



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره ششم، ۱۳۹۸

۱۱۹-۱۳۸

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

DOI: 10.22069/jwsc.2019.16153.3141

مطالعه عددی اثر موانع دشت سیلابی بر جریان ناشی از شکست سد به روش MPS

علیرضا خوش‌کنش^۱، *سعید گوهری^۲ و حسین بانژاد^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، آستادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان،

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

چکیده

سابقه و هدف: سیلاب‌دشت‌ها سرزمین‌هایی نسبتاً هموار در مجاورت رودخانه‌ها با کاربری مسکونی، صنعتی یا کشاورزی می‌باشند. شکست ناگهانی سدهای بزرگ، موجب شکل‌گیری و پیشروی امواج مخرب سیلاب در پائین‌دست می‌گردد. پیشروی سیل روی دشت‌های سیلابی تحت اثر تغییرات توپوگرافی و موانع درون جریان مانند پل‌ها صورت می‌گیرد. این امواج، در بازه کوچکی از رودخانه و روی دشت سیلابی به ترتیب به صورت یک و دوبعدی انتشار می‌یابند. در شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی، خصوصیات دوبعدی جریان ناشی از شکست سد روی دشت سیلابی، به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، اثر تلفیقی موانع دشت سیلابی، تنگ‌شدگی و موانع بستر بر خصوصیات جریان ناشی از شکست سد تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از روش لاگرانژی ذرات متحرک نیمه ضمنی (MPS) برای مطالعه عددی خصوصیات جریان ناشی از شکست سد روی دشت سیلابی استفاده شد. از جمله مزایای این روش، تراکم ناپذیری، ذره محوری، بهره‌گیری از مدل‌های توانمند گرادیان و لاپلاسیس در تصحیحات سرعت- فشار بدون نیاز به توابع هموارسازی پیچیده می‌باشد. بدین ترتیب، اثر رقوم اولیه آب در مخزن، شکل موانع، تبدیل‌های جانبی و نیز موانع کف بر پارامترهای هیدرولیکی، در ۱۵ حالت گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. موانع دشت سیلابی به شکل‌های استوانه، مکعب، لوزی و نامتقارن و موانع بستر به شکل مکعبی می‌باشند. ابتدا، تحلیل حساسیت نتایج عددی نسبت به سه قطر ذره ۰/۰۱، ۰/۱۵ و ۰/۰۲ متر صورت گرفت. در نهایت، قطر ذره ۰/۱۵ متر به عنوان اندازه ذرات آب در مدل در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها با بیش از ۲۸۰۰۰۰ ذره کروی و با دقت مرتبه دوم مکانی و زمانی صورت گرفت.

یافته‌ها: دقت نتایج عددی با بهره‌گیری از خطای نرمال *NRMSE* و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پیشین تعیین گردید. نتایج نشان داد که تخلیه مخزن در حل‌های عددی سریع‌تر از نتایج آزمایشگاهی رخ می‌دهد. بنابراین، مدل MPS

* مسئول مکاتبه: s.gohari@basu.ac.ir

مقادیر ارتفاع نیمرخ سطح آزاد و سرعت پیشروی جریان را به ترتیب کم و بیش برآورد می‌نماید. برخورد جریان به موانع دشت سیلابی، موجب بالاروی و شکل‌گیری جریان سه‌بعدی در محل استقرار موانع، تبدیل‌های جانبی و موانع کف می‌گردد. هم‌چنین، شکل موانع عاملی مؤثر بر تغییر شکل‌های نیمرخ سطح آزاد، مؤلفه افقی سرعت سطحی و نیروهای مقاومت پس‌آی وارد بر جریان می‌باشد.

نتیجه‌گیری: مقادیر خطای نرمال نشان داد که دقت روش MPS در محاسبه تغییر شکل‌های نیمرخ طولی سطح آزاد بین ۸۸ تا ۹۱ درصد متغیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل‌های جانبی، ذرات متحرک نیمه‌ضمنی، سیلابدشت، شکست آبی سد، موانع

مقدمه

خیر و همکاران (۲۰۱۹) و ژانگ و ون (۲۰۱۹)، مسأله اندرکنش سازه الاستیک- سیال در جریان ناشی از شکست سد را به روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که در این روش، کاهش وضوح شبکه موجب کاهش هزینه محاسباتی می‌گردد (۴ و ۲۳). درحالی‌که تأثیری بر دقت و پایداری حل‌ها ندارد. هم‌چنین، پیشروی سطح آزاد روی جداره‌های الاستیک مخزن ماهیتی سه‌بعدی دارد. سان و همکاران (۲۰۱۹)، کارایی روش‌های ذرات متحرک و حجم سیال را در شبیه‌سازی برخورد جریان ناشی از شکست سد به یک مانع متخلخل مطالعه نمودند. مشخص گردید که روش حجم سیال مسافت پیشروی پیشانی موج را بیش از روش ذرات متحرک پیش‌بینی می‌نماید. هم‌چنین، روش ذرات متحرک کارایی بالایی در پیش‌بینی تغییر شکل‌های سطح آزاد دارد (۱۹). چن و همکاران (۲۰۱۹)، جریان ناشی از شکست سد را به روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی و با بهره‌گیری از حلگر فشار صریح مدل‌سازی نمودند. مشخص گردید کارایی حلگر صریح به انتخاب دقیق سرعت صورت و ضریب گاما متناسب با آن بستگی دارد (۲). ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) جریان ناشی از شکست سد در حالت هندسه پیچیده و با وجود یک مانع را به روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی مدل‌سازی

دشت‌های سیلابی سرزمین‌هایی نسبتاً هموار در مجاورت رودخانه‌ها می‌باشند. معمولاً مقطع عرضی متوسط رودخانه در مقایسه با دشت‌های سیلابی طرفین آن، بسیار کوچک می‌باشد. دشت‌های سیلابی، دارای کاربری کشاورزی، صنعتی، مسکونی و یا زمین‌های بایر می‌باشند. سدهای بزرگ معمولاً در بالادست آن‌ها، روی سازندهای سخت و در مقطع تنگ‌شدگی دره احداث می‌گردند. بنابراین، در صورت وقوع بارندگی‌های رعدآسا یا بلندمدت و نیز وجود معایب در بدنه یا سرریز سدها، پدیده شکست ناگهانی رخ می‌دهد. وقوع این پدیده، موجب شکل‌گیری و پیشروی امواج بزرگ سیلاب در پائین‌دست می‌گردد. هم‌چنین، تغییرات توپوگرافی سواحل و بستر رودخانه، موجب توسعه عرضی و طولی جریان در سیلاب‌دشت می‌گردد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف تعیین اثرات تلفیقی موانع دشت سیلابی، تنگ‌شدگی و موانع بستر مجرای اصلی، بر خصوصیات جریان ناشی از شکست سد صورت گرفت. نتایج این مطالعه، در پیش‌بینی خصوصیات جریان‌های غیرماندگار سریع، روندیابی هیدرولیکی، پهنه‌بندی و تحلیل مخاطره سیلاب کاربرد دارد.

در مطالعه حاضر، از روش MPS^۱ برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد روی دشت‌های سیلابی استفاده شد. براساس مطالعات کوشیزوکا و اوکا (۱۹۹۶) و کوشیزوکا و همکاران (۲۰۱۶)، این روش به دلیل عدم نیاز به شبکه‌بندی، به تعریف دقیق شرایط مرزی در دامنه محاسباتی وابسته نیست. همچنین، نیازمند افزایش وضوح شبکه در نقاط با گرادیان شدید عمق، فشار یا سرعت جریان نیست. از سوی دیگر، حساسیت نتایج عددی نسبت به قطر ذرات در مقایسه با حساسیت روش‌های مرسوم دینامیک سیالات محاسباتی^۲ نسبت به ابعاد سلول‌ها بسیار کم‌تر است. افزون بر آن‌که، به دلیل عدم نیاز به توابع کرنل، دارای معادلاتی ساده در مقایسه با سایر روش‌های ذره محور مانند هیدرودینامیک ذرات هموار^۳ می‌باشد (۷ و ۸). جعفری ندوشن و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که روش MPS از دقت بالاتری نسبت به روش حجم سیال^۴ (نرم‌افزار Flow-3D) و SPH در پیش‌بینی تغییر شکل‌های سطح آزاد و مسافت پیشروی پیشانی موج ناشی از شکست سد برخوردار است. همچنین، این روش در مقایسه با روش SPH به هیچ شرط اضافی در ردیابی سطح آزاد نیاز ندارد. درحالی‌که در مقایسه با روش SPH، به تعداد ذرات کم‌تری نیاز دارد (۳). از سوی دیگر، نرم‌افزارهای تجاری مبتنی بر روش VOF مانند Flow-3D، در پیش‌بینی گسستگی‌های سطح آزاد در برخورد سریع جریان به موانع دقت پائینی دارند. درحالی‌که روش MPS به دلیل ماهیت ذره محور آن، با دقت بالایی تغییر شکل‌های سطح آزاد در محل گسستگی‌ها را پیش‌بینی می‌نماید. در پایان، هدف از انجام این مطالعه، تعیین اثر موانع سیلاب‌دشت با شکل‌های گوناگون،

نمودند. نتایج نشان داد که این روش از دقت بالایی در پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و گسستگی‌های نیمرخ سطح آزاد در برخورد با مانع برخوردار می‌باشد (۲۱ و ۲۲). شیبانی‌فرد و همکاران (۲۰۱۸)، با به‌کارگیری روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر، خصوصیات جریان یک‌بعدی ناشی از شکست سد را به صورت عددی مطالعه نمودند. مشخص گردید که با کاهش فاصله میان ذرات در مدل، دقت این روش در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی افزایش می‌یابد. هر چند، کاهش فاصله میان ذرات در مدل، بر زمان و هزینه انجام محاسبات می‌افزاید (۱۴). جعفری ندوشن و همکاران (۲۰۱۵)، جریان ناشی از شکست سد روی بسترهای ثابت خشک و مرطوب را به روش لاگرانژی ذرات متحرک نیمه ضمنی تراکم پذیر شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که این روش از دقت بالایی در پیش‌بینی نوسانات فشار جریان ناشی از شکست سد روی بسترهای ثابت و متحرک برخوردار می‌باشد (۳). عطائی آشتیانی و فرهادی (۲۰۰۶) و شکیبائی‌نیا و جین (۲۰۱۱)، جریان ناشی از شکست سد را با بهره‌گیری از روش ذرات متحرک نیمه ضمنی تراکم‌پذیر ضعیف به صورت عددی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که این مدل به خوبی می‌تواند نیمرخ سرعت جریان، ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و ویژگی‌های مرتبط با آن را پیش‌بینی نماید (۱ و ۱۳). سوارز فرازائو و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۱۲) و سوارز فرازائو و زک (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸)، خصوصیات جریان ناشی از شکست سد روی بسترهای ثابت و متحرک را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه نمودند. براساس این مطالعات، وجود موانع در مسیر جریان موجب کاهش انرژی جنبشی، تغییر رژیم جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی در بالادست موانع و نیز تشکیل پرش هیدرولیکی می‌گردد (۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸).

