نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره دهم / پاییز ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 10 / December 2016

شبیه‌سازی عددی پخش جت آب در حوضچه استغراق و فشار وارد بر کف آن

احسان بهنام طلب[۱]
مسعود قدسیان*[۲]
امیررضا زراتی[۳]
علی‌اکبر صالحی نیشابوری[۴]

چکیده

در این تحقیق پدیده پخش جت در حوضچه استغراق به کمک نرم‌افزار Flow3D مدل‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این نرم‌افزار توانایی خوبی در پیش‌بینی مشخصات پخش جت در آب ساکن شامل پروفیل‌های سرعت و زوایای پخش در ناحیه جت آزاد و فشار در ناحیه برخورد دارد. همچنین ارتفاع محدوده‌ای از جت که تحت تأثیر کف حوضچه استغراق قرار گرفته به‌خوبی توسط مدل عددی پیش‌بینی می‌شود. نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهد که زوایای بازشدگی جت و انقباض هسته جت به ترتیب در محدوده‌های ۵ تا ۱۱ درجه و ۹ تا ۱۲ درجه است که این مقادیر به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مدل عددی، پروفیل‌های بی‌بعد فشار در کف حوضچه استغراق نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیشین را با ۱۵ درصد خطا پیش‌بینی کرده است. از طرفی مدل عددی، فشار متوسط بی‌بعد در نقطه ایستایی را در شرایطی که هسته جت به کف حوضچه استغراق برخورد می‌کند در حدود ۱۴ درصد بیشتر از مدل‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند که علت آن نفوذ حباب‌های هوا به داخل حوضچه استغراق در آزمایش است.

واژه‌های کلیدی

جت دایره‌ای، حوضچه استغراق، مدل‌سازی عددی، توزیع فشار، پخش جت.

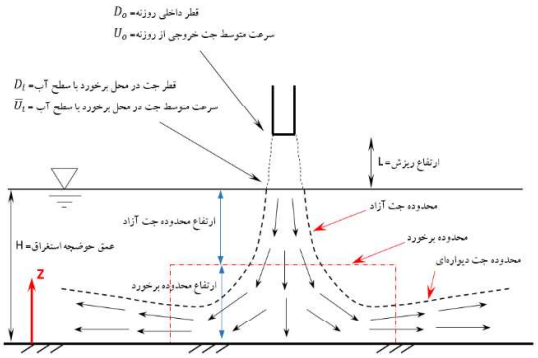
۱. دانشجوی دکترای هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۲*. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ghods@modares.ac.ir.
۳. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر تهران.
۴. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

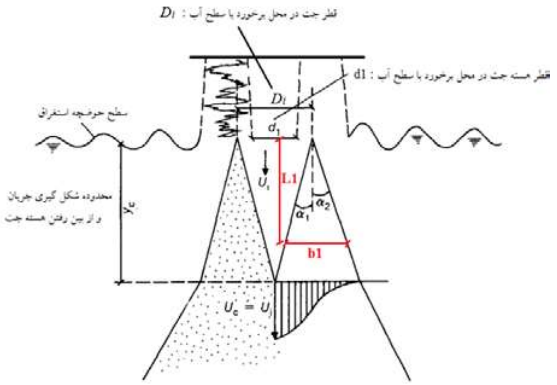
مقدمه

جت‌های ریزشی یکی از موضوعات بسیار مهم در سازه‌های هیدرولیکی هستند. غالباً این جت‌ها به حوضچه استغراق وارد شده و به‌تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند. حوضچه استغراق[1] حوضچه‌ای با عمق مشخص است که پدیده پخش و استهلاک جت داخل آن اتفاق می‌افتد. کاموی و تاناکا[2] (۱۹۷۲)، بلتاس و راجاراتنام[3] (۱۹۷۳، ۱۹۷۴، ۱۹۷۷) و نیز لیو و همکاران[4] (۲۰۰۳)، جت داخل حوضچه استغراق را به ۳ محدوده آزاد[5]، برخورد[6] و دیواره‌ای[7] تقسیم‌بندی کرده و پخش جت را در این نواحی شرح و برای طول این نواحی مقادیری را پیشنهاد داده‌اند. این محدوده‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): محدوده‌های تعریف شده و برخی پارامترهای مهم در جت گسیخته نشده‌ای که وارد حوضچه استغراق شده است. (مبدأ محور Z در کف حوضچه استغراق قرار دارد)

در محدوده آزاد مشخصات جت هنوز تحت تأثیر بستر حوضچه قرار نگرفته است. در این محدوده زوایای انقباض هسته جت (α_1) و پخش جت (α_2) در شکل (۲) مشخص گردیده است. اروین و فالوی[8] (۱۹۸۷) این دو زاویه را به ترتیب ۴/۵ تا ۸ درجه و ۶ تا ۱۴ درجه گزارش کرده‌اند و این تفاوت در این زوایا نیز به دلیل آشفتگی‌های مختلف در جت ورودی و تغییرات میزان هوای کشیده شده توسط جت به داخل حوضچه استغراق است.



شکل (۲): نحوه پخش جت پس از ورود به حوضچه استغراق در محدوده آزاد، اروین و فالوی (۱۹۸۷)

بر اساس پیشنهاد آلبرتسون[9] و همکاران (۱۹۴۸) مبنی بر اینکه مجموع زوایای پخش جت مقداری ثابت است ($\alpha1+\alpha2=$constant) پارامتر ضریب C و ضریب پخش C_d[10] به شکل روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند. ضریب C بر اساس رابطه (۱) پارامتری بدون بعد است که از تقسیم b_1 (ضخامت لایه اختلاطی) به L_1 (طول پیموده شده توسط جت) محاسبه می‌شود (شکل (۲)).

$$C = \frac{b_1}{L_1} \qquad (۱)$$

$$C = \tan\alpha_1 + \tan\alpha_2 \qquad (۲)$$

$$\alpha_1 = \arctan\frac{1}{2C_d} \qquad (۳)$$

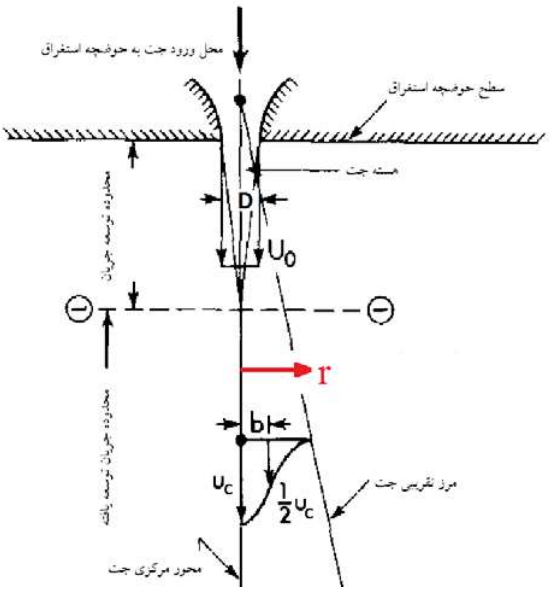
مک‌کیوق و اروین[11] (۱۹۸۱) ضریب C را برای جت آزاد با عدد رینولدز ۱۰[۳] تا ۱۰[۴] در محدوده ۰/۳۷ تا ۰/۴۱ پیشنهاد دادند. ضریب پخش C_d توسط افراد مختلفی محاسبه شده است. آلبرتسون (۱۹۴۸) برای رینولدزهای بالای ۱۵۰۰ به ترتیب ۶/۲ و ۵/۲ را برای جت با مقطع دایره‌ای هوا و جت صفحه‌ای (جتی با مقطع مستطیلی که طول آن خیلی بزرگ‌تر از عرض آن است) هوا پیشنهاد داده است. مک‌کیوق و اروین (۱۹۸۱) برای رینولدزهای ۱۰[۳] تا ۱۰[۴] مقدار ۲/۹۶ و اروین و فالوی (۱۹۸۷) برای جت آزاد با عدد رینولدز ۱۰[۵] تا ۱۰[۶]، مقدار ۳/۵۵ را محاسبه کرده‌اند. همچنین مالمستروم[12] و

