


Numerical Modeling of the Flow Over the Spillway Using the Weakly Compressible Moving Particles Semi-Implicit Method (WCMPS) (Case Study of Dehn Qala Dam)

Ehsan Jafari Nodoushan^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Campus of Bijar, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

* ehsan.jafari@uok.ac.ir

Received: 25 December 2022, Accepted: 15 April 2023  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Numerical simulation has increasingly become a very important tool for solving complex phenomena in fluid mechanics. Today, computational fluid dynamics (CFD), which uses numerical simulation to solve fluid flow problems, has become a major tool in many scientific and engineering studies. So far, most simulations have been performed using network-based Euler methods. The main problem with using such methods is the presence of sharp and mobile joints as well as free surface cells that require complex behaviors. In recent years, a new generation of numerical methods called mesh-free particle methods (Lagrangian) has been developed to solve computational fluid dynamics (CFD) problems. In these methods, the domain of the fluid is represented by a set of moving particles in the Lagrangian system. Mesh-free Lagrangian methods, including SPH and MPS, allow numerical modeling of flow in the face of large deformations or Discontinuity of boundaries. Due to the importance of the subject, the purpose of this study is to simulate the hydrodynamics of flow on the overflow of Dahan Ghaleh dam using a mesh-free Lagrangian method based on weakly compressible moving particle semi-implicit formulation (WC-MPS).

Methodology: In Lagrangian methods, unlike the Eulerian method, instead of networking the solution field and discrete the equations on the nodes, the solution field is divided into a number of particles and the discrete equations are solved on these particles. In fact, the governing equations are transformed into particle interaction equations using different operators. In the WC-MPS method, the system is considered as a system with weakly compressibility and calculates the pressure of each particle using the state equation. The MPS method uses particle density to track the free surface. Because there are no particles outside the free surface, the density of the particles on the free surface decreases severely. A particle is known as a free surface particle whose density is somewhat lower than the standard particle density. The value of this limit may be selected from 80% to 99% depending on the problem. Therefore, the pressure of this particle on the free surface will be set to zero in each time step and there is no need to apply any additional conditions for the free surface. For solid (impermeable) boundaries, such as walls or beds, In the vicinity of solid boundaries, the particle density decreases, which can lead to computational disturbances. Therefore, a number of ghost particles are located outside the boundaries to prevent this density reduction. In order to model the inlet and outlet flow, the particle recycling method at the

inlet and outlet boundaries, which was developed by Jafari Nodoushan et al. (2016) was used.

Results and Discussion: In this study hydraulic parameters of the flow on the broad crested weirs, chute, and flip bucket of Dahan Ghaleh dam are investigated. At first, the free surface profile was compared at times $t = 1, 5, 10, 15, 30$ seconds for three flow rates of 461, 600, and 904 m³/s. when the discharge is 600 m³/s, the depth and velocity of the flow at the beginning of the channel will be 1.1 m and 9.1 m/s, respectively. The value of the depth and velocity of the flow at the beginning of the channel in WCMPS modeling is 1.191 m and 8.420 m/s, respectively, which shows the accuracy of the model in predicting the depth and velocity of the flow. In this research, the pressure is simulated in the form of pressure contour at different points in terms (pa) for three different flow rates. The highest pressure is near the bed in the approach channel and no part of the broad crested weirs, chute, and flip bucket is under negative pressure. Simulation of cavitation index has been done in broad crested weirs, chute, and flip bucket. the results showed that the cavitation index in the range of 110m to 140m has approached the critical value and the possibility of creating cavitation phenomenon in this area is more than in other places, but considering the cavitation index value in this area is greater than 1.8, according to the recommendation Falvey (1990) it does not need to be protected against cavitation. At the end, the height and length of the jump from the edge of the bucket for different discharges have been investigated.

Conclusion: In this study, the hydraulic parameters of the flow on the broad crested weirs, chute, and flip bucket of Dahan Ghaleh dam are investigated. The desired model has simulated the depth and velocity of the flow at the beginning of the channel after of the overflow, depth, velocity, and Froude number of the flow in the bucket floor with an error of less than 10%, and the jump length per discharge 600 (m³/s) with a maximum error of 12% has simulated. The comparison of the results indicates the accuracy and reliability of the results of the developed model.

Keywords: Numerical modeling, moving particle semi-implicit method (MPS), Broad crested weirs, chute, Flip Bucket



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدلسازی عددی جریان بر روی سرریز به روش نیمه ضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف (WCMPS) (مطالعه موردی: سد دهن قلعه)

احسان جعفری ندوشن^{*۱}

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، پردیس بیجار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

* ehsan.jafari@uok.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: روش‌های ذرات بدون شبکه، نسل جدیدی از روش‌های فنی عددی هستند که امکان مدل‌سازی عددی جریان را در شرایطی که تغییرشکل‌های بزرگ و یا گسستگی مرزها وجود دارد، فراهم می‌سازد. لذا در این تحقیق با توجه به اهمیت و نقش سرریز در مهار و هدایت جریان به پایین دست، به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز سد دهن قلعه به روش بدون شبکه نیمه ضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف (WCMPS) پرداخته شده است. در این روش با به‌کارگیری روش بازیافت ذرات در مرزهای ورودی و خروجی، به شبیه‌سازی با شرایط مرزی باز پرداخته شده است. این روش نه تنها شرایط مرزهای ورودی و خروجی را بهبود می‌دهد بلکه نوساناتی فشار در مرزها را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به برتری‌های این روش در این تحقیق به بررسی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان بر روی سرریز لبه پهن، تنداب و جام پرتابی سد دهن قلعه پرداخته شده است. مدل مورد نظر، عمق و سرعت جریان را در ابتدای آبراهه درست در پای پنجه سرریز با خطای کمتر از ۱۰ درصد، عمق، سرعت و عدد فرود جریان را در رقوم کف جام پرتابی با خطای کمتر از ۱۰ درصد و طول پرش را به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه با بیشینه خطا ۱۲ درصد شبیه‌سازی نموده است. همچنین نتایج مدل عددی یادشده نشان داد میزان شاخص حفره‌زایی در طول سرریز بزرگتر از ۱/۸ است.

کلیدواژگان: مدل‌سازی عددی جریان، روش‌های نیمه ضمنی ذرات متحرک (MPS)، سرریز لبه پهن، تنداب، پرتاب کننده جامی.

۱- مقدمه

محاسبه‌هایی برای حل معادله‌های دیفرانسیل می‌باشد. بنابراین کاربرد این روش‌ها در هنگام تغییرشکل‌های بزرگ، سطح مشترک متحرک و مرزهای با قابلیت تغییرشکل با مسئله‌های همراه است. در این روش‌های سنتی روی مش‌بندی اوپلری منجر به خطای عددی ناشی از عبارت جابجایی می‌شود. روش اوپلری-لاگرانژی هیبرید مسئله‌های به جهت همخوانی چارچوب اوپلری و لاگرانژی دارد. روش‌های ذره‌ای بدون شبکه (لاگرانژی) متعلق به گروهی از روش‌های به‌کلی لاگرانژی بوده که قادر به مدل‌سازی پدیده‌هایی با هر گونه تغییرشکل و هندسه‌های پیچیده می‌باشند. روش نیمه‌ضمنی ذرات

شبیه‌سازی عددی به طور فزاینده‌ای تبدیل به یک ابزار بسیار مهم برای حل پدیده‌های پیچیده در مکانیک سیالات شده است. امروزه، پویایی سیالات محاسبه‌هایی که از شبیه‌سازی عددی برای حل مسئله‌های جریان سیال استفاده می‌کند به ابزار اصلی بسیاری از پژوهش‌های علمی و مهندسی تبدیل شده است. بیشتر شبیه‌سازی مسئله‌های مکانیک سیالات به طور عمده با استفاده از روش‌های اولری متکی بر شبکه از مانند روش تفاضل محدود، حجم‌های محدود و روش اجزای محدود انجام گرفته است. شاخص عمده این روش‌ها شبکه‌بندی دامنه

متحرک^۱ (MPS) یکی از روش‌های محاسبه‌هایی لاگرانژی بدون شبکه برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد است که نخستین بار توسط Kushizuka and Oka (1996) معرفی شد. این روش یک روش مبتنی بر ذره بدون شبکه به کلی لاگرانژی است که در دو دهه اخیر برای شبیه‌سازی انواع مختلف جریان سیال با موفقیت به کار گرفته شده است. در روش MPS سیال به کمک ذرات نمایش داده می‌شود و حرکت هر ذره از طریق تعامل با ذرات مجاور محاسبه می‌شود (Nabian and Farhadi, 2016). در این روش گرادیانان و لاپلاسیان‌های فضایی از طریق میانگین‌گیری وزنی گرادیانان و لاپلاسیان‌های یک کمیت فیزیکی بین ذره موردنظر و ذرات مجاورش محاسبه می‌شود. مشارکت هر ذره برای یک کمیت از طریق تابع کرنل با توجه به فاصله آن ذره از ذره موردنظر وزن‌دهی می‌شود (Jin et al., 2016). مدل‌های برهم‌کنش ذرات برای عملگرهای دیفرانسیلی همچون گرادیان، دیورژانس و لاپلاسیان تعریف می‌شوند و معادله‌های حاکم به معادله‌های برهم‌کنش ذرات متحرک تبدیل می‌شوند. این روش که مبتنی بر بسط سری تیلور می‌باشد، در آغاز در مسئله‌های مکانیک سیالات به کار برده شد. در ادامه، این روش برای مدل‌سازی چندی از پدیده‌های هیدرولیکی از جمله شکست سد، شکست موج، موج شکن، جریان خروجی از مخزن و جریان روی سرریز به کار رفته است (Shakibaeinia and Jin, 2009 و Khayyer and Gotoh, 2009). در روش MPS، تراکم‌ناپذیری سیال با ثابت نگاه داشتن چگالی ذرات در زمان محاسبه‌های ارضا می‌شود. همچنین متغیر فشار در معادله مومنتم با حل معادله‌ای موسوم به پواسن به دست می‌آید. از جمله نخستین مدل‌سازی‌های انجام گرفته با روش MPS می‌توان به شبیه‌سازی فروپاشی ستون آب توسط Koshizuka and Oka (1996) اشاره نمود که نتایج آن حاکی از تطابق قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی است. پس از آن محققین بسیاری برای حل مسئله‌های مختلف از روش MPS بهره گرفتند که در زیر به چندین نمونه اشاره می‌شود. (Koshizuka et al. (1998) با کمک روش MPS شکست موج روی شیب را

