

سنة الف الف سنة  
بسم الله الرحمن الرحيم  
الحمد لله رب العالمين  
والصلاة والسلام على  
سيدنا محمد وآله الطيبين  
الطاهرين



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه سازی عددی جریان شکست سد در حضور مانع با اشکال مختلف به روش

**SPH**

رودابه عدنانی

استاد راهنما :

دکتر رامین امینی

استاد مشاور:

مهندس امین نوری

بهمن ۱۳۹۴

# دانشگاه صنعتی شاهرود

## دانشکده مهندسی عمران

### گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم رودابه عدنانی

تحت عنوان: شبیه سازی عددی جریان شکست سد در حضور مانع با اشکال مختلف به روش SPH

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه .....  
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	مهندس امین نوری		دکتر رامین امینی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر رمضان واقعی		دکتر امیرعباس عابدینی
			دکتر مهدی عجمی

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان  
نامه را به پایان برسانم. ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و

استنان این پایان نامه را به؛

خانواده عزیزم، استاد کرامی و تمامی علاقمندان علم و دانش...

تقدیم می‌نمایم.

وظیفه خودمی دانم تشکر ویژه از زحمات فراوان و رهنمودهای اساتید گرامتقدیرم، جناب  
آقای دکتر اینی و جناب آقای مهندس امین نوری داشته باشم که در تمامی مراحل انجام  
این پایان نامه مرایاری نمودند و مشاوره های ارزشمندشان راهگشای مسیر تحقیق بنده  
بوده است.

## تعهد نامه

اینجانب رودابه عدنانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "شبیه سازی عددی جریان شکست سد در حضور مانع با اشکال مختلف به روش SPH" تحت راهنمایی دکتر رامین امینی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- ✓ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- ✓ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- ✓ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

با توجه به عظمت بنای سد، حجم بالای مصالح به کاررفته و هزینه‌های سنگین احداث آن، کارکرد اقتصادی و جنبه‌های تأمین نیرو و آب، سد یک بنای استراتژیک محسوب می‌گردد. به همین دلیل شکست سد در میان مهم‌ترین حوادث طبیعی و یا مهندسی قرار دارد که رخداد آن می‌تواند باعث یک فاجعه بزرگ با تلفات مخرب و ویرانگر جانی و هم مالی همراه باشد. علاوه بر ماهیت پیچیده جریان شکست سد، وجود موانع و ساختمان‌ها، الگوی تغییرات سریع جریان پائین‌دست سد را عوض می‌کند که باعث پیچیدگی بیشتر مسئله می‌شود؛ بنابراین تمامی تلاش محققین و مهندسين، بررسی همه‌جانبه این پدیده و محدود ساختن ابعاد خسارات ناشی از آن می‌باشد. از این‌رو هدف این پایان‌نامه بررسی توانایی و کارایی روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، در مدل کردن پدیده شکست سد در برابر موانع می‌باشد.

روش هیدرودینامیک ذرات هموار یک روش لاگرانژی بدون شبکه می‌باشد که در آن هر ذره با توجه به مشخصات جریان اطراف و معادلات حاکم حرکت می‌کند و خواص آب مانند چگالی، فشار و جرم را با خود حمل می‌کند. این روش در بسیاری از زمینه‌های مهندسی مانند مکانیک جامدات، هیدرولیک و اخترشناسی استفاده می‌شود. SPH به دلیل ماهیت لاگرانژی، برای تغییر شکل‌های بسیار بزرگ و گسسته بسیار مناسب می‌باشد.

ابتدا به منظور صحت سنجی و بررسی دقت روش SPH، تعدادی مدل‌سازی دوبعدی شکست سد در برابر موانع مختلف توسط SPH انجام می‌شود؛ به دلیل محدود بودن اشکال موانع در SPH، مدل‌سازی شکست سد در حالت دوبعدی و هم در حالت سه‌بعدی نیازمند تغییراتی در کد عددی SPHysics، به منظور ساخت اشکال مختلف مانع در برابر جریان شکست سد می‌باشد. این تغییرات در کد، در پیوست

پایان نامه آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی انجام‌شده با نتایج آزمایشگاهی موجود، مشخص می‌شود که SPH دارای عملکرد مناسبی می‌باشد و نتایج از دقت کافی برخوردار می‌باشند.

این پایان‌نامه با هدف ارائه راهکاری مناسب برای کاهش خسارات ناشی از شکست سد می‌باشد تا در صورت وقوع حادثه شکست سد، بتوان با کاهش نیرو و سرعت جریان شدت خسارات را به حداقل رساند. به‌منظور تحقق این هدف ابتدا با استفاده از یک مدل سه‌بعدی شکست سد در برابر یک ستون منفرد، نیروی وارد بر ستون محاسبه می‌شود؛ نیروی وارد بر ستون، توسط کد عددی نوشته شده در پیوست همین پایان‌نامه محاسبه می‌شود و با مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی دقت و صحت روش SPH مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه تاثیر سه پارامتر شکل موانع، فاصله و شیوه چیدمان موانع در حرکت جریان و نیروی وارد بر موانع مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با مقایسه اثر سه مانع استوانه‌ای و مکعبی و ستون مکعبی قرار گرفته در مسیر جریان با زاویه، بر روند جریان، اثر شکل مانع مورد بررسی قرار می‌گیرد و مشخص می‌شود که شکل مانع بر روی سرعت جریان و روند شکل‌گیری موج انعکاسی نقش قابل‌ملاحظه‌ای دارد. در انتها نیز با مدل‌سازی جریان در برابر ۳ مانع با شیوه قرارگیری و فاصله متفاوت آنها، میزان تأثیر این دو پارامتر بر روی سرعت جریان و نیروی وارد شده بر موانع مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر شیوه قرارگیری موانع بر روی نیروی وارد بر آنها بسیار بیش‌تر از فاصله قرارگیری بین موانع می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** شکست سد، مانع، نیروی وارد بر جسم، هیدرودینامیک ذرات هموار.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ✓ مقاله "شبیه‌سازی شکست ناگهانی سد در حضور مانع با روش هیدرودینامیک ذرات هموار"؛ کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب در مهرماه ۹۴، مرکز همایش‌های بین‌المللی شهید بهشتی تهران.
- ✓ مقاله " هیدرودینامیک ذرات هموار و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن"؛ اولین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری در اردیبهشت ۹۴، شیراز دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس.

# فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	خ
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ نگاهی به آمار سدهای دنیا	۴
۳-۱ اهمیت پدیده شکست سد	۸
۴-۱ شکست سدهای معروف	۹
۵-۱ شکل های شکستگی سد	۱۳
۶-۱ طبقه بندی خطر شکست سد	۱۴
۷-۱ ضرورت تحقیق	۱۵
۸-۱ اهداف تحقیق	۱۶
۹-۱ ساختار پایان نامه	۱۶
فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین	۱۹
فصل ۳: معادلات حاکم	۴۱
۳-۱ جایگاه روش های عددی	۴۲
۳-۱-۱ روش های عددی شبکه محور	۴۲
۳-۱-۱-۱ محدودیت های روش های شبکه محور	۴۳
۳-۱-۲ روش های عددی بدون شبکه	۴۴
۳-۱-۳ روش های ذرات	۴۶
۳-۲ روش SPH	۴۶
۳-۲-۱ پیشینه روش SPH	۴۷
۳-۲-۲ مزیت های روش SPH	۴۸
۳-۲-۳ معایب SPH	۴۹

- ۳-۳-۳ اصول روش SPH ----- ۵۰
- ۳-۳-۱ درونیاب های انتگرال ----- ۵۱
- ۳-۳-۲ توابع کرنل و شرایط عمومی آن ----- ۵۳
- ۳-۴-۴ معادلات حاکم ----- ۵۴
- ۳-۴-۱ معادله مومنتوم ----- ۵۵
- ۳-۴-۱-۱ ویسکوزیته مصنوعی ----- ۵۶
- ۳-۴-۱-۲ ویسکوزیته لایه ای ----- ۵۶
- ۳-۴-۱-۳ ویسکوزیته لایه ای و آشفتگی در مقیاس زیر- ذره (SPS) ----- ۵۷
- ۳-۴-۲ معادله پیوستگی (بقای جرم) ----- ۵۸
- ۳-۴-۳ معادله حالت (EOS) ----- ۵۹
- ۳-۵-۵ حرکت ذرات (XSPH) ----- ۶۰
- ۳-۶-۶ بقای انرژی ----- ۶۰
- ۳-۷-۷ عملکرد و اجرای SPHysics ----- ۶۱
- ۳-۷-۱ انتخاب کرنل ----- ۶۲
- ۳-۷-۲ طول هموار ----- ۶۵
- ۳-۷-۳ مقداردهی اولیه چگالی ----- ۶۶
- ۳-۷-۳-۱ تصحیح مرتبه صفر: فیلتر شپرد ----- ۶۶
- ۳-۷-۳-۲ تصحیح مرتبه اول: مربع حداقل حرکت (MLS) ----- ۶۷
- ۳-۷-۴ تصحیح کرنل ----- ۶۸
- ۳-۷-۵ گام زمانی ----- ۶۸
- ۳-۷-۵-۱ روش پیش بینی - تصحیح ----- ۶۹
- ۳-۷-۵-۲ روش ورلت ----- ۷۰
- ۳-۷-۶ گام زمانی متغیر ----- ۷۱
- ۳-۷-۷ کارایی محاسبات (روش Link list) ----- ۷۱
- ۳-۷-۸ شرایط اولیه ----- ۷۳
- ۳-۷-۹ شرایط مرزی ----- ۷۵
- ۳-۷-۱۰ معادلات جسم شناور ----- ۷۷

۷۹	فصل ۴: ارائه، تجزیه و تحلیل نتایج
۸۱	۱-۴ مدل سازی
۸۱	۱-۱-۴ معرفی کد SPHysics
۸۳	۲-۱-۴ اصلاحات اعمال شده در کد
۸۳	۳-۱-۴ انتخاب پارامترهای موثر در مدلسازی های انجام شده
۸۷	۲-۴ مدل سازی دوبعدی
۸۸	۱-۲-۴ جریان شکست سد از روی بستر هموار خشک و مرطوب
۹۱	۲-۲-۴ جریان شکست سد از روی مانع مستطیلی
۹۳	۳-۲-۴ جریان شکست سد از روی مانع دوزنقه ای
۹۷	۴-۲-۴ جریان شکست سد از روی مانع مثلثی
۱۰۱	۵-۲-۴ جریان شکست سد از روی مانع لبه تیز
۱۰۳	۳-۴ مدل سازی سه بعدی
۱۰۳	۱-۳-۴ ستون مکعبی
۱۰۶	۲-۳-۴ ستون استوانه ای
۱۰۸	۳-۳-۴ ستون مکعبی قرار گرفته با زاویه در مسیر جریان
۱۱۲	۴-۴ بررسی اثر چندین مانع
۱۱۳	۱-۴-۴ تأثیر فاصله بر ماکزیمم نیرو
۱۱۹	۲-۴-۴ تأثیر شیوه قرارگیری موانع بر ماکزیمم نیرو
۱۲۳	فصل ۵: بحث و نتیجه گیری
۱۲۴	۱-۵ جمع بندی و نتیجه گیری
۱۲۷	۲-۵ پیشنهاد برای تحقیقات آینده
۱۲۹	پیوست
۱۴۵	فصل ۶: مراجع

## فهرست شکل ها

عنوان شکل ها	صفحه
شکل ۱-۱. موارد کاربردی سد	۳
شکل ۱-۲. شکست سد بانکیاو چین-۱۹۷۵	۱۰
شکل ۱-۳. شکست سد وایونت ایتالیا - ۱۹۶۳	۱۱
شکل ۱-۴. شکست سد مالپاست فرانسه - ۱۹۵۹	۱۲
شکل ۱-۵. ساختار پایان نامه	۱۷
شکل ۲-۱: مقایسه بین راه حل های عددی و تئوری با محدودکننده های مختلف	۲۳
شکل ۲-۲: تصاویر آزمایشگاهی جریان از روی مانع مثلثی	۲۴
شکل ۲-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل سطح آب در طول مراحل اولیه شکست سد در زمان های مختلف	۲۶
شکل ۲-۴: نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی به همراه نقاط اندازه گیری	۲۷
شکل ۲-۵: مقایسه نتایج شبیه سازی شده و آزمایشگاهی عمق آب در نقاط اندازه گیری (GP2-GP20)	۲۸
شکل ۲-۶: نمایی از کانال آزمایشگاهی	۲۸
شکل ۲-۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل سطح آب در زمان های مختلف	۲۹
شکل ۲-۸: مقایسه پروفیل سطح آزاد محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی در بستر خشک و مرطوب	۳۰
شکل ۲-۹: مقایسه پروفیل سطح آزاد محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی در زمان های مختلف	۳۱
شکل ۲-۱۰: مدل فیزیکی در برابر بردارهای سرعت روش عددی VOF با مانع در منطقه انتشار سیلاب در زمان های مختلف	۳۲
شکل ۲-۱۱: نمایی شماتیک از کانال: (a) برش عرضی (A-A)؛ (b) نمای پلان	۳۳
شکل ۲-۱۲: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آزاد در زمان های مختلف	۳۴
شکل ۲-۱۳: تغییرات ارتفاع موج نسبت به ارتفاع در پایاب	۳۵
شکل ۲-۱۴: تغییرات دبی نسبت به ارتفاع در پایاب	۳۵

- شکل ۲-۱۵: شمای کلی انتشار امواج مثبت و منفی ناشی از شکست کلی یک سد در کانال شیب‌دار-----۳۷
- شکل ۲-۱۶: مقایسه نتایج مدل‌های سه‌بعدی و تصاویر آزمایشگاهی-----۳۹
- شکل ۲-۱۷: مقایسه نتایج مدل دوبعدی آب کم‌عمق، مدل ناوراستوکس با نتایج آزمایشگاهی-----۳۹
- شکل ۳-۱: تبدیل میدان حل به ذرات با ابعاد مناسب-----۵۱
- شکل ۳-۲: نمایی از دامنه تأثیر-----۵۲
- شکل ۳-۳: تغییرات زمانی تغییر انرژی سیستم در طول شکست سد-----۶۱
- شکل ۳-۴: کرنل گوسین و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$ -----۶۲
- شکل ۳-۵: کرنل کوادرتیک و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$ -----۶۳
- شکل ۳-۶: کرنل کیوبیک اسپلاین و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$ -----۶۴
- شکل ۳-۷: کرنل کوانتیک و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$ -----۶۴
- شکل ۳-۸: طول هموار برای یک‌ذره-----۶۵
- شکل ۳-۹: جاروب از طریق سلول‌های شبکه در حالت دوبعدی-----۷۲
- شکل ۳-۱۰: جاروب از طریق سلول‌های شبکه در حالت سه بعدی-----۷۲
- شکل ۳-۱۱: نمایی از موقعیت اولیه شبکه کارترین-----۷۳
- شکل ۳-۱۲: نمایی از موقعیت اولیه شبکه استگرد-----۷۴
- شکل ۳-۱۳: نمایی از طرز عملکرد ذرات مرزی در SPH-----۷۶
- شکل ۴-۱: (a) نمای هندسه محفظه مستطیلی (b) نمای هندسه ساحل-----۸۲
- شکل ۴-۲: مقایسه نتایج توابع کرنل مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.44s$ -----۸۴
- شکل ۴-۳: مقایسه نتایج توابع کرنل مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.8s$ -----۸۴
- شکل ۴-۴: نمایش زمان اجرا برای توابع کرنل متفاوت-----۸۵
- شکل ۴-۵: مقایسه نتایج تاندازه ذرات مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.44s$ -----۸۶
- شکل ۴-۶: مقایسه نتایج تاندازه ذرات مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.8s$ -----۸۶
- شکل ۴-۷: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی بستر خشک-----۸۹
- شکل ۴-۸: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی بستر مرطوب-----۹۰
- شکل ۴-۹: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی-----۹۲

- شکل ۴-۱۰: مقایسه پروفیل سطح آب نتایج آزمایشگاهی با نتایج SPH در شکست سد با مانع مستطیلی ----- ۹۳
- شکل ۴-۱۱: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی؛ (a) مقطع A-A؛ (b) پلان ----- ۹۴
- شکل ۴-۱۲: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد  
از روی مانع دوزنقه‌ای ----- ۹۵
- شکل ۴-۱۳: شکل‌گیری موج منفی از روی مانع دوزنقه‌ای ----- ۹۷
- شکل ۴-۱۴: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی؛ (a) مقطع A-A؛ (b) پلان ----- ۹۸
- شکل ۴-۱۵: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی مانع  
مثلثی ----- ۹۹
- شکل ۴-۱۶: شکل‌گیری موج منفی از روی مانع مثلثی ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۱۷: مشخصات مخزن، کانال و مانع مورد استفاده در شکست سد ----- ۱۰۲
- شکل ۴-۱۸: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد  
از روی مانع لبه تیز ----- ۱۰۲
- شکل ۴-۱۹: (a) نمایی از کانال و پلان مورد بررسی (b) نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده ----- ۱۰۴
- شکل ۴-۲۰: مقایسه نتایج آزمایشگاهی نیروی وارد بر مانع و مدل‌سازی SPH ----- ۱۰۵
- شکل ۴-۲۱: برخورد جریان با مانع مکعبی به صورت سه‌بعدی ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۲۲: نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده ----- ۱۰۷
- شکل ۴-۲۳: برخورد جریان با مانع استوانه‌ای به صورت سه‌بعدی ----- ۱۰۸
- شکل ۴-۲۴: نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده ----- ۱۰۹
- شکل ۴-۲۵: برخورد جریان با مانع مکعبی قرار گرفته با زاویه در مسیر جریان به صورت سه‌بعدی ----- ۱۱۰
- شکل ۴-۲۶: بردارهای سرعت در برخورد با مانع و دیوارهای کانال (a) ستون مربع (b) ستون استوانه (c) ستون مربع  
با زاویه ----- ۱۱۱
- شکل ۴-۲۷: شیوه قرارگیری ستون‌ها ----- ۱۱۲
- شکل ۴-۲۸: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها بر حسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری کنارهم موانع ----- ۱۱۴
- شکل ۴-۲۹: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری کنارهم موانع ----- ۱۱۵
- شکل ۴-۳۰: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها بر حسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری پشت سرهم موانع ----- ۱۱۶
- شکل ۴-۳۱: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری پشت سرهم موانع ----- ۱۱۷
- شکل ۴-۳۲: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها بر حسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$  ----- ۱۱۸

شکل ۴-۳۳: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$ -----۱۱۹

شکل ۴-۳۴: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها برحسب زاویه قرارگیری آنها: (a- 1.5Db (b 2Db (c 3Db-----۱۲۰



## فهرست جدول‌ها

عنوان جدول‌ها	صفحه
جدول ۱-۱: آمار تعداد سدهای ساخته شده	۵
جدول ۲-۱: بزرگ‌ترین سدهای جهان در بازه سال‌های ۱۹۳۲-۲۰۰۸	۷
جدول ۱-۳: برخی روش‌های بدون شبکه	۴۵
جدول ۱-۴: خلاصه‌ای از پارامترهای مدل‌سازی در آزمون‌های انجام شده	۸۸
جدول ۲-۴: خلاصه‌ای از پارامترهای مدل‌سازی در آزمون‌های انجام شده	۱۰۳
جدول ۳-۴: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۱ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها	۱۲۱
جدول ۴-۴: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۲ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها	۱۲۲
جدول ۵-۴: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۳ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها	۱۲۲



# فصل ۱

## (( مقدمه ))

آب مایع حیاتی برای حمایت از تمامی گونه‌های حیات بر روی زمین است و یک عنصر ضروری برای حفظ محیط‌زیست جهان است. اگرچه هفتاد درصد از زمین با آب پوشانده شده است، ولی بخش قابل توجهی از جمعیت جهان از کمبود آب رنج می‌برند. این به این دلیل است که ۹۵٪ از منابع آب، آب‌های شور در اقیانوس‌ها می‌باشد [۱]. از سوی دیگر ۹۸٫۸٪ از آب شیرین زمین در یخ‌ها و آب‌های زیرزمینی قرار دارد و تنها بخش کوچکی در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌باشد. نیاز به آب در نتیجه افزایش جمعیت جهان و رشد اقتصادی، اهمیت منابع آب شیرین را افزایش می‌دهد؛ بنابراین جمع‌آوری و ذخیره منابع آب شیرین موجود بر روی زمین مهم و ضروری می‌باشد. ساخت سدها یکی از راه‌های ذخیره آب شیرین در مقادیر زیاد می‌باشد [۲].

سد یک سازه مهندسی ساخته‌شده در میان دره یا محل فرورفتگی‌های طبیعی و یکی از روش‌های متداول برای جمع‌آوری و ذخیره آب‌های جریان یافته در رودخانه‌ها می‌باشد و مزایای ضروری و مهمی از جمله تأمین آب آشامیدنی، تولید برق، حفاظت از سیلاب، آبیاری، نوبری و تفریح و سرگرمی دارد. پیشینه سدسازی به ۵۰۰۰ سال قبل یعنی حدوداً ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برمی‌گردد؛ زمانی که مصریان باستان برای آبیاری زمین‌های خود سد احداث کردند [۳]. در زمان‌های قدیم، سدها تنها به منظور فراهم کردن آب یا آبیاری ساخته می‌شدند. با توسعه و پیشرفت تمدن، به داشتن سدهای چندمنظوره برای تأمین آب، آبیاری، کنترل سیلاب، نوبری، کنترل رسوب و تأمین انرژی نیاز شد.



تولید برق آبی



آبیاری



کنترل سیلاب



کشتیرانی

شکل ۱-۱: موارد کاربردی سد

به منظور ذخیره آب، مخزن ذخیره در طول دوره‌هایی با جریان‌های بالاتر از میانگین جریان، پر می‌شوند. برای کاهش سیلاب، مخزن ذخیره را در طول دوره‌های خشک‌سالی و دوره‌های با بارش کم، تقریباً خالی نگه می‌دارند؛ بنابراین زمانی که باران‌های شدید اتفاق می‌افتد، حجم ذخیره‌سازی موجود در مخزن، یک مانعی را در برابر حوادث وخیم جاری شدن سیل ایجاد می‌کند. برای تولید نیروی برق، مخزن ذخیره یک هد آب در بالادست سد فراهم می‌آورد و انرژی پتانسیل این آب ابتدا به جنبشی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سدها تنها جریان آب در رودخانه‌ها را ذخیره نمی‌کنند بلکه همچنین ذرات رسوب را نیز ذخیره می‌کنند. به‌طور کلی، رودخانه‌ها، رسوب‌ها را حمل می‌کنند و هنگامی که یک رودخانه در پشت سد متوقف می‌شود، رسوبات در کف مخزن ته‌نشین می‌شوند؛ بنابراین بسته به اندازه مخزن، حجم قابل توجهی از آب و رسوبات انباشته‌شده در پشت یک سد وجود دارد؛ بنابراین اطمینان از طراحی خوب سد و مخزن، ساخت صحیح، حفاظت و عملکرد خوب آن‌ها مهم است.

در غیر این صورت شکست سد ممکن است باعث خروج ناگهانی مخلوط پشت سد شود که سیلاب گل‌آلود و ویرانگری را ایجاد می‌کند.

با توجه به این شرایط، موقعیت و طراحی سدها بدون شک تا حدی توسط ویژگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ بنابراین نتیجه می‌شود که عوامل زمین‌شناسی و نزدیکی مصالح ساختمانی فاکتورهای مهم در تعیین نوع سد ساخته‌شده در محل موردنظر می‌باشد. هنگامی که یک محل برای سد انتخاب می‌شود، ملاحظات برای تصمیم‌گیری اینکه چه نوع سدی برای محل مناسب‌تر است داده می‌شود. به‌هرحال، در هر محلی انواع مختلفی از سد باید در نظر گرفته شود. به‌طور کلی سه فاکتور تصمیم‌نهایی را کنترل می‌کند: (۱) توپوگرافی محل سد و ناحیه مخزن (۲) قدرت و تغییرپذیری فونداسیون و (۳) در دسترس بودن و مناسب بودن مصالح ساختمانی.

در هنگام طراحی سدهای بزرگ مهندسیین باید بر دو هدف اصلی تمرکز نمایند: (۱) سد باید پایدار باشد و (۲) سازه باید تا حد امکان اقتصادی ساخته شود. این دو هدف در مقابل یکدیگر هستند: اطمینان‌پذیری با طراحی بالا<sup>۱</sup> هزینه را افزایش می‌دهد، درحالی‌که روش‌های با کاهش هزینه می‌تواند منجر به سازه‌های ناامن و پرخطر شود.

## ۱-۲- نگاه‌ی به آمار سدهای دنیا

تاریخچه سدهای جهان توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD<sup>۲</sup>) در پاریس نگهداری می‌شود. حدود ده هزار سد با ارتفاع بیش از ۳۰ متر بنا شده‌اند که اغلب توصیه‌های موجود ICOLD در رابطه با مبانی، معیارها و ضوابط مطالعات، طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری مربوط به این دسته از سدها می‌باشد. تعداد سدهای کمتر از ۳۰ متر (۱۰ تا ۳۰ متر) تا سال ۱۹۹۵ که طبق تعریف ICOLD از گروه سدهای بزرگ محسوب می‌شوند، ۳۵۰۰۰ سد گزارش شده است [۴]. مبانی طراحی، ساخت و

1. Over design

2. International Commission on Large Dams

غیره این گروه از سدها در بسیاری از کشورها با یکدیگر متفاوت بوده که بر اساس آمار موجود، اغلب شکست‌ها مربوط به این گروه از سدها بوده است [۵].

در جدول زیر تعداد سدهای ساخته‌شده توسط کشورهای عضو کمیسیون که در رتبه ۱۵ کشور اول قرار دارند، آمده است [۶]:

جدول ۱-۱: آمار تعداد سدهای ساخته‌شده

تعداد سدهای ساخته‌شده توسط کشورهای عضو کمیسیون		
رتبه	تعداد سد	نام کشور
۱	۲۳۸۴۲	چین
۲	۹۲۶۵	ایالات متحده امریکا
۳	۵۱۰۲	هند
۴	۳۱۱۶	ژاپن
۵	۱۳۹۲	برزیل
۶	۱۳۰۵	کره
۷	۱۱۶۶	کانادا
۸	۱۱۱۴	آفریقای جنوبی
۹	۱۰۸۲	اسپانیا
۱۰	۹۷۶	ترکیه
۱۱	۸۰۰	ایران
۱۲	۷۱۳	فرانسه
۱۳	۶۰۷	انگلیس
۱۴	۵۷۲	مکزیک
۱۵	۵۴۲	ایتالیا

بر اساس گزارش‌های کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ می‌توان نتایج زیر را از مطالعات آمارهای شکست سدها به دست آورد [۵]:

- درصد شکست سدهای بزرگ: ۲/۲ درصد سدهای شکسته شده مربوط به سدهای ساخته‌شده قبل از سال‌های ۱۹۵۰ میلادی بوده‌اند. درصد سدهای شکسته شده ساخته‌شده بعد از ۱۹۵۱ کمتر از ۰/۵ درصد بوده است.

- به بیان مطلق، بیشترین شکست مربوط به سدهای کوچک است که در هر حال نسبت بزرگی از سدهای در حال بهره‌برداری می‌باشند.
  - بیشتر شکست‌ها مربوط به سدهای ساخته‌شده جدید بوده‌اند. جالب‌توجه اینکه ۷۰ درصد شکست‌ها در ۱۰ سال اول بهره‌برداری از سد رخ داده است و از این تعداد، چندین سد دقیقاً در همان سال اول بهره‌برداری شکسته شده‌اند.
  - بیشترین میزان شکست سدها در سدهایی رخ داده که در ۱۰ سال بین ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰ ساخته شده‌اند.
  - مسائل پی، بیشترین عامل شکست در سدهای بتنی بوده است. این مسائل همراه با فرسایش درونی در پی و خلل در نیروی مقاومتی برشی در پی بوده‌اند (هرکدام ۲۱ درصد نقش داشته‌اند).
  - در سدهای خاکی، بیشترین عامل شکست، روگذری از سدها، فرسایش در بدنه سد و ضعف در پی سد بوده‌اند.
  - در سدهای بنایی عامل اصلی شکست، روگذری از سد که همراه با فرسایش درونی در پی بوده گزارش گردیده است.
  - سدهایی که به دلیل پدیدار شدن عارضه‌ای در سازه‌های وابسته شکسته شده‌اند. در این دسته از سدها بیشترین آمار مربوط به عدم کفایت ظرفیت آبگذری سرریز گزارش شده است.
- جدول زیر، بزرگ‌ترین سدهای ساخته شده جهان را در بازه سال‌های ۱۹۳۲-۲۰۰۸ نشان می‌دهد

[۷].



جدول ۱-۲: بزرگ‌ترین سدهای جهان در بازه‌ی سال‌های ۱۹۳۲-۲۰۰۸

رتبه	نام سد	کشور	سال تکمیل	ارتفاع سد [m]	حجم سد [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	نوع سد
۱	Tarbela	پاکستان	۱۹۷۶	۱۴۳	۱۵۳	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۲	Fort Peck	ایالات متحده آمریکا	۱۹۴۰	۷۶,۴	۹۶	سد خاکی
۳	Atatürk	ترکیه	۱۹۹۰	۱۶۶	۸۴,۵	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۴	Houtribdijk	هلند	۱۹۶۸	۱۳	۷۸	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۵	Oahe	ایالات متحده آمریکا	۱۹۶۳	۷۵	۷۰,۳	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۶	Gardiner	کانادا	۱۹۶۷	۶۴	۶۵,۴	سد خاکی
۷	Mangla	پاکستان	۱۹۶۷	۱۴۷	۶۵,۴	سد خاکی و یا سد خاکی / سنگریزه‌ای
۸	Oroville	ایالات متحده آمریکا	۱۹۶۸	۲۳۰	۵۹,۶	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۹	San Luis (BF Sisk Dam)	ایالات متحده آمریکا	۱۹۶۷	۹۳	۵۹,۶	سد خاکی
۱۰	Nurek	تاجیکستان	۱۹۸۰	۳۰۰	۵۴	سد خاکی
۱۱	Samara	روسیه	۱۹۵۵	۵۲	۵۴	سد خاکی یا سد سنگریزه‌ای
۱۲	Garrison	ایالات متحده آمریکا	۱۹۵۴	۶۴	۵۰,۸	سد خاکی
۱۳	Cochiti	ایالات متحده آمریکا	۱۹۷۵	۷۶,۵	۵۰,۲	سد خاکی
۱۴	Aswan	مصر	۱۹۷۰	۱۱۱	۴۴,۳	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۱۵	W. A. C. Bennett	کانادا	۱۹۶۸	۱۸۶	۴۳,۷	سد خاکی
۱۶	San Roque	فیلیپین	۲۰۰۳	۲۰۰,۲۱	۴۰	سد خاکی یا سد سنگریزه‌ای
۱۷	Fort Randall	ایالات متحده آمریکا	۱۹۵۳	۵۰,۳	۳۸,۲	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۱۸	Afsluitdijk	هلند	۱۹۳۲	۱۳	۳۶,۵	سد خاکی / سنگریزه‌ای
۱۹	Guri	ونزوئلا	۱۹۷۸	۱۶۲	۲۹,۸	سد بتنی وزنی / سد سنگریزه‌ای
۲۰	Three Gorges	چین	۲۰۰۸	۱۸۱	۲۷,۴	سد بتنی وزنی

در سراسر جهان بیشترین توجه مربوط به جلوگیری از شکست سدهای متوسط تا بزرگ است و توجه کمتری به ممانعت از شکست سدهای کوچک می‌شود. دلیل این امر آن است که از دید عمومی خطر شکست سد مربوط به ایجاد خسارات مالی و جانی در پائین‌دست سد می‌باشد. اگرچه سدهای کوچک برای آب قابل دسترسی برای معاش مطمئن جوامع روستایی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند.

در مجموع شکست مجموعه سدها که حدود ۲ درصد کل سدهای موجود را نشان می‌دهند و رقم قابل ملاحظه‌ای از قربانی‌ها و افت سرمایه‌های ملی در کشورهای مختلف را در برمی‌گیرد. لازم به ذکر است که مجموع خسارات حاصل از شکست سدهای کوتاه‌تر از ۳۰ متر، ۱۰ برابر بیشتر از خسارات حاصل از سدهای بلندتر گزارش شده است [۵].

### ۱-۳- اهمیت پدیده شکست سد

با توجه به عظمت بنا، حجم بالای مصالح به کاررفته و هزینه‌های سنگین احداث سد، کارکرد اقتصادی و جنبه‌های تأمین نیرو و آب و ایجاد اشتغال، سد یک بنای استراتژیک محسوب می‌گردد که فروپاشی و انهدام آن، یک رویداد فاجعه‌بار است که ممکن است باعث خسارات جانی و مالی قابل توجه و آسیب‌های زیست‌محیطی به علت خروج غیرقابل کنترل مقدار زیاد مخلوط آب و رسوب از مخزن شود که منجر به انتشار سیل مخرب و ویرانگر در پائین دست می‌شود؛ بنابراین تمامی تلاش محققین و دانشمندان به بررسی همه‌جانبه و محدود ساختن ابعاد خسارات ناشی از شکست سد می‌باشد.

انتظار می‌رود که پیشرفت‌های مساعد در طراحی سد و تکنیک‌های ساخت آن، منجر به کاهش حوادث شکست شود. با این حال به دو دلیل اصلی مسئله شکست سد اتفاق می‌افتد:

اول اینکه با هر پیشرفت تکنولوژی، همیشه به احتمال زیاد عوامل پیش‌بینی نشده‌ای وجود دارد که می‌تواند مسائل و مشکلات غیرمنتظره‌ای را ایجاد کند. و دوماً بسیاری از محل‌های مناسب برای سد، در سراسر جهان استفاده شده‌اند؛ این به این معنا است که ساخت سدهای آینده، در محل‌های بسیار مشکل و پیچیده زمین‌شناسی، ضروری خواهد بود که باعث افزایش احتمال وقوع شکست سد می‌شود؛ بنابراین واضح است که اگر بخواهیم شکست سد و حوادث آن در آینده به حداقل برسد، باید نقش پیشرفت تکنولوژی در هنگام تحقیق و بررسی، طراحی و ساخت‌وساز سد افزایش یابد.

مسائل و مشکلات سد معمولاً به صورت ترم‌های قابل‌مقایسه و طبقه‌بندی‌شده بیان نمی‌شوند و این می‌تواند گاهی اوقات باعث فهم نادرست شود. با توجه به تعریف ICOLD، شکست سد به صورت زیر تعریف شده است [۸]: «فروپاشی یا جابه‌جایی قسمتی از سد یا فونداسیون آن، به طوری که سد نمی‌تواند آب را نگه دارد. به طور کلی شکست سد منجر به آزاد شدن مقدار زیادی آب می‌شود که خطرات زیادی را برای مردم و یا اموال پائین دست اعمال می‌کند».

هیدرولوژی و هیدرولیک شکست سد از موضوعاتی هستند که در زمینه‌های برنامه‌ریزی منابع آب، حفاظت محیط‌زیست و مدیریت بوم‌شناسی با توجه به پتانسیل وقوع حوادث شدید هواشناسی ناشی از تغییرات آب و هوایی و حوادث طبیعی تاریخچه شکست سد، موجب افزایش علاقه شده‌اند. پیش‌بینی شکل، اندازه و زمان جاری شدن سیل ناشی از شکست سد، برای برنامه‌ریزی تخلیه و ایمنی مدیریت عملکرد مخزن مهم است.

## ۱-۴- شکست سدهای معروف

سدها توسط مهندسين زيادي ساخته شدند؛ با اين ادعا كه اين ساختمان‌ها براي برجا ماندن براي قرن‌ها ساخته شده‌اند. با اين حال سدها بارها و بارها فروريختند و برخي از آنها منجر به حوادث فاجعه‌بار بزرگي شدند. در اينجا 3 مورد از معروف‌ترين شكست‌هاي سد كه تاكنون اتفاق افتاده است، آمده است [۹]:

- شكست سد بانگياو<sup>۱</sup> و سد مخزني شيمانتان<sup>۲</sup> - چين (۱۹۷۵)

سد بانگياو در سال ۱۹۵۲ بر روي رودخانه هوايي در استان هنان چين ساخته شد. اين سد، نيروبي در حدود ۱۸ گيگاوات الكتريسيته را براي اين ناحيه تأمين مي‌كرد. بعد از پايان مراحل اوليه ساخت، ترك‌هايي در بدنه سد ديده شد كه با توصيه‌هاي مشاوران روسي تعمير شده و اين سد به‌عنوان سدي پايدار به نام «سد آهنين» مشهور شد. اين سد براي مقاومت در برابر

1. Banqiao

2. Shimantan

بارش ۳۰ میلی‌متر در روز، اتفاقی که در هر ۱۰۰۰ سال در آن ناحیه رخ می‌دهد ساخته شده بود. اما در آگوست سال ۱۹۷۵ میلادی در اثر طوفان نینا<sup>۱</sup> باعث شد که در عرض ۲۴ ساعت ۱۰۶۰ میلی‌متر باران ببارد. به دلیل وقوع طوفان، سیستم‌های ارتباطی نابود شده و باعث شد که درخواست باز کردن دریاچه‌های سد به‌موقع به واحدهای مهندسی نرسد. تراز آب در سد شروع به افزایش و بالا آمدن کرد تا جایی که دریاچه‌های رسوب‌قادر به کنترل تمام فشار آب نبودند و باعث ویرانی سریع دریاچه‌ها شد. در نتیجه، در مجموع ۱,۷ میلیون مترمکعب آب با سرعت متوسط ۳۱ مایل در ساعت آزاد شد که حتی زمین‌های واقع شده در هزاران کیلومترمربع دورتر از آن را ویران کرد. شمار کشته‌شدگان در این حادثه ۱۷۱۰۰۰ بوده است.



شکل ۱-۲: شکست سد بانکیاو چین-۱۹۷۵

- شکست سد وایونت<sup>۲</sup> - ایتالیا (۱۹۶۳)

این سد واقع در دره رودخانه وایونت می‌باشد که در میان بلندترین سدهای جهان می‌باشد. اگرچه امروزه از این سد استفاده نمی‌شود، ولی هنوز هم به بهترین شکل خودش به‌عنوان اینکه هرگز از نظر ساختاری ویران نشده است، پابرجا است. منطقه اغلب توسط زمین‌لرزه‌های جزئی آسیب‌دیده است ولی هرگز بر روی سد تأثیری نگذاشته است. در اکتبر ۱۹۶۳، در حالی که مخزن در حال پر شدن با آب بود، زلزله به منطقه آسیب رساند و در اثر رانش، خاکریز ای در

1. Super Typhoon Nina  
2. Vajont

حدود ۲۶۰ میلیون مترمکعب در داخل مخزن فروریخت. تنها در عرض ۴۵ ثانیه کل منطقه در آب غوطه‌ور شد و در حدود ۵۰ میلیون مترمکعب آب از سد به صورت امواج با ارتفاع ۲۵۰ متر آزاد شد که به طور کامل روستاهای اطرافش را ویران کرد و در حدود ۲۰۰۰ نفر کشته شدند.



شکل ۱-۳: شکست سد وایونت ایتالیا - ۱۹۶۳

- شکست سد مالپاست - فرانسه (۱۹۵۹)

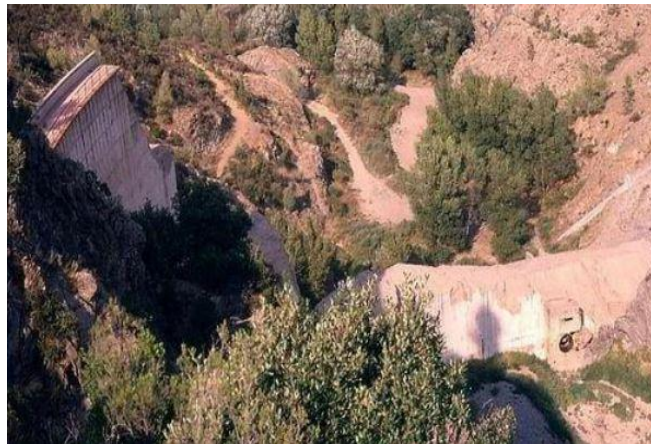
سد مالپاست بر روی رودخانه ری ران<sup>۱</sup> واقع در ریورا<sup>۲</sup> فرانسه در قسمت جنوبی فرانسه ساخته شد. در سال ۱۹۵۹، صداهای ترک در نزدیکی دیوارهای سد شنیده می‌شد اما به دلیل عدم توانایی فنی، نتوانستند آن را بررسی کنند. در نهایت سد در ۲ سپتامبر ۱۹۵۹ شکسته شد و تمام دیوارهای آن به صورت قطعاتی فروریخت. امواج با بیش از ۴۰ متر ارتفاع شروع به عبور از مناطق مجاور کردند که باعث تلفات سنگینی به سازه‌ها شد. شمار کشته‌شدگان در این حادثه ۴۲۳ نفر اعلام شد.

---

1. Reyran River  
2. Riviera

به‌طور کلی، دلایل تخریب سد مالپاست را به‌صورت زیر طبقه‌بندی کردند:

۱. افزایش نسبی فشار آب در توده سنگی و ایجاد ترک و شکاف در بالادست سد
۲. بازشدگی ترک‌ها در طول پاشنه سد در مدت ۱ سال و سرانجام جابجایی پیش‌رونده پای سد و دوران پوسته سد حول تاج.
۳. وجود شرایط خطرناک (مانند گسل) اساساً در جناح چپ سد
۴. در جابجایی‌های سریع در لحظه گسیختگی، این مقدار در امتداد رودخانه افزایش یافته و در نهایت به علت دوران سد در دو امتداد و بیرون زدن توده سنگ در پایه چپ سد، کل پوسته تخریب شده است.



شکل ۱-۴: شکست سد مالپاست فرانسه - ۱۹۵۹

## ۱-۵- شکل‌های شکستگی سد:

علیرغم تلاش‌ها برای ارتقای ایمنی سد، گاهی اوقات شکست سد در نتیجهٔ روگذری<sup>۱</sup> ناشی از طوفان شدید و رواناب ناشی از آن، نقص فونداسیون، رگاب (Piping؛ پدیده‌ای که در اثر نشت آب به سمت بالا در محیط‌های خاکی رخ می‌دهد) و نشت، خطاهای انسانی، زلزله، حملات تروریستی و غیره اتفاق می‌افتد.

شکل شکستگی سد با توجه به نوع سد و عامل تخریب‌کننده سد متفاوت می‌باشد. سرریز شدن آب از بالای سد (Over Topping) از مهم‌ترین شکل‌های شکست سد است که می‌تواند ناشی از طراحی نامناسب سرریز، انسداد سرریز و یا نشست تاج سد و نقص فونداسیون، از جمله نشست و ناپایداری شیب باشد. روگذری در سدهای خاکی با ایجاد یک رخنه کوچک شروع شده و در طول زمان شکست سد افزایش می‌یابد و در نهایت موجب خرابی کامل سد خواهد شد.

پایپینگ، فرسایش داخلی ناشی از نشت می‌باشد که مهم‌ترین عامل شکست سد بعد از روگذری می‌باشد. نشت اغلب در اطراف سازه‌های هیدرولیکی مانند لوله‌ها و سرریزها؛ لانه حیوانات؛ اطراف ریشه‌های چوبی پوشش‌های گیاهی و از طریق ترک‌های سد و متعلقات آن و فونداسیون سد، اتفاق می‌افتد.

در سدهای بتنی وزنی خرابی سد شبیه به سدهای خاکی است با این تفاوت که تخریب سد مرحله‌به‌مرحله در بلوک‌های مجزای بتنی که در هنگام ساخت در سد تعبیه شده است، صورت می‌گیرد. در سدهای بتنی قوسی، با توجه به نوع سازه این سد، شکست سد به صورت آنی است و تقریباً تمام سازه سد در یک‌زمان تخریب می‌گردد و به همین دلیل می‌باشد که حداکثر دبی خروجی از این نوع سدها نسبت به انواع دیگر سدها افزایش قابل‌ملاحظه‌ای دارد.

---

<sup>1</sup>. Over topping

## ۱-۶- طبقه‌بندی خطر شکست سد

با توجه به عواقب شکست سد، خطر شکست سد را می‌توان به خطر بالا، خطر قابل توجه و خطر کم طبقه‌بندی کرد [۱۰]. سدهای اختصاص داده‌شده با طبقه‌بندی پتانسیل خطر بالا، شکست‌هایی هستند که سبب از دست دادن زندگی انسان‌ها، آسیب‌های جدی به خانه‌ها، ساختمان‌های صنعتی یا تجاری، خدمات عمومی مهم و سیستم‌های حمل‌ونقل و جاده‌ها می‌شود. شکست سدها با خطر قابل توجه سبب از دست دادن زندگی انسانی نمی‌شود اما ممکن است باعث خسارت جدی اموال و آسیب‌های محیط زیستی مانند آسیب جاده‌های اصلی، راه‌آهن‌های فرعی یا باعث ایجاد وقفه در استفاده از خدمات رفاهی نسبتاً مهم شود. سدهای اختصاص داده‌شده با طبقه‌بندی پتانسیل خطر کم، شکست‌هایی هستند که باعث از دست دادن زندگی انسانی نمی‌شوند اما ممکن است باعث آسیب‌های اقتصادی و یا زیست‌محیطی کمی مانند آسیب به ساختمان‌های روستایی، زمین‌های کشاورزی و یا جاده‌های فرعی شود و خسارات عمدتاً به مالک اموال محدود می‌شود. تعداد کل سدها با پتانسیل خطر بالا، به دلیل رسیدن سدها به پایان عمر مفیدشان رو به افزایش است. برای مثال تعداد سدها با پتانسیل خطر بالا از ۱۰,۱۱۸ سد در سال ۲۰۰۲ به ۱۳,۹۹۱ سد در سال ۲۰۱۲ افزایش یافت [۱۱]؛ بنابراین پیامدهای فاجعه‌بار شکست سد، ضرورت مطالعه جریان‌های شکست سد که اطلاعاتی را برای ارزیابی خطر و مدیریت رودخانه‌های دره پائین‌دست فراهم می‌کند را بیان می‌کند.

مطالعات جریان شکست سد را می‌توان به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی/میدانی و مطالعات عددی تقسیم‌بندی کرد. مطالعات تحلیلی برای حل معادلات حاکم با استفاده از حساب دیفرانسیل و انتگرال، مثلثات و سایر تکنیک‌های ریاضی متمرکز است. از آنجاکه معادلات حاکم جریان شکست سد، پیچیده و معمولاً غیرخطی هستند، روش‌های تحلیلی از تعدادی فرضیات برای ساده‌سازی معادلات حاکم استفاده می‌کند. مطالعات آزمایشگاهی جریان شکست سد، بر محدودیت‌های روش‌های تحلیلی با استفاده از مدل‌های فیزیکی و اندازه‌گیری اطلاعات در آزمایشگاه، غلبه می‌کند. ظهور فن‌آوری جدید و



ابزارهای اندازه‌گیری، مطالعات تجربی جریان‌های شکست سد را تسهیل کرده است که امروزه شبیه‌سازی موارد بسیار پیچیده را امکان‌پذیر کرده است. اگرچه مطالعه تجربی جریان شکست سد از لحاظ مالی گران و زمان‌بر به‌ویژه برای موارد در مقیاس بزرگ می‌باشد، ولی مجموعه‌ای از اطلاعات قابل اطمینان به‌منظور بررسی و تأیید مدل‌های عددی را فراهم می‌کند. مطالعات عددی جریان شکست سد، بر محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و تجربی غلبه می‌کند. با افزایش ظرفیت پردازش کامپیوتر، شبیه‌سازی عددی به یک روش موردعلاقه و مقرون‌به‌صرفه تبدیل شده است.

