

مدل سازی توزیع هوای وارد شده از سطح جریان در تنداب با استفاده از تحلیلگر میانگین عمقی نرم افزار حجم محدود ^۱NASIR

سعیدرضا صباغ یزدی^۱، حبیب رضایی مانیزانی^{۲*}

۱- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- فارغ التحصیل کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

rmanizani@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۱/۲۰

چکیده- در این مقاله، نتایج مدل سازی جریان و توزیع غلظت هوای وارد شده از سطح جریان در تنداب سرریز، تشریح شده است. در تحلیلگر میانگین عمقی نرم افزار NASIR که از آن استفاده شده است، معادلات آب های کم عمق اصلاح شده برای شیب تند با روش حجم محدود (رئوس سلول هم پوشان و مرکزیت سلول) روی شبکه مثلثی بی ساختار حل می شوند. با به کارگیری پارامترهای عمق و سرعت میانگین عمقی جریان تحلیل شده به وسیله نرم افزار، پارامترهای هواگیری از سطح (مانند تعیین موقعیت نقطه شروع هواگیری، محاسبه غلظت میانگین هوا و توزیع عمقی آن) از روابط تجربی ارائه شده به وسیله محققین قبلی، گرفته شده است. در این پژوهش برای بررسی عددی پدیده هواگیری از سطح جریان در تنداب از سه شیوه استفاده شده است: (۱) بدون در نظر گرفتن تأثیر ورود هوا، پارامترهای جریان، تحلیل عددی شده، سپس با استفاده از نتایج تحلیل و یک پس پردازنده، توزیع هوای وارد شده از سطح محاسبه می شود؛ (۲) حل همگام جریان آب و توزیع هوا بدون اعمال تأثیر چگالی مخلوط آب و هوا در مقدار حرکت جریان با در نظر گرفتن تأثیر ورود هوا بر کاهش تنش های استهلاکی و تورم عمق جریان، در هر گام محاسباتی، انجام می شود؛ (۳) حل هم زمان غلظت هوا و جریان آب با اعمال چگالی مخلوط آب و هوا در مقدار حرکت جریان انجام می شود و علاوه بر تأثیر ورود هوا بر کاهش تنش های استهلاکی و تورم عمق جریان در هر گام محاسباتی، تأثیر تغییر چگالی مخلوط آب و هوا بر تغییرات استهلاک مقدار حرکت نیز در نظر گرفته می شود. برای ارزیابی کیفیت نتایج به دست آمده از سه شیوه مدل سازی، نتایج محاسباتی جریان و غلظت هوا در تنداب سرریز سد آویمور با اندازه گیری های میدانی گزارش شده در مراجع، مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: مدل سازی عددی جریان در تندابها، توزیع عمقی ورود هوا از سطح آب، معادلات آب های کم عمق در

شیب تند

۱- مقدمه

هواگیری سطحی (خود هواگیری^۲) در جریان ها می شود. پدیده خود هواگیری سبب تورم جریان و افزایش عمق می شود که این تورم و افزایش عمق بر طراحی ارتفاع دیوارهای کناری سرریز تأثیر چشم گیری دارد؛ اما وجود

در سرریز سدها، جریان از یک ارتفاع بلند فرو می ریزد و سرعت جریان به سمت انتهای سرریز شدیداً افزایش می یابد. این افزایش سرعت جریان سبب شکل گیری پدیده

2- Self Airation

1- Numerical Analyzer for Scientific and Industrial Requirements

حالت دوبعدی با استفاده از روش احجام محدود روی یک شبکه بدون ساختار مثلثی، مدلی را برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد ارائه کردند (HEMAT Model). در این مدل برای حل دقیق معادلات از تابع Roe استفاده شده است [۱۱]. *Zarrati et al.* (۱۹۹۴) با استفاده از یک مدل دوبعدی در قائم جریان را شبیه‌سازی کرد و به‌کمک نتایج آن غلظت هوا را در قسمت‌های مختلف پایین دست هواده مصنوعی یک سرریز محاسبه کرد. برای محاسبه غلظت هوا، وزن مخصوص مخلوط هوا و آب در معادلات، وارد و لزجت آشفتگی نیز با استفاده از مدل $k - \varepsilon$ محاسبه شد. وی در سال ۲۰۰۷ این مدل را بهبود بخشید [۲۷].

در بین نرم‌افزارهایی که قابلیت شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز را دارند و می‌توانند جریان دوفازی را شبیه‌سازی کنند، نرم‌افزار *Flow3D* و *Fluent* مناسب است. نرم‌افزار *Flow3D*، جریان را بر مبنای حل معادلات ناویر-استوکس مدل می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت مدل کردن جریان‌های یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی را با در نظر گرفتن جریان دائمی در دستگاه مختصات دکارتی یا استوانه‌ای دارد. اما روش *VOF* این نرم‌افزار که برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی (آب و هوا) مناسب است نمی‌تواند توزیع حباب‌های ریز هوا را (به‌ویژه در لایه‌های زیرین جریان) مدل کند. این نرم‌افزار با وجود این‌که از روابط تجربی برای محاسبه غلظت هوا استفاده شده است قابلیت تحلیل جریان دوفازی را دارد. نرم‌افزار *Fluent* توانایی شبیه‌سازی جریان دوفازی را دارد که با انتخاب گزینه *Mixture* می‌توان تأثیر ورود هوا بر جریان را مدل‌سازی کرد.

مدل‌سازی جریان هواگیری‌شده با استفاده از مدل‌های دوفازی، احتیاج به شبکه‌بندی سه‌بعدی بسیار ریزی که بتواند حباب‌های هوا را مدل‌سازی کند، دارد. از آن‌جا که حباب‌های هوای مجاور سطح زیرین جریان بسیار ریز است، استفاده از

هوا در جریان، تأثیر مثبتی بر کاهش خطرات ناشی از کاویتاسیون می‌گذارد. بنابراین مهندسين طراح سازه‌های آبی علاقه دارند از نحوه توزیع میزان هوا در جریان در تنداب سرریز سدها آگاهی داشته باشند.

برای بررسی هوای واردشده از سطح به جریان، مدل‌های آزمایشگاهی قابل قبول نیست زیرا این مدل‌ها بر اساس تشابه عدد فرود است و مقیاس کوچک همان رفتاری نیست که در نمونه واقعی اتفاق می‌افتد. به همین علت از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌شود. در سال‌های گذشته مدل‌های عددی مختلفی ارائه شده است. *Younus et al.* (۱۹۹۴) با استفاده از روش تفاضل محدود، معادلات را بر روی شبکه با ساختار منتقل‌شده به دستگاه مختصات غیردکارتی حل کردند. در این مدل برای محاسبه لزجت آشفتگی از مدل $k - \varepsilon$ استفاده شده و مقاومت بستر و شیب نیز در نیروهای کالبدی لحاظ شده بود. برای تضمین پایداری روند حل صریح از روش لزجت مصنوعی استفاده شده بود [۲۶]. *Unami et al.* (۱۹۹۹) معادلات آب‌های کم‌عمق را روی یک شبکه بدون ساختار مثلثی با استفاده هم‌زمان از هر دو روش اجزاء محدود و احجام محدود حل و این‌گونه، جریان در یک سرریز را شبیه‌سازی کردند. در این مدل اثر شیب و مقاومت بستر در نیروهای کالبدی وارد می‌شود. همچنین برای در نظر گرفتن یکنواخت نبودن سرعت در عمق و اثر ورود هوا به جریان، عباراتی به معادلات اصلی افزوده شد [۲۴]. *Balas* (۲۰۰۰) معادلات آب‌های کم‌عمق را در حالت سه‌بعدی با استفاده هم‌زمان از روش‌های تفاضل‌های محدود و اجزاء محدود حل کردند. در این روش از هر دو مدل $k - \varepsilon$ و Smagorinsky برای محاسبه لزجت در جهات قائم و افقی استفاده شده است [۲]. *Namin et al.* (۲۰۰۲) با حل معادلات میانگین عمقی در

با به کارگیری مدل‌های صفر معادله‌ای مدل‌سازی شده است [۱۹]. در این مقاله، ویرایش تحلیلی جریان میانگین عمقی این نرم‌افزار به روابط مناسب برای منظور کردن تأثیر ورود هوا از کف تنداب، مورد توسعه قرار گرفته است و نتایج سه شیوه مختلف برای این مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. آزمون استفاده شده برای مدل‌سازی در این مقاله، تنداب سرریز سد آویمور^۳ است. نتایج به دست آمده از مدل عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت و غلظت هوای گزارش شده به وسیله‌ی Cain and Wood (۱۹۸۷) [۳] مقایسه شده است.

