

الحمد لله
الكریم



دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل سازی عددی جریان گل به روش SPH

نگارنده: مهسا بخارائیان

استاد راهنما :

دکتر رضا نادری

شهریور ۹۶

شماره: ۹۶۲۴/۱
تاریخ: ۹۶/۶/۲۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهسا بخارانیان با شماره دانشجویی ۹۳۰۳۶۳۴ رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان مدلسازی عددی جریان گل به روش SPH که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۸.۵۰ درجه ۶۰) ☒ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر رضا نادری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر امیر بذرافشان مقدم	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ:

ماحصل آموختہ ایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مہر آسمانشان آرام بخش آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین مگاہ زندگی ام، چشمان سبز مادرم

کہ ہرچہ آموختم در مکتب عشق شما آموختم و ہرچہ بگو شتم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانیان را پاس توانم بگویم

امروز، ہستی ام بہ امید شماست و فردا باغ بہشت رضای شما

رہ آوردی کران سنگ ترا ز این ارزان نہاشتم تا بہ خاک پایتان نہار کنم، باشد کہ حاصل تلا شتم نسیم کونہ غبار محبت گیتان را بزوداید

بوسہ بردستان پر مہر تان

پاس

پاس گذار کسانی، هستم که سرآغاز تولد من هستند... از یکی زاده می‌شوم و از دیگری جاودانه... پدری که سپیدی را برتخته سیاه زندگیم

مکاشفت و مادری که تار مویی از او پای من سیاه نماند.

از استاد کرامیم جناب آقای دکتر رضانادی بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل

می‌نمود. به‌خین از دوست عزیزم خانم فیاض و تمامی کسانی که در این راه مریاری و همراهی کردند، کمال تشکر را دارم.

مسابخار لایان

تعهد نامه

اینجانب مهسا بخارائیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی عددی جریان گل به روش SPH تحت راهنمایی جناب دکتر رضا نادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه 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 بافت های آن ها) 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 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

حرکت لایه‌های رسوبی ناپایدار غیر متراکم و متراکم بر روی سطح شیب‌دار (زمین‌لغزش) انواع مختلفی دارد. یکی از انواع زمین‌لغزش‌ها، جریان واریزه‌ای می‌باشد که ممکن است بسیار کند یا با سرعت بسیار زیاد رخ دهد و تأثیرات مصیبت‌باری به‌جای بگذارد. جریان گل یک جریان واریزه‌ای است که در طبقه‌بندی سیالات غیرنیوتنی جای می‌گیرد. در این پژوهش در ابتدا با در نظر گرفتن مدل رفتاری هرشل – بالکلی و روش هیدرودینامیک ذرات هموار به مدل‌سازی جاری شدن مواد گلی در اثر برداشته شدن دريچه پرداخته شده و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که هر دو مدل آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده دارای نتایجی مشابه و قابل قبولی می‌باشند. پس از آن به بررسی تأثیر نوع و میزان پستی و بلندی‌های زمین پرداخته شده است. بدین‌منظور، دو نمونه شیب با انحناء محدب و مقعر با شیب‌های هم‌ارز خود مورد مقایسه قرار داده شد. نتایج نشان می‌دهد که در شیب مقعر، جابجایی و سرعت مواد بیشتر از شیب هم‌ارز خود است و در شیب محدب، مقدار جابجایی و سرعت از شیب هم‌ارز خود کمتر است. در نتیجه استفاده از شیب هم‌ارز برای مدل‌سازی جریان گل همیشه قابل اعتماد نیست. از این‌رو، یک کوه با توپوگرافی واقعی به نرم‌افزار منتقل و مدل‌سازی شد. مقایسه نتایج این مدل‌سازی با مدل‌سازی شیب هم‌ارز آن نشان می‌دهد که در ابتدا که شیب کوه محدب بوده سرعت جریان در کوه کمتر از شیب هم‌ارز خود است اما در دامنه کوه که شیب مقعر بوده سرعت جریان بیشتر از شیب هم‌ارز می‌باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت استفاده از توپوگرافی هر منطقه برای پیش‌بینی طول پیشروی جریان گل به‌جای استفاده از شیب هم‌ارز می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد و نرم‌افزار آباکوس قابلیت خوبی برای انجام اینگونه شبیه‌سازی‌ها را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: جریان گل، روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، مدل هرشل – بالکلی

فهرست مطالب

چکیده ز

فهرست شکل ها ل

فهرست جدول ن

فصل اول ۱

۱- مقدمه ۲

۱-۱ ضرورت انجام پژوهش ۴

۲-۱ معرفی پژوهش ۵

۱-۲-۱ بیان مسئله ۵

۲-۲-۱ هدف از پژوهش ۶

۳-۲-۱ فصل بندی پژوهش ۶

فصل دوم ۷

۲- مقدمه ۸

۱-۲ طبقه بندی زمین لغزش بر اساس تعریف وارس ۹

۲-۲ جریان های با غلظت بالای رسوب ۱۱

۱-۲-۲ نواحی مستعد برای وقوع جریان های با غلظت بالای رسوب ۱۲

۲-۲-۲ جریان گلی ۱۳

۱۴	 خواص فیزیکی سوسپانسیونی گل
۱۵	 اجزاء و پارامترهای فیزیکی
۱۵	 راه های پیش گیری و کاهش خطرات ناشی از جریان گلی
۱۷	 فصل سوم
۱۸	 ۳- هیدرولیک محاسباتی
۲۰	 ۱-۳ نقش روش های عددی
۲۲	 ۲-۳ روش های حل معادلات حاکم بر سیال
۲۲	 ۱-۲-۳ روش مبتنی بر شبکه
۲۴	 ۲-۲-۳ روش بدون شبکه
۲۶	 ۱-۲-۲-۳ روش المان های محدود بدون شبکه بندی (MFEM)
۲۷	 ۲-۲-۲-۳ روش حرکت ذرات نیمه ضمنی (MPS)
۲۸	 ۳-۲-۲-۳ روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)
۳۱	 ۳-۳ تاریخچه SPH
۳۴	 ۴-۳ مدل های رئولوژی
۳۶	 ۱-۴-۳ سیالات غیرنیوتنی
۳۷	 ۵-۳ کارهای انجام شده در زمینه جریان گل
۳۹	 فصل چهارم
۴۰	 ۴- مقدمه

- ۴-۱ معادلات حاکم بر جریان ۴۰
- ۴-۲ روش عددی SPH ۴۱
- ۴-۲-۱ گسسته سازی معادلات در روش SPH ۴۲
- ۴-۲-۲ تابع کرنل ۴۳
- ۴-۲-۲-۱ انتخاب طول هموارسازی h ۴۵
- ۴-۲-۳ گسسته سازی معادلات حاکم ۴۶
- ۴-۳ معادله حالت ۵۰
- ۴-۳-۱ معادله انرژی و منحنی هوگونیوت ۵۰
- ۴-۳-۱-۱ معادله حالت Mie-Gruesisen ۵۲
- ۴-۳-۱-۲ فرم خطی هوگونیوت ($U_s - U_p$) ۵۲
- ۴-۴ حرکت ذرات ۵۳
- ۴-۵ ذرات مرزی ۵۴
- ۴-۵-۱ ذرات مجازی ۵۴
- ۴-۵-۲ ذرات حقیقی ۵۶
- ۴-۵-۳ ذرات مرزی پویا ۵۷
- ۴-۶ تنش برشی در سیالات ۵۸
- ۴-۶-۱ سیالات نیوتنی ۵۸
- ۴-۶-۲ سیالات غیر نیوتنی ۵۹
- ۴-۶-۲-۱ مدل غیرنیوتنی هرشل بالکلی ۶۱

۶۱ ۷-۴ الگوریتم جستجو

۶۳ فصل پنجم

۶۴ ۵- مقدمه

۶۴ ۵-۱ معرفی نرم افزار

۶۵ ۵-۲ فیزیک مسئله

۶۶ ۵-۳ تعریف مشخصات مواد گل

۶۷ ۵-۴ شبیه سازی

۶۸ ۵-۴-۱ نتایج شبیه سازی

۷۷ ۵-۵ بررسی عوامل موثر بر جریان گل

۷۸ ۵-۵-۱ کوه با شیب مقعر

۸۳ ۵-۵-۲ کوه با شیب محدب

۸۸ ۵-۵-۳ کوه با توپوگرافی واقعی

۹۷ فصل ششم

۹۸ ۶- نتایج کلی

۹۹ پیشنهادات

۱۰۰ منابع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲ : طبقه بندی زمین لغزش بر اساس تعریف وارنس ۹
- شکل ۲-۲ شمای کلی حرکت جریان بسیار غلیظ روی یک سطح شیب دار ۱۲
- شکل ۳-۲ نمای کلی از شروع تا خاتمه یک جریان گلی ۱۴
- شکل ۱-۳: رفتار رئولوژیکی مواد با ویسکوزیته مختلف ۳۶
- شکل ۱-۴ نحوه مش بندی در روش المان محدود و روش SPH ۴۲
- شکل ۲-۴ نمایش تابع کرنل و شعاع تأثیر ذره در موقعیت X ۴۳
- شکل ۳-۴ نمایش طول ناحیه پشتیبانی ذره a ۴۵
- نمودار ۱-۴ نمایش شماتیک منحنی هوگونیوت ۵۱
- شکل ۴-۴ چیدمان ذرات مرزی مصنوعی ۵۵
- شکل ۵-۴ ذرات مرزی آینه ای ۵۶
- شکل ۶-۴ موقعیت قرارگیری ذرات مرزی پویا ۵۷
- نمودار ۲-۴ طبقه بندی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی ۵۸
- شکل ۷-۴ دست بندی سیالات غیر نیوتنی بر اساس وابستگی به زمان ۶۰
- شکل ۱-۵ نمای شماتیک مخزن مورد استفاده در مدلسازی ۶۶
- شکل ۲-۵ نحوه مش بندی اجزای مدل در محیط نرم افزار ۶۸
- شکل ۳-۵ نمونه ای از فرم های بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی ۶۹
- شکل ۴-۵ نتایج حاصل از آزمایشگاه در زمان های ۲۲، ۲۶ و ۳۴ ثانیه ۷۰
- شکل ۵-۵ نتایج حاصل از نرم افزار در زمان های ۲۲، ۲۶ و ۳ ثانیه ۷۱
- نمودار ۱-۵ منحنی مکان - زمان نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی بدون اصطکاک ۷۲
- نمودار ۲-۵ منحنی سرعت - زمان برای نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی بدون اصطکاک ۷۳
- نمودار ۳-۵ منحنی جابجایی - زمان نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی با اصطکاک ناچیز ۷۴

- نمودار ۴-۵ منحنی سرعت - زمان برای نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی با اصطکاک ناچیز ۷۵
- نمودار ۵-۵ منحنی جابجایی برای حالت آزمایشگاهی، نرم افزاری با و بدون اصطکاک ۷۶
- شکل ۶-۵ نحوه مش بندی گل در نرم افزار ۷۸
- شکل ۷-۵ نحوه انتشار گل بر روی شیب مقعر در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه ۷۹
- شکل ۸-۵ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز منحنی مقعر در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه ۸۰
- نمودار ۶-۵ منحنی جابجایی - زمان برای شیب مقعر و شیب هم ارز آن ۸۱
- نمودار ۷-۵ منحنی سرعت - زمان برای شیب مقعر و شیب هم ارز آن ۸۲
- شکل ۹-۵ نحوه انتشار جریان بر روی شیب محدب در زمان های ۱۴، ۲۴ و ۳۴ ثانیه ۸۴
- شکل ۱۰-۵ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز با منحنی محدب در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه ۸۵
- نمودار ۸-۵ منحنی جابجایی - زمان برای منحنی محدب و شیب هم ارز آن ۸۶
- نمودار ۹-۵ منحنی سرعت - زمان برای منحنی محدب و شیب هم ارز آن ۸۷
- شکل ۱۱-۵ توپوگرافی کوه گرفته شده از نرم افزار Sketchup ۸۹
- شکل ۱۲-۵ نحوه مش بندی در نرم افزار ۹۰
- شکل ۱۳-۵ نحوه انتشار جریان بر روی کوه با توپوگرافی واقعی در زمان های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه ۹۱
- شکل ۱۴-۵ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز کوه در زمان های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه ۹۲
- نمودار ۱۰-۵ منحنی جابجایی - زمان برای کوه واقعی و شیب هم ارز آن ۹۳
- نمودار ۱۱-۵ منحنی سرعت - زمان برای کوه واقعی و شیب هم ارز آن ۹۴

فهرست جدول

- جدول ۱-۳ : جدول دسته بندی روش های بدون شبکه ۲۶
- جدول ۱-۴ مدل های ریاضی برای شبیه سازی رفتار سیالات غیرنیوتنی ۶۰
- جدول ۱-۵ مشخصات مواد گلی مورد استفاده ۶۷
- جدول ۲-۵ مشخصات مش مورد استفاده ۶۸
- جدول ۳-۵ نتایج کلی برای سه حالت آزمایشگاهی و نرم افزار با و بدون اصطکاک ۷۷
- جدول ۴-۵ مشخصات مواد گلی مورد استفاده ۸۹

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

در چند دهه گذشته، زمین لغزش بسیار مورد توجه قرار گرفته است چراکه این پدیده بسیار فاجعه-بار بوده و باعث تلفات و آسیب‌های جدی جانی و مالی در سراسر جهان شده است [۱]. می‌توان زمین-لغزش را به جریان‌های واریزه‌ای، سقوط آزاد، خزش، واژگونی و زمین لغزش انتقالی تقسیم کرد که در این میان جریان‌های واریزه‌ای خود شامل جریان گل و بهمن می‌شود [۲].

جریان گل یک نوع جریان واریزه‌ای با تمرکز بالای رسوب است که توسط غلظت رس و سیلت مشخص می‌شود. علل بسیاری ممکن است موجب ایجاد این جریان شود که می‌توان به ریزش باران، رانش زمین در زیردریا، شکست سد و فعالیت‌های انسانی اشاره کرد. از جمله ویژگی‌های پیچیده جریان گل می‌توان به نامشخص بودن میزان ویسکوزیته مایع، ویژگی آشفستگی برخی از آن‌ها و چند فاز بودن این جریان‌ها اشاره کرد. جریان گل می‌تواند منجر به خسارات عمده به ساختارهای حفاظت رودخانه و دیگر سازه‌های هیدرولیکی شود. بنابراین، شبیه‌سازی این جریان به منظور روشن شدن تأثیر جریان در طراحی و بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی برای کاهش اثرات مخرب ضروری است.

به‌طور سنتی، روش‌های تجربی برای پیش‌بینی رفتار جریان گل انجام شده است. اگرچه وجود خطای اندازه‌گیری، هزینه بالا، تأثیر مقیاس اندازه‌گیری از معایب این روش‌ها بشمار می‌آید، با این وجود، خواص رئولوژیکی جریان گل مانند ترکیبات، چگالی و درصد رسوبات از طریق روش‌های تجربی مشخص می‌شود. با پیشرفت قدرت کامپیوترها، مدل‌های ریاضی گسترده‌ای در حال حاضر برای مدل‌سازی جریان گل در حالت دو یا سه بعدی بکار برده می‌شود. تاکنون، دو روش ریاضی برای توصیف جریان‌های چند فاز مانند جریان گل ارائه شده است. در روش اول، که رایج‌تر است، از معادلات جداگانه برای شبیه‌سازی فاز جامد و مایع استفاده می‌شود. در این روش، از معادلات پیوستگی و مومنتم برای شبیه‌سازی فاز مایع و از مدل توزیع توده برای شبیه‌سازی انتقال رسوبات

استفاده می‌شود. اما این روش دارای مشکلاتی در ادغام معادلات برای فاز مایع و جامد است. در روش دوم، ترکیب آب و رسوبات به‌عنوان یک مایع غیر نیوتنی، که در آن رابطه بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی غیرخطی است، در نظر گرفته می‌شود. درواقع سیالات غیر نیوتنی، سیالاتی هستند که گرانش آن‌ها با نرخ کرنش وارد بر آن‌ها تغییر می‌کند و درنتیجه این‌چنین سیالات فاقد گرانشی معینی می‌باشند. بنابراین، در روش دوم نیازی به بررسی توزیع فشار منفذی و کشش سطحی موضعی نیست و از یک دستگاه معادلات واحد با یک مدل غیر نیوتنی، برای محاسبه ویسکوزیته غیرخطی و شبیه‌سازی رفتار جریان گل استفاده می‌شود. مدل غیر نیوتنی و روش عددی مناسب، دو موضوعی است که باید در شبیه‌سازی جریان گل به آن‌ها توجه شود. مدل‌های ویسکوپلاستیک معمولاً به‌عنوان مدلی برای توصیف ویسکوزیته سیال‌های غیر نیوتنی (ازجمله جریان گلی که تحت وزن خود جاری می‌شود) به کار می‌روند. مواد ویسکوپلاستیک به‌وسیله تنش تسلیم توصیف می‌شوند که در زیر این تنش مواد تغییر شکل نمی‌دهند و در بالای آن تغییر شکل خواهند داد و جاری می‌شوند. مدل‌های ویسکوپلاستیک دارای معادلات ساختاری مختلفی هستند مانند بینگهام، هرشل – بالکلی، کاسون و مدل‌های ویسکوپلاستیک رایجی که برای توصیف رئولوژی نسبتاً پیچیده جریان گل استفاده می‌شوند. تجربیات مختلف در رابطه با خواص رئولوژیکی به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی مختلف حاکی از آن است که مدل هرشل – بالکلی مدل مناسب برای توصیف خواص جریان گل می‌باشد. روش‌های عددی حل معادلات سطح آزاد (جریان گل) را می‌توان به دو بخش مبتنی بر مش و بدون مش دسته‌بندی کرد. روش‌های عددی مبتنی بر شبکه مانند روش المان محدود^۱ (FEM) ابزار مفیدی برای تحلیل مسائل و حل مشکلات عمده علمی و مهندسی است. اما این روش با مسائل با تغییرشکل‌های بزرگ مشکل دارد. در این روش ممکن است مش بندی در هنگام تغییرشکل‌های بزرگ دچار چرخش و اعوجاج و ... شوند. درنتیجه استفاده از مش بندی مجدد باعث افزایش پیچیدگی مسائل و زمان حل

^۱Finite Element Method

آن می‌شود. به‌منظور جلوگیری از این مشکلات عددی، روش‌های بدون شبکه در مهر و موم‌های اخیر توسعه‌یافته. در مقایسه با روش مبتنی به شبکه این روش بر اساس تقریب مبتنی بر نقاط می‌باشد. درواقع به‌جای یک شبکه، از یکسری گره، که به‌طور تصادفی توزیع شده است، برای حل انواع انتگرال‌ها و یا معادلات دیفرانسیلی جزئی با شرایط مرزی مختلف استفاده می‌شود که نتیجه آن راه‌حل عددی دقیق و پایدار است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ (SPH) یکی از روش‌های قدرتمند بدون شبکه است که اخیراً در شبیه‌سازی مسائل سطح آزاد مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

۱-۱ ضرورت انجام پژوهش

در دهه‌ی اخیر، تلاش‌های زیادی برای فهم انتشار و رفتار رسوب جریان واریزه‌ای صورت گرفته است. به دلیل دشواری اندازه‌گیری هم‌زمان وقایع، بیشتر تحقیقات در رابطه با جریان واریزه‌ای، به-وسیله آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته که دارای پارامترهای پیش محاسبه‌شده یا واسنجی شده‌ای می‌باشند. بنابراین شبیه‌سازی عددی برای بازسازی انتشار جریان واریزه‌ای به روشی ایده‌آل تبدیل شده است. جریان واریزه‌ای یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های طبیعی در مناطق کوهستانی به شمار می‌رود. فهم و بازسازی دقیق رفتار جریان‌های واریزه‌ای مختلف، در توسعه معیارهای طراحی پیشرفته برای پیش‌گیری از چنین خطرهایی ضروری است. گرچه فرد می-تواند مکان و زمان وقوع جریان واریزه‌ای را متصور شود، با این حال ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی آن (حجم، چگالی، سرعت) به دلیل نشأت گرفتن از منبع و استمرار داشتن تا منطقه رسوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، مدل‌های ریاضی تا اندازه‌ای پیشرفت کرده‌اند که می‌توانند دینامیک جریان واریزه‌ای را توصیف کنند [۴].

در حال حاضر محققان زیادی در حال برآورد خطرات جریان واریزه‌ای در ایالت متحده آمریکا، ژاپن، نیوزلند، قزاقستان و کوهستان آلپ به‌منظور شناسایی مناطق پرخطر می‌باشند به‌گونه‌ای که

^۱ Smoothed Particles Hydrodynamics

بتوانند عملیات کمک‌رسانی، بستن جاده‌ها، تخلیه و عقب‌نشینی یا فعالیت‌های بهسازی را با موفقیت به انجام برسانند. سرتاسر مناطق جنوبی کالیفرنیا در ایالت آمریکا، با جریان‌های واریزه‌ای پرمخاطره روبرو است. با وقوع بارندگی شدید در ۲۷ ژوئن ۱۹۹۵ ارتفاع بارندگی در مدت ۱۶ ساعت به ۳۰ اینچ رسید و صدها سیلاب واریزه‌ای در کوهستان‌های کالیفرنیا به وقوع پیوست. پدیده‌ی گرم شدن اقیانوس در ایالت یوتای آمریکا باعث ایجاد بارندگی بیشتر از حد معمول و ایجاد سیلاب‌های واریزه‌ای بی‌شماری شد. مناطق شمالی کشورمان به‌ویژه شهر ماسوله استان گیلان به دلیل کوهستانی بودن منطقه و بارش رگبارهای شدید فصلی در اواخر تابستان و اوایل بهار به‌صورت دائم در معرض وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای هستند [۵].

شناخت و مطالعه مشخصات جریان در سواحل و رودخانه‌ها، برای طراحی سازه‌های مختلف مرتبط و طرح‌های سامان‌یافته، یکی از موضوعات مهم مهندسی آب است. هزینه بالای ساخت مدل‌های فیزیکی برای مطالعه جریان‌ها و افزایش قدرت رایانه‌ها در حال حاضر باعث شده تا مدل‌های ریاضی به‌عنوان ابزاری انعطاف‌پذیر و اقتصادی در این زمینه موردتوجه محققان و متخصصان قرار گیرد.

۲-۱ معرفی پژوهش

۱-۲-۱ بیان مسئله

در این پژوهش جریان گل به روش هیدرودینامیک ذرات هموار و توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی مدل غیر نیوتنی هرشل - بالکلی مورد استفاده قرار گرفته است. سپس به‌منظور صحت‌سنجی، یک نمونه شکست سد و جاری شدن گل و رسوبات که در آزمایشگاه انجام شده، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی و نتایج حاصل با نمونه آزمایشگاهی مورد مقایسه واقع شده است.

۱-۲-۲ هدف از پژوهش

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی جریان گل به روش SPH و بررسی روند انتشار، طول پیشروی و سرعت جریان و عوامل موثر بر این پارامترها است. همچنین در اینجا توانایی روش بدون شبکه و مدل‌های غیر نیوتنی برای شبیه‌سازی این گونه جریان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲-۳ فصل بندی پژوهش

در فصل اول که از پیش روی گذشت به معرفی مقدمه و کلیاتی از این پژوهش، شامل معرفی جریان گل، ضرورت و هدف انجام پژوهش حاضر پرداخته شد.

در فصل دوم به بررسی معرفی انواع زمین‌لغزش‌ها، جریان گل و مشخصات آن‌ها پرداخته می‌شود.

در فصل سوم روش‌های مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته می‌شود.

در فصل چهارم معادلات حاکم بر جریان معرفی می‌شود.

در فصل پنجم مدل‌های ریاضی جریان گل و مدل‌سازی آن توسط روش عددی نشان داده شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی برای اطمینان از صحت آن، مورد مقایسه قرار گرفته شده است و در نهایت به ارائه نتایج و تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

در نهایت در فصل ششم، جمع‌بندی نتایج پژوهش و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده، ارائه می‌گردد.

فصل دوم

جریان گل

۲- مقدمه

زمین لغزش و سیل از جمله بلایای طبیعی هستند که هر یک به نوبه خود باعث بروز خسارات و تلفات جانی و مالی فراوانی می شوند. رخداد هم زمان این دو پدیده می تواند منجر به جریان های واریزه ای شود. مواد و مصالح از هم گسسته تشکیل دهنده شیب ها زمانی که توسط آب اشباع شوند، به علت افزایش وزن، تحت تأثیر نیروی گرانش به صورت روانه های گلی و یا مخلوط گل و خاک و سنگ در امتداد شیب ها به سمت پایین سرازیر می شوند و در هنگام حرکت خود به دلیل داشتن توان تخریبی بالا تمامی موانع و تأسیسات موجود بر سر راه (مانند درخت ها، ساختمان ها، جاده ها و ..) را تخریب و با حمل مواد حاصل از تخریب دامنه به پایین دست، باعث انسداد دهانه پل ها و آبروها می شوند [۸-۶].

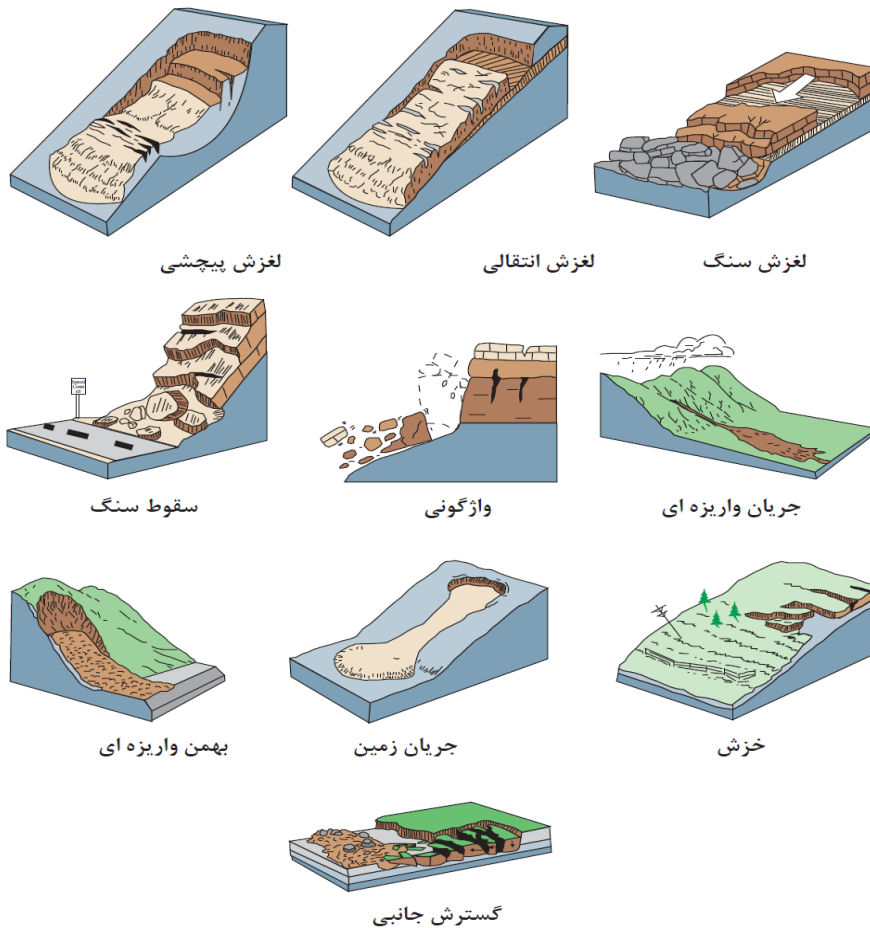
به طور کلی زمین لغزش اصطلاحی است که دربرگیرنده طیف گسترده ای از فرایندهایی است که سبب جابجایی مواد تشکیل دهنده دامنه شامل سنگ، خاک، مواد مصنوعی یا ترکیبی از آنها به سمت پایین دامنه می شود.

سیستم طبقه بندی زمین لغزش ابتدا توسط وارنس^۱ (۱۹۷۸) ابداع شد و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. نوع ماده یکی از عوامل مؤثر بر رفتار زمین لغزش است. در نتیجه وارنس زمین لغزش را بر اساس نوع حرکت و مواد تشکیل دهنده طبقه بندی کرد که به عنوان ساده ترین و رایج ترین طبقه بندی مورد استفاده قرار می گیرد [۹].

^۱ Varnes

۱-۲ طبقه بندی زمین لغزش بر اساس تعریف وارنس

طبقه بندی زمین لغزش بر اساس تعریف وارنس در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ : طبقه بندی زمین لغزش بر اساس تعریف وارنس [۹]

- لغزش پیچشی^۱ : در این لغزش سطح گسیختگی به صورت منحنی مقعر رو به بالا است و حرکت شیب به صورت چرخشی حول محور موازی سطح زمین می باشد.

^۱ Rotational landslide

- لغزش انتقالی^۱ : در این لغزش، حرکت توده در امتداد سطح و با چرخش کم است.
- سقوط سنگ^۲ : سقوط، حرکت ناگهانی موادی مانند سنگ یا تخته‌سنگ از دامنه‌های شیب‌دار و یا صخره‌ها می‌باشد.
- واژگونی^۳ : واژگونی زمانی رخ می‌دهد که یک گسیختگی کششی در اثر کوه یخی، پوشش گیاهی یا سایر عوامل ناپایدار کننده سبب چرخش مواد حول یک نقطه شود.
- خزش^۴ : یک حرکت بسیار کند روبه پایین شیب متشکل از خاک یا سنگ است. علت این حرکت تنش برشی‌ای است که سبب ایجاد یک تغییر شکل دائمی اما بسیار کوچک و ایجاد شکست برشی می‌شود.
- گسترش جانبی^۵ : گسترش جانبی کاملاً قابل تشخیص است چراکه آن‌ها معمولاً در دامنه‌های بسیار ملایم و یا زمین مسطح رخ می‌دهند. اغلب، حرکت مواد در این زمین‌لغزش‌ها همراه با شکستگی برشی و یا کششی است. گسترش جانبی معمولاً به‌طور ناگهانی و با حرکت سریع زمین همراه است.
- جریان‌ها: جریان‌ها خود به دودسته جریان واریزه و جریان زمین طبقه‌بندی می‌شوند.
- جریان واریزه‌ای^۶ : جریان واریزه‌ای یک حرکت سریع توده متشکل از خاک، سنگ، مواد آلی، هوا و آب است که به صورت دوغاب به سمت پایین حرکت می‌کنند. جریان واریزه‌ای شامل کمتر از ۵۰ درصد ریزدانه است. این جریان عموماً به‌علت جریان آب سطحی شدید ناشی از

^۱ Translational landslide

^۲ Rackfall

^۳ Toppel

^۴ Creep

^۵ Lateral spreads

^۶ Debris flow

بارندگی ایجاد می‌شود. تفاوت جریان واریزه‌ای با دیگر جریان‌ها، در اشباع بودن و وجود بخش عظیمی مواد در سائز سیلت و ماسه است.

- جریان زمین^۱: جریان زمین دارای یک شکل ساعت‌شنی به‌خصوصی است. مواد روی شیب به- صورت مایع به پایین حرکت کرده و در نوک شیب یک فرورفتگی ایجاد می‌کنند. این جریان معمولاً در شیب‌ها با مواد ریزدانه یا سنگ‌های رسوبی تحت شرایط اشباع رخ می‌دهد [۹].