## ۱-۷- ضرورت تحقیق

علیرغم تلاش‌های فراوان جهت ارتقای ایمنی سدها، گاهی اوقات شکست سد می‌تواند به دلایلی از جمله روگذری جریان ناشی از باران‌های شدید و رواناب مربوط به آن، نقص فونداسیون، نشت در بدنه سد، خطاهای انسانی، زمین‌لرزه، حملات تروریستی و غیره اتفاق بیفتد. شکست سد یک رویداد فاجعه‌بار می‌باشد که به دلیل خروج حجم قابل ملاحظه‌ای آب از مخزن و انتشار سیلاب در پائین‌دست سد، ممکن است باعث خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی قابل توجهی شود. این جریان‌های ناپایدار ناشی از شکست سد، به‌طور قابل ملاحظه‌ای توسط توپوگرافی منطقه پائین‌دست سد تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ وجود شیب بستر و یا موانع ساخته‌شده توسط انسان‌ها مانند پل‌ها و یا موانع طبیعی (درخت‌ها و پستی بلندی‌های طبیعی) باعث تغییرات ناگهانی در رفتار جریان می‌شوند. از این‌رو پیش‌بینی عمق جریان، سرعت و نیروی انتشار امواج، به‌منظور ارزیابی و مدیریت خطر سیلاب شکست سد به‌طور دقیق بسیار مهم است.

با توجه به اهمیت موضوع، همواره تلاش برای کاهش خطرات و خسارات ناشی از شکست سد مورد توجه مهندسان و محققان بوده است. در این پایان‌نامه نیز با توجه به حیاتی بودن این مسئله، سعی بر آن است تا با استفاده از روش عددی SPH، مدل‌سازی این پدیده و انجام اقدامات و در نظر گرفتن تمهیداتی در پائین‌دست سد، خسارات احتمالی شکست سد را تا حد زیادی کاهش داد.

با مطرح شدن SPH، که روشی لاگرانژی است و به شبکه نیازی ندارد، امکان مدل سازی فرآیندهای پیچیده دینامیک سیالات فراهم شده است. هرچند این روش هنوز به مرحله‌ی کاربرد مستقیم در مسائل مهندسی نرسیده و دارای محدودیت‌های زیادی از جمله سرعت عملیات است و همچنان مراحل تکوینی خود را در زمینه‌های مختلف طی می‌کند، اما با توجه به پتانسیل بالایی که روش‌های لاگرانژی و بدون شبکه دارند، می‌توانند در پاره‌ای از مسائل شناخت بهتری از مسئله ارائه دهند. در ضمن، مطالعاتی از این دست، بستری را فراهم می‌کنند تا روش‌هایی مانند SPH که در مراحل تحقیقاتی به سر می‌برند، امکان توسعه پیدا کنند.

### **۱-۸-۱ اهداف تحقیق**

در این پایان‌نامه از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای مدل سازی جریان ناشی از شکست سد استفاده شده است. برنامه SPHysics یک کد متن باز فرترن می‌باشد و از روش SPH برای مدل سازی مسائل مکانیک سیالات استفاده می‌کند.

هدف این پایان‌نامه توسعه یک مدل هیدرودینامیکی می‌باشد که بتواند به درستی جریان شکست سد در برابر موانع را مدل کند و تراز سطح آب و سرعت آن را اندازه‌گیری نماید؛ نیروی وارد بر سازه و موانع را به دقت برآورد کند تا بتوان از آن برای استهلاک نیروی جریان و کنترل سیلاب برای کاهش خسارات ناشی از شکست سد استفاده نمود.

### **۱-۹-۱ ساختار پایان‌نامه**

این پایان‌نامه از ۵ فصل تشکیل شده است که مباحث مطرح شده در آن به شرح زیر می‌باشد:

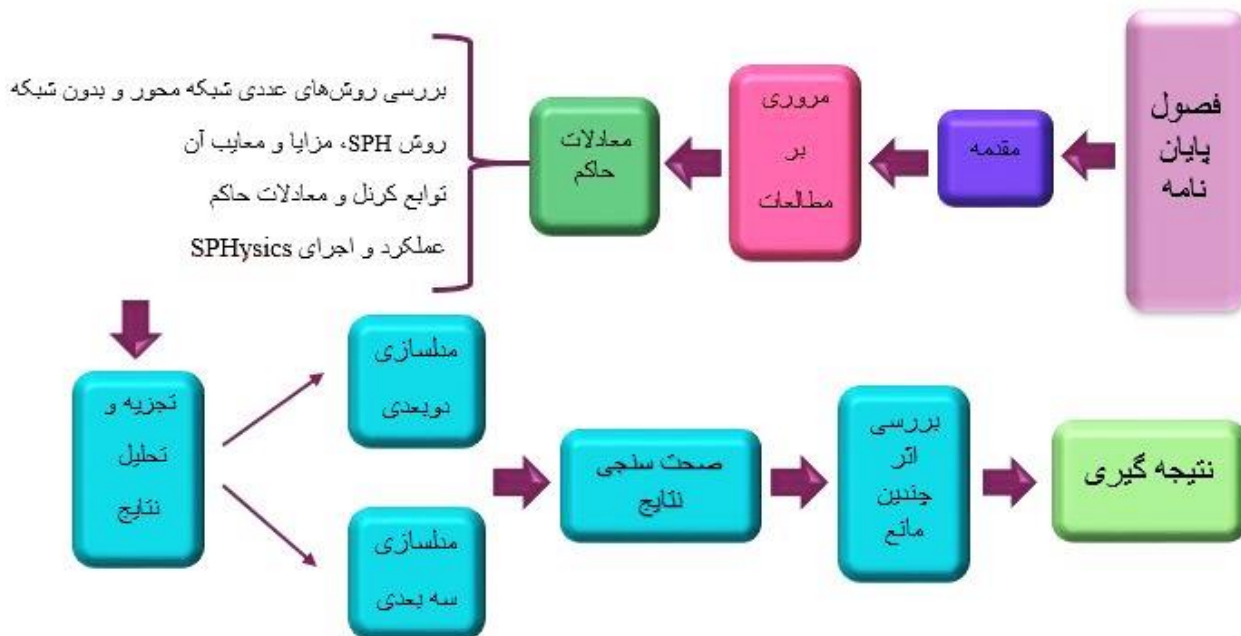
فصل ۱- بیان مقدمه و کلیات موضوع پژوهش، اهمیت موضوع و اهدافی که به دنبال دارد، می‌باشد.

فصل ۲- مروری بر مطالعات پیشین؛ در این فصل مروری بر کارهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده عددی انجام شده بر روی جریان ناشی از شکست سد با و بدون مانع می‌شود.

فصل ۳- معادلات حاکم؛ در این فصل ابتدا ساختار روش عددی SPH بیان می‌شود و سپس معادلات حاکم در این روش و شرایط اجرای برنامه SPHysics به‌طور کامل توضیح داده می‌شود.

فصل ۴- تجزیه و تحلیل نتایج؛ در این فصل مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی اجرا می‌شود. در قسمت دوبعدی نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر مقایسه می‌شود. در قسمت سه‌بعدی نتایج به‌صورت مستقل بیان می‌شوند و اثر عواملی از جمله شکل موانع، فاصله و نحوه قرارگیری آن‌ها نسبت به هم، بر روی میزان استهلاک نیرو و کاهش سرعت مشخص می‌شود.

فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها؛ در این فصل به‌طور خلاصه نتایج و یافته‌های حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده در فصل قبل و نیز پیشنهادهای به نظر مکمل این مطالعه بیان شده است.



شکل ۱-۵: ساختار پایان‌نامه



## **فصل ۲**

**(( هروری بر مطالعات پیشین ))**

مطالعات مربوط به جریان‌های شکست سد، برای چندین دهه از موضوعات جالب برای مهندسين محیط‌زیست و هیدرولیک و محققان بوده است. تلاش‌های قابل‌ملاحظه‌ای برای فهمیدن و مدل‌سازی مکانیسم جریان‌های شکست سد انجام شد. اگرچه قدیمی‌ترین مطالعه توسط ریتر در سال ۱۸۹۲، بر اساس راه‌حل تحلیلی مسئله ساده شده شکست سد می‌باشد، ولی معادلات پیچیده حاکم باعث شد که محققان بیش‌تر به روش‌های تجربی و عددی علاقه‌مند شوند [۱۲].

در دهه‌های اخیر مدل‌سازی کامپیوتری قابل‌دسترس می‌باشد و بسیاری از محققان تحقیقات خود را به شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان‌های شکست سد و پیامدهای آن اختصاص دادند. داده‌های محاسبه‌شده شامل ارتفاع سطح آب، سرعت، فشار، نیرو و غیره برای شناسایی و پیش‌بینی نواحی‌ای به کار می‌رود که در معرض خطر طغیان رودخانه‌ها و تلفات آن می‌باشد.

در گذشته، با در نظر گرفتن مفروضاتی مدل‌های یک‌بعدی شکست سد نوشته شد؛ ولی این مدل‌ها در مواقعی که سد خیلی بزرگ باشد و اختلاف بین بالادست و پایین‌دست زیاد باشد، هنگام مواجهه با جریان‌های فوق بحرانی و زیربحرانی در یک روند سیل و همچنین در مواجهه با پخش سیلاب در منطقه و یا تغییرات در مقطع عرضی جریان، پاسخگوی نیازهای موردنظر نبوده و در نتیجه ضرورت نوشتن مدل‌های دوبعدی را واضح ساخته است. از طرف دیگر وجود رایانه‌های قوی در امر محاسبات و به خدمت گرفتن آن‌ها در راستای شبیه‌سازی جریان، کاربرد روش‌های عددی را نسبت به روش‌های تحلیلی و تحقیقات آزمایشگاهی که بعضاً دارای هزینه کمتر و دقت بیشتر می‌باشند را دوچندان کرده است.

در این قسمت به بررسی بخشی از مطالعات انجام‌شده بر روی پدیده شکست سد پرداخته‌شده است.

درس‌لر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۴، موج هیدرولیکی ناشی از پدیده شکست سد را بررسی کرد. اساس این پژوهش بر کار آزمایشگاهی استوار است. داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در اداره استانداردهای ایالات‌متحده برای خط سیر جبهه موج پیشرو، جبهه موج پسرو و برای پروفیل‌های جریان طی فواصل

---

<sup>1</sup>. Dressler

زمانی طولانی برای سه بستر متفاوت کانال، که در آن ضریب شزی<sup>۱</sup> از حالت صاف تا بسیار زبر می‌باشد، با نتایج کارهای قبلی شاکلیچ<sup>۲</sup> و اگوآزاراف<sup>۳</sup> و نتایج ریاضی درسلر و ویسم<sup>۴</sup> مقایسه شدند. داده‌های آزمایشگاهی انحراف کمی از نتایج تئوری داشتند، که به‌طور کلی مربوط به عملکرد ضریب مقاومت شزی است. آزمایش نشان داد که بخشی از خصوصیات جریان موردنظر، بستگی به اثرات ویسکوزیته جریان لایه‌ای، اثرات فشار هیدرواستاتیک جریان غیر لزج و اثر مقاومتی جریان آشفته دارد [۱۳].

بل<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۹۲)، به بررسی تجربی جریان دوبعدی ناشی از شکست سد پرداختند. آن‌ها نتایج آزمایشگاهی را با توجه به شبیه‌سازی شکست سد، برای جریان‌های ناپایدار در کانال‌های مستقیم، منحنی و عمق‌های ناپایدار مخزن، ارائه کردند و تغییرات تراز آب را در ۵ ایستگاه در پائین‌دست و ۶ موقعیت در مخزن ثبت کردند. همچنین نمای پلان جبهه موج را نیز در ۳ ایستگاه در پائین‌دست کانال ثبت کردند. علاوه بر این از یک روش با استفاده از دوربین‌های فیلم‌برداری برای ثبت ترازهای آب در کانال استفاده کردند. تصاویر ویدئویی امواج، به‌صورت الکترونیکی تبدیل به اطلاعات دیجیتالی بر اساس اختلافات جزئی چگالی‌شان می‌شوند. آن‌ها آزمایشات را برای طیف وسیعی از شرایط اولیه، تغییرات عمق مخزن بالادست، عمق کانال و زبری کانال انجام دادند [۱۴].

فراکرلو<sup>۶</sup> و تورو<sup>۷</sup> (۱۹۹۵)، نتایج آزمایشگاهی و عددی جریان ناشی از شکست سد از روی بستر خشک را ارائه کردند. هدف آن‌ها پیشنهاد و تایید دقت مرتبه دوم روش عددی گرفتن ضربه<sup>۸</sup> از نوع Godunov برای معادلات دوبعدی آب کم‌عمق می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که روش هر دو ترم پایداری

---

1. Chezy  
2. Schoklitsch  
3. Eguiazaroff  
4. Whitham  
5. Bell  
6. Fraccarollo  
7. Toro  
8. Shock-Capturing

و دقت را دارا می‌باشد. همچنین مدل آزمایشگاهی شکست سد را برای تأیید صحت و درستی روش‌های ریاضی و عددی به کار بردند [۱۵].

لابر<sup>۱</sup> و هاگر<sup>۲</sup> (۱۹۹۸)، به بررسی اثر شیب بستر در فرآیند شکست سد در یک کانال مستطیلی افقی با بستر پائین دست خشک پرداختند. آن‌ها آزمایش را در یک کانال مستطیلی با طول ۱۴ متر و عرض ۰٫۵ متر انجام دادند و با استفاده از یک سیستم استاتیکی ساده، به راحتی اجازه تغییرات شیب کف، از حالت افقی به حداکثر ۰٫۵ (۲۶٫۵ درجه) را دادند. جبههٔ امواج مثبت و منفی را به صورت تحلیلی بر اساس معادلات مشخصه، تعیین کردند که سازگاری خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. همچنین سرعت امواج را با روش اندازه‌گیری سرعت تصویر ذرات (PIV) به دست آوردند [۱۶].

ونگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۰)، یک مدل بر اساس نوع ترکیبی از روش مرتبه دوم تفاضل محدود<sup>۴</sup> TVD، را برای شکست سد، توسعه دادند. آن‌ها در مطالعهٔ خود به‌طور همزمان اثرات شیب و اصطکاک بستر و نسبت عمق آب پائین دست به مخزن را مورد بحث قرار دادند. روش آن‌ها بر اساس ترکیبی از روش موج بالادست<sup>۵</sup> مرتبه اول و روش لاکس وندروف<sup>۶</sup> مرتبه دوم، همراه با یک یا دو پارامتر محدودکننده می‌باشد. این روش در اصل برای مسائل یک‌بعدی توسعه پیدا کرد و سپس آن را با استفاده از تکنیک تقسیم کنندهٔ اپراتور<sup>۷</sup> برای معادلات دوبعدی آب کم‌عمق گسترش دادند؛ که با مقایسهٔ نتایج حاضر با نتایج منتشرشده، صحت سنجی شد و تطابق خوبی را در مورد شکست سد به دست آورد [۱۷].

---

1. Lauber

2. Hager

3. Wang

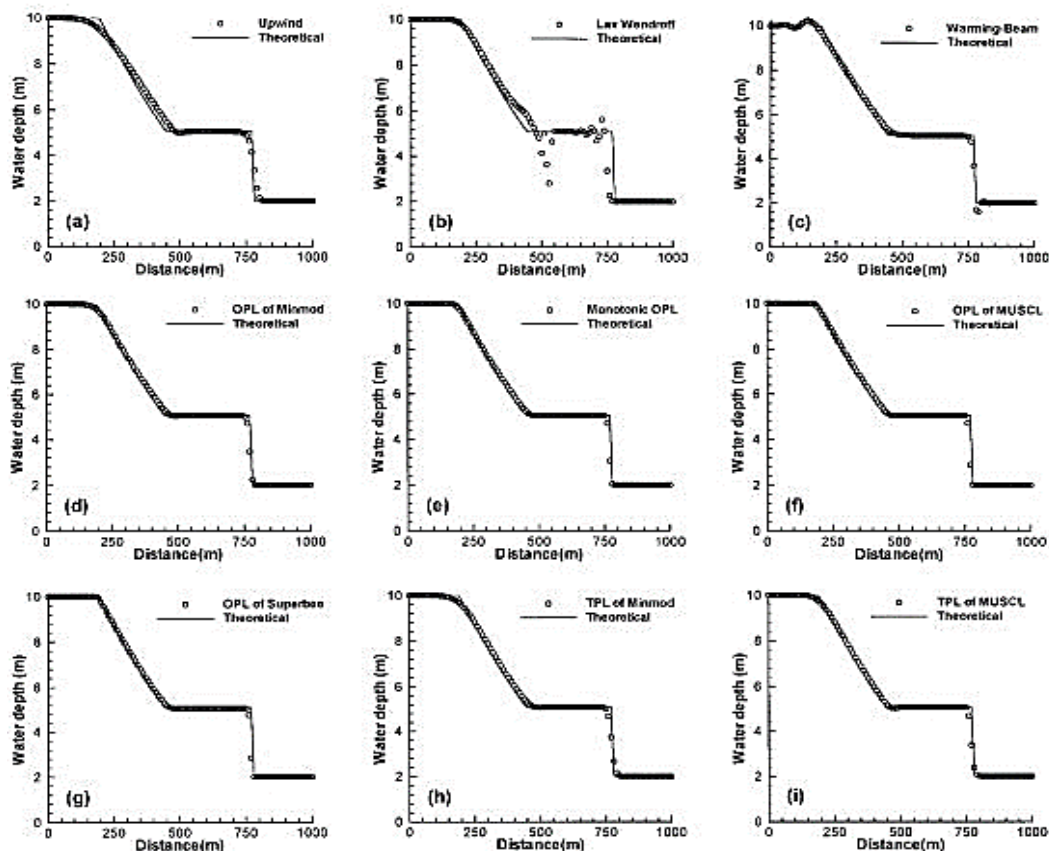
4. Total Variation Diminishing

5. Upwind

6. Lax-Wendroff

7. Operator Splitting





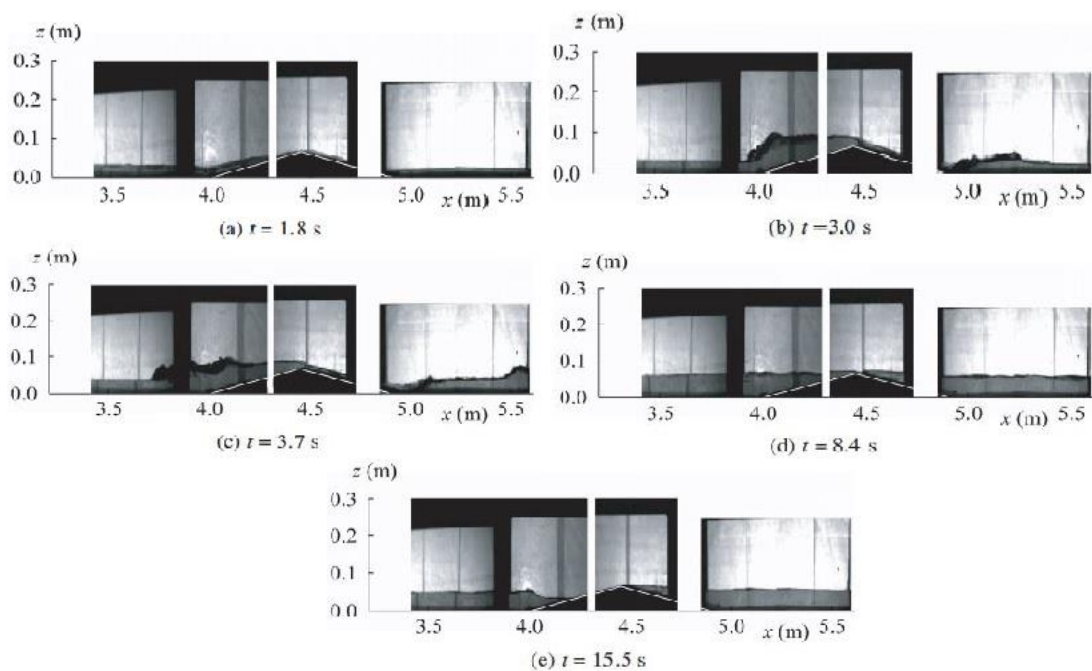
شکل ۲-۱: مقایسه بین راه‌حل‌های عددی و تئوری با محدودکننده‌های مختلف

سوارز<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، به بررسی اثر مانع بر روی امواج شکست سد پرداختند. آزمایش در یک کانال با مانع مستطیلی در پائین‌دست سد که نشان‌دهنده یک ساختمان می‌باشد، انجام شد. آن‌ها تراز آب را در ۵ نقطه مختلف به وسیله گیج‌های اندازه‌گیری تراز آب، اندازه‌گیری کردند. همچنین در هر نقطه اندازه‌گیری، سرعت را به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV<sup>۲</sup>)، اندازه‌گیری کردند؛ سپس میدان سرعت سطح را با استفاده از تکنیک تصویربرداری دیجیتالی به دست آوردند. مطالعات آن‌ها بخشی از پروژه IMPACT اروپائی بوده که هدف بررسی فرآیندهای با سیلاب‌های شدید و نامشخص را داشتند. از مجموعه اطلاعات به‌دست‌آمده از تحقیق سوارز و همکارانش در برنامه IMPACT برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی استفاده می‌شود [۱۸].

1. S.Soaes-Frazao

2. Acousti Velocimeter Doppler

سوارز (۲۰۰۷)، به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر شیب بستر بر روی انتشار امواج از روی بستر خشک پرداخت. او این کار را با استفاده از یک مثال یک بعدی جریان شکست سد از روی پائین دست با مانع مثلثی انجام داد. در این مطالعه از دو ابزار اندازه گیری برای به دست آوردن تغییرات تراز آب استفاده شد. اولی، سه گیج اندازه گیری تراز آب، برای به دست آوردن تغییرات تراز آب می باشد و دومی استفاده از دوربین های دیجیتالی با سرعت بالا، که از طریق دیوارهای شیشه ای کانال فیلم برداری می شود؛ پروفیل سطح آب با کنار هم قرار دادن تصاویر در نقاط مختلف در طول کانال به دست می آید. گیج سنج ها تراز آب را در چند نقطه اندازه گیری، نشان می دهند در حالی که تصویر برداری دیجیتالی پروفیل سطح را مشخص می کند. در نهایت این روش با موفقیت با مقایسه با نتایج گیج ها، اعتبار سنجی شد [۱۹].



شکل ۲-۲: تصاویر آزمایشگاهی جریان از روی مانع، که با خط سفید مشخص شده است.

فراری<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰، انتشار موج بر روی بستر خشک را بعد از شکست سد بررسی نمودند. آن ها از دو مدل برای مقایسه شبیه سازی پدیده شکست سد استفاده کردند. مدل دوبعدی شکست سد را بر اساس فرضیات آب کم عمق و مدل سه بعدی را بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات

<sup>۱</sup>. Ferrari

هموار (SPH) توسعه دادند. مدل سه‌بعدی SPH، معادلات ناویر استوکس با تراکم‌پذیری ضعیف را شامل می‌شد که برای تعیین فشار، مدل را قادر به استفاده از معادله حالت Tait به‌جای رابطه پواسون می‌کرد. همچنین مقایسه نتایج نشان داد که نتایج محاسبه‌شده توسط مدل سه‌بعدی SPH نسبت به نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل دوبعدی آب کم‌عمق، برتری دارند [۲۰].

یانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، جریان‌های شکست سد را با توسعه یک مدل سه‌بعدی که معادلات پیوستگی و معادلات میانگین‌گیری رینولدز ناویر استوکس (RANS<sup>۲</sup>) را با استفاده از روش تفاضل محدود در شبکه استگرد کارترین حل می‌کند، مطالعه کردند. آن‌ها تکنیک حجم سیال (VOF<sup>۳</sup>)، را برای به دست آوردن سطح آب و مدل K-ε را برای مدل کردن آشفتگی معادلات RANS به کار بردند. هم سرعت و هم فشار در معادلات حاکم با استفاده از روش تصویر دومرحله‌ای به دست می‌آیند. همچنین یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی، برای بررسی مدل عددی اجرا شد [۲۱].

ازمن<sup>۴</sup> و کوکامن<sup>۵</sup> (۲۰۱۰)، به بررسی مراحل اولیه شکست سد از روی بستر خشک پرداختند. آزمایش در یک کانال منشوری هموار با سطح مقطع مستطیلی با طول ۹ متر، عرض ۰٫۳ متر و ارتفاع ۰٫۳۴ متر انجام شد. دریچه را در فاصله ۴٫۶۵ متری از انتهای بالادست کانال قرار دادند و روند شکست سد را با حذف ناگهانی دریچه، شبیه‌سازی کردند. آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مراحل اولیه پروفیل سطح آزاد با استفاده از پردازشگر تصویر دیجیتالی انجام شد. همچنین ویژگی‌های جریان با استفاده از تکنیک‌های اندازه‌گیری ساده و اقتصادی مشخص شدند. در نهایت نتایج آزمایشگاهی را با نتایج برنامه‌های تجاری CFD موجود، با حل معادلات میانگین‌گیری رینولدز ناویر استوکس با مدل آشفتگی K-ε معادلات آب کم‌عمق، مقایسه کردند. اندازه‌گیری و محاسبه پروفیل سطح آزاد در مراحل

---

1. Yang

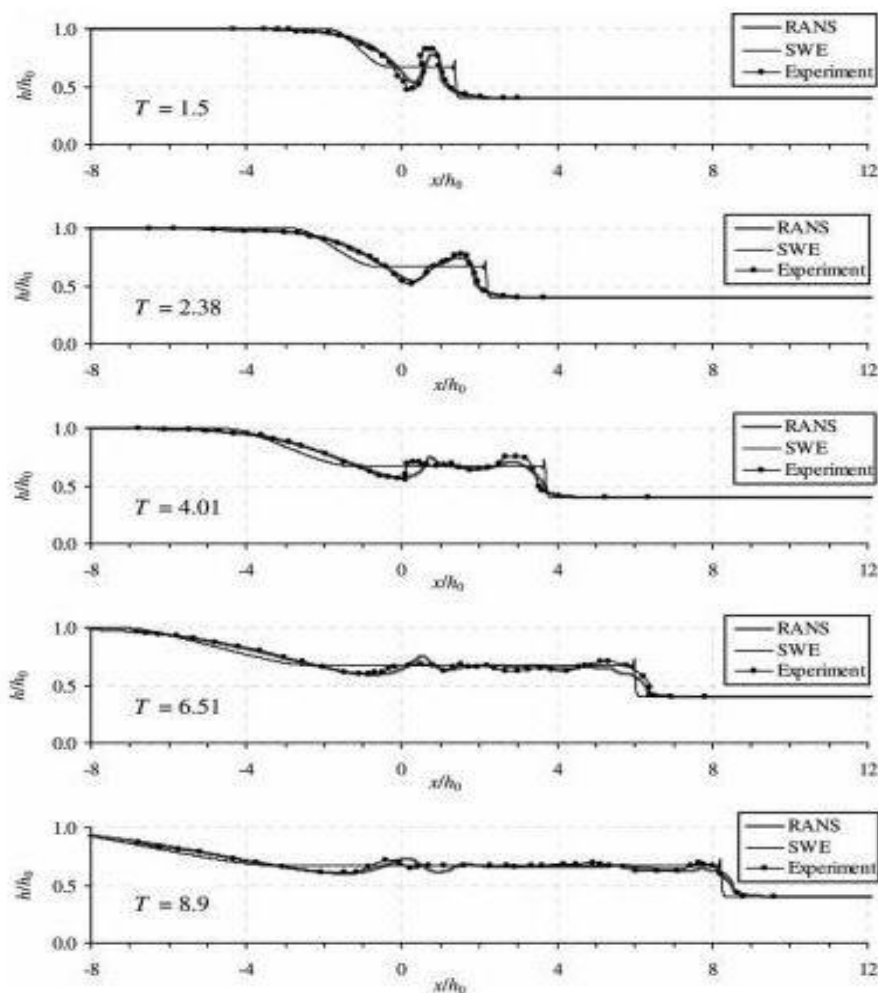
2. Reynolds-averaged Navier–Stokes

3. Volume Of Fluid

4. Ozmen-Cagatay

5. Kocaman

اولیه شکست سد نشان می‌دهد که اگرچه هر دو مدل جریان شکست سد را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کنند، ولی تطابق مدل RANS بهتر است [۲۲].



شکل ۲-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل سطح آب در طول مراحل اولیه شکست سد در زمان‌های

مختلف

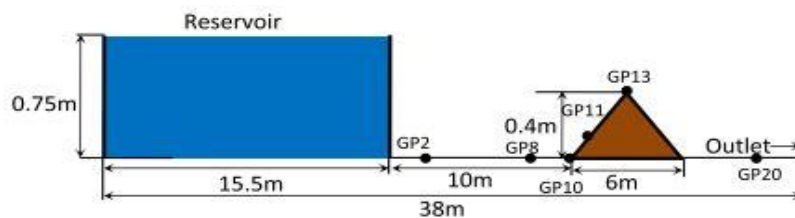
بیسکارینی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰، حل عددی جریان ناشی از شکست سد را با مقایسه مدل شبیه‌سازی شده سه‌بعدی آب‌های کم‌عمق (SWE<sup>۲</sup>) ارائه دادند. تحقیق آن‌ها بر اساس حل معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق با استفاده از روش VOF بوده است. نتایج نشان داد که روش آب‌های کم‌عمق حتی اگر قادر به مدل کردن مناسب جنبه‌های اصلی جریان سیال باشد، بعضی

1. Biscarini

2. Shallow Water Equation

از پدیده‌های سه‌بعدی به‌واسطه ایده آل سازی نادرست جریان کم‌عمق که اثرات سه‌بعدی نیروی ثقل را نادیده می‌پندارد، از دست می‌دهد [۲۳].

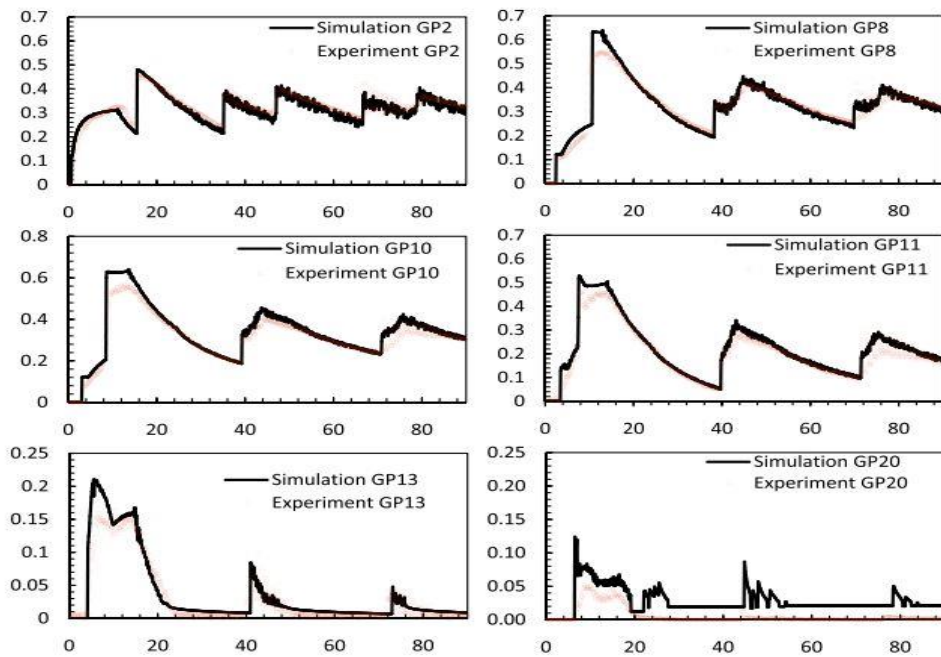
سینگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، مدل دوبعدی را برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد توسعه دادند. مشتقات مکانی با استفاده از روش مرکزی موج بالادست و به‌صورت صریح برای فرم بقائی معادلات انجام‌شده است. این روش فارغ از حل‌کننده ریمن بوده و اگر عدد کورانت کمتر از ۰,۲۵ نگه‌داشته شود مثبت بودن عمق جریان بر روی توپوگرافی‌های پیچیده را تضمین می‌نماید. از روش اوپلری برای انتگرال‌گیری زمانی استفاده‌شده است. برای صحت‌سنجی مدل، نتایج آن با حل تحلیلی برای عمق و دبی، مقایسه شده است و سپس یک مدل آزمایشگاهی که در آن جریان منتشرشده ناشی از شکست سد با یک مانع مثلثی روبرو می‌شود برای مدل دوبعدی شبیه‌سازی‌شده است. همچنین رویداد واقعی شکست سد مالپاسست<sup>۲</sup> فرانسه در سال ۱۹۵۹، شبیه‌سازی‌شده که نتایج رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد. عملکرد این مدل حاکی از توانای آن در شبیه‌سازی امواج شکست سد در موارد واقعی است [۲۴].



شکل ۲-۴: نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی به همراه نقاط اندازه‌گیری

1. Singh

2. Malpasset



شکل ۲-۵: مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی عمق آب در نقاط اندازه‌گیری (GP2-GP20)

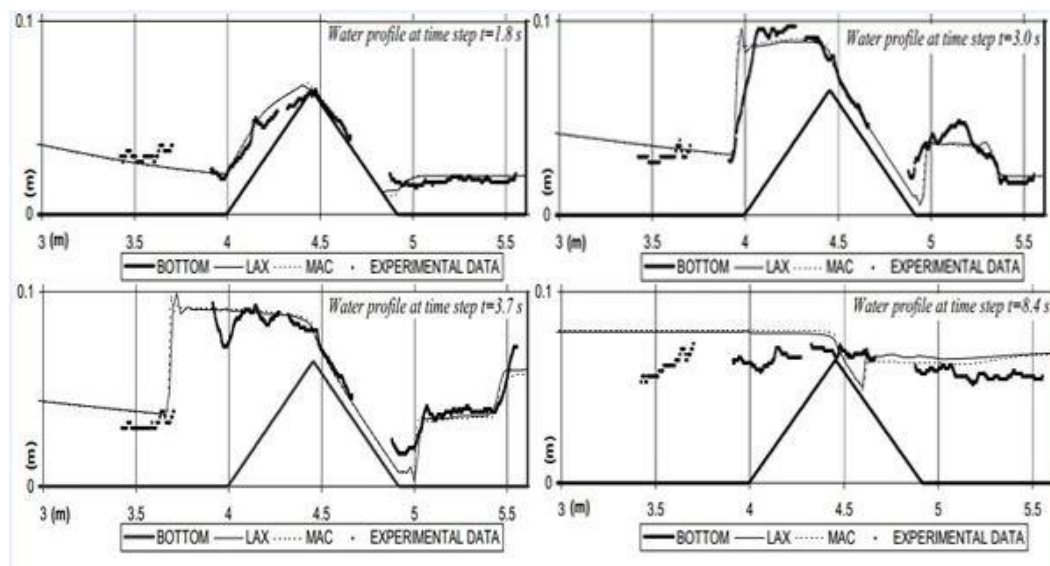
بلوس<sup>۱</sup> و هریسانتو<sup>۲</sup> (۲۰۱۱)، انتشار موج سیلاب ناشی از شکست سد بتن مسلح را با فرض جریان ناپایدار یک‌بعدی، به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. برای این کار، آن‌ها دو مدل عددی بر پایه معادلات یک‌بعدی آب کم‌عمق و معادلات سنت و نانت را به ترتیب با استفاده از روش‌های عددی لاکس-وندروف و مک کورمک<sup>۳</sup>، توسعه دادند. به منظور صحت‌سنجی، نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. آزمایش شامل یک تانک آب به منظور شبیه‌سازی مخزن سد، پائین‌دست با بستر خشک و بستر با مانع مثلثی با شیب بالا و یک آبگیر کوچک آب در حالت راکد که در انتهای دیافراگم عمودی می‌باشد، انجام شد [۲۵].



شکل ۲-۶: نمایی از کانال آزمایشگاهی

1. Bellos  
2. Hrisanthou  
3. McCormack

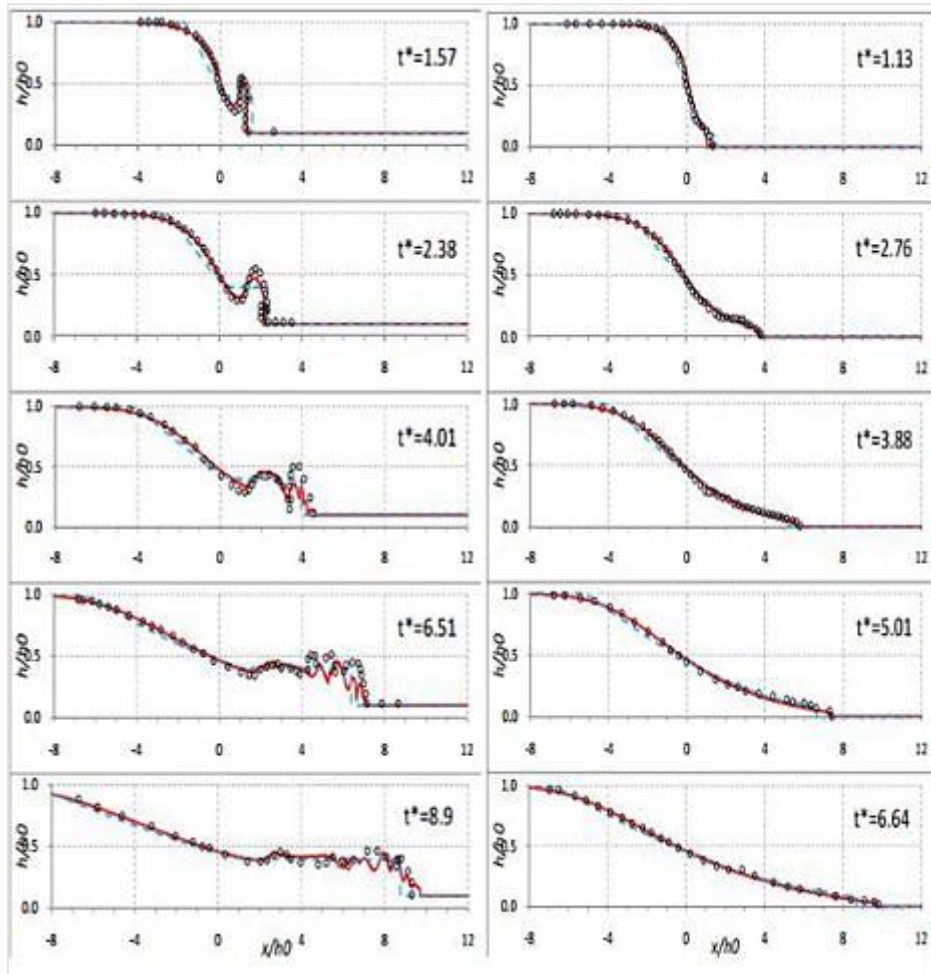
الگوریتم توانست با موفقیت جریان عبوری از روی بستر با مانع مثلثی با شیب زیاد منفی را بدون هیچ نوع ملاحظات پیچیده‌ای شبیه‌سازی کند. آن‌ها با مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی، درجه بالایی از همگرایی را نشان دادند.



شکل ۲-۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل سطح آب در زمان‌های مختلف

مرسولی<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۱)، دو مدل دوبعدی را برای شبیه‌سازی جریان ناپایدار ناشی از شکست سد به کار بردند. اولین مدل که مدل دوبعدی افقی می‌باشد، معادلات آب کم‌عمق را با استفاده از روش Godunov یا حجم محدود موج بالادست حل می‌کند. دومین مدل، مدل دوبعدی عمودی می‌باشد که معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش تفاضل محدود حجم سیال برای به دست آوردن سطح آزاد حل می‌کند. هر دو مدل در مورد امواج شکست سد از روی بستر خشک، بستر مرطوب و بستر با مانع مثلثی مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین نشان داده شد که مدل دوبعدی عمودی می‌تواند تغییرات سطح آب را با جزئیات بیشتری نسبت به مدل دوبعدی افقی بررسی کند. با این حال، هر دو مدل می‌توانند به صورت معقولی، متوسط خواص جریان‌های شکست سد مانند سرعت انتشار موج و ارتفاع متوسط را پیش‌بینی کنند [۲۶].

1. Marsooli

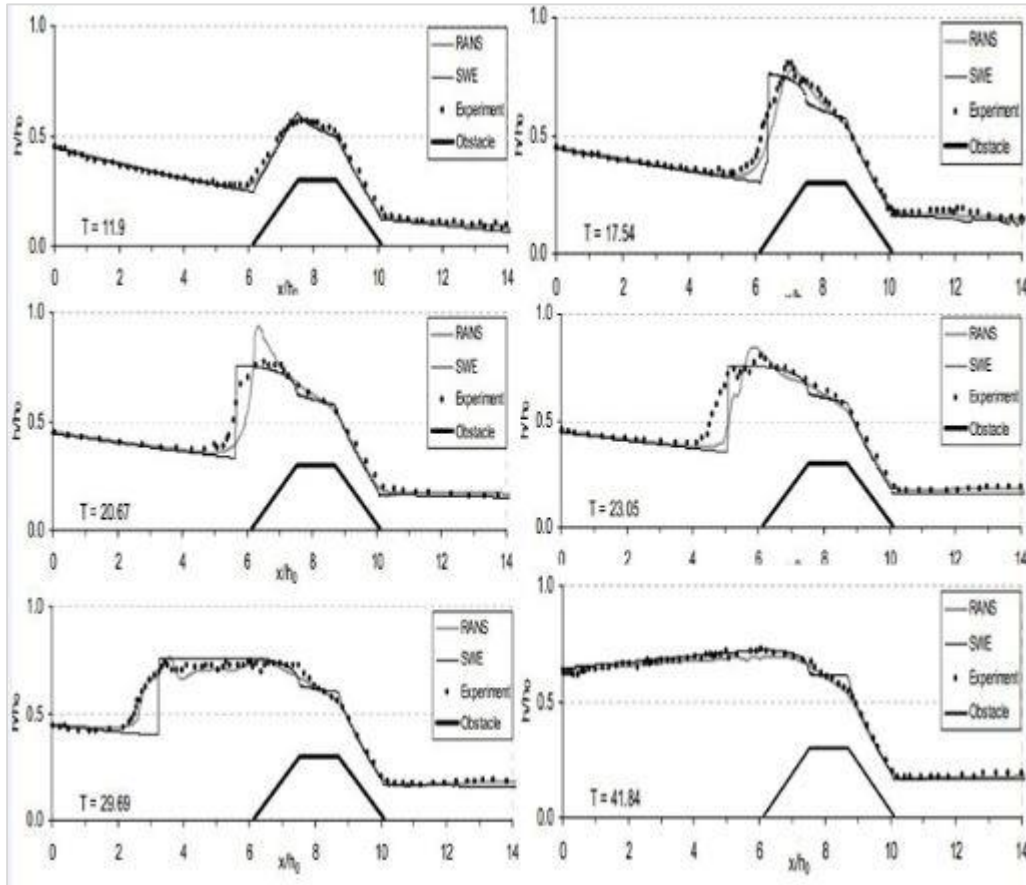


شکل ۲-۸: شکل سمت راست مقایسه نتایج آزمایشگاهی (دایره‌ای) با مدل دوبعدی عمودی (خط ممتد) و مدل دوبعدی افقی (نقطه‌چین) با بستر مرطوب در زمان‌های مختلف، شکل سمت چپ مقایسه نتایج آزمایشگاهی (دایره‌ای) با مدل دوبعدی عمودی (خط ممتد) و مدل دوبعدی افقی (نقطه‌چین) با بستر خشک در زمان‌های مختلف

ازمن و کوکامن (۲۰۱۱)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان شکست سد از روی بستر اولیه خشک با حضور مانع پرداختند. آن‌ها با این آزمایش علاوه بر نشان دادن اثر شیب کف، اثر تغییرات ناگهانی در توپوگرافی کانال را نشان دادند. آزمایش در یک کانال افقی مستطیلی با طول ۸٫۹ متر، عرض ۰٫۳ متر و ارتفاع ۰٫۳۴ متر که یک مانع دوزنقه‌ای متقارن با ارتفاع ۰٫۰۷۵ متر و طول ۱ متر در پائین دست در فاصله ۵٫۳ متری از دریچه قرار دارد، انجام شد. آن‌ها به بررسی شکل‌گیری و انتشار موج منفی در پشت مانع پرداختند. جریان به صورت عددی توسط روش VOF بر اساس برنامه‌های تجاری CFD موجود، Flow-3D، حل معادلات میانگین‌گیری رینولدز ناویر استوکس با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  و معادلات آب کم‌عمق، شبیه‌سازی می‌شود. مقایسه نتایج محاسبه‌شده با داده‌های آزمایشگاهی نشان



می‌دهد که مدل RANS جریان را با دقت قابل قبولی مدل می‌کند درحالی‌که مدل ساده SWE، برخی تناقضات به‌ویژه در انتشار موج منفی را نشان می‌دهد [۲۷].

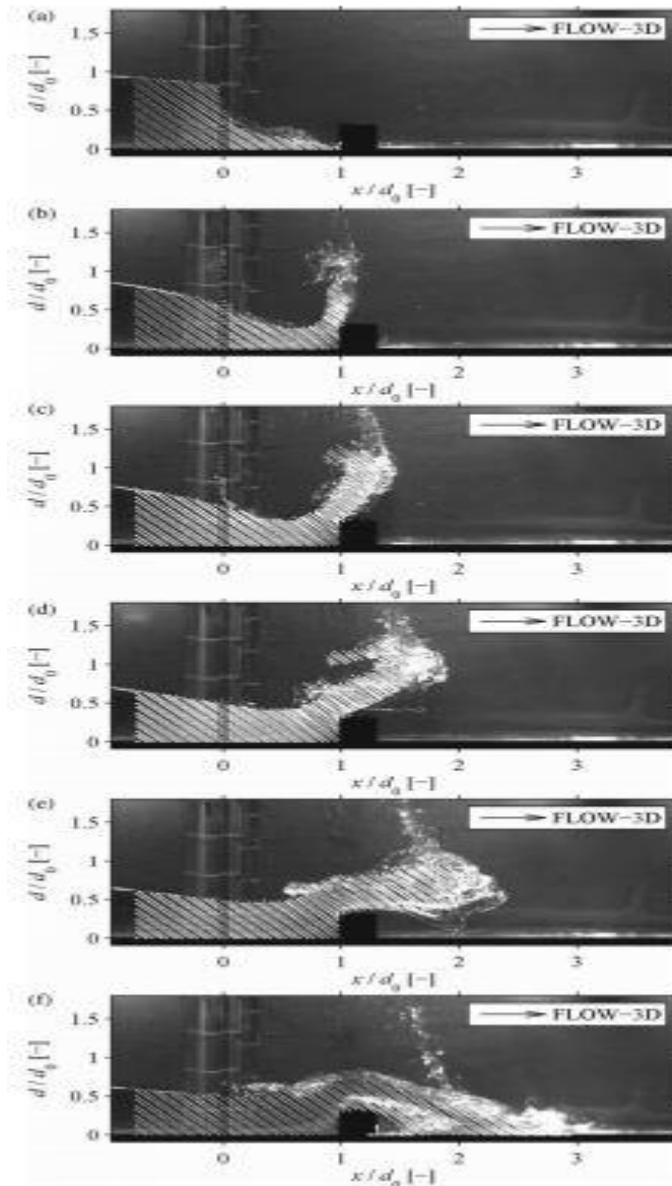


شکل ۲-۹: مقایسه پروفیل سطح آزاد محاسبه‌شده با نتایج آزمایشگاهی در زمان‌های مختلف

ارتل<sup>۱</sup> و بونگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، جریان شکست سد بر روی مانع را به‌صورت دوبعدی، با مدل‌های فیزیکی و عددی بررسی کردند و نتایج را با روش عددی VOF، شامل کد تجاری Flow-3D، مقایسه کردند و مشخص شد که شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل فیزیکی سطح موج و پروفیل‌های سرعت شامل اثرات دریچه، سازگار است؛ درحالی‌که روش‌های تحلیلی قادر به اعمال اثر دریچه نیستند. با قرار دادن مانع در منطقه انتشار سیلاب شکست سد، موج بعد از ضربه به مانع در جهت عمودی تغییر جهت می‌دهد. با ادامه انتشار موج، سرعت در جهت جریان به دلیل وجود مانع، کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر نیروی

1. Oertel  
2. Bung

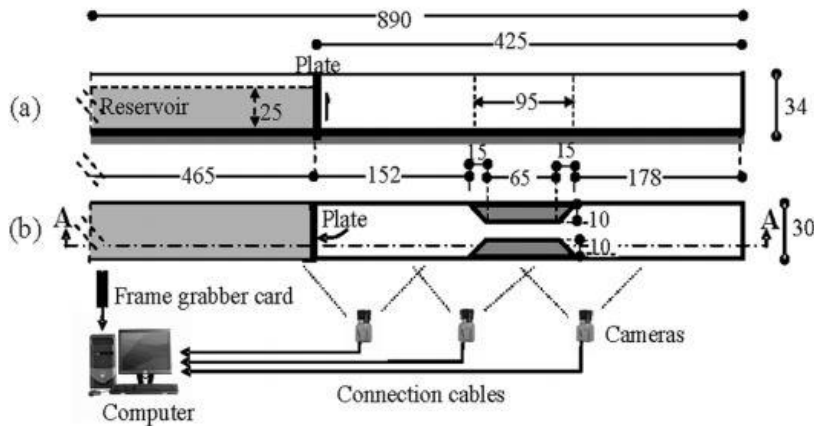
بدون بعد درگ<sup>۱</sup> را نیز توسط روش VOF اندازه‌گیری کردند و مقایسه خوبی را با نتایج مدل فیزیکی نشان داد که منجر به این نتیجه شد که شبیه‌سازی عددی VOF برای امواج شکست سد چه با و چه بدون مانع قرارگرفته در منطقه انتشار سیلاب، به‌خوبی عمل می‌کند [۲۸].