[1] Plunge Pool
[2] Kamoi &Tanaka
[3] Beltaos & Rajaratnam
[4] Liu
[5] Free jet region
[6] Impingement region
[7] Wall jet region
[8] Ervine & Falvey
[9] Albertson
[10] Diffusion Coefficient
[11] McKeogh & Ervine
[12] Malmstrom

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

همکاران (۱۹۹۷) برای رینولدزهای محدوده 10^4 تا 10^5 و برای جت دایره‌ای هوا در محیط هوا این ضریب را بین ۲/۷ تا ۳ پیش‌بینی کرده‌اند.

پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در محدوده جت آزاد نیز توسط افراد مختلفی بررسی گردیده است. راجاراتنام[1] (۱۹۷۶) دو پروفیل بی‌بعد بر اساس راه‌حل‌های تحلیلی تلمین[2] و گورتلر[3] به‌صورت روابط (۴) و (۵) ارائه کرد. در این روابط r_o شعاع روزنه، b فاصله‌ای از محور مرکزی پروفیل سرعت که سرعت در آن به نصف سرعت محور مرکزی رسیده است، U_o سرعت متوسط جت در خروجی روزنه و u_c سرعت در محور مرکزی جت است (شکل (۳)).



شکل (۳): مشخصات پروفیل سرعت در پخش جت در محدوده آزاد، برگرفته از راجاراتنام (۱۹۷۶)

$$\frac{u_c}{U_o} = 1.1966\frac{r_o}{b} \qquad (۴)$$

$$\frac{u_c}{U_o} = 1.1242\frac{r_o}{b} \qquad (۵)$$

محدوده برخورد محدوده‌ای است که جت، به دلیل نزدیک‌شدن به کف حوضچه استغراق، شروع به انحراف از مسیر عادی خود را می‌کند. کاهش سرعت در محور مرکزی جت در این محدوده، با نحوه کاهش سرعت در محور مرکزی جت در محدوده آزاد متفاوت است. در این ناحیه سرعت با نرخ بسیار بالا به هد فشار تبدیل شده و سپس به کف حوضچه برخورد خواهد کرد. یکی از پارامترهای مهم در محدوده برخورد، فشار وارد بر کف حوضچه استغراق است. برای بررسی تغییرات فشار در کف حوضچه استغراق، پارامتر فشار متوسط بی‌بعد C_P استفاده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_P = \left(\overline{P} - H\right)/\left(\overline{U_i}^2/2g\right) \qquad (۶)$$

در این رابطه، U_i سرعت متوسط جت در محل برخورد با سطح حوضچه استغراق است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\overline{U_i} = \sqrt{U_o^2 + 2gL} \qquad (۷)$$

در روابط فوق Uo سرعت متوسط خروجی از جت، L ارتفاع ریزش جت از خروجی روزنه تا سطح آب، H عمق آب در حوضچه استغراق و $\overline{P}$ فشار متوسط برحسب متر در کف حوضچه استغراق است (شکل (۱)).

برای تعیین طول ناحیه آزاد و ناحیه برخورد نیز تحقیقات مختلف توسط محققان مختلفی انجام شده است. طول محدوده آزاد از حاصل‌ضرب پارامتر بی‌بعد β در عمق حوضچه استغراق محاسبه می‌شود($H_{freejet\ region}$= β.H) و طول محدوده برخورد نیز از حاصل تفریق عمق حوضچه استغراق از طول محدوده آزاد به دست می‌آید و با η.H نمایش داده می‌شود(η.H=H-β.H یا η=1.0-β). برای پارامتر β، بلتااس[4] و راجاراتنام (۱۹۷۴) برای جت دایره‌ای هوا مقدار ۰/۸۶، کولا[5] (۱۹۶۶) برای جت مستغرق آب مقدار ۰/۶۵ تا ۰/۷۵، بلتااس و راجاراتنام (۱۹۷۳) برای جت صفحه‌ای هوا مقدار ۰/۷ و گاتمارک[6] و همکاران (۱۹۷۸) برای جت هوا مقدار ۰/۷۵ را پیشنهاد داده‌اند. برای پارامتر η نیز بلتااس و راجاراتنام (۱۹۷۴) برای جت دایره‌ای هوا مقدار ۰/۱۴، کولا (۱۹۶۶) برای جت مستغرق آب مقدار ۰/۲۸، بلتااس و راجاراتنام (۱۹۷۳) برای جت صفحه‌ای هوا مقدار ۰/۳ و گاتمارک و همکاران (۱۹۷۸) برای جت هوا مقدار ۰/۲۵ را ارائه کردند.

بخش عمده‌ای از تحقیقات گذشته به نحوه پخش جت داخل حوضچه و توزیع فشار در کف حوضچه استغراق اختصاص یافته است. در ادامه به برخی از تحقیقات قبلی اشاره‌ای خواهد شد.

[1] Rajaratnam
[2] Tollmien Solution
[3] Goertler-type Solution
[4] Beltaos
[5] Cola
[6] Gutmark

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

آلبرتسون و همکاران (۱۹۴۸) چگونگی پخش جت دایره‌ای و مستطیلی مستغرق را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. هوما[1] (۱۹۵۳) جت دایره‌ای و کولا (۱۹۶۵، ۱۹۶۶) جت دایره‌ای و مستطیلی مستغرق در آزمایشگاه را مدل‌سازی و برخی پارامترهای مرتبط با پخش جت را بررسی نمودند. کولا (۱۹۶۵) در بخشی از کار خود نیز حل تحلیلی پخش جت را انجام داد.

هارتونگ و هاسلر[2] (۱۹۷۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی جت دایره‌ای و مستطیلی ریزشی، به محاسبه زوایای پخش جت پرداختند. مک‌کیوق و اروین (۱۹۸۱) زوایای پخش یک جت دایره‌ای ریزشی را محاسبه کردند. همچنین چی و یوئن[3] (۱۹۸۵) نحوه پخش مومنتوم جت‌های دایره‌ای و مستطیلی ریزشی را مطالعه کردند.

ورود هوا توسط جت‌های ریزشی به داخل حوضچه استغراق نیز ازجمله موضوعات مهم بشمار می‌آید. مک‌کیوق و السawی[4] (۱۹۸۰)، مک‌کیوق و اروین (۱۹۸۱)، اروین و فالوی (۱۹۸۷)، بونتو و لاهی‌جر[5] (۱۹۹۳)، بوهرر[6] و همکاران (۱۹۹۸) و چانسون[7] و همکاران (۲۰۰۴) تحقیقاتی در این زمینه انجام دادند.

