

ارائه مدل جهت پیش‌بینی هیدرودینامیک مخزن سد

A New Model for Reservoir Hydrodynamics Prediction

M. Najmii¹, K. Motamedi²

Abstract

This paper describes in detail a new two-dimensional transient model for prediction of thermally stratified reservoir flow. Unlike many other reservoir models such as CE-QUAL-W2 and Mike-Reservoir, the present model does not employ the hydrostatic approximation. The full general orthogonal three-dimensional equations of motion, which are laterally averaged by Karpik and Raithby (1990) and produced a set of two-dimensional equations in the vertical plane, are used. Using an orthogonal boundary fitted mesh, the governing differential equations are rendered discretely by a finite volume technique. The resulting set of coupled difference equations for momentum, mass, and energy are solved by MAC method.

The previous studies were not accurate however, for example, the calculated underflow was predicted a thicker and slower than actually observed in the flume. Johnson suggested that these anomalous features of calculated flow were due to the fact of the model represented the sloping bottom by "stair steps" rather than employing a boundary fitted coordinate system. Another possible reason for differences that suggested by Karpik is due to the hydrostatic pressure approximation.

Karpik used a semi-implicit program developed by modified SIMPLE method which was not very successful in different cases due to divergence, so an explicit MAC-type model is developed. The present model is tested in general and compared by Johnson's flume data. The results show the model is well able to predict the important features of density under-flow. But some numerical diffusion errors occur when we have changes in coordinate system, so in future studies this model with a more accurate scheme and more uniform grid would be perfect.

محمد نجمایی^۱، کاوه معتمدی^۲

چکیده

با توجه به اهمیت لایه بندی حرارتی و اثر آن بر روی کیفیت آب مخازن، و بدلیل پیچیدگی هیدرودینامیک مخزن لایه بندی شده، یک مدل صریح با چگالی متغیر جهت حل همزمان معادلات پیوستگی، حرکت و انرژی در سیستم مختصات منحنی الخط متعامد ارائه گردیده است. مدل ارائه شده بصورت دو بعدی در قائم و با استفاده از معادلات منحنی الخط متعامد متوسط گیری شده در عرض، که برای مخازن نسبتاً باریک، بلند و مستقیم قابل استفاده می باشد، ارائه شده است. با توجه به اینکه معادله اندازه حرکت در جهت قائم حل گردیده، لذا از تقریب فشار هیدرواستاتیک استفاده نمی شود و معادلات به روش علامت گذاری و سلول MAC و تکنیک گسسته سازی حجم محدود بر روی شبکه متعامد حل شده است. در این شبکه محور افقی مختصات بر سطح آب و کف مخزن سد منطبق می باشد. مدل فوق با نتایج فلوم جانسون مقایسه و نتایج به دست آمده نمایانگر آن است که این مدل می تواند پیش بینی هیدرودینامیک جریان با چگالی متغیر را بخوبی انجام دهد. به علاوه در این شبیه سازی، جریان ناشی از تغییرات چگالی در طول فلوم با داده های جانسون و کارپیک همخوانی و سازگاری خوبی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: کیفیت آب، مخازن، هیدرودینامیک، لایه بندی حرارتی، مدل های کیفیت آب

1 - Associate Professor of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2 - MSc. Civil Engineer- IUST

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران najmii@iust.ac.ir
۲- کارشناس ارشد مهندسی آب kavehmt@hotmail

Keywords: Water quality, Reservoirs, Hydrodynamics, Thermally stratified, Water quality models.

۱- مقدمه

در عصر کمبودها، تأمین آب شیرین در مناطق مختلف جهان از نقطه نظر کیفی و کمی اهمیت فوق العاده‌ای پیدا کرده است. حتی باید اذعان کرد که امروزه کیفیت آب محدودیت شدیدتری را بر مصرف تحمیل می‌کند و استفاده از آبهای شور و آلوده را غیر ممکن می‌سازد. از این رو سعی و اهتمام زیادی معمول می‌گردد تا با اعمال مدیریت کیفی از منابع آب شیرین مخازن سدها استفاده بیشینه و پایدار بعمل آید.

مخزن هر سد بر حسب شرایط منطقه و مشخصات فیزیکی و شیمیایی محیط، با اثرات متفاوتی روبرو می‌شود. مخازن بزرگ که مقادیر قبل توجهی آب را ذخیره کرده‌اند، در معرض آلودگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. در این سدها افزایش زمان ماند و تشکیل لایه بندی حرارتی موجب تغییرات شدید کیفی آب می‌شود، لذا این سازه‌های هیدرولیکی همراه با ذخیره و تأمین آب، موجب تغییرات کیفی آب نیز بشمار می‌روند.

در هر حال شناخت و پیش‌بینی تغییرات کیفی آب از موارد مهمی است، که در هنگام طراحی و بهره برداری از سد بایستی مورد توجه قرار گیرد و فرصت مناسبی را برای اعمال راه حل‌های مناسب جهت دستیابی به کیفیت مطلوب را فراهم می‌سازد.

در مدل‌سازی کیفی آب، رژیم حرارتی در عمق از نقطه نظر تأثیر مستقیم بر سرعت واکنش‌های شیمیایی و همچنین بعنوان عامل انتقال جرم و اندازه حرکت در ستون آب اهمیت دارد. در واقع تعادل گرمایی، ابزار اولیه تخمین مقدار اختلاط در سیستم آب شیرین است (Chapra 1992).

باید گفت که در مدیریت کیفی مخازن سدها، هیدرودینامیک مخزن، جابجایی و پخش شوری و تغییرات دما نقش غیرقابل انکاری در کیفیت آب دارند. از این رو مدل‌های پیش‌بینی هیدرودینامیک از جمله ابزارهای اولیه در پیش‌بینی وضعیت کیفی آب در مخازن آبی است.

گرچه مخزن سد یک محیط سه بعدی است، اما مدل‌های دو بعدی، به ویژه در مخازن آبی که در دره‌های باریک و بلند قرار دارند مانند مخزن سد دوستی نتایج بسیار خوبی داشته‌اند. می‌توان انتظار داشت که برای مخازن سدهای کرج، لتیان، ساوه، پانزده خرداد و کارون نیز از دقت کافی برخوردار باشند.

با توجه به مکان سدهای کشور، چنین بنظر می‌رسد، که عموماً در مناطق نسبتاً گرم قرار دارند و پدیده لایه بندی در بیشتر آنها اتفاق می‌افتد و تغییرات کیفی نیز در این مخازن مشاهده شده است. برای نمونه در سدهایی نظیر پانزده خرداد، میناب، پیشین، مشکلات کیفی به صورت کاملاً مشخص به چشم می‌خورند. به علاوه به نظر می‌رسد که سدهای جگین، گابریک، رئیس علی دلواری، قیر، چمشیر، مارون نیز در معرض چنین خطری باشند.

در حال حاضر مدل‌های هیدرودینامیکی سه بعدی نظیر مدل دینامیک سیالات زیست محیطی (EFDC 1993)، مدل سه بعدی دریاچه (Simmons 1973)، مدل سه بعدی Leenderst (1973) برای مصب‌ها، مدل حرارتی (Lick 1976)، مدل Waldrop-Tatom 3D (1976)، Plume Model، مدل Spraggs & Street (1979)، مدل Eraslan 3D Discrete Element Model و مدل سه بعدی Johnson (1979) و Blumberg & Mellor (1981) وجود دارند.

تقریباً در تمامی این مدل‌ها برای حل معادلات از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. این مدل‌ها محدودیت قابل توجهی برای ابعاد ماتریس و گسسته سازی و حل معادلات دارند. به علاوه در هر کدام از این مدل‌ها برای سهولت نسبی فرضیاتی اعمال گردیده که ممکن است با شرایط مخازن دیگر تفاوت داشته باشند. مشکل عمده مدل‌های سه بعدی هزینه، نیاز به رایانه قوی و زمان محاسبات بالا جهت مدل‌سازی می‌باشد. برای مثال اجرای مدل لیندرست برای یک شبیه سازی نسبتاً کوتاه، ۶۷ ساعت طول کشیده است. به علاوه حذف پاره ای از اثرات و عوامل در این مدل‌ها، (نظیر عدم استفاده از معادله ممنتم کامل در راستای قائم)، ضعف دیگر این مدل‌ها است.

