مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۸

اصلاح شرایط مرزی روش هیدرودینامیک ذرات هموار در مدل‌سازی بالاروی موج با استفاده از قابلیت پردازش موازی

علی ساسانی بابک[۱]، حسن اکبری[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه سازه دریایی، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

***Akbari.h@modares.ac.ir**

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰] تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

بالاروی و روگذری موج یکی از عوامل مهم در طراحی سازه‌های ساحلی است و تخمین مناسب این پارامتر نقشی تعیین کننده در تعیین تراز طراحی سازه‌های دریایی دارد. بالاروی و اندرکنش موج با سازه با پدیده‌هایی چون شکست موج، تغییرات و بهم ریختگی زیاد سطح آب همراه است که با توجه به قابلیت روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار SPH در شبیه سازی این پدیده‌ها، از این روش عددی در این پژوهش استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان بالاروی، مشخصات و جنس بستر است که تاثیر مستقیمی بر میزان بالاروی موج داشته و منظور نمودن آن می‌تواند باعث بهبود نتایج و هماهنگی مناسب مدل عددی با فیزیک پدیده شود. در این راستا، در این پژوهش با معرفی دو رویکرد جدید، مدل عددی SPH به گونه‌ای توسعه یافت که تاثیر نیروی اصطکاک با دو روش پله‌ای و هموارشده بر ذرات مجاور بستر اعمال شود. نتایج مدل عددی توسعه یافته با روابط تحلیلی-تجربی معتبر شده بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی مشابه مقایسه و مشاهده شد که با تصحیح روند اعمال نیروی اصطکاک، دقت مدل عددی افزایش یافته و میزان بالاروی با مقدار خطای کم تری ارزیابی می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، اعمال نیروی اصطکاک تأثیر زیادی بر پاسخ‌ها دارد و میزان افزایش دقت وابسته به هندسه و شرایط موج است. اگر بالاروی همراه با لغزش موج روی سطح بستر باشد، تاثیر اعمال نیروی اصطکاک بر بهبود نتایج افزایش می‌یابد به‌گونه‌که در بعضی از مدل‌ها خطای ۹۰ درصدی را به ٦ درصد کاهش می‌دهد. از آنجایی که بطور معمول، روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبت به سایر روش های مرسوم عددی هزینه محاسباتی بالاتری دارد، از قابلیت پردازش موازی و استفاده از ظرفیت کارت گرافیک به‌منظور کاهش زمان محاسبات استفاده شد. همچنین، برای ارزیابی عملکرد این مدل، هزینه محاسباتی گام‌های مختلف روش توسعه یافته در هر دو شرایط استفاده و عدم استفاده از پردازش موازی با یکدیگر مقایسه شد.

واژگان کلیدی: شرایط مرزی، اصطکاک بستر، بالاروی موج، پردازش موازی.

۱. مقدمه

مسئله بالاروی و روگذری موج یکی از پدیده‌های مهم در مهندسی سواحل است که همراه با آن تغییرات زیاد سطح آزاد، شکست موج و اندرکنش آن با سازه مطرح می‌شود. وقتی‌که

میزان بالاروی از ارتفاع تاج سازه بیشتر شود پدیده روگذری اتفاق می‌افتد که می‌تواند به خرابی سازه، آسیب به تجهیزات بندر و حتی آسیب‌های جانی منجر شود. در مسئله بالاروی و مدل‌سازی آن با روش‌های مختلف عددی، مدل‌های آزمایشگاهی و روابط تحلیلی کارهای فراوانی انجام‌شده است. هانت [1] و بتیس [2] روابط تحلیلی را برای میزان بالاروی روی سطوح صاف و نفوذناپذیر با شرایط موج منظم و پیوسته ارائه کردند. هو [3] ، استنسبی [4، 5] و شیاچ [6] با استفاده از معادلات حاکم بر آب کم‌عمق پژوهشی را بر روی میزان بالاروی و روگذری موج در این شرایط و با استفاده از روش حجم محدود انجام دادند. علی‌رغم توفیقاتی که در روش‌های دارای شبکه به وجود آمد، این روش‌ها دارای نقاط ضعفی به ویژه در مدل‌سازی تغییر شکل‌های زیاد در وجوه متحرک بودند. همچنین در مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده، پیدا کردن یک شبکه‌بندی مناسب و باکیفیت کاری دشوار است. برای رفع این کاستی‌ها، روش‌های بدون شبکه شروع به پیشرفت کردند. یکی از توانمندترین روش‌های مدل‌سازی جریانات سطح آزاد با تغییرات قابل توجه در مرز سطح آزاد، روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH[1]) است.

اولین کار مهم درزمینه شبیه‌سازی با استفاده از هیدرودینامیک ذرات هموار را موناگهان با مدل‌سازی مسئله شکست سد انجام داد و نتایج قابل‌قبولی گرفت [7]. لو در سال ۲۰۰۲ با فرض تراکم ناپذیری سیال و با مدل‌سازی ادی‌های بزرگ، به مدل‌سازی امواج یکتا نزدیک ساحل پرداخت [8]. راجرز و دیدیر در مدل‌های بعدی به محاسبه اندرکنش موج با سازه پرداختند [9] [10]. شائو در سال ۲۰۰۶ با فرض تراکم ناپذیری سیال به مدل‌سازی روگذری پرداخت [11]. شائو همچنین با ارائه مقاله‌ای به بررسی روگذری بر روی سازه‌های مختلف پرداخت [12]. شادلو در سال ۲۰۱۵ بالاروی امواج بلند شکسته و نشکسته را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی کرد [13]. همچنین مطالعات متعدد دیگری برای اصلاح شرایط مرزی در مدل های مبتنی بر ذرات انجام شده است که به عنوان نمونه در راستای افزایش دقت مدلسازی و یا کوپل نمودن این مدل ها با سایر مدل‌های عددی بوده است [14و 15].

با وجود مدلسازی بالاروی موج با روش SPH، پژوهش بسیار کمی در خصوص اعمال تأثیر جنس بستر بر مقدار بالاروی ارائه شده است. هدف این پژوهش، اعمال جنس بستر و نیروی معادل آن در مدل‌سازی بوده و انتظار می‌رود که با اعمال این نیرو میزان بالاروی و روگذری تطبیق بهتری را با نتایج آزمایشگاهی نشان دهد. همچنین، برای افزایش کارایی روش SPH، از قابلیت پردازش موازی استفاده می‌شود. از اولین کارهایی که برای افزودن روش SPH بر GPU[2] بود می‌توان به مقالات کولب در سال ۲۰۰۵ [16] و هارادا اشاره کرد [17]. موکوس در سال ۲۰۱۵ برای مدل چند فازی SPH از ظرفیت کارت گرافیک استفاده کرد [18]. در این پژوهش، تاثیر استفاده از GPU بر افزایش کارایی گام‌های حل روش عددی معرفی شده بررسی می‌شود.