توزیع فشار در کف حوضچه استغراق توسط محققان مختلفی ازجمله مور[8] (۱۹۴۳)، لنکاستر[9] (۱۹۶۱)، کولا (۱۹۶۵)، هارتونگ و هاسلر (۱۹۷۳)، گاتمارک و همکاران (۱۹۷۸)، کوبوس[10] و همکاران (۱۹۷۹)، لموس[11] (۱۹۸۲)، فرانزتی و تاندا[12] (۱۹۸۴)، می و ویلوبی[13] (۱۹۹۱)، بالیو[14]، فرانزتی و تاندا (۱۹۹۲)، پوارتاس-آگودو[15] (۱۹۹۴)، اروین و همکاران (۱۹۹۷)، بولارت[16] (۲۰۰۲) و مانسو[17] (۲۰۰۶) بررسی شده است. فرانزتی و تاندا نیز (۱۹۸۴) در یک تحقیق گسترده آزمایشگاهی به بررسی جت‌های دایره‌ای وارد شده به حوضچه استغراق پرداختند. آن‌ها پارامترهای مختلف فشار ازجمله فشار متوسط، نوسانات فشار، فشارهای بیشینه و کمینه را بررسی کرده و نیز رابطه‌ای برای پیش‌بینی فشار بیشینه در کف حوضچه استغراق ارائه دادند. اشلایس[18] و همکاران نیز از سال ۲۰۰۲ تحقیقی جامع در زمینه فشارهای وارد به کف حوضچه استغراق و عوامل مؤثر بر آن‌ها را آغاز کرده‌اند که بخشی از آن توسط بولارت (۲۰۰۲)، مانسو (۲۰۰۶) و دوآرت[19] (۲۰۱۴) انجام شده و هنوز ادامه دارد.

اغلب تحقیقات قبلی در زمینه پخش جت و توزیع فشار در کف حوضچه استغراق به‌منظور بررسی و کنترل فشارهای وارد بر کف حوضچه استغراق و نهایتاً طراحی پوشش کف حوضچه انجام شده است. همان‌طور که تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، موضوع پخش جت و توزیع فشار در کف حوضچه استغراق بیشتر به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده و کمتر مدل‌های عددی موردتوجه قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق بررسی عددی پخش جت و توزیع فشار در کف حوضچه استغراق است. ابتدا آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی توزیع فشار در کف ناشی از یک جت ریزشی داخل حوضچه استغراق انجام شد. سپس مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فوق به همراه داده‌های آزمایشگاهی محققین قبلی صحت‌سنجی گردید. در ادامه پروفیل‌های سرعت، نحوه پخش جت داخل حوضچه استغراق و توزیع فشار در کف حوضچه استغراق بررسی شد. نتایج مدل عددی با نتایج موجود از آزمایش‌های محققین گذشته و تعدادی آزمایش اضافی که در تحقیق حاضر انجام شده مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق تعدادی آزمایش به‌منظور اندازه‌گیری و بررسی توزیع فشار در کف حوضچه استغراق در شرایط گوناگون انجام شد. این آزمایش‌ها مطابق جدول (۱) شامل ۹ آزمایش بوده که در آزمایش‌های ۱ تا ۸، جت پس از خروج از نازل وارد اتمسفر شده و سپس به حوضچه استغراق وارد و در آزمایش شماره ۹ جت بلافاصله پس از خروج از روزنه وارد حوضچه

[1] Homma
[2] Hartung & Hausler
[3] Chee &Yuen
[4] Elsawy
[5] Bonetto & LaheyJr
[6] Bohrer
[7] Chanson
[8] Moore
[9] Lencastre
[10] Kobus
[11] Lemos
[12] Franzetti &Tanda
[13] May & Willoughby
[14] Ballio
[15] Puertas-Agudo
[16] Bollaert
[17] Manso
[18] Schleiss
[19] Duarte

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

استغراق می‌شد. در آزمایش‌های ۱ تا ۸ فاصله طی شده توسط جت داخل اتمسفر به‌اندازه‌ای بود که جت به حالت گسیختگی نمی‌رسید.

شکل (۴) شمای کلی مدل آزمایشگاهی شامل جت و حوضچه استغراق را نشان می‌دهد. فشار در کف حوضچه استغراق با استفاده از سنسورهای فشار لحظه‌ای برداشت شد. حوضچه استغراق کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۲ و ارتفاع ۱ متر بود. قطر جت ۴۷ میلی‌متر و فاصله قائم نازل تا کف حوضچه ۴۳ سانتی‌متر بود.

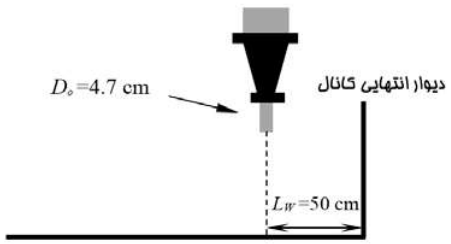


الف) جت و حوضچه ب) کف حوضچه استغراق

شکل (۴): مدل آزمایشگاهی

نکته قابل‌توجه در آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی این بود که در ابتدا، جت خروجی بلافاصله پس از خروج از روزنه، پخش شده و مقطع آن افزایش می‌یافت. برای جلوگیری از پیچش جریان و پخش جت، قطعه‌ای به شکل + قبل از خروجی جت تعبیه گردید و نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این قطعه تأثیر بسیاری در جلوگیری از پیچش جت دارد.

بر اساس تحقیق مانسو (۲۰۰۶) اگر نسبت فاصله محور مرکزی جت از دیواره کناری حوضچه به قطر جت بیشتر از ۹/۵ باشد دیوار کناری اثری بر جت ندارد. موقعیت دقیق محور مرکزی جت و دیوار انتهایی کانال در شکل (۵) ارائه شده است، بر اساس مقادیر ارائه‌شده در این شکل $\frac{L_w}{D_\circ}=\frac{50}{4.7}=10.6\geq 9.5$ و بنابراین دیوار کناری اثری بر جت نخواهد داشت.



شکل (۵): موقعیت جت نسبت به دیوار انتهایی کانال

جدول (۱): مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	$D_\circ$ (cm)	Q (lit/s)	$U_\circ$ (m/s)	H (cm)	L (cm)	Re
۱	۴/۷	۹	۵/۱۹	۲۰	۲۳	۲۴۰۰۰۰
۲		۱۰/۵	۶/۰۶	۱۴	۲۹	۲۸۰۰۰۰
۳		۱۴	۸/۰۷	۱۷	۲۶	۳۸۰۰۰۰
۴		۱۳	۷/۵۰	۱۳	۳۰	۳۵۰۰۰۰
۵				۳۰	۱۳	۳۵۰۰۰۰
۶		۱۵	۸/۶۵	۱۸	۲۵	۴۱۰۰۰۰
۷				۳۲	۱۱	۴۱۰۰۰۰
۸		۱۶/۵	۹/۵۲	۲۰	۲۳	۴۵۰۰۰۰
۹				۴۳	۰	۴۵۰۰۰۰

مدل‌سازی عددی پخش جت در حوضچه استغراق با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام گرفته است. این نرم‌افزار از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر و لزج توسط معادله پیوستگی و معادله ناویر-استوکس به شکل زیر بیان می‌شوند.