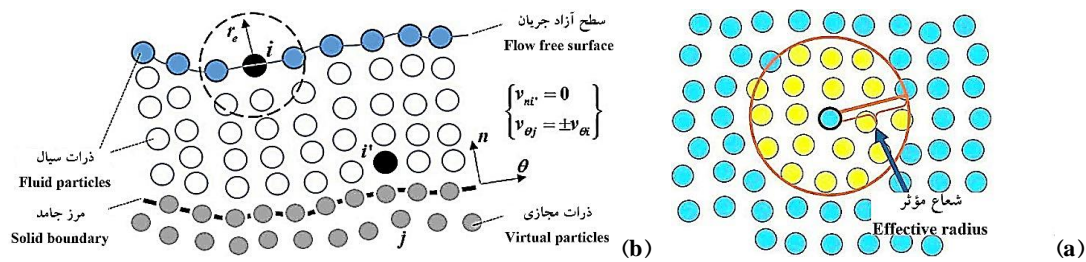
- 1- Moving particles semi-implicit (MPS)
- 2- Computational fluid dynamics
- 3- Smoothed particles hydrodynamics
- 4- Volume of fluid (VOF)

مجاور با یکدیگر می‌باشد. ذره‌ای که در مرکز دایره قرار دارد به‌عنوان ذره هدف (i) و ذرات مجاور آن به‌عنوان ذرات همسایه (i') در نظر گرفته می‌شوند. جهت اطمینان از جابه‌جایی همسان ذرات همسایه، معمولاً شعاع مؤثر، حدود دو برابر فاصله اولیه ذرات فرض می‌گردد. بردارهای مماس و نرمال برون سوی دیواره، به‌ترتیب با θ و n نشان داده می‌شوند. هم‌چنین، سرعت‌های مماسی و نرمال با v_θ و v_n نشان داده می‌شوند. در رابطه ۱ متغیرهای u, t, g, ρ, v به‌ترتیب نمایانگر لزجت سینماتیک، دانسیته، شتاب ثقل، زمان، سرعت و فشار سیال می‌باشند. سرعت و فشار سیال می‌باشند. سرعت و فشار سیال می‌باشند. برای تعیین بر هم کنش میان ذرات هدف و همسایه، ضرورت دارد که یک تابع وزن‌دهی تعریف گردد. این تابع، مطابق رابطه ۲ به‌صورت نسبت شعاع مؤثر به فاصله شعاعی میان مرکزهای ذرات مجاور ($\vec{r}_{ii'} = \vec{r}_{i'} - \vec{r}_i$) تعریف می‌گردد. تابع وزن در واقع در درونیابی مقادیر کمیت‌های ذره هدف، با استفاده از مقادیر ذرات مجاور آن‌ها در ناحیه پشتیبانی کاربرد دارد (۱۳). بر این اساس، تعیین موقعیت ذرات و تعداد آن‌ها در ناحیه پشتیبانی، با بهره‌گیری از دانسیته شماره ذره n مطابق رابطه ۲ تعیین می‌گردد. ترم‌های فشار و ویسکوزیته در معادلات حرکت، مطابق رابطه ۳ با بهره‌گیری از مدل لاپلاسی تعریف می‌گردند. در این روابط، تابع ϕ نمایانگر کمیت‌های لزجت، فشار و سرعت به‌ترتیب در محاسبات مربوط به این ترم‌ها می‌باشد. از سوی دیگر ضرورت دارد که در محاسبات فشار، معادله پواسون (رابطه ۴) نیز برآورده گردد. از آنجایی‌که محاسبات فشار به‌صورت تکراری و به روش ضمنی صورت می‌گیرد، پس از هر بار محاسبه فشار، مقادیر سرعت تغییر می‌نماید.

تبدیل‌های جانبی و موانع بستر مجرای اصلی بر خصوصیات جریان ناشی از شکست سد می‌باشد. در واقعیت، موانع دشت سیلابی مشتمل بر ساختارهای طبیعی و مصنوعی می‌باشند. به‌طور نمونه، موانع استوانه‌ای، مکعبی، لوزی و غیرمتمقارن به‌ترتیب نمایانگر درختان و درختچه‌ها، ساختمان‌ها و برج‌های مسکونی، ابنیه صنعتی و نیز دکل‌های توزیع فشارقوی برق می‌باشند. خصوصیات هیدرولیکی مورد مطالعه شامل تغییر شکل‌های نیمرخ سطح آزاد، تغییرات سرعت سطحی و نیز تغییرات مؤلفه‌های عرضی و عمقی سرعت، به‌ترتیب در محل سد و تبدیل‌های جانبی می‌باشد. در مطالعات پیشین شکست سد، خصوصیات جریان دوبعدی، اثرات مقطع مرکب، اثرات توأمان تغییر سطح مقطع و موانع بیرون از جریان، تغییر شکل و آرایش موانع بر پیشروی جریان دوبعدی، به‌ندرت گزارش شده است. هم‌چنین، کارایی مدل‌های لاگرانژی از جمله ذرات متحرک نیمه ضمنی در شکست سد در هندسه‌های پیچیده و مقطع مرکب به‌ندرت مورد آزمون قرار گرفته است؛ بنابراین، در این مطالعه، موارد مذکور بررسی می‌گردند. نتایج این پژوهش، از تعمیم‌پذیری بالاتری نسبت به مطالعات شکست سد ایدئال در حالت جریان یک‌بعدی برخوردار می‌باشند.

مواد و روش‌ها

معادلات روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی: روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی MPS، نخستین بار توسط کوشیزوکا و اوکا (۱۹۹۶) به‌عنوان یک روش عددی بدون شبکه مبتنی بر درونیابی انتگرالی در حل معادلات جریان تراکم‌ناپذیر ارائه گردید (۸). در این روش، معادلات حرکت سیال در شکل پیوستار برداری به‌صورت رابطه ۱ می‌باشند. در شکل ۱، شعاع مؤثر (r_e)، نمایانگر فاصله اندرکنش ذرات



شکل ۱- a: شعاع مؤثر، b: آرایش ذرات سیال و مجازی، مرز جامد و سطح آزاد در روش MPS (۱۳).

Figure 1. a: effective radius, b: the fluid and virtual particles arrangement, solid boundary and free surface particles in MPS method (13).

بنابراین، ضرورت دارد که مقادیر سرعت تصحیح گردند. این تصحیح بر اساس معادله گرادیان (رابطه ۵) صورت می گیرد. در روش ذرات متحرک نیمه ضمنی، سطح آزاد جریان به عنوان یک فصل مشترک میان آب و هوا وجود ندارد. از این رو، جهت تعیین سطح آزاد، ذراتی که مقادیر فشار آنها برابر صفر محاسبه می گردد و دانسیته شماره ذره آنها شرط $n_i < \beta n_0$ را برآورده می نماید، به عنوان سطح آزاد در نظر گرفته می شوند. در رابطه مذکور، پارامتر β عبارت از ضریب آستانه دانسیته بدون بعد، با مقدار پیش فرض برابر ۰/۹۷ می باشد. همچنین، رابطه ۶ نمایانگر شرط پایداری کورانت- فردریخ- لوی در حل های صریح معادلات حرکت می باشد. شرط CFL حداکثر سرعت حرکت ذرات را به مقدار Cl_0/dt محدود می نماید. در رابطه ۶، متغیرهای u_i^0 و u_i^n به ترتیب نمایانگر سرعت ذره پسروپیش از اعمال شرط پایداری کورانت- فردریخ- لوی، l_0 فاصله اولیه میان ذرات پیش از آغاز حرکت، C نمایانگر عدد کورانت و dt عبارت از بازه زمانی می باشد. عدد کورانت، عددی مثبت و در محدوده $C = udt/dx \leq 1$ قرار دارد. در همه شبیه سازی های این پژوهش مقدار آن به طور پیش فرض برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد. جهت پایداری حل های صریح ضرورت دارد که گام زمانی dt شرط کورانت را برآورده نماید. همچنین، در این رابطه، جهت اعمال شرط عدم لغزش سیال روی

$$\left\{ \begin{aligned} D\rho/Dt &= 0 \\ D\vec{u}/Dt &= -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$w(|\vec{r}_{ii'}|) = \begin{cases} \left(\frac{r_e}{|\vec{r}_{ii'}|} \right) - 1 & (|\vec{r}_{ii'}| < r_e) \\ 0 & (|\vec{r}_{ii'}| \geq r_e) \end{cases} \quad (2)$$

$$n = \sum_{i \neq i'} w(|\vec{r}_{ii'}|)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \langle \nabla^2 \varphi \rangle_i &= \sum_{i \neq i'} (6/\lambda) (\varphi_i - \varphi_{i'}) w(|\vec{r}_{ii'}|) \\ \lambda &= \sum_{i \neq i'} |\vec{r}_{ii'}|^2 w(|\vec{r}_{ii'}|) / \sum_{i \neq i'} w(|\vec{r}_{ii'}|) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\nabla^2 P^{k+1} = (-\rho_{ii'}/\Delta t^2) ((n^* - n_0)/n_0) \quad (4)$$

$$\overline{\nabla \varphi_i} = \sum_{i \neq i'} \left(\frac{3(\varphi_i - \varphi_{i'})}{|\vec{r}_{ii'}|^2} n_0 \right) w(|\vec{r}_{ii'}|) \quad (5)$$

$$\vec{u}_i^n = \begin{cases} Cl_0/dt (\vec{u}_i^0 / |\vec{u}_i^0|) & (|\vec{u}_i^0| > Cl_0/dt) \\ \vec{u}_i^0 & (|\vec{u}_i^0| \leq Cl_0/dt) \end{cases} \quad (6)$$