۲- مدل تراکم‌پذیر SPH

روش هیدرودینامیک ذرات هموار، به‌طورکلی به دو نوع هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر و تراکم ناپذیر تقسیم می‌شود. در روش نخست، قابلیت تراکم جزئی برای سیال در نظر گرفته می‌شود و در روش دوم، معادلات با فرض تراکم ناپذیری کامل حل می‌شود.

در روش SPH با جایگزین نمودن سیستم موردنظر با مجموعه‌ای از ذرات، گسسته سازی انجام می‌شود. این روش محیط پیوسته را با اختصاص مشخصات فیزیکی به سیال، گسسته می‌کند. در مدل‌سازی مسائل مربوط به دینامیک سیالات، معادلات گسسته شده ناویر- استوکس به‌طور محلی برای هر ذره در مکان موردنظر و بر اساس مشخصات فیزیکی ذرات مجاور، انتگرال‌گیری می‌شود. ذرات همسایه بر اساس فاصله‌ای که در حالت دوبعدی به شکل دایره‌ای و در حالت سه‌بعدی به شکل کروی است بصورت تابعی از طول هموارسازی h مشخص می‌شود. تابع F را می‌توان به شکل غیر پیوسته و گسسته بر اساس ذرات موجود نوشت. در این حالت

1 Smoothed Particle Hydrodynamics

2 Graphics Processing Unit

مقدار یابی تابع در محل ذره a با جمع تأثیر ذراتی که در محدوده تأثیر ذره (a) قرار دارند، محاسبه می‌شود. شکل گسسته تقریب تابع، به صورت زیر است:

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) W(r_a - r_b, h) \Delta v_b \qquad (۱)$$

در این مطالعه، تابع کرنل وندلند استفاده شده است [19] و معادلات حاکم، معادلات ناویر–استوکس (معادلات پیوستگی و ممنتوم) مطابق زیر است:

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \nabla . u = 0 \qquad (۲)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \Gamma \qquad (۳)$$

که در آن ρ چگالی سیال، u بردار سرعت جریان، Γ نشان‌دهنده ترم لزجت و g شتاب جاذبه است. در این پژوهش، از روش تراکم پذیر استفاده شده و به منظور جلوگیری از ناپایداری عددی لزجت مصنوعی مطابق [7] تنظیم شده است. با اعمال فرض تراکم‌پذیری جزئی سیال، از معادله حالت برای مشخص کردن فشار وارد بر ذرات سیال استفاده می‌شود. همچنین، به منظور بررسی اندرکنش سیال و مرز صلب از شرط مرزی پویا استفاده شده است. در این روش روابط روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار برای تمام ذرات مرز و سیال حل‌شده و کمیت‌های ذرات در هر گام زمانی محاسبه می‌شود ولی مقدار سرعت برای ذرات مرز صلب برابر صفر قرار می‌گیرد تا ذرات مرز جابه‌جا نشوند. همچنین در این روش می‌توان تابع حرکتی به ذرات مرز صلب داد که جسم صلب با توجه به این تابع حرکت و مستقل از نیروهای محاسبه‌شده برای ذرات مرز حرکت کند، مانند صفحه موج ساز [20].

۳- استفاده از قابلیت پردازش موازی

مدل‌سازی با SPH شامل سه قسمت اصلی است: [21]

I. تهیه لیست همسایه‌ها که در آن دامنه محاسباتی به سلول‌های با عرض 2h (و یا اندازه تابع کرنل) تقسیم می‌شود. لیست ذرات بر طبق سلول‌های آن‌ها تشکیل و سپس، آرایه‌های حاوی متغیرهای فیزیکی ذرات بر طبق لیست مرتب می‌شوند.

II. محاسبه نیروها که در آن نیروهای مابین هر ذره با ذرات همسایه در فاصله 2h محاسبه می‌شود.

III. آپدیت کردن سیستم که در آن، مقادیر فیزیکی در گام بعدی که با استفاده از مقادیر فیزیکی فعلی یا گام زمانی قبلی محاسبه شده است به‌روز می‌شود.

تمرکز اعمال سازی GPU روی محاسبه نیروها است که تأثیر بالاتری روی زمان اجرا دارد. یکی از نکات مهمی که در اجرای کدها باید در نظر گرفت بهینه‌سازی ارتباط و انتقال بین CPU و GPU است. [22] اجرای GPU باعث بروز تفاوت‌هایی در مقایسه با CPU می‌شود اصلی‌ترین تفاوت اجرای موازی تمام دستورات است که باعث موازی‌سازی برای تمام ذرات می‌شود. در شکل زیر به‌صورت شماتیک تفاوت استفاده از CPU و GPU آورده شده است.

شکل ۱. تفاوت **GPU** و **CPU** (کرسپو [**23**])

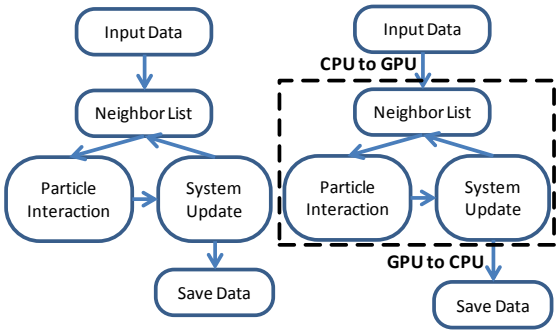


Fig. 1. CPU versus GPU (Crespo [23])

همان‌طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود در CPU تمام وظایف بر عهده پردازنده مرکزی است ولی در استفاده از GPU تهیه لیست همسایه‌ها محاسبه نیروها و اندرکنش ذرات و آپدیت کردن مقادیر فیزیکی جدید بر عهده GPU است [23].

برای پردازش اطلاعات تکنیک‌های مختلفی مانند یک دستور، یک داده SISD[1]، یک دستور، چند داده SIMD[2]، چند دستور، یک داده MISD[3] و چند دستور، چند داده MIMD[4] وجود دارد. پردازش CPU بر مبنای دسته اول است که روی یک مجموعه داده (یا بردار داده ها)، یک دستور توسط یک پردازشگر مرکزی انجام می‌شود و لیکن در تکنیک استفاده شده در این پژوهش SIMD، یک دستور توسط پردازنده‌های کارت گرافیک GPU، انجام می‌شود. به عبارتی اطلاعات به چند بخش

1 Single Instruction Single Data
2 Single Instruction Multiple Data
3 Multiple Instruction Single Data
4 Multiple Instruction Multiple Data

شکسته شده و یک دستور روی هر بخش جداگانه و به صورت همزمان انجام می‌شود. در روش SPH از آنجایی که معمولا دستورات مشابهی روی همه ذرات اعمال می‌شود، تکنیک SIMD کاربرد موثری دارد.