شبیه‌سازی و به دست آمده که در نتایج محاسبه‌هایی دو نوع موج مشاهده شده و نتایج حاصل با نتایج مرجع به خوبی در توافق است. در این زمینه Gotoh and Sakai (2006) به مدل‌سازی شکست امواج روی بسترهای مختلف دریا مانند بستر با شیب یکنواخت نفوذناپذیر، شیب یکنواخت نفوذپذیر و یک دیواره عمودی با پله‌های کوچک پرداختند و نتایج رضایت‌بخشی به دست آوردند. برای بهبود پایداری روش MPS، Koshizuka et al. (1998) یک مدل اصلاح شده گرادیان فشار برای تضمین نیروی دافعه بین ذرات ارائه کردند و این مدل ارائه شده جدید را برای شبیه‌سازی جریان مستغرق به کار گرفتند. (Gotoh et al. (2001 و Gotoh and Sakai (2006) مدل MPS چندفازه را برای شبیه‌سازی مسئله‌های سیال-گاز و سیال-جامد، انتقال رسوب و جسم‌های شناور بسط دادند. (Shao and Lo (2003) با استفاده از مفهوم‌های جریان‌های غیرنیوتنی، جریان‌های گل‌آلود را شبیه‌سازی کردند. به این صورت که جریان حاوی رسوب را با مدل رئولوژی به صورت یک سیال غیرنیوتنی مدل‌سازی نمودند و بر مبنای فراسنجه‌های جریان، لزجت متغیری برای جریان گل‌آلود تعریف کردند و مسئله شکست سد را برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی مدل‌سازی نمودند. (Ataie-Ashtiani and Farhadi (2006) تاثیر تابع‌های هسته‌های مختلف را برای ثبات و عملکرد MPS بررسی کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که تابع کرنل B-Spline ثبات و کارکرد روش MPS را بهبود می‌بخشد. (Zhang et al. (2006) با معرفی رابطه جدیدی برای لاپلاسیان، از روش MPS در شبیه‌سازی مسئله‌های انتقال حرارت استفاده کردند. (Shibata and Koshizuka (2007) مدل MPS سه‌بعدی را برای شبیه‌سازی برخورد موج به عرشه کشتی و پیش‌بینی فشار ناشی از برخورد به کار بردند. (Khayyer and Gotoh (2008) روی بخش مومنتم مدل کار کردند و رابطه جدیدی برای تغییرهای فشار پیشنهاد دادند. آنان همچنین برای چیره شدن بر نوسان‌های فشار، تراکم‌پذیری کمی را برای مدل قائل شدند. (Shakibaeinia and Jin (2010) روش MPS با تراکم ضعیف^۲ (WC-) را

2 Weakly Compressible MPS

1 Moving particles semi-implicit method

الگوریتم نه تنها شرایط مرزهای ورودی و خروجی را بهبود بلکه نوسان‌های فشار در مرزها را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از انجام این تحقیق، شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان بر روی سرریز سد دهن قلعه با استفاده از اطلاعات دریافت شده از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به روش لاگرانژی بدون شبکه برمبنای ترکیب بندی نیمه‌ضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف (WC-MPS) می‌باشد. بنابراین در این مطالعه به بررسی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت جریان، عمق جریان، عدد فرود، طول پرش جت جریان در پرتاب کننده جامی و شاخص حفره‌زایی بر روی سرریز لبه پهن، تنداب و جام پرتابی سد دهن قلعه پرداخته شده است.

۲- معادله‌های حاکم

معادله‌های حاکم بر جریان سیال شامل بقای جرم و اندازه حرکت در فرم لاگرانژی به شرح رابطه‌های ۱ و ۲ می‌باشند (Shakibaenia and Jin 2010):

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (\nu_i \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{g} \quad (2)$$

در رابطه‌های بالا، \mathbf{u} بردار سرعت، t زمان، ρ چگالی سیال، P فشار، \mathbf{g} شتاب ثقل و ν_i لزجت گردابی سیال می‌باشد.

۳- گسسته‌سازی در روش MPS

در روش‌های لاگرانژی بر خلاف روش اویلری، به‌جای شبکه‌بندی میدان حل و منقطع‌سازی معادله‌های روی گره‌ها، میدان حل به چندین ذره تقسیم شده و معادله‌های منقطع شده روی این ذرات حل می‌شوند. در حقیقت معادله‌های حاکم با استفاده از کنشگرهای مختلف به معادله‌های برهمکنش ذرات تبدیل می‌شوند. در این میان، ذراتی که به ذره مورد بررسی نزدیک‌تر باشند، اثر بیشتری روی آن ذره خواهند گذاشت. به گونه‌ای که می‌توان از اثر ذرات به نسبت دورتر در مقایسه با ذرات نزدیک‌تر صرف‌نظر کرد و برهمکنش بین ذرات را به قلمرو مشخصی به نام شعاع تأثیر محدود نمود. تأثیر هر یک از ذرات بر ذره مورد

(MPS) را برای مدل‌سازی مایع‌های تراکم‌ناپذیر پیشنهاد کردند. در این روش سیال به‌جای به‌کلی غیرقابل‌تراکم، به‌صورت نسبتاً تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود و به‌جای حل معادله پواسن فشار به‌صورت ضمنی، از معادله حالت، که به‌صورت صریح حل می‌شود، استفاده می‌شود. آنان نشان دادند که این روش نه تنها نوسان‌های MPS مصنوعی را بهبود می‌دهد، بلکه کمی کارایی مدل در مقایسه با MPS استاندارد (به‌کلی تراکم‌پذیر) را افزایش می‌دهد. (Kondo and Koshizuko 2011) به منظور غلبه بر نوسان‌های فشار و اطمینان از پایداری خطی و زاویه‌ای رابطه جدیدی برای جمله منبع در معادله پواسن فشار پیشنهاد کردند. (Shakibaenia and Jin 2011b) تراکم‌پذیری کم برای مدل MPS قائل شده و در مرزها راهبرد جایگزینی ذرات را پیشنهاد کردند. (Shakibaenia and Jin 2012a) یک مدل چند فازی MPS برای سیستم‌های چند چگالی و چند لزجت پیشنهاد کردند.

(Fadafan and Kermani 2017) خواص پایداری فشارها را با روش MPS بهبود دادند. (Shakibaenia and Jin 2011a, 2012) با ترکیب مدل چند فازی با رابطه‌های رئولوژیکی ویسکو-پلاستیک مانند پلاستیک هرشل-بالکی و بینگهام، مدلی را برای شبیه‌سازی جریان‌های رسوبی مانند شکست سد با بستر متحرک، جت و ستون شن و ماسه ابداع کردند.

(Fu and Jin 2015) و (Nabian and Farhadi 2016) از رویکرد همانندی برای شبیه‌سازی جریان رسوب گرانشی در مورد زمین لغزش‌های غوطه‌ور استفاده کردند. چندی پیش، (Tajnesaie et al. 2018) و (Jafari Nadoushan et al. 2018) WC- MPS چند فازی را برای جریان‌های رسوبی مبتنی بر گرانش توسعه دادند. در بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه روش‌های لاگرانژی مدل‌های مورد نظر دارای شرایط مرزی بسته می‌باشند. (Jafari-Nadoushan et al. 2016) به‌کارگیری روش بازیافت ذرات در مرزهای ورودی و خروجی، به توسعه و بهبود مدل در شبیه‌سازی مدل‌های کاربردی با شرایط مرزی باز پرداخته و الگوریتم جدیدی برای شرایط مرزی ورودی و خروجی توسعه داده‌اند. این

۲-۳- عملگرهای روش MPS

همان‌طور که در معادله‌های حاکم دیده می‌شود، جمله‌های عملگرهای گرادیان و لاپلاسیان در این معادله‌های وجود دارد که برای گسسته‌سازی لازم است به صورت لاگرانژی تعریف شوند. عملگر گرادیان، میانگین وزنی بردارهای گرادیان بین ذره مورد نظر i و ذرات همسایه آن است که در روش MPS استاندارد به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود (Koshizuka and Oka, 1996).

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{i \neq j} \left[\frac{\phi_i - \phi_j}{R_{ij}} \frac{r_j - r_i}{R_{ij}} W(R_{ij}, r_e) \right] \quad (7)$$

به طور همانند، فرمول دیورژانس بردار u برای ذره i به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$\langle \nabla \cdot u \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{i \neq j} \left[\frac{u_i - u_j}{R_{ij}} \cdot \frac{r_j - r_i}{R_{ij}} W(R_{ij}, r_e) \right] \quad (8)$$

که در آن d ابعاد فضا، n^0 میزان میانگین چگالی عددی ذرات اولیه و r بردار موقعیت می‌باشد. فرمول لاپلاس به وسیله میانگین وزنی مقادیر فیزیکی توزیع شده از ذره i به ذرات مجاور خود محاسبه می‌شود. بر این مبنا، اپراتور لاپلاسیان به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود (Koshizuka and Oka, 1996):

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{i \neq j} [(\phi_i - \phi_j) W(R_{ij}, r_e)] \quad (9)$$

که در آن λ فراسنجه معرف برای حفظ تساوی افزایش واریانس با راه حل تحلیلی است. این فراسنجه به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{\int_v W(R, r_e) R^2 dv}{\int_v W(R, r_e) dv} \quad (10)$$

تابع کرنل که در این بررسی استفاده شده، تابع چند جمله‌ای ناهمگون در مرتبه سوم می‌باشد که توسط شکیبائی‌نیا و جین (۲۰۱۰) پیشنهاد شده است (Shakibaeinia and Jin, 2010):

$$W(r_{ij}, r_e) = \begin{cases} (1 - r_{ij}/r_e)^3 & 0 \leq r_{ij}/r_e < 1 \\ 0 & r_{ij}/r_e \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

محاسبه با تابعی وزنی سنجیده می‌شود. وزن‌دهی ذرات همسایه موجود در شعاع تأثیر یک ذره خاص، توسط تابع کرنل انجام می‌گیرد. شکل ۱ موقعیت ذره مورد نظر در میدان حل و برهمکنش با ذرات همسایه را نشان می‌دهد. تابع کرنل برای درونیایی کمیت‌های فیزیکی در پیرامون هر ذره استفاده می‌شود.