به علاوه پاره‌ای از مدل‌های فوق در حال تکامل می‌باشند و اطلاعات منتشر شده دقیقی از آنها وجود ندارد و یا تنها در یک مورد خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند و دسترسی به آنها دشوار یا غیر ممکن است.

مدل‌های دو بعدی عمومی هیدرودینامیک، از معادلات میانگین شده در عمق استفاده می‌کنند که برای بررسی لایه‌بندی مناسب نیستند. مدل‌های دو بعدی در قائم نیز برای مطالعه مخازن ارائه شده‌اند، که از طریق متوسط گیری در عرض توسعه یافته‌اند، و بر خلاف مدل‌های سه بعدی، این مدل‌ها از طرح ضمنی و یا نیمه ضمنی نسبت به زمان استفاده می‌نمایند و لذا گام زمانی می‌تواند از معیار عددی کورانت بزرگتر باشد. از جمله می‌توان مدل دو بعدی Hamilton (1975)، Blumberg & Mellor (1975).

و غیره را نام برد (Johnson, 1981).

۲- معادلات حاکم

معادلات هیدرودینامیک بصورت معادلات دیفرانسیل غیر خطی بیان می‌شوند، که حل همزمان آنها به تنهایی و بدون گسسته‌سازی و فرضیات ساده شونده غیر ممکن است. برای حل این معادلات از روش‌های محاسباتی مختلفی از جمله تفاضل محدود، حجم محدود، اجزای محدود و المانهای مجزا استفاده می‌شود.

معادلات بقای جرم و اندازه حرکت، از معادلات پایه دینامیک سیالات است، که بصورت تانسوری زیر ارائه می‌شود (Johnson 1981):

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \text{ پیوستگی}$$

(۲) ممتنم

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{\rho} u_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varepsilon_{ij} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

(۳) انرژی

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{T} u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(A_{ij} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \sum sources - \sum \sin ks$$

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}(\bar{T}, \bar{p}) \quad (4) \text{ معادله حالت}$$

t، زمان

$\bar{\rho}$ ، متوسط زمانی چگالی

u_i ، شکل تانسوری سرعت، \bar{u}_i متوسط زمانی آن

x_i ، شکل تانسوری مختصات مکانی

g_i ، شتاب ثقل

ε_{ijk} ، تانسور سیکلی

Ω_j ، پارامتر کریولیس

\bar{P} ، متوسط زمانی فشار

\bar{T} ، متوسط زمانی دما

A_{ij} ، ضریب پخش حرارت و ε_{ij} ضریب پخش ادی

معمولا جریان آشفته فرض می‌شود و ضرایب ادی بسیار بزرگتر از مقادیر لزجت مولکولی است یعنی:

$$A_{ij} \gg D_{ij} \quad \varepsilon_{ij} \gg \mu$$

جدیدترین نرم‌افزارهای دوبعدی در حال حاضر MIKE-Reservoir، CE-QUAL-W2 می‌باشند که مدل اول در دستگاه مختصات سیگما و مدل دوم در دستگاه مختصات دکارتی بوده و هر دو از فرض فشار هیدرواستاتیک استفاده می‌کند. مدل آشفته‌گی مدل دوم، طول مخلوط می‌باشد. این نرم‌افزار محدودیت عدد کورانت را نیز دارد و توسط مهندسين ارتش آمریکا توسعه داده شده است.

باید اشاره گردد که عموماً جهت تائید و تحلیل حساسیت بیشتر مدل‌های سه بعدی و دو بعدی از فلویم عمومی هیدرودینامیک مخزن استفاده شده است.

مدلی که در این تحقیق ارائه شده یک مدل محاسباتی دو بعدی میانگین‌گیری شده در عرض است که جهت مدل کردن جریان‌های با اختلاف چگالی در مخازن کم عمق، با تغییرات کم سطح آب و بدون جریان‌های ورودی و خروجی جانبی مناسب است. بطور مسلم این مدل از مدل‌های یک بعدی پیشرفته‌تر بوده، و پیش‌بینی کیفیت آب به مراتب دقیق‌تر صورت می‌پذیرد.

یک مدل مناسب بایستی حداقل معیارهای زیر را داشته باشد:

- حداقل دو بعدی باشد (با دو بعد طول و عمق).
- در صورت دو بعدی بودن میانگین‌گیری شده در عرض باشد.
- پویا باشد (غیر دائمی)، قابلیت‌های انتقال حرارت، تبادل حرارتی از سطح و جابجایی و پخش آن و همچنین قابلیت برخورد با لایه بندی معکوس و اصلاح آن را داشته باشد).
- امکان تعریف سطح آزاد را داشته باشد.

لایه‌بندی می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون تمرکز مواد محلول، مواد معلق و تبادل گرمایی در سطح آب ایجاد شود. در لایه بندی حرارتی، گرمای سطح آب مخزن تابعی از تابش امواج بلند و کوتاه خورشید است که تبخیر و بارش نیز روی آن اثر دارند. کیفیت آب تحت تأثیر جابجایی و پخش (حاصل از آشفته‌گی)، مواد شیمیایی و بیوشیمی است.

در شکل (۱) پلان مخزن و خط پائین مخزن نشان دهنده لبه و کرانه یک صفحه قائم و منطبق بر محور طولی مخزن می‌باشد. محور مختصات X_3 عمود بر صفحه بوده و عرض مخزن در این جهت اندازه گیری می‌شود.

بطور ایده‌آل بهتراست که مقاطع عرضی نزدیک به مستطیل باشند. در این صورت تنظیم خصوصیات فیزیکی، در مدل میانگین گیری شده در عرض ساده خواهد بود. اگر چه از لحاظ ریاضی تعریف مقاطع باشکله نامنظم نیز مشکل نیست. سیستم مختصات منحنی الخط متعامد (X_2, X_1) بر کف مخزن و سطح آب منطبق است. در گام اولیه برای توسعه معادلات، متغیر را تجزیه و برای سادگی، هر پارامتر وابسته را با نماد Φ نشان می‌دهیم، که می‌تواند دما، فشار و یا یکی از مولفه‌های سرعت باشد.

(۵)

$$\Phi(X_1, X_2, X_3, t) = \bar{\bar{\Phi}}(X_1, X_2, t) + \tilde{\Phi}(X_1, X_2, X_3, t) + \phi'(X_1, X_2, X_3, t)$$

که $\bar{\bar{\Phi}}$ میانگین مقدار Φ در مقیاس زمانی آشفستگی و عرض می‌باشد و $\tilde{\Phi}$ نشانگر تغییرات میانگین زمانی Φ در عرض می‌باشد که با این تعریف میانگین آن در عرض برابر صفر خواهد بود. و ϕ' اختلاف مقادیر لحظه‌ای Φ از متوسط رینولدز $(\bar{\bar{\Phi}} + \tilde{\Phi})$ می‌باشد و متوسط رینولدز ϕ' برابر صفر می‌باشد.

همچنین عوامل $\tilde{\Phi}$ و ϕ وابسته به زمان هستند که معرف گذرا بودن مقادیر میانگین رینولدز می‌باشد.

معادلات سه بعدی بقای لحظه‌ای جرم، ممنتوم و انرژی در زمان میانگین گیری شده سپس از این معادلات در جهت X_3 و عرض (X_1, X_2) انتگرال گیری می‌شود تا یک دسته معادلات دوبعدی در صفحه (X_1, X_2) بدست آید.

