

بررسی عددی روند تغییرات غلظت هوا در جریان‌های عبوری از روی تنداب‌ها

آروین بهرامی^۱، غلامعباس بارانی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

* کرمان، صندوق پستی ۱۳۳-۷۶۱۶۹

gab@mail.uk.ac.ir

چکیده- یکی از عوامل مهم در طراحی سرریز سدها، در نظر گرفتن ظرفیت تخلیه مناسب است. یکی از خطرهایی که در هنگام عبور سیلاب‌های شدید سرریزها را تهدید می‌کند، امکان ایجاد فشار منفی بر روی سرریز و در نتیجه وقوع پدیده خلأزایی (کاویتاسیون) است. یکی از بهترین روشهای موجود برای جلوگیری از وقوع این پدیده، استفاده از هوادها است. شناخت نحوه تغییرات غلظت هوا در طول تنداب، یکی از مشکلات اساسی در طراحی هوادها است. هر چند استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی در مطالعه فرایندهای هیدرولیکی از مزایای خاصی برخوردار است، اما این مدل‌ها هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند. در این بررسی از مدل عددی FLOW-3D برای تعیین معادله تغییرات غلظت هوای لایه تحتانی جریان در حالتی که هوادهی با استفاده از دفلکتورها صورت گرفته، استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این مدل با نتایج آزمایشگاهی کرامر مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شده است. همچنین نمودار تغییرات غلظت هوا، نشان‌دهنده روند کاهش نمایی غلظت هوا در طول تنداب است.

کلید واژگان: سرریز سد، خلأزایی، هوادهی جریان، نرم‌افزار FLOW-3D، غلظت هوا.

۱- مقدمه

هیدرولیکی کارآمد بوده و از نظر سازه‌ای استحکام کافی داشته باشد، در حفظ ایمنی سد و مناطق پایین‌دست آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از عوامل مهم در طراحی سرریزها، در نظر گرفتن ظرفیت تخلیه مناسب است. با پیشرفت علم هواشناسی و هیدرولوژی و امکان محاسبه حداکثر سیلاب محتمل، طراحی مناسب سرریزها امکان‌پذیر شده است. یکی از خطرهایی که در هنگام عبور سیلاب‌های شدید سرریزها را تهدید می‌کند، امکان

سرریزها یکی از اجزای اساسی در حفظ پایداری سدها هستند. از این سازه‌ها به‌منظور تخلیه جریانهای مازاد به پایین‌دست سد در مواقع سیلابی و جلوگیری از خرابی‌های ناشی از عبور آنها از روی سد استفاده می‌شود. انتخاب و طراحی نوع سرریز به اهداف پروژه، عوامل هیدرولوژیکی، توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه و عوامل اقتصادی بستگی دارد. طراحی سرریزی که از نظر

مختلفی بیان شده، اما در بیشتر منابع موجود به این نکته اشاره شده که حضور مقدار کمی هوا در نزدیکی مرزهای جامد سرریز، خطر وقوع خلأزایی را به میزان زیادی کاهش می‌دهد (کرامر، ۲۰۰۴).

یکی از مشکلات موجود در طراحی هواده‌ها تعیین مکان و فاصله مناسب آنها است. حل این معضل نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی دقیقی است که فرایند ورود و خروج هوا را به‌دقت ثبت کند. فاصله کم هواده‌ها، علاوه بر اینکه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، به علت وارد کردن حجم زیاد هوا ممکن است، خود باعث ایجاد خلأزایی شود. از طرفی فاصله زیاد هواده‌ها باعث عدم کارایی آنها خواهد شد (کرامر، ۲۰۰۶). بنابراین شناخت نحوه تغییرات غلظت هوا، به‌ویژه در سطح تنداب، گام مهمی در طراحی هواده‌ها است. اولین تلاشها برای محاسبه تغییرات غلظت هوا در طول تنداب توسط استراب و اندرسون (۱۹۵۸) و اندرسون (۱۹۶۵) انجام شده است. سپس محققان دیگری مانند فالوی (۱۹۸۰) ضمن گسترش مطالعه استراب و اندرسون با در نظر گرفتن عدد فرود جریان (F)، عدد وبر (W) و شیب کف تنداب (α) معادله زیر را برای محاسبه میانگین درصد غلظت هوا (\bar{C}_{99u}) پیشنهاد کرده اند (کرامر، ۲۰۰۴):

$$\bar{C}_{99u} = 0.05F - \frac{\sin(\alpha)^{1/2} W}{63F} \quad 0 \leq \bar{C}_{99u} \leq 0.6 \quad (2)$$

که در آن اثر کشش سطحی σ_t ، چگالی آب ρ و قطر حباب های هوا d_{bu} در عدد وبر W در نظر گرفته شده است:

$$W = \bar{u} / (\sigma_t / (\rho d_{bu}))^{1/2} \quad (3)$$

هیجر (۱۹۹۱) نشان داد که میانگین درصد غلظت هوا در عرض تنداب فقط به شیب کف تنداب (α) بستگی دارد. وی با استفاده از روش اختلاف محدود صریح، معادله زیر را برای اندازه‌گیری میانگین غلظت هوا ارائه کرد:

ایجاد فشار منفی بر روی سرریز و در نتیجه خلأزایی (کاویتاسیون) است. در سرعت‌های زیاد، فشار روی سرریز تا حد فشار بخار آب کاهش می‌یابد که به تشکیل حباب‌های بخار منجر می‌شود. با انتقال این حباب‌ها به قسمت پر فشار در پایین‌دست و انفجار آنها در نزدیکی سطح سرریز، خلأزایی به وقوع می‌پیوندد.

در زمینه مطالعه احتمال وقوع خلأزایی در سازه‌های هیدرولیکی نظرهای متفاوتی ارائه شده که در این میان استفاده از شاخص خلأزایی (σ) - که بر اساس معادله برنولی محاسبه می‌شود - کاربرد بیشتری دارد

$$\sigma = \frac{P_0 - P_V}{\rho \frac{u^2}{2}} \quad (1)$$

که در آن \bar{u} سرعت میانگین جریان، ρ چگالی آب، P_V فشار بخار آب و P_0 فشار محلی است که از مجموع فشار اتمسفر P_A و فشار پیزومتری P_g به‌دست می‌آید ($P_0 = P_A + P_g$). در حالتی که $\sigma \leq 0.7$ و یا سرعت جریان از ۲۵ m/sec بیشتر شود، خطر وقوع خلأزایی تشدید می‌شود (فالوی، ۱۹۹۰). برای جلوگیری از وقوع این پدیده راه‌حل‌های متفاوتی مانند مقاوم‌سازی سطح سرریز (استفاده از بتون الیافی)، حذف نامنظمی‌های موجود در سطح آن، یا دور نگه داشتن انفجار حباب‌ها از سطح سرریز با استفاده از دفلکتورها پیشنهاد شده است (کوکینار و گوگوس ۲۰۰۲). هواده‌ی به جریان به‌عنوان یکی از معمول‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها از دهه ۱۹۷۰ میلادی استفاده شده است. بر طبق نظر فالوی (۱۹۹۰) در صورتی که شاخص خلأزایی از مقدار بحرانی کمتر شود ($\sigma \leq 0.7$)، فقط با استفاده از هواده‌ها می‌توان سطح سرریز را هواده‌ی و در مقابل خطرهای ناشی از خلأزایی محافظت کرد. هر چند در باره میزان دقیق غلظت هوای مورد نیاز برای جلوگیری از وقوع خلأزایی نظرهای

رودخانه‌های کوهستانی و کانال‌های منظم با زبری غیریکنواخت ارائه کرده است:

$$\bar{C}_{99u} = 1.44 \sin \alpha - 0.08 \quad (۷)$$

افزایش اطلاعات در زمینه هیدرودینامیک سرریزها، نیازی مهم در طراحی مطمئن‌تر آنها به‌شمار می‌رود و این کار با استفاده از مدل‌های فیزیکی و مدل‌های عددی امکان‌پذیر است. هر چند استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی در مطالعه فرایندهای هیدرولیکی از مزایای خاصی برخوردار است، اما این مدل‌ها هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند. به‌علاوه مشکلاتی در تبدیل داده‌ها از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس اصلی وجود دارد (هو و همکاران، ۲۰۰۶). از طرفی گسترش روزافزون نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ و دسترسی به کامپیوترهای مجهز و پیشرفته باعث افزایش کاربرد روشهای عددی در تحلیل جریان سیال شده و با صرف هزینه و زمان کمتری نسبت به مدل‌های فیزیکی، می‌توان رفتار سیال را در شرایط مختلف شبیه‌سازی کرد (سرتاج و همکاران، ۱۳۸۴).

