



بررسی توزیع فشار غیر هیدروستاتیک روی پیشانی دریچه‌ها در عمقها و بازشدگیهای مختلف

مسعود منتظری نمین^۱، فاطمه چگینی^۲

۱_ استادیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲_ دانشجوی دکتری آب، دانشگاه تهران

fateme.chegini@gmail.com

خلاصه

در این تحقیق، به منظور بررسی دقیق تر تأثیر فشار هیدرودینامیک، توزیع فشار غیرهیدروستاتیک روی پیشانی دریچه‌ها شبیه‌سازی شده است. در این راستا، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد با در نظر گرفتن فشار غیرهیدروستاتیک به صورت دو بعدی و در قائم (2DV) توسعه داده شده است. معادلات حاکم بر این مدل، معادلات ناویر-استوکس انتگرال‌گیری شده در عرض می‌باشند که با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و به کمک روش گام کسری^۱ حل شده‌اند. مدل آشفتگی به کار رفته، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ می‌باشد. علاوه بر آن در مدل حاضر، جهت مدلسازی سطح آزاد آب، فرض فشار هیدروستاتیک در آخرین لایه مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت پس از ارزیابی و حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل، توزیع فشار غیرهیدروستاتیک روی پیشانی دریچه‌ها در عمقها و بازشدگیهای مختلف تعیین شده و با توزیع فشار هیدروستاتیک مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: مدلسازی عددی، جریان دو بعدی در قائم، حجم محدود، فشار غیرهیدروستاتیک، پیشانی دریچه

مقدمه

امروزه مدل‌های عددی به طور وسیعی برای مدلسازی جریان در محیط‌های آبی مانند رودخانه‌ها، خورها، دریاچه‌ها و اقیانوسها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسیاری از مدل‌های موجود برای شبیه‌سازی جریانهای غیر ماندگار با سطح آزاد، بر این فرضیه استوارند که مؤلفه شتاب در جهت قائم نسبت به سایر مؤلفه‌های فشار در معادلات حاکم کوچک و قابل صرف‌نظر کردن بوده و در نتیجه این مدلها بر اساس فرض فشار هیدروستاتیک تهیه می‌شوند. اگرچه این فرض برای شبیه‌سازی جریان در شرایطی که مقیاس حرکت در جهت افق بسیار بیشتر از مقیاس حرکت در جهت قائم است کاربرد دارد (یوان و وو ۲۰۰۳)؛ اما برای مدلسازی جریان در برخی شرایط لازم است که معادلات ناویر-استوکس به طور کامل حل شوند. از جمله این شرایط می‌توان به امواج با دوره تناوب کوتاه، تغییر ناگهانی در توپوگرافی بستر، تغییر ناگهانی در شیب بستر و جریان عبوری از سازه‌ها اشاره نمود (نمین ۲۰۰۱ و چن ۲۰۰۵). یکی از کاربردهای مدل هیدرودینامیک تعیین فشار غیر هیدروستاتیک وارد بر دریچه‌هاست. در پژوهش حاضر، پس از تهیه مدل عددی هیدرودینامیک دو بعدی در قائم، فشار غیر هیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریچه‌ها در عمقها و بازشدگیهای مختلف تعیین شده و با فشار هیدروستاتیک مقایسه شده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان دو بعدی در قائم با انتگرال‌گیری از معادلات اندازه حرکت و معادله پیوستگی در عرض واحد، به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \quad (3)$$

¹ Fractional Step



که معادله (۱) معادله پیوستگی در صفحه قائم و معادلات (۲) و (۳) به ترتیب معادلات اندازه حرکت در جهت x و z می‌باشند. در معادلات فوق، u و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x و z ، فشار کل، P ، چگالی و ρ لزجت گردابه‌ای است.

روش حل عددی

یکی از روشهای حل معادلات حاکم بر جریان دو بعدی در قائم که اولین بار توسط چورین (۱۹۶۸) پیشنهاد شد، استفاده از "فشار مصنوعی" می‌باشد. در این روش مشتق فشار نسبت به زمان در معادله پیوستگی ظاهر شده و در نتیجه امکان استفاده از روش عددی مشابه با روش بکار رفته در مدل‌های دو بعدی افقی (روش ADI) را فراهم می‌سازد. از دیگر روشهای معروف جهت حل معادلات حاکم که توسط پاتانکار (۱۹۸۰) معرفی شد، روش SIMPLE می‌باشد. این روش، میدان فشار فرض شده را با استفاده از یک الگوی تکرار به نحوی تصحیح می‌کند که معادله پیوستگی اغنا شود. یکی از معایب روش SIMPLE آن است که نتایج میانی که در حین تکرارها بدست می‌آیند، لزوماً مفهوم فیزیکی ندارند. روش دیگری که در آن این نقیصه برطرف شده است، روش گام کسری نام دارد (یانکو ۱۹۷۱). این روش امکان تفکیک و حل مجزای ترمهای مختلف معادلات حاکم را فراهم می‌سازد. این تفکیک منجر به حل معادلات در دو گام کلی می‌گردد. در ادامه چگونگی اجرای مراحل روش گام کسری تشریح شده است.

