

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدلسازی عددی بهمن

نگارنده: مهتاب فیاض ترشیزی

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

شهریور ۹۶

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی عمران

گروه : خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مهتاب فیاض ترشیزی به شماره دانشجویی: ۹۳۱۳۲۱۴

تحت عنوان: مدلسازی عددی بهمن

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

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

شماره: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲  
تاریخ: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲

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 مهتاب فیاض توشیزی با شماره دانشجویی ۹۳۱۳۲۱۴ رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان مدلسازی عددی بهمن که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با امتیاز ۴۸ درجه علمی)
<input type="checkbox"/> عملی	<input type="checkbox"/> نظری

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 امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محسن کرامتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

توضیح: 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 به خانواده عزیزم:

پدرم، اولین استادم، که همواره چتر محبتش بر سرم است

بزرگواری که فضای زندگی را از او آموختم.

مادرم، بلندتکیه گاهم، که دلمان پر مهرش یگانه بناهم است

مهربانی که عشق و رزیدن را از او آموختم.

خواهران و برادرم که همراهم همیشگی و پشتوانه زندگیم هستند.

# مشکر و قدردانی

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم و سهمی هر چند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

بالمشکر از زحمات استاد گرامی جناب آقای دکتر رضانادی که خود باوری را به من آموختند و صادقانه تجربیات ارزشمند خود را در اختیار من گذاشتند. همچنین از آقای احسان برقی و دوست عزیز و مهربانم خانم بخارنایان و تمامی کسانی که مراد این راه یاری کردند، کمال مشکر را دارم.

مستاب فیاض ترشیزی

## تعهد نامه

اینجانب مهتاب فیاض ترشیزی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی عددی بهمن 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 پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه 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 بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه 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

بهمن، توده برفی است که در اثر نیروی وزن خود یا عوامل خارجی همچون انفجار، بطور ناگهانی و با سرعت بر روی سطح شیبدار شروع به حرکت می‌کند. این پدیده طبیعی اغلب در مناطق کوهستانی و در فصل زمستان اتفاق می‌افتد و هر ساله در ایران و جهان، برای بازدیدکنندگان یا کسانی که در مناطق سردسیر و دامنه کوه زندگی می‌کنند، خسارت‌های فراوانی ایجاد می‌کند. از همین‌رو با شناخت حرکت بهمن می‌توان راه‌کارهایی برای کاهش صدمات آن ارائه کرد. در این پژوهش سعی می‌شود بهمن پودری (ابری متشکل از دو سیال با خواص مختلف) و بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف پوشیده شده (بهمن پودری- متراکم) با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مدل‌سازی شود.

هیدرودینامیک ذرات هموار، روش لاگرانژی بدون شبکه است که سیال را به‌جای شبکه با مجموعه‌ای از ذرات مدل‌سازی می‌کند و هر ذره مکان، سرعت و جرم خاص خود را دارد. در اینجا، بهمن بصورت توده برفی مدل شده است که در اثر وزن خود بر روی شیب شروع به حرکت کرده و تنها نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت، به آن وارد شده است. در نهایت، موانعی جلوی حرکت بهمن گذاشته و سرعت و میزان پیشروی آن درحالت‌های مختلف با هم مقایسه می‌شود. در انتها موانعی که باعث بیشترین کاهش در سرعت و پیشروی بهمن می‌گردد، به عنوان مانعی مناسب انتخاب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از مانع بصورت جدا از هم باعث کاهش سرعت و طول پیشروی بهمن می‌شود. البته فاصله موانع باید بگونه‌ای انتخاب شود که بیشترین تاثیر را داشته باشد.

گاهی اوقات در انتهای حرکت بهمن بر روی شیب، آب وجود دارد؛ برخورد بهمن به آن موجی ایجاد کرده و باعث سرریز شدن آب از سد می‌شود که می‌تواند تهدیدی جدی برای شهرک‌ها، جاده‌ها و زیرساخت‌ها در پایین‌دست باشد. در ادامه، در این پژوهش، ابتدا حرکت بهمن بر روی شیب، موج



ایجاد شده در اثر برخورد با آب و سرعت و ارتفاع آب در لحظه عبور از سد شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به نتایج به دست آمده، مانع سراسری و موانعی با فواصل مناسب از هم در این مدل گذاشته شده و در هر حالت، سرعت بهمن در لحظه برخورد با آب، ارتفاع موج ایجاد شده، ارتفاع و سرعت آب در لحظه عبور از سد با حالت بدون مانع مقایسه می‌شود.

**کلمات کلیدی: بهمن، مانع، آباکوس، روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)**

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱- مقدمه	۲
۱-۱- ضرورت انجام پژوهش	۳
۲-۱- معرفی پژوهش	۴
۱-۲-۱- بیان مسئله	۴
۲-۲-۱- هدف از پژوهش	۴
۳-۱- فصل بندی پژوهش	۵
فصل دوم	۷
۲- جریان بهمن	۸
۱-۲- طبقه بندی بهمن ها	۸
۲-۲- برخی از بهمن های خطرناک در جهان	۱۰
۱-۲-۲- بهمن مناطق اوآسکاران و انکاش، پرو	۱۱
۲-۲-۲- جمعه سفید یا بهمن های خط مقدم کوه های آلپ، کوه مارمولادا، ایتالیا	۱۱
۳-۲-۲- بهمن کوه اوآسکاران، پرو	۱۱
۴-۲-۲- بهمن افغانستان، ولایت پنجشیر	۱۲
۵-۲-۲- زمستان وحشتناک، کوه های آلپ	۱۲
۶-۲-۲- لاهول ولی، هند	۱۲

- ۱۳ ..... ۷-۲-۲- بهمن‌های افغانستان، بدخشان، افغانستان
- ۱۳ ..... ۸-۲-۲- بهمن سالنگ، هندوکش، افغانستان
- ۱۳ ..... ۹-۲-۲- پایگاه نظامی گیاری، گانچی، پاکستان
- ۱۳ ..... ۱۰-۲-۲- یخچال طبیعی کولکا، اوستیای شمالی، روسیه
- ۱۴ ..... ۳-۲-۳- بهمن‌های اتفاق افتاده در ایران
- ۱۴ ..... ۱-۳-۲- ریزش بهمن در پیست شمشک
- ۱۵ ..... ۲-۳-۲- ریزش بهمن در سردشت
- ۱۵ ..... ۳-۳-۲- ریزش بهمن در خوی
- ۱۵ ..... ۴-۳-۲- ریزش بهمن در ارومیه
- ۱۵ ..... ۵-۳-۲- ریزش بهمن در جاده هراز
- ۱۶ ..... ۶-۳-۲- ریزش بهمن در جاده کرج-چالوس
- ۱۷ ..... **فصل سوم**
- ۱۸ ..... ۳- **روش‌های مدل‌سازی عددی جریان بهمن**
- ۱۸ ..... ۱-۳-۱- مقدمه
- ۱۸ ..... ۲-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی
- ۲۱ ..... ۳-۳-۳- مطالعات عددی
- ۲۲ ..... ۱-۳-۳- سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی
- ۲۳ ..... ۲-۳-۳- روش‌های عددی

۳-۴- معادلات ناویر- استوکس ..... ۲۸

۳-۵- مدل ریاضی بهمن ..... ۲۹

**فصل چهارم ..... ۳۳**

**۴- روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) ..... ۳۴**

۴-۱- روش هیدرودینامیک ذرات هموار ..... ۳۴

۴-۱-۱- تابع هموار ..... ۳۷

۴-۱-۲- طول هموار ..... ۴۳

۴-۲- روابط SPH معادلات بهمن ..... ۴۴

۴-۲-۱- شرط تراکم‌ناپذیری ..... ۴۴

۴-۲-۲- شرط بقای جرم ..... ۴۶

۴-۲-۳- شرط بقای اندازه حرکت ..... ۴۷

۴-۲-۳-۱- نیروهای داخلی ..... ۴۷

۴-۲-۳-۲- نیروهای خارجی ..... ۴۷

**فصل پنجم ..... ۴۹**

**۵- مدلسازی عددی بهمن با استفاده از SPH ..... ۵۰**

۵-۱- مقدمه ..... ۵۰

۵-۲- روش تحقیق ..... ۵۰

۵-۲-۱- معرفی نرم افزار ..... ۵۰

۵۲	..... پارامترهای مدلسازی
۵۲	..... بارگذاری
۵۳	..... روش SPH در نرم افزار
۵۴	..... بهمن پودری
۵۴	..... صحت سنجی
۶۷	..... تاثیر موانع مختلف بر سرعت و پیشروی بهمن
۷۳	..... برخورد بهمن پودری به آب
۸۰	..... بهمن پودری - متراکم
۸۱	..... تاثیر موانع مختلف بر سرعت و پیشروی بهمن
۸۷	..... برخورد بهمن پودری - متراکم به آب
۹۴	..... نتایج
۹۷	..... فصل ششم
۹۸	..... ۶- نتایج و پیشنهادات
۹۸	..... ۱-۶- مقدمه
۹۸	..... ۲-۶- نتیجه گیری
۹۹	..... ۳-۶- پیشنهاد برای مطالعات آتی
۱۰۱	..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) الف) صدمات بهمن به پیست اسکی روستای Aosta در سال ۱۹۹۷. ب) ریزش بهمن بر روی جاده در روستای Gressoney در سال ۲۰۰۸. ج) خسارت‌های بهمن مکزیک در سال ۱۹۹۹ به ماشین، د) درختان، ه) خانه‌ها و ی) تیر برق [۶]. ۹.....
- شکل (۲-۲) a) بهمن متراکم. b) بهمن پودری. c) بهمن پودری - متراکم. ۱۰.....
- شکل (۳-۲) بهمن هوابرد در هیمالیا [۷]. ۱۰.....
- شکل (۱-۳) آزمایش انجام شده توسط (۶) با شیب ۲۰ درجه. الف) چگالی لایه متحرک بیشتر از لایه ساکن. ب) چگالی لایه متحرک کم‌تر از لایه ساکن. [۲۳]. ۲۰.....
- شکل (۲-۳) مقیاس‌های فضایی مختلف که برای توصیف بهمن استفاده می‌شود. بالایی: مدل ساده ای که بهمن را بدون تغییرشکل در نظر گرفته و نیروی اصطکاک تنها نیروی مخالف است. پایینی: مدل عددی پیچیده‌ای که در نظر می‌گیرد بهمن از ذراتی تشکیل شده است که حرکت بهمن با حرکت آن‌ها بیان می‌شود [۵]. ۲۱.....
- شکل (۳-۳) الف) در دیدگاه مبتنی بر مش، هر سلول دارای خواص سیال است؛ فلش‌ها، رنگ فلش‌ها، رنگ المان‌ها و کادر رنگی المان‌ها به ترتیب نشان دهنده سرعت، فشار، چگالی و دما می‌باشد. ب) در دیدگاه لاگرانژی، هر ذره علاوه بر خواص سیال دارای جرم و سرعت نیز هست. [۲۹]. ۲۴.....
- شکل (۱-۴) دایره‌ای به شعاع  $h$  که ناحیه تحت تاثیر ذره  $i$  است؛ خط پررنگ تابع کرنل و خط‌چین مشتق اول تابع کرنل ..... ۳۶.....
- شکل (۲-۴) تابع هموار گاوسی ارائه شده توسط Gingold و Monaghan [۳۹]. ۳۸.....
- شکل (۳-۴) تابع هموار B-spline ارائه شده توسط Monaghan و Lattanzio [۴۱]. ۳۹.....
- شکل (۴-۴) تابع هموار اولین quartic spline ارائه شده توسط Morris [۴۲]. ۴۰.....
- شکل (۵-۴) تابع هموار دومین quartic spline ارائه شده توسط Morris [۴۲]. ۴۰.....

- شکل (۶-۴) تابع هموار quartic ارائه شده توسط Johnson و همکاران [۴۳] ..... ۴۱
- شکل (۷-۴) توابع کرنل ارائه شده توسط Muller، به ترتیب از سمت راست  $W_{viscosity}$ ،  $W_{spiky}$  و  $W_{poly}$  است که خطوط باریک و خط چین به ترتیب گرادیان و لاپلاس را نشان می‌دهند [۴۵] ..... ۴۳
- شکل (۸-۴) طول هموار برای تابع تقریب کرنل. (a) شعاع پشتیبانی بزرگ توزیع وزنی خوبی برای اطراف ذره ندارد. (b) شعاع پشتیبانی کوچک داده‌های کافی برای تاثیر ذرات اطراف بدست نمی‌دهد. (c) شعاع پشتیبانی مناسب در هنگام ارزیابی مقادیر سیال مهم است [۴۶] ..... ۴۴
- شکل (۱-۵) ابعاد و نحوه مشبندی شبکه المانها در صفحه xz ..... ۵۳
- شکل (۲-۵) الف) نمایشی از مسیر شیب‌دار. ب) مانع هر ۲ سانتی‌متر. ج) مانع هر ۴ سانتی‌متر. .... ۵۴
- شکل (۳-۵) نمودار مکان- زمان بهمن ..... ۵۵
- شکل (۴-۵) شکل حرکت بهمن در حالت بدون مانع در زمان‌های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه. .... ۵۶
- شکل (۵-۵) نمودار مکان- زمان بهمن [۳۶] ..... ۵۷
- شکل (۶-۵) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه. [۳۶] ..... ۵۷
- شکل (۷-۵) الف) نمودار مکان- زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدلسازی و آزمایشگاه. [۱۶] ۵۸
- شکل (۸-۵) نمای کلی موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. .... ۵۹
- شکل (۹-۵) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. .... ۶۰
- شکل (۱۰-۵) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. .... ۶۱
- شکل (۱۱-۵) نمودار مکان- زمان بهمن [۳۶] ..... ۶۱
- شکل (۱۲-۵) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه. [۳۶] ..... ۶۲
- شکل (۱۳-۵) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. الف) نمودار مکان- زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدلسازی و آزمایشگاه. [۱۶] ..... ۶۳

- شکل (۱۴-۵) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ..... ۶۴
- شکل (۱۵-۵) شکل حرکت بهمن در زمان های ۰/۹، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۴ سانتی متر. .... ۶۵
- شکل (۱۶-۵) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۴ سانتی متر [۳۶]. ..... ۶۵
- شکل (۱۷-۵) شکل حرکت بهمن در زمان های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۴ سانتی متر [۳۶]. ..... ۶۶
- شکل (۱۸-۵) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. الف) نمودار مکان- زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدلسازی و آزمایشگاه. [۱۶]. ..... ۶۷
- شکل (۱۹-۵) خط آبی رنگ محل قرارگیری مانع. الف) نمایی از مسیر مدلسازی. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. ۶۸
- شکل (۲۰-۵) الف) نمایی از قطعات مجزا در موانع با فواصل ۲ و ۴ سانتی متر. ب) مانع بصورت بازشدگی. ج) مانع سراسری. .... ۶۹
- شکل (۲۱-۵) پیشروی بهمن پودری. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. .... ۷۰
- شکل (۲۲-۵) نمودار سرعت- زمان بهمن پودری. a) بدون مانع. b) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. c) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. d) مانع بصورت بازشدگی. e) مانع سراسری. .... ۷۲
- شکل (۲۳-۵) کانتور تغییرات سرعت بهمن پودری. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. .... ۷۳
- شکل (۲۴-۵) نمایی از مسیر مدلسازی (رنگ سبز: توده برف، رنگ آبی: آب). ..... ۷۴
- شکل (۲۵-۵) سرعت حرکت بهمن پودری بر روی شیب و موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن با آب. .... ۷۵
- شکل (۲۶-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد. .... ۷۶



- شکل (۲۷-۵) الف) نمای کلی مسیر مدلسازی (خط محل قرارگیری مانع). ب) شکل موانع. ۷۶.....
- شکل (۲۸-۵) برخورد بهمن پودری به موانع با فواصل ۲ متر و سطح آب. ۷۷.....
- شکل (۲۹-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد در موانع با فواصل ۲ متر. ۷۸.....
- شکل (۳۰-۵) برخورد بهمن پودری به مانع سراسری و سطح آب. ۷۹.....
- شکل (۳۱-۵) خط آبی رنگ محل قرارگیری مانع. الف) نمایی از مسیر مدلسازی (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری). ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. ۸۱.....
- شکل (۳۲-۵) پیشروی بهمن (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری). ۸۳.....
- شکل (۳۳-۵) پیشروی بهمن پودری - متراکم. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. ۸۴.....
- شکل (۳۴-۵) نمودار سرعت - زمان بهمن پودری - متراکم. a) بدون مانع. b) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. c) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. d) مانع بصورت بازشدگی. e) مانع سراسری. ۸۶.....
- شکل (۳۵-۵) کانتور تغییرات سرعت بهمن پودری - متراکم. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری. ۸۷.....
- شکل (۳۶-۵) نمایی از مسیر مدلسازی (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری، رنگ سبز: آب). ۸۸.....
- شکل (۳۷-۵) سرعت حرکت بهمن پودری - متراکم بر روی شیب و موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن با آب. ۸۹.....
- شکل (۳۸-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد. ۹۰.....
- شکل (۳۹-۵) الف) نمای کلی مسیر مدلسازی (خط محل قرارگیری مانع). ب) شکل موانع. ۹۰.....
- شکل (۴۰-۵) برخورد بهمن پودری - متراکم به موانع با فواصل ۲ متر و سطح آب. ۹۱.....

شکل (۴۱-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد در موانع با فواصل ۲ متر. ....۹۲

شکل (۴۲-۵) برخورد بهمن پودری - متراکم به مانع سراسری و سطح آب. ....۹۳

## فهرست جدول

جدول (۱-۵) پارامترهای مدلسازی بهمن [۳۵] ..... ۵۲

جدول (۲-۵) پارامترهای مدلسازی آب ..... ۵۲

جدول (۳-۵) زمان توقف و طول پیشروی هر حالت ..... ۷۱

جدول (۴-۵) خروجی‌های شبیه‌سازی ..... ۸۰

جدول (۵-۵) زمان توقف و طول پیشروی هر حالت ..... ۸۵

جدول (۶-۵) خروجی‌های شبیه‌سازی ..... ۹۴



# فصل اول

## مقدمه

## ۱- مقدمه

شبیه‌سازی سیال‌ها با توجه به رفتار فیزیکی پیچیده‌ای که دارند یکی از سخت‌ترین مسائل در زمینه مدل‌سازی‌های عددی است. نمونه‌هایی از این رفتارها شامل تغییرشکل‌ها، آشفستگی‌ها، تشکیل گرداب‌ها و حرکت‌های سطح مشترک بین دو سیال می‌باشد. به دلیل این حرکت‌های پیچیده‌ای که سیال‌ها دارند، به دست آوردن نتایج قابل قبول بسیار دشوار است. به همین دلیل مدل‌هایی برای شبیه‌سازی واقعی سیال‌ها تهیه شده است که هدف این شبیه‌سازی‌ها، توصیف حرکت سیال می‌باشد. شبیه‌سازی بهمن نیز به دلیل همین پیچیدگی‌ها کاری چالش برانگیز است.

حرکت در سیال‌ها با معادلات ناویر-استوکس بیان می‌شود که مجموعه‌ای از معادلات ریاضی وابسته به خواص سیال هستند. پدیده‌های طبیعی زیادی مانند آب [۱]، دود [۲] و آتش [۳]، با بکار بردن این معادلات برای توصیف حرکتشان، مدل‌سازی شده‌اند تا بتوان درک درستی از حرکتشان به دست آورد. انجام محاسبات این معادلات نیاز به قدرت محاسباتی فراوانی دارد. این نیاز می‌تواند برای برنامه‌هایی که سهم اساسی در شبیه‌سازی واقعی جریان‌ها دارند، ویرانگر باشد که این چالشی مهم برای شبیه‌سازی این پدیده‌ها به شمار می‌رود.

روش‌های عددی حل معادلات را می‌توان به دو دسته مبتنی بر مش<sup>۱</sup> و بدون مش<sup>۲</sup> طبقه‌بندی کرد. روش‌های عددی مبتنی بر مش مانند روش المان محدود<sup>۳</sup> (FEM)، حجم محدود<sup>۴</sup> (FVM) و تفاضل محدود<sup>۵</sup> (FDM) ابزار مفیدی برای تحلیل هستند اما این روش‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ ممکن است دچار چرخش، اعوجاج و ... شوند که این باعث کمتر شدن دقت حل می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات در سال‌های اخیر روش‌های بدون مش همانند روش هیدرودینامیک ذرات

---

<sup>۱</sup> Mesh-based Numerical Method

<sup>۲</sup> Meshless Method

<sup>۳</sup> Finit Element Method

<sup>۴</sup> Finit Volume Method

<sup>۵</sup> Finit Difference Method

هموار ( $SPH^1$ ) توسعه یافته است. روش SPH، روش لاگرانژی بدون مش است که معادلات را با تبدیل کردن سیال به مجموعه‌ای از ذرات حل می‌کند و هر ذره دارای جرم، سرعت و خواص سیال است.

## ۱-۱- ضرورت انجام پژوهش

بهمن، به سقوط سریع و ناگهانی مقدار زیادی برف از روی سطوح شیب‌دار گفته می‌شود. بهمن پدیده‌ای است که اغلب در مناطق کوهستانی و در فصل زمستان اتفاق می‌افتد و هر ساله خسارت‌های مالی و جانی فراوانی برای بازدیدکنندگان یا کسانی که در آن مناطق زندگی می‌کنند، به وجود می‌آورد. به همین دلیل در سال‌های اخیر، توجه زیادی را به خود جذب کرده است و محققان فراوانی سعی کرده‌اند تا بهترین توصیف را برای حرکت آن ارائه کنند. این تحقیقات منجر به طبقه‌بندی بهمن‌ها، از لحاظ نوع برف (بهمن پودری<sup>۲</sup>، بهمن متراکم<sup>۳</sup> و در بعضی موارد بهمن پودری- متراکم<sup>۴</sup>) و شکل حرکت برف (جریان بهمن<sup>۵</sup> و بهمن‌های هواپرد<sup>۶</sup>)، شده است. هم‌چنین برای کاهش صدمات آن روش‌هایی ارائه شده است تا بتوان خسارت‌های ناشی از آن را به حداقل رساند. علاوه بر این، ابزارهای جدیدی برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی بهمن‌ها در جهان واقعی توسعه پیدا کرده است که نتیجه این کارها، باعث ایجاد مدل‌های ریاضی بر اساس معادلات ناویر- استوکس برای توصیف حرکت‌های پیچیده بهمن‌های واقعی شده است. لذا در این پژوهش با مدل‌سازی عددی حرکت بهمن بر روی شیب که در اثر وزن خود شروع به حرکت کرده، رفتار آن بررسی و تاثیر موانع مختلف بر حرکت و سرعت آن نشان داده خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

<sup>۲</sup> Powder- snow avalanche

<sup>۳</sup> Dense- snow avalanche

<sup>۴</sup> Dense- Powder avalanche

<sup>۵</sup> Flowing avalanche

<sup>۶</sup> Airborne avalanche

## ۱-۲- معرفی پژوهش

### ۱-۲-۱- بیان مسئله

در این پایان‌نامه، جریان بهمنی که در اثر وزن خود، بر روی شیب شروع به حرکت کرده و تنها نیروی اصطکاک، در خلاف جهت حرکت، به آن وارد شده، مدلسازی می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها بهمن به دو صورت، پودری و بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از برف پوشیده شده (بهمن پودری- متراکم)، در نظر گرفته می‌شود؛ به چنین جریان‌هایی که از دو سیال تشکیل شده‌اند، جریان‌های دو فازی گفته می‌شود. برای توصیف حرکت‌های پیچیده این‌گونه جریان‌ها، مدل‌های ریاضی توسط Dutikh و همکاران [۴] که برگرفته از معادلات ناویر- استوکس است، توسعه پیدا کرده‌اند. حل این معادلات با استفاده از روش SPH نیازمند نرم‌افزاری قدرتمند است؛ به همین دلیل در این تحقیق برای شبیه‌سازی بهمن از نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود.

### ۱-۲-۲- هدف از پژوهش

هدف این پایان‌نامه شبیه‌سازی بهمن با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) است تا بتوان شناختی مناسب از حرکت بهمن پیدا کرد. همان‌گونه که گفته شد بهمن می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری به جا گذارد، پس پیدا کردن راه‌حلی برای کاهش صدمات آن امری ضروری است؛ به همین دلیل در این پایان‌نامه سعی می‌شود تا با گذاشتن موانع مختلف در سر راه بهمن، میزان پیشروی و سرعت آن را در حالت‌های مختلف با هم مقایسه کرد. در انتها بهترین مانع انتخاب می‌شود و با قرار دادن آن در مدلی که بهمن به سطح آب برخورد می‌کند، تاثیر مانع بر سرعت و ارتفاع آب در لحظه برخورد بهمن و هنگام عبور آب از سد بررسی خواهد شد.



## ۱-۳- فصل بندی پژوهش

در فصل اول مقدمه و کلیاتی از این پژوهش، شامل معرفی بهمن، ضرورت و هدف انجام پژوهش حاضر پرداخته شد.

در فصل دوم به بررسی بهمن شامل طبقه بندی بهمن و معرفی خصوصیات هر حالت پرداخته و بعضی از خطرناک ترین بهمن هایی که در جهان و همچنین برخی از بهمن هایی که در سال های گذشته در ایران اتفاق افتاده، بیان می گردد.

در فصل سوم به معرفی روش های تحلیل بهمن شامل روش های عددی و آزمایشگاهی و کاستی های روش های بیان شده، پرداخته و در انتهای فصل معادلات ناویر- استوکس و سپس مدل ریاضی استخراج شده از این معادلات برای بهمن ارائه می گردد.

در فصل چهارم روش هیدرودینامیک ذرات هموار توضیح داده می شود و معادلات خروجی بهمن که در فصل گذشته به آن اشاره شد به روش SPH بیان می گردد.

در فصل پنجم در ابتدا به معرفی روش تحقیق شامل معرفی نرم افزار، پارامترهای مدلسازی بهمن و سپس به مدل های مختلفی که در نرم افزار شبیه سازی شده و در نهایت نتایج و تحلیل آنها ارائه می گردد.

در انتهای این پایان نامه در فصل شش، به نتیجه گیری پرداخته و پیشنهادات لازم برای کارهای بعدی ارائه می گردد.



## فصل دوم

### جریان بهمن

## ۲- جریان بهمن

### ۲-۱- طبقه‌بندی بهمن‌ها

بهمن، توده برفی است که به دلیل تفاوت حاصل از نیروی وارد بر توده برف (نیروی گرانش یا نیروهای خارجی مثل انفجار) و نیروی لازم برای نگهداری آن (نیروی اصطکاک)، بطور ناگهانی و با سرعت بر روی شیب شروع به حرکت می‌کند. هنگامی که برف جدید بر روی برف قدیمی جمع می‌شود، ساختاری لایه‌ای شکل می‌گیرد؛ این ساختار مستعد لغزش‌های داخلی بین لایه‌ها است که منجر به وقوع بهمن می‌شود. این پدیده اغلب در مناطق کوهستانی و در فصل زمستان اتفاق می‌افتد و هر ساله خسارت‌های فراوانی به جاده‌ها، شهرک‌ها و سازه‌های عمرانی وارد می‌کند؛ به همین دلیل پیدا کردن راه‌حلی مناسب برای کاهش صدمات آن امری ضروری است. در شکل (۲-۱) نمونه‌هایی از خسارت‌های بهمن نشان داده شده است.

در ابتدا که توده برف شروع به حرکت می‌کند، به صورت جریان متراکم می‌باشد که از آن به عنوان بهمن متراکم یاد می‌شود. در حین پیشروی، هوا وارد جریان متراکم بهمن شده و آن را تبدیل به بهمن پودری می‌کند. گاهی اوقات فاز میان این دو، بصورت بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات هوا و برف پوشیده شده، در نظر گرفته می‌شود (بهمن پودری-متراکم). در شکل (۲-۲) فازبندی مراحل فوق (طبقه‌بندی بر اساس نوع برف) نشان داده شده است.

در طبقه‌بندی دیگر بهمن‌ها، Ancey شکل حرکت برف را به جای نوع برف، عامل طبقه‌بندی در نظر گرفته است؛ که بر اساس آن بهمن‌ها به دو دسته، جریان بهمن و بهمن هوابرد تقسیم می‌شوند [۵]. جریان بهمن معمولاً توسط هسته‌ای متراکم با چگالی بالا، در حدود  $150 \text{ Kg/m}^3$  تا  $500 \text{ Kg/m}^3$  مشخص می‌شود که عمق نسبتاً کم، در حد چند متر و سرعت متوسط بین  $5 \text{ m/s}$  تا  $25 \text{ m/s}$  دارد. این بهمن‌ها می‌توانند باعث خطرات گسترده‌ای شوند زیرا علیرغم اینکه سرعت آن‌ها کم است، جرم قابل

ملاحظه‌ای دارند [۵].



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

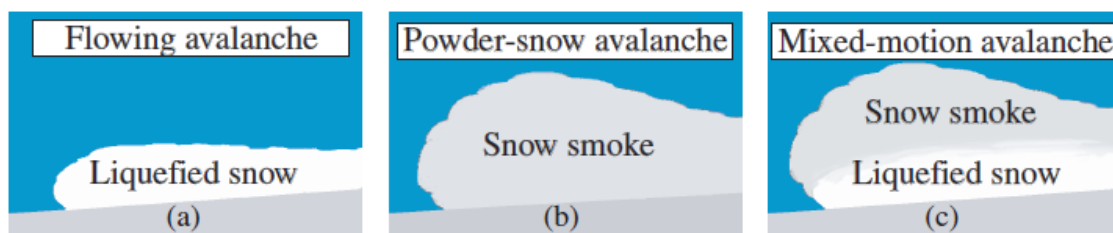


(ی)



(ه)

شکل (۱-۲) الف) صدمات بهمن به پیستاسکی روستای Aosta در سال ۱۹۹۷. ب) ریزش بهمن بر روی جاده در روستای Gressoney در سال ۲۰۰۸. ج) خسارت‌های بهمن مکزیک در سال ۱۹۹۹ به ماشین، د) درختان، ه) خانه‌ها و ی) تیر برق [۶].



شکل (۲-۲) (a) بهمن متراکم، (b) بهمن پودری، (c) بهمن پودری-متراکم.

بهمن‌های هوابرد، در واقع حرکت خیلی سریع ابر برفی شامل ذرات برف و هوا هستند (شکل ۲-۲-۳). این ابرها می‌توانند تا ۱۰۰ متر ارتفاع داشته باشند و سرعت متوسط آن‌ها گاهی مواقع از  $100\text{ m/s}$  نیز تجاوز می‌کند. این بهمن‌ها در طول حرکت خود به طور مداوم در حال گسترش هستند و چگالی متوسط نسبتاً کمی در حدود  $5\text{ Kg/m}^3$  تا  $50\text{ Kg/m}^3$  دارند [۵]. چنین بهمن‌هایی گاهی اوقات به بهمن پودری اشاره دارند.



شکل (۲-۳) بهمن هوابرد در هیمالیا [۷]

## ۲-۲-۲- برخی از بهمن‌های خطرناک در جهان

با فرا رسیدن فصل زمستان و سرما، حوادث طبیعی نیز جلوه‌ای متفاوت پیدا می‌کنند. آنچه از آن تحت عنوان بهمن یاد می‌شود، فقط یک نمونه به ظاهر شناخته شده از این نوع است که هنوز رازهای ناگفته زیادی دارد. بهمن به سقوط سریع و ناگهانی مقدار زیادی برف از روی سطوح شیب‌دار یا

کوهستان گفته می‌شود. برای کسانی که در مناطق سردسیر و در دامنه‌ی کوه زندگی می‌کنند، وجود بهمن خطری جدی محسوب می‌شود. در ادامه فهرستی از مرگبارترین بهمن‌های به‌وقوع پیوسته در طول تاریخ ارائه خواهد شد.

## ۲-۲-۱- بهمن مناطق اوآسکاران و انکاش، پرو

بدترین بلای طبیعی تاریخ کشور پرو در ۳۱ مه ۱۹۷۰ اتفاق افتاد که به «زمین‌لرزه بزرگ پرو» معروف است. بهمنی که در پی وقوع یک زلزله ایجاد شد، تقریباً جان ۲۰،۰۰۰ نفر را گرفت. این حادثه، مرگبارترین بهمن در کل تاریخ بشریت محسوب می‌شود. مرکز این زلزله در ۳۳ کیلومتری سواحل پرو در اقیانوس آرام بود. طی وقوع این بهمن، انباشت بزرگی از برف و یخ به طول ۱/۶ کیلومتر و عرض ۹۱۰ متر و نیز با سرعتی بالغ بر ۲۸۰ تا ۳۳۵ کیلومتر بر ساعت روانه‌ی دامنه‌ی کوه شد [۸].

## ۲-۲-۲- جمعه سفید یا بهمن‌های خط مقدم کوه‌های آلپ، کوه

### مارمولادا، ایتالیا

در دسامبر سال ۱۹۱۶، طی بدترین روزهای جنگ جهانی اول، وقوع چندین بهمن در کوه‌های آلپ ایتالیا، موجب مرگ سربازان ایتالیایی و اتریشی شد که در حال جنگ مقابل یکدیگر بودند. در ۱۳ دسامبر همان سال، اولین بهمن با ۱۰۰ هزار تن یخ، برف و سنگ از کوه مارمولادا به سمت پایین سرازیر شد. در این حادثه، ۳۰۰ سرباز جان خود را از دست دادند اما این تازه شروع کار بود. طی چند هفته‌ی آینده، بهمن‌های بسیار دیگری به وقوع پیوستند که جان ۱۰،۰۰۰ نفر را گرفت [۸].

## ۲-۲-۳- بهمن کوه اوآسکاران، پرو

کوه اوآسکاران در رشته کوه‌های آند پرو، یک کوه آتشفشانی خاموش است که بسیاری از مردم پرو در دامنه‌ی آن زندگی می‌کنند. در روز دهم ژانویه‌ی ۱۹۶۲، قطعه‌ی بزرگی از یخچال طبیعی

کوهستان، از آن جدا و با سرعتی بسیار زیاد روانه‌ی پایین شد. این بهمن، منطقه‌ای ۱۵ کیلومتری را طی تنها ۷ دقیقه زیر برف مدفون کرد که به مردم، اجازه‌ی رسیدن به نواحی امن را نداد. این بهمن کشنده تا رسیدن به رودخانه‌ی سانتا، به تخریب‌های خود ادامه داد، سپس بهمن موجب بسته شدن راه رودخانه و وقوع سیلی عظیم در مناطق اطراف شد. ۴۰۰۰ نفر جان خود را طی وقوع این بهمن از دست دادند [۸].

## ۲-۲-۴- بهمن افغانستان، ولایت پنجشیر

در فوریه سال ۲۰۱۵، چهار استان افغانستان تحت حملات بهمن‌های کشنده قرار گرفتند. طی وقوع این بهمن‌ها، استان پنجشیر واقع در ۹۵ کیلومتری شمال شرقی پایتخت افغانستان کابل، بیشتر از دیگر نواحی این کشور آسیب دید. بهمن بیش از ۱۰۰ خانه‌ی استان پنجشیر را نابود کرد و حدوداً ۳۱۰ نفر در این فاجعه جان باختند [۸].

## ۲-۲-۵- زمستان وحشتناک، کوه‌های آلپ

«زمستان وحشتناک» یکی از بدترین ادوار تاریخ کوه‌های آلپ است که شاهد وقوع چندین بهمن در مرز اتریش-سوئیس بود. این بهمن‌ها جان ۲۶۵ انسان را گرفته و مناطق مسکونی و مراکز بزرگ بسیاری را در اتریش و سوئیس زیر برف مدفون کردند. شرایط بد آب و هوایی نامعمول، موجب به وجود آمدن «زمستان وحشتناک» شد. این فاجعه‌ی ناگوار طی دوره‌ای سه ماهه در زمستان سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۵۱ به وقوع پیوست [۸].

## ۲-۲-۶- لاهول ولی، هند

مردم لاهول ولی هند، به درختان محل زندگی خود اهمیت بسیاری می‌دهند؛ چرا که جنگل‌های آنجا برای مردم، مانند سپری در مقابل بلایای طبیعی از جمله بهمن است. یکی از حوادثی که همواره در یاد و خاطره‌ی مردم لاهول ولی باقی خواهد ماند، وقوع بهمنی است که در ششم مارس سال



۱۹۷۹، جان ۲۵۴ نفر از روستاییان منطقه را گرفت. اگرچه درختان در کم کردن سرعت و جلوگیری از ادامه‌ی بهمن‌های کوچک نقش مهمی ایفا می‌کنند، اما بهمن‌های بزرگ به راحتی می‌توانند کل جنگل را از سر راه خود بردارند [۸].