۲-۲ جریان‌های با غلظت بالای رسوب

جریان با غلظت بالای رسوب به جریان‌هایی گفته می‌شود که مقدار زیادی رسوب با خود حمل کرده که این امر بر زبری هیدرولیکی جریان تأثیر قابل‌توجهی دارد. جریان‌های واریزه‌ای، جریان‌های گلی و سیلاب گلی سه نوع از جریان با غلظت بالای رسوب می‌باشند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

جریان واریزه‌ای: به جریان‌هایی با غلظت بالای رسوب اطلاق می‌شود که ۷۰ تا ۹۰ درصد وزن مواد جامد آن را ذرات درشت‌دانه مانند قلوه‌سنگ، سنگ خردشده (حتی با قطر بیش از ۲ متر) و بعضاً تنه درخت تشکیل می‌دهد.

جریان گلی: به جریان‌هایی با غلظت بالای رسوب اطلاق می‌شود که میزان رسوبات چسبنده در آن‌ها مقدار تعیین‌کننده‌ای داشته باشد و حداقل ۵۰ درصد وزنی رسوبات را ماسه، لای و رس تشکیل دهد.

سیلاب گلی: به جریان‌ها با غلظت بالای رسوب اطلاق می‌شود که از ذرات غیر چسبنده (مانند ماسه) تشکیل شده‌اند. این‌گونه جریان‌ها، به‌خصوص در غلظت رسوبی بیشتر از ۴۰ درصد، آشفته می‌باشند [۱۰].

^۱ Earth flow

۱-۲-۲ نواحی مستعد برای وقوع جریان های با غلظت بالای رسوب

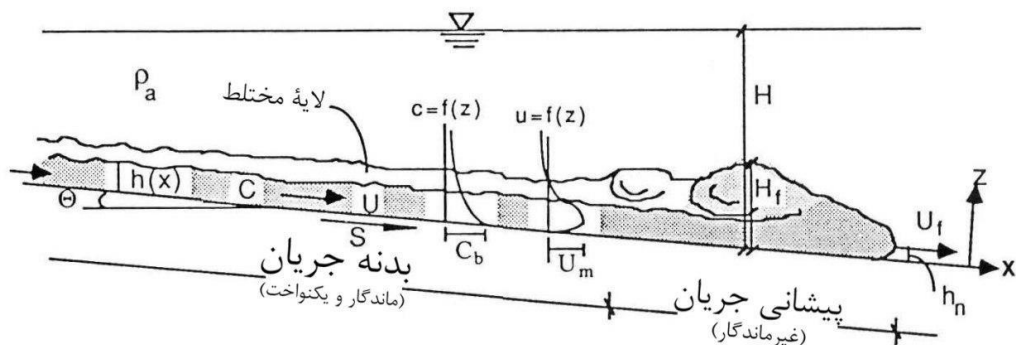
بررسی دقیق این جریان ها نشان می دهد که این پدیده ها اغلب در نواحی زیر به وقوع می پیوندند:

۱- نواحی نیمه خشک

۲- نواحی کوهستانی با شیب تند

۳- نواحی آتشفشانی

در نواحی نیمه خشک، رگبارهای شدید در حوزه های کوچک سبب اشباع سریع خاک و افزایش فشار آب منفذی و به دنبال آن، موجب حرکت خاک های تحکیم نیافته بر روی سنگ بستر می شود. در نواحی کوهستانی که پوشش گیاهی وجود ندارد، رگبارهای شدید و یا ذوب سریع برف موجب اشباع شدن خاک و حرکت توده های خاک می شود. شکل (۲-۲) شمای کلی حرکت جریان بسیار غلیظ بر روی یک سطح را نشان می دهد که از دو بخش، پیشانی جریان (حالت غیر ماندگار) و بدنه جریان (جریان ماندگار و تقریباً یکنواخت) تشکیل شده است [۱۰].



شکل ۲-۲ شمای کلی حرکت جریان بسیار غلیظ روی یک سطح شیب دار [۱۱]

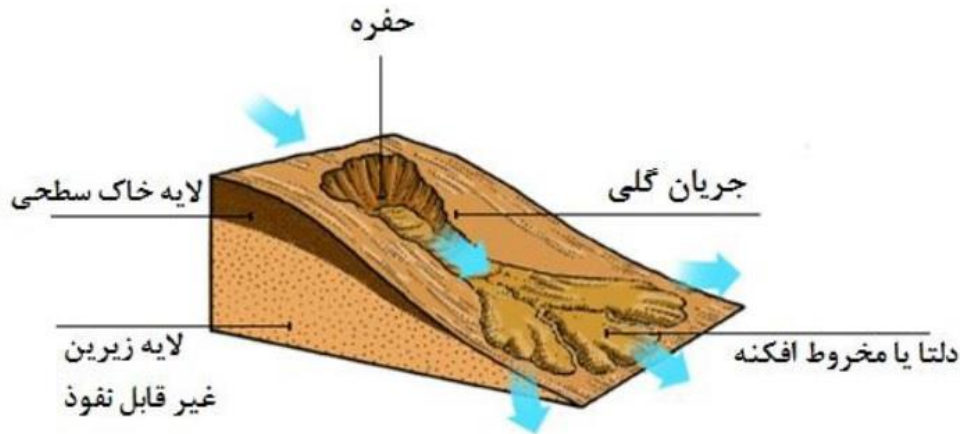
۲-۲-۲ جریان گلی

جریان گل یک نوع جریان بسیار غلیظ چند فازي است که توسط غلظت بالای گل و لای و رس مشخص می‌شود. علل بسیاری از جمله بارش باران شدید، خزیدن ناشی از رانش زمین، شکست سد در بستر شیب‌دار و فعالیت‌های انسانی می‌تواند سبب وقوع این‌گونه جریان‌ها شود. در جریان‌های چند فازي، سیالات بسیار چسبناک می‌باشند.

جریان‌های گلی عموماً ریزدانه بوده و حداقل ۵۰ درصد آن‌ها را ماسه، سیلت و رس تشکیل می‌دهد، درحالی‌که جریان‌های واریزه‌ای حداقل دارای ۱۵ درصد سنگ‌های درشت‌دانه می‌باشند. جریان خروجی از لوله تخلیه یک لایروب و یا دریچه تحتانی سدهای بلند هنگام فلاشینگ نیز ممکن است از نوع جریان‌های گلی باشد. باید توجه داشت که مابین سیلاب‌های گلی و جریان‌های گلی تفاوت وجود دارد. سیلاب‌های گلی نوعی از جریان‌های با غلظت بالا می‌باشند که در مورد آن‌ها معادلات انتقال رسوب برای بیان دینامیک جریان استفاده می‌شود ولی جریان‌های گلی نوعی زمین‌لغزش محسوب می‌شوند و در بحث پایداری شیب‌ها مطرح می‌گردند. از لحاظ مهندسی بررسی و پیش‌بینی حداکثر طول پیشروی جریان گلی، سرعت پیشانی جریان و نهایتاً شکل نهایی و ضخامت توده گلی ته‌نشین شده حائز اهمیت است. خواص رئولوژیکی جریان گلی و واریزه‌ای به عوامل مختلفی از جمله غلظت مواد جامد معلق، خاصیت چسبندگی، توزیع دانه‌بندی، شکل دانه‌ها، اصطکاک دانه‌ای و فشار حفره‌ای بستگی دارد. جریان‌های گلی با غلظت خیلی زیاد معمولاً از نوع جریان آرام (لایه‌ای) می‌باشند. در شکل (۲-۳) نمای کلی از شروع تا خاتمه یک جریان گلی نشان داده شده است.

تاکنون هیچ معیاری قادر به دسته‌بندی مرز رفتار چسبندگی و دانه‌ای نبوده است. تحولات اخیر در مطالعات ترکیب آب و ریزدانه حاکی از آن است که در یک غلظت مشخص خاک رفتار این ترکیب عمدتاً با درصد خاک رس تغییر می‌کند. برای کسر بسیار کمی از خاک رس، رفتار ریزدانه حاکم شده

و پدیده جریان آواره‌ای ریزدانه پدیدار می‌شود. در صورتی که میزان رس زیاد باشد، این ترکیب به صورت سیال ویسکوپلاستیک رفتار می‌کند و مدل هرشل- بالکی برای پیش‌بینی رفتار آن‌ها نسبتاً دقیق می‌باشد [۱۰].



شکل ۲-۳ نمای کلی از شروع تا خاتمه یک جریان گلی [۱۲]

۲-۲-۱ خواص فیزیکی سوسپانسیونی گل

پدیده‌شناسی رفتار سیال از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم برای مایعات که دارای اجزاء ثابت و ساده‌ای هستند، می‌تواند کافی باشد. ایجاد ارتباط بین خواص رئولوژیکی سوسپانسیون گل و ساختار و پارامترهای فیزیکی آن، نیازمند تلاش‌های بسیاری است. داشتن درک کلی از انواع رفتار گل با استفاده از مطالعات رئولوژیکی سوسپانسیونی گل و اصلاح یا پیش‌بینی رفتار دستگاه‌های مختلف، کمک شایانی به شناخت مشخصات حالت خمیری گل می‌کند. برای مشخص کردن سوسپانسیون گل طبیعی و پارامترهای فیزیکی اصلی آن‌ها، باید از بررسی اجزاء آن‌ها شروع کرد [۱۰].

۲-۲-۲ اجزاء و پارامترهای فیزیکی

مطالعات دینامیک جریان واریزه‌ای یا جریان گلی، در مخلوط‌های آب- واریزه طبیعی (شامل آب و دانه‌هایی از سایزهای مختلف) بررسی می‌شود. این نوع مواد اغلب به‌طور کلی از یک حالت خمیری از دانه‌های درشت در یک پراکندگی کلوئیدی (مخلوط رس - آب) تشکیل می‌شوند.

سوسپانسیون گل طبیعی عمدتاً دربردارنده آب و دانه‌هایی است که دامنه اندازه آن‌ها از $0.1 \mu m$ تا حدود 10 m متغیر می‌باشد. از دیگر اجزاء در مخلوط می‌توان به هوا، گیاهان و بقایای حیوانات و غیره اشاره نمود که البته غلظت آن‌ها در مخلوط نسبتاً کم است [۱۰].

۲-۲-۳ راه‌های پیش‌گیری و کاهش خطرات ناشی از جریان گلی

به‌منظور کاهش خسارات ناشی از جریان‌های گلی می‌بایست ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

(۱) تغییر مسیر جریان

(۲) به‌راه انداختن مکرر جریان واریزه‌ای و گل در کانال

(۳) انتقال امکانات

(۴) تعمیر مسیر (تمیزکاری)

اگر منطقه‌ای برای ذخیره واریزه و گل ناشی از جریان گلی وجود دارد، می‌توان با مدیریت صحیح و با تکرار جریان گلی توسط انسان، جریان گل را به آن منطقه هدایت نمود و به این وسیله از خسارات وارده به مناطق شهری، مناطق تفریحی و مراعات در معرض جریان جلوگیری کرد. یک‌راه برای کاهش این خسارات وجود بندهایی است که حرکت جریان گلی را بر روی مخروط‌افکنه‌ها به سمت بخشی از مخروط افکنه که برای ته‌نشینی جریان گل اختصاص داده، هدایت می‌کنند.

انحراف جریان، باعث ایجاد پراکندگی در جریان می‌شود و امکان بررسی فشار ضربه‌ای جریان، بارهای ایستایی و جریان سطحی روی جریان گل ته‌نشست را فراهم می‌سازد. دیوارهای انحرافی می‌تواند از بتن، سیمان، خاک و یا خاک‌ریز پله‌ای مانند که در دو طرف کانال به‌صورت مورب ریخته می‌شود، ساخته‌شده باشد.

ورود یک جبهه از مواد گلی می‌تواند بسیار مخرب باشد. در نتیجه، کاهش قدرت تخریب پیشانی موج جریان به‌عنوان عامل مؤثر در کاهش خطر سیلاب، توسط طراحی عمق و سرعت جریان انجام می‌گیرد [۱۰].

فصل سوم

روش های مدل سازی عددی

۳- هیدرولیک محاسباتی

سرگذشت پیدایش و گسترش دینامیک سیالات محاسباتی را نمی‌توان جدا از تاریخ اختراع، رواج و تکامل کامپیوترها دانست. تا حدود جنگ جهانی دوم، بیشتر روش‌های حل مسائل دینامیک سیالات دارای ماهیتی تحلیلی یا تجربی بودند. مانند تمامی نوآوری‌های برجسته علمی، اشاره به زمان دقیق آغاز دینامیک سیالات محاسباتی ناممکن است. در این رابطه، نخستین کار باارزش در این رشته را به ریچاردسون نسبت می‌دهند، که در سال ۱۹۱۰ میلادی محاسبات مربوط به نحوه‌ی پخش تنش در یک سد ساخته‌شده از مصالح بنایی را به انجام رسانید.

بر اساس گزارش‌ها آکادمی علوم فرانسه، سنت – ونانت^۱ نخستین بار معادلات دیفرانسیلی جریان غیرماندگار سیلاب و معادلات آب کم‌عمق (شامل معادله مونتوم و معادله پیوستگی جریان) را ارائه نمود. این معادلات غیرخطی و از نوع هیپربولیک می‌باشند و حل تحلیلی آن‌ها بدون در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده بسیار دشوار و با مشکلاتی مواجه است از این‌رو تاکنون حل تحلیلی کاملی از این معادلات ارائه نشده است. اصولاً بخش اعظم هیدرولیک سیلاب به روش‌های حل این معادلات اختصاص دارد.

برای نخستین بار سنت – ونانت در سال ۱۸۷۱ با صفر در نظر گرفتن شیب‌خط انرژی و شیب بستر جریان، مبادرت به حل تحلیلی این دستگاه معادلات نمود. پس از او در سال‌های بعد، به دلیل به‌کارگیری این معادلات در تجزیه و تحلیل مسائل جریان غیرماندگار مخصوصاً در روندیابی سیل، این دستگاه معادلات موردتوجه اندیشمندان و صاحب‌نظران هیدرولیک واقع گردید و به‌منظور حل غیر تحلیلی آن‌ها تلاش‌های زیادی صورت گرفت.

^۱ Saint Vanant

استوکر^۱ در سال ۱۹۵۷ به روش خطوط مشخصه روی آورد. روش او در حل معادلات جریان غیرماندگار دارای دقتی از مرتبه اول بود. پس از آن، لاکس و وندروف در سال ۱۹۵۷ الی ۱۹۶۰ به روش حل عددی صریح روی آوردند. این روش دارای دقتی از مرتبه دوم بود و به زمان حساسیت نشان می داد. این حساسیت به زمان محاسبات، پایداری روش را خدشه دار می نمود.

در سال ۱۹۵۷ ریتمایر^۲ برای اولین بار از روش عددی غیرصریح، جهت تحلیل مسائل حرارت استفاده نمود. ابداع روش های صریح، غیرصریح و خطوط مشخصه باعث رونق در به کارگیری معادلات غیرماندگار و توسعه این روش ها توسط اندیشمندان و محققین شد. در نتیجه این فعالیت ها روش های جدیدتری مبتنی بر این روش ها ابداع شد. در سال ۱۹۶۳، واسیلیو^۳ که عضو آکادمی علوم روسیه بود با تلاش ها گسترده، روشی را برای حل معادلات جریان غیرماندگار ابداع نمود که از مجموعه روش های غیرصریح به حساب می آید. واسیلیو در این روش، معادلات را با استفاده از روش تفاضل های مرکزی منقطع نمود و با روش جاروب برگشتی^۴ آن ها را حل کرد.

پیچیدگی حل تحلیل معادلات جریان غیرماندگار، سبب شده که پژوهشگران در حل این دستگاه معادلات و به کارگیری آن ها، به ساده گرایی و فرضیات ساده کننده روی آورند و روش های حل خود را بر این فرضیات پایه گذاری کنند. از این رو، روش های ابداع شده دچار عدم دقت و خطا در نتایج بود و همین امر باعث جلب توجه دانشمندان به ارائه روش های نسبتاً دقیق تر شد. در همین راستا، فوکس^۵ در سال ۱۹۶۲ روش خطوط مشخصه را که دقیق تر از سایر روش ها به نظر می رسید، مبنای کار خود قرارداد و روش های هارتری^۶ یا روش های شبکه مستطیلی خود را مطرح نمود. یکی از مزایای روش

^۱ Stocker

^۲ Richtmyer

^۳ Vasiliev

^۴ Double Sweep

^۵ Fox

^۶ Hartree

اخیر، سهولت در شبیه‌سازی کامپیوتری آن بود. آبت^۱ در سال ۱۹۷۰ روش چهار نقطه خود را که بر مبنای خطوط مشخصه بود، با نادیده گرفتن شیب خط انرژی و شیب بستر جریان جهت حل معادلات جریان غیرماندگار ارائه نمود. این روش در بسیاری از مسائل قابل توسعه بود اما تعمیم آن در کانال-هایی با مقطع متغیر با مشکلاتی مواجه بود. او برای اولین بار با استفاده از جبر خطی و اصول ماتریس-ها، معادلات شیب خطوط مشخصه را به دست آورد و استفاده از این روش را در به دست آوردن معادلات دیگر امکان‌پذیر ساخت. عده‌ای با کمک معادله شزی و ادغام آن با معادلات جریان غیرماندگار به معادلات پخشیدگی^۲ در هیدرولیک دست یافتند. این معادله در تجزیه و تحلیل جریان‌های غیرماندگار حائز اهمیت و مبنای روش تشابه پخشیدگی^۳ در روندیابی سیل است. روش‌های حل عددی معادلات جریان غیرماندگار نقش فوق‌العاده مؤثری در به کارگیری و استفاده شایسته از معادلات فوق داشته و تا آنجایی توسعه یافته که هیدرولیک محاسباتی به عنوان یک مجموعه بسیار قوی مورد توجه واقع شد و پیشرفت کامپیوتر و علوم مربوط نیز بیش از پیش به باروری و شکوفایی این روش‌ها کمک نمود. از آن پس، دیگر روندیابی سیل که یکی از مسائل پیچیده جریان‌های غیرماندگار محسوب می‌شد به راحتی انجام پذیرفت و روش‌های متعددی مبتنی بر روش‌های گفته شده به منظور روندیابی سیل ارائه گردید [۱۳].

۳-۱ نقش روش‌های عددی

مدل‌سازی عددی، جنبه‌های مهم یک مسئله فیزیکی را به یک فرم گسسته از توصیف ریاضی تبدیل می‌کند که قابلیت حل کردن مسائل به این طریق (روش‌های عددی) باعث افزایش روزافزون کاربرد این روش‌ها شده است. روش‌های عددی، یک جایگزین مناسب علمی جهت بررسی مسائل به-جای روش‌های تجربی می‌باشند که باعث حذف مشکلات گرانی، وقت‌گیری و خطرناکی روش‌های

^۱ Abbot

^۲ Diffusion equation

^۳ Diffusion analogy method

تجربی می‌شود و در حقیقت روش‌های عددی به‌عنوان پلی بین مدل‌های تجربی و پیش‌بینی‌های تئوریکی به کار می‌رود.

در حقیقت می‌توان این‌گونه بیان کرد که از پدیده‌های فیزیکی مشاهده‌شده، مدل‌های ریاضی با فرضیات و ساده‌سازی‌های ممکن، ایجاد می‌شود. این مدل‌های ریاضی معمولاً به‌صورت معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی و شرایط اولیه می‌باشند. معادلات حاکم ممکن است به‌صورت معادلات دیفرانسیلی معمولی، معادلات دیفرانسیل جزئی و معادلات انتگرالی یا هر حالت دیگری از معادلات ریاضی باشد.

دانستن شرایط اولیه و مرزی امری ضروری برای تعیین رشته متغیرها نسبت به زمان یا مکان می‌باشد. برای حل عددی معادلات حاکم، ما نیازمند تقسیم شکل هندسی فضای مسئله به اعضای ریزتر هستیم. تکنیک گسسته‌سازی محیط معادله برای روش‌های عددی مختلف، گوناگون است. از طرف دیگر، گسسته‌سازی عددی، وسیله‌ای برای تبدیل عمل انتگرال یا مشتق در معادلات حاکم در حالت پیوسته به حالت ناپیوسته است.

بعد از گسسته‌سازی هندسه مسئله و گسسته‌سازی عددی (تقریب تابع)، معادله فیزیکی اصلی به حالت معادلات جبری و معادلات دیفرانسیلی معمولی تبدیل می‌شود که به‌وسیله روش‌های حل معمولی قابل حل می‌باشند.

به‌طور کلی می‌توان مراحل حل عددی را به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- معادلات حاکم

۲- شرایط اولیه و مرزی

۳- تکنیک‌های گسسته‌سازی محیط

۴- گسسته‌سازی عددی

۵- تکنیک‌های عددی برای حل معادلات جبری و یا معادلات دیفرانسیل معمولی [۱۴].

۲-۳ روش‌های حل معادلات حاکم بر سیال

از آنجایی که معادلات حاکم بر حرکت سیال به صورت دستگاه معادلات غیرخطی است، حل تحلیلی آن‌ها جز در موارد ساده، امکان‌پذیر نیست لذا باید این معادلات را به صورت عددی حل نمود. روش‌های متفاوتی برای حل عددی این معادلات وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو بخش مبتنی بر شبکه و بدون شبکه تقسیم‌بندی نمود. روش‌های مبتنی بر شبکه شامل روش اجرا محدود، روش تفاضل محدود و روش حجم محدود است.

۱-۲-۳ روش مبتنی بر شبکه

شبیه‌سازی‌های کامپیوتری یک ابزار بسیار مهم برای حل مسائل عملی و پیچیده علوم مهندسی است. این موضوع نقش مهمی در انجام آزمایش و امتحانات نظری، ارائه فیزیک پیچیده و کمک در تفسیر و حتی کشف پدیده‌های جدید بازی می‌کند. روش‌های عددی مبتنی بر شبکه یا مش مانند روش تفاضل محدود^۱ (FDM)، روش حجم محدود^۲ (FVM) و روش المان محدود (FEM) به طور گسترده در بخش‌های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی^۳ (CFD) و مکانیک جامدات محاسباتی^۴ (CSM) استفاده می‌شود. این روش برای حل معادلات دیفرانسیل یا معادلات با مشتقات جزئی (PDEs) که بر پدیده‌های فیزیکی حاکم است، بسیار مفید است.

مدت‌ها، FDM به عنوان ابزار اصلی برای حل معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی در مسائل با هندسه ساده مورد استفاده قرار می‌گرفت. سپس، از FVM برای حل مسائل جریان سیال استفاده می‌شد و FEM نقش اساسی برای مسائل مکانیک جامدات با هندسه پیچیده بازی می‌کرد [۱۵-۱۷].

^۱ Finite Difference Methods

^۲ Finite Volume Methods

^۳ Computational Fluid Dynamics

^۴ Computational Solid Mechanics

یکی از ویژگی‌های قابل توجه مدل‌های عددی مبتنی بر شبکه تقسیم کردن دامنه پیوسته حل به زیر دامنه‌های گسسته کوچک، از طریق فرآیندی به نام گسسته‌سازی یا مش بندی است. هر نقطه (گره) با یک روش از پیش تعریف شده به وسیله نقشه توپولوژیک، به عنوان یک مش (شبکه) به هم متصل می‌شوند. نتیجه آن ایجاد مش بندی المان‌ها در FEM، سلول‌ها در FVM و شبکه در FDM است. یک سیستم مش متشکل از شبکه، سلول‌ها و یا المان‌ها باید برای ایجاد رابطه بین گره‌ها، قبل از فرایند تقریب معادلات دیفرانسیل یا معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شود. بر اساس مش از پیش تعیین شده، می‌توان معادلات حاکم را با توجه به گره‌ها، به مجموعه‌ای از معادلات جبری برای متغیرهای موجود تبدیل کرد. از این رو، به روش‌های عددی مبتنی بر شبکه توجه فراوانی شد و این روش‌ها در حال حاضر، روش‌هایی غالب برای شبیه‌سازی عددی و حل مشکلات در علوم مهندسی و کاربردی است [۱۸، ۱۹]. با وجود موفقیت‌های بزرگ، روش‌های مبنی بر شبکه در برخی از جوانب دارای مشکلاتی بودند که کاربرد آن‌ها را در حل بسیاری از مسائل پیچیده محدود می‌کرد. مشکل اصلی ایجاد شده به علت استفاده از مش، عدم اطمینان از یکسان بودن شرایط سازگاری عددی با شرایط سازگاری فیزیکی در یک زنجیره می‌باشد. از این رو، استفاده از روش (شبکه / مش) با مشکلات مختلفی در حل مسائل با سطح آزاد، شرایط مرزی متغیر و تغییر شکل‌های بسیار بزرگ و انتشار ترک روبرو شد. علاوه بر این، برای مسائل با هندسه پیچیده، روش مش دشوار، وقت گیر و پرهزینه است [۱۴]. مشکلات و محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه به خصوص در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیک مانند انفجار و ضربه با سرعت بالا کاملاً مشهود است. این ویژگی‌های خاص این گونه مسائل یک چالش بزرگ در شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش مبتنی بر شبکه می‌باشد. از جمله مشکلات این مسائل سرعت بالای ضربه که شامل موج شوک منتشر شده از طریق برخورد و یا ضربه اجسامی که مانند مایعات رفتار می‌کنند، اشاره کرد. تجزیه و تحلیل معادلات اندازه حرکت و معادلات

حالت فشار بالا، توصیفات کلیدی برای بیان رفتار مواد است. در پدیده‌های (HVI)^۱، که تغییر شکل-های بزرگی وجود دارد، یافتن رابطه اندازه حرکت، مرزهای تغییر شکل‌پذیر و سطح آزاد بر اساس روش مبتنی بر شبکه دشوار است [۲۰].

روش‌های مبتنی بر شبکه، برای آن دسته از مسائلی که موضوع اصلی آن وجود مجموعه‌ای از ذرات فیزیکی گسسته به جای یک زنجیر می‌باشد، مناسب نیست. به عنوان مثال فعل‌وانفعالات ستاره‌ها در فیزیک نجوم، حرکت میلیون‌ها اتم در تعادل یا حالت غیرتعادل، رفتار دینامیکی ملکول‌های پروتئین اشاره کرد. شبیه‌سازی این‌گونه مسائل با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه، اغلب انتخاب مناسب نیست [۲۱، ۲۲].

۳-۲-۲ روش بدون شبکه

تحلیل و شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات به‌طور عمده با استفاده از روش‌های متکی بر شبکه متداول مانند روش اختلاف محدود، روش حجم محدود و روش اجزاء محدود انجام می‌شد. این روش-ها که به‌طور گسترده‌ای برای حل مسائل کاربردی و علمی استفاده می‌شوند، روش‌هایی هستند که تاکنون دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه آن‌ها شکل گرفته است. تشابه اصلی این روش‌ها نیاز آن‌ها به یک شبکه اولیه و یا لاگرانژی در ناحیه حل خود است. این روش‌ها در برخورد با مسائلی که شامل سطح آزاد و یا مرزهای متحرک، سطح مشترک متحرک و یا واپیچش زیاد در مسئله باشند بسیار پیچیده خواهند شد و گاهی با مشکل مواجه می‌شوند [۲۳].

در حال حاضر روش‌های بدون شبکه به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی برای مسائل با تغییر شکل‌های زیاد مطرح می‌شود. همان‌طور که از نام آن‌ها پیداست، ویژگی اصلی این روش‌ها عدم نیاز آن‌ها به شبکه برای حل مسائل است و همین ویژگی دلیل استفاده بیشتر این روش‌ها را در حل این‌گونه مسائل دینامیک سیالات محاسباتی آشکار می‌-

^۱ High Velocity Impact

سازد. در این روش‌ها نیز هدف، تبدیل معادلات دیفرانسیلی به دستگاه معادلات جبری است. برای به دست آوردن دستگاه معادلات جبری از گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط پیوسته استفاده می‌شود، اما نقاط گسسته شده در این روش‌ها فاقد هرگونه توزیع منظم و ارتباط از پیش تعیین‌شده‌ای می‌باشند. در این روش‌ها دسته‌ای از نقاط بر روی مرزها قرار می‌گیرند که مرز را تشکیل می‌دهند و دسته‌ای از آن‌ها در داخل محیط حل قرار می‌گیرند [۲۴].

روش‌های بدون شبکه ذره‌ای^۱ (MPMS) به‌طور کلی، به مجموعه‌ای از روش‌های بدون شبکه‌ای برمی‌گردد که از یک مجموعه ذرات گسسته برای ارائه سیستم و ضبط حرکت سیستم استفاده می‌کند.

به‌طور کلی مراحل مدل‌سازی با بکارگیری روش MPMS به‌صورت زیر است.

- ۱- معادلات حاکم با شرایط مرزی مناسب (BC) و یا شرایط اولیه (IC)
 - ۲- تکنیک گسسته‌سازی محیط برای ایجاد ذرات
 - ۳- تکنیک گسسته‌سازی عددی
 - ۴- تکنیک عددی برای حل معادلات جبری حاصل یا معادلات دیفرانسیلی معمولی (ODE)
- در نتیجه اختلاف بین روش‌های بدون مش و روش‌های مش پایه‌ای به شرح زیر است:
- گسسته‌سازی فضا به‌وسیله ذرات
 - توابع، مشتقات و انتگرال‌ها در معادلات حاکم با به‌کار بردن ذرات گسسته‌سازی شده،
- تعریف‌شده است (تقریب ذره) [۲۵].

روش‌های بدون شبکه متعددی وجود دارند که در جدول (۳-۱) به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. تمامی این روش‌ها در یک جنبه باهم مشترک هستند و آن استفاده نکردن آن‌ها از شبکه‌های از

^۱ Meshfree Particle Method

پیش تعیین شده برای درون یابی میدان متغیرهاست. اسامی روش های مختلف بدون شبکه هنوز موضوع بحث است. از آنجاکه اصول این روش ها به سرعت توسعه می یابد، نام های جدیدی نیز به صورت پیوسته پیشنهاد می شود. ممکن است مدتی طول بکشد تا تمام روش های به صورت مناسبی دسته بندی و متحد شوند تا از پراکندگی در این مجموعه اجتناب شود.

جدول ۱-۳: جدول دسته بندی روش های بدون شبکه [۲۶]

Method	System equation	Method of function approximation	Ref
Smoothed particle Hydrodynamics	Strong form	Integral representation	Lucy 1977; Gingold and Monaghan 1977
Finit point method	Strong form	Finite differential Representation; MLS	Liszka and Orkisz 1980; Jensen 1980; Onate et al 1996
Diffuse element method	Weak form	MLS, Galerkin method	Nayroles et al 1992
Reproducing Kernel Particle Method	Strong and weak form	Integral representation	W. K. Liu 1993
Hp-clouds	Weak form	Partition of unity, MLS	Oden and Abani 1994; Armando and Oden 1995
Element Free Galerkin method	Weak form	MLS approximation; Galerkin method	Belytschko et al 1994
Partition of Unity FEM	Weak form	Partition of unity, MLS	Babuska and Melenk 1995
Boundary Node Method	Weak form and local Weak form	Moving Least Square (MLS)	Mukherjee 1997
Meshless Local Petrov-Galerkin method	Local Weak form	MLS approximation, Petrov- Galerkin method	Atluri and Zhu 1998
Pint interpolating Method	Weak form and local Weak form	Point interpolation	G. R. Liu and Gu 1999, 2000
Boundary Point Interpolating Method	Weak form and local Weak form	Point interpolation	G. R. Liu and Gu 2000, 2001

روش های بدون شبکه خاص و معروف دیگری نیز در حرکت توأم با تغییر شکل های بزرگ یک محیط پیوسته که عموماً سیال نامیده می شود، وجود دارند که در ادامه به معرفی برخی از آنها پرداخته می شود [۲۶].