٤- معرفی اصلاح اعمال تنش برشی

یکی از عوامل مهم که تأثیر به سزایی بر میزان بالاروی و روگذری می‌گذارد، جنس بستر و اصطکاک ناشی از آن است. کدهای عددی موجود، اثر اصطکاک بستر را لحاظ نمی‌کنند و به‌تبع آن باعث بروز خطا در پاسخ‌ها و دست بالا بودن آن‌ها می‌شود. چشم‌پوشی از عامل اصطکاک در مدل‌های عددی باعث به وجود آمدن خطای قابل‌توجهی در محاسبات شده که منجر به اختلاف نتایج با مقادیر تحلیلی و تجربی می‌شود. برای رفع این تقریب و به منظور جلوگیری از ایجاد خطا و افزایش دقت مدل های موجود، مطابق روندی که در ادامه ذکر می‌شود، نیروی اصطکاک به معادلات روش هیدرودینامیک ذرات هموار اضافه شده است.

در این مطالعه، تنش برشی بین سیال و مرز جامد در هر گام زمانی محاسبه شده و به ذرات مجاور مرز اعمال می‌گردد. برای این منظور، مطابق مطالعات کوبایاشی و ورجانتو و همچنین مطالعات هو در این پژوهش استفاده شده است:[3, 24, 25]

$$\tau_f = \frac{1}{2}\rho f |u| u \qquad (٤)$$

که در آن f ضریب مربوط به اصطکاک بستر، ρ چگالی سیال و u سرعت ذره است. چگونگی اعمال به این صورت است که در محدوده‌ای مشخص، هنگامی‌که سیال به مجاورت این مرز می‌رسد تحت اثر نیروی اصطکاک بستر قرار گرفته و ترم دیگری به معادله ممنتوم اضافه می‌شود.

اگرچه مقدار ضریب اصطکاک می‌تواند به عنوان پارامتر کالیبراسیون در مدل‌های عددی مطرح باشد، لیکن در شرایطی که مقادیر کمی برای کالیبراسیون مدل موجود نباشد می‌توان از مقادیر توصیه شده برای تخمین مقدار ضریب اصطکاک در شرایط حضور موج استفاده نمود. لیکن، همانطور که ذکر شد در مدل‌های عددی، ضریب اصطکاک پارامتری اصلی برای کالیبراسیون مدل به شمار می‌آید. در این پژوهش، دو رویکرد متفاوت برای اعمال نیروی اصطکاک به ذرات مجاور بستر معرفی شده است. در رویکرد نخست (روش پله‌ای)، نیروی مقاوم به‌صورت ثابت و در بازه‌ای مشخص به ذرات سیال وارد می‌شود. در این روش، نیروی اصطکاک بطور مساوی بین ذراتی که در فاصله کم‌تر از طول هموارساز از بستر قرار دارند، تقسیم می‌شود و به عبارتی، با اضافه شدن این ترم به معادله ممنتوم، شکل اصلاح شده این معادله مطابق زیر می‌شود:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \Gamma + \frac{1}{\rho} m_p .dp .l .\tau_f \qquad (٥)$$

در این معادله، ترم سمت راست بیانگر اثر اصطکاک بستر است، m_p نشان‌دهنده جرم ذره سیال ، dp اندازه ذرات ، l عمق محدوده محاسباتی است (برای حالت دوبعدی یک در نظر گرفته شده است).

در رویکرد دوم (روش هموارشده)، نیروی اصلاحی در بازه‌ای بیشتر و متناسب با فاصله ذرات آب از سطح بستر اعمال می‌گردد به این صورت که حداکثر نیرو دقیقاً روی بستر شکل می‌گیرد و با فاصله گرفتن از آن، مقدار نیروی اعمالی کاهش پیدا می‌کند. بازه اعمال نیرو در روش هموارشده مطابق با تابع کرنل مورد استفاده بوده و مقدار نیرو در خارج از این محدوده صفر است. در این روش، شکل اصلاح شده معادله ممنتوم مطابق زیر است:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \Gamma + \frac{1}{\rho} m_p .dp .l .\tau_f .W_{a,boundary} \qquad (٦)$$

در این معادله، ترم سمت راست بیانگر اثر اصطکاک بستر است و $W_{a,boundary}$ بیانگر تأثیر تابع کرنل است که با فاصله ذره سیال موردنظر و مرز صلب رابطه دارد.

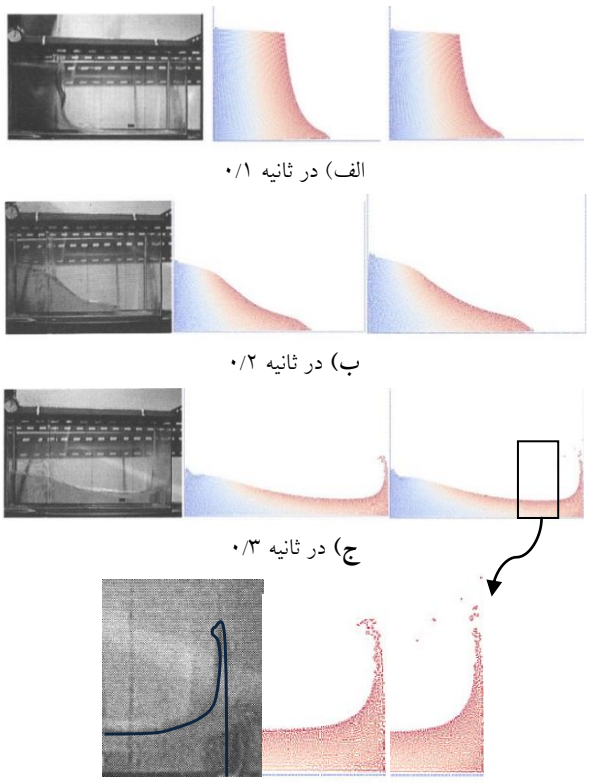
٥- ارزیابی مدل در تخمین بالاروی

٥-١ صحت سنجی تابع اصطکاک مورد استفاده

به منظور صحت سنجی تابع اصطکاک مورد استفاده، از مدل رایج فروریزش ستون آب که در مقاله کوشیزوکا آورده شده است استفاده شده است. با توجه به ماهیت مسئله که آشفتگی زیادی را در سیال به وجود می آورد، انتظار می رود که نیروی اصطکاک تغییرات کمی را بر پاسخ ها بگذارد و تغییرات چشم