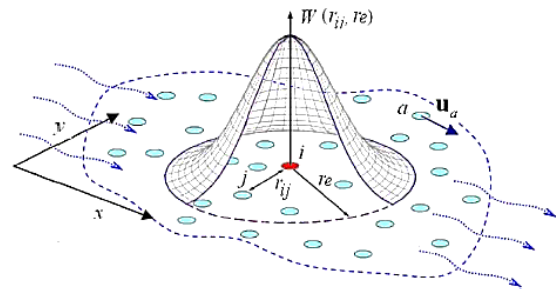


Fig. 1 MPS kernel approximation (Jafari et al., 2016).

شکل ۱ تقریب تابع کرنل MPS (Jafari et al., 2016)

۳-۱- چگالی عددی ذرات

چگالی عددی ذرات برای نشان دادن تراکم ذرات در پیرامون یک ذره خاص (فراسنجه n)، به صورت رابطه ۳ تعریف شده است (Shakibaeinia and Jin 2011a):

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(R_{ij}, r_e) \quad (3)$$

شماره ذرات در واحد حجم (N_i) را می‌توان با استفاده از چگالی عددی ذرات با رابطه ۴ محاسبه کرد:

$$\langle N \rangle_i = \frac{\langle n \rangle_i}{\int_v W(R, r_e) dv} \quad (4)$$

بنابراین، با داشتن جرم هر ذره، چگالی سیال به کمک رابطه ۵ تعیین می‌شود:

$$\langle \rho \rangle_i = \frac{\sum_{i \neq j} m_j W(R_{ij}, r_e)}{\int_v W(R, r_e) dv} \quad (5)$$

که در آن m_i جرم ذره i ، عملگر $\langle \rangle$ تقریب کرنل و مخرج کسر انتگرال از تابع کرنل در منطقه تعامل است. با فرض اینکه همه ذرات دارای جرم همانند m باشند، چگالی سیال و چگالی عددی ذرات با رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$\langle \rho \rangle_i = \frac{m}{\int_v W(R, r_e) dv} \langle n \rangle_i \quad (6)$$

۴- مدل سازی آشفتگی

آشفتگی یک عامل مؤثر در محاسبه‌های هیدرولیکی جریان‌های آشفته به شمار می‌آید. در این پژوهش، برای مدل سازی تنش آشفتگی در معادله اندازه حرکت، از رابطه‌های معرفی شده توسط (Gotoh et al 2001) استفاده شده است. لزجت آشفتگی (لزجت گردابی سینماتیک) با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$v_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (12)$$

که در آن Δ فاصله بین ذرات و C_s ثابت اسماگورینسکی می‌باشد که اغلب بین ۰/۱ تا ۰/۲ در نظر می‌گیرند. در این تحقیق میزان ۰/۱۵ برای ضریب اسماگورینسکی در نظر گرفته شده است (Shakibaenia and Jin 2011a). همچنین، S_{ij} نرخ تانسور کرنش در مقیاس حل است که به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

۵- الگوریتم حل روش MPS

برای حل معادله‌های حاکم ارائه شده، از روش MPS استفاده می‌شود. در این روش، معادله‌های بر مینا دو سطح زمانی کنونی و آینده نوشته می‌شوند. همانگونه که از نام روش نیمه ضمنی ذرات متحرک برمی‌آید، معادله‌های به صورت نیمه ضمنی حل می‌گردند. یعنی بعضی جمله‌های معادله به صورت صریح و برخی به صورت ضمنی در نظر گرفته می‌شوند. با این روش، منقطع سازی معادله ناویر-استوکس در دو نیم گام زمانی انجام می‌شود. در نیم گام اول (مرحله پیش بینی)، معادله‌های حاکم با حضور جمله‌های لزجت و ثقل، بدون اعمال تراکم‌ناپذیری به صورت صریح حل شده، ولی جمله فشار در نظر گرفته نمی‌شود. تا این مرحله، بقای جرم یا تراکم‌ناپذیری سیال ارضا نشده است. در نیم گام دوم (مرحله تصحیح) معادله‌های حاکم با حضور جمله فشار حل می‌شوند و سپس نتایج به دست آمده از مرحله قبل شامل سرعت و موقعیت ذرات، با حضور گرادیان فشار و با ثابت نگاه داشتن چگالی، اصلاح می‌شود. به بیان دیگر، از جمله فشار برای تصحیح سرعت ذرات

محاسبه شده از مرحله تخمین استفاده می‌شود. بر این مبنای، معادله ناویر- استوکس در نیم گام اول را می‌توان به زبان ریاضی به صورت رابطه ۱۴ نوشت:

$$\frac{Du}{Dt} = \nabla \cdot (v_i \nabla u) + f \quad (14)$$

از حل معادله ۱۴ به صورت صریح، نوسان‌های مؤلفه‌های سرعت Du برای همه ذرات به دست آمده و سپس موقعیت و سرعت اصلاح شده ذرات با استفاده از رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$u^{t+\frac{1}{2}} = \Delta u^{t+\frac{1}{2}} + u^t \quad (15)$$

$$r^{t+\frac{1}{2}} = \Delta r^{t+\frac{1}{2}} + r^t \quad (16)$$

که در آنان u^t, r^t و $u^{t+1/2}$ و $r^{t+1/2}$ به ترتیب موقعیت و سرعت هر ذره در گام زمانی کنونی t و نیم گام زمانی آینده $t+1/2$ می‌باشند. آنگاه دوباره چگالی عددی هر ذره $n_i^{t+1/2}$ با توجه به موقعیت جدید ذرات محاسبه می‌شود. جمله‌های مربوط به ثقل و لزجت از معادله ناویر- استوکس کنار گذاشته شده و با رابطه ۱۷ فشار ارزیابی می‌شود:

$$\frac{Du}{Dt} = - \frac{1}{\rho} \nabla P^{t+1} \quad (17)$$

از آنجا که این مرحله در نیم گام زمانی دوم انجام می‌شود، منقطع سازی معادله بالا به صورت رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ خواهد بود:

$$\frac{1}{2} \frac{(n^0 - n_i^{t+\frac{1}{2}})}{\Delta t} = - \nabla \cdot \left(- \frac{\Delta t}{\rho} \nabla P^{t+1} \right) \quad (18)$$

$$\langle \nabla^2 P^{t+1} \rangle = \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{(n^0 - n_i^{t+\frac{1}{2}})}{n^0} \quad (19)$$

MPS بقای جرم را بدون محاسبه‌های اضافی تضمین می‌کند زیرا خود ذرات نشان‌دهنده جرم است. در این تحقیق، از روش WC-MPS، ارائه شده برای مدل سازی جریان تراکم‌ناپذیر برای محاسبه فشار استفاده می‌شود. در این روش، با نگاه داشتن میزان تراکم‌پذیری بسیار کوچک، سیال به عنوان یک سیال تاحدودی تراکم‌ناپذیر رفتار کرد و رابطه صریح (معادله حالت) برای تعیین فشار در هر گام زمانی، به جای حل ضمنی رابطه (معادله پواسون) استفاده می‌شود. فرض تراکم‌پذیری ضعیف در روش MPS سبب

کاهش می‌یابد. ذره‌ای به عنوان ذره سطح آزاد شناخته می‌شود که چگالی آن تا حدی از چگالی استاندارد ذرات کمتر باشد (برابر شکل ۲) میزان این حد با توجه به مسئله مورد نظر ممکن است از ۸۰٪ تا ۹۹٪ انتخاب شود و با رابطه ۲۲ نشان داده می‌شود (Shakibaeinia and Jin, 2011a):

$$\langle n^* \rangle_i \leq n^0 \beta \quad (22)$$

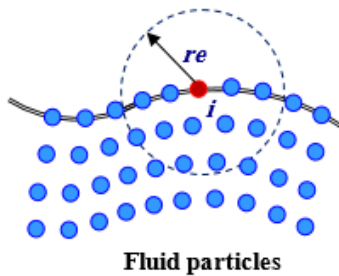


Fig. 2 Particles on the free surface

شکل ۲ ذرات روی سطح آزاد

در این صورت فشار این ذره روی سطح آزاد در هر گام زمانی برابر صفر قرار داده خواهد شد. در روش MPS نیاز به اعمال شرط اضافه دیگری برای سطح آزاد نیست.

۲-۶- مرز جامد

در مواردی مانند دیواره‌ها یا کف آبراهه که با مرز جامد غیر قابل نفوذ روبه‌رو هستیم، از این شرط مرزی استفاده می‌شود. در مجاورت مرزهای جامد، چگالی ذرات کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند سبب ایجاد اختلال در محاسبات شود. از این رو شماری ذرات مجازی در بیرون از مرزها مستقر می‌شوند تا از این کاهش ناخواسته چگالی جلوگیری شود. این روش اولین بار توسط (Koshizuka et al., 1995) به کار گرفته شد. مرزهای جامد به صورت چند ردیف ذرات مجازی بیرون از میدان جریان در نظر گرفته می‌شوند که با فاصله‌هایی برابر شعاع اولیه ذرات در کنار هم چیده شده‌اند تا چگالی ذرات دیواره نسبت به چگالی ذرات سیال ثابت بماند (شکل ۳). ضخامت لایه ذرات مجازی به شعاع تأثیر انتخاب شده در تابع کرنل بستگی دارد.