۳-۲-۱ روش المان های محدود بدون شبکه بندی (MFEM)^۱

در این روش سیال را می توان به مجموعه ای از نقاط که در واقع ذرات سیال هستند، تقسیم بندی کرد. هر کدام از این ذرات پارامترهایی مانند سرعت، جرم و چگالی را با خود همراه دارند. معادلات

^۱ Meshless Finite Element Method

حاکم بر جریان سیال یعنی معادلات ناویر - استوکس با یک روش پیش‌بینی تصحیح^۱ حل می‌شود. بدین‌صورت که در مرحله پیش‌بینی، مشخصات جریان از قبیل چگالی، سرعت و موقعیت ذرات در گام زمانی بعدی تخمین زده می‌شوند و سپس در مرحله تصحیح بر اساس فرضیات موجود در معادلات حاکم یک معادله پواسون فشار به دست می‌آید که با حل آن می‌توان این مقادیر را تصحیح کرد. معادلات لاپلاسی^۲ فشار ناشی از تجزیه معادلات، در این روش با روش اجزاء محدود به نام MFEM حل می‌شوند. علاوه بر این دامنه محاسباتی نیز با روش اجزاء محدود گسسته می‌شود و این کار در زمان‌های مختلف با تغییر میدان جریان تکرار می‌شود. این روش را از آن جهت MFEM می‌نامند که هم یک روش اجزاء محدود و هم یک روش بدون شبکه‌بندی است. این روش توانسته است مسائل مربوط به جریان‌های با سطح آزاد را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نماید [۲۶].

۲-۲-۲-۳ روش حرکت ذرات نیمه ضمنی (MPS)^۳

روش MPS یک روش لاگرانژی است که اخیراً توسط کوشیزوکا^۴ و همکارانش پیشنهاد شده است. در این روش، معادلات حاکم بر جریان سطح‌آزاد (معادلات ناویر - استوکس) بر اساس رفتار لاگرانژی ذرات سیال حل می‌گردند. در این روش یک سری نقاط درونی با توزیع دلخواه وجود دارند که درواقع همان ذرات سیال هستند. کلیه متغیرهای مسئله به‌وسیله این نقاط درونیابی و همچنین توسط یک تابع درونیابی محاسبه می‌گردند. همچنین در این روش از یک روش دو گام زمانی برای تجزیه معادلات حاکم استفاده می‌شود. بدین‌صورت که هر گام زمانی اصلی به دو گام زمانی تقسیم می‌شود که گام اول زمانی گامی است مجازی و در آن متغیرهای موردنظر در زمان بعدی تخمین زده می‌شوند و مقادیر تصحیح‌شده این مقادیر با توجه به مقادیر آن متغیرها در گام زمانی قبلی و گام

^۱ Predicted-Corrected Method

^۲ Laplacian

^۳ Moving Particles Semi implicit Method

^۴ Koshizuka

زمانی مجازی و اعمال قیده‌های موجود در معادلات حاکم محاسبه می‌گردند.

روش MPS را می‌توان ترکیبی از دو روش MFEM و SPH دانست. وجه تشابه روش MPS با روش MFEM در الگوریتم تجزیه معادلات حاکم و استفاده از روش دو گام زمانی است و وجه تشابه این روش با روش SPH در استفاده از یک تابع درونیابی برای تبدیل معادلات حاکم به فرم انتگرالی است. این توابع انتگرالی یک تخمین مرکزی از متغیرهای ناحیه در یک نقطه را به دست می‌آورند. اطلاعات تنها در یکسری نقاط مجزا مشخص است و انتگرال‌های به‌وسیله جمع زدن بر روی یکسری نقاط مجاور هم محاسبه می‌شوند.

این روش قابلیت شبیه‌سازی انواع جریان‌ها با سطح آزاد در هر دو حالت تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر را دارا است و می‌تواند تغییر شکل‌ها و ناپیوستگی‌های شدید را به‌خوبی مدل کند. علی‌رغم پیشرفت‌هایی که این روش در سال‌های اخیر برای شبیه‌سازی سیالات در حالات مختلف داشته است، با این وجود هنوز پایداری این روش یک مسئله مهم است و نسبت به پارامترهای موجود در این روش حساس است. اخیراً تلاش‌هایی برای بهبود و اصلاح این روش صورت گرفته است و نتایج قابل قبولی نیز به‌دست آمده است. در این روش مشتق اول توابع پیوسته نمی‌باشند، بنابراین نوسانات موجود در حل عددی این روش بیشتر از روش SPH است [۲۶].

۳-۲-۲-۳ روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

روش SPH یک روش کاملاً لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه‌بندی نیست. این روش اولین بار توسط لوسی^۱ در زمینه مسائل فیزیک‌شناسی به‌کار گرفته شد. از دیگر پیشگامان این روش می‌توان به موناگان^۲ اشاره کرد که علاوه بر مسائل فیزیک نجوم برای اولین بار این روش را برای تحلیل جریان‌های با سطح آزاد به‌کار گرفت و نتایج قابل قبولی نیز کسب کرد. با توجه به قابلیت این

^۱ Lucy

^۲ Monaghan

روش در شبیه‌سازی تغییرات زیاد مربوط به سطوح مشترک از جمله پخش‌شدگی و به هم پیوستن ذرات، تاکنون در محدوده وسیعی از مطالعات از جمله مطالعه جریان چگال، برخورد سیال با سازه‌های جامد و همچنین برخورد اجسام جامد با موفقیت به کار گرفته می‌شود.

اساس و پایه این روش بر تئوری درون‌یابی انتگرالی^۱ بنا نهاده شده است. در این روش اطلاعات مقادیر پارامترهای مختلف سیال از قبیل چگالی، سرعت و فشار که بیانگر ذرات سیال هستند مشخص است. مقدار یک متغیر وابسته، به وسیله جمع زدن بر روی یکسری ذرات مجاور هم محاسبه می‌شوند. معادلات دیفرانسیلی با استفاده از یک تابع درون‌یابی به معادلات انتگرالی تبدیل می‌شوند. مشتقات مکانی به جای کمیت‌های فیزیکی بر روی تابع درون‌یابی که یک تابع تحلیلی و مشتق‌پذیر است، عمل می‌کنند.

به‌طور کلی دو نوع روش SPH تابه‌حال معرفی شده است. در نوع اول یا استاندارد این روش به سیال از این دید نگریسته می‌شود که سیالات تراکم‌پذیر هستند هرچند که این تراکم‌پذیری اندک است. در این روش با برقراری یک معادله ریاضی بین تغییرات چگالی و فشار می‌توان جریان سیالات تراکم‌ناپذیر را شبیه‌سازی کرد. این ضریب تراکم‌ناپذیری مصنوعی باعث می‌شود که در محاسبات عددی گام‌های زمانی کوچکی منظور شود که از نقاط ضعف این روش است، به‌علاوه در این روش مقادیر منفی فشار می‌تواند باعث ناپایداری شود. از این روش به‌عنوان روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر ضعیف^۲ یاد می‌شود (C-SPH). در روش دوم SPH سیالات تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود و با اعمال این قید و با یک روش پیش‌بینی - تصحیح، معادلات ناویر - استوکس حل می‌شوند. از این روش به‌عنوان روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر^۳ (I-SPH) یاد می‌شود [۲۶].

^۱ Integral interpolation

^۲ Weakly Compressible SPH Method

^۳ Incompressible SPH Method

برخی از مزیت‌های ویژه روش SPH نسبت به روش‌های عددی مبتنی بر شبکه عبارت است از:

۱- روش SPH یک روش ذرات با ماهیت لاگرانژی است که می‌توان به‌وسیله آن تاریخچه زمان^۱ ذرات ماده را به دست آورد.

۲- با گسترش ذرات در موقعیت‌های ویژه در حالت اولیه و قبل از تجزیه و تحلیل، می‌توان سطح آزاد، ارتباط مواد و شرایط مرزی متغیر را به‌صورت طبیعی در فرآیند شبیه‌سازی پیش‌بینی کرد درحالی‌که این موضوع در روش اویلری یک چالش بزرگ محسوب می‌شد. درنتیجه SPH یک انتخاب مناسب برای مدل‌سازی سطح آزاد و مسائل جریان‌های سطحی است.

۳- SPH یک روش ذرات بدون استفاده از مش یا شبکه است. این ویژگی بدون مش بودن روش SPH این موقعیت را فراهم می‌سازد که به‌طور مستقیم به بررسی تغییرشکل‌های بزرگ بپردازد چراکه ارتباط بین ذرات از طریق بخش محاسبات تأمین و می‌تواند باگذشت زمان تغییر کند.

۴- در روش SPH، یک‌ذره نشان‌دهنده یک حجم محدود در مقیاس پیوسته است. این روش کاملاً مشابه روش دینامیک ملکولی^۲ (MD)، (که از یک‌ذره برای نشان دادن یک اتم یا ملکول در مقیاس نانو استفاده می‌شود) و روش دینامیک ذرات پویا^۳ (DPD) (که از ذره برای نشان دادن یک دسته ملکول کوچک استفاده می‌شود) است. درنتیجه، تعمیم و گسترش روش SPH و یا ادغام آن با روش دینامیک ملکولی و دینامیک ذرات پویا به‌ویژه در مسائل بیوفیزیک و بیوشیمی امکان‌پذیر است.

۵- SPH برای مسائلی که موضوع مورد بررسی آن‌ها پیوسته نیست، مناسب است. این روش به-ویژه در مهندسی نانو و بیو در مقیاس نانو و میکرو و در اختریف یک در مقیاس نجومی دقیق

^۱ Time history

^۲ Molecular Dynamics Method

^۳ Dissipative Particle Dynamics Method

است. برای این گونه مسائل، SPH به عنوان یک انتخاب خوب برای شبیه سازی پیشنهاد می-شود.

۶- SPH در اجرا نسبتاً ساده تر و توسعه آن برای مدل های عددی سه بعدی نسبت به روش های مبتنی بر شبکه راحت تر است [۲۷].

با توجه به مزایای این روش بدون شبکه در این پروژه برای شبیه سازی جریان گل از روش SPH استفاده شده است و در ادامه به طور مختصر تاریخچه ای از پیدایش و پیشرفت های این روش بیان می-شود.

۳-۳ تاریخچه SPH

الگوریتم های اولیه SPH از نظریه احتمالی^۱ اتخاذ و از مکانیک آماری به طور گسترده برای تخمین عددی استفاده می کرد. در این الگوریتم ها اندازه حرکت خطی و زاویه ای حفظ نمی شد. با این حال، آن ها نتایج منطقی خوبی را برای بسیاری از پدیده های اختریفی یک ارائه می دادند. در شبیه سازی مسائل مکانیک جامدات و سیالات، گسسته سازی درست معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم برای دینامیک سیالات و جامدات، یک چالش بزرگ محسوب می شد.

با توسعه روش SPH و کاربردهای گسترده آن در طیف وسیعی از مسائل، توجه بیشتری به آن داده و برخی از اشکالات ذاتی این روش نیز شناسایی و در نتیجه تغییراتی برای بهبود این روش ارائه شد. به عنوان مثال گینگلد^۲ و موناگان غیر پیوستگی اندازه حرکت خطی و زاویه ای الگوریتم SPH را پیدا و سپس الگوریتم SPH را معرفی کردند که هر دو حالت اندازه حرکت خطی و زاویه ای را پوشش

^۱ Probability theor

^۲ Gingold

می‌داد. هو و آدامز^۱ نیز یک الگوریتم برای جریان ویسکوز تراکم‌ناپذیر ارائه دادند. در همین راستا، تحقیقاتی در رابطه با جنبه‌های دقت عددی، ثبات و همگرایی و کارایی روش SPH توسط بسیاری از محققین صورت گرفت. سوگل^۲ و همکاران مسائل بی‌ثباتی کششی را، که برای مواد و مصالح با استحکام بالا مهم می‌باشند، مورد بررسی قرار دادند. موریس^۳ به مسئله بی‌ثباتی ذرات که می‌تواند سبب بی‌دقت‌تر شدن راه‌حل SPH شود، اشاره کرد. بعد از گذشت سال‌ها، تغییرات و اصلاحات مختلفی به‌منظور ایجاد ثبات و بهبودی دقت روش SPH صورت گرفت. مناگان یک فرمولاسیون متقارن که بنا به گزارش‌ها دارای اثرات بهتری بود، پیشنهاد کرد. جانسون^۴ و همکارانش یک فرمولاسیون نرمال شده تک‌محوری را ارائه دادند. راندلس و لیبراسکای^۵ یک فرمول نرمال شده برای تقریب چگالی و یک فرمولاسیون برای واگرایی تانسور تنش^۶ ارائه نمودند. چن و همکاران^۷ یک روش ذرات هموار اصلاحی^۸ (CSPM) پیشنهاد کردند که دقت شبیه‌سازی را در هر دو حالت داخل دامنه مسئله و اطراف منطقه مرزی بهبود می‌بخشد. روش CSPM توسط لیو و همکارانش^۹ برای مسائل با ناپیوستگی‌هایی مانند موج شوک به‌صورت SPH ناپیوسته^{۱۰} (DSPH) توسعه پیدا کرد. لیو و همکارانش همچنین یک روش ذرات محدود^{۱۱} (FPM) را پیشنهاد کردند که از یک مجموعه توابع پایه برای تقریب متغیرهای موجود در ذرات با توزیع خودسرانه استفاده می‌کند. درواقع FPM را می‌توان به‌عنوان یک نسخه بهبودیافته روش SPH و CSPM دانست که در آن عملکرد ثبات ذرات بهبودیافته است. باترا و همکارانش^{۱۲} هم‌زمان یک ایده مشابه FPM با برنامه‌های کاربردی در مکانیک

^۱ Hu and Adams

^۲ Swegle

^۳ Morris

^۴ Johnson

^۵ Randles and Libersky

^۶ Divergence of the stress tensor

^۷ Chen et al

^۸ Corrective Smoothed Particle Method

^۹ Liu et al

^{۱۰} Discontinuous SPH

^{۱۱} Finite Particle Method

^{۱۲} Batra et al

جامدات ارائه نمودند و آن را SPH اصلاح شده^۱ (MSPH) نامیدند. فانگ و همکارانش^۲ این ایده را برای شبیه سازی جریان سطح آزاد ارتقاء دادند و پس از آن یک روش ذرات محدود لاگرانژی منظم برای شبیه سازی جریان لزج تراکم ناپذیر ارائه دادند. یک روش ذرات تنش برای بهبود بی ثباتی کششی و مشکلات حالت انرژی صفر، ارائه شد. از دیگر اصلاحات قابل توجه روش SPH، می توان به روش هیدرولیک مربعات ذرات در حال حرکت^۳ (MLSPH)، یکپارچه سازی کرنل اصلاحی^۴، روش ذرات کرنلی قابل تکثیر^۵ (RKPM)، روش اصلاح پایداری ذرات^۶ و چندین روش دیگر برای بازیابی بی ثباتی ذرات اشاره کرد. بلیچکو^۷ و همکارانش یکسری تجزیه و تحلیلی برای ایجاد ثبات و همگرایی در روش ذرات بدون شبکه انجام دادند که برخی از این تکنیک های عددی و تحلیلات می تواند برای روش SPH مناسب باشد [۲۷].

روش SPH امروزه نیز به صورت گسترده برای حل مسائل مکانیک جامدات و سیالات، به دلیل توانایی نسبتاً زیاد این روش برای شرکت در اثرات فیزیکی پیچیده استفاده می شود. اولین کاربردهای SPH اساساً بر روی مسائل مرتبط با دینامیک سیالات، مانند جریان های چند مرحله ای، جریان از بین محیط متخلخل، هدایت گرمایی، مدل سازی امواج، جریانات جرم و انتقال گرما و ... متمرکز شده بود. در این راستا بنز و آسفاگ^۸، SPH را برای مدل سازی شکست و ترک جامدات شکننده، گسترش دادند [۲۸-۳۰]. بونت و کولاسگارام^۹، در مدل سازی شکل دادن مواد، روش SPH را مورد استفاده قرار دادند. امروزه روش SPH در مدل سازی تغییر شکل های بزرگ و بارگذاری های ضربه ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳۱].

¹ Modified SPH

² Fang et al

³ Moving Least Square Particle Hydrodynamics

⁴ Integration kernel correction

⁵ Reproducing Kernel Particle Method

⁶ Correction for stable particle method

⁷ Belytschko

⁸ Benz and Asphaug

⁹ Bonet and Kulasegaram

یکی از کاربردهای مهم SPH در زمینه مسائل مربوط به ضربات با سرعت بالا (HVI) و انفجارهای شدید است. در مسائل ضربات با سرعت بالا، امواج ضربه حین برخورد با اجسام، مانند سیالات رفتار می‌کنند. سوگل و آتوی^۱ امکان استفاده از روش SPH را برای محاسبات زیرآبی بررسی کردند. اخیراً لیو و همکارانش روش SPH را برای مدل‌سازی یکسری از پدیده‌های انفجاری شامل انفجارهای شدید، امواج زیرآبی و امواج انتقالی آب بکار بردند.

کاربرد وسیع روش SPH در مسائل مختلف، منجر به بسط و پیشرفت گسترده‌ای در روش SPH نسبت به اصل روش شد. جنبه‌های عددی به تدریج پیشرفت کرد و برخی مشکلات مربوط به این روش تشخیص داده شد و تکنیک‌های ویرایشی یا تصحیح کننده‌ای ارائه شد [۳۲].

با تصحیحاتی که بر روی روش SPH تاکنون انجام شده است، هم‌اکنون این روش توانایی مدل‌سازی بسیاری از این جریان‌ها با ویژگی‌های مختلف را دارا است. اکنون از این روش برای مدل‌سازی جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، جریان‌های لزج و غیر لزج، جریان با سطح آزاد همراه با کشش سطحی، جریان دوفازی، جریان در محیط متخلخل و .. استفاده می‌شود.

۳-۴ مدل‌های رئولوژی

در طول چند دهه گذشته، توجه ویژه‌ای بر رئولوژی و مکانیک پیوسته مواد تک فازی به خصوص محلول‌های پلیمری وجود داشته است. درحالی‌که، دوغاب، خمیر و مواد معلق که غالباً در مسائل صنعتی با آن‌ها روبرو می‌شویم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از این مواد دارای یک تنش تسلیم می‌باشند که در تنش کمتر از این تنش بحرانی مواد تغییر شکل نداده و در تنش بالاتر تغییر شکل داده و جاری می‌شوند. به این مواد پلاستیک بینگهام^۲ یا مواد ویسکوپلاستیک گفته می‌شود. بینگهام کسی است که اولین بار در سال ۱۹۱۹ این مواد را این‌گونه معرفی کرد. این مواد یک دسته

^۱ Swegle and Attaway

^۲ Bingham

مهم از مواد غیر نیوتنی را تشکیل می‌دهند.

وضعیت به تدریج در سال ۱۹۸۳، با ظهور مقاله‌ای توسط برد^۱ تغییر کرد. در آن کار، نویسنده یک لیست از موادی که تسلیم می‌شوند را ارائه کرد که شامل نمونه‌هایی از غذاهای صنعتی مانند مارگارین، سس ماینز، سس گوجه‌فرنگی و نمونه‌هایی از مایع نیوتنی معلق و غیره بود. از آن پس تلاش‌های گسترده‌ای به منظور جمع‌آوری کارهای بیشتر در رابطه با مواد ویسکوپلاستیک تا سال ۱۹۸۰ انجام شد (بالغ بر ۲۱۴ مرجع)، که حاصل آن پیشرفت‌های نظری‌ای بر اساس مدل ویسکوپلاستیک و ارائه مدل‌هایی برای این‌گونه مواد شامل مدل بینگهام، مدل هرشل-بالکلی و مدل کاسون است [۳۳، ۳۴].

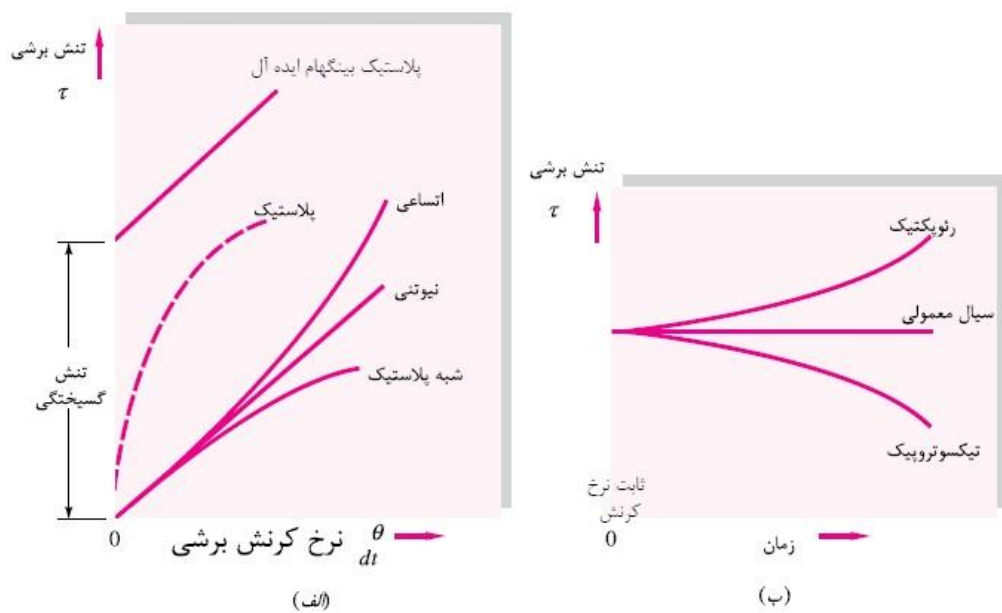
از آن پس، محققین مجدداً علاقه‌مند به مطالعه این مواد در جریان‌های غیر بدیهی، به صورت نظری یا تجربی و شامل هر دو حالت مدل‌سازی و شبیه‌سازی شدند. حدوداً در اوایل سال ۱۹۸۰ و با توجه به در دسترس بودن کدهای کامپیوتری دوبعدی برای حل مسائل جریان، اولین تلاش‌ها به منظور شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی مسائل پلاستیک بینگهام انجام گرفت [۳۵]. در نتیجه، چندین مدل اصلاح‌شده به منظور شبیه‌سازی مقرون به صرفه با میزان موفقیت‌های گوناگون، ارائه شد. در همین حال، در راستای این‌گونه شبیه‌سازی‌ها، تلاش‌های متعددی در رابطه با اندازه‌گیری خصوصیت‌های رئولوژیکی مواد ویسکوپلاستیک (به ویژه تنش تسلیم) انجام شد. نمونه‌هایی از این تلاش‌ها در کارهای کاوی و استانمور^۲ (۱۹۸۰) قابل مشاهده است [۳۶].

^۱ Bird

^۲ Covey and stanmore

۳-۴-۱ سیالات غیر نیوتنی

سیالات غیر نیوتنی سیالاتی هستند که از معادله خطی پیروی نمی کنند. این سیالات تحت عنوان رئولوژی بررسی می شوند. در شکل (۳-۱ الف)) چند سیال غیر نیوتنی با سیال نیوتنی مقایسه شده اند. شیب منحنی های غیر خطی در هر نقطه را ویسکوزیته ظاهری می گویند.



شکل ۳-۱ رفتار رئولوژیکی مواد با ویسکوزیته مختلف. الف) تغییرات تنش برشی نسبت به نرخ کرنش برشی. ب) تاثیر زمان بر تنش وارده

سیال اتساعی^۱: این سیال غلیظ شونده برشی است؛ یعنی، با افزایش آهنگ کرنش، مقاومت آن افزایش می یابد. سوسپانسیون های ذرات نشاسته یا شن در آب، نمونه هایی از سیال اتساعی هستند.

سیال شبه پلاستیک^۲: این سیال رقیق شونده برشی است؛ یعنی با افزایش آهنگ کرنش، مقاومت آن کاهش می یابد. سیال بسیار رقیق شونده را پلاستیک می گویند. محلول های پلیمری، سوسپانسیون های کلوئیدی، خمیر آب در کاغذ، پلاسمای خون، شربت ها شیر قند از سیالات شبه

^۱ Dilatant

^۲ Pseudoplastic

پلاستیک هستند. رنگ یکی از رایج‌ترین سیالات شبه پلاستیک است که هنگام خروج از قوطی غلیظ است، اما وقتی با آهنگ کرنش زیاد برس می‌خورد رقیق می‌شود.

پلاستیک بینگهام^۱: این ماده تحت تأثیر یک تنش تسلیم معین، به جریان در می‌آید. شکل (۱)-۳(الف)) رفتار خطی این ماده را پس از تسلیم نشان می‌دهد. (البته، این ماده رفتار غیرخطی نیز دارد). سوسپانسیون خاک رس، خمیردندان، سس مایونز، شکلات و خردل از پلاستیک‌های بینگهام هستند. یکی از رایج‌ترین مواد، سس گوجه‌فرنگی است که برای خروج از بطری باید آن را تکان داد.

آثار گذرا یکی دیگر از رفتارهای پیچیده سیالات غیر نیوتنی است. با توجه به شکل (۳-۱(ب)) در بعضی سیالات، برای حفظ آهنگ برش ثابت، تنش برشی مؤثر بر آن‌ها را باید تدریجی افزایش داد. این سیالات را رئوپکتیک^۲ می‌گویند. برعکس، سیالاتی وجود دارند که به‌مرورزمان رقیق می‌شوند، و برای حفظ آهنگ برش ثابت باید تنش برشی مؤثر بر آن‌ها را کاهش داد، این سیالات را تیکسوتروپیک^۳ می‌گویند [۳۷].

۳-۵ کارهای انجام شده در زمینه جریان گل

کاستا و وسلیوز^۴ در سال ۱۹۸۴ و والا^۵ در سال ۱۹۸۱ اولین نفراتی بودند که مشاهدات میدانی و ویدئویی جریان گلی را ثبت و ضبط کردند. معادلات آب کم‌عمق در مورد موج سینماتیکی توسط تاکاهاشی (۱۹۸۷)، میزویاما^۶ (۱۹۸۷)، ابرین و ژولین^۷ (۱۹۹۳)، آرتانو و سوچ^۸ (۱۹۹۴) برای جریان-

^۱ Bingham plastic

^۲ Pheopectic

^۳ Thixotropic

^۴ Costa and Williws

^۵ Valla

^۶ Mizuyama

^۷ O'Brien and Julien

^۸ Arttano and Savage

های واریزه‌ای به دست آمد. پس‌از آن، رفتار پراکندگی آرام یک سیال نازک بینگهام که مرتبه‌ای از سیال هرشل-بالکلی است بر روی یک سطح شیب‌دار توسط لی‌یو و میی^۱ مدل گردید. جویسون^۲ در سال ۱۹۷۰، در بحث مدل‌سازی سیالات ویسکوپلاستیک مربوط به مدل بینگهام بیشترین تحقیقات را انجام داد. تأثیرات خاک، آشفته‌گی جریان و .. بر یک جریان دانه‌ای و لزج در بحث سیالات نیوتنی توسط ابرین و ژولین در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. در سال ۱۹۹۴ هانت^۳ دریافت که جریان‌های گلی یا واریزه‌ای که عموماً لزج هستند در ناحیه آرام قرار دارند.

کاست^۴ (۱۹۹۴) رابطه بین جریان گلی طبیعی و سیال هرشل-بالکلی را با استفاده از یکسری پارامترهای بی‌بعد به دست آورد، وی همچنین عبارت اصطکاک دیواره را روی جریان‌های یکنواخت ماندگار در یک کانال آزمایشگاهی تخمین زد. سپس در سال ۱۹۸۶، عبارت اصطکاکی توسط ویلا^۵ بر روی جریان‌های ناپایدار برای معادلات آب‌های کم‌عمق به صورت عددی مدل‌سازی شد. برگر^۶ (۱۹۹۴) فرم بقای معادلات آب‌های کم‌عمق در بحث جریان‌های گلی را ارائه نمود.

در سال‌های اخیر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان‌های گلی بیشتر توجه شده است، این امر در جهت پیش‌بینی و حداقل کردن خسارات به شهرهای مورد تهدید قرار می‌گیرد. با توجه به شناخت جریان‌های گلی و نحوه وقوع آن‌ها و همچنین تحت تأثیر قرار گرفتن زندگی انسانی در مناطق حادثه-خیز، اخیراً مطالعات آزمایشگاهی و میدانی فراوانی برای بررسی بهتر جریان‌های گلی انجام شده است [۳۸].

^۱ Liu and Mei

^۲ Johison

^۳ Hunt

^۴ Coussot

^۵ Vila

^۶ Berger

فصل چهارم

معادلات حاکم و فرمول بندی SPH

۴-مقدمه

در این فصل، ابتدا معادلات حاکم بر فیزیک مسئله در دیدگاه لاگرانژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، به بیان روش عددی SPH، گسسته‌سازی‌های معادلات حاکم بر آن و فضای حل پرداخته می‌شود و در انتها، مدل‌سازی شرایط مرزی در روش عددی SPH و مدل‌های رفتاری سیال غیر نیوتنی در این روش بیان می‌گردد.

۴-۱ معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر دینامیک جریان سیال شامل معادلات بقای جرم (پیوستگی)، بقای مومنتم (اندازه حرکت) و بقای انرژی است که این معادلات در دیدگاه لاگرانژی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

الف) معادله پیوستگی

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = 0 \quad (۱-۴)$$

ب) معادله اندازه حرکت

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} - F = 0 \quad (۲-۴)$$

پ) معادله انرژی

$$\frac{De}{Dt} - \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} = 0 \quad (۳-۴)$$

که در آن α و β معرف راستاهای اصلی، v سرعت در این راستاهای، F نیروهای حجمی که شامل

نیروهای وزن است، ρ چگالی سیال و D/Dt اپراتور مشتق کل^۱ و σ تنش‌های کل وارده به سیال و شامل ترم‌های تنش برشی و تنش قائم است که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma^{\alpha\beta} = -P\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (4-4)$$

که در آن P تنش فشاری، τ تنش برشی سیال و $\delta^{\alpha\beta}$ تابع دلتای دیراک است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

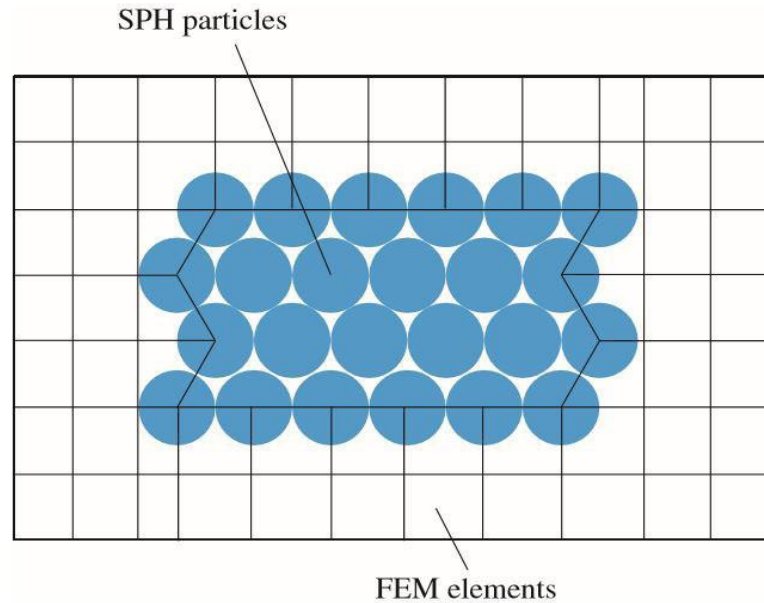
$$\delta(x-x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases} \quad (4-5)$$

۲-۴ روش عددی SPH

در روش‌های عددی، به منظور حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر فیزیک مسئله، از گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌شود. در گسسته‌سازی، فضای مسئله به نقاطی محدود تقسیم و معادلات دیفرانسیلی حاکم با تکنیک‌های مناسب و متناسب با نوع گسسته‌سازی به یک‌سری معادلات جبری تبدیل می‌شوند که با حل این معادلات، جواب متغیرهای مسئله حاصل می‌شود. در روش‌های مرسوم FEM (المان محدود^۲)، فضای مسئله شبکه‌بندی شده و جواب مسئله تنها در نقاط شبکه به دست آورده می‌شود [۳۹]. اما در روش هیدرولیک ذرات هموار (SPH)، فضای مسئله به تعدادی ذره که به صورت دلخواه پراکنده شده و هیچ‌گونه اتصالی بین آن‌ها وجود ندارد، تقسیم‌بندی می‌شود که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. روش SPH، یک روش بدون شبکه و لاگرانژی است و برای مدل‌سازی جریان سطح آزاد و دارای تغییر شکل‌های بزرگ بسیار مناسب است. در ادامه به جزئیات فرمول‌بندی و خصوصیات این روش پرداخته می‌شود.