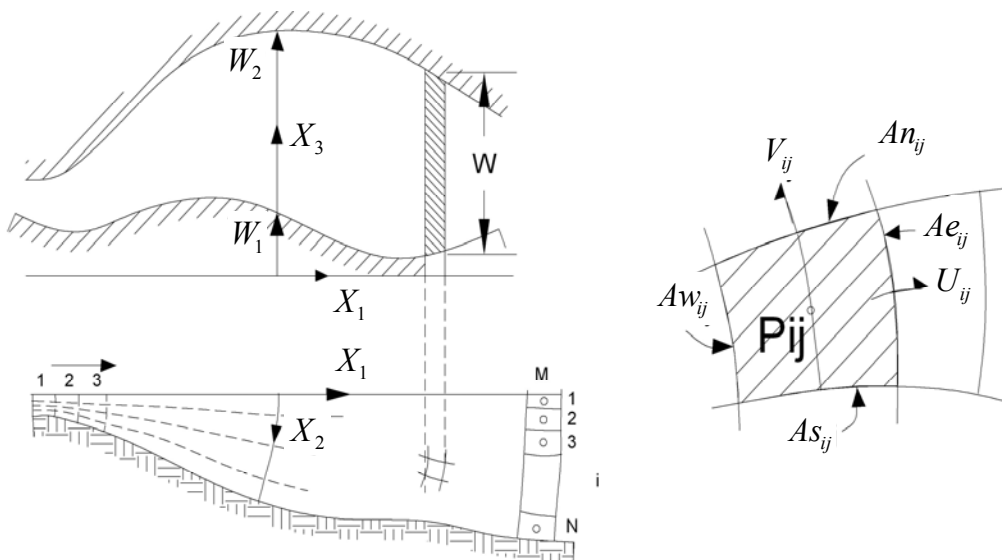
برای رسیدن به شکل نهائی معادلات مدل، فرض‌های ساده کننده درباره تغییرات چگالی در زمان و مکان انجام گرفته است. بعلاوه:

الف- از نوسانات جرم حجمی بر اثر آشفستگی صرف نظر می‌شود.
ب- با باریک فرض شدن نسبی مخزن و در نتیجه یکنواختی در عرض، از تغییرات چگالی در جهت X_3 صرف نظر می‌شود.

در تمام معادلات، دما تابعی از مکان X_1, X_2 قرار داده می‌شود. (بجز در جمله شناوری از معادلات اندازه حرکت، که در آن چگالی وابسته به دما، شوری، زمان و مکان می‌باشد). بعد از اعمال این ساده‌سازی‌ها معادله پیوستگی و معادله ممنتوم u_1 در دستگاه منحنی‌الخط متعامد، به شکل زیر در می‌آید (Karpik & Raithby (1990)

(۶) پیوستگی

$$\frac{1}{h_1 h_2 W} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (\rho h_2 W u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho h_1 W u_2) \right] = 0$$



شکل ۱- مدل سازی مخزن سد

شده در عرض تقسیم بر (Cp) است، فشار موثر P_e مجموع فشار استاتیکی و تشبهای عمودی ظاهری بر اثر آشفتگی و پراکندگی می‌باشد (Karpik, 1990).

τ_{ij}^e نمایانگر تنش های موثر سیال و q_i^T ، شار Γ در اثر پخش است که شامل پخش لایه‌ای، آشفته و همچنین جملات پراکندگی (ناشی از میانگین‌گیری در عرض) می‌باشد و معادلات q_i^T و τ_{ij}^e عبارتند از:

$$(9) \text{ تنش برشی}$$

$$\tau_{ij}^e = 2\mu e_{ij} - \rho \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle - \rho \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle$$

(۱۰) شار گرما

$$q_i^T = -\frac{\Gamma}{h_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \langle \overline{u'_i T'} \rangle - \rho \langle \tilde{u}'_i \tilde{T}' \rangle$$

جمله اول در معادله (۹) برای تنش، τ_{ij}^e ، نشان دهنده تبادل ممنتیم مولکولی است که برای یک سیال نیوتنی متناسب با نرخ کرنش e_{ij} می‌باشد. جمله دوم متوسط تنش رینولدز در عرض و جمله سوم پراکندگی می‌باشد.

سه جمله پخش دما، q_i^T ، در معادله (۱۰) نیز نشانگر انتقال انرژی توسط هدایت، پخش ناشی از آشفتگی و پراکندگی می‌باشند (μ لزجت مولکولی و Γ ضریب پخش حرارت مولکولی هستند). با صرف نظر کردن از تنش‌ها و نیروهای وارد از طرف دیواره مخزن و لزجت مولکولی در معادلات اندازه حرکت خواهیم داشت: (نشانه‌های بکار رفته همان نشانه‌های معادلات (۶) و (۷) هستند)

(۱۱) ممنتیم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) - \frac{\rho v v}{h_{1u} h_{2u}} \frac{\partial h_{2u}}{\partial x_1} + \frac{\rho u v}{h_{1u} h_{2u}} \frac{\partial h_{1u}}{\partial x_2}$$

$$+ \frac{1}{h_{1u} h_{2u} W_u} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (\rho h_{2u} W_u u u) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho h_{1u} W_u v u) \right]$$

$$= -\frac{1}{h_{1u}} \frac{\partial P_e}{\partial x_1} + \frac{1}{h_{1u} h_{2u}} \frac{\partial h_{1u}}{\partial x_2} \tau_{e12} - \frac{1}{h_{1u} h_{2u}} \frac{\partial h_{2u}}{\partial x_1} \tau_{e22}$$

$$+ \frac{1}{h_{1u} h_{2u} W_u} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (h_{2u} W_u \tau_{e11}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_{1u} W_u \tau_{e12}) \right] + \rho g_1$$

(۱۲) تنش برشی

$$\tau_{ij}^e = 2\mu e_{ij} - \rho \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle - \rho \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle$$

$$\tau_{ij}^e \approx -\rho \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\tau_{11} = 2\mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x_1} \right), \tau_{21} = \tau_{12} = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right), \tau_{22} = 2\mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x_2} \right)$$

(۷) ممنتیم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_1) - \frac{\rho u_2 u_2}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial x_1} + \frac{\rho u_1 u_2}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial x_2} - \frac{\rho u_3 u_3}{h_1 W} \frac{\partial W}{\partial x_1}$$

$$+ \frac{1}{h_1 h_2 W} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (\rho h_2 W u_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho h_1 W u_2 u_1) \right]$$

$$= \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \tau_{12}^e - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial x_1} \tau_{22}^e - \frac{1}{h_1 W} \frac{\partial W}{\partial x_1} \tau_{33}^e$$

$$+ \frac{1}{h_1 h_2 W} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (h_2 W \tau_{11}^e) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_1 W \tau_{12}^e) \right] - \frac{1}{h_1} \frac{\partial P^e}{\partial x_1}$$

$$+ \rho g + F_{1w}''$$

t زمان

ρ ، چگالی متوسط در عرض و زمان

u_i ، مولفه‌های بردار سرعت متوسط در عرض و زمان

x_i ، شکل تانسوری مختصات مکانی x_1 و x_2

g_i ، مولفه شتاب ثقل

τ_{ij}^e ، تانسور تنش‌های برشی موثر شامل اثرات

(مولکولی، رینولدز و متوسط‌گیری مکانی)

P^e ، فشار موثر متوسط در عرض و زمان

W ، عرض (تابع مکان)

h_2, h_1 ، ضرایب مقیاس یا متریک سیستم مختصات منحنی الخط

(X_1, X_2)، (Spiegel, 1959)

F_{1w}'' ، نیرو وارد بر واحد حجم

معادله u_1 مشابه معادله u_2 می‌باشد با این تفاوت که اندیس ۱ و ۲ با هم جابجا می‌شوند. معادله انرژی عبارت است از:

(۸) انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{1}{h_1 h_2 W} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (\rho h_2 W u_1 T) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho h_1 W u_2 T) \right]$$

$$= \frac{1}{h_1 h_2 W} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (h_2 W q_1 T) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_1 W q_2 T) \right] + \dot{S}^T$$

در این معادلات u_i ، P_e و T (سرعت و فشار موثر و دما)

متغیرهای وابسته میانگین‌گیری شده در عرض و زمان هستند

(Karpik, 1990).