گیری رخ ندهد هرچند که این تغییرات ناچیز نیز باید در جهت بهبود نتایج و افزایش دقت پاسخ ها باشد. به این منظور برداشتهای آزمایشگاهی در زمان‌های مختلف با نتایج روش عددی در شکل (۲) با نتایج ازمایشگاهی در زمان‌های مختلف مقایسه شده است. اگر چه با دقت در نتایج، می‌توان به بهبود نسبی روش توسعه یافته در جبهه موج پی برد، لیکن همان‌گونه که به نظر می رسید، خروجی‌های تصویری در مدل آزمایشگاهی هماهنگی خوبی با هر دو مدل عددی دارد. دلیل این امر ممنتوم قابل توجه توده موج و اثرپذیری کم‌تر آن از اصطکاک کف است. به عبارتی، مقادیر معمول نیروی اصطکاک در مقایسه با نیروی پیش ران ناشی از شکست موج ناچیز است و لذا تاثیر چندانی بر مقدار پیشروی ندارد. لیکن اهمیت این نیرو در شرایط بالاروی موج که توده سیال روی سطح شیب دار ساحل می‌لغزد و انرژی کم‌تری نسبت به شرایط شکست سد دارد بیشتر ملموس خواهد بود. از اینرو، در ادامه، پدیده بالاروی موج مدلسازی و تحلیل می گردد.

شکل ۲. مقایسه خروجی مدل عددی با و بدون اعمال نیروی اصطکاک (به ترتیب وسط و راست) با نتایج آزمایشگاهی (چپ)



الف) در ثانیه ۰/۱

ب) در ثانیه ۰/۲

ج) در ثانیه ۰/۳

د) بزرگ شده در محدوده پیشانی موج در ثانیه ۰/۳

Fig. 2. comparison between numerical results (unmodified and modified in middle and right, respectively) with experimental data (left)

۵-۲ معرفی شرایط مدل سازی و مدل‌های بالاروی

برای ارزیابی کارایی مدل، مقدار بالاروی موج برای هفت شرایط مختلف مندرج در جدول (۱) محاسبه شده و با مقادیر تحلیلی توصیه شده در مراجع SPM و Hunt، مقایسه شد [3, 25]. هندسه شماتیک مدل‌های مورد مطالعه مطابق شکل (۳) است. در تمامی این مدل‌ها، فاصله صفحه تولید موج تا سطح شیب‌دار ۱۰ متر است. به‌منظور حساسیت سنجی روی اندازه ذرات از میزان خطای ۵ درصد استفاده شده که با اعمال این میزان خطا، اندازه ذرات مناسب برای حل این مسئله ۰/۰۲ متر به‌دست می‌آید و ریزتر کردن ذرات پیشرفت شگرفی در دقت پاسخ‌ها ایجاد نکرده و تنها باعث افزایش زمان محاسباتی می-شود.

جدول ۱. مشخصات مدل‌ها و شرایط موج در محل موج‌ساز

Case No.	Water Depth (m)	Wave Height (m)	Slope	Wave Period (sec)
1	2	0.5	1:10	4
2	2	1	1:10	8
3	2	1	1:5	8
4	2	1	1:3	8
5	4	2	1:10	10
6	4	2	1:5	10
7	4	2	1:3	10

Table3. ????

شکل ۳. شکل کلی مدل‌های بالاروی

Fig. 3. General form of run-up models

برای مقایسه‌ی نتایج و تحلیل آن‌ها، کلیه پارامترها در همه مدل‌ها یکسان فرض شده‌اند. طول هموارسازی ۱/۲ برابر فاصله ذرات و عدد CFL برای محاسبه گام زمانی، ۰/۲ منظور شده است. الگوریتم انتگرال‌گیری زمانی از نوع ورلت و برای محاسبات مربوط به کرنل از تابع وندلند استفاده شده است. ماکیا و همکاران [26] دریافتند که استفاده از تابع وندلند باعث بهبود دقت نتایج می شود و از طرفی، اختلال در محدوده چرخش ذرات در رینولدهای پایین و ناپایداری در رینولدهای بالا نیز، با استفاده از تابع وندلند رفع می‌شود. در مدل‌ها از

ضریب ویسکوزیته مصنوعی بر اساس توصیه کرسپو [27] در مسئله پیشروی موج ۰/۰۱ استفاده شده است.

۵-۳ مقایسه روش پله‌ای و هموار شده

در شکل (٤) پروفیل سرعت ذرات موج، برای مدل شماره ۱ در ثانیه ۱۰ام (لحظه عبور تاج موج) و در فاصله ۲۱/٤ متری از صفحه تولید موج ارائه شده است. در این نمودار پروفیل سرعت برای مدل اصلاح‌نشده، اصلاح‌شده با روش هموارشده و اصلاح‌شده با روش پله‌ای با یکدیگر مقایسه شده است.

شکل ٤. پروفیل سرعت برای مدل‌های اصلاح شده و اصلاح نشده

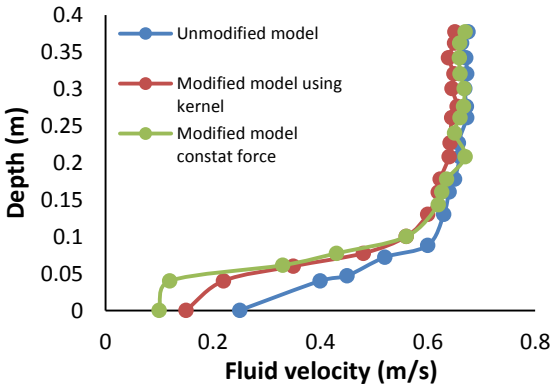


Fig. 4. Fluid velocity profile for the modified and unmodified SPH models

در مدل اصلاح‌نشده SPH ذرات نزدیک بستر سرعت بیشتری در مقایسه با مدل‌های اصلاح‌نشده دارند. با اعمال نیروی اصطکاک، سرعت ذرات در نزدیک مرز کاهش قابل توجهی می‌یابد. در اعماق کم‌تر، تاثیر نیروی اصطکاک کاهش یافته و ممنتوم موج تعیین کننده کامل الگوی جریان است. از اینرو تفاوت پروفیل‌های سرعت با فاصله گرفتن از بستر دریا کاهش می‌یابد اگرچه همچنان اختلاف جزئی بین سرعت اصلاح نشده و اصلاح شده وجود دارد. این امر نشان‌دهنده اعمال صحیح نیروی اصطکاک است که در پایان منجر به کاهش سرعت ذرات و کاهش بالاروی در مدل‌های اصلاح شده می‌شود. لازم به توضیح است که اعمال تنش بستر لزوما منجر به بهبود قابل توجه پروفیل سرعت ذرات مجاور بستر در مقایسه با مقادیر واقعی نمی‌شود زیرا برای این منظور لازم است فاصله بین ذرات بسیار کاهش یابد تا لایه مرزی و پدیده‌های مرتبط با آن قابل مدلسازی باشد. لیکن در این مطالعه، هدف انتقال این تنش به کل توده آب و تاثیر آن بر رفتار پیشروی و بالاروی موج بوده است.

