



دانشگاه گواران، دانشکده مهندسی عمران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره چهارم، ۱۳۹۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## مقایسه روش‌های اختلاطی و حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی اختلاط آب و هوا در جریان غیرریزشی روی سرریزهای پلکانی

\*میترا جوان<sup>۱</sup>، سینا صادق‌فام<sup>۲</sup> و افشین اقبال‌زاده<sup>۱</sup>

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۹

### چکیده

از آنجا که سرریزهای پلکانی می‌توانند با اتلاف انرژی، نقش مهمی در کاهش ابعاد حوضچه‌های آرامش پایین‌دست سدها و در نتیجه طراحی اقتصادی آن‌ها ایفا نمایند، مطالعه و بررسی این سرریزها مورد علاقه مهندسان هیدرولیک می‌باشد. معمولاً شناخت هوادهی سطحی در سرریزهای پلکانی، مهم و قابل توجه است. در این مقاله به منظور بررسی توانایی روش‌های اختلاطی و حجم سیال، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، چگونگی ورود هوا به داخل آب در سرریزهای پلکانی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به سطح آزاد، مؤلفه‌های سرعت و غلظت هوای محبوس در آب و چگونگی ورود هوا به داخل آب با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. براساس نتایج به دست آمده، در نواحی شروع هوادهی که اختلاط زیاد آب و هوا وجود دارد، روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال سطح آزاد را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. بر روی پله‌هایی که نزدیک‌تر به محل شروع اختلاط آب و هوا هستند، نتایج دو روش اختلاطی و حجم سیال در خصوص پیش‌بینی توزیع سرعت به هم نزدیک هستند (مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای روش اختلاطی برابر ۰/۲۵ و برای روش حجم سیال برابر ۰/۲۳ است). اما در پله‌هایی که فاصله آن‌ها از نقطه شروع هوادهی بیش‌تر است و اختلاط کامل‌تر آب و هوا انجام شده، روش اختلاطی نتایج به نسبت بهتری ارائه می‌دهد (مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای روش اختلاطی برابر ۰/۲۳ و برای روش حجم سیال برابر ۰/۳۳ است). همچنین زمان هم‌گرایی روش اختلاطی در مقایسه با روش حجم سیال بسیار کم‌تر است به طوری که این زمان می‌تواند ۵-۴ برابر کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: فلوئنت، روش اختلاطی، سرریز پلکانی، روش حجم سیال

\* مسئول مکاتبه: [javanmi@gmail.com](mailto:javanmi@gmail.com)

## مقدمه

برای مستهلک کردن انرژی جنبشی در پایاب سدها معمولاً حوضچه آرامش احداث می‌شود. هرچه انرژی جنبشی منتقل شده به پایین دست بیش تر باشد، حوضچه آرامش ابعاد بزرگتری خواهد داشت و یا باید تمهیدات بیشتری برای استهلاک انرژی در آن در نظر گرفت. در نتیجه به همان نسبت، هزینه‌های اجرایی و نگهداری و نیز پایداری سد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی به کار گرفته می‌شوند. با احداث این نوع سرریزها، ابعاد حوضچه آرامش و در نتیجه هزینه‌های آن کاهش می‌یابد و در بعضی شرایط، منجر به حذف حوضچه آرامش می‌گردد (چانسون، ۲۰۰۱). به طور کلی سه نوع جریان در روی سرریزهای پلکانی می‌توان مشاهده نمود. نوع اول، جریان فواره‌ای که در آن جریان به صورت فواره‌های متوالی می‌باشد، نوع دوم، جریان غیرریزشی سطحی که در آن جریان به صورت جریان متغیر تدریجی است و نوع سوم، جریان انتقالی که در آن جریان بینابینی است و درصد قابل توجهی هوا با آن مخلوط شده و حالت ناپایدار دارد (چانسون، ۲۰۰۱). معمولاً جریان نوع اول در دبی‌های کم و جریان نوع دوم در دبی‌های زیاد رخ می‌دهد. با توجه به پیچیدگی جریان دو فازی عبوری از روی سرریزهای پلکانی، تعدادی از پژوهشگران با استفاده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی، عملکرد این سرریزها را مورد بررسی قرار داده‌اند. سورنسن (۱۹۸۵) و چانسون (۲۰۰۱) مطالعات آزمایشگاهی زیادی پیرامون تشخیص جریان و پراکنش انرژی بر روی سرریزهای پلکانی انجام داده و رابطه‌هایی را برای تعیین نوع جریان و میزان انرژی تلف شده بر روی این نوع سرریزها ارائه نمودند. معمولاً استفاده از مدل عددی در شبیه‌سازی جریان سبب کاهش هزینه‌های زیاد مدل آزمایشگاهی می‌گردد. چن و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از روش حجم محدود و روش حجم سیال<sup>۱</sup> و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد، جریان بر روی سرریزهای پلکانی را شبیه‌سازی عددی نموده‌اند. در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی چگونگی اختلاط جریان آب و هوا و نقطه شروع هوادهی در جریان ریزشی عبوری از روی سرریز پلکانی ارائه نشده است. چنگ و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش اختلاطی و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG، جریان روی سرریزهای پلکانی را مدل‌سازی نمودند. با توجه به پژوهش آن‌ها مشخص گردید که روش اختلاطی برتری‌های زیادی در شبیه‌سازی عددی فشار منفی و جریان‌های گردابی بر روی پله‌های سرریزهای پلکانی دارد. تابارا و همکاران (۲۰۰۵) جریان روی سرریز پلکانی

1- Volume of Fluid (VOF)

را با استفاده از روش اجزا محدود و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد مدل‌سازی نمودند. ورجاوند و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از روش حجم سیال و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد جریان بر روی سرریز پلکانی را شبیه‌سازی کرده و اثر تعداد پله‌ها را در اتلاف انرژی بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد پله‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. نادری‌راد (۲۰۰۷) استهلاک انرژی را در سرریز پلکانی و سرریز اوجی به وسیله روش حجم سیال مقایسه کرده و نشان دادند که نسبت استهلاک انرژی به انرژی اولیه در سرریزهای پلکانی به میزان ۸۰/۹ درصد نسبت به سرریز اوجی افزایش داشته است. رضایی و همکاران (۲۰۰۹) با شبیه‌سازی میدان جریان روی سرریزهای پلکانی با دو روش حجم سیال و اختلاطی و مدل‌های آشفتگی مختلف و مقایسه نتایج آن‌ها با هم، بهترین شبیه‌سازی را با روش اختلاطی و مدل آشفتگی تنش رینولدز امگا<sup>۱</sup> به دست آوردند. در پژوهش رضایی و همکاران (۲۰۰۹)، میزان افت انرژی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی و پروفیل جریان شکل گرفته بر روی آن با دو روش حجم سیال و اختلاطی شبیه‌سازی گردیده است. رضایی و همکاران (۲۰۰۹)، نشان دادند که در شبیه‌سازی با روش حجم سیال، به هیچ وجه در طول جریان عبوری از روی سرریز پلکانی، هوا وارد ترازهای پایین جریان نشده و جریان به صورت به نسبت مطلق و بدون هوا شکل می‌گیرد. بمباردلی و همکاران (۲۰۱۰) به صورت آزمایشگاهی مطالعاتی در خصوص جریان عبوری از روی سرریز پلکانی با شیب تند انجام داده و سپس با استفاده از نرم‌افزار فلوتری دی<sup>۲</sup> این جریان را با مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و RNG  $k-\varepsilon$  شبیه‌سازی نمودند. از جمله پژوهش‌های دیگر در خصوص شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط چنگ و همکاران (۲۰۰۴) و کاروالهو و آمادور (۲۰۰۸) اشاره نمود. در این مقاله، با مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های اختلاطی و حجم سیال، توانایی این روش‌ها برای شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی بررسی شده‌اند. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار فلونتت جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به ارتفاع سطح آزاد، مؤلفه‌های سرعت و غلظت هوای محبوس در آب و چگونگی ورود هوا به داخل آب با نتایج آزمایشگاهی چنسن و تومبس (۲۰۰۲) و چن و همکاران (۲۰۰۲) که شیب شوت سرریز در آن‌ها تفاوت قابل توجهی دارد، مورد مقایسه قرار گرفته است.