به عنوان نیرو وارد بر واحد حجم در جهت i است که ناشی از

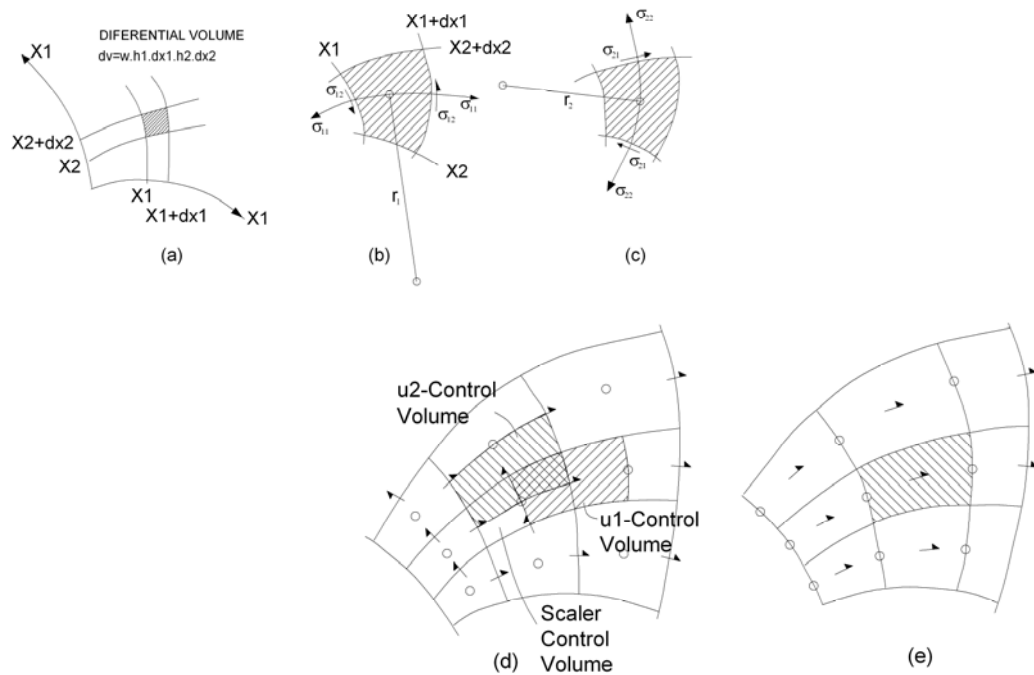
تنش‌های دیواره‌های مخزن در دو سر حجم کنترل (W_3, W_1) در

شکل (۱) می‌باشد. \dot{S}^T چشمه انرژی در واحد حجم (انتگرال‌گیری

۳- گسسته‌سازی معادلات

دستگاه مختصات جدید اساساً هندسی می‌باشند و مادامیکه طول‌ها، سطوح و احجام مورد نیاز صحیح محاسبه شوند، به اصول جدیدی نیاز نیست. به علاوه در هر دستگاه مختصات متعامد می‌توان معادلات انفصال را مشابه با مختصات کارترین بدست آورد. البته به شرط آنکه سیستم مختصات متعامد باشد (برای فرموله کردن شبکه‌های غیر متعامد به روابط پیچیده تری نیاز می‌باشد).

مرکز هر سلول، شکل (۲)، محل محاسبه فشار و دما P_{ij} ، T_{ij} خواهد بود. با استفاده از نامگذاری مولفه‌های سرعت $u_1 = u$ ، $u_2 = v$ حجم محدود برای u_{ij} در جهت X_1 و به همین ترتیب برای v_{ij} در جهت X_2 منتقل می‌شود. در مورد سیستم مختصات منحنی الخط متعامد چنین بیان می‌شود که جنبه‌های اضافی وارد شده توسط



شکل ۲- شبکه منحنی الخط متعامد جابجا شده و محل در نظر گرفتن پارامترها در سلول (Raithby, 1986)

شکل صریح منفصل شده معادله ممتنم در جهت X_1 به شکل زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{u_P^{n+1} - u_P^n}{\Delta t} h_{1u} h_{2u} W_u}_{unsteady} + \underbrace{(h_{2u} W_u u^n)_w u_W^n - (h_{2u} W_u u^n)_e u_E^n + (h_{1u} W_u v_u^n)_s u_S^n - (h_{1u} W_u v_u^n)_n u_N^n}_{convection} \\
 & - \underbrace{(v_u^n)^2 W (h_{2eu} - h_{2wu}) + (v_u^n) W (h_{1nu} - h_{1su}) u_P^n}_{curvilinear_ex_term1} = \underbrace{(h_2 W_u 2v_{tu})_e \frac{u_E^n - u_P^n}{h_{1uEP}} - (h_2 W_u 2v_{tu})_w \frac{u_P^n - u_W^n}{h_{1uPW}}}_{diffusion_term1} \\
 & - \underbrace{h_{2u} W_u (P_{i,j} - P_{i-1,j})}_{prsure_term} + \underbrace{(h_1 W_u v_{tu})_n \left(\left(\frac{v_n^n - v_{nw}^n}{h_{1un}} \right) + \left(\frac{u_N^n - u_P^n}{h_{2uNS}} \right) \right) - (h_1 W_u v_{tu})_s \left(\left(\frac{v_p^n - v_{pw}^n}{h_{1us}} \right) + \left(\frac{u_P^n - u_S^n}{h_{2uNS}} \right) \right)}_{diffusion_term2} \\
 & + \underbrace{W_u (h_{1n} - h_{1s}) v \left(\left(\frac{u_N^n - u_S^n}{h_{2uNS}} \right) + \left(\frac{v_n^n + v_{nw}^n - v_p^n - v_{pw}^n}{2h_{1u}} \right) \right) - W_u (h_{2e} - h_{2w}) 2v \left(\left(\frac{v_n^n + v_{nw}^n - v_p^n - v_{pw}^n}{2h_{2u}} \right) \right)}_{curvilinear_ex_term2} \\
 & + \underbrace{\rho g_1 W_u h_{1u} h_{2u}}_{gravity_Bouiancy}
 \end{aligned}$$

مرزهای بالا و پائین سلول فشار

در امتداد محور ۱ از گام زمانی قبل

در امتداد محور ۲ از گام زمانی قبل

فشار در گام زمانی جدید و در مرکز سلول فشار i, j

گام زمانی، Δt ، ابعاد شبکه در امتداد محور ۱، Δy ، ابعاد شبکه در امتداد محور ۲

با حل معادله پواسون حاصل (۱۷)، میدان فشار محاسبه شده و با استفاده از آن سرعت‌های جدید از معادلات (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که به روش صریح بوده در نتیجه گام زمانی محدودیت پایداری دارد.

Karpik and Raithby (1990) از روش ضمنی برای گسسته‌سازی معادلات استفاده نموده بودند. لذا ابتدا برنامه‌ای مطابق فرضیات و روش ضمنی کارپیک توسعه داده و مشاهده شد که روش انتخابی کارپیک که همان (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) SIMPLE اصلاح شده می‌باشد، دارای معایب زیر است.

- مدل دارای ضرایب مادون رهاسازی می‌باشد (مقدار پیشنهادی ۰/۷) و از آنجا که مقدار ضرایب مادون رهاسازی متغیر است، لذا مدل برای هر مسئله خاص می‌بایستی تنظیم شده و این امر زمان و نیروی متخصص را می‌طلبد.

- با وارد شدن جملات ناشی از مختصات منحنی‌الخط، همگرایی برنامه در بعضی مسائل با مشکل جدی روبرو می‌شد. - در صورت توقف برنامه در حین اجرا، نتایج آن معنادار نبوده، در صورتیکه در روش صریح در صورت توقف برنامه جواب قابل بررسی و قضاوت می‌باشد.

در تحقیق حاضر برای رفع این مشکلات از روش صریح و قدرتمند علامتگذاری و سلول (MAC) استفاده شد. در ادامه مطالعات نشان داده شده که روش فوق بخوبی مسائل جریان با چگالی متغیر را بدون سعی و خطا و نیاز به ضرایب مادون رهاسازی حل می‌کند. به علاوه این روش نسبت به ابعاد شبکه در دو جهت x, y از حساسیت کمتری برخوردار است.