بدیهی است بدون اعمال نیروی اصطکاک (روش اصلاح نشده)، مطابق انتظار مقدار بالاروی بیش از حالتی است که نیروی اصطکاک منظور شود. لیکن از آنجایی که مقدار نیروی کلی ناشی از اصطکاک بستر ثابت بوده و فقط چگونگی تقسیم آن بین ذرات متفاوت است، نتایج نشان داد که مقدار کاهش بالاروی کلی در هر دو روش اصلاح شده (روش پله‌ای و هموار شده) یکسان است، اگرچه در مجاورت بستر تفاوت سرعت وجود دارد. همانطور که در شکل (٤) مشخص است، در روش هموارشده، سرعت ذرات با شیب ملایم‌تری در مقایسه با حالت پله‌ای تغییر می‌کند که به دلیل اعمال تدریجی نیروی اصطکاک در روش هموار شده است. این شیب ملایم باعث کاهش نسبی خطا در مدل عددی و متعاقبا همگرایی مناسب‌تر آن می‌شود. از اینرو در ادامه فقط روش هموار شده با دقت بیشتری ارزیابی شده است. در شکل (٥) خروجی مدل شماره دو برای دو حالت با اعمال نیروی اصطکاک به روش هموار شده (شکل بالا) و بدون آن (شکل پایین) آورده شده است. همانطور که مشاهد می‌شود الگوی عمومی توزیع سرعت در هر دو شرایط، تشابه زیادی داشته و تنها با دقت در موقعیت مجاور بستر می‌توان به ضخیم‌تر بودن لایه تاثیر گرفته از اصطکاک بستر (با سرعت کم‌تر) در شکل بالایی پی برد. لیکن همانطور که مشاهده می‌شود، اعمال نیروی اصطکاک تاثیر قابل توجهی در پروفیل کلی موج در حال شکست و الگوی عمومی سرعت موج در این لحظه ندارد. دلیل این امر، مطابق آنچه در قسمت ۵-۱ نیز بحث شد، نیروی قابل توجه موج در هنگام شکست است. لیکن پس از شکست موج و سوار شدن موج روی بستر شیب‌دار، تاثیر نیروی اصطکاک بر مقدار بالاروی نهایی محسوس‌تر خواهد بود به گونه‌ای که در مدل اصلاح شده نیروی مقاوم در جهت انتشار موج باعث جلوگیری از پیشروی موج و نهایتا کاهش بالاروی موج می‌شود که نتایج آن در بخش‌های آتی ارائه و تحلیل شده است.

شکل ۵. خروجی مدل شماره ۲ با اعمال نیروی اصطکاک (بالا) و بدون اعمال نیروی اصطکاک (پایین)

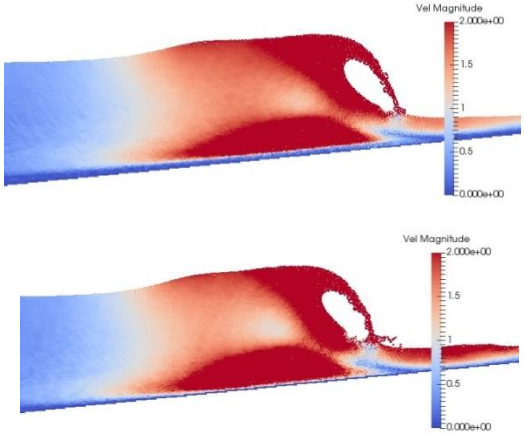


Fig. 5. Result of model case No. 2 with shear force (top) and without shear force (bottom)

۵-۴ حساسیت سنجی ضریب اصطکاک بستر

یک عامل مهم در تخمین نیروی اصطکاک بستر، پارامتر ضریب اصطکاک است. زیاد و کم شدن این مقدار پاسخ‌ها را دچار تغییر می‌کند. بنابراین انجام مطالعه روی مقدار این ضریب و اعمال نیرو به سیال امری ضروری است. بطور معمول، ضریب اصطکاک یکی از پارامترهای اصلی کالیبراسیون مدل‌های جریان است. از اینرو ابتدا سعی شده است تا با مدنظر قرار دادن مدل‌های ۱ و ۲، مقدار مناسب این ضریب در مدل عددی معرفی شده استخراج شده و با مقایسه با مقادیر تحلیلی توصیه شده، از محدوده این ضریب اطمینان حاصل شود. سپس با استفاده از ضریب به دست آمده، عملکرد مدل توسعه یافته در برآورد مقادیر بالاروی برای سایر مدل‌ها ارزیابی شود. از اینرو، در این قسمت با تغییر ضریب اصطکاک، خطای بالاروی در مدل با روابط تحلیلی مقایسه شده و با رسم نتایج در یک نمودار و برازش یک منحنی به آن‌ها، مناسب‌ترین ضریب استخراج شده است. در شکل (٦) نتایج این تحلیل برای مدل ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

مقدار محور افقی در این نمودار نشان دهنده تفاضل نتایج بالاروی حاصل از مدل عددی (R_N) نسبت به مقدار تحلیلی ارائه شده توسط مرجع SPM (R_S) به ازای استفاده از ضریب اصطکاک‌های مختلف است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای هر دوی این مدل‌ها، بهترین مقدار ضریب اصطکاک بستر در حدود ۰/۰۹ تا ۰/۱۳ است. پس، در ادامه به‌منظور یکسان‌سازی شرایط از ضریب ۰/۱۲ برای تمامی مدل‌های بالاروی استفاده شده است.

شکل ٦. خطای روگذری مدل‌های ۱ و ۲

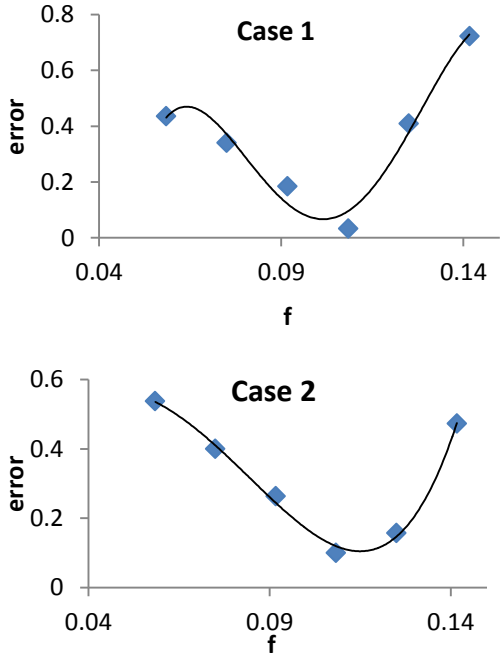


Fig. 6. overtopping error for case No. 1 and2

۵-۵ مقایسه نتایج بالاروی

مقدار بالاروی برای همه شرایط مندرج در جدول (۱) به دو روش مدل اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده محاسبه و نتایج آن در شکل (۷) در کنار مقادیر تحلیلی ارائه شده توسط مراجع SPM و Hunt ارائه شده است.