کاهش نوسان‌های فشار مصنوعی و مدت زمان محاسبه‌ها می‌شود. با ننگ‌داشتن میزان تراکم‌پذیری در حد بسیار کوچک، سیال به عنوان یک سیال تاحدودی تراکم‌ناپذیر رفتار می‌کند. رابطه ۲۰ معادله حالت صلاح شده توسط (Shakibaeinia and Jin, 2010) را نشان می‌دهد.

$$P_i^{t+1} = k \left[\left(\frac{\langle n^{t+1/2} \rangle_i}{n^0} \right)^\gamma - 1 \right]; \quad k = \frac{\rho c_0^2}{\gamma} \quad (20)$$

که در آن اغلب $\gamma = 7$ ، k مدول حجمی مایع و C_0 سرعت مصنوعی صوت است. از آنجا که استفاده از سرعت صوت واقعی برای سیال، گام زمانی بسیار کوچک نتیجه می‌دهد، اغلب از سرعت صوت مصنوعی کوچکتر استفاده می‌شود. برای حفظ تغییرپذیری‌های چگالی مایع کمتر از ۱٪ چگالی مرجع، سرعت صوت باید بیش از ۱۰ برابر بیشینه سرعت سیال باشد. از آنجا که یک طرح تقسیم زمانی صریح و روشن استفاده شده است، شرط پایداری (شرایط CFL) باید برآورده شود. شرایط CFL به شرح زیر است:

$$\Delta t \leq \frac{C \Delta l}{c_0 + |u|_{\max}} \quad (21)$$

که در آن Δl فاصله ذرات و $0 < C \leq 1$ عدد کورانت است. در این بررسی، $C = 0.5$ یا کمتر، یک راه حل پایدار برای همه مسئله‌های نمونه می‌دهد (Gotoh and Sakai, 2006). لازم به یادآوری است که مدل مورد نظر یک مدل تک فاز می‌باشد و همان گونه که بیان شد مدل اصلی MPS نیمه ضمنی می‌باشد یعنی بخشی صریح و بخشی ضمنی (معادله پواسن فشار به صورت به کلی ضمنی حل می‌شود) است. در روش WC-MPS حاضر به علت اینکه از معادله حالت برای محاسبه فشار استفاده می‌شود (برای اعمال تراکم پذیری ضعیف) این بخش نیز صریح محاسبه می‌شود. که در نهایت روش به کلی صریح می‌باشد.

۶- شرایط مرزی

۶-۱- سطح آزاد

در روش MPS برای ردیابی سطح آزاد از چگالی ذرات استفاده می‌شود. از آنجا که هیچ ذره‌ای در فضای بیرون از سطح آزاد وجود ندارد، چگالی ذرات در سطح آزاد به شدت

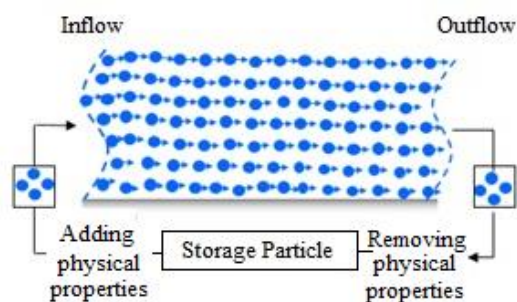


Fig. 4 Particle recycling strategy in open boundary modeling in the WC-MPS method

شکل ۴ راهبرد بازیافت ذرات در مدل‌سازی مرزهای باز در روش WC-MPS

برای شرط مرزی با سرعت معلوم جریان ورودی، شمارهی ذره با توجه به مشخصات سرعت مرز ورودی به جریان ورودی افزوده می‌شود. به بیان دیگر، بسته به توزیع سرعت جریان ورودی در عمق، در هر چند گام زمانی با رابطه (۲۳)، یک ذره در همان عمق به جریان ورودی اضافه می‌شود (Shakibaenia and Jin, 2010) (شکل ۴). خصوصیات مرز به این ذرات که بین ذرات سیال و ذرات مجازی مرز وارد می‌شوند، اعمال می‌شود.

$$k(y) = \frac{\Delta l}{u(y)\Delta t} \quad (23)$$

که در آن k مقاطع زمانی افزودن ذرات محاسبه‌هایی، $u(y)$ سرعت جریان ورودی در عمق، Δt گام زمانی و Δl فاصله اولیه بین ذرات است. برای شرط مرزی با فشار یا عمق معلوم جریان خروجی، ذراتی که در مجاورت ذرات مجازی مرز خروجی قرار می‌گیرند، حذف شده و به ذرات ذخیره می‌پیوندند. به گونه‌ای که عمق ذرات مجازی مرز برابر شرط مرزی عمق خروجی خواهد بود. شکل ۵ شرایط مرز ورودی و خروجی استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد (Jafari et al., 2016).

۷- سرریز، تنداب و جام پرتابی سد دهن

قلعه

سرریز سد دهن قلعه از نوع لبه پهن با عرض ورودی ۶۰ متر به همراه آبراهه به عرض ۶۰ متر در جناح راست سد قرار گرفته است. شکل (۶) مقطع طولی سرریز لبه پهن، آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی را نشان می‌دهد.

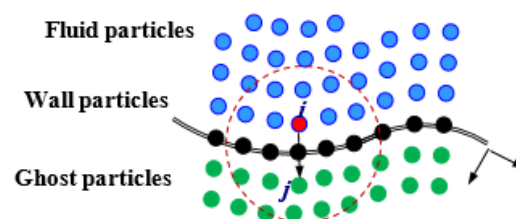


Fig. 3 Particles on the solid boundary and ghost particles
شکل ۳ ذرات روی مرز جامد و ذرات مجازی

۶-۳- مرزهای باز

در مواردی که جریانی به محیط آبی وارد یا از آن بیرون می‌شود، با مرز باز سروکار داریم. با وجود پیشرفت‌های زیاد در مدل‌سازی با روش‌های مبتنی بر ذره، اجرای مرزهای باز با ورود یا خروج جریان، به علت لزوم افزایش یا کاهش ذرات در میدان حل و محدودیت حافظه محاسبه‌هایی، هنوز چالشی در شبیه‌سازی مسئله‌های سطح آزاد با روش لاگرانژی است و به ملاحظات ویژه‌ای نیازمند است. یکی از روش‌های در نظر گرفتن مرزهای با جریان ورودی و خروجی در روش‌های لاگرانژی، استفاده از شرایط مرزی تناوبی^۱ است. در این روش، ذره‌ای که میدان حل را از طریق مرز جریان ورودی دوباره وارد میدان حل می‌شود. از آنجا که در بسیاری از موارد تضمینی وجود ندارد که جریان خروجی و ورودی و در پی آن شمار ذرات خروجی و وارد شده به میدان حل، برابر باشد، این روش در شرایط محدودی کاربرد خواهد داشت. در روش دیگری که راهبرد بازیافت ذرات^۲ نامیده شده، به شماری ذره ذخیره در مدل نیاز است (Shibata et al., 2004). ذراتی که میدان حل را ترک می‌کنند، به ذرات ذخیره اضافه شده و ذراتی که به میدان حل وارد می‌شوند، از ذرات ذخیره کسر می‌گردند. ذرات ذخیره هیچ میزان فیزیکی نخواهند داشت و وجود آنان این امکان را به مدل می‌دهد که بدون محدودیت، شمارهی از ذرات را به میدان حل وارد کرده یا از آن بیرون کند. چنین رویکردی محدودیت ناشی از نابرابری شماره ذرات ورودی و خروجی را از میان برمی‌دارد (شکل ۴).

1 Periodic Boundary Condition
2 Particle Recycling Strategy

طراحی سهمی به معادله $y = 0.03 x^2$ در دستگاه مختصاتی که محور y آن در برای جاذبه، محور x در برای جریان و مبدأ مختصات در ابتدای قوس قرار گیرد استفاده شده است.

رقوم کف جام پرتابی 10.20 متر در نظر گرفته شده است. در این رقوم عمق و سرعت جریان به ترتیب 0.55 متر و $18/12$ متر بر ثانیه بوده و عدد فرودی معادل $7/8$ را ارائه می دهد. این شرایط هیدرولیکی و افزون بر آن در نظر گرفتن فشار بیشینه 25 کیلو پاسکال، شعاع دست کم 7 متر را به جام تحمیل می کند. بنابراین همین میزان شعاع انحنای جام پرتابی در نظر گرفته شده است. هندسه طرح ایجاب کرده است که یک تنداب افقی معکوس نیز بعد از انحنای جام مد نظر قرار گیرد که این تنداب کوتاه با شیب 2 قائم به 3 افقی تصویر افقی معادل $2/44$ متر خواهد داشت. سرعت اولیه پرتابه $16/54$ متر بر ثانیه و عمق آن $0/6$ متر می باشد. بر این مبنا جریان $29/7$ متر پس از مبدأ در رقوم 10.18 متر از سطح مبنا با کف حوضچه استغراق برخورد می کند.

۸- شبیه سازی جریان بر روی سرریز سد دهن قلعه

برای شبیه سازی نیمرخ سطح آب، چگونگی توزیع فشار بر روی سرریز، شاخص حفره زایی و طول و ارتفاع پرش جریان در جام در این تحقیق با توجه به پیشینه بررسی های طرح برای سه حالت زیر مدل سازی شده است.