$$v_f = f_w v_{fw}$$

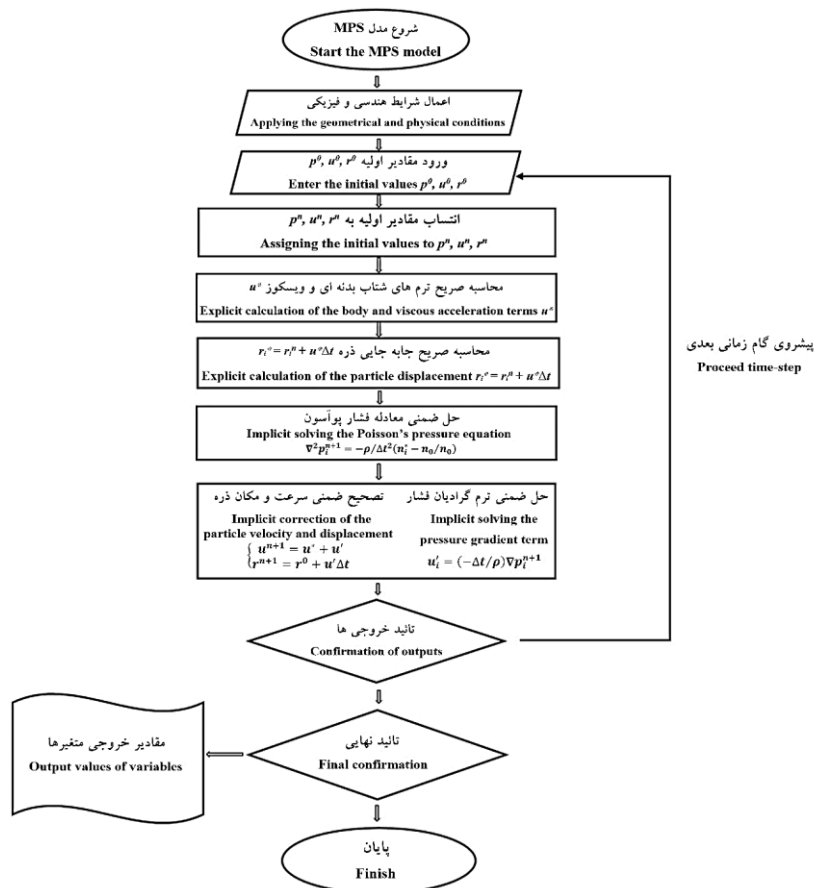
$$F(u_T) = (\bar{u}_p/u_T) - \ln(y_p u_T/\nu)^{2.4} - 5.5 \quad (7)$$

حل‌های عددی بر اساس رابطه ۸ تعیین گردید. در این معادله، $Y_{e,n}$ ، $Y_{e,x}$ ، $Y_{i,m}$ ، $Y_{i,e}$ ، به ترتیب نمایانگر مقادیر آزمایشگاهی، عددی، مقادیر حداکثر و حداقل متغیر Y می‌باشند.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,e} - Y_{i,m})^2}{(Y_{e,x} - Y_{e,n})}} \quad (۸)$$

پیکره‌بندی مدل‌های شکست سد روی بستر خشک:
در این پژوهش، جریان ناشی از شکست سد روی بستر خشک در حالات گوناگون به روش ذرات متحرک شبیه‌سازی گردید (شکل ۳).

دیواره‌های صلب، v_f (ضریب لزجت ذرات سیال) تعریف می‌گردد. درحالی‌که، v_w ضریب لزجت ذرات واقع بر دیواره می‌باشد. مقدار ضریب f_w جهت اعمال شرط عدم لغزش ذرات سیال روی دیواره صلب، برابر یک در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم حل عددی رابطه‌های (۱-۶) بر اساس شکل ۲ می‌باشد. خصوصیات آشفتگی جریان با بهره‌گیری از مدل دیواره^۱ شبیه‌سازی گردید (رابطه ۷). در این راستا، توزیع سرعت متوسط در مجاورت دیواره‌ها، از رابطه ۷ تعیین می‌گردد. در این رابطه، y_p و u_T به ترتیب نمایانگر فاصله از دیواره و سرعت اصطکاکی می‌باشند. با حل رابطه ۷، ویسکوزیته گردابه‌ای برابر $U_e = ky_p u_T$ می‌گردد (۱۲). هم‌چنین، خطای نرمال



شکل ۲- الگوریتم حل روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی.

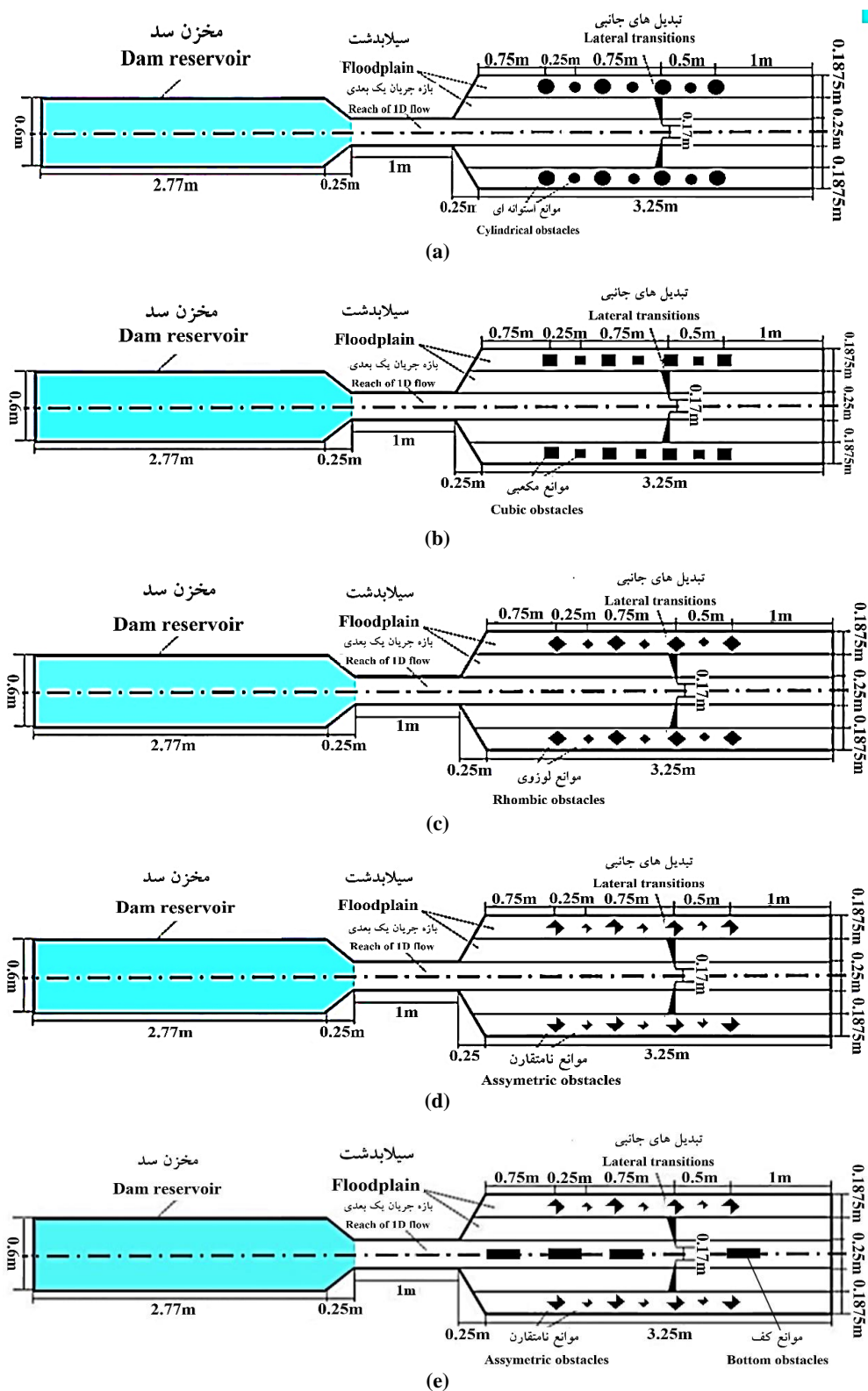
Figure 2. Solution algorithm of moving particles semi-implicit method (Prometech (2016)).

می‌باشند. همچنین، عرض موانع بزرگ و کوچک به ترتیب برابر ۷ و ۴ سانتی‌متر می‌باشند. بر اساس مطالعه مورینگ (۲۰۰۴)، اثرات دیواره بر نواحی که در فاصله‌ای کم‌تر از $0.2h$ (عمق متوسط جریان) از جداره‌های جانبی کانال قرار دارند، چشمگیر می‌باشد (۹). بنابراین، با توجه به قرارگیری موانع در محور دشت سیلابی و فاصله بیش از ۵/۵ سانتی‌متری از دیواره‌های جانبی، اثرات دیواره بر جریان عبوری از پیرامون موانع، ناچیز می‌باشد. ارتفاع تبدیل‌های جانبی، برابر $7/5$ سانتی‌متر از کف کانال می‌باشد. موانع کف به ارتفاع ۵ سانتی‌متر از بستر کانال قرار دارند. همچنین، مدل‌سازی‌ها در سه عمق اولیه آب درون مخزن برابر ۴، ۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر انجام گرفت. تعداد کل حالت‌های شبیه‌سازی برابر ۱۵ بود. همه شبیه‌سازی‌ها، با بهره‌گیری از نرم‌افزار پارتیکل ورکز^۱ صورت گرفت. در این راستا، از پردازشگر چهار هسته‌ای Intel i7 3.6 GHz با هشت ترد استفاده شد. پدیده شکست سد از لحظه شروع فروریزش ستون سیال تا خروج جریان از کانال پائین‌دست، به مدت $t_f = 35$ مورد مطالعه قرار گرفت. زمان متوسط پردازش در شبیه‌سازی‌ها برابر $2/8$ ساعت بود. این مدت‌زمان، برابر 336 ثانیه به‌ازای هر $0/1$ ثانیه از t_f بود (۱۱). ابتدا، تحلیل حساسیت نتایج عددی نسبت به قطر ذرات صورت گرفت. بدین ترتیب، سه قطر ذره ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید. با توجه به استقلال نتایج عددی از ابعاد شبکه و زمان پردازش در دو قطر ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، قطر ذره ۱۵ میلی‌متر انتخاب گردید. پراکندگی و دقت نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در پیش‌بینی تغییر شکل‌های نیمرخ سطح آزاد، به ترتیب مطابق شکل ۴ و جدول ۱ می‌باشد. در همه شبیه‌سازی‌ها، تعداد ذرات برابر 280000 و با خصوصیات فیزیکی یکسان با آب در دمای 20°C می‌باشند. این ذرات با قطر ۱۵ میلی‌متر، دانسیته 1000kg/m^3 ، ضریب تخفیف^۲ برابر $0/2$ ، لزجت سینماتیک، کشش سطحی و گرمای ویژه به ترتیب برابر 10^{-6} ، $0/072$ و 4200 در سیستم SI می‌باشند.

صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی شکست سد کوکامان و اوزمن کاکاتای (۲۰۱۲) صورت گرفت (۶). در این راستا، پدیده شکست سد به مدت $t_f = 68$ مورد مطالعه قرار گرفت. تعداد کل ذرات در سه قطر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب برابر $329,133$ ، $96,637$ و $38,976$ و مدت‌زمان پردازش به ترتیب برابر $3/32$ ، $0/78$ و $0/27$ ساعت بود. این مقادیر به ترتیب برابر 299 ، $70/2$ و $24/3$ ثانیه به‌ازای هر $0/1$ ثانیه از t_f بود. همچنین، برابر $0/036$ ، $0/029$ و $0/025$ ثانیه به‌ازای هر یک‌ذره در دامنه محاسباتی بود. در واقع، کاهش قطر ذرات موجب افزایش تعداد و فاصله میان آن‌ها در دامنه محاسباتی و افزایش زمان پردازش گردید. همه تخمین‌های صریح و ضمنی، از دقت مرتبه دوم مکانی و زمانی برخوردارند. همچنین، الگوریتم حل فشار، ضمنی است. از جمله مزایای این الگوریتم در مقایسه با حلگر صریح، پایداری آن و حساسیت اندک آن به مقادیر سرعت صوت و گام زمانی می‌باشد (۲ و ۱۲). جهت تعمیم‌پذیری نتایج مدل‌سازی‌ها به واقعیت، پیکره‌بندی‌های شکست سد متشکل از سه بخش می‌باشند. این سه بخش عبارت از مخزن، بازه جریان یک‌بعدی و موانع دشت سیلابی می‌باشند. در شکست سدهای واقعی، بازه جریان یک‌بعدی، بازه‌ای کوچک از پائین‌دست محل سد می‌باشد که سیلاب تنها در امتداد مجرای اصلی حرکت می‌نماید. در پائین‌دست، دو دشت سیلابی با ترازهای ارتفاعی بالاتر از مجرای اصلی قرار دارند. موانع دشت سیلابی نمایانگر شکل ایده‌آل درختان و درختچه‌ها، برج‌ها و منازل مسکونی، کارخانه‌ها و ابنیه صنعتی یا دکل‌های فشارقوی برق در دشت سیلابی می‌باشند. همچنین، تبدیل‌های جانبی واقع بر دشت سیلابی اول و مجرای اصلی، نمایانگر شکل ایدئال تنگ‌شدگی ناشی از یک پل احداث‌شده در پائین‌دست محل سد می‌باشند. ابعاد مدل‌های شکست سد براساس پژوهش‌های آزمایشگاهی - عددی اوزمن-کاکاتای و کوکامان (۲۰۱۱) و (۲۰۱۴) و کوکامان و اوزمن-کاکاتای (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) انتخاب گردید (۵، ۶، ۱۰ و ۱۱). این ابعاد مطابق شکل ۳

1- Particleworks

2- Relaxation



شکل ۳- a-e: به ترتیب، پلان‌های مدل‌های شکست سد با موانع استوانه‌ای، مکعبی، لوزی، نامتقارن و موانع کف (پژوهش حاضر).

Figure 3. a-e: plan view of the dam-break models with cylindrical, cubic, rhombus, assymetrical and bottom obstacles (present research).

عمق اولیه آب، شرط شکست آنی سد برآورد می‌گردد ($t_{g-55} < 0.296$, $t_{g-50} < 0.282$, $t_{g-45} < 0.268$).

نتایج و بحث

بر اساس جدول ۱ و شکل‌های (a-d) ۴، نتایج عددی از تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار می‌باشند. در واقع، مدل عددی به‌خوبی، شکل‌گیری و توسعه پرش هیدرولیکی متحرک به‌طرف بالادست (ناحیه برآمدگی در نیمرخ‌ها) را پیش‌بینی می‌نماید. این نتایج با نتایج خیر و همکاران (۲۰۱۹)، ژانگ و ون (۲۰۱۹) و سان و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد (۴، ۱۹ و ۲۳). هر چند این مدل ارتفاع نیمرخ را اندکی کم برآورد می‌نماید. علت آن است که ذرات در مدل، انرژی جنبشی بالایی دارند و با سرعتی بیش از جریان واقعی حرکت می‌نمایند؛ بنابراین، تخلیه مخزن و به‌تبع آن تخلیه جریان از کانال پائین‌دست، سریع‌تر از نتایج آزمایشگاهی رخ می‌دهد. این موجب می‌گردد که مقادیر عمق و سرعت جریان در مدل عددی، به‌ترتیب کم‌تر و بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی باشند. بر اساس مطالعه جعفری ندوشن و همکاران (۲۰۱۵)، روش MPS از دقت بالایی در پیش‌بینی تغییرات نیمرخ طولی سطح آزاد و سرعت جریان برخوردار می‌باشد (۳). درحالی‌که نوسانات فشار جریان را بیش برآورد می‌نماید؛ اما در مطالعه حاضر، مدل MPS مقادیر سرعت را بیش برآورد می‌نماید. در شکل ۴، بی‌بعدسازی کمیت‌ها بر اساس پژوهش کاکامان و اوزمن کاکاتای (۲۰۱۲) صورت گرفت. محور طولی نمایانگر مسافت بدون بعد پیشروی پیشانی موج به‌طرف پائین‌دست می‌باشد. درحالی‌که محور عمودی، تغییرات ارتفاع نیمرخ سطح آزاد نسبت به عمق اولیه آب درون مخزن را نشان می‌دهد (۶).

دقت مدل‌های عددی، با بهره‌گیری از خطای نرمال ریشه مربعات میانگین^۱، مطابق رابطه ۷ ارزیابی گردید. لازم به ذکر است که واسنجی مدل نسبت به مقادیر مختلف ضریب تخفیف صورت گرفت. بر اساس جدول ۲، با توجه به حساسیت پائین نتایج نسبت به مقادیر متفاوت ضریب تخفیف، مقدار آن در مدل‌سازی‌ها برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد.

شرایط اولیه و مرزی در مدل‌سازی‌های عددی: همه مرزهای جامد از جمله موانع سیلاب‌دشت و کف، تبدیل‌های جانبی، جداره‌ها و بستر کانال به‌عنوان شرط مرزی عدم لغزش در نظر گرفته شد. انتهای پائین‌دست سیلاب‌دشت و کانال اصلی، شرط مرزی خروجی در نظر گرفته شد. آب ساکن درون مخزن، به‌عنوان یک شرط اولیه، ابتدا به‌صورت یک المان هندسی تعریف گردید. براساس مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)، تعریف دیواره‌ها و بستر صلب به‌صورت المان‌های هندسی (و نه ذرات) دارای دو مزیت می‌باشد. نخست می‌توان ضمن حفظ پایداری، از ذرات بزرگ‌تری برای مدل‌سازی جریان استفاده نمود. دوم، نوسانات فشار به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (۲۲). سپس با اعمال خصوصیات فیزیکی سیال بر آن، تبدیل به ذرات گسسته گردید. در مدل‌سازی شکست ناگهانی سد، واژگونی ستون سیال در راستای عمود بر امتداد کف کانال، تحت‌تأثیر وزن ذرات صورت می‌گیرد. در این روش نیازی به تعریف دریچه نمی‌باشد. در همه مدل‌سازی‌ها، این واژگونی در کسری از ثانیه ($t_g < 0.1s$) صورت می‌گیرد. براساس مطالعات ویشر و هگر (۱۹۹۸)، در صورتی‌که $t_g \leq \sqrt{1.5625H_0/g}$ باشد، پدیده شکست سد، آنی محسوب می‌گردد (۱۸ و ۲۰). در این مطالعه، در هر سه عمق اولیه ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر، $t_g < 0.1$ می‌باشد. در واقع، در مدل‌سازی‌های MPS در هر سه

1- Normal root mean square

جدول ۱- دقت مدل عددی در محاسبه نیمرخ سطح آزاد جریان (NRMSE=۱۰۰-دقت).

Table 1. Precision of the numerical model (%) in calculation of flow free surface profile (Precision = 100-NRMSE).

t = 4s	t = 3s	t = 2.7s	t = 2.4s	قطر ذرات d_0 (cm) Particles diameter
88.9	90.6	90.5	93.1	1
88.1	91.2	90.8	91.5	1.5
81.1	87.6	86.6	85.8	2

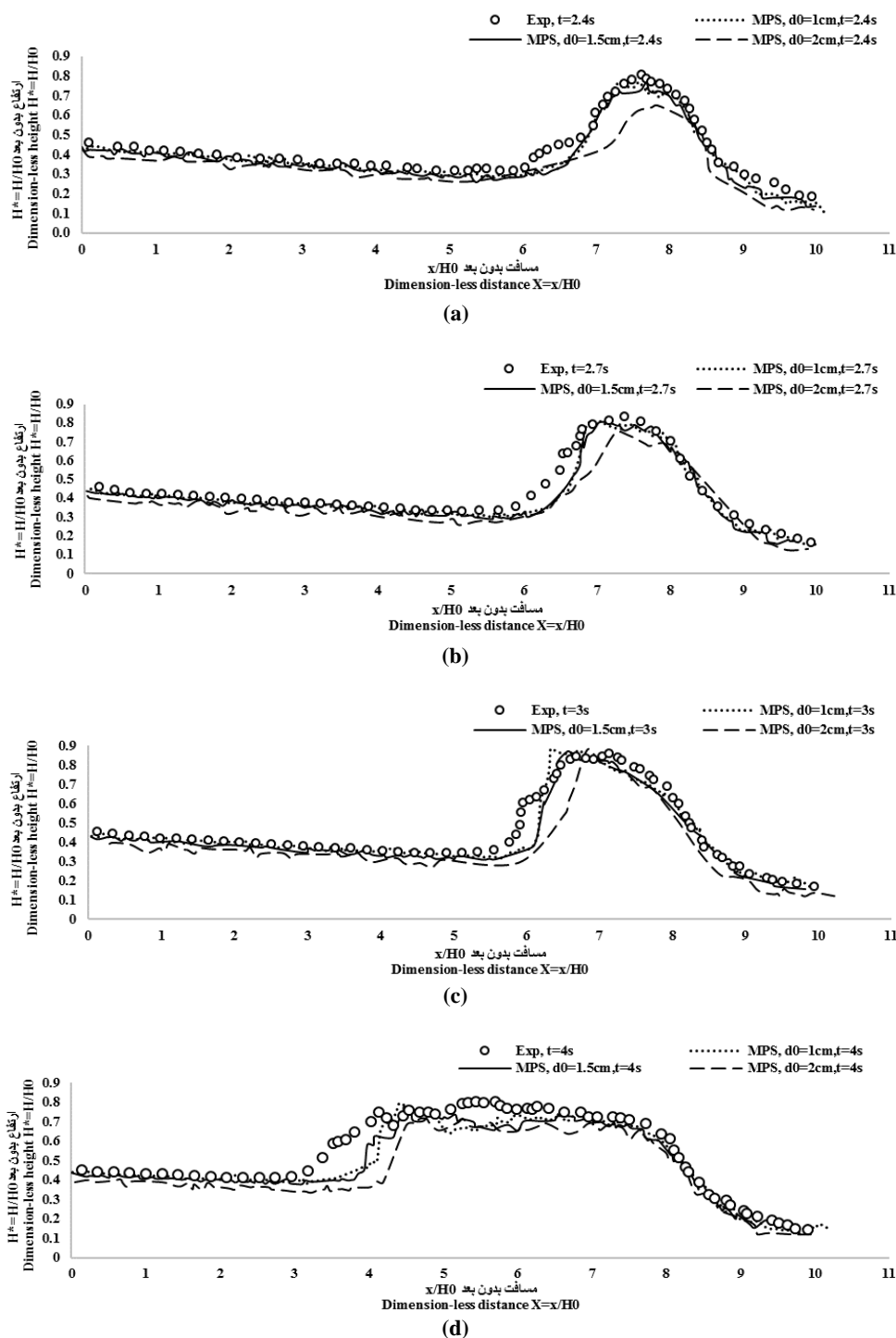
جدول ۲- دقت واسنجی مدل عددی نسبت به ضریب تخفیف در محاسبه نیمرخ سطح آزاد ($d_0=1.5\text{cm}$).