شکل ۷. میزان بالاروی مدل‌های اصلاح نشده و اصلاح شده در مقایسه با نتایج هانت و SPM

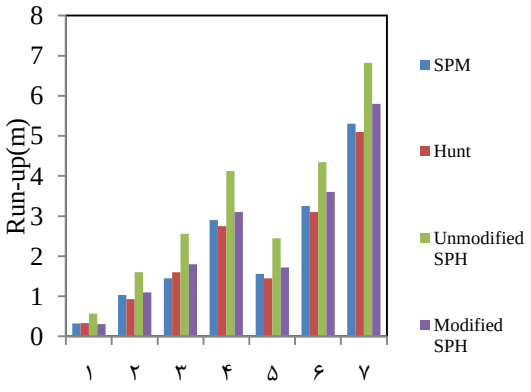


Fig. 7. Rrun-up by modified and ummodified models compared with Hunt and SPM results

لازم به توضیح است که با توجه به تساوی نیروی اصطکاک در هر دو روش اعمال اصطکاک بستر (روش پله‌ای و هموار شده)، نتایج هر دو تحت عنوان مدل اصلاح‌شده نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج، در مدل شماره یک که میزان بالاروی کم است، پاسخ مدل اصلاح‌نشده SPH در حدود دو برابر نتایج تحلیلی است که این مقدار در مدل اصلاح‌شده به حدود ۷ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین، در مدل شماره دو با اعمال نیروی اصطکاک میزان خطا از حدود ۶۰ درصد به ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است. شیب بستر در این مدل ۱:۱۰ بوده است که در مدل شماره سه با ثابت نگاه‌داشتن باقی پارامترها شیب دو برابر شده است. به‌تبع این افزایش شیب، میزان بالاروی نیز افزایش می‌یابد. در مدل سوم خطای مدل اصلاح‌نشده ۶۰ درصد بوده که با اعمال نیروی اصطکاک این میزان به حدود ۱۲ درصد کاهش یافته است. در مدل آخر که به دلیل افزایش شیب بستر بالاترین میزان بالاروی را مشاهده نمودیم، میزان خطای مدل اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده به ترتیب ۳۳ و ۱۳ درصد بوده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، اعمال نیروی اصطکاک برای مدل‌های کوچک با بالاروی کم تأثیر به سزایی بر پاسخ‌ها می‌گذارد و از طرفی خطای مدل اصلاح‌نشده بسیار بالا است به‌نحوی‌که در مدل ۱ که کمترین میزان بالاروی را داشت میزان خطای مدل اصلاح‌نشده حدود ۸۰ درصد بوده است که این میزان برای مدل ۷ که بیشترین میزان بالاروی را دارد ۳۳ درصد است. دلیل این امر، ماهیت متفاوت پدیده بالاروی در این مدل‌ها و متعاقبا عملکرد متفاوت نیروی اصطکاک در این شرایط است. به عنوان نمونه تاثیر نیروی اصطکاک اعمال شده بر ذرات مجاور بستر بر کاهش بالاروی موجی که در حال شکست است متفاوت (و البته کم‌تر) از تاثیر آن بر موجی است که شکسته شده و با لغزش روی شیب ساحل در حال بالاروی است. بدیهی است در شرایط دوم، ممنتوم کم‌تر موج و عمق کم‌تر لایه آب موجب تاثیر بیشتر نیروی اصطکاک می‌شود. از اینرو، اگرچه اعمال نیروی اصطکاک و استفاده از مدل اصلاح شده در جمیع شرایط منجر به بهبود نتایج شده است، لیکن نرخ این بهبود وابسته به شرایط هندسی بستر و همچنین مشخصات موج، متفاوت و البته همچنان شاخص خواهد بود.

شکل (۸)، نمودار پراکندگی مقادیر بالاروی مدلسازی شده را در برابر مقادیر دقیق محاسبه شده نشان می‌دهد. مطابق انتظار با اعمال نیروی اصطکاک، مقادیر بالاروی عموما کاهش و دقت نتایج افزایش یافته است. اگرچه در هر دوحالت اعمال و یا چشم‌پوشی از نیروی اصطکاک، ضریب همبستگی R^2 نزدیک عدد ۱ است (۰/۹۸۹ و ۰/۹۹۶ برای دو مدل اصلاح نشده و اصلاح شده) و لیکن مقدار خطای RMSE برای این دو حالت به ترتیب ۲/۷و ۰/۷ است که نشان دهنده اهمیت اعمال نیروی اصطکاک است.

شکل ۸. بالاروی مدل اصلاح شده و نشده در مقایسه با SPM

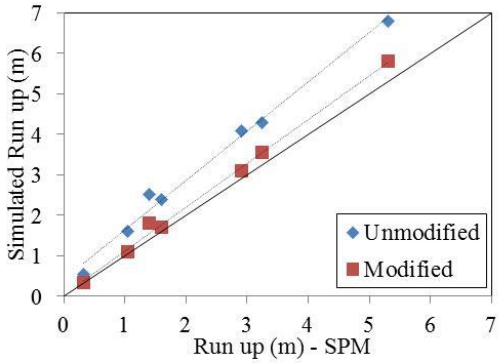


Fig. 8. computed run-up by modified and ummodified models versus SPM results

۶- تأثیر پردازش موازی بر محاسبات

۶-۱ مقایسه زمان کلی اجرا

برای مقایسه کارایی و اهمیت پردازش موازی با استفاده از ظرفیت کارت گرافیک در قیاس با استفاده از پردازنده مرکزی، مدل‌های ۱ و ۲ با سه شرایط پردازشی متفاوت شبیه‌سازی شد. دو پردازنده مرکزی ۲ هسته‌ای و ۸ هسته‌ای و همچنین کارت گرافیک با مشخصات مندرج در جدول (۲) برای این مقایسه انتخاب شد. در شکل (۹)، زمان محاسباتی لازم برای هر پردازش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت زمان‌های محاسباتی برای هر دو مدل اجرا شده تقریبا یکسان است.