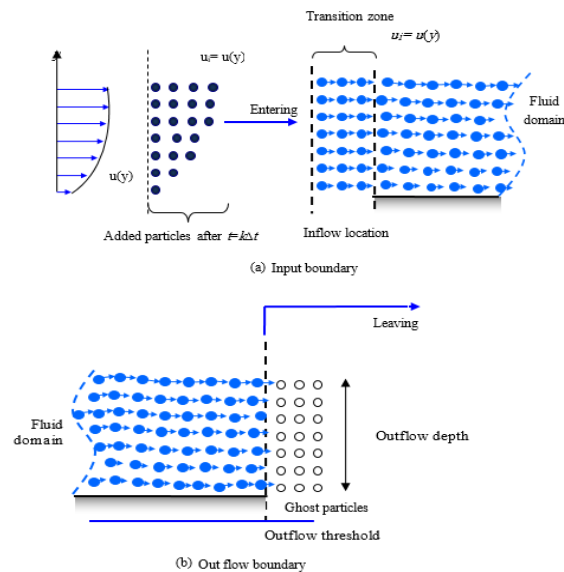


Fig. 5 Open boundary modeling in WC-MPS method
شکل ۵ مدل سازی مرزهای باز در روش WC-MPS

بنا بر بررسی های پژوهش های مصوب مرحله دوم دبی طراحی سرریز 461 مترمکعب بر ثانیه و معادل سیلاب روندیابی شده با دوره بازگشت صد ساله است. دبی مهار سرریز نیز سیلاب روندیابی شده با دوره بازگشت هزار ساله یعنی 904 مترمکعب بر ثانیه می باشد. دبی طراحی تنداب و جام پرتابی برابر میانگین تقریبی سیلاب طراحی و مهار سرریز، معادل 600 مترمکعب بر ثانیه لحاظ شده است. به هنگام عبور جریان با دبی 600 مترمکعب بر ثانیه، عمق و سرعت جریان در ابتدای آبراهه دقیق در پای پنجه سرریز به ترتیب معادل $1/1$ متر و $9/1$ متر بر ثانیه بدست آمده است. شیب انتهای سهمی 3 افقی به 2 عمودی در نظر گرفته شده است. برای اتصال افقی به چنین شیبی در دبی

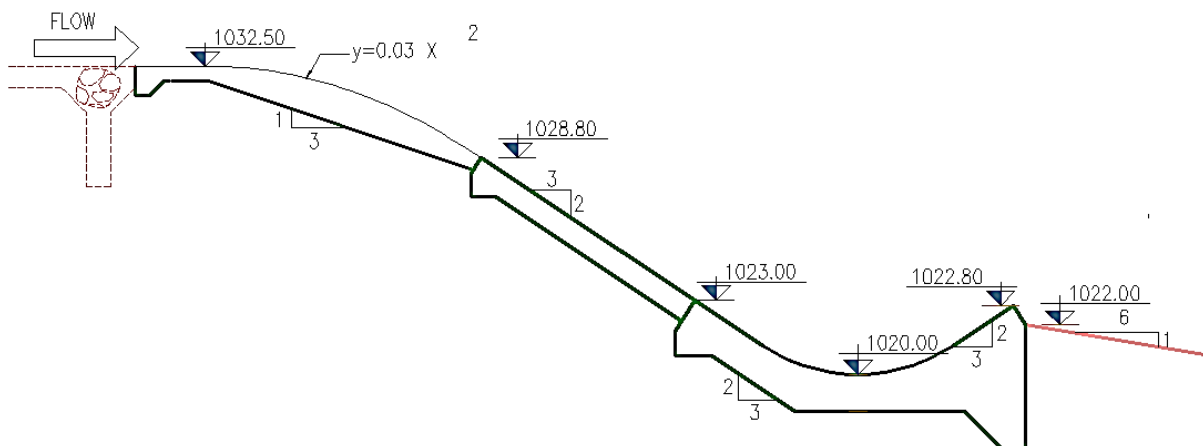


Fig. 6 Longitudinal section of the transfer channel, chute, and flip bucket

شکل ۶ مقطع طولی آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی

مقیاس زمان و دبی خواهیم داشت:

$$V_R = \frac{X_R}{T_R} \rightarrow T_R = \frac{X_R}{V_R} = \sqrt{L_R} \quad (26)$$

$$Q_R = A_R \times V_R = (L_R)^{\frac{5}{2}} \quad (27)$$

لذا در صورت رعایت مقیاس سرعت و دبی، همانندی سینماتیکی نیز برقرار خواهد بود. با توجه به اینکه مقیاس طولی مدل ۱:۱۰۰ انتخاب شده است. مقیاس سرعت برابر با ۱:۱۰ و مقیاس دبی ۱:۱۰۰۰۰۰ به دست می‌آید. در مدل حاضر با کاهش قطر ذرات دقت مدل افزایش خواهد یافت اما کاهش بیش از اندازه قطر ذرات باعث افزایش حجم و زمان محاسبه‌های می‌شود و در دقت نتایج تاثیر محسوسی ندارد لذا مقرون به صرفه نیست و برعکس افزایش قطر ذرات باعث کاهش دقت مدل می‌شود. انتخاب قطر بهینه نیاز به سعی و خطا دارد. در این مطالعه قطر بهینه ۰/۰۰۱ متر برای ذرات در نظر گرفته شده است. برای هر سه مدل به ترتیب به ازای شمار ۱۶۹۱۴، ۱۶۰۲۶ و ۱۹۱۳۴ ذره شبیه‌سازی عددی انجام شده است. شکل (۷) موقعیت اولیه ذرات برای سرریز لبه پهن، آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی را در مدل به ازای بار آبی $h = 0.02778\text{m}$ در سیلاب طراحی نشان می‌دهد. در آغاز، ذرات یکنواخت توزیع شده‌اند و سرعت و فشار ذرات به ترتیب به صورت صفر و فشار هیدرواستاتیک، تنظیم شده‌اند. شکل ۸ و ۹ به ترتیب موقعیت اولیه ذرات سیال، دیواره و مجازی برای سرریز لبه پهن و موقعیت ذرات دیواره و مجازی برای آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی با جزئیات دقیق را نشان می‌دهند.

- ۱- دبی طراحی سرریز ۴۶۱ مترمکعب بر ثانیه و معادل سیلاب روندیابی شده با دوره بازگشت صد ساله،
- ۲- دبی مهار سرریز نیز سیلاب روندیابی شده با دوره بازگشت هزار ساله یعنی ۹۰۴ مترمکعب بر ثانیه،
- ۳- دبی طراحی تنداب و جام پرتابی برابر میانگین تقریبی سیلاب طراحی و مهار سرریز، معادل ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه

۸-۱- همانندی مدل

مدل‌های فیزیکی باید از سه نظر هندسی، سینماتیکی و پویایی دارای همانندی با مدل اصلی باشند. همانندی هندسی با رعایت مقیاس مدل در همه ابعاد حاصل می‌شود که در این تحقیق حاضر با رعایت ضوابط موجود مقیاس مدل برابر 1:100 انتخاب گردید. برای رعایت همانندی پویایی لازم است نسبت نیروها در مدل و نمونه اصلی یکسان گرفته شوند که این امر با برابری نسبت‌های بدون بعد نیروها قابل انجام است، اما با توجه به تفاوت ماهیت نیروهای حاکم بر جریان نمی‌توان همزمان همه نسبت نیروها را یکسان در نظر گرفت، از این رو این برابری برای نیروی غالب انجام می‌شود. در سرریزهای لبه پهن، جریان از نوع سطح آزاد می‌باشد و نیروی غالب ثقل است لذا برابری عدد فرود برای رعایت همانندی پویایی مدنظر قرار می‌گیرد. با کاربرد قانون فرود می‌بایست $Fr = 1$ باشد، به بیان دیگر:

$$F_r = V_R / \sqrt{g_R \cdot Z_R} = 1 \quad (24)$$

با توجه به آن که $g_R = 1$ است، پس:

$$V_R = \sqrt{Z_R} \rightarrow V_R = \sqrt{L_R} \quad (25)$$

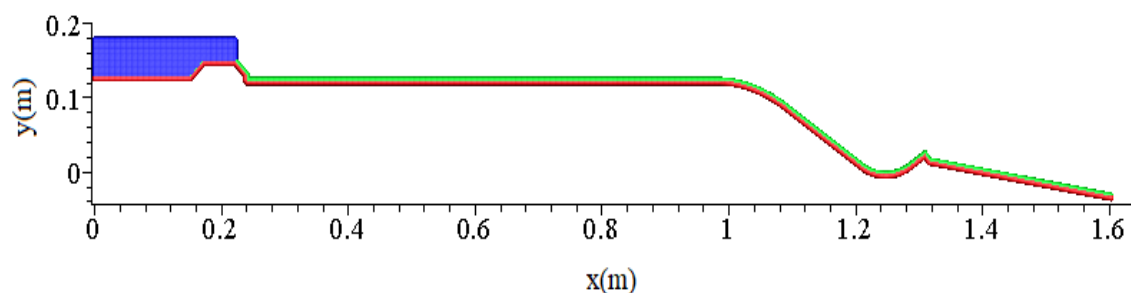


Fig. 7 Initial position of particles for broad crested weir, transfer channel, chute and flip bucket

شکل ۷ موقعیت اولیه ذرات برای سرریز لبه پهن، آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی

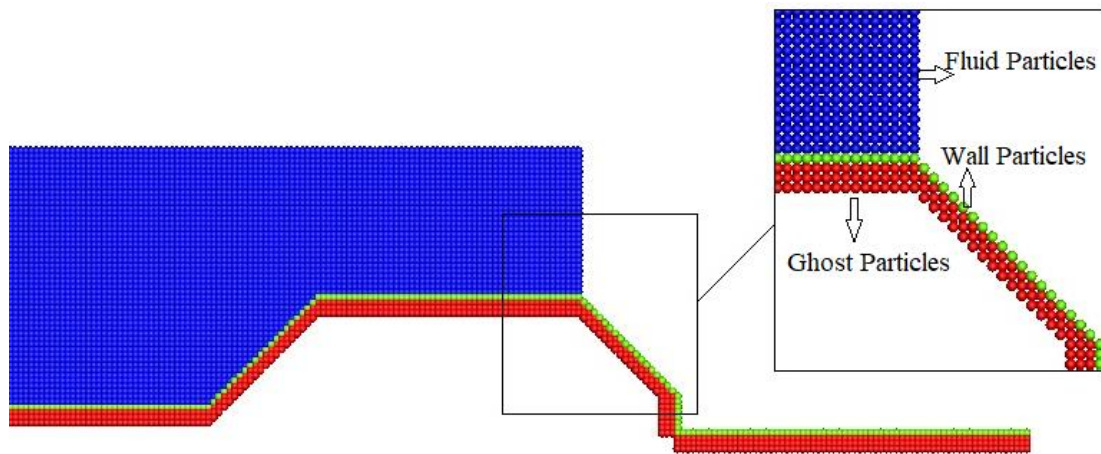


Fig. 8 initial position of fluid, wall and ghost particles for broad crested weirs with detailed details
 شکل ۸ موقعیت اولیه ذرات سیال، دیواره و مجازی برای سرریز لبه پهن با جزئیات دقیق

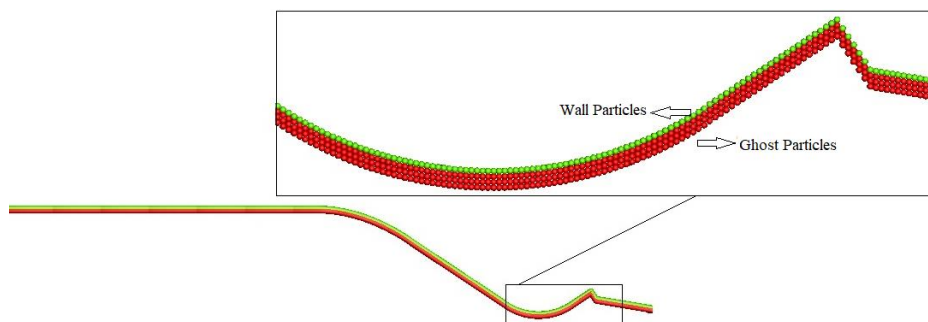


Fig. 9 position of wall and ghost particles for transfer channel, chute and flip bucket
 شکل ۹ موقعیت ذرات دیواره و مجازی برای آبراهه انتقال، تنداب و جام پرتابی با جزئیات دقیق

۸/۴۲۰ متر بر ثانیه است که نشان از دقت مدل مورد نظر در پیش‌بینی عمق و سرعت جریان دارد. شکل (۱۳) نیمرخ سرعت در پای پنجه سرریز به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.