1- Low-Re Stress-Omega

2- FLOW-3D

معادله‌های حاکم بر روش حجم سیال: روش حجم سیال توسط هیرت و نیکولز (۱۹۸۱) ارائه شده بود. این روش برای شبیه‌سازی مرز مشترک دو یا چند سیال مخلوط‌نشده در یک شبکه اولری طراحی شده است. در این مقاله از این روش برای محاسبه سطح مشترک بین آب و هوا استفاده می‌شود. در این روش ابتدا معادله‌های حاکم بر جریان در محیط آب حل شده و سپس با حل معادله انتقال جزء حجم آب، در هر سلول محاسباتی جزء حجم هر سیال (آب و هوا) در کل میدان محاسباتی محاسبه می‌شود.

قوانین حاکم بر جریان عبارتند از قانون بقای جرم و قانون بقای مومتم که در حالت جریان آشفته و به‌صورت متوسط‌گیری شده در زمان، معادله‌های ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز به شکل زیر از آن‌ها استخراج می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $u_i$ : مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$  ( $i=1,2$ ) به ترتیب برای جهت‌های  $x$  و  $y$ ،  $p$ : فشار،  $\rho$ : چگالی،  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی و جملات  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  به‌عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. این معادله‌ها دارای ۳ مجهول شامل مؤلفه‌های سرعت در دو جهت ( $u, v$ ) و فشار می‌باشند. از طرفی معادله مومتم شامل ۴ مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، بنابراین سیستم معادله‌های بالا بسته نیست و باید با استفاده از مدل آشفتگی مناسب، تنش رینولدز محاسبه شوند. با توجه به پژوهش‌های چنگ و همکاران (۲۰۰۶) در شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی، در این مقاله از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG استفاده شده است.

در روش حجم سیال از یک تابع متغیر به نام  $\alpha$  استفاده می‌شود که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. اگر  $\alpha=1$  باشد نشان‌دهنده پر بودن سلول از آب می‌باشد و اگر  $\alpha=0$  باشد یعنی سلول پر از هوا است. برای  $0 < \alpha < 1$  درصدی از سلول، آب و درصدی از آن هوا است. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. با حل رابطه ۳ برای جزء حجمی آب  $\alpha$ ، جزء حجمی در کل میدان حل تعیین می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

روش‌های متعددی برای حل این رابطه وجود دارد که در این پژوهش روش بازسازی هندسی<sup>۱</sup> (الگوی یانگ) استفاده شده است. این روش به صورت غیرماندگار بوده و شیب سطح بین آب و هوا در هر سلول جریان به صورت خطی فرض می‌شود.

**معادله‌های حاکم بر روش اختلاطی:** تفاوت روش اختلاطی با روش حجم سیال در ۳ مورد خلاصه می‌شود. ۱- در روش اختلاطی، فازهای مختلف امکان حرکت با سرعت‌های متفاوت و نفوذ در یکدیگر را دارند. به عنوان مثال اجزا حجمی مربوط به فازهای  $p$  و  $q$  ( $\alpha_p$  و  $\alpha_q$ ) در یک حجم کنترل، بسته به فضای اشغال شده توسط هر یک از این فازها می‌توانند مقداری بین ۰-۱ داشته باشند، ۲- در روش اختلاطی، فازهای مختلف امکان حرکت با سرعت‌های متفاوت را با استفاده از مفهوم سرعت‌های لغزشی دارند و ۳- همچنین در این روش اندرکنش انتقال جرم درونی فاز، مومتم و انرژی وجود دارد. اما در روش حجم سیال محاسبه‌های دینامیکی در نواحی که هوا وجود دارد انجام نمی‌شود. معادله پیوستگی حاکم بر جریان اختلاطی به شکل زیر است:

$$(\partial \rho_m) / \partial t + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (4)$$

که در آن،  $\rho_m$ : چگالی مخلوط و  $u_m$ : سرعت مخلوط از رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردند:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (5)$$

$$u_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k \quad (6)$$

که در آن،  $\alpha_k$  و  $\rho_k$  به ترتیب برابر جزء حجم و چگالی فاز  $k$  می‌باشند و سرعت مخلوط  $u_m$  سرعت مرکز جرم جریان اختلاطی است. لازم به ذکر است که حتی اگر مقادیر چگالی اجزا ثابت بمانند اما  $\rho_m$  می‌تواند تغییر نماید.

دیگر معادلات حاکم بر جریان با توجه به قانون بقای مومتم به شکل زیر استخراج می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m u_m + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = -\nabla p_m + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_{Dm}) + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla u_m) + \rho_m g \quad (7)$$

و  $\rho_m$ : فشار جریان اختلاطی در معادلات مومنتم را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\nabla p_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \nabla p_k \quad (۸)$$

دو تانسور تنش در معادلات مومنتم،  $\tau_m$ : تنش متوسط لزجت و  $\tau_{Dm}$ : تنش پخش ناشی از شیب فازها به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\tau_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_{eff} \nabla u_k \quad (۹)$$

$$\tau_{Dm} = -\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{Mk} u_{Mk} \quad (۱۰)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (۱۱)$$

که در آن،  $u_{Mk}$ : سرعت پخش جریان اختلاطی بوده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u_{Mk} = u_{qk} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} u_{qk} \quad (۱۲)$$

که در آن  $u_{qk}$ : معرف سرعت لغزش<sup>۱</sup> بین آب و هوا می‌باشد که به صورت زیر تعریف شده است (مانین و همکاران، ۱۹۹۶):

$$u_{qk} = \frac{(\rho_m - \rho_k) d_k^2}{18 \mu_{eff,m} f_{drag}} \left[ g - (u_m \cdot \nabla) u_m - \frac{\partial u_m}{\partial t} \right] \quad (۱۳)$$

که در آن،  $\mu_{eff,m}$ : ویسکوزیته مؤثر اختلاطی و  $d_k$ : قطر حباب فاز  $k$  ام است و نیروی دراگ ( $f_{drag}$ ) از تابع زیر قابل محاسبه است:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{1/4} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.182 \text{Re} & \text{Re} \geq 1000 \end{cases} \quad (۱۴)$$

و به کمک معادله پیوستگی برای فاز دوم  $k$  می‌توان معادله جزء حجمی برای این فاز را به دست آورد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۶):

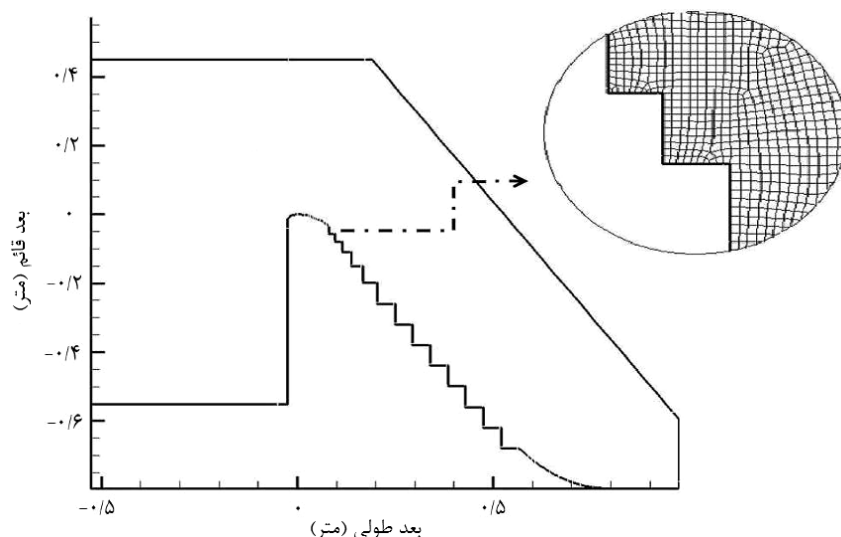
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_m) = -\nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_{Mk}) \quad (۱۵)$$