^۱ Substantial derivative

^۲ Finite difference



شکل ۴-۱ نحوه مش بندی در روش المان محدود و روش SPH [۴۰]

۴-۲-۱ گسسته سازی معادلات در روش SPH

در این گسسته سازی، مقدار کمی ذره موردنظر، با استفاده از اطلاعات موجود در محدوده‌ای در اطراف ذره موردنظر و با استفاده از تابع وزنی، به صورت انتگرالی تقریب زده می‌شود (انتگرال درون-یابی). فرم دقیق معادله انتگرالی درون‌یابی با استفاده از تعریف تابع انتگرالی حلقه‌ای^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (۴-۶)$$

که در آن تابع $f(x)$ بردار متغیر وابسته در x ، $f(x')$ مقادیر بردارهای متغیر وابسته در همسایگی نقطه‌ای x و Ω فضای حل شامل x و همسایگی اطراف آن (x') است. به دلیل عدم پیوستگی تابع دلتا دیراک، عدم مشتق‌پذیری تابع و شعاع تأثیر کوچک، این تابع کارایی لازم برای حل مسائل مبتنی بر ذره را ندارد در نتیجه از تابع کرنل $W(x - x', h)$ به جای تابع دلتای دیراک استفاده

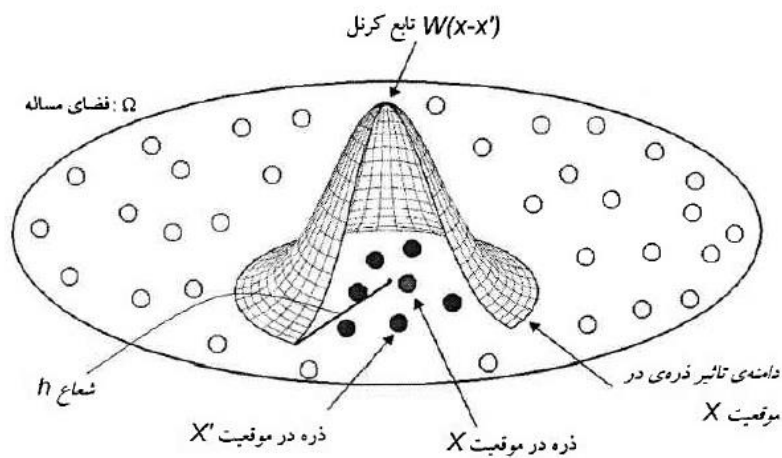
^۱Integral convolution function

می‌شود. در این حالت تابع‌های $f(x)$ و $\nabla f(x)$ به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (7-4)$$

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int_{\Omega} f(x') \nabla_x \cdot W(x-x', h) dx' \quad (8-4)$$

که در آن h طول هموار^۱ است که دامنه تأثیر^۲ را کنترل می‌کند شکل (۲-۴) [۱۴].



شکل ۲-۴ نمایش تابع کرنل و شعاع تأثیر ذره در موقعیت X

۲-۲-۴ تابع کرنل

تابع کرنل دارای ویژگی‌های زیر است:

الف) مقدار انتگرال تابع کرنل در دامنه تأثیر آن یک است.

$$\int_{\Omega} W(x-x', h) dx = 1 \quad (9-4)$$

^۱ Smoothing length

^۲ Influence Domain

ب) باید مقدار این تابع در خارج از دامنه تأثیر صفر باشد.

$$W(x-x')=0 \quad \text{for } |x-x'| > Kh \quad (10-4)$$

که در آن k ضریب مقیاس است و اندازه دامنه تأثیر با استفاده از طول هموار h و ضریب k به دست می‌آید. تعیین مقدار h تأثیر قابل توجهی بر حجم و دقت محاسبات دارد.

ج) مقدار تابع کرنل باید برای هر نقطه در محدوده‌ی اثر مثبت باشد. این ویژگی از نظر ریاضی ضروری نیست، ولی باعث معنادار و پایدار شدن فرایند حل مدل‌سازی یک پدیده فیزیکی می‌شود. به‌طور مثال، در شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی، مقادیر منفی برای تابع کرنل می‌تواند باعث ایجاد پارامترهای غیر فیزیکی مانند منفی شدن چگالی و انرژی شود.

د) مقادیر تابع کرنل باید به‌طور یکنواخت با فاصله گرفتن از نقطه موردنظر، کاهش یابد. درواقع این خاصیت نشان‌دهنده این موضوع است که ذرات نزدیک‌تر به ذره موردنظر، تأثیر بیشتری بر خصوصیات آن ذره دارند. به‌بیان دیگر، نیروی اندرکنش بین ذرات با کاهش فاصله آن‌ها افزایش می‌یابد.

ه) تابع کرنل باید زمانی که طول هموار به صفر نزدیک می‌شود، شرایط تابع دیراک را برآورده سازد. این خاصیت تضمین می‌کند که با نزدیک‌تر شدن طول هموار به صفر، تقریب به مقدار حقیقی تابع نزدیک شود.

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x') \quad (11-4)$$

و) تابع کرنل باید تابعی زوج و با خاصیت تقارن باشد. این ویژگی باعث می‌شود که اثر ذرات در یک فاصله یکسان ولی در مکان‌های مختلف نسبت به ذره موردنظر یکسان باشد.

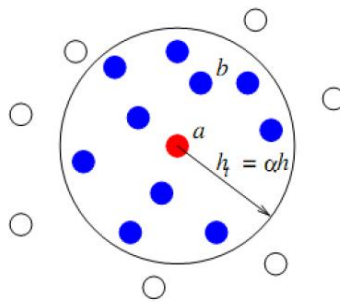
ی) تابع کرنل باید به‌اندازه کافی هموار باشد (عدم تغییرات ناگهانی شیب منحنی تابع کرنل).

هرچه تابع کرنل هموارتر ، حساسیت آن به نامنظمی ذرات کمتر و دستیابی به تخمینی دقیق‌تر امکان‌پذیر می‌باشد.

تابع کرنل w_h به وسیله یک ناحیه‌ی پشتیبان به هم فشرده تشخیص داده می‌شود. اگر فاصله‌ی r_{ab} (فاصله بین نقطه a تا b) از مقدار طول پشتیبانی تابع کرنل h_i بیشتر شود، آنگاه مقدار $w_h(r_{ab})$ صفر خواهد شد شکل (۳-۴). طول ناحیه پشتیبانی h_i به‌طور مستقیم با طول هموارسازی متناسب است.

$$h_i = kh \quad (۱۲-۴)$$

که در آن ضریب K به مرتبه تابع کرنل وابسته است.



شکل ۳-۴ نمایش طول ناحیه پشتیبانی ذره a [۴۰]

۱-۲-۲-۴ انتخاب طول هموارسازی h

طول هموارساز h در روش SPH مشابه اندازه‌ی سلول شبکه در روش اویلری است. در واقع طول هموارساز h بیان‌کننده ناحیه تأثیر اطراف یک‌ذره مرکزی است که با ذرات واقع در این ناحیه برهم‌کنش دارد یا به عبارت دیگر می‌توان گفت ناحیه تأثیر یک‌ذره، دایره‌ای با مرکزیت ذره موردنظر و شعاع kh است. همان‌طوری که در معادله (۱۲-۴) مشاهده می‌شود طول هموارساز به‌طور مستقیم با ناحیه پشتیبانی h_i ارتباط داشته و تأثیر بسزایی در دقت نتایج خواهد داشت. اگر این طول خیلی

کوچک باشد، ممکن است تعداد کافی ذرات در ناحیه تأثیر ذره مرکزی وجود نداشته باشد که باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. اگر طول هموارسازی (h) زیاد باشد تمام جزئیات ذرات و خصوصیات محلی ممکن است از حالت هموار خارج شوند که تأثیر منفی در نتایج خواهد داشت و در این صورت تعداد ذرات واقع در ناحیه تأثیر ذره مرکزی و حجم محاسبات افزایش خواهد یافت.

کینگلد و موناگان نشان دادند که وجود یک طول هموارساز بهینه به تعداد ذرات وابسته است [۴۱]. تعداد ذرات بیشتر و طول هموارسازی کمتر، موجب کوچک‌تر شدن خطای محاسبات می‌شود. این نتیجه‌گیری با آنچه اسپیت^۱ در مقاله‌اش ذکر کرده، سازگار است. اسپیت اثبات کرد که دقت نتایج روش SPH به تعداد ذرات همسایه N_i بستگی دارد [۴۲].

$$N_i \propto \left[\frac{h}{\delta_r} \right]^d N \quad (۴-۱۳)$$

که در آن متغیر N متناظر با تعداد کل ذرات، d بعد مسئله موردنظر و δ_r فاصله اولیه ذرات است. با افزایش طول هموارسازی و ثابت نگه‌داشتن تعداد کل ذرات، با توجه به رابطه (۴-۱۳) تعداد ذرات همسایه افزایش خواهد یافت. اگرچه اسپیت با استفاده از این رابطه نشان داد که طول هموارسازی h تعیین‌کننده وضوح شبیه‌سازی می‌باشد، اما درنهایت دقت کلی حل مسئله به متوسط تعداد اندرکنش‌های بین ذرات وابسته است [۴۳]. نتیجه‌گیری اسپیت با نتیجه‌گیری که موناگان و کینگلد ارائه کرده بودند دارای تناقض بود، اما به‌طورکلی می‌توان با انتخاب تعداد مناسب کل ذرات، یک سازگاری میان تعداد ذرات و طول هموارسازی برقرار کرد.

۴-۲-۳ گسسته سازی معادلات حاکم

با گسسته‌سازی معادلات تقریبی (۴-۷) و (۴-۸)، معادلات حاکم بر فیزیک مسئله گسسته می‌-

شود. برای مسائل سه‌بعدی گسسته‌سازی این معادلات به‌صورت زیر است [۱۴].

^۱ Speith

$$f(x) = \sum_{i=1}^b m_b \frac{f(x_b)}{\rho_b} W_{ab} \quad (14-4)$$

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle \geq \sum_{i=1}^b m_b \frac{f(x_b)}{\rho_b} \nabla_{x_a} \cdot W_{ab} \quad (15-4)$$

که در آن b شمارنده ذرات، m_b و ρ_b به ترتیب جرم و چگالی ذرات در محدوده تأثیر ذره x $W_{ab} = W(x_a - x_b, h)$ و ∇_{x_a} معرف گرادیان تابع کرنل نسبت به x_b است. از این معادلات به منظور گسسته سازی معادلات حاکم استفاده می شود.

الف) معادله پیوستگی:

$$\frac{D\rho_a}{Dt} = \sum m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (16-4)$$

که در آن v_{ab} سرعت نسبی ذرات a و b است.

ب) معادله اندازه حرکت:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \Theta \quad (17-4)$$

که در آن p فشار، g شتاب گرانش زمین و Θ معرف ترم های پخش شدگی^۱ است. ترم پخش - شدگی معرف ترم های لزجت و وابسته به تنش برشی است. با توجه به فیزیک جریان می توان از سه پارامتر لزجت مصنوعی^۲، لزجت معرف جریان آرام^۳ و لزجت جریان آشفته^۴ به جای ترم های پخش - شدگی استفاده شود.

^۱ Diffusion terms

^۲ Artificial viscosity

^۳ Laminar viscosity

^۴ SPS(Sub Particle Scale)

(۱) لزجت مصنوعی:

برای جریان‌ها با سطح آزاد عبارتی به فرم Π ، به‌جای ترم پخش‌شدگی استفاده می‌شود که این کار سبب پایداری حل مسئله، تصحیح شکل امواج و عدم نفوذ ذرات در جریان‌های دوفازی می‌شود. درنتیجه معادله (۴-۱۷) به شکل زیر بازنویسی می‌شود [۱۴]:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \rho + g + \Pi \quad (۴-۱۸)$$

ترم Π به صورت‌های مختلفی ارائه‌شده است که رابطه (۴-۱۹) از جامع‌ترین تعاریف برای روش مبتنی بر ذره است.

$$\Pi_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{-\alpha_{av} \bar{C}_{ij} \varphi_{ij} + \beta_{a\beta} \varphi_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} & v_{ij} r_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} r_{ij} \geq 0 \end{array} \right\} \quad (۴-۱۹)$$

پارامترهای این رابطه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varphi_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} r_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \eta^2} \quad (۴-۲۰)$$

$$\bar{\rho}_{ij} = \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j) \quad (۴-۲۱)$$

$$h_{ij} = \frac{1}{2} (h_i + h_j) \quad (۴-۲۲)$$

$$\bar{C}_{ij} = \frac{1}{2} (C_i + C_j) \quad (۴-۲۳)$$

$$v_{ij} = v_i - v_j \quad (۴-۲۴)$$

$$r_{ij} = r_i - r_j \quad (۴-۲۵)$$

در رابطه (۱۹-۴) ثابت‌های α_{ij} و β_{ij} به ترتیب به‌منظور پایداری حل و عدم نفوذ ذرات و بر اساس شرایط مسئله تعیین می‌شوند. در رابطه (۲۰-۴)، پارامتر η عددی کوچک است که تنها به‌منظور عدم صفر شدن مخرج مورد استفاده قرار داده می‌شود. فرم گسسته سازی شده معادله (۱۸-۴) به‌صورت زیر است:

$$\frac{Dv_a}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (۲۶-۴)$$

(۲) لزجت در جریان آرام

لو و شائو^۱ در سال ۲۰۰۲، عبارت $v_0 \nabla^2 v$ را به‌عنوان ترم پخش‌شدگی برای شبیه‌سازی جریان آرام معرفی کردند که در آن v_0 لزجت سینماتیکی و $\nabla^2 v$ اپراتور لاپلاسین است. با توجه به این تعریف معادله (۲۷-۴) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \rho + g + v_0 \nabla^2 v \quad (۲۷-۴)$$

و فرم گسسته شده معادله (۲۷-۴) به‌صورت زیر است:

$$\frac{Dv_a}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} + g + \sum_b m_b \left[\frac{4v_0 r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |r_{ab}|^2} \right] v_{ab} \quad (۲۸-۴)$$

که در آن r_{ab} بردار مکان $(r_{ab} = r_a - r_b)$ است.

(ج) معادله انرژی

$$\frac{De_a}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} + \Theta_{ab} \right) v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (۲۹-۴)$$

^۱ Lo and shao

که در آن e_a مقدار کل انرژی ذره a شامل انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و انرژی حرارتی و Θ_{ab} فرم گسسته شده ی ترم های پخش شدگی است.

۴-۳ معادله حالت

معادله حالت نیروی حجمی مواد را در یک مدل هیدرودینامیکی ارائه می دهد. در واقع، در معادله حالت، فشار (مثبت در فشار) به عنوان تابعی از چگالی ρ و انرژی ویژه (انرژی داخلی بر واحد جرم) E_m ، بیان می شود.

$$P = f(\rho, E_m) \quad (۴-۳۰)$$

۴-۳-۱ معادله انرژی و منحنی هوگونیوت^۱

معادله پایستگی انرژی معادل با افزایش انرژی داخلی بر واحد جرم (E_m) ، به تنش و انتقال حرارت وابسته است. در صورت عدم وجود انتقال حرارت، معادله انرژی به صورت زیر است:

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (P - P_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + S : \dot{e} + \rho \dot{Q} \quad (۴-۳۱)$$

که در آن P تنش فشار که در حالت فشرده شدن مثبت، P_{bv} تنش فشار ناشی از میزان ویسکوزیته بالک^۲، S تانسور تنش انحرافی، $\dot{e}$ بخش انحرافی نرخ کرنش^۳ و $\dot{Q}$ نرخ حرارت بر واحد جرم است.

در معادله حالت، فشار به عنوان تابعی از چگالی ρ و انرژی داخلی بر واحد جرم E_m در نظر گرفته می شود که در آن تمام حالت های تعادلی موجود در یک ماده تعریف می شود.

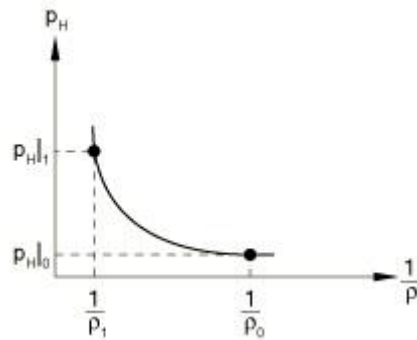
با حذف انرژی داخلی از معادله بالا می توان یک رابطه بین P و V (که در آن V حجم سیال) یا

^۱ Hugoniot

^۲ Pressure stress due to the bulk viscosity

^۳ Deviatoric part of strain rate

یک رابطه بین P و $\frac{1}{\rho}$ به دست آورد. این رابطه برای هر ماده منحصر به فرد است. این رابطه منحصر به فرد را منحنی هوگونیوت می‌نامند. در نمودار (۱-۴) نمایش شماتیکی از منحنی هوگونیوت نشان داده شده است.



نمودار ۱-۴ نمایش شماتیک منحنی هوگونیوت [۴۴]

فشار هوگونیوت P_H ، تابعی از چگالی بوده و توسط داده‌های تجربی به دست می‌آید.

به‌طور کلی تاکنون معادلات حالت مختلفی ارائه شده است از جمله این معادلات:

۱- معادله حالت Mie-Gruesisen

۲- معادله حالت Tabular

۳- معادله حالت اشتعال و رشد^۱

۴- معادله حالت گاز ایده‌آل^۲

۵- معادله حالت $P-\alpha$

که در اینجا از معادله حالت Mie-Gruesisen استفاده شده است [۴۴].

^۱ Ignition and growth equations

^۲ Ideal gas equation

۴-۳-۱-۱ معادله حالت Mie-Gruesisen

معادله حالت Mie-Gruesisen یک معادله خطی انرژی به صورت زیر است [۴۴]:

$$P - P_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (۳۲-۴)$$

که در آن P_H و E_H به ترتیب فشار و انرژی ویژه (بر واحد جرم) بوده و تنها تابعی از چگالی است و Γ نرخ Gruesisen است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (۳۳-۴)$$

Γ_0 ثابت مواد و ρ_0 چگالی منبع است.

از طرفی انرژی هوگونیوت (E_H) به فشار Gruesisen وابسته است، در نتیجه داریم:

$$E_H = \frac{P_H \eta}{2\rho_0} \quad (۳۴-۴)$$

که در آن $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ ، کرنش فشاری حجمی اسمی است. با حذف Γ و E_H از معادله بالا داریم:

$$P = P_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (۳۵-۴)$$

۴-۳-۱-۲ فرم خطی هوگونیوت ($U_s - U_p$)

با توجه به داده های هوگونیوت داریم:

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (۳۶-۴)$$

که در آن s و c_0 رابطه خطی بین سرعت شوک U_s و سرعت ذرات U_p را به صورت زیر ارائه می کنند:

$$U_s = c_0 + sU_p \quad (37-4)$$

با توجه به فرض بالا، فرم خطی هوگونیوت $(U_s - U_p)$ به صورت زیر نوشته می شود:

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (38-4)$$

که در آن $\rho_0 c_0^2$ معادل با مدول الاستیک بالک در کرنش اسمی کوچک است [44].

4-4 حرکت ذرات

به منظور بررسی موقعیت هر ذره در هر گام زمانی، از رابطه (39-4) استفاده می شود. در روش SPH، استفاده از معادله (39-4) باعث می شود که ذرات بسیار نزدیک به هم، دارای سرعت های مشابه باشند و مقدار معادله اندازه ی حرکت به طور دقیق ارضا نشود [45]. در نتیجه در پدیده هایی که سرعت سیال زیاد می باشد، ممکن است ذرات به داخل یکدیگر نفوذ کنند. برای سازمان دهی بهتر ذرات و برطرف کردن معایب ذکر شده، رابطه (40-4) توسط مناگان ارائه شده است.

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V} \quad (39-4)$$

که در آن r بردار تغییر مکان و V بردار سرعت است.

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a + \varepsilon \sum \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} v_{ba} W_{ab} \quad (40-4)$$

که در آن $\bar{\rho}_{ab} = 0.5(\rho_b - \rho_a)$ و ε ثابتی بین 0 و 1 است و معمولاً برابر 0/5 در نظر گرفته می شود. در این روش، تصحیحاتی بر روی سرعت ذره a انجام گرفته و سرعت ذره a به همراه میانگین سرعت تمامی ذراتی که بر روی آن اثر دارند، دوباره محاسبه می شود.

۴-۵ ذرات مرزی

در روش SPH، مانند سایر روش‌های عددی، شرایط مرزی یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی است. تاکنون مدل‌های مختلفی برای اعمال این شرایط مرزی بکار برده شده است که در این قسمت به‌طور اجمالی به معرفی این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۵-۱ ذرات مجازی

به‌منظور افزایش دقت محاسبات، در مجاورت ذرات حقیقی، ذراتی به‌صورت مجازی در نظر گرفته می‌شود. این ذرات مجازی به دودسته‌ی ذرات مصنوعی^۱ و ذرات آینه‌ای^۲ تقسیم می‌شوند.

الف) ذرات مصنوعی

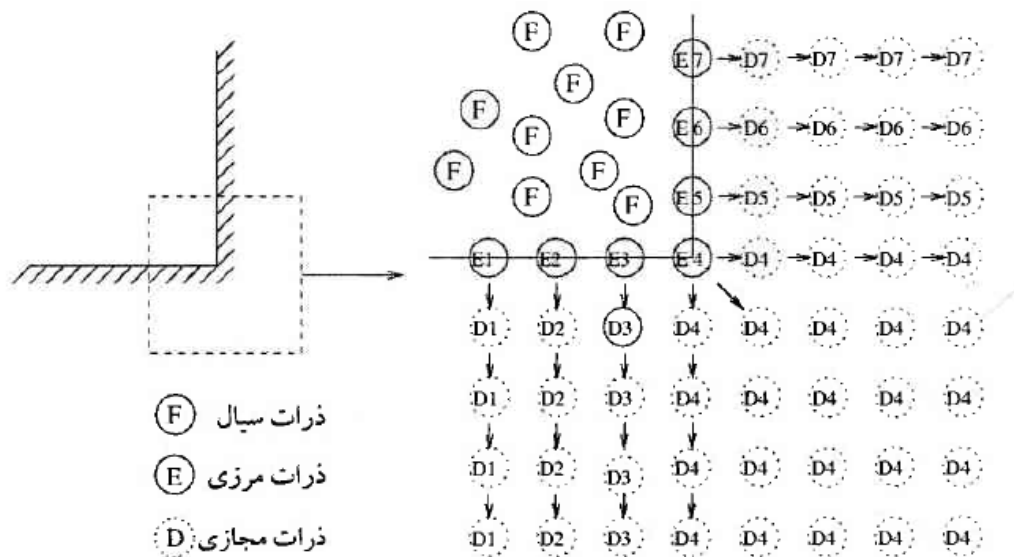
کوشیزوکا و همکارانش^۳ در سال ۱۹۹۸، چندین ذره‌ی مصنوعی به‌صورت منظم در اطراف مرز جامد در نظر گرفتند. به‌طوری‌که مکان این ذرات در تمام زمان فرایند حل ثابت و سرعت آن‌ها برابر صفر است. درحالی‌که فشار ذرات مرزی متناسب با موقعیت سیال داخل مرز، در هرگام زمانی تغییر می‌کند. با نزدیک شدن ذره‌ی سیال به دیواره، چگالی ذرات دیواره افزایش می‌یابد، که این امر سبب افزایش فشار در این ذرات و وارد شدن نیرویی به سمت داخل فضای حل می‌شود و درنتیجه ذره از مرز دور می‌شود. قرار دادن ۴ ردیف لایه ذرات مصنوعی منجر به حل کامل معادلات تقریب برای مرزها می‌شود. تعداد لایه‌های این ذرات، متناسب با برآورده شدن شرط فشردگی در تابه کرنل است. به‌عنوان مثال، اگر مقدار طول هموار در تابع کرنل دو برابر فاصله اولیه ذرات باشد، ۴ ردیف از ذرات مصنوعی موردنیاز است. از مزایای این روش، می‌توان به حل شدن کامل تابع تقریب در هر گام زمانی اشاره کرد اما با استفاده از این روش، تعداد ذرات افزایش‌یافته و باعث بالا رفتن هزینه محاسباتی می‌-

^۱ Dummy particles

^۲ Mirror particles

^۳ Koshizuka et al

شود شکل (۴-۴) [۴۶].

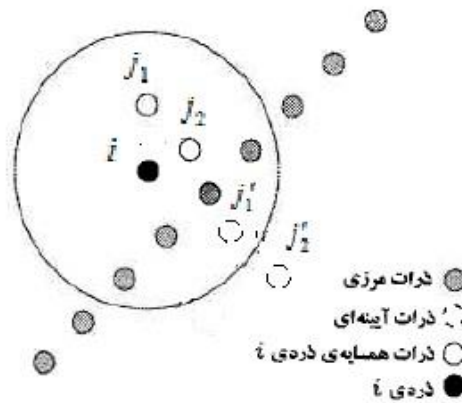


شکل ۴-۴ چیدمان ذرات مرزی مصنوعی [۴۷]

ب) ذرات آینه‌ای

تاکدا (۱۹۹۴) و لیبرسکی (۱۹۹۳) روش دیگری را برای شبیه‌سازی ذرات مرزی ارائه کردند. در این روش، با نزدیک شدن ذرات سیال به مرز، ذره‌ای به صورت مجازی و متقارن در طرف دیگر مرز ایجاد می‌شود شکل (۴-۵). در این حالت تا زمانی که ذره‌ای به مرز نزدیک نشود، ذره‌ی مجازی تشکیل نمی‌شود و در نتیجه تعداد ذرات در این روش نسبت به روش ذرات مصنوعی، کمتر است و زمان حل کاهش می‌یابد.

از معایب این روش، می‌توان به عدم توانایی شبیه‌سازی هندسه‌های نامنظم و جریان‌های چند فازی اشاره کرد [۴۸، ۴۹].



شکل ۴-۵ ذرات مرزی آینه‌ای [۵۰]

۴-۵-۲ ذرات حقیقی^۱

در این روش ذرات مرزی خود تأمین‌کننده‌ی شرایط مرزی در فضای مسئله می‌باشند.

این روش در سال ۱۹۹۹ توسط مناگان به‌منظور اعمال نیروی دافع به ذرات سیال به‌منظور عدم نفوذ ذرات داخلی به لایه‌های مرزی ابداع شد. در این روش از نیروهای بین‌مولکولی الهام گرفته‌شده است، به‌همین دلیل، به این نوع ذرات مرزی، ذرات لنارد-جونز نیز گفته می‌شود [۱۴].

$$f(\vec{r}) = \begin{cases} D \left[\left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{p_1} - \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{p_2} \right] \frac{\vec{r}}{r_{ij}^2} & \text{if } r < r_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴۱-۴)$$

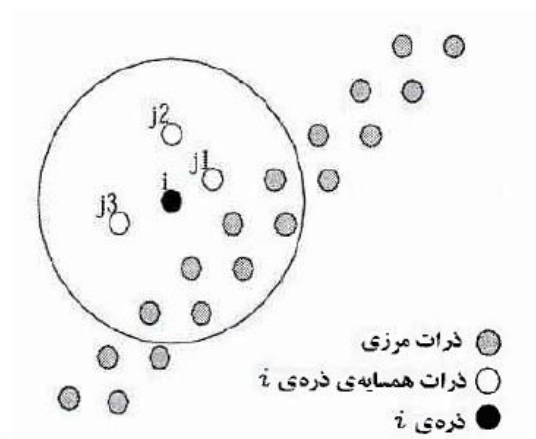
که در آن f نیروی وارد بر واحد جرم ذرات سیال از طرف لایه‌های مرزی، r فاصله بین لایه مرزی و ذرات سیال، r_0 فاصله اولیه ذرات، r_{ij} فاصله دو ذره i و j ، D پارامتری وابسته به مسئله و هم‌مقیاس مربع بزرگ‌ترین سرعت انتخاب می‌شود. p_1 و p_2 ضرایب ثابت و به ترتیب برابر ۱۲ و ۴ است. در این روش، تعداد ذرات کاهش‌یافته و در نتیجه زمان حل مسئله کاهش می‌یابد. از معایب این روش می‌توان

^۱ Real particles

به وجود پارامترهای موجود در مسئله و تعیین آن‌ها در هر مسئله اشاره کرد.

۴-۵-۳ ذرات مرزی پویا^۱

اولین بار از این روش برای شبیه‌سازی اندرکنش موج و سازه‌های ساحلی در سال ۲۰۰۰ توسط دارلیمپر و کیتو استفاده شد. این نوع مرز در دو لایه و به‌صورت زیگزاگ سازمان‌دهی می‌شود که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. علت دو لایه بودن این مرز، برطرف کردن خطاهای ناشی از محاسبات به علت عدم وجود ذره در طرف دیگر لایه است. بنابر پیشنهادات محققین، در این روش، برای مسائل ۲ بعدی طول هموار ذرات (h) در تمام طول حل ثابت و برابر $\frac{1}{3}$ قطر ذرات و در مسائل ۳ بعدی برابر $\frac{1}{5}$ قطر ذرات در نظر گرفته می‌شود. یکی از مزایای استفاده از این ذرات مرزی، مشابه بودن این ذرات با ذرات سیال است. در این روش کلیه معادلات پیوستگی، مومنتوم و غیره برای ذرات مرزی مشابه ذرات سیال در طول شبیه‌سازی حل می‌شود. تنها تفاوت در مکان این ذرات است که در طول زمان حل ثابت باقی می‌ماند [۵۰].