در دهه‌های گذشته بسیاری از محققان به شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزها پرداخته‌اند که در برخی از آنها از معادلات میانگین رینولدزی ناویر- استوکس (RANS)^۲ و نرم‌افزارهای موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. اونامی و همکاران (۱۹۹۹) با استفاه از روش المان‌های محدود و حجم محدود (FVM)^۳، به بررسی جریان آزاد از روی سرریز با در نظر گرفتن هوادهی سطحی، پرداختند. برای این منظور آنان با در نظر گرفتن شبکه‌بندی مثلثی نامنظم، به حل عددی معادلات پیوستگی و بقای مومتمم به روش گالرکین (المان محدود) و حجم محدود پرداختند که نتایج این بررسی، نشان‌دهنده کارایی این روش در تحلیل

$$\bar{C}_{99u} = 0.75(\sin \alpha)^{0.75} \quad (۴)$$

چانسون در سالهای ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ روابطی را برای اندازه‌گیری دبی هوای ورودی به جریان از طریق سطح بالایی تیغه جریان (Q_{air}^{upper}) ارائه کرد و این روابط در سال ۱۹۹۴ به معادله زیر تبدیل شد:

$$\frac{Q_{air}^{upper}}{Q_w} = K_o \left[\frac{L}{d_o} \tan \Psi^U - 2 \frac{(Q_{air})_o}{P_N} \ln \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tan \Psi^U L}{(Q_{air})_o d_o} \right) \right] - 0.9 \frac{L}{d_o} \frac{U_r}{(U_w)_o} \cos \alpha \quad (۵)$$

که در آن Q_w دبی آب، L فاصله از انتهای دفکتور، U_r سرعت صعود حباب‌های هوا، d_o و $(U_w)_o$ به‌ترتیب عمق و سرعت جریان در انتهای دفکتور، $(Q_{air})_o$ دبی اولیه هوای ورودی به جریان در انتهای دفکتور و Ψ^U زاویه برخورد جت آب با کف تنداب است. چانسون (۱۹۹۷) مطالعات خود را در زمینه اندازه‌گیری میزان هوای ورودی به جریان یکنواخت با استفاده از پارامتر میانگین درصد غلظت هوا متمرکز کرد. معادله وی بر مبنای داده‌های استراب و اندرسون و بدون در نظر گرفتن دبی و زبری کف به شکل زیر ارائه شده است:

$$\bar{C}_{99u} = 0.9 \sin \alpha \quad \alpha \leq 50^\circ \quad (۶)$$

وی با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به این نتیجه رسید که در صورت تأمین میانگین غلظت هوای ۳۰٪، غلظت هوا در کف تنداب به ۵٪ می‌رسد. این غلظت برای حفاظت از سرریز در برابر خلأزایی کافی به‌نظر می‌رسد. بر طبق معادله‌ای که ایشان ارائه کرده در تنداب‌هایی با شیب بیشتر از ۲۰ درجه، میانگین غلظت هوا به‌میزان مناسب برای حفاظت از خلأزایی می‌رسد. چانسون معادله زیر را برای پیش‌بینی مقدار هوای وارد شده به جریان در

1. Computational Fluid Dynamics
2. Reynolds Averaged Navier-Stokes
3. Finite Volume Method

حاصل از مدل آزمایشگاهی کرامر و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شده است. این مدل شامل کانالی مستطیلی منشوری به طول ۱۴ متر و عرض ۰/۵ متر است که در آزمایشگاه هیدرولیک و هیدرولوژی (VAW) زوریخ سوئیس قرار دارد. شیب کف کانال در محدوده $0 < S_0 < 5\%$ قابل تغییر است. حداکثر عمق ورودی آب ۰/۱۲ متر و دبی ورودی آن $Q_w = 250$ lit/sec است. برای هوادهی به جریان، دفلکتوری به طول ۱۵۰mm و ارتفاع ۱۵mm در ابتدای تنداب به کار رفته است. هوا از طریق مجاری موجود در دیوار کناری کانال به دفلکتور وارد شده و با آب مخلوط می‌شود. همچنین در بررسی جداگانه‌ای برای مطالعه جریانهای پیش هوا داده، مقداری هوا با جریان ورودی به کانال مخلوط می‌شود. سیستم‌های اندازه‌گیری کاملاً خودکار بوده و علاوه بر پارامترهای اصلی مانند دبی آب و هوا، پارامترهایی مانند غلظت هوا در طول تنداب، قطر حباب‌ها و سرعت صعود حباب هوا را با دقت بسیار خوبی اندازه‌گیری می‌کند.

۳- مدل عددی

در مطالعه حاضر برای تحلیل عددی جریان از روی تنداب از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. این نرم‌افزار توانایی تحلیل میدان جریان دوبعدی و سه‌بعدی را دارد. توانایی این برنامه در ملحوظ کردن زبری دیوار، مدل‌سازی هوادهی و خلأزایی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نرم‌افزار FLOW-3D از روش حجم محدود برای حل معادلات میانگین رینولدزی ناویر-استوکس (RANS) استفاده می‌کند.

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{RSOR}{\rho} \quad (8)$$

هیدرولیکی سرریزها است. چارلز و زو (۱۹۹۹) با استفاده از روش عددی حجم محدود، اثر هندسه سرریزهای تونلی را بر جریان آزاد عبوری از آنها بررسی کردند. کاوسون و همکاران (۱۹۹۹) روش‌های محاسبه جریان‌های فوق بحرانی در سرریزها را بررسی کردند. در این بررسی معادلات دوبعدی و غیرخطی آب‌های کم‌عمق به روش حجم محدود حل شده است. ساویچ و جانسون (۲۰۰۱) جریان رادر سرریزهای اوجی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D[®] مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل از این نرم‌افزار را با ضوابط طراحی USBR¹ و USACE² مقایسه کردند.

بررسی مشابهی توسط هو و همکاران (۲۰۰۱) انجام شده که از نتایج آن در اصلاح سرریز در برخی سدهای استرالیا استفاده گردیده است. درگاهی (۲۰۰۶) نیز با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان عبوری از روی سرریزها پرداخته است.

در این پژوهش سعی شده با شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی تنداب، غلظت هوای لایه تحتانی جریان و نحوه تغییرات آن در طول تنداب محاسبه شود. برای این منظور از نرم‌افزار FLOW-3D[®] استفاده شده است. به کمک این نرم‌افزار غلظت هوای موجود در جریان بعد از هواده محاسبه شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی کرامر مقایسه شده است. همچنین اثر تغییرات عدد فرود و شیب کف تنداب بر نحوه تغییرات غلظت هوا در لایه تحتانی جریان مطالعه شده است.

۲- مدل آزمایشگاهی کرامر

برای تعیین اثر هواده‌ها، محاسبه غلظت هوا و نحوه تغییرات آن در طول تنداب با استفاده از مدل عددی و سنجش صحت نتایج به‌دست آمده، از نتایج اندازه‌گیری

1. United States Bureau of Reclamation
2. U. S. Army Corps of Engineers

کسر حجمی هوا (f_a) از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هیرت، ۲۰۰۳):

$$\rho = (1 - f_a) \rho_{\text{hof}} + f_a \rho_{\text{hofs}} \quad (10)$$

که در آن ρ چگالی مخلوط جریان و ρ_{hof} نشان‌دهنده چگالی سیال است. با محاسبه ρ توسط نرم‌افزار و معلوم بودن مقادیر ρ_{hofs} و ρ_{hof} کسر حجمی هوا محاسبه می‌شود. در حالتی که مانند بررسی حاضر $\rho_{\text{hofs}} / \rho_{\text{hof}} \ll 1$ باشد ($\rho_a / \rho_w = 0.001$)، معادله زیر با تقریب خوبی قابل استفاده می‌باشد:

$$f_a = (\rho_{\text{hof}} - \rho) / \rho_{\text{hofs}} \quad (11)$$

محدوده محاسباتی در محورهای مختصات دکارتی و به صورت مکعبی با ابعاد معین، مشخص می‌شود. نرم‌افزار FLOW-3D برای حل معادلات آشفتگی از مدل‌های متفاوتی مانند مدل دومعادله‌ای $k - \epsilon$ ، مدل LES، مدل RNG، و طول اختلاط پراپرتی استفاده می‌کند. در این مطالعه از مدل RNG استفاده شده که دقت بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. مانع موجود در این بررسی تداوم است که به روش FAVOR در محدوده‌ای مستطیلی مشخص می‌شود. در این روش که به وسیله هیرت و همکاران (۱۹۸۵) ارائه شده، برای تشخیص وجود مانع در هر سلول، از اعدادی بین صفر و یک استفاده می‌شود، که حجم فضای خالی در سلولی که تمام آن توسط مانع پر شده برابر صفر و در سلول‌های خالی برابر یک است. سلول‌هایی که فقط در بخشی از آنها مانع وجود دارد، متناسب با درصد حجمی پر شده توسط مانع، تخلخلی بین صفر و یک دارند. یکی از مهم‌ترین مزایای نرم‌افزار FLOW-3D در تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی آن در مدل‌سازی دقیق مسائلی است که با جریان‌هایی با سطح

در این معادله V_F کسر حجمی سیال، ρ چگالی سیال، و RSOR منبع جرم است. u ، v و w مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در جهت‌های x ، y و z در مختصات کارتیزین یا α ، θ و z در مختصات استوانه‌ای و A_x ، A_y و A_z مساحت‌های جزیی در این جهت‌ها هستند. ضرایب R و ξ در معادله فوق به انتخاب سیستم مختصات بستگی داشته و در مختصات دکارتی مقدار $R=1$ و ξ برابر صفر است.

