

مقاله پژوهشی

## بررسی مکانیزم آبشستگی ناشی از کارکرد همزمان جت‌های دیواره و ریزشی مستغرق با استفاده از مدل Flow3D

حمید رضا سماع<sup>۱</sup>، معصومه رستم آبادی<sup>۲\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۳</sup>، مجتبی مهرآیین<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

۱-دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران

۳-استادیار، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

\* مسئول مکاتبه، پست الکترونیکی: rostamabadi@buiniau.ac.ir

### چکیده

انرژی جنبشی زیاد جریان فوق بحرانی خروجی از سرریزها، مجراهای میانی و تحتانی در بدنه سدها که اغلب بصورت جت طراحی می‌شوند، در تعامل با بستر فرسایش پذیر می‌توانند پایداری سازه‌های واقع شده در مسیر آنها را به مخاطره اندازند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی مکانیزم جریان و آبشستگی ناشی از عملکرد همزمان جت‌های ریزشی و دیواره است. بدین منظور الگوی جریان و آبشستگی ایجاد شده ناشی از برخورد جت‌ها با استفاده از مدل عددی Flow3D شبیه‌سازی شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی، بردارهای سرعت، جریان‌های ثانویه ناشی از برخورد جت‌ها، پارامترهای هندسه آبشستگی شامل عمق و طول حفره آبشستگی و نیز ارتفاع برآمدگی، از شروع آبشستگی تا زمان تعادل بستر در زمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل الگوی جریان نشان داد با برخورد دو جت، یک جریان گردابی ساعت‌گرد در محل برخورد جت‌ها تشکیل می‌شود که منجر به فرسایش بستر رسوبی می‌شود. با گذشت زمان و تجمع رسوبات در پایین‌دست چاله آبشستگی، جدایش جریان در بالای برآمدگی اتفاق می‌افتد و یک جریان گردابی پادساعت‌گرد در بالادست برآمدگی بوجود می‌آید. بررسی مکانیزم آبشستگی نشان داد بیشترین نرخ فرسایش در مراحل اولیه فرآیند آبشستگی اتفاق می‌افتد، بطوریکه در ۱۵ درصد ابتدایی زمان تعادل شبیه‌سازی، به ترتیب ۸۰، ۶۷ و ۷۶ درصد بیشینه طول، عمق و عرض آبشستگی رخ داده است. نتایج بدست آمده از مدل عددی به ترتیب با خطای ۱/۸۶، ۷/۷ و ۳۱ درصد پارامترهای بیشینه عمق، طول و ارتفاع برآمدگی را در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی نمودند.

واژه‌های کلیدی: برخورد جت‌ها، شبیه‌سازی عددی، مکانیزم جریان و آبشستگی

## Investigation of Scour Mechanism Due to Simultaneous Operations of Submerged Wall and Impinging Jets Using Flow3D Model

Hamidreza Samma<sup>1</sup>, Masoumeh Rostam-Abadi<sup>2\*</sup>, Amir Khosrojerdi<sup>3</sup>, Mojtaba Mehraein<sup>4</sup>

Received: August 21, 2020

Accepted: March 16, 2021

1-Ph.D. Student, Dept. of Water Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2-Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Buinzahra Branch, Islamic Azad University, Buinzahra, Iran

3-Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4-Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Kharazmi University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author Email: rostamabadi@buiniau.ac.ir

### Abstract

High kinetic energy of supercritical flow formed from spillways as well as middle and bottom outlets of the dam body are commonly considered a water jet. This flow type in interaction with the erodible bed can endanger the stability of structures located in its path. The main purpose of this study is to assess the mechanisms of flow and scour due to simultaneous operations of wall and impinging jets. To this end, the flow pattern and the scouring process has been simulated by Flow3D. First, the numerical model results are validated against experimental data. Then the velocity vectors, secondary currents due to the collision of water jets, and the geometric parameters of scour (e.g., scour depth, scour length, and ridge height) are investigated at various stages from the beginning of the scouring process to the equilibrium. The results of the flow pattern analysis indicated that by the collision of water jets, a single clockwise rotating vortex is formed at intersection of the jets. The latter vortex leads to further erosion of a sediment bed. Flow separation occurs at the top of the ridge due to the accumulation of the eroded sediments at the downstream of the scour hole over time. A counter-clockwise vortex is generated at the upstream of the ridge as a result of the flow separation. Investigation of the scour mechanism demonstrated that the highest scouring propagation rate occurs during the early stages of the scouring process. It was found that within the first 15% of the simulation time, the maximums of scour depth, ridge height and scour width are equal to 80%, 67%, and 76% of their equilibrium state, respectively. The simulated results estimated the maximums of scour depth, scour length, and ridge height with relative errors of 1.86%, 7.7%, and 31%, respectively, compared with the measurements.

**Keywords:** Intersection of jets, Mechanisms of flow and scour, Numerical simulation

### مقدمه

سه‌بعدی از نازل‌هایی با عرض محدود، بوجود می‌آیند، یکی از تفاوت‌های اصلی بین جت‌های دوبعدی و سه‌بعدی، گسترش جانبی (گسترش عرضی) جت‌های سه‌بعدی می‌باشد. جت‌های آشفته می‌توانند در یکی از گروه‌های آزاد، دیواره، سطحی و آفست طبقه‌بندی شوند. جت آزاد زمانی تشکیل می‌شود که جت تخلیه شده به اندازه کافی دور از مرزی باشد که موجب محدودیت توسعه آن خواهد شد (محدودیتی برای توسعه سیال وجود نداشته باشد) مانند جت‌های پرتابی

جت زمانی تولید می‌شود که یک سیال با مومنتوم بالا از یک منبع، داخل محیط پذیرنده<sup>۱</sup> تخلیه می‌شود. جت‌ها می‌توانند بصورت دو یا سه‌بعدی در طبیعت باشند. جت‌های دوبعدی (که جت مسطح نیز نام گرفته‌اند) زمانی تشکیل می‌شوند که جت تخلیه شده دارای عرض نامحدود باشد، در حالی که جت‌های

<sup>1</sup> Ambient fluid

جهت تامین حوضچه استغراق مصنوعی در پایین دست سد که به جهت تامین بالشتک آبی انجام می‌گیرند، باشند. در بسیاری از موارد در صورت امکان با طراحی جت‌های خروجی که می‌توان با ایجاد سرریزهای ریزشی آزاد، ایجاد خروجی‌های میانی بصورت سرریز روزنه‌ای، سرریزهای تونلی منتهی به پرتاب کننده جامی در سازه انتهایی و تخلیه کننده‌های تحتانی در سدها و ... جت‌های جریان را ایجاد نموده و با تقاطع آنها با یکدیگر، اثر ضربه جریان خروجی از جت‌ها را کاهش داد که موجب کاهش چشمگیری در توسعه ابعاد آبشستگی خواهد شد. بررسی منابع حاکی از آن است که تمرکز مطالعات انجام شده در زمینه آبشستگی معطوف به عملکرد یک نوع جت می باشد و از سوی پژوهشگران توجه کمتری به بررسی کارکرد همزمان جت‌ها به عنوان یکی از گزینه‌های استهلاک انرژی شده است. از معدود مطالعات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی مهرآیین و همکاران (۲۰۱۱ و ۲۰۱۲) و پاگلیارا و پالرمو (۲۰۱۷) که در آنها به بررسی فرآیند آبشستگی تحت تاثیر کارکرد همزمان جت‌ها پرداخته شده است، اشاره کرد.