## ۲-۲-۷- بهمن‌های افغانستان، بدخشان، افغانستان

«بهمن‌های افغانستان» در استان بدخشان شمال این کشور، موجب تلفات جانی و مالی سنگینی در این ناحیه شد. در ۲ مارس سال ۲۰۱۲، وقوع سه بهمن متوالی در بدخشان، روستاهای اطراف این شهر را، زیر تلی از برف و یخ مدفون کرد و جان ۲۰۱ نفر را گرفت [۸].

## ۲-۲-۸- بهمن سالنگ، هندوکش، افغانستان

در فوریه ۲۰۱۲، به دلیل وزش بادهای شدید و بارش باران، هفده بهمن کوچک و بزرگ در نواحی جنوبی گذرگاه سالنگ در کوهستان‌های هندوکش به سمت پایین سرازیر شد. این بهمن‌ها ۳ کیلومتر از بزرگراه را مدفون کردند و تقریباً جان ۱۷۲ نفر را نیز گرفتند. بهمن، اتومبیل‌های زیادی را زیر برف مدفون کرد [۸].

## ۲-۲-۹- پایگاه نظامی گیاری، گانچی، پاکستان

در هفتم آوریل سال ۲۰۱۲، بهمنی در منطقه‌ی سیاچن هند و پاکستان رخ داد که ۱۳۸ نفر را به کام مرگ کشاند. سیاچن منطقه‌ای در کشمیر است که بر سر مالکیت آن، بین هند و پاکستان جنگ و نزاع وجود دارد [۸].

## ۲-۲-۱۰- یخچال طبیعی کولکا، اوستیای شمالی، روسیه

در ۲۰ سپتامبر ۲۰۰۲ وقوع یک بهمن کوچک در «یخچال طبیعی کولکا» جان ۱۲۵ را گرفت. این

بهمن در شیب‌های کوه قازبگی، در اوستیای شمالی روسیه سرازیر شد. در میان کشته شدگان، یک گروه فیلمسازی ۲۷ نفره نیز حضور داشتند. همچنین این بهمین، روستای «نیجنی کارمادون» را کاملاً زیر برف مدفون کرد [۸].

## ۲-۳- بهمین‌های اتفاق افتاده در ایران

بهمین، با حرکت توده‌های برف بر روی شیب، زمانی که شرایط ناپایداری بر روی شیب داشته باشند و با تحریک یک عامل خارجی (مانند وزن برف تازه باریده، باد، وزن یک کوهنورد و...) ایجاد می‌شود. وقوع بهمین تابع شرایط محیط مانند: بستر برف، شدت و جهت باد، میزان برف تازه، عدم اتصال کریستال‌های برف تازه باریده به برف قدیمی، گرم شدن در طول روز، شیب نامناسب و... است. با حضور این عوامل کنار یکدیگر امکان وقوع بهمین به شدت افزایش می‌یابد.

هر سال در سراسر جهان بیش از یک میلیون بهمین اتفاق می‌افتد. وقوع بهمین رخدادی طبیعی در کوهستان است. در کوه‌های ایران نیز این روند وجود دارد و در فصل‌های زمستان و بهار بهمین‌های بسیاری در آنجا رخ می‌دهد. در ادامه برخی از بهمین‌هایی که در ایران اتفاق افتاده ارائه خواهد شد.

## ۲-۳-۱- ریزش بهمین در پیست شمشک

ریزش بهمین در ساعت ۱۰:۳۰ صبح روز ۱۱ بهمین ۱۳۹۳ در منطقه‌ی شمشک منجر به کشته شدن یک اسکی باز شد. در این حادثه ۳ نفر اسکی باز در خارج از محدوده پیست شمشک در حال اسکی بودند، به یکباره دچار حادثه ریزش بهمین شدند که دو نفر از آنها از زیر بهمین خارج شدند؛ پس از ساعاتی تلاش و جستجو نفر سوم نیز از زیر بهمین خارج شد که متأسفانه با وجود تلاش‌های فراوان به زندگی مجدد بازنگشت [۹].

## ۲-۳-۲- ریزش بهمن در سردشت

در ساعت ۲۰:۴۰ دقیقه شامگاه شنبه ۹ بهمن ۱۳۹۵ در پی سقوط بهمن در روستای بیوران علیا (سرچشمه قره‌دان) سردشت ۱۶ تن در بهمن مدفون شدند. عوامل امدادی بلافاصله با اطلاع یافتن از حادثه به محل اعزام شدند و از مجموع ۱۶ تن گرفتار در بهمن، چهار نفر جان خود را از دست داده‌اند [۱۰].

## ۲-۳-۳- ریزش بهمن در خوی

به گزارش خبرگزاری صدا سیما مرکز آذربایجان غربی، ساعت ۱۱:۳۰ دقیقه شب روز ۱ فروردین ۱۳۹۶ ریزش بهمن در روستای ترس‌آباد از شهرستان خوی، ۵ نفر را زیر بار سنگین برف گرفتار کرد. متأسفانه علی‌رغم تلاش اکیپ فوریت‌های پزشکی ۴ نفر از گرفتارشدگان به سبب سرمازدگی و کمبود اکسیژن جان خود را از دست دادند [۱۱].

## ۲-۳-۴- ریزش بهمن در ارومیه

در روز چهارشنبه ۲۷ بهمن ۱۳۹۵ در ساعت ۹:۳۰ دقیقه شب، در اثر سقوط بهمن در روستای برده‌سور بخش سیلوانای ارومیه، یکی از منازل مسکونی این روستا به طور کامل در زیر بهمن مدفون شد. در این حادثه ۲ نفر از اعضاء خانواده جان خود را از دست دادند [۱۲].

## ۲-۳-۵- ریزش بهمن در جاده هراز

جاده هراز، جاده‌ای است که هر ساله بهمن‌های زیادی در آن اتفاق می‌افتد که مهم‌ترین آن را می‌توان بهمن ایجاد شده در ۵ فروردین ۱۳۵۱ دانست که باعث شد صدها اتومبیل در زیر بهمن مدفون گردد. این بهمن ۳۰ متر ارتفاع و ۵۰۰ متر طول داشت [۱۳].

هر ساله در زمستان ریزش بهمن در محور هراز به امری عادی تبدیل می‌شود به گونه‌ای که در زمستان ۱۳۹۵ در ۲۴ ساعت (پنج‌شنبه ۱۴ بهمن تا جمعه ۱۵ بهمن) ۴ بار ریزش بهمن در این محور ثبت شده است. بعنوان مثال ریزش بهمن در مبارک آباد آبعلی محور هراز که در این حادثه ۴ نفر جان خود را از دست دادند [۱۴]. ۲۰ روز بعد از این حادثه در روز ۲۵ بهمن ۱۳۹۵، نیز بهمنی با ۴ متر ارتفاع در جاده هراز اتفاق می‌افتد که به دلیل مسدود بودن این جاده، خوشبختانه خسارت و تلفاتی در پی نداشت [۱۴].

## ۲-۳-۶- ریزش بهمن در جاده کرج-چالوس

جاده کرج-چالوس به دلیل واقع شدن در منطقه کوهستانی هر ساله در فصل زمستان، بهمن‌های فراوانی در این منطقه اتفاق می‌افتد. در روز جمعه ۸ بهمن ۱۳۹۵ در چهار نقطه از این محور، از جمله در محدوده گچسر تا دهانه جنوبی تونل کندوان، سقوط بهمن اتفاق افتاده که با توجه به مسدود کردن مسیر جاده چالوس قبل از ریزش بهمن، هیچ خسارات جانی در پی نداشته است [۱۵].

تداوم سرما در ادامه، راه ۱۲ روستای طالقان را بست، در روز شنبه ۹ بهمن ۱۳۹۵، نیز این محور شاهد ۹ بهمن، حدفاصل امام چشمه تا کندوان. اما آنچه برای یکشنبه پیش بینی شد وزش باد شدید بود تا بارش برف دمای هوای استان را ۴ درجه کاهش دهد. بارش برف و باران در استان البرز کماکان ادامه داشت و بیش از ۴۰ بهمن در روز یکشنبه ۱۰ بهمن ۱۳۹۵ در جاده کرج-چالوس ثبت شد [۱۵].

همان‌گونه که مشاهده شد، بهمن پدیده‌ای طبیعی است و هر ساله در فصل زمستان، بهمن‌های فراوانی در جهان و ایران اتفاق افتاده که باعث از دست دادن جان هزاران نفر شده است. به همین دلیل، شناخت حرکت بهمن و یافتن راه‌حلهایی برای کاهش و جلوگیری از پیشروی و سرعت آن امری ضروری است تا بتوان خطرات ناشی از سقوط بهمن را به حداقل رساند.

## فصل سوم

### روش‌های مدل‌سازی عددی جریان بهمن

## ۳- روش‌های مدل‌سازی عددی جریان بهمن

### ۳-۱- مقدمه

همان‌گونه که در فصل پیش اشاره شد هر ساله بهمن‌های زیادی اتفاق می‌افتد که خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را به وجود می‌آورند. به همین دلیل باعث شده است محققان زیادی سعی در شناخت رفتار بهمن داشته باشند. در این فصل در ابتدا مطالعات آزمایشگاهی که در برای شناخت رفتار بهمن انجام شده است، بیان می‌شود. سپس مطالعات عددی، انواع سیالات و روش‌های عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی بهمن‌ها ارائه می‌گردد. در انتهای فصل نیز معادلات ناویر-استوکس، که پایه بسیاری از مدل‌های توصیف‌کننده سیال‌ها هستند و مدل ریاضی توصیف‌کننده بهمن ارائه می‌شود.

### ۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی به عنوان پیش زمینه‌ای برای مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده بهمن‌ها به کار می‌رود. در این راستا دو دیدگاه برای بررسی جریان بهمن وجود دارد؛ یکی آزمایش‌هایی که در مقیاس کوچک در آزمایشگاه انجام می‌شود [۱۶، ۱۷] و دیگری ایجاد مصنوعی بهمن در سایت آزمایشی به وسیله نیروهای خارجی، مثل انفجار یا نیروی گرانش که باعث حرکت لایه‌های برف انباشته شده روی هم می‌شود، است [۱۸، ۱۹].

ایجاد مصنوعی بهمن در سایت آزمایشی را می‌توان به بهمن ایجاد شده در دو سایت آزمایشی اروپا اشاره کرد؛ در هر دو سایت سرعت بهمن توسط رادار داپلر ثبت شده است. در سال ۱۹۹۹، در سایت آزمایشی Vallée de la Sionne (Vdls) بهمن در اثر نیروی گرانش شروع به حرکت می‌کند؛ توده برفی که در ابتدا شروع به حرکت کرده دارای ارتفاع ۰/۷ متر و حجم اولیه حدوداً ۸۴۰۰۰ مترمکعب

است. در طول حرکت بهمن، به طور متوسط  $0/7$  متر از برف روی کوه وارد بهمن شده که این باعث می‌شود بهمن در انتهای حرکتش حجمی در حدود  $505000$  مترمکعب داشته باشد؛ که این نشان می‌دهد حجم بهمن تا  $6$  درصد افزایش یافته است [۱۸].

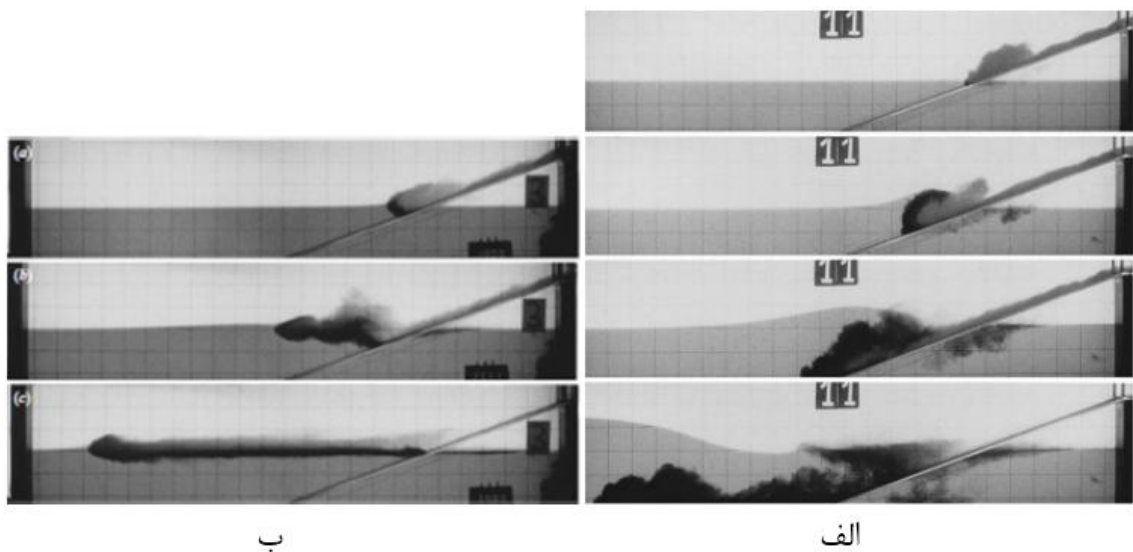
در سال  $1997$ ، در سایت آزمایشی Ryggfonn (Rgf) بهمن به وسیله انفجار ایجاد شده است که باعث شده توده برفی به حجم اولیه  $12000$  تا  $30000$  مترمکعب شروع به حرکت کند. بهمن در ابتدا به صورت توده برف خشک بوده است که در حین پیشروی برف تازه از روی کوه وارد آن می‌شود. تخمین زده شده است که بهمن در انتهای حرکتش حجمی در حدود  $40000$  مترمکعب دارد که این نشان می‌دهد حجم بهمن بین  $1/3$  تا  $3/3$  درصد افزایش یافته است [۱۹].

گروه دوم، آزمایش‌هایی است که در مقیاس کوچک در آزمایشگاه انجام می‌شود. در آزمایشگاه، بهمن به دو صورت متراکم و پودری در نظر گرفته می‌شود اما از آنجایی که بهمن‌های پودری حوادث نادری هستند، ساخت مجدد آن در شرایط آزمایشگاهی و انجام مطالعات بر روی آن‌ها نسبت به بهمن‌های متراکم امری دشوار است بنابراین مطالعات آزمایشگاهی بر روی آن‌ها اغلب شامل مطالعه حرکت‌های جریان‌های گل‌آلود می‌شود که رفتار بهمن پودری را بهتر نشان می‌دهند. جریان‌های گل‌آلود را با پخش سیال سنگین در داخل سیال سبک، مانند حل نمک در آب [۲۰]، می‌توان تولید کرد. نسبت چگالی سیال سبک به سنگین در این جریان‌ها معمولاً بین  $1$  تا  $2$  می‌باشد در حالی که این نسبت برای بهمن پودری تقریباً  $10$  است.

Olange و Beghin پروفیل‌های سرعت و چگالی بهمن را در جریان‌های گرانشی  $3$ - بعدی با استفاده از حل نمک در آب، اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که به دست آوردن قوانین در مورد سرعت و چگالی جریان امکان‌پذیر است. آن‌ها هم چنین نشان دادند که نرخ رشد طول، ارتفاع و عرض ابرها تابع خطی از شیب و به چگالی و حجم اولیه وابسته هستند [۱۷].

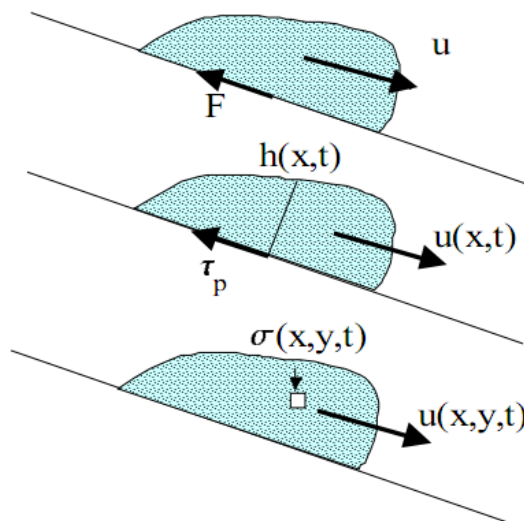
Hutter و Herman بهمن‌های پودری را با استفاده از ذرات پلی-استایرن در آب برای نمایش رفتار بهمن شبیه‌سازی کردند [۲۱]، در حالی که Bozhinkiy و Sukhanov مصالحی با استفاده از مخلوط خاک اره فرومغناطیس و گرد و غبار آلومینیوم برای تقریب‌های بهتر رفتار بهمن پودری ساختند [۲۲].

Monaghan و همکاران آزمایشی طراحی کردند که آب نمک بر روی شیب شروع به حرکت کرده (لایه متحرک) و به لایه آب نمکی که در انتهای شیب قرار دارد (لایه ساکن)، برخورد می‌کند. آن‌ها فضای خالی موجود در مخزن آزمایش را با آب تازه پر کردند و اثرات شیب‌ها (۲۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) و تفاوت در چگالی‌های آب نمک را بر موج ایجاد شده در اثر برخورد لایه متحرک به لایه ساکن را بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان دادند که صرف‌نظر از زاویه سطح شیب‌دار و تغییرات در چگالی لایه ساکن، زمانی که چگالی لایه متحرک کم‌تر از چگالی لایه ساکن باشد، ارتفاع موج ایجاد شده کم است و لایه متحرک در امتداد سطح مشترک لایه ساکن و آب تازه به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۲-۴-ب). هنگامی که چگالی لایه متحرک چند درصد از لایه ساکن بالاتر باشد، لایه متحرک به درون لایه ساکن می‌رود و به حرکت خود در انتهای لایه ادامه می‌دهد (شکل ۲-۴-الف). هم‌چنین ارتفاع



شکل (۳-۱) آزمایش انجام شده توسط (۶) با شیب ۲۰ درجه. الف) چگالی لایه متحرک بیشتر از لایه ساکن. ب) چگالی لایه متحرک کم‌تر از لایه ساکن. [۲۳]





شکل (۲-۳) مقیاس‌های فضایی مختلف که برای توصیف بهمن استفاده می‌شود. بالایی: مدل ساده‌ای که بهمن را بدون تغییر شکل در نظر گرفته و نیروی اصطکاک تنها نیروی مخالف است. پایینی: مدل عددی پیچیده‌ای که در نظر می‌گیرد بهمن از ذراتی تشکیل شده است که حرکت بهمن با حرکت آن‌ها بیان می‌شود [۵].

موج با افزایش چگالی لایه متحرک نسبت به لایه ساکن، افزایش می‌یابد. آنها هم‌چنین با استفاده از SPH آن را شبیه‌سازی کردند که همان نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بدست آمد [۲۳].

Nishimura و McElwaine بهمن را با استفاده از توپ‌های پینگ‌پنگ برای مطالعه جریان‌های ۳-بعدی، شبیه‌سازی کرده و سرعت توپ‌ها و فشار هوای اطراف آن‌ها را با استفاده از دوربین‌های مخصوصی که در اطراف شیب نصب کرده بودند، اندازه‌گیری کردند. آن‌ها ساختاری از جریان هوای اطراف بهمن را با استفاده از این داده‌ها ارائه دادند. هم‌چنین آزمایش آن‌ها جزئیاتی از حرکت‌های جریان‌های دو فازی را نشان داد [۲۴].

### ۳-۳- مطالعات عددی

شبیه‌سازی بهمن‌ها با توجه به رفتار پیچیده‌ای که دارند، کاری چالش برانگیز است. مدل‌های ریاضی که حرکت‌های بهمن را به خوبی توصیف می‌کنند بر پایه مدل‌های توصیف کننده حرکت سیال‌ها هستند. این مدل‌های ریاضی بر پایه معادلات ناویر-استوکس است که در بخش بعدی توضیح

داده خواهد شد. گاهی بهمن را در شبیه‌سازی‌ها به صورت مدل ساده‌ای در نظر می‌گیرند که حرکت آن شامل توده برفی است که فقط نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت به آن وارد می‌شود. در مدل‌های پیشرفته‌تر نیروی اصطکاک را می‌توان وابسته به جرم بهمن، عمق جریان، مسیر حرکت بهمن و ۲ ضریب اصطکاک در نظر گرفت که به طور کلی این عوامل را می‌توان به فاکتورهای اصطکاکی داخلی و خارجی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۳-۲). ضریب اصطکاک داخلی به روانی برف و در نتیجه به جرم بهمن بستگی دارد؛ در حالی که نیروی اصطکاک خارجی وابستگی زیادی به مسیر حرکت بهمن دارد [۲۵].

### ۳-۳-۱- سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی

سیال را ماده‌ای تعریف می‌کنند که وقتی تنش برشی هر چند کوچک به آن وارد شود، شکل آن به طور پیوسته تغییر کند. سیالات به طور کلی به سیالات ایده‌آل و غیر ایده‌آل تقسیم می‌شوند. اگر برای سیالی لزجت صفر و قابلیت تراکم‌پذیری نداشته باشد، سیال ایده‌آل فرض می‌شود. در سیال ایده‌آل لایه‌ها بدون هیچ مقاومتی روی هم حرکت می‌کنند و هیچ چسبندگی بین لایه‌های مجاور وجود ندارد [۲۶].

سیالات غیر ایده‌آل به دو دسته، سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی تقسیم می‌شوند. سیالات نیوتنی، سیالاتی هستند که در آن‌ها تغییرات تنش برشی نسبت به نرخ کرنش برشی خطی است و ثابت تناسب در این حالت معرف لزجت سیال می‌باشد. در سیال‌های غیر نیوتنی رابطه بین تنش و نرخ کرنش خطی نیست و با افزایش سرعت، تنش در سیال کاهش یا افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر سیالی است که لزجت آن با نرخ کرنش وارد بر آن تغییر می‌کند [۲۶].

در شبیه‌سازی‌ها، بهمن نیز به صورت یکی از حالت‌های سیال نیوتنی [۲۷] یا سیال غیر نیوتنی در نظر گرفته می‌شود. برخی مدل‌هایی که رفتار بهمن‌های سیال غیر نیوتنی را به خوبی توصیف می‌کنند عبارتند از: مدل بینگهام [۱۶] و مدل هرشل بالکی [۲۸].

## ۳-۳-۲- روش‌های عددی

به طور کلی روش‌های عددی به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- روش‌های با شبکه (مبتنی بر مش)

• روش المان محدود (FEM)

• روش حجم محدود (FVM)

• روش تفاضل محدود (FDM)

۲- روش‌های بدون شبکه (بدون مش)

• روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

• روش بدون شبکه گالرکین<sup>۱</sup> (EFG)

• روش حداقل مربعات گسسته<sup>۲</sup> (DSL)

• روش بدون شبکه موضعی پتروف گالرکین<sup>۳</sup> (MLPG)

• روش بازتولید کرنل ذرات<sup>۴</sup> (RKPM)

روش‌های عددی مبتنی بر مش مانند روش المان محدود و ... ابزار مفیدی برای تحلیل هستند اما این روش‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ ممکن است دچار چرخش، اعوجاج و ... شوند؛ که این باعث کمتر شدن دقت حل می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات، در سال‌های اخیر روش‌های بدون مش

---

<sup>۱</sup> Element Free Galerkin

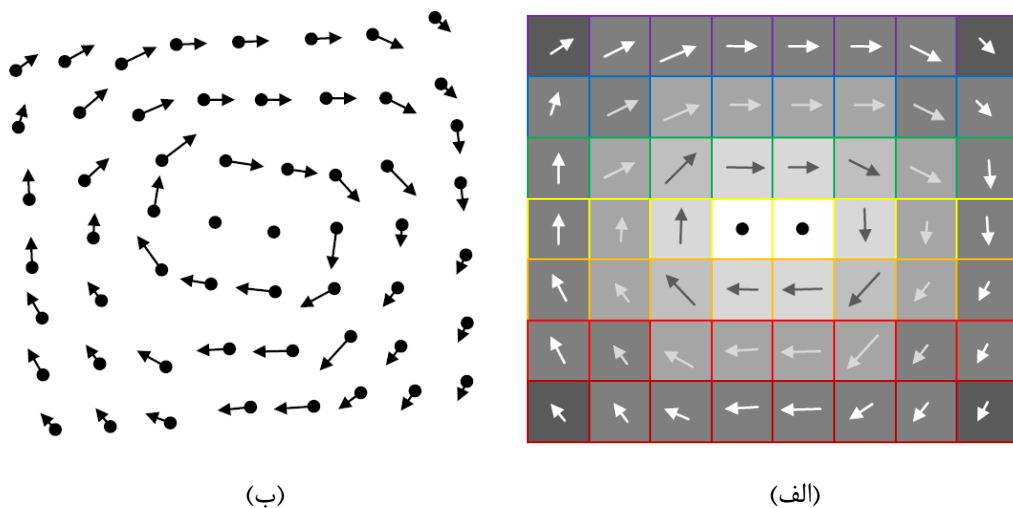
<sup>۲</sup> Discrete Least square

<sup>۳</sup> Meshless Local Petrov Galerkin

<sup>۴</sup> Reproducing Kernel Particle Method

توسعه یافته که مهم‌ترین این روش‌ها، روش هیدرودینامیک ذرات هموار است. روش SPH، روش لاگرانژی بدون مش است که معادلات را با تبدیل کردن سیال به مجموعه‌ای از ذرات حل می‌کند و هر ذره دارای جرم، سرعت و خواص سیال است.

در روش مبتنی بر مش، مسئله به صورت پیوسته و توسط المان‌هایی مدل می‌شود که در گره‌ها بهم متصل شده‌اند و هر یک از این المان‌ها موقعیت ثابتی در فضا دارند که وابسته به همه خواص سیال هستند. شکل (۳-۳-الف) چگونگی وابستگی خواص سیال به المان‌ها را نشان می‌دهد. برای ارائه سیال با استفاده از ذرات بجای شبکه، حرکت جریان با حرکت ذرات بیان می‌شود که به آن نمایش لاگرانژی نیز می‌گویند. در این حالت خواص سیال با ذرات تشکیل‌دهنده سیال انتقال می‌یابد (شکل ۳-۳-ب). بنابراین نیازی به پیش‌بینی موقعیت ذره نیست بلکه به خود ذره وابسته بوده و بر اساس سرعت ذره محاسبه می‌شود؛ در نتیجه مساله یافتن نرخ تغییرات سرعت برای یک ذره در ناحیه محاسباتی آسان‌تر می‌شود زیرا سرعت تنها به زمان وابسته است.



شکل (۳-۳-الف) در دیدگاه مبتنی بر مش، هر سلول دارای خواص سیال است؛ فلش‌ها، رنگ فلش‌ها، رنگ المان‌ها و کادر رنگی المان‌ها به ترتیب نشان دهنده سرعت، فشار، چگالی و دما می‌باشد. (ب) در دیدگاه لاگرانژی، هر ذره علاوه بر خواص سیال دارای جرم و سرعت نیز هست. [۲۹].

Oremus بهمین را بصورت جریان متراکم در نظر گرفته و تاثیر اصطکاک لغزشی ( $\mu$ )، اصطکاک

ویسکوزیته داخلی ( $\bar{\lambda}$ ) و شیب‌های مختلف را بر سرعت و پیشروی بهمن بررسی کرد [۳۰]. او در این شبیه‌سازی از اصل بقاء جرم و بقاء اندازه حرکت و روش تفاضل محدود استفاده و مشاهده نمود که پیشروی بهمن تحت تاثیر اصطکاک ویسکوزیته نیست و عمدتاً با پارامترهای اصطکاک لغزشی کنترل می‌شود. افزایش اصطکاک لغزشی باعث کاهش سرعت و کم شدن میزان میزان پیشروی بهمن شده است. او همچنین بهمن را در آزمایشگاه با استفاده از ماسه بر روی شیب‌های متفاوت شبیه‌سازی کرد و توانست به این نتیجه برسد که تطابق خوبی، با خطایی کمتر از ۵٪، بین میزان حداکثر پیشروی بهمن در آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی وجود دارد. همچنین مشاهده نمود که نسبت طول توقف بهمن در آزمایشگاه به شبیه‌سازی عددی در زاویه‌های شیب بین ۳۳ تا ۳۶ درجه کمتر از ۳٪ و در زوایای ۳۷ تا ۳۹ درجه بین ۴٪-۹٪ است [۳۰].

Gucer و همکاران، بهمن را بصورت جریان متراکم (تشکیل شده از برف روان و خشک) و با استفاده از روش حرکت‌های مولکولی<sup>۱</sup> و المان گسسته<sup>۲</sup> شبیه‌سازی کردند. روش حرکت‌های مولکولی (MD) نمایشی ساده از سیستم ذرات برای مصالح دانه‌ای همچون ماسه و بهمن، به جای یک روش جامد مانند SPH است. متغیرهای مهم در این روش، جرم، شکل تماس و نتایج اصطکاک برشی است و هر ذره با توجه به اندازه خود، دارای جرم متفاوتی می‌باشد. با این روش آن‌ها توانستند جزئیات بیشتری از حرکت بهمن متراکم را نشان دهند [۳۱].

Sample و همکاران با استفاده از نرم‌افزار Samos-AT بهمن متراکم-پودری را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها بهمن را بصورت سه لایه شامل لایه جریان متراکم در پایین، لایه برف پودری در بالا و یک لایه انتقال<sup>۳</sup> میان این دو لایه در نظر گرفتند. آن‌ها لایه جریان متراکم و لایه انتقال را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار و لایه برف پودری را با روش حجم محدود مدل‌سازی کردند [۳۲].

---

<sup>۱</sup> Molecular Dynamics

<sup>۲</sup> Discrete Element Method

<sup>۳</sup> transition Layer

Tsuda و همکاران نیز بهمن متراکم- پودری را بصورت سه لایه شامل لایه برف پودری در بالا، لایه برف متراکم در پایین و برف موجود روی سطح کوه را نیز به عنوان لایه برف انباشته شده<sup>۱</sup> در نظر گرفتند. آن‌ها لایه متراکم و لایه برف انباشته شده را با روش مبتنی بر ذرات و لایه برف پودری را با روش مبتنی بر شبکه شبیه‌سازی کردند. کار برجسته آن‌ها شبیه‌سازی اندرکنش بین لایه‌ها (بین لایه برف پودری و لایه متراکم و بین لایه متراکم و لایه برف انباشته شده) بود که باعث شد بتوانند ویژگی‌های پدیده بهمن، از قبیل تولید برف پودری پیشانی بهمن را به خوبی نشان دهند [۳۳].

Etienne و همکاران بهمن پودری را به صورت ابر متراکم در نظر گرفتند و با استفاده از روش المان محدود و شبیه‌سازی در فضای ۲- بعدی توانستند به اعداد رینولدز<sup>۲</sup> بالایی دست یابند که نتایج به دست آمده از انطباق خوبی با آزمایش‌های گذشته برخوردار بود [۳۴].

Calgario و همکاران بهمن پودری را به صورت هسته نسبتاً متراکم که توسط ذرات معلق برف احاطه شده است، شبیه‌سازی کردند که در مسیر خود بر روی شیب ۳۲ درجه با مانع برخورد می‌کند. آن‌ها روشی مرکب از المان محدود و حجم محدود برای حل معادلات ناویر- استوکس تراکم‌ناپذیر ناهمگن ارائه دادند و تاثیر سه پارامتر بی‌بعد عدد فرود<sup>۳</sup>، عدد رینولدز و عدد اشمیت<sup>۴</sup> را برای تعیین جریان در فضای ۲- بعدی مشخص کردند. عدد رینولدز و عدد فرود به ترتیب مقاومت جابجایی با توجه به ویسکوزیته و مقاومت نیروی لختی و گرانشی را نشان می‌دهند؛ عدد اشمیت نیز نسبت نرخ گرانشی (پخش سرعت) و نفوذ توده بهمن است. آن‌ها مشاهده کردند که اعداد اشمیت مختلف تاثیری بر سرعت پیشانی بهمن<sup>۵</sup> ندارد؛ با افزایش عدد رینولدز، سرعت پیشانی بهمن با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش عدد فرود باعث کاهش سرعت پیشانی بهمن می‌شود [۳۵].

---

<sup>۱</sup> Accumulated Snow Layer

<sup>۲</sup> Reynolds Numbers

<sup>۳</sup> Froude Number

<sup>۴</sup> Schmidt Number

<sup>۵</sup> Velocity of the front of the avalanche

Hornnes Yndested بهمن پودری را بصورت مدل دو فازی تک سرعتی با استفاده از روش مبتنی بر ذرات (SPH) شبیه‌سازی کردند. آن‌ها اثر پارامترهای کسر حجمی (کسری از کل حجم اشغال شده توسط سیال سنگین‌تر) و اختلاف چگالی بین سیال سنگین و سبک (برف و هوا) را بر پدیده بهمن نشان دادند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر کسر حجمی، جریان بهمن نیز تغییر می‌کند و هر چه اختلاف چگالی بین سیال سنگین و سبک بیشتر باشد، جریان آشفته‌تر خواهد بود [۲۷].

Abdelrazek و همکاران در آزمایشگاه نمونه‌ای بهمن به ابعاد  $0.3 \times 0.3 \times 0.3$  m را از ارتفاع ۰/۵۵ متری بر روی سطح شیب‌دار ۴۵ درجه‌ای که اطراف آن باز است، رها کردند. سپس در مسیر بهمن موانع مختلفی گذاشتند و نمودار مکان-زمان را برای آن رسم کردند (همانند کار انجام شده توسط Saito و همکاران [۳۶]). آنها هم‌چنین بهمن پودری را با استفاده از مدل بینگهام و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، دقیقاً مشابه کاری که در آزمایشگاه انجام گرفته، شبیه‌سازی و نتایج را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کردند که از لحاظ حرکت بهمن و میزان برف مانده در پشت موانع انطباق مناسبی مشاهده شد [۱۶].

Gabl و همکاران با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و با روش اجزاء محدود، بهمن پودری را که انتهای مسیرش سدی پر از آب قرار دارد، شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی شکل و سرعت برخورد بهمن به آب و سرعت در لحظه عبور آب از سد را نشان دادند که بر اساس آن، حجم خروجی آب با تحقیقات موجود در ETH Zürich تطابق مناسبی دارد [۳۷].

همان‌گونه که اشاره شد، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی فراوانی برای شناخت رفتار بهمن، سرعت و پیشروی آن انجام گرفته است. در این پایان‌نامه بهمن به دو صورت پودری و بهمن با هسته متراکم در نظر گرفته و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، شبیه‌سازی می‌شود؛ هم‌چنین سعی خواهد شد با گذاشتن موانع مختلف در مسیر حرکت بهمن، تاثیر موانع را بر

میزان پیشروی و سرعت آن، ارزیابی کرد تا بتوان راه‌حلی مناسب برای کاهش خسارت‌های بهمن به دست آورد. در ادامه معادلات بهمن ارائه می‌شوند، البته قبل از آن معادلات ناویر-استوکس که معادلات پایه بسیاری از جریان‌ها هستند، بیان می‌شوند.

### ۳-۴- معادلات ناویر-استوکس

جریان سیال دارای برخی مقادیر پایه فیزیکی، مانند سرعت، فشار و چگالی می‌باشد. چگونگی تغییرات سرعت سیال به صورت تابعی از زمان به وسیله معادلات ناویر-استوکس بیان می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1-3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (2\mu D(v)) + f \quad (2-3)$$

که  $v$  سرعت،  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار سیال،  $D(v)$  تانسور نرخ کرنش،  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $f$  جمع نیروهای خارجی وارد بر سیال است.

این دو معادله شکل کلاسیک معادلات بقاء جرم و بقاء اندازه حرکت را نشان داده و حرکت سیال را توصیف می‌کنند. معادله (۲-۳)، معادله بقاء اندازه حرکت است که میزان شتاب سیال را با توجه به نیروهای وارد شده به سیال توصیف می‌کند. دو عبارت  $-\nabla P$  و  $\nabla \cdot (2\mu D(v))$  نشان دهنده نیروهایی است که داخل سیال ایجاد می‌شود، به عبارتی معرف نیروهای داخلی سیال هستند.  $-\nabla P$  نیروی ایجاد شده ناشی از تفاوت فشار در سیال را نشان می‌دهد، به معنای دیگر چگونگی جریان سیال را از مناطق با فشار بالا به مناطق با فشار پایین توصیف می‌کند.  $D(v)$  تانسور نرخ کرنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D(v) = \frac{1}{2} \left( \nabla v + (\nabla v)^T \right)$$



$D(v)$  نشان دهنده نرخ تغییر شکل در هنگام اعمال تنش می‌باشد. این نرخ هنگامی که سیال نیوتنی باشد، خطی و وقتی سیال غیرنیوتنی است، غیرخطی می‌باشد. علاوه بر این  $\mu$  میزان اصطکاک داخلی سیال است. بنابراین عبارت کامل  $\nabla \cdot (2\mu D(v))$  توضیحی از رفتار پیچیده احتمالاتی سیال در هنگام تغییر شکل است.