Table 1. Precision of the numerical model calibration to the relaxation coefficient in calculation of flow free surface profile ($d_0=1.5\text{cm}$).

t = 4s	t = 2.7s	t = 2.4s	ضریب تخفیف Relaxation coefficient
88.5	90.5	92.2	0.15
88.1	90.8	91.5	0.2
85.8	90.5	89.9	0.4

مخزن تا ابتدای سیلاب‌دشت)، به دلیل عرض کم مجرا و حرکت شتاب‌دار تند شونده جریان، نیمرخ دارای شیب تند نزولی و جریان فوق بحرانی می‌باشد. در واقع، در ابتدای بازه جریان یک‌بعدی، رژیم جریان از زیربحرانی (در مخزن) به فوق بحرانی (در کانال پائین‌دست) تغییر می‌نماید. جریان پس از عبور از این بازه، وارد دشت سیلابی گردیده و توسعه عرضی می‌یابد. این توسعه موجب تولید جریان دوبعدی می‌گردد. بنابراین، انرژی مخصوص در کانال اصلی کاهش می‌یابد. در فاصله میان انتهای بازه جریان یک‌بعدی تا ابتدای تبدیل‌های جانبی (شکل ۳)، به دلیل توسعه عرضی جریان روی دشت‌های سیلابی، نیمرخ نسبتاً هموار با شیب ملایم می‌باشد. درحالی‌که، تداوم جریان از بالادست موجب افزایش توسعه عرضی آن روی دشت سیلابی می‌گردد. با عبور جریان از میان تبدیل‌های جانبی، به دلیل کاهش سطح مقطع، سرعت و انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. برای تداوم عبور جریان از محل تنگ‌شدگی، لازم است جریان دارای حداقل انرژی مخصوص گردد (۱۶). جهت برقراری تعادل انرژی مخصوص جریان میان محل تنگ‌شدگی و بالادست آن، جریان دچار پس‌زدگی به شکل یک اشتراک منفی می‌گردد.

در شکل‌های (a-e) ۵، ارتفاع نیمرخ طولی سطح آزاد در محل مخزن، به دلیل سرعت کم جریان در این ناحیه، با شیب ملایم افزایش می‌یابد. در این شکل‌ها، در محور طولی، متغیر $x/t\sqrt{gH_0}$ عبارت از مسافت بدون بعد پیشروی پیشانی موج در یک لحظه معین و نیز عبارت از نسبت سرعت متوسط پیشروی پیشانی موج به سرعت موج سطحی می‌باشد. در فاصله میان ابتدای مخزن تا محل سد، جریان متغیر تدریجی با رژیم آرام، زیربحرانی و نیمرخ M1 تشکیل می‌گردد. به دلیل سرعت کم جریان در مخزن، فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک در این ناحیه قابل قبول می‌باشد. همچنین، در همه حالات در لحظه $t=3\text{s}$ ، ارتفاع نیمرخ سطح آزاد از ابتدای محل سد تا انتهای بازه جریان یک‌بعدی، با افزایش عمق اولیه آب کاهش می‌یابد. علت آن است که سرعت تخلیه مخزن با افزایش عمق اولیه آب افزایش می‌یابد. در نتیجه، ارتفاع نیمرخ با افزایش عمق اولیه آب در مخزن سریع‌تر کاهش می‌یابد. این برخلاف، تغییرات نیمرخ در لحظات اولیه شکست سد می‌باشد. در لحظات اولیه، به طور قابل‌انتظاری ارتفاع نیمرخ رابطه مستقیمی با عمق اولیه آب در مخزن دارد. در بازه جریان یک‌بعدی (انتهای



شکل ۴- (a-d) نیمرخ طولی سطح آزاد جریان در نتایج آزمایشگاهی (Exp) و عددی (MPS) در قطره‌های متفاوت ذرات، در لحظه‌های $t = 2.4s, 2.7s, 3s$ & $4s$

Figure 4. (a-d) Longitudinal profile of the flow free surface in experimental and numerical results in several particles diameter at the moments $t = 2.4s, 2.7s, 3s$ & $4s$.

مکعبی (شکل 5a - Squ45)، در عمق اولیه برابر ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین، ابعاد مشترک منفی رابطه مشخصی را با عمق اولیه آب در مخزن نشان نمی‌دهد. بر اساس پژوهش عطائی آشتیانی و فرهادی (۲۰۰۶)، در روش MPS در نقاط گسستگی سطح آزاد جریان، تغییرات مومنتوم ذرات در مدل شدید می‌باشد (۱). بنابراین، در محل جدایش جریان پیرامون موانع سیلاب‌دشت و در محل برخورد جریان به تبدیل‌های جانبی، به دلیل مومنتوم قابل‌ملاحظه، ذرات به شدت با یکدیگر برخورد می‌نمایند. همچنین، یک شارش عددی و غیر فیزیکی در حرکت ذرات مشاهده می‌گردد. در حالت موانع کف (شکل 5e)، شکل نیم‌رخ‌ها در فاصله میان انتهای بازه جریان یک‌بعدی تا انتهای کانال، متفاوت از سایر حالات (شکل‌های 5a-5d) می‌باشد. در این فاصله، نوسانات سطح آزاد چشمگیر می‌باشد. در نتیجه، نیم‌رخ سطح آزاد از تقارن عمقی اندکی در محل مشترک منفی برخوردار می‌باشد. علت آن است که وجود موانع کف، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای موجب ایجاد اغتشاش در بالادست تبدیل‌های جانبی و تولید جریان سه‌بعدی به‌طور موضعی می‌گردد. هرچند، برخلاف موانع دشت سیلابی، عبور جریان از پیرامون موانع کف، موجب جدایش اندک جریان می‌گردد. علت آن، استغراق موانع کف به دلیل عبور جریان از بالا، توسعه سریع جریان پیرامون آن‌ها و عرض نسبتاً کم موانع نسبت به کانال اصلی می‌باشد. محدودیت روش MPS به‌کاررفته در این پژوهش آن است که این روش قادر به پیش‌بینی فرآیند اختلاط هوا با جریان ناشی از شکست سد نمی‌باشد. در واقعیت، در نقاطی که گرادیان سرعت شدید می‌باشد، از جمله در محل برخورد جریان با موانع سیلاب‌دشت و یا تبدیل‌های جانبی، اختلاط هوا با جریان ایجاد می‌گردد. در نتیجه این اختلاط پدیده آب- سفید^۱ و احتباس هوا به

در این حالت، گذار رژیم جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی صورت می‌گیرد. در حالی که، ورودی مقطع تنگ‌شدگی در کانال اصلی به‌عنوان یک مقطع کنترلی در نظر گرفته می‌شود. این پس‌زدگی در بالادست، در دو راستای طولی و عرضی توسعه می‌یابد. بنابراین انرژی جنبشی جریان در صفحه افقی، در سه راستا توزیع می‌گردد.

این سه راستا، عبارت از امتداد جریان عبوری از تبدیل‌ها به طرف پائین‌دست، امتداد بالادست کانال اصلی و امتداد عرضی دشت سیلابی می‌باشد. این توزیع انرژی جنبشی در سه راستا، موجب می‌گردد که مشترک منفی تشکیل‌شده در محل تنگ‌شدگی نتواند به طرف بالادست توسعه یابد.

بنابراین، به‌صورت یک مشترک منفی ثابت نمایان می‌گردد. این یافته، مخالف نتایج پژوهش‌های اوزمن و همکاران (۲۰۱۱ و ۲۰۱۴) و کوکامان و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) می‌باشد (۱۰، ۱۱، ۵ و ۶).

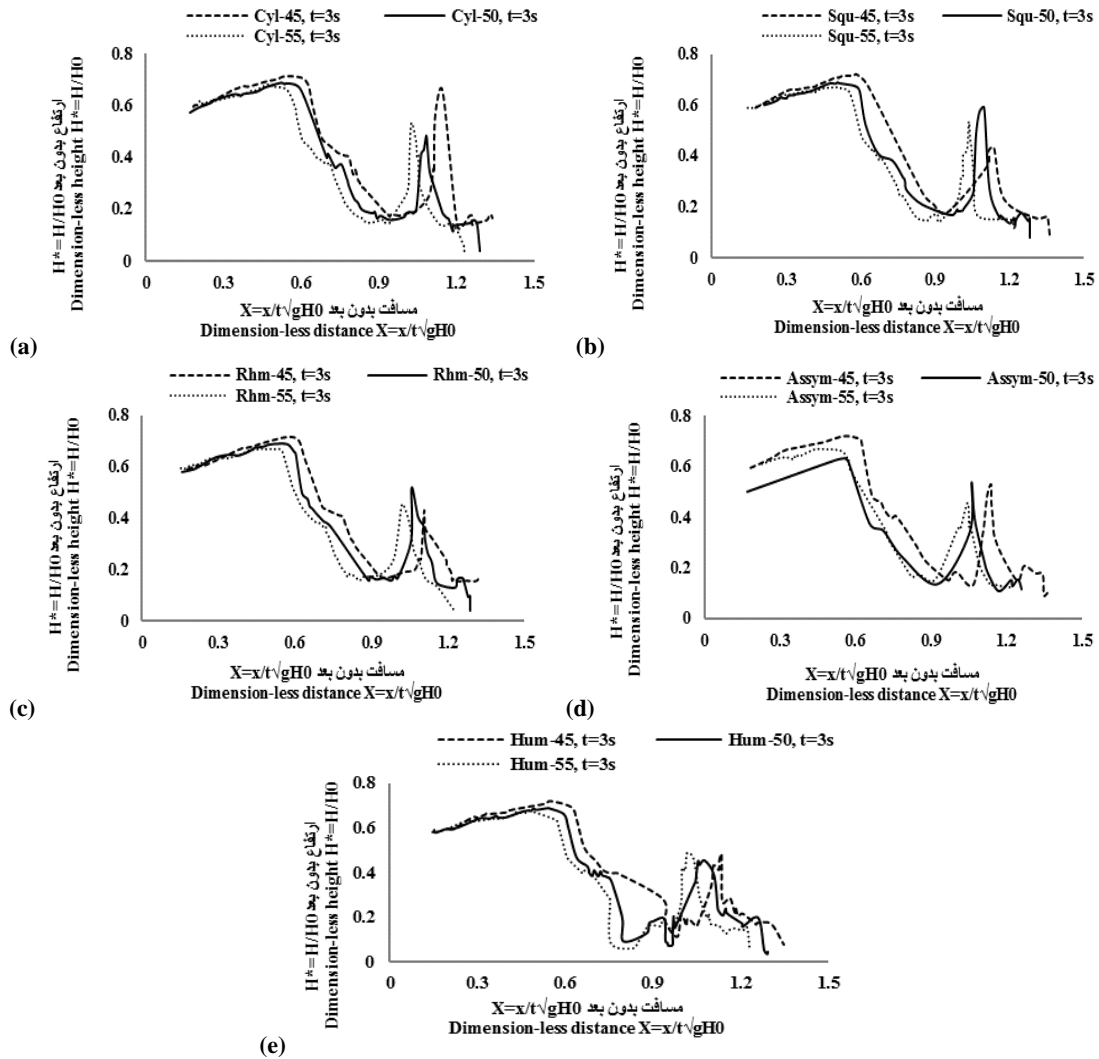
در مطالعات مذکور، شکل‌گیری و توسعه مشترک منفی متحرک به طرف بالادست در محل موانع و تبدیل‌های جانبی آن گزارش شده است (۵، ۶، ۱۰ و ۱۱). علت آن است که در این مطالعات، جریان در سرتاسر مجرا به‌استثنای محل تبدیل‌ها، به‌صورت یک‌بعدی توسعه می‌یابد. در نتیجه، توزیع انرژی جنبشی تنها در دو راستای بالادست و پائین‌دست محل تبدیل‌ها صورت می‌گیرد.

