

روش شبیه‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و کاربردهای آن در هوافضا

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) یک روش عددی بدون شبکه نسبتاً جدید است که در چند دهه گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روش SPH در مقایسه با روش‌های متداول دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر شبکه، دارای برخی مزایای خاص در مدل‌سازی جریان‌های چندفازی و فیزیک‌های پیچیده است. SPH در واقع همچنان یک روش CFD در حال توسعه است. در این مطالعه سعی شده است که نحوه تکامل SPH، مزایا، معایب، مراحل به‌کارگیری و کاربردهای صنعتی (با تأکید بیشتر بر روی کاربردهای هوافضا) مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، هیدرودینامیک ذرات هموار، روش‌های بدون شبکه

یاسر جعفری*، دانشجوی دکتری،
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی
شریف

*نویسنده مخاطب، آدرس تهران، کد پستی:
۸۶۳۹/۱۱۳۶۵

jafariyaser@ae.sharif.ir

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Simulation and its Applications in Aerospace

Smoothed particle hydrodynamics (SPH) is a relatively new meshless numerical method which is highly noticed during the last few decades. In comparison to the conventional grid-based computational fluid dynamics (CFD) methods, SPH has some unique advantages when it comes to modeling multiphase flows and complex physics. SPH is a promising CFD method, but it is still in progress. This study deals with the evolution procedure of SPH, its pros and cons using steps, and its applications specially in the aerospace field.

Keywords: Numerical Simulation, Smoothed Particle Hydrodynamics, Meshless Numerical Method

Y. Jafari^{1*}, PhD Student,
Department of Aerospace
Engineering, Sharif University of
Technology

*Corresponding Author, Postal
Code: 8639/11365, Tehran, IRAN
jafariyaser@ae.sharif.ir

مقدمه

د- حل‌های عددی باید بتوانند متغیرهای بقایی را حفظ کند، به‌خصوص در مواردی که مرز مشترک بین مواد تغییر شکل‌های پیچیده‌ای مانند تکه تکه شدن و دوباره اتصال پیدا کردن دارند و در نهایت، ه- این روش‌ها باید به‌راحتی قابل توسعه برای پدیده‌های چندفیزیکی پیچیده باشند. بنابراین، یک متدولوژی خوب باید خود را برای مدل‌سازی سه بعدی و با راندمان بالا در محاسبات موازی به منظور به‌کارگیری در مقیاس واقعی برای مسائل صنعتی پیچیده در یک زمان قابل قبول آماده کند. در این زمینه، روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ یا به اختصار SPH یک روش نسبتاً جدید است که در مسائل صنعتی کمی به‌کار گرفته شده است. این عدم استقبال به دلیل بالا بودن هزینه محاسباتی که برای یک دقتی که به تازگی تا سطح رضایت‌بخشی به منظور استفاده از این روش در کاربردهای واقعی زندگی افزایش یافته است. در واقع کاربردهای مخاطب این روش از لحاظ فیزیکی و یا هندسی پیچیده‌اند. بنابراین، با امکانات سخت افزاری محدود قابل دسترس نیستند.

در این مقاله، ابتدا یک دسته‌بندی برای روش‌های عددی از دیدگاه‌های مختلف و جایگاه روش SPH در این دسته‌بندی‌ها بیان می‌شود. سپس، ابداع، ویژگی‌ها و توسعه روش SPH به‌طور خلاصه معرفی می‌شود. بعد از آن خلاصه‌ای از مدل عددی SPH گفته می‌شود. در نهایت بعد از مطرح کردن کاربردهای SPH و به‌طور خاص کاربردهای آن در هوافضا و جمع‌بندی برای مطالب ارائه شده بیان خواهد شد.

دسته‌بندی روش‌های عددی از دیدگاه‌های مختلف

روش‌های عددی در حل مسائل به‌خصوص در جریان‌های سیال از لحاظ به‌کارگیری دستگاه مختصات می‌توانند به سه دسته مختلف تقسیم شوند که عبارتند از: اولیری، لاگرانژی و اولیری-لاگرانژی. در روش‌های اولیری به‌طور کلی یک سیستم مختصات مرجع به‌کار گرفته می‌شود که خواص فیزیکی از یک سلول به سلولی دیگر انتقال می‌یابد. در روش لاگرانژی برخلاف روش اولیری سیستم مختصات متحرک به‌کار گرفته می‌شود که در آن المان‌های فاز می‌تواند با سلول‌های عددی یا ذرات نشان داده شوند و المان‌ها با حرکت سیستم مختصات خود نیز حرکت می‌کنند. به زبان ساده‌تر می‌توان گفت در فرمول‌بندی لاگرانژی، حرکت اجزا در میدان محاسباتی ردگیری می‌شود، در حالی‌که در فرمول‌بندی اولیری، ذرات از شبکه محاسباتی ثابت عبور می‌کنند. شکل (۱) تفاوت این دو دیدگاه را نشان می‌دهد [۱].

برای حل مسائل صنعتی و کاربردی مختلف و به‌خصوص مربوط به زمینه دینامیک سیالات، ۳ روش کلی وجود دارد که عبارتند از: آزمایشگاهی، تئوری و عددی. روش‌های آزمایشگاهی از نشان دادن واقعیت بهره می‌برند و معمولاً به‌عنوان مرجع اصلی استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، این روش‌ها با برخی محدودیت‌ها مواجه هستند که از جمله می‌توان به مشکلات مقیاس‌بندی (وقتی آزمایش در مقیاس مدل انجام می‌گیرد)، مشکلات اندازه‌گیری (یکی از عوامل ایجاد خطا نسبت به مسئله واقعی) و هزینه‌های صرف شده برای رفع محدودیت مربوط به توسعه پیکره‌بندی‌ها اشاره کرد. نواقص و کمبودهای روش‌های آزمایشگاهی هنگامی بیشتر خود را نشان می‌دهند که با وضعیت‌های پیچیده چندفیزیکی که مشکلاتی مانند تشخیص سخت اعداد بدون بعد، تنظیمات آزمایش، مقیاس‌بندی و اندازه‌گیری‌های دقیق را به همراه خود دارند، روبه‌رو می‌شود. در مورد روش‌های تئوری می‌توان گفت که این روش‌ها به فیزیک‌ها و پیکره‌بندی‌های ساده برای ارائه راه حل‌های دقیق ایده‌آل به عنوان محدود می‌شوند. روش‌های عددی نیز بسته به زمان خود از محدودیت‌هایی که مهمترین آنها، ضعف امکانات سخت‌افزاری بود، رنج می‌برند. اما از این بین، روش عددی تنها روشی است که روال تدریجی توسعه و تکامل خود را حفظ کرده و روز به روز در حال پیشرفت و رفع نواقص خود است [۱]. با ظهور سخت‌افزارهای محاسباتی، مدل‌سازی عددی جریان‌های چندفیزیکی پیچیده به سرعت در حال رشد است و در حال حاضر این ابزار بر روی بعضی از مسائل صنعتی به‌طور عملی رایج شده‌اند. به‌طوری‌که، ابزارهای شبیه‌سازی در این زمینه به اندازه کافی معتبر هستند که قابل اطمینان به نظر برسند. با این وجود، شایستگی، کارایی، بهره‌وری و دقت یک ابزار عددی مشخص به‌طور مستقیم به روش‌های عددی موجود در آن بستگی دارد و هیچ ابزار جامعی وجود ندارد. اما، تنوع روش‌ها در طول زمان افزایش می‌یابد و هر روش بهترین کاربرد ممکن را پیدا می‌کند. در حال حاضر، مسائل پیچیده‌تری را می‌توان با روش‌های عددی حل کرد.

رفع دقیق نواقص و مشکلات مربوط به مدل‌سازی عددی سیستم‌های جریان سیال جهت تعیین موفقیت کل روش برای مسائل واقعی و صنعتی امری ضروری است. الزامات این موارد عبارتند از: الف- این روش‌ها باید بتواند انواع مختلف را مدل کند، ب- رهیافت‌های عددی باید به این انواع مختلف مدل‌سازی‌ها به‌درستی و به‌طور مؤثر متصل شود، ج- روش‌های عددی باید بتواند به‌طور دقیق شرایط پیوستگی یا ناپیوستگی فیزیکی را در مرز مشترک بین محیط‌های مختلف را مدل کند،

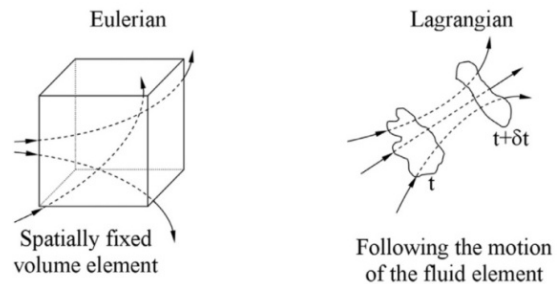
1. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

دو دسته مبتنی بر شبکه و بدون شبکه تقسیم کرد. این دسته‌بندی ارتباطی با اویلری، لاگرانژی یا اویلری-لاگرانژی بودن روش عددی موردنظر ندارد. برای مثال روش شبکه بولتزمن یک روش با دیدگاه لاگرانژی است که به ظاهر از شبکه با مفاهیم اویلری و حتی در مواردی از رهیافت‌های موجود در روش‌های تفاضل محدود که یک روش اویلری است، بهره می‌برد [۳]. از طرفی دیگر، در مسائلی از قبیل بالچه متحرک با وجود استفاده از روش‌های اویلری مانند روش حجم محدود برای شبیه‌سازی، به‌کارگیری شبکه متحرک در واقع نوعی برداشت از دیدگاه لاگرانژی را به‌همراه دارد [۴].