۲- معادلات جریان

مدل ریاضی استفاده شده در تحلیلی جریان (NASIR) شامل معادلات آب‌های کم‌عمق اصلاح شده برای شیب تند است که عبارتند از [۱۲]:

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + \frac{\partial(h'u')}{\partial x'} + \frac{\partial(h'v')}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h'u')}{\partial t} + \frac{\partial(u'h'u')}{\partial x'} + \frac{\partial(vh'u')}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x'} \left[h' \frac{gh' \cos \alpha}{2} \right] = gh' \sin \alpha - gh' S_{fx'} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h'v')}{\partial t} + \frac{\partial(u'h'v')}{\partial x'} + \frac{\partial(vh'v')}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[h' \frac{gh' \cos \alpha}{2} \right] = -gh' S_{fy} \quad (3)$$

که در آن:

$$S_{fx'} = \frac{n^2 u' \sqrt{u'^2 + v'^2}}{h'^{4/3}}; S_{fy} = \frac{n^2 v' \sqrt{u'^2 + v'^2}}{h'^{4/3}} \quad (4)$$

x' محور مماس بر بستر مجرا در راستای شیب و محور y' منطبق بر محور افقی مختصات کلی است. u' و v' مؤلفه‌های

مدل‌های دوفازی امکان پذیر نیست. گزینه دیگر، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی جریان مخلوط آب و هوا (یا چگالی میانگین) است. در جریان پر سرعت روی سرریزها، تغییرات سرعت در راستای عمق ناچیز است و در مناطقی که جریان فوق بحرانی توسعه یافته باشد، استفاده از مدل‌های میانگین عمقی با دقت مناسب و هزینه محاسباتی معقول، موجه است.

ماجول تحلیلی جریان میانگین عمقی نرم‌افزار^۱ NASIR (که برای شبیه‌سازی رایانه‌ای مسائل علمی و صنعتی در کاربردهای مهندسی تدوین شده است) قادر به شبیه‌سازی این موارد است: جریان جزر و مدی در خلیج فارس [۱۴]، جریان حاوی رسوب [۱۶]، جریان چندلایه در دریاچه سدها [۲۱]، جریان روی بستر تر و خشک شونده [۱۳]، جریان ناشی از ورود رودخانه‌ها، چرخش زمین و عوامل جوی در دریای خزر [۱۵]، جریان با سطح آزاد فوق بحرانی با امواج مانا در سرریزهای تنگ شونده پایه‌دار [۲۳]، جریان در تنداب با شیب متغیر [۱۲]، جریان رویه‌ای هواگیری شده روی سرریزهای پلکانی [۲۲] و تأثیر هواده‌های عمقی بر جریان تنداب [۲۰].

در ویرایشی از نرم‌افزار NASIR که در این پژوهش استفاده شده است، معادلات آب‌های کم‌عمق^۲ اصلاح شده برای شیب تند [۱۲] به‌عنوان مدل ریاضی انتخاب شده است. این مدل ریاضی با فرض توزیع هیدرواستاتیک، فشار جریان دوبعدی در صفحه موازی بستر را مدل می‌کند و ورود هوا از سطح جریان در تنداب را در نظر می‌گیرد [۱۸]. بنابراین مقادیر سرعت به دست آمده از حل این مدل ریاضی به‌وسیله نرم‌افزار، روی احجام محدود بی‌ساختار، مقادیر مبه و سیله‌ی عمقی است. برای جریان فوق بحرانی، تأثیر اینرسی، غالب است و از حساسیت مدل‌سازی تأثیر آشفتگی در نتایج حل عددی می‌کاهد؛ بنابراین تأثیر آشفتگی در صفحه موازی بستر

1- Numerical Analyzer for Scientific and Industrial Requirements
2- Shallow Water Equations(SWE)

$$\bar{C}_e = \bar{C}_\infty (1 - e^{-0.010X^*/Y_l}) + 0.23 \quad (8)$$

X^* ، فاصله از نقطه آغاز هواگیری در طول تنداب و Y_l عمق در نقطه آغاز هواگیری است. پارامتر \bar{C}_∞ حد تعادل غلظت حباب‌های معلق هوا در آب برای جریان یکنواخت در یک تنداب با شیب مشخص است. این مقدار برای زوایای بین ۱۱ تا ۷۵ درجه از رابطه زیر محاسبه می‌شود (θ زاویه شیب تنداب به درجه):

$$\bar{C}_\infty = 0.626(1 - e^{-0.0356(\theta - 10.9)}) \quad (9)$$

۳-۳-۳ رابطه تعیین توزیع عمقی غلظت هوا

توزیع عمقی غلظت هوا به صورت زیر بیان می‌شود (Chanson, ۱۹۸۸) [۴]:

$$C(Y') = 1 - \tanh^2\left(K' - \frac{Y'}{2D'}\right) \quad (10)$$

C غلظت هوا در عمق‌های مختلف و $Y' = Y/Y_{90}$ عمق مشخص مخلوط آب و هوا با غلظت هوای ۹۰ درصد است.

$$D' = 3.5722C_e^3 - 2.3456C_e^2 + 1.15799C_e - 0.0166 (R^2 = 0.999) \quad (11)$$

از داده‌های تجربی موجود، K' و D' بر اساس غلظت مبه وسیله‌ی هوا C_e شرح زیر توصیه شده‌اند [۴]:

$$K' = 0.7766C_e^{-0.9877} (R^2 = 0.9978) \quad (12)$$

۳-۴-۳ روابط تأثیر ورود هوا بر زبری و عمق جریان

برای اعمال زبری بستر در نتیجه ورود هوا از رابطه تجربی Wood و Cain (۱۹۹۱) [۳] استفاده می‌شود:

$$f = -2.144C_e^2 + 0.335C_e + 0.99 \quad (13)$$

سرعت در راستای محورهای x' ، y' ، h' ، عمق جریان در راستای عمود بر بستر و g شتاب گرانش است. α زاویه شیب بستر در راستای x' و $S_{fx'}$ و S_{fy} شیب‌های اصطکاک در راستای x' و y' است. n ضریب زبری مانینگ است [۱۲].

۳- روابط تعیین غلظت هوای وارد شده از سطح

۳-۱- روابط تعیین نقطه آغاز هواگیری

روابط استفاده شده برای تعیین فاصله نقطه آغاز هواگیری از تاج در راستای شیب عبارتند از [۳]:
رابطه Wood و Cain (۱۹۸۳):

$$\frac{L_{b1}}{K_s} = 13.6(\sin\alpha)^{0.0796} (F_*)^{0.713} \quad F_* = \frac{q_w}{\sqrt{gK_s^3 \sin\alpha}} \quad (5)$$

رابطه Ferrando (۲۰۰۲):

$$L_{b1} = \left(\frac{q}{0.05642k_s^{0.056} (\sin\alpha)^{0.34}} \right)^F \quad (6)$$

$$F = (1.46443k_s^{0.0054} (\sin\alpha)^{0.0027})^{-1}$$

L_{b1} فاصله برخورد لایه مرزی به سطح آزاد آب از ابتدای کانال یا سرریز، K_s ارتفاع زبری معادل دانه‌های ماسه، α شیب کانال و q_w دبی در عرض واحد است. رابطه تعیین عمق جریان در نقطه آغاز هواگیری ارائه شده به وسیله‌ی Wood و Cain (۱۹۸۳) [۳] عبارت است از:

$$\frac{d_{b1}}{K_s} = \frac{0.223}{(\sin\alpha)^{0.04}} (F_*)^{0.643} \quad (7)$$

d_{b1} ، عمق جریان در محل برخورد لایه مرزی با سطح آب است.

۳-۲- رابطه تعیین مبه وسیله‌ی غلظت هوا

رابطه استفاده شده برای تعیین غلظت هوای میانگین عبارت است از:

رابطه Wilhelms (۲۰۰۵) [۲۵]:

به طور هم‌زمان حل می‌شود. با این تفاوت که در این قسمت تأثیر تغییر چگالی جریان (مخلوط آب و هوا) بر معادلات مقدار حرکت آب‌های کم عمق تصویر شده در شیب نیز در نظر گرفته شده است [۱۲].