معادلات مومتم

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \end{aligned} \quad (9)$$

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب ناشی از لزجت و (b_x, b_y, b_z) افت جریان در محیط‌های متخلخل است (ساویج و جانسون، ۲۰۰۱).

تعیین مدل هوادهی برای محاسبه غلظت هوا توسط نرم‌افزار FLOW-3D که در این مطالعه استفاده شده، بر اساس اثر هوادهی در تغییر حجم و چگالی سیال انجام می‌شود. برای این منظور در فایل ورودی نرم‌افزار (XPUT) چگالی متغیر سیال با $ifrho$ (برابر ۲ برای حل معادلات مرتبه اول و برابر ۳ برای معادلات مرتبه دوم) و چگالی هوا با ρ_{hofs} قرار داده می‌شود. در این حالت حجم هوای وارد شده، به شکل افزایش در بخشی از حجم کل سیال (کسر حجمی هوا f_a) محسوب می‌شود.

1. Large Eddy Simulation
2. Re-Normalized Groups
3. Fractional Area / Volume Representation

آزاد سر و کار دارند. در این نرم افزار سطح آزاد به روش حجم سیال (VOF) محاسبه می شود. این روش از سه جزء اصلی تشکیل شده است: سطح آزاد به عنوان منطقه برخورد سیال و هوا، تعیین مکان سطح آزاد و در نهایت اعمال شرایط مرزی در این منطقه. در این روش به سلول هایی که کاملاً از سیال پر شده اند، عدد یک، به سلول های خالی از سیال عدد صفر و به سلول هایی که فقط بخشی از آن را سیال فراگرفته، عددی بین صفر و یک داده می شود. شیب سطح آزاد در هر سلول به وسیله الگوریتمی که از سلول های مجاور برای تعریف زاویه و مکان سطح آزاد استفاده می کند، تعریف می شود (راهنمای نرم افزار FLOW-3D V. 8.2).

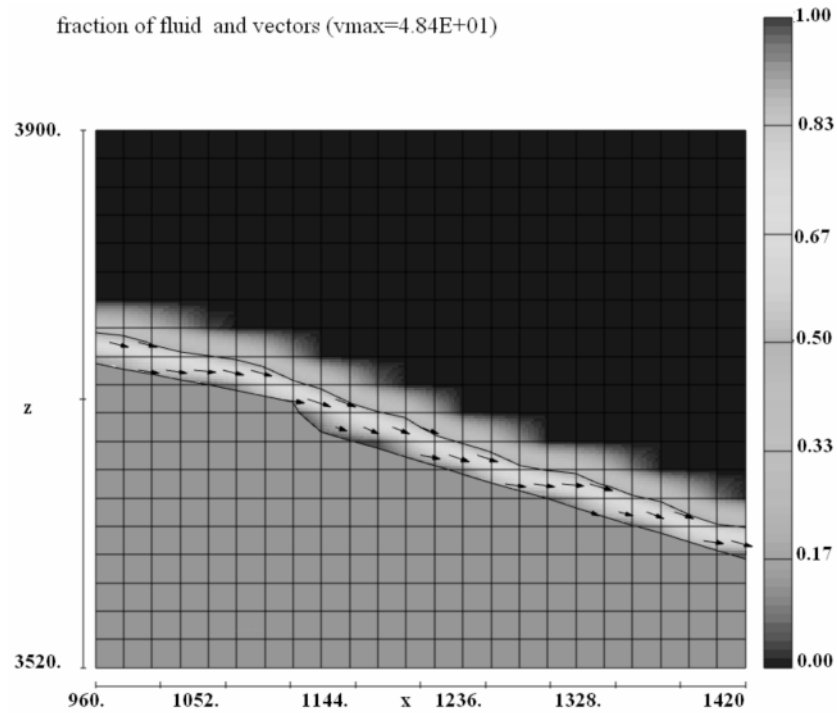
هندسه سازه مورد نظر با ابعاد و شیب هایی مشابه مدل آزمایشگاهی در نرم افزار Solid Works تولید شده و سپس به صورت فایل STL ذخیره و توسط نرم افزار FLOW-3D فراخوانی شده است. برای شبکه بندی میدان جریان در این نرم افزار پس از سعی و خطا از المان های ساده مستطیلی استفاده شده که علاوه بر سادگی در ایجاد آن، دقت بالایی نیز داشته و کمترین میزان حافظه را اشغال می کند. برای شبکه بندی از مربع هایی به طول و ارتفاع ۱ سانتی متر ($\Delta x = \Delta z = 1cm$) استفاده شده است. لازم به توضیح است که برای اندازه شبکه برابر ۲ سانتی متر عمل هواگیری به درستی نشان داده نشده است، اما برای اندازه شبکه برابر ۱ سانتی متر جهش آب از روی دفلیکتور و عمل هواگیری به خوبی نمایان است (شکل ۱).

همچنین در ابعاد کوچکتر، به علت حجم زیاد حافظه مورد نیاز، کامپیوترهای موجود توانایی حل میدان جریان را ندارند و با توجه به اینکه هدف ما تعیین غلظت هوای موجود در لایه زیرین جریان در طول تنداب می باشد؛ لذا

شبکه بندی به صورت یکنواخت انجام شد. هدف این مطالعه تعیین تغییرات غلظت هوا در جهتهای طول (x) و ارتفاع (z) بوده و شبکه بندی میدان جریان به صورت دوبعدی و در این دو جهت انجام شده است (شکل ۲). بنابراین از شبکه بندی در عرض تنداب صرف نظر شده است. با در نظر گرفتن این موضوع، تعداد کل سلول ها در دو جهت x و z و در شیب کف ۱۰٪ به ترتیب برابر ۱۵۰۰ و ۲۰۰، در شیب ۳۰٪ برابر ۱۵۰۰ و ۴۵۰ و در شیب ۵۰٪ برابر ۱۳۵۰ و ۶۵۰ است. با توجه به این که میدان جریان به صورت مکعبی با شش وجه تعریف شده، باید شش شرط مرزی برای میدان جریان در نظر گرفته شود. شرایط مرزی به کار رفته در این مطالعه به شرح زیر است:

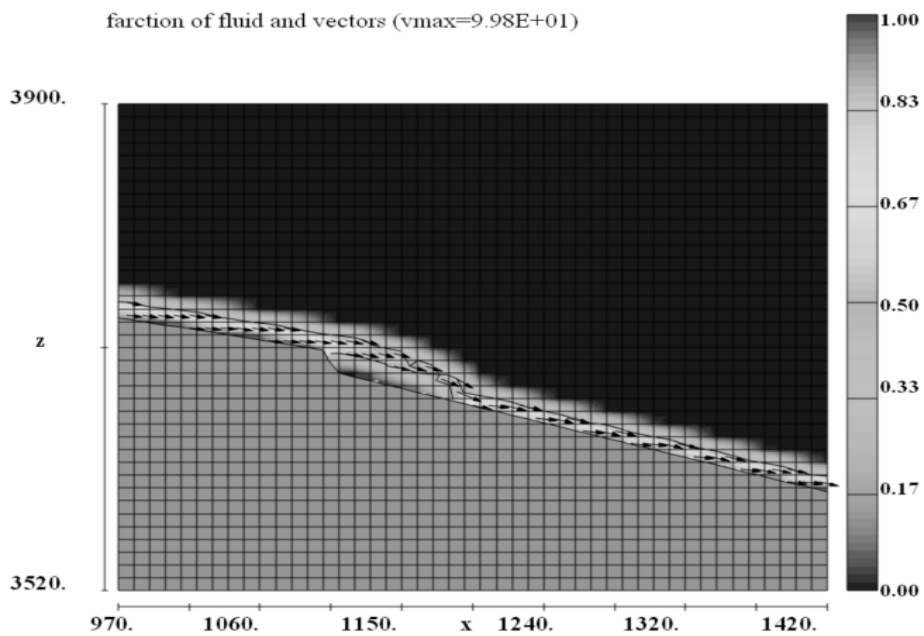
- شرط مرزی بالادست (xmin): فشار هیدرو استاتیک با سرعت صفر و ارتفاع آب متناسب با بررسی موردی.
- شرط مرزی پایین دست (xmax): پیوستگی.
- قسمت فوقانی (zmax): شرط مرزی تقارن.
- قسمت تحتانی (zmin): شرط مرزی دیوار صلب
- دیواره های جانبی (ymax و ymin): شرط مرزی تقارن (شکل ۳).