**حل عددی معادله‌ها:** همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، برای حل معادله‌ها از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. فلوئنت کل میدان جریان را به صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد، از معادله‌های حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادله‌های جبری مفصل می‌شوند. به منظور تهیه هندسه میدان جریان و شبکه‌بندی آن از نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت استفاده شده است و برای مدل‌سازی سطح آزاد، روش‌های اختلاطی و حجم سیال به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر آن از طرح پرستو<sup>۱</sup> برای گسسته‌سازی فشار، طرح کوئیک<sup>۲</sup> برای انفصال جملات جابه‌جایی معادله‌های مومنتم، طرح مرتبه اول آپویند<sup>۳</sup> برای انفصال جملات جابه‌جایی معادله‌های آشفتگی و همچنین از الگوریتم پیرو<sup>۴</sup> برای حل هم‌زمان سرعت و فشار استفاده گردیده است. استفاده از ضرایب زیر تخفیف کوچک‌تر از یک برای فشار، مومنتم و تنش‌های رینولدز مانع از واگرایی حل می‌شود. در این پژوهش گام‌های زمانی برای حل مسأله، ۰/۰۰۱ ثانیه و ملاک هم‌گرایی برای هر متغیر براساس مقدار باقی‌مانده خطای نسبی برابر ۰/۰۰۰۱ انتخاب شده است.

**مشخصات میدان حل و شبکه‌بندی آن:** در ابتدا برای صحت‌سنجی مدل عددی از آزمایش‌های انجام شده توسط چن و همکاران (۲۰۰۲) استفاده می‌شود. در کانال آزمایشگاهی ایشان، تاج سرریز با فاصله ۷۸/۹ سانتی‌متر بالای پنجه و دارای هد طراحی برابر با ۹/۷ سانتی‌متر است و پروفیل استاندارد تاج سرریز با معادله  $y=3/632x^{1/85}$  توسط سه منحنی با شعاع‌های متفاوت به بخش بالادست سرریز متصل می‌شود. در زیر نقطه تماس تاج با شوت، پروفیل سرریز، شیب با نسبت ۱ افقی و ۰/۷۵ قائم را داشته که توسط یک قوس با شعاع ۲۸ سانتی‌متر به پنجه متصل گردیده است. در این آزمایش‌ها شیب شوت حدود ۵۳ درجه بوده است. سرریز شامل ۱۳ پله بوده که به صورت ۱، ۲ و... و به ترتیب از بالا به پایین شماره‌گذاری شده‌اند. ارتفاع ۵ پله اول به ترتیب برابر ۲، ۲/۴، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر است و از پله ۵ به بعد پله‌ها یکنواخت و دارای ارتفاع ۶ و طول ۴/۵ سانتی‌متر می‌باشند. در شبیه‌سازی عددی آزمایش بالا شبکه‌بندی به صورت ساختاریافته در نظر گرفته شده است. شکل ۱ میدان محاسباتی و نحوه شبکه‌بندی آن را نشان می‌دهد. علاوه بر مدل آزمایشگاهی بالا در ادامه، برای صحت‌سنجی مدل عددی از آزمایش‌های انجام شده توسط چانسون و تومبس (۲۰۰۲) نیز استفاده می‌شود. آزمایش‌های آن‌ها در

- 1- PRESTO
- 2- QUICK
- 3- Upwind
- 4- PISO

دانشگاه کوپن‌هاگن در مدلی به طول ۲/۷ متر و عرض ۱ متر و شیب شوت ۲۱/۸ درجه، انجام شده است. شیب شوت در این آزمایش‌ها نسبت به آزمایش‌های انجام شده توسط چن و همکاران (۲۰۰۲) شیب کم‌تری دارد. آب از مخزن بزرگی به مساحت  $4/8 \times 6/8$  متر و عمق ۱/۵ متر تأمین می‌شود. مدل دارای یک سرریز لبه پهن به اندازه ۱ متر عرض و ۰/۶ متر طول و با بالادست گرد گوشه به شعاع ۰/۰۵۷ متر بوده که با ۹ پله یکسان به ارتفاع ۰/۱ متر و طول ۰/۲۵ متر ساخته شده است. سرریز پلکانی دارای ۱ متر عرض بوده و به کانالی با کف بتنی متصل می‌شود. در شبیه‌سازی عددی آزمایش بالا نیز شبکه‌بندی به صورت ساختاریافته، مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

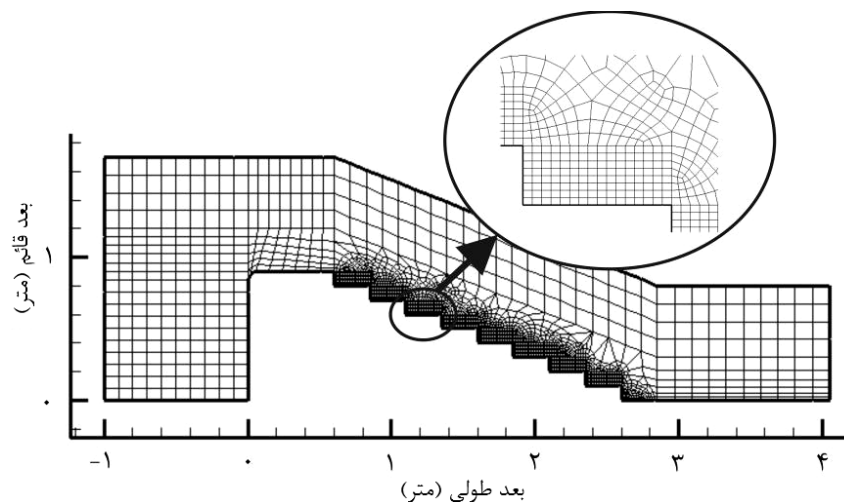


شکل ۱- میدان حل جریان و نحوه شبکه‌بندی آن، در شبیه‌سازی عددی آزمایش چن و همکاران (۲۰۰۲).

**شرایط مرزی:** در شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از هر دو روش حجم سیال و اختلاطی، در مرز ورودی، سرعت در فاز آب معادل ۰/۱۰۲۴ متر بر ثانیه و سرعت در فاز هوا برای مدل‌سازی جریان هوا و ایجاد شرایط آزمایشگاهی برابر با مقدار ناچیز ۰/۰۰۰۰۰۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن عمق فاز آب و هوا در ورودی معادل ۱ متر می‌باشد که عمق فاز آب برابر با مقدار آزمایشگاهی ۰/۶۵۰۶۹ متر قرار داده شده است. در شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های انجام شده توسط چانسون و تومبس (۲۰۰۱)، در مرز ورودی مقادیر دبی آزمایشگاهی



۰/۱۲۴، ۰/۱۳۰ و ۰/۱۴۷ مترمربع بر ثانیه اعمال شده است که برای هر یک از آنها سرعت در مرز ورودی در فاز آب به ترتیب ۰/۱۰۳۳، ۰/۱۰۸۳ و ۰/۱۲۲۵ متر بر ثانیه قرار داده شده است. عمق فاز آب و هوا در ورودی معادل ۱/۷ متر می باشد که عمق فاز آب برابر با ۱/۲ متر است. مقدار سرعت در فاز هوا نیز مطابق مدل عددی قبل مقدار ناچیزی فرض شده است. در شبیه سازی انجام شده، در مرز خروجی فاز آب و فاز هوا، شرط مرزی فشار خروجی، در مرز فوقانی فاز هوا شرط مرزی فشار ورودی و در کف کانال از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. این تابع مانند یک پل، پاسخ های نقاط داخلی میدان را به نواحی نزدیک دیوار مرتبط می سازد و به این ترتیب از استفاده از شبکه ریز در نواحی (نزدیک دیواره) با گرادیان شدید پرهیز می گردد.