روش‌های عددی متداول مبتنی بر شبکه

شبیه‌سازی کامپیوتری به عنوان یک ابزار مهم برای حل مسائل علمی و پیچیده در مهندسی و علوم گسترش یافته است. این شبیه‌سازی‌ها نقش مهمی را در آزمایش و بررسی تئوری‌ها، ارائه دید برای فیزیک‌های پیچیده و کمک به تفسیر و حتی کشف پدیده‌های جدید بازی می‌کند. روش‌های عددی مبتنی بر شبکه مانند روش‌های تفاضل محدود^۲، روش‌های حجم محدود^۳ و روش‌های المان محدود^۴ در محدوده وسیعی از دینامیک سیالات و مکانیک جامدات محاسباتی کاربرد دارد. این روش‌ها برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی (ODEs) و جزئی (PDEs) حاکم بر پدیده‌های فیزیکی بسیار مفید هستند. برای قرن‌ها، FDM به عنوان ابزار اصلی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی تعریف شده در مسائل با هندسه ساده مورد استفاده قرار گرفته است. برای چندین دهه، زمینه FVM در حل مسائل جریان سیال و FEM برای مسائل مکانیک جامدات با هندسه پیچیده نقش اساسی را بازی کرده است [۵-۷]. یک ویژگی قابل توجه روش‌های عددی مبتنی بر شبکه تقسیم یک دامنه پیوسته به زیر دامنه‌های گسسته است که به اصطلاح گسسته‌سازی یا شبکه بندی نامیده می‌شود. نقاط شبکه منحصر به فرد (یا گره‌ها) از طریق یک نقشه از پیش تعیین شده که به اصطلاح شبکه یا مش گفته می‌شود، بهم متصل می‌شوند. نتیجه شبکه‌بندی در FEM، FVM و FDM به ترتیب المان‌ها، سلول‌ها و شبکه‌هاست. بنابراین، لازم است یک سیستم شبکه یا مش شامل گره‌ها، سلول‌ها یا المان‌ها برای فراهم کردن ارتباط بین گره‌ها قبل از فرآیند تقریب برای معادلات دیفرانسیل معمولی یا جزئی تعریف می‌شود. براساس یک شبکه از پیش تعریف شده، معادلات حاکم می‌توانند به یک مجموعه معادلات جبری با مقادیر مجهول متغیرهای میدانی در نقاط گره تبدیل

در این بین، ترکیب اویلری-لاگرانژی روش‌هایی هستند که هر دو مفهوم اویلری و لاگرانژی را در نظر می‌گیرند. برای درک بهتر تفاوت این دیدگاه‌ها می‌توان مسئله شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی سیال را مثال زد. برای انجام این شبیه‌سازی در توصیف اویلری که یک توصیف مکانی می‌باشد، شبکه‌بندی جریان را در فضا به صورت ثابت در نظر گرفته و معادلات بر روی آن گسسته‌سازی می‌شود. تعیین سطح تقابل فازهای متفاوت با استفاده از مدل‌های اضافی ردیابی سطح صورت می‌پذیرد. در مقابل توصیف لاگرانژی که یک توصیف مادی است، که از یک شبکه متحرک برای توصیف جریان استفاده می‌کند و متغیرها فقط نسبت به زمان تغییر می‌کنند. ماهیت لاگرانژی این روش‌ها به‌طور طبیعی سطح تقابل فازهای متفاوت را ردیابی می‌کند و نیازی برای استفاده از مدلی اضافه برای تعیین محل مرز بین فازها وجود ندارد. در جدول (۱) مقایسه بین روش‌های با ماهیت اویلری و لاگرانژی صورت گرفته است [۲].



شکل ۱- تفاوت دیدگاه اویلری و لاگرانژی [۱]

جدول ۱- مقایسه بین روش‌های با ماهیت اویلری و لاگرانژی [۲]

| مورد مقایسه | روش‌های لاگرانژی | روش‌های اویلری |
|---------------------------|---|--|
| شبکه | متصل شده به جسم متحرک | ثابت در فضا |
| ردیابی | حرکت هر نقطه از جسم | شار جرمی، مومنتم و انرژی در بین نقاط شبکه و مرز سلول‌ها |
| تاریخچه زمانی | آسان برای رسیدن به اطلاعات تاریخچه زمانی در یک نقطه متصل به جسم | سخت برای رسیدن به اطلاعات تاریخچه زمانی در یک نقطه متصل به جسم |
| مرز مشترک و مرز متحرک | ردیابی آسان | ردیابی دشوار |
| هندسه‌های نامنظم | مدل‌سازی آسان برای دقت‌های بالا | مدل‌سازی دشوار مخصوصاً برای دقت‌های بالا |
| محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ | به‌کارگیری دشوار | به‌کارگیری آسان |

نوع دیگری از طبقه‌بندی روش‌های عددی به استفاده از شبکه برمی‌گردد. بر این اساس می‌توان روش‌های عددی را به

2. Finite Difference Methods (FDM)
3. Finite Volume Methods (FVM)
4. Finite Element Methods (FEM)

شوند. تاکنون روش‌های عددی مبتنی بر شبکه قابل‌توجهی به‌دست آمده‌اند و در حال حاضر روش‌های غالب در شبیه‌سازی‌های عددی برای حل مسائل عملی در مهندسی و علم به حساب می‌آیند [۵-۹].

به‌رغم موفقیت‌های بسیار روش‌های عددی مبتنی بر شبکه در برخی جنبه‌ها دارای مشکلاتی هستند که کاربرد آنها را در تعداد زیادی از مسائل پیچیده محدود می‌کند. مشکلات عمده به دلیل استفاده از شبکه پیش می‌آید. به طوری که، در استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه همیشه باید از شرایط سازگاری عددی همانند شرایط سازگاری فیزیکی برای یک محیط پیوسته اطمینان حاصل شود. از این‌رو، استفاده از شبکه می‌تواند منجر به مشکلات مختلفی در برخورد با مسائلی شامل سطح آزاد، مرز قابل تغییر شکل، مرز مشترک متحرک و تغییر شکل‌های به‌شدت بزرگ و انتشار ترک شود. علاوه بر این، تولید یک شبکه با کیفیت برای مسائل با هندسه پیچیده به یک روند دشوار، وقت‌گیر و پرهزینه تبدیل شده است.

در روش‌های عددی مبتنی بر شبکه، تولید شبکه برای دامنه حل یک پیش شرط برای شبیه‌سازی عددی است. برای روش‌های شبکه اویلرین FDM، ساخت یک شبکه منظم برای هندسه نامنظم یا پیچیده هرگز کار ساده‌ای نیست و معمولاً نیاز به تبدیلات پیچیده ریاضی اضافی که می‌تواند حتی از حل خود مسئله گران‌تر باشد، دارد. همچنین، تعیین محل دقیق ناهمگنی، سطوح آزاد، مرز با قابلیت تغییر شکل و مرزهای مشترک متحرک درون چارچوب شبکه اویلرین کار دشواری است. از طرفی، روش‌های اویلرین برای مسائلی که نیاز به نمایش دادن خواص مواد در حجم ثابت دارند، مانند جریان‌های دارای ذرات مناسب نیست [۲، ۵، ۶]. برای روش‌های شبکه لاگرانژی مانند برخی کاربردهای FEM، تولید شبکه برای جامدات و ساختارها ضروری است و معمولاً بخش چشمگیری از تلاش محاسباتی را دربرمی‌گیرد. رفتار تغییر شکل‌های به‌شدت بزرگ یک مشکل مهم پیش روی روش مبتنی بر شبکه لانگراژین است. رفع این مشکل معمولاً نیاز به تکنیک‌های خاص مانند تعیین دوباره شبکه یا به اصطلاح ریزنینگ^۵ دارد. با این وجود، این تکنیک‌ها خسته‌کننده و زمان‌بر هستند و ممکن است باعث تولید عدم دقت بیشتر شوند [۷، ۱۰].

مشکلات و محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه به‌خصوص در هنگام شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیک شبیه انفجار^۶ و ضربه با سرعت بالا^۷ آشکار می‌شود. در کل فرآیند انفجار، ویژگی‌های خاصی نظیر تغییر شکل‌های بزرگ،

ناهمگونی‌های بزرگ، مرزهای مشترک متحرک مواد، مرزهای با قابلیت تغییر شکل و سطح آزاد وجود دارد. این جنبه‌های خاص موجب ظهور چالش‌های بزرگ برای شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه شده است. مسائل ضربه با سرعت بالا شامل پخش امواج شوک از طریق برخورد و یا ضربه‌های وارده به بدنه که مانند سیالات رفتار می‌کنند، می‌شود. از لحاظ تحلیل، معادلات حرکت و یک معادله فشار بالای حالت، توصیف کلیدی از رفتار ماده است. همچنین، تغییر شکل‌های بزرگ، مرزهای مشترک متحرک مواد، مرزهای با قابلیت تغییر شکل و سطح آزاد در پدیده HVI نیز وجود دارد. از این‌رو، برای روش‌های مبتنی بر شبکه از عهده شبیه‌سازی پدیده HVI بر آمدن نیز بسیار دشوار است [۱۱].

روش‌های عددی مبتنی بر شبکه در مواردی که نگرانی اصلی به‌کارگیری یک مجموعه ذرات فیزیکی گسسته به‌جای یک محیط پیوسته برای شبیه‌سازی باشد، مناسب نیستند. مثال‌های در این زمینه شامل اندرکنش ستارگان در فیزیک نجومی، حرکت میلیون‌ها اتم در حالت تعادلی یا غیرتعادلی، رفتار پویای مولکول‌های پروتئین و غیره می‌شود. شبیه‌سازی این‌گونه سیستم‌های گسسته با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه اغلب انتخاب خوبی به حساب نمی‌آید [۱۲، ۱۳].