معادله (۳-۱)، معادله پیوستگی جرم و هم چنین توضیحی از بقاء جرم است. بقاء جرم برای توصیف کامل جریان سیال لازم می‌باشد. این معادله برای سیالات تراکم‌پذیر است و چگونگی تراکم یا انبساط سیال را برای حفظ جرم کل سیال توصیف می‌کند. با فرض این که سیال متراکم یا منبسط نمی‌شود و چگالی سیال ثابت است، سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و معادله پیوستگی به صورت  $\nabla \cdot v = 0$  بیان می‌شود. علاوه بر این سیال نیوتنی فرض شده که در این صورت تانسور نرخ کرنش تبدیل به یک عملگر ساده می‌شود. در نتیجه معادلات کامل ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر سیال نیوتنی به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (3-3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + f \quad (3-4)$$

### ۳-۵- مدل ریاضی بهمن

همانگونه که در فصل ۲ اشاره شد، در حین پیشروی جریان متراکم برف، هوا وارد آن شده و بهمن را تبدیل به بهمن پودری می‌کند و در بعضی موارد فاز میان این دو را بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف احاطه شده در نظر می‌گیرند. این گونه جریان‌ها که رفتارشان با دو سیال متفاوت بیان می‌شود به جریان‌های دو فازی مشهور هستند. مدل‌های ریاضی که به شبیه‌سازی دو فازی برای بهمن‌ها اعمال می‌شوند، اطلاعات کامل‌تری از ساختار جریان را نشان می‌دهند.

در معادلات ناویر- استوکس که در بخش قبلی آمده است، پیدا کردن راه حلی برای میدان سرعت یک فازی کار دشواری است. در جریان‌های دو فازی نیز باید برای هر یک از سیال‌ها، میدان سرعت جداگانه به دست آورد که این منجر به افزایش محاسبات شبیه‌سازی می‌شود. به همین دلیل فرض شده است که جریان‌های دو فازی دارای سرعت یکسانی هستند.

Dutykh و همکاران مدل دو فازی تک سرعتی برای شبیه‌سازی بهمن‌ها ارائه دادند [۴]. مدل آن‌ها به جریان دو فازی در مجاورت سطح مشترک برف و هوا، اجازه مخلوط شدن هوا در جریان برف را می‌دهد که این باعث تکامل ابر پودری می‌شود.

مدل ریاضی مشابه آنچه در بخش قبلی ارائه شده است، با معادلات ناویر- استوکس در شکل کلاسیک، آغاز می‌شود

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla u \cdot u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (2\mu D(u)) + f$$

که می‌توان نتیجه زیر را نیز گرفت:

$$\nabla \cdot u = -k \nabla^2 \log \rho$$

که  $k$  معرف ضریب نفوذپذیری است. این سه معادله، معادلات حاکم دو فازی کل ناحیه محاسباتی را ارائه می‌کنند. این معادلات هم‌چنین جریان سیال تراکم‌پذیر را بیان می‌کنند که با بازنویسی این عبارات‌های مدل دو فازی تک سرعتی، سیستم معادلات سیال تراکم‌ناپذیر حاصل خواهد شد که برای حل عددی ساده‌تر هستند.

متغیر تک سرعتی حاکم بر کل سیستم دو فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v \equiv u + k \log \rho$$

که سرعت حجمی سیال نامیده می‌شود. با استفاده از این متغیر جدید، معادلات حاکم دوباره نوشته می‌شود.

$$\nabla \cdot v = 0$$

در شرایط تراکم‌ناپذیری، همراه با فرض سیال نیوتنی، معادلات بقاء جرم و بقای اندازه حرکت در شرایط سرعت جدید دوباره نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho = k \nabla^2 \rho \quad (5-3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v \right) + \nabla P + k \nabla (v \cdot \nabla \rho) - k (v \cdot \nabla \rho) \frac{\nabla \rho}{\rho} + k^2 \frac{\nabla \rho}{\rho} \nabla^2 \rho - k^2 \nabla^2 \nabla \rho - k \rho (\nabla \log \rho \cdot \nabla) v + k \rho (v \cdot \nabla) \nabla \log \rho + k^2 \rho (\nabla \log \rho \cdot \nabla) \nabla \log \rho = \rho g + \nabla \cdot (2\mu D(v)) - k \nabla \cdot (2\mu \nabla \nabla \log \rho) \quad (6-3)$$

عبارت پراکندگی در معادله بقاء جرم (5-3) از قوانین حاکم بر جریان دو فازی می‌آید. معادله بقاء اندازه حرکت (6-3) به راحتی در مدل ارائه شده توسط Dutykh و همکاران [4] ساده شده است و مجموعه نهایی معادلات حاکم در شکل لاگرانژی به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (7-3)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 2\bar{v} \nabla^2 \rho \quad (8-3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla \pi + 2\bar{v} \nabla v \nabla \rho = \rho g + \nabla \cdot (2\mu D(v)) \quad (9-3)$$

که  $\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v$  و ضریب نفوذپذیری به صورت  $k = 2\bar{v}$  تنظیم شده است.  $\pi$  تعریف جدیدی از فشار سیال است:

$$\pi = P + 4\bar{v}\mu_0\nabla^2 \log \rho$$

که P با معادله‌ای به وسیله چگالی مخلوط  $\rho$  محاسبه می‌شود (در بخش ۴-۲-۱ توضیح داده شده است). بقیه متغیرها مقادیری هستند که خواص فیزیکی سیال مخلوط را در هنگام نفوذ هوا و برف به جریان برف نشان می‌دهند.

Dutykh و همکاران مفهوم کسر حجمی را در بهمن پودری ارائه دادند [۴]. هنگامی که جریان دو فازی در نظر گرفته می‌شود، کسر حجمی سیال، کسری از کل حجم اشغال شده توسط سیال سنگین‌تر است. در مورد بهمن‌های پودری، دو سیال برف و هوا در جریان وجود دارد. اگر کسر حجمی اشغال شده توسط برف  $\phi \in [0, 1]$  در نظر گرفته شود، کسر حجمی هوا  $(1 - \phi)$  می‌شود. با فرض چگالی‌ها و ویسکوزیته سینماتیکی ثابت برای برف و هوا، چگالی مخلوط  $\rho$  و ویسکوزیته دینامیکی مخلوط  $\mu$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$\rho = \phi\rho^+ + (1-\phi)\rho^- \quad (10-3)$$

$$\mu = \phi\rho^+v^+ + (1-\phi)\rho^-v^- \quad (11-3)$$

که  $\rho^\pm$  و  $v^\pm$  به ترتیب چگالی و ویسکوزیته سینماتیکی سیال سبک و سنگین هستند. ویسکوزیته دینامیکی مخلوط ممکن است بر حسب  $\rho$  بیان شود به صورت [۴]:

$$\mu = \mu_0 + \bar{v}\rho \quad (12-3)$$

که  $\mu_0$  و  $\bar{v}$  به ترتیب چگالی‌ها و ویسکوزیته سینماتیکی دو سیال به شرح زیر هستند:

$$\mu_0 = \frac{v^-\rho^-\rho^+ - v^+\rho^+\rho^-}{\rho^+ - \rho^-}$$

$$\bar{v} = \frac{v^+\rho^+ - v^-\rho^-}{\rho^+ - \rho^-}$$

## فصل چهارم

### روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

## ۴- روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

### ۴-۱- روش هیدرودینامیک ذرات هموار

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) روش لاگرانژی بدون شبکه است که اولین بار برای حل مسائل اختر فیزیک [۳۸، ۳۹] مورد استفاده قرار گرفته است. از آن زمان به بعد از این روش برای شبیه‌سازی مدل‌های بسیاری، از جمله حرکت‌های سیال و مسائل سطح آزاد استفاده شده است [۴۰]. روش SPH، معادلات حرکت سیال‌ها را با تبدیل کردن سیال به مجموعه‌ای از ذرات حل می‌کند و هر ذره مکان، سرعت و جرم خاص خود را دارد.

SPH از درون‌یابی به عنوان تکنیک عددی برای تقریب خواص فیزیکی موجود در سیال استفاده می‌کند. درون‌یابی به معنی پیدا کردن مقادیر تقریبی برای تابع ناشناخته  $f$  بر اساس مقادیر  $f$  در نقاط مختلف است.

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x-x') dx' \quad (1-4)$$

که  $f(x)$  تابع بردار مکان  $x$  است و هر نقطه در  $\Omega$  (کل ناحیه) می‌تواند باشد.  $\delta(x-x')$  تابع دلتای دیراک است که دارای دو خاصیت زیر است:

$$\delta(x-x') = \begin{cases} \infty & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-x') dx = 1$$

هنگامی که اتحاد (۱-۴) دقیق باشد، تابع دلتای دیراک واقعاً یک تابع متغیر ریاضی نیست. بنابراین برای ایجاد مدل‌های عددی به جای تابع دلتای دیراک از تابع هموار کرنل که تابع هموار نیز نامیده می‌شود، استفاده می‌شود. تقریب کرنل  $f(x)$  به صورت زیر می‌باشد:

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

که  $h$  طول هموار، ناحیه موثر اطراف ذره  $x$  که در تقریب  $f(x)$  استفاده شده، نامیده می‌شود. تابع

هموار کرنل دارای دو شرط زیر است:

$$\int_{\Omega} W(x-x', h) dx' = 1 \quad (2-4)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x') \quad (3-4)$$

و هم چنین  $W(x-x', h) = 0$  هنگامی که  $|x-x'| > h$ . معادله (2-4)، شرط نرمال شده می‌باشد و اطمینان حاصل می‌کند که  $\langle f(x_i) \rangle$  به درستی مقیاس شده است. معادله (3-4) خاصیت تابع دلتا است و نشان می‌دهد که وقتی طول هموار به سمت صفر می‌رود  $W$  نزدیک  $\delta$  شده و  $\langle f(x_i) \rangle$  نزدیک مقدار صحیح خود می‌شود.

این روش درون‌یابی یک روش عددی کلی برای تقریب مقدار تابع از مقادیر اطراف است. به منظور

اعمال این تقریب به مقادیر سیال، چگالی در انتگرال تقریبی گنجانده می‌شود بصورت

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

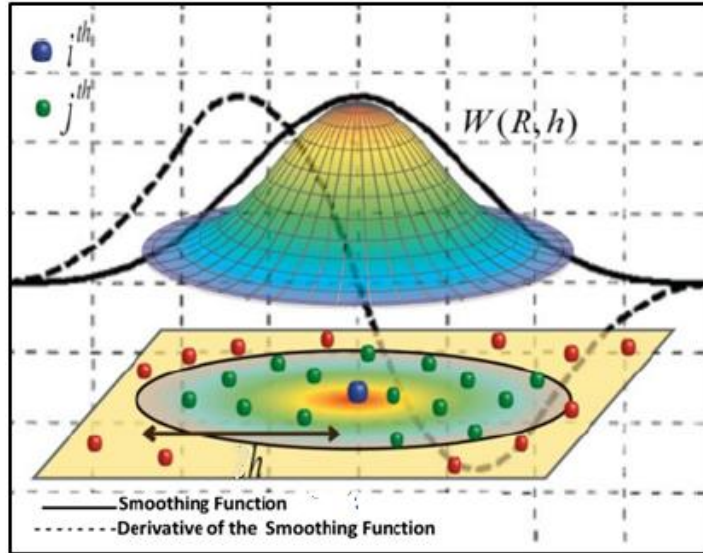
سپس با مشخص کردن حجم سیال با تعداد محدودی ذره و دانستن این نکته که انتگرال چگالی

در ناحیه  $\Omega$  برابر جرم سیال است ( $m = \int_{\Omega} \rho(x') dx'$ )، معادله (4-4) تبدیل به جمع تابع در ذرات

همسایه می‌شود بصورت

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} W(x_i - x_j, h) \quad (5-4)$$

که  $N$  تعداد کل ذرات در ناحیه تحت تاثیر اطراف ذره  $x_i$ ،  $\rho_j$  چگالی ذره  $j$  و  $m_j$  جرم ذره  $j$  است. با معادله (۴-۵) می توان مقدار تابع در ذره را تقریب زد.



شکل (۴-۱) دایره‌ای به شعاع  $h$  که ناحیه تحت تاثیر ذره  $i$  است؛ خط پررنگ تابع کرنل و خطچین مشتق اول تابع کرنل

برای حل معادلات به روش SPH در ابتدا باید بدانیم که این روش چگونه به معادلات اعمال می‌شود. در ابتدا عملگر گرادیان  $\nabla(\ )$  به رابطه SPH اعمال شده و همین مطلب برای دیورژانس  $\nabla \cdot (\ )$ ، لاپلاس  $\nabla^2(\ )$  و کرل  $\nabla \times (\ )$  صادق است. عملگر گرادیان  $\nabla f(x)$  بصورت  $\frac{\partial}{\partial x} f(\ )$  تعریف می‌شود. اعمال این عملگر به رابطه SPH بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \langle f(x_i) \rangle &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \sum_j f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} W(x_i - x_j, h) \right] \\ &= \sum_j \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \right) W(x_i - x_j, h) + f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial}{\partial x_i} W(x_i - x_j, h) \right] \\ &= \sum_j \left[ 0 \times W(x_i - x_j, h) + f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial}{\partial x_i} W(x_i - x_j, h) \right] \\ &= \sum_j f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial}{\partial x_i} W(x_i - x_j, h) \end{aligned}$$



چون  $f(x_j)$  تابعی از  $x_i$  نیست پس عبارت  $\frac{\partial}{\partial x_i} f(x_j)$  برابر صفر است. پس این نتیجه بدست می-

آید که عملگر دیفرانسیلی در تابع  $f(x)$  تبدیل به عملگر دیفرانسیلی در تابع هموار  $W$  می‌شود. توابع زیر به ترتیب تقریب‌های از عملگرهای دیورژانس، لاپلاس و کرل به معادله (۳-۱۳) هستند:

$$\langle \nabla \cdot f(x_i) \rangle = \sum_j f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \cdot \nabla W(x_i - x_j, h)$$

$$\langle \nabla^2 f(x_i) \rangle = \sum_j f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \nabla^2 W(x_i - x_j, h)$$

$$\langle \nabla \times f(x_i) \rangle = \sum_j f(x_j) \frac{m_j}{\rho_j} \times \nabla W(x_i - x_j, h)$$

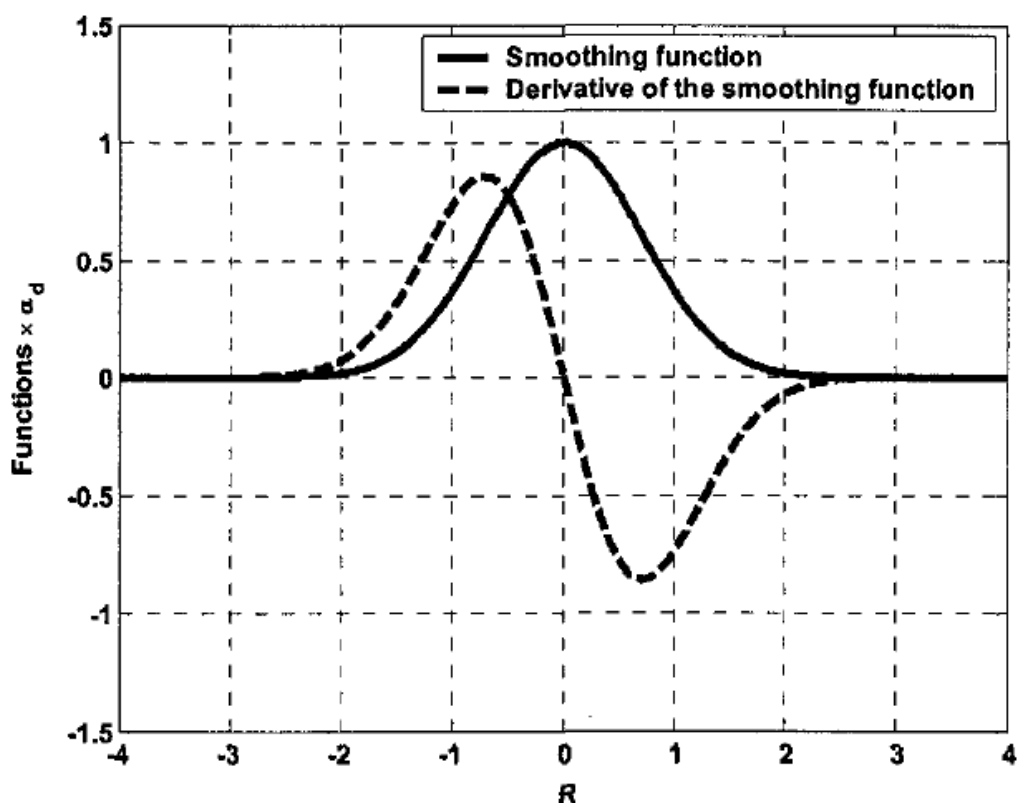
#### ۴-۱-۱- تابع هموار

توابع هموار نقش مهمی در تقریب SPH دارند و دقت و بازدهی محاسبات تابع SPH را تعیین می‌کنند. تحقیقات زیادی برای توابع هموار به منظور بهبود عملکرد SPH انجام شده است. در این بخش برخی از توابع کرنل ارائه خواهند شد. در ادامه  $x_{ij} = x_i - x_j$  و  $r = x_{ij}/h$  تعریف شده است.

Monaghan و Gingold کرنل گاوسی برای شبیه‌سازی ستاره‌های غیرکروی بصورت [۳۹]

$$W(x_{ij}, h) = \alpha e^{-r^2}$$

ارائه کردند که  $\alpha$  به ترتیب برابر  $1/(\pi^{1/2}h)$ ،  $1/(\pi h^2)$  و  $1/(\pi^{3/2}h^3)$  در فضای یک، دو و سه بعدی است (شکل ۴-۲). Monaghan این کرنل را به عنوان یک قانون طلایی SPH که بسیار پایدار و دقیق است، در نظر گرفت. با این حال این کرنل برای محاسبات بسیار سنگین و زمان‌بر است [۳۹].

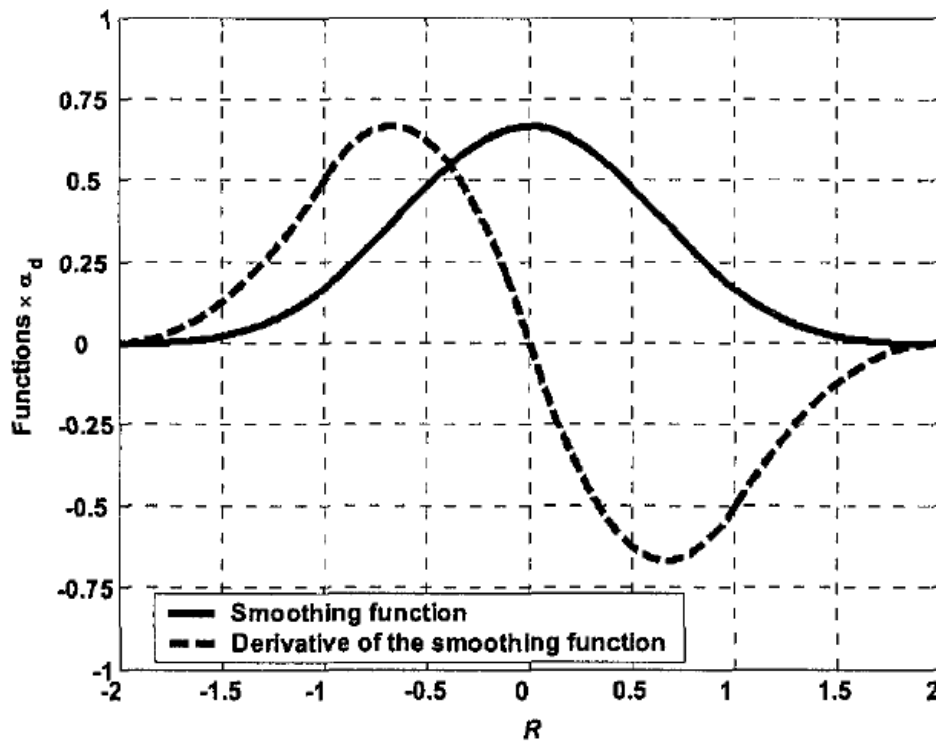


شکل (۲-۴) تابع هموار گاوسی ارائه شده توسط Monaghan و Gingold [۳۹]

Monaghan و Lattanzio تابع کرنل B-spline را بصورت [۴۱]

$$W(x_{ij}, h) = \alpha \begin{cases} \frac{2}{3} - r^2 - \frac{1}{2}r^3 & 0 \leq r \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2-r)^3 & 1 \leq r \leq 2 \\ 0 & r \geq 2 \end{cases}$$

ارائه کردند که  $\alpha$  به ترتیب برابر  $1/h$ ،  $15/(7\pi h^2)$  و  $3/(2\pi h^3)$  در فضای یک، دو و سه بعدی است (شکل ۳-۴). این تابع بسیار شبیه تابع گاوسی است اما مانند تابع گاوسی زمان بر نیست. مشکل این تابع در مشتق دوم آن است که تابعی هموار نیست در نتیجه شرایطی نامناسب برای شبیه‌سازی ایجاد می‌کند.



شکل (۳-۴) تابع هموار B-spline ارائه شده توسط Lattanzio و Monaghan [۴۱]

Morris، spline های مرتبه بالاتر از ۲ که خیلی نزدیک تابع گاوسی تقریب می‌زنند و باثبات‌تر

هستند را معرفی کردند [۴۲]. اولین quartic spline بصورت

$$W(x_{ij}, h) = \alpha \begin{cases} (r-2.5)^4 - 5(r+1.5)^4 + 10(r+0.5)^4 & 0 \leq r \leq 0.5 \\ (2.5-r)^4 - 5(1.5-r)^4 & 0.5 \leq r \leq 1.5 \\ (2.5-r)^4 & 1.5 \leq r \leq 2.5 \\ 0 & r \geq 2.5 \end{cases}$$

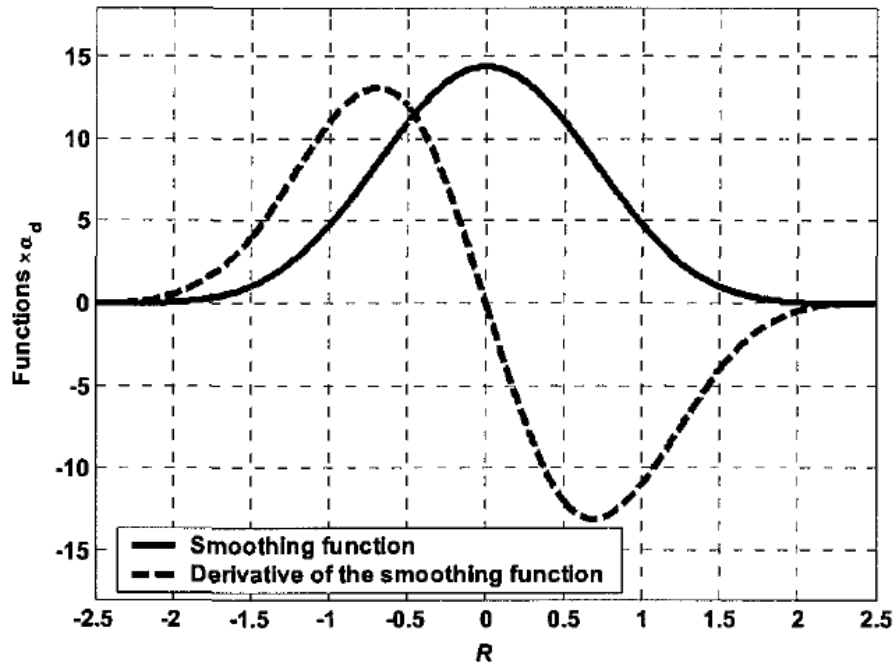
است که  $\alpha$  برابر  $1/24h$  تنها در فضای یک بعدی تعریف می‌شود (شکل ۴-۴). دومین quartic

spline

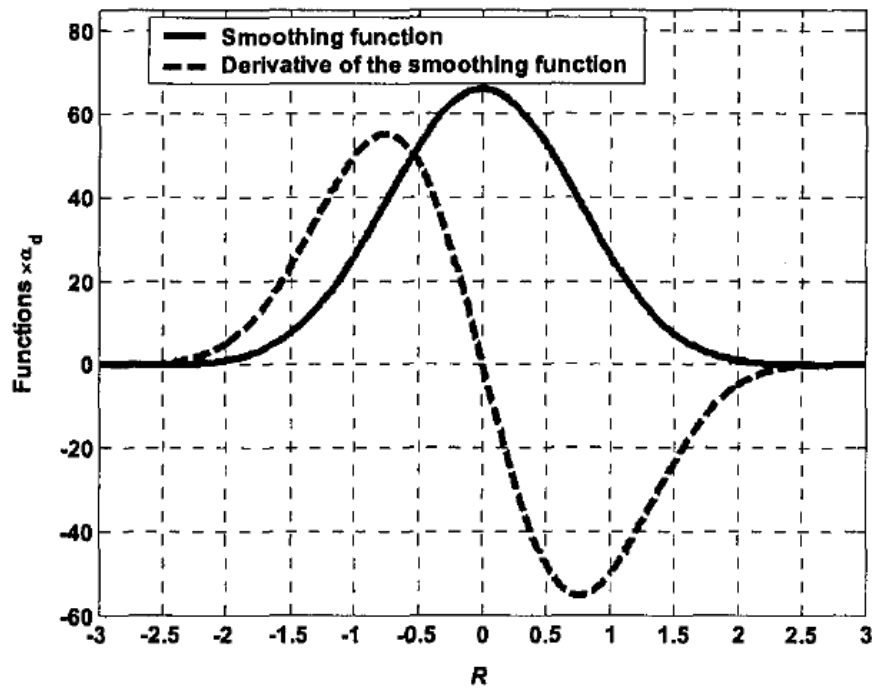
$$W(x_{ij}, h) = \alpha \begin{cases} (3-r)^5 - 6(2-r)^5 + 15(1-r)^5 & 0 \leq r \leq 1 \\ (3-r)^5 - 6(2-r)^5 & 1 \leq r \leq 2 \\ (3-r)^4 & 2 \leq r \leq 3 \\ 0 & r \geq 3 \end{cases}$$

تعریف می‌شود که  $\alpha$  به ترتیب برابر  $120/h$ ،  $7/(478\pi h^2)$  و  $3/(359\pi h^3)$  در فضای یک، دو و سه

بعدی است (شکل ۴-۵) [۴۲].



شکل (۴-۴) تابع هموار اولین quartic spline ارائه شده توسط Morris [۴۲]

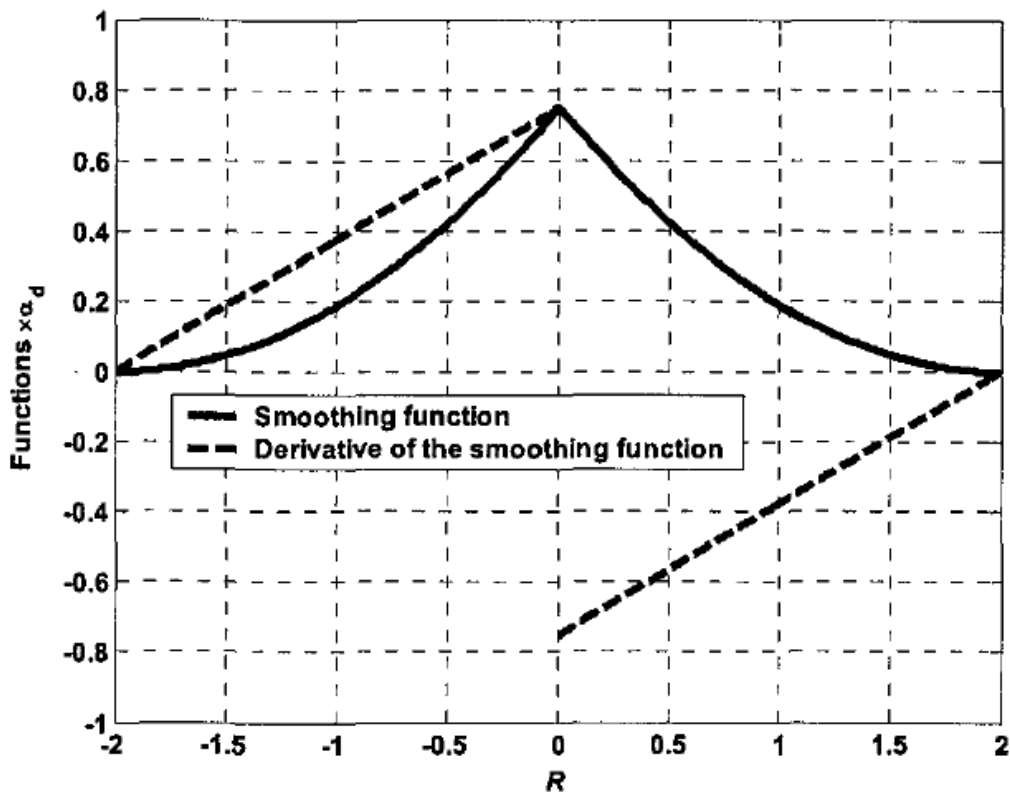


شکل (۴-۵) تابع هموار دومین quartic spline ارائه شده توسط Morris [۴۲]

Johnson و همکاران مشکل اثرات سرعت بالا را با استفاده از تابع هموار درجه دوم [۴۳]

$$W(x_{ij}, h) = \alpha \left( \frac{3}{16} r^2 - \frac{3}{4} r + \frac{3}{4} \right)$$

شبه‌سازی کردند که  $\alpha$  به ترتیب برابر  $1/h$ ،  $2/(\pi h^2)$  و  $5/(4\pi h^3)$  در فضای یک، دو و سه بعدی است (شکل ۴-۶). این تابع کرنل مشکلات بی‌ثباتی تابع B-spline را بهبود بخشیده و هم‌چنین مشتق آن وقتی ذرات نزدیک هم حرکت می‌کنند، افزایش می‌یابد و هنگامی که جدا از هم حرکت می‌کنند، کاهش می‌یابد [۴۳].



شکل (۴-۶) تابع هموار quartic ارائه شده توسط Johnson و همکاران [۴۳]

Liu و همکاران یک تابع هموار quartic که برای استفاده خیلی راحت است، ارائه کردند؛ در حالی

که رفتار آن بسیار مشابه B-spline مکعبی است [۴۴].

$$W(x_{ij}, h) = \alpha \begin{cases} \frac{2}{3} - \frac{9}{8}r^2 + \frac{19}{24}r^3 - \frac{5}{32}r^4 & 0 \leq r \leq 2 \\ 0 & r \geq 2 \end{cases}$$

که  $\alpha$  به ترتیب برابر  $1/h$ ،  $15/(7\pi h^2)$  و  $315/(208\pi h^3)$  در فضای یک، دو و سه بعدی است.

Muller و همکاران توابع هموار کرنل را برای شبیه‌سازی سیال مبتنی بر ذره با سطح آزاد بصورت

زیر طراحی کردند [۴۵]:

$$W_{poly}(x_{ij}, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - r^2)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & r \geq h \end{cases}$$

با این حال این کرنل برای محاسبه نیروی فشاری مناسب نیست زیرا گرادیان کرنل در مرکز

نزدیک صفر می‌شود، که به این معنی است که نیروی فشاری به صفر رسیده است. پس نیروها فشاری

محاسبه می‌شوند با تابع هموار [۴۵]

$$W_{spiky}(x_{ij}, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h-r)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & r \geq h \end{cases}$$

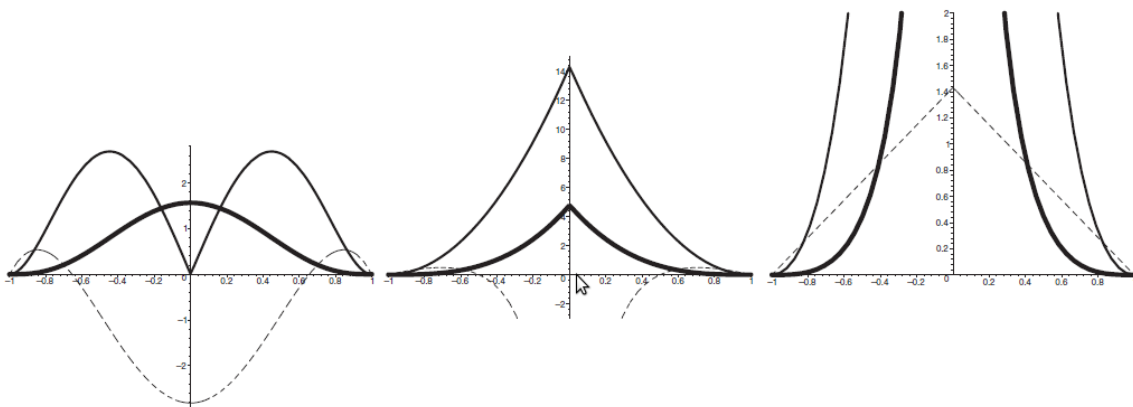
Muller و همکاران هم چنین یک کرنل اضافی برای محاسبه نیروی ویسکوزیته طراحی کردند

[۴۵]:

$$W_{viscosity}(x_{ij}, h) = \frac{15}{2\pi h^3} \begin{cases} -\frac{r^3}{2h^3} + \frac{r^2}{h^2} + \frac{h}{2r} - 1 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & r \geq h \end{cases}$$

این تابع در همه نقاط لاپلاس مثبت است که نتایج غلط افزایش سرعت را که در هنگام نزدیک

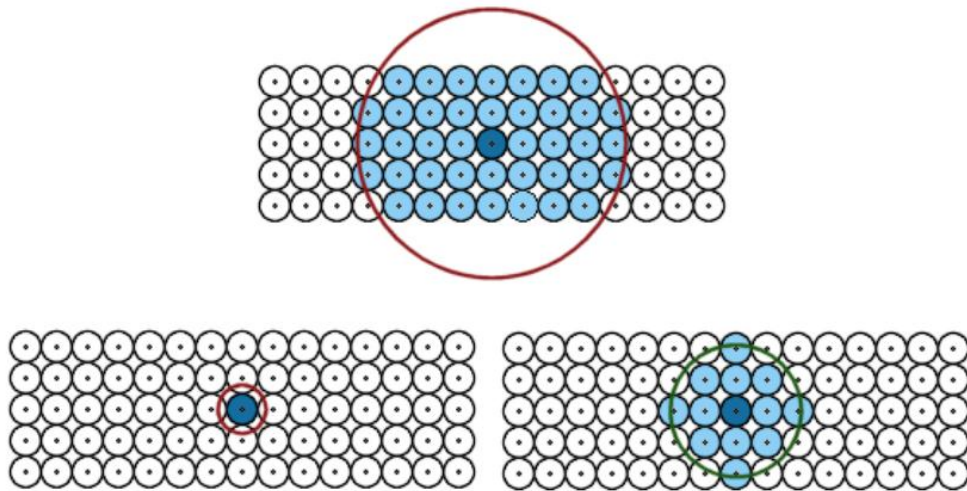
شدن دو ذره ایجاد می‌شود را از بین می‌برد.



شکل (۷-۴) توابع کرنل ارائه شده توسط Muller، به ترتیب از سمت راست  $W_{viscosity}$ ،  $W_{spiky}$  و  $W_{poly}$  است که خطوط باریک و خط چین به ترتیب گرادیان و لاپلاس را نشان می‌دهند [۴۵].

#### ۴-۱-۲- طول هموار

طول هموار، ناحیه‌ای اطراف ذره است که هر ذره در این ناحیه بر ذره موردنظر تاثیر می‌گذارد در حالی که ذرات خارج از این ناحیه دیگر اثری بر ذره موردنظر ندارند؛ به طور کلی می‌توان گفت، ناحیه‌ای اطراف ذره است که ذرات موجود در آن ناحیه تحت تاثیر تابع هموار می‌باشند. این طول تاثیر به سزایی در پایداری و استحکام شبیه‌سازی سیال‌ها دارد. ممکن است این‌گونه به نظر برسد که شعاع نفوذ بزرگ باعث ارزیابی دقیق سیال منجر خواهد شد. در صورتی که چنین نیست و شعاع نفوذ بزرگ در بعضی موارد منجر به وزن غیریکنواخت اطراف ذره می‌شود. شکل (۴-۸) درک بهتری از این که چگونه شعاع حمایت‌های مختلف ارزیابی سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهند، نشان می‌دهد. این شعاع می‌تواند مقدار متوسط ذراتی باشد که در هنگام محاسبه مقدار سیال از آن استفاده خواهد شد، پس باید بر اساس تعداد کل ذرات تعیین شود.