پیشرفت در صنعت کامپیوتر و بکارگیری مدل‌های عددی این اجازه را می‌دهد که با صرف هزینه و زمانی کمتر و در نظر گرفتن ابعاد واقعی مدل در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی، جزئیات دقیقی از میدان جریان و پدیده آبشستگی را با دقت قابل قبولی در اختیار مهندسين قرار داد.

سماع و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی توسعه آبشستگی تحت تاثیر جت دیواره مستغرق و میدان جریان در حفره آبشستگی تشکیل شده توسط مدل عددی Flow3D و مقایسه نتایج مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد مدل عددی دارای دقت مناسبی در پیش بینی الگوی جریان و آبشستگی می باشد. برومند و همکاران (۲۰۰۷) به مطالعه دوبعدی تاثیر جت آفست روی بستر

از سرریزها و تخلیه کننده‌های تحتانی سدها. جت دیواره زمانی ایجاد می شود که جت تخلیه شده در یک طرف توسط مرز جامد محدود می‌شود که جریان عبوری از زیر دریچه‌ها در گروه این نوع جت‌ها قرار می‌گیرند (نیانتکی-کواکی ۲۰۱۶). تقسیم بندی دیگر جت‌ها وابسته به عمق پایاب است که جت‌ها می‌توانند بصورت آزاد یا مستغرق عمل نمایند (فاروق و همکاران ۲۰۰۶). تعامل جت‌های آزاد شده با بستر فرسایش پذیر منجر به ایجاد حفره آبشستگی می‌شود که با گذشت زمان و توسعه چاله آبشستگی به سمت سواحل رودخانه و یا بالادست خود می‌تواند پایداری سازه‌های واقع شده در مسیر آنها را به مخاطره اندازد. به عنوان نمونه، در سد دوقوسی Kariba که به دلیل ایجاد بزرگترین دریاچه مصنوعی جهان و توسعه عظیم آبشستگی حوضچه استغراق شناخته شده است یک چاله آبشستگی قابل توجه داخل سنگ گنایس به عمق تقریبی ۸۰ متر که بیش از نصف ارتفاع کل سد می‌باشد، بوجود آمده است (آناندل ۲۰۰۶). در حوضچه استغراق سد Tarbela واقع در پاکستان، چاله آبشستگی ایجاد شده به سمت ساحل راست توسعه یافت، علاوه بر آن، سازه پرتاب کننده جامی را مقداری جابجا نمود و در نهایت موجب گسترش (انبساط) درز و توسعه ترک‌ها در گالری زهکش شد (هنگ و همکاران، ۲۰۱۲). بلوک‌های حفاظت بتنی در فنداسیون سد Keban ترکیه، توسط آبشستگی در عملکرد پایین جریان (دبی پایین) تخریب شدند (بیلدیز و اوزوجک ۱۹۹۴). موارد بیشتر در مطالعات آناندل (۲۰۰۶) و بیلدیز و اوزوجک (۱۹۹۴) در دسترس می‌باشند. بنابراین با توجه به اهمیت بالای طراحی ایمن سازه‌های هیدرولیکی که قطعا اصلاح آنها، هزینه‌های هنگفتی را در پی خواهد داشت بررسی کارکرد همزمان جت‌ها به عنوان یک روش موثر و کاربردی می‌تواند گزینه هوشمندانه‌ای در مقابل گزینه‌های مرسوم استهلاک انرژی مانند حوضچه آرامش از پیش حفاری شده در پایاب و یا احداث سد

برای پیش بینی بیشینه عمق آبشستگی مناسب هستند. نتایج مدل عددی می تواند کمک قابل توجهی برای مهندسين در اتخاذ تدابير لازم و راهکارهای حفاظتی بمنظور کاهش عمق آبشستگی در مراحل برنامه ریزی و طراحی فراهم نماید و در نتیجه موجب اجتناب از پیامدهای منفی غیر قابل پیش بینی در آینده ناشی از پدیده آبشستگی خواهد شد. هدف از مطالعه حاضر بررسی مکانیزم جریان و فرآیند آبشستگی موضعی ایجاد شده با پیشرفت زمان ناشی از عملکرد همزمان جت های دیواره و ریزشی مستغرق با مقطع دایره ای می باشد. تدقیق این بررسی از طریق شبیه سازی عددی با استفاده از مدل سه بعدی Flow3D صورت گرفته است. علاوه بر آن، تمامی پارامترهای آبشستگی شامل بیشینه عمق، طول و ارتفاع برآمدگی با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه و میزان دقت مدل عددی در تخمین هر یک از پارامترهای مذکور با ارائه خطای نسبی مشخص شدند. قابل ذکر است که این تحقیق به لحاظ کاربردی بودن و تامین خلا تحقیقاتی موجود برای اولین بار است که مورد توجه قرار می گیرد.

#### مواد و روش ها

در این مطالعه بمنظور صحت سنجی مدل عددی از داده های آزمایشگاهی مهرآیین و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شد. آزمایش در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. دو لوله با قطر داخلی ۱ سانتی متر و طول ۲ متر برای تولید جت بکار گرفته شدند. مصالح بستر از ذرات رسوب یکنواخت (شامل سیلیس) با قطر متوسط ۱/۰۵ میلی متر و انحراف استاندارد  $\sigma_g = 1/25$  تشکیل شده است، وزن مخصوص ذرات رسوب برابر ۲/۶۵ می باشد. منحنی دانه بندی رسوب بکار رفته در شکل ۱ نشان داده شده است. حوضچه رسوب با حداقل ضخامت ۰/۴ متر و طول ۲/۵ متر در پایین دست جت قرار داده شد. دریاچه کشویی در