شکل ۲-۱۰: مدل فیزیکی در برابر بردارهای سرعت روش عددی VOF با مانع در منطقه انتشار سیلاب در زمان‌های مختلف

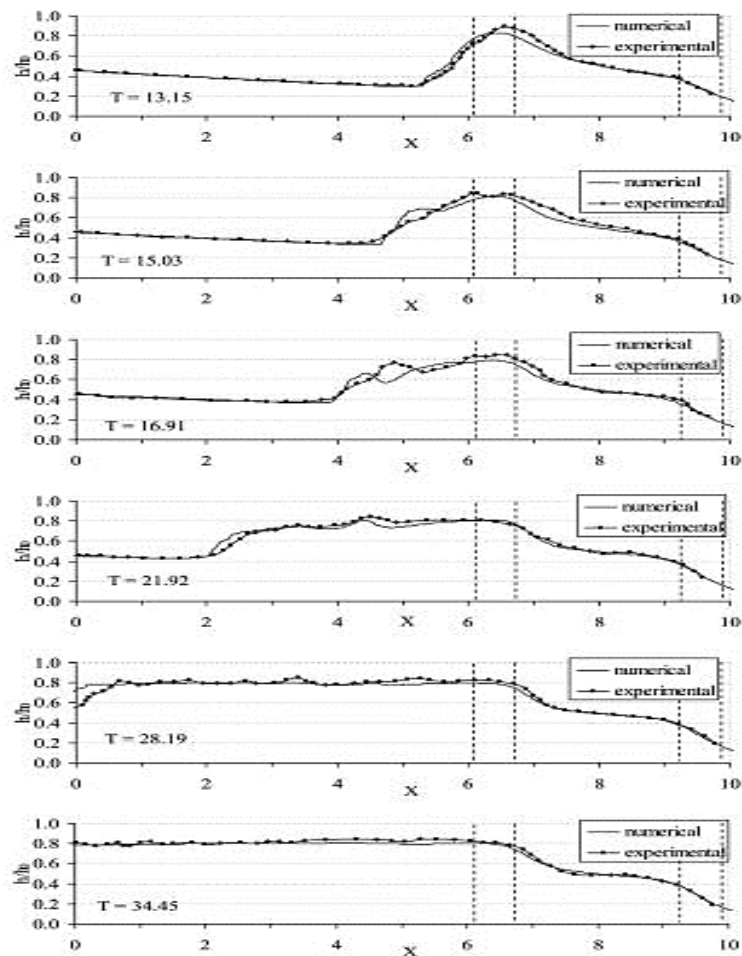
<sup>۱</sup>. Drag

ازمن و کوکامن (۲۰۱۲)، به بررسی جریان شکست سد از روی کانال خشک با انقباض ناگهانی در بخشی از مقطع کانال پرداختند. آزمایش در کانال هموار با سطح مقطع مستطیلی و بستر افقی انجام شد و از تکنیک تصویربرداری دیجیتالی برای اندازه‌گیری جریان استفاده کردند [۲۹].



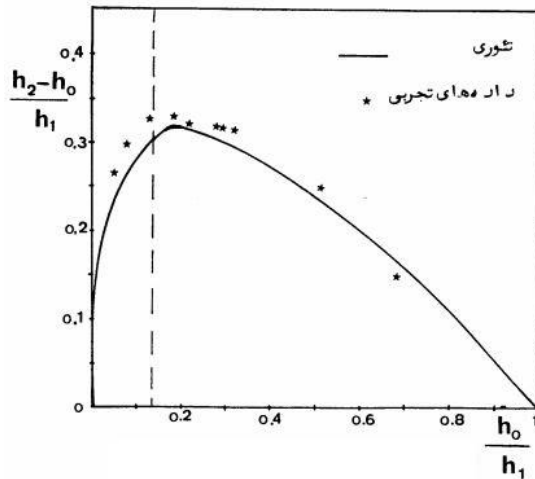
شکل ۲-۱۱: نمایی شماتیک از کانال: (a) برش عرضی (A-A)؛ (b) نمای پلان

آن‌ها با انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند که انقباض ناگهانی در سطح مقطع کانال باعث منعکس شدن قسمتی از امواج سیلاب به سمت انقباض می‌شوند و منجر به تشکیل حفره منفی می‌شود که به سمت بالادست منعکس می‌شود در حالی که بقیه جریان به سمت پائین‌دست حرکت می‌کند. همچنین پرش هیدرولیکی قوی‌ای در ابتدای مانع اتفاق می‌افتد و رژیم جریان ناپایداری در پائین‌دست به علت وجود انقباض ناگهانی در کانال اتفاق می‌افتد. در انتها آن‌ها نتایج اندازه‌گیری شده را با راه‌حل عددی معادلات میانگین‌گیری رینولدز ناویر استوکس با مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  مقایسه کردند و به تطابق خوبی رسیدند.

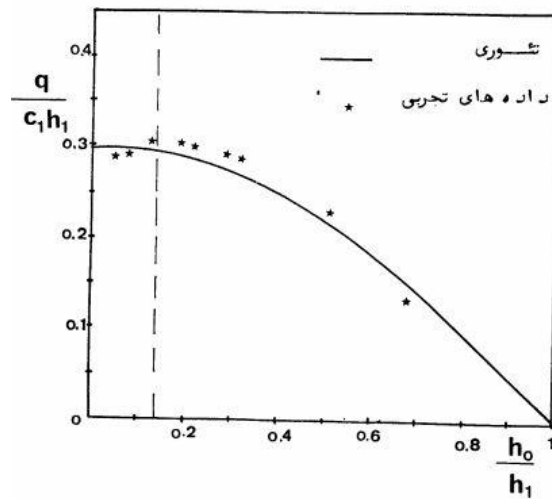


شکل ۲-۱۲: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آزاد در زمان‌های مختلف

یوسف حسن‌زاده (۱۳۷۰)، به بررسی انتشار امواج ناشی از شکست سد پرداخت. به‌منظور تعیین ارتفاع و سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد و پیش‌بینی تغییرات و محاسبه سرعت و دبی جریان سیال، از معادله‌های پیوستگی و دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر گذرا، بدون افت انرژی با بستر پائین‌دست مرطوب استفاده کرد. او برای این کار از روش مشخصه استفاده کرد و به کمک داده‌های تجربی حاصل از یک مدل هیدرولیکی، نتایج به‌دست‌آمده را ارزیابی کرد [۳۰].



شکل ۲-۱۳: تغییرات ارتفاع موج نسبت به ارتفاع در پایاب



شکل ۲-۱۴: تغییرات دبی نسبت به ارتفاع در پایاب

بهرام عباسی و همکاران (۱۳۸۸)، از طریق شبیه‌سازی آزمایشگاهی به بررسی اثر متقابل جریان همزمان سیلاب سریع و موج منفی حاصل از شکست سد در شرایط مختلف ارتفاع ذخیره آب مخزن پرداختند. آن‌ها همچنین اثر شیب و تأثیر حضور رسوبات در مخزن و تغییر دبی و زمان پایه سیلاب‌های ورودی را مورد مطالعه قرار دادند. به منظور برداشت پارامترهای هیدرولیکی همچون عمق جریان و سرعت حرکت و غیره با توجه به ماهیت غیردائمی جریان، برای ثبت نتایج از روش تصویربرداری به‌وسیله دو دوربین دیجیتالی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند با افزایش عمق اولیه ذخیره‌شده در مخزن و افزایش شیب کانال، زمان تخلیه مخزن کاهش می‌یابد و از سوی دیگر وجود رسوبات در مخزن که همچون یک

پله در مسیر جریان ایفای نقش می‌کنند، سرعت حرکت موج مثبت به سمت پائین‌دست را افزایش می‌دهند. با افزایش زمان پایه و حداکثر دبی هیدروگراف‌ها، موجب افزایش عمق در پائین‌دست سد پس از شکست می‌شود [۳۱].

اسدیانی یکتا و بنی‌هاشمی (۱۳۸۹)، روش نیمه-ضمنی را برای شبیه‌سازی دوبعدی مدل شکست سد با استفاده از تکنیک حجم محدود ارائه دادند. در این مدل از شبکه‌بندی متناوب استفاده شده است. آن‌ها در روش تفکیک سازی زمان، دو مرحله پیش‌بینی-اصلاح را برای تعیین فلاکس‌های بین سلولی به کار بردند؛ در مرحله پیش‌بینی از حل‌کننده ریمان و در مرحله اصلاح از طرح دون ویند<sup>۱</sup> استفاده نمودند. سپس به منظور گرفتن ضربه از روش تغییرات کل از بین رونده که در آن تابع محدودکننده مین موند<sup>۲</sup> برای توابع فلاکس بکار گرفته شد، استفاده نمودند. برای حل دستگاه از روش ضمنی ADI استفاده شده است. این مدل همچنین قادر به شبیه‌سازی جریان فوق بحرانی و زیربحرانی می‌باشد [۳۲].

بغلانی (۲۰۱۱)، برای شبیه‌سازی مسئله شکست سد بر اساس روش حجم محدود بر روی شبکه کارتیزین از روش تجزیه بردار فلاکس (FVS<sup>۳</sup>) استفاده نموده است. این روش ترکیبی از روش تجزیه اختلاف فلاکس (FDS<sup>۴</sup>) و روش تجزیه بردار فلاکس می‌باشد، که برای تخمین دقیق فلاکس عددی در مرزهای هر سلول استفاده شده است. برای ارتقاء دقت روش جمله غیرخطی مرتبه دوم، که در مسیرهای مشخصه<sup>۵</sup> به صورت محلی ارزیابی شده به فلاکس‌های تجزیه شده اضافه شده است. آزمون‌های یک‌بعدی و دوبعدی در حالت بستر خشک و مرطوب برای ارزیابی مدل بکار گرفته شده است که نتایج، دقت، کارایی و قدرت روش ارائه شده را نشان می‌دهد [۳۳].

---

1. Downwind

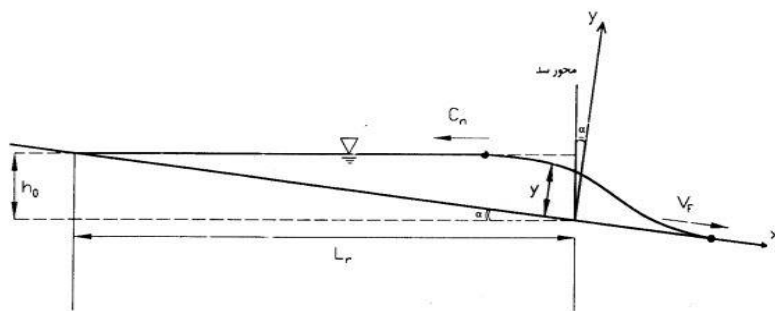
2. Minmond

3. Flux-Vector Splitting

4. Flux-Difference Splitting

5. Characteristics Field

یوسف حسن‌زاده و عطاله رنجینه خجسته (۱۳۸۹)، به بررسی اثرات زبری بستر پایاب در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد از دیدگاه تئوری با اعمال روش مشخصه به شکل بی‌بعد پرداختند و آن را با روش تحلیلی با استفاده از کامپیوتر حل کردند. آن‌ها با بررسی اثرات زبری بستر بر سرعت انتشار امواج حاصل از شکست سد نشان دادند که با افزایش زبری بستر سرعت پیشانی امواج مثبت و خشک‌کننده به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که موج خشک‌کننده از یک‌سو با تأخیر زمانی نسبت به موج مثبت منتشرشده و از سوی دیگر سرعت آن به‌مراتب کمتر از سرعت پیشانی موج مثبت می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از تئوری در مورد سرعت پیشانی امواج مثبت و منفی با داده‌های تجربی نشان دادند که تطابق نسبتاً خوب و معقولی بین روش تحلیلی با داده‌های تجربی می‌باشد [۳۴].



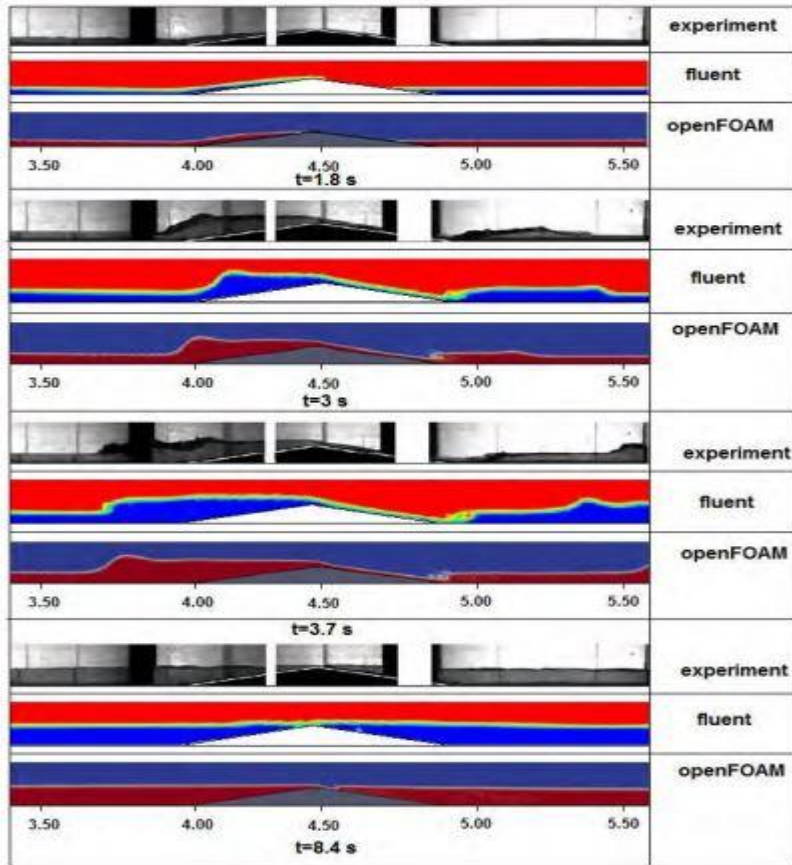
شکل ۲-۱۵: شمای کلی انتشار امواج مثبت و منفی ناشی از شکست کلی یک سد در کانال شیب‌دار

عصمت خوب و سید محمود کاشفی پور (۱۳۹۱)، پدیده شکست سد را به‌صورت آزمایشگاهی در یک کانال افقی مستطیلی با باز شدن ناگهانی یک دریچه سدکننده مسیر جریان مدل کردند. آزمایش‌ها را با استفاده از چهار نوع زبری برای دو عمق در بالادست انجام دادند و نتایج اولیه در قالب فیلم ثبت شده و به تصویر تبدیل شده است. نتایج نهایی مربوط به پیشروی پروفیل موج ناشی از شکست در پائین‌دست دریچه در زمان‌های مختلف و تأثیر زبری بر روی آن در کانال پائین‌دست دریچه در زمان‌های مختلف و تأثیر زبری بر روی آن در کانال پائین‌دست، از استخراج نتایج از تصاویر صورت گرفت. آن‌ها با توجه به پروفیل‌های پیشروی جریان به این نتیجه رسیدند که وجود زبری در پائین‌دست دریچه سبب می‌گردد

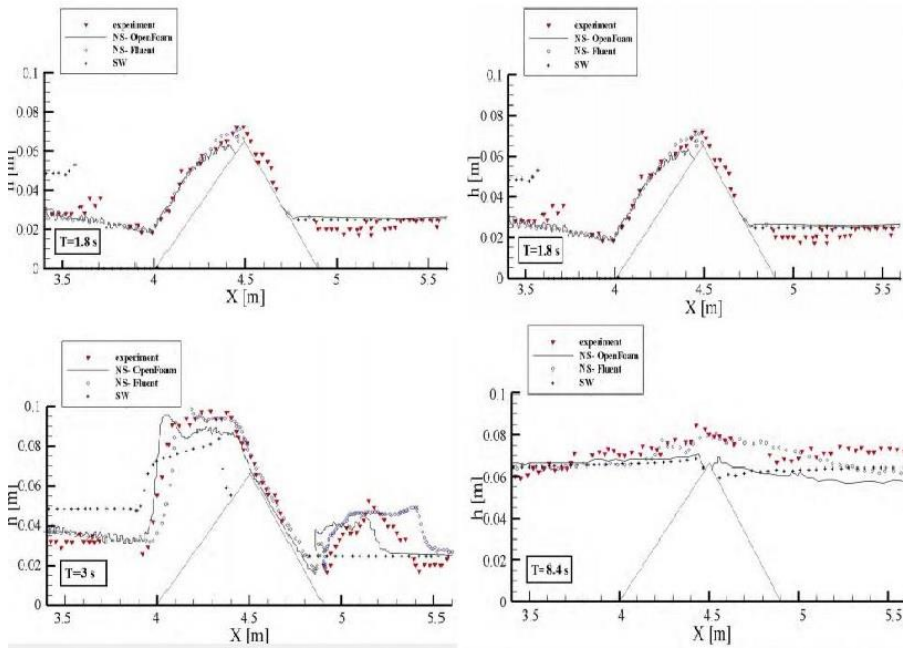
که تأخیر در پیشروی موج حاصل شود و بدنه موج نسبت به بستر صاف، دیگر از حالت همواری برخوردار نباشند و جریان با تشکیل نوساناتی به سمت پائین دست حرکت می‌کند و هیچ‌گونه شکل مشخصی ندارد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان دادند که زبری در زمان‌های بسیار کوتاه و در حد کمتر از دهم ثانیه تأثیر چندانی بر روی شکل موج نداشته اما باگذشت زمان زبری بر روی شکل توسعه موج اثرگذار می‌باشد؛ کاهش عمق در بالادست دریچه نیز مانند تغییر در آرایش و شکل زبری تأثیری مشابه داشته و سبب کاهش سرعت پیشانی موج و ارتفاع پیشانی موج می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و نتایج محققین پیشین بیانگر این است که استفاده از تصویربرداری ابزار مناسبی برای بررسی مشخصات هیدرولیکی سیلاب ناشی از سدها می‌باشد [۳۵].

غلامعباس بارانی و همکاران (۱۳۹۲)، به شبیه‌سازی جریان حاصل از شکست سد روی بستر افقی و باوجود یک مانع مثلثی که در شکل ایده آلی از یک مانع طبیعی است، پرداختند. شبیه‌سازی با روش دوبعدی آب کم‌عمق و روش سه‌بعدی انجام شد. شبیه‌سازی سه‌بعدی بر اساس حل کامل مجموعه معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز می‌باشد که با روش حجم سیال کوپل شده است. برای شبیه‌سازی سه‌بعدی از دو کد مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی Fluent و OpenFOAM و برای شبیه‌سازی دوبعدی آب کم‌عمق از کد محاسباتی CCHE2D استفاده کردند. به‌منظور صحت سنجی مدل‌های عددی استفاده‌شده، نتایج شبیه‌سازی‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روش سه‌بعدی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد اما روش دوبعدی حتی اگر قادر به توصیف مشخصات جریان باشد، به علت چشم‌پوشی از جنبه‌های مربوط به نیروی گرانش، در شبیه‌سازی جزئیات سه‌بعدی جریان توانایی کافی را ندارند [۳۶].





شکل ۲-۱۶: مقایسه نتایج مدل‌های سه‌بعدی و تصاویر آزمایشگاهی



شکل ۲-۱۷: مقایسه نتایج مدل دویبعی آب کم‌عمق، مدل نایبراستوکس با نتایج آزمایشگاهی

بایرامعلی محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۳)، شکست موج و انتشار امواج ناشی از آن را با استفاده از روش عددی حجم محدود به صورت دوبعدی قائم شبیه‌سازی کردند. مدل‌سازی عددی شکست سد در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب و بر اساس اندازه‌های مختلف شبیه‌سازی، مدل‌های مختلف آشفتگی شامل  $k-\epsilon$  Standard،  $k-\epsilon$  RNG،  $k-\epsilon$  Realizable، RSM و  $k-\omega$ ، طرح‌های پیشرو مرتبه اول، پیشرو مرتبه دوم، Quick و Power Law انجام دادند و پس از آزمون صحت و دقت مدل، برای شیب‌های بستر ۰، ۱٪ و ۲٪ و زبری‌های مختلف بستر شامل ۰،۰۰۹، ۰،۰۱۵، ۰،۰۱۸۵، ۰،۰۱۹۸ را مدل‌سازی کردند و پس از ارزیابی نتایج به این نتیجه رسیدند که مدل عددی مورد استفاده، توانایی شبیه‌سازی شکست سد را در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب داشته و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد [۳۷].

## فصل ۳

(( معادلات حاکم ))

### ۳-۱- جایگاه روش‌های عددی

روش‌های ارائه‌شده در حل مسائل دینامیک سیالات معمولاً در ترکیب با یکدیگر می‌توانند بهترین نتایج را در برداشته باشند. در گذشته روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به کمک مهندسان در طراحی می‌آمدند. با پیدایش کامپیوتر، توجه به رویکرد عددی بیشتر شده و امروزه به دلیل محدودیت‌هایی که روش‌های دیگر دارند، پیشرفت روزافزون فناوری‌های دیجیتال و ظهور نرم‌افزارهای تجاری برای تحلیل عددی دینامیک سیالات، تمایل بیشتری به سمت به‌کارگیری روش‌های عددی وجود دارد. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> یا به‌طور خلاصه CFD علاوه بر این‌که به‌طور کاربردی در طراحی‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، موضوع بیشترین مقالات و تحقیقات در زمینه دینامیک سیالات است.

### ۳-۱-۱- روش‌های عددی شبکه محور

در این نوع از روش‌های عددی، معادلات حاکم معمولاً به کمک تقسیم‌بندی<sup>۲</sup> محدوده مورد بررسی به المان‌هایی متشکل از شبکه<sup>۳</sup> یا مش<sup>۴</sup> حل می‌شوند. رابطه میان گره‌های حاصل از این مش‌بندی است که امکان درون‌یابی یا تقریب تابع‌های مجهول متغیرهای میدان را فراهم می‌کند. چنانچه هر یک از گره‌های حاصل از این تقسیم‌بندی به نقطه‌ی خاصی از سیال یا ماده‌ی مورد مطالعه متصل شده باشند، رویکرد مورد نظر در حل عددی لاگرانژی خواهد بود. روش المان محدود<sup>۵</sup> (FEM) مشهورترین روشی است که رویکرد لاگرانژی در دستور کارش قرار دارد و امروزه بیشترین کاربرد را در پیشبرد تکنولوژی دارد. اگر در طول زمان تحلیل، گره‌ها و شبکه‌ها در نقاط خاصی از فضا ثابت نگه‌داشته شوند، رویکرد استفاده‌شده در حل عددی، اویلری است که روش متداول با این رویکرد تفاضل محدود<sup>۶</sup> (FDM) است.

---

1. Computational Fluid Dynamics

2. Discretization

3. Grid

4. Mesh

5. Finite Element Method

6. Finite Difference Method

روش‌های شبکه محور بیشترین کاربرد را در حل مسائل مختلف عددی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مکانیک سیالات داشته و دارند؛ اما به دلایل محدودیت‌هایی که هر یک در تحلیل بعضی از پدیده‌های طبیعی از خود نشان می‌دهند، رفته‌رفته گرایش به سمت رویکردی جامع‌تر در تحلیل عددی به وجود آمد که دیگر در آن از شبکه‌بندی خبری نیست.

### ۳-۱-۱-۱ - محدودیت‌های روش‌های شبکه محور

#### روش‌های لاگرانژی

مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های لاگرانژی تا آنجا که با مکانیک سیالات سروکار دارند عبارت هستند از:

- دشواری در نحوه‌ی مش‌بندی در مسائل با هندسه پیچیده همیشه به‌عنوان یک معضل در این روش‌ها به حساب می‌آید.
- بروز خطا و قطع محاسبات یا کاهش چشم‌گیر دقت در نتایج در حالتی که تغییر شکل‌های زیاد در مدل ایجاد شود.
- لزوم به‌کارگیری المان‌های ریزتر و در نتیجه زمان‌گیر شدن محاسبات در مواردی که تغییرات گرادیان زیاد باشد یا المان‌ها ویژگی‌های محلی خاصی داشته باشند (برخورد، نفوذ، انفجار، موانع جریان و اندرکنش سازه و آب). در این‌گونه موارد به‌کارگیری روش‌های تطبیقی ضروری می‌شود که به دلیل پیچیدگی هندسه‌ی مدل و اصلاح ساختار مش‌بندی آسان نیست.
- درون‌یابی مراتب بالاتر توابع، دشوار است.

#### روش‌های اویلری

مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های اویلری تا آنجا که با مکانیک سیالات سروکار دارند عبارت هستند

از:

- عدم سهولت در دستیابی به تاریخچه زمانی متغیرهای هر جزء از ماده مورد مطالعه و نیز عدم وجود دقت کافی در تعیین سطح آزاد، مرزهای تغییر شکل پذیر و سطوح مشترک متحرک به دلیل ثابت بودن شبکه.
- مش بندی برای مسائلی با هندسه پیچیده و نامنظم مشکل است.
- ضرورت ایجاد شبکه های درشت تر و در نتیجه کاهش دقت در محاسبات در حالت هایی که امکان حرکت جریان در مقیاس بزرگی وجود داشته باشد.

از آنجاکه محدودیت های هر یک از دو رویکرد فوق در دیگری وجود ندارد، روش هایی به وجود آمدند که از ترکیب این دو رویکرد بهره می برند؛ اما پیچیدگی و در بسیاری از موارد، ناکارا بودن این روش ها ضرورت جستجو برای نسل بعدی روش های محاسباتی یعنی روش های بدون شبکه را بیشتر نمودار ساخت.

### ۳-۱-۲- روش های عددی بدون شبکه

به کارگیری شبکه، ابزاری برای مدل سازی عددی است و در روند حل مسائل با استفاده از روش های بدون شبکه، از شبکه های از پیش تعیین شده استفاده نمی شود. در این نوع روش ها، فرض می شود سیستم از گره های متعددی تشکیل شده که در دامنه آن گسترش یافته اند و برای درون یابی نیازی به وجود رابطه ای میان گره ها وجود ندارد. مسائلی چون عدم همپوشانی و نبود فاصله بین المان ها برخلاف روش های شبکه محور در مورد گره های میدان مطرح نیست و به اطلاعاتی از قبیل پیوستگی المان ها نیازی احساس نمی شود.

پس از ایجاد گره ها، توابعی برای متغیرهای میدان تعریف می شود. این توابع نمایانگر روابط درون یابی متغیرهای میدان هستند و به صورت کلی برای هر نقطه به این ترتیب تعریف می شوند:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) u_i = \varphi^T(x) U_s \quad (1-3)$$

در این رابطه،  $n$  تعداد گره‌هایی است که بر ذره مورد نظر تأثیر می‌گذارند یا به عبارت دیگر در دامنه تأثیر<sup>۱</sup> آن قرار دارند. بدین معنا که ذراتی که خارج از این محدوده قرار می‌گیرند، اثری بر روی تابع ندارند.  $u_i$  متغیر میدان در نقطه نام  $U_s$  برداری است که شامل همه متغیرها در  $n$  گره مورد نظر می‌شود.  $\varphi_i$  نیز با عنوان تابع شکل تعریف می‌شود و بر مبنای گره‌های موجود در دامنه تأثیر تعیین می‌شود.

با استفاده از روش‌های بدون شبکه، محدودیت‌های روش‌های شبکه محور از بین می‌روند. به علاوه روش‌های بدون شبکه خصلت انعطاف‌پذیری زیادی در مواجهه با انواع پدیده‌ها دارند. بسیاری از روش‌های بدون شبکه کاربردهای متنوعی یافته‌اند و برای تبدیل شدن به ابزار عددی قدرتمند پتانسیل بالایی از خود نشان داده‌اند. با این همه، این نوع رویکرد هنوز در مراحل اولیه پیشرفت خود قرار دارد و مسائل و مشکلات زیادی را باید تا تبدیل شدن به ابزاری قدرتمند در حل مسائل پیچیده مهندسی، حل کند.

تعدادی از روش‌های بدون شبکه در جدول (۳-۱) داده شده است. این لیست توسط لیو در سال ۲۰۰۳ منتشر شد [۳۸]. جالب این است که اکثر این روش‌ها در سال ۱۹۹۰ توسعه یافتند؛ آن‌ها در مقایسه با روش المان محدود که اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسعه پیدا کرد، کاملاً تازه و نوین هستند.

جدول ۳-۱-۲: برخی روش‌های بدون شبکه

روش	اولین سال انتشار
روش المان آزاد گالرکین	۱۹۹۴
روش محلی بدون مش پترو- گالرکین	۱۹۹۸
روش درون‌یابی نقطه	۱۹۹۹
روش assembly نقطه	۱۹۹۹
روش نقطه محدود	۱۹۹۶
هیدرودینامیک ذرات هموار	۱۹۷۷
روش المان منتشرشده	۱۹۹۲

<sup>1</sup>. Support Domain

### ۳-۱-۳- روش‌های ذرات

روش‌های ذرات بدون شبکه، یک مجموعه در حال رشد از روش‌های مورد استفاده برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی می‌باشد. این روش‌ها برای حل مسائل جدی مانند جریان‌های چندگانه، حرکت سطح مشترک مواد، مرزهای تغییر شکل‌پذیر و جریان‌های سطح آزاد بسیار مفید هستند، در حالی که اغلب روش‌های معمولی بر اساس شبکه شکست می‌خورند.

روش‌های ذرات، ابزار محاسباتی قوی و آسانی برای شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی پیوسته و گسسته اعم از مکانیک سیالات تا علوم زیست‌شناسی و اجتماعی می‌باشند. در مسائل همرفتی، روش‌های ذرات را با توجه به ماهیت مستحکم، پایداری و لاگرانژی بودن آن‌ها، می‌توان به‌عنوان روشی مناسب در نظر گرفت [۳۹].

### ۳-۲-۳- روش SPH

هیدرودینامیک ذرات هموار، یک روش کاملاً بدون شبکه و لاگرانژی می‌باشد که در آن سیستم توسط مجموعه‌ای از ذرات با مشخصات آن مشخص می‌شود و با توجه به معادلات حاکم حرکت می‌کنند. طیف گسترده‌ای از فرمول‌های لاگرانژی برای محاسبه چگالی، فشار، شتاب و سرعت سیال ارائه شده است. SPH اولین بار در مسائل اختر فیزیکی استفاده شد [۴۰ و ۴۱] و سپس به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفت و در زمینه‌های دیگر از جمله جریان سیال با تغییر شکل غیرخطی بزرگ توسعه پیدا کرد [۴۲]. این روش برای حدود ۱۰ سال تنها برای مسائل اختر فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفت [۴۳]. امروزه SPH در طیف وسیعی از مسائل فیزیک و مهندسی، از مکانیک جامدات تا جریان‌های چند فازه استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت لاگرانژی، SPH برای تغییر شکل‌های بسیار بزرگ و گسسته، بسیار مناسب می‌باشد. معادلات جرم، مومنتوم و انرژی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشد که برای درک و حل بسیار آسان می‌باشد. برای مثال نیروی بین جفت ذرات ناشی از گرادیان فشار [۴۴].



### ۳-۲-۱-پیشینه روش SPH

SPH را می‌توان قدیمی‌ترین روش مدرن بدون شبکه نامید. گینگلد<sup>۱</sup> و موناگان<sup>۲</sup> [۴۵]، به‌طور مشترک و لوسی<sup>۳</sup> [۴۰]، به‌طور جداگانه در مقالاتی اساس این روش را پی‌ریزی کردند. در ابتدا این روش به‌منظور حل مسائل سه‌بعدی اخت‌فیزیک<sup>۴</sup> و اجرام آسمانی ارائه شد. در این روش، به دلیل شباهت حرکت کلی و جمعی اجرام آسمانی به جریان سیال از معادلات حاکم بر هیدرودینامیک کلاسیک نیوتنی بهره گرفته شد که خود دلیلی بر نحوه نام‌گذاری روش است.

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه دقت، کارایی، پایداری<sup>۵</sup> و دیگر مسائل، پیرامون SPH صورت پذیرفته و نیز اصلاحاتی در جهت بهبود قابلیت‌های آن ارائه شده است. به‌علاوه در بسیاری از زمینه‌ها، SPH کاربردهای خود را پیدا کرده است. علاوه بر کاربرد و پیشرفت در زمینه اولیه آن یعنی اجرام فضایی، امروزه طیف وسیعی از مسائل مکانیک سیالات و جامدات با استفاده از این رویکرد مورد بررسی قرار می‌گیرند. دامنه این روش علاوه بر پدیده‌های مهندسی، برخی از مسائل علوم پزشکی نظیر جریان خون را نیز در برمی‌گیرد.

یکی از اولین مطالعات موناگان در مورد جریان دوبعدی شکست سد به روش SPH بوده است [۴۶]. پس‌از آن از این روش برای مدل‌سازی شکست سه‌بعدی سد با توپوگرافی واقعی از طریق مدل دیجیتالی منطقه (DTM<sup>۶</sup>) استفاده شد و نشان دادند که شبیه‌سازی سیلاب‌ها در مقیاس بزرگ ناشی از حوادث شکست سد با SPH، عملی خواهد بود [۴۷]. اصل بقای جرم در روش SPH با دقت خوبی رعایت شده است و از این‌رو قابلیت خوبی در حل مسائل مربوط به سطوح آزاد و حرکت سطح مشترک خواهد داشت [۳۸].

---

1. Gingold  
2. Monaghan  
3. Lucy  
4. Astrophysics  
5. Stability  
6. Digital Terrain Model

ونگ و شین (۱۹۹۹)، SPH را برای جریان‌های لزج یک‌بعدی شکست سد به کاربرند [۴۸]. اتا و سلیمانی، (۲۰۰۵)، از یک روش بر اساس حلگر ریمان، برای ارائه روش SPH پایدار شده برای جریان‌های آب کم‌عمق دوبعدی لزج استفاده کردند [۴۹]. لفه و همکارانش (۲۰۱۰)، از یک کرنل ناهمسان برای اجرای مدل‌سازی SPH دوبعدی جریان‌های ساحلی آب کم‌عمق استفاده کردند [۵۰]. بعدها چانگ و همکارانش (۲۰۱۱)، SPH را برای بررسی جریان‌های یک‌بعدی آب کم‌عمق شکست سد در کانال‌های باز واقعی توسعه دادند [۵۱].

### ۳-۲-۲- مزیت‌های روش SPH

درمجموع SPH پتانسیل بسیار خوبی در حل بسیاری از مسائل مهندسی و علوم دارد. SPH دارای مزایای برجسته‌ای نسبت به مدل‌های عددی بر اساس شبکه‌های متداول، در رفتار با مسائلی از جمله تغییر شکل‌های بزرگ، بررسی سطح آزاد، سطح مشترک در حال حرکت، مرزهای تغییر شکل‌پذیر، حل ناپیوستگی‌های متحرک مانند ترک‌ها و امواج ضربه دارد. انگیزه ایجاد روش SPH، نیاز به حل مسائل پیچیده‌ای می‌باشد که روش‌های سنتی بر پایه شبکه اوپلری (مانند روش‌های تفاضل محدود، المان محدود یا روش‌های حجم محدود) توانایی انجام آن را به‌آسانی ندارند. مشکلات هنگامی که این روش‌های مبتنی بر شبکه، برای حل مسائل شامل سطح آزاد، مرزهای تغییر شکل‌پذیر و مسائل مربوط به تغییر شکل استفاده می‌شوند، بروز می‌دهد. علاوه بر این، هنگامی که دامنه محاسباتی پیچیده می‌باشد، همیشه ایجاد شبکه‌ها برای روش‌های بر اساس شبکه که تمام بی‌نظمی‌های دامنه در آن به حساب می‌آید، روشن و واضح نیست حتی اگر از روش‌هایی مانند تجزیه دامنه استفاده شود.

در اینجا خلاصه‌ای از مزیت‌های روش SPH نسبت به روش‌های متداول دیگر مانند FDM، به صورت طبقه‌بندی شده بیان می‌شود [۵۲].

- روش SPH یک روش بدون شبکه می‌باشد؛ این به این معنا است که نیاز به شبکه‌ای نیست. در واقع یک شبکه ممکن است برای ذرات اولیه و پیدا کردن همسایگان آن مورد نیاز

باشد. اگرچه آن شبکه‌ها با زمان تغییر نمی‌کنند. یک مشکل بزرگ برای روش‌های بر اساس شبکه مانند FEM، اعوجاج و تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. در واقع زمانی که شبکه بسیار تغییر کند، صحت و درستی نتایج کمتر می‌شود و بازسازی شبکه ضروری می‌باشد. این عمل می‌تواند زمان زیادی از CPU بگیرد و همچنین ممکن است به خوبی اجرا نشود. برای روش FDM، به منظور ارزیابی صحیح مشتقات مکانی، سلول‌ها باید منظم باشند. اگر هندسه پیچیده‌ای داشته باشیم، بنابراین داشتن شبکه منظم ساده نیست و یا حتی غیرممکن است. روش‌های بدون شبکه، مسائل و مشکلات مربوط به استفاده از شبکه ثابت را ندارند.

- روش SPH یک روش ذرات لاگرانژی می‌باشد. سیال توسط مجموعه‌ای از ذرات نمایش داده می‌شود. این ذرات حاوی اطلاعاتی مربوط به حالت و شرایط خود می‌باشند. هر ذره با توجه به فاصله آن تا ذره دیگر، بر هم اثر می‌گذارند. مزیت روش ذرات نسبت به روش‌های متداول و مرسوم این است که ذرات به راحتی می‌توانند از سیال جدا شوند. نشان دادن این رفتار سیال بر اساس روش‌های مبتنی بر شبکه غیرممکن می‌باشد. به طور کلی، ناپیوستگی را توسط  $MPM^1$  بهتر می‌توان نشان داد.
- همچنین ویژگی لاگرانژی روش SPH اجازه پیروی از مسیر ذرات را می‌دهد. این امکان می‌تواند برای مسائلی که چندین سیال مخلوط باهم درگیر هستند، مناسب باشد.

### ۳-۲-۳- معایب SPH

به طور کلی SPH در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر شبکه روند محاسباتی کندتری دارد. فرض تراکم‌پذیری ضعیف در مسئله مکانیک سیالات، گام زمانی را به سرعت صوت مربوط می‌سازد؛ سرعت بالاتر صوت، گام زمانی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همچنین اجرای شرایط مرزی هنوز هم

---

<sup>1</sup>. Meshfree particle method

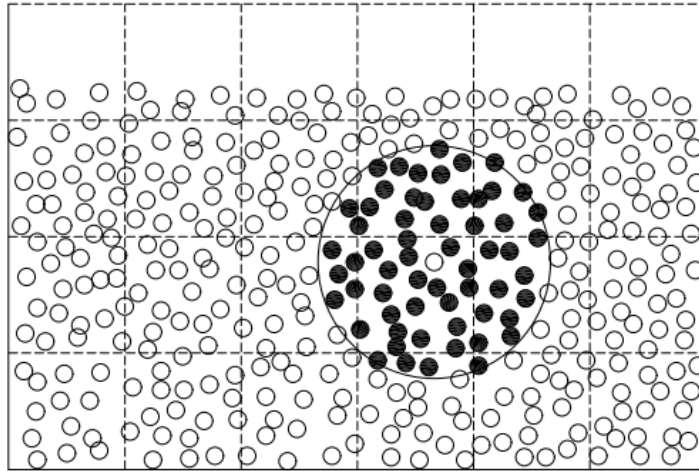
دشوار است و به اندازه کافی دقیق نیست و برخی روش‌ها، مشکل نفوذ ذرات سیال به داخل مرزها را دارند. آشفتگی ذرات به‌طور جدی، روش‌های متداول درون‌یابی در SPH را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. اگرچه SPH نتایج منطقی را برای مشتق مرتبه اول ارائه می‌کند اما بونت و لوک<sup>۱</sup> [۵۳]، تصحیح گرادیان را پیشنهاد کردند. هنگامی که مشتقات مرتبه بالاتری وجود دارد، توصیه می‌شود که از تکنیک‌های ویژه‌ای استفاده شود [۵۴].

### ۳-۳- اصول روش SPH

در SPH به‌مانند دیگر روش‌های بدون شبکه با جایگزین کردن سیستم موردنظر با مجموعه‌ای از ذرات (اگر سیستم خود گسسته نباشد)، فرآیند مدل‌سازی عددی آغاز می‌شود (شکل ۳-۱). کاربرد ذرات در این روش از دو منظر فیزیکی و ریاضی قابل بررسی است. از نظر ریاضی کاربرد ذرات تقریباً همان نقشی است که گره‌ها ایفا می‌کنند و به عبارت ساده‌تر، ذرات بستری برای تقریب و درون‌یابی ویژگی‌های سیال فراهم می‌آورند. از نظر فیزیکی این ذرات مانند هر ذره‌ی دیگری دارای مشخصات فیزیکی هستند، یعنی چنانچه سیستم موردنظر جریان آب باشد، آب به مجموعه‌ای از ذرات تبدیل می‌شود که هر کدام دارای ویژگی‌هایی چون سرعت، موقعیت، دانسیته و غیره هستند. این ویژگی‌ها با اعمال تکنیک‌های درون‌یابی با ذرات دیگر به‌نوعی در تعامل قرار می‌گیرند.

---

<sup>1</sup>. Bonet and Lok



شکل ۳-۱: تبدیل میدان حل به ذرات با ابعاد مناسب

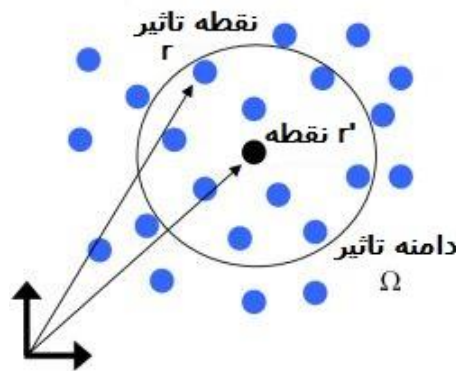
هرچند ایده استفاده از ذرات در تحلیل عددی پدیده‌های هیدرودینامیکی منطقی به نظر می‌رسد، اما آنچه در ابهام قرار می‌گیرد، نحوه مناسب اندرکنش ذرات است به گونه‌ای که بتواند معادلات مربوط به دینامیک سیال یا هر محیط پیوسته یا گسسته دیگری را بازتولید و منعکس سازد. تکنیکی که در درون‌یابی توابع در SPH مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کارگیری از تخمین کرنل است که این روش توسط متخصصان آمار به منظور تخمین چگالی احتمال برای داده‌ها ابداع شده بود. با استفاده از این تکنیک در درون‌یابی این امکان فراهم می‌شود تا با داشتن مقادیر یک تابع در نقاط مختلف، مقدار آن در هر نقطه تخمین زده شود. به علاوه مشتق‌گیری از این تابع تخمینی، تنها نیازمند مشتق‌پذیر بودن تابع کرنل است.

### ۳-۳-۱- درونیاب‌های انتگرال

SPH بر پایه درونیاب‌های انتگرال می‌باشد. اصل اساسی تقریب هر تابع  $A(r)$  توسط (تقریب کرنل):

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(r - r', h) dr' \quad (۲-۳)$$

می‌باشد؛ که در آن  $r$  بردار موقعیت می‌باشد؛  $W$  تابع وزن دار یا کرنل می‌باشد؛  $h$  طول هموار نامیده می‌شود و دامنه تأثیر  $\Omega$  را کنترل می‌کند (شکل ۳-۲). معمولاً مقدار  $h$  باید بزرگ‌تر از فاصله اولیه ذرات باشد.



شکل ۳-۲: نمایی از دامنه تأثیر

تقریب (۳-۲)، در نماد گسسته، منجر به تقریب زیر از تابع در ذره  $a$ ، (تقریب ذره) می‌شود:

$$A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (3-3)$$

جرم و چگالی به ترتیب توسط  $m_b$  و  $\rho_b$  نشان داده می‌شوند و  $W_{ab} = W(r_a - r_b, h)$ ، تابع وزن یا کرنل می‌باشد.

یکی از مزایای رویکرد کرنل SPH، این است که مشتق تابع در مقایسه با روش‌هایی مانند تفاضل محدود که مشتقات توسط نقاط مجاور با استفاده از فضای بین آن‌ها محاسبه می‌شود، به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. برای ذرات قرار گرفته نامنظم SPH، این می‌تواند بسیار پیچیده باشد. مشتقات این درون‌یابی را می‌توان با تفکیک و گسسته سازی معمولی به دست آورد که دیگر نه روش تفاضل محدود نیاز است و نه شبکه استفاده می‌شود.

$$\nabla A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} \nabla W_{ab} \quad (4-3)$$

در نتیجه، این معادله با اجرای انتگرال در معادله (۳-۲) برای یک مشتق تابعی و به کار بردن انتگرال جزئی به دست می‌آید.

### ۳-۳-۲- توابع کرنل و شرایط عمومی آن

با نگاهی عمیق‌تر به مفهوم تابع کرنل می‌توان دریافت، برای این که کرنل بتواند نقش یک تابع وزنی را در میانگین‌گیری توابع میدان ایفا کند، باید دارای شرایطی که در ادامه می‌آید باشد:

- مانند هر تابع وزنی دیگری، کرنل نیز باید در دامنه مسئله دارای انتگرال واحد<sup>۱</sup> باشد:

$$\int_{\Omega} W(r - r', h) dr' = 1 \quad (۵-۳)$$

- برای محدود کردن دامنه ذرات متأثر بر یکدیگر، متغیری به نام  $h$  (طول تأثیر) در تابع کرنل تعریف می‌شود. مقادیر تابع میدان در خارج از حوزه تأثیر یک‌ذره باید برابر صفر در نظر گرفته شود:

$$W(r - r', h) = 0, \text{ for } |x - x'| > kh \quad (۶-۳)$$

به این شرط در اصطلاح فشردگی<sup>۲</sup> اطلاق می‌شود.  $k$  دارای مقداری بزرگ‌تر از ۱ است و معمولاً برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

- تابع کرنل باید همواره مثبت باشد. منفی شدن کرنل از نظر ریاضی برای رسیدن به همگرایی مشکلی به وجود نمی‌آورد، اما مفهوم فیزیکی مسئله را زیر سؤال می‌برد.

$$W(r - r', h) \geq 0 \quad (۷-۳)$$

- مقدار تابع کرنل برای یک‌ذره با افزایش فاصله از آن کاهش می‌یابد. درک این مفهوم با توجه به این که با افزایش تأثیر ذرات بر هم کم می‌شود، چندان پیچیده نیست (شرط میرایی<sup>۳</sup>).

---

1. Unity Integration  
2. Compact Support  
3. Decay Condition

- از آنجاکه در تعریف فرمول اساسی SPH تابع کرنل را جایگزین تابع دلتای دیراک کردیم، در شرایط حدی، این تابع باید دارای خصوصیات تابع دلتای دیراک<sup>۱</sup> باشد:

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(r - r', h) = \delta(r - r') \quad (۸-۳)$$

- کرنل باید به اندازه کافی هموار<sup>۲</sup>، یا به عبارت ساده تر مشتق مراتب بالا داشته باشد. این شرط برای بهبود تقریب حاصل از درونیابی یک تابع و مشتقات آن است. خطاهای ناشی از پراکندگی و نامنظمی ذرات بدین شیوه کاهش پیدا می کنند [۴۴].