۸-۳- تحلیل طول و ارتفاع پرش در پرتابه

در این بخش به بررسی ارتفاع و طول پرش از لبه پرتابه جامی شکل به ازای دبی‌های مختلف پرداخته شده است. نتایج در نمودار شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودارهای یادشده مشخص است با افزایش دبی، طول و ارتفاع پرش افزایش پیدا می‌کند. بر مبنای گزارش طرح به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه، جریان ۲۹/۱ متر پس از مبدأ در رقوم ۱۰/۱۸ متر از سطح مینا با کف حوضچه استغراق برخورد می‌کند. در روش یادشده نقطه برخورد جت با کف حوضچه استغراق ۲۵/۵۵ متر است که بیانگر دقت مدل در پیش‌بینی طول پرش است.

۸-۲- شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد و توزیع

سرعت

شکل ۱۰ شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد و توزیع سرعت در زمان‌های مختلف به ازای دبی طراحی تنداب و جام پرتابی برابر میانگین تقریبی سیلاب طراحی و مهار سرریز، معادل ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.

نمودارهای شکل ۱۱ نیمرخ سطح آزاد در زمان‌های $t = 1, 5, 10, 15, 30 \text{ sec}$ به ازای سه دبی ۴۶۱، ۶۰۰ و ۹۰۴ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.

همانگونه که در گزارش طرح بیان شده است به هنگام عبور جریان با دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه، عمق و سرعت جریان در ابتدای آبراهه درست در پای پنجه سرریز به ترتیب معادل ۱/۱ متر و ۹/۱ متر بر ثانیه خواهد بود. در شکل (۱۲) نشان داده شده است میزان عمق و سرعت جریان در ابتدای آبراهه درست در پای پنجه سرریز در مدل‌سازی به روش WCMPs به ترتیب ۱/۱۹۱ متر و

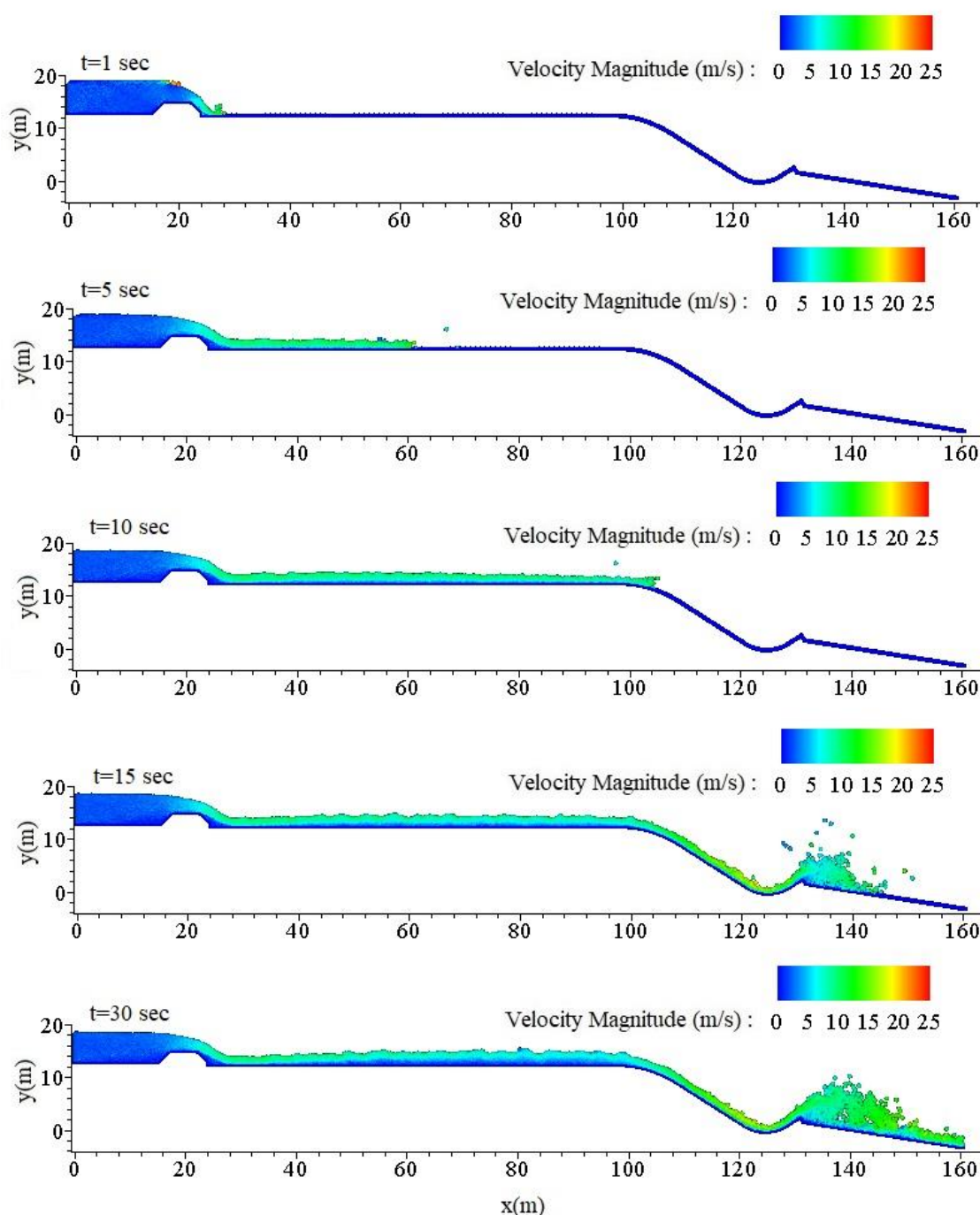


Fig. 10 Simulating the free surface profile and velocity at different times for a discharge of $600 \text{ m}^3/\text{s}$ using the WC-MPS method

شکل ۱۰ شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد و توزیع سرعت در زمانی مختلف به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه با استفاده از روش WC-MPS

شکل (۱۶) میزان عمق و سرعت جریان در رقوم کف جام پرتابی سرریز در مدل‌سازی به روش WC-MPS به ترتیب ۰/۵۹ متر و ۱۶/۸۴ متر بر ثانیه به دست آمده است که نشان از دقت مدل موردنظر در پیش‌بینی عمق و سرعت جریان دارد.

همانگونه که در گزارش طرح بیان شده است رقوم کف جام پرتابی ۱۰۲۰ متر در نظر گرفته شده است. هنگام عبور جریان با دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه در این رقوم عمق و سرعت جریان به ترتیب ۰/۵۵ متر و ۱۸/۱۲ متر بر ثانیه بوده و عدد فرودی معادل ۷/۸ ارائه شده است.