جدول ۲. مشخصات سیستم مورد استفاده

CPU	Intel® core™ i7-4770k CPU@3.5GHz(8CPUs)
GPU	NVIDIA GeForceGTX 650

Table 2. Configuration of used system

شکل ۹. تاثیر استفاده از GPU بر سرعت محاسبات

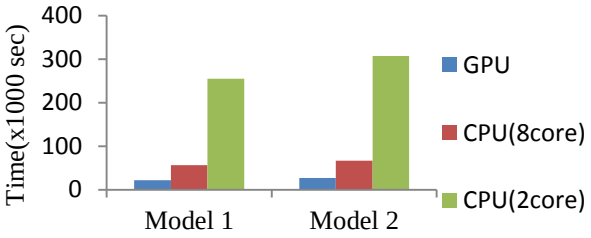


Fig. 9. Effect of using the GPU on computational speed

مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۹)، سرعت پردازش با استفاده از کارت گرافیک GTX 650 نسبت به پردازنده مرکزی هشت هسته‌ای در حدود ۲/۵ برابر است. در مدل ۱ که تعداد ذرات ۹۸ هزار و زمان شبیه‌سازی ۳۰ ثانیه بوده است، زمان محاسباتی با استفاده از GPU، ٦ ساعت و ۸ دقیقه بوده است در حالی‌که این زمان برای پردازنده مرکزی نزدیک به ۱۵ ساعت بوده است. همچنین میزان افزایش سرعت محاسبات برای GPU در مقایسه با پردازنده مرکزی دو هسته‌ای ۱۲ برابر بوده است. اگرچه در مدل‌های کوچک شاید بتوان با استفاده از پردازنده مرکزی مدل‌ها را اجرا کرد ولی برای مدل‌های بزرگ‌تر استفاده از ظرفیت کارت گرافیک ضروری است. لازم به توضیح است که مقایسه انجام شده مربوط به مدل‌هایی با شرایط یکسان از نظر گام زمانی و تعداد ذره بوده و بدیهی است با تغییر این مشخصات و همچنین مشخصات جریان، نسبت‌های به‌دست آمده ممکن است تغییراتی داشته باشد.

۶-۲ مقایسه گام‌های روش SPH

برای ارزیابی دقیق‌تر استفاده از پردازنده مرکزی و کارت گرافیک، زمان محاسباتی لازم برای هر مرحله به تفکیک برای مدل‌های ۱ و ۲ محاسبه شد که نتایج آن به ترتیب برای پردازنده مرکزی در شکل (۱۰) و برای پردازش موازی در شکل (۱۱) ارائه شده است. مراحل انتخاب شده شامل جستجوی ذرات همسایه، محاسبه نیروها و به‌روز رسانی مشخصات ذرات است.

همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه هزینه محاسباتی در هر دو شرایط مربوط به مرحله محاسبه نیروها است به گونه‌ای که در شرایط استفاده از پردازنده مرکزی و کارت گرافیک به ترتیب حدود ۹۷ و ۸۲ درصد زمان محاسباتی به این مرحله اختصاص دارد. در شرایط استفاده از پردازنده مرکزی ۸ هسته‌ای، به‌روزرسانی سیستم کمتر از ۱٪ و تهیه لیست همسایه‌ها حدود ۲ درصد هزینه محاسباتی کل را دارد در صورتی‌که برای شرایط استفاده از پردازش موازی، این مقادیر به ترتیب حدود ۵ و ۱۰ درصد است. دلیل افزایش درصد زمان اختصاص‌یافته به گام‌های به‌روزرسانی و لیست همسایه‌ها در شرایط استفاده از ظرفیت کارت گرافیک، اختصاص زمان کم‌تر به مرحله محاسبه نیروها است که البته با توجه به اهمیت این مرحله، هزینه کلی محاسبات نیز با استفاده از قابلیت پردازش موازی کاهش قابل ملاحظه‌ای با زمان محاسباتی پردازنده مرکزی دارد.

شکل ۱۰. درصد زمان مراحل محاسباتی با استفاده از CPU

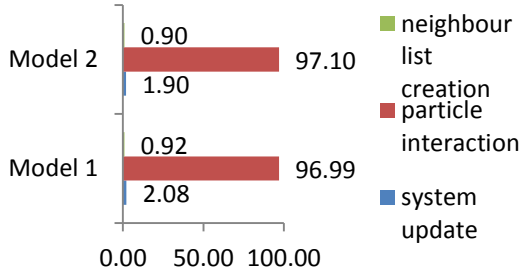


Fig.10. Computational runtime distribution on CPU

شکل ۱۱. درصد زمان مراحل محاسباتی با استفاده از CPU

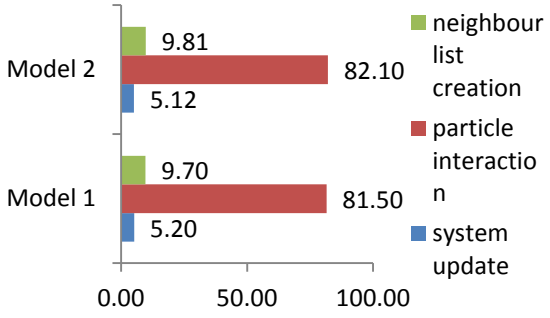


Fig. 11. Computational runtime distribution on GPU

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو روش پله‌ای و هموارشده برای اعمال نیروی اصطکاک بستر در مدل عددی SPH معرفی شد. نتایج نشان داد که اعمال این نیرو از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند باعث کاهش قابل توجه خطا در پاسخ‌ها و هماهنگی بیشتر آن‌ها با واقعیت شود. اگرچه به دلیل تساوی مقدار نیروی

اصطکاک، نتیجه بالاروی موج در هر دو مدل معرفی شده یکسان است، در روش هموارشده تغییرات سرعت ذرات سیال در مجاورت مرز به شکل تدریجی‌تر و هموارتر رخ می‌دهد که هماهنگی بیشتری با فیزیک پدیده داشته و از طرفی ناپایداری‌های عددی احتمالی را نسبت به روش پله‌ای کاهش می‌دهد.

نتایج نشان داد که میزان بهبود پاسخ مدل اصلاح شده تابعی از شرایط هندسی و مشخصات موج است به گونه‌ای که در شرایطی که ممنتوم موج غالب بوده و شرایط شکست موج حاکم بر پدیده بالاروی است، میزان تاثیر اصطکاک بستر بطور نسبی کاهش می‌یابد. حتی در این شرایط نیز، میزان خطای بالاروی با اصلاح مدل از حدود ٤٠ درصد به ٧ درصد کاهش یافته است. از طرف دیگر، در شرایط موج آرام، خطای ٩٠ درصدی مدل اصلاح‌نشده تا حدود ٦ درصد کاهش دارد که اگرچه مقدار قابل توجهی است، گاهی به دلیل مقدار کم بالاروی نیز است.

با استفاده از پردازش موازی با ظرفیت کارت گرافیک مشاهده شد که میزان افزایش سرعت محاسبات روی GPU در مقایسه با CPU دو هسته‌ای در حدود ١٢ و این افزایش در مقایسه با CPU هشت هسته‌ای حدود ٢,٥ برابر است که بیشینه زمان محاسباتی مربوط به مرحله محاسبه نیروهای بین ذرات است.

٨- مراجع Refrences

1.Hunt, I.A., *Design of sea-walls and breakwaters.* Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1959. **126**(4): p. 542-570.