تابع کرنل در درونیابی تابع درروش SPH نقش اساسی ایفا می کند. به طور کلی کرنل از سه نقطه نظر دارای اهمیت است:

- الگوی تخمین و درونیابی تابع میدان را مشخص می سازد.
- ابعاد حوزه تأثیر را معین می کند.
- دقت و سازگاری<sup>۳</sup> درونیابی در حالت گسسته (تقریبی کرنل) با توجه به نوع این تابع معلوم می شود.

### ۳-۴- معادلات حاکم

معادلات اساسی دینامیک سیالات بر پایه سه اصل فیزیکی بقای جرم، مومنتوم و انرژی تعریف می شوند. این معادلات بسته به شرایط کاربرد می توانند شکل متفاوتی به خود گیرند. به طوری که می توان فرم معادلات را با توجه به نوع رویکرد مواجهه با مسئله مشخص کرد. چنانچه در حل مسئله از دیدگاه اویلری بهره ببریم، معادلات شکل اویلری به خود می گیرند و در صورتی که رویکرد حل مسئله لاگرانژی باشد، فرم معادلات نیز لاگرانژی خواهد شد.

---

1. Delta Function Property  
2. Smooth  
3. Consistency



در دیدگاه لاگرانژی خواص و ویژگی‌های هیدرودینامیکی با تمرکز بر المان‌های ماده مورد بررسی قرار می‌گیرند، اما در دیدگاه اویلری این ویژگی‌ها در موقعیت‌های فضایی اهمیت پیدا می‌کنند. فرق اساسی معادلات حاصل از این دو رویکرد این است که در توصیف لاگرانژی، مشتق کلی نسبت به زمان گرفته می‌شود. این مشتق کلی برحسب زمان برابر با ترکیب مشتق محلی<sup>۱</sup> و مشتق انتقالی<sup>۲</sup> در دیدگاه اویلری است.

از آنجاکه روش SPH به دنبال تعیین ویژگی‌های هیدرودینامیکی و فیزیکی ذرات سیال در زمان‌های مختلف است، بی‌تردید رویکرد اتخاذشده، لاگرانژی است. از این رو در تعیین معادلات کلی SPH از فرم لاگرانژی معادلات ناویراستوکس استفاده می‌کنیم.

### ۳-۴-۱- معادله مومنتوم

معادله بقای مومنتوم در یک محیط پیوسته برابر است با:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \theta \quad (9-3)$$

که در آن  $v$  سرعت،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی می‌باشد؛  $g = (0,0,-9.81)ms^{-2}$  شتاب گرانش می‌باشد؛  $\theta$  نشان‌دهنده ترم دیفیوژن می‌باشد.

بر اساس روابط موجود برای بیان ترم دیفیوژن، رویکردهای متفاوتی برای توصیف معادله مومنتوم در روش SPH را می‌توان در نظر گرفت. سه گزینه برای دیفیوژن را می‌توان در SPHysics استفاده کرد: (۱) ویسکوزیته مصنوعی، (۲) ویسکوزیته لایه‌ای و (۳) مدل آشفته (ویسکوزیته لایه‌ای + آشفستگی در مقیاس زیر-ذره (SPS<sup>۳</sup>)).

---

1. Local Derivative  
2. Convective Derivative  
3. Sub-Particle Scale

### ۳-۴-۱-۱- ویسکوزیته مصنوعی

ویسکوزیته مصنوعی توسط موناگان [۴۴]، ارائه شد و به علت سادگی اغلب از آن استفاده می‌کنند.

بیان SPH ای معادله مومنتوم (۳-۹) با استفاده از ویسکوزیته مصنوعی به صورت زیر است:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a w_{ab} + g \quad (۳-۱۰)$$

ترم گرادیان فشار در فرم متقارن در بیان SPH، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a w_{ab} \quad (۳-۱۱)$$

که در آن فشار  $P$  و چگالی  $\rho$  می‌باشد.

ترم  $\pi_{ab}$  ویسکوزیته می‌باشد:

$$\pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \overline{c_{ab}} \mu_{ab}}{\overline{\rho_{ab}}} & \text{if } V_{ab} \cdot r_{ab} < 0, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳-۱۲)$$

با

$$\mu_{ab} = \frac{h V_{ab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2}$$

که در آن  $\overline{c_{ab}} = \frac{1}{2}(c_a + c_b)$ ،  $\overline{\rho_{ab}} = \frac{1}{2}(\rho_a + \rho_b)$ ،  $\eta^2 = 0.01h^2$ ؛ پارامتر آزاد می‌باشد که با

توجه به هر مسئله می‌تواند تغییر کند.

### ۳-۴-۱-۲- ویسکوزیته لایه‌ای

معادله بقای مومنتوم با استفاده از ویسکوزیته لایه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \nu_0 \nabla^2 \mathbf{v} \quad (۳-۱۳)$$

که در آن ترم تنش لایه‌ای [۵۵ و ۵۶]، به معادله زیر ساده می‌شود:

$$(v_0 \nabla^2 v)_a = \sum_b m_b \left( \frac{4v_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |r_{ab}|^2} \right) v_{ab} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن  $v_0$  ویسکوزیته سینماتیکی جریان لایه‌ای می‌باشد ( $0.893 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

در نتیجه بیان SPH ای، معادله (۱۳-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{dv_a}{dt} = & - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} + g \\ & + \sum_b m_b \left( \frac{4v_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |r_{ab}|^2} \right) v_{ab} \end{aligned} \quad (۱۵-۳)$$

### ۳-۱-۴-۳- ویسکوزیته لایه‌ای و آشفتگی در مقیاس زیر-ذره (SPS):

به منظور نشان دادن دقیق ویسکوزیته سیال و آشفتگی جریان، راجرز<sup>۱</sup> و دالریمل<sup>۲</sup> [۵۷ و ۵۸] از یک مدل شبیه‌سازی گرداب بزرگ (LES<sup>۳</sup>) استفاده کردند [۵۹]. این روش مقیاس زیر-شبکه که از ترم ویسکوزیته گردابه ای اسماگرینسکی<sup>۴</sup> [۶۰]، استفاده می‌کند، شبیه ترم استفاده شده توسط [۵۶] است به جز مدل آشفتگی آن برای جریان تراکم پذیر.

همچنین گوته<sup>۵</sup> و همکارانش (۲۰۰۱)، از مقیاس زیر-ذره در تکنیک ذرات نیمه ضمنی در حال حرکت (MPS) استفاده کرد. اگرچه برای یک سیال تراکم پذیر روش کمی متفاوت است و شامل میانگین‌گیری Favre می‌باشد که یک روش متوسط‌گیری زمانی چگالی وزن دار می‌باشد [۶۱].

معادله بقای مومنتوم به صورت معادله زیر می‌باشد:

---

1. Rogers  
2. Dalrymple  
3. Large Eddy Simulation  
4. Smagorinsky  
5. Gotoh

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + v_0 \nabla^2 v + \frac{1}{\rho} \nabla \bar{\tau} \quad (۱۶-۳)$$

که ترم لایه‌ای را می‌توان مانند معادله (۱۴-۳) در نظر گرفت و  $\bar{\tau}$  نشان‌دهنده تانسور تنش SPS می‌باشد.

فرض ویسکوزیته گردابه ای (فرضیه بوسینسک) اغلب برای مدل کردن تانسور تنش SPS با استفاده

از میانگین‌گیری Favre استفاده می‌شود (برای یک سیال تراکم پذیر):

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \frac{2}{3} C_1 \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2 \quad (۱۷-۳)$$

که در آن  $\tau_{ij}$  تانسور تنش زیر-ذره است و  $\nu_t = [\min(C_s, \Delta l)]^2$  می‌باشد.  $|S|$  ویسکوزیته گردابه ای

آشفتگی،  $K$  انرژی جنبشی آشفتگی SPS،  $C_s$  ثابت اسماگرینسکی (۰,۱۲) می‌باشد،  $C_1 = 0.0066$ .

$\Delta l$  فضای بین ذرات می‌باشد،  $|S| = (2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}}$  و  $S_{ij}$  المانی از تانسور کرنش SPS می‌باشد.

بنابراین با توجه به [۵۸]، معادله (۱۶-۳) را می‌توان با بیان SPH به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a w_{ab} + \sum_b m_b \left( \frac{4\nu_0 r_{ab} \nabla_a w_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |r_{ab}|^2} \right) v_{ab} + g \quad (۱۸-۳)$$

### ۳-۴-۲- معادله پیوستگی (بقای جرم)

سیال در فرمول‌بندی استاندارد SPH، تراکم پذیر تلقی می‌شود؛ که اجازه استفاده از معادله حالت

برای تعیین فشار سیال را، به جای حل معادله دیفرانسیل دیگر می‌دهد. اگرچه، تراکم‌پذیری به منظور

کاهش سرعت صوت تنظیم شده است، به طوری که گام زمانی در مدل (بر اساس سرعت صوت) منطقی

و معقول است.

تغییرات در چگالی سیال به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a w_{ab} \quad (۱۹-۳)$$

استفاده از رابطه تغییرات چگالی به جای رابطه مجموع وزنی جرم [۴۴]، باعث می‌شود تا چگالی مصنوعی در نزدیکی سطح سیال کاهش یابد.

### ۳-۴-۳- معادله حالت (EOS<sup>۱</sup>)

روش سنتی و استاندارد SPH برای حل جریان‌های ذرات تراکم‌پذیر ابداع شده است. حرکت ذره با وجود گرادیان فشار امکان‌پذیر می‌شود، درحالی‌که فشار ذره با توجه به رابطه دانسیته محلی ذره و انرژی داخلی آن از طریق به کار بردن یک معادله حالت<sup>۲</sup> محاسبه می‌گردد. از این رو در حل مسائل مربوط به مایعات تراکم‌ناپذیر اولین راه‌حلی که به نظر می‌رسد این است که سیال را اندکی تراکم‌پذیر فرض کنیم. دلیل اصلی استفاده از معادله حالت در روش SPH، به دست آوردن مشتق زمانی فشار به‌طور جداگانه و صریح، بدون نیاز به حل معادلات دیفرانسیل حرکت برای فشار است که به فرم یک معادله پواسون پدیدار می‌شود.

معادله حالتی که توسط موناگان برای محاسبه فشار در جریان سطح آزاد آب مطرح شد، به صورت زیر است [۶۲]:

$$P = B \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (20-3)$$

$\gamma$  ثابتی است که در اغلب تحلیل‌ها برابر ۷ در نظر گرفته می‌شود.  $\rho_0$  چگالی مرجع است که برای آب برابر  $1000 \text{KG/m}^3$  لحاظ می‌شود.

برای تعیین B، مشتق رابطه فوق بر حسب دانسیته (مربع سرعت صوت) محاسبه می‌شود:

$$c^2(\rho) = \frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{B\gamma}{\rho_0} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma-1} = \frac{B\gamma}{\rho_0^\gamma} \rho^{\gamma-1} \quad (21-3)$$

$$c^2_0 = c^2(\rho_0) = \frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} = \frac{B\gamma}{\rho_0} \quad (22-3)$$

1. Equation of State

2. State Equation

$c_0$  سرعت صوت در دانسیته مرجع است و ثابت  $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$  حدی برای ماکزیمم تغییرات دانسیته تعیین می‌کند. طبق یافته موناگان برای سیالات می‌توان سرعت صوت را به صورت مصنوعی به مقدار قابل توجهی کاهش داد به گونه‌ای که تأثیری در حرکت سیال نداشته باشد. ضمن این که حداقل این سرعت باید ۱۰ برابر ماکزیمم سرعت قابل انتظار جریان باشد تا تغییرات زیادی در دانسیته مشاهده نشود (کمتر از ۱ درصد).

### ۳-۵- حرکت ذرات (XSPH)

ذرات با استفاده از روش XSPH [۶۳]، حرکت می‌کنند:

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} v_{ab} W_{ab} \quad (۲۳-۳)$$

که در آن  $\bar{\rho}_{ab} = \frac{1}{2}(\rho_a + \rho_b)$  و  $\varepsilon$  یک ثابت است که مقدار آن بین صفر و یک است، که اغلب  $\varepsilon = 0.5$  استفاده می‌شود.

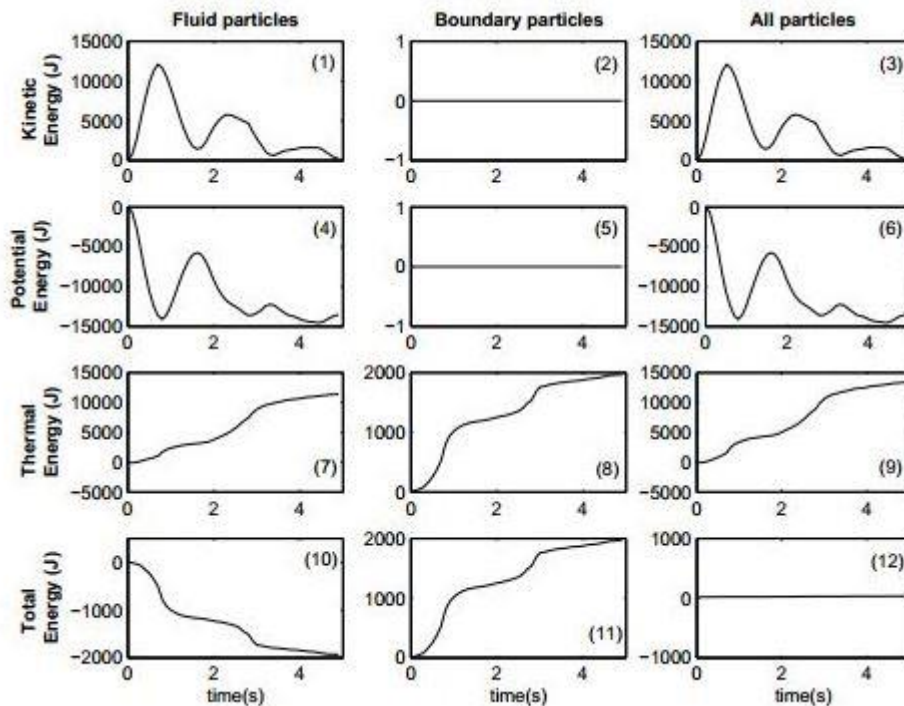
این روش یک تصحیح برای سرعت ذره  $a$  است. این سرعت مجدداً با استفاده از سرعت آن ذره و سرعت متوسط تمام ذراتی که در ارتباط با ذره  $a$  هستند، محاسبه می‌شود. به دلیل فشردگی کرنل، تنها نزدیک‌ترین ذرات مجاور در نظر گرفته می‌شوند. این تصحیح به ذرات اجازه می‌دهد که بهتر سازمان‌یافته شوند و برای سرعت بالای سیال، به جلوگیری از نفوذ ذرات کمک می‌کند.

### ۳-۶- بقای انرژی

در طول شبیه‌سازی انرژی جنبشی، پتانسیل و گرمایی محاسبه می‌شوند. انرژی گرمایی مربوط به هر ذره با استفاده از ویسکوزیته مصنوعی که توسط موناگان [۴۴] بیان شد، محاسبه می‌شود:

$$\frac{de_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (۲۴-۳)$$

مجموع انرژی سیستم به صورت مجموعی از انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و گرمایی محاسبه می‌شود.



شکل ۳-۳: تغییرات زمانی تغییر انرژی سیستم در طول شکست سد [۶۴]

شکل ۳-۳ اشکال مختلف انرژی را در شکست سد نشان می‌دهد. این شکل انرژی جنبشی،

پتانسیل، گرمایی و انرژی کل سیال، شرایط مرزی و ذرات را در ۱۲ گراف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که چگونه انرژی در ناحیه به اشکال مختلف تغییر می‌کند و در نهایت انرژی کل سیستم تنها ۰.۳٪ تغییر می‌کند.

### ۳-۷- عملکرد و اجرای SPHysics

اگرچه معادلات SPH در قسمت قبل توضیح داده شدند، ولی برخی از تکنیک‌های عددی برای بهبود دقت عددی و کاهش زمان محاسبات در کد SPHysics استفاده می‌شود. همچنین در این بخش گزینه‌های مختلف از شرایط مرزی و اولیه با جزئیات توضیح داده شده است.

### ۳-۷-۱- انتخاب کرنل

چندین تقریب کرنل توصیف شده است [۴۴، ۳۸، ۶۵ و ۶۲]. در مورد SPHysics هر یک از کرنل‌های

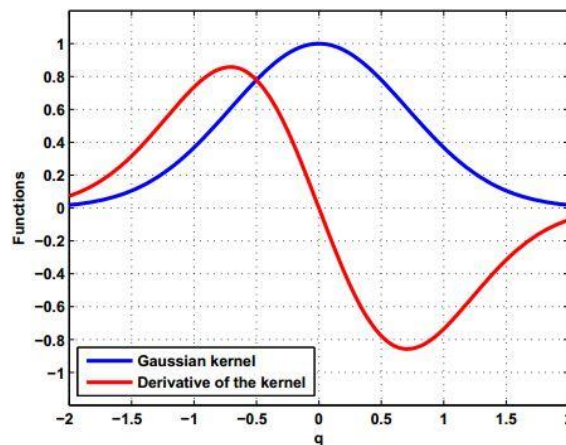
زیر را می‌توان استفاده کرد:

- ۱- گوسین<sup>۱</sup>      ۲- کوادرتیک<sup>۲</sup>      ۳- کیوبیک اسپلاین<sup>۳</sup>      ۴- کوآنتیک<sup>۴</sup>

### گوسین

$$W(r, h) = \alpha_D \cdot \exp(-q^2) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (۳-۲۵)$$

که در آن  $q = r/h$ ، r فاصله بین ذره a و b می‌باشد و  $\alpha_D$  در حالت دوبعدی برابر با  $1/(\pi h^2)$  و در حالت سه‌بعدی برابر با  $1/(\pi^{3/2} h^3)$  می‌باشد.



شکل ۳-۴: کرنل گوسین و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$

شکل (۳-۳)، مقادیر کرنل گوسین و مشتق آن را نشان می‌دهد. مقادیر توابع توسط  $\alpha_D$  تقسیم شده است.

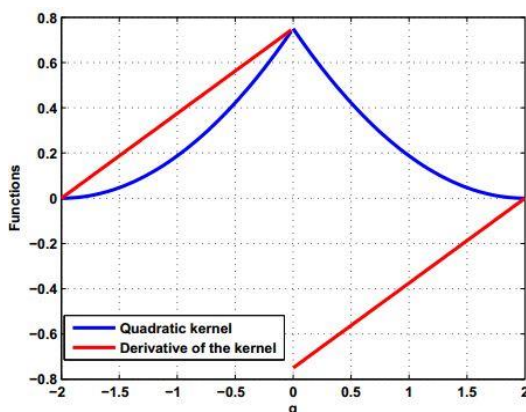
- 
1. Gaussian
  2. Quadratic
  3. Cubic spline
  4. Quintic



## کوادر تیک

$$W(r, h) = \alpha_D \left[ \frac{3}{16} q^2 - \frac{3}{4} q + \frac{3}{4} \right] \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (26-3)$$

که  $\alpha_D$  در حالت دوبعدی برابر با  $2/(\pi h^2)$  و در حالت سهبعدی برابر با  $5/(4\pi h^3)$  می باشد.



شکل 3-5: کرنل کوادر تیک و مشتق آن تقسیم بر فاکتور  $\alpha_D$

جانسون<sup>1</sup> و همکاران (۱۹۹۶)، از این تابع هموار برای شبیه سازی مسئله ضربه با سرعت بالا<sup>2</sup> استفاده کرد [۶۶]. این تابع، مانع از دسته بندی ذرات در مسائل تراکم می شود. مشتق این کرنل همواره با نزدیک شدن ذرات افزایش می یابد و با فاصله گرفتن آنها از هم کاهش پیدا می کند.

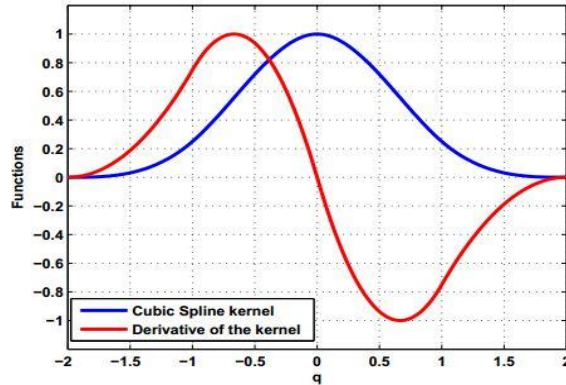
## کیوبیک اسپلاین

$$W(q, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} q^2 + \frac{3}{4} q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4} (2 - q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (27-3)$$

که در حالت دوبعدی  $\alpha_D$  برابر با  $10/(7\pi h^2)$  و در حالت سهبعدی برابر با  $1/(\pi h^3)$  می باشد.

<sup>1</sup>. Johanson

<sup>2</sup>. high velocity impact problem



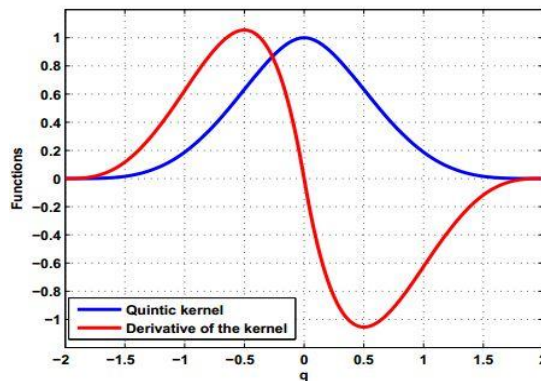
شکل ۳-۶: کرنل کیوبیک اسپلاین و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$

تاکنون کرنل کیوبیک اسپلاین (که توسط موناگان و لاتانزو<sup>۱</sup> [۶۷] معرفی شد)، از تابع هموار به صورت گسترده در متون SPH استفاده کرده است، از آنجاکه شبیه تابع گوسین می‌باشد درحالی‌که دارای فشردگی محدودتری می‌باشد؛ بنابراین یکی از مزایای استفاده از این کرنل به جای کرنل گوسین این است که دارای مزایای فشردگی می‌باشد (برای  $q > 2$  برابر صفر می‌باشد) و محاسبات عددی کاهش می‌یابد.

### کوانتیک (Wendland)

$$W(q, h) = \alpha_D \left[1 - \frac{q}{2}\right]^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (۲۸-۳)$$

که  $\alpha_D$  در حالت دوبعدی برابر با  $7/(4\pi h^2)$  و در حالت سه‌بعدی برابر با  $7/(8\pi h^3)$  می‌باشد.



شکل ۳-۷: کرنل کوانتیک و مشتق آن تقسیم‌بر فاکتور  $\alpha_D$

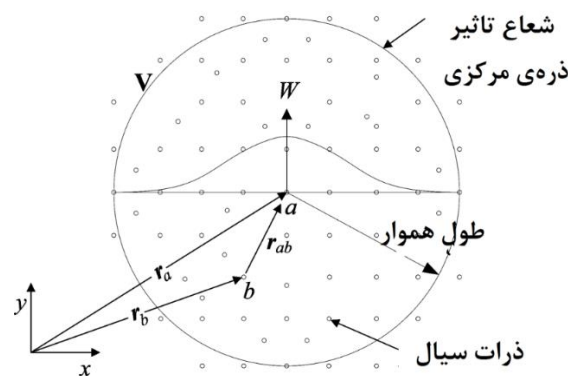
<sup>1</sup>. Lattanzio

با توجه به [۶۸]، نتایج نشان می‌دهد که بهترین رابطه بین دقت و هزینه زمان محاسبات با استفاده از کرنل وندلند<sup>۱</sup> [۶۹]، به دست می‌آید. به‌طور کلی مرتبه بالاتر کرنل باعث دقت بیشتر روش SPH می‌شود.

توابع دیگری نیز به‌عنوان کرنل ارائه شده‌اند اما بر اساس مطالعاتی که توسط فولک<sup>۲</sup> و کوئین<sup>۳</sup> در فضای یک‌بعدی انجام پذیرفته است که هیچ‌کدام بهتر از کیوبیک اسپلاین و وندلند عمل نمی‌کنند [۷۰].

### ۳-۷-۲- طول هموار (طول تأثیر)

طول تأثیر در SPH نقش مهمی ایفا می‌کند. این مقدار در میزان دقت و کارایی محاسبات تعیین‌کننده است. از یک‌سو مقدار طول تأثیر نباید چنان کوچک باشد که درون حوزه تأثیر، تعداد ذرات کافی وجود نداشته باشد. از سوی دیگر بزرگ بودن این مقدار نیز به کاهش دقت و افزایش چشم‌گیر محاسبات می‌انجامد.



شکل ۳-۸: طول هموار برای یک ذره

به‌طور کلی  $h$  از تست‌های همگرایی به دست می‌آید، به این ترتیب که با تغییر آن، دقت و سرعت اجرای مدل سنجیده می‌شود و استفاده از توابع کرنل مختلف این آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

1. Wendland  
2. Fulk  
3. Quinn

برای مثال مرسوم است که این مقدار برای تابع کیوبیک اسپلاین برابر  $1/3$  و برای تابع وندلند، برابر  $1/5$  برابر فاصله اولیه ذرات در نظر گرفته شود تا قرارگیری ذرات شکل منظم‌تری به خود گیرند. در اغلب مطالعاتی که انجام پذیرفته، این طول  $1$  تا  $1/5$  برابر فاصله‌ی ذرات در نظر گرفته شده است. در مسائل غیر همگنی چون امواج ضربه‌ای طول تأثیر بر اساس نیاز مسئله می‌تواند در زمان و مکان تغییر پیدا کند [۷۱].

### ۳-۷-۳ - مقداردهی اولیه چگالی

درحالی که حرکت ذرات در شبیه‌سازی SPH به‌خوبی مدل‌سازی می‌شود اما میدان فشار دارای نوسانات زیادی است. تلاش‌ها برای غلبه بر این مشکل، بر روی روش‌های متعددی از جمله اصلاح کرنل (بخش ۳-۷-۴) و حلگرهای تراکم ناپذیر درحال توسعه، متمرکز شده است. یکی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های محاسباتی، اجرای فیلتر برای غلبه بر چگالی ذرات و دوباره اختصاص دادن چگالی به هر یک از ذرات می‌باشد [۷۲]. دومرتبه تصحیح شامل مرتبه صفر و مرتبه اول است که در ادامه تشریح خواهند شد.

### ۳-۷-۳-۱ - تصحیح مرتبه صفر: فیلتر شپرد

واضح است زمانی که ذرات نزدیک مرز یا سطح آب هستند، تابع کرنل از کمبود ذره در دامنه موردنظر رنج می‌برد و یک تصحیح  $\tilde{W}$  به جای  $W$  در نظر گرفته می‌شود. فیلتر شپرد یک تصحیح آسان و سریع برای میدان چگالی است که در هر  $m$  گام زمانی اعمال می‌شود.

$$\bar{\rho}_a = \sum_b \rho_b \tilde{W}_{ab} \frac{m_b}{\rho_b} = \sum_b m_b \tilde{W}_{ab} \quad (29-3)$$

که کرنل با استفاده از تصحیح مرتبه صفر تصحیح می‌شود:

$$\tilde{W}_{ab} = \frac{W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}}{\sum_b W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}} \quad (30-3)$$

### ۳-۷-۳-۲- تصحیح مرتبه اول: مربع حداقل حرکت (MLS)

این روش به وسیله دیلتز<sup>۱</sup> گسترش یافت [۷۳] و با موفقیت توسط کلاگریسی<sup>۲</sup> و پانیزو<sup>۳</sup> به کار گرفته شد [۷۴]. اعمال این روش یک تصحیح مرتبه اول است تا اینکه تغییرات میدان چگالی بتواند دوباره محاسبه شود.

$$\bar{\rho}_a = \sum_b \rho_b W_{ab}^{MLS} \frac{m_b}{\rho_b} = \sum_b m_b W_{ab}^{MLS} \quad (31-3)$$

کرنل تصحیح شده به صورت زیر بررسی می شود:

$$W_{ab}^{MLS} = W_b^{MLS}(r_a) = \beta(r_a) \cdot (r_a - r_b) W_a \quad (32-3)$$

بنابراین در حالت دوبعدی:

$$W_{ab}^{MLS} = [\beta_0(r_a) + \beta_{1x}(r_a) \cdot (x_a - x_b) + \beta_{1z}(r_a) \cdot (z_a - z_b)] W_a \quad (33-3)$$

که بردار تصحیح  $\beta$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\beta(r_a) = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1x} \\ \beta_{1z} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \sum_b W_b(r_a) \tilde{A} \frac{m_b}{\rho_b} \quad (34-3)$$

که ماتریس  $\tilde{A}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & (x_a - x_b) & (z_a - z_b) \\ (x_a - x_b) & (x_a - x_b)^2 & (z_a - z_b)(x_a - x_b) \\ (z_a - z_b) & (z_a - z_b)(x_a - x_b) & (z_a - z_b)^2 \end{bmatrix} \quad (35-3)$$

مشابه حالت قبل این فیلتر نیز در هر  $m$  گام زمانی اعمال می شود. لازم به ذکر است استفاده از

فیلترهای مختلف نیز جواب های منطقی داده است.

1. Dilts

2. Colagrossi

3. Panizzo

### ۳-۷-۴ - تصحیح کرنل

تصحیح پریودیک تابع کرنل در محاسبات هیدرولیکی SPH ضروری است، جایی که دامنه محدود و یک سطح آزاد، جدا از محدوده محاسباتی هستند. ذرات سیال در نزدیکی مرزها و یا سطح آزاد به دلیل فقدان ذرات همسایه کافی دارای طول هموار ناقصی هستند که در این شرایط سازگاری تابع کرنل تأمین نمی‌شود. در این صورت می‌توان با یک تصحیح مناسب برای کرنل یا گرادیان آن این مشکل را برطرف نمود. چند روش رایج برای تصحیح این خطا در زیر معرفی می‌گردد.

- تصحیح کرنل: در این روش‌ها تکنیک‌هایی برای تصحیح توابع چندجمله‌ای درونیابی ارائه شده است.

- تصحیح گرادیان کرنل: در نوع دیگری از این روش‌ها، به وسیله یک ماتریس تصحیح گرادیان کرنل مورد اصلاح قرار می‌گیرد تا مطمئن شوند گرادیان میدان سرعت به درستی محاسبه می‌شود.

- تصحیح کرنل و گرادیان آن: سومین تکنیک برای حل مشکل کرنل در سطح آزاد و مرزها با ترکیبی از تصحیح کرنل و گرادیان آن ارائه شده است.

لازم به ذکر است مقداردهی دوباره چگالی و تصحیح کرنل اندکی هزینه محاسباتی در پی دارند.

### ۳-۷-۵ - گام زمانی

راه‌های مختلفی برای توسعه راه‌حل معادلات SPH در زمان وجود دارد. استفاده از روش حداقل دقت مرتبه دوم در زمان توصیه می‌شود. دو روش عددی در SPHysics اجرا می‌شود: (۱) الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح که توسط موناگان [۶۳] توصیف شد؛ (۲) الگوریتم ورت [۷۵].

یک سری روش‌های انتگرال‌گیری مختلف دیگر نیز در SPH و سایر مدل‌های لاگرانژی استفاده شده است، مانند الگوریتم دومرحله‌ای سرعت ورت [۷۶] و الگوریتم بیمن [۷۷].

معادلات مومنتوم (۹-۳)، چگالی (۱۹-۳)، موقعیت (۲۳-۳) و چگالی انرژی (۲۴-۳) را به صورت زیر

در نظر بگیرید:

$$\frac{dv_a}{dt} = F_a \quad (۳۶-۳)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \quad (۳۷-۳)$$

$$\frac{dr_a}{dt} = V_a \quad (۳۸-۳)$$

$$\frac{de_a}{dt} = E_a \quad (۳۹-۳)$$

که در آن  $V_a$  نشان دهنده سهم سرعت ذره  $a$  و ذرات مجاور آن می باشد (تصحیح XSPH).

### ۳-۷-۵-۱- روش پیش بینی-تصحیح

این روش پیشروی در زمان (سیر تکاملی در زمان) را به صورت زیر پیش بینی می کند:

$$\vec{v}_a^{n+\frac{1}{2}} = \vec{v}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \vec{F}_a^n \quad (۴۰-۳)$$

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \quad (۴۱-۳)$$

$$r_a^{n+\frac{1}{2}} = r_a^n + \frac{\Delta t}{2} V_a^n \quad (۴۲-۳)$$

$$e_a^{n+\frac{1}{2}} = e_a^n + \frac{\Delta t}{2} E_a^n \quad (۴۳-۳)$$

$P_a^{n+\frac{1}{2}} = f(\rho_a^{n+\frac{1}{2}})$  مطابق با معادله (۲۰-۳) محاسبه می شود.

سپس این مقادیر توسط نیروها در نصف گام زمانی تصحیح می شوند:

$$\vec{v}_a^{n+\frac{1}{2}} = \vec{v}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \vec{F}_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (۴۴-۳)$$

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (۴۵-۳)$$

$$r_a^{n+\frac{1}{2}} = r_a^n + \frac{\Delta t}{2} V_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (۴۶-۳)$$

$$e_a^{n+\frac{1}{2}} = e_a^n + \frac{\Delta t}{2} E_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (۴۷-۳)$$

در نهایت، مقادیر در انتهای گام زمانی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\vec{v}_a^{n+1} = 2\vec{v}_a^{n+\frac{1}{2}} - \vec{v}_a^n \quad (48-3)$$

$$\rho_a^{n+1} = 2\rho_a^{n+\frac{1}{2}} - \rho_a^n \quad (49-3)$$

$$\vec{r}_a^{n+1} = 2\vec{r}_a^{n+\frac{1}{2}} - \vec{r}_a^n \quad (50-3)$$

$$\vec{e}_a^{n+1} = 2\vec{e}_a^{n+\frac{1}{2}} - \vec{e}_a^n \quad (51-3)$$

در نهایت، فشار با استفاده از چگالی، از رابطه  $P_a^{n+1/2} = f(\rho_a^{n+1})$  محاسبه می شود.

موناگان از این برای نشان دادن اینکه روش SPH هر دو مقدار اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای را حفظ می کند، استفاده کرد. در عمل آن‌ها از مقدار نقطه میانی در گام زمانی قبلی به جای محاسبه مقادیر در لحظه n استفاده می کنند که موجب صرفه جویی زمان می شود و تنها خطای کوچکی را ایجاد می کند. این طرح کلی از مرتبه دوم می باشد [63].

### ۳-۷-۵-۲- روش ورت

الگوریتم ورت [75]، اغلب از روش انتگرال زمان در دینامیک مولکولی استفاده می کند. ایده اساسی نوشتن دو بسط تیلور مرتبه سوم، یکی پیش‌رونده و دیگری پس‌رونده می باشد. این الگوریتم گام زمانی، برای گسسته سازی معادلات (3-36) و (3-39) به دو بخش تقسیم می شوند؛ به‌طور کلی، متغیرها به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\vec{v}_a^{n+1} = \vec{v}_a^{n-1} + 2\Delta t \vec{F}_a^n \quad (52-3)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^{n-1} + 2\Delta t D_a^n \quad (53-3)$$

$$\vec{r}_a^{n+1} = \vec{r}_a^n + \Delta t V_a^n + 0.5\Delta t^2 F_a^n \quad (54-3)$$

$$e_a^{n+1} = e_a^{n-1} + 2\Delta t E_a^n \quad (55-3)$$

پس از هر M گام زمانی (M در هر 50 گام زمانی) متغیرها مطابق زیر محاسبه می شوند:

$$\vec{v}_a^{n+1} = \vec{v}_a^n + \Delta t \vec{F}_a^n \quad (56-3)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^n + \Delta t D_a^n \quad (57-3)$$



$$r_a^{n+1} = r_a^n + \Delta t V_a^n + 0.5 \Delta t^2 F_a^n \quad (58-3)$$

$$e_a^{n+1} = e_a^n + \Delta t E_a^n \quad (59-3)$$

در این روش از واگرایی در گام زمانی جلوگیری می‌شود؛ چراکه دیگر معادلات درگیر نیستند.

### ۳-۷-۶- گام زمانی متغیر

کنترل گام زمانی به ترم‌های نیرویی، شرایط Courant-Fredrich-Levy و ترم انتشار ویسکوز [۶۳].

بستگی دارد. گام زمانی متغیر  $\Delta t$  به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷۸]:

$$\Delta t = 0.3 \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (60-3)$$

$$\Delta t_f = \min_a \sqrt{h/|f_a|} \quad (61-3)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \frac{h}{c_s + \max_b \left| \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2} \right|} \quad (62-3)$$

در اینجا  $\Delta t_f$  بر اساس نیرو در واحد جرم  $|f_a|$  می‌باشد و شرایط کورانت و کنترل گام زمانی ویسکوز

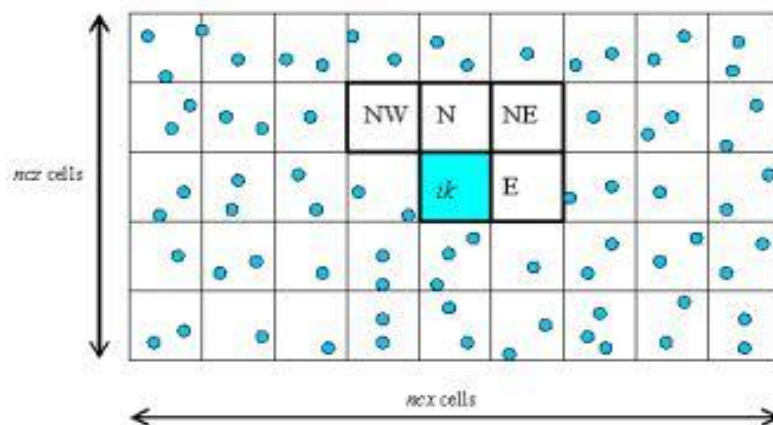
را، ترکیب می‌کند.

### ۳-۷-۷- کارایی محاسبات (روش Link list)

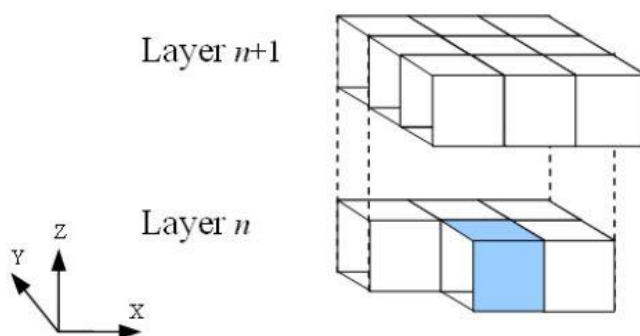
در مدل عددی SPHysics، ناحیه حل به مربع‌هایی با ضلع  $2h$  تقسیم می‌شود و برای ذره‌ای که درون یکی از این مربع‌ها قرار گیرد، تنها اندرکنش این ذره با ذرات موجود در مربع‌های مجاور در نظر گرفته می‌شود تا بدین صورت از حجم محاسبات در هر گام زمانی کاسته و بازده مدل افزایش یابد.

در مدل عددی SPHysics، ابتدا ناحیه حل به سلول‌هایی تقسیم می‌شود و بعد در اطراف هر سلول، سلول‌های E,N,NW,NE مورد بررسی قرار می‌گیرند تا ذراتی که در ناحیه تأثیر ذره فرضی a، واقع در یک سلول خاص، قرار دارند مشخص شوند. برای مثال مطابق شکل زیر، وقتی که ذره فرضی a در سلول سطر پنجم و ستون سوم قرار دارد، سلول‌های (۵،۴) و (۴،۴) و (۶،۴) و (۶،۳) مورد توجه قرار می‌گیرند

(اعداد داخل پرانتز نشان دهنده سطر و ستون سلول موردنظر در تقسیمات صورت گرفته می باشد). البته اثر بقیه سلول های اطراف سلول اصلی قبلاً لحاظ شده است، مثلاً اندرکنش سلول های (۵،۳) و (۵،۲) هنگامی که ذره a در سلول (۵،۲) بوده، در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۹: جاروب از طریق سلول های شبکه در حالت دوبعدی، با شروع از پائین ترین گوشه سمت چپ، ذرات در داخل سلول مرکزی  $ik$  در تعامل با سلول های مجاور تنها در جهت های  $N, E, NW$  و  $NE$  می باشد. اندرکنش با بقیه سلول ها در جهت های  $S, W, SE$  و  $SW$  قبلاً با استفاده از اثرات متقابل معکوس محاسبه شد. روند مشابهی در محاسبات سه بعدی استفاده می شود (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۱۰: جاروب از طریق سلول های شبکه در حالت سه بعدی

دو  $link\ lists$  در نظر گرفته می شود؛ اولی برای این است که ذرات مرزی را ردیابی می کند و در هر گام زمانی به صورت جزئی به روزرسانی می شود. این به خاطر این واقعیت است که تنها ذرات مرزی که موقعیتشان در زمان تغییر می کند آنهایی هستند که اشیا در حال حرکت مانند دریچه ها و تولیدکننده های موج را توصیف می کنند.  $Link\ lists$  دوم مربوط به ذرات سیال می باشد و در هر گام زمانی به طور کامل به روزرسانی می شود.

### ۳-۷-۸ - شرایط اولیه

برای تمام موارد در نظر گرفته شده در این کار، سرعت اولیه ذرات سیال صفر در نظر گرفته می شود. چگالی اولیه ذرات بر اساس فشار هیدروستاتیک،  $\rho_0$  در نظر گرفته می شود؛ بنابراین چگالی ذره  $a$  (قرار گرفته در عمق  $Z_a$ ) باید با در نظر گرفتن ارتفاع ستون آب محاسبه شود.

$$\rho(x, z) = \rho_0 \left( 1 + \frac{\rho_0 g (H(x) - z)}{B} \right)^{1/\gamma} \quad (3-63)$$

که در آن  $H(X)$  عمق اولیه آب در مکان  $X$  و  $Z$  فاصله عمودی از کف می باشد. فشار نیز با استفاده از معادله حالت (۳-۲۰) با توجه به مقدار چگالی محاسبه می شود.

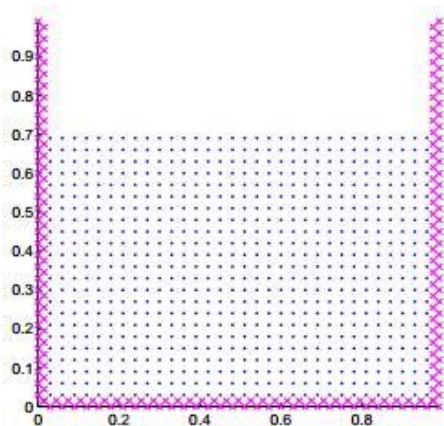
ذرات سیال در ابتدا در یک موقعیت ثابت قرار دارند. دو وضعیت اولیه مختلف را می توان انتخاب کرد:

(۱) شبکه کارتزین<sup>۱</sup>:

در حالت دوبعدی، ذرات قرار گرفته در گره های شبکه مربعی، می توانند یک مثال تنها از شبکه مربعی باشند که در [۷۸]، استفاده شد. در حالت سه بعدی، با یک شبکه مکعبی ساده مطابقت دارد. گره های شبکه در  $\vec{R} = ldx\vec{i} + mdy\vec{j} + ndz\vec{k}$  قرار دارند که در آن  $l$ ،  $m$  و  $n$  عدد صحیح هستند و  $\vec{i}$ ،  $\vec{j}$  و  $\vec{k}$  بردارهای واحد در جهت های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  هستند.

این موقعیت را می توان در شکل (۳-۱۱) مشاهده کرد. ابعاد جعبه  $Im \times Im$  می باشد و

$dx = dz = 0.03$  و تعداد ذرات ۹۳۷ می باشد که ۲۰۱ از این ذرات، مرزی می باشند.

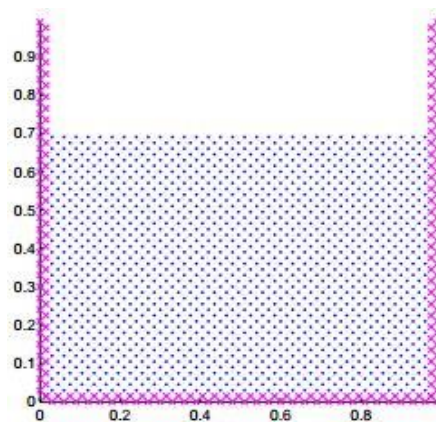


<sup>1</sup>. Cartesian

شکل ۳-۱۱: نمایی از موقعیت اولیه شبکه کارترین. ضربدرها نشان‌دهنده ذرات مرزی و نقاط نشان‌دهنده ذرات سیال می‌باشند.

(۲) شبکه استگرد<sup>۱</sup>:

در حالت دوبعدی، ذرات در گره‌های مربعی شبکه با یک گره در مرکز مربع قرار می‌گیرند. در حالت سه‌بعدی در گره‌های جسم متمرکز در شبکه مکعبی قرار می‌گیرند (BCC). این روش اصولاً به‌طور متداول استفاده می‌شود؛ به دلیل مقدار بیش‌تر ذرات مجاور که برای هر ذره با استفاده از این نوع شبکه تولید می‌شود؛ بنابراین، گره‌های شبکه در  $\vec{R} = ldx\vec{i} + mdy\vec{j} + ndz\vec{k}$  با دو نقطه پایه  $(0,0,0)$  و  $(dx/2, dy/2, dz/2)$ ، که اشاره به گوشه تعریف شده توسط  $\vec{R}$  دارد، قرار گرفته‌اند.  $l, m$  و  $n$  عدد صحیح هستند و  $\vec{i}, \vec{j}$  و  $\vec{k}$  بردارهای واحد در جهت‌های  $X, Y$  و  $Z$  هستند. این موقعیت را می‌توان در شکل (۳-۱۲) مشاهده کرد. در این مورد، تعداد ذرات ۱۶۱۹ می‌باشد (۲۰۱ ای از آن‌ها مرزی می‌باشند).



شکل ۳-۱۲: نمایی از موقعیت اولیه شبکه استگرد. ضربدرها نشان‌دهنده ذرات مرزی و نقاط نشان‌دهنده ذرات سیال می‌باشند.

<sup>1</sup>. Staggered

### ۳-۷-۹- شرایط مرزی

در SPH مرزهای سیال توسط ذرات شبیه‌سازی می‌شوند. مدل‌سازی ذرات مرزی بسته و مرزهای اجسام شناور به قدرتمندی سایر قابلیت‌های SPH نیست. ذرات مرزی در SPH به چندین روش مدل شده‌اند که هر یک مزایا و معایبی دارند.

در روش ذرات مجازی<sup>۱</sup> این ذرات در خارج از محدوده سیال و در امتداد مرز قرار می‌گیرند. هنگامی که یک ذره وارد محدوده مرزی می‌شود، یک ذره کاملاً همسان با ذره سیال به صورت قرینه نسبت به مرز به وجود می‌آید. این ذره مجازی دارای چگالی و فشار مساوی با ذره داخلی است، اما سرعت عمودی آن در خلاف جهت سرعت عمودی ذره داخلی می‌باشد. سرعت مماسی و عمودی برای ذرات مرزی صفر است و وقتی ذره داخلی به مرز نزدیک‌تر می‌شود، تصویر مجازی آن نیز به مرز نزدیک شده و تأثیر فشار آن بر روی ذره داخلی بیشتر می‌گردد و مانع از عبور ذره سیال از مرز می‌شود. ایراد اصلی این روش زمانی است که جهت مرز تغییر شدیدی پیدا کند که در این حالت محل قرارگیری ذره‌ی مجازی مشخص نیست.

اگر مرز با ذرات سیال جایگزین شود، حداقل دو مشکل پیش می‌آید. اول اینکه اگر سیال از مرز دور شود، دانسیته و فشار ظاهری کاهش می‌یابد و ذرات سیال میل به جذب شدن به سمت مرزها را پیدا خواهند کرد. مشکل دوم زمانی به وجود می‌آید که بیش از یک سیال وجود داشته باشد. در این حالت یکی از آن‌ها برای ذرات مرزی باید انتخاب شود یا برحسب اندرکنش هر یک از آن‌ها با مرز، خواص ذرات مرزی دچار تغییر شود که بسیار پیچیده است.