که جمله فشار مبین فشار نسبی است. مشابه همین کار برای معادله ممتنم u_2 (۷)، صورت می‌گیرد (نشانه‌های بکار رفته همان نشانه‌های معادلات (۶) و (۷) هستند اندیس n نشان دهنده مقادیر از گام قبلی و اندیس n+1 مقادیر در گام زمانی جدید می‌باشند). جهت حل معادلات، مقدار متغیر در زمان جدید را در طرف چپ معادله نگه داشته و مابقی جملات (که مربوط از گام زمانی پیش معلوم می‌باشند، را به طرف راست منتقل می‌کنیم. جهت سادگی تمامی جملات سمت راست را، به استثنای گرادیان فشار، با RHS نشان می‌دهیم.

۴- روش حل معادلات

روش

(MAC)

..Hoffman (1996)

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (p_{i+1,j}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) + RHSU_{i+\frac{1}{2},j} \quad (14)$$

$$u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\Delta y} (p_{i,j+1}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) + RHSV_{i,j+\frac{1}{2}} \quad (15)$$

حال معادله پیوستگی را در (n+1) بکار می‌بریم. در نتیجه:

$$\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta y} = 0 \quad (16)$$

با جایگزین کردن معادلات (۱۴) و (۱۵) و عبارتهای مشابه در معادله (۱۶)، رابطه جدید زیر به دست می‌آید، که پس از مرتب کردن جمله‌ها خواهیم داشت.

$$\frac{P_{i-1,j}^{n+1} - 2P_{i,j}^{n+1} + P_{i+1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{P_{i,j-1}^{n+1} - 2P_{i,j}^{n+1} + P_{i,j+1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{RHSU_{i+\frac{1}{2},j} - RHSU_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x} + \frac{RHSV_{i,j+\frac{1}{2}} - RHSV_{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right]$$

مرزهای چپ و راست سلول فشار

شده از قبل جاگذاری می‌شوند. ولی با بقیه مرزها همانند سلول عادی برخورد می‌شود.

د - ج - محاسبه چشمه فشار معادله پواسون:
همانطور که در توضیح روش مک آمد، جمله چشمه معادله پواسون حاصل از پیوستگی سرعت‌ها در گام زمانی $n+1$ بدست می‌آیند. مقادیر چشمه فشار برای محاسبه زیربرنامه LAPLAS و مقادیر RHSU, RHSV برای محاسبه سرعت‌ها به زیر برنامه CALCUV منتقل می‌شوند.

ه. زیر برنامه LAPLAS
در این زیر برنامه معادله پواسون تشکیل، ضرایب آن توسط زیر برنامه COEFF محاسبه و شرایط مرزی فشار از طریق ضرایب اعمال می‌شوند، و با استفاده از جملات چشمه محاسبه شده معادله بروش تکراری گوس - سایدل حل می‌گردند. بدین ترتیب فشارهای جدید محاسبه می‌شوند.

و. زیر برنامه CALC-UV:
در این زیر برنامه با توجه به فشارهای جدید و RHSU, RHSV محاسبه شده در گام د، سرعت‌ها محاسبه می‌شوند. سرعت‌ها و فشارها در این گام تکمیل بوده و نیاز به تکرار ندارند.

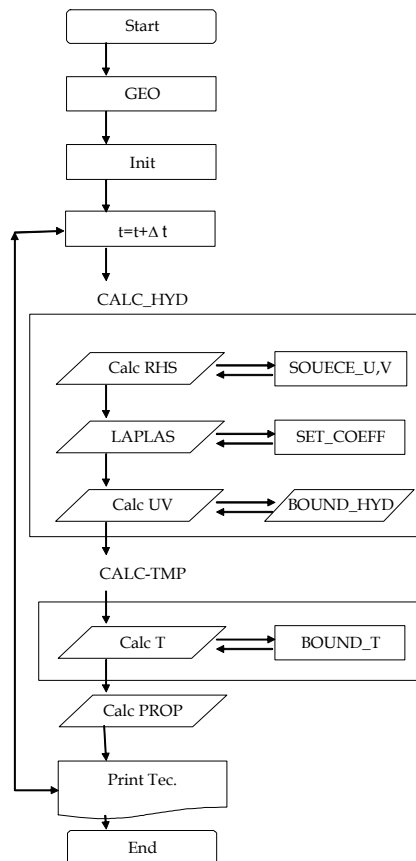
نقطه ضعف این روش محدودیت گام زمانی است که سرعت کامپیوترهای امروزی و ثابت ماندن ماتریس ضرایب تا وقتی که شبکه تغییر نکند، تا حدودی این ضعف را می‌پوشاند.
در شکل (۳) آمده است. این برنامه به روش صریح زمانی و بالادست مکانی برای ممتنم و پیوندی مکانی برای شوری و دما نوشته شده است و شامل اجزا زیر است.

ا. برنامه اصلی، از فلوجارت شکل (۳) تبعیت می‌کند و وظیفه هدایت محاسبات و چاپ نتایج را برعهده دارد.
ب. زیر برنامه GEO، وظیفه خواندن مختصات مراکز سلول‌های محاسباتی از فایل و محاسبات اولیه سطوح و احجام را دارد.
ج. زیر برنامه INIT، وظیفه تعریف شرایط آغازی مسئله و محاسبات اولیه سیستم مختصات را برعهده دارد.
د. زیر برنامه CALC-RHS، این زیر برنامه دارای سه بخش است.

د- الف - محاسبات سمت راست ممتنم U:
در این زیر برنامه ابتدا مشخصات هندسی وجوه و حجم‌های مربوط به سلول‌های U محاسبه می‌شود. سپس ضرایب جابجایی و پخش محاسبه شده و به زیر برنامه SKEAME و طرح بالادست فرستاده می‌شود. بعد از محاسبه اولیه ضرایب نقاط همسایه و خود سلول چشمه‌های مربوط به گرانش، مختصات منحنی الخط از طریق زیر برنامه SOURCE-U و غیره اضافه و تعیین می‌شوند. سپس RHSU برای نقاط داخلی، پیرو روش مک، در گام زمانی n محاسبه می‌شوند. در مرزهای ورودی و خروجی RHSU مستقیماً برابر سرعت‌های تعیین شده از قبل جاگذاری می‌شوند. ولی با بقیه مرزها همانند سلول عادی برخورد می‌شود.

د- ب - محاسبات سمت راست ممتنم V:
در این زیر برنامه ابتدا مشخصات هندسی وجوه و حجم‌های مربوط به سلول‌های V محاسبه می‌شود. سپس ضرایب جابجایی و پخش محاسبه شده و به زیر برنامه SKEAME و طرح بالادست فرستاده می‌شود. بعد از محاسبه اولیه ضرایب نقاط همسایه و خود سلول چشمه‌های مربوط به گرانش، مختصات منحنی الخط از طریق زیر برنامه SOURCE-V و غیره اضافه و تعیین می‌شوند. سپس RHSV برای نقاط داخلی در گام زمانی n محاسبه می‌شوند. در مرزهای ورودی و خروجی RHSV مستقیماً برابر سرعت‌های تعیین

شکل ۳- الگوریتم برنامه GMAC به روش علامت گذاری سلول



ز. زیر برنامه BOUND-HYD :

در این زیر برنامه شرایط مرزی سرعت‌ها اعمال می‌شود و سرعت‌ها در خارج از محدوده محاسباتی تعیین می‌شوند. بدین شکل که برای سطح آزاد مانند مرز تفارن عمل شده و در مرز کف، مرز بدون لغزش در نظر گرفته می‌شود. در ورودی و خروجی سرعت‌ها مجدداً برابر مقادیر از پیش تعیین شده قرار داده می‌شوند.

ح. زیر برنامه CALC-TMP :

در این زیر برنامه دما بر روش ضمنی برای سلول‌ها طی مراحل زیر تعیین می‌شود.