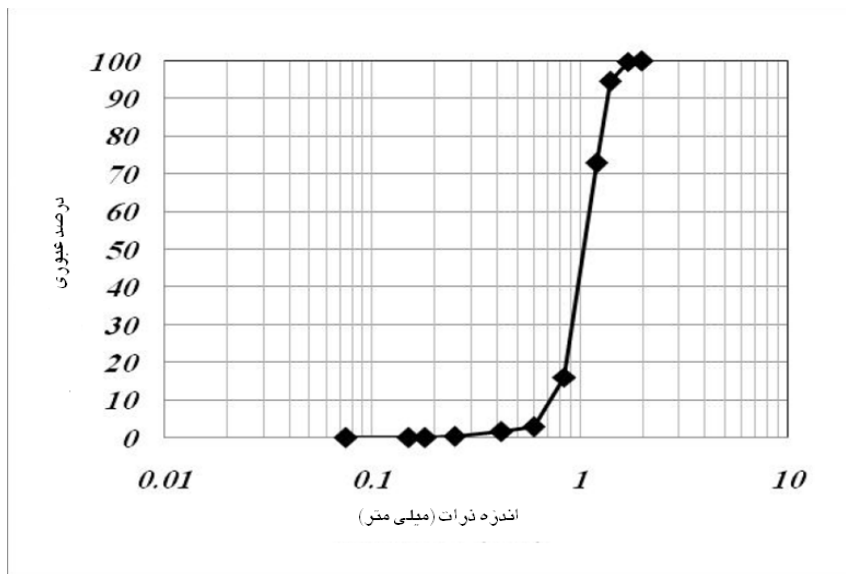
رسوبی با استفاده از نرم افزار FLUENT و مقایسه پروفیل های قائم غلظت ذرات رسوبی معلق و مقایسه کیفی الگوهای چاله آبشستگی و برآمدگی بدست آمده از نرم افزار با مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند. نتایج توافق مناسبی را با اندازه گیری های آزمایشگاهی نشان دادند. اگر چه پروفیل های غلظت شبیه سازی شده ذرات نزدیک بستر اختلاف محسوسی با مقادیر آزمایشگاهی داشتند.

کاستیلو و کاریلو (۲۰۱۶) به بررسی عددی آبشستگی ایجاد شده بوسیله جت های خروجی از سرریز سطح آزاد و خروجی های واقع شده در نیمه ارتفاع سد دو قوسی با سه روش مکمل هم، شامل فرمول های تجربی، روش نیمه تجربی و کد FLOW3D، پرداختند. این مطالعه بیان کرد که شبیه سازی های عددی می توانند نقش موثری را در ارزیابی ایمنی و پایداری سازه سد ایفا نمایند. در مطالعه دیگری کاستیلو و کاریلو (۲۰۱۷) به بررسی آبشستگی پایین دست سرریز منتهی به پرتاب کننده جامی با چهار روش مکمل هم به دلیل محدودیت های هر روش، شامل مدل فیزیکی جهت صحت سنجی، فرمول های تجربی، متدولوژی نیمه تجربی بر اساس شاخص نوسانات فشار- فرسایش پذیری و شبیه سازی عددی پرداختند، نتایج نزدیک به مدل فیزیکی گزارش شدند. شبیه سازی های عددی جهت تکمیل اندازه گیری های آزمایشگاهی و رویکردهای تحلیلی و درک بهتر از پدیده فیزیکی بمنظور دستیابی به حل مناسب مورد استفاده قرار گرفتند.

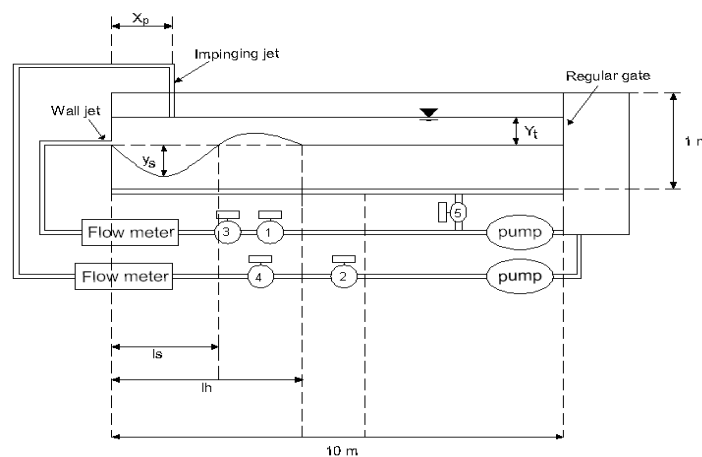
عامر و احمد (۲۰۱۹) به بررسی تخمین عمق آبشستگی تحت جت دیواره آزاد شده از دریاچه کشویی با استفاده از معادلات پیشنهادی توسط محققین قبلی و روش های شبکه عصبی مصنوعی و سیستم تطبیقی عصبی- فازی پرداختند. نتایج بررسی ها نشان داد دو روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم تطبیقی عصبی- فازی بترتیب بعنوان ابزارهای ساده و دقیق

$l_h$  و  $l_s$  طول حفره آبشستگی و  $y_s$  بیشینه عمق آبشستگی، فاصله افقی میان انتهای برآمدگی و جت دیواره می باشند.

انتهای کانال برای کنترل پایاب نصب شده است. نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی و تجهیزات مربوطه در شکل ۲ قابل مشاهده می باشد. در شکل مذکور  $X_p$  فاصله افقی جت ریزشی از جت دیواره،  $Y_t$  عمق پایاب،



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات (مهرآیین و همکاران ۲۰۱۱).



شکل ۲- نمای شماتیک از پروفیل آبشستگی و تجهیزات آزمایشگاهی (مهرآیین و همکاران ۲۰۱۱).

پیوستگی برای حرکت سیال بر اساس هر دو روش تفاضل محدود<sup>۳</sup> و حجم محدود<sup>۴</sup> روی شبکه محاسباتی ساختاریافته حل می‌شوند (مسله و همکاران ۲۰۱۲).

مدل عددی Flow3D

Flow3D یک کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> است که در آن معادلات ناویر استوکس و

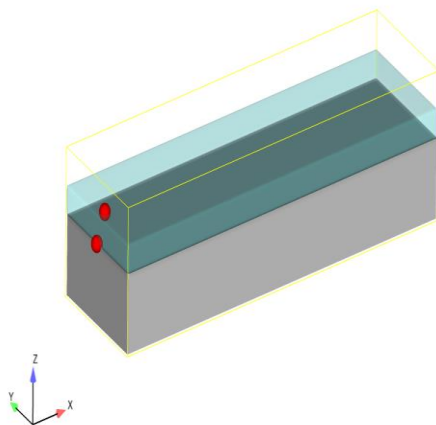
<sup>۳</sup> Finite element

<sup>۴</sup> Finite volume

<sup>۲</sup> Computational fluid dynamics

که در آن  $\varphi$  مقدار عددی است که ممکن است بعنوان درجه حرارت و یا غلظت ماده مورد نظر باشد،  $S_\varphi$  جمله چشمه یا چاه حجمی و  $\Gamma$  پخش مولکولی برای  $\varphi$  می-باشد (رادی و همکاران ۲۰۱۳).

با توجه به ساده بودن هندسه مدل آزمایشگاهی، ساخت هندسه آن در مدل عددی توسط نرم افزار Flow3D انجام گرفت. جت دیواره و جت ریزشی بعنوان منبع جرم با مشخصات مطابق با مدل فیزیکی به نرم افزار معرفی شدند. نمایی از مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد. در این مطالعه، از شبکه بندی یکنواخت با سایز سلول ۱/۱ سانتی متر در تمام جهات مختصاتی در حوزه جریان استفاده گردید. بکارگیری شبکه بندی یکنواخت برای شبیه سازی حاضر در تطابق با مطالعات سماع و همکاران (۲۰۲۰) می باشد.