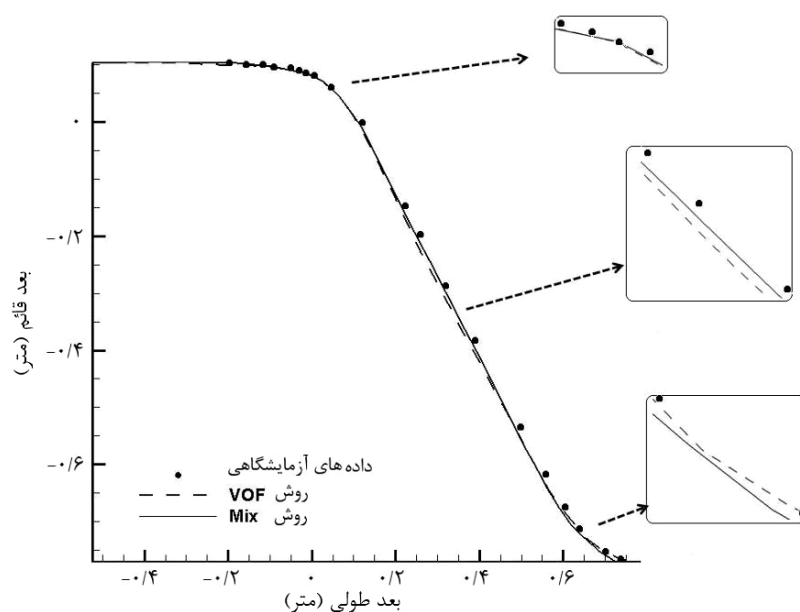


شکل ۲- میدان حل جریان و نحوه شبکه بندی آن، در شبیه سازی عددی آزمایش چانسون و تومبس (۲۰۰۲).

### نتایج و بحث

به منظور صحت سنجی مدل عددی، ارتفاع سطح آزاد شبیه سازی شده با استفاده از دو روش حجم سیال و اختلاطی با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) مقایسه شده اند (شکل ۳). ارتفاع سطح آزاد جریان در سرریز پلکانی می تواند در طراحی دیواره های جانبی سرریز مورد استفاده قرار گیرد. برای تعیین سطح آزاد آب از متغیر  $\alpha$  با مقدار برابر با ۰/۴۰ استفاده شده است. به منظور تعیین مقدار

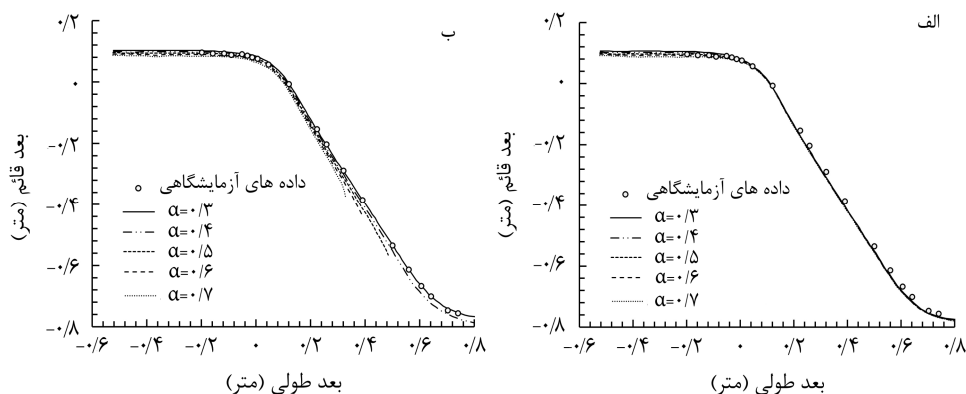
مناسب برای  $\alpha$ ، سطح آزاد آب به دست آمده از مقادیر مختلف  $\alpha$  (۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷) در هر دو روش حجم سیال و اختلاطی با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) مقایسه شدند (شکل ۴). در روش حجم سیال ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> در پیش‌بینی سطح آزاد، برای مقادیر  $\alpha$  برابر ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۳، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱۵ به دست می‌آیند. در روش اختلاطی مقدار خطا برای مقادیر  $\alpha$  برابر ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ به ترتیب برابر ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۳ می‌باشند. در روش اختلاطی با توجه به نفوذ کامل هوا به داخل آب در قسمت‌های پایین دست (این حالت در شکل ۷ که چگونگی ورود هوا به داخل آب را نشان می‌دهد، به خوبی قابل مشاهده است)، مقادیر ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ سطح آب را مشخص نمی‌کنند. با توجه به مقادیر خطای محاسبه شده، مقدار  $\alpha$  برابر ۰/۴ که حداقل خطا را دارد و همچنین به مقدار متوسط ۰/۵ نزدیک‌تر است، انتخاب شد.



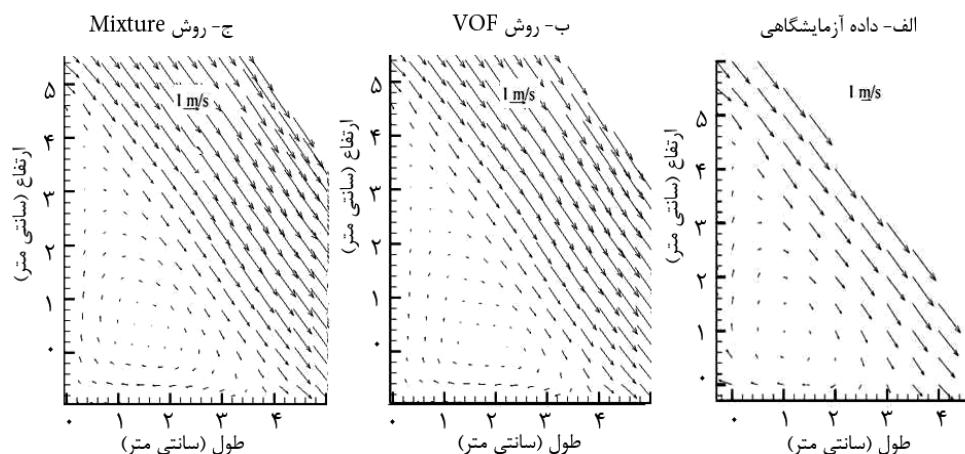
شکل ۳- ارتفاع سطح آزاد شبیه‌سازی شده در دو روش عددی حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲).

براساس شکل ۳ سطح آزاد شبیه‌سازی شده در هر دو روش با نتایج به‌دست آمده از مدل آزمایشگاهی تطابق به‌نسبت مناسبی دارند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در ناحیه روی تاج سرریز به دلیل این که اختلاط آب و هوا وجود ندارد، هر دو روش سطح آزاد را کاملاً مشابه با هم و در تطابق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کنند. براساس نتایج ارائه شده توسط چن و همکاران (۲۰۰۲)، در این آزمایش بعد از پله ۵ (از بعد طولی برابر با حدود ۰/۲ متر) هوادهی آغاز می‌شود. در این ناحیه میزان آشفتگی بالا بوده و اختلاط زیاد آب و هوا وجود دارد. در نواحی پس از شروع هوادهی، روش اختلاطی سطح آزاد را نسبت به روش حجم سیال بهتر پیش‌بینی می‌کند. با فاصله گرفتن از ناحیه شروع هوادهی، نتایج هر دو روش مشابه می‌شوند. اما در پای سرریز روش حجم سیال نتایج به‌نسبت بهتری ارائه می‌دهد (شکل ۳). به‌طور کلی براساس نتایج به‌دست آمده، به‌نظر می‌رسد در نواحی که اختلاط زیاد آب و هوا وجود دارد روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال سطح آزاد را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