افزون بر این برخورد جریان به موانع دشت سیلابی، موجب بالاروی جریان روی آن‌ها و در فاصله میان آن‌ها و دیواره‌های جانبی فلوم می‌گردد. در این نواحی، جریان به‌طور موضعی سه‌بعدی می‌باشد. عبور جریان از پیرامون موانع، تابع شکل، طول و ارتفاع آن‌ها است. در این راستا، بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع مشترک منفی برابر $H^*=0.66$ و $H^*=0.33$ به‌ترتیب متعلق به موانع استوانه‌ای (شکل 5a - Cy145) و

1- White water

از آنجایی که مدل MPS به کاررفته در این پژوهش تکفازی می باشد، قادر به پیش بینی این پدیده و در نتیجه اتلاف انرژی ناشی از آن نیست.

صورت حباب در جریان در نقاط با گرادیان شدید سرعت رخ می دهد. این پدیده موجب اتلاف انرژی جنبشی آب و تولید جریان دوفازی می گردد. اما



شکل ۵- نیمرخ طولی بدون بعد سطح آزاد عددی در محور کانال اصلی در لحظه $t = 3s$ در حالت های (a) موانع استوانه ای (Cyl)، (b) مکعبی (Squ)، (c) لوزی (Rhm)، (d) نامتقارن (Assym) و (e) موانع کف (Hump).

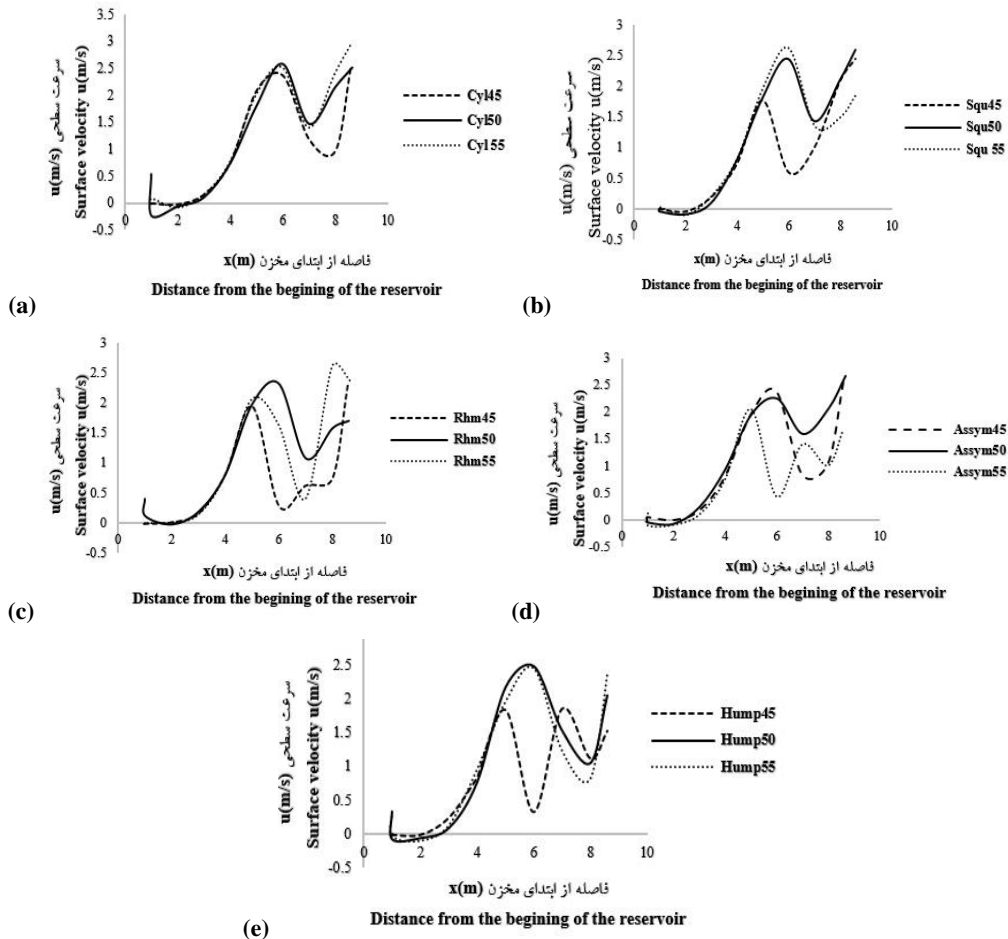
Figure 5. The dimensionless numerical longitudinal profile of the free surface in the main channel axis at the moments $t = 3s$ in the cases of (a) cylindrical (b) cubic, (c) Rhombus (d) Assymmetric and (e) Bottom obstacles.

واقع، در محل موانع و تبدیل های جانبی، بخش قابل ملاحظه ای از انرژی جنبشی جریان به انرژی پتانسیل و بخش کوچکی از آن به انرژی حرارتی ناشی از آشفتگی و اختلاط هوا تبدیل می گردد.

لازم به ذکر است، که میزان اتلاف انرژی ناشی از ورود هوا به درون جریان، در مقایسه با نیروی مقاومت پسای ناشی از موانع، تغییر سطح مقطع سیلاب دشت و تبدیل های جانبی، ناچیز می باشد. در

این مقدار، حدوداً برابر ۰/۶ حداکثر سرعت پیشانی موج مثبت ($v=2\sqrt{gH_0}$) در حل تحلیلی ریتز (۱۸۹۲) می‌باشد (۱۵). علت احتمالی آن است که این موانع دارای بیش‌ترین تقارن و کم‌ترین سطح عمود بر امتداد جریان غالب، در مقایسه با سایر موانع می‌باشند. بنابراین کم‌ترین نیروهای مقاومت پس‌آی فشاری و اصطکاکی را در برابر جریان عبوری از پیرامون آن‌ها ایجاد می‌نمایند. هم‌چنین، ارتباط مشخصی میان مقادیر عمق و سرعت سطحی وجود ندارد.

در شکل‌های ۶(a-e)، مؤلفه افقی سرعت جریان در سطح آزاد u از ابتدای مخزن تا انتهای بازه جریان یک‌بعدی، روند افزایشی دارد. درحالی‌که در فاصله میان انتهای این بازه تا محل تبدیل‌های جانبی، سرعت سطحی کاهش می‌یابد. علل آن، پس زدگی جریان در محل تبدیل‌های جانبی، تشکیل اشترک منفی و کنترل پائین‌دست در محل تبدیل‌های جانبی می‌باشد. یک نقطه بیشینه سرعت، در فاصله‌ای نزدیک به انتهای بازه جریان یک‌بعدی مشاهده می‌گردد. تغییرات سرعت سطحی تابع شکل موانع می‌باشد. درحالی‌که بیشینه سرعت، مربوط به موانع استوانه‌ای شکل می‌باشد.



شکل ۶- مقادیر مؤلفه افقی سرعت u (m/s) در سطح آزاد جریان در لحظه $t=3s$ در حالت‌های (a) موانع استوانه‌ای (Cyl)، (b) مکعبی (Squ)، (c) لوزی (Rhm)، (d) نامتقارن (Assym) و (e) موانع کف (Hump) در سه عمق اولیه آب مخزن برابر ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر.

Figure 6. The velocity horizontal component u (m/s) values at the flow free surface at the moments $t = 3s$ in the cases of (a) cylindrical obstacles (Cyl), (b) cubic (Squ), (c) Rhombus (Rhm), (d) Assymmetric (Assym) and (e) bottom obstacles (Hump) in three reservoir initial water depths of 45, 50 and 55 cm.

می‌باشند. این نکته در پژوهش‌های پیشین شکست سد مانند پژوهش کوکامان و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (۵ و ۶).

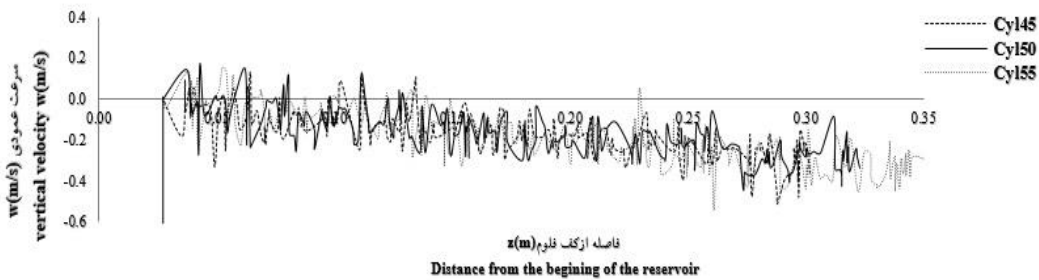
در همه نمودارهای $v(a-e)$ ، به دلیل توسعه عرضی جریان در محور کانال اصلی، علامت سرعت از مثبت به منفی تغییر می‌نماید. علامت‌های مثبت و منفی سرعت در انطباق با جهت‌های مثبت و منفی مختصات کارتزین می‌باشند. توسعه عرضی جریان در دو جهت مخالف در محور کانال اصلی، به صورت تقریباً متقارن صورت می‌گیرد.