استفاده از ذرات مرزی با نیروی دافعه سابقه بیشتری دارد. ایده این تکنیک به مطالعات سیروویچ<sup>۲</sup> برمی‌گردد که شرایط مرزی بین سیال و جسم جامد را به شکل نیرویی در معادله شتاب سیال لحاظ کرد. نیروهای دافعه مرزی توسط موناگان در اولین شبیه‌سازی SPH از جریان تراکم‌ناپذیر به کار گرفته

1. Ghost Particles

2. Sirovich

شد. نتایج این نیروها چندان رضایت‌بخش نیست چراکه با این شیوه، ذره‌ای که از کنار مرز می‌گذرد و فاصله‌ای ثابت از آن را حفظ می‌کند، تحت تأثیر نیروی نرمال غیریکنواخت و نیروی مماسی غیر صفر قرار می‌گیرد. در روش بعدی نیروهای وارد بر ذرات تنها با توجه به فاصله عمودی ذرات از مرز تخمین زده شد که نتایج این روش به‌دقت استفاده از ذرات مجازی نیست. به‌علاوه مرز این روش برای مرزهای مقعر نتایج قابل قبولی نمی‌دهد.

نیروی وارد بر یک ذره سیال، ناشی از ذرات مرزی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

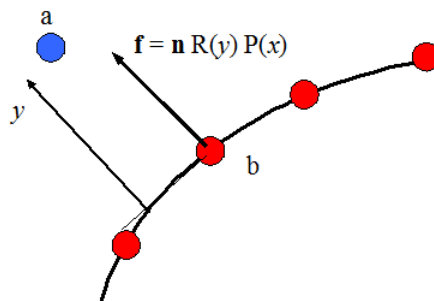
$$f_{ib} = \frac{K}{\beta} \frac{r_{ib}}{\left(|r_{ib}| - \frac{\Delta p}{\beta}\right)^2} W\left(\frac{r_{ib}}{h}\right) \frac{2m_b}{m_i + m_b}, \quad (64-3)$$

که  $m_b$  نشانگر جرم ذره مرزی،  $m_i$  جرم ذره سیال و  $\beta$  نسبت فاصله اولیه ذرات سیال به فاصله ذرات مرزی است.  $K$  معمولاً مجذور حداکثر سرعت پیش‌بینی‌شده برای سیال است.

ذرات مرزی باید دارای فواصلی کوچک‌تر از  $\frac{1}{3}$  فاصله اولیه ذرات سیال باشند تا نسبت نیروی مماسی به نیروی نرمال و نسبت تغییرات نیروی نرمال در یک فاصله ثابت از مرز کمتر از  $10^{-5}$  باشد.

با در نظر گرفتن نیروی دافعه ذرات مرزی و معادله شتاب سیال را می‌توان به این صورت اصلاح کرد:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_j m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} + R_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_b (f_{ib} - m_b \Pi_{ib} \nabla_i W_{ib}) + f_i \quad (65-3)$$



شکل ۳-۱۳: نمایی از طرز عملکرد ذرات مرزی در SPH

### ۳-۷-۱۰- معادلات جسم شناور

همان‌طور که گفته شد، در SPH مرزها توسط مجموعه‌ای از ذرات تشکیل می‌شوند که با نزدیک شدن ذرات سیال به مرز، به آن‌ها نیروی دافعه وارد کرده و باعث دور شدن ذرات سیال از مرز می‌گردند. همانند ذرات مرزی که در قسمت قبل نیز شرح داده شد، در کد ذرات اجسام شناور می‌توانند با دو شرط مرزی دینامیکی و دافعه مدل‌سازی شوند. برای هر ذره جسم شناور نیروی وارده از طرف ذرات سیال همسایه محاسبه شده و با جمع این نیروها شتاب و سرعت و جابجایی جسم محاسبه می‌گردد. در این پژوهش فرض ما این است که جسم کاملاً صلب<sup>۱</sup> بوده و دچار تغییر شکل نمی‌شود. ذره مرزی  $k$  نیرو بر واحد جرم زیر را توسط ذرات سیال تجربه می‌کند.

$$f_k = \sum_{a \in WP} f_{ka} \quad (۶۶-۳)$$

که در این رابطه  $WP$  به ذرات سیال اشاره داشته و  $f_{ka}$  نیز نیرو بر واحد جرم اعمال شده از طرف ذره سیال  $a$  به ذره مرزی  $k$  است. با استفاده از اصل تعادل و قانون سوم نیوتون، نیروی به وجود آمده از طرف یک ذره سیال به ذره مرز با استفاده از رابطه ۳-۶۷ محاسبه می‌شود.

$$m_k f_{ka} = -m_a f_{ak} \quad (۶۷-۳)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان نیروی وارد بر جسم شناور را محاسبه کرد. برای حرکت جسم از معادلات پایه‌ای دینامیک جسم صلب استفاده می‌شود. معادلات حرکت جسم در درجات آزادی انتقالی و دورانی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$M \frac{dV}{dt} = \sum_{k \in BP} m_k f_k \quad (۶۸-۳)$$

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \sum_{k \in BP} m_k (r_k - R_0) \times f_k \quad (۶۹-۳)$$

<sup>۱</sup>. rigid

در این روابط  $M$  جرم جسم شناور،  $I$  ممان اینرسی،  $V$  سرعت جسم،  $\Omega$  سرعت دورانی جسم،  $R_0$  موقعیت مرکز جرم و  $BP$  نیز ذرات مرزی هستند. همه ذرات مرزی جسم متحرک سرعت زیر را دارا می‌باشند.

$$u_k = V + \Omega \times (r_k - R_0) \quad (۷۰-۳)$$

موقعیت این ذرات نیز با انتگرال از رابطه محاسبه شده و می‌توان نشان داد، استفاده از روش هر دو مومنوم خطی و زاویه‌ای را برقرار می‌سازد.



# فصل ۴

(( اراءه، تجزيه و تحليل نتايجه ))

مطالعه و درک اثر سازه‌ها، موانع و پوشش‌های گیاهی در سیلاب‌های شدید همچون سونامی، طوفان‌های شدید و جریان ناشی از شکست سد و همچنین پیش‌بینی دقیق نیروی وارد بر موانع در حفاظت از مناطق مستعد و تحت تأثیر بسیار مهم می‌باشد. از آنجاکه ارزیابی و بررسی این پدیده می‌تواند بسیار پیچیده باشد، مدل‌های عددی به مهندسان در طبقه‌بندی و بررسی ساختار جریان کمک می‌کنند. هدف این بخش مطالعه و بررسی مسئله شکست سد و اثر آب راکد قرارگرفته در پشت آن با استفاده از مدل SPH می‌باشد. مطالعات در این فصل به ۴ بخش تقسیم می‌شود. در قسمت اول، ابتدا نرم‌افزار مدل‌سازی SPHysics همراه با پارامترهای آن معرفی می‌شود و سپس شرایط مدل‌سازی در نظر گرفته‌شده از جمله تابع کرنل، الگوریتم گام زمانی، سرعت صوت، شرایط مرزی و غیره برای مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام‌شده در این فصل ارائه می‌شود. در بخش دوم به‌منظور بررسی و تأیید روش SPH، ۵ آزمون شکست سد در برابر موانع مختلف در حالت دوبعدی انجام می‌پذیرد و نتایج مدل‌سازی، توسط مدل‌های آزمایشگاهی و سایر روش‌های عددی مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرند. بخش سوم به مدل‌سازی سه‌بعدی شکست سد در برابر یک مانع منفرد (مانع مکعبی، مانع استوانه‌ای و مانع مکعبی قرارگرفته با زاویه در مسیر جریان) و بررسی اثر نیروی واردشده بر مانع اختصاص داده‌شده است. بخش چهارم آخرین قسمت این فصل و هدف اصلی این پایان‌نامه می‌باشد. با هدف ارائه بهترین راهکار برای مقابله با جریان ناشی از شکست سد، در این قسمت چندین مانع با فواصل و شیوه‌چیدمان متفاوت در مسیر جریان مدل می‌شوند و ماکزیمم نیروی وارد بر موانع محاسبه می‌گردد تا به کمک بررسی آن بتوان به ارائه راهکاری مناسب رسید.

## ۴-۱-مدل سازی

### ۴-۱-۱- معرفی کد SPHysics

کد عددی SPHysics یک کد متن باز است. این کد با همکاری محققینی از دانشگاه‌های جان هاپکینز (آمریکا)، ویگو (اسپانیا)، منچستر (انگلستان) و ساپینزای رم (ایتالیا) نوشته شده است و از طریق سایت اینترنتی مجموعه SPHysics<sup>1</sup> در اختیار سایر محققین قرار گرفته است. کد عددی مذکور به زبان فرترن بوده و یکی از کدهای عددی بر مبنای فرمول بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموار است و عمدتاً بر اساس روابط ارائه شده توسط موناگان و تحقیقات انجام شده پیرامون جریان سطح آزاد در دانشگاه‌های اشاره شده می باشد. برای صحت سنجی SPHysics تست کیس‌های مختلفی انجام شده است؛ از جمله این تست‌ها می توان به شکست سد و اندرکنش موج و سازه اشاره کرد، که مقایسه نتایج کد عددی با نتایج آزمایشگاهی بیانگر قابلیت آن برای محاسبه مسائل سطح آزاد، که روش‌های اوپلری در آن‌ها موفقیت چندانی ندارند، می باشد. تاکنون بیش از ۲۰۰۰۰ نفر این کد را دریافت کرده اند و پژوهش‌های بسیاری با استفاده از این برنامه انجام شده است.

در این کد چهار الگوریتم حل در گام زمانی تعریف شده است، این الگوریتم‌ها از قرار زیر می باشند:

- الگوریتم پیش بینی-تصحیح،
- الگوریتم ورت،
- الگوریتم سیمپلکتیک،
- الگوریتم بیمن.

همچنین چهار تابع کرنل در کد قابل استفاده است، این توابع عبارت‌اند از:

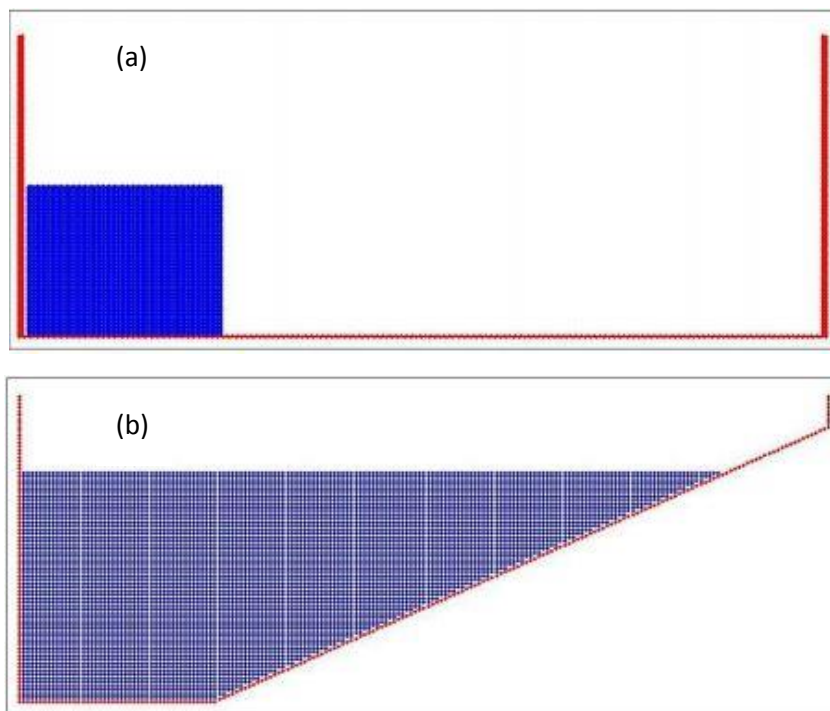
- کرنل گوسین،

<sup>1</sup> <https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>

- کرنل کوادرتیک،
- کرنل کیوبیک اسپلاین،
- کرنل وندلند (درجه ی پنج).

برای اصلاح توابع کرنل و گرادیان آنها گزینه های اصلاح تابع کرنل و اصلاح گرادیان تابع کرنل منظور شده است.

برای تعریف کردن شرایط اولیه هندسه مسئله، دو حالت کلی در نظر گرفته شده است، محفظه مستطیلی و ساحل. این دو هندسه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: (a) نمای هندسه محفظه مستطیلی (b) نمای هندسه ساحل

در این کد عددی اجسام ثابت متفاوتی (مستطیل و دوزنقه) در دامنه ی حل می توان در نظر گرفت. همچنین کد قابلیت اضافه کردن اجسام ثابت دیگری در برنامه را می دهد. در این کد اجسام متحرک با هندسه های مختلف (متناسب با کاربرد) تعریف شده است. به عنوان شرایط مرزی می توان دو شرط دینامیکی و دافعه را در نظر گرفت.

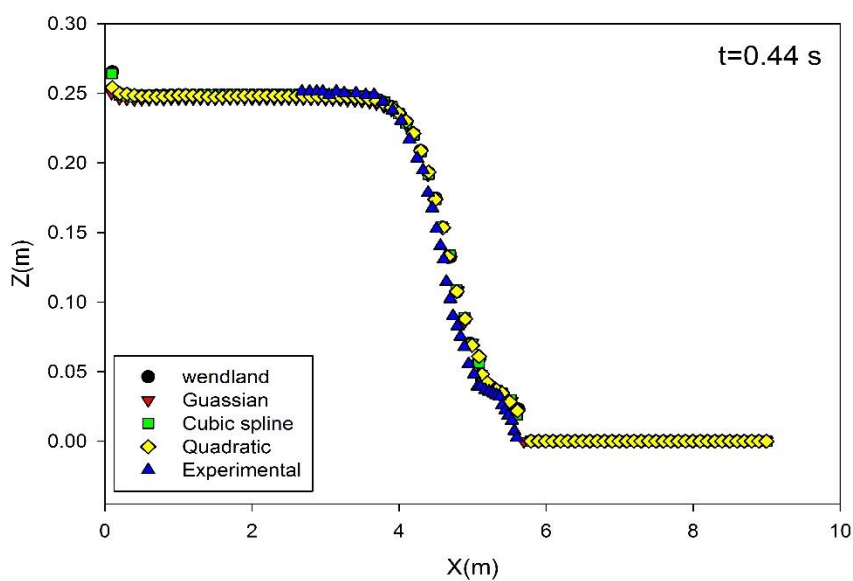
#### ۴-۱-۲- اصلاحات اعمال شده در کد

برای اینکه بتوان شرایط مختلف شکست سد در مقابل موانع را به وسیله کد SPHysics مدل کرد، می‌بایست تغییراتی را در کد به منظور ساخت هندسه‌های مورد نیاز اعمال کرد. SPHysics دارای معادلات جسم ثابت (مانع) بوده و تنها دارای دو شکل مستطیلی و دوزنقه‌ای می‌باشد. بنابراین می‌بایست با تغییر در هندسه جسم و برخی پارامترها دیگر اشکال مورد نظر را ساخت. برای بررسی مسئله شکست سد در برابر مانع، نیاز به ایجاد مدل‌های مختلف مانع در حالت دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشد برای همین منظور امکان ایجاد اشکال ذکر شده با هر اندازه و زاویه‌ای در کد فراهم گردیده است.

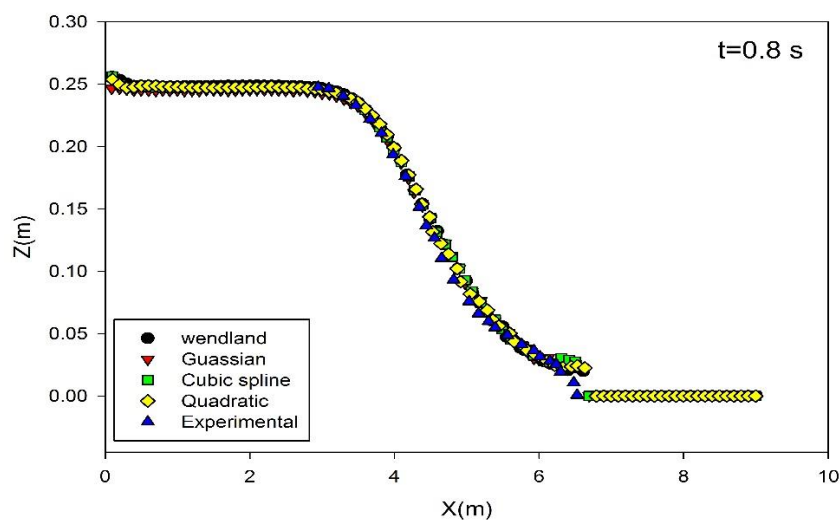
#### ۴-۱-۳- انتخاب پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی‌های انجام شده

تابع کرنل

در مدل‌سازی‌های انجام شده از تابع کرنل وندلند استفاده شده است. برای اینکه بتوان یک تابع کرنل را به عنوان بهترین گزینه انتخاب کرد، نیاز به بررسی عملکرد توابع کرنل متفاوت می‌باشد. برای این منظور مسئله شکست سد با پائین دست خشک با توابع کرنل مختلف مدل‌سازی شد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. مقایسه این نتایج طی دو مجموعه نمودار در ادامه ارائه می‌گردد، مجموعه اول مربوط به نتایج توابع کرنل بوده (شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳) و مجموعه دوم مربوط به زمان حل هر تابع کرنل می‌باشد (شکل ۴-۴).

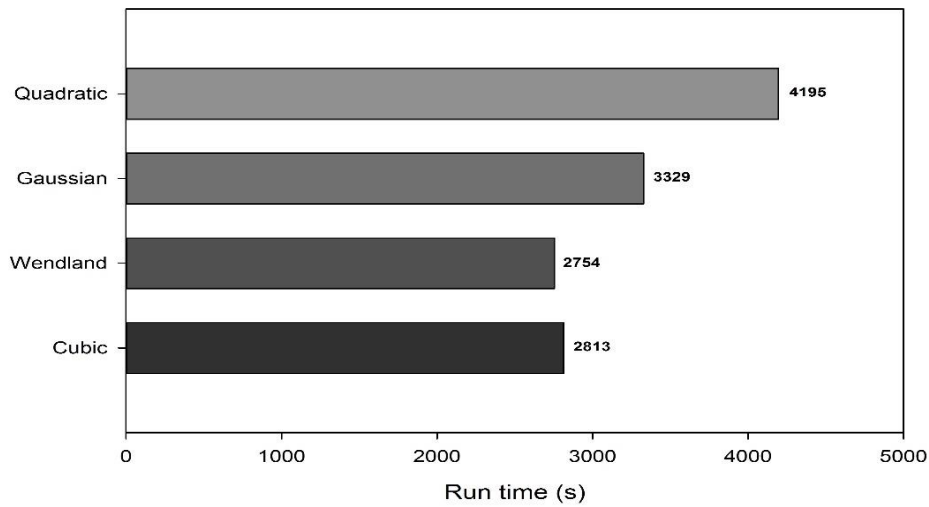


شکل ۲-۴: مقایسه نتایج توابع کرنل مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.44s$



شکل ۳-۴: مقایسه نتایج توابع کرنل مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.8s$

همان طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از توابع مختلف برای این مسئله بسیار نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین دقت حل توابع، مبنای مناسبی برای انتخاب تابع کرنل نمی‌باشد. با این توضیح می‌توان اظهار کرد که زمان حل پارامتر مؤثری در انتخاب تابع کرنل می‌باشد.



شکل ۴-۴: نمایش زمان اجرا برای توابع کرنل متفاوت

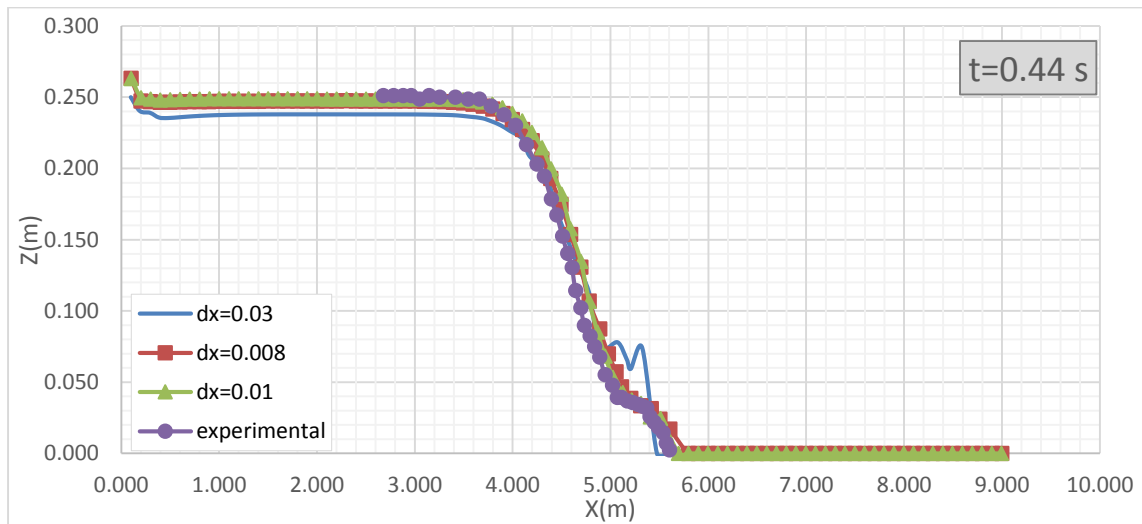
همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود تابع وندلند کمترین زمان حل را دارد و از این رو به عنوان تابع کرنل مبنا در مدل‌سازی‌ها انتخاب می‌شود.

#### سرعت صوت

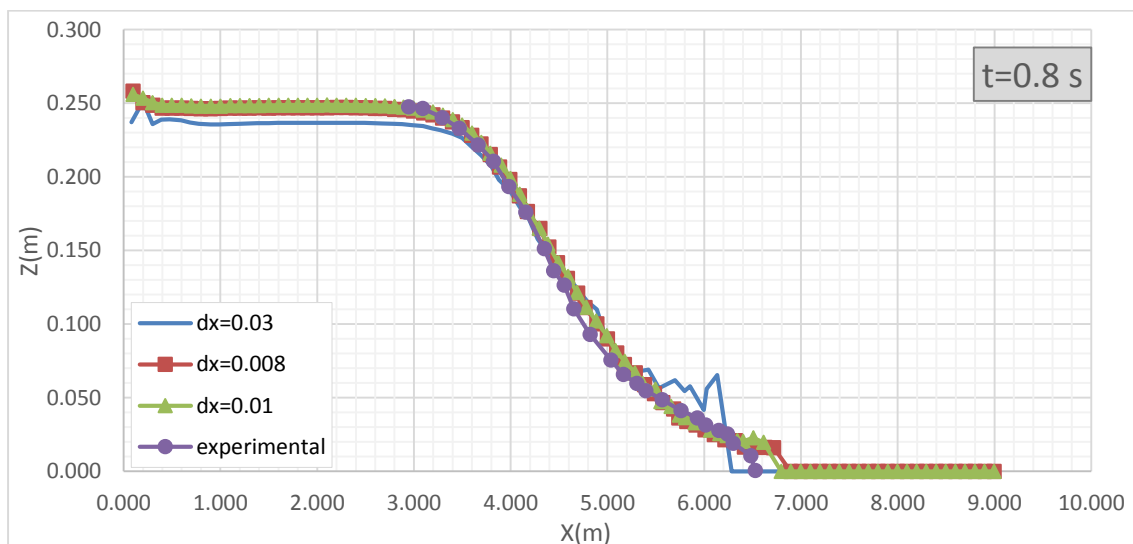
سرعت صوت واقعی در آب حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است. استفاده از این سرعت صوت حل مسائل را دچار مشکل می‌کند، زیرا گام زمانی به سرعت صوت وابسته بوده و انتخاب مقدار واقعی سرعت صوت، گام زمانی را بسیار کوچک و اجرای برنامه را غیرممکن می‌سازد. برای حل این مشکل پیشنهاد شده است از سرعت صوتی معادل ۱۰ برابر سرعت بیشینه استفاده شود. این کار سبب می‌شود سیال اندکی تراکم‌پذیر شده و تغییرات چگالی در حدود ۱ درصد گردد. در SPHysics توصیه می‌شود سرعت صوت ورودی مسئله بین ۱۰ و ۴۰ قرار بگیرد و به‌طور پیش‌فرض این مقدار در  $\sqrt{gh_{SWL}}$  ضرب شده که  $g$  شتاب ثقل و  $h_{SWL}$  حداکثر عمق سیال است.

## اندازه ذرات

به منظور بررسی اثر اندازه ذرات در مدل سازی، در این قسمت مسئله شکست سد با پائین دست خشک توسط اندازه ذرات مختلف مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج آن ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شوند.



شکل ۴-۵: مقایسه نتایج اندازه ذرات مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.44s$



شکل ۴-۶: مقایسه نتایج اندازه ذرات مختلف با نتیجه آزمایشگاهی در زمان  $t=0.8s$

همان طور که در شکل های بالا می توان مشاهده کرد، هر چه تعداد ذرات بیشتری و به عبارتی  $dx$  کوچک تری برای ذرات در نظر گرفته شود، نتایج مدل سازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر می شوند.



البته انتخاب ذرات بسیار ریز منجر می‌شود که زمان و هزینه محاسباتی افزایش یابد. بنابراین انتخاب اندازه ذرات باید متناسب با مسئله انتخاب شود تا هم دقت جواب مناسب باشد و هم زمان حل بهینه گردد.

همچنین شرایط مرزی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی‌های انجام شده، شرایط مرزی دینامیک می‌باشد. از مزیت‌های این روش سادگی آن است چون ذرات مرزی می‌توانند در همان حلقه‌ای که برای ذرات سیال نوشته می‌شود، حل شده و در نتیجه هزینه محاسباتی پایین بیاید. علاوه بر این شرط مرزی دینامیک، شرط عدم لغزش را ارضا می‌کند؛ این در حالی است که شرایط مرزی دافع چنین قابلیت را نداشته و دارای محدودیت می‌باشد.

در این قسمت پارامترهای دینامیکی مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها بیان و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه می‌توان قدم به مرحله اصلی تحقیق، یعنی مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی شکست سد در برابر موانع پرداخت.

## **۴-۲- مدل‌سازی دوبعدی**

در جدول زیر خلاصه‌ای از شرایط مدل‌سازی‌های دوبعدی انجام شده در این بخش، آمده است. همچنین کدهای نوشته شده برای مدل‌سازی‌های انجام شده در این قسمت، در پیوست الف آورده شده است.

جدول ۴-۱: خلاصه‌ای از پارامترهای مدل‌سازی در آزمون‌های انجام‌شده

مطابقتی و بهتری	case	نوع آزمایش	نوع کرنل	تعداد ذرات np	گام زمانی	سرعت صوت Cs (m/s)	dx=dy (m)	شرایط مرزی BC	CFL
		1	شکست سد در بستر خشک	Wendland	25164	P-C *	22.00	0.01	Dalrymple
شکست سد در بستر مرطوب			Wendland	15561	P-C	22.00	0.015	Dalrymple	0.2
2		شکست سد از روی مانع مستطیلی	Wendland	10774	P-C	23.00	0.003	Dalrymple	0.2
3		شکست سد از روی مانع دوزنقه‌ای	Wendland	12048	P-C	22.00	0.015	Dalrymple	0.2
4		شکست سد از روی مانع مثلثی	Wendland	25950	P-C	22.00	0.01	Dalrymple	0.2
5		شکست سد از روی مانع لبه تیز	Wendland	17927	P-C	21.00	0.003	Dalrymple	0.2

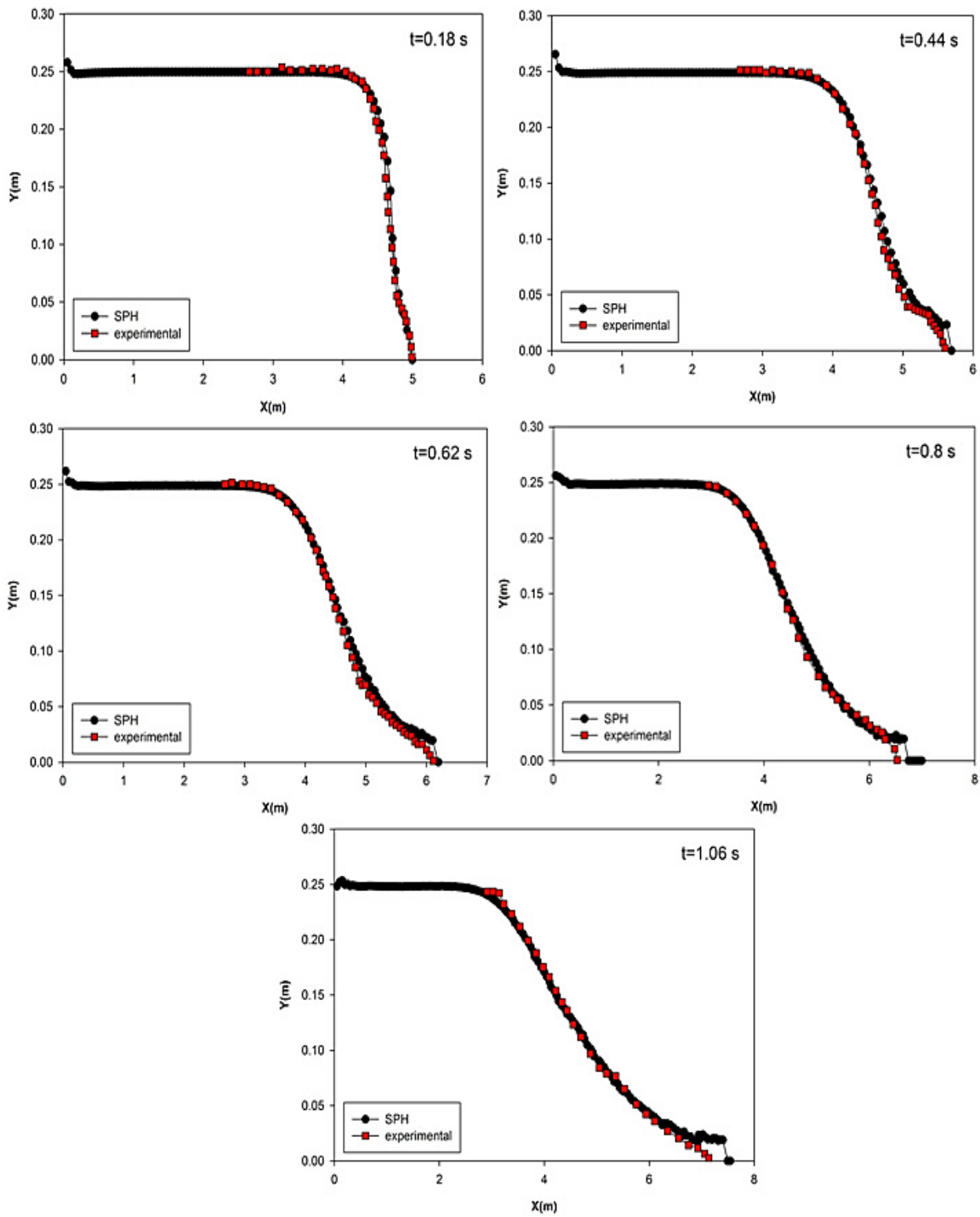
\*Predictor-Corrector

### ۴-۲-۱- جریان شکست سد از روی بستر هموار خشک و مرطوب

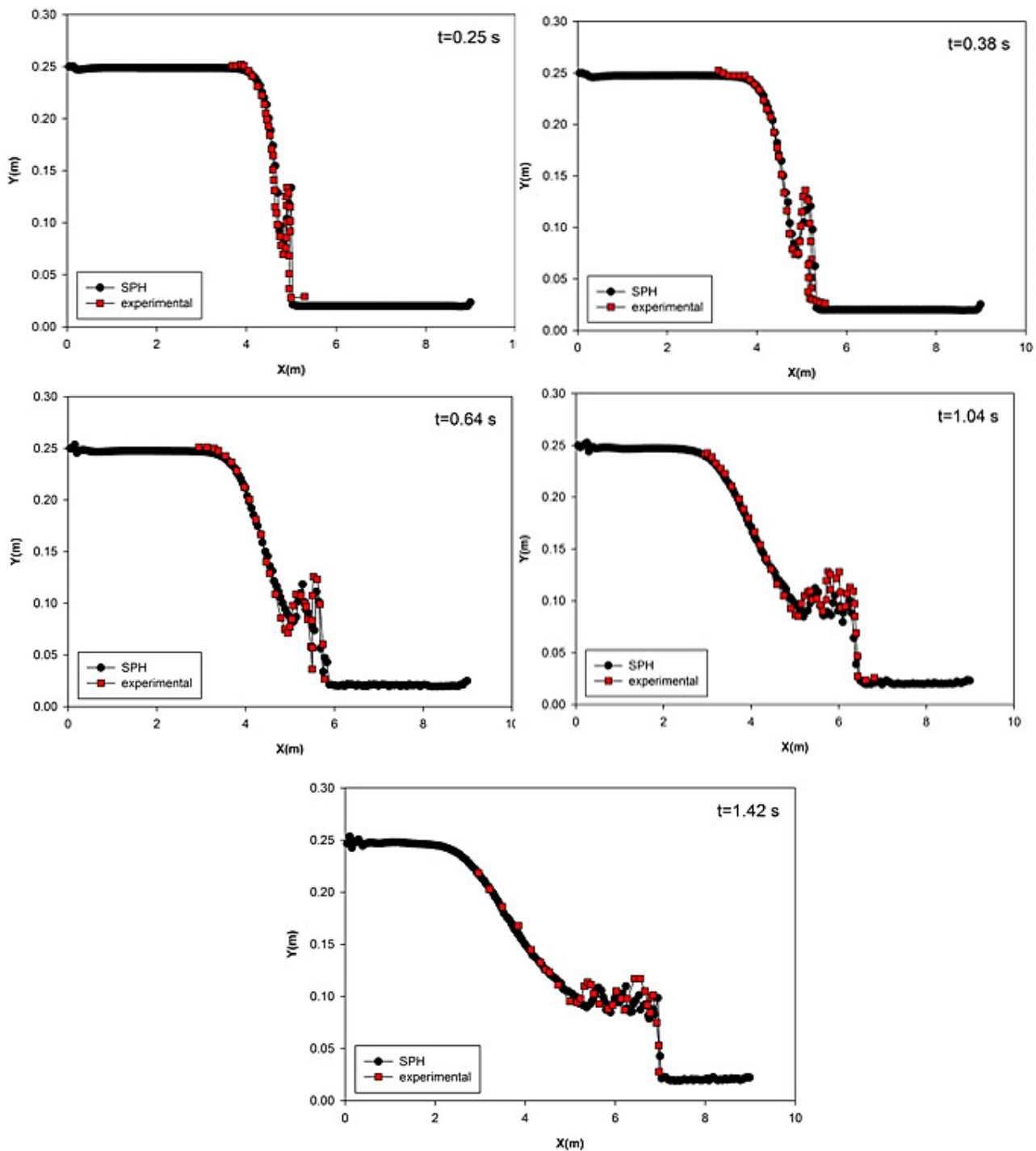
اولین آزمون باهدف بررسی توانایی مدل SPH برای شبیه‌سازی جریان شکست سد از روی بستر هموار می‌باشد. آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه Cukurova در ترکیه توسط کوکامن در سال ۲۰۰۷ انجام شد [۷۹] و نتایج توسط ازمن و کوکامن در سال ۲۰۱۰ منتشر شد [۲۲]. آزمایش در یک کانال مستطیلی به طول ۹m، عرض ۰/۳m و ارتفاع ۰/۳۴m انجام شد. درپچه در فاصله ۴/۶۵ متری از ابتدای کانال قرار دارد. عمق اولیه آب،  $h_0$ ، ثابت و برابر ۰,۲۵m می‌باشد. مدل‌سازی‌ها در دو شرایط متفاوت انجام می‌شود؛ در آزمون اول بستر پائین‌دست کانال خشک و در آزمون دوم بستر پائین‌دست مرطوب و عمق آب برابر ۰,۰۲۵ متر می‌باشد.

شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ به ترتیب مقایسه بین پروفیل سطح آب نتایج آزمایشگاهی و نتایج

شبیه‌سازی‌شده SPH را در زمان‌های مختلف برای بستر خشک و مرطوب نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی بستر خشک



شکل ۴-۸: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی بستر مرطوب

برای بررسی کمی و مقایسه نتایج با نتایج مدل‌سازی SPH، مقادیر خطا از رابطه زیر محاسبه

می‌شود:

در این رابطه  $N$  تعداد داده‌ها،  $\varphi_i$  مقدار کمیت به دست آمده از مدل حاضر و  $\varphi'_i$  نیز مقدار کمیت مورد نظر بوده که از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آید:

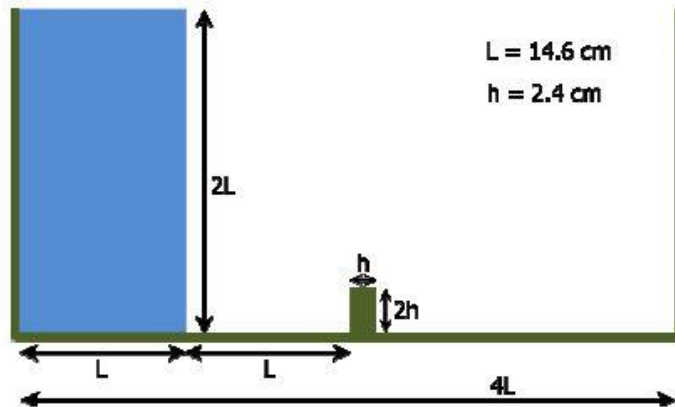
$$Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\varphi_i - \varphi'_i|}{\varphi'_i} \times 100 \quad (1-4)$$

در شکل ۴-۷ تطابق خوبی را بین نتایج SPH و نتایج آزمایشگاهی برای بستر خشک نشان می‌دهد. در این حالت میانگین درصد خطا برابر ۳٫۵٪ می‌باشد که در محدوده قابل قبولی قرار دارد. در شکل ۴-۸ نیز تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و SPH وجود دارد. نتایج در زمان‌های  $t=0.25s$  و  $t=0.38s$  را به درستی نشان می‌دهد. در زمان‌های بالاتر تنها تفاوت اندکی بین SPH و عمق جریان اندازه‌گیری شده بر روی پیشرفت موج مثبت، به جز در طول مراحل اولیه و مراحل نهایی، به دلیل خطای ناشی از پاشیدگی جریان در سطح می‌باشد. در این حالت نیز میانگین درصد خطا ۱۳٫۲٪ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که مدل شبیه‌سازی شده SPH در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

## ۴-۲-۲- جریان شکست سد از روی مانع مستطیلی

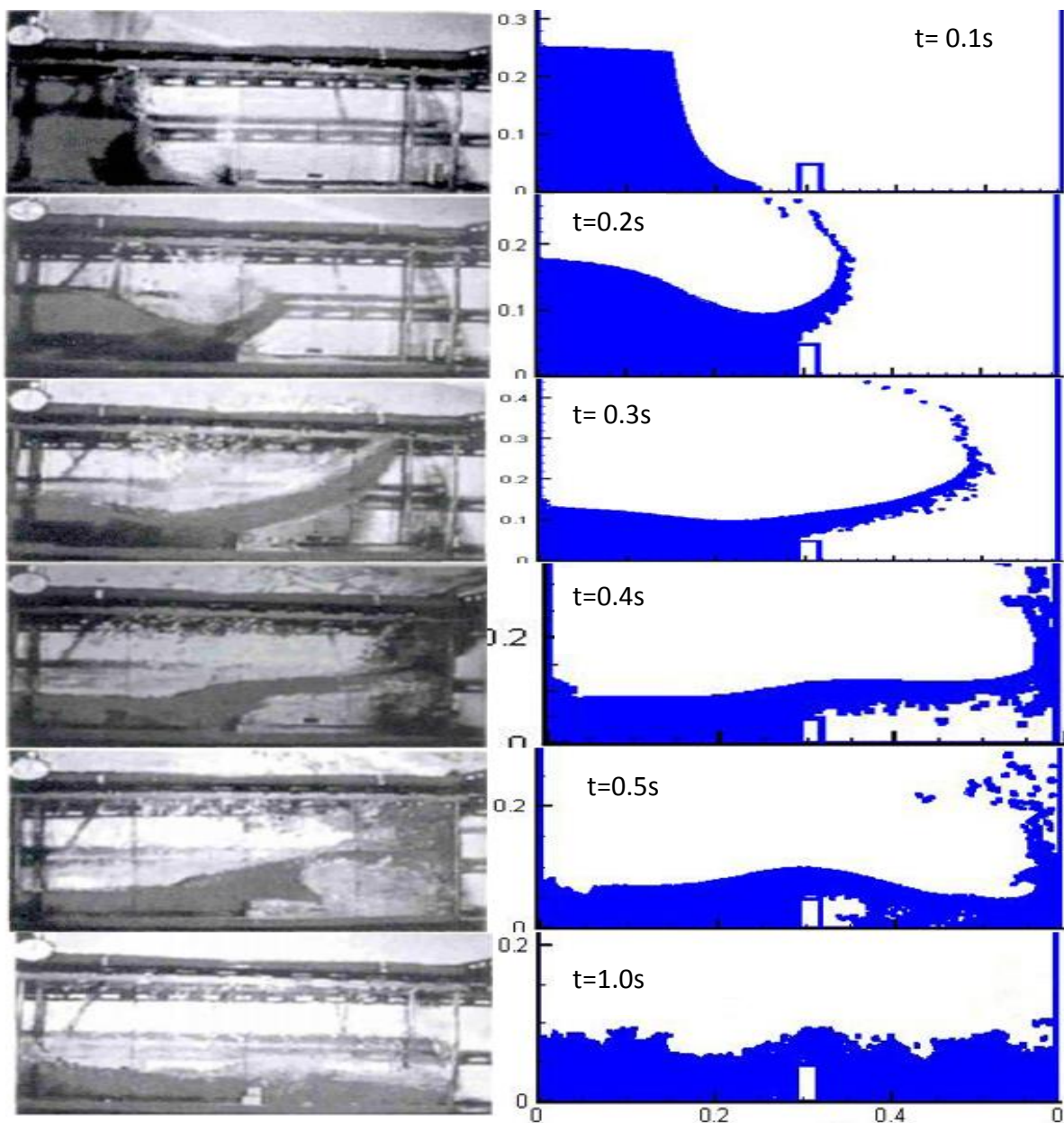
آزمایش جریان دوبعدی شکست سد از روی مانع مستطیلی توسط کوشیزوکا<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۵ در یک کانال به ابعاد  $4L \times 4L$  (طول \* ارتفاع) که  $L = 0.146$  می‌باشد، انجام شد [۸۰]. ستون آب با ارتفاع اولیه  $2L$  و عرض  $L$  در داخل کانال در نظر گرفته شد و یک مانع مستطیلی با ابعاد  $h \times 2h$  که  $h=0.24m$  می‌باشد در وسط کانال قرار گرفته است. شکل ۴-۹ نمایی از کانال آزمایشگاهی مورد بررسی را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup>. Koshizuka



شکل ۴-۹: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی

شکل ۴-۱۰ مقایسه نتایج آزمایشگاهی را با نتایج شبیه‌سازی شده SPH در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در زمان  $t=0.1\text{s}$  مدل شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی دارد. در زمان‌های  $t=0.2\text{s}$  و  $t=0.3\text{s}$  مشاهده می‌شود که پیشانی مایع به تدریج از جت آب پاشیده شده جدا می‌شود و قطرات ریز مایع را تشکیل می‌دهد. اگرچه در نتایج شبیه‌سازی شده، تفکیک و جدا شدن قوی جبهه جت آب پاشیده شده در حالت آزمایشگاهی نشان داده نشده است. با گذشت زمان در  $t=0.4\text{s}$  جت آب به دیوار برخورد می‌کند و هوا در زیر آن به دام می‌افتد. در این لحظه لایه‌نازکی از مایع بر روی دیوار تشکیل می‌شود. سپس لایه با توجه به اثر گرانش شروع به سقوط به سمت پایین می‌کند. در زمان  $t=0.5\text{s}$  تفاوت‌های اندکی با مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که این به دلیل تفاوت در حرکت مقدار هوای به دام افتاده باشد. در زمان  $t=1\text{s}$  نیز با گذشت زمان، حرکت جریان آرام‌تر می‌شود و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی می‌باشد.

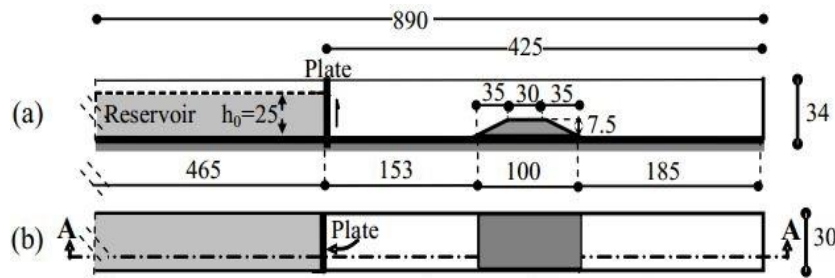


شکل ۴-۱۰: مقایسه پروفیل سطح آب نتایج آزمایشگاهی با نتایج SPH در شکست سد با مانع مستطیلی

### ۴-۲-۳- جریان شکست سد از روی مانع دوزنقه‌ای

جریان شکست سد از روی مانع دوزنقه‌ای به صورت آزمایشگاهی توسط کوکامن در سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت [۷۹] و نتایج اندازه‌گیری آن توسط ازمن و کوکامن در سال ۲۰۱۱ گزارش شد [۲۷]. این آزمایش شامل یک کانال به طول 9m، عرض 0.3m و ارتفاع 0.34m بوده و بستر و کف کانال از شیشه ساخته شده است. دریچه در فاصله ۴٫۶۵ متری از ابتدای کانال قرار دارد. عمق اولیه آب در

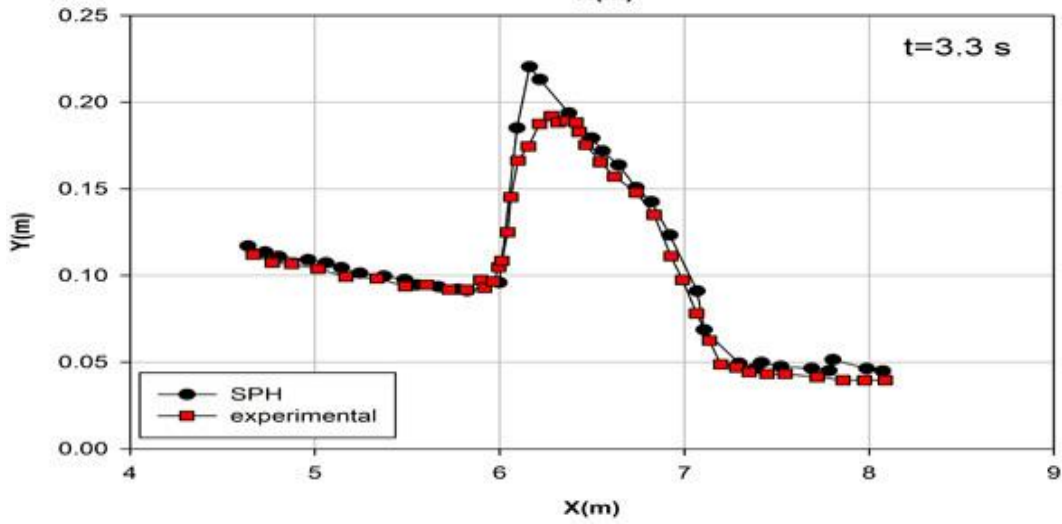
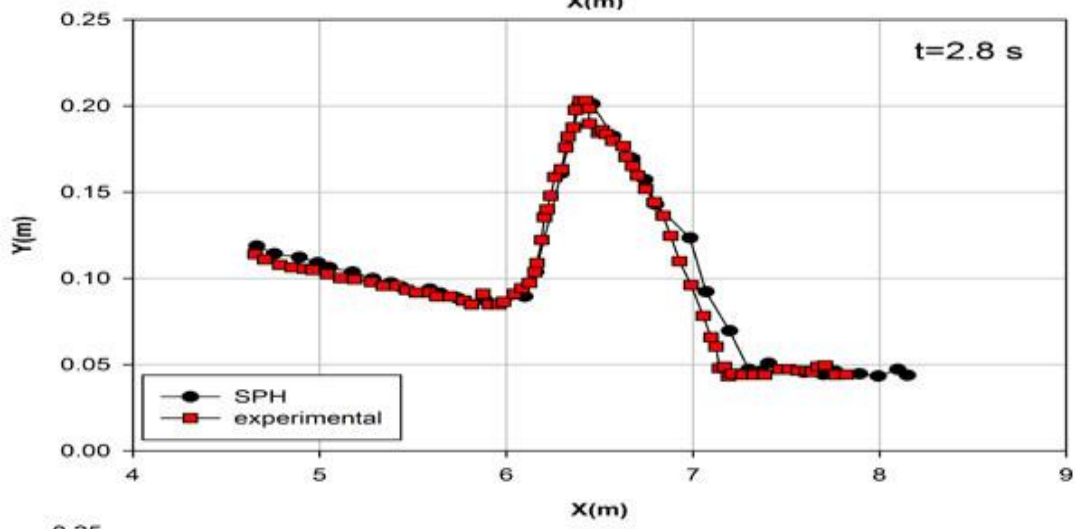
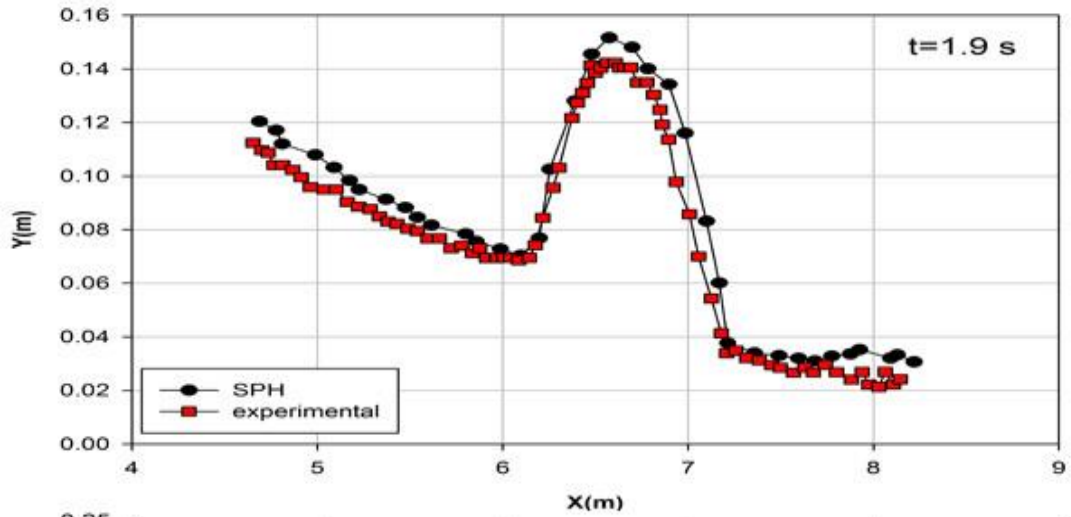
مخزن،  $h_0$ ، ۰٫۲۵ متر و پائین دست آن خشک است. یک مانع ذوزنقه‌ای شکل در پائین دست کانال قرار گرفته است. شکل ۴-۱۱ نمایی دوبعدی از کانال آزمایشگاهی مورد بررسی را در دو حالت مقطع عرضی و پلان نشان می‌دهد.