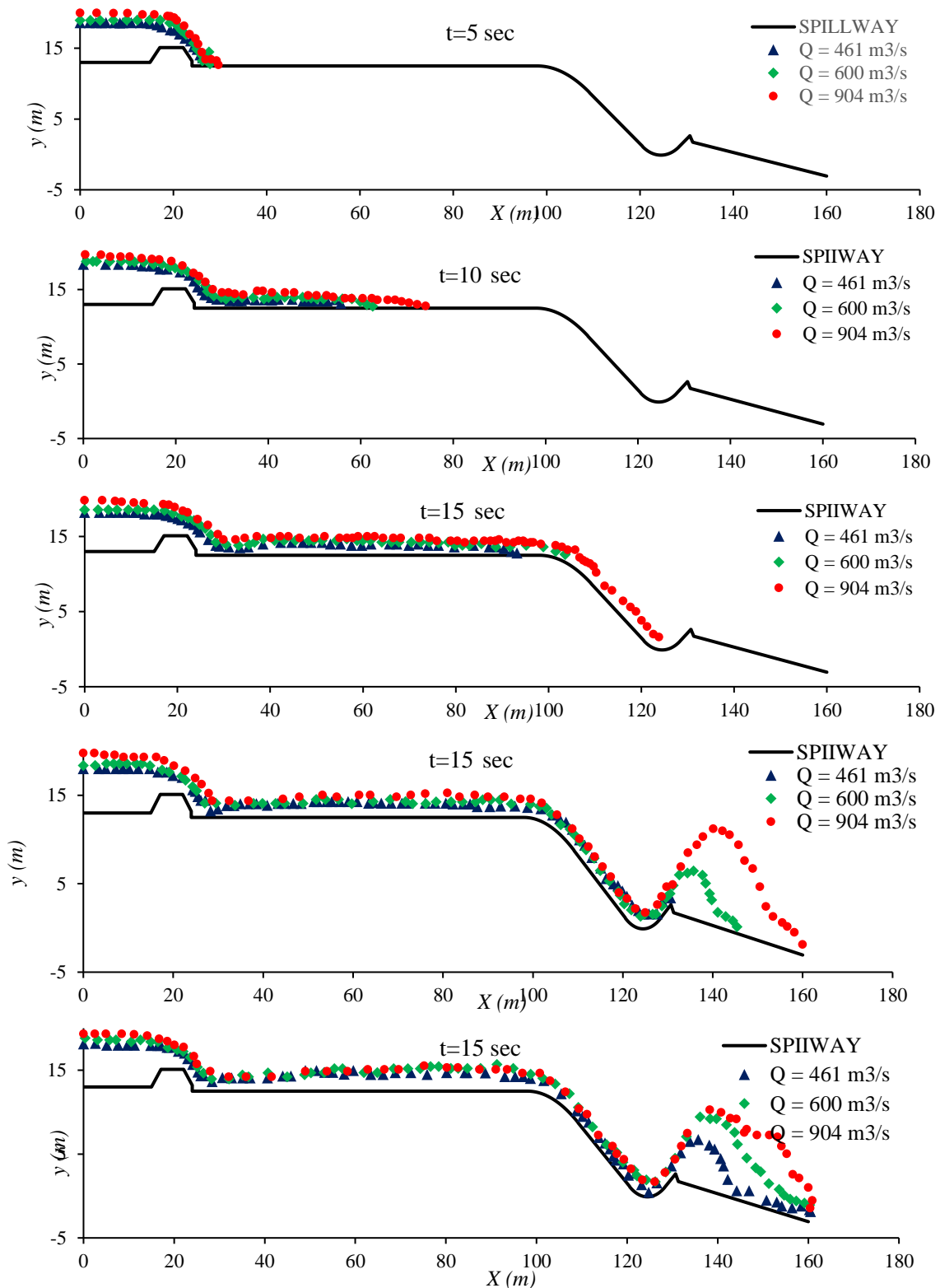


Fig. 11 Comparison of the free surface profile for three different discharges in 30 seconds

شکل ۱۱ مقایسه نیمرخ سطح آزاد به ازای سه دبی مختلف در زمان ۳۰ ثانیه

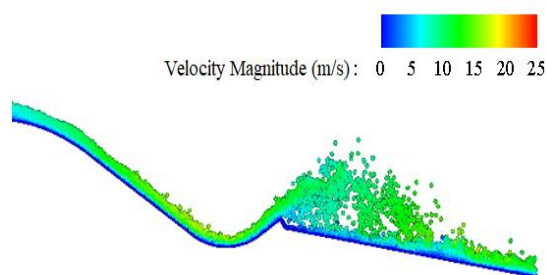


Fig. 16 simulation by WCMPS method for discharge of 600 m³/s

شکل ۱۶ شبیه‌سازی پرتابه به روش WCMPS به ازای دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه

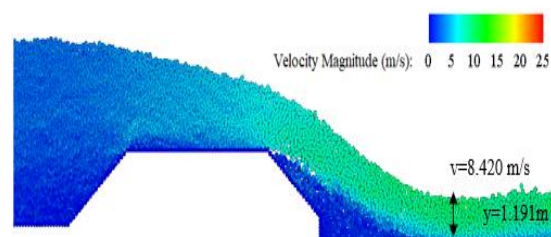


Fig. 12 checking the depth and velocity in the broad crested weir toe for a discharge of 600 m³/s

شکل ۱۲ بررسی عمق و سرعت در پای پنجه سرریز به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه

۴-۸- تحلیل شاخص حفره‌زایی

برای بررسی و کنترل وقوع حفره‌زایی، نیاز به اطلاعاتی مانند سرعت میانگین و فشار وارد بر کف در قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد. با توجه به فراسنجه‌های موردنیاز و استفاده از رابطه (۲۸) شاخص حفره‌زایی محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (28)$$

که در آن P فشار مطلق، v سرعت متوسط جریان، P_v فشار بخار آب برابر ۲۳۳۰ پاسکال و ρ جرم مخصوص سیال (آب) است.

فشار مطلق از رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$P = P_{atm} + P_{model} \quad (29)$$

داوری در مورد وقوع حفره‌زایی در این پژوهش نیز بر مبنای مشاهداتی که توسط Falvey (1990) در طراحی سرریزها ارائه شده است و برحسب شاخص حفره‌زایی، صورت گرفته است.

همان‌گونه که بیان شد داشتن اطلاعات کافی در مورد فشار روی سرریز در بررسی احتمال رخداد پدیده حفره‌زایی اهمیت خیلی بالایی دارد. لذا در این تحقیق فشار در قالب هم‌تراز فشار در نقاط مختلف بر حسب پاسکال (pa) برای سه دبی مختلف شبیه‌سازی شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، بیشترین فشار در نزدیکی بستر در آبراهه تقرب می‌باشد و هیچ بخشی از سرریز، تنداب و جام پرتابی تحت فشار منفی قرار ندارد. شکل‌های ۱۸ شبیه‌سازی شاخص حفره‌زایی را در طول

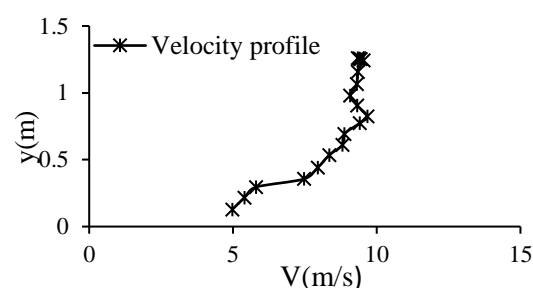


Fig. 13 Velocity profile at the toe of broad crested weir for a discharge of 600 m³/s

شکل ۱۳ نیمرخ سرعت در پای پنجه سرریز به ازای دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه

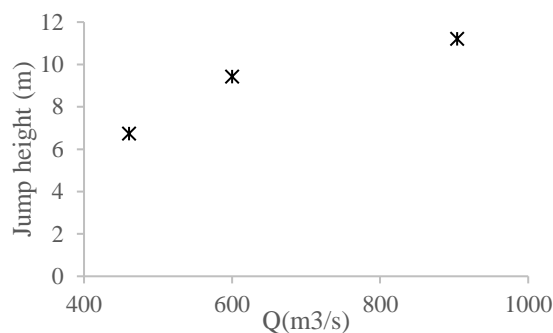


Fig. 14 Comparison of jump height for three discharges
شکل ۱۴ مقایسه ارتفاع پرش پرتابه به ازای سه دبی

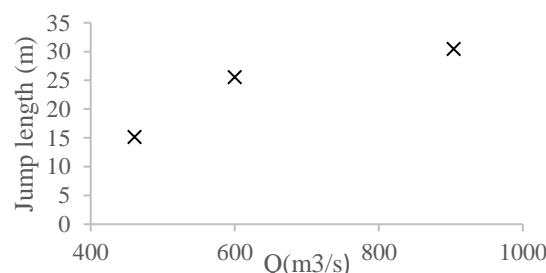


Fig. 15 Comparison of jump length for three discharges
شکل ۱۵ مقایسه طول پرش پرتابه به ازای سه دبی

ولی با توجه به اینکه میزان شاخص حفره‌زایی در این قسمت بزرگتر از ۱/۸ است بنا بر توصیه‌های Falvey (1990) نیاز به حفاظت در برابر حفره‌زایی نیست.

سرریز، تنداب و جام پرتابی نشان می‌دهند. بنا بر این تصاویر شاخص حفره‌زایی در محدوده مترهاژ ۱۱۰ تا ۱۴۰ به میزان بحرانی نزدیک شده است و امکان ایجاد پدیده حفره‌زایی در این محدوده بیش از نقطه‌های دیگر است

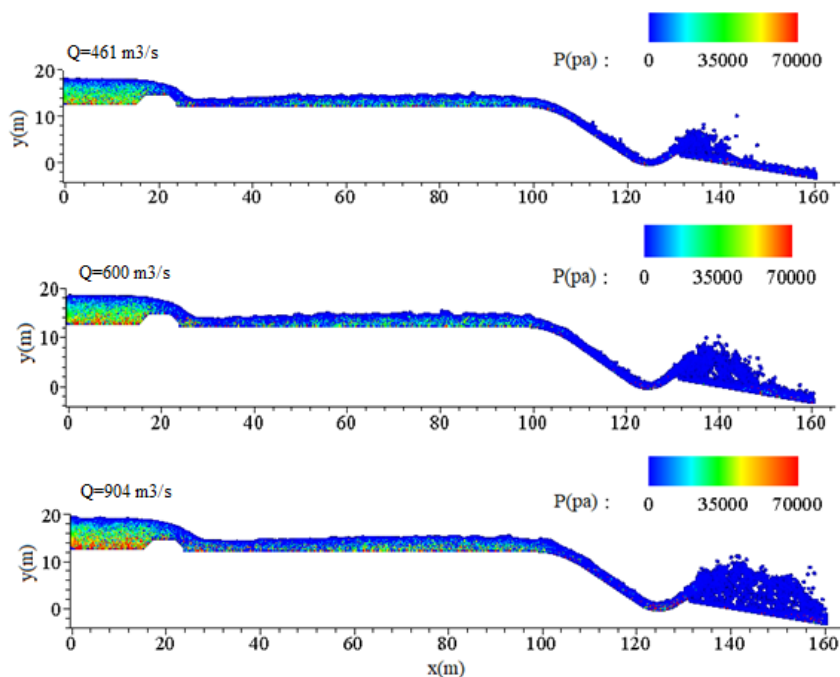


Fig. 17 Simulation of the pressure field after 30 seconds for three discharge of 461, 600 and 904 m³/s using the WC-MPS method

شکل ۱۷ شبیه‌سازی میدان فشار پس از ۳۰ ثانیه به ازای سه دبی ۴۶۱، ۶۰۰ و ۹۰۴ مترمکعب بر ثانیه با استفاده از روش WC-MPS