روش‌های بدون شبکه

تحقیقات جدید بر روی گسترش نسل محاسباتی دیگری به نام روش‌های بدون شبکه متمرکز شده و انتظار می‌رود که این روش‌ها نسبت به روش‌های مرسوم دارای شبکه در وضعیت بهتری قرار گیرند. مهم‌ترین ایده روش‌های بدون شبکه، بدست آوردن حل دقیق و پایدار عددی از معادلات انتگرالی دیفرانسیل جزئی بدون محدودیت شرایط مرزی و با استفاده از یک سری نقاط اختیاری و بدون استفاده از شبکه می‌باشد. این روش‌ها هنوز در مراحل ابتدایی پیشرفت قرار دارند تا بتوانند به‌عنوان یک ابزار مناسب در حل مسائل پیچیده مهندسی به صورت کاربردی و تجاری مدنظر قرار گیرند. در این روش‌ها هیچ‌گونه المان‌بندی از پیش تعیین شده‌ای برای حل مسئله وجود ندارد و از یک سری نقاط پراکنده که می‌توانند ثابت یا متحرک باشند، در دامنه حل و مرزها به منظور بیان آن‌ها استفاده می‌شود. به روش بدون شبکه لاگرانژی، «روش ذرات»^۸ نیز گفته می‌شود. ایجاد روش‌های بدون شبکه به ۷۰ سال پیش و به روش هم‌مکانی^۹ باز می‌گردد [۱۴]. در این روش نیز دیدگاه‌های اویلری و لاگرانژی (ذرات) در شبکه‌بندی و حل معادلات دنبال

8. Particle Methods
9. Collocation

5. Rezoning or Remeshing
6. Explosion
7. High Velocity Impact (HVI)

مثال دینامیک مولکولی^{۱۳}، روش‌های مزوسکوپی^{۱۴} (به‌طور مثال دینامیک ذرات اتلافی^{۱۵}) و روش‌های ماکروسکوپی^{۱۶} (به‌طور مثال ذرات در سلول^{۱۷}، حرکت ذرات نیمه ضمنی^{۱۸} و هیدرودینامیک ذرات هموار) طبقه‌بندی می‌شوند. از دیدگاه مدل‌های ریاضی، روش‌های بدون شبکه به دو دسته روش‌های قطعی^{۱۹} و احتمالی^{۲۰} طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های احتمالی (نظیر دینامیک مولکولی مونت کارلو^{۲۱}) به‌طور ذاتی دارای طبیعت احتمالاتی بوده و بر پایه قواعد آماری می‌باشند [۱۶]. از طرف دیگر، روش‌های قطعی بر پایه معادلات ریاضی حاکم بر پدیده‌های فیزیکی می‌باشند. روش‌های عددی حرکت ذرات نیمه ضمنی و هیدرودینامیک ذرات هموار از کارآمدترین روش‌های قطعی در دیدگاه لاگرانژی برای شبیه‌سازی حرکت سیال می‌باشند. تاریخچه، توسعه، تئوری و کاربردهای اصلی روش‌های بدون شبکه موجود در برخی پژوهش‌ها و مقالات مروری بررسی شده است. برای فهم جزئیات بیشتر از روش‌های بدون شبکه می‌توان به این منابع رجوع کرد. برای جلوگیری از انحراف از موضوع اصلی مقاله حاضر، در ادامه از بحث راجع به این روش‌ها خودداری خواهد شد.

به‌طور کلی روش‌های عددی بدون شبکه و بر پایه دیدگاه لاگرانژی دارای مشکلاتی به شرح زیر می‌باشد:

- نوسانات فشار غیر قابل اجتناب در این روش وجود دارد، مگر اینکه یک سری اصلاحات مناسب در این روش معرفی شود [۱۵].
- در این روش بقاء کامل بعضی از اصول فیزیکی نظیر مومنتم و انرژی مکانیکی ممکن است به‌طور دقیق حفظ نشود، و برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۷، ۱۸].
- با توجه به اینکه برای محاسبه اندازه گام زمانی که پایداری حل را تضمین کند، از حداکثر سرعت موجود در میدان حل استفاده می‌شود که خصوصاً در روش تراکم‌پذیر ضعیف می‌بایست بیش از ۱۰ برابر کوچکتر از سرعت صوت باشد، که این موضوع باعث می‌شود که اندازه گام زمانی محدود شود و هزینه‌های محاسباتی افزایش یابد [۱۹].

می‌شود. دیدگاه‌های مختلف حل معادلات ناویر-استوکس بر پایه روش‌های بدون شبکه در جدول (۲) بیان شده است [۱۵].

جدول ۲- حل معادلات ناویر-استوکس بر پایه روش‌های بدون شبکه [۱۵]

| دیدگاه | توصیف خصوصیات فیزیکی | حرکت نقاط محاسبه‌گر | مثال |
|------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
| لاگرانژی | ذرات | متحرک | هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) |
| اویلری | نقاط ^{۱۰} | ثابت | Gridless Petrov-Galerkin |
| لاگرانژی+ اویلری | میدان محلی اطراف هر ذره | متحرک | MPS-MAFL |

در روش لاگرانژی از تعداد محدودی از ذرات^{۱۱} برای بیان دامنه حل استفاده می‌شود. در مکانیک سیالات عددی از ذرات برای بیان سیال و حرکت آن استفاده می‌شود. هر ذره یک سری از داده‌های میدانی نظیر جرم، مومنتم، موقعیت و غیره را داراست. سیستم معادلات حاکمه معمولاً معادلات بقاء جرم و مومنتم هستند که بر روی ذرات دارای حرکت گسسته‌سازی می‌شوند. روش ذرات دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های شناخته شده مبتنی بر شبکه است که در ادامه خلاصه‌ای از آن‌ها بیان شده است [۱۶]:

- در این روش سیال پیوسته به یک سری از ذرات بدون اتصالات ثابت تبدیل شده است. در نتیجه تطبیق مدل عددی در برابر تغییر شکل‌های زیاد بسیار آسان‌تر از روش‌های دارای المان است.
- شکل سیستم فیزیکی سیال به‌راحتی از طریق ردیابی حرکت ذرات مشخص می‌شود. در نتیجه تعیین سطح آزاد و مرزهای تغییر شکل یافته کار سختی نمی‌باشد.
- طبیعت لاگرانژی ذرات باعث می‌شود تا ترم‌های جابه‌جایی به‌طور مستقیم محاسبه شده و در نتیجه خطای پخش عددی در محاسبات حذف می‌شود.
- هندسه‌های پیچیده‌تر و مسائل فیزیکی دشوارتری نظیر در هم آمیختگی سیالات در مکانیک سیالات عددی قابل حل است.

روش ذرات بر اساس مقیاس طولی و مدل‌های ریاضی مورد استفاده طبقه‌بندی می‌شود. ذرات می‌توانند در مقیاس‌های نانو، میکرو، مزو و ماکرو تغییر نمایند. بنابراین، روش‌های بدون المان از نظر مقیاس سه دسته هستند: روش‌های میکروسکوپی^{۱۲} (به‌طور

13. Molecular Dynamics (MD)
14. Mesoscopic
15. Dissipative Particle Dynamics (DPD)
16. Macroscopic
17. Particle in Cell (PIC)
18. Moving Particle Semi-implicit (MPS)
19. Deterministic
20. Probabilistic
21. Monte Carlo Molecular Dynamics (MMD)

10. Nodes
11. Particles
12. Microscopic

با توجه به آنکه حل معادلات ناویر- استوکس با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه، به علت وابستگی به المان‌های از پیش تعیین شده دارای مشکلاتی نظیر هزینه محاسباتی زیاد، دقت کم در حل برخی از مسائل جریان آزاد نظیر پخش ذرات در سطح آزاد و تغییر شکل‌های بزرگ در جریان می‌باشند، بنابراین استفاده از روش‌هایی که فاقد شبکه از پیش تعیین شده باشند در سال‌های اخیر برای حل جریان‌های چندفازی گسترش یافته است. هرچند این روش‌ها در برخی مسائل جریان آزاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما استفاده از روش‌های بدون شبکه در بسیاری از مسائل چندفازی از اولویت‌های تحقیقاتی می‌باشد. از میان روش‌های بدون شبکه، روش هیدرودینامیک ذرات هموار از کارآمدترین روش‌ها در دیدگاه لاگرانژی برای شبیه‌سازی حرکت سیال است، که در چند سال اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. با توجه به دیدگاه لاگرانژی مورد استفاده در این روش که منطبق بر ذات جریان بوده و همچنین عدم نیاز به استفاده از معادلات اضافی برای ردیابی مرز بین فازهای متفاوت، و عدم کاربرد این روش در بسیاری از مسائل چندفازی، در این پژوهش از این روش به منظور حل معادلات ناویر- استوکس در جریان‌های چندفازی استفاده می‌شود. در ادامه مزایا، تاریخچه، نحوه تکامل، تکنیک‌های به‌کار گرفته شده و کاربردهای SPH بیان خواهند شد.

هیدرودینامیک ذرات هموار یا SPH

هیدرودینامیک ذرات هموار حقیقتاً یک روش ذرات بدون شبکه است که در ابتدا برای کاربردهایی در مقیاس پیوسته استفاده شده است و ممکن است به عنوان قدیمی‌ترین روش ذره‌ای بدون شبکه مدرن در نظر گرفته شود. این روش در ابتدا برای حل مسائل فیزیک نجومی در فضای باز سه بعدی ابداع شد [۲۰، ۲۱]. زیرا که حرکت مجموعه‌ای از ذرات آنها شبیه به حرکت جریان مایع یا گاز است و این حرکت‌ها را می‌توان به‌وسیله معادلات حاکم در هیدرودینامیک نیوتنی کلاسیک مدل کرد.

حالت یک سیستم در SPH، به‌وسیله یک مجموعه از ذرات که دارای خواص مواد هستند و با یکدیگر در یک محدوده کنترل شده به‌وسیله یک تابع وزنی یا تابع هموار اندرکنش دارند، بیان می‌شوند [۲۲، ۲۳]. گسسته‌سازی معادلات حاکم بر پایه این ذرات گسسته است و یک فرمولاسیون مبتنی بر ذرات برای محاسبه چگالی، سرعت و شتاب محلی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار سیال به کمک یک معادله حالت از روی چگالی محاسبه می‌شود. سپس، شتاب ذرات از گرادیان فشار و چگالی به‌دست می‌آید. همچنین، لزجت فیزیکی در جریان‌های لزج بر روی شتاب ذرات مؤثر خواهد بود. در SPH به‌عنوان یک

روش لاگرانژی ذرات، بقای جرم دقیقاً اتفاق می‌افتد. در SPH هیچ‌گونه ردیابی صریح مرز مشترک برای جریان‌های چند فازی وجود ندارد. زیرا، حرکت سیال به‌وسیله حرکت ذرات بیان می‌شود و سطوح سیال یا مرز مشترک سیال-سیال با ذرات تعریف شده‌ی فاز آنها در ابتدا حرکت می‌کند.