سپس میدان جریان شبیه‌سازی شده با استفاده از دو روش بالا با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) مقایسه شده است. در شکل ۵ بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده با استفاده از دو روش حجم سیال و اختلاطی و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه روی پله ۷ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است برای چرخش در شبیه‌سازی‌ها با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در پله ۷ مطابقت دارد. لازم به ذکر است که بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده در هر دو مدل برای کل عمق جریان به نمایش در آمده است. در نتایج شبیه‌سازی (شکل ۵- ب و ج) و نتایج آزمایشگاهی (شکل ۵- الف) گردابه‌ها ساعت‌گرد چرخیده و در ناحیه مثلثی شکل پله قرار گرفته‌اند. برای جریان غیرریزشی به‌دست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یکسان بوده و سرعت جریان غیرریزشی در نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی بزرگ‌تر از سرعت گردابه می‌باشد (شکل ۵). همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، در نتایج آزمایشگاهی مرکز گردابه در حدود ۱/۸ سانتی‌متر از سطح قائم و ۱/۷ سانتی‌متر بالای سطح افقی پله قرار دارند. اما در نتایج شبیه‌سازی دو روش حجم سیال و اختلاطی به‌ترتیب مرکز گردابه در حدود ۱/۹ و ۱/۵ سانتی‌متر از سطح قائم و ۱ و ۱/۳ سانتی‌متر بالای سطح افقی پله واقع شده است که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، روش اختلاطی این فواصل را مناسب‌تر از روش حجم سیال شبیه‌سازی نموده است. پله ۷، در نواحی ابتدایی پس از شروع هوادهی قرار دارد و همان‌طور که اشاره شد در این نواحی با استفاده از روش اختلاطی، سطح آزاد نیز نسبت به روش حجم سیال بهتر شبیه‌سازی شده بود.



شکل ۴- مقایسه سطح آزاد آب به دست آمده از مقادیر مختلف  $\alpha$  در هر دو روش (الف) حجم سیال و (ب) اختلاطی با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲).

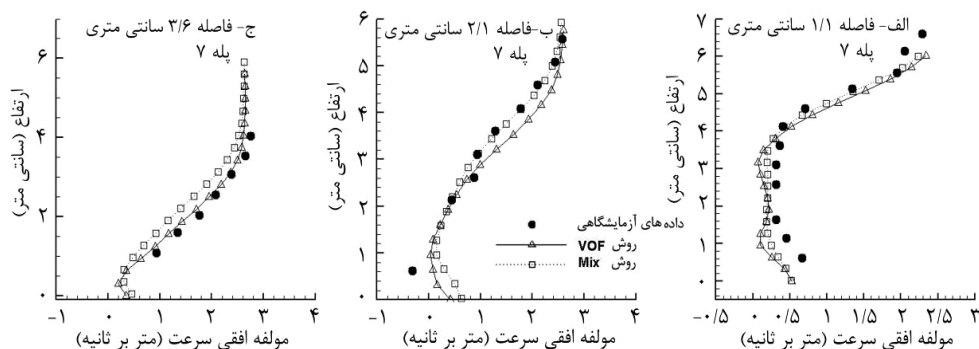


شکل ۵- بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده با استفاده از دو روش حجم سیال و اختلاطی و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه روی پله ۷.

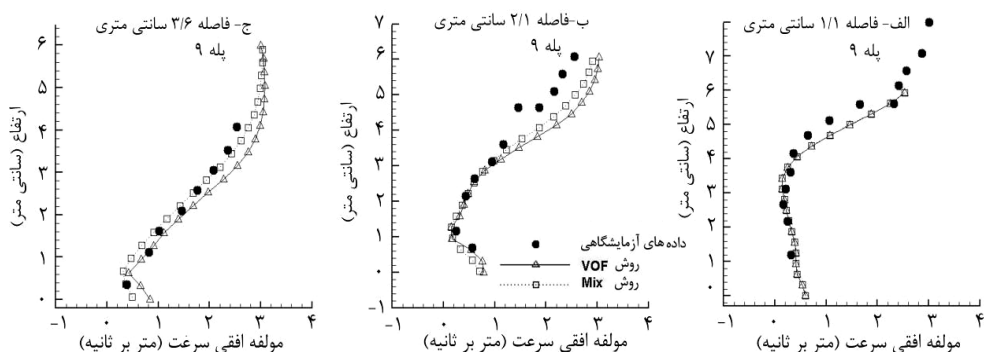
در شکل‌های ۶ و ۷ توزیع سرعت شبیه‌سازی شده در مقاطع مختلف پله‌های ۷ و ۹ در دو مدل بالا در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در بیش‌تر مقاطع تطابق به‌نسبت مناسبی میان نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در شکل ۶ مقادیر ریشه میانگین

مربعات خطا در حالت‌های الف، ب و ج برای روش اختلاطی به‌ترتیب برابر ۰/۱۵۸، ۰/۲۴۴ و ۰/۳۶۴ و برای روش حجم سیال به‌ترتیب برابر ۰/۲۳۶، ۰/۲۷۹ و ۰/۱۴۸ است. همچنین در شکل ۷ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در حالت‌های الف، ب و ج برای روش اختلاطی به‌ترتیب برابر ۰/۲۳۷، ۰/۲۹۴ و ۰/۱۳۵ و برای روش حجم سیال به‌ترتیب برابر ۰/۲۴۰، ۰/۴۳۰ و ۰/۲۷۵ است. بر روی پله ۷ (شکل ۶) که نزدیک‌تر به محل شروع اختلاط آب و هواست، نتایج دو روش اختلاطی و حجم سیال بهم نزدیک هستند (مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در کل پله ۷ برای روش اختلاطی برابر ۰/۲۵ و برای روش حجم سیال برابر ۰/۲۳ است). اما در پله ۹ (شکل ۷) که اختلاط کامل‌تر آب و هوا انجام شده، روش اختلاطی نتایج به‌نسبت بهتری ارائه می‌دهد (مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در کل پله ۹ برای روش اختلاطی برابر ۰/۲۳ و برای روش حجم سیال برابر ۰/۳۳ است). حتی در شکل برای هر یک از حالت‌ها با توجه به نتایج میدان سرعت شبیه‌سازی شده، تشکیل گردابه‌های تقریباً یکسان در دو روش اختلاطی و حجم سیال را می‌توان به‌دلیل افت انرژی تقریباً یکسان جریان عبوری از روی سرریز پلکانی در این مدل‌ها دانست که با نتایج رضایی و همکاران (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد.

در جریان‌های بالا بحرانی بر روی سرریزهای پلکانی مقدار هوای محبوس در آب از مهم‌ترین پارامترهای طراحی هیدرولیکی است. مقدار هوای محبوس حجم جریان آب را افزایش داده که در تعیین ارتفاع دیواره‌های جانبی سرریز نقش مهمی را ایفا می‌کند. وجود هوا در لایه مرزی تنش برشی را در لایه‌های جریان کاهش می‌دهد. بنابراین افزایش موتمن جریان باید در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مدنظر قرار گیرد. از طرفی وجود هوا در جریان‌های با سرعت بالا ممکن است از خرابی ناشی از خوردگی یا کاویتاسون جلوگیری کند یا آن را کاهش دهد. همچنین وجود حباب‌ها در جریان آب بر روی آشفتگی و اختلاط ناشی از آن تأثیر می‌گذارد. در شکل ۸ چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه‌سازی شده توسط روش‌های اختلاطی و حجم سیال و داده‌های آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی روش اختلاطی، الگوی به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی را به‌خوبی ارائه می‌دهد (شکل ۸).



شکل ۶- توزیع سرعت شبیه‌سازی شده با دو روش حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع مختلف پله ۷.