روش گام کسری

روش گام کسری نخستین بار توسط یانکو (۱۹۷۱) مورد استفاده قرار گرفت و شامل دو گام اصلی می‌باشد. در گام اول این روش، ترم فشار از معادلات اندازه حرکت حذف گردیده و قسمت انتقالی معادلات اندازه حرکت (شامل ترمهای جابجایی^۱ و پخش^۲) حل شده و در نتیجه مقادیر میانی برای متغیرهای u و w به دست می‌آید. در گام دوم با جایگذاری این مقادیر در معادله پیوستگی، معادله‌ای بر حسب فشار، معروف به معادله پواسن، به دست می‌آید. پس از حل معادله پواسن و تعیین مقادیر فشار، مقادیر نهایی مؤلفه‌های سرعت با استفاده از مقادیر فشار به دست آمده، محاسبه می‌شوند. گام اول روش گام کسری دارای دو مرحله است. بدین معنی که برای حل معادله انتقال، ترمهای جابجایی و پخش این معادله با استفاده از روش تفکیک زمانی، تفکیک شده و منقطع می‌شوند. سپس در مرحله اول، مقادیر سرعت میانی (u_i^*) ناشی از جابجایی در جهت‌های x و z با استفاده از رابطه (۴) و بر اساس میدان سرعت گام زمانی n محاسبه می‌شود. در مرحله دوم، با استفاده از مقادیر سرعت بدست آمده، مقادیر سرعت جدید تحت اثر پدیده پخش در هر دو جهت x و z طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{u_i^* - u_i^n}{\Delta t} = \left[-\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) \right]^n \quad (۴)$$

$$\frac{u_i^{**} - u_i^*}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_i \left(\frac{\partial u_j^*}{\partial x_j} \right) \right] \quad (۵)$$

پس از حل معادله انتقال، معادلات اندازه حرکت (بدون ترمهای جابجایی و پخش) به صورت معادله (۶) بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} &= -g \end{aligned} \quad (۶)$$

با منقطع‌سازی معادله فوق و در نظر گرفتن P در گام زمانی جدید، روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2,k}^{n+1} - u_{i+1/2,k}^{**}}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{i+1,k}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1}}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{w_{i,k+1/2}^{n+1} - w_{i,k+1/2}^{**}}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{i,k+1}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1}}{\Delta z} &= -g \end{aligned} \quad (۷)$$

با استفاده از روابط فوق، می‌توان مقادیر $u_{i+1/2,k}$ و $w_{i,k+1/2}$ را در گام زمانی جدید بر حسب مقادیر سرعت میانی و فشار نوشت. به همین ترتیب روابطی برای مقادیر $u_{i-1/2,k}$ و $w_{i,k-1/2}$ در گام زمانی جدید بدست می‌آید.

¹ Advection

² Diffusion



در گام دوم روش گام کسری، با منفصل سازی مکانی معادله پیوستگی به صورت رابطه (۸) و جایگذاری مقادیر سرعت گام زمانی جدید در این رابطه، معادله‌ای بر حسب فشار موسوم به معادله پواسن تشکیل می‌شود (رابطه ۹). با حل این معادله، مقادیر فشار در گام زمانی جدید بدست می‌آیند. در پژوهش حاضر، این معادله با استفاده از روش ADI حل شده است.

$$\frac{u_{i+1/2,k}^{n+1} - u_{i-1/2,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{w_{i,k+1/2}^{n+1} - w_{i,k-1/2}^{n+1}}{\Delta z} = 0 \quad (8)$$

$$2\left(\frac{\Delta t}{\rho(\Delta x)^2} + \frac{\Delta t}{\rho(\Delta z)^2}\right)P_{i,k}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\rho(\Delta x)^2}(P_{i+1,k}^{n+1} + P_{i-1,k}^{n+1}) - \frac{\Delta t}{\rho(\Delta z)^2}(P_{i,k+1}^{n+1} + P_{i,k-1}^{n+1}) = \frac{(w_{i,k-1/2}^{**} - g\Delta t) - (w_{i,k+1/2}^{**} - g\Delta t)}{\Delta z} + \frac{u_{i-1/2,k}^{**} - u_{i,k+1/2}^{**}}{\Delta x} \quad (9)$$

در نهایت با جایگذاری مقادیر فشار بدست آمده و مقادیر w^{**} و u^{**} در معادله (۷) مقادیر سرعت در گام زمانی جدید محاسبه می‌شوند.