SPH بعضی مزایای خاص نسبت به روش‌های عددی مبتنی بر شبکه سنتی دارد که عبارتند از:

- SPH یک روش ذره‌ای با ماهیت لاگرانژی و الگوریتم نسبت گالیله‌ای است. در این روش می‌توان تاریخچه زمانی از ذرات مواد را به‌دست آورد. از این‌رو، امکان محاسبه انتقال و جابجایی سیستم وجود دارد.
- با استقرار صحیح ذرات در موقعیت‌های خاص در مرحله ابتدایی قبل از آنالیز، سطوح آزاد، مرز مشترک بین فازها و مرزهای متحرک می‌توانند بدون در نظر گرفتن نقش حرکت ذرات به‌طور طبیعی ردیابی شوند. این در حالی است که این عمل در بسیاری از روش‌های اوپلری بسیار چالش‌برانگیز بوده است. بنابراین، SPH یک انتخاب ایده‌آل برای مدلسازی مسائل جریان سطحی و سطح آزاد است.
- SPH یک روش ذره‌ای بدون استفاده از شبکه است. این خصوصیت متمایز بدون شبکه بودن روش SPH، اجازه بررسی تغییر شکل‌های بسیار بزرگ را به‌راحتی می‌دهد. زیرا که ارتباط بین ذرات به عنوان بخشی از محاسبات تولید می‌شود و می‌تواند با زمان تغییر کند. نمونه‌های از کاربرد SPH شامل پدیده‌های انرژی بالا مانند انفجار، انفجار زیر آب، ضربه با سرعت بالا و نفوذ می‌شود.
- در روش SPH، یک ذره بیانگر یک حجم محدود در مقیاس پیوسته است. این کاملاً شبیه به روش دینامیک مولکولی کلاسیک که در آن یک ذره برای بیان یک اتم یا یک مولکول در مقیاس نانو و یا روش دینامیک ذرات اتلافی که یک ذره برای بیان یک دسته از مولکول‌ها در مقیاس مزو استفاده می‌شود، است. بنابراین، طبیعی است که SPH برای مقیاس‌های کوچکتر یا استفاده همزمان SPH با دینامیک مولکولی و دینامیک ذرات اتلافی برای کاربردهای چند مقیاسی به‌خصوص در بیوفیزیک و بیوشیمی تعمیم و توسعه داده شود.
- SPH برای مسائلی با فرض عدم برقراری پیوستگی مناسب است. این مسئله مخصوصاً برای مهندسی در زمینه بیو و نانو در مقیاس میکرو و نانو و فیزیک نجومی (آستروفیزیک) در مقیاس نجومی صادق است. برای مسائل

[۳۰، ۳۱]. رندلس^{۲۹} و لیبرسلی^{۳۰} یک فرمول‌بندی نرمال برای تقریب چگالی و نرمالیزه کردن برای واگرایی تانسور تنش استخراج کردند [۳۲]. چن^{۳۱} و همکارانش یک روش ذرات هموار اصلاح شده^{۳۲} (CSPM) را ارائه کردند که دقت شبیه‌سازی را هم در دامنه مسئله و هم در اطراف منطقه مرزی بهبود می‌بخشید [۳۳، ۳۴]. این روش توسط لیو^{۳۳} و همکارانش در برطرف کردن مسائلی با ناپیوستگی مانند امواج شوک در یک SPH ناپیوسته^{۳۴} استفاده شد [۳۵]. همچنین، لیو و همکارانش روش ذرات محدود^{۳۵} یا FPM را ارائه کردند که یک مجموعه تابع برای تقریب متغیرهای میدانی در یک مجموعه ذرات پراکنده دلخواه استفاده می‌کند [۳۶، ۳۷]. FPM می‌تواند به عنوان یک ورژن بهبود یافته SPH و CSPM با عملکرد بهتری در مورد ثبات ذرات مطرح شود. باترا^{۳۶} و همکارانش، به‌طور همزمان یک ایده مشابه برای FPM توسعه دادند که SPH اصلاح شده^{۳۷} نام گرفت که در بسیاری از کاربردهای مکانیک جامدات به کار گرفته شد [۳۸]. فنگ^{۳۸} و همکارانش، بعدها این ایده را برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد بهبود بخشیدند [۳۹]. همچنین، آنها یک روش نقطه محدود لاگرانژی نامنظم برای شبیه‌سازی جریان‌های تراکم ناپذیر لزج توسعه دادند [۴۰، ۴۱]. سایر تغییرات یا اصلاحات قابل توجه در روش SPH شامل هیدرو‌دینامیک ذرات کمترین مربعات، تصحیح هسته انتگرالگیری، روش باز تولید ذرات هسته، تصحیح روش ذرات پایدار و چندین رهیافت بازیابی ثبات ذره دیگر می‌شوند [۴۲-۴۵].

تکنیک‌های تقریبی SPH

روش SPH مرسوم در اصل برای مسائل هیدرو‌دینامیکی که معادلات دیفرانسیل جزئی شامل متغیرهای میدانی مانند چگالی، سرعت، انرژی و غیره بر آنها حاکم است، توسعه پیدا کرد. اصولاً دو مرحله در به‌دست آوردن یک فرمول‌بندی SPH وجود دارد. مرحله اول برای بیان تابع و یا مشتقات در شکل پیوسته انتگرالی است و این مرحله به اصطلاح «تقریب کرنل»^{۳۹} نامیده می‌شود [۱۵]. در تقریب این مرحله، تقریب تابع و مشتقات آن بر پایه ارزیابی تابع کرنل هموار و مشتقات آن

مشابه، SPH می‌تواند یک انتخاب طبیعی برای شبیه‌سازی‌های عددی باشد.

• SPH در اجرای عددی نسبتاً ساده‌تر است و استعداد ذاتی بیشتری برای توسعه مدل‌های عددی سه بعدی نسبت به روش‌های مبتنی بر شبکه دارد.

الگوریتم اولیه SPH از تئوری احتمال استخراج شده است و از مکانیک آماری به‌طور جدی برای تقریب‌های عددی استفاده می‌کند. این الگوریتم قانون بقای مومنتم خطی و زاویه‌ای را ارضا نمی‌کند. با این وجود، این الگوریتم‌ها می‌توانند جواب‌های منطقی خوبی برای بسیاری از پدیده‌های فیزیک نجومی تولید کنند. برای شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات و جامدات، چالش‌های برای بازتولید معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر دینامیک سیالات و جامدات متناظر وجود دارد. این چالش‌ها شامل دقت و پایداری رهیافت‌های عددی به‌کار گرفته شده در روش SPH است.

با توسعه روش SPH و کاربرد فراوان برای یک محدوده وسیعی از مسائل، ویژگی‌های جذابتری از آن به نمایش گذاشته شده است. از طرفی، برخی از اشکالات ذاتی آن نیز شناسایی شده‌اند. انواع مختلف یا اصلاحات برای بهبود روش SPH اصلی پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، موناگان^{۲۲} و جینگولد^{۲۳} عدم بقای مومنتم زاویه‌ای و خطی در مورد روش SPH اصلی را دریافتند و سپس یک الگوریتم بقایی SPH در هر دو مورد مومنتم زاویه‌ای و خطی معرفی کردند [۲۴]. همچنین، هو^{۲۴} و آدامز^{۲۵} یک الگوریتم بقای SPH در مورد مومنتم زاویه‌ای برای جریان‌های تراکم ناپذیر لزج ابداع کردند [۱۷].

تعداد زیادی از محققان، بررسی‌های بر روی روش SPH از لحاظ دقت، پایداری، همگرایی و راندمان انجام داده‌اند. شناسایی مسئله ناپایداری کششی را که برای مواد با استحکام مهم است، توسط سوگل^{۲۶} و همکارانش انجام شد [۲۵]. موریس^{۲۷} مشکل بی‌ثباتی ذرات را که می‌تواند منجر به دقت پایین در حل روش SPH شود، را مورد بررسی قرار داد [۲۶]. در طی سالیان گذشته، اصلاحات مختلفی برای بازیابی ثبات و بهبود دقت روش SPH انجام شده است. موناگان، فرمولاسیون متقارن را که اثرات بهتری بر آن گزارش شده است، پیشنهاد داد [۲۷-۲۹]. جانسون^{۲۸} و همکارانش، فرمول‌بندی نرمال تقارن محوری را ارائه کردند

29. Randles
30. Libersky
31. Chen
32. Corrective Smoothed Particle Method (CSPM)
33. Liu
34. Discontinuous SPH (DSPH)
35. Finite Particle Method (FPM)
36. Batra
37. Modified SPH (MSPH)
38. Fang
39. Kernel Approximation

22. Monaghan
23. Gingold
24. Hu
25. Adams
26. Swegle
27. Morris
28. Johnson

دارد که به عنوان یک شکل ضعیف فرمول‌بندی رفتار می‌کند. شکل ضعیف فرمول‌بندی معمولاً تا زمانی که انتگرال‌گیری عددی دقیق انجام می‌شود، بسیار پایدار است.

مرحله ۳ ماتریس‌های کوچک و دسته‌بندی شده سیستم گسسته را تولید می‌کند. این مرحله بسیار مهم است زیرا که مستقیماً به تلاش محاسباتی مربوط می‌شود. به طوری که اگر ماتریس‌ها پر شوند، می‌توانند زمان پردازش غیرقابل قبول و طولانی را برای حل معادلات سیستم‌های بزرگ (برای مثال تغییر شکل‌های بزرگ که با استفاده از میلیون‌ها ذره شبیه‌سازی می‌شوند)، سبب شود.