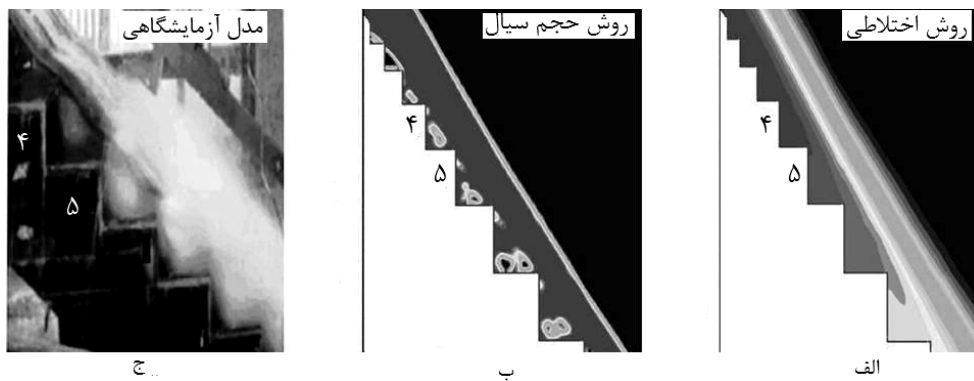


شکل ۷- توزیع سرعت شبیه‌سازی شده در مقاطع مختلف پله ۹ با دو روش حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی.

در شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که مکان شروع هوادهی در نتایج روش اختلاطی و داده‌های آزمایشگاهی روی پله ۵ می‌باشد. اما در روش حجم سیال ورود هوا به داخل آب از پله ۱ مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که در نقطه شروع هوادهی، درجه آشفتگی آنقدر بزرگ است که هوا را وارد جریان آب می‌کند. با وجود آن‌که میدان سرعت و ارتفاع سطح آزاد شبیه‌سازی شده در دو روش حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲) انطباق به نسبت

مناسبی دارند، اما فرآیند اختلاط آب و هوا در دو مدل عددی بالا متفاوت است. چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه‌سازی شده توسط روش اختلاطی در تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. مکان شروع هوادهی در نتایج روش اختلاطی و داده‌های آزمایشگاهی یکسان است اما در روش حجم سیال ورود هوا به داخل آب از پله ۱ شروع شده و الگوی ورود آن متفاوت می‌باشد.

همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، یک برتری مهم هوادهی روی سرریزهای پلکانی کاهش پتانسیل وقوع کاویتاسیون است. برای سرعت‌های بالا، فشار هیدرودینامیک روی سطوح یا در لبه‌ها ممکن است به زیر فشار بخار آب سقوط و منجر به کاویتاسیون شود که باعث صدمات شدید به بتن سرریز می‌گردد. دانستن نقطه شروع هوادهی از آن جهت اهمیت دارد که ناحیه هوادهی نشده سرریز که مستعد کاویتاسیون است، مشخص می‌گردد. در ادامه با توجه به اهمیت ذکر شده و به‌منظور بررسی بیش‌تر توانایی روش‌های اختلاطی و حجم سیال در شبیه‌سازی ورود هوا به داخل آب و نقطه شروع هوادهی، با استفاده از این دو روش مدل آزمایشگاهی چانسون و تومبس (۲۰۰۲) شبیه‌سازی می‌گردد.



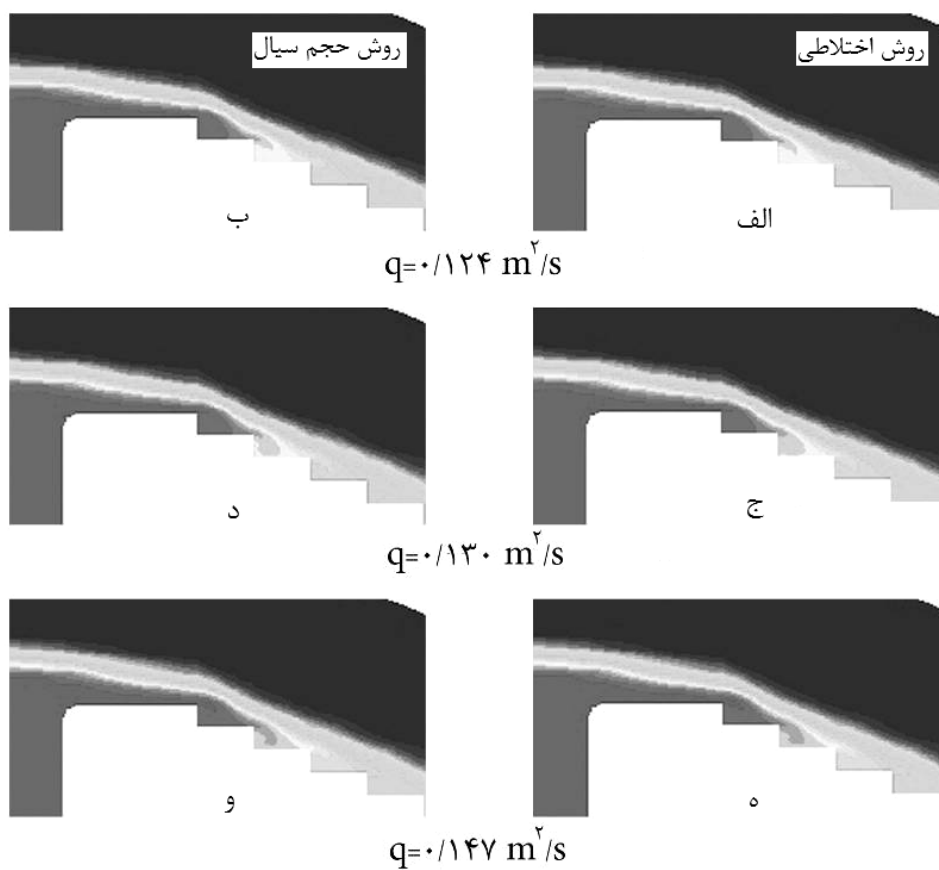
شکل ۸- چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه‌سازی شده توسط الف) روش اختلاطی، ب) روش حجم سیال و ج) نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲).

در شکل ۹ چگونگی ورود هوا به داخل آب و مکان شروع هوادهی شبیه‌سازی شده توسط روش‌های اختلاطی و حجم سیال به‌ترتیب در دبی‌های ۰/۱۲۴، ۰/۱۳۰ و ۰/۱۴۷ مترمربع بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می‌توان مشاهده نمود مکان شروع هوادهی و چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه‌سازی شده توسط دو روش اختلاطی و حجم سیال یکسان می‌باشد.