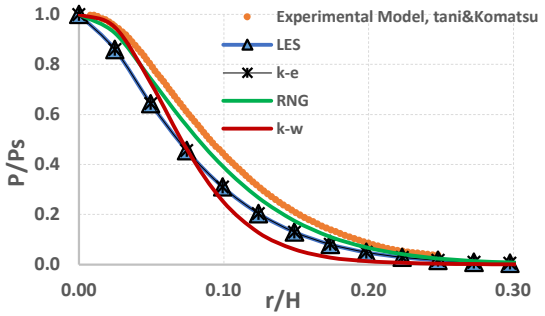
$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u\frac{\partial u_i}{\partial x}+v\frac{\partial u_i}{\partial y}+w\frac{\partial u_i}{\partial z}= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial g}{\partial x_i}+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}\right) \qquad (۹)$$

این نرم‌افزار از مدل‌های آشفتگی مختلفی ازجمله طول اختلاط پرانتل، یک‌معادله‌ای، k-ε ، k-ω، RNG و LES استفاده می‌کند. مدل‌های دومعادله‌ای نسبت به معادلات صفرمعادله‌ای و یک‌معادله‌ای دقت بالاتری در مدل‌سازی آشفتگی جریان دارند. همچنین مدل RNG مدل اصلاح شده‌ای از مدل‌های دومعادله‌ای است و نسبت به دیگر مدل‌های دومعادله‌ای دقت بالاتری مخصوصاً در نزدیک دیواره دارد. برای مقایسه اثر مدل‌های آشفتگی در نتایج پخش جت در حوضچه استغراق، آزمایش شماره ۷ برای مدل‌های آشفتگی مختلف مدل‌سازی گردید. مطابق شکل (۶)، نتایج توزیع فشار در کف حوضچه استغراق نشان داد که مدل آشفتگی RNG توزیع فشار را به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر پیش‌بینی می‌کند. بنابراین در

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

مدل‌سازی جت و حوضچه استغراق از این مدل استفاده‌شده است.

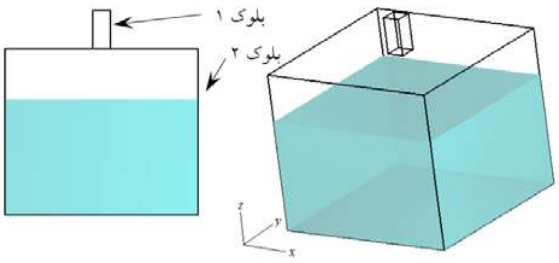


شکل (۶): مقایسه مدل‌های آشفتگی

جریان سیال به‌صورت تک فازی شبیه‌سازی شده است. نرم-افزار Flow3D این قابلیت را دارد که برای تشخیص حجم سیال[1] از روش‌های مختلفی استفاده کند. در این تحقیق از روش حجم سیال خودکار استفاده شده است. در این روش برای سلول‌های سطح جریان، که به‌صورت نیمه‌پر هستند، کمیتی تعریف می‌شود که نسبت پرشدگی آن‌ها از آب را نشان می‌دهد. با معلوم بودن این کمیت محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول‌های میدان حل توسط نرم‌افزار قابل‌تشخیص است.

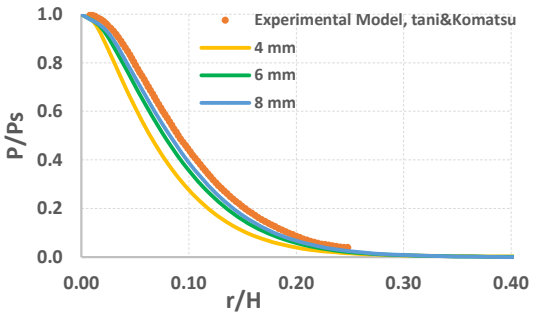
این نرم‌افزار برای مش‌بندی مدل از بلوک استفاده می‌کند و هر بلوک پس از ایجاد، به سلول‌های بسیار کوچک‌تری تقسیم-بندی خواهد شد. بلوک‌ها باید به شکلی ایجاد شوند که تمام میدان حل موردنظر را پوشش دهند، در این تحقیق از دو بلوک برای مدل‌سازی جت و حوضچه استغراق استفاده‌شده است. بلوک مربوط به جت دارای ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و طول و عرض ۴/۷ سانتی‌متر و بلوک مربوط به حوضچه دارای ارتفاع ۴۳ سانتی‌متر و طول و عرض ۲۵ سانتی‌متر است.

برای مش‌بندی میدان حل مطابق شکل (۷) از دو بلوک ۱ و ۲ به ترتیب برای جت و حوضچه استغراق استفاده شده است. برای بررسی اثر اندازه سلول بر نتایج مدل‌های عددی از سه اندازه مختلف سلول در بلوک شماره ۲ استفاده و نتایج آن‌ها مطابق شکل (۸) با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج توزیع فشار در کف حوضچه استغراق نشان می‌دهد که اندازه سلول ۸ میلی‌متری نتایج نزدیک‌تری به مقادیر آزمایشگاهی دارد.



شکل (۷): بلوک‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی جت و حوضچه استغراق

بنابراین برای مش‌بندی میدان، برای بلوک یک از اندازه سلول ۲ میلی‌متر و برای بلوک دو از سلول ۸ میلی‌متری استفاده‌شده است.



شکل (۸): مقایسه اندازه‌های مختلف سلول‌ها در بلوک ۲

با این شرایط بلوک یک و بلوک دو به ترتیب دارای تقریباً ۲۹۰۰۰ و ۲۱۵۰۰۰ سلول هستند.

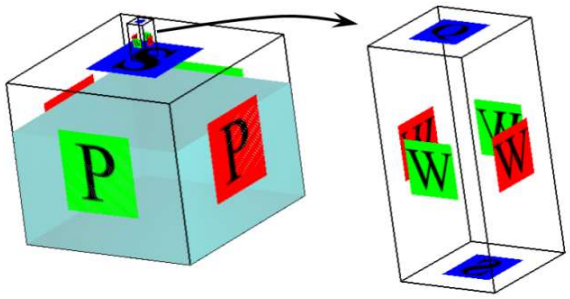
شرایط مرزی بلوک‌های جت و حوضچه استغراق در شکل (۹) ارائه‌شده است. بلوک ۱ دارای شرایط مرزی دبی (Q) و متقارن (S) به ترتیب در بالا و پایین و دیوار (W) در کناره‌ها است. همچنین در بلوک ۲ مرزهای قائم حوضچه استغراق دارای شرایط مرزی فشار-ثابت[2] (P) و شرایط مرزی متقارن و دیوار به ترتیب در بالا و پایین هستند. در شرایط واقعی در فواصل دور از جت، سطح حوضچه استغراق تقریباً ثابت است ولی در نزدیکی محل برخورد جت، سطح آب در حال نوسان است. با در نظر گرفتن مرز فشار-ثابت برای مرزهای حوضچه استغراق عملاً ارتفاع آب در پیرامون حوضچه استغراق ثابت نگه‌داشته خواهد شد.