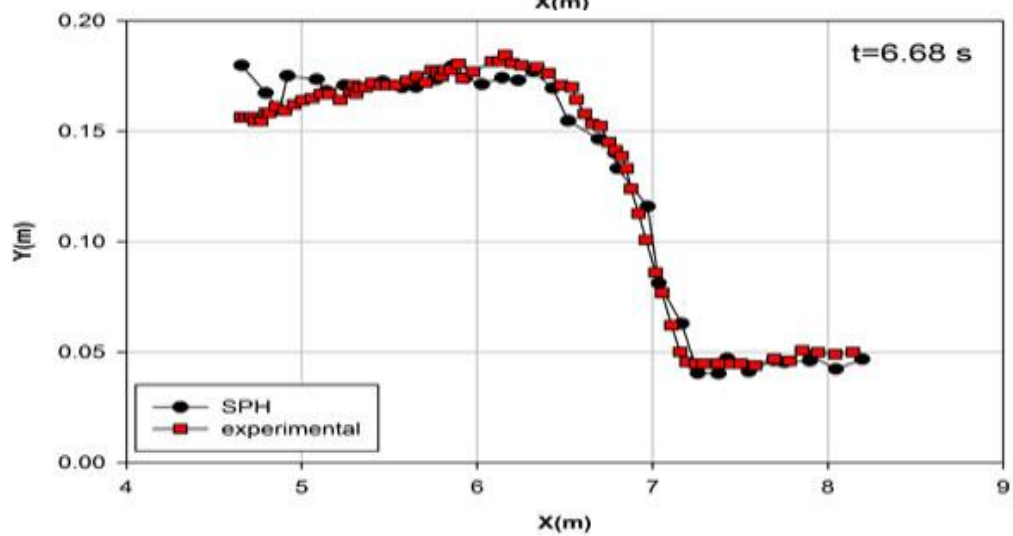
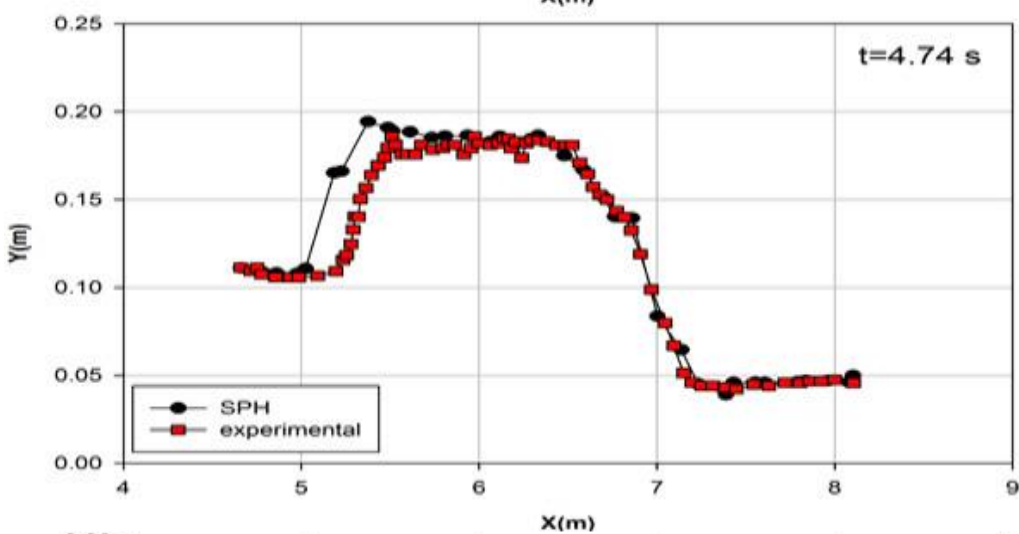
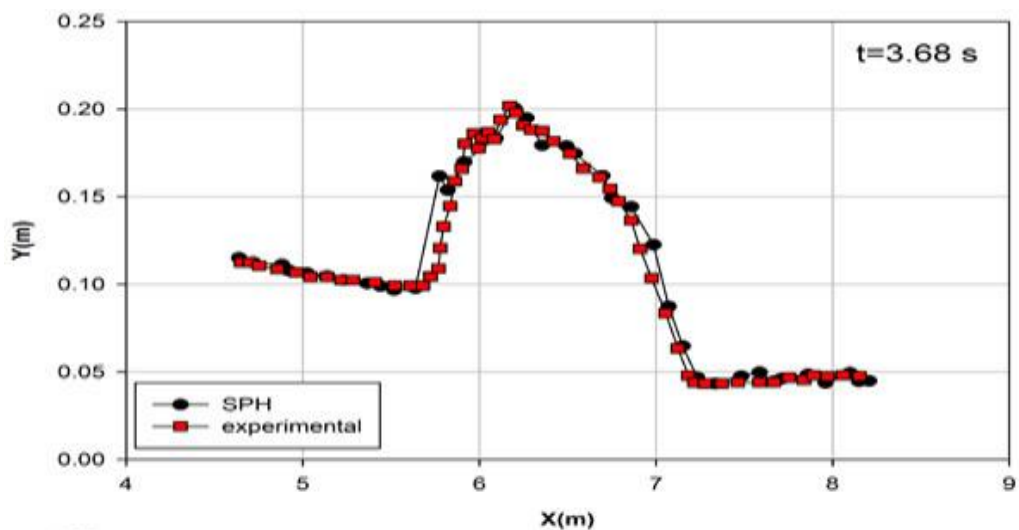


شکل ۴-۱۱: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی؛ (a) مقطع A-A؛ (b) پلان

شکل ۴-۱۲ نتایج پروفیل سطح آب در حالت آزمایشگاهی و محاسبه شده توسط SPH را در زمان‌های مختلف مقایسه می‌کند. هنگامی که سد می‌شکند و موج شکست سد به مانع می‌رسد، جریان دچار پرش هیدرولیکی می‌شود و در گام زمانی  $t=1.2$  s از روی مانع عبور می‌کند. با عبور جریان از روی مانع یک موج منفی بر روی سطح آزاد آب در بالادست مانع تشکیل می‌شود. پروفیل سطح آزاد در زمان‌های  $t=1.9$  s و  $t=2.8$  s به درستی پیش‌بینی شده است اما هنگامی که موج منفی در زمان  $t=3.3$  s شروع به تشکیل شدن در پشت مانع می‌کند، تراز آب همچنان بالا می‌رود و در  $x=6.16$  m به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این مرحله تفاوت اندکی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی وجود دارد که به دلیل نوع شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در سطح آزاد و نوع شکسته شدن موج به سمت بالادست در آزمایش می‌باشد. در زمان‌های دیگر تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و SPH می‌باشد (  $t=3.68$  s،  $t=4.74$  و  $t=6.68$  s ).

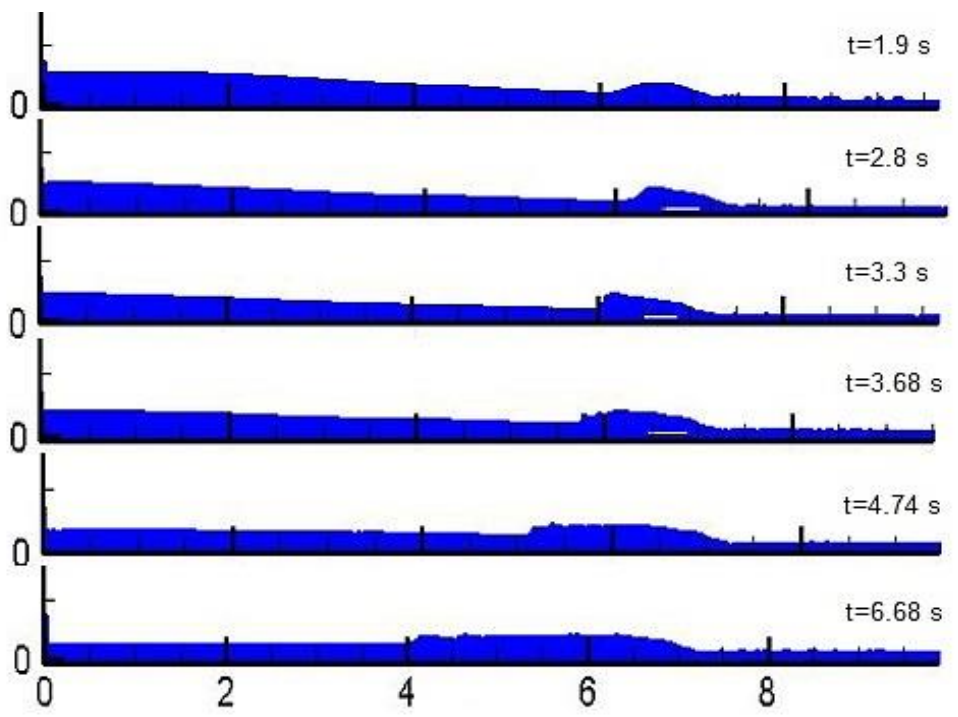






شکل ۴-۱۲: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی مانع دوزنقه‌ای

در شکل ۴-۱۳ می‌توان عبور جریان از روی مانع و شکل‌گیری موج منفی را مشاهده کرد.

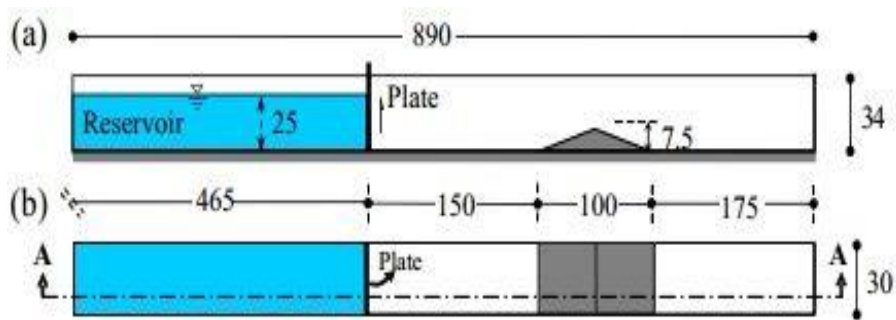


شکل ۴-۱۳: شکل‌گیری موج منفی از روی مانع دوزنقه‌ای

با استفاده از رابطه ۴-۱ مشخص گردید که مدل شبیه‌سازی‌شده به‌طور متوسط خطایی به میزان ۶٫۶٪ دارد که در محدوده قابل قبولی می‌باشد.

#### ۴-۲-۴- جریان شکست سد از روی مانع مثلثی

مدل آزمایشگاهی شکست سد از روی مانع مثلثی در آزمایشگاه مهندسی هیدرولیک دانشگاه Cukurova ترکیه، توسط کوکامن در سال ۲۰۰۷، اجرا شد [۷۹]. آزمایش شامل یک کانال مستطیلی افقی با طول ۸٫۹م، عرض ۰٫۳م و ارتفاع ۰٫۳۴م می‌باشد که کف و دیوارهای آن از جنس شیشه می‌باشد. یک صفحه در فاصله ۴٫۶۵ متری از ابتدای کانال قرار دارد که نشان‌دهنده سد می‌باشد. عمق اولیه آب در مخزن ۰٫۲۵ متر می‌باشد و پائین‌دست کانال خشک می‌باشد. یک مانع مثلثی متقارن با طول ۱متر و ارتفاع ۰٫۰۷۵ متر در فاصله ۱٫۵ متری در پائین‌دست سد قرار گرفته است. شکل ۴-۱۴ نمایی دوبعدی از کانال آزمایشگاهی موردبررسی را در دو حالت مقطع و پلان نشان می‌دهد.

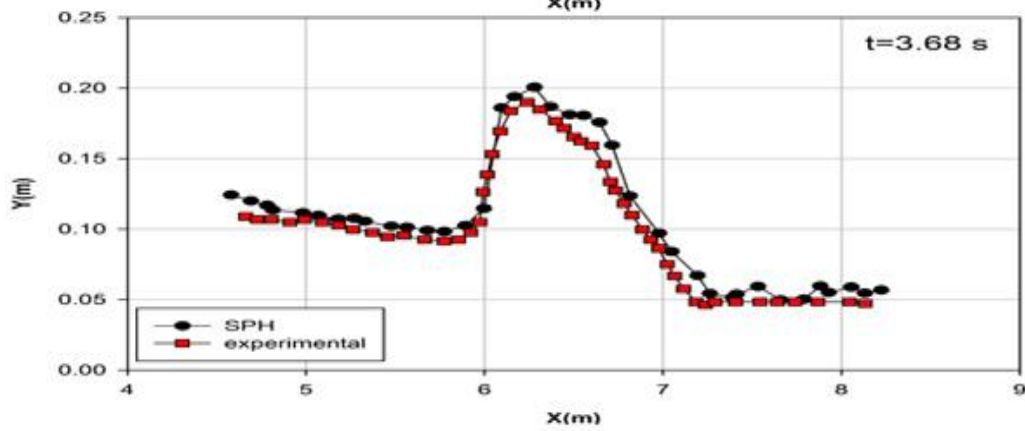
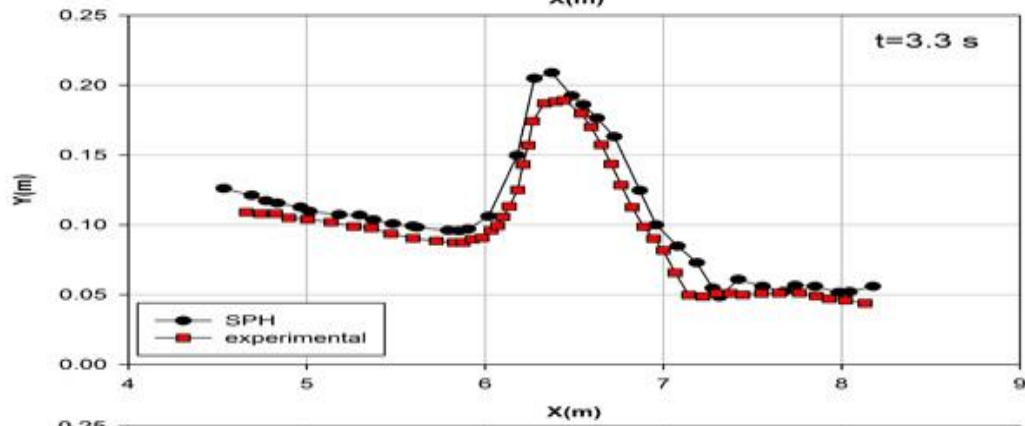
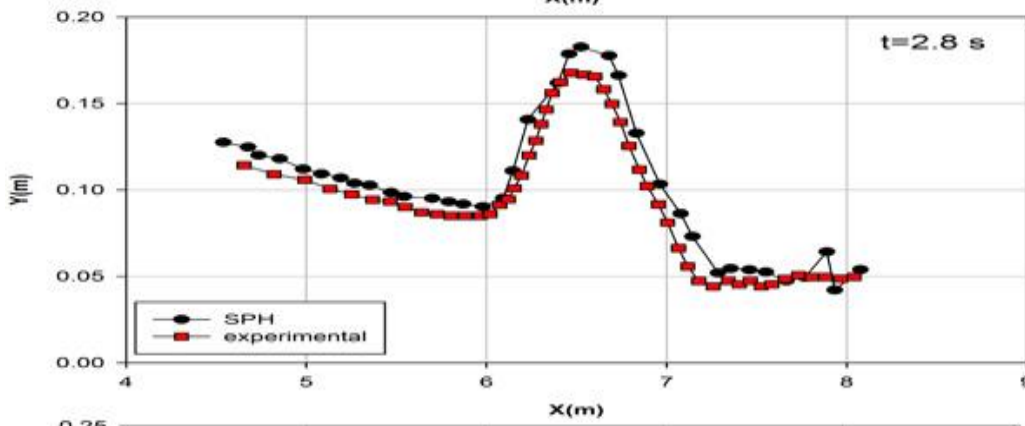
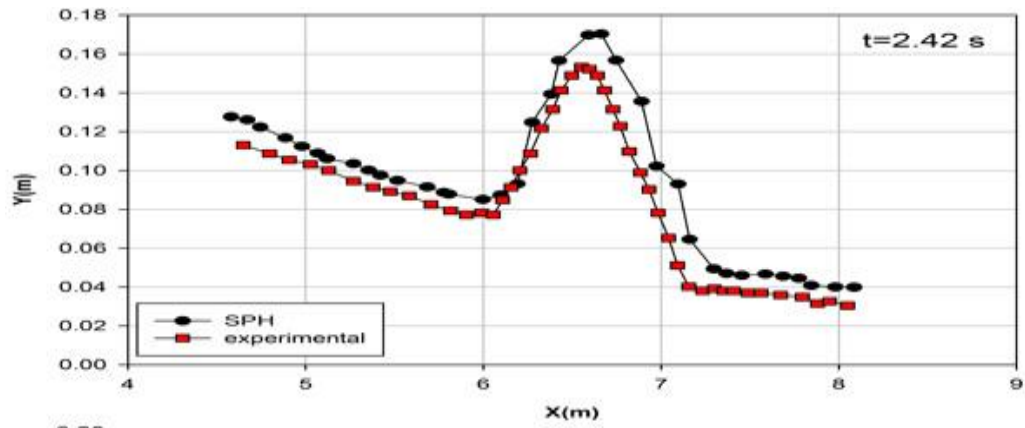


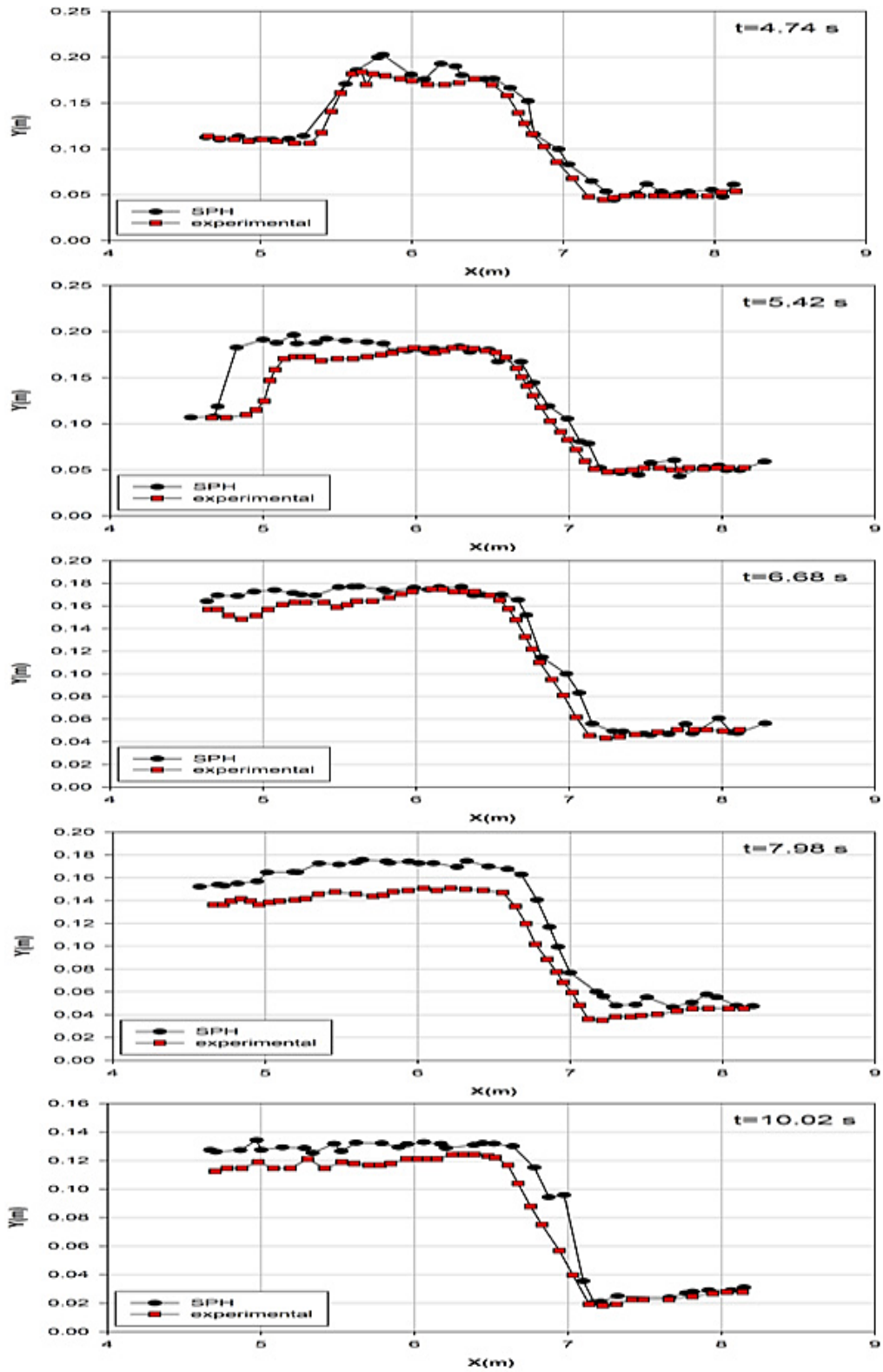
شکل ۴-۱۴: شرایط اولیه کانال آزمایشگاهی؛ (a) مقطع A-A؛ (b) پلان

شکل ۴-۱۵ مقایسه بین پروفیل سطح آب نتایج آزمایشگاهی را با نتایج مدل‌سازی شده SPH شکست سد در برابر مانع مثلثی نشان می‌دهد. در زمان‌های  $t=2.42s$  و  $t=2.8s$  SPH پیشروی جبهه موج جلو رونده را اندکی بیشتر از مقدار آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با گذشت زمان تراز آب افزایش می‌یابد تا در زمان‌های  $t=3.3s$  تا  $t=5.42s$  هنگامی که جریان از روی مانع عبور می‌کند، قسمتی از جریان به سمت بالادست منعکس می‌شود و تشکیل موج منفی می‌دهد، که نتایج مدل‌سازی اندکی بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهند و موج شبیه‌سازی شده با سرعت بیش‌تری به سمت بالادست حرکت می‌کند. در زمان  $t=6.68s$  به جز تفاوت اندکی که در مراحل اولیه به دلیل برخورد جریان با دیواره کانال ایجاد می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد. در زمان‌های  $t=7.98s$  و  $t=10.02s$  تفاوت اندکی با نتایج آزمایشگاهی به چشم می‌خورد و ارتفاع سطح آب را اندکی بالاتر از مقدار آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

در این مدل شبیه‌سازی شده توسط SPH، میانگین درصد خطا ۱۳٫۷٪ می‌باشد که در محدوده قابل

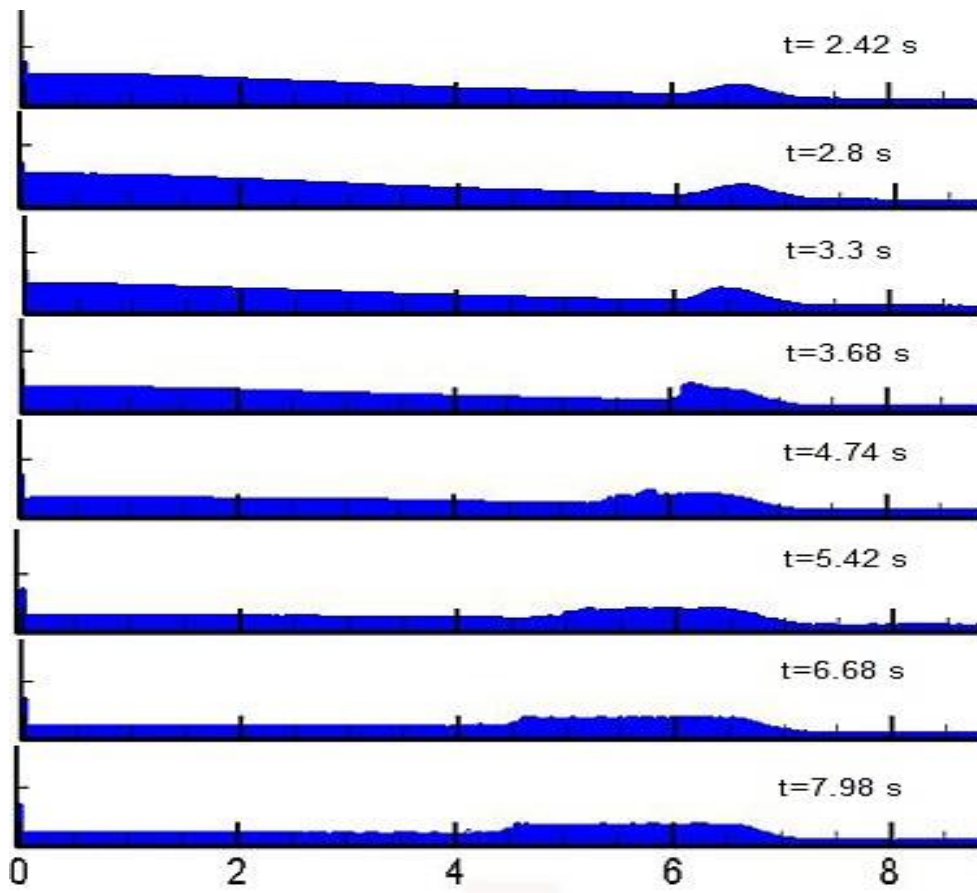
قبولی قرار دارد که نشان‌دهنده دقت نتایج SPH می‌باشد.





شکل ۴-۱۵: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه‌شده (SPH) جریان شکست سد از روی مانع مثلثی

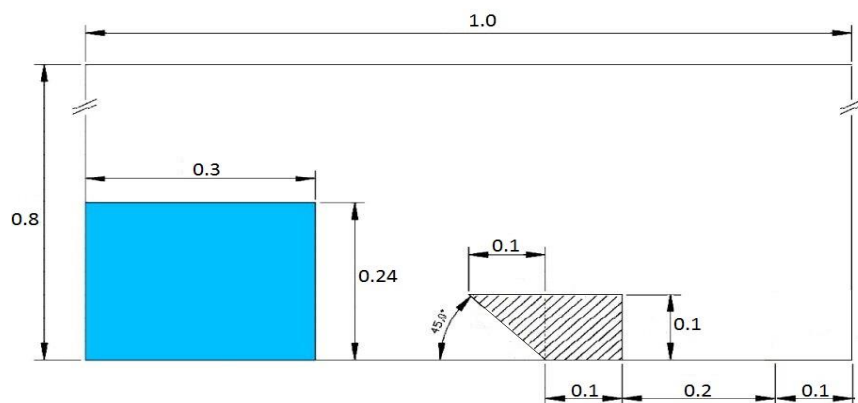
در شکل ۴-۱۶ می توان عبور جریان از روی مانع و شکل گیری موج منفی را مشاهده کرد.



شکل ۴-۱۶: شکل گیری موج منفی از روی مانع مثلثی

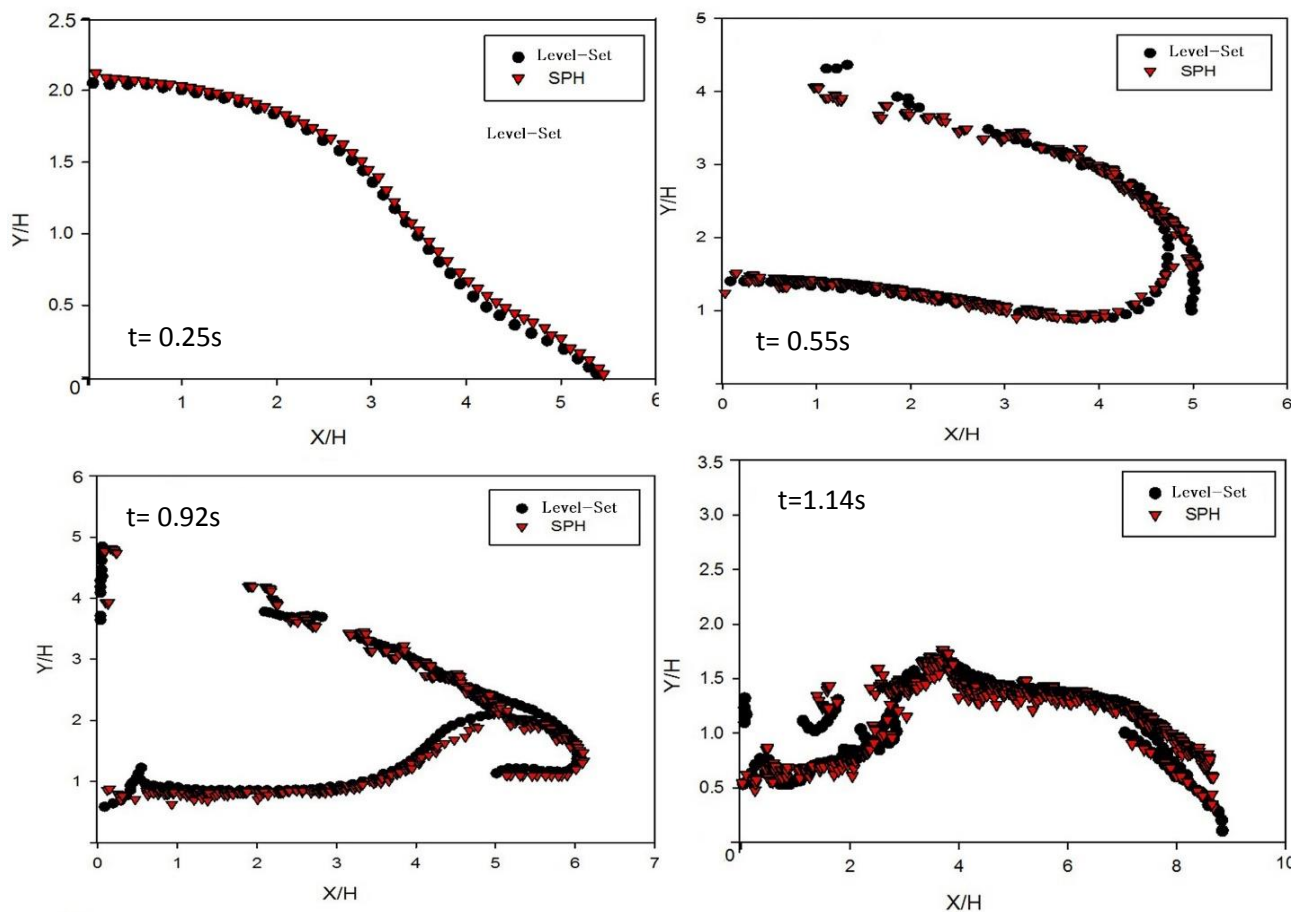
#### ۴-۲-۵- جریان شکست سد از روی مانع لبه تیز

آخرین مدل سازی مربوط به بررسی جریان شکست سد از روی یک مانع لبه تیز می باشد. برای این مدل سازی نتایج آزمایشگاهی وجود ندارد و نتایج مدل سازی SPH با نتایج روش عددی Level-Set که حلگر آن بر اساس روش تفاضل محدود مرتبه دوم می باشد [۸۱]، مورد مقایسه قرار گرفته شد [۴۳]. برای شبیه سازی شکست سد، یک کانال دوبعدی به طول 1m و ارتفاع 0.8m با پائین دست خشک مدل می شود. از دیواره کانال تا فاصله ۰,۳ متری از آن ستون آب با ارتفاع ۰,۲۴ متر قرار می گیرد. همچنین انتهای کانال تا حد امکان دور در نظر گرفته می شود تا سیل در مدت زمان مناسب بدون برخورد به مانعی دیگر به راه خود ادامه دهد. شکل ۴-۱۷ مشخصات کانال شبیه سازی شده را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۷: مشخصات مخزن، کانال و مانع مورد استفاده در شکست سد

شکل ۴-۱۸ مقایسه بین پروفیل سطح آب محاسبه شده توسط SPH و نتایج روش عددی Level-Set، را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۸: مقایسه پروفیل سطح آب اندازه گیری شده توسط روش عددی Level-Set و محاسبه شده (SPH) جریان شکست سد از روی مانع لبه تیز



بعد از شکسته شدن سد، موج سیلابی در پائین دست سد ایجاد می شود. در اثر برخورد این موج سیلابی به مانع، الگوی جریان پیچیده ای تشکیل می شود. هنگامی که جریان به مانع می رسد بخش اعظمی از آن منعکس می شود و به شکل یک موج منفی، به سمت بالادست حرکت می کند. با افزایش ارتفاع، موج حاصل ناپایدار می شود و شکست رخ می دهد و در اثر این شکست جریان تا حد زیادی گسسته می شود. مدل SPH و روش عددی ذکر شده نتایج نزدیکی به هم دارند. پروفیل سطح آزاد برای  $t=0.25s$  دقیق می باشد. در زمان های  $t=0.55s$ ،  $t=0.92s$  و  $t=1.14s$  به دلیل پراکنده شدن ذرات در اثر برخورد به مانع اختلافات اندکی در حرکت ذرات وجود دارد. باین وجود پروفیل سطح آزاد دارای تطابق خوبی می باشد و میانگین درصد خطایی به میزان ۳،۹٪ داشته که در محدوده قابل قبولی می باشد.

#### ۴-۳- مدل سازی سه بعدی

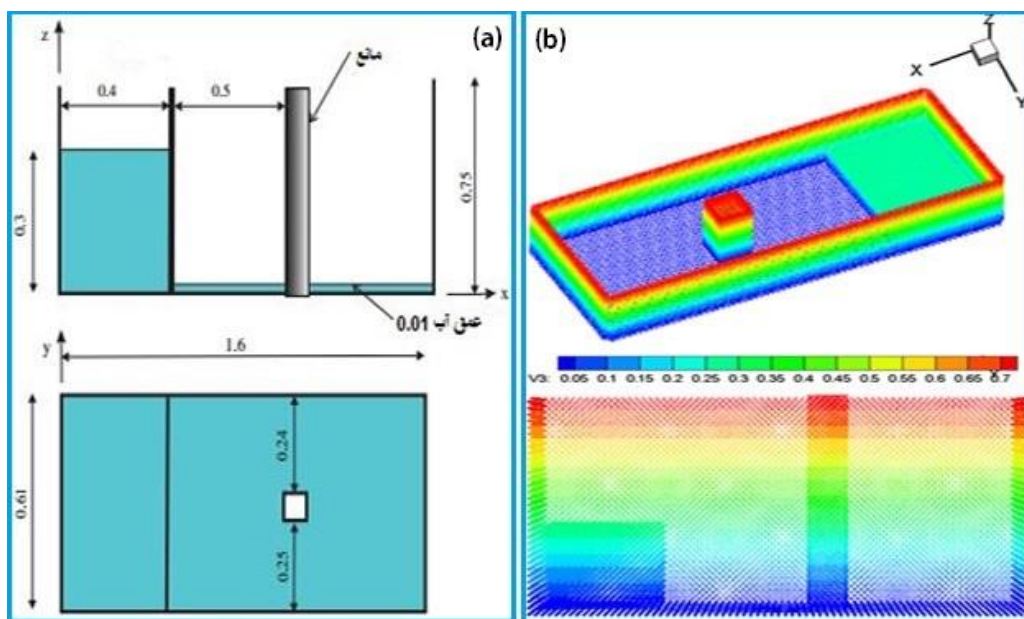
در این قسمت ابتدا به بررسی اثر یک مانع منفرد مکعبی بر روی سرعت و نیروی جریان پرداخته می شود و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه می شود. سپس با استفاده از شرایط مدل سازی ستون مکعبی، دو مانع به اشکال دیگر مدل می شود و اثر شکل مانع بر روی سرعت جریان مورد بررسی قرار می گیرد. در جدول زیر خلاصه ای از شرایط مدل سازی های سه بعدی انجام شده در این بخش، آمده است. همچنین کدهای نوشته شده در این قسمت برای مدل سازی سه بعدی موانع و محاسبه نیرو وارد بر آن ها به ترتیب در پیوست های (ب) و (پ) آورده شده است.

جدول ۴-۲: خلاصه ای از پارامترهای مدل سازی در آزمون های انجام شده

مدلسازی سه بعدی	case	نوع آزمایش	نوع کرنل	تعداد ذرات np	گام زمانی	سرعت صوت Cs (m/s)	dx=dy=dz (m)	شرایط مرزی BC	CFL
	1	شکست سد در برابر مانع مکعبی	Wendland	32525	P-C	20.00	0.0225	Dalrymple	0.2
2	شکست سد در برابر مانع استوانه ای	Wendland	30025	P-C	20.00	0.0225	Dalrymple	0.2	
3	شکست سد در برابر مانع مکعبی با زاویه	Wendland	31231	P-C	20.00	0.0225	Dalrymple	0.2	

#### ۴-۳-۱- ستون مکعبی

شرایط کانال و مانع شبیه‌سازی شده، با توجه به مطالعه آزمایشگاهی که توسط راد<sup>۱</sup> [۸۲]، انجام شد، اجرا می‌شود. کانال مورد بررسی به ابعاد 1.6m طول، 0.61m عرض و 0.75m ارتفاع می‌باشد. آب ذخیره شده در پشت سد به ابعاد 0.4m طول و 0.3m ارتفاع و ارتفاع آب پائین دست برابر با ۰.۱ متر می‌باشد. یک مانع به صورت ستون مربع بلند به ابعاد 0.12m×0.12m × 0.75m در ۰.۵ متری پائین دست سد و ۰.۲۴ متری از یک طرف دیوار کانال قرار دارد. شکل زیر نمایی از کانال شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

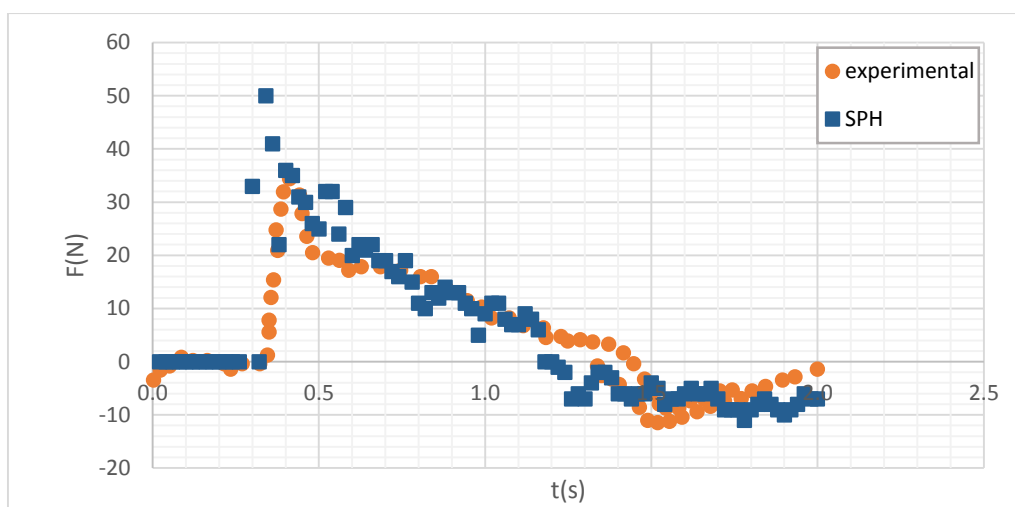


شکل ۴-۱۹: (a) نمایی از کانال و پلان مورد بررسی (b) نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده

برای محاسبه نیروی وارد بر مانع در روش SPH، نیروی وارد بر هر ذره بر اساس سه ترم ویسکوزیته، فشار و ثقل در معادله ناویر استوکس محاسبه می‌شود. برای محاسبه نیروی هر ذره، با محاسبه هر سه ترم ویسکوزیته، فشار و ثقل برای هر ذره موجود در دامنه تأثیر ذره مورد بررسی نیروی وارد بر یک ذره از جسم محاسبه می‌شود. از جمع نیروی وارد بر تک تک ذرات و تقسیم مقدار به دست آمده بر جرم جسم، نیروی وارد بر جسم در یک پارت زمانی به دست می‌آید.

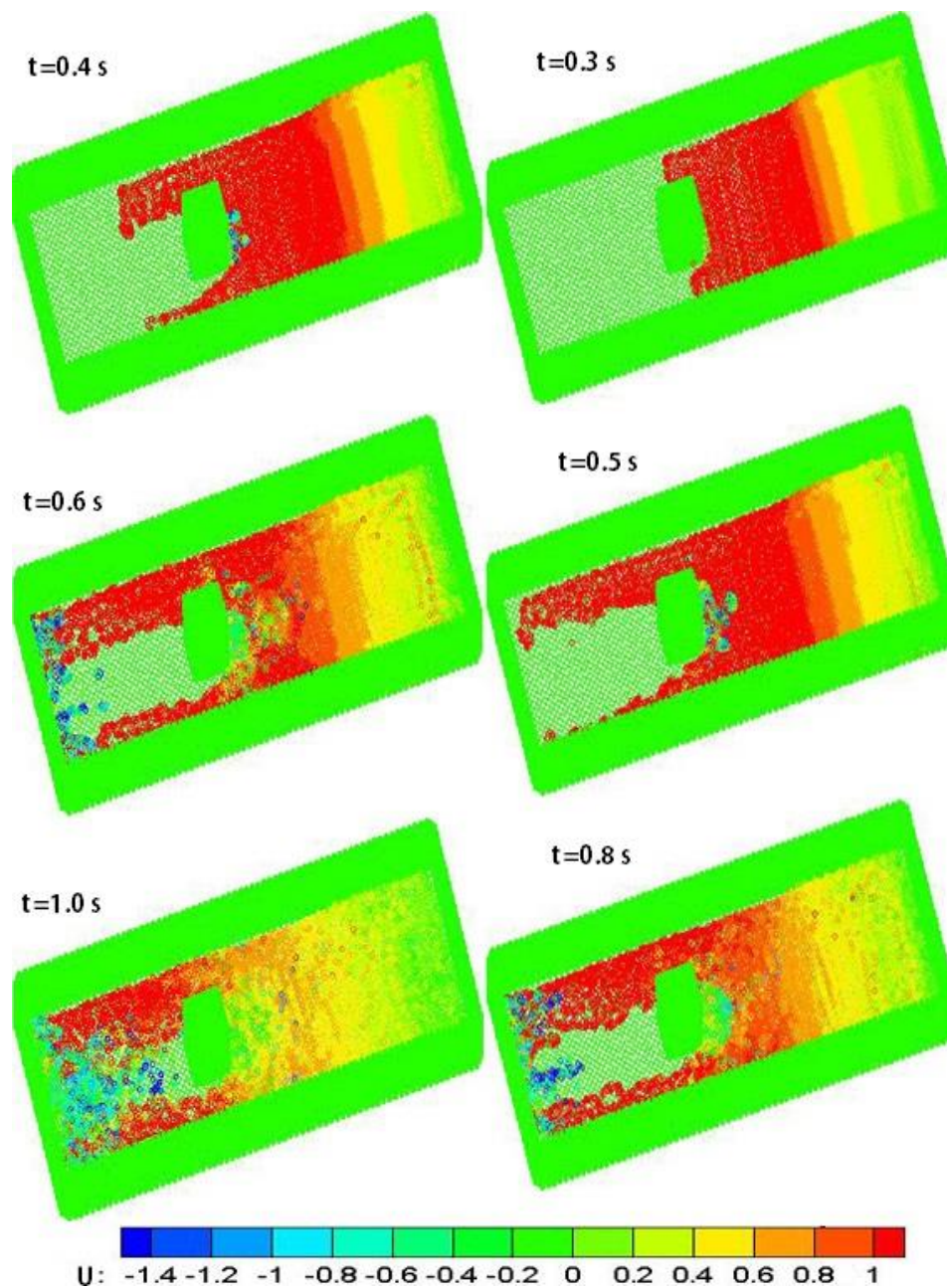
<sup>1</sup>. Raad

شکل ۴-۲۰ مقایسه نیروی وارد شده به مانع را به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی شده SPH نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود ماکزیمم نیرو در حالت آزمایشگاهی در زمان  $t=0.45s$  اتفاق می افتد در حالی که SPH ماکزیمم نیرو را در زمان  $t=0.35s$  و بیشتر از مقدار آزمایشگاهی نشان می دهد. ولی با گذشت زمان نتایج SPH به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر می شوند؛ به طوری که تفاوت بین نتایج بسیار ناچیز می گردد. با بررسی نتایج می توان به این نتیجه رسید که نتایج در محدوده قابل قبولی هستند و روش SPH در تخمین میزان نیروی وارد بر مانع از صحت و دقت کافی برخوردار می باشد.