منقطع‌سازی معادله انتقال

همانطور که ذکر شد، در گام اول، معادله انتقال (شامل ترمهای جابجایی و پخش) به روش حجم محدود منقطع شده و حل می‌گردد. هرچند این دو پدیده از اجزای معادله انتقال هستند اما رفتار فیزیکی کاملاً متفاوتی دارند و روش عددی مناسب برای یکی الزاماً مناسب‌ترین برای دیگری نخواهد بود. بکارگیری روش گام کسری این امکان را فراهم می‌سازد که از روشهای عددی متفاوت و مناسب هر یک برای حل ترمهای جابجایی و پخش استفاده شود.

منقطع‌سازی معادله جابجایی

در توسعه مدل عددی حاضر برای منقطع‌سازی معادله جابجایی از روش Fromm که روشی صریح با درجه دقت مرتبه دوم است استفاده شده است. در صورتیکه معادله جابجایی را به صورت معادله (۱۰) در نظر بگیریم:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

که در آن c کمیت مورد انتقال است. رابطه منقطع شده معادله فوق، به شکل کلی روش حجم محدود به صورت رابطه (۱۱) نوشته می‌شود:

$$c_j^{n+1} = c_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_j}(F_{j+1/2} - F_{j-1/2}) \quad (11)$$

که در رابطه فوق، $F_{j\pm 1/2}$ جرم‌های عبوری از مرزهای پایین دست و بالا دست در واحد زمان (شار) می‌باشند. با استفاده از روش Fromm شارهای عبوری با استفاده از رابطه (۱۲) تعیین می‌شوند:

$$F_{j+1/2} = (uc)_{j+1/2} = u_{j+1/2} \left[c_j + \frac{1}{2}(\Delta x_j - u_{j+1/2}\Delta t) \frac{c_{j+1} - c_{j-1}}{0.5(\Delta x_j + 0.5(\Delta x_{j+1} + \Delta x_{j-1}))} \right] \quad (12)$$

$$F_{j-1/2} = (uc)_{j-1/2} = u_{j-1/2} \left[c_{j-1} + \frac{1}{2}(\Delta x_{j-1} - u_{j-1/2}\Delta t) \frac{c_j - c_{j-2}}{0.5(\Delta x_{j-1} + 0.5(\Delta x_j + \Delta x_{j-2}))} \right]$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۱)، رابطه منقطع شده معادله جابجایی بدست می‌آید (رابطه ۱۳).

$$c_j^{n+1} = c_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_j} u_{j+1/2} \left[c_j + \frac{1}{2}(\Delta x_j - u_{j+1/2}\Delta t) \frac{c_{j+1} - c_{j-1}}{0.5(\Delta x_j + 0.5(\Delta x_{j+1} + \Delta x_{j-1}))} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x_j} u_{j-1/2} \left[c_{j-1} + \frac{1}{2}(\Delta x_{j-1} - u_{j-1/2}\Delta t) \frac{c_j - c_{j-2}}{0.5(\Delta x_{j-1} + 0.5(\Delta x_j + \Delta x_{j-2}))} \right] \quad (13)$$

منقطع‌سازی معادله پخش

معادله پخش با استفاده از روش ضمنی منقطع شده است. در صورتیکه معادله پخش را به صورت معادله (۱۴) در نظر بگیریم:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (14)$$



که در آن c کمیت مورد انتقال و D_x ضریب پخش است. رابطه منقطع شده پخش با استفاده از روش ضمنی به صورت رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$c_j^{n+1} = c_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_j} \left[\left(-D_{j+1/2} \frac{c_{j+1}^{n+1} - c_j^{n+1} + c_{j+1}^n - c_j^n}{2(\Delta x)_{j+1/2}} \right) - \left(-D_{j-1/2} \frac{c_j^{n+1} - c_{j-1}^{n+1} + c_j^n - c_{j-1}^n}{2(\Delta x)_{j-1/2}} \right) \right] \quad (15)$$

که در رابطه فوق، $\Delta x_{j-1/2} = (\Delta x_j + \Delta x_{j-1/2})/2$ و $\Delta x_{j+1/2} = (\Delta x_j + \Delta x_{j+1/2})/2$

مدل آشفتگی

در مدل توسعه یافته، برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل استاندارد $k - \varepsilon$ استفاده شده است. معادلات مدل $k - \varepsilon$ به صورت معادله (۱۶) می‌باشد.

$$\begin{cases} v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_r + G - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_r + c_{3\varepsilon} G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن v_t لزجت گردابه‌ای، k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ استهلاک و $c_\mu, \sigma_\varepsilon, \sigma_k, c_{2\varepsilon}, c_{1\varepsilon}, \sigma_t, c_{3\varepsilon}$ همگی ضرایب استاندارد معادله

$k - \varepsilon$ می‌باشند. علاوه بر آن $P_r = v_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]$ و $G = \beta \frac{f_i v_t}{\rho \sigma_t} \frac{\partial S}{\partial x_i}$ که β ضریب توسعه حجمی و f_i نیروهای بدنه‌ای

است. مقادیر ضرایب استاندارد معادله $k - \varepsilon$ در (ردی ۱۹۸۰) آورده شده است.