[1] Volume of Fluid (VOF)

[2] Specified Pressure

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

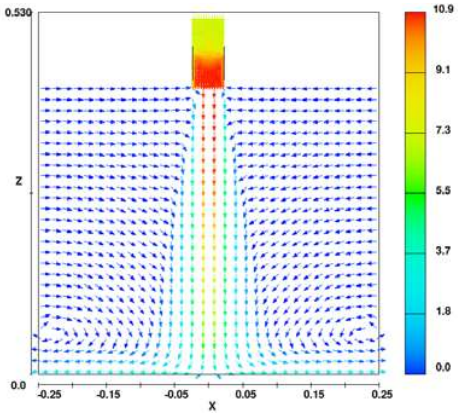
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]



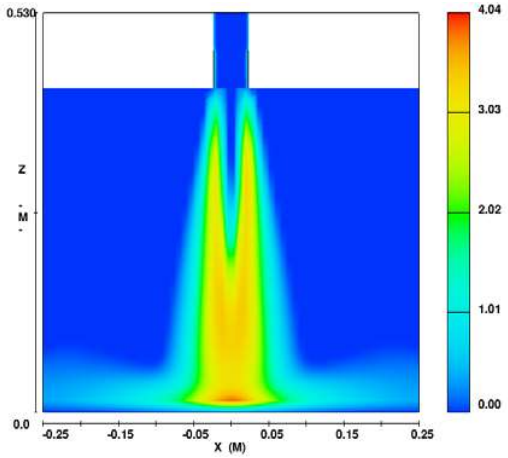
شکل (۹): شرایط مرزی در بلوک یک (سمت راست) و بلوک دو (سمت چپ)

ارائه نتایج

بررسی نتایج مدل‌های عددی مختلف، در دو محدوده جت آزاد (ناحیه ۱) و محدوده برخورد (ناحیه ۲) انجام شده است. قبل از بررسی نتایج در هر ناحیه، میدان سرعت و انرژی جنبشی آشفته در مدل آزمایش شماره ۹ به ترتیب در شکل‌های (۱۰ الف) و (۱۰ ب) ارائه گردیده است. شکل کلی میدان سرعت نشان می‌دهد که جت و پخش آن داخل حوضچه استغراق به‌خوبی مدل‌سازی شده است. همچنین انرژی جنبشی آشفته در محدوده لایه برشی یا به عبارتی محدوده مرز جت در حال پخش بیشینه است.



الف): میدان سرعت (برحسب متر بر ثانیه)

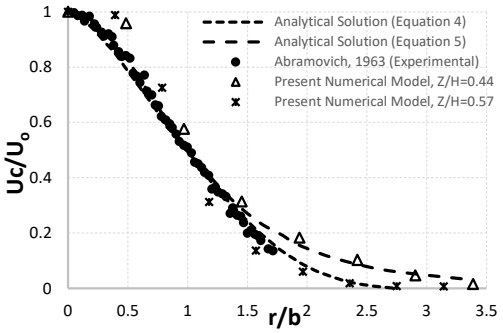


ب): میدان انرژی جنبشی آشفته (بر حسب ژول بر کیلوگرم)

شکل (۱۰): میدان سرعت و انرژی جنبشی آشفته برای مدل آزمایش شماره ۹ در صفحه xz برای y میانی

محدوده جت آزاد (ناحیه اول)

ویژگی مهم این محدوده این است که مشخصات جت تحت تأثیر کف حوضچه قرار ندارد و شرایط پخش جت در فضای نامحدود، حاکم است. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی آزمایش‌های شماره ۹ (جت مستغرق) و شماره ۵ (جت غیر مستغرق) که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه‌شده است با روابط (۱) و (۲) و نیز نتایج آزمایشگاهی آبراموویچ[1] (۱۹۶۳) در شکل (۱۱) ارائه‌شده‌اند که تطابق بسیار خوب آن‌ها با یکدیگر و پیش‌بینی مناسب شرایط پخش در مدل عددی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱)، Z فاصله از کف حوضچه (بر اساس شکل (۱))، r فاصله از محور مرکزی جت (بر اساس شکل (۳)) و b فاصله‌ای از محور مرکزی جت که سرعت آن نصف سرعت محور مرکزی جت است (بر اساس شکل (۳)) است.

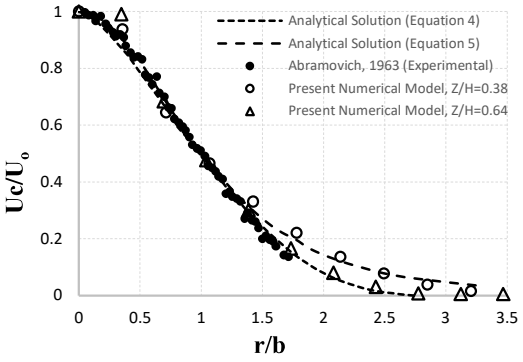


الف) آزمایش شماره ۵

[1] Abramovich

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]



ب) آزمایش شماره ۹

شکل (۱۱): پروفیل‌های بدون بعد سرعت در محدوده جت آزاد در مدل‌سازی آزمایش‌های شماره ۵ و ۹

موضـــوع دیگری که در محدوده جت آزاد مورد بررســـی قرار گرفته است زوایای پخش جت است که در شکل (۲) مشخص شـــده‌اند. این زوایا برای آزمایش‌های انجام شـــده توســـط مدل عددی محاسبه شده و در جدول (۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشـــاهده می‌شـــود زوایای $\alpha 1$ و $\alpha 2$ به ترتیب در محدوده‌های ۵ تا ۱۱ درجه و ۹ تا ۱۲ درجه قرار دارند. به دلیل آشفتگی بالا در محدوده پخش جت پیش‌بینی مناسب مدل آشفتگی می‌تواند تأثیر بسیاری در این زوایا داشته باشد. بعلاوه در نظر گرفته نشـــدن پدیده ورود هوا به داخل جت در مدل عددی نیز ممکن اســـت از علت اختلاف اندک آن‌ها با نتایج اروین و فالوی (۱۹۸۷) باشد.

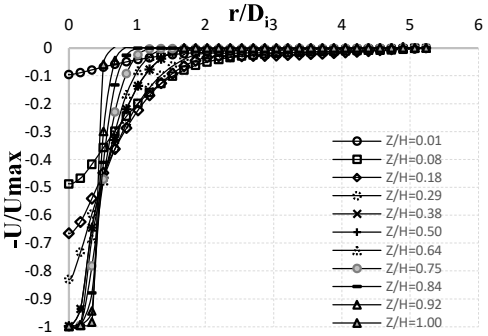
جدول (۲): پارامترهای مختلف پخش جت در مدل‌های عددی

شماره مدل	H(cm)	α_1	α_2	C	C_d
۱	۲۰	۹	۱۱	۰/۳۵	۳/۰۵
۲	۱۴	۱۱	۱۱	۰/۴۰	۲/۴۸
۳	۱۷	۱۰	۹	۰/۳۳	۲/۷۸
۴	۱۳	۱۰	۱۲	۰/۳۸	۲/۹۹
۵	۳۰	۹	۱۰	۰/۳۲	۳/۳۱
۶	۱۸	۹	۹	۰/۳۲	۳/۱۹
۷	۳۲	۵	۱۲	۰/۲۹	۶/۲۱
۸	۲۰	۹	۱۲	۰/۳۷	۳/۰۹
۹	۴۳	۷	۱۱	۰/۳۱	۴/۳۹

علاوه بر زوایای پخش جت، مقادیر پارامترهای C و C_d در مدل‌سازی عددی برای آزمایش‌های انجام شده محاسبه و در جدول (۲) ارائه‌شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود مدل عددی مقدار پارامتر C را در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۴۰ برای محدوده رینولدز $۲/۴\times۱۰^{۵}$ تا $۴/۵\times۱۰^{۵}$ پیش‌بینی کرده است که نزدیک به نتایج مک‌کیوق و اروین (۱۹۸۱) است. همچنین مدل عددی به‌جز برای آزمایش‌های ۷ و ۹ ضریب پخش C_d را برای رینولدزهای $۱۰^{۵}$ تا $۱۰^{۶}$ از ۲/۴۸ تا ۳/۳۱ به‌درستی پیش‌بینی کرده است. البته نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که این پارامتر در شرایط مختلف جت و اعداد رینولدز، بازه گسترده‌ای دارد.