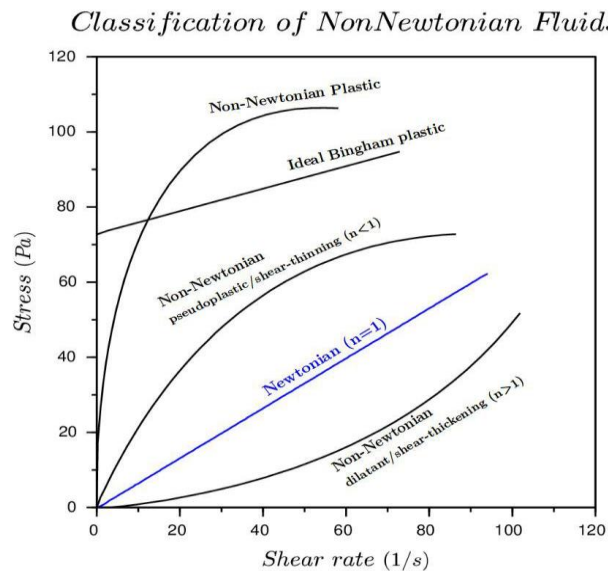
شکل ۴-۶ موقعیت قرارگیری ذرات مرزی پویا [۵۰]

^۱ Dynamic particles

۴-۶ تنش برشی در سیالات

با توجه به رفتار سیال در مقابل تغییر شکل، سیالات به دو دسته سیالات نیوتنی و سیالات غیر

نیوتنی تقسیم‌بندی می‌شوند نمودار (۴-۲).



نمودار ۴-۲ طبقه بندی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی

۴-۶-۱ سیالات نیوتنی

در این حالت رابطه بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی به صورت خطی است و به صورت زیر تعریف

می‌شود:

$$\tau^{\alpha\beta} = \mu \gamma^{\alpha\beta} \quad (۴۲-۴)$$

که در آن μ لزجت، α و β نشان‌دهنده راستاهای X و Y و $\gamma^{\alpha\beta}$ نرخ کرنش است که از رابطه زیر

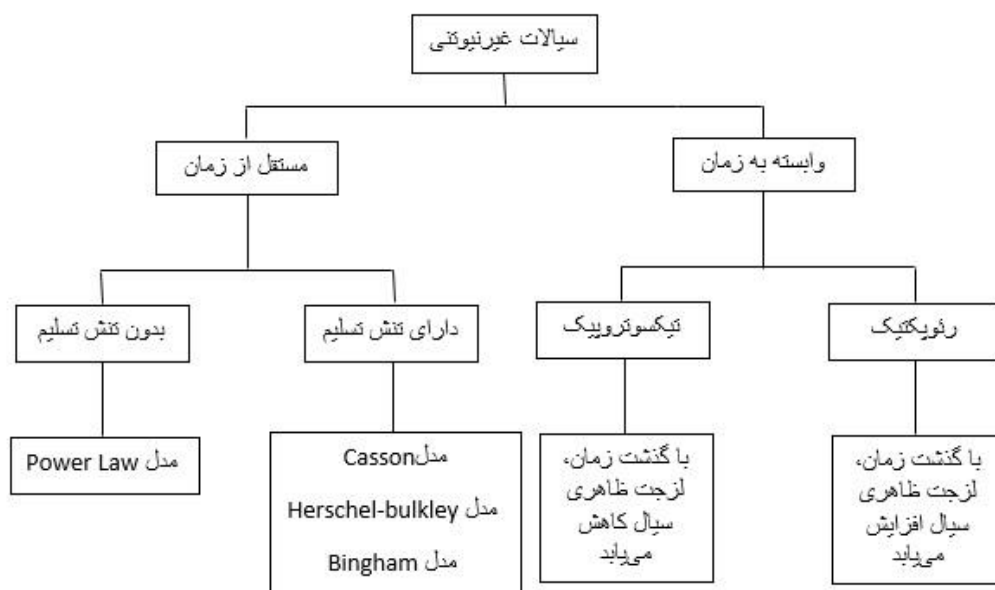
محاسبه می‌شود.

$$\gamma^{\alpha\beta} = \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot v)\delta^{\alpha\beta} \quad (۴۳-۴)$$

که در آن v^α و v^β سرعت در راستاهای x و y است [۱۴]. به‌طور کلی از این روابط می‌توان هم برای سیالات تراکم‌پذیر و هم سیالات تراکم‌ناپذیر استفاده کرد تنها برای سیالات تراکم‌ناپذیر ترم $\nabla \cdot \mathbf{v}$ به دلیل ارضای شرایط پیوستگی برابر صفر است.

۴-۶-۲ سیالات غیر نیوتنی

در این گروه از سیالات، رابطه بین تنش و نرخ کرنش برشی، خطی نیست. تاکنون روابط و مدل‌های مختلفی برای این نوع سیالات ارائه شده است که به‌طور خلاصه این مدل‌ها و معادلات مربوط به آن‌ها در جدول (۴-۱) بیان شده است. در این معادلات τ تنش برشی، τ_0 تنش برشی تسلیم، k شاخص سازگاری، γ_0 ضریب اصلاح برای نرخ کرنش $\dot{\gamma}$ ، μ_p لزجت دینامیکی و n ضریبی برای بیان رفتار سیال است. برخی از این مدل‌ها دارای تنش تسلیم می‌باشند، درواقع ابتدا سیال تحت تنش وارده هیچ‌گونه تغییر شکلی نداشته و با افزایش تنش وارده و تجاوز آن از تنش تسلیم، سیال شروع به حرکت می‌کند [۵۱]. سیالات غیر نیوتنی را می‌توان به‌صورت دیگری نیز تقسیم‌بندی کرد که به‌طور خلاصه در شکل (۴-۷) نشان داده شده است [۵۲]. در این مطالعه از مدل غیر نیوتنی هرشل-بالکی برای شبیه‌سازی استفاده شده است که در بخش بعد به‌طور مختصر توضیح داده می‌شود.



شکل ۷-۴ دست بندی سیالات غیر نیوتنی بر اساس وابستگی به زمان

جدول ۱-۴ مدل های ریاضی برای شبیه سازی رفتار سیالات غیر نیوتنی

مدل رفتاری	رابطه بکار برده شده	موارد کاربردی
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$	جریان بتن تازه
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$	روغن
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_p \dot{\gamma}}$	جوهرهای رنگی
Power Law	$\tau = k_{pl} \dot{\gamma}^{n_{pl}}$	محلول‌های پلیمری
Robertson-Stiff	$\tau = k (\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n$	مخلوط آب و سیمان

۴-۶-۲-۱ مدل غیرنیوتنی هرشل بالکلی

معمولاً از دوغاب متشکل از آب و کائولین برای توصیف رفتار جریان گل غیر نیوتنی استفاده می-شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که، مدل هرشل – بالکلی می‌تواند خواص غیرخطی تانسور تنش را به درستی توصیف کند. به طور خلاصه این مدل ترکیبی از مدل قانون توان و مدل بینگهام است که در تنش کمتر از نقطه تسلیم مانند مدل پلاستیک بینگهام و در بالای نقطه تسلیم مانند مدل قانون توان رفتار می‌کند. در این روش، تنش برای توصیف رفتار ویسکوپلاستیک غیرخطی جریان گل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_B \\ \tau_B + \mu_B (\dot{\gamma})^N & \tau \geq \tau_B \end{cases} \quad (4-44)$$

که در آن τ_B و μ_B و N به ترتیب تنش تسلیم، گرانروی پویای معادل و شاخص رفتاری جریان گل است. دو پارامتر نهایی معمولاً بر اساس نتایج تجربی تعیین می‌شوند. نرخ تنش برشی در فضای دوبعدی به صورت زیر است [۵۳]:

$$\dot{\gamma} = (2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (4-45)$$

4-7 الگوریتم جستجو

روابط SPH اصولاً بر مبنای جمع وزنی بر روی ذرات موجود در ناحیه حل بنا نهاده شده است. پیش از انجام محاسبات در این روش باید ارتباط بین ذرات مشخص شود تا بتوان مقادیر کمیت‌های مختلف را محاسبه کرد، به همین منظور در ابتدای حل مسائل با استفاده از روش SPH باید از یک الگوریتم جستجو بهینه استفاده کرد. مدت زمانی که CPU برای انجام یک جستجوی معمولی نیاز دارد متناسب با توان دوم تعداد کل ذرات (N^2) است. حل مسائل با تعداد ذرات زیاد و استفاده از یک الگوریتم جستجو معمولی، مدت زمان اجرای برنامه را افزایش خواهد داد.

فصل پنجم

مدلسازی عددی جریان گل

۵- مقدمه

هدف از این پژوهش مدل‌سازی عددی جریان گل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن است. بدین منظور در ابتدا به بررسی عملکرد نرم‌افزار پرداخته می‌شود. برای تحقق این هدف یک مخزن با دریچه که مخلوط گلی در پشت آن قرار دارد در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است سپس با بالا آمدن دریچه و جاری شدن گل مدل‌سازی شده، میزان جابجایی و سرعت آن برداشت شده و نتایج حاصل از آن، با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است [۵۴]. در بخش بعدی به بررسی تأثیر نوع و مقدار شیب بر سرعت و پیشروی جریان گل پرداخته شده است و در انتها به شبیه‌سازی یک نمونه جریان گل با استفاده از توپوگرافی یک کوه واقعی و مقایسه آن با شیب هم-ارز کوه پرداخته شده و تأثیر پستی و بلندی‌های کوه بر میزان طول پیشروی و سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱ معرفی نرم افزار

برای مدل‌سازی عددی جریان گل از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نرم‌افزار ABAQUS مجموعه‌ای بسیار توانمند از برنامه‌های مدل‌سازی است که بر پایه روش اجزاء محدود شکل گرفته است و توانایی حل طیف گسترده‌ای از مسائل علمی و صنعتی، از مسائل ساده و دارای تحلیل خطی تا مباحث پیچیده مدل‌سازی غیرخطی را دارا است. محیط کاربرپسند و جذاب در کنار کتابخانه قوی پیش‌بینی رفتار مواد مهندسی (از قبیل فلزات، لاستیک‌ها، مواد پلیمری، کامپوزیت‌ها، مصالح عمرانی مثل بتن‌های تقویت‌شده، فوم‌های فبری، سنگ و خاک) از آباکوس نرم‌افزاری کارآمد و موردتوجه محققین ساخته است.

نرم‌افزار آباکوس به شکل گسترده در صنایع اتومبیل‌سازی، هوافضا و ساخت تجهیزات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محصول، با سایر نرم‌افزارهای علمی و طراحی سازگار بوده و از زبان متن‌باز پایتون (Python) برای برنامه‌نویسی بهره می‌برد. به همین دلیل توانایی گسترده‌ای در ایجاد تغییرات در مدل ماده و بارگذاری دلخواه را به کاربر می‌دهد. همچنین این نرم‌افزار مجموعه بسیار مناسبی از قابلیت‌های فیزیکی در دنیای واقعی نظیر پیزوالکتریک، محیط‌های آکوستیک، محیط‌های متخلخل را فراهم آورده است. جالب است بدانید که نرم‌افزار ABAQUS در ابتدا با هدف بررسی رفتار فیزیکی غیرخطی مواد ارائه گردید و نتیجه آن قابلیت بالای نرم‌افزار کنونی در تحلیل بازه گسترده از مواد با رفتار غیرخطی (مانند الاستومرها یا شبه لاستیک‌ها) است.

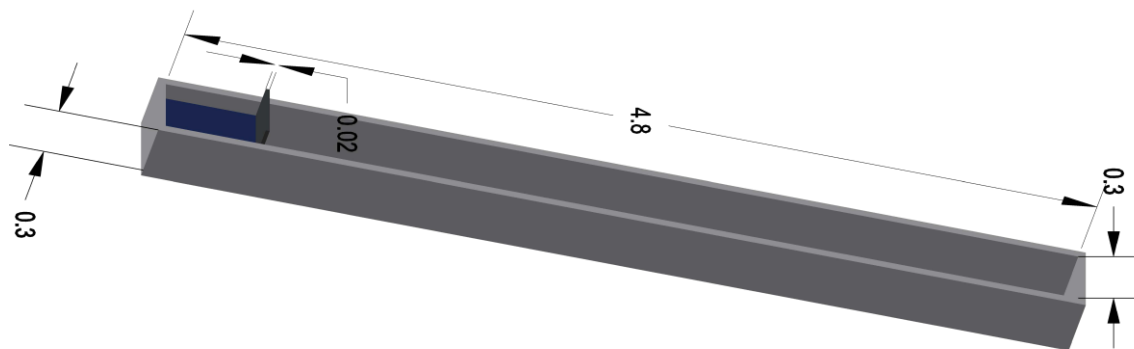
با توجه به این‌که در نسخه ۲۰۱۶ نرم‌افزار آباکوس تعریف شرایط مرزی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار بهبود یافته است و هدف ما در این پژوهش شبیه‌سازی جریان گل به روش SPH است، در نتیجه از ورژن ۲۰۱۶ این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی استفاده شده است.

از دیگر نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش می‌توان به نرم‌افزارهای Sketchup، Rhinoceros و AutoCAD نام برد.

۵-۲ فیزیک مسئله

به منظور بررسی موج و پروفیل سطح تشکیل شده ناشی از باز شدن ناگهانی دریچه، از یک کانال مستطیلی استفاده شده است. این کانال شیشه‌ای و دارای طول $4/8$ متر، ارتفاع $0/3$ متر و عرض $0/3$ متر است که در شکل (۵-۱) نمایی از کانال شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. شیب کف کانال صفر در نظر گرفته شده است. در بالادست کانال، یک دریچه از جنس پلکسی گلاس و در فاصله $0/5$ متری از انتهای کانال قرار داده شده است. ضخامت این دریچه $0/02$ متر است که با سرعت $0/4$ متر

بر ثانیه به سمت بالا حرکت می‌کند. پشت این دریچه مواد گلی به ارتفاع ۰.۲ متر قرار داده شده است.



شکل ۵-۱ نمای شماتیک مخزن مورد استفاده در مدلسازی

۵-۳ تعریف مشخصات مواد گل

در فصل سوم اشاره شد که سیالات به ۲ دسته سیالات نیوتنی و سیالات غیر نیوتنی تقسیم می‌شوند. گل را در این دسته‌بندی می‌توان در زیرشاخه سیالات غیر نیوتنی جای داد که مدل رئولوژیکی مناسب برای بیان رفتار آن، مدل هرشل - بالکلی است. از آنجایی که در نرم‌افزار آباکوس تنها ماژول مربوط به معرفی مواد نیوتنی موجود است برای ایجاد مواد غیر نیوتنی باید کد مربوط به آن نوشته شود. به‌طور کلی برای ایجاد مواد در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از دو روش استفاده کرد. در روش اول، برای موادی که مشخصات آن در Helpp آباکوس موجود نمی‌باشد باید کد مربوطه در پایتون نوشته و به آباکوس منتقل شود اما در روش دوم اگر مواد در کتابخانه آباکوس موجود باشد می‌توان از نرم‌افزار یک فایل به صورت inp خروجی گرفت و کدهای مربوطه که از Helpp آباکوس استخراج شده را در این فایل وارد کرد و دوباره توسط نرم‌افزار بازخوانی کرد. از آنجایی که مدل رفتاری هرشل-بالکلی در کتابخانه آباکوس موجود بود در این پژوهش پس از انجام کامل مدل‌سازی در منو Job رفته و با انتخاب گزینه Write input یک فایل به صورت Text و با فرمت inp در محل ذخیره‌سازی مدل ایجاد شد سپس فرمول‌های مربوط به مدل رفتاری هرشل-بالکلی استخراج و دستورات برای معرفی این مواد در فایل inp اعمال شد.

خصوصیات مواد گلی و پارامترهای مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی استفاده شده در این شبیه سازی در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول ۵-۱ مشخصات مواد گلی مورد استفاده [۵۴]

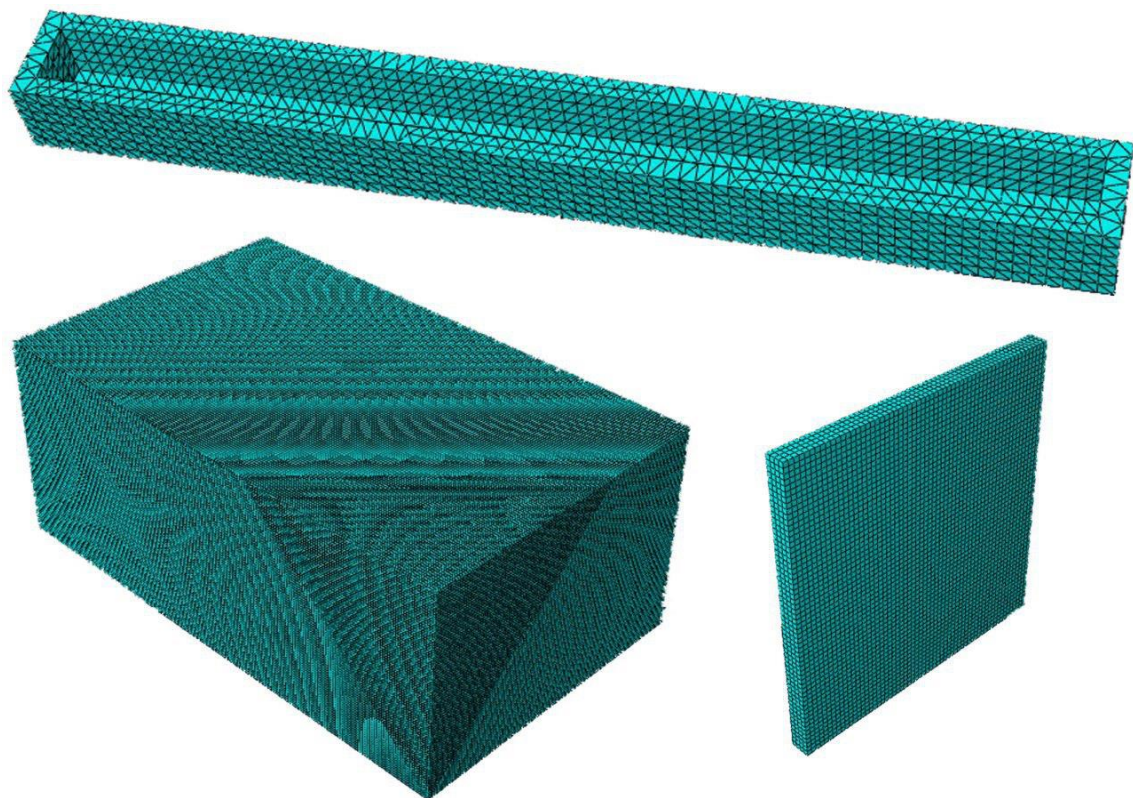
نوع سیال	تنش تسلیم (Pa)	چگالی (Kg/m^3)	K	N
گل بنتونیت	۹/۲۴۲	۱۱۳۸/۲۸	۳/۱	۰/۳۳

۵-۴ شبیه سازی

مخزن موردنظر طبق مشخصات گفته شده در نرم افزار مدل سازی شد. در اینجا برای تحلیل از روش SPH استفاده شده است. در نرم افزار آباکوس برای استفاده از روش بدون شبکه SPH باید ابتدا اجزاء مدل مش بندی شده سپس به بخش Assign Element type رفته و گزینه Conversion to Particles را فعال کرد بدین صورت مش بندی به گره تبدیل می شود. عدد مربوط به گزینه PPD مشخص می کند که مشخصات هر مش به چند گره داده شود. در اینجا با فرض عدد یک برای PPD مشخصات هر مش به یک گره اعمال می شود. از آنجایی که مش بندی تأثیر بسزایی در نتایج خروجی و دقت حل دارد، در اینجا برای انتخاب بهترین اندازه مش، این مدل سازی با مش بندی های مختلفی صورت گرفت و اندازه مش تا جایی کوچک شد که کوچک تر شدن بیشتر اندازه مش تأثیر چندانی روی نتیجه ایجاد نمی کرد و تنها زمان محاسبات را طولانی تر می کرد. ابعاد شبکه استفاده شده برای هر بخش در این شبیه سازی در جدول (۵-۲) و نحوه مش بندی آن ها در محیط نرم افزار در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱ مشخصات مش مورد استفاده

اشکال	مخزن	دریچه	مواد گل
اندازه مش (m)	۰.۷	۰.۵	۰.۲۵



شکل ۵-۲ نحوه مش بندی اجزای مدل در محیط نرم افزار

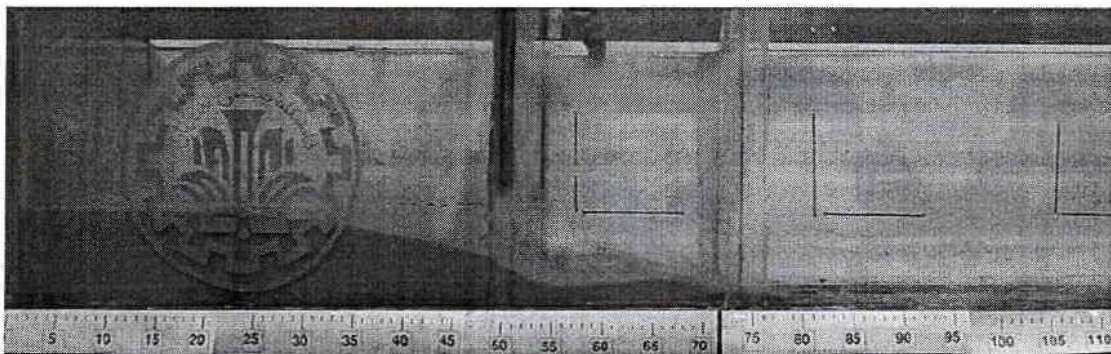
۵-۴-۱ نتایج شبیه سازی

الف) نتایج با فرض عدم وجود اصطکاک

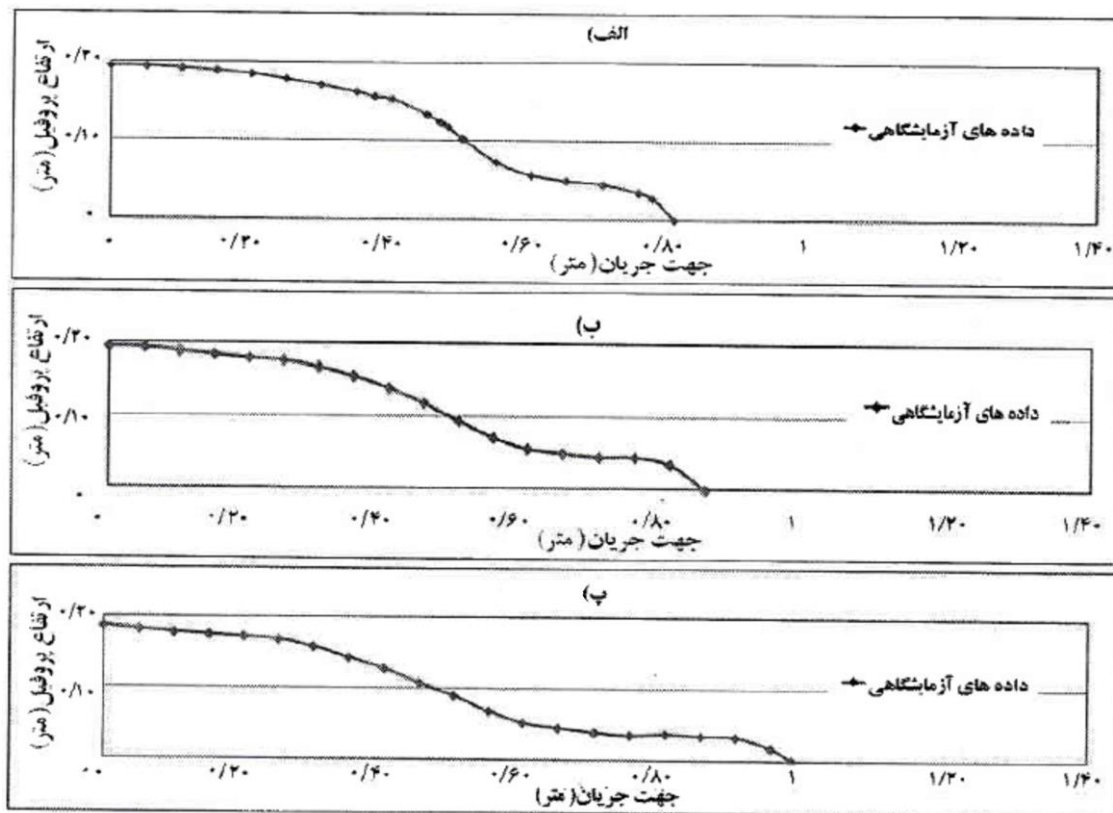
با توجه به این که در مدل آزمایشگاهی برای مخزن از شیشه صیقلی استفاده شده بود که تا حد امکان از اصطکاک موجود کاسته شود و این گونه فرض شده بود که اصطکاک صفر است در نتیجه

ابتدا، مدل‌سازی با فرض عدم وجود اصطکاک انجام شد.

در مدل آزمایشگاهی به‌منظور ثبت طول پیشروی جریان پس از باز شدن دریچه از یک دوربین استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا با تنظیم پایه دوربین، زاویه دید دوربین نسبت به جداره‌ی طولی کانال به‌صورت قائم تنظیم می‌شود. پس از آن فریم‌های (عکس‌های) حاصله برداشت و به نرم‌افزار متلب منتقل می‌شود. سپس این تصاویر بر روی یک صفحه شطرنجی قرار داده شده و میزان طول پیشروی و ارتفاع جریان محاسبه می‌شود نمونه‌ای از این عکس‌ها در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. در شکل (۴-۵) پروفیل‌های به‌دست آمده از پردازش تصویر پدیده باز شدن دریچه در زمان‌های ۲۲، ۲۶ و ۳۴ ثانیه نشان داده شده است [۵۴].

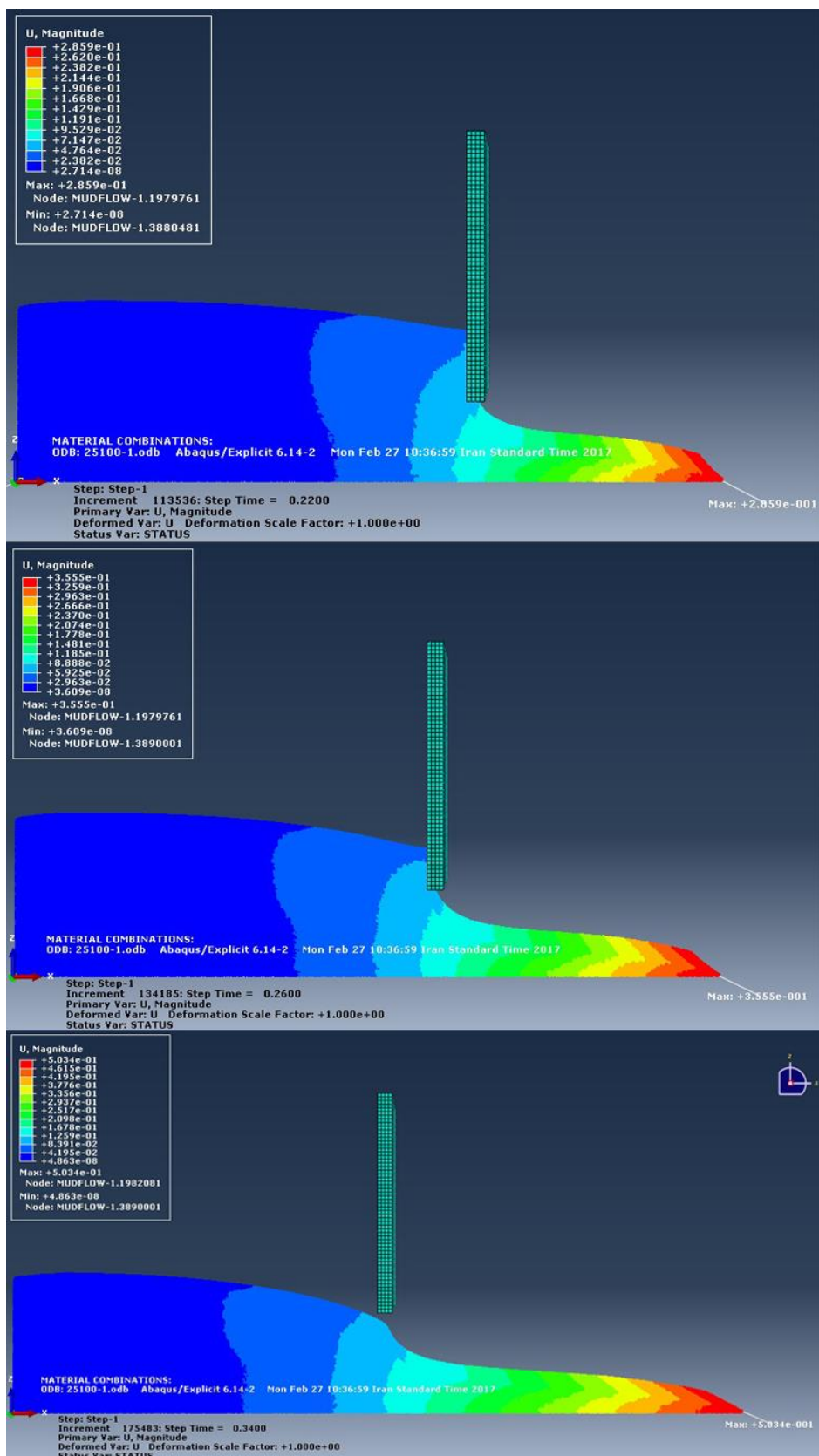


شکل ۳-۵ نمونه‌ای از فرم‌های بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی



شکل ۴-۵ نتایج حاصل از آزمایشگاه در زمان های ۲۲، ۲۶ و ۳۴ ثانیه [۵۴]

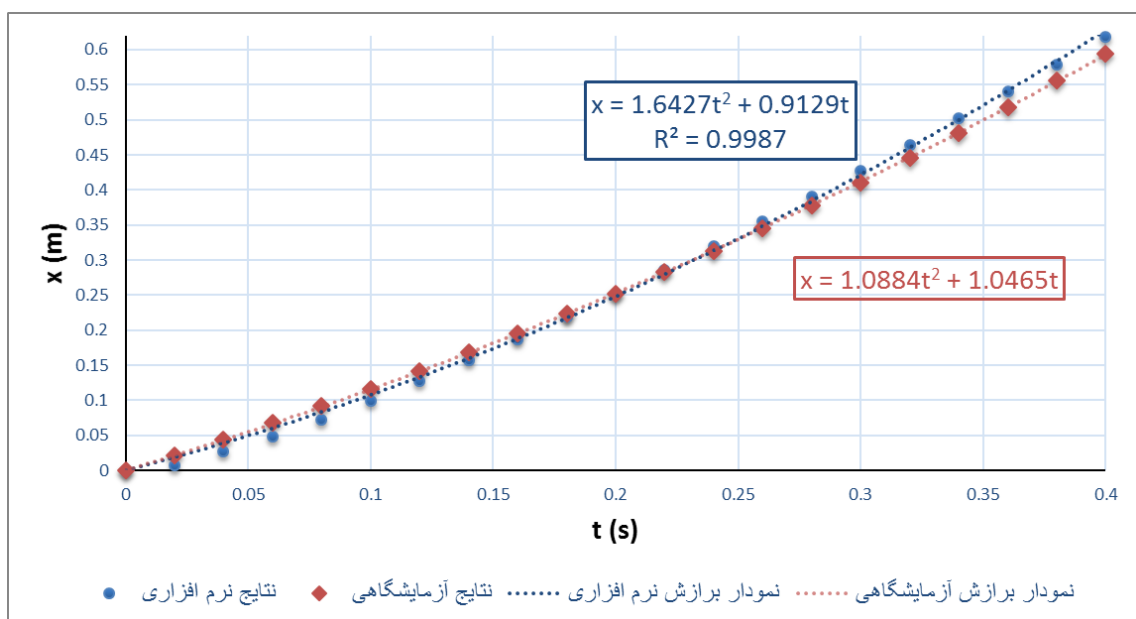
همچنین، نتایج حاصل از مدل سازی این پدیده در نرم افزار برای زمان های ۲۲، ۲۶ و ۳۴ ثانیه در شکل (۵-۵) نشان داده شده است.