شرایط مرزی

شرط مرزی سطح آزاد

شرط مرزی سینماتیک سطح آزاد که تغییرات تراز سطح آب را تعریف می‌کند به صورت معادله (۱۷) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} = w \quad (17)$$

که در آن ξ تراز سطح آب نسبت به سطح مبنا می‌باشد. در مدل عددی حاضر برای در نظر گرفتن شرط مرزی سطح آزاد، فشار سلولهای لایه آخر با استفاده از فرض فشار هیدروستاتیک تعیین می‌گردد.

شرط مرزی بالادست و پایین‌دست

شرایط مرزی در کناره‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- شرط مرزی سرعت معلوم: این شرط شامل معلوم بودن سرعت (مرز باز) و یا صفر بودن سرعت (مرز بسته) می‌باشد.
- شرط مرزی فشار معلوم

ارزیابی مدل

جهت حصول اطمینان از عملکرد صحیح مدل عددی تهیه شده و بررسی صحت نتایج حاصل از آن، مدل به کمک آزمونهای مختلف متداول مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله این آزمونها، آزمون انتشار موج و آزمون موج ایستا می‌باشد.

آزمون انتشار موج

در این آزمون، امواج دامنه کوتاه، در طول یک فلوم به طول ۳۰۰ و عمق ۵ متر و از سمت چپ به راست منتشر می‌شوند. برای تولید امواج، تراز آب مرز سمت چپ با استفاده از رابطه (۱۸) به صورت سینوسی تغییر می‌کند. دامنه موج ۰٫۵ متر و دوره تناوب آن ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

$$\eta = a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (18)$$



در رابطه بالا T دوره تناوب موج و a دامنه موج می‌باشد. در این آزمون $\Delta x = 1 \text{ m}$, $\Delta z = 0.2 \text{ m}$ و ارتفاع لایه آخر بین ۵ تا ۱۵ سانتیمتر می‌باشد. از آنجا که در این آزمون، ارتفاع موج در مقایسه با طول آن خیلی کوچک است، می‌توان معادلات حاکم بر حرکت موج را خطی کرده و به صورت تحلیلی حل نمود. پس از حل معادلات، طول موج، سرعت موج و تراز سطح آب به ترتیب از روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شوند.

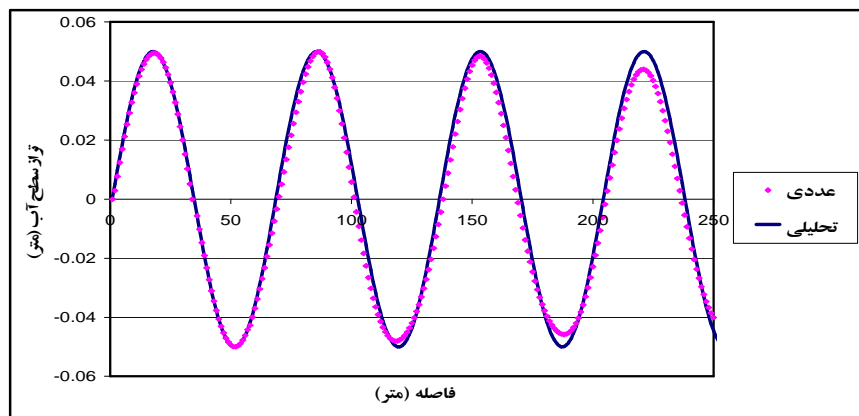
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (19)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (20)$$

$$\eta = a \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (21)$$

در روابط بالا، L طول موج، d عمق آب و T دوره تناوب موج می‌باشد.