شکل (۸-۴) طول هموار برای تابع تقریب کرنل. (a) شعاع پشتیبانی بزرگ توزیع وزنی خوبی برای اطراف ذره ندارد. (b) شعاع پشتیبانی کوچک داده‌های کافی برای تاثیر ذرات اطراف بدست نمی‌دهد. (c) شعاع پشتیبانی مناسب در هنگام ارزیابی مقادیر سیال مهم است [۴۶].

## ۴-۲- روابط SPH معادلات بهمن

معادلات حاکم توصیف کننده حرکت‌های بهمن پودری شامل سه معادله است (معادلات (۷-۳) تا (۹-۳))، همان طور که مشاهده می‌شود همه آن‌ها وابسته به چگالی هستند. پس مقدار چگالی ذره در روش SPH محاسبه می‌شود به صورت:

$$\rho_i = \sum_j m_j W(x_{ij}, h)$$

## ۴-۲-۱- شرط تراکم‌ناپذیری

$$\nabla \cdot v = 0$$

شرط تراکم‌ناپذیری توضیحی از چگونگی رفتار سیال به جای استفاده از معادله ساختاری مرتبط با مقادیر سیال است. معنی فیزیکی دیورژانس  $\nabla \cdot v = 0$  این است که تعادل جریان ورودی و خروجی برای المان حجمی معلوم در هر زمان صفر است. به طور خاص، نیروهای نشات گرفته از اختلاف فشار در سیال باید متعادل شود.



استراتژی های مختلفی برای به اجرا درآوردن تراکم‌ناپذیری در شبیه‌سازی سیال مبتنی بر ذرات استفاده شده است. SPH تراکم‌ناپذیر<sup>۱</sup> (ISPH) روشی برای مدلسازی سیال تراکم‌ناپذیر است که اولین بار با روش‌های اویلری معرفی شده است [۴۷]. این روش‌ها دارای گام‌های زمانی طولانی در شبیه‌سازی سیال‌ها هستند اما الگوریتم‌های تکرارشونده موردنیاز برای حل معادلات بسیار زمان‌بر است که این منجر به انجام محاسباتی طولانی در هر گام زمانی می‌شود.

Solenthaler و همکاران روش اجرای تراکم‌ناپذیری را با استفاده از روش اصلاح پیش‌بینی محلی برای تعیین فشار ذرات معرفی کردند [۴۸]. روش آن‌ها شامل حلقه‌های همگرایی متشکل از پیش‌بینی سرعت و چگالی در هر گام زمانی می‌باشد. با این که این روش، محاسباتی کمتر نسبت به ISPH دارد اما هنوز دارای گام‌های زمانی طولانی می‌باشد.

در مدل SPH استاندارد، فشار از معادله حرکت<sup>۲</sup> (EOS) یا دقیق‌تر از قانون ایده‌آل گازها محاسبه می‌شود.

$$PV=nRT \quad (۴-۶)$$

که P فشار، v حجم در واحد جرم، n تعداد ذرات گاز در مول، R ثابت گاز و T دما است. جرم و دما ثابت در نظر گرفته شده‌اند، پس سمت راست معادله (۴-۶) ثابت است؛ در نتیجه

$$PV = nRT \rightarrow P\left(\frac{1}{\rho}\right) = k \rightarrow P = k\rho$$

که k ثابت سختی گاز می‌باشد. این معادله رفتار تراکم‌پذیر سیال را نشان می‌دهد. Desbrun و همکاران فشار را بصورت تراکم‌پذیری ضعیفی بصورت [۴۹]

$$P = k(\rho - \rho_0)$$

---

<sup>۱</sup> Incompressible SPH

<sup>۲</sup> Equation Of State

ارائه دادند که  $\rho_0$  چگالی ساکن سیال است.

SPH ضعیف تراکم‌یافته<sup>۱</sup> (WCSPH)، به EOS که مقدار تراکم‌پذیری اتفاق افتاده در سیال را

محدود می‌کند، اعمال می‌شود [۵۰]. در نتیجه فشار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{k\rho_0}{\gamma} \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right)$$

که  $k$  پارامتر سختی و  $\rho_0$  چگالی مرجع<sup>۲</sup> (چگالی در حالت سکون) است.  $\gamma$  شاخص عایق گرما<sup>۳</sup>، مقدار نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت است و به طور تجربی تعیین می‌شود (معمولاً  $\gamma$  می‌باشد). SPH ضعیف تراکم‌یافته برای تقریب جریان سیال تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود که به محاسبات کافی بدون کاهش شبیه‌سازی در مقدار بزرگ منجر می‌شود. در نتیجه انتخابی مناسب برای شبیه‌سازی بهمن پودری می‌باشد.

## ۴-۲-۲- شرط بقای جرم

$$\frac{D\rho}{Dt} = 2\bar{v}\nabla^2\rho$$

معادله بقای جرم شرحی از چگونگی تغییر چگالی سیال با جریان سیال است. این رابطه در معادلات

ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر (معادلات (۳-۱) و (۳-۴)) به دلیل شرایط تراکم‌ناپذیری حذف شده است

اما در مدل توصیف‌کننده بهمن، تغییر چگالی به عنوان کنترل‌کننده جریان مخلوط توسط قانون

فیک دوباره آمده است. این رابطه با تقریب‌های SPH بیان می‌شود به صورت [۲۷]

$$\langle 2\bar{v}\nabla^2\rho \rangle = 2\bar{v}\rho \left[ \sum_j m_j \left( \frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_j} \right) \nabla^2 W(x_i - x_j, h) \right]$$

<sup>۱</sup> Weakly compressible SPH

<sup>۲</sup> reference density

<sup>۳</sup> adiabatic index

#### ۴-۲-۳- شرط بقای اندازه حرکت

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla \pi + 2\bar{v} (\nabla v)^T \nabla \rho - 2\bar{v} \nabla v \nabla \rho = \rho g + \mu \nabla^2 v$$

معادله بقای اندازه حرکت، حرکت واقعی ذرات را کنترل می‌کند که به شتاب هر ذره که توسط نیروهایی که به آن وارد می‌شود، مرتبط است. با قرار دادن  $\pi = P + 4\bar{v} \mu_0 \nabla^2 \log \rho$  در معادله بقاء اندازه حرکت، معادله بصورت [۲۷]

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla P + 2\bar{v} (\nabla v)^T \nabla \rho - 2\bar{v} \nabla v \nabla \rho = \rho g + \mu \nabla^2 v - 4\bar{v} \mu_0 \nabla \nabla^2 \log \rho$$

می‌شود که عبارتی مشابه معادله ناویر- استوکس تراکم‌ناپذیر (معادله (۳-۴)) بدست می‌آید. که  $f = \rho g - 2\bar{v} (\nabla v)^T \nabla \rho + 2\bar{v} \nabla v \nabla \rho - 4\bar{v} \mu_0 \nabla \nabla^2 \log \rho$  نیروهای خارجی وارد بر حرکت‌های پیچیده  $\nabla P$  و  $\mu \nabla^2 v$  نیروهای داخلی جریان سیال هستند.

#### ۴-۲-۳-۱- نیروهای داخلی

در زیر دو تقریب SPH نیروی فشار  $-\nabla P$  و نیروی ویسکوزیته  $\mu \nabla^2 v$  آمده‌اند [۲۷]:

$$\langle -\nabla P \rangle = -\rho \left[ \sum_j m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(x_{ij}, h) \right]$$

$$\langle \mu \nabla^2 v \rangle = \mu \frac{1}{\rho} \left[ \sum_j m_j (v_i - v_j) \nabla^2 W(x_{ij}, h) \right]$$

#### ۴-۲-۳-۲- نیروهای خارجی

عبارت در ظاهر پیچیده ساخته شده برای نیروهای خارجی از فرآیند مخلوطی که بین برف و هوا در جریان بهمن پودری رخ می‌دهد، سرچشمه می‌گیرد. در عبارت  $\nabla \nabla^2 \log \rho$ ، ارزیابی  $\nabla^2 \log \rho$

لازم است قبل از محاسبه کل عبارت انجام شود. در زیر تقریب SPH برای نیروهای خارجی آمده

است، که در آنها  $\alpha = \nabla^2 \log \rho$  است [۲۷].

$$\langle \nabla \rho \rangle = \rho \left[ \sum_j m_j \left( \frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_j} \right) \nabla W(x_{ij}, h) \right]$$

$$\langle \nabla v \rangle = \frac{1}{\rho} \left[ \sum_j m_j (v_j - v_i) \otimes \nabla W(x_{ij}, h) \right]$$

$$\langle \nabla^2 \log \rho \rangle = \rho \left[ \sum_j m_j \left( \frac{\log \rho_i}{\rho_i^2} + \frac{\log \rho_j}{\rho_j^2} \right) \nabla^2 W(x_{ij}, h) \right]$$

$$\langle \nabla \alpha \rangle = \rho \left[ \sum_j m_j \left( \frac{\alpha_i}{\rho_i^2} + \frac{\alpha_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(x_{ij}, h) \right]$$

## فصل پنجم

### مدلسازی عددی بهمن با استفاده از SPH

## ۵- مدل‌سازی عددی بهمن با استفاده از SPH

### ۵-۱- مقدمه

در این بخش به مدل‌سازی عددی بهمن با استفاده از روش SPH و نرم‌افزار ABAQUS<sup>®</sup> پرداخته می‌شود. همان‌گونه که در فصل ۲ اشاره شد، بهمن‌ها را می‌توان از لحاظ نوع برف به سه دسته طبقه‌بندی کرد که عبارتند از: بهمن پودری، بهمن متراکم و بهمن پودری-متراکم. در این پژوهش، در ابتدا بهمن به صورت پودری و سپس با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف احاطه شده (بهمن پودری-متراکم)، در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر بهمن بر روی مسیری با شیب ۴۵ درجه‌ای قرار گرفته و با مدل مشابه ساخته شده در آزمایشگاه توسط Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] جهت حصول اطمینان از نتایج بدست آمده، مقایسه می‌شود.

### ۵-۲- روش تحقیق

در این بخش به بیان روش و نحوه مدل‌سازی و بارگذاری مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود. این مبحث شامل معرفی جزئیاتی از قبیل معرفی نرم‌افزار، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی و بارهای وارده می‌باشد.

### ۵-۲-۱- معرفی نرم افزار

نرم‌افزار Abaqus/CAE<sup>۱</sup> 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، شامل مسائل ساده تحلیل خطی تا مباحث پیچیده مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. اسم و نشان این نرم‌افزار از لغت abacus در زبان انگلیسی به معنای چرتکه و در زبان یونانی به معنای تخته پوشیده

---

<sup>۱</sup> Complete Abaqus Environment

شده با ماسه، الهام گرفته شده است.

این نرم‌افزار محصول شرکت فرانسوی داسو سیستمز<sup>۱</sup> می‌باشد. ایده اصلی این نرم‌افزار در تز دکترای دیوید هبیت در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان «مکانیک محاسباتی بر پایه روش اجزاء محدود» در دانشگاه براون ارائه شد. در سال ۱۹۷۸، آقای هبیت به همراه دو شرکت خود Karlsson و Sorenson شرکت HKS را تاسیس کردند و اولین ویرایش آباکوس را منتشر ساختند. در سال ۱۹۹۱ شرکت HKS تحلیل‌گر Abaqus/Explicit را هم به مجموعه نرم‌افزار اضافه کرد و نرم‌افزار اصلی خود را منتشر ساخت. سرانجام در سال ۱۹۹۹ اولین نسخه گرافیکی تحت عنوان Abaqus/CAE به بازار عرضه شد. اولین نسخه گرافیکی Abaqus/CAE 6.3 شامل ۹ ماژول برای مدل‌سازی، حل و استخراج نتایج بود. هر ساله این نرم‌افزار با بهبودهای فراوان و دقت نظر کارشناسان مورد بازبینی قرار گرفته و ارائه نسخه‌های متعدد آن به شکل منظم، با استقبال محققین و صنعت‌گران رو به رو شده است.

این نرم‌افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های رفتاری بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فوم‌های فبری و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل مسائل مکانیک جامدات (یعنی مسئله تنش- کرنش) نمی‌شود و می‌توان با استفاده از این نرم‌افزار مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، انتقال جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک، تراوش و... را مورد مطالعه قرار داد.

Abaqus/CAE دارای ظرفیت پیش پردازش، پس پردازش و مشاهده فرآیند تحلیلی که توسط تحلیل‌گر آن انجام می‌شود، می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار Abaqus/CAE 6.14-1 برای

---

<sup>۱</sup> Dassault Systèmes Société Anonyme

شبه‌سازی مدل‌های موردنظر استفاده می‌شود.

## ۵-۲-۲- پارامترهای مدل‌سازی

پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی بهمن و آب در جداول (۱-۵) و (۲-۵) آورده شده است.

جدول (۱-۵) پارامترهای مدل‌سازی بهمن [۳۵]

سیال سبک	سیال سنگین	
۱	۲۰	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$10^{-4}$	$4/8 \times 10^{-4}$	ویسکوزیته سینماتیکی، $\text{m}^2/\text{s}$
۰/۴		کسر حجمی

جدول (۲-۵) پارامترهای مدل‌سازی آب

آب	
۱۰۰۰	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$10^{-3}$	ویسکوزیته دینامیکی، $\text{kg.m/s}^2$

در این پژوهش فرض شده که هیچ برفی از سطح شیب‌دار وارد جریان بهمن نمی‌شود؛ همچنین با فرض نیوتنی بودن مخلوط، در مدل‌سازی بهمن پودری می‌توان با استفاده از روابط ارائه شده در فصل (۳) (معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱))، چگالی و ویسکوزیته دینامیکی مخلوط را بدست آورد که به ترتیب برابر  $8/6 \text{ kg/m}^3$  و  $39 \times 10^{-4} \text{ kg.m/s}$  در نظر گرفته می‌شوند. شایان ذکر است موانع استفاده شده در مدل‌سازی‌ها صلب فرض شده‌اند.

## ۵-۲-۳- بارگذاری

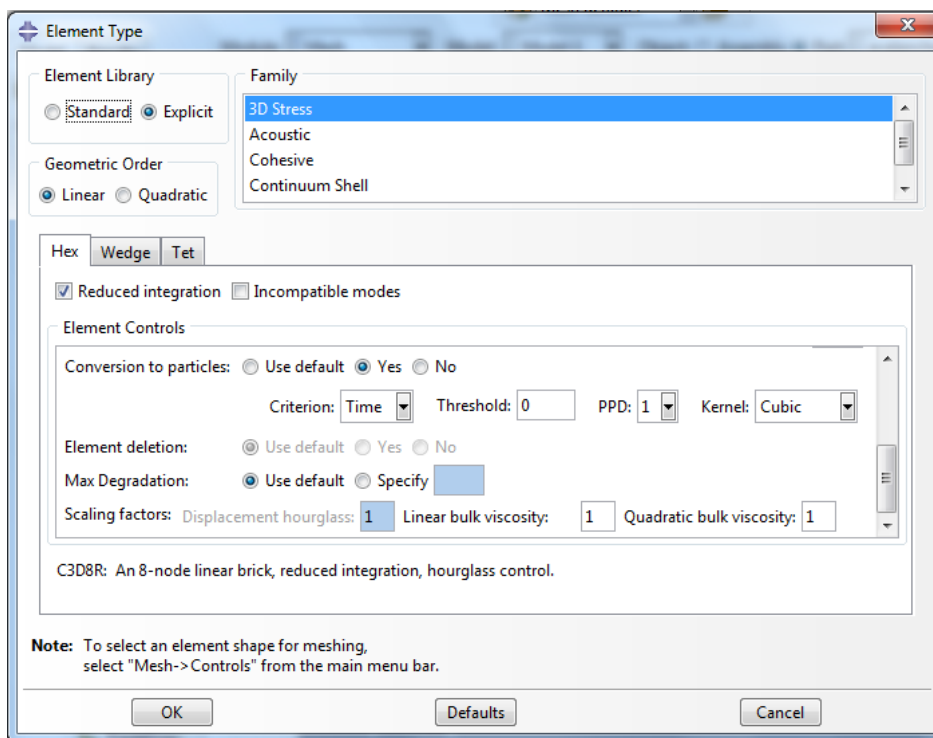
در این پژوهش دو نیرو بر جریان بهمن وارد می‌شود؛ نیروی اول، نیروی گرانش زمین ( $\text{m/s}^2$ )  $g=9/8$  می‌باشد که در خلاف جهت محور  $y$  به مدل وارد شده و تنها عامل حرکت بهمن بر روی



شیب است. نیروی دیگر، نیروی اصطکاکی است که در خلاف جهت حرکت بهمن بر روی شیب به آن اعمال می‌شود. به همین منظور، ضریب اصطکاک  $0/3$  برای همه مدلسازی‌ها در نظر گرفته شده است.

## ۵-۲-۴- روش SPH در نرم‌افزار

بعد از تعریف مصالح، انتخاب تحلیلگر مناسب (Dynamic, Explicit) و اعمال نیروها (قبل از ایجاد Job برای شروع حل)، لازم است جسم موردنظر (بهمن) المان‌بندی گردد. همانگونه که گفته شد، نرم‌افزار Abaqus/CAE بر پایه روش اجزاء محدود شکل گرفته است، اما در سال‌های اخیر با توجه به گسترش روش‌های بدون مش بخصوص روش SPH در حل مسائل، سازندگان نرم‌افزار قابلیت‌هایی را به آن افزوده‌اند، که امکان المان‌بندی اجسام به روش SPH در نرم‌افزار Abaqus/CAE فراهم شود. برای این منظور لازم است در ماژول Mesh، آیکن Assign Element Type را انتخاب کرده و همانند شکل (۵-۱)، گزینه Conversion to particles را از حالت Use default به Yes تغییر داد تا نرم‌افزار جسم موردنظر را با روش SPH المان‌بندی نماید.

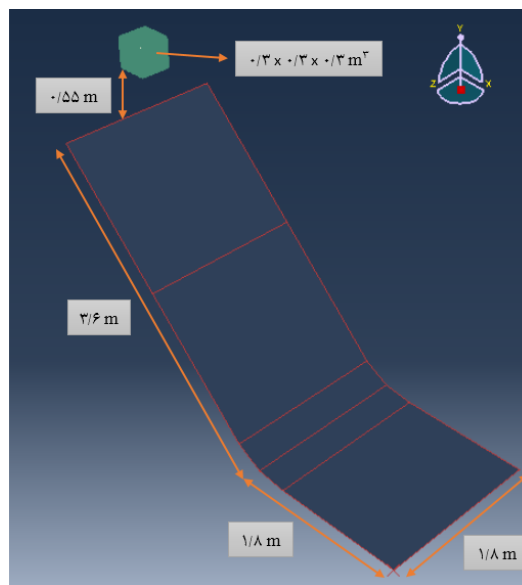


شکل (۵-۱) ابعاد و نحوه مش‌بندی شبکه المان‌ها در صفحه XZ

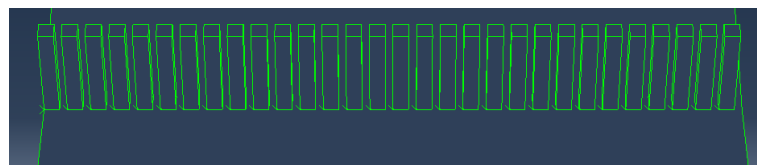
## ۵-۳- بهمن پودری

### ۵-۳-۱- صحت سنجی

در این بخش توده ای از بهمن پودری به ابعاد  $0.3 \times 0.3 \times 0.3$  m از فاصله  $0.55$  متری بر روی سطحی با شیب  $45^\circ$  درجه رها شده و پس از حرکت بر روی سطح شیبدار به موانعی که در پایین دست سطح طراحی شده‌اند، برخورد می‌کند. جهت حصول اطمینان از صحت فرضیات مدلسازی، نتایج بدست آمده، با تحقیقات انجام شده توسط Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] مقایسه می‌گردد. در شکل (۵-۲) سطح شیبدار و شکل موانع مختلف نشان داده شده است.



الف



ب



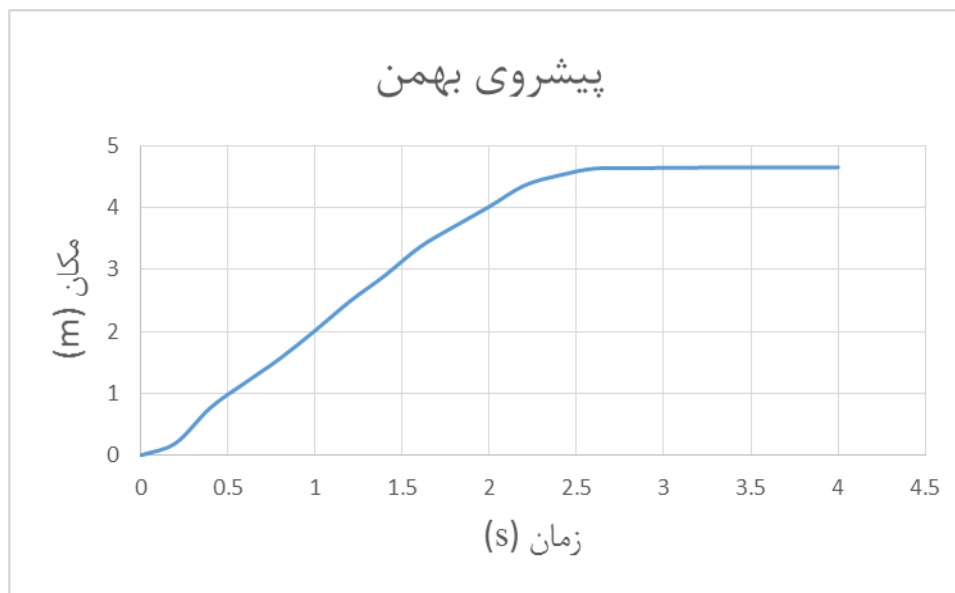
ج

شکل (۵-۲) الف) نمایی از مسیر شیبدار. ب) مانع هر  $2$  سانتی‌متر. ج) مانع هر  $4$  سانتی‌متر.

همانگونه که در فصل پیش اشاره شد، در روش SPH جسم بجای شبکه با مجموعه‌ای از ذرات مدل‌سازی می‌گردد. از این‌رو در این پژوهش، بهمن با استفاده از ۲۹۷۹۱ ذره (همانند مرجع [۱۶]) شبیه‌سازی می‌شود.

در مدل‌سازی حاضر، بهمن در اثر وزن خود سقوط کرده و بعد از  $0/3$  ثانیه به سطح شیب‌دار برخورد و سپس به حرکت خود بر روی سطح ادامه می‌دهد. این توده در مدت زمان ۲ ثانیه سطح شیب‌دار را طی کرده و سپس با شیب ملایمی از سرعت آن کاسته می‌شود تا نهایتاً سرعتش به صفر رسیده و ذرات آن به حالت سکون برسند.

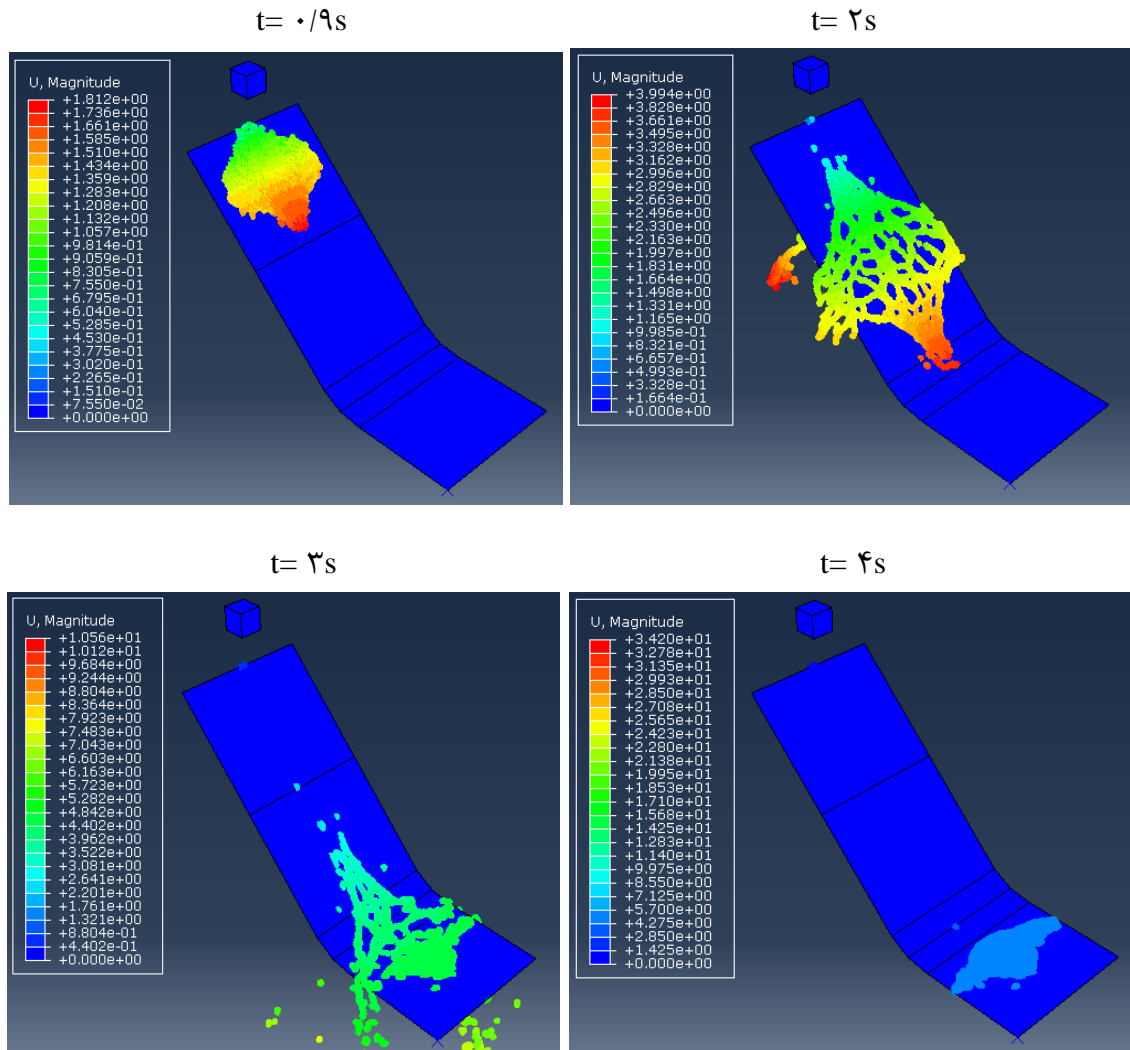
بر اساس نتایج بدست آمده، بهمن حداکثر پیشروی خود را بعد از  $2/5$  ثانیه انجام می‌دهد، با این حال مدت شبیه‌سازی ۴ ثانیه می‌باشد تا همه ذرات بهمن، مسیر مدل‌سازی را طی نموده و سرعتشان به صفر برسد. در شکل (۳-۵) نمودار مکان-زمان نشان داده شده است. در این حالت، حداکثر پیشروی بهمن برابر با  $4/65$  متر بدست آمده است.



شکل (۳-۵) نمودار مکان-زمان بهمن

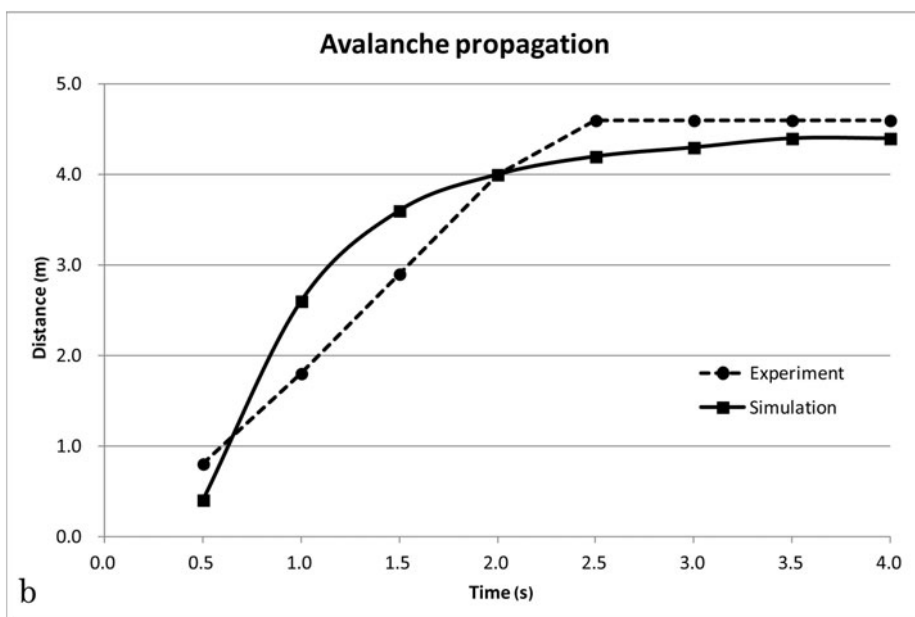
شکل (۴-۵) شکل و میزان پیشروی بهمن را در زمان‌های  $0/9$ ، ۲، ۳ و ۴ ثانیه نشان می‌دهد. بهمن بر

روی سطح شیب‌دار در زمان‌های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه به ترتیب محدوده بین ۰/۳ تا ۱/۸۱ متر، ۱/۵ تا ۴ متر، ۳ تا ۴/۶۵ متر و ۴/۲ تا ۴/۶۵ را در بر گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود، طرفین مسیر باز بوده و بخشی از ذرات بهمن از مسیر شیب‌دار خارج شده و به حرکت خود ادامه می‌دهند.



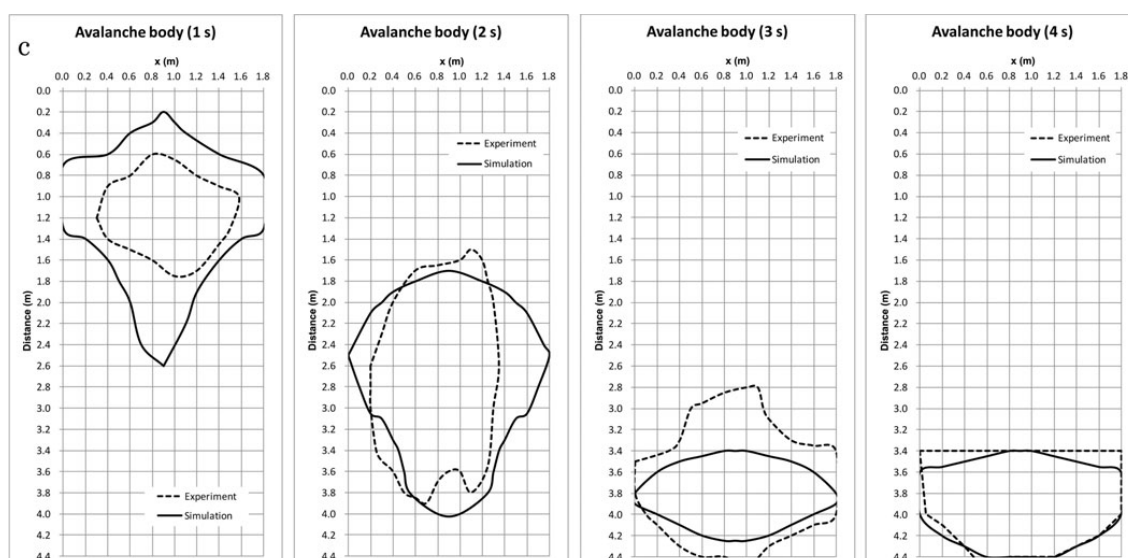
شکل (۴-۵) شکل حرکت بهمن در حالت بدون مانع در زمان‌های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه.

در شکل (۵-۵) می‌توان نمودار مکان- زمان برای دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی را که حاصل تحقیقات Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می‌باشد، مشاهده نمود. همانگونه که در این شکل نیز مشهود است، بهمن در آزمایشگاه بعد از ۲/۵ ثانیه و در مدلسازی بعد از ۳/۵ ثانیه به حداکثر پیشروی خود (به ترتیب برابر ۴/۶ و ۴/۴ متر) می‌رسد.



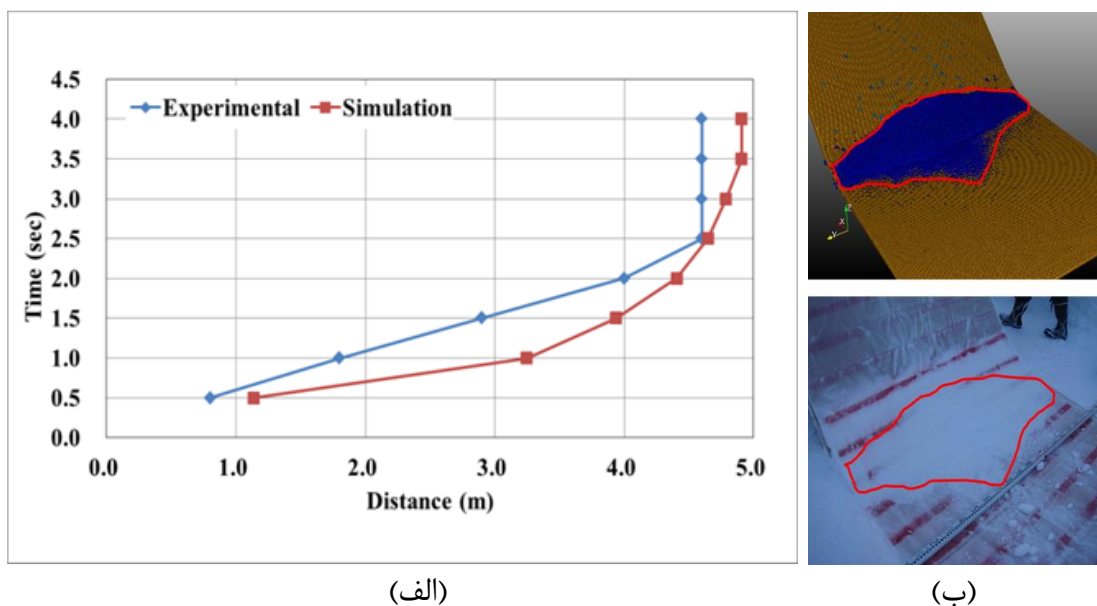
شکل (۵-۵) نمودار مکان- زمان بهمن [۳۶].

در شکل (۵-۶)، شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه که حاصل تحقیقات در شکل (۵-۶)، Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می‌باشد، نشان داده شده است. بهمن بر روی سطح شیب‌دار در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در آزمایشگاه به ترتیب محدوده بین ۰/۶ تا ۱/۷۹ متر، ۱/۵ تا ۳/۹ متر، ۲/۸ تا ۴/۶۵ متر و ۳/۴ تا ۴/۶ را در بر گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، ذرات بهمن پس از طی زمان ۴ ثانیه حرکتی نداشته و به حالت سکون رسیده‌اند.



شکل (۵-۶) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه. [۳۶]

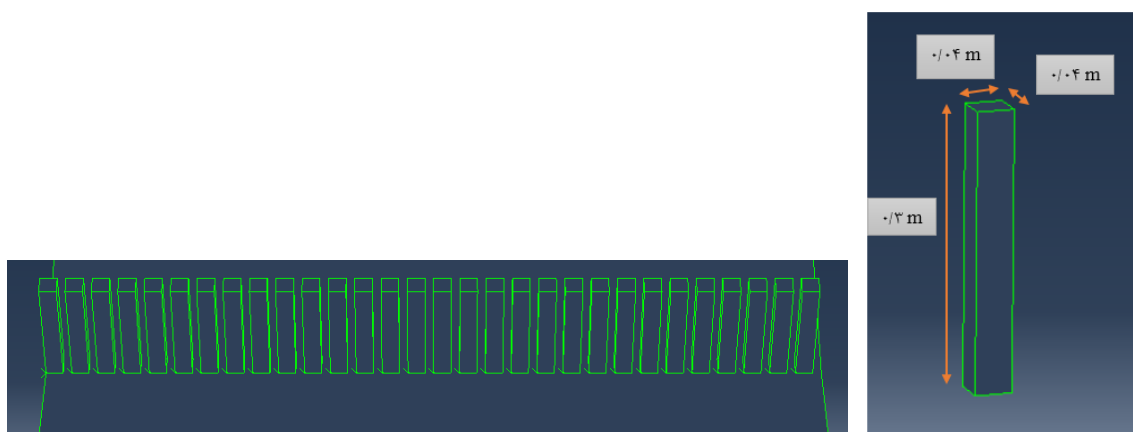
در شکل (۷-۵) نمودار مکان- زمان و حداکثر پیشروی بهمن در آزمایشگاه و مدلسازی، که بر اساس نتایج تحقیقات Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد، نشان داده شده است. آنها مشاهده کردند که بهمن در آزمایشگاه بعد از  $2/5$  ثانیه و در مدلسازی بعد از  $3/5$  ثانیه به حداکثر پیشروی خود می‌رسد که به ترتیب برابر با  $4/6$  و  $4/95$  متر است. در این تحقیق نیز مشاهده شده است که بعد از گذشت ۴ ثانیه همه ذرات بهمن دیگر حرکتی نداشته و سرعتشان صفر می‌باشد. هم‌چنین بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده کردند که نحوه قرارگیری ذرات بهمن در انتهای مسیر در آزمایشگاه و مدلسازی مطابقت خوبی با هم دارند.