شکل ۵-۵ نتایج حاصل از نرم افزار در زمان های ۰.۲۲، ۰.۲۶ و ۰.۳ ثانیه

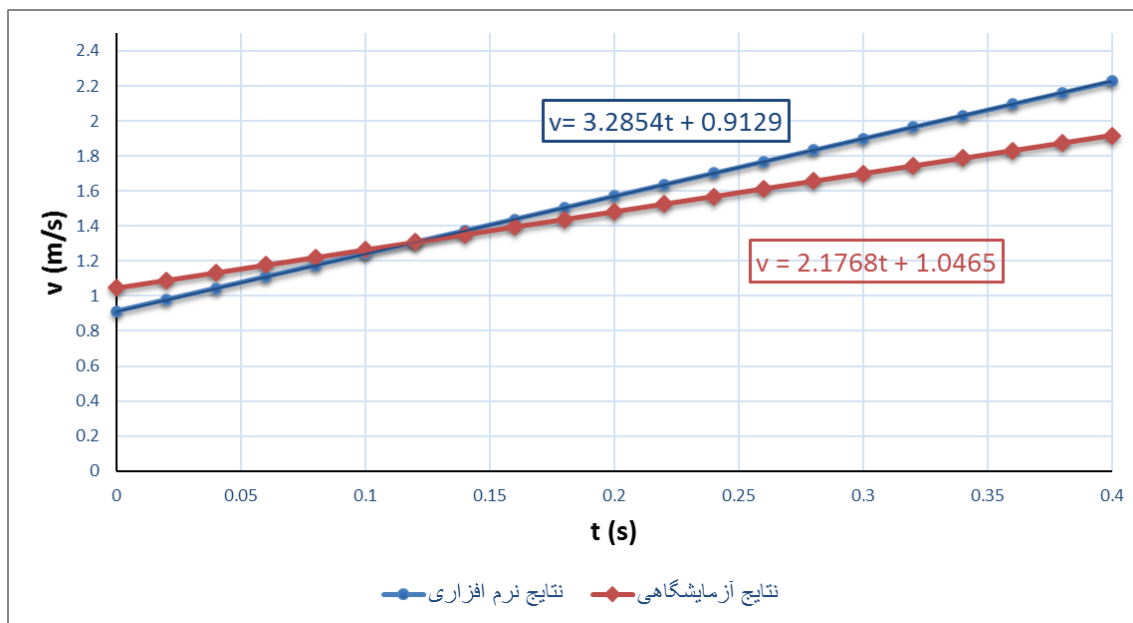
مقادیر به دست آمده به عنوان جابجایی از هر دو روش آزمایشگاهی و مدل سازی، نسبت به زمان به صورت نقطه در نمودار (۱-۵) ترسیم شده است. نمودار رسم شده برای نتایج مدل سازی، برای گر-ای است که در زمان ۰/۴ ثانیه دارای بیشترین طول پیشروی می باشد. باید توجه داشت که در اینجا از اندازه جابجایی استفاده شده است که از فرمول (۱-۵) به دست می آید.

$$u = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-5)$$



نمودار ۱-۵ منحنی مکان - زمان نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی بدون اصطکاک

سپس با استفاده از روابط ریاضی و روش حداقل مربعات، بهترین منحنی عبوری از این نقاط و معادله آن به دست آمده است. با توجه به نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی و برازش منحنی عبوری از نقاط به دست آمده و مقایسه این دو نمودار می توان دریافت که نتایج حاصله بسیار به یکدیگر نزدیک است. سپس به منظور مطالعه و بررسی دقیق تر از معادله منحنی جابجایی-زمان، بر حسب زمان مشتق گرفته شده، و منحنی سرعت رسم شد که در نمودار (۲-۵) قابل مشاهده است.



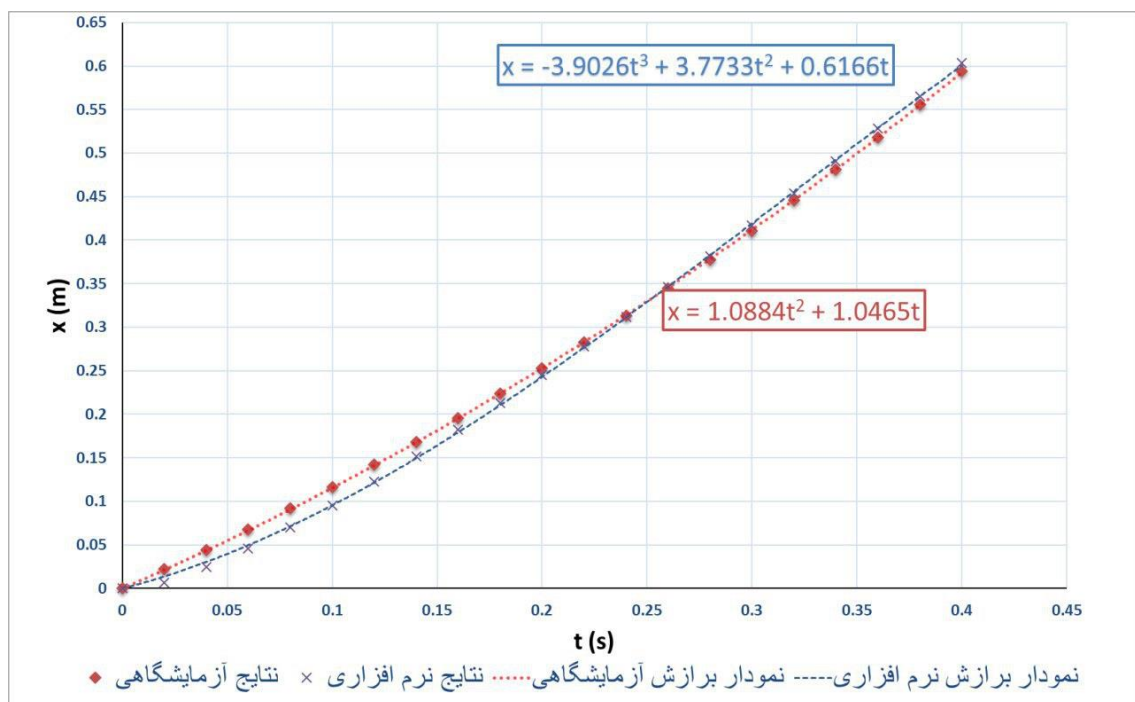
نمودار ۲-۵ منحنی سرعت - زمان برای نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی بدون اصطکاک

با توجه به نمودار (۵-۱) و معادلات به دست آمده برای جابجایی در مدل نرم افزاری می توان گفت، از آنجایی که معادله طول پیشروی اکیداً صعودی و به صورت یک سهمی تخمین زده شده، طول پیشروی هرگز به یک مقدار ثابت نمی رسد. به عبارت دیگر، جریان با گذشت زمان همچنان ادامه خواهد داشت. البته این امر، طبیعی است چراکه در این پژوهش از اصطکاک صرف نظر شده است. نظر به نمودار (۵-۲) سرعت جریان در آزمایشگاه و مدل، هر دو رو به افزایش است ولی با بررسی دقیق تر نمودار می توان دریافت که نرخ افزایش سرعت در جریان آزمایشگاهی کمتر از نرخ افزایش سرعت در جریان مدل سازی است این رخداد را می توان دال بر این دانست که هرچند هدف از مدل سازی آزمایشگاهی صرف نظر کردن از اصطکاک بوده ولی با این وجود مقدار ناچیزی اصطکاک باعث افت نرخ افزایش سرعت شده است. برای اثبات این امر تصمیم بر مدل سازی همراه با اصطکاک ناچیز گرفته شد.

ب) نتایج با فرض وجود اصطکاک ناچیز

از آنجایی که هیچ‌گاه در پدیده‌های طبیعی اصطکاک، صفر مطلق نیست به‌منظور رسیدن به نتایجی دقیق‌تر این شبیه‌سازی با چندین ضریب اصطکاک ناچیز انجام شد. با اعمال ضریب اصطکاک ۰.۱، درصد نتایج دقیق‌تری و منطبق‌تری بر نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد.

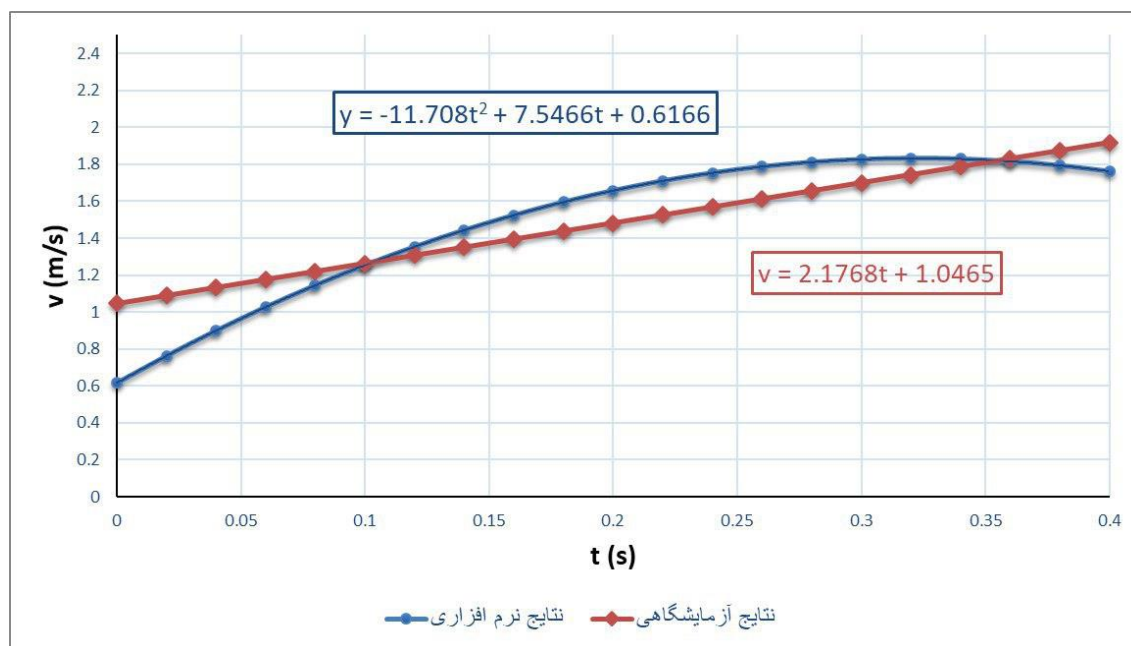
نمودار جابجایی – زمان برای نتایج مدل‌سازی باوجود اصطکاک و آزمایشگاهی در نمودار (۳-۵) نشان داده شده است.



نمودار ۳-۵ منحنی جابجایی – زمان نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی با اصطکاک ناچیز

در نمودار (۳-۵) مطابق نمودار (۱-۵) جابجایی گره موردنظر در حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است با این تفاوت که در نمودار (۳-۵) نتایج با فرض وجود اصطکاک رسم شده است. این بار نیز نتایج حاکی از تطابق بیشتر خروجی نرم‌افزار با آزمایشگاه است که نشان‌دهنده وجود اصطکاک ناچیز در مدل آزمایشگاهی است. از آنجاکه تابع جابجایی برحسب زمان در صورت وجود

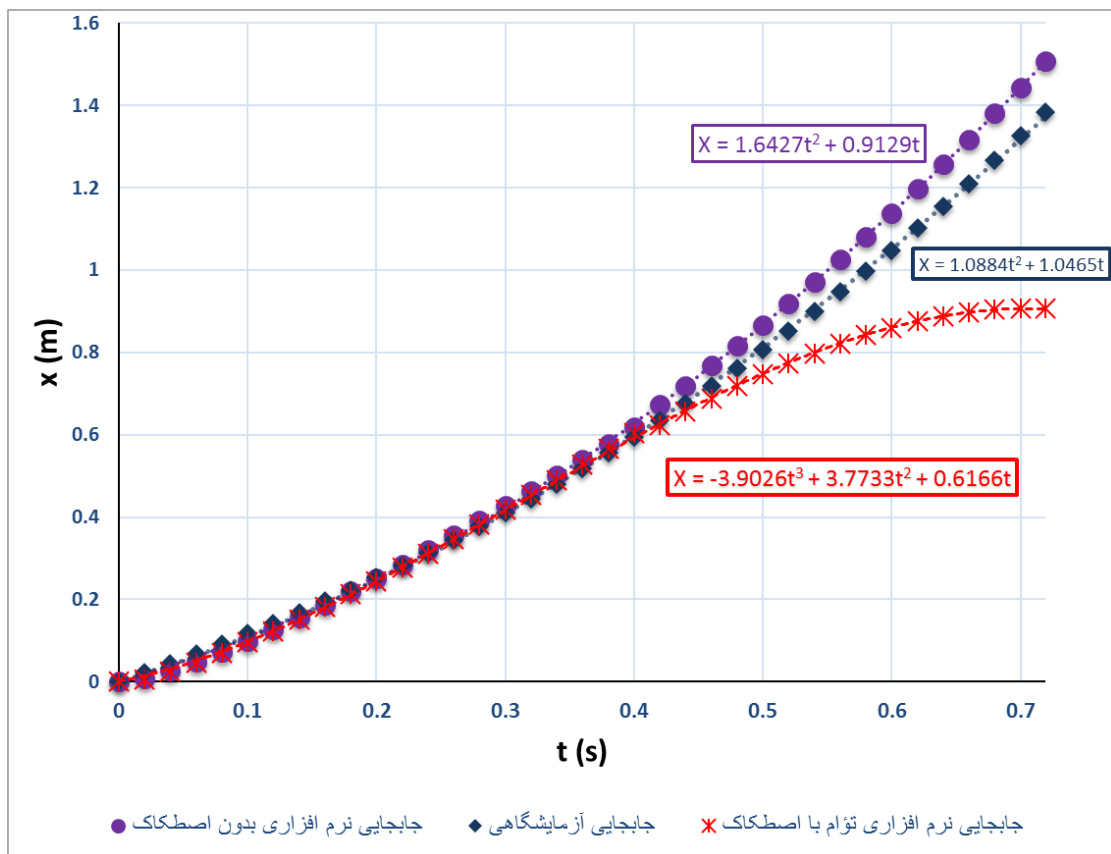
اصطکاک نمی‌تواند تابعی اکیداً صعودی باشد برای به دست آوردن منحنی برآزش جابجایی گره مربوطه همراه با اصطکاک از تابعی ابتدا صعودی و سپس نزولی (در این پروژه درجه ۳) استفاده شده است. سپس برای به دست آوردن مقادیر سرعت لحظه‌ای در هر دو حالت از مقادیر تابع جابجایی مشتق گرفته شد و نمودار سرعت – زمان آن رسم شد که در نمودار (۵-۴) نشان داده شده است.



نمودار ۵-۴ منحنی سرعت – زمان برای نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی با اصطکاک ناچیز

قابل مشاهده است که سرعت در حالت آزمایشگاهی تابعی خطی و اکیداً صعودی است اما در حالت نرم‌افزاری همراه با اصطکاک منحنی سرعت درجه دو بوده و محور افقی را در زمان ۰/۷۱۷ ثانیه قطع می‌کند. به عبارتی دیگر در این زمان سرعت جریان به صفر رسیده و در اثر اصطکاک جریان متوقف می‌شود.

جهت مقایسه و بررسی ۳ حالت (آزمایشگاهی، مدل‌سازی بدون اصطکاک و مدل‌سازی با اصطکاک) نمودار (۵-۵) رسم شده است.



نمودار ۵-۵ منحنی جابجایی برای حالت آزمایشگاهی، نرم افزاری با و بدون اصطکاک

همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی جابجایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی تا زمان ۰/۴ ثانیه بر منحنی حاصل از مدل‌سازی با اصطکاک منطبق‌تر است ولی از این زمان به بعد به علت کمتر شدن سرعت جریان تأثیر اصطکاک بر کاهش سرعت جریان بیشتر خواهد بود و باعث می‌شود سرعت جریان در حالت مدل‌سازی شده با اصطکاک با نرخ بیشتری کاهش یابد و از منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی فاصله بیشتری بگیرد. به‌طوری‌که در حالت مدل‌سازی شده با فرض اصطکاک، پس از گذشت زمان ۰/۷۱۷ ثانیه جریان کاملاً متوقف می‌شود که در این زمان طول پیشروی ۰/۹ متر می‌باشد. اما در حالت آزمایشگاهی در این زمان سرعت جریان ۲/۶ متر بر ثانیه است. خلاصه آنچه گفته شد در جدول (۳-۵) برای هر سه حالت نشان داده شده است. تمامی مدل‌سازی‌ها تا زمان ۰/۴ ثانیه آنالیز شده سپس با استفاده از درون‌یابی منحنی‌های هر ۳ حالت تا زمان ۰/۷۱۷ ثانیه ادامه یافت است.

جدول ۵-۳ نتایج کلی برای سه حالت آزمایشگاهی و مدلسازی با و بدون اصطکاک

آزمایشگاهی			نرم افزار بدون اصطکاک			نرم افزار با اصطکاک		
زمان (s)	۰	۰/۴	۰/۷۱۷	۰/۴	۰	۰/۷۱۷	۰/۴	۰
جابجایی (m)	۰	۰/۵۹	۱/۳۷	۰/۶۱	۰	۱/۴۹	۰/۶۰۳	۰/۹
سرعت (m/s)	۰	۱/۹۱	۲/۶	۲/۲۲	۰	۳/۲۶	۱/۷۷	۰

۵-۵ بررسی عوامل مؤثر بر جریان گل

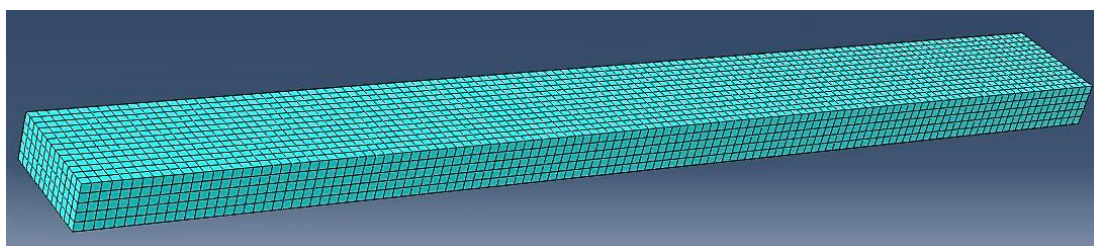
عوامل مختلفی می تواند بر جریان گل تأثیر داشته باشد از جمله چگالی گل، نوع خاک، شیب کوه و میزان پستی و بلندی های کوه و پوشش گیاهی آن که باعث کاهش سرعت جریان می شود.

همان طور که می دانید با کاهش چگالی مواد گلی، سرعت آن افزایش می یابد در نتیجه در اینجا ما به میزان تأثیر پستی و بلندی های زمین و نوع آن ها (محدب یا مقعر) می پردازیم. در اکثر شبیه سازی ها به منظور ساده سازی مسئله از یک شیب معادل کوه برای شبیه سازی استفاده می شود و تأثیر پستی و بلندی های زمین و پوشش گیاهی موجود با اعمال یک ضریب اصطکاک اعمال می شود. در اینجا با مدل سازی دو نوع کوه که یکی از آن ها دارای شیبی محدب و دیگری دارای شیبی مقعر می باشند و مقایسه دو کوه با شیب هم ارزشان به بررسی تأثیر نوع پستی و بلندی ها بر میزان سرعت و جابجایی مواد گلی پرداخته می شود و بررسی می شود که آیا استفاده از شیب معادل (هم ارز) برای شبیه سازی جریان گلی مناسب می باشد یا خیر.

۵-۵-۱ کوه با شیب مقعر

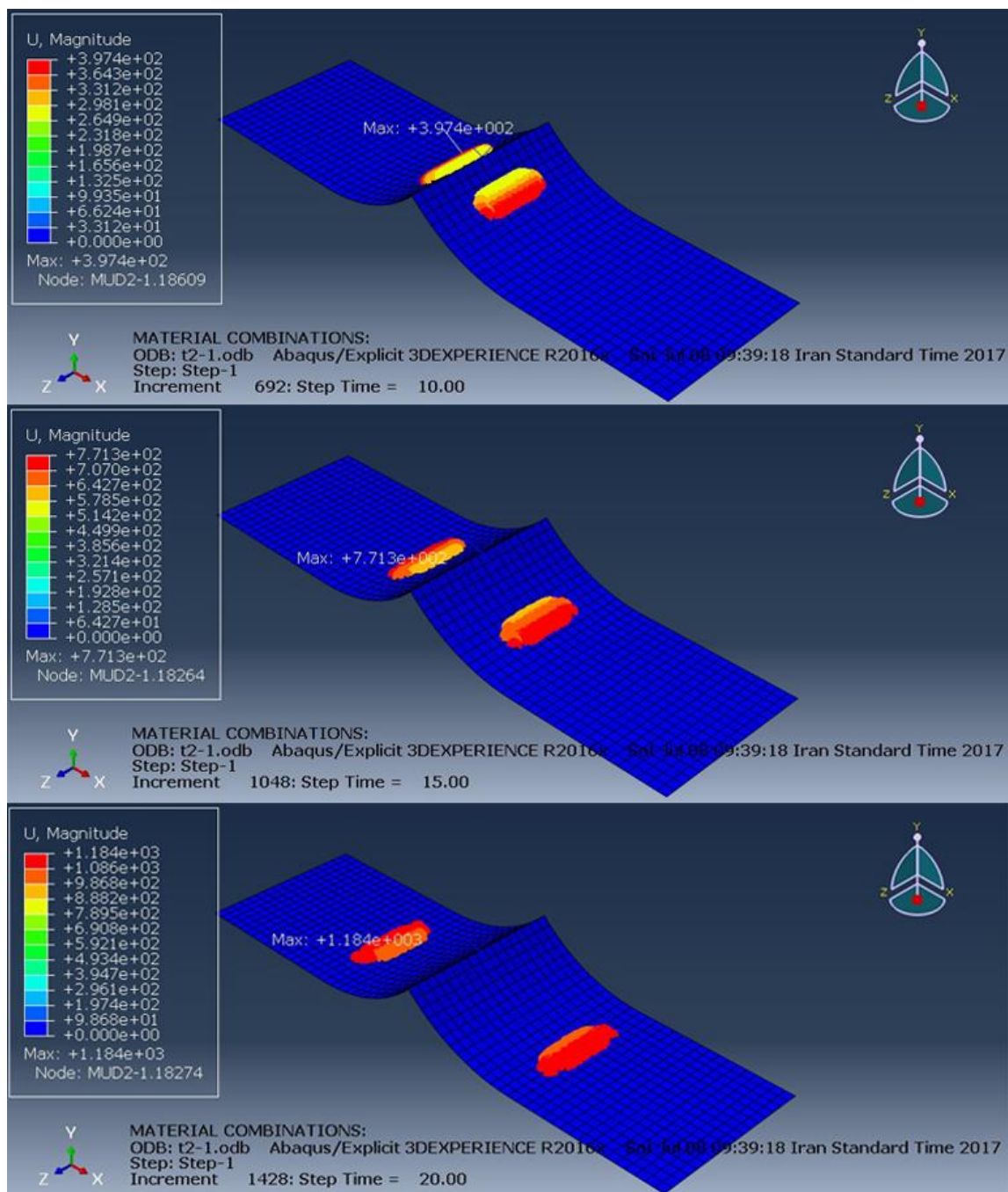
از آنجایی که یافتن شیب هم‌ارز برای هر منحنی کار دشواری است برای ایجاد شیب مقعر از $\frac{1}{8}$ محیط یک دایره به عنوان تقعر استفاده شده است. بدین منظور معادله دایره در اکسل برای بخش مورد نظر نوشته و منحنی مقعر آن رسم شد. سپس از طریق اکسل شیب هم‌ارز آن رسم و میزان این شیب محاسبه شد. در نتیجه، هر دو شیب مقعر و شیب هم‌ارز آن توسط نرم‌افزار اتوکد ترسیم و به نرم‌افزار آباکوس منتقل شد.

مشخصات مواد گلی مورد استفاده در این شبیه‌سازی مشابه آنچه در بخش قبل گفته شد، است. از آنجایی که مقایسه بین دو مدل با مشخصات مشابه می‌باشد به منظور جلوگیری از طولانی شدن محاسبات از مش با اندازه ۴ متری برای مواد گلی در هر دو مدل کوه مقعر و شیب هم‌ارز آن استفاده شده است که در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. ابعاد مکعب $500 \times 50 \times 20$ متر است و در کل حجم ۵۰۰ هزار متر مکعب مواد گلی در هر طرف شیب به منظور جلوگیری از خطاهای احتمالی و ایجاد تقارن قرار داده شده است.

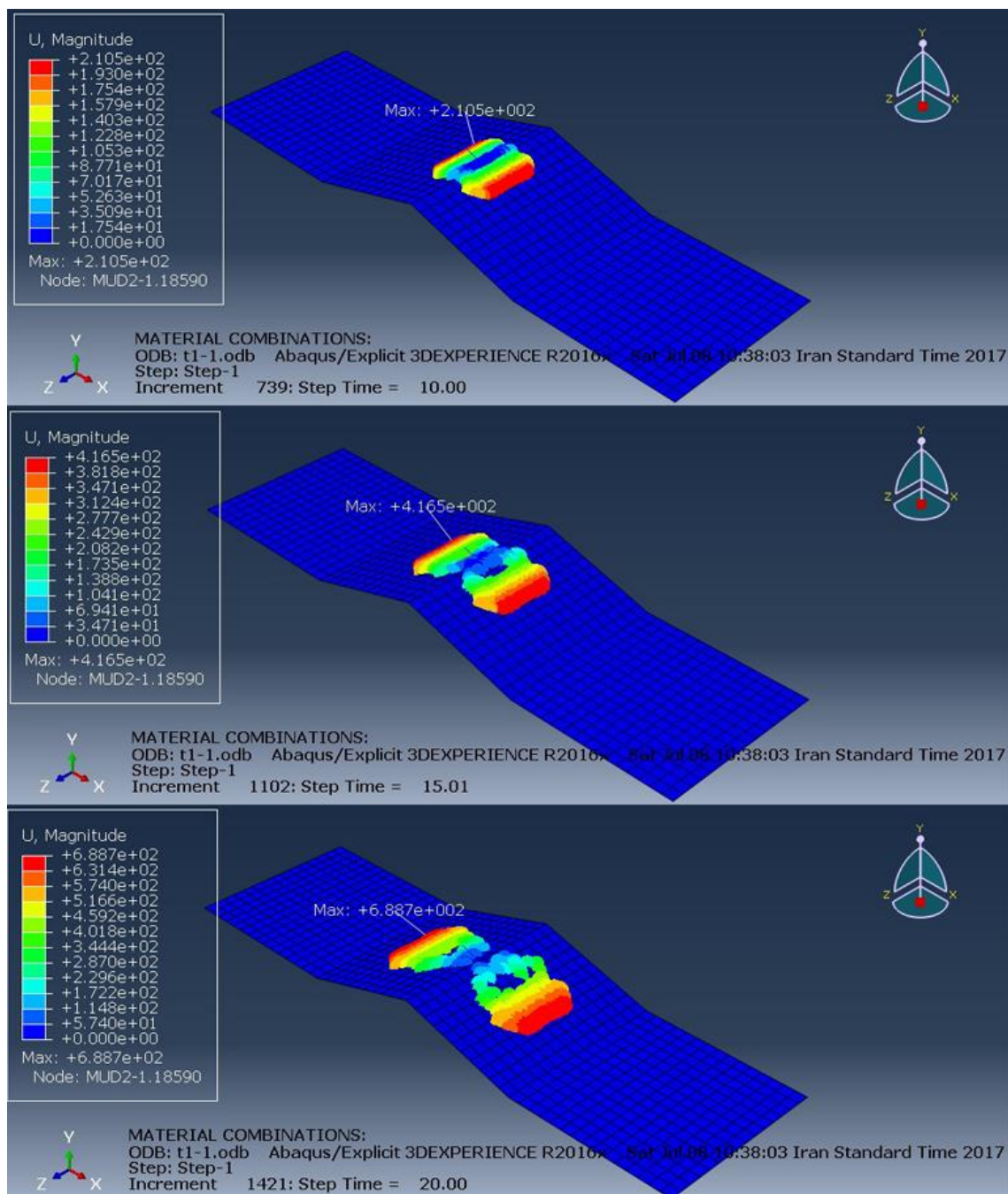


شکل ۵-۶ نحوه مش بندی گل در نرم افزار

در شکل (۵-۷) نحوه انتشار جریان گل بر روی شیب مقعر و در شکل (۵-۸) بر روی شیب هم‌ارز آن در زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه نشان داده شده است.