شکل ۳- نمای سه بعدی از مدل عددی به همراه موقعیت جت های ریزشی و دیواره.

بی نام ۲۰۱۶). Flow3D از روش TruVOF که شکل بهبود یافته روش حجم سیال<sup>۵</sup> می باشد و روش نماینده کسر مساحت-حجم مانع<sup>۶</sup> بترتیب برای تعیین مکان سطح آزاد و موانع (مرزهای صلب مانند پل ها، دریچه ها و ... ) استفاده می نماید (بی نام ۲۰۱۶). فرمت تانسور معادلات حاکم بر جریان سیال به صورت روابط ۱ و ۲ بیان می شوند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad [2]$$

در معادلات بالا  $u_i$  و  $X_i$  بترتیب بردارهای سرعت و موقعیت،  $t$  بیانگر زمان،  $P$  فشار و  $\rho$  دانسیته سیال است و  $t_{ij}$  تانسور تنش لزجت بصورت رابطه ۳ می باشد:

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad [3]$$

که در آن  $\mu$  لزجت مولکولی و  $s_{ij}$  تانسور نرخ کرنش می باشد که بصورت رابطه ۴ تعریف می شود (ویلاکاکس ۲۰۰۶):

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [4]$$

حرکت رسوبات در این نرم افزار توسط پیش بینی فرسایش، انتقال و ته نشینی یا رسوبگذاری رسوبات، تخمین زده می شود (بی نام ۲۰۱۶). برای هر متغیر اسکالر که در محاسبه در نظر گرفته می شود، معادله انتقال اسکالر (بقای انرژی حرارتی یا غلظت ماده مورد نظر) بصورت زیر قابل بیان می باشد:

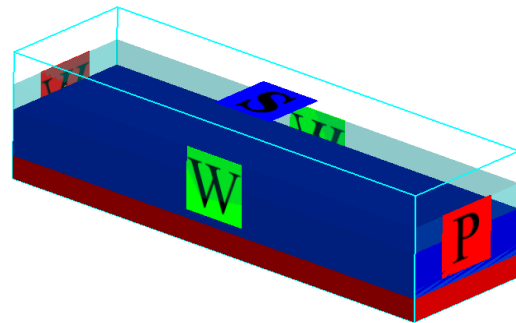
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u_i \phi}{\partial x_i} = \Gamma \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_i} + S_\phi \quad [5]$$

<sup>5</sup> Volume of fluid

<sup>6</sup> Fractional area-volume obstacle representation

### معرفی میدان حل و شرایط مرزی

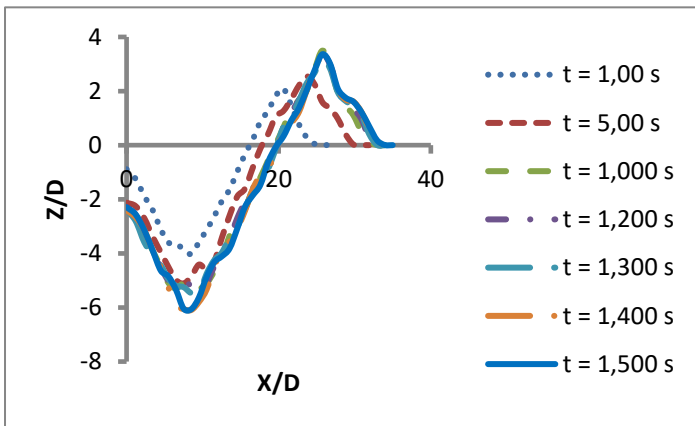
شرط مرزی بالادست بعنوان شرط مرزی دیواره<sup>۷</sup> و شرط مرزی پایین‌دست، فشار مشخص معادل عمق پایاب<sup>۸</sup> در نظر گرفته شد. برای مرزهای جانبی و کف مدل، شرط مرزی دیواره و در سطح مدل، شرط مرزی تقارن<sup>۹</sup> انتخاب گردید. شرایط مرزی اعمال شده در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین برای بستن معادلات از مدل آشفتگی  $k-\omega$  استفاده گردید که در مطالعه آبشستگی ناشی از جت دیواره مستغرق توسط سماع و همکاران (۲۰۲۰) توصیه شده است.



شکل ۴- نمایش شرایط مرزی اتخاذ شده در مدل عددی.

### زمان تعادل آبشستگی

زمان تعادل آبشستگی معادل با زمانی در نظر گرفته می‌شود که پس از آن، تغییری در ابعاد چاله آبشستگی با گذشت زمان رخ ندهد. توسعه زمانی پروفیل شبیه‌سازی شده آبشستگی در امتداد محور مرکزی جت‌های ریزشی و دیواره در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این شکل محورهای  $X$  و  $Y$  بترتیب بیان‌کننده فواصل افقی و عمودی از محل جت دیواره و بستر رسوبی می‌باشند که هر دو محور توسط قطر لوله بکار رفته برای تولید جت‌ها ( $D$ ) بی بعد شده‌اند.