شکل (۷-۵) الف) نمودار مکان- زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدلسازی و آزمایشگاه. [۱۶]

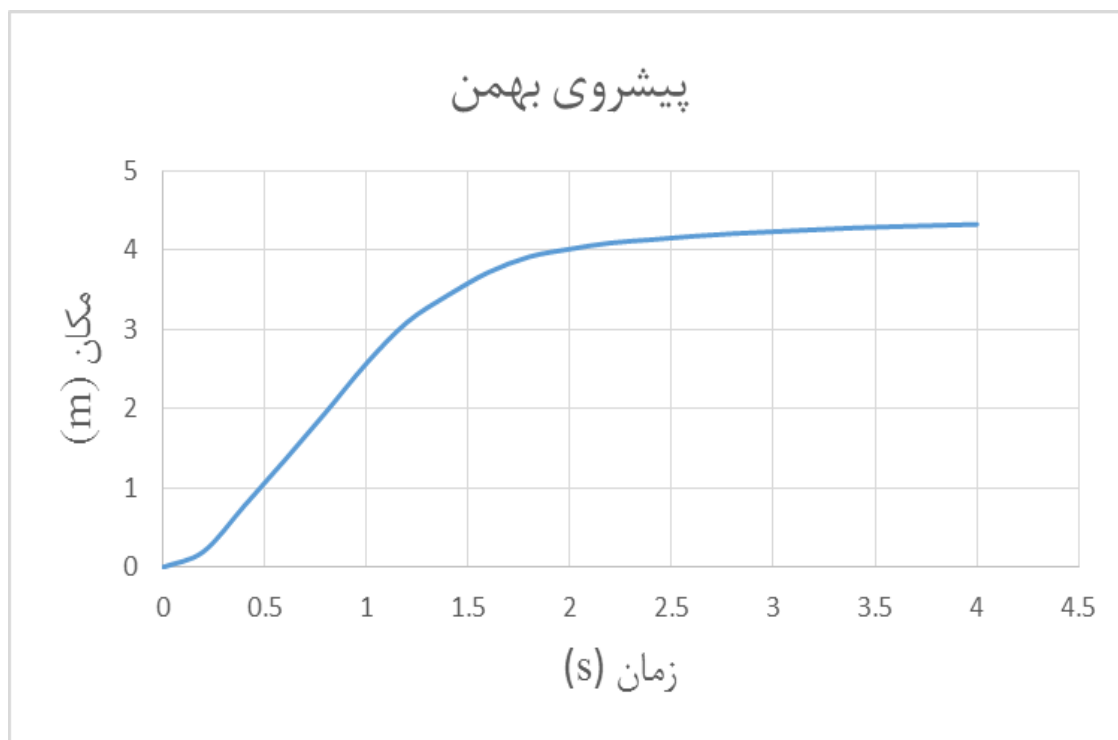
در پژوهش حاضر نیز، بهمن در مدت زمان  $2/5$  ثانیه به حداکثر میزان پیشروی که برابر  $4/65$  متر است، می‌رسد که مشابه تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد. هم‌چنین شکل حرکت بهمن بر روی سطح شیب‌دار در  $0/9$ ،  $2$ ،  $3$  و  $4$  ثانیه و شکل بهمن در انتهای مسیر به ترتیب مطابقت خوبی با کار انجام گرفته توسط Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] (شکل (۵-۶)) و Abdelrazek و همکاران [۱۶] (شکل (۷-۵) ب)) دارند.

در ادامه برای کاهش طول پیشروی بهمن، از موانع مختلف استفاده می‌شود (شکل (۵-۲-ب) و (۵-۲-ج)). در ابتدا مانع بصورت قطعات مجزا در فواصل ۲ سانتی‌متری از یکدیگر (موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر) در مدل قرار داده می‌شود که در شکل (۵-۸) نمای کلی مانع نشان داده شده است. همانگونه که مشهود است، بهمن از فاصله ۰/۵۵ متری نسبت به سطح شیب‌دار رها شده و پس از گذشت ۰/۳ ثانیه به سطح برخورد و سپس به حرکت خود بر روی سطح شیب‌دار ادامه می‌دهد. بعد از طی مسافت ۳/۳ متر، در زمان ۱/۶ ثانیه، بهمن به موانع برخورد می‌کند و به دلیل وجود فواصل ۲ سانتی‌متری در موانع، بهمن از این فواصل عبور کرده و به حرکت خود ادامه می‌دهد؛ قابل ذکر است که حجمی از بهمن نیز در پشت موانع متوقف می‌شود.



شکل (۵-۸) نمای کلی موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر.

در شکل (۵-۹) نمودار مکان- زمان نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بهمن حداکثر پیشروی خود را بعد از ۳ ثانیه طی می‌کند، با این حال مدت شبیه‌سازی ۴ ثانیه می‌باشد تا ذرات بهمنی که در پشت موانع قرار دارند به حالت پایدار رسیده و دیگر حرکتی نداشته باشند. حداکثر پیشروی بهمن در این حالت برابر با ۴/۲ متر می‌باشد.

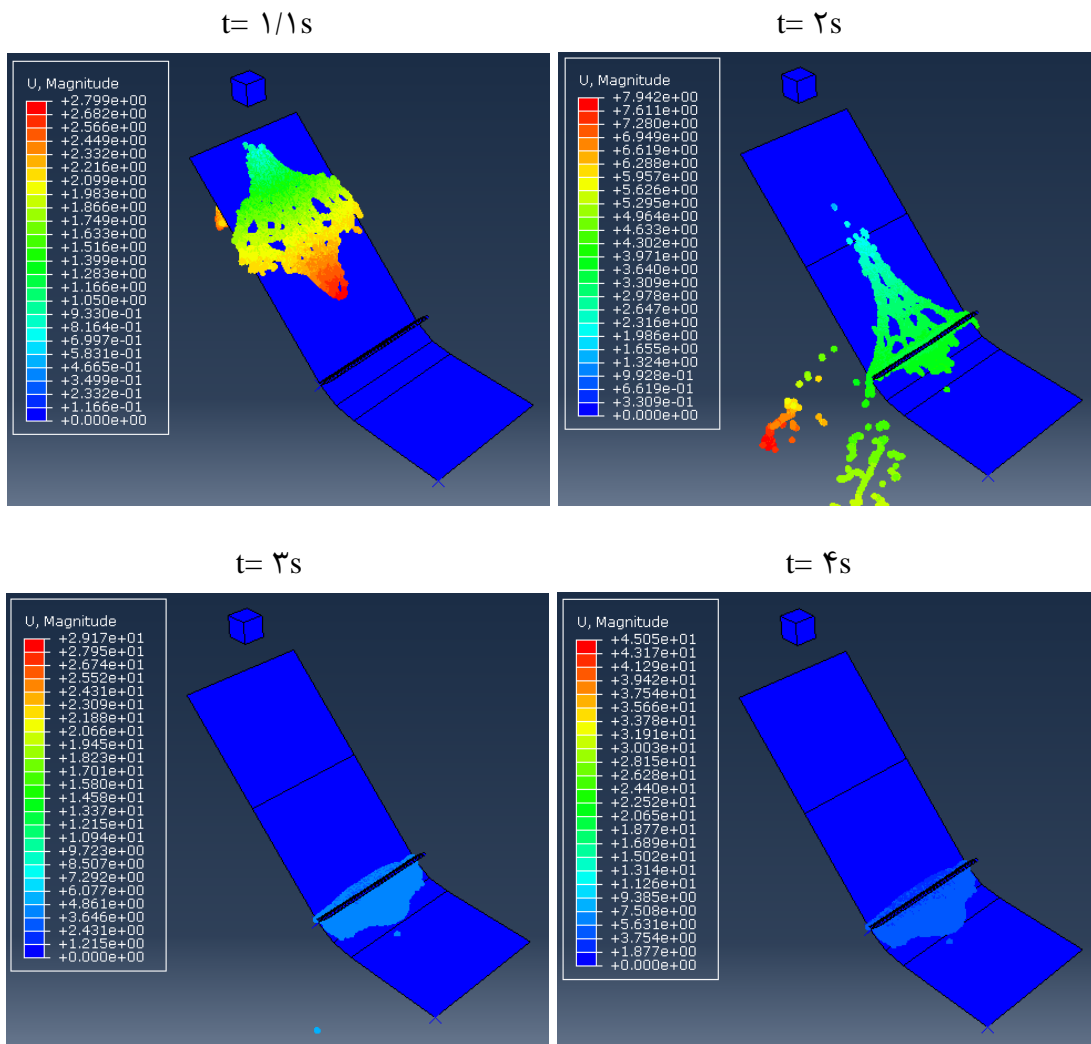


شکل (۵-۹) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر.

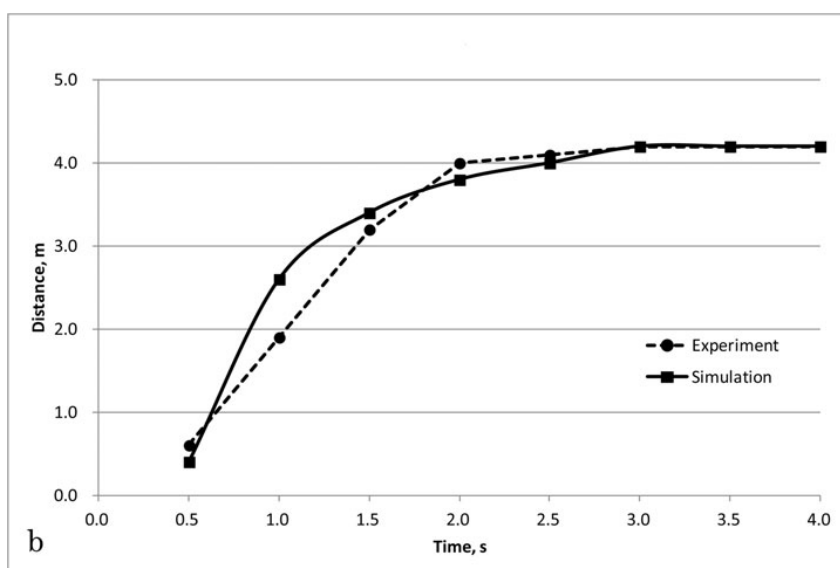
شکل (۵-۱۰) شکل و میزان پیشروی بهمن را در زمان‌های ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در حالت موانع در فواصل ۲ سانتی‌متر نشان می‌دهد. بهمن بر روی سطح شیب‌دار در زمان‌های ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه به ترتیب محدوده بین ۰/۶ تا ۲/۵۶ متر، ۱/۹۹ تا ۴/۱ متر، ۲/۹ تا ۴/۲ متر و ۳/۱ تا ۴/۲ را در بر گرفته است.

در شکل (۵-۱۱) می‌توان نمودار مکان- زمان برای دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی را که حاصل تحقیقات Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می‌باشد، مشاهده نمود. آنها مشاهده کردند که بهمن در آزمایشگاه و مدلسازی بعد از ۳ ثانیه به حداکثر پیشروی خود می‌رسد که برابر ۴/۲ متر بدست آمده است. همچنین بر اساس مشاهدات آنها، حجم توده بهمن متوقف شده در پشت موانع در نواحی میانی بیشتر از نواحی کناری می‌باشد.



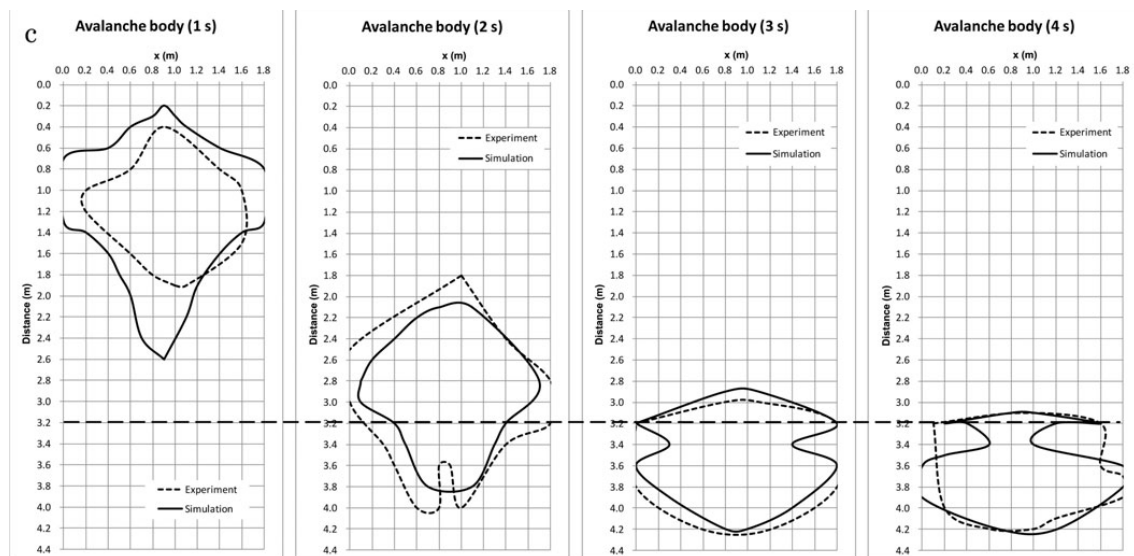


شکل (۱۰-۵) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر.



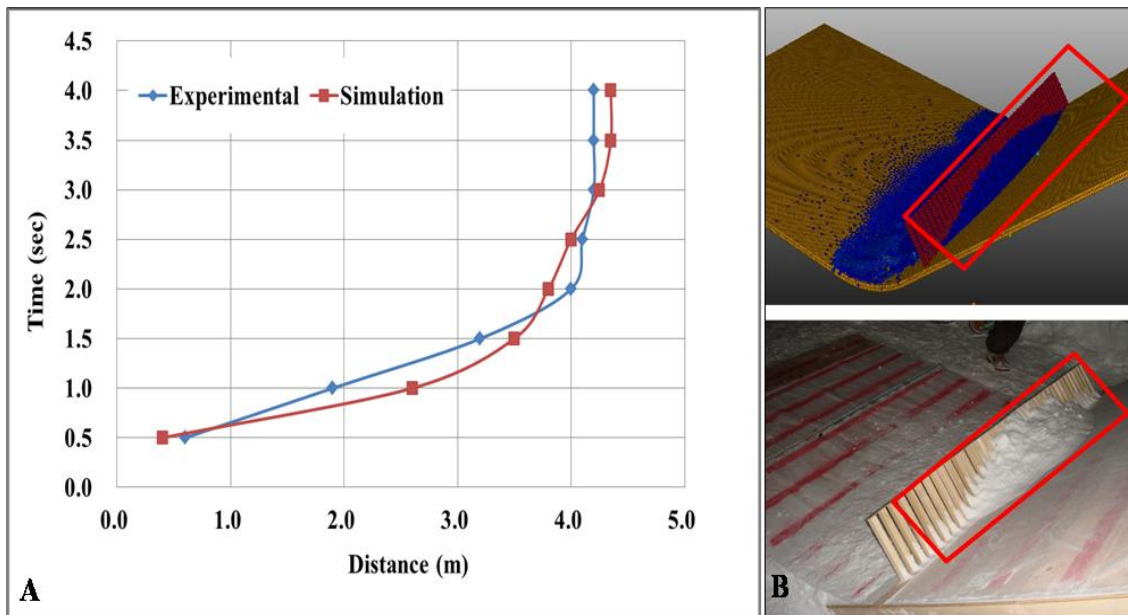
شکل (۱۱-۵) نمودار مکان-زمان بهمن [۳۶].

در شکل (۵-۱۲)، شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه که حاصل تحقیقات Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می‌باشد، نشان داده شده است. بهمن بر روی سطح شیب‌دار در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در آزمایشگاه به ترتیب محدوده بین ۰/۴ تا ۱/۷ متر، ۱/۸ تا ۴/۱ متر، ۲/۸ تا ۴/۲ متر و ۳/۱ تا ۴/۲ را در بر گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، ذرات بهمن پس از طی زمان ۴ ثانیه حرکتی نداشته و به حالت سکون رسیده‌اند.



شکل (۵-۱۲) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه. [۳۶]

در شکل (۵-۱۳) نمودار مکان-زمان و حداکثر پیشروی بهمن در آزمایشگاه و مدلسازی، که حاصل تحقیقات Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد، نشان داده شده است. آنها مشاهده کردند که بهمن در آزمایشگاه بعد از ۳ ثانیه و در مدلسازی بعد از ۳/۵ ثانیه به حداکثر پیشروی خود می‌رسد که به ترتیب برابر با ۴/۲ و ۴/۴ متر است. در این تحقیق نیز مشاهده شده است که بعد از گذشت ۴ ثانیه همه ذرات بهمن دیگر حرکتی نداشته و سرعتشان صفر می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده کردند که حجم توده بهمن متوقف شده در پشت موانع در نواحی میانی بیشتر از نواحی کناری می‌باشد.

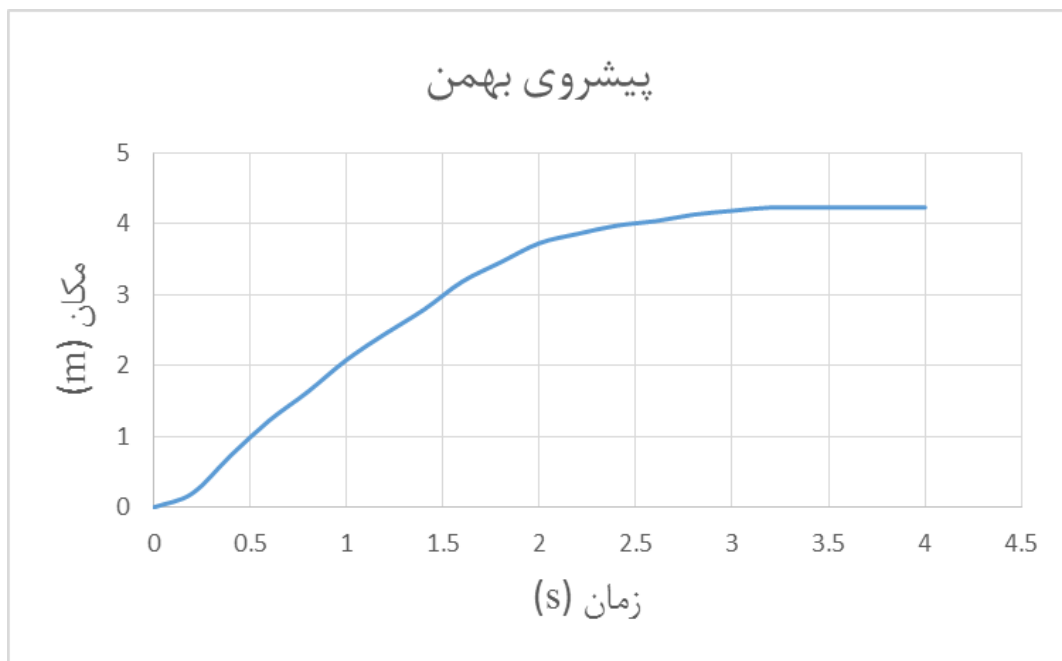


شکل (۵-۱۳) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. الف) نمودار مکان-زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدل‌سازی و آزمایشگاه. [۱۶]

در پژوهش حاضر نیز، بهمن در مدت زمان ۳ ثانیه به حداکثر میزان پیشروی که برابر ۴/۲ متر است، می‌رسد که مشابه تحقیقات انجام گرفته توسط Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] و تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد. هم‌چنین شکل حرکت بهمن بر روی سطح شیب‌دار در ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه مطابقت خوبی با کار انجام گرفته توسط Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] (شکل (۵-۱۲)) دارد. هم‌چنین مشاهده شد که حجم توده بهمن متوقف شده در پشت موانع در نواحی میانی بیشتر از نواحی کناری است که مشابه تحقیقات انجام گرفته توسط Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد.

در ادامه مانع بصورت قطعات مجزا در فواصل ۴ سانتی‌متری از هم (موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر) در مدل قرار داده می‌شود. در شکل (۵-۱۴) نمودار مکان-زمان در حالت موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بهمن حداکثر پیشروی خود را بعد از ۳/۵ ثانیه طی می‌کند، با این حال مدت شبیه‌سازی ۴ ثانیه می‌باشد تا ذرات بهمنی که در پشت موانع قرار دارند به حالت پایدار رسیده و دیگر حرکتی نداشته باشند. حداکثر پیشروی بهمن در این حالت برابر با

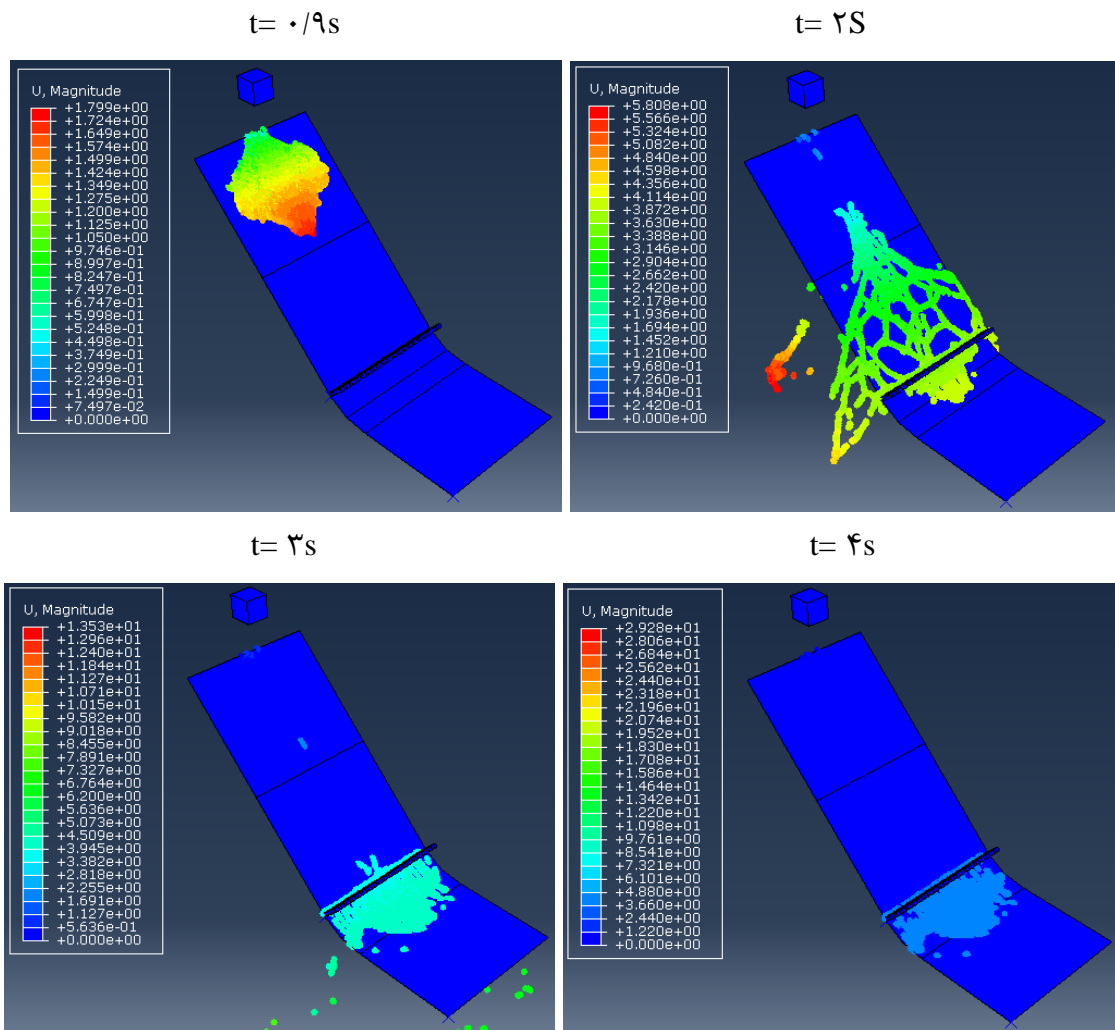
۴/۱۳ متر می باشد.



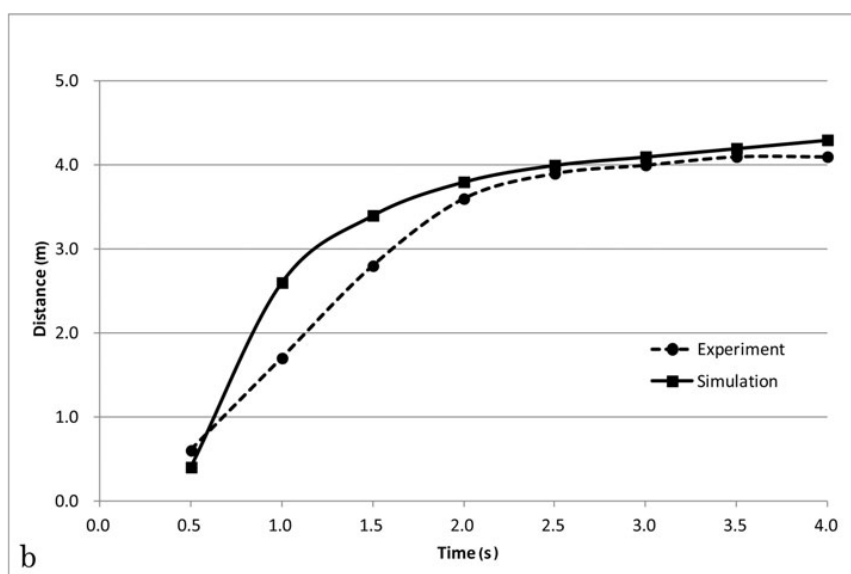
شکل (۱۴-۵) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۴ سانتی متر.

شکل (۱۵-۵) شکل و میزان پیشروی بهمن را در زمان های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در حالت موانع در فواصل ۴ سانتی متر نشان می دهد. بهمن بر روی سطح شیب دار در زمان های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه به ترتیب محدوده بین ۰/۳ تا ۱/۸ متر، ۱/۷ تا ۴ متر، ۲/۸ تا ۴/۱۳ متر و ۳/۱ تا ۴/۱۳ را در بر گرفته است.

در شکل (۱۶-۵) می توان نمودار مکان- زمان برای دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی را که حاصل تحقیقات Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می باشد، مشاهده نمود. همانگونه که در این شکل نیز مشهود است، بهمن در آزمایشگاه بعد از ۳/۵ ثانیه و در مدلسازی بعد از ۴ ثانیه به حداکثر پیشروی خود (به ترتیب برابر ۴/۱۳ و ۴/۲۵ متر) می رسد. هم چنین مشاهده کردند که در آزمایشگاه مقداری بهمن در پشت موانع باقی می ماند اما در مدلسازی هیچ برفی در پشت موانع باقی نمانده است.

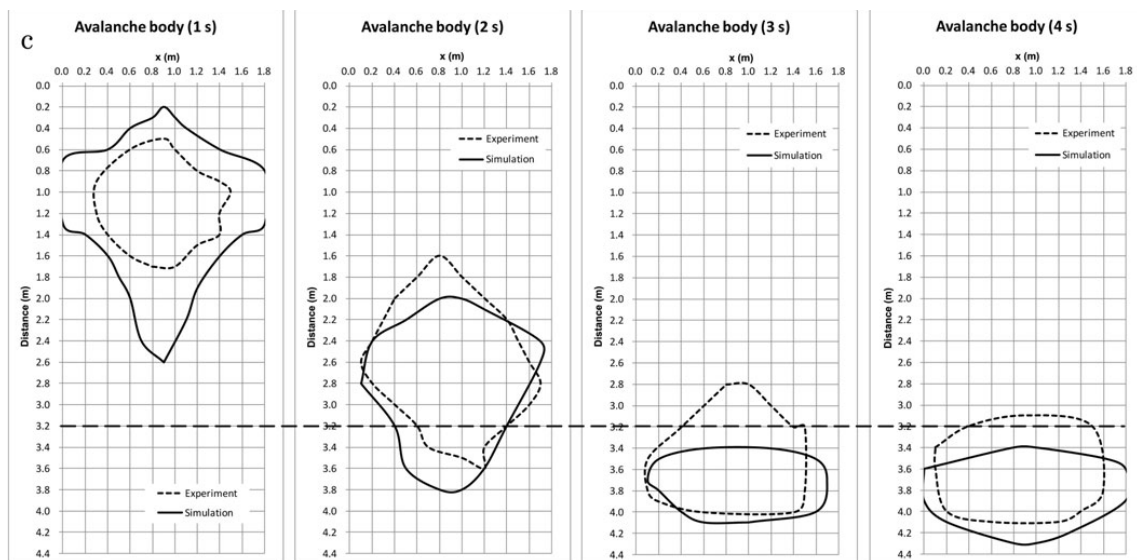


شکل (۵-۱۵) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۰/۹، ۲، ۳ و ۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر.



شکل (۵-۱۶) نمودار مکان- زمان بهمن برای موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر [۳۶].

در شکل (۵-۱۷)، شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه که حاصل تحقیقات Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] می‌باشد، نشان داده شده است. بهمن بر روی سطح شیب‌دار در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در آزمایشگاه به ترتیب محدوده بین ۰/۵ تا ۱/۷ متر، ۱/۶ تا ۳/۶ متر، ۲/۸ تا ۴ متر و ۳/۱ تا ۴/۱۳ را در بر گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، ذرات بهمن پس از طی زمان ۴ ثانیه حرکتی نداشته و به حالت سکون رسیده‌اند.

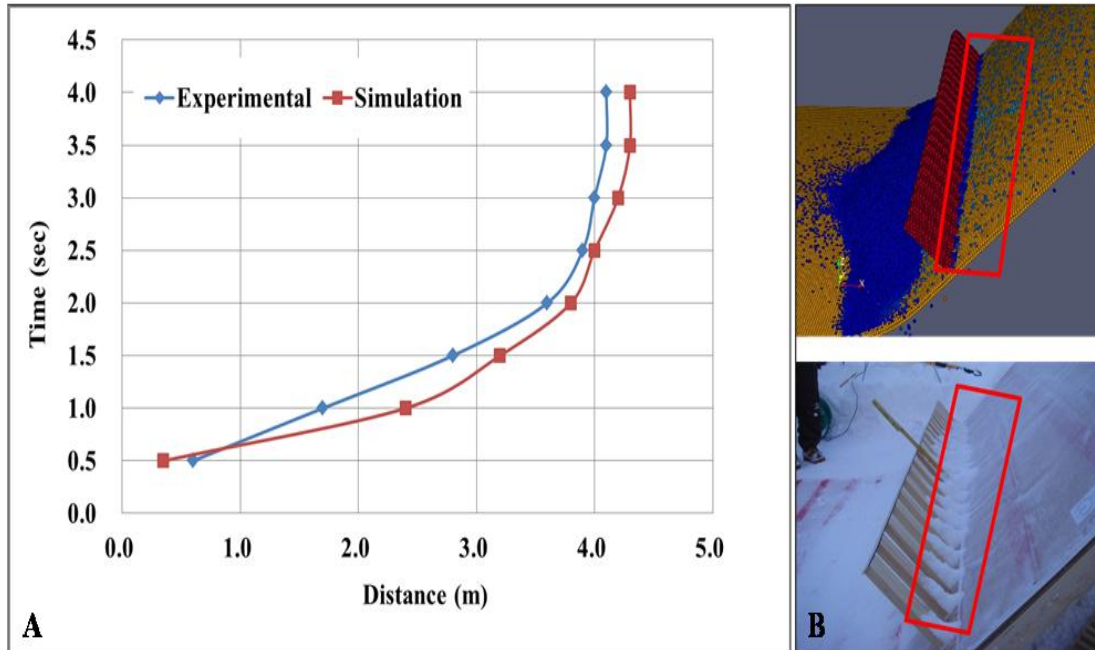


شکل (۵-۱۷) شکل حرکت بهمن در زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه برای موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر [۳۶].

در شکل (۵-۱۸) نمودار مکان-زمان و حداکثر پیشروی بهمن در آزمایشگاه و مدلسازی، که بر اساس نتایج تحقیقات Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد، نشان داده شده است. آنها مشاهده کردند که بهمن در آزمایشگاه و مدلسازی بعد از ۳/۵ ثانیه به حداکثر پیشروی خود می‌رسد که به ترتیب برابر ۴/۲ و ۴/۳ متر بدست آمده است. در این تحقیق نیز مشاهده شد که مقداری بهمن در پشت موانع باقی می‌ماند.

در پژوهش حاضر نیز، بهمن در مدت زمان ۳/۵ ثانیه به حداکثر میزان پیشروی که برابر ۴/۱۳ متر است، می‌رسد که مشابه تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] می‌باشد. همچنین شکل حرکت بهمن بر روی سطح شیب‌دار

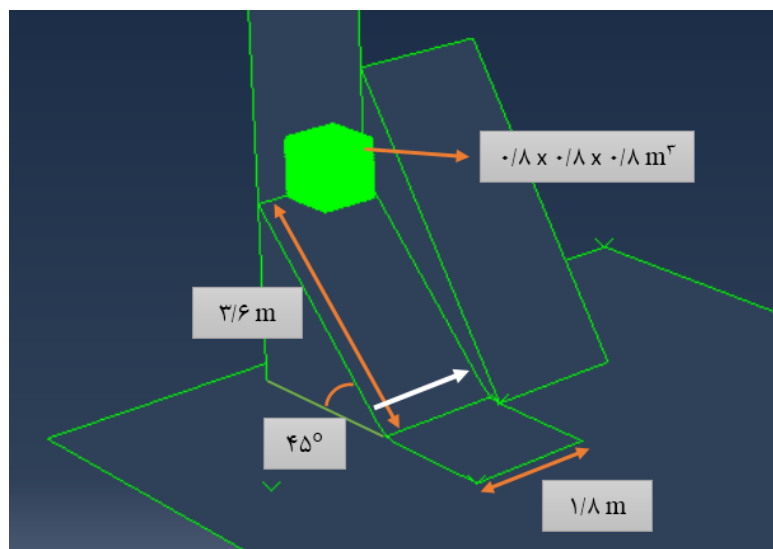
در ۱/۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه مطابقت خوبی با کار انجام گرفته توسط Yoshihiko SAITO و همکاران [۳۶] (شکل (۵-۱۷)) دارد. همینطور مشاهده شد که حجم توده بهمن متوقف شده در پشت این نوع مانع از حجم مشابه در مانع با فواصل ۲ سانتی متر کمتر است که با نتایج بدست آمده از تحقیقات Yoshihiko Saito و همکاران [۳۶] و Abdelrazek و همکاران [۱۶] مطابقت دارد.



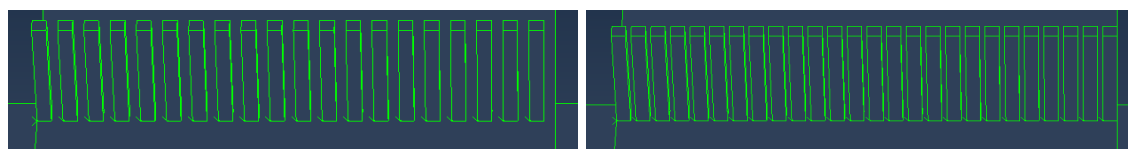
شکل (۵-۱۸) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. الف) نمودار مکان-زمان بهمن. ب) پیشروی بهمن در مدلسازی و آزمایشگاه. [۱۶]

### ۵-۳-۲- تاثیر موانع مختلف بر سرعت و پیشروی بهمن

از آنجایی که در حین حرکت بهمن‌های رخداده در جهان، حجمی قابل توجهی از بهمن از مسیر حرکت خارج نمی‌شود، لذا در ادامه اطراف شیب محدود شده تا ذرات بهمن از محیط مدلسازی خارج نشوند. به همین منظور، توده برفی به ابعاد  $0.8 \times 0.8 \times 0.8$  m بر روی سطحی با شیب ۴۵ درجه رها شده و پس از حرکت بر روی سطح شیب‌دار به موانعی که در پایین دست سطح طراحی شده‌اند، برخورد می‌کند تا بتوان میزان پیشروی و سرعت بهمن را در حالت‌های مختلف با هم مقایسه کرد. در شکل (۵-۱۹) شیب و شکل موانع مختلف نشان داده شده است.