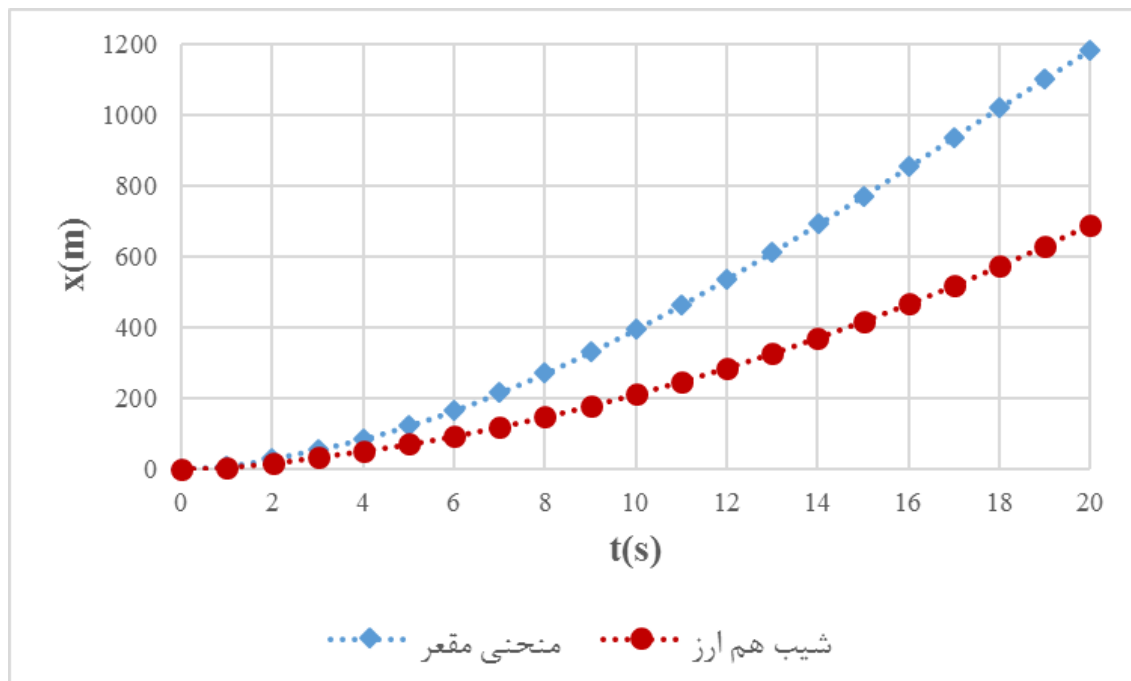
شکل ۵-۷ نحوه انتشار گل بر روی شیب مقعر در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه



شکل ۵-۸ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز منحنی مقعر در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

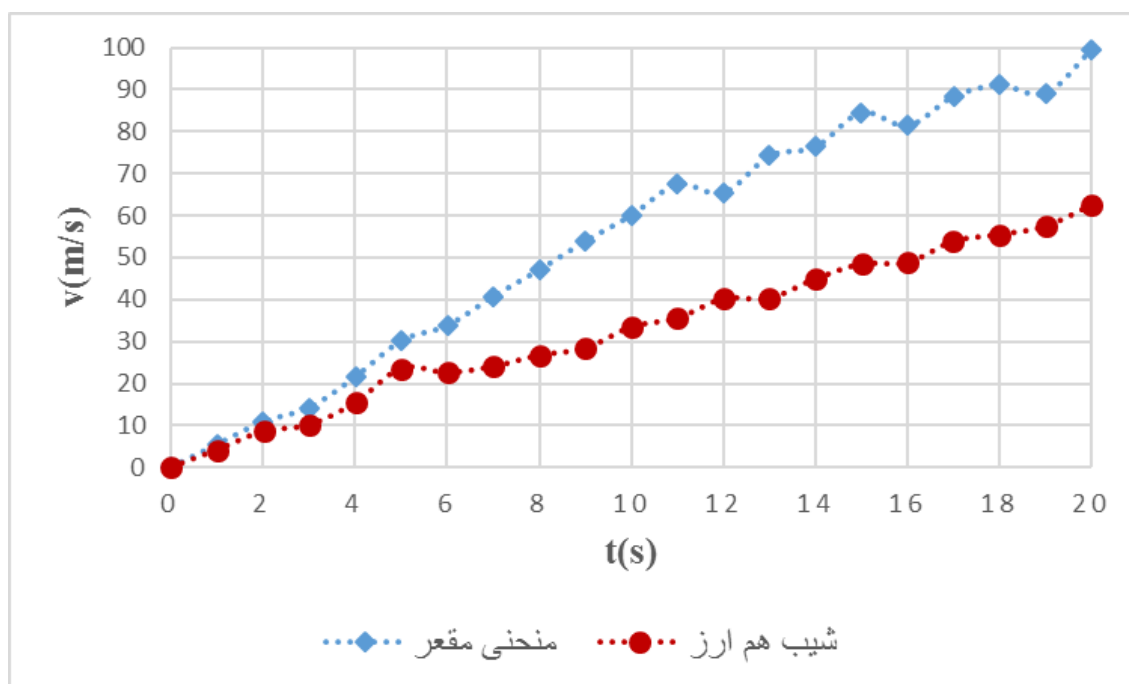
منحنی جابجایی - زمان برای هر دو مدل شبیه سازی شده در نمودار (۵-۶) نشان داده شده است. این نمودارها برای گره های ترسیم شده است که در زمان ۲۰ ثانیه دارای بیشترین مقدار جابجایی است. همان طور که مشاهده می شود نرخ افزایش جابجایی در مدل کوه مقعر بسیار بیشتر از مدل شیب هم-

ارز آن است به طوری که در طول ۲۰ ثانیه مواد گلی در مدل کوه مقعر دارای جابجایی ۱۲۰۰ متر بوده در حالی که در مدل شیب هم‌ارز آن تنها ۷۰۰ متر جابجایی داشته است.



نمودار ۵-۶ منحنی جابجایی - زمان برای شیب مقعر و شیب هم ارز آن

به منظور بررسی دقیق تر منحنی سرعت - زمان برای هر دو نمونه از نرم افزار استخراج شد که در نمودار (۵-۷) نشان داده شده است. این منحنی ها برای گره های رسم شده که در زمان ۲۰ ثانیه دارای بیشترین سرعت است. در شیب هم‌ارز نمودار تقریباً به صورت یکنواخت در حال افزایش است و تقریباً خطی می باشد اما در کوه مقعر سرعت در طول زمان کم و زیاد شده است ولی دارای سیری صعودی می باشد و این بدان خاطر است که ما نمودار سرعت را برای یک گره رسم کرده ایم و این گره در زمان های مختلف دارای مکان های گوناگون بوده و در اثر جریان یافتن مواد گلی و غلتیدن مواد بر روی هم و ایجاد آشفتگی دارای سرعت هایی مختلف است. همان طور که از شکل پیداست سرعت مواد در کوه مقعر بیشتر از سرعت آن در شیب هم‌ارز آن است.



نمودار ۵-۷ منحنی سرعت - زمان برای شیب مقعر و شیب هم ارز آن

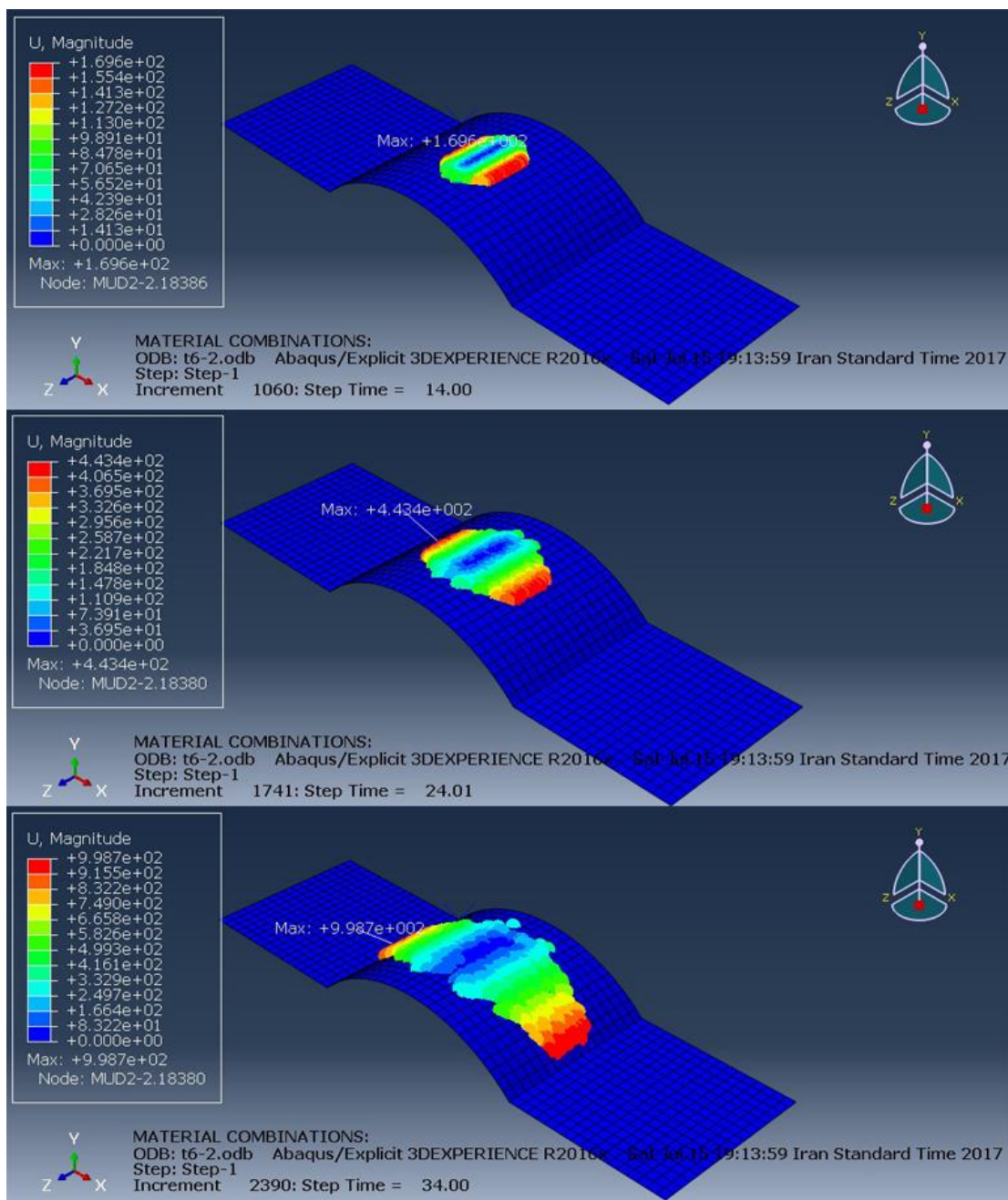
با توجه به نمودارهای موجود این گونه می توان استنباط نمود که در حالتی که کوه دارای انحنایی مقعری شکل باشد برای استفاده از شیب هم ارز و ساده سازی مسئله، استفاده از یک شیب معمولی با یک ضریب اصطکاک نمی تواند مناسب باشد. درواقع در اینجا تنها باید اثر اصطکاک بین سطح و مواد و پوشش گیاهی که باعث کاهش سرعت جریان می شود را لحاظ نمود و از اعمال اصطکاک به منظور وجود این گونه پستی و بلندی ها اجتناب کرد و حتی اگر این اختلاف بسیار زیاد باشد باید با اعمال حجم مواد گلی بیشتر بر روی شیب هم ارز یا ایجاد یک نیروی اولیه این تفاوت را جبران کرد اما این کار مستلزم آزمون و خطا می باشد تا به جوابی دقیق برای شیب هم ارز برسیم. به طور کلی در اینگونه شیب ها استفاده از شیب هم ارز نمی تواند کاملاً دقیق باشند و به درستی میزان سرعت و جابجایی مواد گلی را نشان دهند.

۵-۵-۲ کوه با شیب محدب

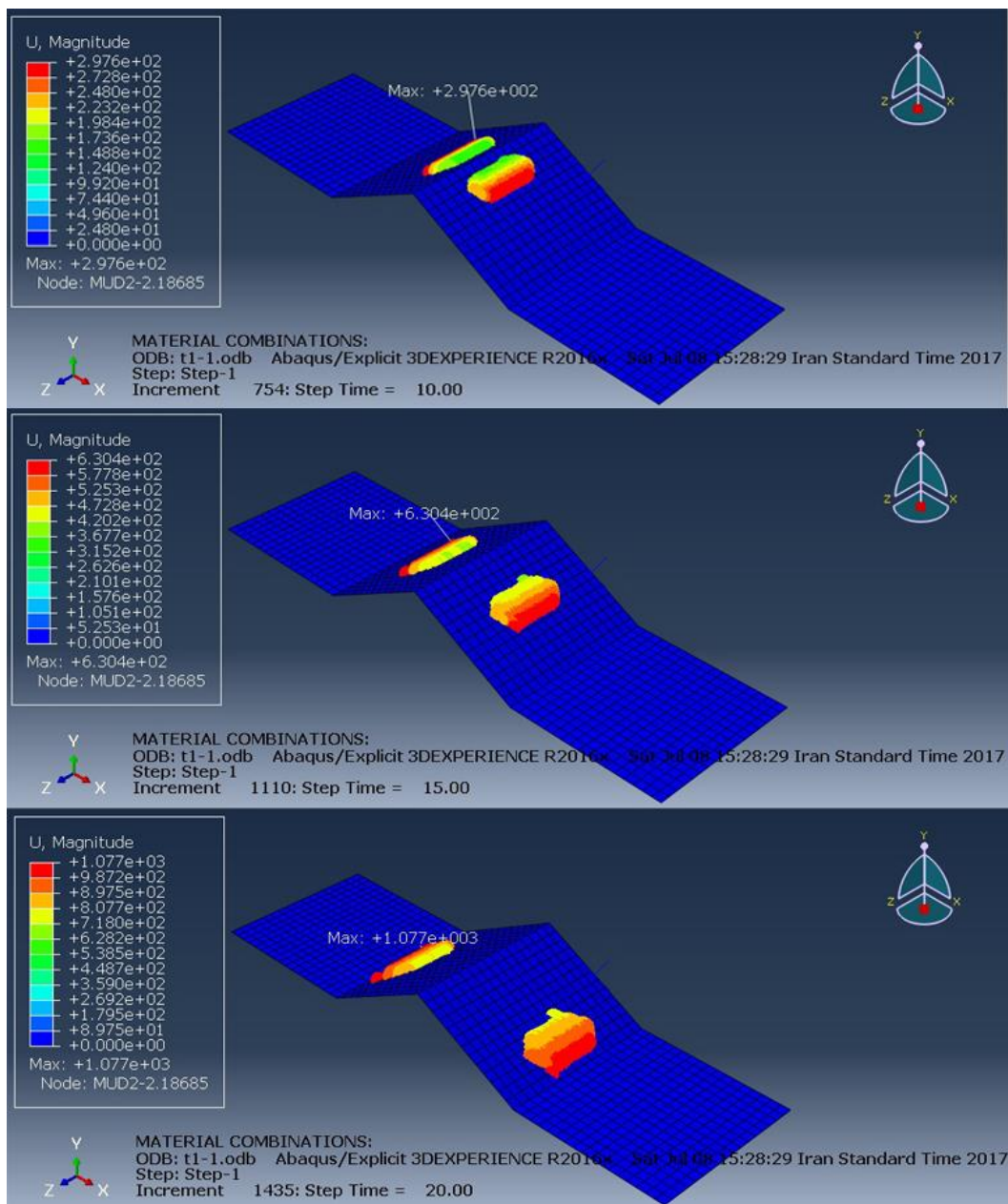
در اینجا نیز مشابه کوه مقعر از $\frac{1}{8}$ محیط دایره استفاده شده است و اشکال موردنظر توسط اتوکد ترسیم و به محیط نرم افزار منتقل شده است.

مواد گلی مورد استفاده در اینجا نیز دارای مشخصاتی مشابه با آنچه گفته شد، است. همچنین ابعاد و حجم مواد گلی و ابعاد مش مورد استفاده در اینجا نیز مشابه کوه مقعر بوده و به علت جلوگیری از خطا و ایجاد تقارن مواد گلی در دو طرف شیب قرار داده شده است.

در شکل (۵-۹) نحوه انتشار مواد گل بر روی کوه محدب در زمان های ۲۴، ۱۴ و ۳۴ ثانیه و در شکل (۵-۱۰) نحوه انتشار و جابجایی مواد بر روی شیب هم ارز آن در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه نشان داده شده است.



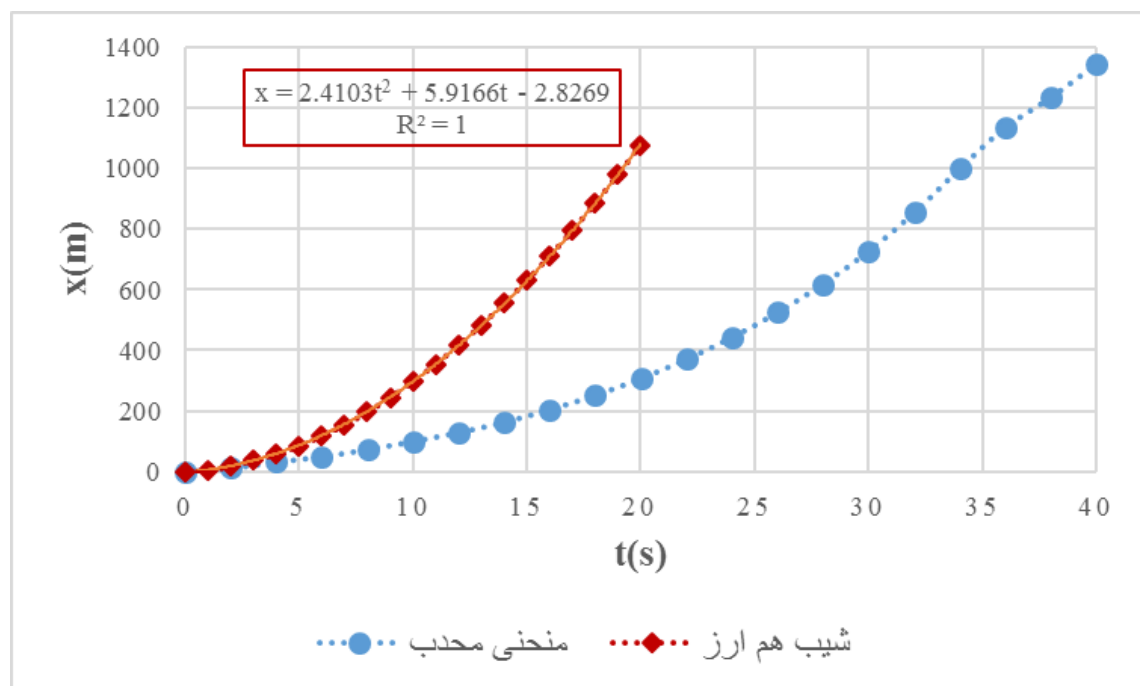
شکل ۵-۹ نحوه انتشار جریان بر روی شیب محدب در زمان های ۱۴، ۲۴ و ۳۴ ثانیه



شکل ۵-۱۰ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز با منحنی محدب در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

پس از آن، منحنی جابجایی نسبت به زمان برای هر دو مدل ترسیم شد که در نمودار (۵-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود شیب منحنی مربوط به کوه محدب کمتر از منحنی شیب هم ارز آن است و در زمان ۳۵ ثانیه مواد گلی به انتهای کوه محدب می رسد در حالی که در شیب

هم‌ارز آن در طول ۲۰ ثانیه به پایین شیب رسیده و مواد گلی ۱۱۰۰ متر جابجا شده‌اند. پس از آن، معادله حاصل از منحنی شیب هم‌ارز به‌دست آورده شد. با توجه به آن، در شیب هم‌ارز با سپری شدن ۳۵ ثانیه، جابجایی مواد به ۳۱۵۶ متر می‌رسد درحالی‌که جابجایی مواد در کوه محدب طی ۳۵ ثانیه ۱۳۶۰ متر است.

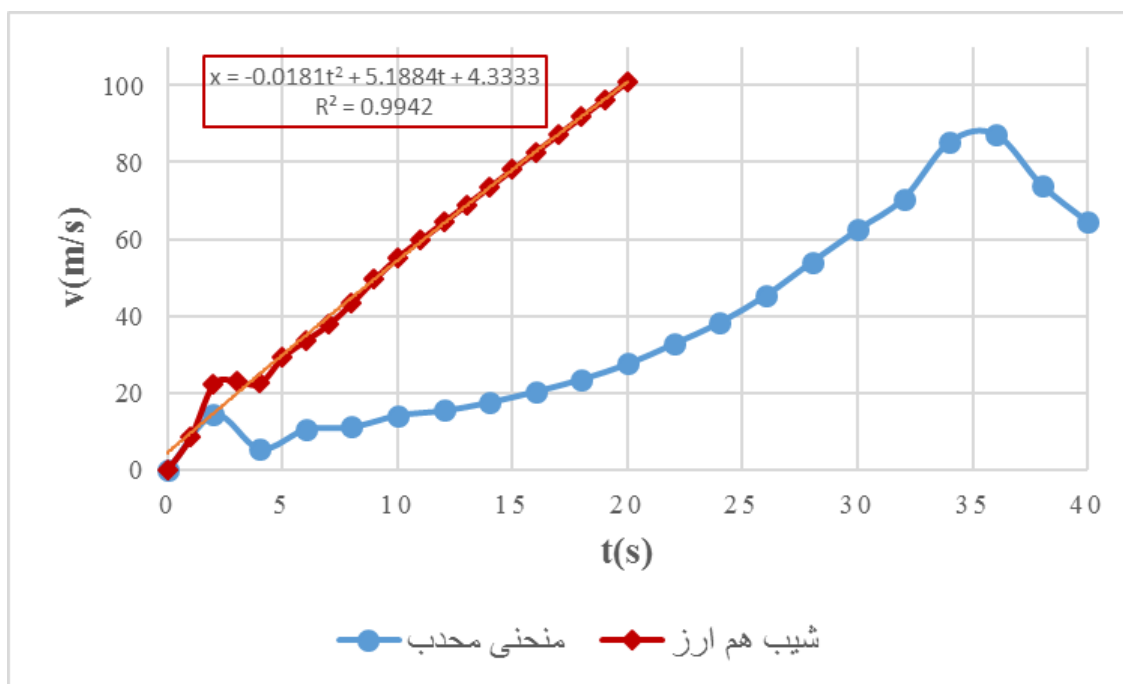


نمودار ۵-۸ منحنی جابجایی - زمان برای منحنی محدب و شیب هم‌ارز آن

پس از آن به‌منظور بررسی دقیق‌تر، نمودار سرعت - زمان برای گره‌ای که در زمان ۲۰ ثانیه دارای بیشترین سرعت بوده برای شیب هم‌ارز و برای گره‌ای که در ۳۵ ثانیه دارای بیشترین سرعت بوده برای کوه محدب رسم شد که در نمودار (۵-۹) نشان داده شده است.

با توجه به نمودار سرعت - زمان مشاهده می‌شود که در کوه محدب پس از طی ۳۵ ثانیه حداکثر سرعت جریان گل به ۸۴ متر بر ثانیه می‌رسد درحالی‌که در شیب هم‌ارز آن طی ۲۰ ثانیه سرعت آن به ۱۰۲ متر بر ثانیه می‌رسد. در نتیجه شتاب جریان در کوه محدب کمتر از شیب هم‌ارزش است. در اینجا می‌توان به‌منظور استفاده از شیب هم‌ارز کوه از یک ضریب اصطکاک استفاده کرد تا این اختلاف

در سرعت جریان را جبران نمود اما این کار نیز مستلزم آزمون و خطا می باشد تا بتوان به جواب دقیقی دست یافت. در واقع به منظور استفاده از شیب هم‌ارز به عنوان شیب محدب و ساده‌سازی مسئله باید ضرایب اصطکاک مختلفی را به شیب هم‌ارز اعمال کرد تا ضریبی که به‌ازای آن سرعت جابجایی مواد در شیب هم‌ارز با سرعت آن در شیب محدب برابر می‌شود را پیدا کرد که انجام این کار وقت‌گیر بوده و برای هر مورد مطالعاتی می‌تواند متفاوت باشد.



نمودار ۵-۹ منحنی سرعت - زمان برای منحنی محدب و شیب هم‌ارز آن

با توجه به شبیه‌سازی ۲ نمونه کوه محدب و مقعر این‌گونه می‌توان استنباط نمود که در نظر گرفتن یک ضریب اصطکاک برای اعمال پستی و بلندی‌های زمین و ساده‌سازی مسئله و استفاده از یک شیب ساده نمی‌تواند همیشه درست و کارآمد باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ضریب اصطکاک در شیب‌های هم‌ارز شیب مقعر برای ساده‌سازی مسئله اثر سوء بر نتایج دارد و پیدا کردن این ضریب اصطکاک در شیب‌های هم‌ارز شیب محدب کاری وقت‌گیر بوده و از آن‌جایی که تعیین دقیق نوع شیب حاکم بر منطقه مورد بررسی کار بسیار دشواری می‌باشد به نظر می‌آید که بهترین کار

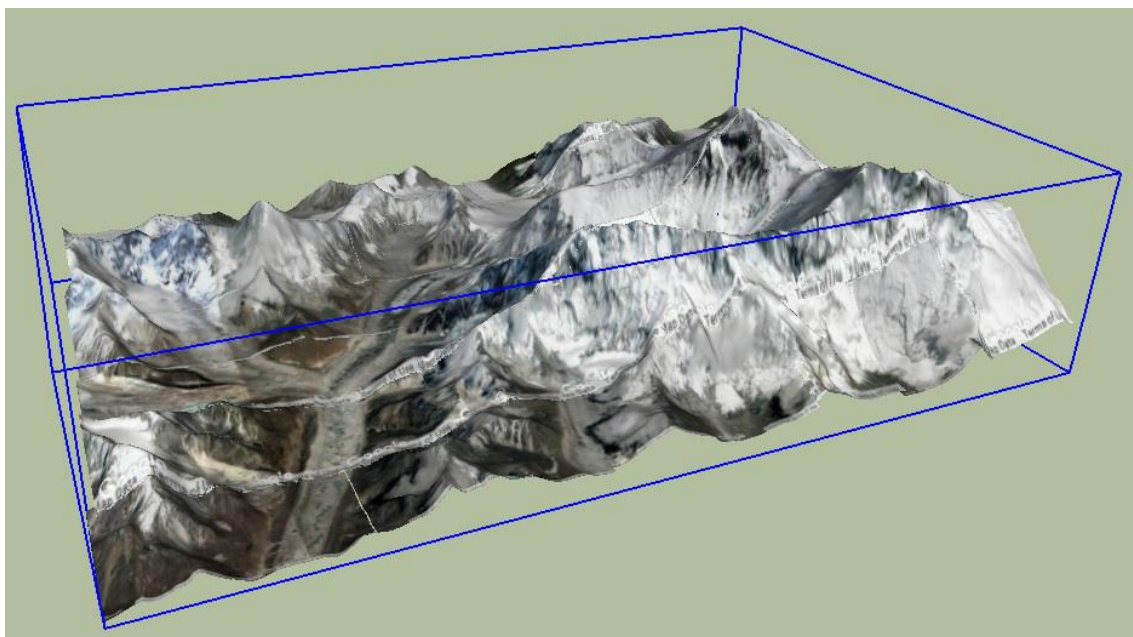
برای مدل‌سازی دقیق‌تر این پدیده استفاده از توپوگرافی دقیق منطقه تحت جریان گل می‌باشد.

در نتیجه در اینجا سعی شد برای ایجاد یک مدل مناسب از یک کوه با توپوگرافی برای شبیه‌سازی استفاده شود که در بخش بعد نحوه ایجاد و مدل‌سازی آن بیان می‌شود.

۵-۳-۵ کوه با توپوگرافی واقعی

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد میزان و نوع پستی و بلندی‌های زمین تأثیر بسزایی بر روی سرعت و طول پیشروی جریان دارد. به‌طور کلی در قله‌های کوه یا کوه‌های گنبدی که شیب آن به‌صورت محدب است سرعت جریان از شیب هم‌ارز خود کمتر بوده و با اعمال یک ضریب اصطکاک قابل شبیه‌سازی است اما در دامنه‌های کوه که عمده شیب به‌صورت مقعر است سرعت جریان بیشتر از شیب هم‌ارز خود بوده که می‌تواند بسیار خطرناک باشد. با توجه به این که تشخیص میزان تأثیر این پارامتر کاری دشوار است در اینجا سعی شد از یک نمونه کوه واقعی با توپوگرافی به‌منظور شبیه‌سازی استفاده شود. بدین منظور توپوگرافی یک نمونه کوه از Google earth توسط نرم‌افزار Sketchup گرفته شد که در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است.

از آن جایی که خروجی به‌دست آمده از نرم‌افزار Sketchup قابل انتقال به نرم‌افزار آباکوس نبود از نرم‌افزار Rhinoceros به منظور تغییر فرمت استفاده شد. سپس فایل خروجی گرفته شده از نرم‌افزار Rhinoceros به نرم‌افزار آباکوس منتقل شد.



شکل ۵-۱۱ توپوگرافی کوه گرفته شده از نرم افزار Sketchup

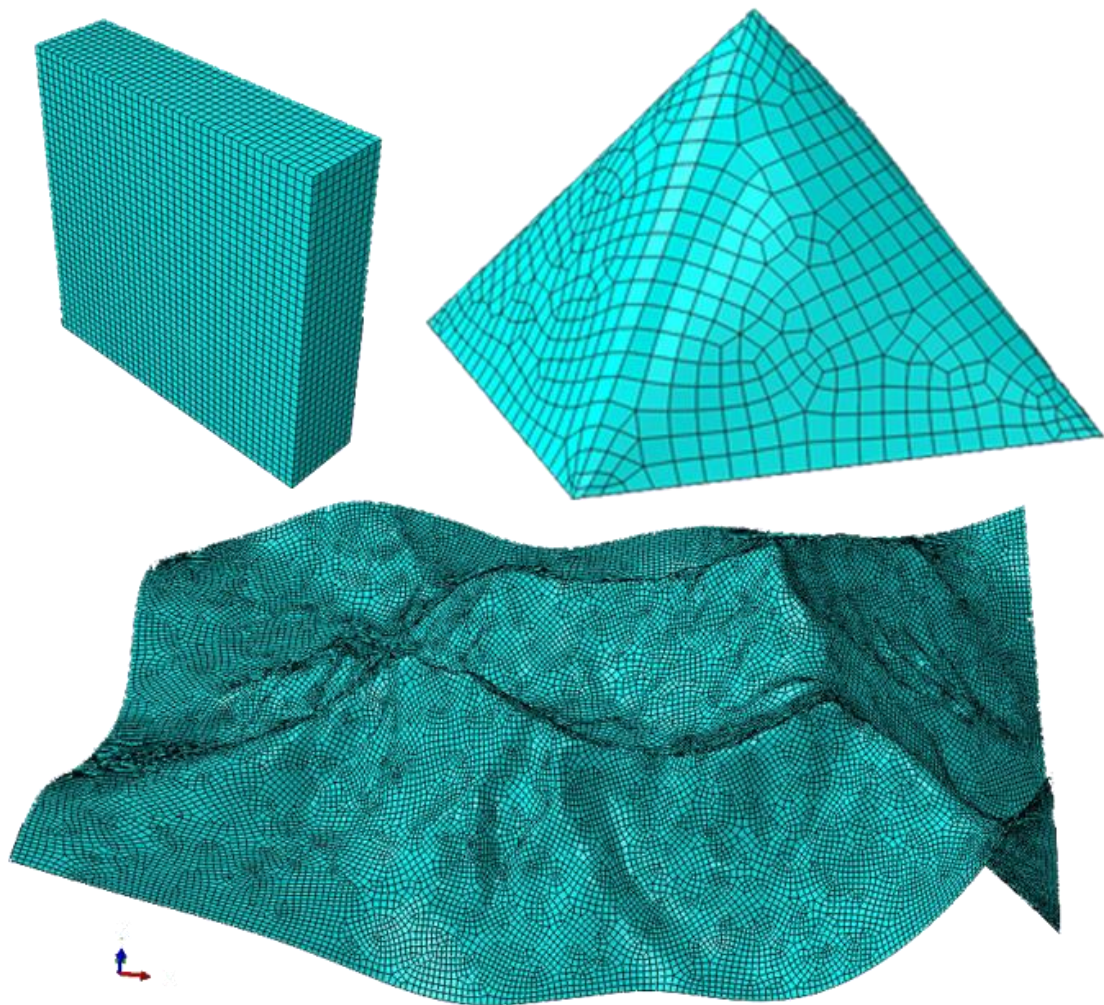
به منظور شبیه سازی از گل با مشخصات قبلی، مجدداً استفاده شد که در جدول (۵-۴) آمده است.

جدول ۵-۴ مشخصات مواد گلی مورد استفاده

نوع سیال	تنش تسلیم (Pa)	چگالی (Kg/m^3)	K	N
گل بنتونیت	۹/۲۴۲	۱۱۳۸/۲۸	۳/۱	۰/۳۳

حجم مواد گل استفاده شده در این شبیه سازی ۵۰۰ هزار مترمکعب است که توسط مکعبی با ابعاد $50 \times 100 \times 100$ متر ایجاد شده است. فاصله مش بندی مورد استفاده برای مواد گلی ۵ متر، برای کوه با توپوگرافی واقعی ۲۵ متر و برای شیب هم ارز آن ۱۰۰ متر است که در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. برای مش بندی کوه با توپوگرافی واقعی سعی شد از مش ریزتری استفاده شود تا جزئیات پستی و بلندی های موجود در آن قابل مشاهده باشد اما در شیب هم ارز که سطح آن صاف است و هیچ گونه

پستی و بلندی ندارد، از مش درشت‌تری استفاده شده است.