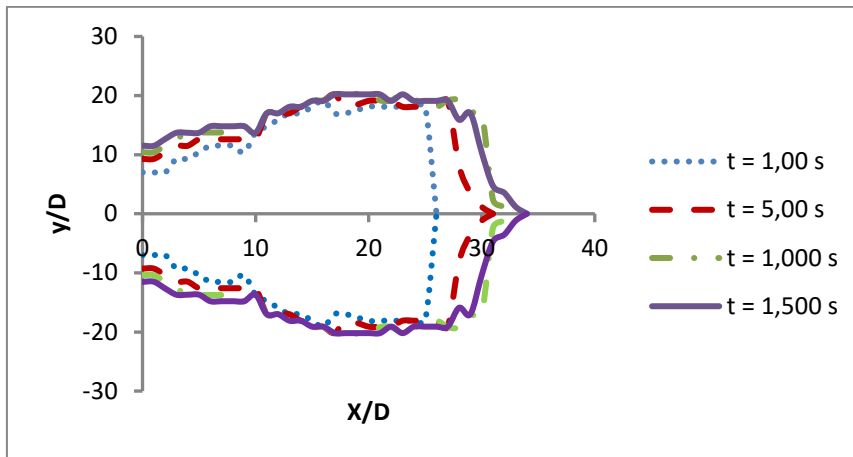


شکل ۵- تغییرات ارتفاعی بستر در امتداد محور مرکزی جت ریزشی و دیواره برای زمان‌های متفاوت شبیه‌سازی. همچنین در شکل ۶ پلان توسعه زمانی آبشستگی نشان داده شده است. محورهای  $X$  و  $Y$  به ترتیب نشان‌دهنده فواصل طولی و عرضی از محل قراگیری جت دیواره و محور مرکزی جت‌ها می‌باشند که هر دو محور توسط قطر جت‌ها بی بعد شده‌اند. مطابق شکل‌های ۵ و ۶ بیشترین نرخ فرسایش در سه جهت مختصاتی شامل عمق، طول و عرض آبشستگی در مراحل اولیه فرآیند آبشستگی اتفاق می‌افتند. به‌طوریکه ۸۰ درصد بیشینه طول آبشستگی پس از گذشت زمان ۱۰۰ ثانیه از شروع شبیه‌سازی اتفاق می‌افتد. بیشینه عمق آبشستگی ایجاد شده در همین زمان معادل ۶۷ درصد عمق آبشستگی در زمان تعادل می‌باشد و بیشینه فرسایش در جهت عرضی معادل ۷۶ درصد آن در زمان تعادل می‌باشد. بیشینه فرسایش چاله آبشستگی در جهت عرضی نیز پس از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از زمان شروع شبیه‌سازی به زمان تعادل خود می‌رسد که در شکل ۶ قابل ملاحظه می‌باشد. فرآیند توسعه چاله آبشستگی با گذشت زمان و نزدیک شدن به زمان ۱۵۰۰ ثانیه به سمت همگرا شدن پیش می‌رود که نشان‌دهنده رسیدن به زمان تعادل می‌باشد و پس از این زمان نیز تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. بنابراین زمان پایانی شبیه‌سازی برابر ۱۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

<sup>7</sup> Wall

<sup>8</sup> Pressure

<sup>9</sup> Symmetry

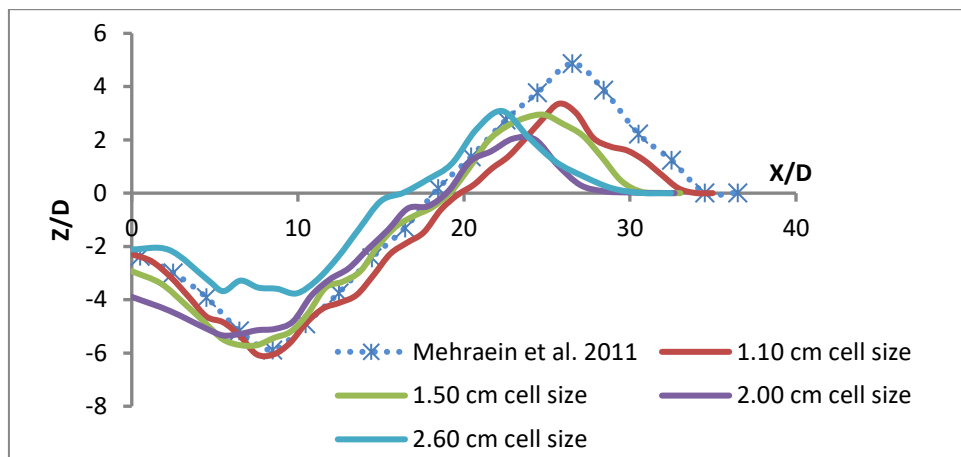


شکل ۶- نمای پلان از چاله آبشستگی و برآمدگی برای زمان‌های متفاوت شبیه‌سازی.

#### بررسی استقلال نتایج مدل عددی از شبکه‌بندی

بمنظور بررسی استقلال نتایج مدل عددی از شبکه‌بندی، چهار مش متفاوت با اندازه‌های سلول ۲/۶، ۲، ۱/۵ و ۱/۱ سانتی‌متر تولید شدند. در شکل ۷ مقایسه نیمرخ تغییرات ارتفاعی بستر رسوبی در زمان تعادل برای شبکه‌های مذکور با نیمرخ آزمایشگاهی نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ روند تغییرات طولی بستر برای چهار شبکه مذکور مشابه نیمرخ بستر

آزمایشگاهی است؛ محل چاله آبشستگی به درستی پیش بینی شده است و با ریزتر شدن شبکه خطای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی کاهش قابل توجهی دارد. همچنین محل تشکیل برآمدگی پایین‌دست چاله و نیز طول چاله با ریزتر شدن شبکه به نتیجه آزمایشگاهی نزدیک شده است.



شکل ۷- نیمرخ طولی تغییرات ارتفاعی بستر رسوبی برای اندازه‌های متفاوت سلول.

نسبت به مدل آزمایشگاهی محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین زمان محاسباتی هر یک از مدل‌های

به‌منظور مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی عددی با تغییر اندازه سلول‌ها، پارامتر بیشینه عمق آبشستگی

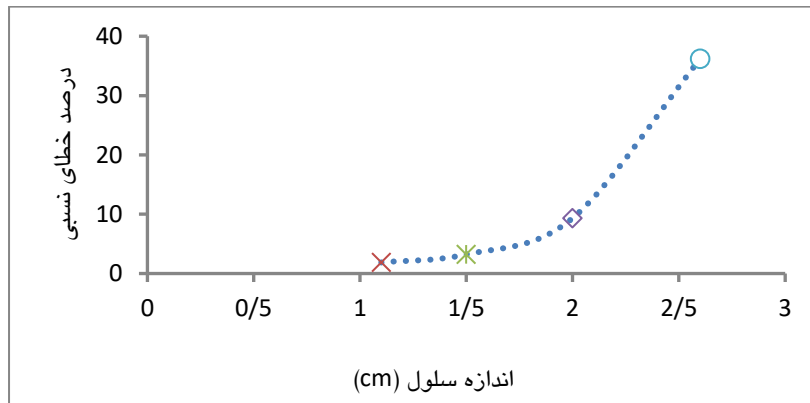


عددی که با یک سیستم با مشخصات پردازشگر مرکزی Core(TM) i7 با قدرت 3.60 GHz و حافظه 16GB  
 جدول ۱- مقایسه کمی پارامتر بیشینه عمق آبشستگی شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی. انجام گرفته است در جدول مذکور بیان شده است.

زمان محاسباتی (hour)	درصد خطا	بیشینه عمق آبشستگی (cm)		اندازه سلول (cm)
		آزمایشگاهی (Exp.)	عددی (Num.)	
۲	۳۶/۲	۵/۸۹	۳/۷۶	۲/۶
۷	۹/۳۳	۵/۸۹	۵/۳۴	۲
۱۷	۳/۲۲	۵/۸۹	۵/۷	۱/۵
۴۶	۱/۸۶	۵/۸۹	۶	۱/۱

بنابراین با کاهش اندازه سلول کمتر از ۱/۱ سانتی‌متر بیشینه عمق آبشستگی شبیه‌سازی شده تحت تاثیر اندازه سلول قرار نمی‌گیرد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ و نیز محاسبات جدول ۱، در این مطالعه اندازه سلول محاسباتی ۱/۱ سانتی‌متر به‌عنوان اندازه سلول مناسب در نظر گرفته شد.

همچنین در شکل ۸ تغییر خطای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی با تغییر اندازه سلول‌های شبکه محاسباتی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش اندازه سلول از ۲/۶ به ۱/۱ سانتی‌متر، خطای نسبی از حدود ۳۷ درصد به کمتر از ۲ درصد کاهش یافته و شیب نمودار تغییرات خطای نسبی بین دو شبکه ۱/۱ و ۱/۵ سانتی‌متری به سمت صفر کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تغییرات خطای نسبی بیشینه عمق آبشستگی با اندازه سلول محاسباتی.

