Channels", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.109, No. 12, pp. 1707-1722.
[17] 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.
[18] Hakimzadeh, H. (2002). "Simulation of Water Circulation in River Harbour Using Zero- and Two-Equation Turbulence Models", Journal of Faculty of Engineering, University of Tabriz, Iran, No. 27, Autumn & Winter 2002, pp. 1-12. (in Persian).
[19] 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, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
[20] Langendoen, E.J., (1992). "Flow patterns and transport of dissolved matter in tidal harbours", PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.