در این مدل‌سازی از شبکه مثلثی بی‌ساختار و روش حل عددی حجم محدود^۲ استفاده شده است. نرم‌افزار *NASIR*، توانایی گسسته‌سازی معادلات جریان را با استفاده از دو روش رئوس سلول هم‌پوشان^۳ و مرکزیت سلول^۴ دارد. بنابراین معادلات جریان ارائه‌شده در بخش قبل را می‌توان با در نظر گرفتن $Q = h'$ ، $E = h'u'$ و $F = h'v'$ به شکل برداری زیر نوشت [۱۳ و ۱۴]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = S \quad (15)$$

اگر رابطه بالا را در رابطه کلی روش احجام محدود قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} \right) dx dy = \int_{\Omega} S dx dy \quad (16)$$

Ω ، برابر با سطح حجم کنترل مورد نظر است. رابطه پس از گسسته‌سازی به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$Q^{n+1} = Q^n - \frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^N (\bar{E} \Delta x - \bar{F} \Delta y)_k + S \Delta t \quad (17)$$

منظور از n و $n+1$ گام زمانی حل معادلات و Δt گام زمانی محاسبات است. در این رابطه، N وابسته به روش حل انتخابی (روش مرکزیت سلول و رئوس سلول) است که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

۴-۱- روش مرکزیت سلول

در روش مرکزیت سلول، معادلات در مراکز حجم

با توجه به غلظت میانگین هوا (C_e) تورم عمق جریان به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$Y_{90} = d / (1 - C_e) \quad (14)$$

۴- حل عددی جریان

برای مدل‌سازی، سه شیوه بررسی شده است:

حل جریان بدون حضور هوا و استفاده از پس‌پردازنده^۱ برای مدل‌سازی ورود هوا: ابتدا بدون در نظر گرفتن ورود هوا با حل معادلات آب‌های کم‌عمق به وسیله نرم‌افزار *NASIR*، مقادیر عمق جریان و سرعت میانگین در نقاط مختلف مدل به دست می‌آید. سپس پس‌پردازنده با کمک لایه‌بندی محیط حل و نتایج نرم‌افزار و با استفاده از روابط تجربی نقطه ورود هوا به جریان و توزیع غلظت هوا، غلظت میانگین هوا در هر نقطه گرهی را محاسبه می‌کند. پس پردازنده با در نظر گرفتن تأثیر هوا در عمق جریان، مقادیر سرعت در عمق جریان (با توزیع توانی)، و توزیع غلظت هوا در عمق را محاسبه می‌کند.

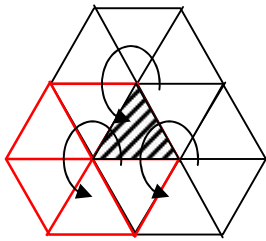
حل هم‌زمان هوا و آب بدون اعمال چگالی مخلوط آب و هوا: در این حالت جریان با حضور هوا به طور هم‌زمان حل می‌شود. در واقع در نرم‌افزار *NASIR* تأثیر هوا لحاظ می‌شود. با توجه به ورود هوا به جریان، زبری مؤثر بستر کاهش یافته و برای اعمال زبری کاهش یافته در محاسبات، لازم است پس از محاسبه غلظت هوا، ضریب زبری اصلاح شود و محاسبات دوباره برای زبری جدید تکرار شوند؛ یعنی حل هم‌زمان هوا و آب انجام شود و تأثیر ورود هوا در افزایش عمق نیز منظور می‌شود.

حل هم‌زمان هوا و آب با اعمال چگالی مخلوط آب و هوا: در این حالت، جریان مانند حالت دوم با حضور هوا

2- Finite Volume
3- Overlapping Cell Vertex
4- Cell Center

1- Post-Processor

کنار یکدیگر است [۱۲].



شکل (۲) حجم کنترل انتخابی رئوس سلول هم‌پوشان

۴-۳- شرایط مرزی جریان

نوع جریان در مرزهای خروجی، آزاد و در مرزهای دیواره سرریز، بسته در نظر گرفته می‌شود. شرایط جریان در مرز ورودی به صورت دستی وارد می‌شود. این شرایط به صورت زیر است [۳]:

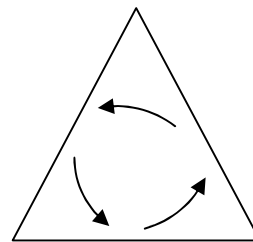
$$u_0 = 11.07 \frac{m^2}{s} \quad \text{و} \quad h_0 = 0.2m$$

به خاطر استفاده از روش شار انتقالی جهت‌دار [۱]، مدل عددی استفاده شده در این پژوهش، نیازی به تنظیم پارامتر خاصی ندارد؛ لذا در بخش آتی، دقت نتایج ارزیابی می‌شود. از آن‌جاکه در این پژوهش، مدل‌سازی امواج شوک مورد نظر نیست و جریان مورد نظر مدل‌سازی، فوق بحرانی است؛ حساسیت چشم‌گیری برای اندازه شبکه وجود ندارد. دقت در محاسبه تغییرات طولی غلظت هوا (با استفاده از روابط جبری برای محاسبه غلظت هوا)، اندازه شبکه‌بندی را تعیین می‌کند؛ همچنین آشفتگی جریان ورودی، صفر در نظر گرفته شده است.

۵- ارزیابی نتایج مدل عددی

تنداب مدل‌سازی شده در این مقاله، تنداب سرریز سد آویمور است. این سرریز ۵ دهانه به عرض ثابت ۱۵ متر دارد و نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده

کنترل‌های مورد نظر حل می‌شوند؛ بنابراین در رابطه بالا، N تعداد گره‌های تشکیل‌دهنده یک حجم کنترل است. مقدار متغیر مورد نظر در مرکز هر سلول به‌دست می‌آید اما چون مقدار سایر متغیرهای به‌کاررفته برای محاسبه متغیر مورد نظر باید در گره‌ها مشخص باشد، برای ادامه محاسبات، لازم است مقادیر به‌دست‌آمده در مرکز سلول‌ها به گره‌ها منتقل شود. برای این انتقال، روش‌های مختلفی وجود دارد که پیچیدگی و هزینه محاسباتی دارند.



شکل (۱) حجم کنترل انتخابی در روش مرکزیت سلول

۴-۲- روش رئوس سلول

در روش رئوس سلول، هر حجم کنترل از مجموعه‌ای از چند سلول ریزتر تشکیل شده است. یعنی هر چند سلول مثلثی (۵ یا ۶ مثلث) یک حجم کنترل چندضلعی تشکیل می‌دهند که برای انجام محاسبات از حجم کنترل بزرگ‌تر استفاده می‌شود. بنابراین در رابطه بالا N ، تعداد یال‌های تشکیل‌دهنده یک حجم کنترل است. مزیتی که این روش نسبت به روش قبل دارد این است که نقطه مرکزی، همان رئوس سلول‌ها است و همگی این نقاط جزء نقاط اصلی شبکه است و به محاسبات اضافه برای تعیین موقعیت نقطه مرکزی حجم کنترل و انتقال متغیرهای محاسبه‌شده به نقاط گرهی احتیاج نیست. روش رئوس سلول به دو روش هم‌پوشان و غیرهم‌پوشان تقسیم می‌شود. در روش هم‌پوشان، حجم کنترل‌ها در هم ادغام می‌شوند ولی در روش غیرهم‌پوشان، حجم کنترل‌ها در

مقایسه مقادیر به دست آمده از این مدل سازی برای روابط مختلف تعیین محل آغاز هواگیری و عمق جریان در این نقطه در جدول ۱ و جدول ۲ آمده است. همان طور که در جداول ۱ و ۲ مشاهده می شود، مقادیر محاسبه شده فاصله نقطه آغاز هواگیری در شیوه شماره یک با استفاده از رابطه ارائه شده به وسیله ی *Fernando* و *Rico* (۲۰۰۲) [۹] به واقعیت بسیار نزدیک است و از بین دو روش حل (رئوس سلول هم پوشان و مرکزیت سلول)، جواب به دست آمده از روش مرکزیت سلول به واقعیت نزدیک تر است. مقادیر محاسبه شده عمق نقطه آغاز هواگیری با استفاده از رابطه *Wood* و *Cain* (۱۹۸۳) نیز خطای کمتری نسبت به واقعیت دارد که روش رئوس سلول هم پوشان جواب بهتری داده است.

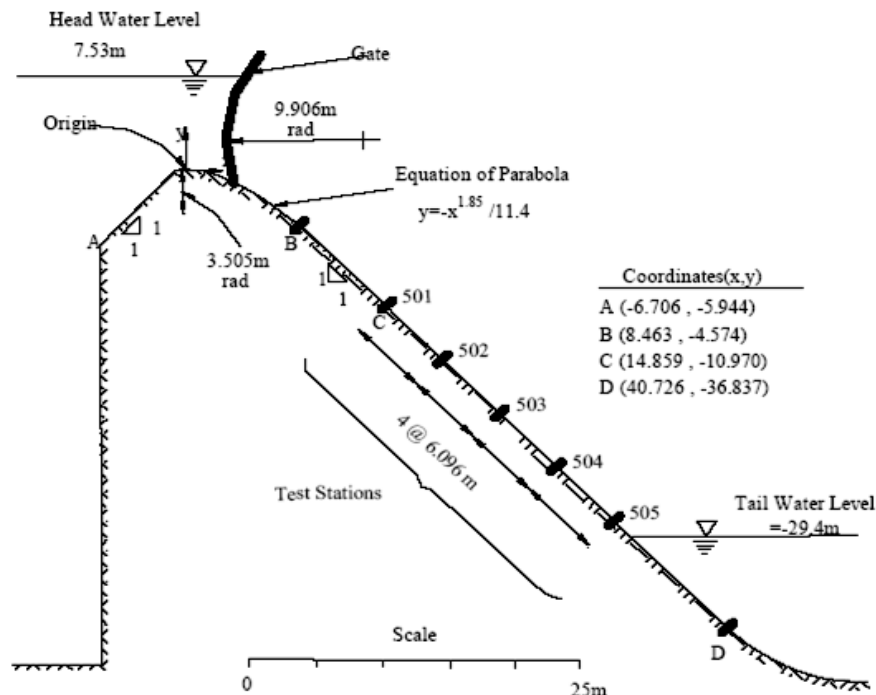
به وسیله ی *Wood* و *Cain* (۱۹۸۷) [۳] مقایسه می شود. این سرریز در ابتدا اوجی شکل است و قسمت تنداب آن، شیب بسیار تندی (۴۵ درجه) دارد.