ناحیه برخورد (ناحیه دوم)

شکل (۱۲) تغییرات پروفیل سرعت جت در مدل‌سازی عددی آزمایش شماره ۹ از محل ورود به حوضچه استغراق (Z/H=1.00) تا نزدیکی کف (Z/H=0.01) را نشان می‌دهد. در محور افقی این نمودار، فاصله از محور مرکزی جت r توسط قطر جت در محل برخورد با حوضچه استغراق D_i و در محور قائم، سرعت جت در هر نقطه U توسط سرعت بیشینه جت در محل برخورد با حوضچه استغراق U_{max} بی‌بعد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت در محور مرکزی جت از (Z/H=1.00) تا (Z/H=0.38) مقداری ثابت است که این نشان‌دهنده هسته جت است ولی پس از (Z/H=0.38) سرعت محور مرکزی جت کاهش یافته تا اینکه در محل (Z/H=0.01) به مقدار ۰/۱ سرعت بیشینه (یعنی سرعت در محور جت) می‌رسد.



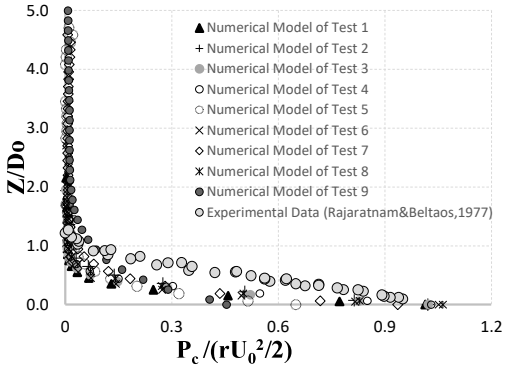
شکل (۱۲): نتایج مدل عددی برای پروفیل سرعت در ترازهای مختلف برای آزمایش شماره ۹ (H=43 cm)
(Z بر اساس شکل (۱) فاصله از کف حوضچه استغراق است)

نکته قابل‌توجه در ناحیه برخورد، طول این ناحیه است. بلتاس و راجاراتنام (۱۹۷۷) برای محاسبه طول این ناحیه پیشنهاد کرده‌اند که پس از محاسبه فشار در محور مرکزی جت از محل ورود به حوضچه تا کف حوضچه (P_c) و نیز کسر کردن فشار استاتیک آب در هر نقطه از فشار مذکور(P_c-(H-Z))، محلی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

که این فشار به صفر نزدیک می‌شود طول ناحیه برخورد را نشان خواهد داد.

در شکل (۱۳) فشار بدون بعد در محور مرکزی جت بدون در نظر گرفتن فشار استاتیک آب در هر Z مشخص در مقابل فاصله بدون بعد از کف حوضچه استغراق رسم گردیده است. محل برخورد این منحنی‌ها با محور افقی محل تلاقی محدوده جت آزاد و محدوده برخورد را نشان می‌دهند.



شکل (۱۳): تغییرات فشار در محور مرکزی جت برای مدل‌سازی عددی آزمایش‌های مختلف

مطابق شکل (۱۳) راجاراتنام و بلتاس (۱۹۷۷) طول ناحیه برخورد را برای جت دایره‌ای هوا برابر $1.2D_o$ محاسبه کرده‌اند. نتایج مدل‌های عددی برای این طول‌ها به‌صورت بدون بعد به شکل پارامترهای η و β محاسبه و در جدول (۳) ارائه‌شده‌اند. باید توجه نمود که در شکل (۱۳) طول ناحیه برخورد (محل تقاطع منحنی‌ها با محور افقی) برحسب D_i اندازه‌گیری شده، سپس با ضرب این اعداد در D_i ارتفاع محدوده برخورد محاسبه شده است. در نهایت با تقسیم این اعداد بر عمق حوضچه استغراق در هر آزمایش عدد بدون بعد η به دست آمده و با توجه به رابطه ارائه‌شده در مقدمه با کسر این پارامتر از عدد ۱/۰ پارامتر β محاسبه گردیده است.

جدول (۳): طول بی‌بعد ناحیه جت آزاد (β) و ناحیه برخورد (η)

شماره مدل	H	D_i	پارامتر η	پارامتر β
۱	۲۰	۷/۹۴	۰/۳	۰/۷
۲	۱۴	۵/۵۵	۰/۴۳	۰/۵۷
۳	۱۷	۷/۱۴	۰/۳۵	۰/۶۵
۴	۱۳	۶/۳۴	۰/۴	۰/۶
۵	۳۰	۶/۳۴	۰/۲۵	۰/۷۵
۶	۱۸	۷/۹۳	۰/۳۳	۰/۶۷
۷	۳۲	۶/۳۴	۰/۲۶	۰/۷۴
۸	۲۰	۶/۳۴	۰/۳	۰/۷
۹	۴۳	۴/۷	۰/۲۳	۰/۷۷

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود در مدل عددی مقدار پارامتر β در محدوده ۰/۵۷ تا ۰/۷۷ متغیر است که تطابق نسبتاً مناسبی با نتایج آزمایشگاهی محققان دیگر دارد، زیرا مطابق مقدمه، کولا (۱۹۶۶) برای جت مستغرق آب این پارامتر را بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵، بلتااس و راجاراتنام (۱۹۷۳) برای جت صفحه‌ای هوا ۰/۷ و گاتمارک و همکاران (۱۹۷۸) برای جت هوا ۰/۷۵ گزارش کرده‌اند. همچنین بر اساس جدول (۳)، پارامتر η در محدوده ۰/۲۳ تا ۰/۴۳ در حال تغییر است، برای آزمایش‌هایی با عمق آب داخل حوضچه استغراق بیشتر، مقدار کمتر و برای آزمایش‌هایی با عمق آب داخل حوضچه استغراق کمتر، مقدار بیشتری پیش‌بینی شده است. این موضوع به این دلیل است که فشار در کف حوضچه استغراق از فشار هیدرواستاتیک بیشتر است. برای حوضچه‌های با عمق بیشتر، جت بیشتر مستهلک شده و با سرعت کمتری نسبت به حوضچه‌های کم‌عمق، به کف حوضچه استغراق می‌رسد، بنابراین برای فشارهای هیدرواستاتیک بالاتر، مقادیر فشار حاصل از جت کمتر خواهد شد و برعکس. بعلاوه نتایج این پارامتر در مقایسه با نتایج محققان پیشین که در بخش مقدمه ارائه گردید نشان می‌دهد که نتایج مدل عددی نزدیک به نتایج محققان پیشین است. زیرا مطابق مقدمه، کولا (۱۹۶۶) برای جت مستغرق آب این پارامتر را ۰/۲۸، بلتااس و راجاراتنام (۱۹۷۳) برای جت صفحه‌ای هوا ۰/۳ و گاتمارک و همکاران (۱۹۷۸) برای جت هوا ۰/۲۵ گزارش کرده‌اند.