با توجه به روابط فوق طول و سرعت موج انتشار یافته به ترتیب برابر $۶۷/۷$ متر و $۶/۷۷$ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. نتایج عددی تراز آب به دست آمده توسط مدل تهیه شده در مقایسه با حل تحلیلی در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱) مقایسه نتایج عددی تراز سطح آب با نتایج حل تحلیلی

آزمون موج ایستا

یکی از کاربردهای مدل غیر هیدروستاتیک، تعیین فشار هیدرودینامیک وارد بر دیوار مخازن در اثر تشکیل امواج ایستا می‌باشد. در صورتیکه فشار کل را به دو جزء هیدروستاتیک و هیدرودینامیک تقسیم کنیم (رابطه ۲۱)، با استفاده از مدل عددی غیرهیدروستاتیک می‌توان مقدار فشار هیدرودینامیک و نسبت فشار هیدرودینامیک به هیدروستاتیک را تعیین نمود.

$$P = P_h + P_n \quad (21)$$

$$P_h = g \int_z^n \rho d\zeta$$

در رابطه فوق، z فاصله نقطه مورد نظر از کف مخزن، P_n جزء هیدرودینامیک فشار، P_h جزء هیدروستاتیک فشار در تراز z و η تراز سطح آب است.

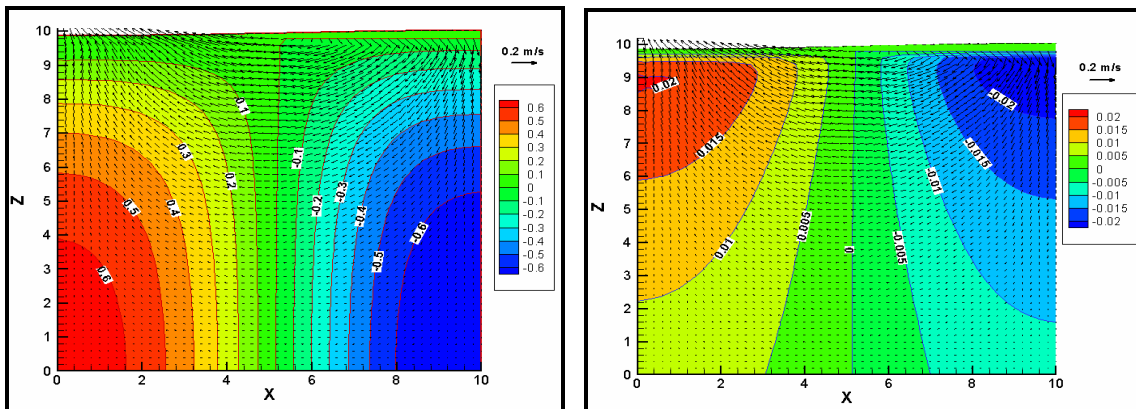
در آزمون حاضر، میدان فشار ناشی از تشکیل موج ایستا درون مخزنی به طول و عمق ۱۰ متر محاسبه شده است. در زمان $t=0$ آب درون مخزن ساکن و سطح آب دارای شکل سینوسی به صورت زیر می‌باشد:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (22)$$

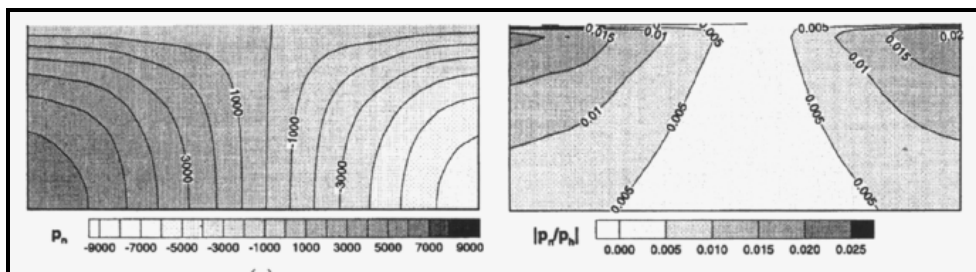
که در رابطه فوق H ارتفاع موج و برابر ۳۰ سانتیمتر و L طول موج است. در این مسئله طول موج دو برابر طول مخزن و برابر ۲۰ متر در نظر گرفته شده است و در نتیجه نسبت عمق آب به طول موج (D/L) برابر ۰٫۵ می‌باشد. دوره تناوب موج تشکیل شده برابر ۳/۶ ثانیه است. برای شبیه‌سازی مخزن، مرز سمت راست و چپ فضای محاسباتی مرز بسته در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن فضای محاسباتی به سلولهایی با طول و ارتفاع ۰٫۲ متر تقسیم شده و گام زمانی برابر ۰٫۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مسئله فوق توسط چن (۲۰۰۴) حل شده و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج وی مقایسه شده است. جزء هیدرودینامیک فشار (P_n) و نسبت جزء هیدرودینامیک فشار به جزء هیدروستاتیک فشار (P_n/P_h) تعیین شده توسط مدل عددی پس از ۶ و ۷/۷ ثانیه به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۴) و نتایج بدست آمده توسط چن در شکل‌های (۳) و (۵) نشان داده شده است.