در هر گام زمانی، قابلیت سازگاری SPH بر پایه توزیع ذرات دلخواه در دامنه حل فعلی مدنظر با انجام مرحله ۴ به دست می‌آید. از آنجاکه این تقریب تطبیقی SPH در مراحل اولیه تقریب متغیرهای میدان انجام می‌گیرد، فرمول‌بندی SPH تحت تأثیر توزیع دلخواه و متغیر با زمان ذرات نیست. بنابراین، این روش می‌تواند به طور طبیعی با مسائل شامل تغییر شکل‌های به شدت بزرگ روبه‌رو شود. باید در نظر داشت که این تقریب ذره در واقع یک روش برای انجام انتگرال عددی مورد نیاز در مرحله ۲ است. برای اطمینان از دقت انتگرال و به سبب آن پایداری عددی و همچنین تعداد ذرات کافی (دامنه پشتیبانی باید به اندازه کافی بزرگ باشد) به اجبار باید در این مرحله مجموع‌گیری انجام شود. ذرات بعد از انجام تقریب ذرات با یک جرم مشخص می‌شوند و این بدین معنی است که ذرات در واقع ذرات مادی واقعی هستند.

استفاده از توصیف لاگرانژی در مرحله ۵ به SPH این امکان را می‌دهد که تمام ویژگی‌های یک روش لاگرانژی را داشته باشد. مرحله ۶ یک ابزار متداول برای گذر زمانی در حل مسائل دینامیک است. تمام ملزومات روش SPH در جهت مجسم‌کردن یک راه مناسب برای تشخیص گام زمانی است که پایداری انتگرال زمانی را تضمین می‌کند. ترکیبی از این استراتژی ۶ مرحله‌ای روش SPH را به عنوان یک حلگر بدون شبکه، سازگار، پایدار و لاگرانژی برای مسائل دینامیکی را می‌سازد [۲].

کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی SPH

در این بخش قصد داریم حوزه‌هایی صنعتی و تحقیقاتی که از روش شبیه‌سازی SPH استفاده کرده‌اند، را به طور خلاصه دسته‌بندی کنیم. بخشی از این کاربردهای واقعی در زمینه‌های مختلف نیز طی شکل‌های (۲) تا (۱۷) به نمایش گذاشته شده است [۴۶-۶۰]. با بررسی تحقیقات انجام شده می‌توان حوزه‌های موفق در استفاده از SPH را به صورت زیر دسته‌بندی کرد [۱]:

می‌باشند. مرحله دوم معمولاً به عنوان «تقریب ذره^{۴۰}» شناخته می‌شود [۱۵]. در این مرحله، دامنه محاسباتی ابتدا به وسیله بیان دامنه حل با یک مجموعه از توزیع اولیه ذرات نشان‌دهنده شرایط اولیه مسئله، گسسته‌سازی می‌شود. بعد از گسسته‌سازی، متغیرهای میدان روی یک ذره به وسیله جمع مقادیر روی نزدیک‌ترین همسایه‌های ذرات تقریب زده می‌شود [۱۵].

اساس تمام شبیه‌سازی‌ها بر پایه روش SPH شامل مراحل مشترکی هستند. مراحل پایه انجام یک شبیه‌سازی SPH عبارتند از [۲]:

۱. دامنه حل مسئله به وسیله یک مجموعه از ذرات دلخواه پراکنده به نمایش گذاشته می‌شود. هیچ اتصالی برای این ذرات نیاز نیست (بدون شبکه).

۲. ارائه روش انتگرالی که برای تقریب تابع میدان استفاده می‌شود. در روش SPH این روش انتگرالی به عنوان تقریب کرنل مصطلح است (بیان تابع انتگرال).

۳. تقریب کرنل با استفاده از ذرات بیشتر تقریب زده می‌شود. این در روش SPH به عنوان تقریب ذرات مصطلح شده است. این تقریب با جایگزینی انتگرال‌گیری از انتگرال تابع میدان و مشتقات آن با مجموع‌گیری از تمام مقادیر متناظر در ذرات همسایه در یک دامنه موضعی که دامنه پشتیبان نامیده می‌شود، انجام می‌شود (پشتیبانی فشرده).

۴. تقریب ذرات در هر گام زمانی انجام می‌شود. از این رو، استفاده از ذرات به توزیع موضعی موجود ذرات بستگی دارد (انطباق).

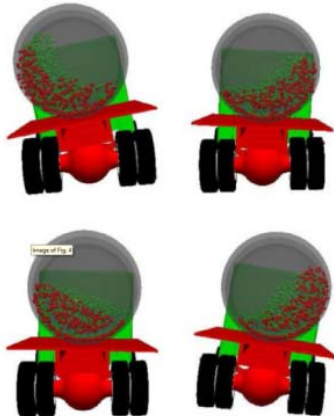
۵. تقریب‌های ذرات بر روی کل عبارات مربوط به تابع‌های میدان در PDE اعمال می‌شود تا یک مجموعه از ODEها در شکل گسسته که تنها از لحاظ زمانی رابطه دارند، تولید شود (دیدگاه لاگرانژی).

۶. ODEهای به دست آمده با استفاده از یک الگوریتم صریح انتگرال‌گیری برای رسیدن به سریع‌ترین گام زمانی برای به دست آوردن تاریخچه زمانی تمام متغیرهای میدانی تمام ذرات حل می‌شوند (دینامیک).

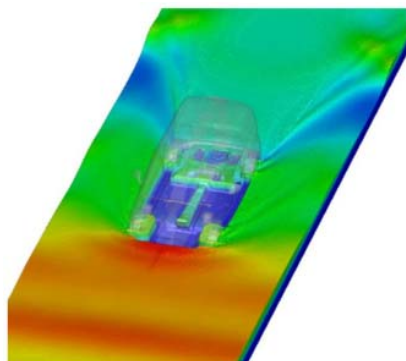
مرحله ۱ ماهیت بدون شبکه روش SPH را تعیین می‌کند. فرمول‌بندی یک روش عددی بدون شبکه دشوار نیست. اما، مشکل کلیدی چگونگی حصول اطمینان از پایداری حل عددی به ویژه هنگامی که گره‌های نامنظم یا ذرات در دامنه‌های فشرده پشتیبانی شده برای مسائل با شرایط مرزی نویمان به کار برده می‌شود، است.

مرحله ۲ از لحاظ ریاضیات پایداری لازم را برای روش SPH فراهم می‌کند. زیرا، بیان انتگرالی یک اثر هموارکنندگی

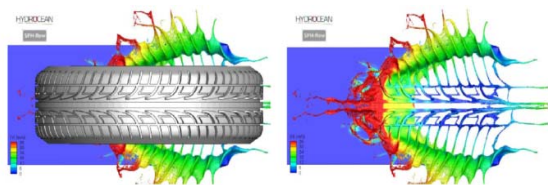
- مسائل محیط زیستی و زیست شناسی



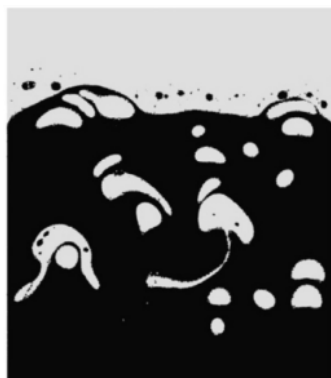
شکل ۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش SPH مربوط به تغییر مسیر یک مخزن حامل مایع [۴۶]



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی ارتفاع سطح آزاد سیال و تولید موج اطراف یک اتومبیل در حین عبور از گذرگاه به روش SPH [۴۷]



شکل ۴- شبیه‌سازی ۳ بعدی پاشش آب ناشی از گذر تایر یک اتومبیل با استفاده از روش SPH [۴۷]



شکل ۵- شبیه‌سازی یک جریان دوفازی مخلوط آب-روغن با استفاده از روش SPH [۴۸]

• آستروفیزیک (فیزیک نجومی):

- دینامیک غبار گازی
- شکل‌گیری و فروپاشی کهکشان‌ها
- مکانیک کوانتوم
- برخورد ستاره‌ها و سیارک‌ها
- ابر نواخت

• مهندسی پزشکی:

- سلول‌های خون
- جریان خون
- رگ‌های خون
- دریچه قلب

- میکروسیال‌ها

- تحویل موضعی دارو

- اجسام شناور

- جراحی مجازی

• جریان‌های تراکم‌پذیر:

- جریان‌های مافوق صوت
- انفجار
- امواج شوک

• هیدرودینامیک:

- سرریز سد

- شکست سد

- سیستم‌های چند فازی معمول

- پرش هیدرولیکی

- گذرگاه پرورش ماهی

- ناپایداری‌های هیدرودینامیکی

• سایر کاربردها:

- ضربات سرعت بالا

- شبیه‌سازی نشت

- جابجایی و رسانایی گرمایی

- اندرکنش سیال-سازه

- ازدحام جمعیت

- آشفتنگی

- هیدرودینامیک مغناطیسی

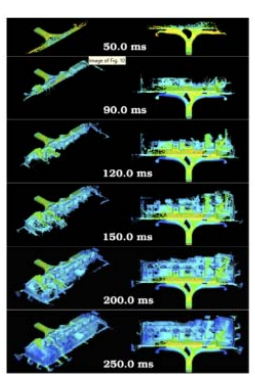
- صنایع غذایی

- صنایع اتومبیل

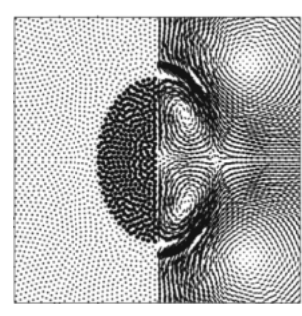
- صنایع تولید انرژی

- پردازش صنعتی

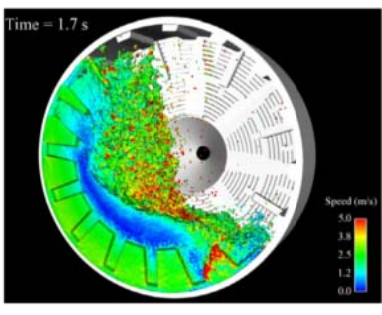
- مهندسی دریایی و سواحل



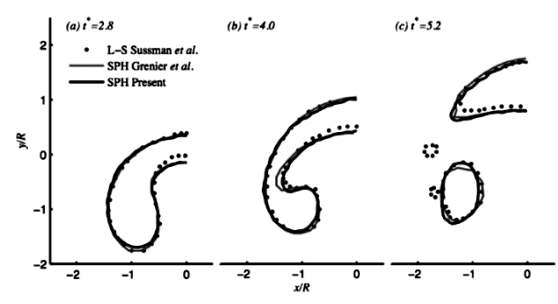
شکل ۱۰- پیش‌بینی الگوی پرتدن محافظه در ریخته‌گری فشار بالا جهت تولید پوشش موتور با استفاده از شبیه‌سازی SPH [۵۳]