برای شبیه سازی جریان در قسمت تنداب، از یک شبکه بدون ساختار مثلثی با ۳۷۷ گره، ۶۴۲ مثلث و ۱۰۱۸ یال استفاده شده است. توزیع عمقی سرعت و غلظت هوای محاسبه شده در این پژوهش با اندازه گیری میدانی در ایستگاه های ۵۰۱ و ۵۰۳ و ۵۰۵ که به ترتیب ۶/۴، ۱۵ و ۲۳/۶ متری از ابتدای تنداب است، مقایسه شده است (شکل ۳).

۱-۵- صحت سنجی فاصله و عمق نقطه آغاز هواگیری

۱-۱-۵- نتایج شیوه اول مدل سازی

پس پردازنده تهیه شده در این کار، می تواند با استفاده از پارامترهای تحلیل شده به وسیله ی نرم افزار *NASIR*، نقطه شروع هواگیری از سطح جریان را محاسبه کند.



شکل (۳) نمای جانبی سرریز سد آویمور [۳]

در شیوه دوم همان طور که اشاره شد حل هم زمان هوا و

۲-۱-۵- نتایج شیوه دوم مدل سازی

آب انجام می‌شود در واقع هنگام حل معادلات جریان (معادلات آب‌های کم‌عمق) تأثیر ورود هوا در نظر گرفته می‌شود. با حضور هوا هنگام حل معادلات جریان دو پارامتر ضریب زبری که به صورت تنش‌های استهلاکی کلی در معادلات آب‌های کم عمق ظاهر می‌شود و "عمق" تغییر خواهند کرد. برای اصلاح این دو در نتیجه ورود هوا به جریان که سبب کاهش زبری و افزایش عمق می‌شود از رابطه ارائه‌شده در بخش ۴ استفاده شده است.

بسیار کمتری نسبت به شیوه اول در تعیین نقطه آغاز هواگیری به‌دست‌آمده است. در این مدل نیز رابطه ارائه‌شده به وسیلهی *Fernando* و *Rico* (۲۰۰۲) [۹] جواب بهتری در روش مرکزیت سلول داده است؛ همچنین در تعیین عمق نقطه آغاز هواگیری در شیوه دوم درصد خطا نسبت به شیوه اول مقدار ناچیزی افزایش یافته است. در این مدل نیز رابطه *Wood* و *Cain* (۱۹۸۳) [۳] در روش مرکزیت سلول جواب بهتری داده است.

با توجه به جداول ۳ و ۴ در شیوه دوم، درصد خطای

جدول (۱) فاصله نقطه آغاز هواگیری از تاج سرریز در شیوه اول مدل‌سازی

<i>Fernando et al (2002)</i>		<i>Wood et al (1983)</i>		فاصله نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۶/۰۷ %	۱۴/۸۵	۱۸/۵۰ %	۱۱/۴۱	۱۴/۰۰	رئوس سلول هم‌پوشان
۵/۵۷ %	۱۴/۷۸	۱۸/۷۹ %	۱۱/۳۷	۱۴/۰۰	مرکزیت سلول

جدول (۲) عمق نقطه آغاز هواگیری از تاج سرریز در شیوه اول

<i>Bauer (1954)</i>		<i>Wood et al (1983)</i>		عمق نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۱۹/۷۴ %	۰/۱۲۲	۳/۲۹ %	۰/۱۵۷	۰/۱۵۲	رئوس سلول هم‌پوشان
۱۱/۱۸ %	۰/۱۳۵	۹/۲۱ %	۰/۱۶۶	۰/۱۵۲	مرکزیت سلول

جدول (۳) فاصله نقطه آغاز هواگیری از تاج سرریز در شیوه دوم

<i>Fernando et al (2002)</i>		<i>Wood et al (1983)</i>		فاصله نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۱۵/۹۶ %	۱۱/۷۶۶	۴۱/۰۰ %	۸/۲۶	۱۴/۰۰	رئوس سلول هم‌پوشان
۹/۵ %	۱۲/۶۷	۳۷/۸ %	۸/۷۰۸	۱۴/۰۰	مرکزیت سلول

جدول (۴) عمق نقطه آغاز هواگیری در شیوه دوم

<i>Baur (1954)</i>		<i>Wood et al (1983)</i>		عمق نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۱۷/۷۶ %	۰/۱۲۵	۱۱/۸۴ %	۰/۱۳۴	۰/۱۵۲	رئوس سلول هم‌پوشان
۱۰/۵۳ %	۰/۱۳۶	۶/۵۸ %	۰/۱۴۲	۰/۱۵۲	مرکزیت سلول

در نظر گرفتن چگالی مخلوط آب و هوا در حل معادلات

به دست آمده از مدل عددی مقایسه کرد. برای این کار می توان به شکل زیر عمل کرد:

$$q = V_{mean} h = \int_0^h v dh \quad (12)$$

به همین ترتیب با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار غلظت هوا در عمق می توان غلظت هوای میانگین را به دست آورد. با توجه به جداول ۷ و ۸، تفاوت شیوه شماره ۱ با ۲ و ۳ به خوبی مشاهده می شود؛ بنابراین هنگام حل معادلات آب های کم عمق، تأثیر ورود هوا باید در نظر گرفته شود.

جریان آب (شیوه سوم)، تأثیر محسوسی بر نتایج ندارد. نتایج شیوه سوم برای هر دو روش حل (رئوس سلول هم پوشان و مرکزیت سلول) در جداول ۵ و ۶ مشاهده می شود.

۲-۵- صحت سنجی سرعت میانگین و غلظت هوای میانگین

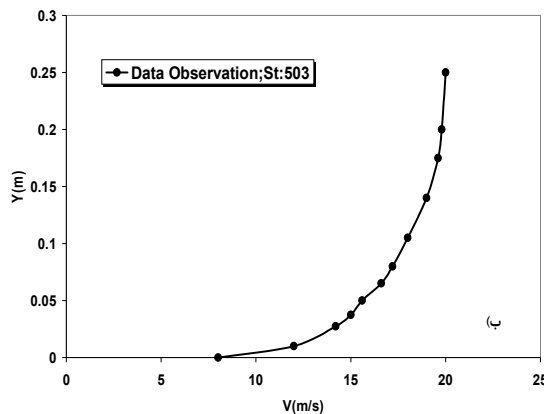
برای صحت سنجی سرعت میانگین و غلظت هوای میانگین، ایستگاه ۵۰۳ بررسی می شود. سرعت میانگین اندازه گیری های میدانی را می توان با استفاده از نمودار سرعت جریان در عمق به دست آورده و با نتایج

جدول (۵) فاصله نقطه آغاز هواگیری از تاج سرریز در شیوه سوم

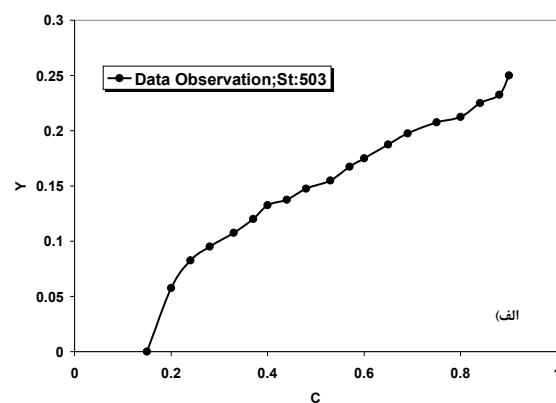
Fernando et al (2002)		Wood et al (1983)		فاصله نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۶/۰۷٪	۱۴/۸۵	۱۸/۵۷٪	۱۱/۴۰	۱۴/۰۰	رئوس سلول هم پوشان
۵/۵۷٪	۱۴/۷۸	۱۸/۷۹٪	۱۱/۳۷	۱۴/۰۰	مرکزیت سلول

جدول (۶) عمق نقطه آغاز هواگیری در شیوه سوم

Baur (1954)		Wood et al (1983)		عمق نقطه آغاز هواگیری	
درصد خطا	مقدار عددی (متر)	درصد خطا	مقدار عددی (متر)	مقدار واقعی (متر)	روش حل معادلات
۱۷/۷۶٪	۰/۱۲۵	۱۱/۸۴٪	۰/۱۳۴	۰/۱۵۲	رئوس سلول هم پوشان
۱۳/۱۶٪	۰/۱۳۲	۶/۵۸٪	۰/۱۴۲	۰/۱۵۲	مرکزیت سلول



ب- سرعت جریان - عمق



الف- غلظت هوا- عمق جریان

شکل (۴) نمودارهای پارامترهای جریان اندازه گیری شده میدانی در ایستگاه ۵۰۳ [۳]

روش مرکزیت سلول، خطای بسیار ناچیزی در شیوه

شماره ۲ و ۳ داشته است. همچنین نتایج شیوه شماره ۳، مشابه شیوه شماره ۲ است؛ یعنی در نظر گرفتن چگالی مخلوط آب و هوا، تأثیری بر نتایج نداشته است. اندازه‌گیری‌های میدانی در شکل ۴-الف نشان می‌دهد که غلظت هوا در نزدیکی بستر به صفر میل می‌کند و بالاتر از سطح بستر، غلظت هوا با تغییراتی به شکل سینوسی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۴-ب ملاحظه می‌شود، تا فاصله چشم‌گیری از سطح جریان، میزان سرعت، تغییرات ناچیزی دارد و فقط در محدوده‌ای در نزدیکی سطح زیرین جریان تغییرات سرعت چشم‌گیر است.