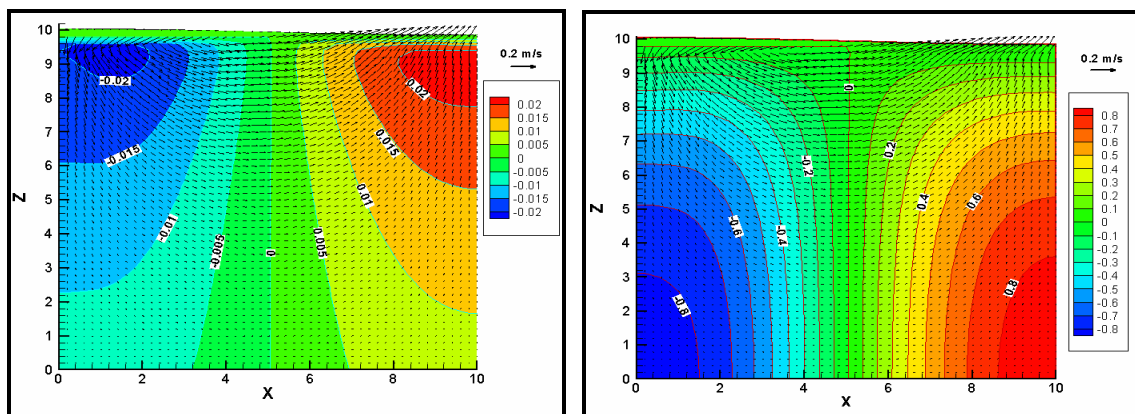
ذکر این نکته ضروری است که که چن قدر مطلق مقدار P_n / P_h را در نتایج خود ارائه کرده است. علاوه بر آن نتایج فشار بدست آمده توسط چن بر حسب dyn/cm^2 و نتایج بدست آمده توسط مدل بر حسب کیلو پاسکال ($1dyn/cm^2 = 10^4 KPa$) ارائه شده است.



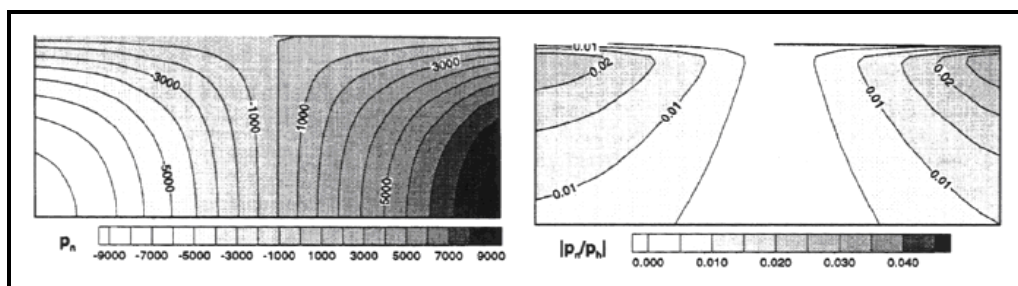
شکل (۲) نتایج مدل پس از ۶ ثانیه (سمت راست P_n / P_h ، سمت چپ: P_n)



شکل (۳) نتایج بدست آمده توسط چن پس از ۶ ثانیه (سمت راست $|P_n / P_n|$ ، سمت چپ: P_n)



شکل (۴) نتایج مدل پس از ۷/۷ ثانیه (سمت راست P_n / P_h ، سمت چپ: P_n)



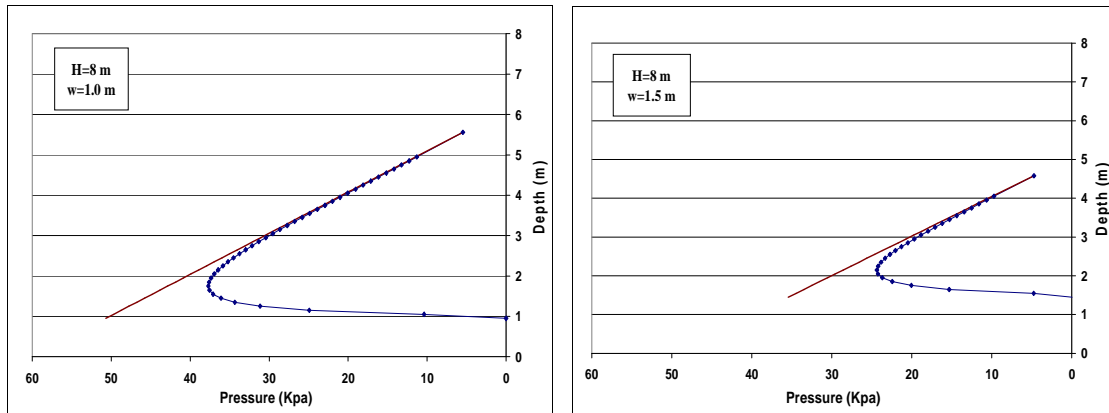
شکل (۵) نتایج بدست آمده توسط چن پس از ۷/۷ ثانیه (سمت راست $|P_n / P_n|$ ، سمت چپ: P_n)