با تعیین شرایط مرزی و اولیه مناسب امکان حل عددی معادلات توسط نرم افزار فراهم می شود. شرایط اولیه اعمال شده در این مطالعه که مشابه شرایط در نظر گرفته شده توسط کرامر (۲۰۰۶) است، در جدول ۱ آورده شده است. بررسی ها برای حالتی انجام شده که هیچ گونه هوادهی اضافی انجام نشده ($Q_a = 0$) و فقط اثر دفلیکتورها در هوادهی و نحوه تغییرات غلظت هوا در پایین دست آن مدنظر بوده است.



FLOW-3D t=300.0 y=5.000E+00 (ix=76 to 98 kz=178 to 196)
17:47:40 02/23/2010 hvsl hydr3d: version 8.2 win32-cv1 2003
Title

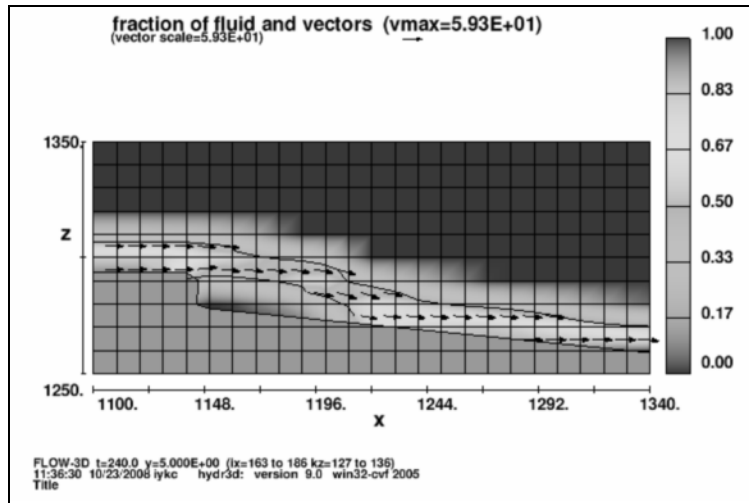
(الف)



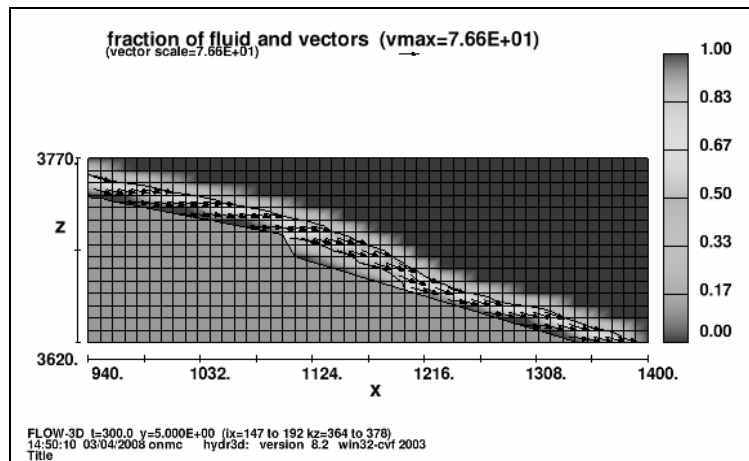
FLOW-3D t=300.0 y=5.000E+00 (ix=150 to 194 kz=354 to 391)
12:12:16 03/04/2008 mtth hydr3d: version 8.2 win32-cv1 2003
Title

(ب)

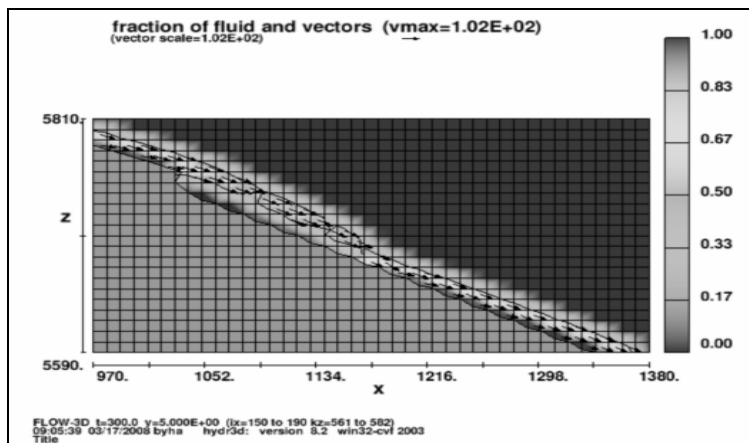
شکل ۱ تیغه جریان عبوری از روی دفلکتور الف- اندازه شبکه برابر ۲ سانتی متر، ب- اندازه شبکه برابر ۱ سانتی متر



(الف)

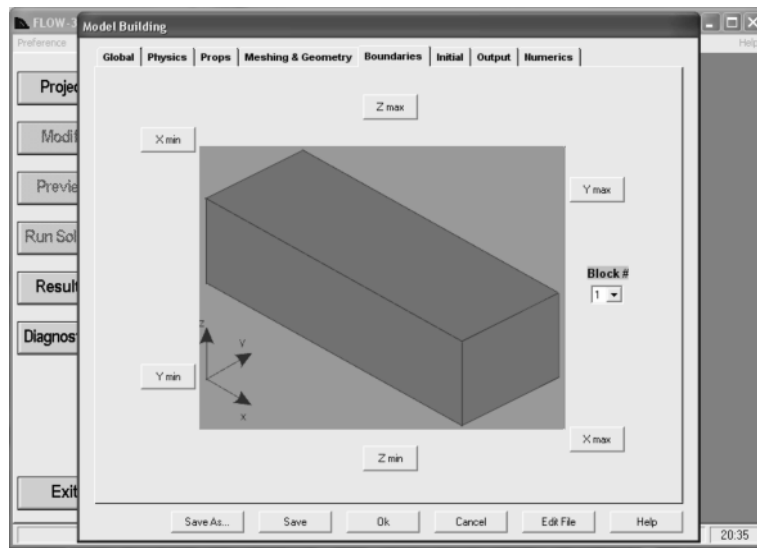


(ب)



(ج)

شکل ۲ تیغه جریان عبوری از روی دفلکتور در شیب الف- ۱۰٪، ب- ۳۰٪، و ج- ۵۰٪ (x و z بر روی شکل‌ها به ترتیب نشان‌دهنده جهت‌های افقی و عمودی محورهای مختصات است)



شکل ۳ منوی شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW-3D

جدول ۲ مقادیر ضرایب β و $\gamma \cos \alpha$ (کرامر، ۲۰۰۴)

شیب کف (α)	$\gamma \cos \alpha$	β
۷۵°	۱/۶	۱/۸۲۲
۶۵°	۱/۹	۱/۳۵
۴۵°	۲/۳	۰/۹۰۴
۳۷/۵°	۲/۶۵	۰/۶۳۸
۳۰°	۳/۸	۰/۲۰۲
۲۲/۵°	۴/۹۲	۰/۰۶۵۹
۷/۵°	۹/۰۵	۰/۰۰۱۰۶

جدول ۱ شرایط اولیه اعمال شده در مدل‌سازی عددی

شیب کف (S_0)	عدد فرود اولیه (F_0)	ارتفاع اولیه (m) h_0	دبی جریان Q_w (lit/s)
٪۱۰	۳	۰/۰۵	۵۲/۵
	۴	۰/۰۵	۷۰
	۶	۰/۰۵	۱۰۵/۱
	۶	۰/۰۶	۱۳۸/۱
	۷	۰/۰۶	۱۶۱/۱
	۸	۰/۰۶	۱۸۴/۱
	۸	۰/۰۷	۲۳۲
	۹	۰/۰۶	۲۰۷/۱
	۹/۷۴	۰/۰۶	۲۷۲/۲
	۱۰	۰/۰۵	۱۷۵/۱
٪۳۰ و ٪۵۰	۳	۰/۱۱	۱۷۱/۴
	۴	۰/۰۶	۹۲/۱
	۴	۰/۱	۱۹۸/۱
	۶	۰/۰۶	۱۳۸/۱
	۶	۰/۰۸	۲۱۲/۶
	۸	۰/۰۶	۱۸۴/۱
	۸	۰/۰۶۵	۲۰۷/۶
	۹/۴۳	۰/۰۶	۲۱۷
	۱۱	۰/۰۵	۱۹۲/۶