شماره ۲ و ۳ داشته است. همچنین نتایج شیوه شماره ۳، مشابه شیوه شماره ۲ است؛ یعنی در نظر گرفتن چگالی مخلوط آب و هوا، تأثیری بر نتایج نداشته است. اندازه‌گیری‌های میدانی در شکل ۴-الف نشان می‌دهد که غلظت هوا در نزدیکی بستر به صفر میل می‌کند و بالاتر از سطح بستر، غلظت هوا با تغییراتی به شکل سینوسی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۴-ب ملاحظه می‌شود، تا فاصله چشم‌گیری از سطح جریان، میزان سرعت، تغییرات ناچیزی دارد و فقط در محدوده‌ای در نزدیکی سطح زیرین جریان تغییرات سرعت چشم‌گیر است.

۶- کاربرد مدل در محاسبه پروفیل عمقی سرعت و غلظت هوا

برای مقایسه بهتر نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی می‌توان پس از تحلیل پارامترهای جریان با استفاده از نرم‌افزار *NASIR* و رابطه توانی سرعت در پس‌پردازنده و لایه‌بندی محیط حل، سرعت در هر نقطه عمق به‌دست‌آورده نمودار توزیع عمقی سرعت و غلظت هوا را رسم کرد. رابطه استفاده شده در پس‌پردازنده برای تعیین پروفیل سرعت جریان در عمق برای همه‌ی حالات بررسی شده، رابطه توانی است که عبارت است از [۱۲]:

$$\frac{u}{u_{90}} = \left(\frac{Y}{Y_{90}}\right)^{1/n} \quad (19)$$

که Y_{90} عمق مشخصه مخلوط یکنواخت با غلظت هوای موضعی ۹۰ درصد (با مبدأ Y از بستر جریان) و u_{90} سرعت در عمق Y_{90} است. پارامتر n در محدوده‌ی ۱ تا ۷ است که در این پژوهش برابر ۶ در نظر گرفته شده است. سپس می‌توان نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی را به صورت سرعت بی‌بعد V/V_{90} در برابر عمق جریان بی‌بعد شده Y/Y_{90} نمایش داد و با اندازه‌گیری‌های میدانی *Cain*

۶-۱- نتایج شیوه اول

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از مدل عددی، از هم‌خوانی خوبی با نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی دارد. در این محاسبات برای تعیین محل آغاز هواگیری از رابطه *Ferrando* (۲۰۰۲) استفاده شده است. ایستگاه ۵۰۱، ناحیه‌ای است که غلظت هوا هنوز به کف تنداب نرسیده است. ایستگاه ۵۰۱، در ناحیه جریان در حال توسعه و به‌طور جزئی هواگیری شده است. در این مقطع در حل عددی به خاطر وجود خطا در محاسبه محل برخورد لایه مرزی با سطح آب، هیچ غلظتی برای هوا در شیوه اول محاسبه نشده است. در واقع با توجه به این‌که در شیوه اول مدل‌سازی، نقطه آغاز هواگیری بعد از ایستگاه ۵۰۱ است، غلظت هوا در این ایستگاه، صفر محاسبه شده است. در ایستگاه ۵۰۳، که ناحیه جریان در حال توسعه و به‌طور کامل هواگیری شده است، نیز به خاطر خطا در محاسبه فاصله نقطه آغاز هواگیری، غلظت هوا اندکی کمتر از اندازه‌گیری‌های میدانی است. در ایستگاه ۵۰۵ که ناحیه جریان کاملاً توسعه‌یافته و به‌طور کامل هواگیری شده است؛ غلظت هوا، همخوانی نسبتاً خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی دارد.

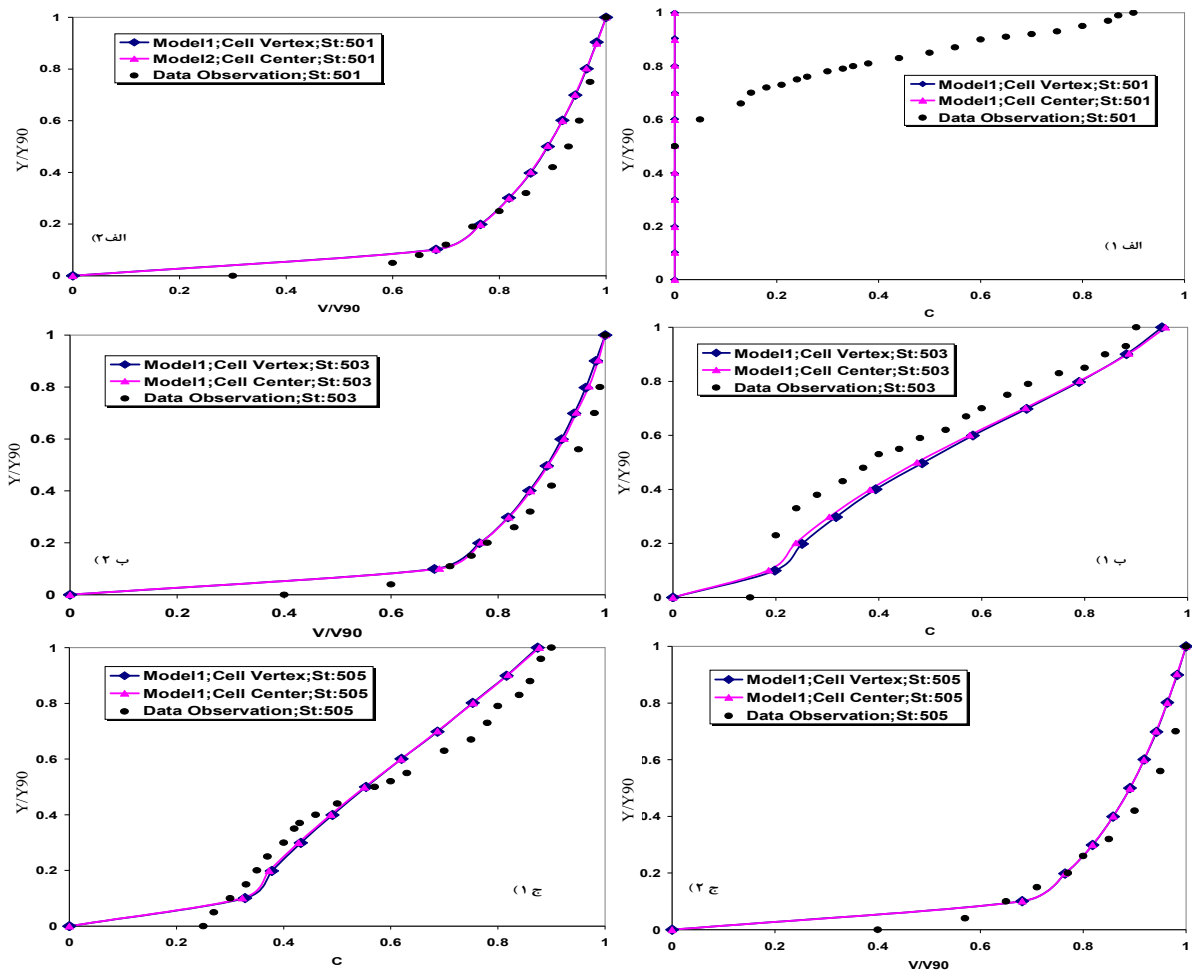
در جدول ۹، میانگین اختلاف و بیشینه‌ی اختلاف سرعت بی‌بعد شده و غلظت هوای ایجادشده از شیوه اول با اندازه‌گیری‌های میدانی در سه ایستگاه ۵۰۱، ۵۰۳ و ۵۰۵ آورده شده است. همان‌طور که اشاره شده در ایستگاه ۵۰۱ با استفاده از مدل‌سازی به روش شیوه اول، هیچ‌گونه غلظت هوایی مشاهده نشده و غلظت هوا در ایستگاه ۵۰۵ کمترین درصد خطا را دارد.