محاسبه پارامترهای هندسی

محاسبه ضرایب جابجایی و پخش

محاسبه ضرایب با استفاده از طرح پیوندی

اعمال شرایط مرزی بر ضرایب و تعیین چشمه در سلول‌ها

حل ضمنی بروش تکراری گوس سایدل

اعمال شرایط مرزی (قراردادن دما در مرز ورودی برابر عدد مربوطه، برابر قراردادن دمای خروجی با سلول مجاور داخلی).

ط. محاسبه خصوصیات سیال با توجه به دمای جدید، به پیش بردن گام زمانی و بازگشت به قسمت د.

۵- مدل ارزیابی با آزمون

جهت آزمون و مقایسه نتایج مدل‌های دوبعدی و سه بعدی از فلوم عمومی GRH استفاده می‌گردد. جهت ارزیابی نسبی و اقتصادی مدل‌های شبیه‌سازی مخازن از نتایج این مدل فیزیکی استفاده شده است. معمولاً در مشاهدات صحرایی اندازه‌گیری دما و پروفیل آن مورد توجه بوده و در موارد کمتری سرعت‌ها بررسی شده‌اند. لذا اگر نتایج مدل ریاضی با مدل فیزیکی مطابقت داشته باشد، می‌توان مدل ریاضی را برای مسائل واقعی نیز بکاربرد (Johnson, 1981).

ابعاد فلوم فوق‌الذکر به شرح‌الذکر به شرح زیر توسط (Johnson, 1981) ساخته شده است (شکل (۴)) :

- طول فلوم ۲۴/۳۸ متر

- سطح مقطع نهایی (۰/۹۱×۰/۹۱) مترمربع

- سطح مقطع ابتدایی (۰/۳۰×۰/۳۰) مترمربع

- دمای اولیه ۷۰/۶ درجه فارنهایت

- دبی ورودی و خروجی ۰/۶۳ لیتر در ثانیه

- شرایط مرزی، آب سرد با دمای ۶۲ درجه فارنهایت وارد می‌شود.

مانعی در ورودی، آب سرد را به ۰/۱۵ متر از بستر محدود می‌کند.

انتهای فلوم بیشتر از مدل آزمایشگاهی برآورد می‌کرد. همچنین ضخامت زیر جریان چگال نیز بیشتر از مقدار قابل انتظار مشاهده گردید. آنها علت این امر را ناشی از دو دلیل دانستند:

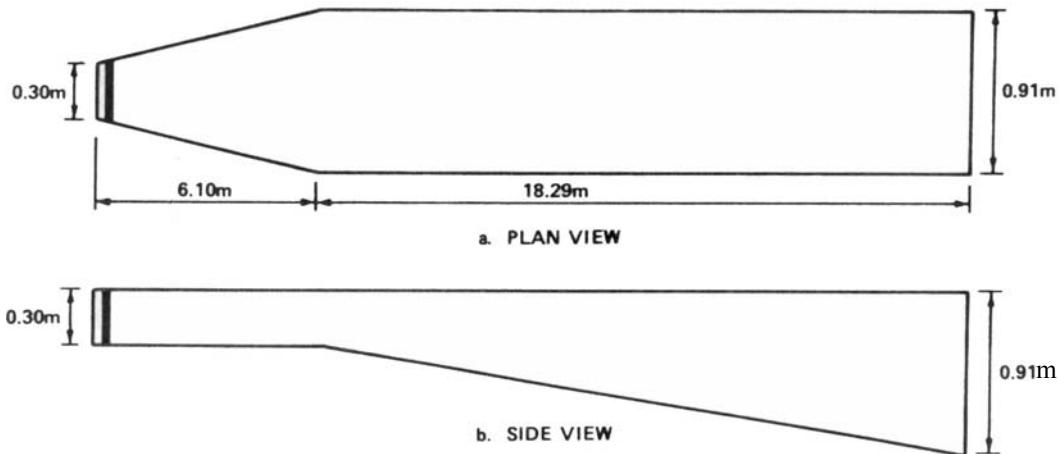
(۱) مدل پلکانی کف فلوم باعث اختلاط بیشتر در کف فلوم شده (Johnson, 1981).

(۲) فرض فشار هیدرواستاتیک بخصوص در نوک زیرجریان چگال نادرست می‌باشد (Karpik & Raithby, 1990).

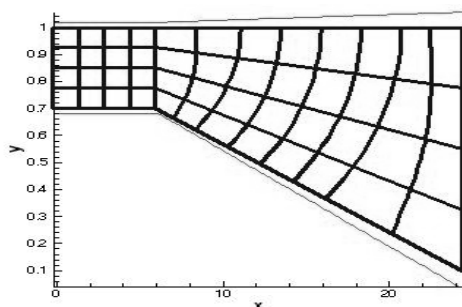
خروجی به شکل دایره به قطر ۲/۵۴ سانتیمتر و ۰/۱۵ متر بالاتر از کف فلوم می‌باشد.

- آب سرد ورودی رنگین است و عمق تیره‌تر نمایانگر سیال باچگالی بیشتر بوده و پروفیل سرعت از رگه رگه شدن رنگ داخل فلوم مشخص می‌شود. جریان زیرلایه چگال، نیز در دامنه جریان لایه ای قرار دارد.

مدل دوبعدی ادینگر بوچاک که توسط (Johnson, 1981) اصلاح و تکمیل و LARM نامیده شد، زمان رسیدن آب سرد و چگال را به



شکل ۴- پلان و مقطع فلوم GRH



شکل ۵- شکل نمادین شبکه منحنی الخط بکار رفته

فلوم بترتیب از چپ به راست دارای یک قسمت کاملاً دکارتی، سپس یک قسمت تبدیلی از دکارتی به استوانه‌ای است که، قسمت کاملاً استوانه‌ای یک قسمت تبدیلی دیگر است. شبکه فوق توسط نرم افزار Auto Cad ترسیم و نقاط آن به فایل داده‌ها ریخته شد و اطلاعات ورودی در جدول (۱) آمده است.

به دلیل درشتی شبکه، بردارهای سرعت قابل ارائه نبودند، ولی وجود جریان معکوس و زیرجریان کاملاً مشهود بوده است. این امر نشانه کلی عملکرد مناسب برنامه است. در شکل‌های (۶ تا ۹) زیر جریان،

یک مدل دوبعدی ضمنی در دستگاه مختصات عمومی متعامد به نام LAHM را توسعه دادند که این مدل به روش حجم محدود بوده و از الگوریتم SIMPLE اصلاح شده استفاده کرده است. روش به کار رفته به علت استفاده از روش ضمنی SIMPLE یک روش تکراری و دارای ضرایب مادون رهاسازی بود. برنامه فوق به این ضرایب بشدت حساس بوده و مستعد واگرایی می‌باشد. بدین جهت استفاده از روش صریح MAC، علامتگذاری و سلول، مدنظر قرار گرفت.

به طور کلی از مزایا روش علامتگذاری و سلول می‌توان به حذف ضرایب مادون رهاسازی و حذف مشکل همگرایی، گسترش دامنه نسبت ابعاد شبکه، عدم نیاز به تکرار اشاره کرد. ضعف روش علامتگذاری و سلول، محدودیت گام زمانی ناشی از طرح صریح می‌باشد.

۶- نتایج برنامه GMAC در فلوم GRH

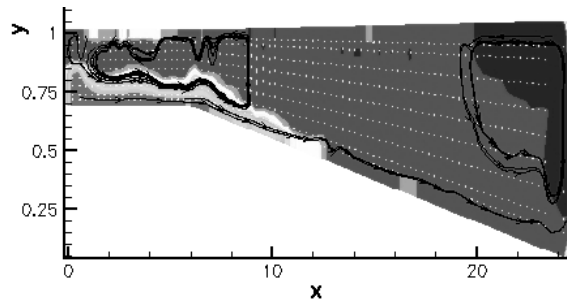
۶-۱- اجرای اول

در ابتدا یک مش اولیه و با تراکم کم، 4×80 ، انتخاب شد. این مش بصورت نمادین در شکل (۵) نشان داده شد.