۴- نتایج و بحث

برای بررسی نتایج نرم‌افزار FLOW-3D (معادلات ۱۰ و ۱۱) در پیش‌بینی مقدار هوای وارد شده به جریان، نتایج با معادله وود (۱۹۸۳) مقایسه شده است. این معادله بر اساس داده‌های آزمایشگاهی استراب و اندرسون (۱۹۵۸) برای پیش‌بینی مقدار هوای وارد شده به جریان (C) پیشنهاد شده است (کرامر، ۲۰۰۴):

$$C = \frac{\beta}{\beta + e^{-\gamma \cos \alpha Z_{90}^2}} \quad (12)$$

که در آن Z_{90} به صورت ارتفاع بی‌بعد جریان از کف نسبت به عمقی که در آن غلظت هوا برابر ۹۰٪ است

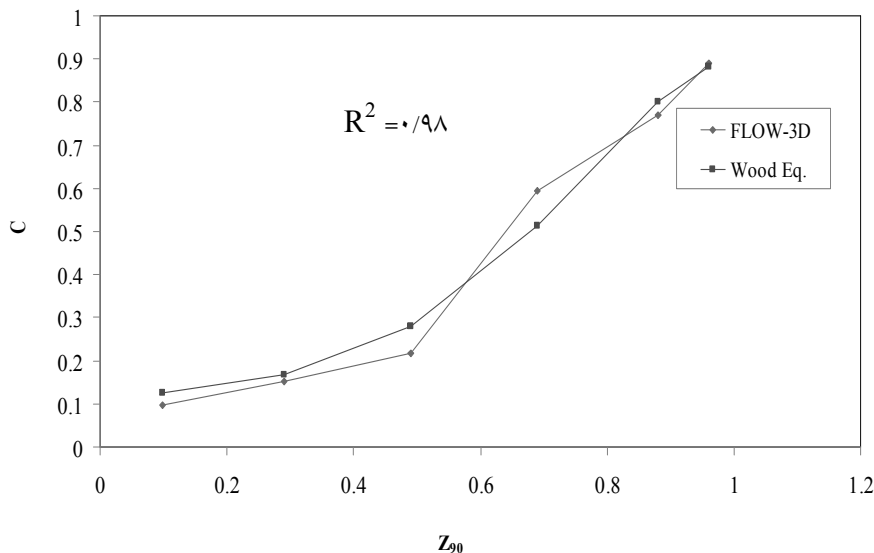
در مطالعه حاضر هیچ‌گونه هوادهی اضافه‌ای در نظر گرفته نشده و هوا به‌کمک دفلکتور به جریان وارد شده است. نتایج نرم‌افزار FLOW-3D با نتایج اندازه‌گیری غلظت هوای لایه تحتانی جریان توسط کرامر (۲۰۰۶) مقایسه شد که از تطابق خوبی برخوردار است (شکل ۵).

لازم است شود که داده‌های آزمایشگاهی کرامر فقط برای دو حالت شیب ۳۰٪ و ۵۰٪ با عدد فرود $F_o = 6$ موجود بوده است، لذا امکان مقایسه نتایج نرم‌افزار FLOW-3D و نتایج آزمایشگاهی فقط در این دو شیب میسر بوده است. گسیختگی به‌وجود آمده در شکل ۴-الف به این دلیل است که غلظت هوا در این قسمت به صفر رسیده و به دلیل نیمه لگاریتمی بودن نمودار مقدار صفر برای آن بی معنا است. کرامر (۲۰۰۶) تغییرات غلظت هوا را در لایه تحتانی جریان در طول تنداب به پنج ناحیه تقسیم کرده است: (۱) ناحیه کاهش سریع غلظت هوا بلافاصله بعد از هوادهی؛ (۲) ناحیه کاهش تدریجی غلظت هوا؛ (۳) ناحیه غلظت کمینه؛ (۴) ناحیه افزایش تدریجی غلظت هوا و (۵) ناحیه غلظت یکنواخت (شکل ۶).

($C = 90\%$) تعریف می‌شود. همچنین ضرایب β و $\gamma \cos \alpha$ تابعی از شیب کف بوده و مقادیر آن در جدول ۲ داده شده است.

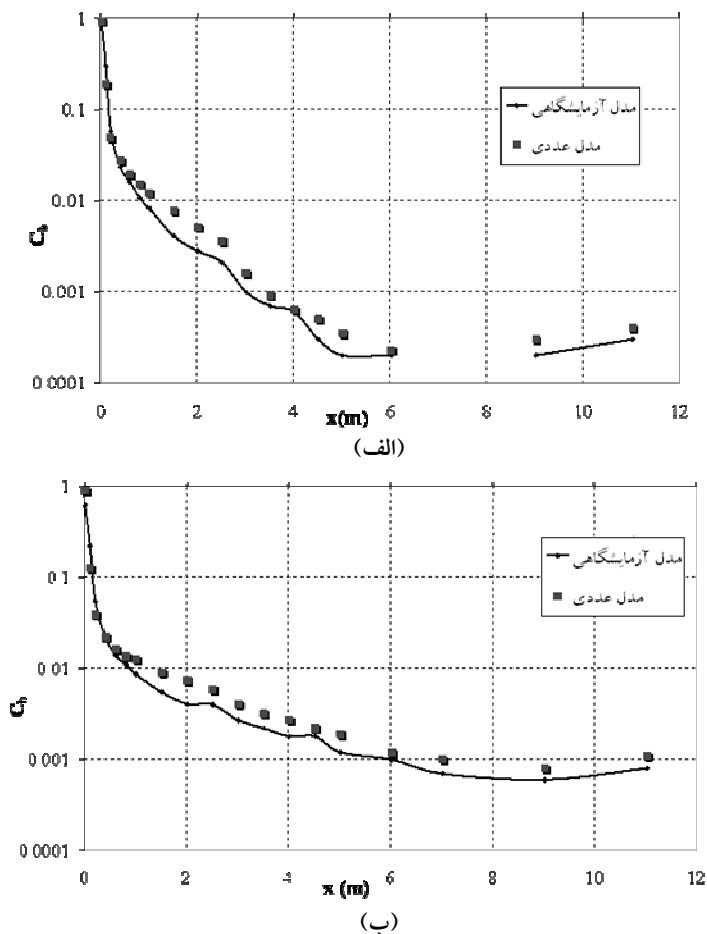
مقادیر غلظت هوا در شیب ۵۰٪ (۲۶/۷ درجه) در سلول‌های مورد نظر با استفاده از معادلات (۱۰ و ۱۱) محاسبه و با نتایج حاصل از معادله (۱۲) مقایسه شد (شکل ۴). با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D همبستگی خوبی با نتایج معادله (۱۲) دارد ($R^2 = 0.98$). غلظت هوا در لایه تحتانی جریان عبوری از روی تنداب (C_b) نقش تعیین‌کننده‌ای در حفاظت از تنداب در برابر خلأزایی دارد.

تعیین روند تغییرات غلظت هوای لایه تحتانی جریان توسط کرامر، در دو حالت پیش هوادهی^۱ (از طریق تزریق هوا به مخزن آب پیش از عبور جریان از روی تنداب) و هوادهی شده^۲ در محل دفلکتور (به‌کمک پمپ هوا و وارد کردن هوا به محل دفلکتور از طریق لوله‌های هوادهی) انجام شده است.