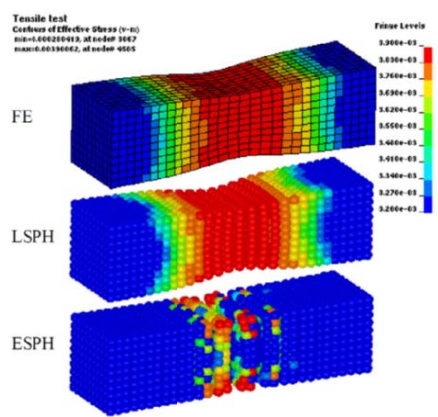
شکل ۶- شکل به‌دست آمده برای حالت پایدار تغییر شکل یک قطره تحت تأثیر یک میدان الکتریکی پایدار خارجی به کمک روش شبیه‌سازی SPH [۴۹]



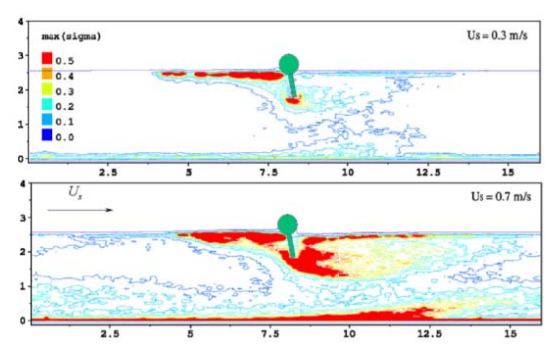
شکل ۱۱- تصویر شبیه‌سازی شده جریان دوغابی داخل محافظه سنگ‌زنی با استفاده از روش SPH [۵۴]



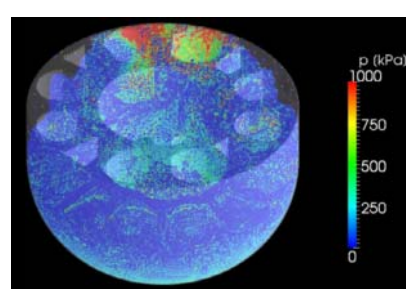
شکل ۷- پیشرفت زمانی مرز مشترک حباب برای مسئله تک حباب بالارونده حاصل از شبیه‌سازی SPH [۵۰]



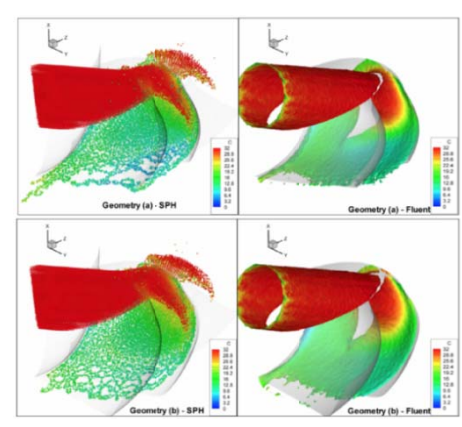
شکل ۱۲- مقایسه شبیه‌سازی آزمایش کشش توسط دو روش SPH و FEM [۵۵]



شکل ۸- توزیع مکانی پارامتر حداکثر مقدار جذب روغن در طول بازه زمانی مشخص، حاصل از روش شبیه‌سازی SPH [۵۱]



شکل ۱۳- توزیع فشار داخل یک راکتور هسته‌ای حاصل از یک شبیه‌سازی SPH [۵۶]



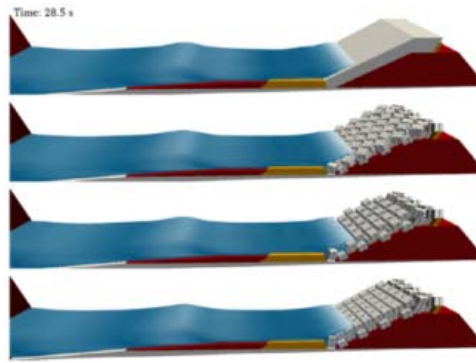
شکل ۹- مقایسه شبیه‌سازی SPH و نرم‌افزار تجاری فلوئنت در مورد گشتاور حاصل شده برای دو هندسه متفاوت پره [۵۲]

کاربرد SPH در هوافضا و صنایع هوافضایی

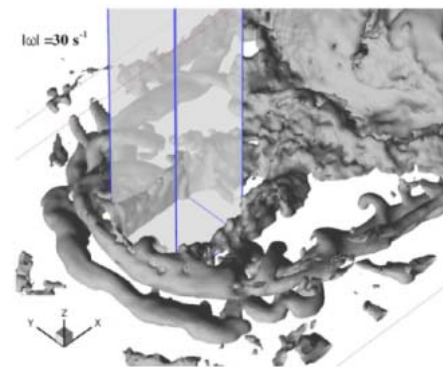
علم هوافضا به‌طور عمده با تلاش انسان در مهندسی و تجاری‌سازی برای پرواز در اتمسفر زمین و خارج شدن از آن سروکار دارد. این فعالیت‌ها از صنایع نظامی گرفته تا صنایع تجاری و تحقیقاتی دامنه بسیار گسترده‌ای دارد. در مهندسی هوافضا نگرانی اصلی در مورد طراحی، توسعه، ساختار و آزمایش سازه‌های هوافضایی جهت مطالعه تکنولوژی وسایل پرنده است. این نکته برای ارزیابی خطرپذیری و قابلیت اطمینان جهت بهبود بازده مربوط به اجزای وسایل پرنده تحت بارگذاری سازه‌ای واقعی، امری ضروری است. همچنین برای انجام این کار، استفاده از رهیافت‌های تجربی بسیار گران و گاهی اوقات غیرقابل تولید مجدد است. بنابراین، تعداد این آزمایش‌های تجربی باید به شیوه هدفمند به حداقل برسد. این کار را می‌توان با استفاده کردن از شبیه‌سازی‌های عددی انجام داد.

افزون بر این، بیشتر کاربرد شبیه‌سازی‌های عددی در صنایع هوافضایی در مسائل چندفیزیکی هستند که عمدتاً شامل اندرکنش‌های ساختاری سیال با جریان اصلی سیال و تغییر شکل‌های ساختاری و حرکتی است. بنابراین، روش SPH با توجه به ویژگی‌هایی که دارد، ممکن است برخی مزایایی در هنگام مواجهه با این چنین مسائلی داشته باشند. موضوع‌های اصلی در این زمینه شامل مواردی مانند واکنش ساختاری و تغییر شکل‌ها در طول عملیات فرود معمولی و فرود بر روی آب یک وسیله پرنده، جریان سیال اطراف هواپر و برجستگی‌های خارجی موجود بر روی اجزای هواپیماهاست.

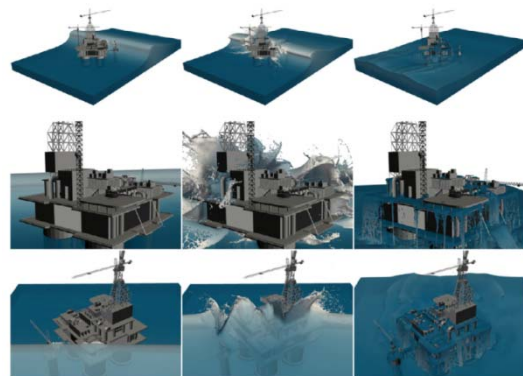
فرود اضطراری وسایل پرنده روی آب و یا فرود وسایل پرنده طراحی شده به منظور فرود روی آب، یکی از زمینه‌های اصلی که SPH در آن به‌طور گسترده به‌کار گرفته شده است، به‌شمار می‌رود [۶۱-۶۴]. در بین پدیده‌های هیدرو‌دینامیکی اتفاق افتاده در فرود بر روی آب، کاویتاسیون، هواگیری، هواناو، فشار بالا و مکش بسیار محبوب هستند. فشار بالا و مکش عمدتاً از شکل بدنه و سرعت افقی فرود تأثیر می‌پذیرد و بسیار تحت تأثیر دینامیک دورانی وسیله پرنده می‌باشد [۶۵، ۶۶]. اهداف اصلی این بررسی پایداری سینماتیکی شامل ارزیابی شتاب در کابین و نیروهای بر روی بدنه به منظور بررسی رفتار هواپیما در ثانیه‌های پس از ضربه فرود و توقف کامل و همچنین شناور شدن در آب‌های آرام و خشن است. لازم به ذکر است که SPH در مرحله فعلی قادر به پیش‌بینی نیروهای مکش و مومنتم ضربه که به‌طور قابل توجهی به تخمین میزان دوران در طول یک فرود روی آب بستگی دارد، نیست [۶۷]. شکل (۱۸) تصویری از فرود یک هوا پیما و هلیکوپتر را نشان می‌دهد.