شکل ۴-۲۰: مقایسه نتایج آزمایشگاهی نیروی وارد بر مانع و مدل سازی SPH

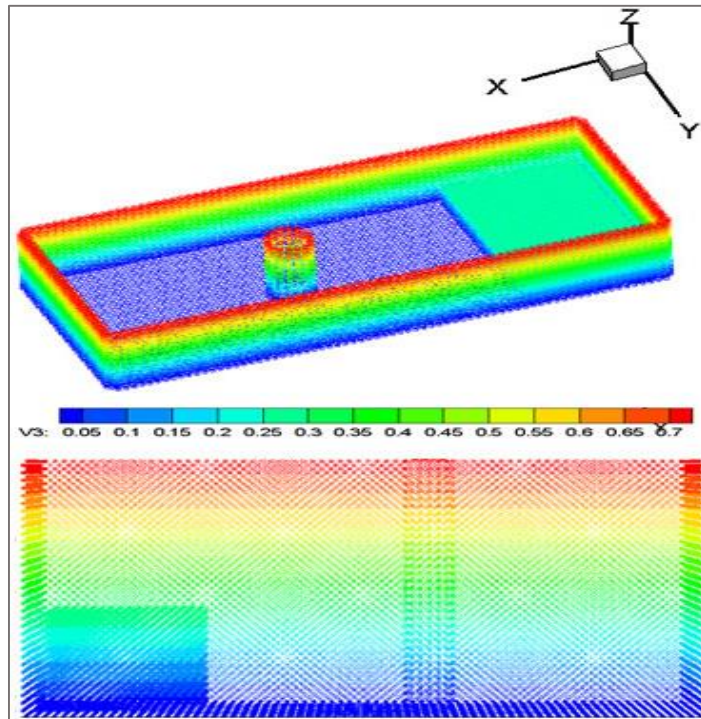
سیر تغییر شکل سطح آب و تحولات سرعت جریان، در اثر برخورد با مانع در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، بعد از شکست سد، موج عظیم ناشی از شکست سد در جهت پائین دست منتشر می شود. موج در زمان  $t=0.3s$  به مانع برخورد می کند و جبهه موج آشفته ای به سمت پائین دست حرکت می کند. با برخورد موج به مانع، قسمتی از جریان به سمت بالادست منعکس می شود و عمق جریان افزایش می یابد ( $t=0.4s$  و  $t=0.5s$ ). در مراحل اولیه شکست سد، یک منطقه بدون آشفتگی جریان در پشت مانع ایجاد می شود. جریان پس از حرکت اطراف مانع به انتهای دیواره کانال برخورد می کند و باهم ادغام می شوند و سپس به دلیل برخورد به دیواره و منعکس شدن جریان، امواج منفی تشکیل می شود ( $t=0.6s$  و  $t=0.8s$ ). این امواج منفی به سمت بالادست (به سمت مانع) حرکت می کنند و ناحیه بدون آشفتگی جریان را سرریز می کنند.



شکل ۴-۲۱: برخورد جریان با مانع مکعبی به صورت سه بعدی

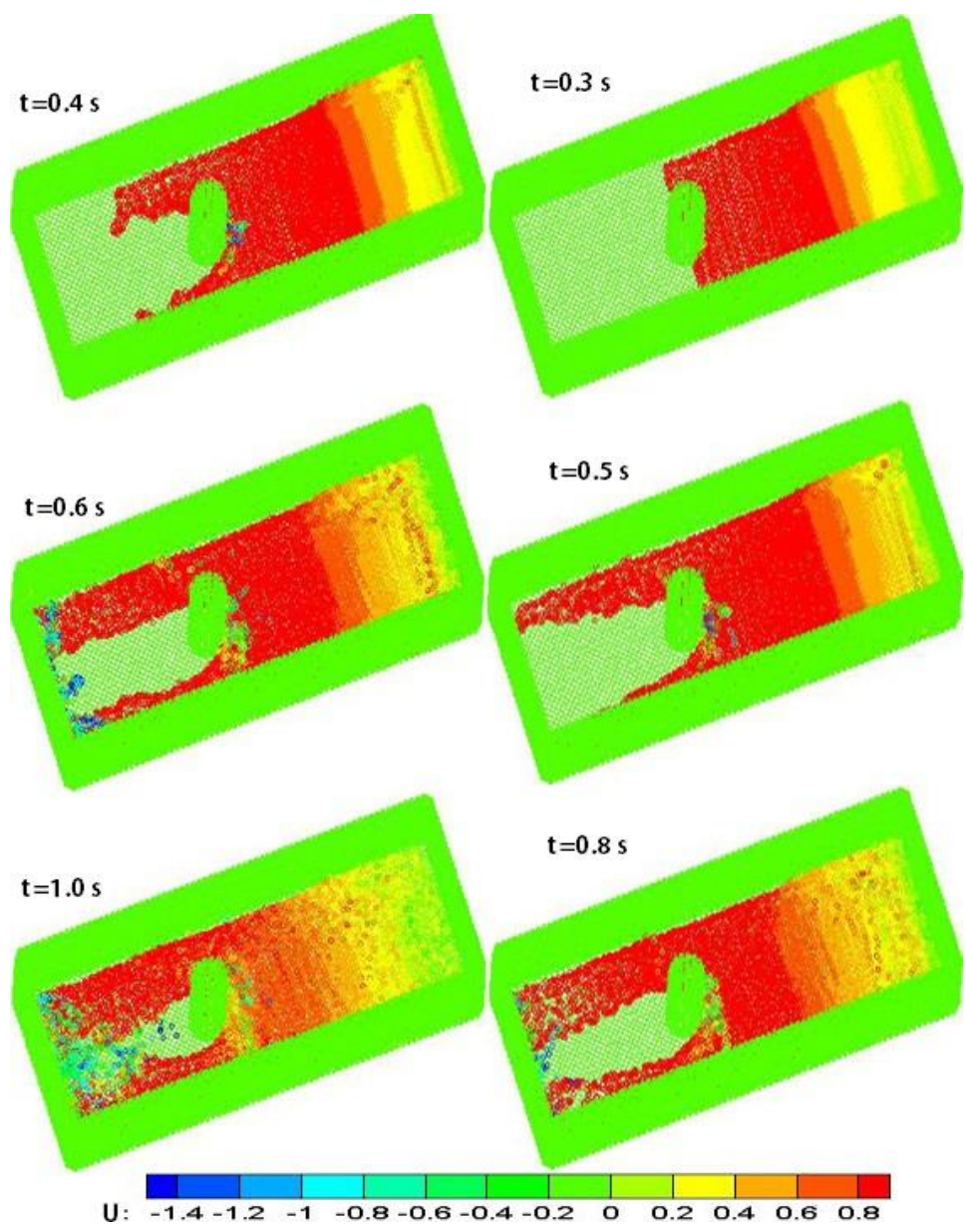
#### ۴-۳-۲- ستون استوانه‌ای

در این قسمت به منظور بررسی اثر شکل مانع بر جریان ناشی از شکست سد، شرایط کانال آزمایشگاهی که در قسمت قبل استفاده شد، در اینجا برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۰٫۱۲ متر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴-۲۲ نمایی از کانال شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۲: نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده

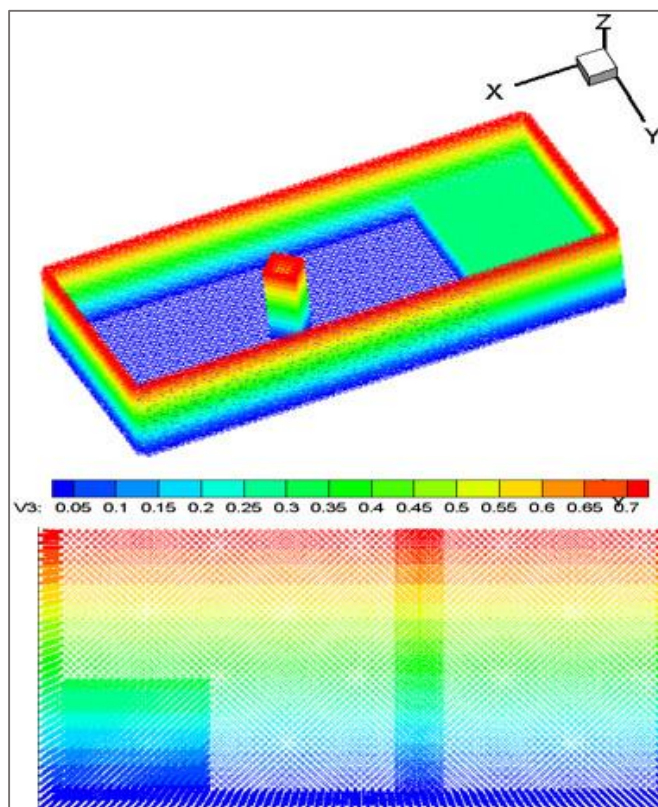
برخورد امواج سیلاب شکست سد با مانع استوانه‌ای در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. زمان‌های در نظر گرفته شده برای این مدل‌سازی نیز همانند زمان‌های استفاده شده برای حالت قبل می‌باشد. در زمان  $t=0.3s$  موج به مانع برخورد می‌کند. در اثر برخورد موج به مانع و منعکس شدن قسمتی از جریان مشاهده می‌شود که ارتفاع موج منعکس شده به سمت بالادست کمتر از حالت مانع مربع می‌باشد ( $t=0.4s$  و  $t=0.5s$ ). با پیشرفت زمان و حرکت جریان به سمت پائین‌دست، موج به دیوار انتهای کانال برخورد می‌کند و به سمت مانع برگشت می‌کند ( $t=0.6s$ ). مشاهدات نشان می‌دهد که در این حالت ارتفاع موج منعکس شده کمتر از حالت جریان در برابر ستون مکعبی می‌باشد ( $t=0.8s$  و  $t=1s$ ) و در این حالت ستون مربعی با سرعت بیشتری به دیوار کانال برخورد کرده و منعکس می‌شود و منجر به آشفتگی بیشتر جریان نسبت به مانع استوانه‌ای می‌شود.



شکل ۴-۲۳: برخورد جریان با مانع استوانه‌ای به صورت سه‌بعدی

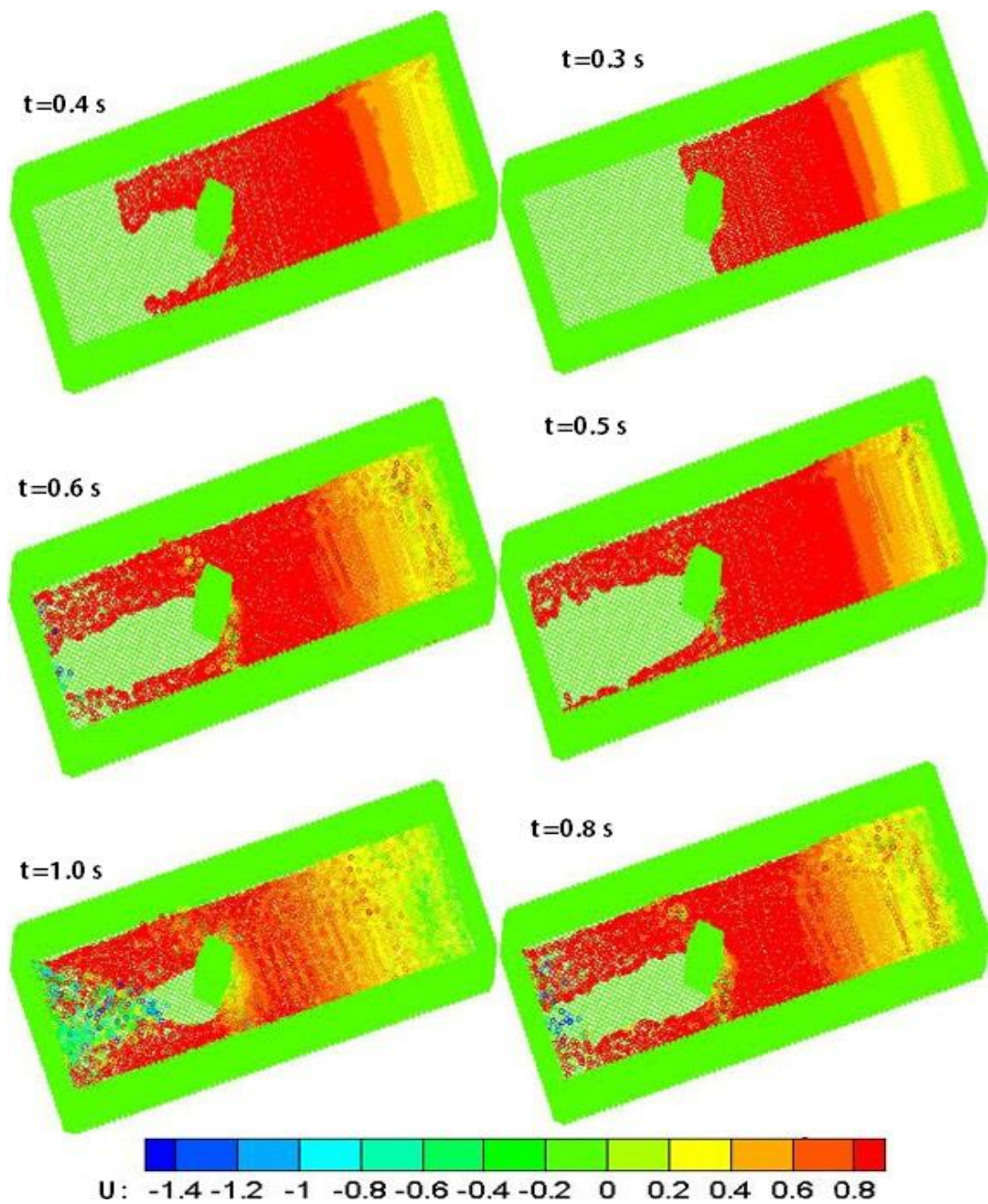
### ۴-۳-۳- ستون مکعبی قرار گرفته با زاویه در مسیر جریان

در این قسمت اثر یک مانع مربع به ضلع  $0.12$  متر که با زاویه  $45^\circ$  در مسیر جریان قرار گرفته است، بر روی جریان ناشی از شکست سد بررسی می‌شود. شکل زیر نمایی از کانال شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



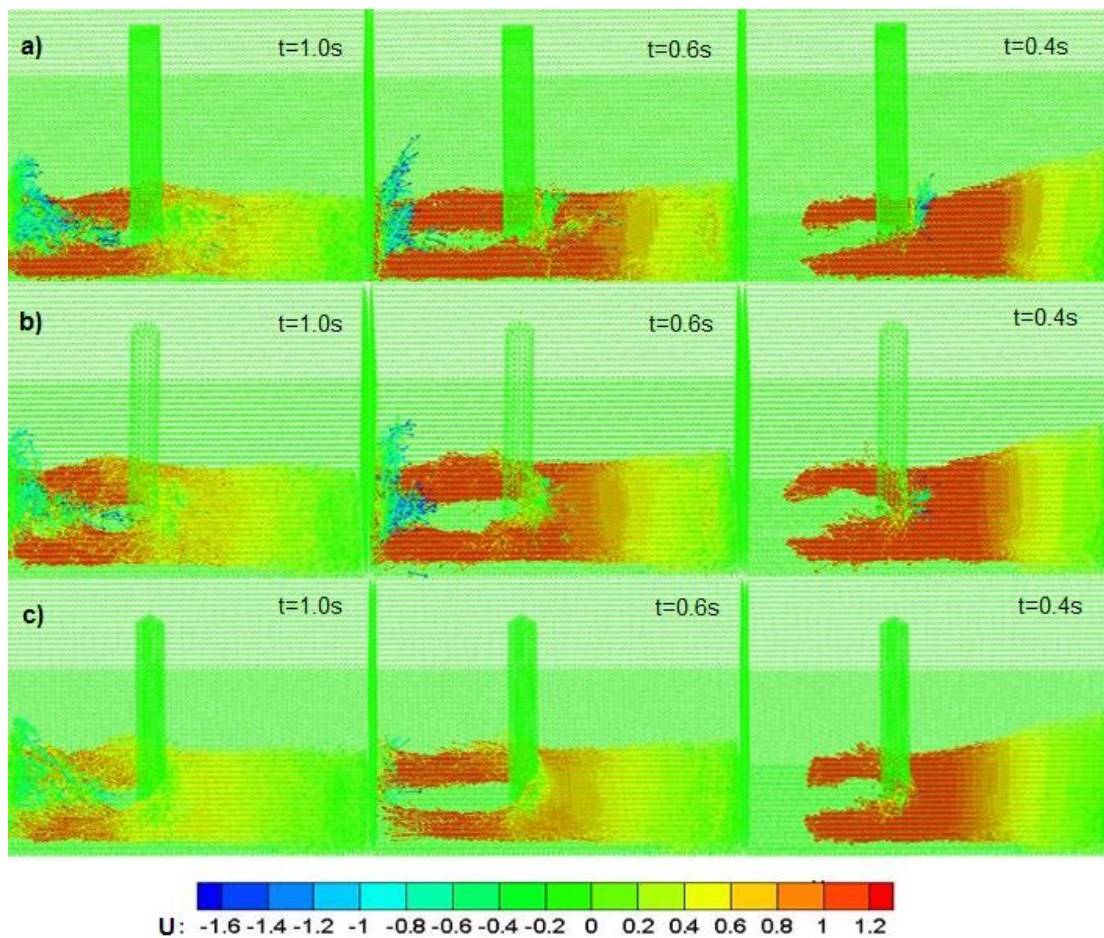
شکل ۴-۲۴: نمایی از کانال و مقطع شبیه‌سازی شده

شکل ۴-۲۵ برخورد جریان ناشی از شکست سد را به هنگام عبور از مانع مربع ای نشان می‌دهد که با زاویه  $45^\circ$  در مسیر جریان قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان هنگام برخورد به مانع برخلاف دو مانع دیگر، موج انعکاسی به سمت بالادست مانع تشکیل نمی‌دهد و به همین دلیل جریان در بالادست مانع از آشفتگی کمتری برخوردار می‌باشد. در زمان  $t=0.6s$  هنگامی که جریان به دیواره کانال برخورد می‌کند به دلیل اینکه جریان در اثر برخورد به مانع سرعت بیشتری را از دست داده است، موج منفی که به سمت مانع تشکیل می‌شود از سرعت و شدت کمتری برخوردار می‌باشد. قرارگیری مانع مربع با زاویه  $45^\circ$  در مسیر جریان منجر به تشکیل ناحیه بدون آشفتگی بزرگ‌تری در پائین‌دست مانع می‌شود.



شکل ۴-۲۵: برخورد جریان با مانع مکعبی قرار گرفته با زاویه در مسیر جریان به صورت سه بعدی





شکل ۴-۲۶: بردارهای سرعت در برخورد با مانع و دیوارهای کانال (a) ستون مربع (b) ستون استوانه (c) ستون مربع با زاویه

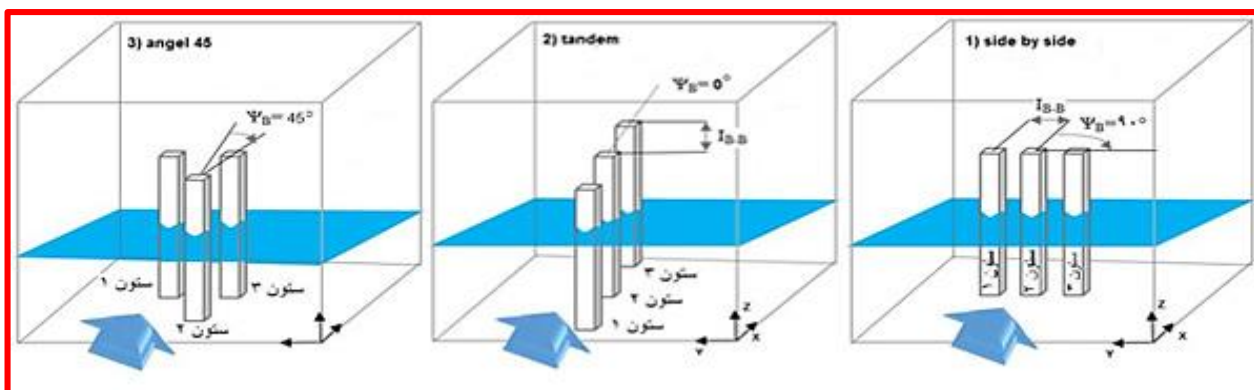
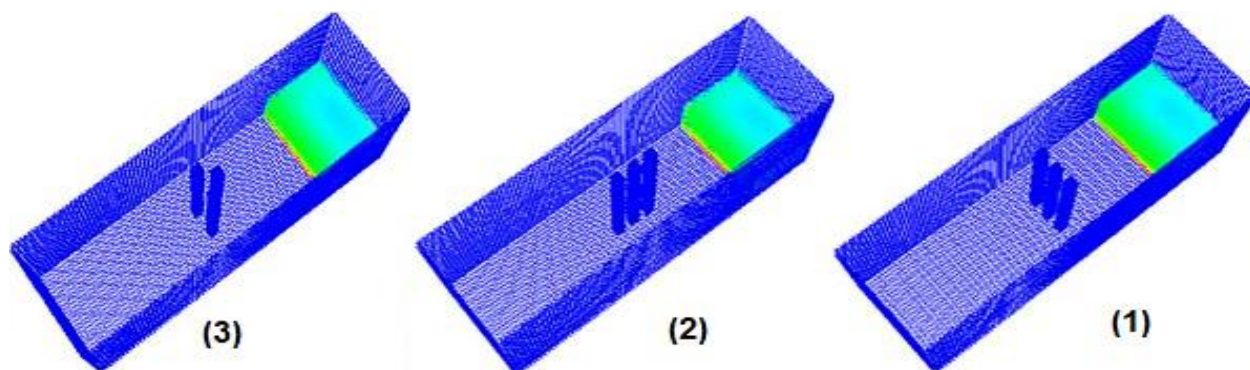
شکل ۴-۲۶ مقایسه بردارهای سرعت را در برخورد جریان با مانع و دیوارهای کانال در سه حالت مانع مکعبی، مانع استوانه‌ای و ستون مکعبی با زاویه  $45^\circ$  نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد در زمان  $t=0.4s$  هنگامی که جریان به مانع برخورد می‌کند، جریان در برخورد با مانع مربع با سرعت بیشتری به سمت بالادست منعکس می‌شود این در حالی است که در حالت مانع مربع قرارگرفته با زاویه  $45^\circ$  در مسیر جریان، بردارهای سرعت به سمت بالادست مشاهده نمی‌شود. در برخورد جریان با دیواره کانال در حالت مانع مربع، بردارهای سرعت ارتفاع بیشتری داشته و در زمان  $t=1s$  ناحیه پائین دست مانع کاملاً سرریز می‌شود.

با مقایسه بردارهای سرعت و روند تغییر شکل سطح آزاد جریان ناشی از شکست سد بر روی مانع استوانه‌ای با مانع مکعبی و مکعبی با زاویه، به‌وضوح مشاهده می‌شود که شکل مانع تأثیر به‌سزایی بر روی برخورد دینامیکی بین امواج سیلاب و مانع دارد.

#### ۴-۴- بررسی اثر چندین مانع

در این قسمت سعی بر آن است تا با استفاده از چندین مانع و طریقه چیدمان متفاوت آن‌ها، به ارائه بهترین مدل به‌عنوان راهکاری برای کاهش سرعت و استهلاک نیروی جریان که مهم‌ترین و اصلی‌ترین هدف این پایان‌نامه می‌باشد، پرداخته شود.

سه ستون مربعی به ضلع  $D_B=0.05m$  در نظر گرفته شده است. شیوه قرارگیری موانع همان‌طور که در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است، به سه صورت (۱) کنار هم، (۲) پشت سر هم و (۳) با زاویه  $45^\circ$  می‌باشد.



شکل ۴-۲۷: شیوه قرارگیری ستون‌ها

شیوه قرارگیری موانع با استفاده از زاویه  $\Psi_B$ ، که زاویه ایجادشده در جهت عقربه‌های ساعت بین جهت حرکت جریان و مانع می‌باشد، مشخص می‌شود. همچنین فاصله بین ستون‌ها ( $I_{B-B}$ )، به صورت  $1/5D_B$ ،  $2D_B$  و  $3D_B$  در نظر گرفته می‌شود.

حداکثر نیرو در تمام موارد برای هر سه ستون، با استفاده از ماکزیمم نیروی مربوط به یک ستون منفرد با استفاده از رابطه زیر نرمال می‌شود:

$$F^*(x)_{cylinderi,max} = \frac{F(x)_{cylinderi,max}}{F(x)_{1cylinder,max}} \quad (2-4)$$

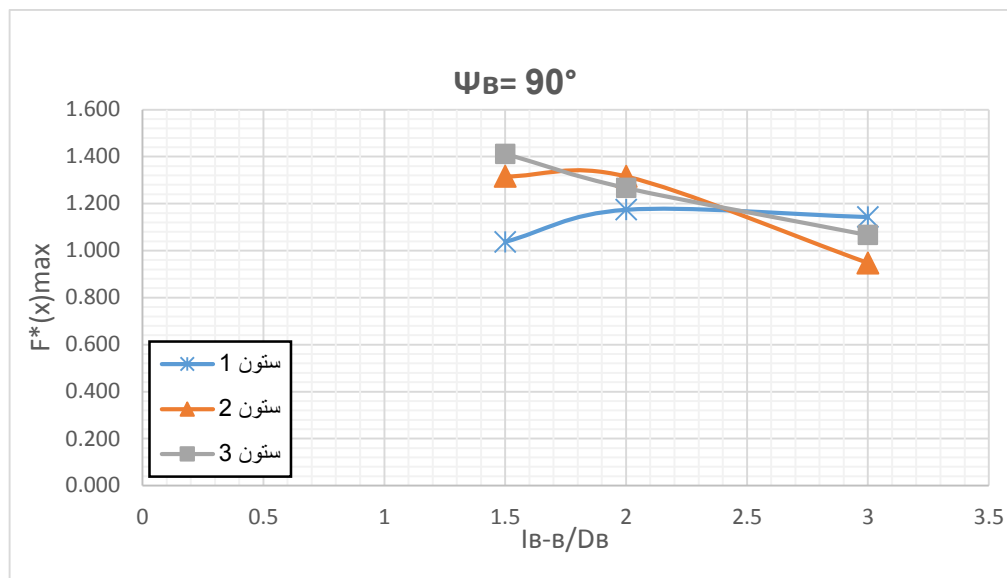
در معادله ۲-۴،  $F(x)_{cylinderi,max}$  ماکزیمم نیروی ستون  $i$  و  $F(x)_{1cylinder,max}$  ماکزیمم نیرو در حالت ستون منفرد می‌باشد.

در این قسمت نتایج نیرو با فاصله بین ستون‌ها ( $I_{B-B}/D_B$ ) و زاویه قرارگیری آن‌ها ( $\Psi_B$ ) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

#### ۴-۴-۱- تأثیر فاصله بر ماکزیمم نیرو

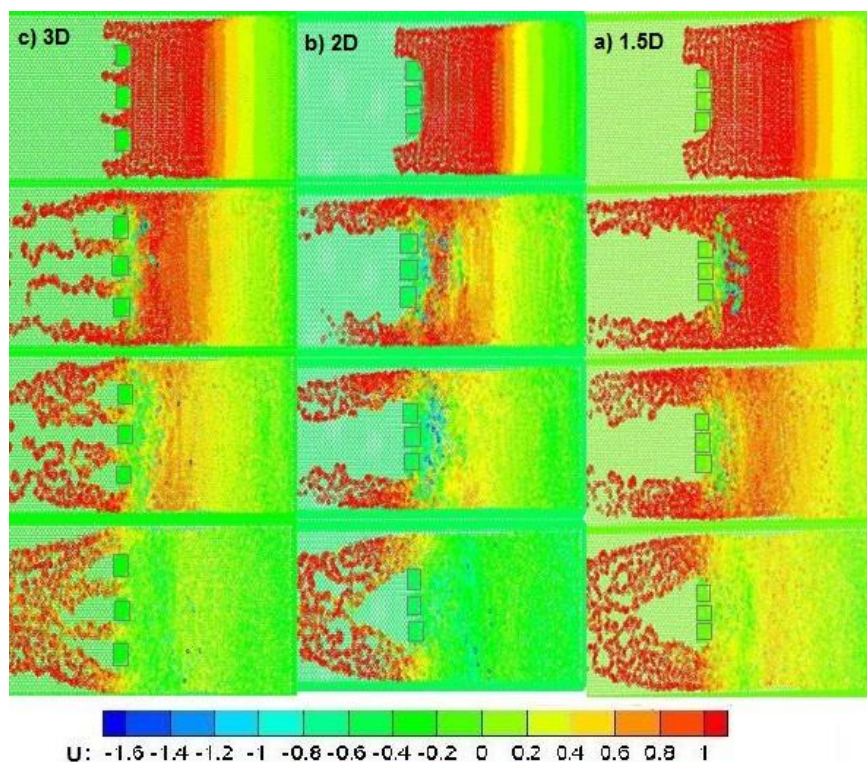
الف) چیدمان کنار هم

شکل ۲۸-۴ ماکزیمم نیروی نرمال شده وارد بر هر سه ستون را برحسب فاصله بین آن‌ها در حالت قرارگیری کنار هم موانع نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ماکزیمم نیروی واردشده بر ستون‌ها در ستون ۲ و ۳ با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که در ستون ۱ ابتدا افزایش و سپس ثابت می‌ماند. آنچه با دیدن این نمودار می‌توان نتیجه گرفت این است که در حالت قرارگیری موانع در کنار هم، ماکزیمم نیروی وارد به ستون‌ها مقادیر نزدیک به هم می‌باشند و تفاوت نیروی وارده بر ستون‌ها در این حالت اندک می‌باشد.



شکل ۴-۲۸: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها برحسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری کنار هم موانع

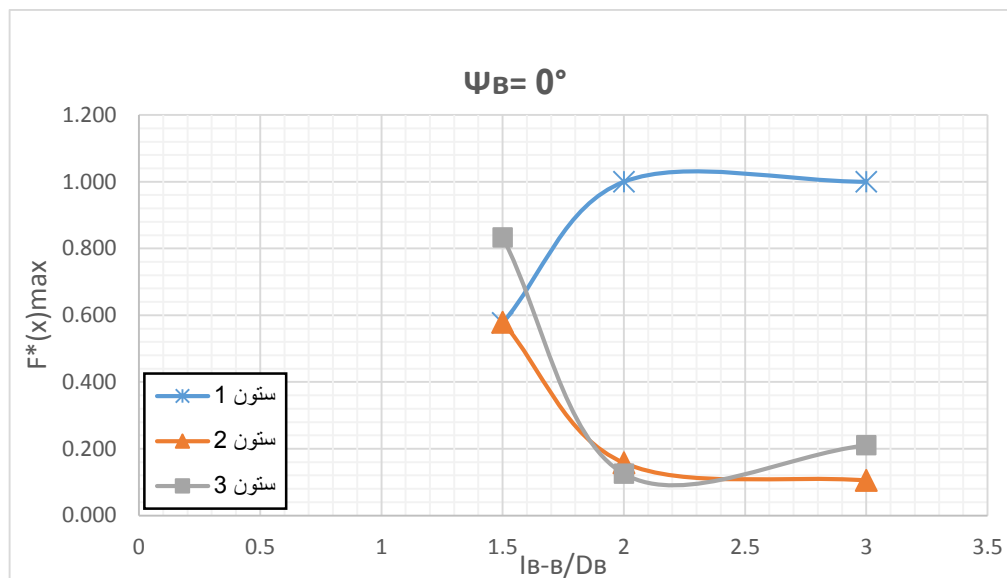
شکل ۴-۲۹ جریان ناشی از شکست سد در اطراف ستون‌ها را در شرایط قرارگیری کنار هم موانع با فواصل مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با شکست سد و برخورد جریان به موانع، قسمتی از جریان شکسته می‌شود و به صورت امواجی به سمت بالادست مانع حرکت می‌کنند. این امواج در حالتی که فاصله بین ستون‌ها  $1.5DB$  می‌باشد، از سرعت بالاتری برخوردار می‌باشند و منجر به آشفتگی بیشتر جریان در بالادست موانع می‌شود. با در نظر گرفتن فاصله موانع به مقدار  $3DB$ ، جریان امکان عبور از بین موانع را داشته و به همین دلیل انرژی جریان بیشتر مستهلک می‌شود و با سرعت کمتری به سمت پائین دست حرکت می‌کند. همچنین در این حالت ناحیه آشفتگی در پائین دست از دو حالت قبل بزرگ‌تر می‌باشد.



شکل ۴-۲۹: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری کنار هم موانع

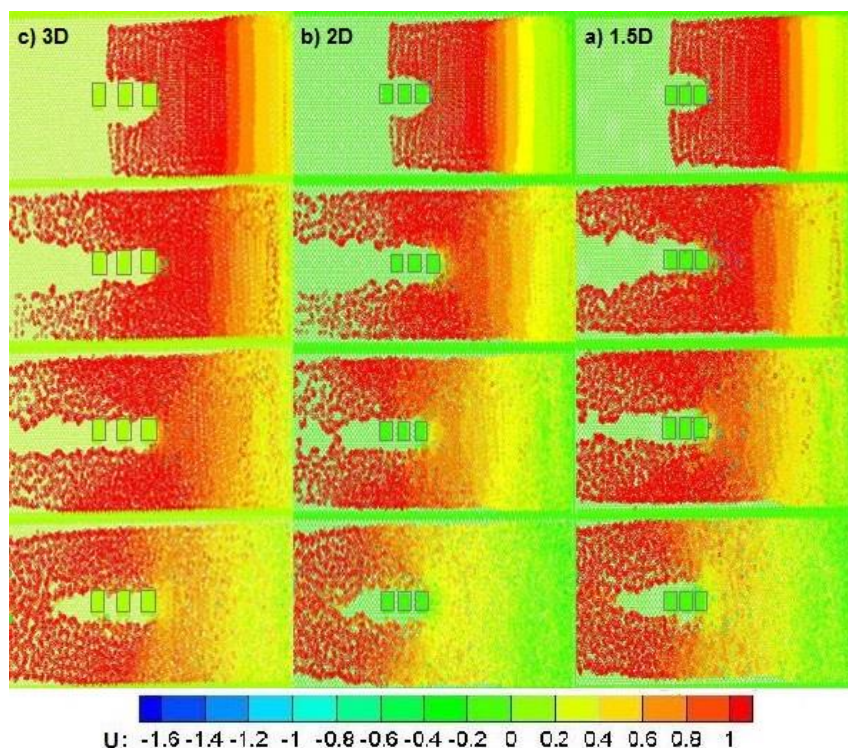
(ب) چیدمان پشت سر هم

شکل ۴-۳۰ ماکزیمم نیروی نرمال شده وارد بر هر سه ستون را برحسب فاصله بین آن‌ها در حالت قرارگیری پشت سر هم موانع نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که در این حالت بیشترین نیرو بر ستون ۱ وارد می‌شود و کمترین نیرو را ستون ۲ متحمل می‌شود. با افزایش فاصله بین موانع، نیروی وارد بر ستون ۲ و ۳ کاهش می‌یابد درحالی‌که نیروی وارد بر ستون ۱ افزایش می‌یابد. تغییرات نیرو هنگامی که فاصله بین موانع 2D می‌باشد، بسیار بیشتر است.



شکل ۴-۳۰: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها برحسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری پشت سرهم موانع

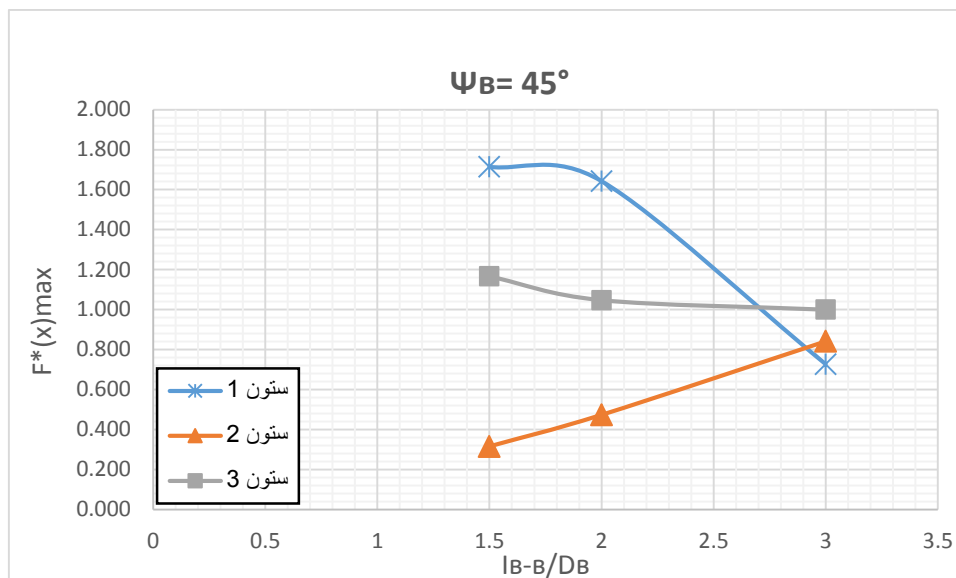
شکل ۴-۳۱: جریان ناشی از شکست سد در اطراف ستون‌ها را در شرایط قرارگیری پشت سرهم موانع نشان می‌دهد. در این شیوه چیدمان موانع در مقایسه با دو حالت دیگر چیدمان موانع، جریان با سرعت بیشتری به سمت پائین دست حرکت می‌کند و موانع نقش کمی در استهلاک انرژی و سرعت جریان دارند. همچنین در این حالت قرارگیری موانع، ناحیه آشفتگی که در پائین دست موانع ایجاد می‌شود، از دو حالت دیگر قرارگیری موانع بزرگ‌تر می‌باشد.



شکل ۴-۳۱: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری پشت سرهم موانع

ج) چیدمان با زاویه  $45^\circ$

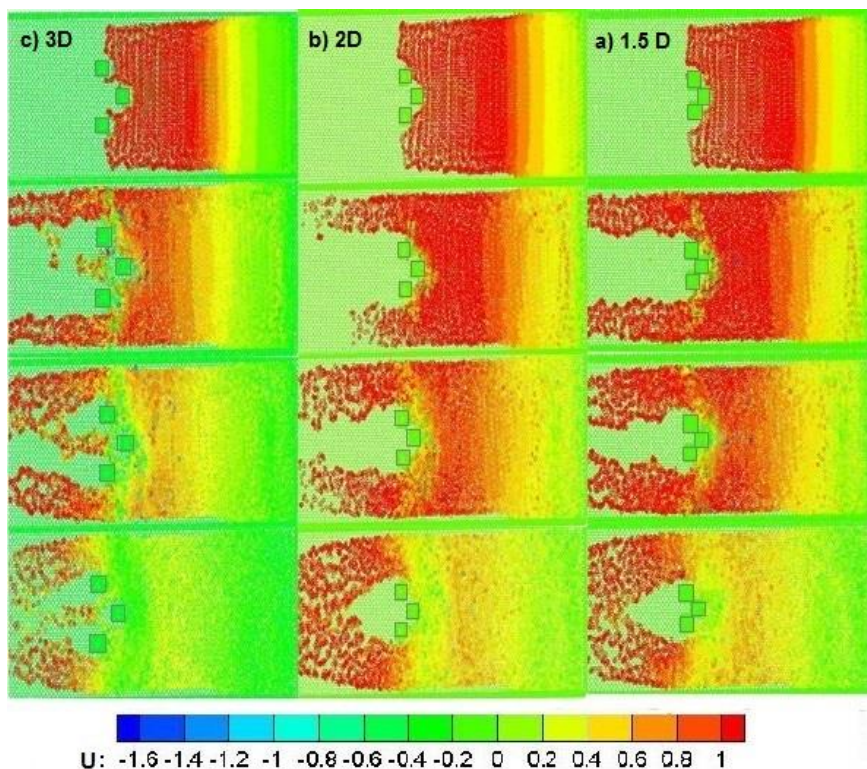
شکل ۴-۳۲ ماکزیمم نیروی نرمال شده وارد بر هر سه ستون را در شرایط قرارگیری ستون‌ها با زاویه  $45^\circ$  نشان می‌دهد. با توجه به نمودار ستون ۲ کمترین نیرو را متحمل می‌شود درحالی‌که ستون ۱ تحت تأثیر بیشترین نیرو در اثر برخورد جریان قرار می‌گیرد. با فاصله گرفتن ستون‌ها از هم تأثیر نیروی ناشی از جریان بر ستون ۲ زیادتر می‌شود درحالی‌که از شدت نیرو بر دو ستون دیگر کاسته می‌شود. تأثیر فاصله میان ستون‌ها بر مقدار نیروی وارد شده بر موانع، هنگامی‌که فاصله ذرات به  $3D_B$  می‌رسد، واضح‌تر می‌شود. در ستون ۳ افزایش فاصله تأثیر چندانی بر تغییرات ماکزیمم نیرو وارد بر آن ندارد درحالی‌که بر روی دو ستون دیگر افزایش فاصله تأثیر به سزایی بر روی تغییرات ماکزیمم نیرو دارد.



شکل ۴-۳۲: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها برحسب فواصل بین آن‌ها در حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$

شکل ۴-۳۳ جریان ناشی از شکست سد در اطراف ستون‌ها را در شرایط قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل، هنگامی که فاصله بین موانع 2D می‌باشد، موانع نسبت به حالت 1.5D سرعت را بیشتر کاهش می‌دهند و ناحیه آشفتگی در پائین دست کوچک‌تر می‌باشد. هنگامی که فاصله بین ستون‌ها 3D در نظر گرفته می‌شود سرعت جریان با عبور از بین موانع مستهلک می‌شود و به همین دلیل نسبت به فاصله 1.5D و 2D جریان هم در بالادست مانع و هم در پائین دست مانع سرعت کمتری دارد. در این حالت به دلیل عبور جریان از بین موانع، ناحیه آشفتگی ناشی از جریان در پائین دست مانع بیشتر می‌باشد.

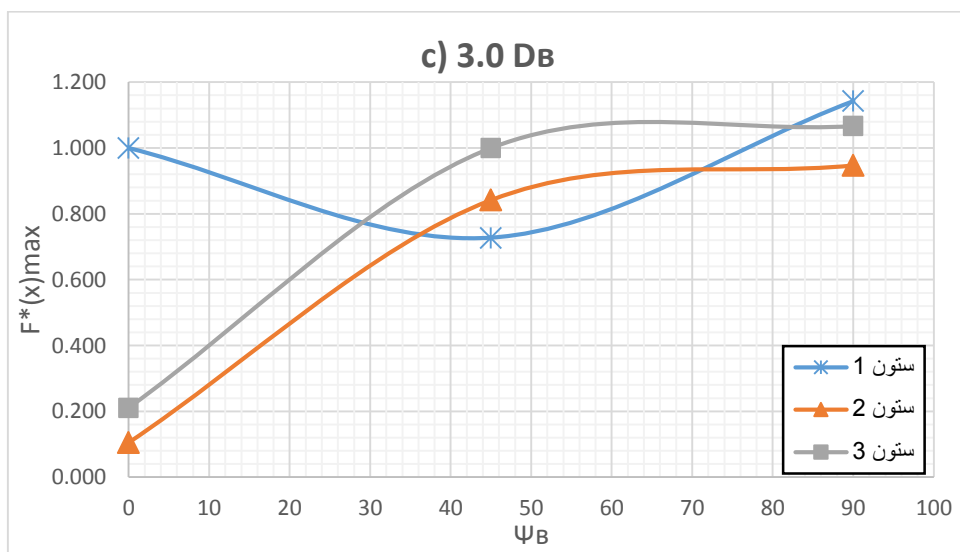
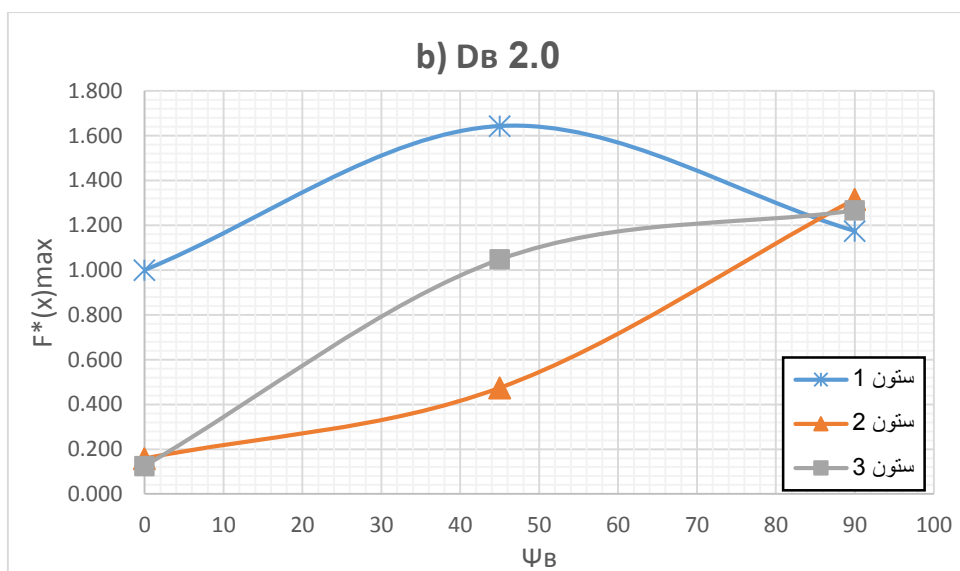
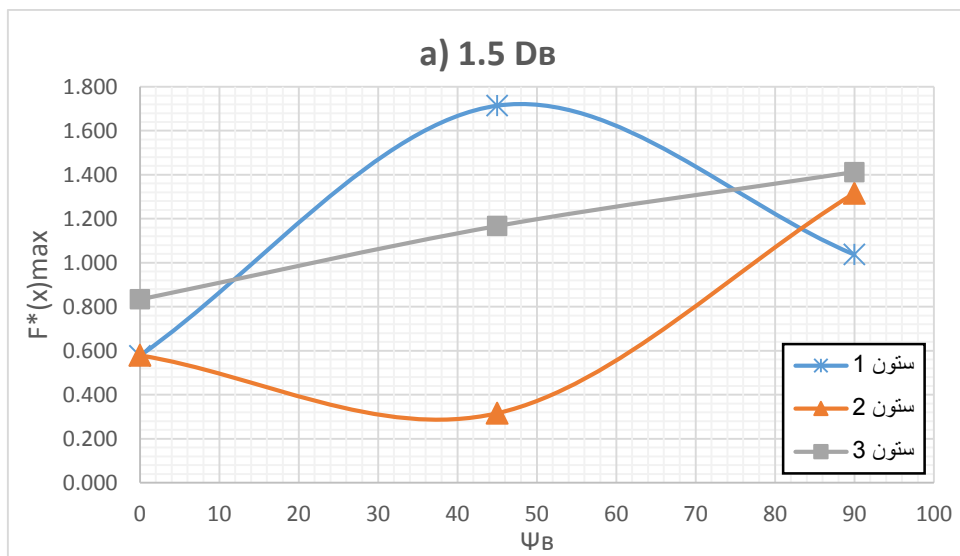




شکل ۳۳-۴: بررسی حرکت و سرعت جریان در اطراف موانع در حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$

#### ۴-۴-۲- تأثیر شیوه قرارگیری موانع بر ماکزیمم نیرو

ماکزیمم نیروی نرمال شده مدل‌سازی‌های انجام‌شده در هر سه نوع چیدمان موانع، در شکل ۳۴-۴ آمده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، در حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$  با افزایش فاصله بین ستون‌ها، تفاوت ماکزیمم نیروی واردشده به هر سه ستون کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در فاصله 3D به هر سه مانع نیروهای تقریباً مشابهی وارد می‌شود. این در حالی است که هنگامی که موانع به‌صورت کنار هم ( $\Psi_B=90^\circ$ ) قرار دارند، تغییرات نیروی سه ستون بسیار اندک می‌باشد و تغییرات فاصله تأثیر چندانی بر روی نیروی واردشده بر موانع ندارد. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که در هر سه نوع چیدمان متفاوت موانع، ماکزیمم نیروی وارد بر ستون ۳ با افزایش زاویه قرارگیری موانع، افزایش می‌یابد. تفاوت نیروهای وارده به هر سه ستون در حالت قرارگیری پشت سرهم موانع ( $\Psi_B=0^\circ$ ) با افزایش فاصله، افزایش می‌یابد در حالی که برای دو حالت دیگر قرارگیری موانع با افزایش فاصله این اختلاف کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۳۴: ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌ها برحسب زاویه قرارگیری آن‌ها: (a) 1.5DB (b) 2DB (c) 3DB

به طور کلی با بررسی نمودارهای موجود در این قسمت به این نتیجه می‌رسیم که به جز حالت قرارگیری موانع با زاویه  $45^\circ$ ، با افزایش فاصله بین موانع، ماکزیمم نیروی وارد بر ستون‌های ۲ و ۳ کاهش پیدا می‌کند در حالی که ماکزیمم نیروی وارد بر ستون ۱ افزایش می‌یابد. هنگامی که  $\Psi_B=0^\circ$  می‌باشد، ماکزیمم نیرو بر ستون‌های ۱ و ۳ با افزایش فاصله کاهش می‌یابد ولی ماکزیمم نیرو برای ستون ۲ افزایش پیدا می‌کند. در بررسی تأثیر چیدمان موانع بر ماکزیمم نیرو، این نتیجه می‌شود که ستون ۳ در هر سه حالت فاصله بین موانع، با افزایش زاویه قرارگیری بین موانع، ماکزیمم نیروی وارد بر آن افزایش می‌یابد.