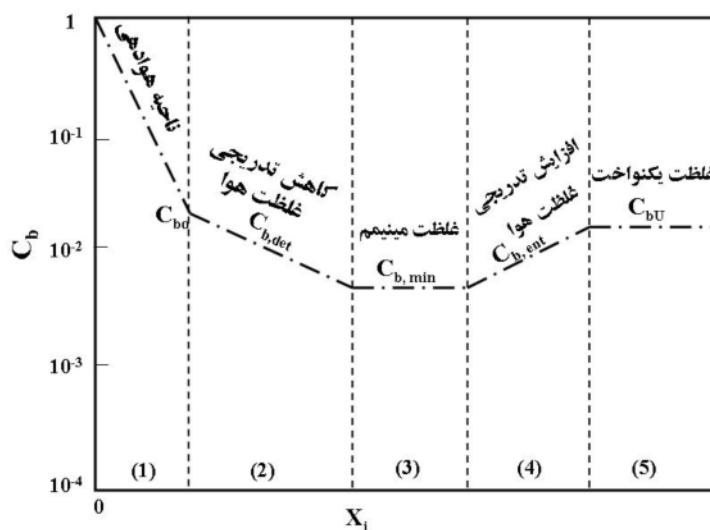


شکل ۴ مقایسه نتایج غلظت هوای جریان عبوری از روی شوت محاسبه شده توسط نرم‌افزار FLOW-3D و معادله Wood (معادله ۱۲)

1. Pre-Aerated Flow
2. Aerated Flow



شکل ۵ مقایسه غلظت هوای لایه تحتانی جریان محاسبه شده توسط نرم‌افزار FLOW-3D و اندازه‌گیری شده توسط مدل آزمایشگاهی کرامر (۲۰۰۶) در عدد فرود $F_o = 6$ شیب الف-شیب ۳۰٪ ($R^2 = 0.98$) و ب-شیب ۵۰٪ ($R^2 = 0.96$)



شکل ۶ نحوه تغییر غلظت هوای تحتانی در طول تنداب (کرامر ۲۰۰۶)

برازش، ضریب m در هر شیب و عدد فرود تعیین شده است (جدول ۳).

برای تعیین ضریب n در معادله (۱۶) مقادیر مختلف پارامتر m در هر شیب از جدول ۳ استخراج و به ازای عدد فرود مربوط به آن ترسیم و بهترین نمودار به شکل معادله توانی (۱۶) برای آن برازش شده است (شکل ۸).

جدول ۳ مقادیر به دست آمده برای پارامتر m در شیب‌ها و مقادیر مختلف عدد فرود

عدد فرود اولیه (F_0)	m		
	$S = 10\%$	$S = 30\%$	$S = 50\%$
۳	۰/۴۸	۰/۱۶	۰/۱۴
۴	۰/۲۳	۰/۰۸۸	۰/۰۷۹
۶	۰/۰۵۴	۰/۰۴۲	۰/۰۲۹
۷	۰/۰۴۶	---	---
۸	۰/۰۴	۰/۰۳۹	۰/۰۱۴
۹	۰/۰۳	---	---
۹/۴۳	---	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸۸
۹/۷۴	۰/۰۲۷	---	---
۱۰	۰/۰۲۳	---	---
۱۱	---	۰/۰۱۸	۰/۰۰۷۲

نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهد که ضریب n در شیب‌های $50\% \leq S_0 \leq 10\%$ بین $n \leq 7/016 \leq n \leq 2/56$ تغییر می‌کند و افزایش شیب باعث کاهش آن می‌شود.

با توجه به معادله (۱۴) رابطه تغییرات n بر حسب شیب کف تنداب (S_0) را می‌توان به شکل کلی زیر نوشت:

$$n = a \times 0.006^{S_0} + b \quad (17)$$

با تعیین ضرایب a و b در این معادله محاسبه نحوه تغییرات غلظت هوا در لایه تحتانی جریان امکان پذیر می‌شود. برای این منظور نمودار تغییرات n در شیب‌های مختلف ترسیم و نمودار بهترین برازش به شکل معادله (۱۷) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 7.1 برای آن تعیین شده است (شکل ۹).

شناخت چگونگی کاهش غلظت هوا در ناحیه (۲) شکل ۶ در تعیین فاصله مناسب هواده‌ها تأثیر زیادی دارد؛ هرچند به عقیده کرامر به علت نبود تجهیزات آزمایشگاهی دقیق، کمتر به آن توجه شده است. کرامر (۲۰۰۶) بر اساس حدود ۶۶۵ برداشت آزمایشگاهی در چهار شیب مختلف کف (۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) و در هر شیب با تغییر پارامترهایی نظیر عدد فرود و عمق اولیه جریان معادله کلی زیر را برای اندازه‌گیری غلظت هوا در ناحیه مذکور توصیه کرده است:

$$C_{b,det} = C_{bo} e^{-mX} \quad (13)$$

که در آن C_{bo} غلظت هوای مشخصه^۱ در ابتدای ناحیه ۲ (شکل ۶)، m شیب خط در نمودار نیمه‌لگاریتمی و $X=x/h$ فاصله افقی بی‌بعد شده نسبت به ارتفاع جریان (h) در آن نقطه است. شیب m تابعی از عدد فرود اولیه (F_0) و شیب کف تنداب (S_0) بوده و برای جریان‌های پیش هواده‌ی (معادله ۱۴) و هواده‌ی شده (معادله ۱۵) به صورت زیر ارائه شده است (کرامر ۲۰۰۶):

$$m = (7.2 \times 0.006^{S_0} + 6.6) \times F_0^{-2.5} \quad (14)$$

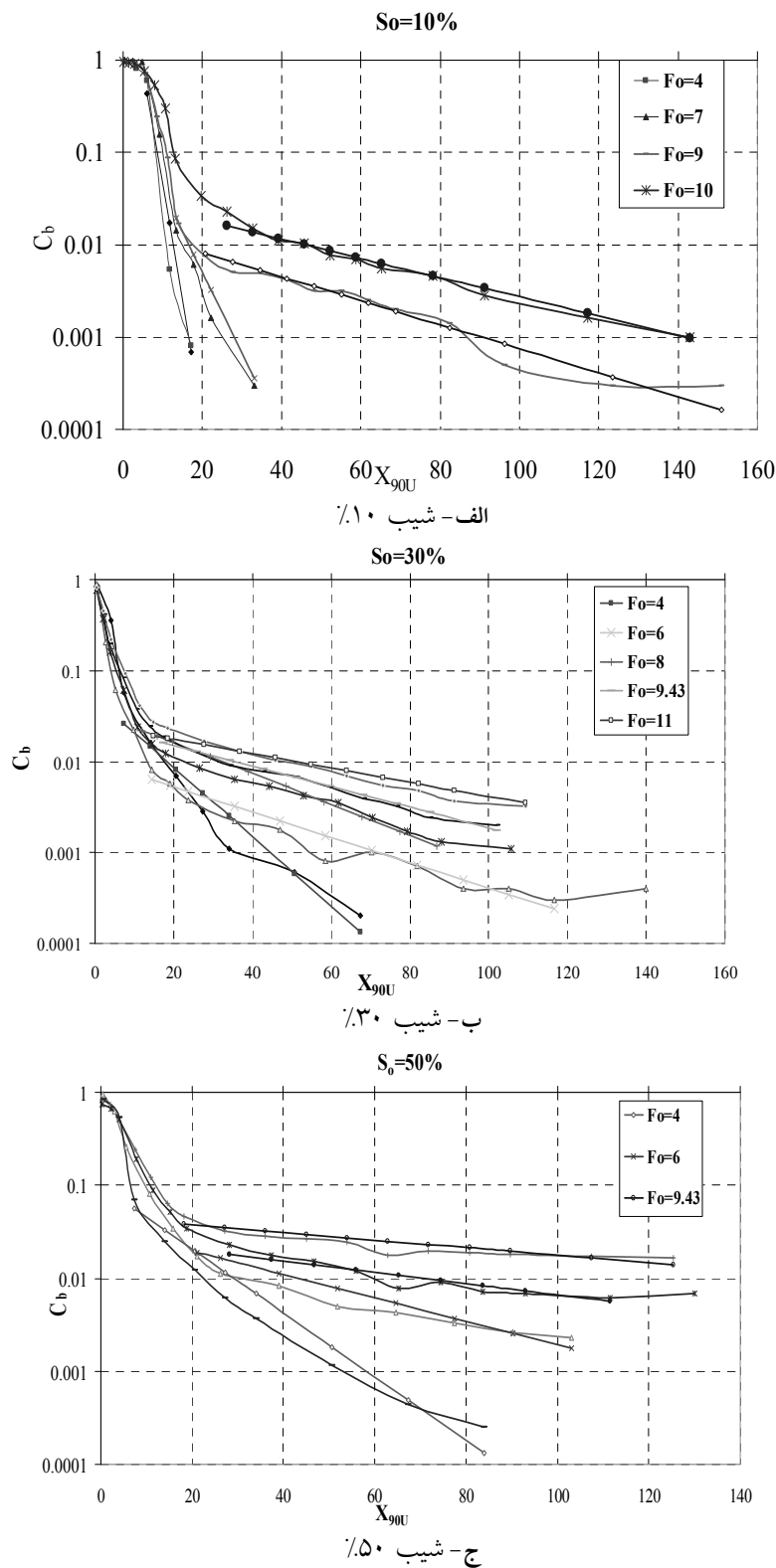
$$m = 30 \times 0.006^{S_0} \times F_0^{-2.5} \quad (15)$$