هم‌چنین، با نزدیک شدن به دیواره‌های جانبی فلوم ($y = -0.1175$ و $y = 0.1675$) مقادیر سرعت v کاهش یافته و به صفر می‌رسد. کم‌ترین مقادیر v مربوط به موانع نامتقارن می‌باشد (شکل ۸c). هم‌چنین، وجود موانع کف موجب افزایش مقادیر و نوسانات سرعت عرضی به‌ویژه در محور کانال اصلی می‌گردد. درحالی‌که، تغییر شکل موانع موجب تغییر شکل نمودارهای سرعت عرضی می‌گردد.

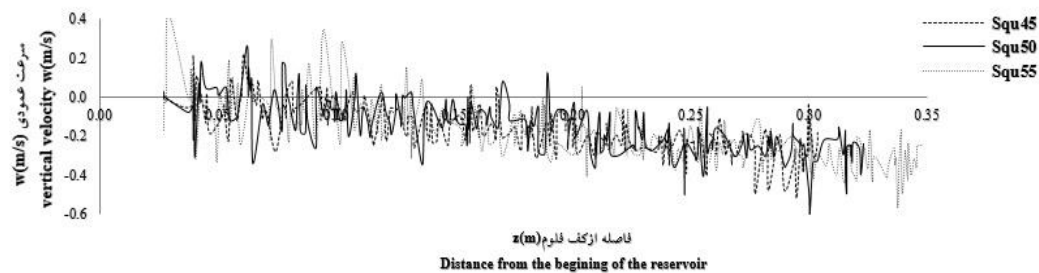
در نمودارهای $v(a-e)$ ، با افزایش فاصله عمودی از کف فلوم، مقادیر منفی مؤلفه عمودی سرعت w (سرعت رو به پائین) افزایش می‌یابد.

هم‌چنین، با افزایش عمق اولیه آب در مخزن از ۴۵ تا ۵۵ سانتی‌متر، به شکل قابل‌انتظاری امتداد نمودارهای w در راستای افقی گسترش می‌یابد. به‌طور آشکار، افزایش عمق اولیه موجب افزایش بیشینه فاصله عمودی توسعه بردارهای سرعت w می‌گردد. به‌علاوه، به دلیل ماهیت جریان غیرماندگار سریع، گرادپان‌های لحظه‌ای و مکانی سرعت در محل شکست و در نقاط تشکیل جریان بحرانی چشمگیر می‌باشند.

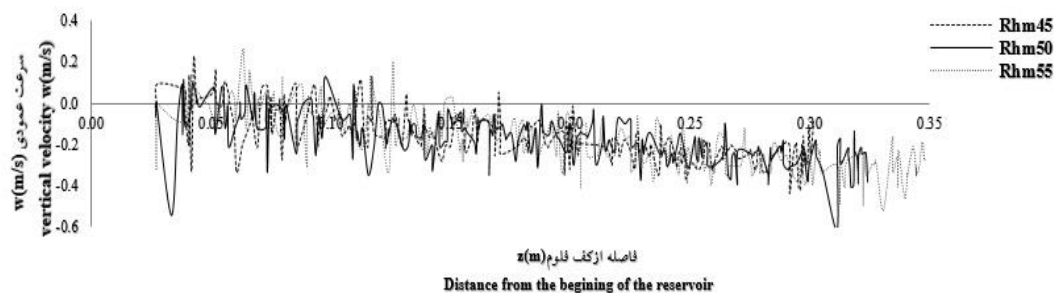
این موجب نوسان مقادیر w در راستای عمودی می‌گردد. نوسانات کوچک‌مقیاس سرعت نمایانگر آشفتگی جریان و اتلاف انرژی توسط ادی‌ها، در راستای عمقی می‌باشند. در واقع، علی‌رغم آن‌که موانع کانال پائین‌دست مستقیماً در امتداد جریان غالب قرار ندارند، اما بر دینامیک جریان در محل سد مؤثر



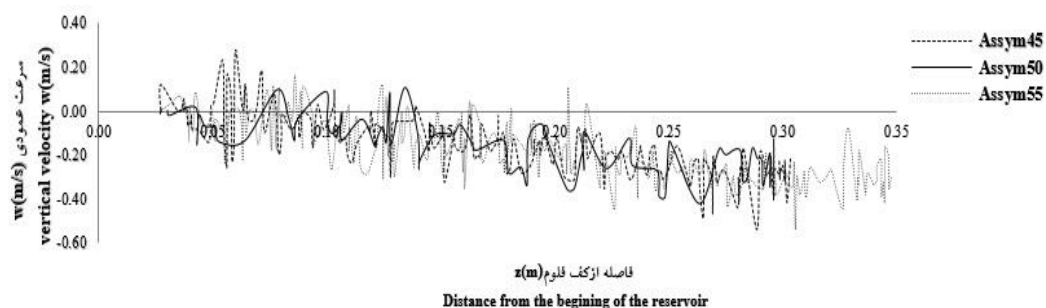
(a)



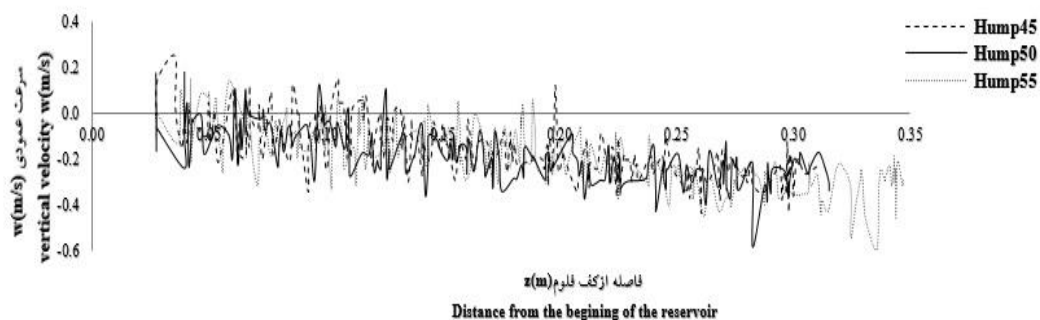
(b)



(c)



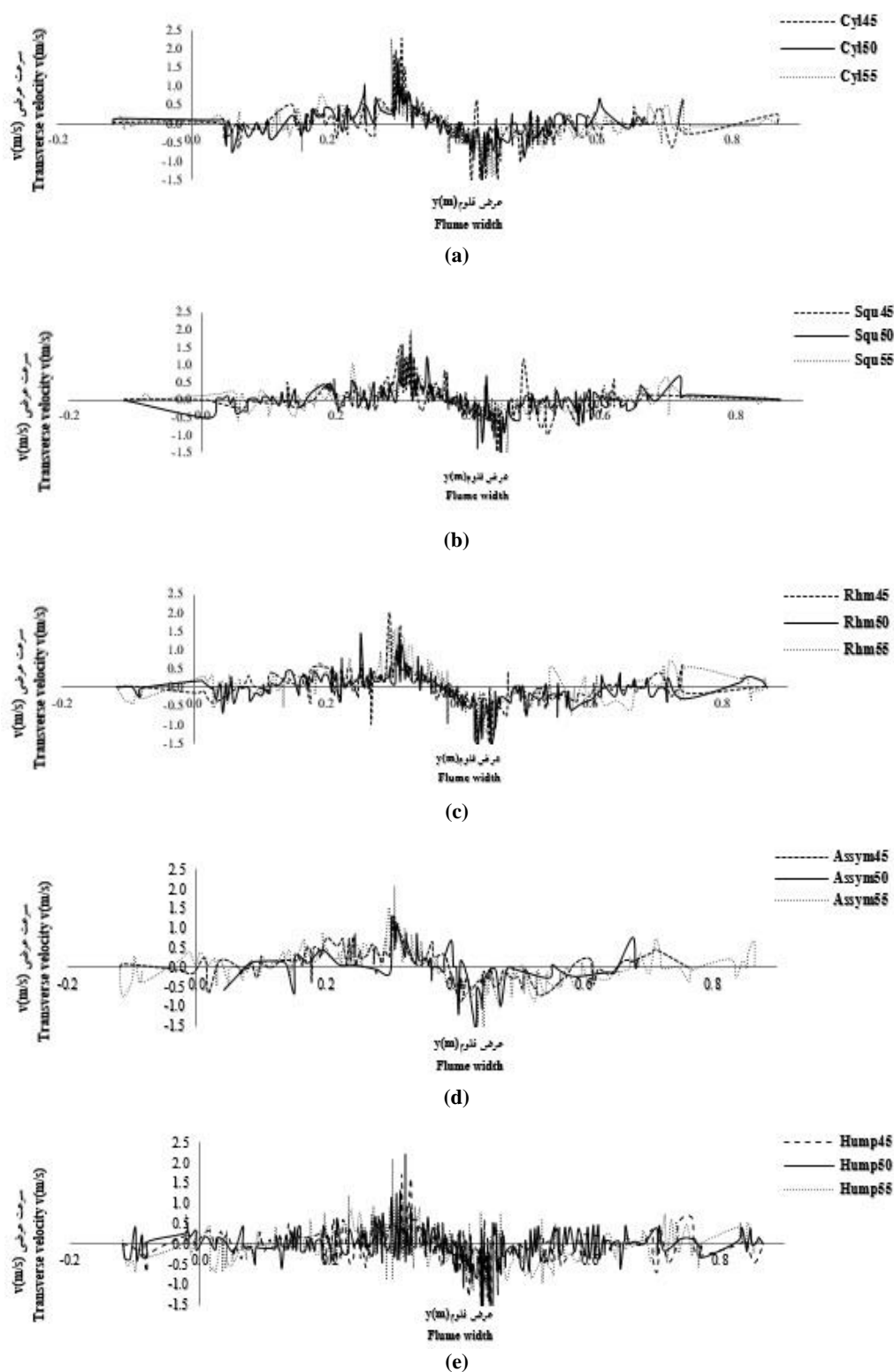
(d)



(e)

شکل ۷- تغییرات مکانی مؤلفه سرعت $w(m/s)$ در عمق فلوم در لحظه $t=3s$ در محل سد ($y=0.175m-0.425m$, $x=3.02m-3.03m$) در (a) موانع استوانه‌ای (b) مکعبی (c) لوزی (d) نامتقارن و (e) موانع کف در سه عمق اولیه آب برابر ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر.