جدول (۷) مقایسه غلظت هوای میانگین به دست آمده از مدل عددی با اندازه گیری های میدانی در ایستگاه ۵۰۳

شیوه (۳)		شیوه (۲)		شیوه (۱)		مقدار واقعی	روش حل معادلات
درصد خطا	مقدار عددی	درصد خطا	مقدار عددی	درصد خطا	مقدار عددی		
۱/۸۶٪	۰/۴۵۴۰٪	۱/۹۱٪	۰/۴۵۴۲٪	۳/۰۳٪	۰/۴۵۹۲٪	۰/۴۴۵۷٪	رئوس سلول هم پوشان
۰/۲۵٪	۰/۴۴۶۸٪	۰/۲۵٪	۰/۴۴۶۸٪	۰/۹۲٪	۰/۴۴۹۸٪	۰/۴۴۵۷٪	مرکزیت سلول

جدول (۸) مقایسه سرعت میانگین به دست آمده از مدل عددی با اندازه گیری های میدانی در ایستگاه ۵۰۳

شیوه (۳)		شیوه (۲)		شیوه (۱)		مقدار واقعی (متر بر ثانیه)	روش حل معادلات
درصد خطا	مقدار عددی (متر بر ثانیه)	درصد خطا	مقدار عددی (متر بر ثانیه)	درصد خطا	مقدار عددی (متر بر ثانیه)		
۳/۶۱٪	۱۷/۰۱	۳/۶۵٪	۱۷/۰۰۳	۱۸/۳۵٪	۱۴/۴۱	۱۷/۶۴۸	رئوس سلول هم پوشان
۰/۸۶٪	۱۷/۸	۰/۸٪	۱۷/۷۹	۴/۲۲٪	۱۶/۹۰۴	۱۷/۶۴۸	مرکزیت سلول



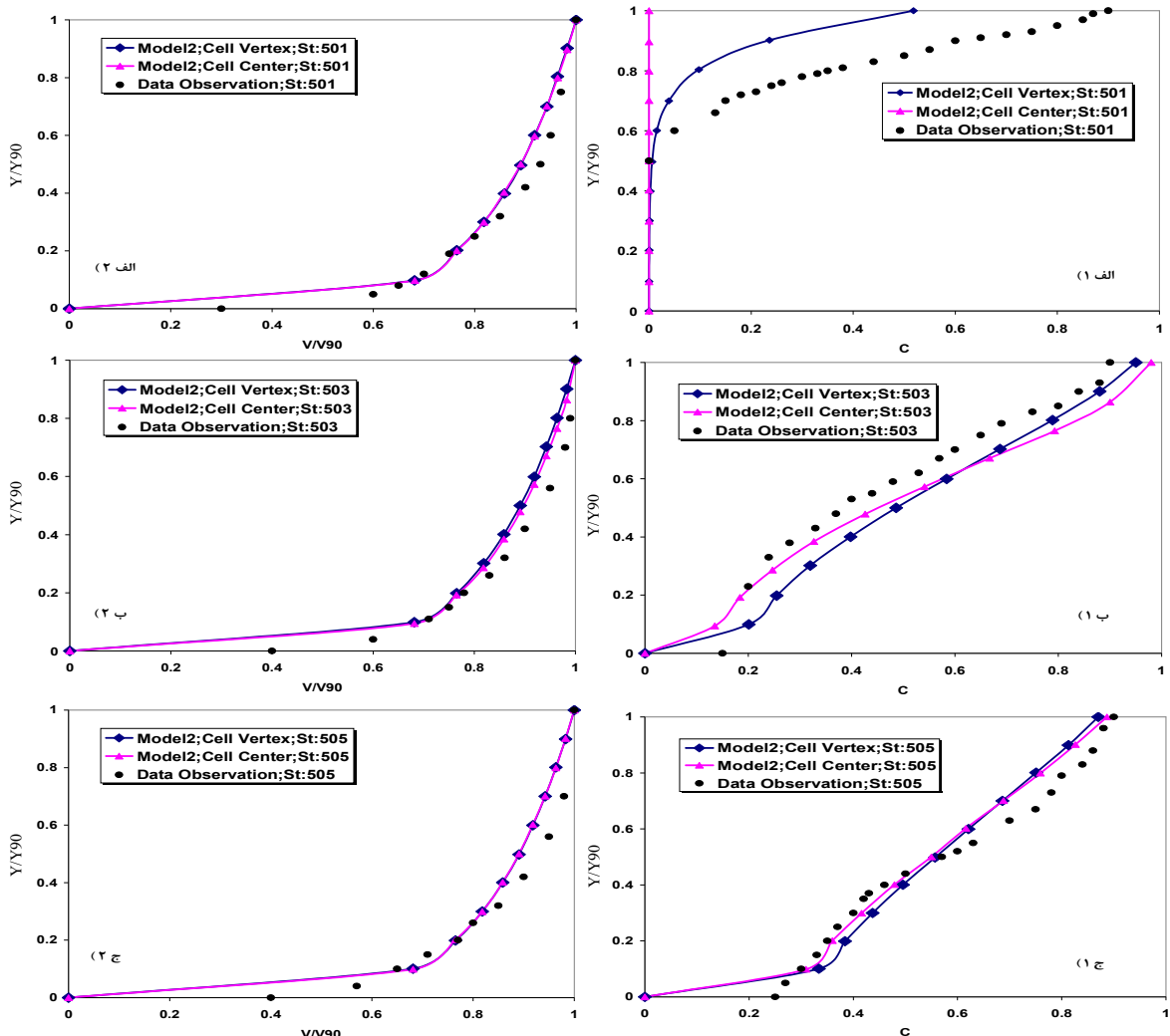
شکل (۵) مقایسه پروفیل عمقی سرعت بی بعد و توزیع عمقی غلظت هوای ایجاد شده از شیوه اول با اندازه گیری های میدانی در ایستگاه های الف (۵۰۱)

ب (۵۰۳ ج) ۵۰۵

۶-۲- نتایج شیوه دوم مدل‌سازی

در شیوه دوم نیز زمانی که نمودار سرعت به صورت بی‌بعد نمایش داده شود نتایج مشابه شیوه اول است که در شکل ۶، ایستگاه‌های ۵۰۱، ۵۰۳ و ۵۰۵ با اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از دو روش رئوس سلول هم‌پوشان و مرکزیت سلول مقایسه شده است که هر دو روش نتایج مشابهی داده است. همچنین در این شیوه با در نظر گرفتن هوا هنگام حل معادلات آب‌های کم‌عمق و تأثیر آن بر ضریب زبری و عمق، فاصله نقطه آغاز هواگیری، درصد خطای کمتری نسبت به شیوه اول دارد

که در بخش قبل به آن اشاره شد. با کاهش خطای فاصله نقطه آغاز هواگیری در ایستگاه ۵۰۱ نیز غلظت هوا با استفاده از روش رئوس سلول هم‌پوشان مشاهده می‌شود و این کاهش درصد خطای فاصله نقطه آغاز هواگیری با اندازه‌گیری‌های میدانی سبب شده تا دو ایستگاه ۵۰۳ و ۵۰۵ نیز انطباق بهتری نسبت به شیوه اول با اندازه‌گیری‌های میدانی داشته باشد. در جدول ۱۰، درصد اختلاف میانگین و بیشینه اختلاف حاصل از شیوه دوم مدل‌سازی و اندازه‌گیری‌های میدانی آمده است.



شکل (۶) مقایسه پروفیل عمقی سرعت بی‌بعد و توزیع عمقی غلظت هوای ایجاد شده از شیوه دوم با اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه‌های الف)

۵۰۱ (ب) ۵۰۳ (ج) ۵۰۵

جدول (۹) خطای شیوه اول مدل‌سازی نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی

ایستگاه ۵۰۵		ایستگاه ۵۰۳		ایستگاه ۵۰۱		درصد خطا
سرعت	غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	
۲/۶۳٪	۵/۳۶٪	۱۶/۹۹٪	۲/۶۱٪	-	۲/۴۳٪	میانگین اختلاف
۵/۵۵٪	۱۱/۴۳٪	۳۲/۱۴٪	۴/۴۴٪	-	۵/۵۵٪	بیشینه اختلاف

جدول (۱۰) خطای شیوه دوم مدل‌سازی نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی

ایستگاه ۵۰۵		ایستگاه ۵۰۳		ایستگاه ۵۰۱		درصد خطا
سرعت	غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	
۲/۶۳٪	۵/۵۱٪	۱۱/۸۲٪	۲/۶۱٪	۳۷/۲۲٪	۲/۴۳٪	میانگین اختلاف
۵/۵۵٪	۱۱/۴۲٪	۲۵/۰۰٪	۴/۴۴٪	۶۳/۴۳٪	۵/۵۵٪	بیشینه اختلاف

۶-۳- نتایج شیوه سوم مدل‌سازی

در شکل ۷، نتایج شیوه سوم برای هر دو روش حل (رئوس سلول هم‌پوشان و مرکزیت سلول) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استفاده از شیوه سوم (که در آن تغییرات غلظت هوا در طول جریان نیز در نظر گرفته شده است) در نظر گرفتن چگالی مخلوط آب و هوا در حل معادلات آب‌های کم‌عمق (شیوه سوم) تأثیر محسوسی بر نتایج نسبت به شیوه دوم نداشته است. در جدول ۱۱، میانگین و بیشینه‌ی اختلاف نتایج شیوه دوم مدل‌سازی و اندازه‌گیری‌های میدانی آمده است.