شکل کلی معادلات فوق را به صورت زیر می‌توان نوشت:

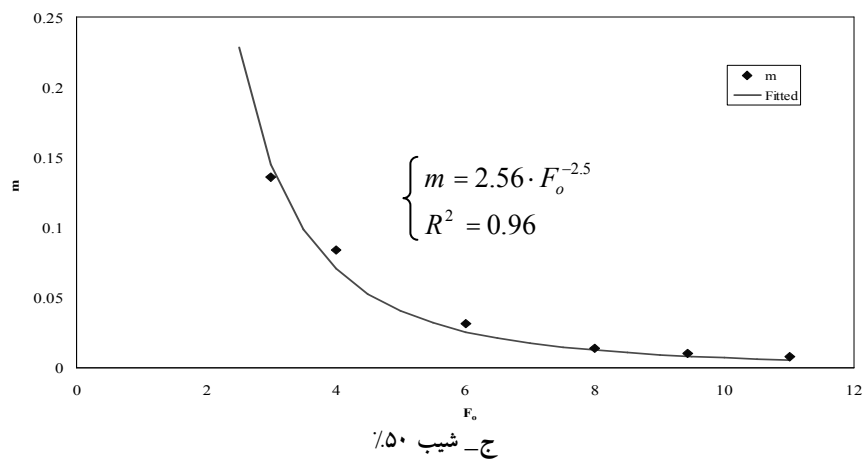
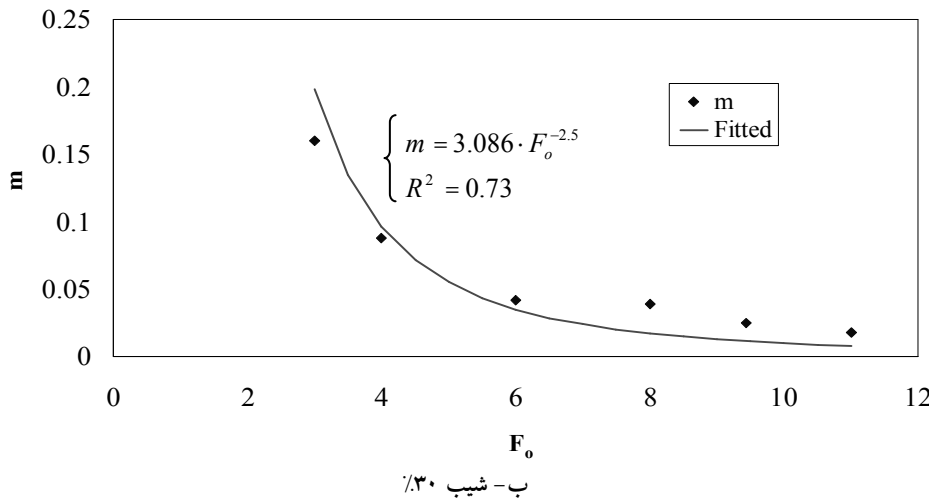
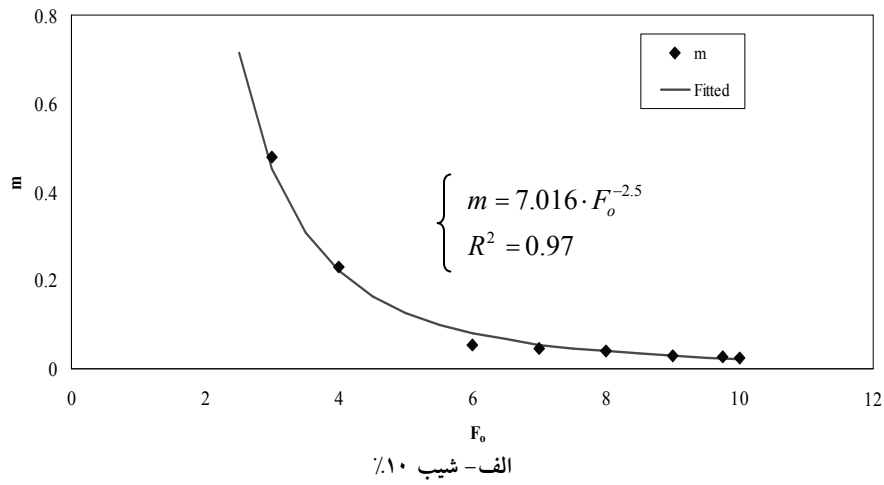
$$m = n F_0^{-2.5} \quad (16)$$

که در آن ضریب n تابعی از شیب کف تنداب است ($n = f(S_0)$). با توجه به معادلات فوق انتظار می‌رود که تغییرات غلظت هوا در حالت اخیر نیز روندی نمایی داشته باشد. برای بررسی این موضوع تغییرات غلظت هوای لایه تحتانی جریان (C_b) در مقابل فاصله افقی بی‌بعد شده، نسبت به ارتفاع جریان (X) در پایین دست دفلکتور بر روی نموداری نیمه‌لگاریتمی ترسیم و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 7.1 بهترین توابع نمایی بر آنها برازش شده (شکل ۷) و با توجه به معادلات بهترین

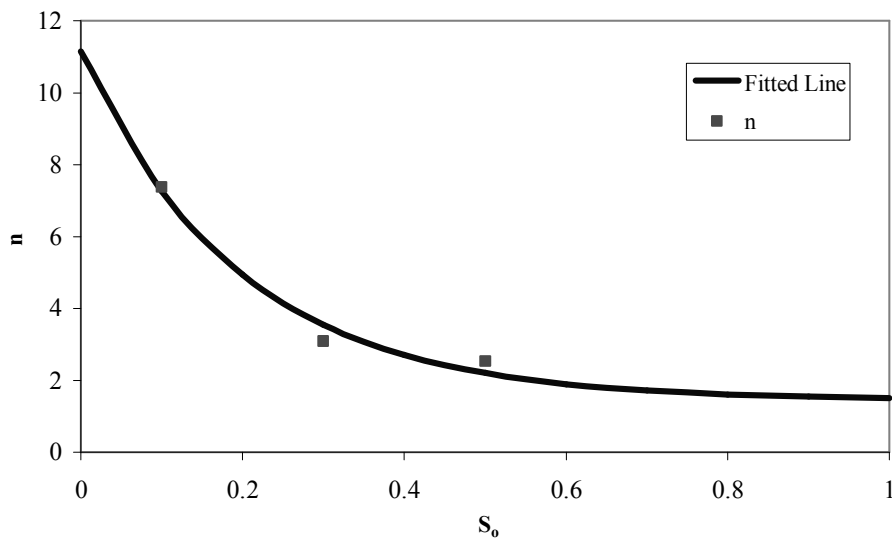
1. Characteristic Upstream Bottom Air Concentration



شکل ۷ نمودار تغییرات غلظت هوای تحتانی در طول تنداب همراه با بهترین خط برازش (—) در مقادیر مختلف عدد فرود



شکل ۸ نمودار تغییرات شیب m بر حسب عدد فرود F_0 همراه با بهترین خط برازش



شکل ۹ نمودار تغییرات n بر حسب شیب کف تنداب همراه با نمودار بهترین برازش ($R^2 = 0.95$)

مقدار بیشتری دارد که این باعث افزایش شیب نمودار کاهشی غلظت هوای لایه تحتانی جریان می‌شود؛ یعنی در شیب‌های کمتر، هوا با شدت بیشتری از کف تنداب خارج می‌شود. دلیل این موضوع شاید وجود گرادیان‌های شدید فشار در ناحیه برخورد جت آب با کف تنداب در شیب‌های کمتر باشد. از طرفی با دقت در نمودارهای شکل ۸ مشخص می‌شود که در مقادیر کم عدد ($F_0 \leq 5$) مقدار m با شدت بیشتری کاهش می‌یابد، در حالی که در مقادیر بزرگ ($F_0 > 10$) اثر شیب کف تقریباً قابل چشم پوشی است. به طور کلی می‌توان گفت در حالتی که جریانی با عدد فرود اولیه کوچک از روی تندابی با شیب کم عبور کند و هوادهی با غلظت زیاد انجام شود، غلظت هوای لایه تحتانی جریان با شدت بیشتری کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

وجود هوا در کف تنداب نقش مهمی در محافظت از آن در برابر خلأزایی دارد. از طرفی شناخت نحوه تغییرات

با توجه به این منحنی، مقادیر a و b تعیین شده و ضریب n در شیب‌های مختلف قابل محاسبه است (معادله ۱۸).