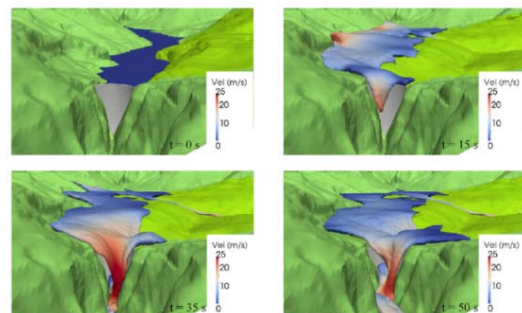
شکل ۱۴- شبیه‌سازی اثرات شکل موج‌شکن‌ها بر روی امواج با استفاده از روش SPH [۵۷]



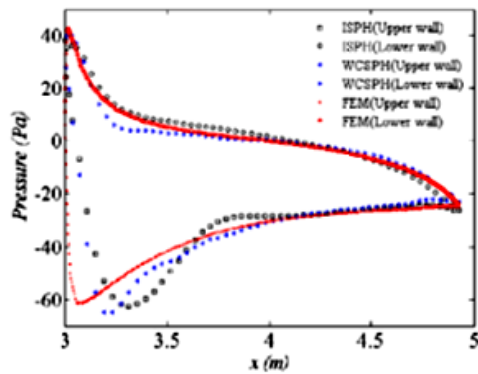
شکل ۱۵- اثرات جریان حاصل از شکست سد بر روی موانع بلند با استفاده از روش SPH [۵۸]



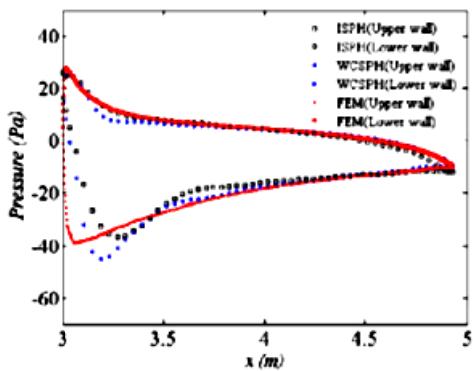
شکل ۱۶- شبیه‌سازی عددی اندرکنش یک موج بزرگ با سکوی نفتی با استفاده از روش SPH [۵۹]



شکل ۱۷- شبیه‌سازی امواج سونامی با استفاده از روش SPH [۶۰]



(الف)



(ب)

شکل ۱۹- الف) و ب) مقایسه توزیع فشار به دست آمده حول هوابر با استفاده از روش‌های SPH و LBM [۱]

جمع‌بندی

هیدرودینامیک ذرات هموار به عنوان یک روش بدون شبکه، لاگرانژی، ذره‌ای ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. برخی مزایای خاص این روش در مقایسه با روش‌های عددی متداول مبتنی بر شبکه بیشتر جلوه می‌کنند که شاخص‌ترین آنها، طبیعت انطباقی روش SPH است. این انطباق‌پذیری SPH در مرحله بسیار ابتدایی در مورد تقریب متغیرهای میدانی است که در هر گام زمانی براساس یک مجموعه موضعی جاری از ذرات پراکنده دلخواه انجام می‌شود. این خواص روش SPH و قابلیت اعمال آن در برخی هندسه‌های پیچیده باعث شده تا نظر محققان در زمینه‌های مختلف صنعتی و تحقیقاتی به سمت این روش جلب شود. علم و صنعت هوافضا از به‌کارگیری این ابزار قدرتمند عقب نیافتاده و در شبیه‌سازی برخی مسائل مهم از این روش استفاده کرده است. با توجه به مزایای این روش، به احتمال زیاد در آینده نزدیک شاهد کاربرد روزافزون آن در هوافضا خواهیم بود.

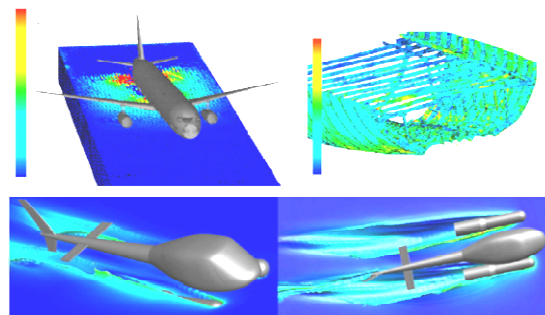
مراجع

- [1] Shadloo, M.S., Oger, G. and Le Touzé, D., "Smoothed Particle Hydrodynamics Method for

در واقع در این شبیه‌سازی‌ها وسیله پرنده از طریق روش FEM و سیال با استفاده از روش SPH مدل شده است.

علاوه‌براین، چندین پژوهش بر روی جریان سیال حول هوابرها با شکل‌ها و زوایای حمله متفاوت با استفاده از روش SPH انجام شده است. این شبیه‌سازی می‌تواند در شرایط بارگذاری اتفاق افتاده مشابه با آنچه در بلند شدن، پرواز و فرود آمدن اتفاق می‌افتد، انجام شود. هدف اصلی برای کاربردهای مشابه، تعریف نیروهای لیفت و درگ بر روی هوابر و نیز مطالعه انواع مختلف گردابه‌های پشت بال (برای مثال گردابه ون-کارمن یا گردابه چرخشی دوقطبی) است [۶۸، ۶۹]. حتی در یکی از بررسی‌ها، اولین مطالعه بر روی تأثیر کاویتاسیون در فرود بر روی آب یک بدنه NACA ارائه شده است [۷۰]. در برخی موارد به مقایسه کمی و کیفی روش SPH با روش‌های عددی پیشین مانند FEM به وسیله ارائه شبیه‌سازی عددی جریان سیال حول یک هوابر پرداخته شده است [۱]. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که در برخی از هندسه‌های پیچیده روش SPH جواب‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری نسبت به FEM ارائه می‌دهد. البته کاربرد روش SPH در این موارد معمولاً با محدودیت‌های روبرو شد که از جمله آن می‌توان به مشکلاتی که در اعداد رینولدز بالاتر از ۲۰۰۰ رخ می‌داد، اشاره کرد. شکل ۱۹)، فشار اطراف هوابر بدست آمده توسط دو رهیافت متفاوت از روش SPH (که بر مبنای فرض تراکم‌پذیری یا تراکم‌ناپذیری بنا شده‌اند) و روش FEM در زاویه حمله ۱۵ درجه و دو عدد رینولدز ۴۲۰ و ۵۷۰ نشان می‌دهد.

استفاده از روش SPH در صنایع هوافضا به موارد ذکر شده محدود نمی‌شود و می‌تواند در حوزه‌های جدیدی نیز به کار گرفته شود. برای مثال می‌توان به کارهای انجام شده در ایرباس بر روی بررسی عددی نیروهای به حرکت سوخت در تانکرهای موجود در بالا هوابیم‌های پهن پیکر و یا کارهای انجام شده بر روی دنباله‌های آیرودینامیکی و شکل دم شعله جنگنده‌های هوابی اشاره کرد [۷۱، ۷۲].



شکل ۱۸- شبیه‌سازی فرود بر روی آب هوابیم A321 و هلیکوپتر، قسمت سازهای با استفاده از روش FEM و قسمت سیال با استفاده از روش SPH [۶۲، ۶۳]

- [20] Lucy, L.B., "A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis," *Astronomical Journal*, Vol. 82, 1977, pp. 1013-1024.
- [21] Gingold, R. A. and Monaghan, J. J., "Smoothed Particle Hydrodynamics-Theory and Application to Non-spherical Stars," *Astronomical Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 181, 1977, pp. 375-389.
- [22] Liu, M.B., Liu, G.R. and Lam, K.Y., "Constructing Smoothing Functions in Smoothed Particle Hydrodynamics with Applications," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 155, No. 2, 2003, pp. 263-284.
- [23] Fulk, D.A. and Quinn, D.W., "An Analysis of 1-D Smoothed Particle Hydrodynamics Kernels," *Journal of Computational Physics*, Vol. 126, No. 1, 1996, pp. 165-180.
- [24] Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., "Kernel Estimates as a Basis for General Particle Method in Hydrodynamics," *Journal of Computational Physics*, Vol. 46, 1982, pp. 429-453.
- [25] Swegle, J.W., Hicks, D.L. and Attaway, S.W., "Smoothed Particle Hydrodynamics Stability Analysis," *Journal of Computational Physics*, Vol. 116, No.1, 1995, pp. 123-134.
- [26] Morris, J.P., Analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics with Applications, (Ph.D. Thesis), Monash University, Melbourne, Australia, 1996.
- [27] Monaghan, J., "Why Particle Methods Work," *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol. 3, No. 4, 1982, pp. 422-433.
- [28] Monaghan, J., "Particle Methods for Hydrodynamics," *Computer Physics Reports*, Vol. 3, 1985, pp. 71-124.
- [29] Monaghan, J., "Smooth Particle Hydrodynamics," *Computer Physics Reports*, Vol. 30, 1992, pp. 543-574.
- [30] Johnson, G.R., "Artificial Viscosity Effects for SPH Impact Computations," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 5, 1996, pp. 477-488.
- [31] Johnson, G.R. and Beissel, S.R., "Normalized Smoothing Functions for SPH Impact Computations," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, No. 16, 1996, pp. 2725-2741.
- [32] Randles, P.W. and Libersky, L.D., "Smoothed Particle Hydrodynamics: Some Recent Improvements and Applications," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 139, No. 1, 1996, pp. 375-408.
- [33] Chen, J.K., Beraun, J.E. and Carney, T.C., "A Corrective Smoothed Particle Method for Boundary Value Problems in Heat Conduction," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, 1999, pp. 231-252.
- [34] Chen, J.K. and Beraun, J.E., "A Generalized Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Nonlinear Dynamic Problems," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, 1999, pp. 225-239.
- [35] Liu, M.B., Liu, G.R. and Lam, K.Y., "A One-dimensional Meshfree Particle Formulation for Simulating Shock Waves," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 3, 2003, pp. 201-211.
- Fluid Flows, towards Industrial Applications: Motivations, Current State, and Challenges," *Computers and Fluids*, Vol. 136, 2016, pp. 11-34.
- [2] Liu, G.R., and Liu, M.B., *Smoothed Particle Hydrodynamics: a Meshfree Particle Method*, World Scientific, 3rd printing, 2003.
- [3] Ancona, M.G., "Fully-Lagrangian and Lattice-Boltzmann Methods for Solving Systems of Conservation Equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 115, No. 1, 1994, pp. 107-120.
- [4] Kang, D.J., Bae, S.S. and Kim, J.W., "Navier-Stokes Simulation of the MIT Flapping Foil Experiment Using an Unstructured Finite Volume Method," *ASME 1999 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Indianapolis, Indiana, USA, 1999.
- [5] Chung, T.J., *Computational Fluid Dynamic*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [6] Anderson, J.D., *Computational Fluid Dynamics: the Basics with Applications*, McGraw Hill, New York, 2002.
- [7] Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, Stonham, 2000.
- [8] Liu, G.R., *Meshfree Methods: Moving beyond the Finite Element Method*, CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [9] Hirsch, C., *Numerical Computation of Internal & External Flows: Fundamentals of Numerical Discretization*, Wiley, NewYork, 1988.
- [10] Liu, G.R. and Gu, Y.T., *An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming*, Springer, Dordrecht, 2005.
- [11] Zukas, J.A., *High Velocity Impact Dynamics*, Wiley, NewYork, 1990.
- [12] Hockney, R.W. and Eastwood, J.W., *Computer Simulation using Particles*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1988.
- [13] Allen, M.P. and Tildesley, D.J., *Computer Simulation of Liquids*, Oxford University Press, Oxford, 1987.
- [14] Frazer, R.A., Jones, W., Skan, S.W. and Britain, G., *Approximations to Functions and to the Solutions of Differential Equations*, Great Britain Aero Council, London, Report and Memo. No. 1799, 1937.
- [15] Liu, M. and Liu, G., "Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 17, No.1, 2010, pp. 25-76.
- [16] Rezavand, M., Numerical Simulation of Motion of a Single Bubble in a Simple Shear Flow, Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), (M.Sc. Thesis), Science and Research Branch of the Islamic Azad University, Iran, 2015 (In Persian).
- [17] Hu, X. and Adams, N.A., "A Multi-phase SPH Method for Macroscopic and Mesoscopic Flows," *Journal of Computational Physics*, Vol. 213, No.2, 2006, pp. 844-861.
- [18] Khayyer, A., Gotoh, H. and Shao, S., "Corrected Incompressible SPH Method for Accurate Water-surface Tracking in Breaking Waves," *Coastal Engineering*, Vol. 55, No. 3, 2008, pp. 236-250.
- [19] Monaghan, J., "Smoothed Particle Hydrodynamics and its Diverse Applications," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 44, 2012, pp. 323-346.