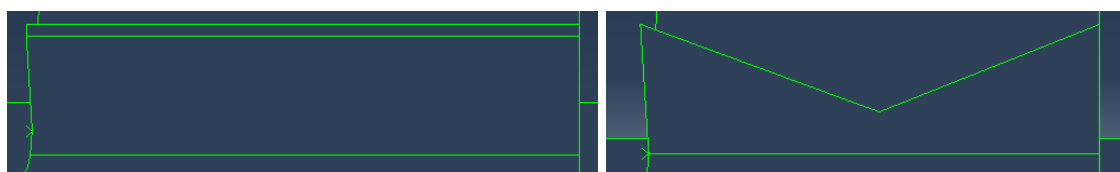


(الف)



(پ)

(ب)



(ث)

(ت)

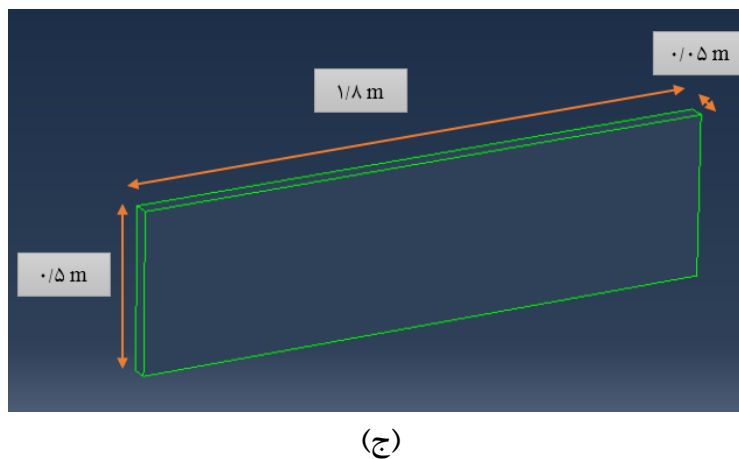
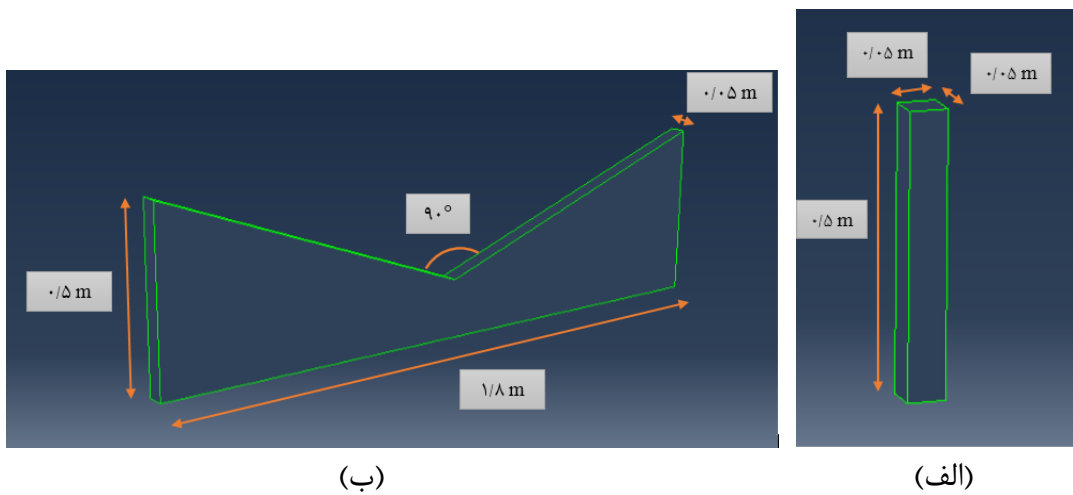
شکل (۵-۱۹) فلش محل قرارگیری مانع. الف) نمایی از مسیر مدلسازی. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری.

در این مدلسازی بهمن با استفاده از ۹۲۶۱ ذره شبیه‌سازی می‌شود. بهمن در اثر وزن خود شروع به حرکت بر روی شیب کرده و در مدت زمان ۱ ثانیه از سطح شیب‌دار عبور می‌کند و تا توقف کامل بر روی سطح صاف به حرکت خود ادامه می‌دهد. حداکثر پیشروی بهمن در این حالت ۷/۳۵ متر است که در ۲/۸ ثانیه طی می‌کند.

در ادامه، چهار نوع مانع (مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ سانتی‌متری، مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۴ سانتی‌متری، مانع بصورت بازشدگی و مانع سراسری) در مسیر بهمن قرار داده می‌شود تا تاثیر آن بر پیشروی و سرعت بهمن بررسی گردد (شکل (۵-۱۹) - ب تا ث)). در شکل (۵-۵)

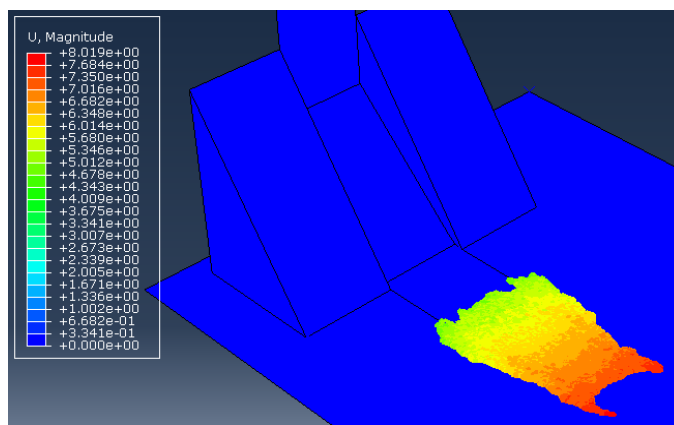


۲۰) مشخصات هر یک از موانع نشان داده شده است.

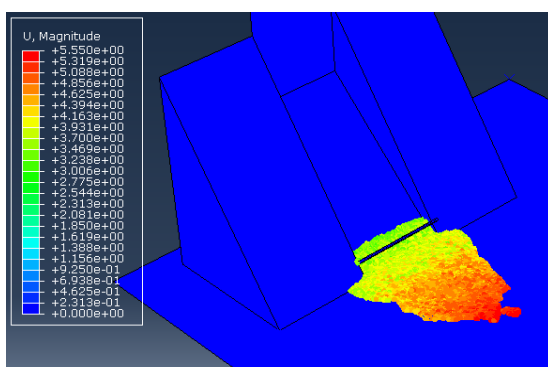


شکل (۵-۲۰) الف) نمایی از قطعات مجزا در موانع با فواصل ۲ و ۴ سانتی‌متر. ب) مانع بصورت بازشدگی. ج) مانع سراسری.

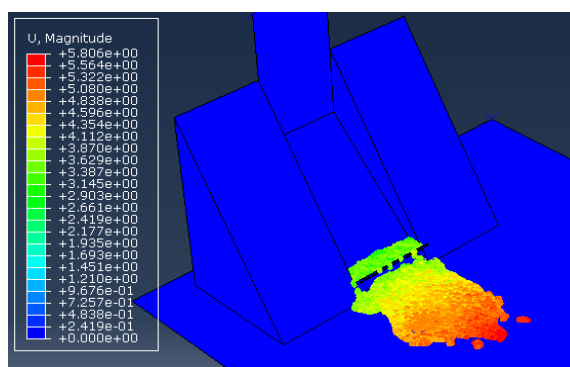
بهمن بعد از طی مسافت  $\frac{3}{4}$  متر بر روی شیب، در مدت زمان  $\frac{0}{9}$  ثانیه، به مانع برخورد می‌کند و از آنجایی که موانع طوری طراحی نشده‌اند که جلوی پیشروی بهمن را بگیرند، بنابراین بعد از برخورد، بهمن دوباره به حرکت خود ادامه می‌دهد؛ البته مقداری از حجم بهمن در پشت موانع باقی می‌ماند. در شکل (۵-۲۱) میزان پیشروی بهمن در هر حالت نشان داده شده است.



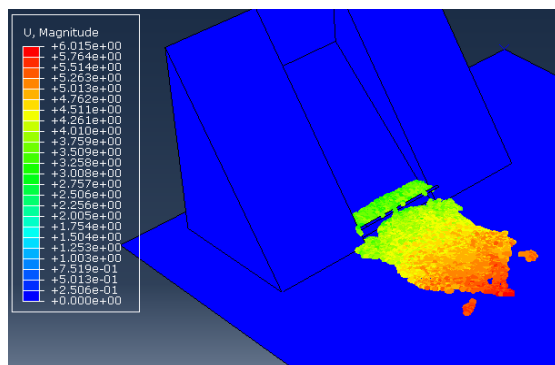
(الف)



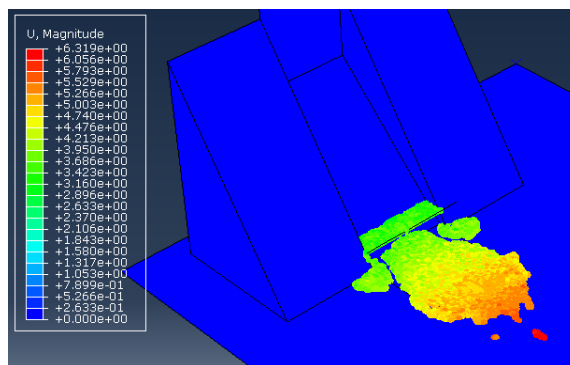
(پ)



(ب)



(ث)



(ت)

شکل (۵-۲۱) پیشروی بهمن پودری. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری.

در جدول (۵-۳) نتایج شبیه‌سازی شامل میزان پیشروی و زمان توقف بهمن در هر حالت آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود حالت (ت) (مانع بصورت بازشدگی) و (پ) (موانع با فواصل ۴ سانتی متر) باعث کاهش پیشروی بهمن به میزان ۲۸٪ و ۲۵٪ نسبت به حالت (الف) (بدون مانع) می‌شوند.

جدول (۳-۵) زمان توقف و طول پیشروی هر حالت

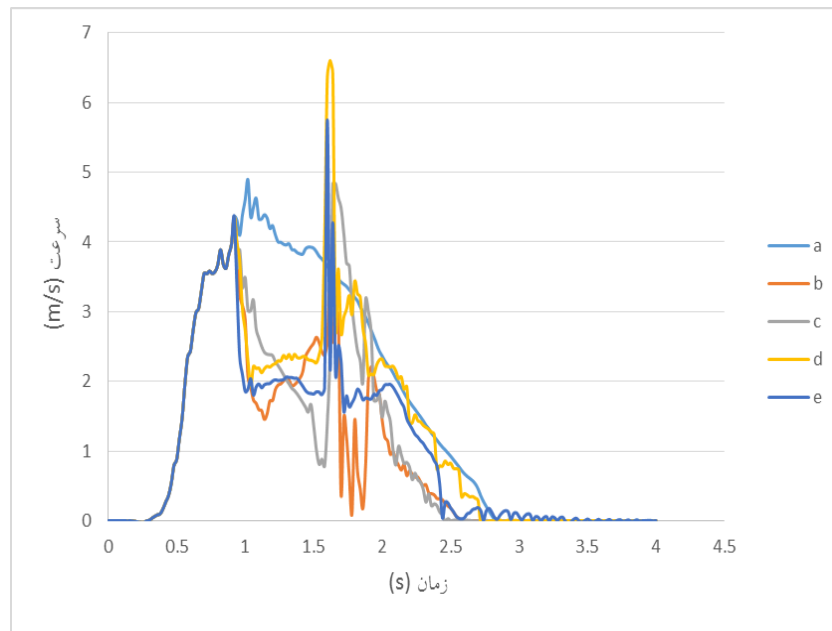
درصد پیشروی، %	طول پیشروی، m	زمان توقف، s	
۱۰۰	۷/۳۵	۲/۸	الف
۷۹	۵/۸	۲/۶	ب
۷۵	۵/۵۴	۲/۴	پ
۷۲	۵/۲۶	۲/۷	ت
۸۲	۶/۰۱	۲/۸	ث

برای این که اثر موانع مختلف بر سرعت بهمن بررسی شود، یک ذره معین از بهمن را مشخص کرده تا نرم افزار نمودار سرعت- زمان را تنها برای آن ذره نمایش دهد. در شکل (۵-۲۲) تغییرات سرعت برای موانع مختلف برای آن ذره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود بیشترین سرعت در حالت بدون مانع می باشد که برابر  $4/90 \text{ m/s}$  در زمان  $t=1 \text{ s}$  است.

محل قرارگیری موانع طوری انتخاب شده است که بهمن قبل از رسیدن به حداکثر سرعت به مانع برخورد کند؛ همانطور که از شکل مشخص است در زمان برخورد بهمن به مانع (در  $t = 0/9 \text{ s}$ ) دارای سرعت  $4/36 \text{ m/s}$  می باشد. همانطور که انتظار می رود بهمن در برخورد با مانع سرعتش بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و از آنجائیکه موانع طوری طراحی نشده اند که بطور کامل جلوی حرکت بهمن را بگیرند، سرعت بهمن بعد از برخورد با مانع مدت کوتاهی زیاد می شود که بیانگر شتاب افزایشی می باشد. همانگونه که مشاهده می شود سرعت بهمن پس از عبور از مانع همواره کمتر از حالت بدون مانع بوده و سیر نزولی دارد.

با توجه به نمودار، در لحظه برخورد بهمن به موانع سرعت در حالت (ب) (موانع با فواصل ۲ سانتی متر) نسبت به حالت (الف) (بدون مانع)،  $68\%$  کاهش یافته که این بیشترین میزان کاهش سرعت نسبت به حالت های دیگر است. در حالت های (ت) (مانع بصورت بازشدگی) و (ث) (مانع سراسری) هر چند سرعت را به ترتیب  $56\%$  و  $58\%$  کاهش می دهند اما در هنگام عبور بهمن از مانع

سرعتشان تقریباً  $1/5$  برابر بیشتر از حالت بدون مانع می‌شود و این موضوع هنگامی که آب یا سازه مهمی در انتها مسیر وجود دارد، مطلوب نمی‌باشد. از طرفی حالت (پ) (موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر) می‌تواند گزینه مناسبی باشد زیرا سرعت را به تدریج (نه ناگهانی) کاهش می‌دهد، در لحظه‌ای نیز سرعتش افزایش می‌یابد که به دلیل حجم بهمنی است که از پشت مانع سرازیر می‌شود.

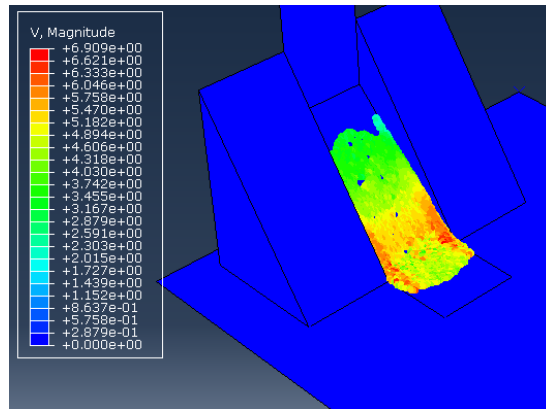


شکل (۵-۲۲) نمودار سرعت- زمان بهمن پودری. (a) بدون مانع. (b) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. (c) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. (d) مانع بصورت بازشدگی. (e) مانع سراسری.

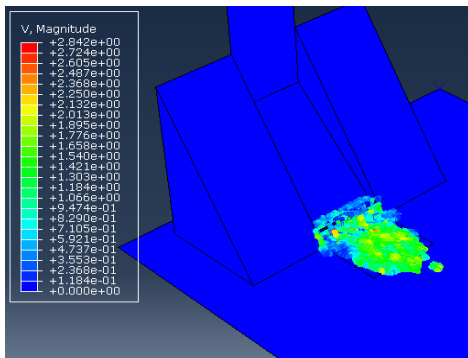
در شکل (۵-۲۳) کانتور تغییرات سرعت بهمن برای موانع مختلف نشان داده شده است. شکل (۵-۱۷ الف) سرعت بهمن را در لحظه عبور از سطح شیب‌دار (در زمان  $t = 1/1s$ ) در حالت بدون مانع نشان می‌دهد. در سایر شکل‌ها نیز سرعت بهمن بعد از عبور از مانع در زمان  $t = 2/2s$  نشان داده شده است.

بنابراین با بررسی نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که اگر فاصله مانع‌ها از یکدیگر کم باشد همانند مانع سراسری عمل می‌کنند و اگر زیاد باشد دیگر تاثیری بر سرعت و طول پیشروی بهمن ندارند. همچنین این نتیجه مشهود است که فواصل مناسب موانع تاثیر بسزایی در کاهش سرعت و میزان پیشروی بهمن دارد. بعبارتی موانعی که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند می‌توانند سرعت و

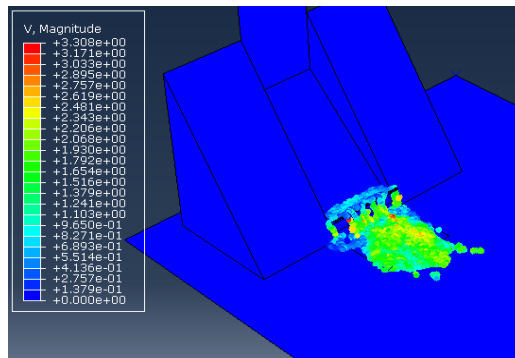
پیشروی بهمن را بطور مناسبی کاهش دهند.



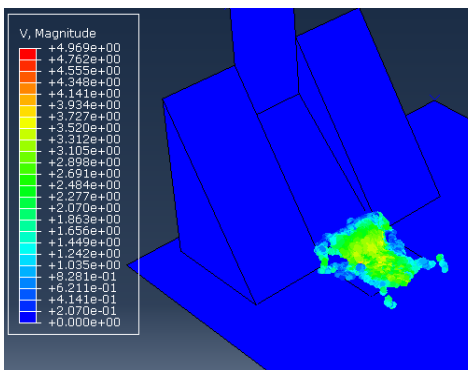
(الف)



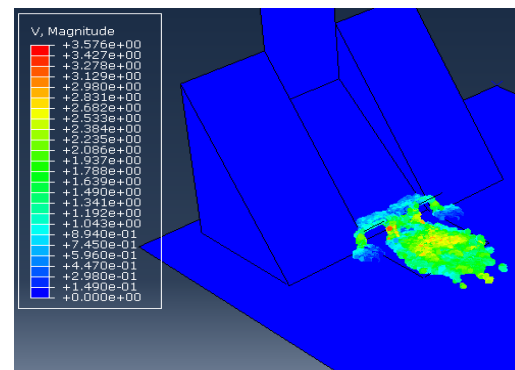
(پ)



(ب)



(ث)



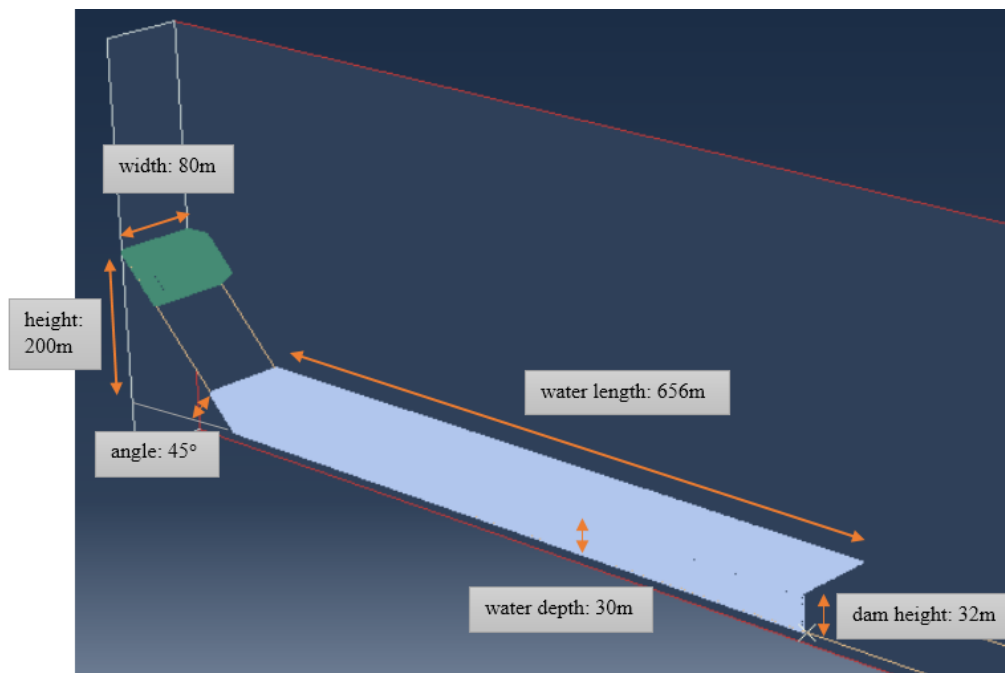
(ت)

شکل (۵-۲۳) کانتور تغییرات سرعت بهمن پودری. (الف) بدون مانع. (ب) مانع با فواصل ۲ سانتی متر. (پ) مانع با فواصل ۴ سانتی متر. (ت) مانع بصورت بازشدگی. (ث) مانع سراسری.

### ۵-۳-۳- برخورد بهمن پودری به آب

در کوه‌های آلپ، مخازن آب بسیاری برای تولید برق وجود دارد که موج ایجاد شده در اثر ورود بهمن

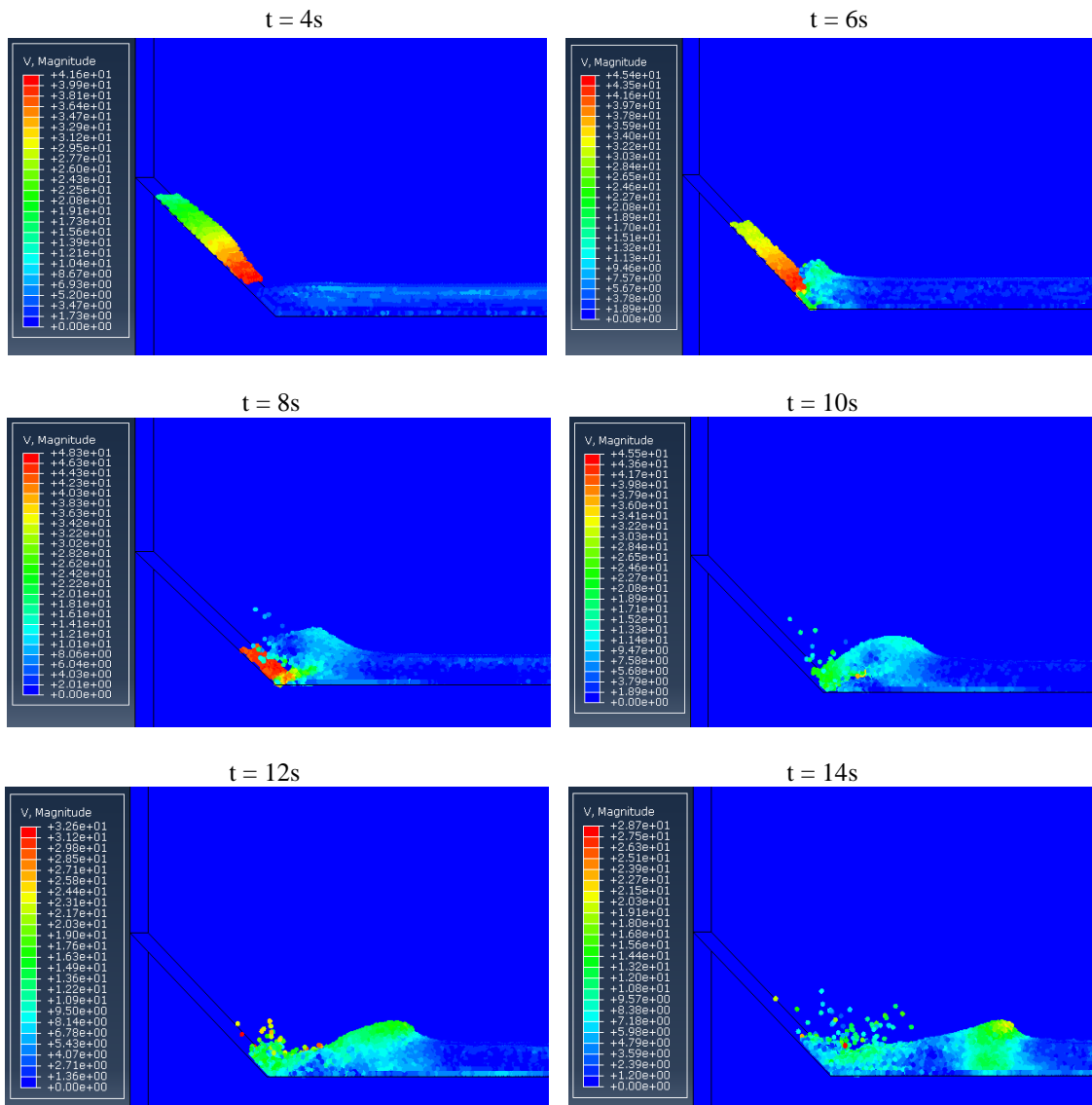
می‌تواند باعث سرریز شدن آب و حتی شکستن سد شود. به همین دلیل در ادامه مدلسازی‌ها توده برفی به حجم  $80000 \text{ m}^3$  بر روی سطح شیب‌دار  $45^\circ$  درجه‌ای قرار داده که در انتهای حرکت خود بر روی شیب به آب ساکنی به حجم  $80 \times 30 \times 656 \text{ m}^3$  که در پشت سدی جمع شده است، برخورد می‌کند. شکل (۲۴-۵) موقعیت بهمن و آب را نشان می‌دهد؛ فاصله سطح آب تا لبه سد ۲ متر در نظر گرفته شده و بهمن از ارتفاع ۲۰۰ متری شروع به حرکت کرده است.



شکل (۲۴-۵) نمایی از مسیر مدلسازی (رنگ سبز: توده برف، رنگ آبی: آب).

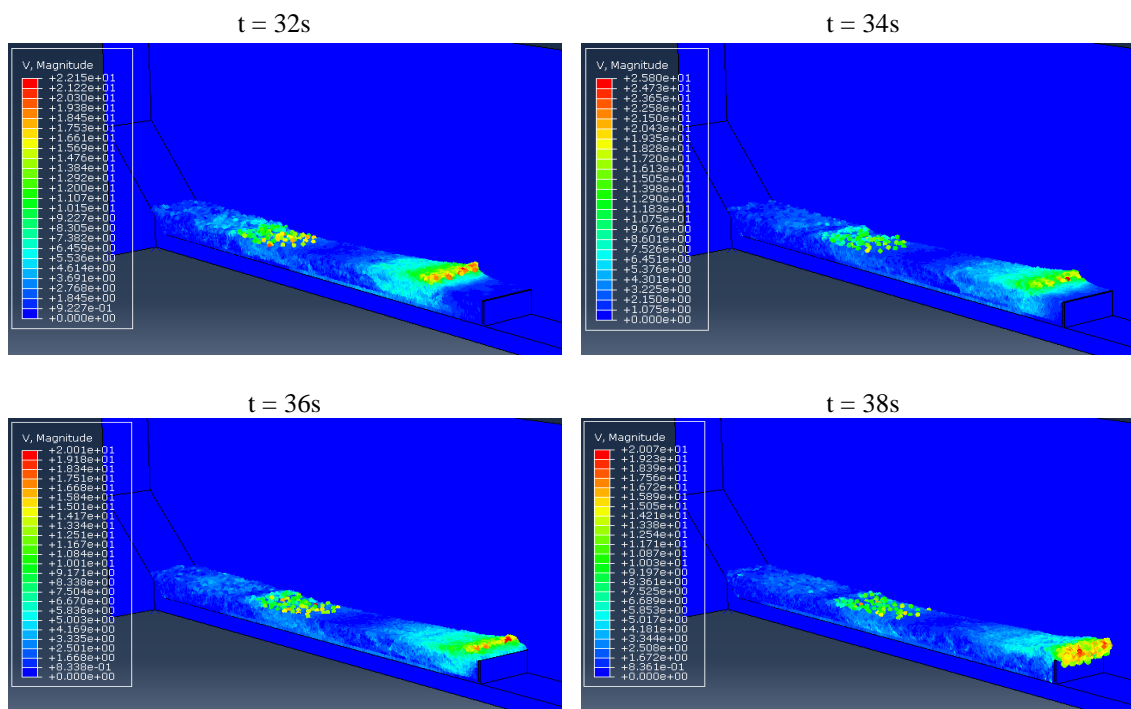
در این مدلسازی بهمن و آب هر دو با استفاده از روش SPH و به ترتیب با  $4284$  و  $81900$  ذره شبیه‌سازی شده‌اند. بهمن از ارتفاع ۲۰۰ متری در اثر نیروی وزن خود شروع به حرکت کرده و بعد از ۵ ثانیه، مسیر ۲۴۰ متری را طی می‌کند؛ در همین لحظه با سرعت  $44/83 \text{ m/s}$  به سطح آب برخورد می‌نماید. در اثر این برخورد، موجی با ارتفاع  $34/3 \text{ m}$  در زمان  $t=10 \text{ s}$  ایجاد می‌شود که با سرعت  $17/95 \text{ m/s}$  شروع به حرکت به سمت سد می‌کند. در حین پیشروی موج به سمت سد، از ارتفاع و سرعت آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t=14 \text{ s}$  ارتفاع و سرعت موج به ترتیب برابر  $30/58 \text{ m}$  و  $17/95 \text{ m/s}$  می‌باشد. در شکل (۲۵-۵) سرعت حرکت بهمن بر روی شیب و موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن

با آب نشان داده شده است.



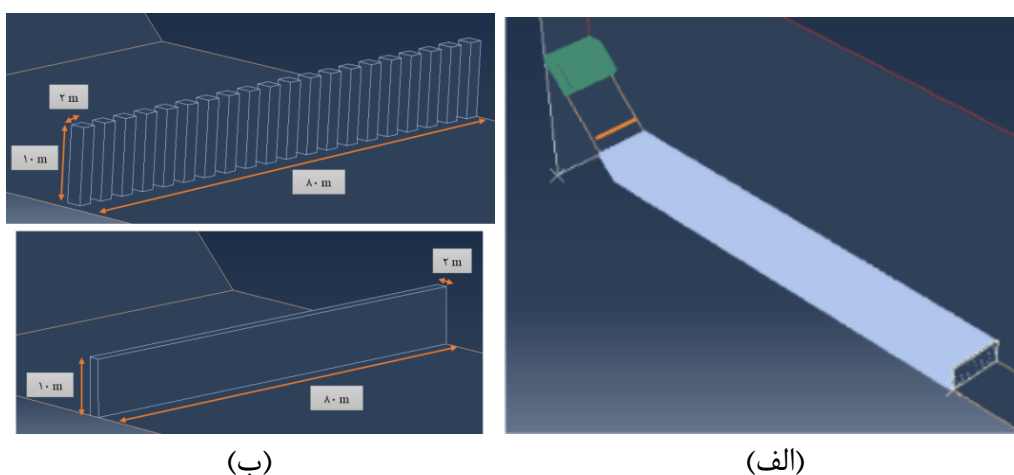
شکل (۵-۲۵) سرعت حرکت بهمن پودری بر روی شیب و موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن با آب.

در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t = 32s$  میزان سرعت و ارتفاع موج به ترتیب برابر  $16/21 \text{ m/s}$  و  $21/73 \text{ m}$  می‌باشد. موج به حرکت خود ادامه می‌دهد تا در نهایت در زمان  $t = 37s$  آب از سد سرریز می‌شود، در این لحظه سرعت و ارتفاع آب به ترتیب برابر  $12/86 \text{ m/s}$  و  $13/72 \text{ m}$  می‌باشد. شکل (۵-۲۶) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد را نشان می‌دهد.



شکل (۲۶-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد.

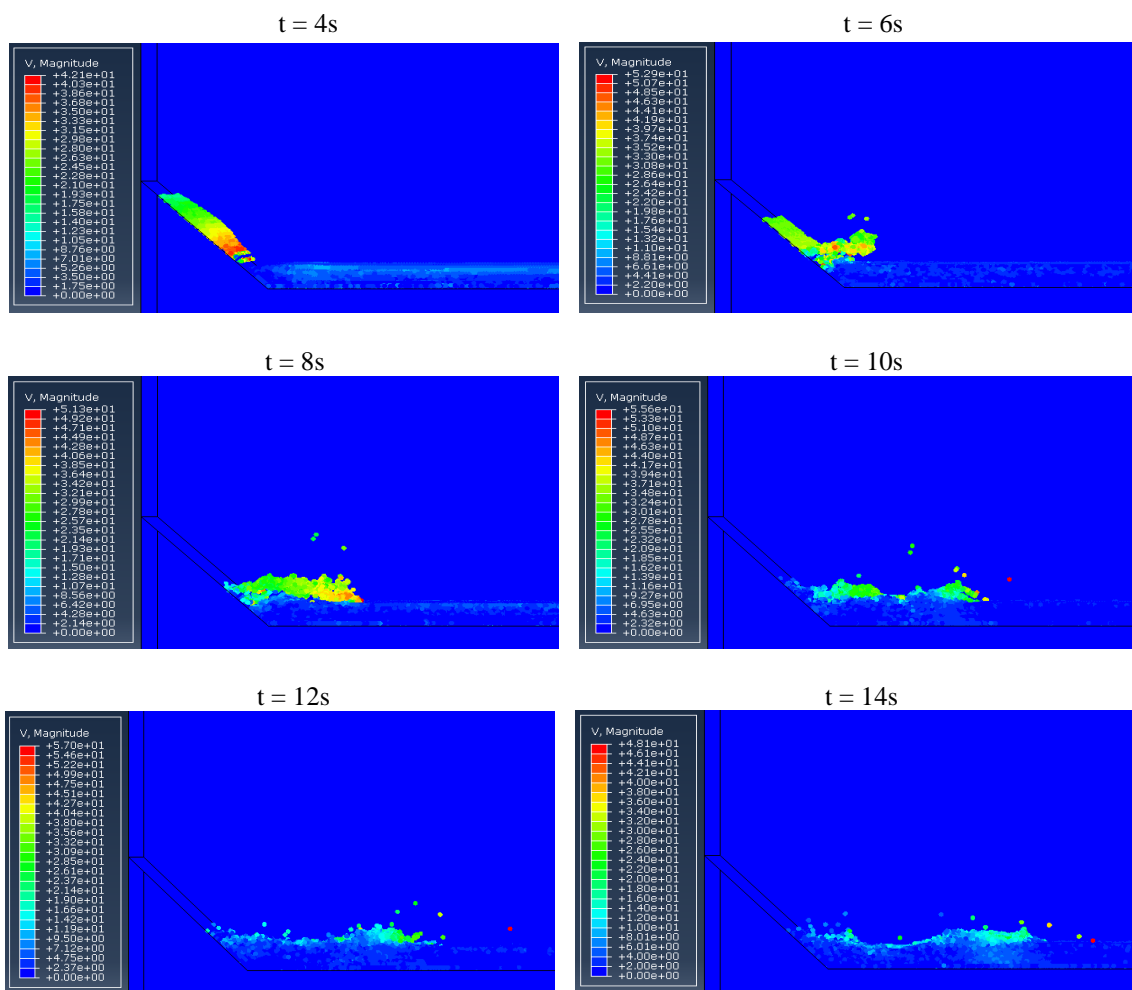
با بهره‌گیری از نتایج بخش قبل (۲-۳-۵)، مانع بصورت قطعات مجزا که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند، بهترین مانع می‌باشد؛ در این مدلسازی، مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری به مدل اولیه (شکل ۲۴-۵) اعمال می‌شود. هم‌چنین مانع سراسری را نیز به مدل اعمال کرده تا تاثیر آن را بر موج ایجاد شده و ارتفاع و سرعت آب در لحظه سرریز شدن، بررسی نمود. شکل (۲۷-۵) محل قرارگیری و شکل مانع را نشان می‌دهد.



شکل (۲۷-۵) الف) نمای کلی مسیر مدلسازی (خط محل قرارگیری مانع). ب) شکل موانع.