فشار نقطه ایستایی در کف حوضچه استغراق

نتایج C_P حاصل از مدل عددی برای آزمایش‌های مختلف و نیز نتایج آزمایشگاهی در نقطه ایستایی در کف حوضچه استغراق در این تحقیق و آزمایش‌های محققین دیگر در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج مدل آزمایشگاهی این تحقیق به نتایج آزمایشگاهی پیشین نزدیک است. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج C_P در مدل عددی در محدوده $H/D_i<4-6$ تفاوت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل این اختلاف وجود حباب‌های هوا در مدل آزمایشگاهی است که در این محدوده به دلیل عمق کم آب قابل‌ملاحظه است. این حباب‌ها با نفوذ در حوضچه استغراق باعث کاهش فشار در نقطه ایستایی خواهند شد ولی در مدل عددی به دلیل عدم

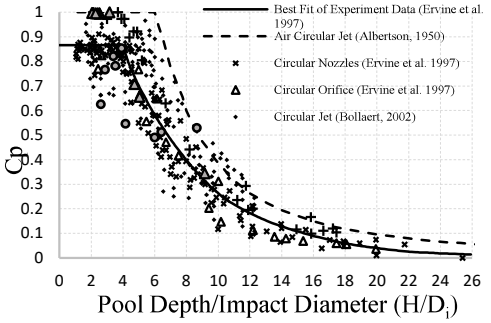
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

مدل‌سازی حباب‌هایی که به داخل حوضچه کشیده می‌شوند مقدار C_P در این محدوده را برابر یک نشان می‌دهد. البته در این محدوده $H/D_i<4-6$ نتایج مدل عددی منطبق بر نتایج آلبرتسون و همکاران (۱۹۴۸) است که C_P را برای حالت جت دایره‌ای هوا در محیط هوا محاسبه کرده است.

در محدوده $H/D_i>4-6$ به دلیل افزایش عمق حوضچه استغراق، نفوذ حباب‌های هوا در ترازهای پایین حوضچه کمتر شده و نتایج C_P به دست آمده از مدل عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود نتایج مدل عددی در این محدوده به نتایج اروین و همکاران (۱۹۹۷) بسیار نزدیک شده است. در جدول (۴) میزان خطای پارامتر C_P در مدل‌های عددی نسبت به نتایج اروین و همکاران ارائه‌شده است. مشاهده می‌شود که برای مدل‌های ۵، ۷ و ۹، که جت توسعه‌یافته به کف حوضچه برخورد می‌کند ($H/D_i<4-6$) مقدار متوسط خطا ۷ درصد و برای بقیه مدل‌ها که هسته جت به کف حوضچه برخورد می‌کند ($H/D_i>4-6$) متوسط خطا ۱۴ درصد است.

جدول (۳): طول بی‌بعد ناحیه جت آزاد (β) و ناحیه برخورد (η)

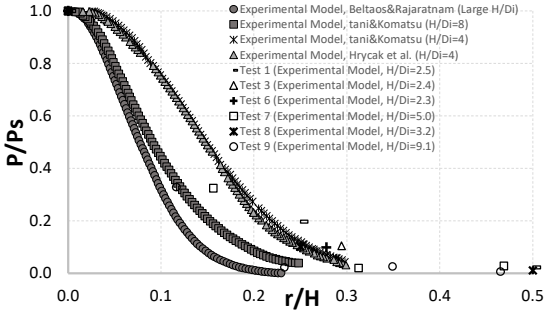
شماره مدل	خطا (٪) نسبت به نتایج اروین و همکاران (۱۹۹۷)
۱	۱۴
۲	۱۴
۳	۱۴
۴	۱۴
۵	۴
۶	۱۴
۷	۶
۸	۱۴
۹	۱۱



شکل (۱۴): مقایسه C_P در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

توزیع فشار در کف حوضچه استغراق

نتایج توزیع فشار در کف حوضچه استغراق در مدل آزمایشگاهی این تحقیق در شکل (۱۵) با نتایج آزمایشگاهی محققین قبلی مقایسه شده است. این منحنی‌ها به‌صورت بدون بعد بوده و فشار در کف حوضچه توسط فشار نقطه ایستایی[1] (P_s) در هر آزمایش بی‌بعد شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نتایج آزمایش شماره ۹ با نسبت $H/D_i=9.1$ (دایره توخالی) به نمودارهای بلتااس و راجاراتنام برای نسبت‌های H/Di بزرگ و تانی و کوماتسو برای H/Di=8 نزدیک است. همچنین نتایج بقیه آزمایش‌ها نیز به نمودارهای تانی و کوماتسو و هریکاک[2] و همکاران با $H/D_i=4$ نزدیک هستند. برخی اختلاف‌ها در نتایج مدل‌های آزمایشگاهی مختلف ممکن است به دلیل تفاوت در سامانه‌های برداشت فشار ازجمله سنسورهای فشار و دستگاه‌های دیتالاگر باشد.



شکل (۱۵): توزیع (P/P_s) در کف حوضچه استغراق برای آزمایش‌های تحقیق حاضر و مدل‌های آزمایشگاهی محققین دیگر (P_s : فشار نقطه ایستایی، H : ارتفاع آب در حوضچه استغراق (شکل (۱))، r : فاصله از محور مرکزی جت (شکل (۳)))

همچنین نتایج مدل عددی توزیع فشار در کف حوضچه استغراق در شکل (۱۶) با نتایج آزمایشگاهی آن‌ها مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی با تقریب مناسبی می‌تواند توزیع فشار در کف حوضچه استغراق را پیش‌بینی نماید. میزان خطای مدل عددی در پیش‌بینی توزیع فشار حدود ۱۵ درصد است.

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که توزیع فشار در آزمایش شماره ۹ و مدل عددی آن، در مقایسه با بقیه مدل‌های عددی و آزمایشگاهی، بهترین تطابق را با یکدیگر دارند. این آزمایش بر اساس جدول (۱) بیشترین ارتفاع آب در حوضچه استغراق را دارد و این باعث خواهد شد که حباب‌هایی که به داخل

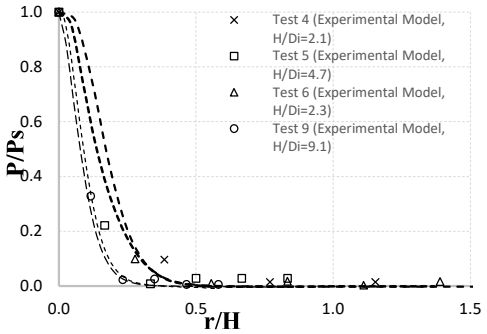
[1] Stagnation Point

[2] Hrycak

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

حوضچه کشیده می‌شوند کمترین تأثیر را بر فشارهای کف حوضچه استغراق داشته باشند و درنتیجه نتایج مدل عددی به دلیل عدم مدل‌سازی این حباب‌ها، به نتایج مدل آزمایشگاهی نزدیک‌تر باشد.



شکل (۱۶): توزیع (P/P_s) در کف حوضچه استغراق برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تحقیق حاضر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پدیده پخش جت در حوضچه استغراق به کمک نرم‌افزار Flow3D مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که این نرم‌افزار توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی مشخصات پخش جت شامل پروفیل‌های سرعت و زوایای پخش جت در ناحیه آزاد و ناحیه برخورد را دارد. مدل عددی، زوایای انقباض هسته جت و انبساط جت را به ترتیب در محدوده ۵ تا ۱۱ درجه و ۹ تا ۱۲ درجه پیش‌بینی می‌کند که بسیار نزدیک به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اروین و فالوی(۱۹۸۷) است.

مقایسه پروفیل‌های سرعت در مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی و حل تحلیلی نشان از دقت بالای نرم‌افزار در پیش‌بینی این پروفیل‌ها در پخش جت در حوضچه استغراق است. همچنین نرم‌افزار Flow3D طول محدوده آزاد و محدوده برخورد را نیز بسیار خوب پیش‌بینی می‌کند.

نتایج C_P در مدل عددی در محدوده عمق حوضچه به قطر جت کمتر از ۴ تا ۶ تفاوت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته و حدود ۱۴ درصد بیشتر است. یکی از مهم‌ترین دلایل این اختلاف وجود حباب‌های هوا در مدل آزمایشگاهی است که در این محدوده به دلیل عمق کم آب قابل‌ملاحظه است که توسط مدل عددی دیده نمی‌شود. از طرفی در محدوده عمق حوضچه به قطر جت بیشتر از ۴ تا ۶ به دلیل افزایش عمق حوضچه استغراق، نفوذ حباب‌های هوا در ترازهای پایین حوضچه کمتر شده و نتایج C_P به‌دست‌آمده از مدل عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر شده است. در این شرایط خطای مدل عددی به کمتر از ۷ درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی می‌رسد.