به منظور ارزیابی کمی اثر پارامترهای فاصله و چیدمان قرارگیری موانع بر نیروهای وارد بر موانع، انحراف معیار استاندارد  $\sigma$  برای همه نیروها مشخص شده است. هرچه انحراف معیار استاندارد از مقداری که از گروهی از کمیت‌ها به دست می‌آید بیش‌تر باشد، اختلاف بین نیروها بزرگ‌تر است. از این نتیجه می‌توان برای مشخص کردن اثر پارامتر مؤثرتر استفاده کرد. انحراف معیار استاندارد محاسبه شده بر حسب زاویه قرارگیری (در ردیف) و بر حسب فاصله (در ستون) در جدول‌های ۴-۳ تا ۴-۵ به ترتیب برای ستون‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۴-۳: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۱ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها

ستون ۱				
$\sigma$	0	45	90	Db
0.467	0.577	1.714	1.037	1.5
0.271	1.000	1.643	1.174	2.0
0.172	1.000	0.727	1.143	3.0
	0.199	0.449	0.059	$\sigma$

جدول ۴-۴: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۲ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها

ستون ۲				
$\sigma$	0	45	90	Db
0.423	0.579	0.316	1.316	1.5
0.489	0.158	0.474	1.316	2.0
0.375	0.105	0.842	0.947	3.0
	0.212	0.22	0.174	$\sigma$

جدول ۴-۵: انحراف معیار استاندارد نیروها در ستون ۳ برای فواصل مختلف بین ستون‌ها و شیوه چیدمان آن‌ها

ستون ۳				
$\sigma$	0	45	90	Db
0.237	0.833	1.167	1.412	1.5
0.495	0.125	1.048	1.267	2.0
0.389	0.211	1.000	1.067	3.0
	0.315	0.07	0.141	$\sigma$

با مقایسه و بررسی نتایج انحراف معیار به دست آمده، می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر شیوه قرارگیری موانع بر روی ماکزیمم نیروی وارد بر موانع بیش‌تر از فاصله بین آن‌ها می‌باشد. از این رو می‌توان با انتخاب زاویه قرارگیری مناسب بین موانع، منجر به استهلاک بیش‌تر سیلاب شکست شد.

# فصل ۵

(( بحث و نتیجہ گیری ))

## ۵-۱- جمع‌بندی و نتایج

با توجه به عظمت بنا، حجم بالای مصالح به‌کاررفته و هزینه‌های سنگین احداث سد باعث می‌شود که سد یک بنای استراتژیک محسوب می‌گردد که فروپاشی و انهدام آن، یک رویداد فاجعه‌بار می‌باشد و ممکن است به علت خروج غیرقابل کنترل حجم زیادی آب از مخزن، منجر به انتشار سیلاب‌های مخرب و ویرانگر در پائین دست سد شود. باوجود پیشرفت‌های مساعدی که در طراحی سد و تکنیک‌های ساخت آن به کار گرفته شده است، بااین حال باز هم مسئله شکست سد به دلایلی ازجمله عوامل طبیعی مانند باران‌ها و طوفان‌های سنگین، زلزله، خطاهای انسانی، جنگ، پیرشدگی مواد و نقص بدنه سد و غیره می‌تواند اتفاق بیفتد. از همین رو در این پایان‌نامه سعی بر بررسی دقیق و همه‌جانبه سیلاب ناشی از شکست سد و ارائه راهکاری برای محدود ساختن ابعاد خسارات ناشی از آن دارد.

روش‌های عددی مختلفی برای بررسی این پدیده به کار گرفته شده است. اما نکته حائز اهمیت در این مسئله ضعف روش‌های عددی اویلری در محاسبه چنین پدیده‌هایی است. به دلیل نقاط ضعف روش‌های اویلری، روش‌های عددی لاگرانژی در حل چنین مسائلی مطرح شدند. روش‌های لاگرانژی بر مبنای ذره بوده و دیگر نیازی به شبکه‌بندی ندارند. در بین روش‌های لاگرانژی، روش هیدرودینامیک ذرات هموار، به‌طور ویژه برای حل چنین مسائلی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مطالب عنوان شده در این پایان‌نامه می‌توان نتایج زیر را از این مطالعه عددی برداشت نمود:

۱. به‌طور کلی استفاده از روش SPH باوجود برخی محدودیت‌ها مانند زمان اجرای بالا و یا وجود برخی خطاهای عددی، به دلیل خصلت لاگرانژی و بدون شبکه خود این مزیت را دارد تا پدیده پیچیده‌ای مانند شکست سد از روی موانع و توپوگرافی‌های پیچیده منطقه را که روش‌های اویلری در آن‌ها دارای موفقیت چندانی نمی‌باشند، به‌خوبی مدل کند. درواقع این روش اگر همراه با تکنیک‌هایی مورد استفاده قرار بگیرد به یک ابزار توانمند برای مدل‌سازی مسائل سطح آزاد تبدیل خواهد شد.

۲. از آنجاکه نوع تابع کرنل پارامتر مهمی در محاسبات و مدل‌سازی‌های انجام‌شده می‌باشد، با بررسی و مدل‌سازی توسط توابع کرنل مختلف، نتیجه می‌شود که در این پایان‌نامه تابع وندلند با توجه به زمان حل مناسب و کمتر نسبت به سایر توابع کرنل، مناسب می‌باشد.
۳. با بررسی اثر اندازه ذرات، می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه تعداد ذرات بیشتر و یا به عبارتی  $dx$  کوچک‌تری برای ذرات در نظر گرفته شود، نتایج مدل‌سازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شوند. البته انتخاب ذرات بسیار ریز منجر به افزایش زمان و هزینه محاسباتی می‌شود. بنابراین انتخاب اندازه ذرات باید متناسب با مسئله انتخاب شود تا هم دقت جواب مناسب باشد و هم‌زمان حل بهینه گردد.
۴. به‌منظور بررسی اثر موانع مختلف در برابر جریان شکست سد، ۵ مدل‌سازی با اشکال مختلف موانع به‌صورت دوبعدی مدل شدند و نتایج آن‌ها برای صحت سنجی روش SPH با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. تمام مدل‌سازی‌های انجام‌شده در این پایان‌نامه میانگین درصد خطایی کمتر از ۱۵٪ داشتند که نتیجه می‌شود قابلیت SPH در مدل‌سازی دوبعدی جریان ناشی از شکست سد در برابر موانع مختلف موفق بوده است.
۵. بررسی‌ها نشان می‌دهند که SPH در مدل‌سازی سه‌بعدی نیز از دقت خوبی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که در فصل ۴ بیان شده است، به‌منظور بررسی و ارزیابی قابلیت SPH، نیروی وارد بر یک ستون به‌صورت سه‌بعدی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج دقت روش SPH را اثبات می‌کنند.
۶. با مدل‌سازی جریان در برابر موانع با اشکال مختلف (مکعبی، استوانه‌ای و مکعبی با زاویه قرارگرفته در مسیر جریان) به‌صورت سه‌بعدی و مقایسه بردارهای سرعت و روند تغییر شکل سطح آزاد جریان ناشی از شکست سد، نتیجه می‌شود که شکل مانع تأثیر به‌سزایی بر روی برخورد دینامیکی بین امواج سیلاب و مانع دارد. مانع مکعبی امواج با پیشانی جبهه موج

بلندتری را نسبت به دو مانع دیگر به سمت بالادست منعکس می‌کنند و آشفستگی در بالادست آن بیش‌تر از دو مانع دیگر می‌باشد.

۷. با مدل‌سازی‌ها و بررسی‌های صورت گرفته بر روی اثر فاصله بین موانع بر روی ماکزیمم نیروی نرمال شده وارد بر ستون‌ها، نتیجه می‌شود که در حالت قرارگیری موانع به صورت پشت سرهم و کنار هم، با افزایش فاصله بین موانع، نیروی وارد بر ستون ۱ افزایش می‌یابد اما نیروی وارد بر ستون‌های ۲ و ۳ کاهش می‌یابد. این در حالی است که در شیوه قرارگیری موانع با زاویه ۴۵ درجه نیروی وارد بر ستون ۱ و ۳ کاهش و نیروی وارد بر ستون ۲ افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که نیروی وارد بر ستون ۳ در هر سه شیوه قرارگیری موانع، با کاهش مقدار نیروی وارد شده همراه می‌باشد.

۸. به‌طور کلی با بررسی‌های انجام شده بر روی اثر فاصله بین موانع می‌توان نتیجه گرفت که فاصله کمتر بین ستون‌ها منجر می‌شود که ماکزیمم نیروی نرمال وارد بر موانع بیش‌تر می‌شود و در نتیجه در این حالت موانع اثر برجسته‌تری را در کاهش نیروی جریان سیلاب شکست سد دارند.

۹. با افزایش زاویه قرارگیری بین موانع، نیروی وارد بر ستون ۳ و ستون ۲ به‌جز در حالت فاصله  $1.5D_B$  افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که نیروی وارد بر ستون ۱ روند صعودی- نزولی و یا بالعکس دارد.

۱۰. با بررسی‌های انجام شده نتیجه می‌شود که در حالت قرارگیری کنار هم موانع ( $\Psi_B=90^\circ$ )، نیروی وارد بر موانع بیش‌تر از دو حالت دیگر می‌باشد. در نتیجه موانع نیروی جریان را بیش‌تر مستهلک می‌کنند.

۱۱. کمترین نیروها در حالت قرارگیری موانع به صورت پشت سرهم ( $\Psi_B=0^\circ$ ) بر ستون‌ها وارد می‌شوند و تأثیر محسوسی بر روی جریان ندارد.



۱۲. آنچه با مقایسه نمودارها و بررسی نتایج انحراف معیارها نتیجه می‌شود این است که تأثیر شیوه قرارگیری موانع بر روی ماکزیمم نیروی وارد بر موانع بیش‌تر از فاصله بین آنها می‌باشد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت برای دستیابی به نتایجی مطلوب‌تر، با انتخاب زاویه قرارگیری مناسب بین موانع، منجر به استهلاک بیش‌تر سیلاب شکست سد شد.

## ۵-۲- پیشنهاد برای تحقیقات آینده

- بررسی اثر تعداد موانع بر روی سیلاب شکست سد
- ارزیابی قابلیت سازه‌ای موانع برای ایستادگی در برابر حرکت سیلاب ناشی از شکست سد
- بررسی اثر موانع متحرک و قابل جابجایی همچون اتومبیل‌ها بر سیلاب و امواج ناشی از شکست سد
- بررسی قابلیت نرم‌افزار SPHysics در مدل‌سازی جریان شکست سد در حالت پلان



پیوست

(( ( SPHysics گدهاں ) ))

```

c      _____ SUBROUTINE TRIANGULAR

subroutine triangular(nn,dx,dy,dz,beta,theta,iopt_obst)
include 'common.gen2D'
double precision x1,z1,x2,z2

c      -- Triangular face 1: Up-slope -
      y1 = 0.0
      M_start = 0
      M_finish = 0
      N_start = nint(x_triangular (n_triangular,1)/dx) !+ 1
      N_finish = nint(x_triangular (n_triangular,2)/dx) !+ 1
      L_start = nint(z_triangular (n_triangular,1)/dz) !+ 1
      L_finish = nint(z_triangular(n_triangular,2)/dz) !+ 1
      triangular_slope1 =
&      (z_triangular (n_triangular,2) - z_triangular (n_triangular,1))/
&      (x_triangular (n_triangular,2) - x_triangular (n_triangular,1))
      ntemp = nn
      do i = N_start,N_finish
          nn=nn+1
          x1 = i*dx
          z1 = z_triangular (n_triangular,1)
&          + (x1 - x_triangular (n_triangular,1))* triangular_slope1
          call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
          if(iBC.eq.1)then
              if(i.eq.N_start)then
                  i_minus1 = nn
                  i_plus1 = nn + 1
              else if(i.eq.N_finish)then
                  i_minus1 = nn - 1
                  i_plus1 = nn
              else
                  i_minus1 = nn - 1
                  i_plus1 = nn + 1
              end if
              !-- Normal information - neighbour data for          --
              !-- Repulsive Boundary Particles (BPs)              --
              iBP_Pointer_Info(nn,3) = i_minus1      !i-1 neighbour
              iBP_Pointer_Info(nn,4) = i_plus1      !i+1 neighbour

```

```

end if
if(iBC.ne.1)then
  x2 = x1 + 0.5*dx
  y2 = y1 + 0.5*dy
  z2 = z1 + 0.5*dz
  nn=nn+1
  call pos_veloc(nn,x2,y2,z2,0.,0.,0.)
end if
end do
if(iBC.eq.1)then
  !-- Normal information - neighbour data for          --
  !-- first corner particle on cylinder side          --
  iBP_Pointer_Info(ntemp+1,3) = ntemp+1      !i-1 neighbour
  iBP_Pointer_Info(ntemp+1,4) = ntemp+2      !i+1 neighbour
  !-- last corner particle on cylinder side          --
  iBP_Pointer_Info(nn,3) = nn -1      !i-1 neighbour
  iBP_Pointer_Info(nn,4) = nn      !i+1 neighbour
  ntemp = nn
end if
c  -- Triangular face 2: Down-slope -
y1 = 0.0
M_start = 0
M_finish = 0
N_start = nint(x_triangular (n_triangular,3)/dx) !+ 1
N_finish = nint(x_triangular (n_triangular,4)/dx) !+ 1
L_start = nint(z_triangular (n_triangular,3)/dz) !+ 1
L_finish = nint(z_triangular (n_triangular,4)/dz) !+ 1
triangular_slope1 =
& (z_triangular (n_triangular,4) - z_triangular (n_triangular,3))/
& (x_triangular (n_triangular,4) - x_triangular (n_triangular,3))
ntemp = nn
do i = N_start,N_finish
  nn=nn+1
  x1 = i*dx
  z1 = z_triangular (n_triangular,3)
& + (x1 - x_triangular (n_triangular,3))* triangular_slope1
  call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  if(iBC.eq.1)then
    if(i.eq.N_start)then
      i_minus1 = nn

```

```

        i_plus1 = nn + 1
    else if(i.eq.N_finish)then
        i_minus1 = nn - 1
        i_plus1 = nn
    else
        i_minus1 = nn - 1
        i_plus1 = nn + 1
    end if

    !-- Normal information - neighbour data for          --
    !-- Repulsive Boundary Particles (BPs)              --
    iBP_Pointer_Info(nn,3) = i_minus1      !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(nn,4) = i_plus1      !i+1 neighbour
end if

if(iBC.ne.1)then
    x2 = x1 + 0.5*dx
    y2 = y1 + 0.5*dy
    z2 = z1 - 0.5*dz
    nn=nn+1

    call pos_veloc(nn,x2,y2,z2,0.,0.,0.)
end if
end do

if(iBC.eq.1)then
    !-- Normal information - neighbour data for          --
    !-- first corner particle on cylinder side           --
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,3) = ntemp+1      !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,4) = ntemp+2      !i+1 neighbour
    !-- last corner particle on cylinder side           --
    iBP_Pointer_Info(nn,3) = nn -1      !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(nn,4) = nn      !i+1 neighbour
    ntemp = nn
end if

```

الف-٢

```

c      _____ SUBROUTINE LABE TIZ*****
subroutine trapezoid(nn,dx,dy,dz,beta,theta,iopt_obst)
include 'common.gen2D'
double precision x1,z1,x2,z2
c      -- Trapezoid face 1: Up-slope -
        y1 = 0.0
        M_start = 0

```

```

M_finish = 0
N_start = nint(x_trapezoid(n_trapezoid,1)/dx) !+ 1
N_finish = nint(x_trapezoid(n_trapezoid,2)/dx) !+ 1
L_start = nint(z_trapezoid(n_trapezoid,1)/dz) !+ 1
L_finish = nint(z_trapezoid(n_trapezoid,2)/dz) !+ 1
trapezoid_slope1 =
& (z_trapezoid(n_trapezoid,2) - z_trapezoid(n_trapezoid,1))/
& (x_trapezoid(n_trapezoid,2) - x_trapezoid(n_trapezoid,1))
ntemp = nn
do i = N_start,N_finish,-1
  nn=nn+1
  x1 = i*dx
  z1 = z_trapezoid(n_trapezoid,1)
& + (x1 - x_trapezoid(n_trapezoid,1))*trapezoid_slope1
  call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  if(iBC.eq.1) then
    if(i.eq.N_start) then
      i_minus1 = nn
      i_plus1 = nn + 1
    else if(i.eq.N_finish) then
      i_minus1 = nn - 1
      i_plus1 = nn
    else
      i_minus1 = nn - 1
      i_plus1 = nn + 1
    end if
    !-- Normal information - neighbour data for --
    !-- Repulsive Boundary Particles (BPs) --
    iBP_Pointer_Info(nn,3) = i_minus1 !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(nn,4) = i_plus1 !i+1 neighbour
  end if
  if(iBC.ne.1) then
    x2 = x1 - 0.5*dx
    y2 = y1 + 0.5*dy
    z2 = z1 + 0.5*dz
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x2,y2,z2,0.,0.,0.)
  end if
  if(i.eq.N_start) then
    print*, 'Start of Trap, x1,z1 ',x1,z1

```

```

    endif
end do

z_lastPoint = z1
if(iBC.eq.1) then

    !-- Normal information - neighbour data for          --
    !-- first corner particle on cylinder side          --
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,3) = ntemp+1             !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,4) = ntemp+2             !i+1 neighbour
    !-- last corner particle on cylinder side          --
    iBP_Pointer_Info(nn,3) = nn -1                    !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(nn,4) = nn                       !i+1 neighbour

    ntemp = nn
end if

c    -- Trapezoid face 2: Flat-Top -
y1 = 0.0
M_start = 0
M_finish = 0
N_start = nint(x_trapezoid(n_trapezoid,2)/dx) !+ 1
N_finish = nint(x_trapezoid(n_trapezoid,3)/dx) !+ 1
z1 = z_lastPoint
ntemp = nn
do i = N_start,N_finish
    nn=nn+1
    x1 = i*dx
    call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
    if(iBC.eq.1) then
        if(i.eq.N_start) then
            i_minus1 = nn
            i_plus1 = nn + 1
        else if(i.eq.N_finish) then
            i_minus1 = nn - 1
            i_plus1 = nn
        else
            i_minus1 = nn - 1
            i_plus1 = nn + 1
        end if
        !-- Normal information - neighbour data for          --
        !-- Repulsive Boundary Particles (BPs)              --
        iBP_Pointer_Info(nn,3) = i_minus1                !i-1 neighbour
        iBP_Pointer_Info(nn,4) = i_plus1                 !i+1 neighbour
    end if
end do

```



```

end if

if(iBC.ne.1) then
  x2 = x1 + 0.5*dx
  y2 = y1 + 0.5*dy
  z2 = z1 + 0.5*dz
  nn=nn+1
  call pos_veloc(nn,x2,y2,z2,0.,0.,0.)
end if

end do

x_TopFinish = x1

if(iBC.eq.1) then
  !-- Normal information - neighbour data for           --
  !-- first corner particle on cylinder side           --
  iBP_Pointer_Info(ntemp+1,3) = ntemp+1           !i-1 neighbour
  iBP_Pointer_Info(ntemp+1,4) = ntemp+2           !i+1 neighbour
  !-- last corner particle on cylinder side           --
  iBP_Pointer_Info(nn,3) = nn -1           !i-1 neighbour
  iBP_Pointer_Info(nn,4) = nn           !i+1 neighbour
  ntemp = nn
end if

c  -- Trapezoid face 3: Down-slope -
y1 = 0.0
M_start = 0
M_finish = 0
x1 = x_trapezoid(n_trapezoid,4)
L_start = nint(z_trapezoid(n_trapezoid,3)/dz) !+ 1
L_finish = nint(z_trapezoid(n_trapezoid,4)/dz) !+ 1
print*, 'x_TopFinish ', x_TopFinish
ntemp = nn
do i = L_start, L_finish, -1
  nn=nn+1
  z1 = i*dz
  call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  if(iBC.eq.1) then
    if(i.eq.N_start) then
      i_minus1 = nn
      i_plus1 = nn + 1
    else if(i.eq.N_finish) then
      i_minus1 = nn - 1
      i_plus1 = nn
    end if
  end if
end do

```

```

else
    i_minus1 = nn - 1
    i_plus1 = nn + 1
end if

!-- Normal information - neighbour data for      --
!-- Repulsive Boundary Particles (BPs)          --
iBP_Pointer_Info(nn,3) = i_minus1      !i-1 neighbour
iBP_Pointer_Info(nn,4) = i_plus1      !i+1 neighbour
end if

if(iBC.ne.1) then
    x2 = x1
    y2 = y1 + 0.5*dy
    z2 = z1 - 0.5*dz
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x2,y2,z2,0.,0.,0.)
end if

end do

if(iBC.eq.1) then
    !-- Normal information - neighbour data for      --
    !-- first corner particle on cylinder side        --
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,3) = ntemp+1      !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(ntemp+1,4) = ntemp+2      !i+1 neighbour
    !-- last corner particle on cylinder side        --
    iBP_Pointer_Info(nn,3) = nn -1      !i-1 neighbour
    iBP_Pointer_Info(nn,4) = nn      !i+1 neighbour
    ntemp = nn
end if

```

پیوست ب

ب-۱

```

c _____ SUBROUTINE MOKA@B ba ZAVIYE*****
subroutine obstacle(nn,dx,dy,dz,beta,theta,iopt_obst)
include 'common.gen3D'
double precision x1,y1,z1
double precision dx1, dy1, dz1
write(*,*) ' Which kind of obstacle'
write(*,*) ' (1) Solid '
write(*,*) ' (2) With Solid Walls'
read(*,*) iopt_kind
write(*,*) iopt_kind

```

```

write(*,*) ' Density of points'
read(*,*) ndens
write(*,*) ndens

dx1=dx/ndens
dy1=dy/ndens
dz1=dz/ndens

write(*,*) ' Cube containing particles'
write(*,*) ' XMin, Xmax ??'
read(*,*) XXmin,XXmax
write(*,*) XXmin,XXmax
write(*,*) ' YMin, Ymax ??'
read(*,*) YYmin,YYmax
write(*,*) YYmin,YYmax
write(*,*) ' ZMin, Zmax ??'
read(*,*) ZZmin,ZZmax
write(*,*) ZZmin,ZZmax
write(*,*) ' slope in X direction??'
read(*,*) slope
write(*,*) slope
slope=slope*pi/180
if (slope.eq.pi/2) then
    valtan_inv=0
    Xtop=1.01*XXmax
else
    valtan_inv =1./tan(slope)
    kmax=nint(ZZmax/dz1)
    Xtop=1.01*(XXmax+kmax*dx1*valtan_inv)
endif
Nstepsx=nint((XXmax-XXmin)/dx1)+1
Nstepsy=nint((YYmax-YYmin)/dy1)+1
Nstepsz=nint((ZZmax-ZZmin)/dz1)+1
write(*,*) 'Npnts x/y/z', nstepsx,nstepsy,nstepsz
write(*,*) 'Beginning of obstacle at ',nn+1
write(*,*) 'Start of obstacle at ',nn+1
if(iBC.eq.2) then
    hk=(YYmax-YYmin)/(XXmax-XXmin)
    if(iopt_kind.eq.2) then
c      -- Block face 1 -
        N_ini=nint(XXmin/dx1)
        N_end=nint((XXmin-(XXmax-XXmin))/dx1)

```

```

M_ini=nint(YYmin/dy1)
M_end=nint(YYmax/dy1)
L_ini=nint(ZZmin/dz1)
L_end=nint(ZZmax/dz1)
do i=N_ini,N_end,-1
  do k=L_ini,L_end
    if(i.eq.N_ini) then
      x1=XXmin
    else
      x1=i*dx1
    end if
    y1=YYmin-(x1-XXmin)*hk
    z1=k*dz1
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  enddo
enddo
c  -- Block face 2 -
N_ini=nint((XXmin-(XXmax-XXmin))/dx1)
N_end=nint(XXmin/dx1)
L_ini=nint(ZZmin/dz1)
L_end=nint(ZZmax/dz1)
do i=N_ini,N_end
  do k=L_ini,L_end
    if(i.eq.N_ini) then
      x1=(2*XXmin)-XXmax
    else if (i.eq.N_end) then
      x1=XXmin
    else
      x1=i*dx1
    end if
    y1=YYmax+(x1-2*XXmin+XXmax)*hk
    z1=k*dz1
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  enddo
enddo
c  -- Block face 3 -
N_ini=nint(XXmin/dx1)
N_end=nint(XXmax/dx1)

```

```

L_ini=nint(ZZmin/dz1)
L_end=nint(ZZmax/dz1)
do i=N_ini,N_end
  do k=L_ini,L_end
    if (i.eq.N_end) then
      x1=XXmax
    else
      x1=i*dx1
    end if
    y1=(YYmin+2*(YYmax-YYmin))-(x1-XXmin)*hk
    z1=k*dz1
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  enddo
enddo
c  -- Block face 4 -
N_ini=nint(XXmax/dx1)
N_end=nint(XXmin/dx1)
L_ini=nint(ZZmin/dz1)
L_end=nint(ZZmax/dz1)
do i=N_ini,N_end,-1
  do k=L_ini,L_end
    if(i.eq.N_ini) then
      x1=XXmax
    else if(i.eq.N_end) then
      x1=XXmin
    else
      x1=i*dx1
    end if
    y1=YYmax+(x1-XXmax)*hk
    z1=k*dz1
    nn=nn+1
    call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
  enddo
enddo
c  -- Block face 5 -
N_ini=nint(XXmin/dx1)
N_end=nint((XXmin-(XXmax-XXmin))/dx1)
M_end=nint((XXmax-XXmin)/dx1)
do j=0,4

```

```

k=1
do i=N_ini,N_end,-1
x1=(i*dx1)+((j+1)*dx1)
y1=YYmin+(j+k)*dy1
z1=ZZmax
k=k+1
nn=nn+1
call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
enddo
enddo
endif

```

٢-ب

c \_\_\_\_\_ SUBROUTINE OSTAVANE\*\*\*\*\*

```

subroutine obstacle(nn,dx,dy,dz,beta,theta,iopt_obst)
include 'common.gen3D'
double precision x1,y1,z1
double precision dx1, dy1, dz1
write(*,*) ' Which kind of obstacle'
write(*,*) ' (1) Solid '
write(*,*) ' (2) With Solid Walls'
read(*,*) iopt_kind
write(*,*) iopt_kind
write(*,*) ' Density of points'
read(*,*) ndens
write(*,*) ndens
dx1=dx/ndens
dy1=dy/ndens
dz1=dz/ndens
write(*,*) ' center of circular'
write(*,*) ' X_center_circular, y_center_circular ??'
read(*,*) X_center_circular, y_center_circular
write(*,*) X_center_circular, y_center_circular
write(*,*) ' radius of circular ??'
read(*,*) r_circular
write(*,*) r_circular
write(*,*) ' ZMin, Zmax ??'
read(*,*) ZZmin,ZZmax
write(*,*) ZZmin,ZZmax
write(*,*) ' slope in X direction??'

```

```

read(*,*) slope
write(*,*) slope
slope=slope*pi/180
if (slope.eq.pi/2) then
    valtan_inv=0
    Xtop=1.01*XXmax
else
    valtan_inv =1./tan(slope)
    kmax=nint(ZZmax/dz1)
    Xtop=1.01*(XXmax+kmax*dx1*valtan_inv)
endif
Nstepsx=nint((XXmax-XXmin)/dx1)+1
Nstepsy=nint((YYmax-YYmin)/dy1)+1
Nstepsz=nint((ZZmax-ZZmin)/dz1)+1
write(*,*) 'Npnts x/y/z', nstepsx,nstepsy,nstepsz
write(*,*) 'Beginning of obstacle at ',nn+1
write(*,*) 'Start of obstacle at ',nn+1
if(iBC.eq.2) then
    N_start1=1
    N_finish1=nint(2.0*pi*(r_circular)/dx)
    L_start=nint(ZZmin/dz)
    L_finish=nint(ZZmax/dz)
do i = N_start1,N_finish1
do k = L_start,L_finish
nn=nn+1
angle=angle+tan(dx/(r_circular))
x1=X_center_circular+(r_circular)*sin(angle)
y1=y_center_circular+(r_circular)*cos(angle)
z1=ZZmin+k*dz
call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
end do
end do
c -- Block face 1
N_start2=1
N_finish2=nint(2.0*pi*(r_circular-dx)/dx)
L_start=nint(ZZmin/dz)
L_finish=nint(ZZmax/dz)
do i = N_start2,N_finish2
nn=nn+1
angle=angle+tan(dx/(r_circular-dx))

```

```

x1=X_center_circular+(r_circular-dx)*sin(angle)
y1=y_center_circular+(r_circular-dx)*cos(angle)
z1=ZZmax
call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
end do
c -- Block face 2
N_start3=1
N_finish3=nint(2.0*pi*(r_circular-2*dx)/dx)
L_start=nint(ZZmin/dz)
L_finish=nint(ZZmax/dz)
do i = N_start3,N_finish3
nn=nn+1
angle=angle+tan(dx/(r_circular-2*dx))
x1=X_center_circular+(r_circular-2*dx)*sin(angle)
y1=y_center_circular+(r_circular-2*dx)*cos(angle)
z1=ZZmax
call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
end do
c -- Block face 3
N_start4=1
N_finish4=nint(2.0*pi*(r_circular-3*dx)/dx)
L_start=nint(ZZmin/dz)
L_finish=nint(ZZmax/dz)
do i = N_start4,N_finish4
nn=nn+1
angle=angle+tan(dx/(r_circular-3*dx))
x1=X_center_circular+(r_circular-3*dx)*sin(angle)
y1=y_center_circular+(r_circular-3*dx)*cos(angle)
z1=ZZmax
call pos_veloc(nn,x1,y1,z1,0.,0.,0.)
end do

!- Include Body Forces -
bigUdot(i_num_FB) = bigUdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*grx
bigVdot(i_num_FB) = bigVdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*gry
bigWdot(i_num_FB) = bigWdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*grz
niro_x=bigUdot(i_num_FB)
niro_y=bigVdot(i_num_FB)
niro_z=bigWdot(i_num_FB)

```

پیوست پ



```

!- Evaluate non-friction forces -
if(nb_inFriction(i_num_FB).gt.0) then
  X_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigUdot(i_num_FB) - X_Friction(i_num_FB))
&      / (nb_inFriction(i_num_FB))
  Y_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigVdot(i_num_FB) - Y_Friction(i_num_FB))
&      / (nb_inFriction(i_num_FB))
  Z_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigWdot(i_num_FB) - Z_Friction(i_num_FB))
&      / (nb_inFriction(i_num_FB))
else
  X_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigUdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*grx
&      - X_Friction(i_num_FB))
  Y_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigVdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*gry
&      - Y_Friction(i_num_FB))
  Z_nonFriction(i_num_FB) =
&      (bigWdot(i_num_FB) + bigMass(i_num_FB)*grz
&      - Z_Friction(i_num_FB))
endif

!- Forces per unit mass -
bigUdot(i_num_FB) = bigUdot(i_num_FB)/bigMass(i_num_FB)
bigVdot(i_num_FB) = bigVdot(i_num_FB)/bigMass(i_num_FB)
bigWdot(i_num_FB) = bigWdot(i_num_FB)/bigMass(i_num_FB)
OmegaXdot(i_num_FB) = OmegaXdot(i_num_FB)/bigInertiaXX(i_num_FB)
OmegaYdot(i_num_FB) = OmegaYdot(i_num_FB)/bigInertiaYY(i_num_FB)
OmegaZdot(i_num_FB) = OmegaZdot(i_num_FB)/bigInertiaZZ(i_num_FB)
Box_XC(i_num_FB) = Box_XC_old(i_num_FB) + dt2*bigU(i_num_FB)
Box_YC(i_num_FB) = Box_YC_old(i_num_FB) + dt2*bigV(i_num_FB)
Box_ZC(i_num_FB) = Box_ZC_old(i_num_FB) + dt2*bigW(i_num_FB)
bigU(i_num_FB) = bigU_old(i_num_FB) + dt2*bigUdot(i_num_FB)
bigV(i_num_FB) = bigV_old(i_num_FB) + dt2*bigVdot(i_num_FB)
bigW(i_num_FB) = bigW_old(i_num_FB) + dt2*bigWdot(i_num_FB)
bigU(i_num_FB) =0.0
bigV(i_num_FB) =0.0
bigW(i_num_FB) =0.0

bigOmegaX(i_num_FB) = bigOmegaX_old(i_num_FB)

```

```

&          + dt2*OmegaXdot(i_num_FB)
bigOmegaY(i_num_FB) = bigOmegaY_old(i_num_FB)
&          + dt2*OmegaYdot(i_num_FB)
bigOmegaZ(i_num_FB) = bigOmegaZ_old(i_num_FB)
&          + dt2*OmegaZdot(i_num_FB)
bigOmegaX(i_num_FB) =0.0
bigOmegaY(i_num_FB) =0.0
bigOmegaZ(i_num_FB) =0.0

```

## فصل ۶

(( صراجے ))

1. Gleick, P. H. (1993). "Water in crisis: A guide to the world's freshwater resources". *Oxford University Press*, pp 13, Table 2-1.
2. Marsooli, R. (2013). PHD thesis. "3-D NUMERICAL SIMULATION OF DAM-BREAK FLOWS OVER MOVABLE BEDS". Mississippi University.
۳. رنجینه خجسته، ع. (۱۳۸۱). پایان نامه ارشد: "بررسی اثرات زبری بستر در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست ناگهانی سد". دانشکده فنی گروه آب. دانشگاه تبریز.
4. Dams less than thirty meters high. *Bulletin .109, ICOLD*.
5. Dam failures statistical analysis. *Bulletin .99, ICOLD*.
6. Number of Dams by Country Members. in ICOLD, International Commission On Large Dams, from: [http://www.icold-cigb.org/gb/world\\_register/general\\_synthesis.asp?IDA=206](http://www.icold-cigb.org/gb/world_register/general_synthesis.asp?IDA=206)
7. List of largest dams in the world. (2015, December 2). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 11:10, December 23, 2015, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_largest\\_dams\\_in\\_the\\_world&oldid=693452789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_largest_dams_in_the_world&oldid=693452789)
8. ICOLD. (1986). "'Soil-Cement". *International Committee of Large Dams, Paris Bulletin No. 54*.
9. Farooq, R. Top 15 Worst Dam Disasters Ever. 28 JUN 2013. from: <http://chillopedia.com/interesting/top-15-worst-dam-disasters-ever/>
10. American Society of Civil Engineers. (2013). "2013 report card for America's infrastructure."
11. Interagency Committee on Dam Safety. (2004). "Federal guidelines for dam safety: hazard potential classification system for dams". *FEMA*.
12. Ritter, A. (1982). "Generation of the water wave". *Magazine Association of German Engineers 36 (2)*, 947-954.
13. Dressler, R. (1954). " Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave". *Assoc. Sci. Hydrol., Rome 38*, 319-328.
14. Bell, S., Elliot, R., & Chaudhry, M. (1992). "Experimental results of two dimensional dam-break flows". *J. Hydraul. Res. 30 (2)*, 225-252.
15. Fraccarollo, L., & Toro, E. F. (1995). "Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems". *Journal of Hydraulic Research, Vol. 33(6)*, 843-864.
16. Lauber, G., & Hager, W. (1998). "Experiments to dam-break wave: horizontal channel". *Journal of Hydraulic Research, Vol. 36(3)*, pp 291-307.
17. Wang, J., Ni, H., & He, Y. (2000). "Finite-difference TVD scheme for computation of dam-break problems". *Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126(4)*, pp 253-262.
18. Soares-Fraza, S., Noel, B., & Zech, Y. (2004). "Experiments of dam-break flow in the presence of obstacles". *Proc. of River Flow 2004, Naples, Italy, vol.2*, pp. 911-918.

19. Soares-Fraza, S. (2007). "Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill". *J. Hydraul. Res.* 45 (Extra Issue), 19-26.
20. Ferrari, A., Fraccarollo, D., Dumbser, M., Toro, E., & Armanini, A. (2010). "Three dimensional flow evolution after a dam break". *J. Fluid Mech.* 663, 456-477.
21. Yang, C., Lin, B., Jiang, C., & Liu, Y. (2010). "Predicting near-field dam-break flow and impact force using a 3D model". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48(6), pp 784-792.
22. Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2010). "Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48(5), pp 603-611.
23. Biscarini, C., Francesco, D., & Manciola, P. (2010). "CFD modelling approach for dam-break flow studies". *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14 (4), 705-718.
24. Singh, J., Altinakar, M., & Ding, Y. (2011). "Two-dimensional numerical modeling of dam-break flows over natural terrain using a central explicit scheme". *Advances in Water Resources*, 1366-1375.
25. Bellos, V., & Hrissanthou, V. (2011). "Numerical Simulation of a Dam-Break Flood Wave". *European Water* 33, 45-53.
26. Marsooli, R., Zhang, M., & Wu, W. (2011). "Vertical and horizontal two-dimensional numerical modeling of dam-break flow over fixed beds". *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, Palm Springs, CA., U.S.A.*
27. Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2011). "Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD Simulation". *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 5 (4), 541-552.
28. Oertel, M., & Bung, D. (2012). "Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50(1), pp 89-97.
29. Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2012). "Investigation of Dam-Break Flow Over Abruptly Contracting Channel With Trapezoidal Shaped Lateral Obstacles". *J. Fluids Eng* 134(8).
۳۰. حسن زاده، ی. (۱۳۷۰). "بررسی انتشار امواج ناشی از شکست سد". نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران ۴۱-۴۸.
۳۱. عباسی، ب.، اسماعیلی، ک. & ابریشمی، ج. (۱۳۸۹). "مدلسازی آزمایشگاهی همزمانی شکست هیدرولیکی سد با ورود سیلاب سریع به مخزن". نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۱، ص ۷۵-۸۳.
۳۲. اسدیانی، ی.، بینی هاشمی، ا. & بینی هاشمی، م. (۱۳۸۹). "یک مدل عددی نیمه ضمنی چند مرحله ای از نوع گودائف با شبکه جابجا شده برای مدلسازی شکست سد". *نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.*
33. Baghlani, A. (2011). "Simulation of Dam-Break Problem by a Robust Flux-Vector Splitting Approach in Cartesian Grid". *Scientia Iranica*, 18(5), 1061-1068.
۳۴. حسن زاده، ی. & رنجینه خجسته، ع. (۱۳۸۹). "بررسی اثرات زبری بستر در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد در یک مدل هیدرولیکی شبیدار". *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، جلد ۴۰، شماره ۱.
۳۵. خوب، ع. & کاشفی پور، س. (۱۳۹۱). *اثر زبری بر توسعه ابتدایی موج حاصل از شکست سد. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه.*
۳۶. بارانی، غ.، عابدی، م. & دهنوی، م. (۱۳۹۲). "شبیه سازی جریان سیلابی حاصل از شکست سد با وجود مانع مثالی و با استفاده از مدل های عددی آب کم عمق و معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز". *همایش ملی پژوهش های محیط زیست ایران.*

۳۷. محمد نژاد, ب. فاطمی کیا, م. بهمنش, ج. ج. & منتصری, م. (۱۳۹۳). شبیه سازی عددی انتشار موج ناشی از شکست سد به صورت دو بعدی قائم. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*, جلد ۴۴, شماره ۳.
38. Liu, G. (2003). "Mesh Free methods: Moving beyond the finite element method". *CRC Press*.
  39. Galagali, N. (2007). "Algorithms for particle remeshing applied to smoothed particle hydrodynamics". *PHD thesis*.
  40. Lucy, L. (1977). "A numerical approach to the testing of fusion process". *Astronomical Journal*, Vol. 88, pp. 1013-1024.
  41. Gingold, R., & Monaghan, J. (1977). "Smoothed Particle Hydrodynamics". *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, Vol. 235, pp. 911-934.
  42. Liu, G., & Liu, M. (2007). "Smoothed Particle Hydrodynamics a meshfree particle method". *World Scientific*.
  43. Marrone, S. (2011). "Enhanced SPH modeling of free-surface flows with large deformations". *PhD Thesis, Theoretical and Applied Mechanics, University of Rome*.
  44. Monaghan, J. (1992). "Smoothed Particle Hydrodynamics". *Annual Rev. Astron. Appl.*, 30:543-574.
  45. Gingold, R. and J. Monaghan (1982). "Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics." *Journal of Computational Physics* 46(3): 429-453.
  46. Monaghan, J. (1994). "Simulating free surface flows with SPH". *Journal Computational Physics*, 110:399- 406.
  47. Cleary, P., & Prakash, M. (2004). "Discrete-element modelling and smoothed particle hydrodynamics: potential in the environmental sciences". *Philos. Trans.R.Soc. Lond. A* 362, 2003–2030.
  48. Wang, Z., & Shen, H. (1999). "Lagrangian simulation of one-dimensional dam-break flow". *J. Hydraul. Eng. ASCE* 125 (11), 1217–1220.
  49. Ata, R., & Soulimani, A. (2005). " A stabilized SPH method for inviscid shallow water flows". *Int. J. Numer. Methods Fluids* 47 (2), 139–159.
  50. De Lefte, M., Le Touze, D., & Alessandrini, B. (2010). " SPH modeling of shallow-water coastal flows". *J. Hydraul. Res.* 48, 118–125.
  51. Chang, T., Kao, H., Chang, K., & Hsu, M. (2011). "Numerical simulation of shallow water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics". *J.Hydrol*, 408 (1-2), 78-90.
  52. Goffin, L. (2013). "Development of a didactic SPH model". *PHD thesis*.
  53. Bonet, J., & Lok, T.-S. (1999). "Variational and momentum preservation aspects of Smoothed Particle Hydrodynamics formulations". *Computat. Methods Appl. Mech. Engineering*, 180:97-115.
  54. Marjani, A. (2013). "Advancement in Smoothed Particle Hydrodynamics for Applying to Ocean Wave Energy Conversion". *PHD thesis*.

55. Morris, J., Fox, P., & Zhu, Y. (1997). "Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH". *Journal of Computational Physics*, 136:214-226.
56. Lo, E., & Shao, S. (2002). "Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method". *Applied Ocean Research*, 24:275-286.
57. Rogers, B., & Dalrymple, R. (2004). "SPH modeling of breaking waves". *In Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering*, 415-427.
58. Dalrymple, R., & Rogers, B. (2006). "Numerical modeling of water waves with the SPH method". *Coastal Engineering*, 53:141-147.
59. Christensen, E. (2006). "Large eddy simulation of spilling and plunging breakers". *Coastal Engineering*, 53:463-485.
60. Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment". *Monthly Weather Review*, 91:99-164.
61. Gotoh, H., Shibihara, T., & Hayashi, M. (2001). "Subparticle-scale model for the mps method-lagrangian flow model for hydraulic engineering". *Computational Fluid Dynamics Journal*, 9(4):339-347.
62. Monaghan, J. (2005). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Rep. Progress Phys.* 68 , 1703-1759.
63. Monaghan, J. (1989). "On the Problem of Penetration in Particle Methods". *Journal Computational Physics*, 82:1-15.
64. Crespo, A. (2008). "Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics". *PHD thesis*.
65. Liu, G., & Liu, M. (2003). "Smoothed Particle Hydrodynamics: a meshfree particle method". *World Scientific*.
66. Johnson, G., Stryk, R., & R, B. (1996). "SPH for high velocity impact computations". *Comput. Methods Appl. Mech. Engineering*, 139:347-373.
67. Monaghan, J., & Lattanzio, J. (1985). "A refined method for astrophysical problems". *Astron. Astrophys*, 149:135-143.
68. Panizzo, A., Capone, T., & Dalrymple, R. (2007). "Accuracy of kernel derivatives and numerical schemes in SPH". *Submitted to Journal of Computational Physics*.
69. Wendland, H. (1995). "Computational aspects of radial basis function approximation". *Elsevier*.
70. Fulk, D., & Quinn, D. (1996). "An analysis of 1-D smoothed particle hydrodynamics kernels". *Journal of Coputational Physics*, 126(1): 165-180.
71. Monaghan, J., & Kajtar, J. (2009). "SPH particle boundary forces for arbitrary boundaries". *Computer Physics Communications*, 180(10): 1811-1820.
72. Colagrossi, A., & Landrini, M. (2003). "Numerical simulation of interfacial flows by Smoothed Particle Hydrodynamics". *Journal of Computational Physics*, 191:448-475.
73. Dilts, G. (1999). "Moving-LeastSquares-Particle Hydrodynamics I. Consistency and stability". *Int. J. Numer. Meth. Engineering*, 44:1115-1155.

74. Panizzo, A. (2004). "Physical and Numerical Modelling of Subaerial Landslide Generated Waves". *PhD thesis, Universita degli Studi di L'Aquila*.
75. Verlet, L. (1967). "Computer Experiments on Classical Fluids.I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules". *Phys. Rev*, 159:98-103.
76. Monaghan, J. (2006). "Time stepping algorithms for SPH". *Technical report, Monash University*.
77. Beeman, D. (1976). "Some multistep methods for use in molecular dynamics calculations". *Journal of Computational Physics*, 20:130-139.
78. Monaghan, J., & Kos, A. (1999). "Solitary Waves on a Cretan Beach". *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125:145-154.
79. Kocaman, S. (2007). "Experimental and theoretical investigation of dam-break problem". *PHD thesis. University of Cukurova, Adana, Turkey [in Turkish]*.
80. Koshizuka, S., Tamko, H., & Oka, Y. (1995). "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation". *Comp. Fluid Dyn. J.*, vol 4 (1), pp. 29–46.
81. Colicchio, G. (2004). "Violent disturbance and fragmentation of free surfaces". *PhD thesis. University of Southampton*.
82. Raad, P., & Bidoae, R. (2005). "The three-dimensional Eulerian–Lagrangian marker and micro cell method for the simulation of free surface flows". *Journal of Computational Physics*, 203:668–699.



## Abstract

Based on the enormity of the dam building, high volume of used materials and high cost of construction, economic function and the aspects of power supply and water, dam is considered as a strategic building. For this reason dam break is the most important case among of natural or engineering events that this event can cause a major catastrophe with destructive fatality and financial losses. In addition to the complexity inherent of dam break flow, existence of obstacles and buildings, changes the rapid variation of downstream flow pattern that make the problem more complex. Therefore all of researchers and engineers effort is studying the comprehensive of this phenomenon and limiting the dimension of the damage caused by it. Hence the aim of this thesis is study the ability and efficiency of the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) in modeling the dam break against the obstacles.

Smoothed Particle Hydrodynamics is a lagrangian mesh free method in which each particle moves according to the property of the surrounding flow and governing equations and carries the properties of water such as density, pressure and mass. This method is used in a lot of fields of engineering, such as solids mechanics, hydraulics and astrophysics. Because of the lagrangian nature, SPH is very suitable for very large and discrete deformations.

In this thesis, in order to validation and verify the accuracy of SPH, some two dimensional modeling of dam break against the various obstacles done by SPH; due to limited shapes of obstacles in SPH, modeling of dam break in two and three dimensional case, require changes in the SPHysics numerical code to build different shapes of obstacles against the dam break flow. This changes in code are given in the appendix of this thesis. By comparing the two dimensional modeling results with available experimental data, it is shown that SPH has a good performance and the results have sufficiently accurate.

This thesis aims to provide appropriate way to reduce the damage caused by dam break till in the event of dam break accident, be able to minimize the severity of damages by reduce force and velocity of the flow. In order to achieve this goal, first by using a three dimensional dam break model against a single column, the exerted force on column is calculated; the applied force on the column, is calculated with the written numerical code in the appendix of this thesis and by comparing the results with experimental data the accuracy of the SPH method is evaluated. In the following the effect of three parameters: the shape, distance and arrangement style of the obstacles is examined on the flow motion and the exerted force on the obstacles. First by comparing the effect of three obstacle, cylindrical and square and the located square column obstacles in the flow path with the angel, the effect of obstacle shape is evaluated and determined that the shape of obstacle has a significant effect on the flow velocity and the process of formation of the reflection wave. Finally by flow modeling against three obstacle with different arrangement styles and distances between them, the impact of these two parameters is evaluated on the flow velocity and exerted force on the obstacles. The results show that the effect of arrangement style of obstacles on the exerted force is much greater than the distance between the obstacles.

**Keywords:** Dam Break, Obstacle, Exerted Forces on the Body, Smoothed Particle Hydrodynamics



**Shahrood University of Technology**

**Faculty Civil Engineering**

**Numerical simulation of dam-break flow in the presence of different obstacles using SPH method**

**Rodabeh Adnani**

**Supervisor:**

**Dr. Ramin Amini**

**February 2016**