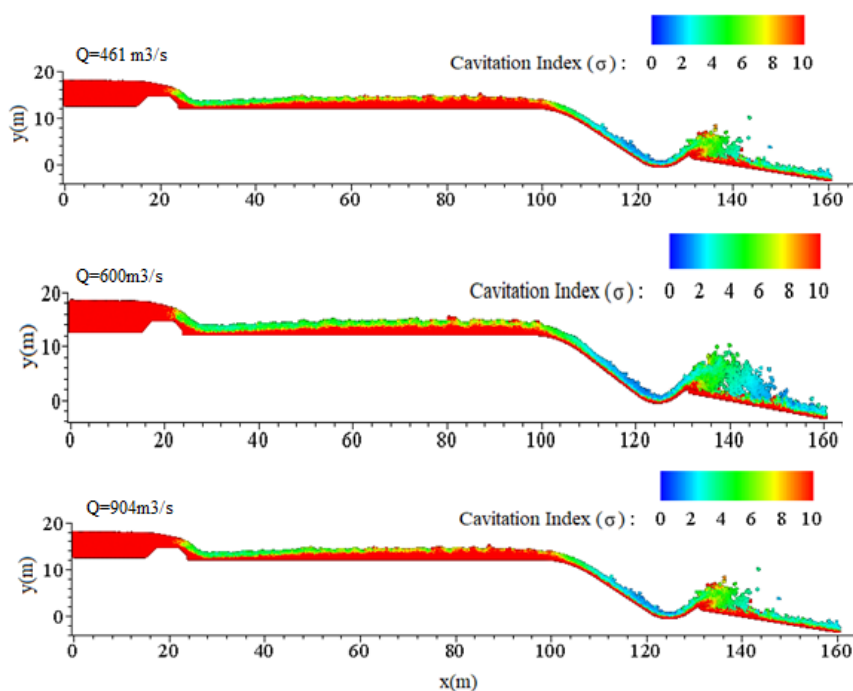


Fig. 18 Simulation of cavitation index after 30 seconds for discharge of 461, 600 and 904 m³/s using the WC-MPS method

شکل ۱۸ شبیه‌سازی شاخص حفره‌زایی پس از ۳۰ ثانیه به ازای دبی‌های ۴۶۱، ۶۰۰ و ۹۰۴ مترمکعب بر ثانیه با استفاده از روش WC-MPS

در جدول زیر به بررسی خطای مدل WCMPS و گزارش طرح تکمیلی پایاب سرریز سد دهن قلعه پرداخته شده است.

جدول ۲ بررسی خطا مدل WCMPS و گزارش طرح تکمیلی پایاب سرریز سد دهن قلعه

Table 2 Error analysis of the model WCMPS and the report of the report supplementary design of the spillway of Dahan Ghaleh dam

Row	Location	WCMPS	Report supplementary design of the spillway of Dahan Ghaleh dam	Percentage error(%)
1	Flow depth at the beginning of the broad crested weir toe channel (m)	1.191	1.1	8.1
2	Velocity at the beginning of the broad crested weir toe channel (m/s)	8.42	9.1	7.47
3	Flow depth in the bottom of the bucket (m)	0.59	0.55	6.78
4	Velocity at the bottom of the bucket (m/s)	16.84	18.12	7.06
5	Froude number at bottom of the bucket	6.93	7.8	11.1
6	Jump length per discharge of 600 m ³ /s	25.55	29.1	12.9

میزان شاخص حفره‌زایی در طول سرریز بزرگتر از ۱/۸ است و بنابر توصیه های (1990) Falvey نیاز به حفاظت در برابر حفره‌زایی نیست. در انتها نیز به بررسی ارتفاع و طول پرش از لبه پرتابه به ازای دبی‌های مختلف پرداخته شده است.

۱۰- فهرست نشانه‌ها

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
C_o	سرعت مصنوعی صوت (ms^{-1})
C_s	ثابت اسمانگورینسکی
C	عدد کورانت
d	ابعاد فضا
n	چگالی عددی ذرات
n^0	چگالی عددی اولیه ذرات
r	بردار موقعیت ذره (m)
r_c	شعاع تاثیر (m)
t	زمان (s)
u, v	مولفه های بردار سرعت در جهت x و y (ms^{-1})
u', u^*	مولفه های بردار سرعت اصلاح و پیش بینی در جهت x و y (ms^{-1})
W	تابع کرنل

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق سرریز دهن قلعه همراه با تنداب و پرتابه جامی شکل با استفاده از روش نیمه ضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف (WCMPS) بررسی شد. الگوریتم جدیدی برای مرزهای ورودی و خروجی استفاده شده است. در این الگوریتم، در مرزهای ورودی و خروجی نیازی به ذرات مجازی نمی‌باشد و جریان ذرات مجازی ایستا توسط نوعی ذرات پویا در یک ناحیه حایل جایگزین شده است. به منظور ارزیابی و اثبات قابلیت این روش، مسئله شناخته شده و پرکاربرد جریان روی سرریز اوجی بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی دقت بسیار بالایی در مدل‌سازی جریانانی سطح آزاد با شرایط مرزی باز دارد. در ادامه شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد و توزیع سرعت در زمان‌های مختلف به ازای سه دبی ۴۶۱، ۶۰۰ و ۹۰۴ مترمکعب بر ثانیه بررسی شد. مقایسه نتایج روش یاد شده با داده های موجود بر گرفته از گزارش طرح تکمیلی پایاب سرریز سد دهن قلعه نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت و عمق جریان در طول سرریز می‌دهد. همچنین به شبیه‌سازی شاخص حفره‌زایی در طول سرریز، تنداب و جام پرداخته شد و نتایج نشان داد که با توجه به اینکه

modelling of free surface flow over spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 18(2), 354–370.

Jandaghian, M., Karimi, A. & Shakibaeinia, A. (2021). Enhanced weakly compressible MPS method for immersed granular flows. *Advances in Water Resources*, 152, 103908.

Jin, Y., Guo, K., Tai, Y. & Lu, Ch. (2016). Laboratory and Numerical study of the flow field of subaqueous block sliding on a slope. *Ocean Engineering*, 124, 371-383

Khayyer, A. & Gotoh, H. (2009). Modified moving particle semi-implicit methods for the prediction of 2D wave impact pressure. *Coastal Eng.*, 56, 419-440.

Khayyer, A. & Gotoh, H. (2010). A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method. *Appl. Ocean Res.*, 32, 124-131.

Kondo, M. & Koshizuka, S. (2011). Improvement of stability in moving particle semi-implicit method. *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, 65(6), 638- 654.

Koshizuka, S. & Oka, Y. (1996). Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nucl. Sci. Eng.*, 123(3), 421-434.

Koshizuka, S., Tamako, H. & Oka, Y. (1995) A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation. *Comput. Fluid Dyn. J.*, 4(1), 29–46.

Liu, J., Koshizuka, S. & Oka, Y. (2005). A hybrid particle-mesh method for viscous, incompressible, multiphase flows. *J. Comput. Phys.*, 202(1), 65 93.

Nabian, M.A. & Farhadi, L. (2016). Multiphase Mesh-Free Particle Method for Simulating Granular Flows and Sediment Transport. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 143(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.00012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.00012).

Shakibaeinia, A. & Jin, Y.C. (2010). A weakly compressible MPS method for modeling of open boundary free-surface flow. *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, 63(10), 1208-1232.

Shakibaeinia, A. & Jin, Y.C. (2011a). A meshfree particle model for simulation of mobile-bed dam break, *Adv. Water Resour.*, 34(6), 794- 807.

Shakibaeinia, A. & Jin, Y.C. (2011b). MPS-based mesh-free particle method for modeling open-channel flows. *J. Hyd. Eng.* 137(11), 1375-1384.

Δl	(m) فاصله متوسط ذرات (اندازه ذرات)
i	ذره هدف
j	ذره همسایه
	علایم یونانی:
ρ	چگالی (kgm^{-3})
v_t	لرجه گردابی
β	ضریب آستانه
σ	شاخص حفره‌زایی

۱۱- منابع

Ataie-Ashtiani, B. & Farhadi, L. (2006). A stable moving-particle semi-implicit method for free surface flows, *Fluid Dyn. Res.*, 38, 241-256.

Chow, V.T. (1988). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 365–380

Fadafan, M.A. & Kermani, M.R.H. (2017) Moving particle semiimplicit method with improved pressures stability properties. *Journal of Hydroinformatic*, 20(6), 1268–1285.

Falvey, H.T. (1990). *Cavitation in Chutes and Spillways*. Engineering Monograph 42. In: Water Resources Technical Publication; US Printing Office, Bureau of Reclamation: Denver, CO, USA.

Fu, L. & Jin, Y. (2015). Investigation of non-deformable and deformable landslides using mesh-free method. *Journal of Ocean Engineering*, 109, 192–206.

Gotoh, H. & Sakai, T. (2006). Key issues in the particle method for computation of wave breaking. *Coastal Eng. J.*, 53, 171-179.

Gotoh, H., Shibahara, T. & Saka, T. (2001). Subparticle scale turbulence model for the MPS method- Lagrangian flow model for hydraulic engineering. *Comput. Fluid Dyn. J.*, 9(4), 331- 347

Jafari Nodoushan, E. & Shakibaeinia, A. (2018). Multiphase mesh-free particle modeling of local sediment scouring with $\mu(I)$ rheology. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2), 279-294. doi: <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.068>.

Jafari Nodoushan, E. Shakibaeinia, A. & Hosseini, K.A. (2018). multiphase meshfree particle method for continuum-based modeling of dry and submerged granular flows. *Powder Technology*, 335, 258-274.

Jafari-Nodoushan, E., Hosseini, K., Shakibaeinia, A. & Mousavi, S.F. (2016) Meshless particle

Shakibaeinia, A. & Jin, Y.C. (2012). MPS meshfree particle method for multiphase flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 229-232, 13-26.

Shibata, K. & Koshizuka, S. (2007). Numerical analysis of shipping water impact on a deck using a particle method, *Ocean Eng.*, 34, 585-593.

Shibata, K., Koshizuka, S. & Oka, Y. (2004). Numerical analysis of jet breakup using particle method. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 41(7), 715-722.

Tajnesaie, M. Shakibaeinia, A. & Hosseini, K. (2018). Meshfree particle numerical modelling of sub-aerial and submerged landslides. *Computers and Fluids*, 172, 109-121.