- [50] Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S. "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-phase Flow," *Journal of Computational Physics*, Vol. 114, No.1, 1994, pp.146–59.
- [51] Violeau, D., Buvat, C., Abed-Meraïm, K. and De Nanteuil, E., "Numerical Modeling of Boom and Oil Spill with SPH," *Coastal Engineering*, Vol. 54, No.12, 2007, pp.895–913.
- [52] Koukouvinis, P.K., Anagnostopoulos, J.S. and Papanonis, D.E., "SPH Method Used for Flow Predictions at a Turbo Impulse Turbine: Comparison with Fluent," *World Academy of Science, Eng. & Tech.*, Vol. 79, No.55, 2011, pp.659–666.
- [53] Cleary, P., Ha, J., Prakash, M., and Nguyen, T., "3D SPH Flow Predictions and Validation for High Pressure Die Casting of Automotive Components," *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 30, No.11, 2006, pp.1406–1427.
- [54] Cleary, P.W. and Morrison, R.D., "Prediction of 3D Slurry Flow within the Grinding Chamber and Discharge from a Pilot Scale Sag Mill," *Minerals Engineering*, Vol. 39, 2012, pp.174–195.
- [55] Lacombe, J-L., Limido, J. and Espinosa, C., "SPH Formulation with Lagrangian Eulerian Adaptive Kernel", *4th International SPHERIC Workshop*, Nantes, France, 2009, pp. 294–301.
- [56] Cercos-Pita J.L., "AQUA_gsp_h, a New Free 3D SPH Solver Accelerated with Opencl," *C Computer Physics Communications*, Vol. 192, 2015, pp. 295–312.
- [57] Altomare, C. and et al. "Numerical Modelling of Armour Block Sea Breakwater with Smoothed Particle Hydrodynamics," *Computers & Structures*, Vol. 130, 2014, pp. 34–45.
- [58] Marrone, S. and et al. "δ-sph Model for Simulating Violent Impact Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 200, No.13, 2011, pp. 526–542.
- [59] Domínguez J.M. and et al. "New Multi-GPU Implementation for Smoothed Particle Hydrodynamics on Het-erogenous Clusters," *Computer Physics Communications*, Vol. 184, No. 8, 2013, pp. 1848–1860.
- [60] Vacondio, R., Mignosa, P., and Pagani, S., "3D SPH Numerical Simulation of the Wave Generated by the Vajont Rockslide," *Advances in Water Resources*, Vol. 59, 2013, pp. 146–156.
- [61] Fasanella, E.L. and Jackson, K.E., "Impact Testing and Simulation of a Crashworthy Composite Fuselage Section with Energy-absorbing Seats and Dummies," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 49, No. 2, 2004, pp. 140–148.
- [62] Ortiz, R., Charles, J. and Sobry, J., "Structural Loading of a Complete Aircraft under Realistic Crash Conditions: Generation of a Load Database for Passenger Safety and Innovative Design," *Office National D Etudes Et De Recherches Aeronautiques Onera-Publications-Tp*, 2004.
- [63] Guibert, D., de Leffe, M., Oger, G. and Piccinali, J-C., "Efficient Parallelization of 3D SPH Schemes", *7th International SPHERIC Workshop, Prato, Italy. SPHERIC*, 2012, pp. 259–265.
- [36] Liu, M.B. and Liu, G.R., "Restoring Particle Consistency in Smoothed Particle Hydrodynamics," *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 56, No. 1, 2006, pp. 19–36.
- [37] Liu, M.B., Xie, W.P. and Liu, G.R., "Modeling Incompressible Flows Using a Finite Particle Method," *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 29, No. 12, 2005, pp. 1252–1270.
- [38] Batra, R.C. and Zhang, G.M., "Analysis of Adiabatic Shear Bands in Elasto-thermo-viscoplastic Materials by Modified Smoothed Particle Hydrodynamics (MSPH) Method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 201, No. 1, 2004, pp. 172–190.
- [39] Fang, J.N., Owens, R.G., Tacher, L. and Parriaux, A., "A Numerical Study of the SPH Method for Simulating Transient Viscoelastic Free Surface Flows," *Journal of Non-Newton Fluid*, Vol. 139, No. 1-2, 2006, pp. 68–84.
- [40] Fang, J.N. and Parriaux, A., "A regularized Lagrangian Finite Point Method for the Simulation of Incompressible Viscous Flows", *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 20, 2008, pp. 8894–8908.
- [41] Fang, J.N., Parriaux, A., Rentschler, M. and Ancey, C., "Improved SPH Methods for Simulating Free Surface Flows of Viscous Fluids," *Journal of Non-Newton Fluid*, Vol. 59, No. 2, 2009, pp. 251–271.
- [42] Dyka, C.T. and Ingel, R.P., "An Approach for Tension Instability in Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)," *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 57, No. 4, 1995, pp. 573–580.
- [43] Dyka, C.T., Randles P.W. and Ingel, R.P., "Stress Points for Tension Instability in SPH," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, No. 13, 1997, pp. 2325–2341.
- [44] Randles, P.W. and Libersky, L.D., "Normalized SPH with Stress Points," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 10, 2000, pp. 1445–1462.
- [45] Vignjevic, R. and Campbell, J., "A Treatment of Zeroenergy Modes in the Smoothed Particle Hydrodynamics Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 184, No. 1, 2000, pp. 67–85.
- [46] Lehnart, A., Fleissner, F., and Eberhard, P., "Using SPH in a Co-simulation Approach to Simulate Sloshing in Tank Vehicles," *9th International SPHERIC Workshop*, Paris, France, 2014, pp. 240–245.
- [47] Barcarolo, D., Candelier, J., Guibert, D. and de Leffe, M., "Hydrodynamic Performance Simulations Using SPH for Automotive Applications," *9th International SPHERIC Workshop*, Paris, France, 2014, pp. 321–326.
- [48] Grenier, N., Le Touzé, D., Colagrossi, A., Antuono, M., and Colicchio, G., "Viscous Bubbly Flows Simulation with an Interface SPH Model," *Ocean Eng.*, 2013, Vol. 69, pp.88–102.
- [49] Shadloo, M., Rahmat, A. and Yildiz, M.A., "Smoothed Particle Hydrodynamics Study on the Electrohydrodynamic Deformation of a Droplet Suspended in a Neutrally Buoyant Newtonian Fluid," *Computational Mechanics*, Vol. 52, No. 3, 2013, pp. 693–707.

- Flow over an Airfoil and Square Obstacle by SPH Method,” *5th International SPHERIC Workshop*, Manchester, UK. SPHERIC, 2010, pp. 37–41.
- [69] González, L.M. and et al. “WSPH and ISPH Calculations of a Counter-rotating Vortex Dipole”, *5th International SPHERIC Workshop*, Manchester, UK. SPHERIC, 2010, pp. 158–65.
- [70] Groenenboom, P.H.L., “SPH for Two-phase Fluid Flow Including Cavitations,” *7th International SPHERIC Workshop*, Prato, Italy. SPHERIC, 2012, pp. 333–339.
- [71] Gambioli, F., “Fuel Loads in Large Civil Airplanes,” *4th International SPHERIC Workshop*, Nantes, France, SPHERIC, 2009, pp. 246–53.
- [72] He, X., Zhu, Q., and Chen, L., “Fast Particle Hydrodynamics for Battlefield Visualization,” *International Journal of Advanced Computer Technology*, Vol. 4, No. 21, 2012, pp. 371–379.
- [64] Siemann, M.H., and Groenenboom P.H.L., “Modeling and Validation of Guided Ditching Tests Using a Coupled SPH-FE Approach”, *9th International SPHERIC Workshop*, Paris, France. SPHERIC, 2014, pp. 260–267.
- [65] Benítez, L., Máñez, H., Siemann, M. and Kohlgrueber, D., “Ditching Numerical Simulations: Recent Steps in Industrial Applications,” *Aerospace Structural Impact Dynamics International Conference*, Wichita, Kansa, 2012, pp. 12–40.
- [66] Toso, N.R.S., Contribution to the Modelling and Simulation of Aircraft Structures Impacting on Water, (Ph.D. Thesis), Universität Stuttgart, 2009.
- [67] Hughes, K. et al. “From Aerospace to Offshore: Bridging the Numerical Simulation Gaps—simulation Advancements for F structure Interaction Problem,s” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 61, 2013, pp.48–63.
- [68] Shadloo, M.S., Zainali, M. and Yildiz, M., “Improved Solid Boundary Treatment Method for the Solution of