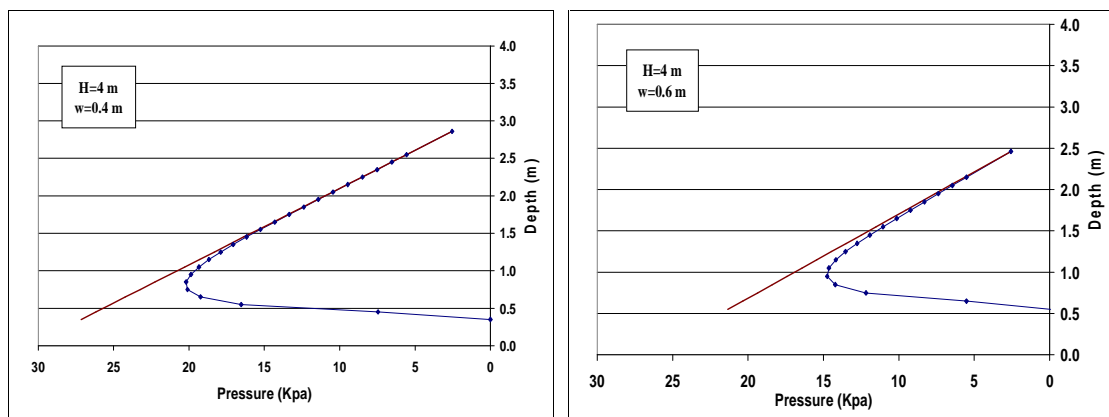
مقایسه نتایج مدل و نتایج بدست آمده توسط چن توانایی مدل در تعیین فشار هیدرودینامیک در شرایطی که مقیاس حرکت در جهت قائم نسبت به مقیاس حرکت در جهت افق قابل صرفنظر نیست را تایید می‌کند. در این مسئله نسبت عمق آب به طول موج (۵/۰) مبین آن است که نمی‌توان از مؤلفه شتاب در جهت قائم صرفنظر نمود.

تعیین فشار هیدرودینامیک وارد بر پیشانی دریچه‌ها

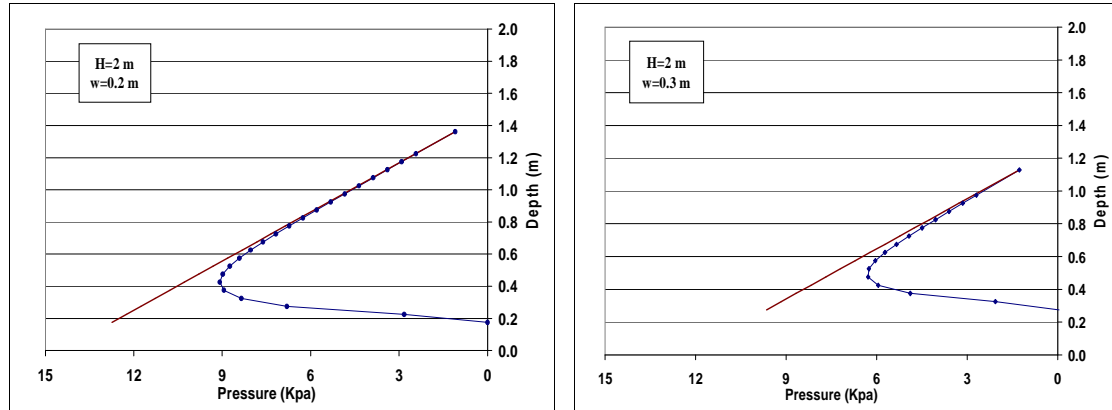
یکی از مسائلی که فرض فشار هیدروستاتیک در آن صادق نیست، جریان عبوری از سازه‌ها نظیر دریچه‌هاست. از جمله کاربردهای مدل غیر هیدروستاتیک می‌توان به تعیین فشار هیدرودینامیک وارد بر پیشانی دریچه‌ها اشاره نمود. در این قسمت، فشار غیرهیدروستاتیک وارد بر دریچه‌ها در عمقها و بازشدگیهای مختلف با استفاده از مدل توسعه داده شده، تعیین و با فشار هیدروستاتیک مقایسه گردیده است. به منظور مدلسازی جریان عبوری از دریچه قائم، کانالی با طول ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است. مرز بالادست کانال مرز بسته و مرز پایین دست کانال به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که قسمت دریچه مرز بسته و قسمت بازشدگی فشار معلوم صفر اعمال گردد. میدان جریان با عمقها و بازشدگی‌های مختلف مدلسازی شده است. فضای محاسباتی به سلولهایی با طول و عرض مساوی (۰.۱ متر تقسیم شده و گام زمانی به گونه‌ای انتخاب شده که $c\Delta t / \Delta x = 0.9$ را اغنا کند. در این رابطه $c = \sqrt{gh}$ سرعت موج می‌باشد. نتایج مقایسه فشار هیدرودینامیک و هیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریچه‌ها در شکل‌های (۴) تا (۶) ارائه شده است که در آن H عمق کانال و w میزان بازشدگی دریچه می‌باشد. با توجه به این شکلها، طبق انتظار با افزایش میزان بازشدگی دریچه، اختلاف فشار هیدرودینامیک و هیدروستاتیک وارد بر دریچه بیشتر می‌شود.