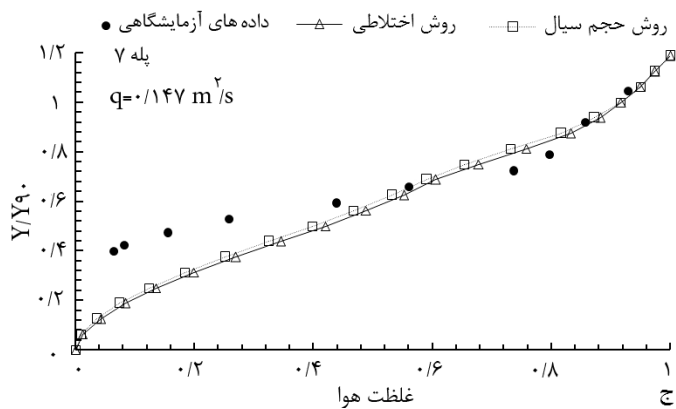
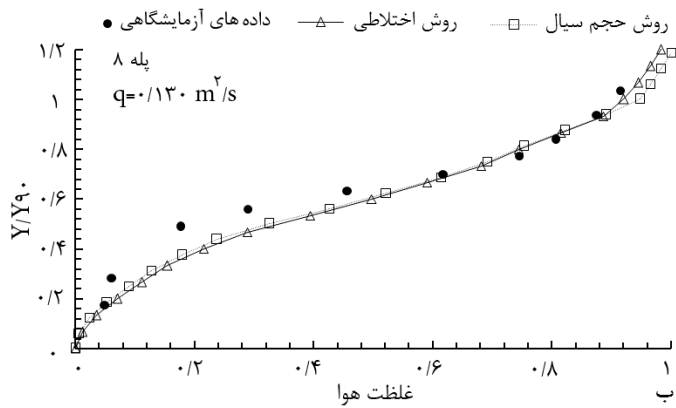
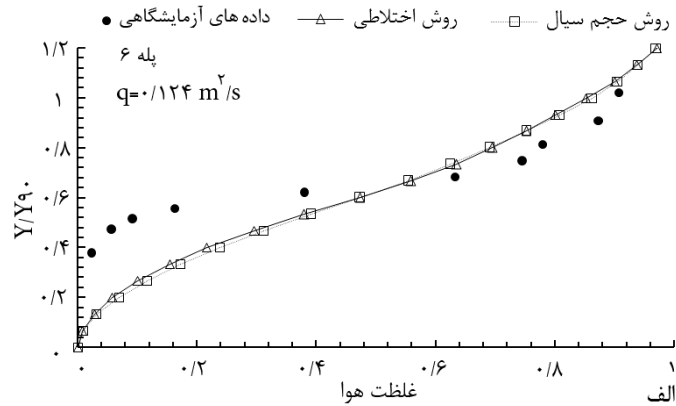
برای بررسی بیشتر، در شکل ۱۰ تغییرات غلظت هوای محبوس در آب در دبی‌های ۰/۱۲۴، ۰/۱۳۰ و ۰/۱۴۷ مترمربع بر ثانیه، به‌ترتیب در پله‌های ۶، ۷ و ۸ به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی چانسون و تومبس (۲۰۰۱) مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در این شکل، Y نمایانگر عمقی در جهت عمود بر شیب شوت و  $Y_{90}$  عمقی در همان جهت است که در آن غلظت هوا برابر ۹۰ درصد است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در حالت‌های الف، ب و ج شکل ۱۰ برای روش اختلاطی به‌ترتیب برابر ۰/۱۷۰، ۰/۰۸۳ و ۰/۱۳۷ و برای روش حجم سیال به‌ترتیب برابر ۰/۱۶۵، ۰/۰۷۶ و ۰/۱۴۹ است. بنابراین نتایج شبیه‌سازی شده توسط روش‌های حجم سیال و اختلاطی با هم مشابه بوده و روند آن‌ها تطابق به‌نسبت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. براساس نتایج پژوهش‌های چانسون و تومبس (۲۰۰۱) مکان شروع هوادهی در هر سه حالت لبه پله ۵ بوده است. با توجه به نتایج شکل ۱۰ هرچه فاصله پله از مکان شروع هوادهی بیشتر شود، انطباق این نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۰-الف که نتایج پله ۶ (نزدیک‌ترین پله به مکان شروع هوادهی) ارایه شده، بیش‌ترین اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. به‌ترتیب در شکل ۱۰-ب و ج که نتایج پله‌های ۷ و ۸ نشان داده شده، انطباق نتایج عددی و آزمایشگاهی بیشتر می‌شود.

طبق نتایج به‌دست آمده، در شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام شده توسط چن و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از روش‌های اختلاطی و حجم سیال، رفتار اختلاط آب و هوا متفاوت بوده، ولی در شبیه‌سازی آزمایش‌های چانسون و تومبس (۲۰۰۱)، این رفتار به‌نسبت مشابه بوده است. به‌نظر می‌رسد علت این امر شیب بسیار بیش‌تر قسمت شوت در سرریز مورد استفاده در آزمایش‌های چن و همکاران (۲۰۰۲) باشد که در این حالت اختلاط بیش‌تر آب و هوا وجود دارد.



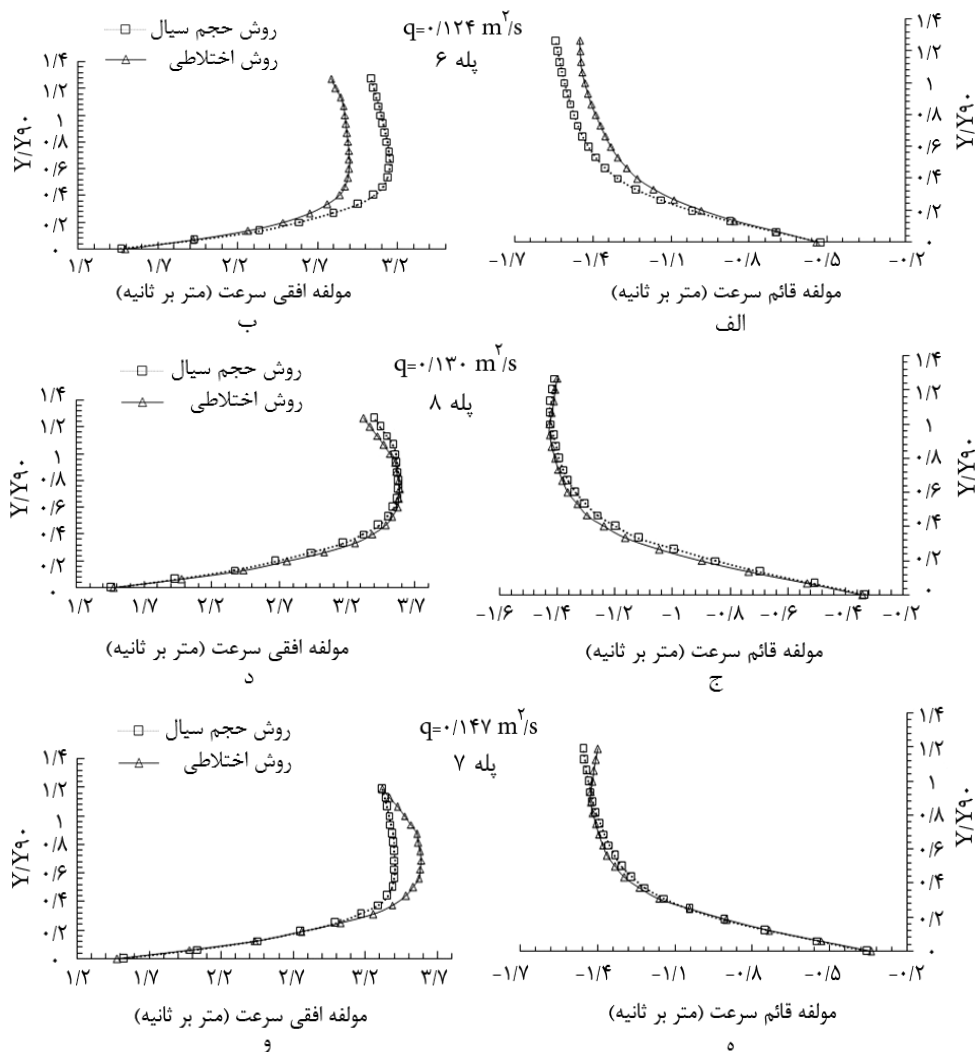


شکل ۹- مقایسه مکان شروع هوادهی و چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه سازی شده توسط روش های اختلاطی (الف، ج و ه) و حجم سیال (ب، د و و) و در شبیه سازی عددی آزمایش چانسن و تومبس (۲۰۰۲).



شکل ۱۰- توزیع غلظت هوای محبوس در آب شبیه‌سازی شده توسط دو روش حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی.

در شکل ۱۱ مؤلفه سرعت در راستای افقی و مؤلفه سرعت در راستای قائم شبیه‌سازی شده توسط دو روش اختلاطی و حجم سیال، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، هرچه فاصله پله از مکان شروع هوادهی بیش‌تر شود، میدان سرعت شبیه‌سازی شده توسط دو روش عددی بالا در تطابق بیش‌تری با یکدیگر قرار می‌گیرند.



شکل ۱۱- توزیع سرعت شبیه‌سازی شده توسط دو روش حجم سیال و اختلاطی در مقایسه با یکدیگر.

علاوه بر نتایج بالا زمان هم‌گرایی در روش اختلاطی در مقایسه با روش حجم سیال بسیار کم‌تر می‌باشد، به طوری که برای یک سیستم با پردازش‌گر دو هسته‌ای ۲/۶۶ گیگا هرتز، مدت زمان لازم برای هم‌گرایی مدل آزمایشگاهی چن و همکاران (۲۰۰۲)، برای روش حجم سیال در حدود ۲۴ ساعت و برای روش اختلاطی در حدود ۵ ساعت بوده است. در هر دو روش از شبکه‌بندی و شرایط مرزی یکسان استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های چانسون و تومبس (۲۰۰۲) نیز زمان هم‌گرایی روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال با همان شرایط سخت‌افزاری و با شبکه‌بندی و شرایط مرزی یکسان برای دو روش بسیار کم‌تر می‌باشد. این زمان برای روش حجم سیال در حدود ۱۰ ساعت و برای روش اختلاطی در حدود ۴ ساعت است.