عددی در پیش‌بینی نیمرخ طولی بستر نسبت به مدل آزمایشگاهی با روش جذر مجموع مربعات محاسبه شد. با توجه به خطای نسبی ارائه شده قابل ذکر است که مدل عددی از دقت بالایی در پیش‌بینی پارامترهای عمق آبشستگی و طول آبشستگی برخوردار می‌باشد. اگر چه پارامتر ارتفاع برآمدگی شبیه‌سازی شده ۳۱ درصد

در جدول ۲ بیشینه خطای نسبی سه پارامتر آبشستگی شامل عمق و طول چاله آبشستگی و نیز ارتفاع برآمدگی ناشی از تجمع رسوبات در پایین‌دست چاله آبشستگی در زمان تعادل مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و خطای نسبی پیش‌بینی مدل عددی برای پارامترهای مذکور و نیز خطای کلی مدل

کلی مدل عددی در پیش‌بینی نیمرخ طولی که با روش جذر میانگین مربعات محاسبه شده است نیز، نشان‌دهنده دقت مناسب مدل عددی و قابل اعتماد بودن نتایج بدست آمده در پیش‌بینی فرآیند آبشستگی می‌باشد.

کمتر از مقدار آزمایشگاهی تخمین زده شده است که خطای مذکور در مطالعات آبشستگی تحت تاثیر جت‌ها قابل قبول تلقی می‌شود. رفتار مشابهی در مطالعات سماع و همکاران (۲۰۲۰) بمنظور پیش‌بینی پارامتر طول آبشستگی با خطای نسبی برابر ۶۰ درصد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی گزارش شد. مقدار خطای

جدول ۲- محاسبه خطای پیش‌بینی پارامترهای آبشستگی شبیه‌سازی شده در زمان تعادل در مقایسه با مدل آزمایشگاهی.

پارامتر	عمق آبشستگی (cm)	طول آبشستگی (cm)	ارتفاع برآمدگی (cm)
آزمایشگاهی (Exp.)	۵/۸۹	۱۸/۲	۴/۸۶
مدل عددی (Num.)	۶	۱۹/۶۱	۳/۳۶
خطای نسبی = $(Exp-Num)/Exp * 100$	٪ ۱/۸۶	٪ ۷/۷	٪ ۳۱
خطای پیش‌بینی نیمرخ طولی	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Exp. - Num.)^2}{n}} = 0/017$		

## نتایج و بحث

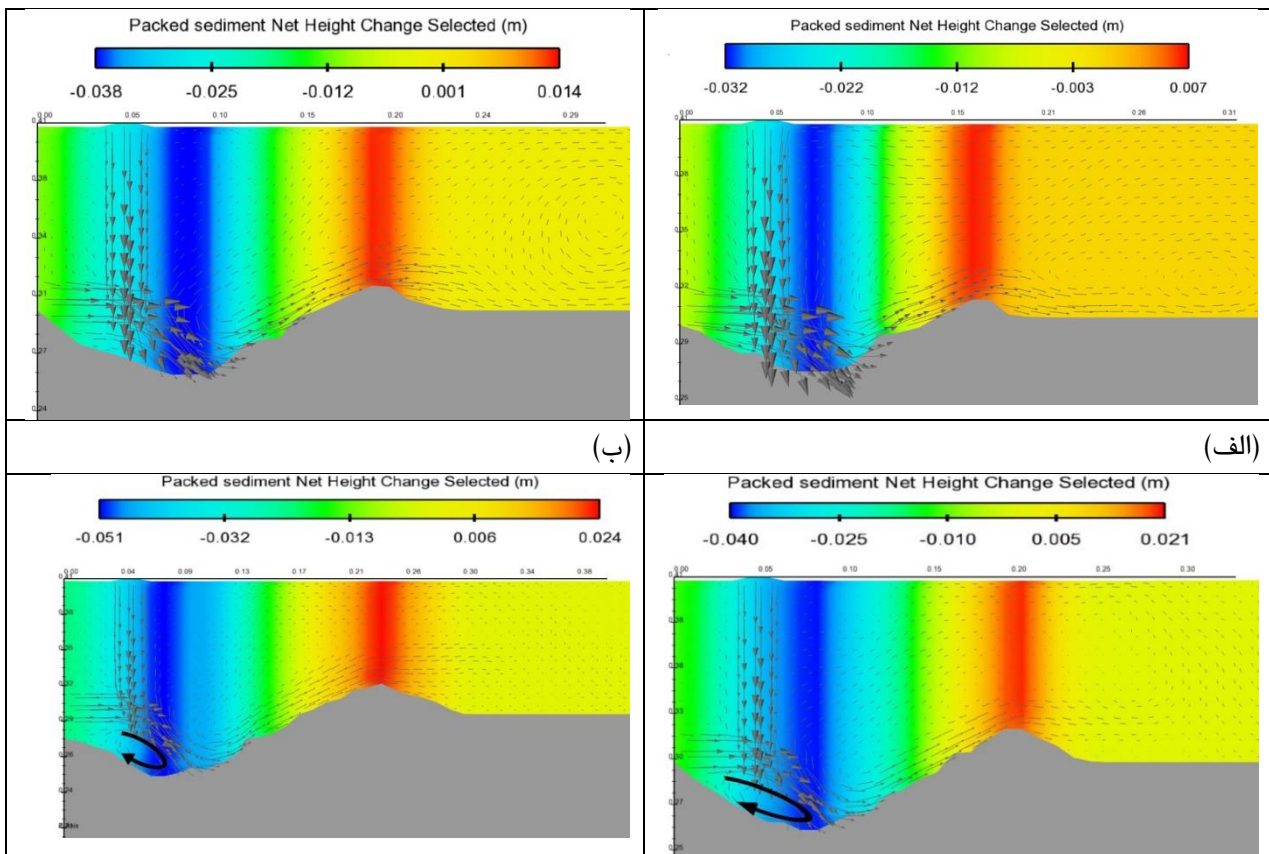
### بررسی مکانیزم جریان و آبشستگی ناشی از برخورد جت‌ها