Figure 7. The spatial variations of the velocity component $w(m/s)$ in flume depth at $t = 3s$ at the dam place ($x=3.02m-3.03m$, $y=0.175m-425m$) in the cases of (a) cylindrical obstacles (b) cubic (c) Rhombus (d) assymmetric and (e) Bottom obstacles in three initial water depths of 45, 50 and 55 cm.



شکل ۸- تغییرات مکانی مؤلفه سرعت v (m/s) در عرض فلوم در لحظه $t = 3s$ در بالادست تبدیل‌های جانبی ($z=0-0.3m$, $x=6m-6.01m$) در حالت‌های (a) موانع استوانه‌ای (b) مکعبی (c) لوزی (d) نامنتظران (e) موانع کف، در سه عمق اولیه آب مخزن برابر ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر.
 Figure 8. The spatial variations of the velocity component v (m/s) in flume width at $t = 3s$ at the upstream of the lateral transitions ($x=3.02m-3.03m$, $z=0-0.3m$) in the cases of (a) cylindrical obstacles, (b) cubic, (c) Rhombus, (d) Assymmetric and (e) bottom obstacles in three reservoir initial water depths of 45, 50 and 55 cm.

نتیجه‌گیری کلی

جانبی، به‌طور موضعی ماهیتی سه‌بعدی دارد. (د) شکل موانع، عاملی مؤثر بر تغییر شکل‌های نیمرخ سطح آزاد، مؤلفه افقی سرعت سطحی جریان، نیروهای مقاومت پساً در برابر عبور جریان از محل موانع، تغییر مقادیر مؤلفه عمودی سرعت در محل سد در راستای عمقی و مؤلفه عرضی سرعت در بالادست تبدیل‌های جانبی در کانال اصلی می‌باشد.

در پایان، نتیجه‌گیری می‌گردد که روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی از کارایی مطلوبی در پیش‌بینی خصوصیات جریان ناشی از شکست ناگهانی سد روی سیلاب‌دشت برخوردار می‌باشد.

پیشنهاد می‌گردد که مدل‌سازی جریان ناشی از شکست سد به‌صورت دوفازی سیال-سیال و سه‌فازی سیال-سیال-جامد صورت گیرد. در این صورت می‌توان اثرات اتلافی ناشی از ورود هوا به جریان و نیز اثرات توأمان اختلاط هوا و رسوبات بستر را مطالعه نمود. همچنین، پیشنهاد می‌گردد که کارایی حلگر فشار صریح و ضمنی در شبیه‌سازی جریان شکست سد روی بسترهای خشک، مرطوب، متحرک و نیز جریان چگال مورد مقایسه قرار گیرد.

در این مطالعه، اثر آرایه‌ای از موانع عمودی در محور دشت‌های سیلابی بر خصوصیات جریان ناشی از شکست سد، به روش ذرات متحرک نیمه‌ضمنی مورد مقایسه قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایش‌های پیشین شکست سد مشخص گردید: الف) مدل MPS، مقادیر ارتفاع نیمرخ سطح آزاد و سرعت پیشروی جریان به‌طرف پائین‌دست سد را به‌ترتیب کم‌وبیش برآورد می‌نماید. علت آن است که در مدل عددی انرژی جنبشی ذرات بیش از واقعیت می‌باشد.

ب) تغییر سطح مقطع کانال اصلی ناشی از وجود دشت‌های سیلابی و تبدیل‌های جانبی، موجب توسعه عرضی و تولید جریان دوبعدی می‌گردد. همچنین، موجب تعدیل مقادیر ارتفاع نیمرخ طولی سطح آزاد جریان در کانال اصلی، سرعت پیشروی جریان به‌طرف پائین‌دست، توزیع انرژی جنبشی جریان در سه راستا و اتلاف آن در اثر تشکیل یک مشترک منفی در محل تبدیل‌های جانبی می‌گردد.

ج) جریان در بستر دشت سیلابی ماهیتی دوبعدی و در محل موانع دشت سیلابی، موانع کف و تبدیل‌های

منابع

1. Ataie-Ashtiani, B., and Farhadi, L. 2006. A stable moving-particle semi-implicit method for free surface flows. *Fluid Dyn Res.* 38: 4. 241-256.
2. Chen, R., Cai, Q., Zhang, P., Li, Y., Guo, K., Tian, W., Qiu, S., and Su, G.H. 2019. Three-dimensional numerical simulation of the HECLA-4 transient MCCI experiment by improved MPS method. *Nucl. Eng. Des.* 347: 95-107.
3. Jafari Nodushan, E., Hosseini, Kh., Mousavi, S.F., Shakibaeinia, A., and Farzin, S. 2015. The simulation of the dam-break flow by weakly compressible moving particle semi-implicit method. *Modares Civil Eng. J.* 15: 3. 25-36. (In Persian)
4. Khayyer, A., Naoki, T., Yuma, Sh., and Gotoh, H. 2019. Multi-resolution MPS for incompressible fluid-elastic structure interactions in ocean engineering. *Appl. Ocean Res.* 82: 397-414.
5. Kocaman, S., and Ozmen-Cagatay, H. 2015. Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *J. Hydrol.* 525: 1-12.
6. Kocaman, S., and Ozmen-Cagatay, H. 2012. The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. *J. Hydrol.* 433: 145-153.

7. Koshizuka, S., Hillman, M., Chen, J.S., Roth, M.J., Reddy, B.D., Ortiz, M., and Kirchdoerfer, T. 2016. Moving Particle Semi-implicit (MPS) Method - Application to Free Surface Flow. Bulletin for the International Association for Computational Mechanics. United Kingdom.
8. Koshizuka, S., and Oka, Y. 1996. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. Nucl. Sci. Eng. 123: 3. 421-434.
9. Mohrig, D. 2004. Conservation of Mass and Momentum: sedimentary Geology. MIT OCW.
10. Ozmen-Cagatay, H., and Kocaman, S. 2011. Dam-break flow in the presence of obstacle: Experiment and CFD simulation. Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. 5: 4. 541-552.
11. Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S., and Guzel, H. 2014. Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. J. Hydro-Environ. Res. 8: 3. 304-315.
12. Prometech. 2016. Particleworks theory manual, Particleworks software documentation. Prometech, Inc.
13. Shakibaenia, A., and Jin, Y.C. 2011. A mesh-free particle model for simulation of mobile-bed dam break. Adv. Water Resour. 34: 6. 794-807.
14. Sheybanifard, H., Zounemat Kermani, M., Baraniand, Gh.A., and Memarzadeh, R. 2018. Sensitivity analysis of the initial distance between particles in the smoothed particle hydrodynamics method in simulation of dam break. J. Water Soil Cons. 25: 4. 153-169. (In Persian)
15. Soares-Frazão, S., Canelas, R., Cao, Z., et al. 2012. Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models. J. Hydraul Res. 50: 4. 364-375.
16. Soares-Frazão, S., Noël, B., and Zech, Y. 2004. Experiments of dam-break flow in the presence of obstacles. River Flow. Pp: 911-918.
17. Soares-Frazão, S., and Zech, Y. 2008. Dam-break flow through an idealised city. J. Hydraul. Res. 46: 5. 648-658.
18. Soares-Frazão, S., and Zech, Y. 2007. Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. J. Hydraul. Res. 45: 27-36.
19. Sun, X., Sun, M., Takabatake, K., Pain, C., and Sakai, M. 2019. Numerical simulation of free surface fluid flows through porous media by using the explicit MPS method. Transp porous media. 127: 1. 7-33.
20. Vischer, D., and Hager, W.H. 1998. Dam Hydraulics, John Wiley, Chichester, United Kingdom, 316p.
21. Zech Y., and Soares-Frazão, S. 2007. Dam-break flow experiments and real-case data. A database from the European IMPACT research. J. Hydraul. Res. 45: 5-7.
22. Zhang, T., Koshizuka, S., Xuan, P., Li, J., and Gong, C. 2018. Enhancement of stabilization of MPS to arbitrary geometries with a generic wall boundary condition. Comput Fluids. 0: 1-25.
23. Zhang, Y., and Van, D. 2019. MPS-FEM coupled method for fluid-structure interaction in 3D dam-break flows. Int. J. Comput. Methods. 15: 3. 1-16.



Numerical Study of the Effect of Floodplain Obstacles on the Flow Induced by Dam Break using MPS method

A.R. Khoshkonesh¹, *S. Gohari² and H. Banejad³

¹Ph.D. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan,

²Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan,

³Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Received: 01.10.2019; Accepted: 05.20.2019

Abstract

Background and Objectives: The floodplains are relatively flat lands in the vicinity of the rivers with the residential, industrial or agricultural usage. The sudden breakdown of large dams leads to the formation and propagation of devastating flood waves over the downstream. The flood propagation occurs over the floodplains due to the topographic variations and in-stream obstacles such as bridges. These waves are developed one and two dimensional over a small reach of the river and floodplains, respectively. In the hydrodynamic simulations, two-dimensional characteristics of the dam-break flow over the floodplains have been studied scarcely. Therefore, the combined effects of the floodplains obstacles, constriction and the bottom barriers are calculated over the dam-break flow characteristics.

Materials and Methods: In the present study, the moving particle semi-implicit (MPS) method was used to the numerical study of the dam-break flow characteristics over the floodplain. From advantages of this method are including the incompressibility, the particle-based and using of powerful models of gradients and Laplacian in velocity-pressure corrections without any complex smoothing functions. Hence, the effects of the reservoir initial water level, the shapes of the obstacles - lateral transitions as well as the bottom barriers on the hydraulic parameters were studied in 15 various cases. The floodplain obstacles are cylindrical, cubic, rhomboidal and asymmetric, and the bottom barriers are cubic. At first, the sensitivity analysis was carried out on three particles diameters including the 0.01, 0.015 and 0.20 m. Finally, the diameter of the particles equal to 0.015m was adopted as the water particles size in the model. The simulations carried out through more than 280000 spherical particles, with the second order spatial and temporal accuracy.

Results: The precision of the numerical results was calculated using the NRMSE normal error through the comparison with the previous experimental one. The results demonstrated that evacuation of the reservoir occurs in numerical solutions faster than the experimental. Therefore, the MPS model under and overestimates the values of the free-surface profile height and the flow propagation velocity, respectively. The impact of flow to the floodplain obstacles leads to the rising up and the formation of a three-dimensional flow at the obstacles place, the lateral constrictions and the bottom obstacles. Further, the shape of the obstacles represents a crucial factor in the free surface profile deformations, the horizontal component of the surface velocity and the drag resistance forces applied to the flow.

Conclusion: Normal error values showed that the accuracy of the MPS method in the calculation of the free surface longitudinal profile deformations are variable between 88 and 91 percent.

Keywords: Floodplain, Instantaneous dam break, Lateral transitions, Moving particles semi-implicit, Obstacles

* Corresponding Author; Email: s.gohari@basu.ac.ir