2.Battjes, J.A., *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves.* 1974.

3.Hu, K., C.G. Mingham, and D.M. Causon, *Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations.* Coastal Engineering, 2000. **41**(4): p. 433-465.

4.Stansby, P.K., *Solitary wave run up and overtopping by a semi-implicit finite-volume shallow-water Boussinesq model.* Journal of Hydraulic Research, 2003. **41**(6): p. 639-647.

5.Stansby, P.K. and T. Feng, *Surf zone wave overtopping a trapezoidal structure: 1-D modelling and PIV comparison.* Coastal Engineering, 2004. **51**(5): p. 483-500.

6.Shiach, J.B., et al., *The applicability of the shallow water equations for modelling violent wave overtopping.* Coastal Engineering, 2004. **51**(1): p. 1-15.

7.Monaghan, J.J., *Simulating free surface flows with SPH.* Journal of computational physics, 1994. **110**(2): p. 399-406.

8.Lo, E.Y. and S. Shao, *Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method.* Applied Ocean Research, 2002. **24**(5): p. 275-286.

9.Rogers, B.D., R.A. Dalrymple, and P.K. Stansby, *Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH.* Journal of Hydraulic Research, 2010. **48**(S1): p. 135-141.

10.Didier, E., et al., *Wave interaction with a vertical wall: SPH numerical and experimental modeling.* Ocean Engineering, 2014. **88**: p. 330-341.

11.Shao, S., *Incompressible SPH simulation of wave breaking and overtopping with turbulence modelling.* International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006. **50**(5): p. 597-621.

12.Shao, S., et al., *Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model.* Coastal Engineering, 2006. **53**(9): p. 723-735.

13.Shadloo, M.S., et al., *Numerical simulation of long wave runup for breaking and nonbreaking waves.* International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2015. **25**(01): p. 1-7.

14. Jafari-Nodoushan, E., Hosseini, K., Shakibaeinia, A. & Mousavi, S. F. 2016, Meshless particle modelling of free surface flow over spillways. Journal of Hydroinformatics 18 (2), 354–370

15. Verbrugghe T., Vasiliki Stratigaki ., 2019, Implementation of Open Boundaries within a Two-Way Coupled SPH Model to Simulate Nonlinear Wave–Structure Interactions, 12(4), 697; doi:10.3390/en12040697

16.Kolb, A. and N. Cuntz. *Dynamic particle coupling for GPU-based fluid simulation*. in *Proc. Symposium on Simulation Technique*. 2005.

17.Harada, T., S. Koshizuka, and Y. Kawaguchi. *Smoothed particle hydrodynamics on GPUs*. in *Computer Graphics International*. 2007. SBC Petropolis.

18.Mokos, A., et al., *Multi-phase SPH modelling of violent hydrodynamics on GPUs.* Computer Physics Communications, 2015. **196**: p. 304-316.

19.Wendland, H., *Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree.* Advances in computational Mathematics, 1995. **4**(1): p. 389-396.

20.Dalrymple, R.A. and O. Knio. *SPH modelling of water waves*. in *Coastal Dynamics' 01*. 2001.

21.Domínguez, J.M., et al., *Neighbour lists in smoothed particle hydrodynamics.* International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011. **67**(12): p. 2026-2042.

22.Crespo, A.C., et al., *GPUs, a new tool of acceleration in CFD: efficiency and reliability on smoothed particle hydrodynamics methods.* PloS one, 2011. **6**(6): p. e20685.

23.Crespo, A., et al., *User Guide for DualSPHysics*

code. University of Vigo. The University of Manchester and Johns Hopkins University, 2011.
24.Johnson, H.K. and H.J.J.o.p.o. Kofoed-Hansen, *Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling.* 2000. **30**(7): p. 1743-1756.
25.Kobayashi, N. and A. Wurjanto, *Wave overtopping on coastal structures.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1989. **115**(2): p. 235-251.
26.Macia Lang, F., et al., *Benefits of using a Wendland kernel for free-surface flows.* 2011.
27.Altomare, C., et al., *Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics.* Computers & Structures, 2014. **130**: p. 34-45.

Improving Boundary Condition in Wave Run-up Simulation using SPH-GPU

Ali Sasani Babak[1], Hassan Akbari[2*]

1-M.Sc of Marine and Coastal Engineering, Faculty of Civil Eng., Tarbiat Modares University
2-Assistant Prof., Marine and Coastal Engineering, Faculty of Civil Eng., Tarbiat Modares University

*** Akbari.h@modares.ac.ir**

Abstract:

Wave run up elevations and wave overtopping rate are two important parameters in design of coastal structures specially in definition of their crest elevation. Wave run up in contribution with wave breaking generates local turbulences as well as large deformations around free surface profile. Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) method as a powerful Lagrangian method in modeling free surface flows is based on particle methods and can be used for modeling large deformation of surface boundary. This model has been modified via considering bed friction force and it is applied in this study to evaluate wave run up values. Two modifications i.e. stepped and smoothed approaches are introduced to implement bed shear stress in weakly compressible SPH models. Dam break flow and wave run up over different beach slopes are modeled and the results are compared with experimental and analytical data. It is concluded that considering the bed friction force is less important in dam break flows than in wave run up models that neglecting bed shear stress as a common practice in SPH methods can generate significant errors. These errors can be diminished efficiently by means of the introduced methods. The improvement rate, however, depends on slope geometry as well as wave condition and it is more sensible in simulating sliding waves over bed slope during run up phenomenon than breaking waves with considerable wave momentum. In the latter case, the wave momentum dominates the process and the bed friction force is not able to resist against the wave force and the the wave profile is consequently less dependednt on the bed friction value. By the way, the reslts have been yet improved and 40% error has been decreased to 7% in this case. In the former case with the limited wave run up values, however, the improvement is more noticeable and 90% error of the unmodified methods has been decreased to 6% using the modified SPH method. The results show that the wave run up will be modified using the bed friction force. Meanwhile, both the introduced method i.e. smoothed and stepped exertion of bed friction forces, results in nearly same wave profile because the total force is equal in both schemes. The only difference is the distribution pattern of the force between particles located near the friction boundary that leads to different distribution of particle velocities. Smoother velocity profile can be resulted in case of using transitional application of bed shear force which is moe comtaible with the natue while the stepped insertion of bed friction force may lead to numerical errors too. In spite of better result of the smoothed method, the implementation of the stepped method is easier and needs less numerical efforts. In addition, parallel processing using graphical processing units (GPU) are utilized to increase the efficiency of the modified model. The efficiency of GPU in comparison with CPU is evaluated and computational costs of different numerical steps are analyzed. It is observed that calculation of forces is the main time consuming step and using GPU can speed up the modified model significantly.

Keywords: Boundary condition, Bed Roughness, Wave Runup, Parallel processing