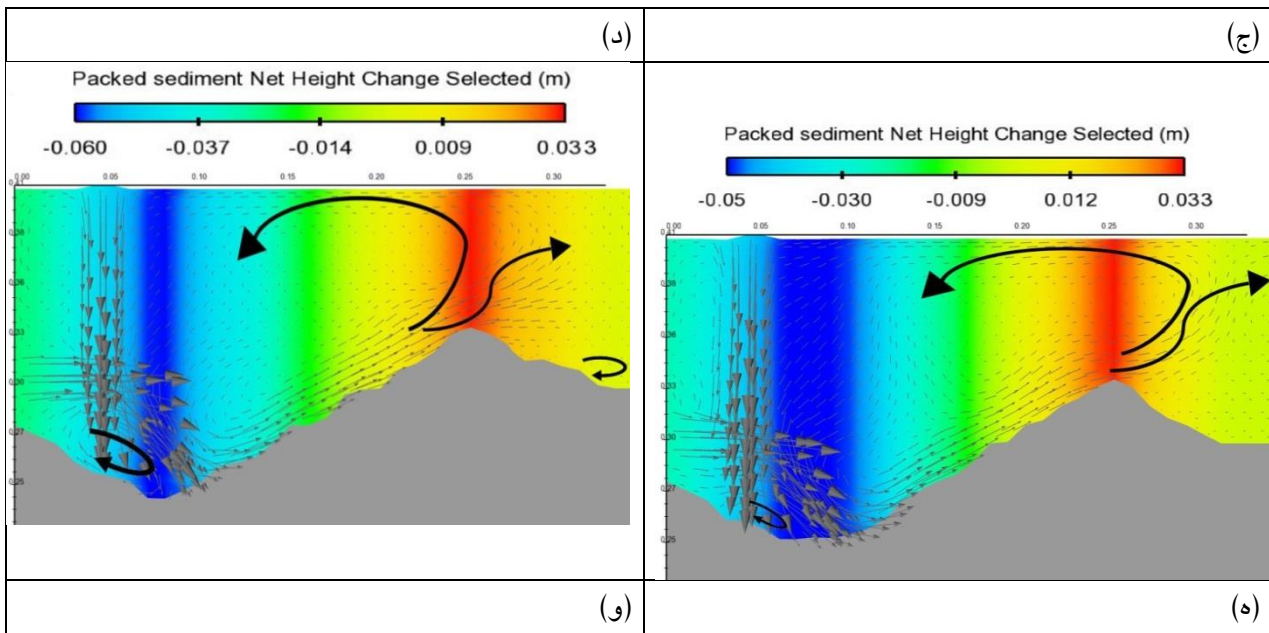
در شکل ۹ کانتور تغییرات ارتفاعی بستر رسوبی به همراه بردارهای سرعت جریان در مراحل اولیه شروع آبشستگی ( $t = 20 \text{ s}$ ) تا رسیدن به زمان تعادل شبیه‌سازی ( $t = 1500 \text{ s}$ ) در صفحه قائم (X-Z) نمایش داده شده اند. رنگ‌های آبی تیره و قرمز تیره بترتیب نشان‌دهنده بیشینه عمق آبشستگی و ارتفاع برآمدگی می‌باشند. با توجه به فاصله افقی بسیار نزدیک جت ریزشی از مبدا جت دیواره ( $X_p = 5 \text{ cm}$ ) و زاویه‌ای که جت ریزشی تحت آن انتشار می‌یابد ( $\Theta = 90^\circ$ )، جت ریزشی نقش سدکنندگی در مقابل جریان آزاد شده از جت دیواره را ایفا خواهد کرد، از طرفی مانع برخورد مستقیم جت ریزشی روی بستر می‌شود، لذا عملکرد هر دو جت تحت تأثیر متقابل قرار می‌گیرد. با برخورد ترکیب جت‌ها به بستر، فرسایش شروع می‌شود و رسوبات برداشته شده از بستر به تدریج به پایین دست

محل برخورد منتقل می‌شوند. پس از گذشت زمان ۱۰۰ ثانیه از شروع شبیه‌سازی و افزایش عمق چاله آبشستگی یک گردابه ساعت‌گرد درون چاله آبشستگی در محل برخورد دو جت تشکیل می‌شود که ناشی از برخورد دو جت است و موجب فرسایش بیشتر بستر رسوبی می‌شود. گردابه مذکور با عمیق شدن چاله آبشستگی نمایان می‌شود، بطوریکه در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب گردابه‌ای درون چاله آبشستگی ملاحظه نمی‌شود. انتقال رسوبات به پایین‌دست موجب افزایش فاصله میان جت دیواره و انتهای برآمدگی می‌گردد. با پیشرفت زمان و افزایش عمق چاله آبشستگی و در نتیجه تجمع رسوبات در پایین‌دست آن، جریان دیگر نمی‌تواند از تاج برآمدگی ایجاد شده عبور نماید و جدایش جریان قبل از عبور جریان از تاج برآمدگی اتفاق می‌افتد که موجب کاهش قابل توجه نرخ انتقال رسوبات توسط جریان به پایین‌دست برآمدگی می‌شود که نتیجه این امر افزایش ارتفاع برآمدگی و رسیدن آن به وضعیت تعادل می‌باشد که این امر به وضوح در شکل‌های ۹-ه و ۹-و قابل ملاحظه می‌باشد. شکل‌های

فرسایش تا زمانی ادامه می‌یابد که تنش برشی موضعی روی مصالح بستر رسوبی از تنش برشی بحرانی آنها کمتر شود. بررسی مکانیزم آبشستگی در زمان‌های ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که نرخ فرسایش در سه جهت عمقی، عرضی و طولی در زمان‌های ابتدایی شبیه‌سازی پیشرفت قابل توجهی دارد و پس از آن تا رسیدن به زمان تعادل (شکل ۹-و)، روند کندتری خواهد داشت. با توسعه چاله آبشستگی و متعاقباً کاهش سرعت جریان، تنش برشی نیز کاهش یافته و آبشستگی به وضعیت تعادل نزدیک می‌شود. قابل ذکر است که ارتفاع برآمدگی تشکیل شده در پایین‌دست چاله آبشستگی پس از گذشت ۹۰۰ ثانیه از زمان شروع شبیه‌سازی به زمان تعادل خود می‌رسد که مقایسه شکل‌های ۹-ه و ۹-و بیانگر این موضوع می‌باشد، اما عمق آبشستگی تا رسیدن به زمان تعادل تغییر می‌کند.

مذکور نشان می‌دهد که جریان در بالای برآمدگی به دو قسمت تقسیم می‌شود که بخشی از آن بصورت جریان برگشتی به سمت بالادست برآمدگی هدایت و سبب تشکیل گردابه پادساعت‌گرد در بالادست برآمدگی می‌شود. بخش دیگر جریان جدایش یافته غالباً به سمت سطح آزاد در پایین‌دست برآمدگی پیش می‌رود. در شکل ۹-و مشاهده شد که جریان جدایش یافته اخیر سبب تشکیل گردابه ساعت‌گرد در پایین‌دست برآمدگی شده و گردابه مذکور موجب انتقال رسوبات انباشته شده بر روی شیب پایین‌دست برآمدگی به سمت بالادست خواهد شد. شایان ذکر است که تغییر زاویه شیب پایین‌دست برآمدگی عمدتاً تحت تاثیر گردابه مذکور ایجاد شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان بیان کرد که دیواره بالادست چاله آبشستگی توسط برخورد دو جت و دیواره پایین‌دست چاله آبشستگی عمدتاً توسط جت ریزشی تشکیل می‌شود.