۷- نتیجه‌گیری

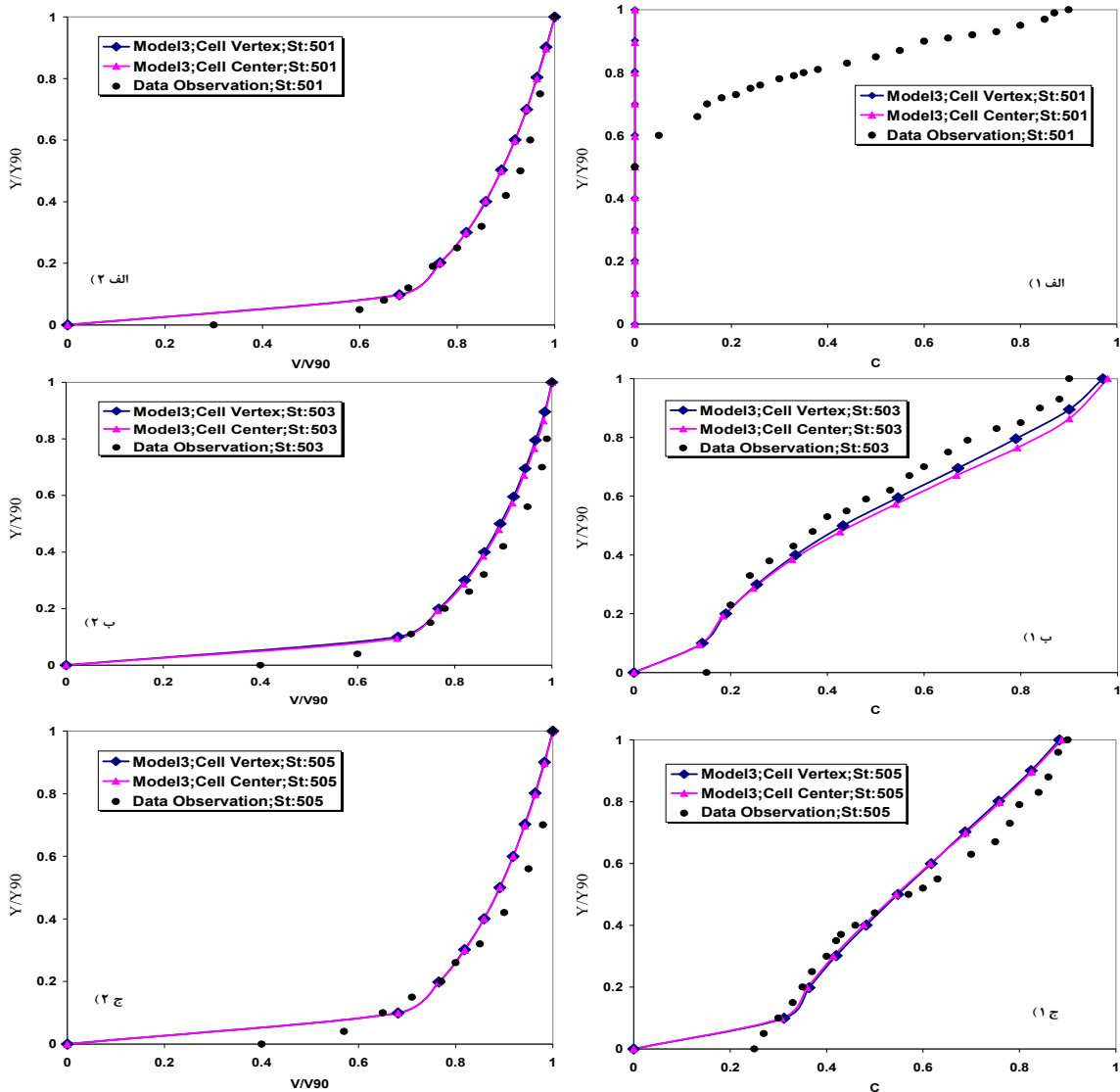
با توجه به نتایج سه شیوه منظور کردن غلظت هوا و دو روش حل معادلات جریان (رئوس سلول هم‌پوشان و مرکزیت سلول) می‌توان نتیجه گرفت که:

از میان روابط مربوط به تعیین فاصله نقطه آغاز هواگیری، رابطه *Rico* و *Ferrando* (۲۰۰۲) [۹] و از میان روابط مربوط به عمق نقطه آغاز هواگیری، رابطه *Wood* و *Cain* (۱۹۸۳) [۳]، در هر دو شیوه یک و دو بهترین نتیجه را می‌دهد.

با مقایسه سرعت میانگین به دست آمده از نرم‌افزار *NASIR*، با اندازه‌گیری‌های میدانی، دیده می‌شود که روش مرکزیت سلول در دو شیوه دوم و سوم، اختلاف بسیار کمی با اندازه‌گیری‌های میدانی دارد.

همان‌گونه که در این مقایسه‌ها دیده می‌شود، در هر سه شیوه منظور کردن غلظت هوا، با استفاده از هر دو روش حل، بجز مقطع اول که به خاطر وجود خطا در محاسبه محل برخورد لایه مرزی با سطح آب، هیچ غلظتی برای هوا محاسبه نشده است، در بقیه موارد (ایستگاه‌های ۵۰۳ و ۵۰۵) هم‌خوانی نسبتاً خوبی بین نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری میدانی وجود دارد.

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۷ می‌توان با صراحت گفت که دقت روش‌های دوم و سوم که در آن‌ها پارامترهای جریان (عمق و سرعت) و غلظت هوا به‌طور هم‌زمان حل می‌شوند، بسیار بیشتر از دقت روش اول است که در آن مدل‌سازی پارامترهای جریان، بدون توجه به تأثیر غلظت هوا، حل می‌شوند. بنابراین لازم است برای مدل‌سازی صحیح جریان در سرریزهای تنداب، تأثیرات غلظت هوای موجود بر افزایش عمق و کاهش استهلاک جریان، هم‌زمان با حل عددی جریان آب، منظور شود.



شکل (۷) مقایسه پروفیل عمقی سرعت بی‌بعد و توزیع عمقی غلظت هوای ایجاد شده از شیوه سوم با اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه‌های الف)

(ب) ۵۰۱ (ج) ۵۰۵

جدول (۱۱) خطای شیوه سوم مدل‌سازی نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی

ایستگاه ۵۰۵		ایستگاه ۵۰۳		ایستگاه ۵۰۱		درصد خطا
غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	سرعت	غلظت هوا	سرعت	
۵/۵۱٪	۲/۶۳٪	۱۱/۸۲٪	۲/۶۱٪	-	۲/۴۳٪	میانگین اختلاف
۱۱/۴۲٪	۵/۵۵٪	۲۵/۰۰٪	۴/۴۴٪	-	۵/۵۵٪	بیشینه‌ی اختلاف

راستای مختصاتی در تحلیل عددی جریان مخلوط آب و هوا در سرریز تندابی که از سطح جریان هواگیری شده،

مقایسه بین نتایج روش‌های دوم و سوم مدل‌سازی در این پژوهش نشان داد منظور کردن تفاوت چگالی در دو