مراجع

1- Abramovich, G. N. (1963). The theory of turbulent jets, M.I.T. Press.

2- Albertson, M., Dai, Y., Jensen, R. and Rouse, H. (1950). “Diffusion of submerged jets.” *Transactions of the ASCE*. 115(1), 639-664.

3- Ballio, F., Franzetti, S., Tanda, M. G. (1992). “Pressure fluctuations induced by turbulent circular jets impinging on a flat plate.” *EXCERPTA of The Italian Contributions to the Field of Hydraulic Engineering*. 7, 41-59

4- Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1973). “Plane turbulent impinging jets.” *Journal of Hydraulic Research.* 11(1), 29-59.

5- Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1974). “Impinging circular turbulent jets.” *Journal of the Hydraulics Division.* 100(10), 1313-1328.

6- Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1977). “Impingement of axisymmetric developing jets.” *Journal of Hydraulic Research.* 14(4), 311-326.

7- Bohrer, J. G., Abt, S. R. and Wittler, R. J. (1998). “Predicting plunge pool velocity decay of free falling, rectangular jet.” *Journal of Hydraulic Engineering.* 124(10), 1043-1048.

8- Bollaert, E. (2002). “Transient Water Pressures in Joints and Formation of Rock Scour due to High-Velocity Jet Impact.” Thesis of EPFL.

9- Bonetto, F. and Lahey Jr, R. T. (1993). “An experimental study of air carry under due to a plunging liquid jet.” *International Journal of Multiphase Flow*. 19(2), 281-294.

10- Chanson, H., Aoki, S. and Hoque, A. (2004). “Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets.” *Chemical Engineering Science.* 59, 747-758.

11- Chee, S. P. and Yuen, E. M. (1985). “Erosion of unconsolidated gravel beds.” *Canadian Journal of Civil Engineering*. 12, 559-566

12- Cola, R. (1965). “Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin.” Proceeding of Xxi iahr congress, Vol. I, paper 1.52, IAHR, Leninegrad, pp. 1-13.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

13- Duarte, R. (2014). “Influence of Air Entrainment on Rock Scour Development and Block Stability in Plunge Pools.” Thesis of EPFL

14- Ervine, A. and Falvey, H. T. (1987). “Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools.” Paper 9136, Water Eng. Group, Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 83, pp. 295-314.

15- Ervine, D. A., Falvey, H. R. and Withers, W. (1997), “Pressure fluctuations on plunge pool floors.” *Journal of Hydraulic Research.* 35(2), 257-279.

16- Franzetti, S., Tanda, M.G. (1987), “Analysis of turbulent pressure fluctuation caused by a circular impinging jet.” International Symposium on New Technology in Model Testing in Hydraulic Research, India, pp. 85–91

17- Gutmark, G., Wolfshtein, M. and Wygnanski, I. (1978). “The plane turbulent impinging jet.” *Journal of Fluid Mechanics*. 88(4), 737-756.

18- Hartung, F. and Häusler, E. (1973). “Scours, stilling basins and downstream protection under free over fall jets at dams.” Proc. of the 11th Congress on Large Dams, Vol. Q41 R3, ICOLD, Madrid, pp. 39-56.

19- Homma, M. (1953). “An Experimental study on water fall.” Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Conference, United States

20- Hrycak et al. (1970). “Experimental flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate”, NASA TND-5690

21- Kamoi, A. and Tanaka, H. (1972). “Measurements of wall shear stress, wall pressure and fluctuations in the stagnation region produced by oblique jet impingement, in D. J. Cockrell (ed.).” *Fluid Dynamic Measurements Conference Papers*. 1, 217-227.

22- Kobus, H., Leister, P. and Westrich, B. (1979). “Flow field and scouring effects on steady and pulsating jets impinging on a movable bed.” *Journal of Hydraulic Research*. 17(3), 175-192.

23- Lemos, F. (1982). “Behavior of hydraulic structures of some dams built in narrow valleys (in Portuguese).” Transactions of the International Symposium on the Layout of Dams in Narrow Gorges, ICOLD, Brazil, pp. 241-252.

24- Lencastre, A., (1961). “Free Overflow Spillways.” Engineering and Design Principles, National Laboratory for Civil Engineering Studies, Report No.1 74, Lisbon, Portugal, (WPRS translation no. 455)

25- Liu, P., Li, F. and Yin, W. (2003). “Experimental study on controlling parameters of flow patterns downstream of high dams.” Vol. Theme D, IAHR, pp. 839-844.

26- Malmström, T. G., Kirkpatrick, A. T., Christensen, B. and Knappmiller, K. D. (1997). “Centerline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets.” *Journal of Fluid Mechanics.* 346, 363-377.

27- Manso, P. (2006). “The influence of pool geometry and induced flow patterns on rock scour by high-velocity plunging jets.” Thesis of EPFL. May, R. W. P., Willoughby, I. R. (1991). “Impact pressures in plunge pool basins due to vertical falling jets.” Report SR 242, HR Wallingford, U.K., January.

28- McKeogh, E. J. and Elsawy, E. M. (1980). “Air retained in pool by plunging water jet.” *Journal of the Hydraulic Division*. 106(10), 1577-1593.

29- McKeogh, E. J. and Ervine, D. A. (1981). “Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets.” *Chemical Engineering Science*. 36, 1161-1172.

30- Moore, W. L. (1943). “Energy loss at the base of free over fall.” *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* 108(1), 1343-1360.

31- Puertas-Agudo, J. (1994). “Hydraulic criteria for the design of energy dissipation basins in arch dams with free crest over fall.” Ph. D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

32- Rajaratnam, N. (1976). “Turbulent jets.” Volume 5 of Developments in Water Science, Elsevier.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]

Numerical Simulation of Water Jet Diffusion in a Plunge Pool and Pressure to Bottom

Ehsan Behnamtalab [1]
Masoud Ghodsian [*2]
Amirreza Zarrati [3]
Aliakbar Salehi Neishabouri [4]

Abstract

Jet diffusion in plunge pool is one of the research topics of many researchers. Most of these researches were done experimentally and few of them were done numerically. In this study, jet diffusion in plunge pool is simulated by using FLOW3D software. Result of models show that this software has a high capability in predicting of jet diffusion characteristics such as velocity profiles and diffusion angles in free jet and impinging regions. The height of impinging region in numerical model is very close to experimental results. Numerical model results have shown that angles of jet diffusion i.e. outer spread angle and inner core decay angle are 5 to 11° and 9 to 12°, respectively. Numerical model predicts the normalized mean pressure (Cp) equal to 1.0 in the plunge pool floor when core jet meets the plunge pool floor whereas this parameter is less than 1.0 in the experimental model because of air entrainment to plunge pool. Moreover, normalized pressure profiles in the plunge pool floor has similar results with experimental cases.

Keywords

Dynamic Analysis, Gravity Dam, Interaction, Isolation Layer, Mechanical Properties.

1 PhD Student of Hydraulic Engineering, Tarbiat Modares University,Tehran, Iran.
2* Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ghods@modares.ac.ir.
3 Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.
4 Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Received: 2016/03/27 Accepted: 2016/12/09

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.4.6]