### نتیجه‌گیری

سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌هایی می‌باشند که در بازه‌ای از رودخانه که شیب تند دارد، به‌منظور استهلاک انرژی و کاهش فرسایش به‌کار می‌روند. استفاده از سرریز پلکانی ضمن این‌که موجب کاهش سرعت و افت انرژی بیش‌تر جریان از طریق ایجاد تلاطم در طول سازه می‌گردد، باعث افزایش قدرت خود پالایی رودخانه به‌واسطه هوادهی مناسب در ناحیه پلکان‌های سرریز نیز می‌شود. پیچیدگی جریان دو فازی آب و هوای عبوری از روی سرریزهای پلکانی سبب گردیده است تا برای شبیه‌سازی جریان عبوری از روی این سرریزها از مدل‌های شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده گردد. در این مقاله، سطح آزاد و الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی دو مدل آزمایشگاهی متفاوت، با استفاده از نرم‌افزار فلونت و بهره‌گیری از روش‌های حجم سیال و اختلاطی شبیه‌سازی گردیده است. براساس نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی سطح آزاد، نتایج هر دو روش حجم سیال و اختلاطی در تطابق به‌نسبت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی قرار دارند. اما به‌نظر می‌رسد در نواحی پس از شروع هوادهی که اختلاط زیاد آب و هوا وجود دارد، روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال سطح آزاد را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

براساس نتایج شبیه‌سازی یکی از مدل‌های آزمایشگاهی (چن و همکاران، ۲۰۰۲)، فرآیند اختلاط آب و هوا در این دو روش متفاوت است. چگونگی ورود هوا به داخل آب شبیه‌سازی شده توسط روش اختلاطی در تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد و مکان شروع هوادهی در نتایج روش اختلاطی و داده‌های آزمایشگاهی یکسان است. اما در روش حجم سیال، ورود هوا به داخل آب

از پله ۱ و زودتر از حالت واقعی آن شروع شده و الگوی ورود آن متفاوت می‌باشد. در مدل آزمایشگاهی دیگر شبیه‌سازی شده (توسط چانسون و تومبس، ۲۰۰۲)، مکان شروع هوادهی و چگونگی ورود هوا به داخل آب در دو روش اختلاطی و حجم سیال یکسان می‌باشد. به نظر می‌رسد علت این امر شیب بسیار بیش‌تر قسمت شوت در سرریز مورد استفاده در آزمایش‌های چن و همکاران (۲۰۰۲) باشد که در این حالت اختلاط بیش‌تر آب و هوا وجود دارد.

همچنین نتایج تغییرات غلظت هوای محبوس در آب شبیه‌سازی شده توسط روش‌های حجم سیال و اختلاطی در دبی‌های متفاوت و در پله‌های مختلف، با هم مشابه هستند. اما هرچه فاصله پله از مکان شروع هوادهی بیش‌تر شود، انطباق این نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بیش‌تر می‌شود. به‌طورکلی براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌نظر می‌رسد با توجه به اهمیت اختلاط آب و هوا در روی سرریزهای پلکانی، روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال این جریان را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. علاوه‌بر نتایج بالا مشخص گردید که چنان‌چه از کامپیوتر یکسان برای شبیه‌سازی دو روش عددی حجم سیال و اختلاطی استفاده گردد، زمان هم‌گرایی روش اختلاطی در مقایسه با روش حجم سیال بسیار کم‌تر است.

### منابع

1. Bombardelli, F.A., Meireles, I., and Matos, J. 2010. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. *Environ. Fluid Mech.* 11: 3. 263-288.
2. Carvalho, R., and Amador, A. 2008. Physical and numerical investigation of the skimming flow over a stepped spillway. P 1767–1772, In: *Proceedings of the 3rd IAHR international symposium on hydraulic structures, Nanjing, China.*
3. Chanson, H. 2001. A transition flow regime on stepped spillways: the facts. In: *Proceedings of the 29<sup>th</sup> IAHR Congress. Beijing, China, Pp: 490-498.*
4. Chanson, H., and Toombes, L. 2002. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Can. J. Civ. Engin.* 29: 145-156.
5. Chen, Q., Dai, G., and Liu, H. 2002. Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway over flow. *J. Hydr. Engin.* 128: 7. 683-688.
6. Cheng, X., Chen, Y., and Luo, L. 2006. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillway. *Sci. in China Series E: Tech. Sci.* 49: 6. 674-684.

7. Cheng, X., Luo, L., and Zhao, W. 2004a. Study of aeration in the water flow over stepped spillway. In: Proceedings of the world water congress, ASCE, Salt Lake City, UT, USA, Pp: 1-8.
8. Cheng, X., Luo, L., Zhao, W., and Li, R. 2004b. Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillway. Prog. Nat. Sci. 14: 7. 626-630.
9. Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E. 2005. Bubbles, drops and particles. Academic Press, New York, 400p.
10. Hirt, C., and Nicholls, B. 1981. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. J. Comp. Phys. 39: 1. 201-225.
11. Manninen, M., Taivassalo, V., and Kallio, S. 1996. On the Mixture Model for Multiphase Flow. VTT Publications 288. Technical Research Center of Finland, 67p.
12. Naderi-Rad, A. 2007. Numerical investigation of energy dissipation in simple, broad and slope stepped spillway by using fluent. Master of Science Degree Thesis. Shiraz University. (In Persian)
13. Rezaie, M., Nikseresht, A., and Taleb-Bidokhti, N. 2009. Numerical simulation of two-phase flow on stepped spillway. In: Proceedings of 8<sup>th</sup> Hydraulic Conference. Tehran University. 8p. (In Persian)
14. Sorensen, R.M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. J. Hydr. Engin. 111: 12. 1461-1472.
15. Tabbara, M., Chatila, J., and Awwad, R. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. J. Com. Struc. 83: 27. 2215-2224.
16. Varjavand, A., Khosravi-Nia, P., and Salmasi, F. 2008. Investigation of energy dissipation in stepped spillway by using fluent numerical modeling. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering. 7p. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(4), 2013*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Comparison of Mixture and VOF methods for numerical simulation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways**

**\*M. Javan<sup>1</sup>, S. Sadeghfam<sup>2</sup> and A. Eghbalzadeh<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah,

<sup>2</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Razi University, Kermanshah

Received: 11/06/2010; Accepted: 09/30/2012

### **Abstract**

Because stepped spillways can significantly reduce the depth and size needed for a stilling basin at the toe of a dam and lead to great economic benefit, these spillways are increasingly attractive in hydraulic engineering. It is commonly acknowledged that free-surface aeration is significant in stepped spillways. In this paper, for investigation of Mixture and VOF method's ability, air-entrainment in skimming flow over the stepped spillways is simulated by using Fluent software. The numerical simulation results of free surface, velocity components and air concentration in water and circumstance of air entry into the water have been compared with the experimental results. It was found, downstream of the inception point of free-surface aeration which rapid free-surface aeration is observed, free surface is simulated better by Mixture method. On the steps downstream of the inception point of free-surface aeration, the results of Mixture and VOF methods about velocity distribution are closer together (RMSE is equal to 0.25 and 0.23 for Mixture and VOF Methods, respectively). But on the steps located further downstream by a strong air entrainment, Mixture method gives relatively better results (RMSE is equal to 0.23 and 0.33 for Mixture and VOF Methods, respectively). Also in the Mixture method, convergence time is much less than VOF method. This time reduces about four to five times.

**Keywords:** Fluent, Mixture method, Stepped spillway, VOF method

---

\* Corresponding Author; Email: javanmi@gmail.com