- [9] Fernando, A.M & Rico, J.R. (2002), "On the Incipient Aerated Flow in Chutes and Spillways", Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, No.1, 1752-1762
- [10] Kramer, K (2004); "Development of Aerated Chute Flow"; Doctoral Thesis ETH No. 15428; Dipl.-Ing. Technical University of Darmstadt (TUD)
- [11] Namin, M.M. & Falconer R.B. & Mohammadian, M. & Lin, B & Kamalian, R, (2002); "Hydro-Environmental Modeling and Analysis Tool (HEMAT)", A GUI base 2DH Hydrodynamic and Contaminant Transport Model on Unstructured Triangular Grids, Hydroinformatics, Cardiff, U.K
- [12] Sabbagh-Yazdi, S.R. Zounemat-Kermani, M. & Mastorakis, N.E. (2007); "Velocity Profile over Spillway by Finite Volume Solution of Sloping Depth Averaged Flow" WSEAS Journal of Applied and Theoretical Mechanics, Issue 3, Vol. 2, 85-94
- [13] Sabbagh-Yazdi SR and Zounemat-Kermani M, (2009) " Numerical Solution of Tidal Currents at Marine Waterways Using Wet and Dry Technique on Galerkin Finite Volume Algorithm" Journal of Computers & Fluids, Vol. 38, 1876-1886
- [14] Sabbagh-Yazdi, S.R. Zounemat-Kermani, M. & Kermani, A. (2007); " Solution of Depth-Averaged Tidal Currents in Persian Gulf on Unstructured Overlapping Finite Volumes" International Journal for Numerical Method in Fluids, 81-101
- [15] Sabbagh-Yazdi, S.R. Zounemat-Kermani, M. (2010); " Conjunction of 2D and 3D Modified Flow Solvers for Simulating Spatiotemporal Wind Induced Hydrodynamics in the Caspian Sea" Ocean Science Journal, 113-128
- [16] Sabbagh-Yazdi, S.R. SaeediFar, A.B. & Mastorakis N.E. (2008); " A Cell Center Finite Volume Depth Average Flow Solver for Simulation of Erosion, Transport and Deposition of Fine Non-Cohesive Sediments" International Journal of Computers, Issue 1, Vol. 2, 47-57
- تأثیر بسیار کمی دارد؛ پس می‌توان در مدل‌سازی چنین جریان‌هایی از منظور کردن عبارت تغییرات چگالی در ایجاد مقدار حرکت، چشم‌پوشی و مدل ریاضی مسئله را از این دیدگاه ساده‌سازی کرد.
- ## ۹- مراجع
- [۱] صباغ یزدی، س ر؛ "شار انتقالی جهت‌دار در مرزهای حجم محدود بی‌ساختار با گام محاسباتی چندمرحله‌ای برای شبیه‌سازی امواج سطحی ایستا در تنداب تنگ شونده" مجله هیدرولیک، ۵۱-۵۳، ۱۳۸۶
- [2] Balas. L. & Ozhan. E. (2000); "An Implicit Three-Dimensional Numerical Model to Simulate Transport Processes in Coastal Water Bodies"; International Journal for Numerical Methods In Fluids, 307-339
- [3] Cain, P & Wood, I. R. (1983) "Measurements of Self- Aerated Flow on Spillways", J. of Hyd. Div., 107, HY11, 1425-1444
- [4] Chanson, H. (1988); "Study of Air Entrainment and Aeration Devices on Spillway Model"; A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree at the University of Canterbury, New Zealand
- [5] Chanson, H. (1995); "Air Concentration Distribution in Self-Aerated Flow - Discussion." Journal of Hydraulic Engineering. Res., IAHR, Vol. 33, No. 4, 586-588.
- [6] Chanson, H. (1994); "Air-Water Interface Area in Self-Aerated Flow." Water Res., IAWPRC, Vol. 28, No. 4, 923-929.
- [7] Chanson, H. (1993); "Self-Aerated Flows on Chutes and Spillways." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 220-243. Discussion: Vol. 120, No. 6, 778-782
- [8] Chanson, H. (1992); "Uniform Aerated Chute Flow, Discussion." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, 944-955

- [22] Sabbagh-Yazdi, S.R. Safaieh, R. & Mastorakis NE (2008);" 3 Modeling Strategies for Computing Aerated Skimming Flow Parameters over Stepped Chutes using Depth Averaged Flow Solver", Intrnational Journal of Mathematics and Computer In Simulation, Issue 2, Vol. 2, 134-144
- [23] Sabbagh-Yazdi & Mastorakis NE (2008);" Comparing Central and Upwind Flux Averages Schemes of Overlapping Finite Volume Method For Simulation of Spillway Flow With Shock Waves", Intrnational Journal of Computer, Issue 1, Vol. 2, 23-31
- [24] Unami, K. & Kawachi, T. & Munir, B. & Itagaki, H. (1999);"Two Dimensional Numerical Model of Spillway Flow" Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, No.5, 369-375
- [25] Wilhelm, S.(2005);"Bubbles and Waves Description of Self-Aerated Spillway Flow" Journal of Hydraulic Research Vol. 43, No. 5, 522-531
- [26] Younus, M. & Chaudhry, M. H. (1994);" A Depth-Averaged $k-\epsilon$ Model for the Computation of Free Surface Flow" Journal of Hydraulic research, Vol.32, No.3, 415-444
- [27] Zarrati, A.R, Jalili, M.R. & Safavi, Kh.(2007);"Development of a 2-D Numerical Model for Simulation of Air Distribution in High Speed Air Water Flow" International Journal of Civil Engineering, Vol.5, No.1 , 1-13
- [17] Sabbagh-Yazdi, S.R. SaediFar, A.B. & Mastorakis N.E. (2007);"Accurate and Efficient Numerical Solution of Trans-Critical Steady Flow in a Channel with Variable Geometry" WSEAS Journal of Fluid Mechanics, Issue 1, Vol. 2, 1-10
- [18] Sabbagh-Yazdi, S.R. Rezaei-Manizani, H. & Mastorakis NE (2007);"Multi-Layer Computation of Coupled Finite Volume Solution of Depth-Averaged Flow in Steep Chute Spillways Considering Air Concentration Effects", WSEAS Journal of Fluid Mechanics, Issue 4, Vol. 2, 69-76
- [19] Sabbagh-Yazdi, S.R. Rezaei-Manizani, H. & Mastorakis NE (2007);" Comparison of the Results of 2D and 3D Numerical Modeling of Flow over Spillway Chutes with Vertical Curvatures", Intrnational Journal of Computers, Issue 4, Vol. 1, 296-302.
- [20] Sabbagh-Yazdi, S.R. Rezaei-Manizani, H. & Mastorakis NE (2007);" Effects of Bottom Aerator and Self Aeration in Steep Chute Spillways on Cell Center Finite Volume Solution of Depth-Averaged Flow", Intrnational Journal of Mathematical Models and methods In Applied Sciences, Issue 4, Vol. 1, 296-302
- [21] Sabbagh-Yazdi, S.R. Arabi, H. & Mastorakis NE (2007);" Multi-Layer Simulation of Circulations in an Artificial Shallow Lake", Intrnational Journal of Mechanics, Issue 3, Vol. 1, 45-53

Using Depth Average Flow Solver of *NASIR* Finite Volume Software for Modeling Air Entrainment from Water Surface in Chute Flow

S.R. Sabbagh-Yazdi¹, H. Rezaei-Manizani^{2*}

1- Professor of Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology

2- Graduation M.Sc. of Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology

Rmanizani@gmail.com

Abstract:

In this paper, the results of water flow modeling and computation of air distribution in chute spillways are described. The depth average flow solver of *NASIR* finite volume software was utilized for modeling of water flow in chute spillways. In this module, the shallow water equations modified for steep slopes are solved using cell-centre and cell-vertex schemes of finite volume method that suits unstructured triangular meshes. Using the computed velocity components and flow depth at each nodal point, the air entertainment parameters (air inception point, mean air concentration and vertical distribution of air concentration) are calculated by utilizing some empirical relations. The empirical relations for the air concentration were adopted by the pervious researchers using the measurements on large scale flow in chute spillways.

In the present work, three modeling strategies were performed: 1) Solution of flow field and then calculation of air concentration parameter (as a post-processing operation after convergence of the water flow solution), 2) Coupled solution of the flow equations and air concentration relations considering the flow bulking and reduction of global friction parameters due to air entrainment and 3) Adding the air entrainment on density variation effects to the coupled solution of the flow equations and air concentration relations considering the flow bulking and reduction of global friction parameters due to air entrainment.

In order to assess the quality of the results of the three modeling strategies, the readily available flow velocity and air concentration measurements on AVIMORE chute spillway were used for comparison considering the best experimental relations for simulating the entrainment of air into the flow on chute spillways. In order to provide better understanding of the velocity and air concentration, the vertical distribution profiles of these parameters were plotted from the multi-layer treatments of depth averaged computed results.

Comparison of the computed velocity fields and air concentrations with the reported field measurements at the stations 503 and 505 of AVIEMORE chute spillway presents promising agreements. However, the accuracy of the 2nd and 3rd modeling strategies (in which the coupled solutions of water flow equations and air concentration relations are considered and the effect of air content on the reduction of global friction of the water flow is taken into consideration) was much better than that of the 1st modeling strategy (in which the air concentration relations are considered as post processing on water flow equation solution for depth and velocity fields). Furthermore, no significant differences were observed between the results of the 2nd and 3rd modeling strategies. Hence, it can be concluded that the effect of air concentration on density variation of the supercritical water flow does not play an important role on the results of the coupled solutions of water flow equations and air concentration relations.

Keywords: Modeling chute spillway flow, Vertical distribution of air entrainment from water surface, SWE for steep slope.