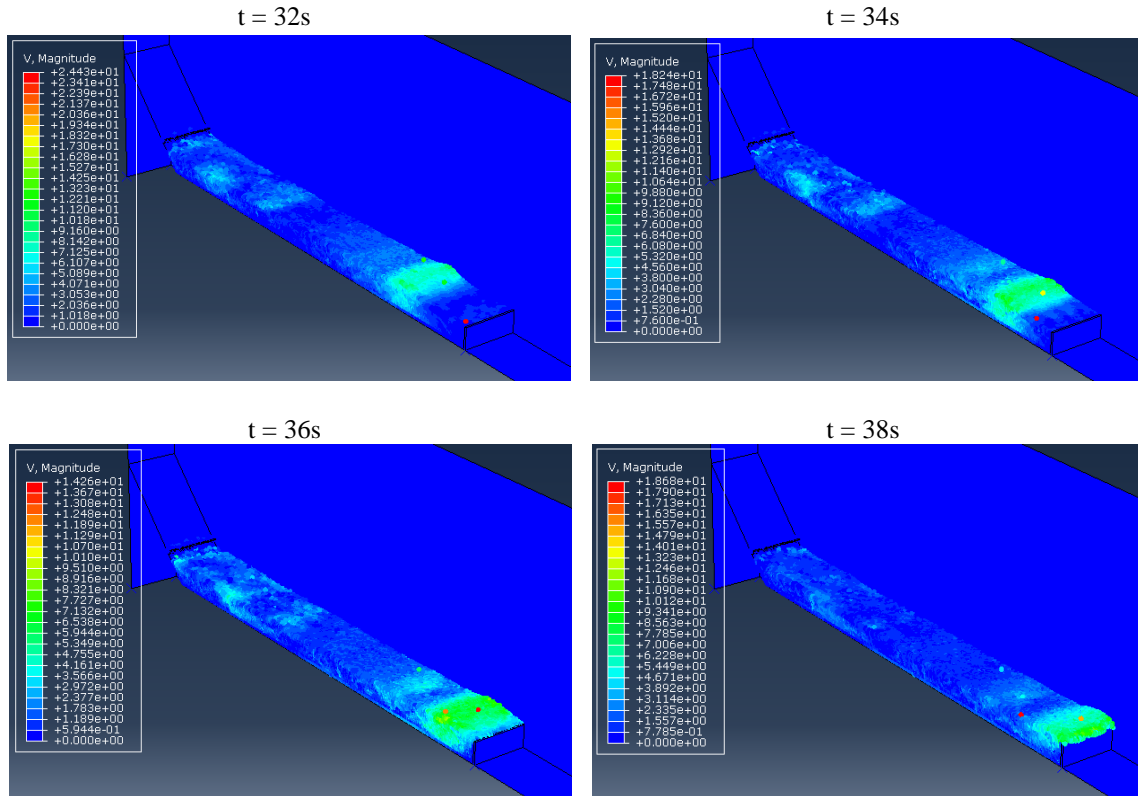
در این مدل بهمن بر روی سطح شیب‌دار شروع به حرکت کرده و پس از طی مسافت ۱۷۸ متر در ۴ ثانیه، با سرعت  $38/55 \text{ m/s}$  به مانع برخورد می‌کند. سرعت بهمن در برخورد با موانع با فواصل ۲ متری کاهش می‌یابد اما باز هم قادر است از فواصل مابین موانع به حرکت خود ادامه دهد. در نهایت بهمن با عبور از موانع در  $t = 8 \text{ s}$  با سرعت  $35/28 \text{ m/s}$  به سطح آب برخورد می‌کند که نتیجه آن ایجاد موجی با ارتفاع  $22/39 \text{ m}$  و سرعت  $16/62 \text{ m/s}$  در ثانیه  $t = 12 \text{ s}$  می‌باشد و در حال پیشروی به سمت سد است (شکل (۵-۲۸)).



شکل (۵-۲۸) برخورد بهمن پودری به موانع با فواصل ۲ متر و سطح آب.

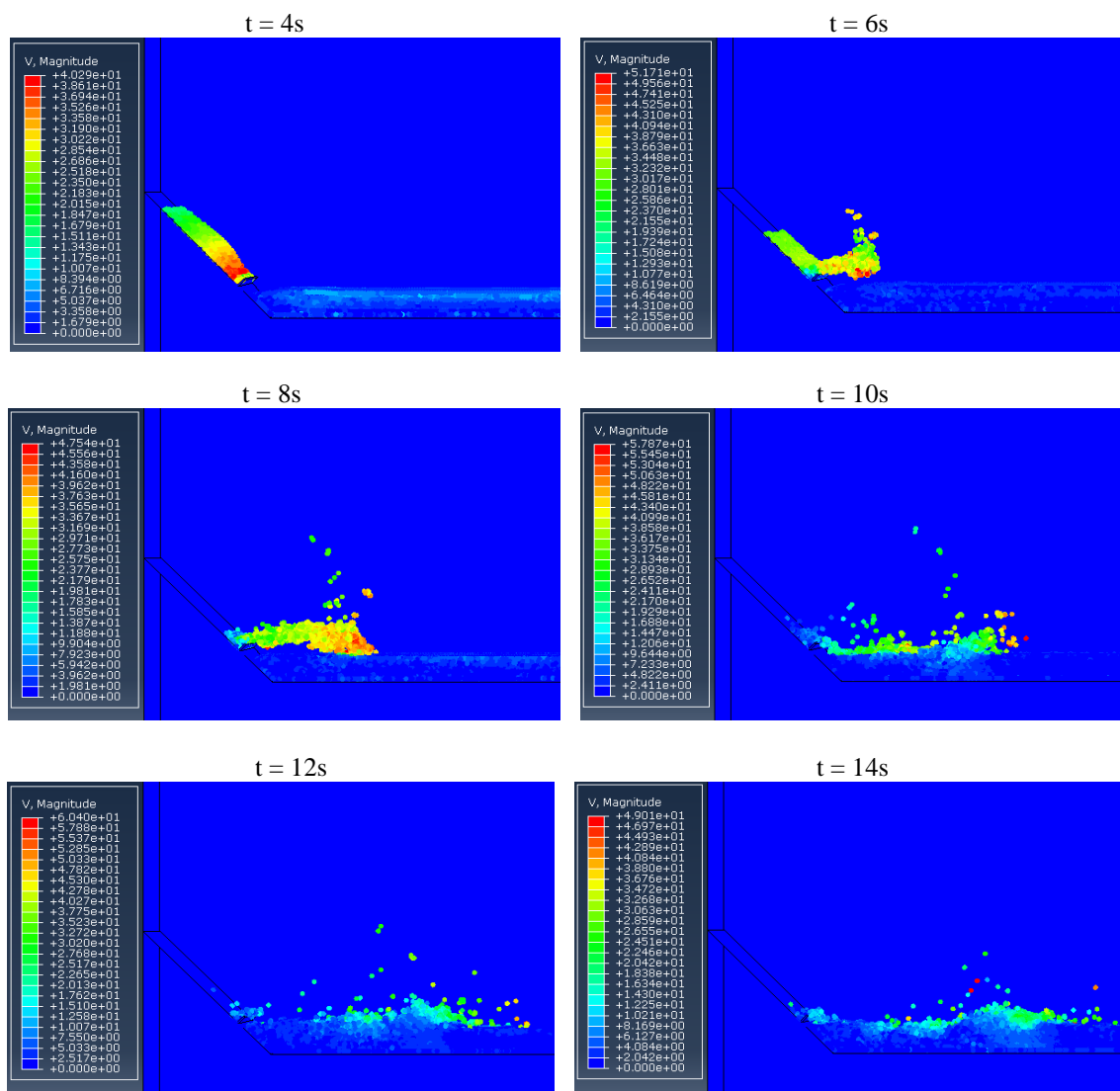
در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t = 32 \text{ s}$  سرعت و ارتفاع موج به ترتیب برابر  $11/20 \text{ m/s}$  و  $16/32 \text{ m}$  می‌باشد. موج به

حرکت خود ادامه می‌دهد تا در نهایت در زمان  $t = 38s$  آب از سد سرریز می‌شود، در این لحظه سرعت و ارتفاع آب به ترتیب برابر  $8/34 \text{ m/s}$  و  $10/32 \text{ m}$  می‌باشد. شکل (۵-۲۹) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد را در مانع هر ۲ متر نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۹) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد در موانع با فواصل ۲ متر.

در ادامه مانع سراسری در فاصله ۱۷۸ متری ابتدای حرکت بهمن بر روی شیب قرار داده می‌شود، بطوری که بهمن بعد از ۴ ثانیه با سرعت  $38/55 \text{ m/s}$  به مانع برخورد می‌کند. سرعت بهمن در برخورد با مانع سراسری کاهش می‌یابد اما باز هم قادر است از مانع عبور کرده و به حرکت خود ادامه دهد. در نهایت بهمن با عبور از مانع با سرعت  $41/92 \text{ m/s}$  به سطح آب برخورد می‌کند که نتیجه آن ایجاد موجی با ارتفاع  $26/30 \text{ m}$  و سرعت  $17/87 \text{ m/s}$  می‌باشد و در حال پیشروی به سمت سد است (شکل (۵-۳۰)). در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می‌شود و نهایتاً آب با سرعت و ارتفاع،  $10/77 \text{ m/s}$  و  $12/32 \text{ m}$  از سد عبور می‌کند.



شکل (۵-۳) برخورد بهمن پودری به مانع سراسری و سطح آب.

در جدول (۵-۴) مقادیر پارامترهای سرعت بهمن، زمان رسیدن موج به سد، ارتفاع موج ایجاد شده، ارتفاع و سرعت آب در لحظه سرریز شدن در حالت‌های، بدون مانع و با مانع مشاهده می‌شود. همانطور که مشهود است سرعت بهمن در برخورد با موانع با فاصله ۲ متر حدود ۲۱٪ کاهش یافته که باعث می‌شود ارتفاع موج اولیه حدود ۳۵٪ کاهش یابد. از این‌رو ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب نیز به ترتیب حدود ۲۵٪ و ۳۵٪ کاهش داشته است.

همچنین سرعت بهمن در برخورد با مانع سراسری حدود ۷٪ کاهش دارد اما بدلیل اینکه حجم بهمن برخوردی به آب در این حالت کمتر از بدون مانع است، ارتفاع موج اولیه ۲۳٪ کاهش می‌یابد.

همچنین ارتفاع و سرعت آب در لحظه عبور از سد به ترتیب ۱۰٪ و ۱۶٪ کاهش یافته است.

جدول (۴-۵) خروجی‌های شبیه‌سازی

مانع سراسری	مانع هر ۲ متر	بدون مانع	
۴۱/۹۲	۳۵/۲۸	۴۴/۸۳	سرعت بهمن در هنگام برخورد با آب (m/s)
۳۷	۳۸	۳۷	زمان رسیدن موج به سد (s)
۲۶/۳	۲۲/۳۹	۳۴/۳	ارتفاع موج ایجاد شده (m)
۱۲/۳۲	۱۰/۳۲	۱۳/۷۲	ارتفاع آب در هنگام سرریز شدن (m)
۱۰/۷۷	۸/۳۴	۱۲/۸۶	سرعت آب در هنگام سرریز شدن (m/s)

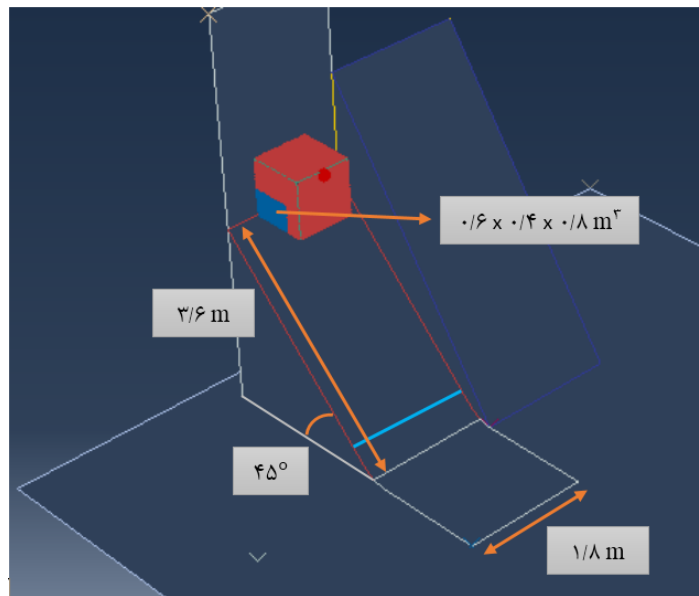
## ۴-۵ - بهمن پودری - متراکم

همانگونه که در فصل (۲) اشاره شد، بهمن‌ها از لحاظ نوع برف به ۳ دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: (۱) بهمن پودری، (۲) بهمن متراکم، (۳) بهمن پودری- متراکم. بهمن پودری، حرکت خیلی سریع ابر برفی است که معمولاً سرعت متوسط بالایی دارد و به همین جهت در مسیر حرکت خود خرابی‌های فراوانی را به وجود می‌آورد.

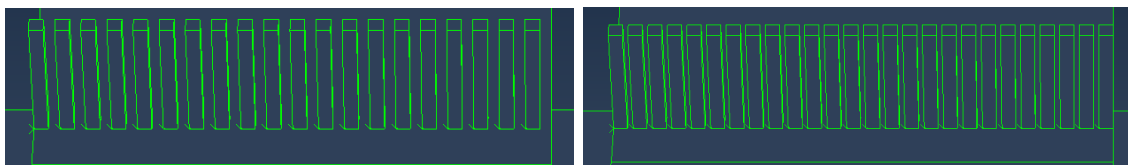
بهمن پودری- متراکم، بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف پوشیده شده می‌باشد. شبیه‌سازی اینگونه بهمن‌ها در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل همواره سعی شده است تا با مدلسازی‌های مختلف به شناخت آن پرداخت. در این نوع بهمن، ابر پودری دارای سرعت بیشتری نسبت به هسته متراکم بوده و همواره پیشروی بیشتری دارد. در بخش (۳-۵)، بهمن پودری بطور کامل مدلسازی شد. حال در این بخش به مدلسازی بهمن پودری- متراکم (بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف پوشیده شده) پرداخته می‌شود.

## ۵-۴-۱- تاثیر موانع مختلف بر سرعت و پیشروی بهمن

در این بخش توده برفی به ابعاد  $0.8 \times 0.8 \times 0.8$  m بر روی سطح شیب‌دار  $45^\circ$  درجه‌ای قرار گرفته می‌شود و پس از آن موانع مختلف را جلوی حرکت بهمن قرار داده تا بتوان میزان پیشروی و سرعت بهمن را در حالت‌های مختلف با هم مقایسه کرد. این توده برف دارای هسته متمرکزی به ابعاد  $0.6 \times 0.4 \times 0.8$  m است. در شکل (۵-۳۱) شیب و شکل موانع مختلف نشان داده شده است.

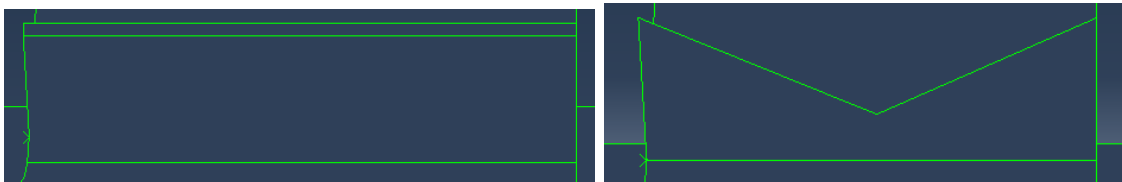


(الف)



(پ)

(ب)



(پ)

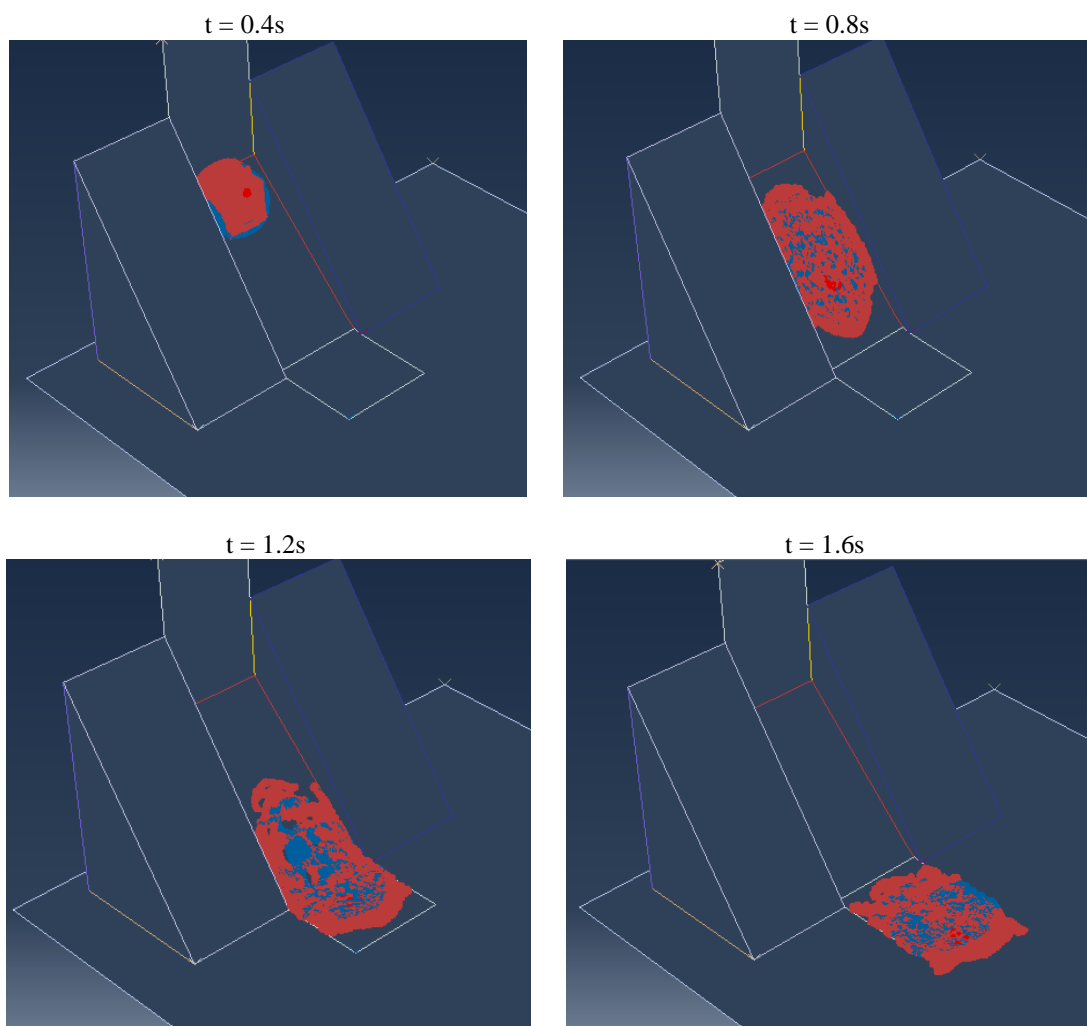
(ب)

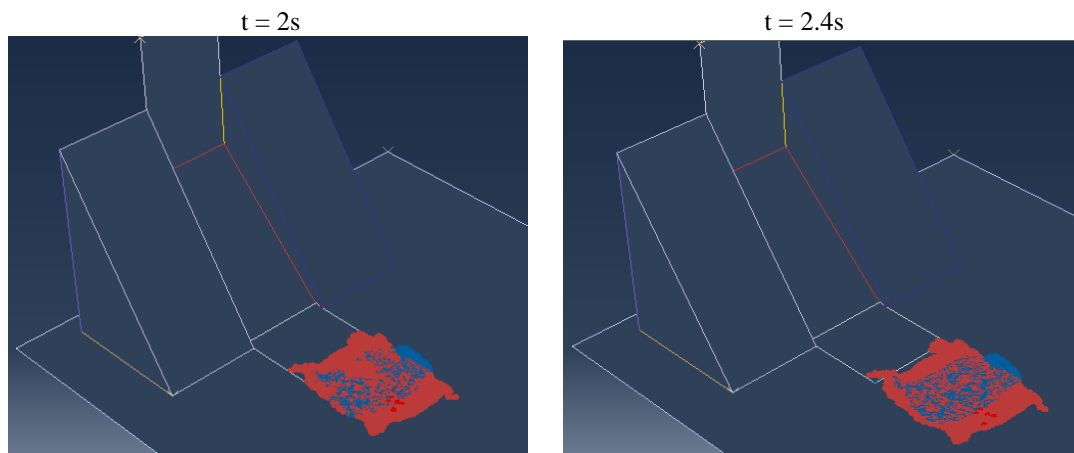
شکل (۵-۳۱) خط آبی رنگ محل قرارگیری مانع. الف) نمایی از مسیر مدل‌سازی (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری). ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع

سراسری.

در این مدل‌سازی بهمن پودری با استفاده از ۶۳۴۲ ذره و بهمن متراکم با استفاده از ۳۶۹۶ ذره شبیه‌سازی می‌شوند. بهمن در اثر وزن خود که ناشی از شتاب گرانش است، بر روی سطح شیب‌دار شروع به حرکت کرده و در مدت زمان ۱/۱ ثانیه از سطح شیب‌دار عبور می‌کند و تا توقف کامل بر روی سطح صاف به حرکت خود ادامه می‌دهد. حداکثر پیشروی بهمن در این حالت ۶/۸۱ متر است که در ۲/۴ ثانیه طی می‌کند.

شکل (۵-۳۲)، شکل حرکت بهمن پودری- متراکم را در حالت بدون مانع در ثانیه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در طی حرکت بهمن همواره ابر پودری در جلوی بهمن قرار گرفته و سرعت بیشتری نسبت به هسته متراکم دارد. همانطور که انتظار می‌رفت، در بهمن پودری- متراکم پیشروی بهمن حدود ۷٪ کم‌تر از بهمن پودری می‌باشد.

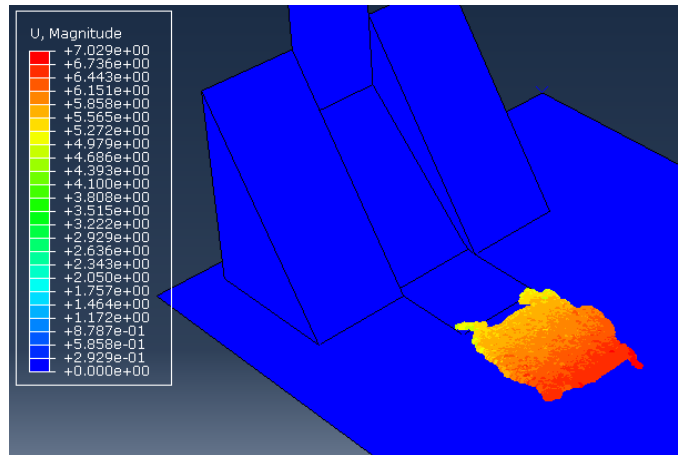




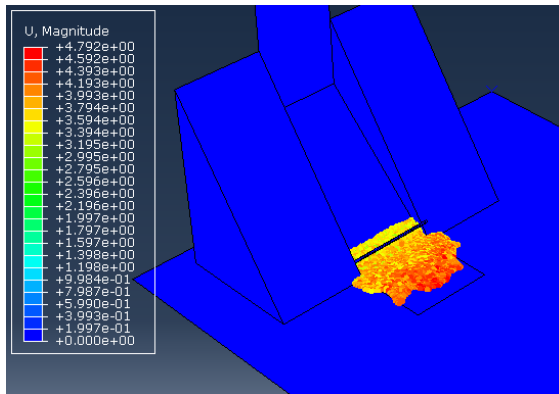
شکل (۳۲-۵) پیشروی بهمن (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری).

در ادامه، چهار نوع مانع (مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ سانتی متری، مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۴ سانتی متری، مانع بصورت بازشدگی و مانع سراسری) در مسیر بهمن قرار داده می شود تا تاثیر آن بر پیشروی و سرعت بهمن بررسی گردد (شکل (۳۱-۵) ب تا ث)). در شکل (۵-۲۰) مشخصات هر یک از موانع نشان داده شده است.

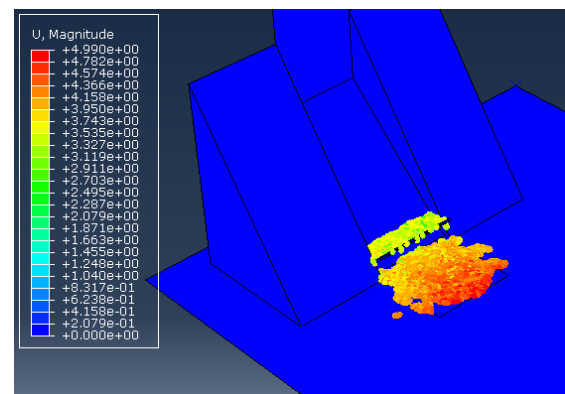
در شکل (۳۳-۵) میزان پیشروی بهمن در هر حالت نشان داده شده است. بهمن بعد از طی مسافت ۳/۴ متر بر روی شیب، در مدت زمان ۱ ثانیه، به مانع برخورد می کند و از آنجایی که موانع طوری طراحی نشده اند که جلوی پیشروی بهمن را بگیرند، بنابراین بعد از برخورد، بهمن دوباره به حرکت خود ادامه می دهد؛ البته مقداری از حجم بهمن (هم پودری و هم متراکم) در پشت موانع باقی می ماند. قابل ذکر است بهمن پودری در کلیه حالتها بیشترین میزان پیشروی را نسبت به هسته متراکم دارد.



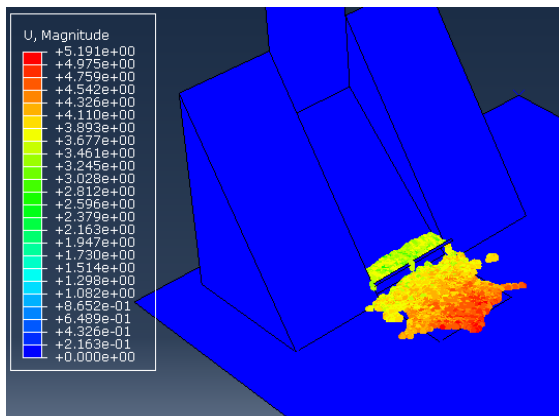
(الف)



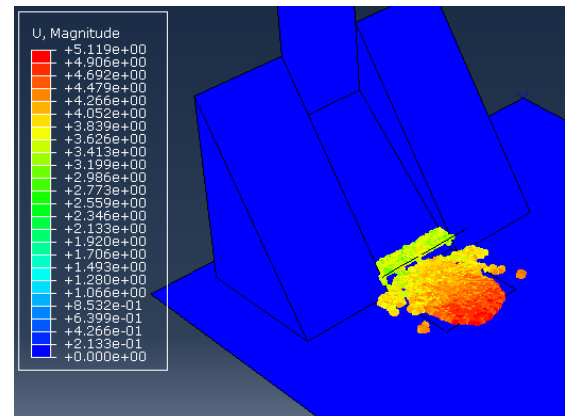
(پ)



(ب)



(ث)



(ت)

شکل (۵-۳۳) پیشروی بهمن پودری-متراکم. (الف) بدون مانع. (ب) موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر. (پ) موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر. (ت) مانع سراسری.

در جدول (۵-۵) نتایج شبیه‌سازی شامل میزان پیشروی و زمان توقف بهمن در هر حالت آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود حالت (پ) (موانع با فواصل ۴ سانتی‌متر)، (ب) (موانع با فواصل ۲ سانتی‌متر) و (ت) (مانع سراسری) باعث کاهش پیشروی بهمن به میزان ۳۹٪، ۳۰٪ و ۲۹٪ نسبت به



حالت (الف) (بدون مانع) می‌شوند.

جدول (۵-۵) زمان توقف و طول پیشروی هر حالت

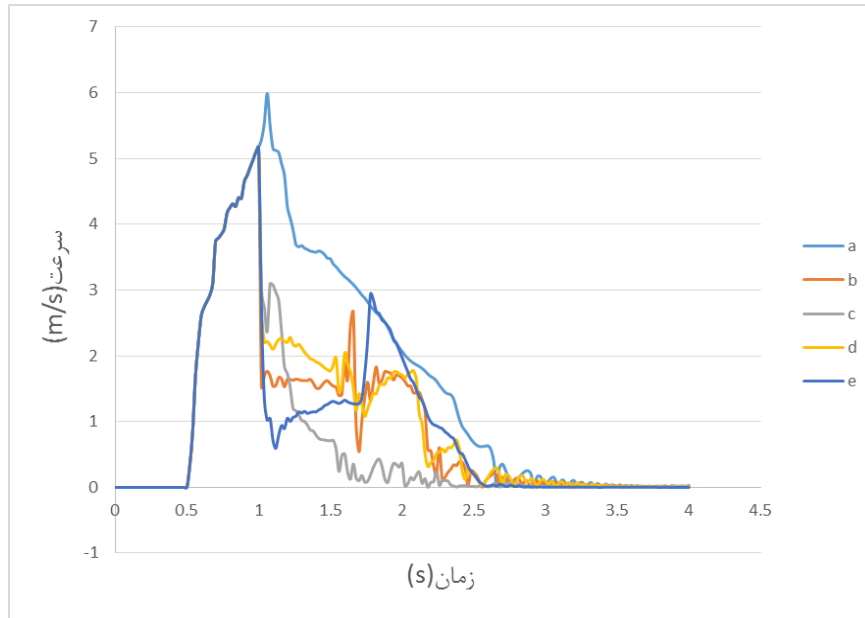
درصد پیشروی، %	طول پیشروی، m	زمان توقف، s	
۱۰۰	۶/۸۱	۲/۶	الف
۷۰	۴/۷۹	۲/۶	ب
۶۱	۴/۱۴	۲/۴	پ
۷۳	۵/۰۰	۲/۵	ت
۷۱	۴/۸۲	۲/۴	ث

برای این که اثر موانع مختلف بر سرعت بهمن بررسی شود، یک ذره معین از بهمن را مشخص کرده تا نرم‌افزار نمودار سرعت- زمان را تنها برای آن ذره نمایش دهد. در شکل (۵-۳۴) تغییرات سرعت برای موانع مختلف در آن ذره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشترین سرعت در حالت بدون مانع می‌باشد که برابر  $۵/۹۹ \text{ m/s}$  است.

محل قرارگیری موانع طوری انتخاب شده است که بهمن قبل از رسیدن به حداکثر سرعت به مانع برخورد کند؛ همانطور که از شکل مشخص است در زمان برخورد بهمن به مانع در  $t = ۱ \text{ s}$  دارای سرعت  $۵/۱۷ \text{ m/s}$  می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رود بهمن در برخورد با مانع سرعتش بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و از آنجائی که موانع طوری طراحی نشده‌اند که بطور کامل جلوی حرکت بهمن را بگیرند، سرعت بهمن بعد از برخورد با مانع مدت کوتاهی زیاد می‌شود اما همانگونه که مشاهده می‌شود سرعت بهمن همواره کمتر از حالت بدون مانع بوده و سیر نزولی دارد.

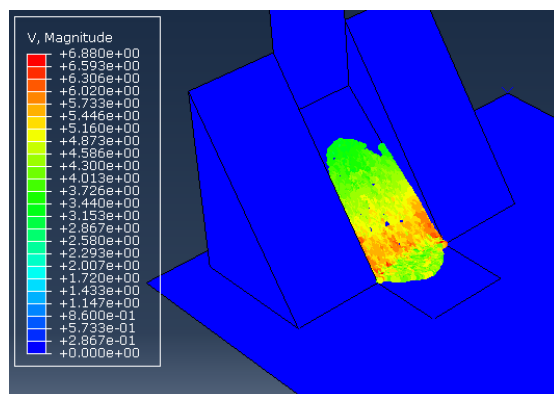
با توجه به نمودار، در لحظه برخورد بهمن به موانع سرعت در حالت (ث) (مانع سراسری) نسبت به حالت (الف) (بدون مانع)،  $۸۰\%$  کاهش یافته که این بیشترین میزان کاهش سرعت نسبت به حالت-های دیگر است. در این حالت بهمن در هنگام عبور از مانع سرعتش  $۶\%$  نسبت به حالت بدون مانع افزایش می‌یابد و در ادامه طول حرکت همواره کمتر از حالت بدون مانع می‌باشد. در حالت‌های (ب)

(موانع با فواصل ۲ سانتی متر) و (ت) (مانع بصورت بازشدگی) به ترتیب سرعت را به ترتیب ۷۰٪ و ۵۸٪ کاهش می دهند. از طرفی حالت (پ) (موانع با فواصل ۴ سانتی متر) می تواند گزینه مناسبی باشد زیرا سرعت را به تدریج (نه ناگهانی) کاهش می دهد.

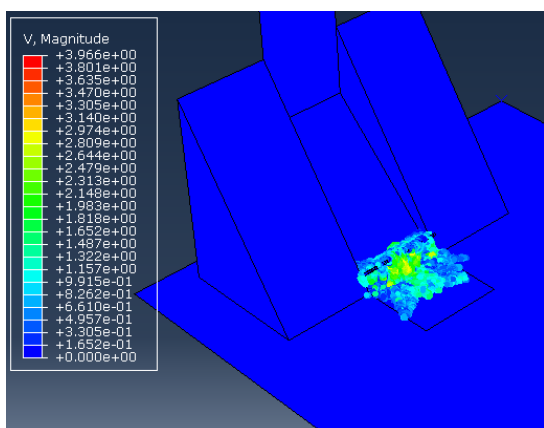


شکل (۵-۳۴) نمودار سرعت- زمان بهمن پودری- متراکم. (a) بدون مانع. (b) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. (c) موانع با فواصل ۴ سانتی متر. (d) مانع بصورت بازشدگی. (e) مانع سراسری.

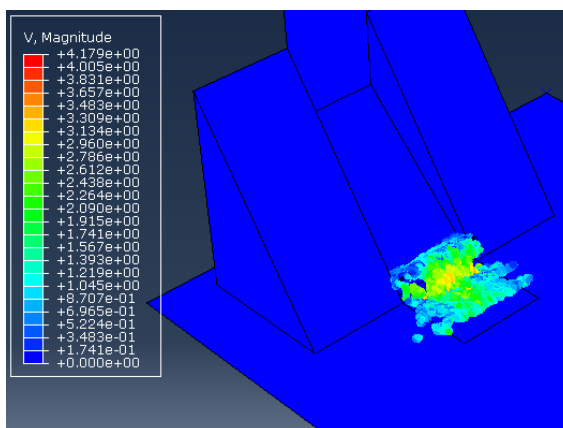
در شکل (۵-۳۵) کانتور تغییرات سرعت بهمن برای موانع مختلف نشان داده شده است. شکل (۵-۳۵-الف) سرعت بهمن را در لحظه عبور از سطح شیب دار (زمان  $t = 1/1s$ ) در حالت بدون مانع نشان می دهد. در سایر شکل ها نیز سرعت بهمن بعد از عبور از مانع در زمان  $t = 1/8s$  نشان داده شده است. بنابراین با بررسی نتایج فوق می توان دریافت که اگر فاصله مانع ها از یکدیگر کم باشد همانند مانع سراسری عمل می کنند و اگر زیاد باشد دیگر تاثیری بر سرعت و طول پیشروی بهمن ندارند. همچنین می توان به این نتیجه رسید که موانعی که به فاصله مناسب از هم قرار می گیرند می توانند سرعت و پیشروی بهمن را بطور مناسبی کاهش دهند.