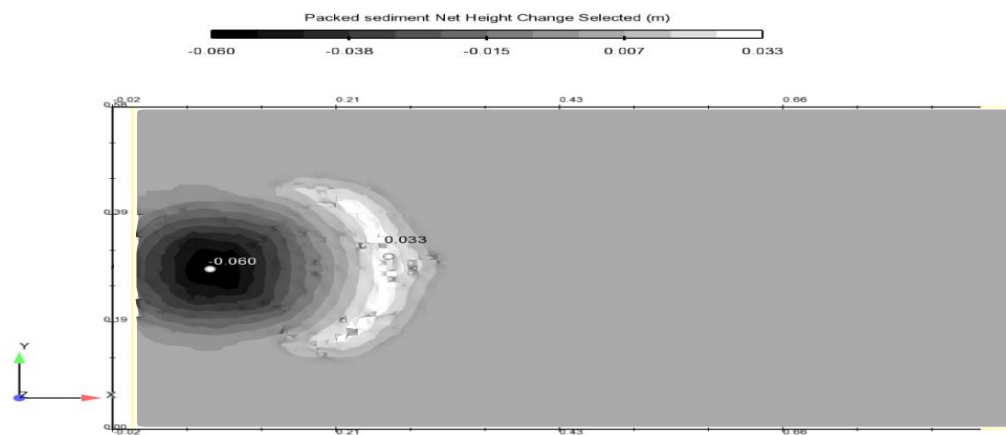




شکل ۹- کانتور تغییرات ارتفاعی بستر رسوبی و بردارهای سرعت جریان در امتداد محور مرکزی جت‌های ترکیبی (الف t = 20 s (ب t = 60 s (ج t = 100 s (د t = 500 s (ه t = 900 s (و زمان تعادل (t = 1500 s).

مقدار عددی بیشینه عمق آبشستگی و ارتفاع برآمدگی نیز در آن مشخص شده است.

نمای پلان از کانتور تغییر ارتفاعی بستر رسوبی در شکل ۱۰ در زمان تعادل نشان داده شده است که



شکل ۱۰- کانتور تغییرات ارتفاعی بستر در زمان تعادل.

### نتیجه‌گیری کلی

مدل عددی بکار رفته دارای دقت بالایی در تخمین پارامترهای آبشستگی به ویژه عمق آبشستگی و طول آبشستگی می باشد.

در این مطالعه مکانیزم جریان و آبشستگی ناشی از برخورد همزمان جت‌های دیواره و ریزشی با استفاده از مدل عددی Flow3D مورد ارزیابی قرار گرفت. اهم نتایج بدست آمده از این مطالعه عبارتست از:

مشاهدات نشان دادند که تجمع رسوبات ته‌نشین شده با گذشت زمان در پایین‌دست چاله آبشستگی موجب جدایش جریان قبل از عبور جریان از تاج برآمدگی و ایجاد گردابه پادساعت‌گردی در بالادست تاج برآمدگی و نیز گردابه ساعت‌گردی در پایین‌دست تاج برآمدگی می‌شود.

توسعه زمانی فرسایش بستر ثابت کرد که نرخ قابل توجهی از پیشرفت آبشستگی در تمام جهات مختصاتی در طی مراحل اولیه فرآیند آبشستگی رخ می‌دهد، اما دو پارامتر ارتفاع برآمدگی و عرض چاله آبشستگی در مقایسه با عمق چاله آبشستگی زودتر به زمان تعادل خود رسیدند.

بیشینه خطای مدل عددی در پیش‌بینی عمق آبشستگی، طول چاله آبشستگی و برآمدگی در پایین‌دست چاله آبشستگی بترتیب برابر  $1/86$ ،  $7/7$  و  $31$  درصد بوده است. دلیل بروز اختلاف در نتایج پیش‌بینی شده و مشاهدات آزمایشگاهی را می‌توان ناشی از تعامل پیچیده بین میدان جریان، فرآیند انتقال رسوب و مورفولوژی بستر رسوبی و همچنین ماهیت تجربی معادلات انتقال رسوب عنوان کرد.

تحلیل میدان جریان ناشی از برخورد جت‌ها نشان داد در همان زمان‌های ابتدایی شروع شبیه‌سازی با عمیق شدن چاله آبشستگی، یک گردابه ساعت‌گرد درون چاله آبشستگی در محل برخورد دو جت شکل می‌گیرد که موجب فرسایش بیشتر بستر رسوبی می‌شود.

#### منابع مورد استفاده

- Aamir M and Ahmad Z, 2019. Estimation of maximum scour depth downstream of an apron under submerged wall jets. *Journal of Hydroinformatics* 21:523-540
- Annandale GW, 2006. *Scour Technology: Mechanics and Engineering Practice*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Anonymous, 2016. *User's Manual*. Flow Science Inc., Santa Fe, New Mexico.
- Boroomand MR, Salehi Neyshabouri AA and Aghajano K, 2007. Numerical simulation of sediment transport and scouring by an offset jet. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34:1267-1275.
- Castillo LG and Carillo JM, 2016. Scour, velocities and pressures evaluations produced by spillway and outlets of dam. *Water* 8: 1-21.
- Castillo LG and Carillo JM, 2017. Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. *International Journal of Multiphase Flow* 92:171-180.
- Faruque MAA, Sarathi P and Balachandrar R, 2006. Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth. *Journal of Hydraulic Engineering* 132:575-580.
- Heng S, Tingsanchali T and Suetsugi T, 2012. Analysis of plunge pool scour hole formation below a chute spillway with flip bucket using a physical model. *Asean Engineering Journal Part C*, 2:54-65.
- Meselhe EA, Georgiou I, Allison MA and Mccorquodale JA, 2012. Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in lower mississippi at a proposed delta building diversion. *Journal of Hydrology* 472-473:340-354.
- Mehraein M, Ghodsian M and Schleiss A, 2011. Experimental Study on Scour Due to Simultaneous Wall and Impinging Circular Jet. Pp. 2515-2521. 34th IAHR World Congress, 26 June – 1 July, Brisbane, Australia.
- Mehraein M, Ghodsian M and Schleiss A, 2012. Scour formation due to simultaneous circular impinging jet and wall jet. *Journal of Hydraulic Research* 50:395-399.
- Nyantekyi-Kwakye B, 2016. *Experimental Investigation on the Flow Characteristics of Three-Dimensional Turbulent Offset Jets*. PhD thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada.
- Pagliara S and Palermo M, 2017. Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets. *Water Science and Engineering* 10: 17-24.
- Rodi W, Constantinescu G and Stoesser E, 2013. *Large Eddy Simulation in Hydraulic*. Taylor & Francis Group, London, UK.

- Samma H, Khosrojerdi A, Rostam-Abadi M, Mehraein M and Cataño-Lopera Y, 2020. Numerical simulation of scour and flow field over movable bed induced by a submerged wall jet. *Journal of Hydroinformatics* 22:385-401.
- Wilcox DC, 2006. *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd Ed. DCW Industries Inc, La Cañada Flintridge, CA, USA.
- Yildiz D and Üzücek E, 1994. Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets. *International Water Power and Dam Construction*, 46:50-56.