شکل ۴: مقایسه فشار غیر هیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریچه با فشار هیدروستاتیک



شکل ۵: مقایسه فشار غیر هیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریچه با فشار هیدروستاتیک



شکل ۶: مقایسه فشار غیر هیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریاچه با فشار هیدروستاتیک

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدلی عددی برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد غیرهیدروستاتیک دو بعدی در قائم با استفاده از روش حجم محدود، تهیه شده است. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت با استفاده از روش تفکیک زمانی تفکیک شده‌اند. در این مدل، معادله جابجایی با استفاده از روش Fromm، معادله پخش با استفاده از روشی ضمنی و معادله پواسن با استفاده از روش ADI، حل گردیده است. علاوه بر آن، به منظور مدل‌سازی جریان آشفته، از مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ استفاده شده است. برای در نظر گرفتن تراز سطح آب، فشار لایه آخر با فرض فشار هیدروستاتیک تعیین گردیده است. شبکه بندی و مختصات به کار رفته در مدل عددی توسعه یافته به ترتیب شبکه با ساختار جابجا شده و مختصات کارتزین می‌باشد. جهت حصول اطمینان از عملکرد صحیح مدل عددی تهیه شده و بررسی صحت نتایج حاصل از آن، مدل به کمک آزمونهای مختلف متداول مانند انتشار موج سینوسی و شبیه‌سازی موج ایستا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، جریان غیر دائمی متغیر سریع، ناشی از بازشدگی ناگهانی دریاچه‌ها توسط مدل شبیه‌سازی گردیده و مقادیر فشار غیرهیدروستاتیک وارد بر دریاچه‌ها در عمق‌ها و بازشدگیهای مختلف با فشار هیدروستاتیک مقایسه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، با افزایش میزان بازشدگی دریاچه، اختلاف فشار هیدرودینامیک و هیدروستاتیک وارد بر دریاچه بیشتر می‌شود. مقایسه نتایج مدل با نتایج تحلیلی، تعیین صحیح فشار هیدرودینامیک ناشی از موج ایستا و شبیه‌سازی فشار غیرهیدروستاتیک وارد بر پیشانی دریاچه‌ها توسط مدل، توانایی و دقت مدل را در شبیه‌سازی جریانهای با سطح آزاد که فرض فشار هیدروستاتیک در آنها صادق نمی‌باشد، را اثبات می‌نماید.

قدردانی

بدینوسیله از پشتیبانی دانشکده فنی دانشگاه تهران و شرکت سهامی مدیریت منابع آب وزارت نیرو در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Yuan, H. and Wu, C.H. (2003) A Two-Dimensional Vertical Non-Hydrostatic σ Model with an Implicit Method for Free-Surface Flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **44**, 811-835.
2. Chen, X. J. (2005) A Comparison of Hydrostatic and Nonhydrostatic Pressure Components in Seiche Oscillations. *Mathematical and Computer Modeling*, **41**, 887-902.
3. Namin, M. M., Lin, B. and Falconer, R. A (2001) An Implicit Algorithm for Solving Non-Hydrostatic Free-Surface Flow Problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **35**, 341-356.
4. Namin M. M. (2004) A fully Three-Dimensional Non-Hydrostatic Free Surface Flow Model for Hydro-Environmental Prediction. *Ph.D. Thesis*, Cardiff School of Engineering, Cardiff University.
5. Chorin, A. J. (1968) Numerical Solution of the Navier-Stokes Equation. *Mathematics of Computation*, **22**, 745-763.
6. Patankar S. V. (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington D.C.
7. Yanenko, N. N. (1971) *The Method of Fractional Step*. Springer-Verlag.
8. Rodi, W. (1980) *Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics*. State of the Art Paper, IAHR.