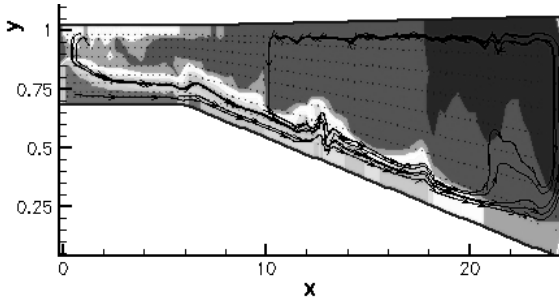
۶-۲- اجرای دوم

در اجرای دوم یک مش دیگر با تراکم 10×80 انتخاب گردید و ورودی آن در جدول (۱) آمده است.

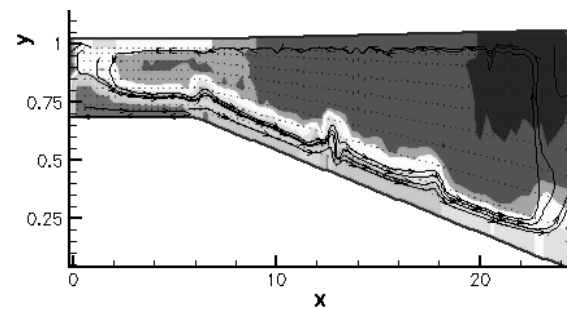
خطوط جریان و خطوط هم‌دما در زمان‌های ۱۱، ۲۰، ۲۲ و ۲۷ دقیقه نشان داده شده‌اند. ولی سرعت زیرجریان کمتر از مقدار مورد انتظار بود. با گذشت ۲۰ دقیقه هنوز طول فلوم طی نشده و علت این امر احتمالاً ناشی از کم بودن ضریب پخش از مقدار واقعی و درشت بودن ابعاد شبکه است. بدین جهت اجرای دیگری با شبکه فشرده‌تر و دقیق‌تر انجام شد که ورودی و نتایج آن در شکل (۱۰) ارائه شده است. جواب‌های دقیق در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۶- خطوط هم‌دما در ۱۱ دقیقه



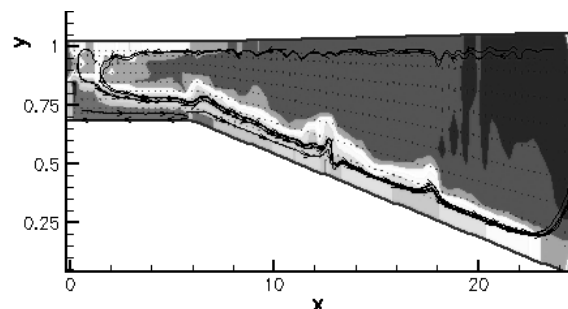
شکل ۷- خطوط هم‌دما در ۲۰ دقیقه



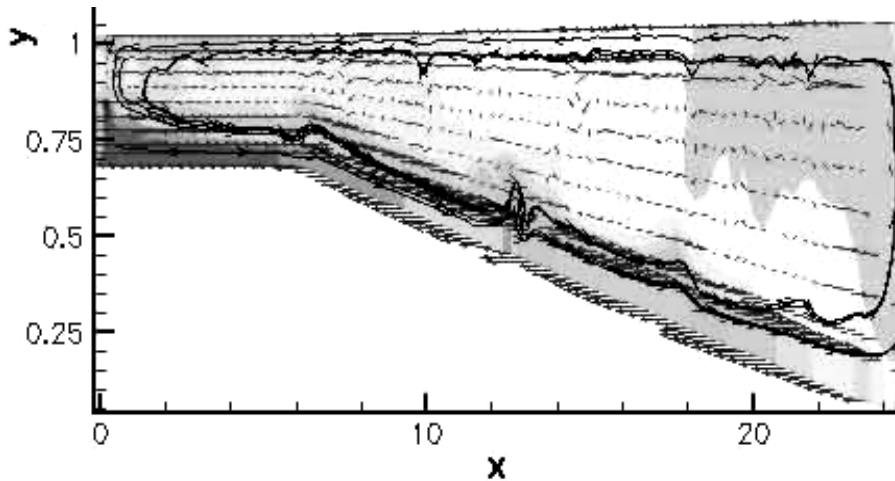
شکل ۹- خطوط هم‌دما در ۲۷ دقیقه

جدول ۱- داده‌های ورودی اجرای اول و دوم

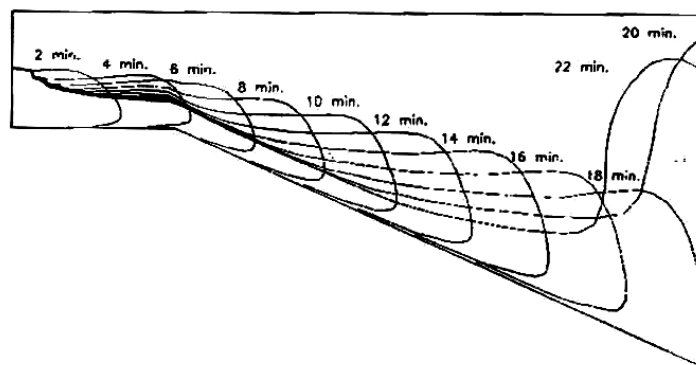
| مشخصات | اجرای اول | اجرای دوم |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| حداقل گام مکانی | $\Delta x = 0.30m$ | $\Delta x = 0.30m$ |
| حداقل ضخامت لایه | 0.75m | 0.03m |
| گام زمانی | $\Delta t = 0.05s$ | $\Delta t = 2.0s$ |
| ویسکوزیته و پخش افقی و قائم | $1/0 \times 10^{-6} m^2 / s$ | $1/5 \times 10^{-6} m^2 / s$ |
| دبی ورودی و خروجی | $0/00063m^3 / s$ | $0/00063m^3 / s$ |
| دمای اولیه آب | $21.44^\circ C$ | $21.44^\circ C$ |
| دمای آب ورودی | $16.66^\circ C$ | $16.66^\circ C$ |



شکل ۸- خطوط هم‌دما در ۲۲ دقیقه



شکل ۱۰- بردارهای سرعت، خطوط هم دما و جریان در $t=22$ اجرای دوم



Progression of Density Current over Time

شکل ۱۱- روند واقعی حرکت زیر جریان چگال در داخل فلوم Karpik & Raithby (1990) GRH

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (18)$$

که در آن U سرعت، D طول ضلع مربع و ν لزجت سینماتیکی سیال است.

در شکل (۱۲) شبکه منحنی الخط متعامد استفاده شده برای آزمون که توسط یک معادله دیفرانسیل بیضوی ایجاد شده، نشان داده شده است. در شکل (۱۳) توزیع فشار به دست آمده توسط برنامه برای رینولدز ۱۰۰۰ و در شکل (۱۴) بردارهای سرعت و خطوط جریان به دست آمده نشان داده شده است.

خطوط جریان، محل تشکیل گردابه‌ها و پروفیل سرعت با نتایج محققین دیگر همخوانی داشته و نشانه صحت عمومی برنامه می‌باشد. پروفیل سرعت نیز در رینولدز ۵۰۰۰ با پروفیل دقیق مقایسه شده است (شکل ۱۵).