(۱۸)
$$n = (9.69 \times 0.006^{S_0} + 1.45)$$
 از تلفیق معادله (۱۸) با معادلات (۱۷)، (۱۶) و (۱۳) رابطه‌ای کلی برای محاسبه تغییرات غلظت هوا در لایه تحتانی جریان در ناحیه کاهش تدریجی ($C_{b,det}$) (ناحیه ۲ در شکل ۶) در حالتی که هوادهی به صورت طبیعی و با استفاده از دفلکتور انجام شده، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_{b,det} = C_{bo} \cdot \exp[-(9.69 \times 0.006^{S_0} + 1.45) \times F_0^{-2.5} \times X] \quad (19)$$

$$(C_{bo} \leq C_{b,det} \leq C_{b,min})$$

با توجه به این بررسی می‌توان گفت که غلظت هوای لایه تحتانی جریان در ناحیه ۲ شکل ۶ به صورت نمایی کاهش می‌یابد و غلظت هوای مشخصه در بالادست (C_{bo})، عدد فرود جریان و شیب کف تنداب نقش مهمی در روند این تغییرات دارند. همان‌گونه که از نمودارهای شکل (۹) مشخص است، ضریب n در شیب‌های کمتر،

$\bar{C}_{90} = \frac{1}{h_{90}} \int_0^{h_{90}} C(z) dz$	
\bar{C}_{99}	میانگین غلظت هوا
d_{bu}	قطر حباب (mm)
d_o	عمق جریان در انتهای دفلکتور (m)
$F = Q_w / (gb^2 h_w^3)^{1/2}$	عدد فرود جریان
$F_o = Q_w / (gb^2 h_o^3)^{1/2}$	عدد فرود اولیه جریان
g	شتاب جاذبه زمین (m/s^2)
h	عمق جریان (m)
L	فاصله از انتهای دفلکتور
m	گرادیان غلظت هوای لایه تحتانی جریان
$p_o = p_A + p_g$	فشار محلی (N/mm^2)
p_A	فشار اتمسفری (N/mm^2)
p_g	فشار پیرومتری (N/mm^2)
p_v	فشار بخار سیال (N/mm^2)
Q_{air}	دبی هوا (m^3/s)
Q_w	دبی آب (m^3/s)
R^2	ضریب همبستگی
S_o	شیب شوت ($\tan \alpha$)
u	مؤلفه سرعت در جهت x محور مختصات
\bar{u}	میانگین سرعت جریان (m/s)
U_r	سرعت صعود حباب های هوا (m/s)
$(U_w)_o$	سرعت جریان در انتهای دفلکتور (m/s)
v	مؤلفه سرعت در جهت y محور مختصات
w	مؤلفه سرعت در جهت z محور مختصات
$W = \bar{u} / (\sigma_t / (\rho d_{bu}))^{1/2}$	عدد وبر
x	محور افقی در امتداد کف تنداب (m)
$X=x/h$	فاصله افقی بی بعد شده نسبت به ارتفاع جریان
y	محور عرضی تنداب (m)
z	محور عمود بر کف تنداب (ارتفاعی) (m)
Z_{90}	ارتفاع بی بعد جریان از کف نسبت به عمقی که در آن غلظت هوا برابر ۹۰٪ باشد
$\alpha = \arctan S_o$	شیب تنداب (درجه)

غلظت هوا در ناحیه کاهش تدریجی غلظت هوا (ناحیه ۲ در شکل ۶) در تعیین کارایی هواده‌ها بسیار مؤثر است. با وجود اهمیت این موضوع در طراحی هواده‌ها، بیشترین تمرکز محققان بر اندازه‌گیری میانگین غلظت هوا قرار داشته و کمتر به محاسبه غلظت هوا در لایه تحتانی جریان توجه شده که یکی از مهمترین دلایل آن می‌تواند نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق و وقت‌گیر بودن آزمایش‌ها باشد. امروز سهولت دسترسی به نرم‌افزارهای مختلف در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولیکی شده است.

در این مطالعه از نرم‌افزار FLOW-3D برای تعیین روند کاهش پارامتر غلظت هوا در لایه تحتانی جریان استفاده شده است. در این حالت هیچ‌گونه منبع اضافی برای هوادهی به جریان وجود نداشته و هوادهی به صورت طبیعی و به کمک دفلکتور انجام شده است. برای سنجش صحت نتایج به دست آمده از نتایج حاصل از معادله وود (معادله ۱۲) و مدل آزمایشگاهی کرامر استفاده شد که بیانگر تطابق خوب با آنها است.

مطالعات انجام شده نشان داده که غلظت هوای اولیه، عدد فرود F_o و شیب کف تنداب S_o تأثیر زیادی در نحوه تغییرات غلظت هوای لایه تحتانی جریان دارند و مقدار آن در بازه $C_{b,\min} \leq C_{b,\det} \leq C_{b_o}$ به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

C	غلظت هوای جریان
C_b	غلظت هوای لایه تحتانی جریان
C_{b_o}	غلظت هوای لایه تحتانی جریان در بالادست
$C_{b,\min}$	کمینه غلظت هوا در لایه تحتانی جریان

Hager, W.H. (1991). "Uniform aerated chute flow", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 117, No. 4, pp. 528-533.

Hirt, C. W. (2003). "Modeling turbulent entrainment of air at a free surface", Technical Note 61, Flow Science Inc.

Ho, D. H. K., Cooper, B. W. and Ridette, K. M. (2006). "Application of numerical model to spillways in Australia", Dams & Reservoirs, Societies & Environment in 21st Century, Taylor & Francis Group, London, pp. 951-959.

Ho, D. K. H., Boyes, K. M. and Donohoo, S. M. (2001). "Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique", Proc. 14th Australian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Australia, 10- 14 Dec. 2001.

Kokpinar, M. A. and Gogus, M. (2002). "High speed jet flow over spillway aerators", Can. J. Civ. Eng. Vol. 29, pp. 885 – 898.

Kramer, K., Hager, W. H. and Minor, H.-E. (2004). "New model investigations on two-phase chute flow", Hydraulics of dams and river structures, F. Yazdandoost and J. Attari, eds., Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 33-41.

Kramer, K., Hager, W.H. and Minor, H.E. (2006). "Development of air concentration on chute spillways", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 132, No.9, pp. 908-915.

Sartaj, M., Beirami, M. K. and Fooladgar, A. (1384). "Analysis of two-dimensional flow over standard ogee spillway using RNG turbulence model", Proc. 7th Int. Cong. on Civil Eng., Isfahan.

Savage, B. M. and Johnson, M. C. (2001). "Flow over ogee spillway: physical & numerical model case study", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640-649.

Unami, K., Kawachi, T., Babar, M. M. and Itakagi, H. (1999). "Two dimensional numerical model of spillway flow", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 125, No.4. pp. 369-375.

$\beta = Q_a/Q_w$ نرخ نسبی ورود هوا به جریان

ρ چگالی آب (kg/m^3)

$\sigma = \frac{P_a - P_v}{\rho \frac{u^2}{2}}$ شاخص کاویتاسیون

σ_{crit} شاخص کاویتاسون بحرانی

σ_t کشش سطحی آب (N/m)

ψ' زاویه برخورد جت با کف تنداب (درجه)

۷- منابع

Causon, D. M., Mingham, C. G. and Ingram, D. M. (1999). "Advances in calculation methods for supercritical flow in spillway channels", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 125, No.10. pp. 1039-1050.

Chanson, H. (1989). "Study of air entrainment and aeration devices", J. of Hyd. Research, Vol. 27, No. 3, pp. 301- 319.

Chanson, H. (1990). "Study of air demand on spillway aerator", J. of Fluid Engineering, Vol. 112, Sep. pp. 343- 350.

Chanson, H. (1994). "Aeration & de-aeration at bottom aeration devices on spillways", Can. J. of Civil. Eng., Vol. 21, No. 3, pp. 404-409.

Chanson, H. (1997). "Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows", Academic Press, Brisbane.

Charles, C. S. and Zhou, F. (1999). "Simulation of free surface flow over spillway", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 125, No.9. pp. 959-967.

Dargahi, B. (2006). "Experimental study and 3D numerical simulation for a free-overflow spillway" J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 132, No. 9, pp. 899-907.

Falvey, H. T. (1990). "Cavitation in chutes and spillways", A Water Resources Technical Publication, EM. 42, Colorado.

Flow-3D user manual; excellence in flow modeling software, v 8.2. (2001). Flow Science, Inc., Santa Fe, N.M.