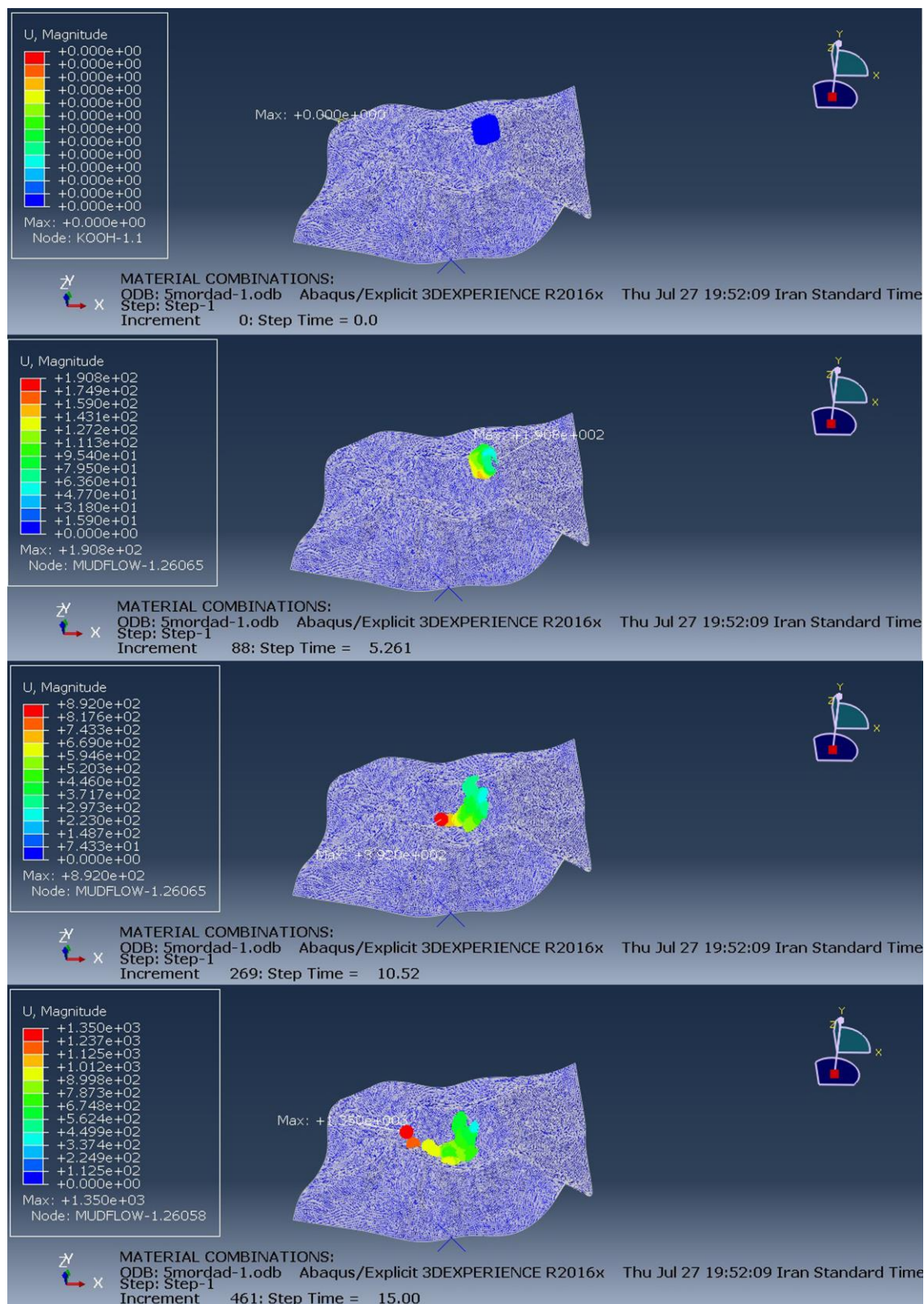


شکل ۵-۱۲ نحوه مش بندی در نرم افزار

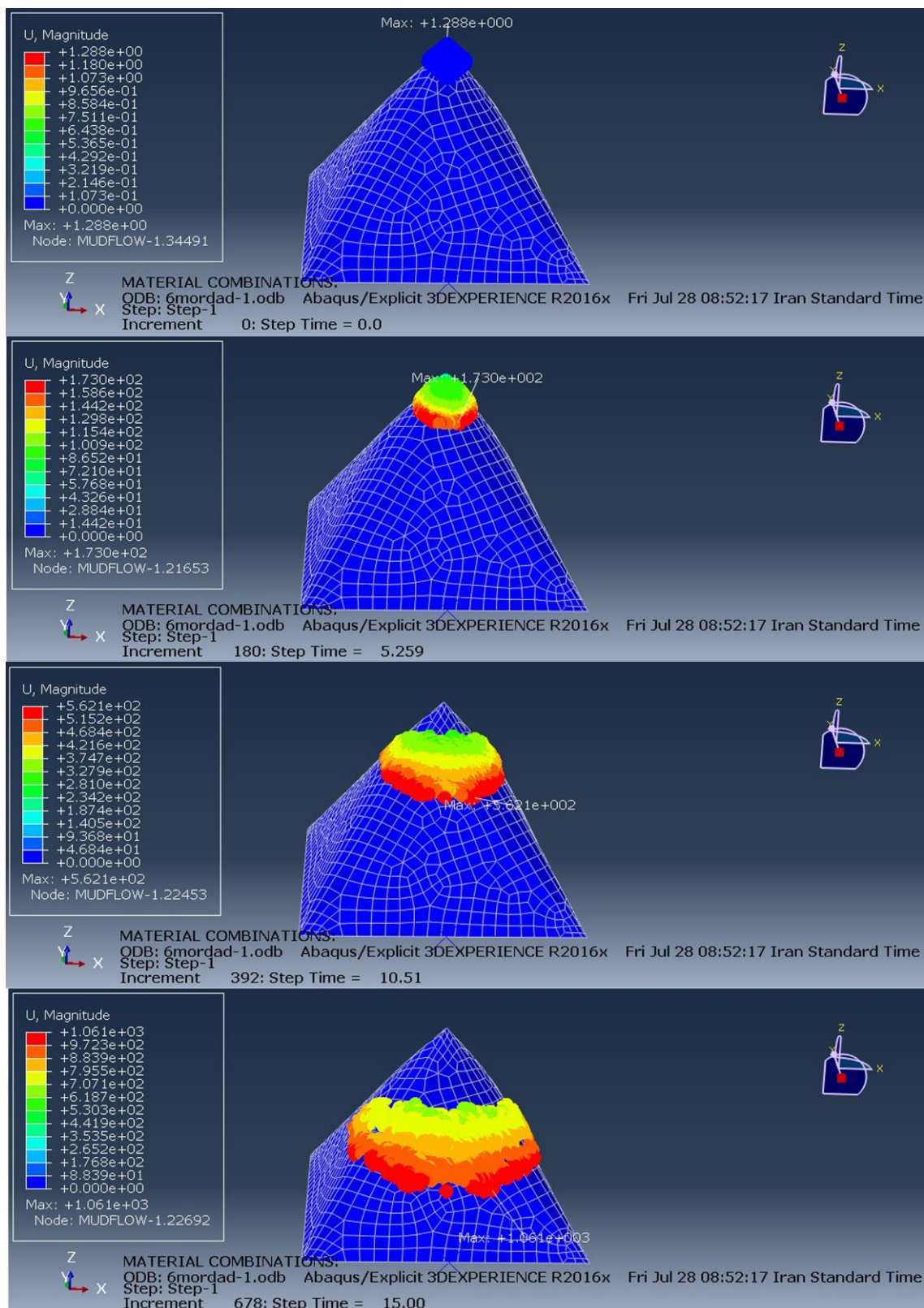
نحوه انتشار مواد گلی در مدل شبیه‌سازی شده کوه با توپوگرافی واقعی در زمان‌های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵

ثانیه در شکل (۵-۱۳) و نحوه انتشار مواد گلی در مدل شبیه‌سازی شده شیب هم‌ارز آن در زمان‌های

مشابه در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است.

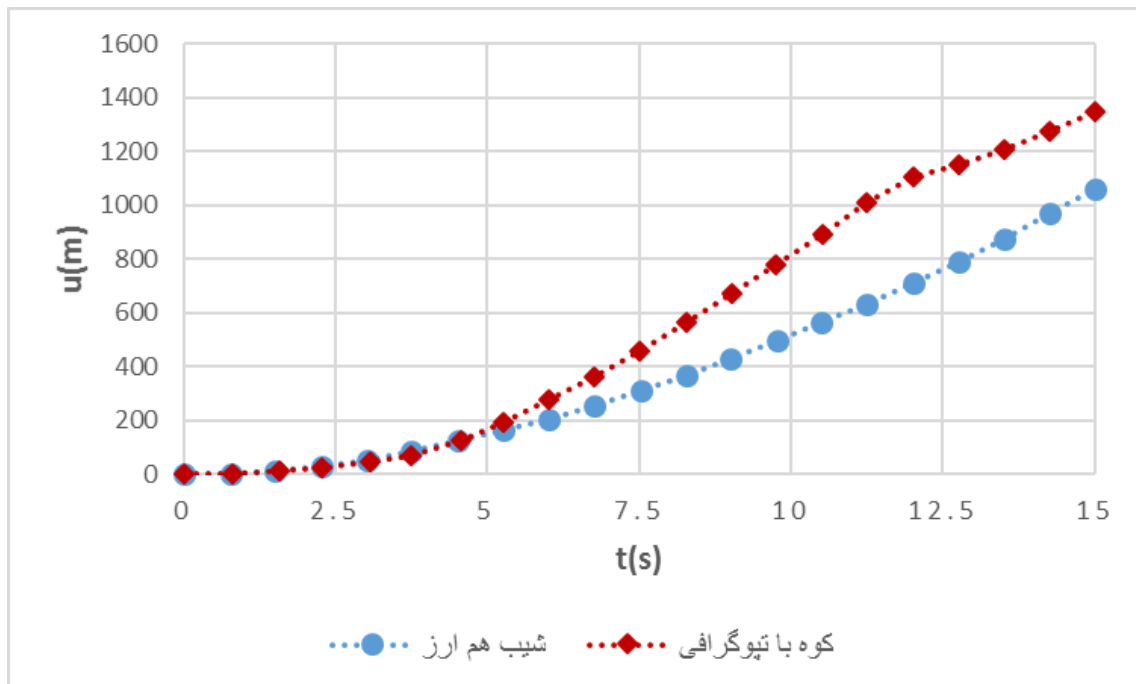


شکل ۵-۱۳ نحوه انتشار جریان بر روی کوه با توپوگرافی واقعی در زمان های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه



شکل ۵-۱۴ نحوه انتشار جریان بر روی شیب هم ارز کوه در زمان های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه

منحنی جابجایی - زمان برای کوه با توپوگرافی واقعی و شیب هم‌ارز آن در نمودار (۵-۱۰) نشان داده شده است. با توجه به نمودار (۵-۱۰) مشاهده می‌شود که حداکثر اندازه جابجایی در کوه واقعی ۱۳۴۷ متر است که این مقدار در شیب هم‌ارز آن ۱۰۶۰ متر است. در هر دو نمودار منحنی دارای سیری صعودی است.

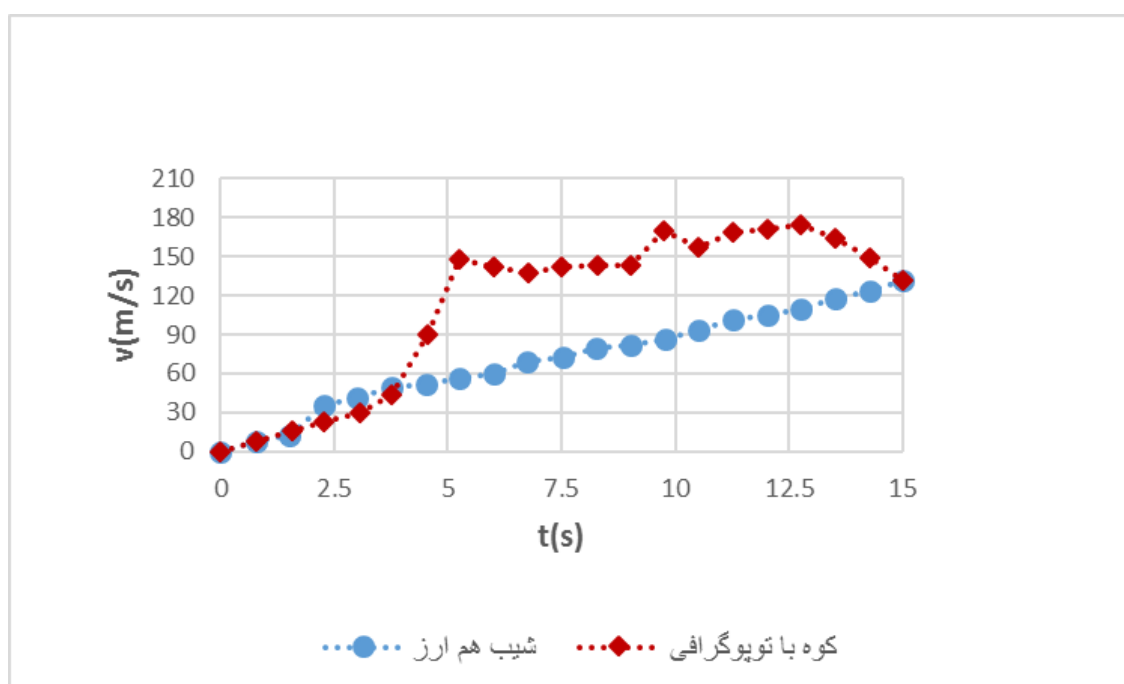


نمودار ۵-۱۰ منحنی جابجایی - زمان برای کوه واقعی و شیب هم‌ارز آن

پس از آن منحنی سرعت جریان برای کوه و شیب هم‌ارز ترسیم شد که در نمودار (۵-۱۱) نشان داده شده است.

با توجه به نمودار سرعت مواد گلی این‌گونه استنباط می‌شود که در کوه واقعی به علت وجود پستی و بلندی‌های زمین سرعت جریان یکنواخت نبوده و در طول مسیر سرعت جریان کم و زیاد می‌شود و پس از ۱۵ ثانیه از شروع جریان سرعت مواد به ۱۳۱/۸ متر بر ثانیه می‌رسد. در این حالت میانگین سرعت جریان ۱۲۱/۱۴ متر بر ثانیه است. اما نمودار ناشی از شیب هم‌ارز تقریباً یکنواخت و صعودی

است. نوسان‌های کمی که در این نمودار دیده می‌شود، ناشی از آن است که این نمودار برای یک گره رسم شده و این گره در طول زمان به علت جاری شدن مواد و برخورد با مواد دیگر دچار آشفتگی‌هایی می‌شود. سرعت جریان پس از طی ۱۵ ثانیه در این حالت به ۱۳۱/۹ متر بر ثانیه رسیده و میانگین سرعت آن ۷۰/۹ متر بر ثانیه است.



نمودار ۵-۱۱ منحنی سرعت - زمان برای کوه واقعی و شیب هم ارز آن

همان‌طور که از نمودارها برداشت می‌شود وجود پستی و بلندی‌های محدب در کوه باعث کاهش سرعت جریان می‌شود که در ابتدای نمودار قابل مشاهده است و باعث شده سرعت جریان در شیب معادل بیشتر از کوه باشد ولی پس از آن به علت وجود پستی و بلندی‌های مقعر سرعت جریان با شیب زیادی افزایش یافته است به طوری که در کوه واقعی حداکثر سرعت جریان ۱۷۴ متر بر ثانیه است در حالی که در شیب هم‌ارز آن ۱۳۱/۹ متر بر ثانیه می‌باشد اما سرعت نهایی جریان در ۱۵ ثانیه در شیب هم‌ارز و کوه تقریباً برابر است.

همان‌طور که گفته شد یکی از پارامترهای مهم در این گونه جریان‌ها سرعت آن‌ها می‌باشد در

نتیجه پیش‌بینی این‌گونه جریان‌ها و کاهش خسارات ناشی از آن‌ها مستلزم دانستن سرعت دقیق مواد در منطقه مورد نظر می‌باشد. در نتیجه اگر در نزدیکی روستا یا محل مورد نظر یک گودال یا پستی بلندی وجود داشته باشد که باعث کاهش سرعت مواد یا افزایش سرعت و یا تغییر جهت جریان‌گلی شود در صورت استفاده از شیب هم‌ارز امکان پیش‌بینی نحوه انتشار مواد گلی هنگام برخورد با این موانع وجود ندارد اما هنگام استفاده از توپوگرافی منطقه می‌توان نحوه انتشار مواد گلی را به درستی بررسی کرد و تخمین زد که به ازای چه حجم مواد گلی منطقه مورد نظر دچار آسیب می‌شود. به عنوان مثال در شکل (۵-۱۳) که نحوه انتشار مواد بر روی کوه واقعی نشان داده شده است مشاهده می‌شود که مواد پس از برخورد به یک تپه که در مسیر حرکت خود بوده تغییر جهت داده و به راه خود ادامه می‌دهد در نتیجه اگر روستایی در بالای این تپه واقع باشد به ازای این حجم از مواد گلی دچار حادثه نمی‌شود اما پیش‌بینی این‌چنین موارد در هنگام استفاده از شیب هم‌ارز امکان‌پذیر نمی‌باشد.

فصل ششم

نتایج و پیشنهادات

۶- نتایج کلی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن حاوی مواد گلی و نتایج آزمایشگاهی دارای انطباق مطلوب و قابل قبول می‌باشند. در نتیجه می‌توان استنباط کرد که نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی جریان‌های غیر نیوتنی به روش SPH با دقت خوبی کارآمد است و می‌توان از آن برای بررسی جریان‌ها و پیش-بینی احتمال وقوع و خسارات ناشی از آن‌ها استفاده کرد.

بررسی میزان و نوع پستی و بلندی‌های زمین نشان می‌دهد که این پارامتر می‌تواند در سرعت جریان و طول پیشروی آن بسیار مؤثر باشد. به‌طوری‌که، در صورت وجود کوهی با شیب محدب سرعت جریان کم بوده و استفاده از شیب هم‌ارز آن و اعمال یک ضریب اصطکاک می‌تواند کارآمد باشد اما یافتن این ضریب نیازمند آزمون و خطا می‌باشد اما در کوه با شیب مقعر یا در دامنه‌ها سرعت جریان بسیار بیشتر از شیب هم‌ارز خود بوده و استفاده از ضریب اصطکاک باعث افزایش بیشتر این اختلاف سرعت می‌شود. از آنجایی‌که در این گونه پدیده‌ها سرعت جریان و قدرت تخریبی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است استفاده از شیبی که منجر به ارائه سرعتی کمتر از سرعت واقعی جریان شود می‌تواند باعث حوادث ناگواری شود در نتیجه در این گونه مواد استفاده از شیب هم‌ارز نامناسب است و باید با اعمال یک نیروی اولیه یا ایجاد مواد گلی بیشتر بر روس سطح این اختلاف را از بین برد که این کار نیز تیاژمند آزمون و خطا می‌باشد.

به‌منظور دستیابی به یک شبیه‌سازی واقعی و کاهش خطاهای ناشی از وجود پستی و بلندی‌های زمین از یک نمونه کوه با توپوگرافی استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده قابلیت خوب نرم‌افزار آباکوس در ایجاد مدل‌های مختلف با اشکال مختلف و هماهنگی خوب این نرم‌افزار با نرم‌افزارهای دیگر است.

از مقایسه کوه با توپوگرافی و شیب هم‌ارز آن نیز می‌توان به صحت و درستی تأثیر بسیار زیاد نوع پستی و بلندی‌های زمین پی برد چراکه همان‌طور که مشاهده شد در ابتدای حرکت مواد بر قله کوه

به علت وجود شیب محدب سرعت جریان کمتر از سرعت آن بر روی شیب هم‌ارزش بود ولی در دامنه کوه به علت وجود شیب مقعر، سرعت جریان افزایش چشمگیری داشت.

از آنجایی که تخمین دقیق نوع شیب حاکم بر منطقه مورد بررسی کاری بسیار دشوار می‌باشد و با توجه به نتایج که نشان دهنده تاثیر زیاد وجود پستی بلندی‌ها بر سرعت جریان گلی می‌باشد و قابلیت نرم‌افزار آباکوس برای ایجاد کوه با توپوگرافی واقعی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کوه با توپوگرافی واقعی بسیار دقیق‌تر و واقعی‌تر بوده و از خطاهای احتمالی جلوگیری می‌کند.

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد نرم‌افزار آباکوس و روش SPH دارای دقت مناسبی برای مدل‌سازی جریان‌های غیر نیوتنی می‌باشند و می‌توان با استفاده از قابلیت‌های موجود در این نرم‌افزار و انتقال توپوگرافی مناطقی که دارای بارندگی زیاد بوده و احتمال وقوع جریان گلی در آن‌ها زیاد است، به این نرم‌افزار و شبیه‌سازی این جریان‌ها احتمال وقوع و خطرات ناشی از وقوع آن‌ها را پیش‌بینی کرد.

پیشنهادهات

- بررسی دیگر پارامترهای مؤثر بر جریان گل مانند چگالی و غلظت رسوب‌ها و نوع خاک در سرعت و طول پیشروی جریان
- استفاده از سایر روش‌های عددی بدون شبکه و مقایسه نتایج آن‌ها
- استفاده از سایر مدل‌های رئولوژیکی در مدل‌سازی جریان‌های غیر نیوتنی و مقایسه آن‌ها
- مدل‌سازی سایر جریان‌ها مانند جاری شدن گدازه‌های آتشفشانی

منابع

- ۱- Cola, S., Calabrò, N., & Pastor, M. (2008). Prediction of the flow-like movements of Tessina landslides by SPH model. Landslides and engineered slopes. Taylor & Francis Group, London.
- ۲- Laigle, D., & Coussot, P. (1997). Numerical modeling of mudflows. Journal of Hydraulic Engineering, 123(7), 617-623.
- ۳- Ghadampour, Z., Talebbeydokhti, N., Hashemi, M. R., Nikseresht, A. H., & Neill, S. P. (2013). Numerical simulation of free surface mudflow using incompressible SPH. Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering, 37(C1), 77.
- ۴- Brufau, p., Garcia-Navarro. P., Ghilardi, p., Natale. L., & Savi, F. (2000). 1D mathematical modelling of debris flow. Journal of Hydraulic Research, 38(6), 446-435
- ۵- هاشمی طباطبائی، س. موسی وند، ع. ا. صفوی، س. اکبری، ب. (۱۳۸۹). بازسازی شرایط جریان آواری ماسوله تحت تأثیر بارندگی شدید. فصلنامه علوم زمین. ۶۷-۷۴:۷۷
- ۶- Louvat, P., & Allègre, C. J. (1997). Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(17), 3645-3669
- ۷- Gaillardet, J., Dupré, B., & Allègre, C. J. (1999). Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer?. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(23), 4037-4051.
- ۸- Lyons, W. B., Carey, A. E., Hicks, D. M., & Nezat, C. A. (2005). Chemical weathering in high-sediment-yielding watersheds, New Zealand. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 110(F1).
- ۹- Highland, L. (2004). Landslide types and processes (No. 2004-3072).

۱۰- خاشعی سیوکی، ع.، اکبرپور، ا. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی امواج سیلاب مشتمل بر

جریان واریزه‌ای با استفاده از حل کننده پیشرفته ریمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند

- ۱۱- Altinakar, S., Graf, W. H., & Hopfinger, E. J. (1990). Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*, 28(1), 55-80.
- ۱۲-BBC. (2017). Higher Bitesize Geography - Lithosphere : Revision, Page8. (n.d.). Retrieved April 02.
- ۱۳- موسوی جهرمی، ح م. (۱۳۸۹). تئوری و کاربرد هیدرولیک سیلاب انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز ص ۲۸۴
- ۱۴- Liu GR, Liu MB. (2003). Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method. World Scientific, Singapore
- ۱۵- Chung, T. J. (2002). Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- ۱۶- Anderson, JD. (2002). Computational fluid dynamics: the basics with applications. McGraw Hill, New York
- ۱۷- Zienkiewicz, OC., Taylor, RL. (2000). The finite element method. Butterworth-Heinemann, Stonham
- ۱۸- Liu, G. R. (2002). Mesh free methods: moving beyond the finite element method. CRC press.
- ۱۹- Hirsch, C. (1988). Numerical computation of internal & external flows: fundamentals of numerical discretization. Wiley, New York
- ۲۰- Zukas, JA. (1990), High velocity impact dynamics. Wiley, NewYork
- ۲۱- Hockney, RW., Eastwood, JW. (1988). Computer simulation using particles. Institute of Physics Publishing, Bristol
- ۲۲- Allen, MP., Tildesley, DJ. (1987). Computer simulation of liquids. Oxford University Press, Oxford
- ۲۳- Childs, S. J., and B. D. Reddy. (1999). "Finite element simulation of

the motion of a rigid body in a fluid with free surface." Computer methods in applied mechanics and engineering 175.1-2:99-120.

۲۴- Gingold, Robert A., and Joseph J. Monaghan. (1977). "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars." Monthly notices of the royal astronomical society 181.3 : 375-389.

۲۵- اسلامی، موسی. (۱۳۸۷). مقایسه مدلسازی نفوذ پرتابه نیمه سنگین با روش SPH و FEM، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تبریز.

۲۶- امانی‌فرد، نیما. خداپرست حقی، اکبر. (۱۳۸۹). آشنایی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و کاربردهای آن. انتشارات دانشگاه گیلان.

۲۷- Liu, M. B., & Liu, G. R. (2010). Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments. Archives of computational methods in engineering, 17(1), 25-76.

۲۸- Benz, W., and E. Asphaug. (1993). "Explicit 3D continuum fracture modeling with smooth particle hydrodynamics." Lunar and Planetary Science Conference. Vol. 24.

۲۹- Benz, Willie, and Erik Asphaug. (1994). "Impact simulations with fracture. I. Method and tests." Icarus 98-116

۳۰- Benz, Willy, and Erik Asphaug. (1995). "Simulations of brittle solids using smooth particle hydrodynamics." Computer physics communications 253-265.

۳۱- Bonet, J., and S. Kulasegaram. (2000). "Correction and stabilization of smooth particle hydrodynamics methods with applications in metal forming simulations." International journal for numerical methods in engineering 47.6 :1189-1214.

۳۲- Swegle, J. W., and S. W. Attaway. (1983). "On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations." Computational Mechanics 17.3 : 151-168.

۳۳- Bird, R.B., Dai, G.C., Yarusso, B.J. (1983). The rheology and flow of viscoplastic materials, Rev. Chem. Eng., 1-70.

۳۴- Bingham, E.C. (1922). Fluidity and plasticity, McGraw-Hill, New

York.

- ۳۵- Beris, A.N., Tsamopoulos, J.A., Armstrong, R.C., Brown, R.A. (1985). Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic, *J. Fluid Mech.*
- ۳۶- Covey, G.H., Stanmore, B.R. (1981). Use of the parallel-plate plastometer for the characterisation of viscous fluids with a yield stress, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 249-260.
- ۳۷- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics*. 7th. Boston: McGraw-Hill Book Company.
- ۳۸- Laigle, D and Coussot, P.(1997),” Numerical modeling of mudflows”. *J. Hydr. Engrg. ,ASCE Vol. 123*,pp:617-623.
- ۳۹- Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics* (Vol. 206). New York: McGraw-Hill.
- ۴۰- Huang, Y., Dai, Z., & Zhang, W. (2014). Geo-disaster modeling and analysis: an SPH-based approach (pp. 184-185). Heidelberg: Springer.
- ۴۱- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1982). Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 46(3), 429-453.
- ۴۲- Speith, R., & Riffert, H. (1999). The viscous gas ring as an astrophysical test problem for a viscous SPH-code. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 109(1), 231-242.
- ۴۳- Quinlan, N. J., Basa, M., & Lastiwka, M. (2006). Truncation error in mesh-free particle methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 66(13), 2064-2085.
- ۴۴- Abaqus® (2016) help
- ۴۵- Monaghan, J. J. (1989). On the problem of penetration in particle methods. *Journal of Computational physics*, 82(1), 1-15.
- ۴۶- Koshizuka, S., Nobe, A., & Oka, Y. (1998). Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(7), 751-769.

- ۴۷- Lee, E. S. (2007). Truly incompressible approach for computing incompressible flow in SPH and comparisons with the traditional weakly compressible approach. University of Manchester
- ۴۸- Takeda, H., Miyama, S. M., & Sekiya, M. (1994). Numerical simulation of viscous flow by smoothed particle hydrodynamics. *Progress of Theoretical Physics*, 92(5), 939-960.
- ۴۹- Libersky, L. D., Petschek, A. G., Carney, T. C., Hipp, J. R., & Allahdadi, F. A. (1993). High strain Lagrangian hydrodynamics: a three-dimensional SPH code for dynamic material response. *Journal of computational physics*, 109(1), 67-75.
- ۵۰- Zou, S. (2007). Coastal sediment transport simulation by smoothed particle hydrodynamics (Doctoral dissertation, The Johns Hopkins University).
- ۵۱- Kelessidis, V. C., & Maglione, R. (2006). Modeling rheological behavior of bentonite suspensions as Casson and Robertson–Stiff fluids using Newtonian and true shear rates in Couette viscometry. *Powder technology*, 168(3), 134-147.
- ۵۲- Barnes, H. A., Hutton, J. F., & Walters, K. (1989). *An introduction to rheology* (Vol. 3). Elsevier.
- ۵۳- Ghadampour, Z., Talebbeydokhti, N., Hashemi, M. R., Nikseresht, A. H., & Neill, S. P. (2013). Numerical simulation of free surface mudflow using incompressible SPH. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 37(C1), 77.
- ۵۴- نعیمی، نوید. (1391). مدلسازی عددی جریان مخلوط خاک رس-آب (بنتونیت) با روش SPH. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Abstract

The movement of unstable, compacted and non-compacted sedimentary layers on the slope (landslide) has different types. Debris flow is a kind of landslide type that can happen very slowly or very fast and have disastrous effect. Mudflow is a kind of debris flow that falls into the classification of Non-Newtonian fluid. In this research, firstly, having considered the Herschel–Bulkley's behavioral model and the smoothed-particle hydrodynamics method we focus on modeling of gush of mudflow due to removal of the valve. The gained data of this modeling are compared with laboratory tests results. The results indicate that both experimental and modeled mudflow have similar and acceptable results. Afterwards, the effect of the type and curvature of surfaces have been studied. For this purpose, two samples of the slope with curved and concave curvatures were compared with their equivalent slopes. The results show that the displacement and velocity of the material in the concave slope, are greater than these parameters in the respective slope. also in the convex slope, the amount of displacement and velocity is less than the corresponding slope. so, the use of the equivalent slope is not always trustable for flow modeling. Hence a mountain with real topography was modeled and transmitted to the software. Comparing the results of this topography modeling with its corresponding slope modeling shows that when the slope of the mountain is convex, the flow velocity in the mountain is lower than the corresponding slope, but in the hillside with concave slope the flow velocity is more than this parameter in equivalent slope. Finally, it can be concluded that the use of the topography of each region to predict the run-out distance of the mudflow can give more accurate results instead of equivalent slope, and Abaqus software has a good ability to perform such simulations.

Keywords: mudflow, smoothed-particle hydrodynamics, Herschel–Bulkley's model



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc.Thesis Geotechnical Engineering

**Numerical modeling of mudflow using smoothed particle
hydrodynamics**

By : mahsa bokharayian

Supervisor:

Dr. R. Naderi

September-2017