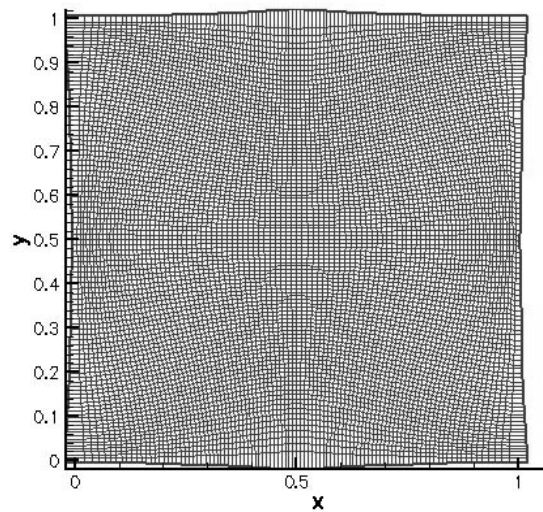
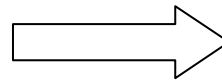
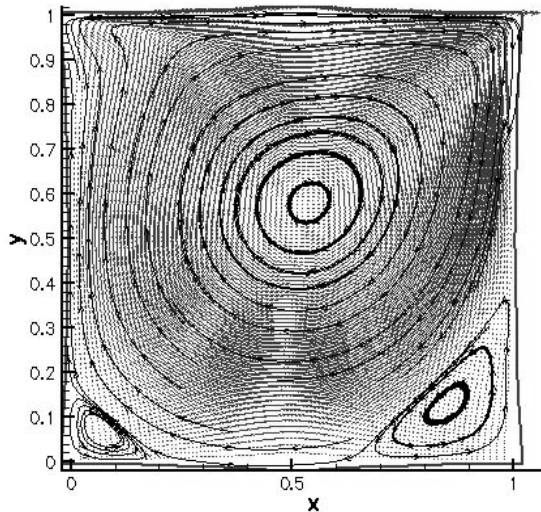
همانطور که انتظار می‌رفت بردارهای سرعت نمایان شده و به مقادیر مورد انتظار نزدیکتر شدند. در شکل (۱۰) خطوط جریان در مدت زمان ۲۲ دقیقه را نشان می‌دهد. در این اجرا سرعت رسیدن زیر جریان به خروجی نیز بهبود یافت، در عوض پخش حرارت بیشتر از حد انتظار بود.

۳-۶- آزمون حفره

جهت اطمینان از صحت مدل، تست‌های عمومی نیز روی آن صورت گرفته است. از آن جمله تست حفره می‌باشد. در این آزمایش یک کانال مربعی واحد در نظر گرفته می‌شود، که سه وجه آن شرط مرزی دیوار و یک مرز آن جریان با سرعت U و موازی با وجه در نظر گرفته می‌شود.

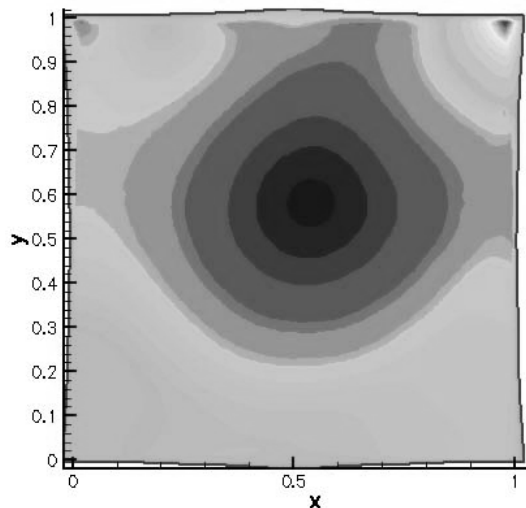
عدد رینولدز این آزمون از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

شکل ۱۳- توزیع فشار از اجرای برنامه در حالت دائمی،
 $Re=1000$



شکل ۱۲- شبکه منحنی الخط متعامد استفاده شده برای حل مسئله

شکل ۱۴- بردارهای سرعت و خطوط جریان حاصل از اجرای برنامه دائمی $Re=1000$



ابعاد شبکه و سطوح باشد که با اضافه کردن برنامه‌ای مانند GridGen مدل‌سازی بهبود پیدا می‌کند.

از معیارهای دیگری که جانسون به روی آنها تاکید داشت، شکل‌گیری جریان معکوس و چرخش داخل مخزن می‌باشد که خطوط جریان اشکال ۷ تا ۱۰ به خوبی این پدیده را مدل می‌کند.

به طور کلی با توجه به آنچه ذکر شد، عاملی که باعث صد درصد دقیق نبودن مدل می‌گردد، از تقریب‌های استفاده شده در محاسبات سطوح و احجام سلول‌های منحنی‌الخط ناشی شده است. از اینرو مدل حاضر می‌تواند با اعمال محاسبات دقیق سطح و احجام، بسیار موفق باشد. برای رهایی از پاره‌ای از مشکلات تولید و محاسبات شبکه منحنی‌الخط، نگاشت معادلات به سیستم مختصات سیگما می‌تواند راهکار مناسبی باشد ولی از آنجا که در دستگاه مختصات سیگما نیز محدودیت موج ثقیل آزار دهنده خواهد بود، لذا الگوریتم ضمنی مطلوب تر خواهد بود.

۸- مراجع

شجاعی‌فرد، محمد حسین (۱۳۷۹)، «مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی نوشته ورستیگ و مالاسکرا». انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

معتمدی، کاوه (۱۳۸۰) «مدل هیدرودینامیک دو بعدی در قائم مخزن سد»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Chapra, S.C., (1992), *Surface water quality modeling*, Mc Graw Hill, Highstown, NJ.

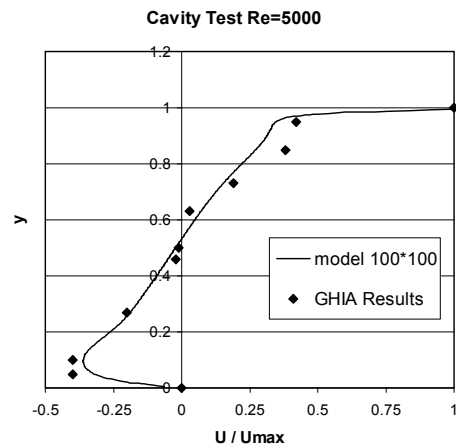
Hoffmann, K. A., and Chiang, S. T. (1989), "Computational fluid dynamics for engineers", EES, Austin, TX, USA.

Johnson, B. H. (1981), "Preview of numerical reservoir hydrodynamic modeling", WES, US Army.

Karpik, S. R. and Raithby, G. D. (1990), "Laterally averaged hydrodynamics model for reservoir predictions", *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(6).

Raithby, G. D., Galpin, P. F., and Van Doormal, J.P. (1986) "Prediction of heat and fluid flow in complex geometries using general orthogonal coordinates", *Numerical Heat Transfer*, 9(2), 125-142.

Spiegel, M. R. (1959). *Theory and problems of vector analysis and an introduction to tensor analysis*. Schaum Publishing Co., New York, N.Y.



شکل ۱۵- مقایسه پروفیل سرعت حاصل از اجرای برنامه دائمی Re=5000

۷- نتیجه گیری

تحقیقات گذشته نشان داده است که با پلکانی مدل شدن کف شبیدار مخزن، باعث اختلاط بیشتر و افزایش زمان حرکت پلوم در کف مخزن شده (Johnson(1981) و Karpik and Raithby (1990) و استفاده از یک سیستم مختصات منطبق بر کف مانند مدل حاضر می‌تواند نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد برنامه داشته باشد.

با پارامترهایی که در سنجش صحت کار برنامه مورد توجه قرار گرفته‌اند، میزان موفقیت مدل به شرح زیر بدست آمده است:

شکل‌گیری پلوم آب سرد در کف فلو (۱۰۰٪ موفق).

شکل‌گیری جریان معکوس و چرخش در داخل مخزن (۱۰۰٪ موفق).

زمان رسیدن پلوم آب سرد به خروجی (۷۵٪ موفق).

تغییرات دما در خروجی در طی زمان (۵۰٪ موفق).

همان‌طور که در اشکال ۶ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، برنامه به خوبی قابلیت مدل‌سازی زیر لایه چگال را دارد و پلوم آب سرد بطور کامل و مشخص شکل گرفته است. زمان و سرعت حرکت این پلوم در بخش دکارتی و قطبی خوب بوده ولی در نقاطی که تغییر سیستم مختصات وجود داشت- به طور مثال از دکارتی به تبدیل دکارتی به قطبی و یا از تبدیل دکارتی به قطبی، به قطبی - پخش عددی اتفاق افتاده است (اشکال ۹) و (۱۰).

در سه نقطه، در زمان رسیدن پلوم آب سرد به خروجی تاخیر ایجاد شده است. این تاخیر می‌تواند ناشی از تقریب در محاسبات هندسی

تاریخ دریافت مقاله : ۳۱ تیر ۱۳۸۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۲۴ اردیبهشت ۱۳۸۴