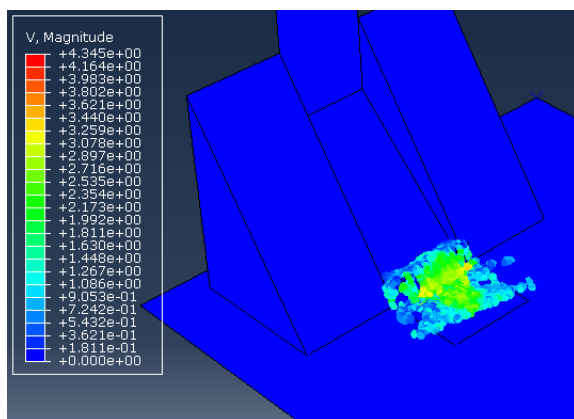
(الف)



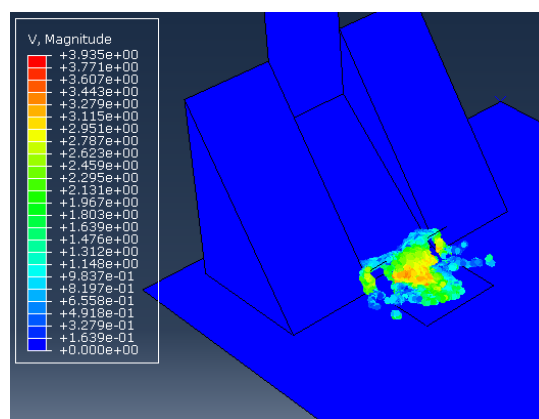
(پ)



(ب)



(ث)



(ت)

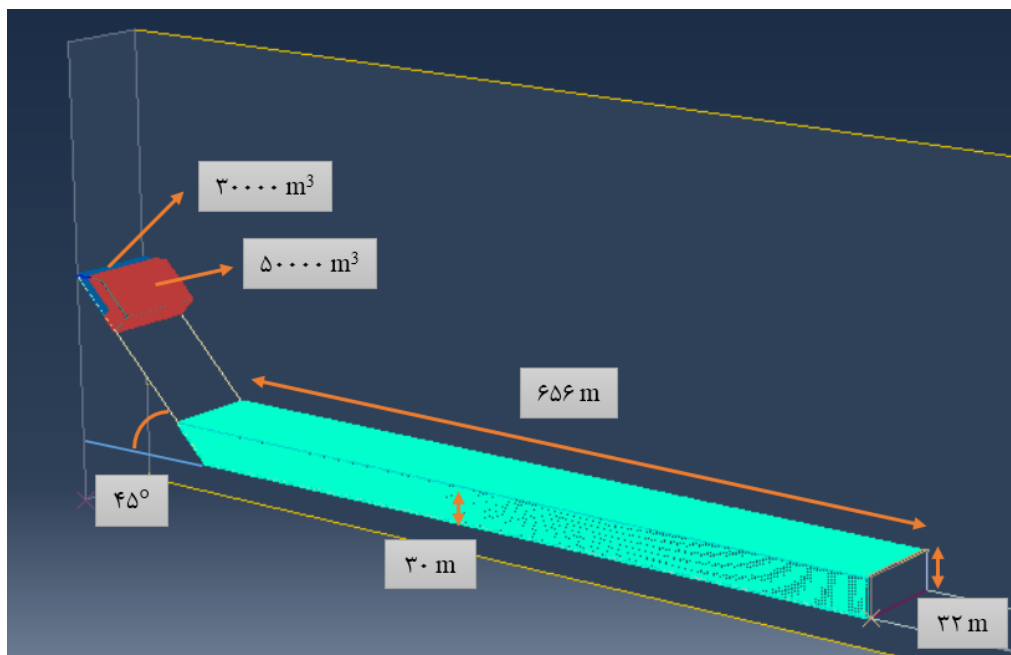
شکل (۵-۳۵) کانتور تغییرات سرعت بهمن پودری- متراکم. الف) بدون مانع. ب) موانع با فواصل ۲ سانتی متر. پ)

موانع با فواصل ۴ سانتی متر. ت) مانع بصورت بازشدگی. ث) مانع سراسری.

## ۵-۴-۲- برخورد بهمن پودری - متراکم به آب

همانگونه که گفته شد، حرکت بهمن می تواند برای مخازن آب خطرناک شود. بنابراین در ادامه

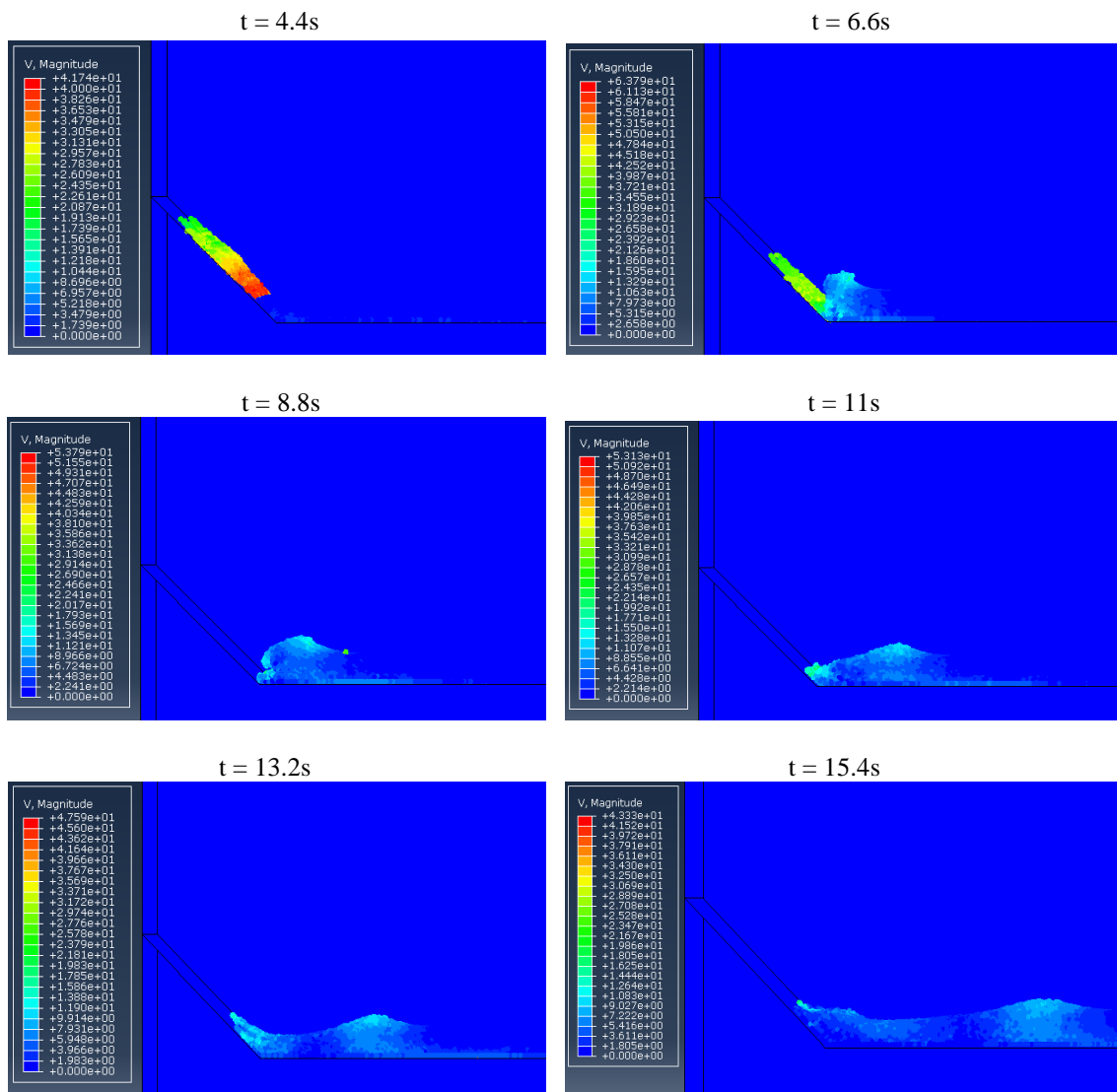
برخورد بهمن پودری- متراکم به سطح آب و موج ایجاد شده در اثر آن، مدلسازی می‌شود. در همین راستا توده برفی شامل هسته متراکم به حجم  $30000 \text{ m}^3$  که توسط ابری از ذرات برف به حجم  $50000 \text{ m}^3$  پوشیده شده بر روی سطح شیب‌دار  $45^\circ$  درجه‌ای قرار داده که در انتهای حرکت خود بر روی شیب به آب ساکنی به حجم  $80 \times 30 \times 656 \text{ m}^3$  که در پشت سد جمع شده است، برخورد می‌کند. شکل (۳۶-۵) موقعیت بهمن و آب را نشان می‌دهد.



شکل (۳۶-۵) نمایی از مسیر مدلسازی (رنگ آبی: برف متراکم، رنگ قرمز: برف پودری، رنگ سبز: آب).

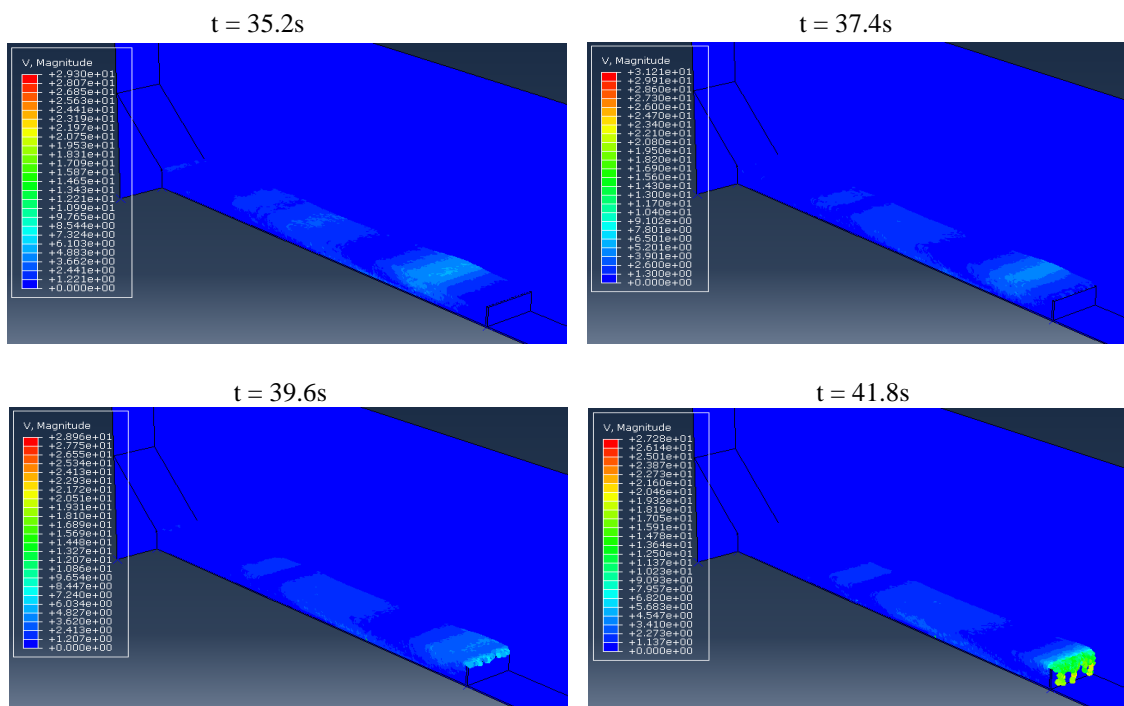
در اینجا بهمن شامل دو قسمت متراکم و پودری است که به ترتیب با استفاده از  $1680$  و  $3192$  ذره و همچنین آب با استفاده از  $81900$  ذره مدلسازی می‌شوند. بهمن از ارتفاع  $200$  متری در اثر نیروی وزن خود شروع به حرکت کرده و بعد از طی مسافت  $240$  متر در  $6$  ثانیه با سرعت  $\text{m/s}$   $41/73$  به سطح آب برخورد می‌نماید. در اثر این برخورد، موجی با ارتفاع  $25/41 \text{ m}$  در زمان  $t = 11 \text{ s}$  ایجاد می‌شود که با سرعت  $17/71 \text{ m/s}$  شروع به حرکت به سمت سد می‌کند. در حین پیشروی موج به سمت سد، از ارتفاع و سرعت آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t = 15/4 \text{ s}$ ، ارتفاع و سرعت موج به ترتیب برابر  $19/49 \text{ m}$  و  $14/46 \text{ m/s}$  می‌باشد. در شکل (۳۷-۵) سرعت حرکت بهمن بر روی شیب و

موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن با آب نشان داده شده است.



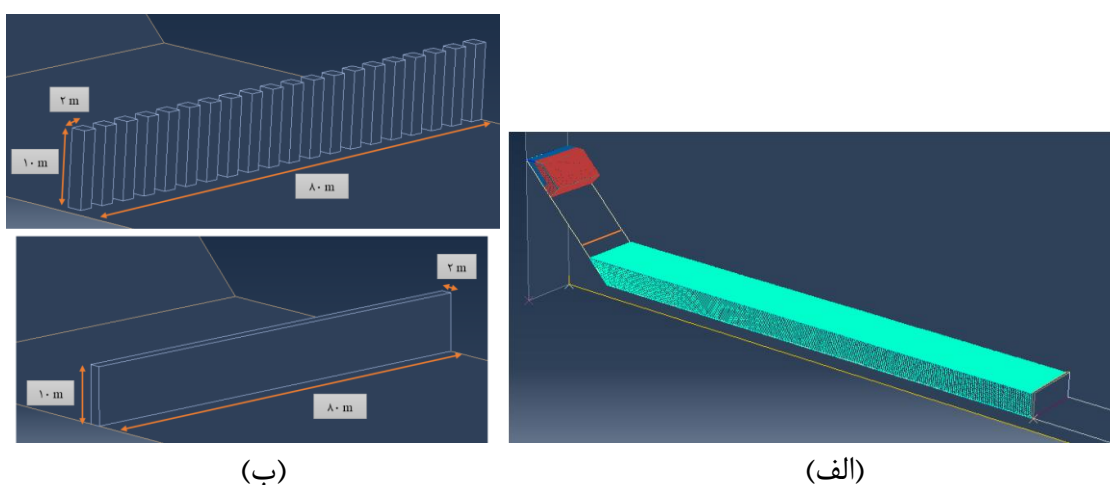
شکل (۵-۳۷) سرعت حرکت بهمن پودری- متراکم بر روی شیب و موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن با آب.

در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t = 35/2s$  سرعت و ارتفاع موج به ترتیب برابر  $10/99 \text{ m/s}$  و  $13/03 \text{ m}$  می‌باشد. موج به حرکت خود ادامه می‌دهد تا در نهایت در زمان  $t = 39/6s$  آب از سد سرریز می‌شود، در این لحظه سرعت و ارتفاع آب به ترتیب برابر  $9/66 \text{ m/s}$  و  $8/74 \text{ m}$  می‌باشد. شکل (۵-۳۸) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد را نشان می‌دهد.



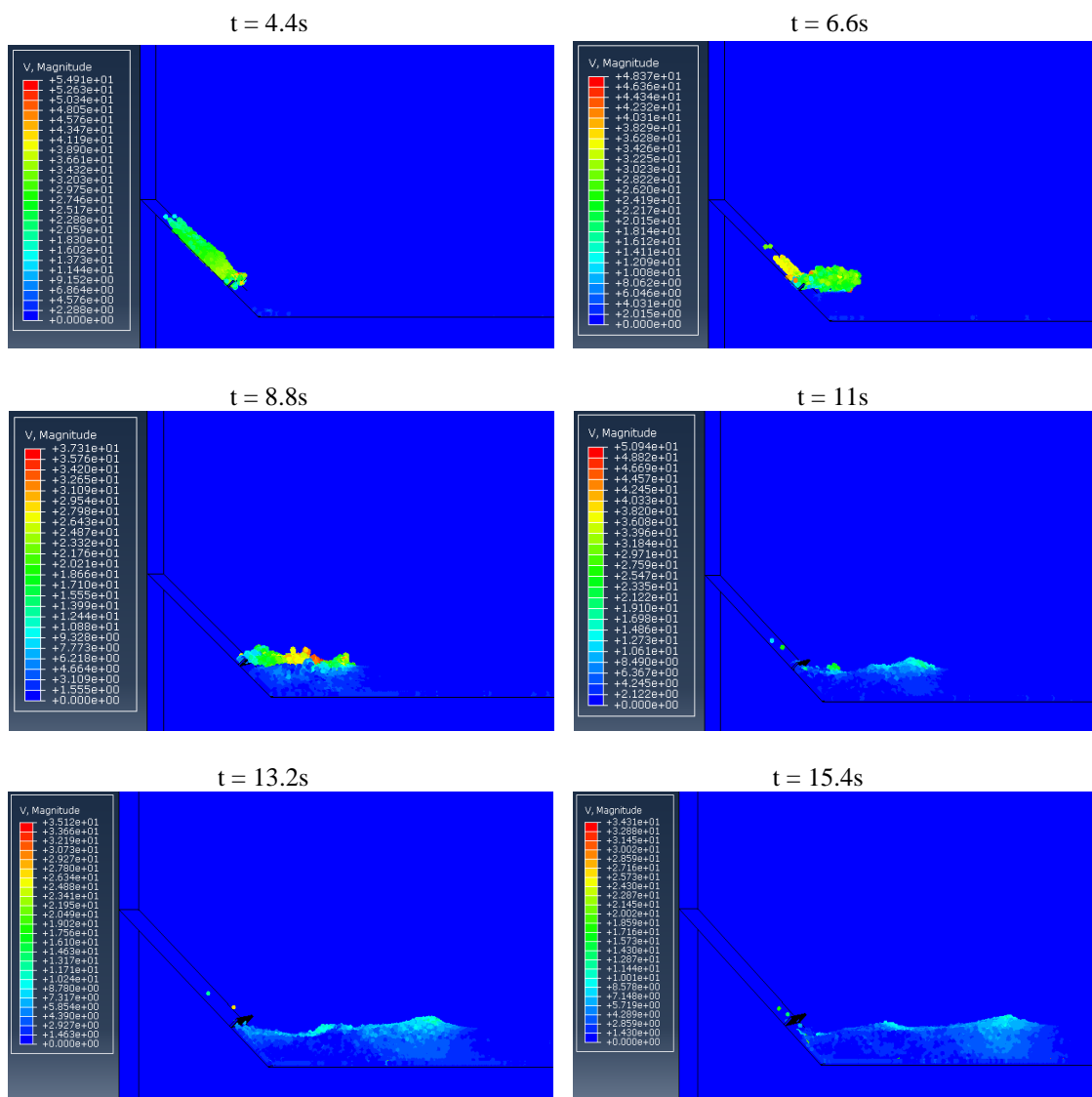
شکل (۳۸-۵) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد.

با بهره‌گیری از نتایج بخش قبل (۵-۴-۱)، مانع بصورت قطعات مجزا که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند، بهترین مانع می‌باشد؛ در این مدل‌سازی، مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری به مدل اولیه (شکل ۵-۳۶) اعمال می‌شود. هم‌چنین مانع سراسری را نیز به مدل اعمال کرده تا تاثیر آن را بر موج ایجاد شده و ارتفاع و سرعت آب در لحظه سرریز شدن، بررسی گردد. شکل (۵-۳۹) محل قرارگیری و شکل مانع را نشان می‌دهد.



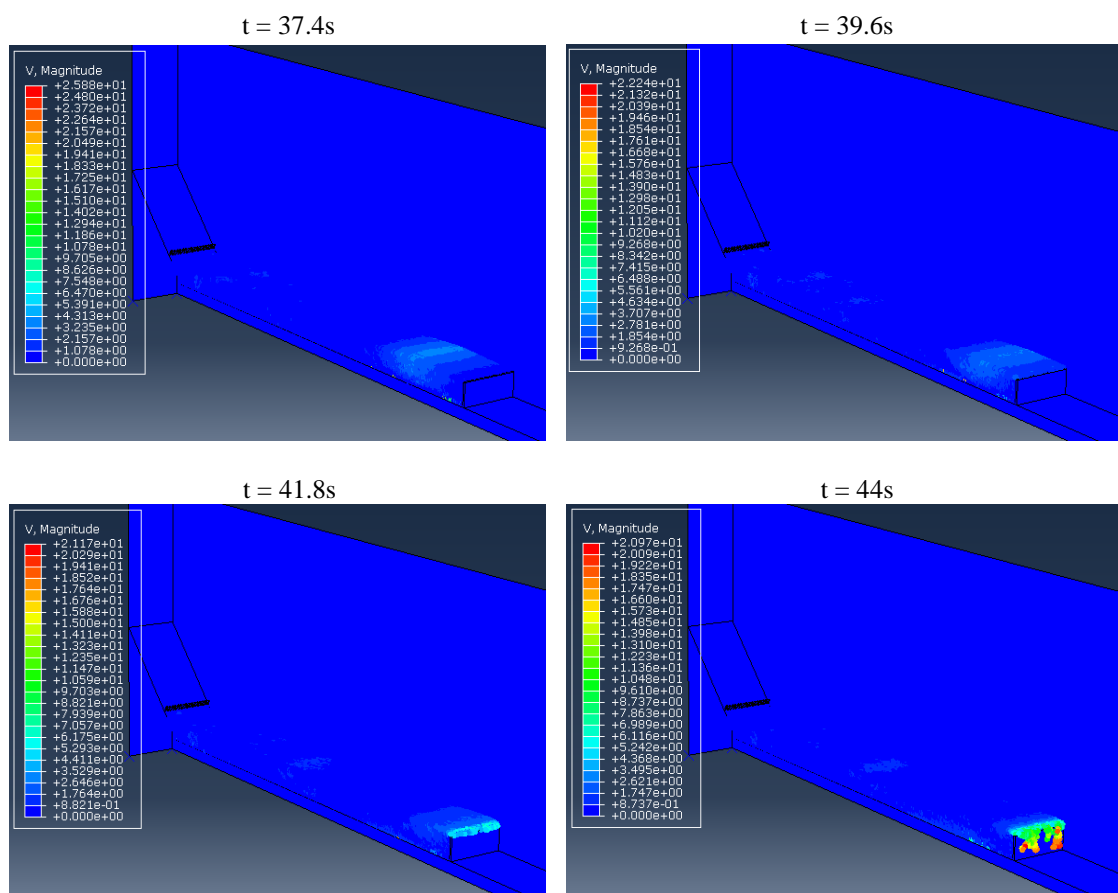
شکل (۵-۳۹) الف) نمای کلی مسیر مدل‌سازی (خط محل قرارگیری مانع). ب) شکل موانع.

در این مدل بهمن بر روی سطح شیب‌دار شروع به حرکت کرده و پس از طی مسافت ۱۷۸ متر در ۴/۲ ثانیه، با سرعت ۲۸/۵۵ m/s به مانع برخورد می‌کند. سرعت بهمن در برخورد با موانع با فواصل ۲ متری کاهش می‌یابد اما باز هم قادر است از فواصل مابین موانع به حرکت خود ادامه دهد. در نهایت بهمن با عبور از موانع در  $t = ۸/۸s$  با سرعت ۳۲/۲۵ m/s به سطح آب برخورد می‌کند؛ نتیجه آن ایجاد موجی با ارتفاع ۱۵/۰۷ m و سرعت ۱۳/۱۷ m/s در ثانیه  $t = ۱۳/۲s$  می‌باشد که در حال پیشروی به سمت سد است (شکل (۴۰-۵)).



شکل (۴۰-۵) برخورد بهمن پودری- متراکم به موانع با فواصل ۲ متر و سطح آب.

در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد، بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می‌شود، به طوری که در  $t = 37/4s$  سرعت و ارتفاع موج به ترتیب برابر  $8/62 \text{ m/s}$  و  $9/38 \text{ m}$  می‌باشد. موج به حرکت خود ادامه می‌دهد تا در نهایت در زمان  $t = 41/8s$  آب از سد سرریز می‌شود، در این لحظه سرعت و ارتفاع آب به ترتیب برابر  $7/07 \text{ m/s}$  و  $5/70 \text{ m}$  می‌باشد. شکل (۵-۴۱) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد را در موانع با فواصل ۲ متر نشان می‌دهد.

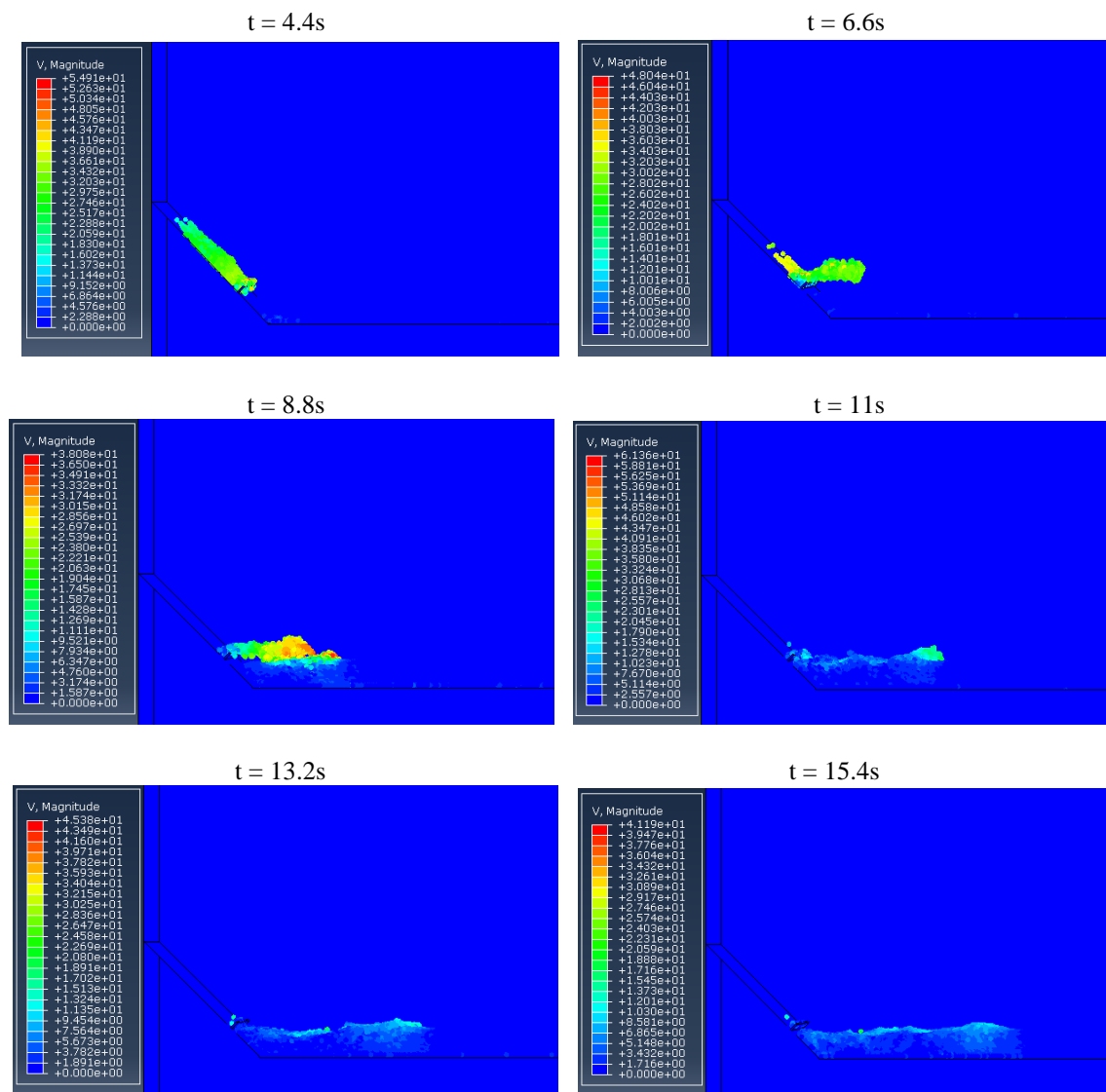


شکل (۵-۴۱) سرعت حرکت موج و لحظه عبور آب از سد در موانع با فواصل ۲ متر.

در ادامه مانع سراسری در فاصله ۱۷۸ متری ابتدای حرکت بهمن بر روی شیب قرار داده می‌شود، بطوری که بهمن بعد از  $4/2$  ثانیه با سرعت  $28/55 \text{ m/s}$  به مانع برخورد می‌کند. سرعت بهمن در برخورد با مانع سراسری کاهش می‌یابد اما باز هم قادر است از مانع عبور کرده و به حرکت خود ادامه دهد. در نهایت بهمن با عبور از مانع با سرعت  $38/50 \text{ m/s}$  به سطح آب برخورد می‌کند که نتیجه آن



ایجاد موجی با ارتفاع  $21/60$  m و سرعت  $15/13$  m/s می باشد و در حال پیشروی به سمت سد است (شکل (۴۲-۵)). در حین حرکت موج ایجاد شده، به سمت سد بتدریج از سرعت و ارتفاع آن کاسته می شود و نهایتاً آب با سرعت و ارتفاع،  $8/22$  m/s و  $7/00$  m از سد عبور می نماید.



شکل (۴۲-۵) برخورد بهمن پودری- متراکم به مانع سراسری و سطح آب.

در جدول (۶-۵) مقادیر پارامترهای سرعت بهمن، زمان رسیدن موج به سد، ارتفاع موج ایجاد شده، ارتفاع و سرعت آب در لحظه سرریز شدن در حالت های، بدون مانع و با مانع برای بهمن پودری- متراکم مشاهده می شود. همانطور که مشهود است سرعت بهمن در برخورد با مانع در هر ۲ متر حدود

۲۳٪ کاهش یافته که باعث می‌شود ارتفاع موج اولیه حدود ۴۱٪ کاهش یابد. از این‌رو ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب نیز به ترتیب حدود ۳۵٪ و ۲۷٪ کاهش داشته است.

همچنین سرعت بهمن در برخورد با مانع سراسری حدود ۸٪ کاهش دارد اما چون حجم بهمن برخوردی به آب در این حالت کمتر از بدون مانع است پس ارتفاع موج اولیه ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین ارتفاع و سرعت آب در لحظه عبور از سد به ترتیب ۲۰٪ و ۱۵٪ کاهش یافته است.

جدول (۵-۶) خروجی‌های شبیه‌سازی

مانع سراسری	مانع هر ۲ متر	بدون مانع	
۳۸/۵۰	۳۲/۲۵	۴۱/۷۴	سرعت بهمن در هنگام برخورد با آب (m/s)
۴۲/۵	۴۲/۵۰	۴۰/۵۰	زمان رسیدن موج به سد (s)
۲۱/۶۰	۱۵/۰۷	۲۵/۴۱	ارتفاع موج ایجاد شده (m)
۷/۰۰	۵/۷۰	۸/۷۴	ارتفاع آب در هنگام سرریز شدن (m)
۸/۲۲	۷/۰۷	۹/۶۶	سرعت آب در هنگام سرریز شدن (m/s)

## ۵-۵- نتایج

در اینجا نتایج مدل‌سازی‌ها بطور مختصر آورده می‌شود.

❖ بهمن پودری:

- کاهش میزان پیشروی بهمن در برخورد با موانع مختلف بین ۱۸ تا ۲۸ درصد
- کاهش سرعت بهمن در لحظه برخورد به موانع مختلف بین ۵۵ تا ۶۷ درصد
- انتخاب موانعی که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند بعنوان بهترین موانع در کاهش سرعت و پیشروی

- ایجاد مانع سراسری و مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری، در مدل برخورد بهمن با آب جمع شده در پشت سد:

▪ مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری: کاهش سرعت بهمن در برخورد با آب، ارتفاع موج اولیه، ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد به ترتیب ۲۱٪، ۳۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ نسبت به حالت بدون مانع

▪ مانع سراسری: کاهش سرعت بهمن در برخورد با آب، ارتفاع موج اولیه، ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد به ترتیب ۷٪، ۲۳٪، ۱۰٪ و ۱۶٪ نسبت به حالت بدون مانع

❖ بهمن پودری - متراکم:

- کاهش میزان پیشروی بهمن در برخورد با موانع مختلف بین ۲۶ تا ۳۹ درصد

- کاهش سرعت بهمن در لحظه برخورد با موانع مختلف بین ۵۵ تا ۸۰ درصد

- انتخاب مانع سراسری و موانعی که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند بعنوان بهترین موانع در کاهش سرعت و پیشروی

- ایجاد مانع سراسری و مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری، در مدل برخورد بهمن با آب جمع شده در پشت سد:

▪ مانع بصورت قطعات مجزا با فواصل ۲ متری: کاهش سرعت بهمن در برخورد با آب، ارتفاع موج اولیه، ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد به ترتیب ۲۳٪، ۴۱٪، ۳۵٪ و ۲۷٪ نسبت به حالت بدون مانع

▪ مانع سراسری: کاهش سرعت بهمن در برخورد با آب، ارتفاع موج اولیه،

ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد به ترتیب ۸٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۱۵٪

نسبت به حالت بدون مانع

## فصل ششم

### نتایج و پیشنهادها

## ۶- نتایج و پیشنهادها

### ۶-۱- مقدمه

در این بخش با توجه به مباحث فصل‌های گذشته، به جمع بندی نتایج کلی پرداخته می‌شود. در پایان نیز پیشنهادات برای مطالعات آتی معرفی می‌گردند.

### ۶-۲- نتیجه‌گیری

- مدلسازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) انجام گرفته و با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی، مشاهده شد که همخوانی بسیار مناسبی بین آنها وجود دارد و می‌توان از نرم‌افزار آباکوس برای مدلسازی پدیده بهمن استفاده نمود.
- با بررسی نتایج مدلسازی بهمن پودری و بهمن پودری- متراکم (بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف پوشیده شده) این نتیجه بدست آمد که در شرایط یکسان، سرعت و طول پیشروی بهمن پودری نسبت به بهمن پودری- متراکم بیشتر می‌باشد.
- نتایج بدست آمده از برخورد بهمن به سطح آب و سرریز شدن آب از سد، حاکی از این اصل است که در شرایط یکسان، ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد و هم‌چنین ارتفاع و سرعت موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن پودری- متراکم به آب نسبت به بهمن پودری کمتر می‌باشد.
- با مدلسازی بهمنی با هسته متراکم که توسط ابری از ذرات برف پوشیده شده (بهمن پودری- متراکم) این نتیجه مشخص گردید که ابر پودری در طول مسیر حرکت، همواره سرعت و پیشروی بیشتری نسبت به هسته متراکم دارد.

- با قرار دادن موانع گوناگون (مانع بصورت قطعات مجزا که به فاصله مناسب از هم قرار دارند، مانع بصورت بازشدگی و مانع سراسری) مشاهده شد که استفاده از موانع در مسیر تاثیر بسزایی در کاهش طول پیشروی و سرعت بهمن در هر دو حالت بهمن پودری و بهمن پودری- متراکم دارند.
- با بررسی نتایج روشن می‌شود که مانع بصورت قطعات مجزا که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند، بیشترین تاثیر را در کاهش سرعت و پیشروی بهمن دارند.
- در واقعیت می‌توان این موانع را مانند درختانی در نظر گرفت که اگر خیلی به هم نزدیک باشند همانند مانع سراسری عمل می‌کنند. پس با کاشت درختان در فواصل مناسب می‌توان سرعت و پیشروی بهمن را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.
- با بررسی نتایج مشخص می‌گردد که مانع سراسری و موانعی که به فاصله مناسب از هم قرار می‌گیرند، در ارتفاع و سرعت سرریز شدن آب از سد و هم‌چنین ارتفاع و سرعت موج ایجاد شده در اثر برخورد بهمن به آب تاثیر بسزایی داشته و باعث کاهش این پارامترها در صورت رخداد پدیده‌های بهمن پودری و بهمن پودری- متراکم می‌شود.

### ۳-۶- پیشنهاد برای مطالعات آتی

- همانگونه که اشاره شد در این پایان‌نامه بهمن پودری و پودری- متراکم شبیه‌سازی شده است. از آنجائیکه گونه‌های دیگری از بهمن همانند جریان بهمن نیز وجود دارد، می‌توان در تحقیقات آینده بر روی مدل‌سازی آن و بررسی سرعت و میزان پیشروی آن در برخورد با موانع مختلف، مطالعات بیشتر نمود.
- در مدل‌سازی‌ها فرض شده بود که ذرات برف از سطح شیب‌دار وارد توده بهمن نمی‌شود. در مدل‌سازی‌های آینده می‌توان اثر ورود این ذرات از روی سطح شیب‌دار را نیز بررسی نمود.

- در این پایان نامه از روش SPH برای مدلسازی‌ها استفاده شد، همانگونه که اشاره شد روش‌های بدون مش دیگری نیز موجود است که می‌توان مدلسازی‌ها را با آن انجام داد و نتایج را با نتایج به دست آمده در این پایان نامه مقایسه کرد.
- در مدلسازی‌ها بهمن بر روی سطحی با شیب ۴۵ درجه حرکت می‌کند، در مطالعات آتی می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای دیگر، مدلی از یک کوه واقعی را وارد محیط آباکوس نمود و شبیه‌سازی‌ها را بر روی آن مدل انجام داد.



## منابع

[1] Foster N., Fedkiw R. (2001), "Practical animation of liquids", Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp 23-30, New York.

[2] Fedkiw R., Stam J., Jensen H. W. (2001), "Visual simulation of smoke", Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp 15-22, New York.

[3] Nguyen D. Q., Fedkiw R., Jensen H. W. (2002), "Physically based modeling and animation of fire", ACM Trans. Graph., 21, pp 721-728.

[4] Dutykh D., Acary-Robert C., Bresch D. (2011), "Mathematical modeling of powder-snow avalanche flows", Studies in Applied Mathematics.

[5] Ancey C. (2001), "Snow Avalanches", Geomorphological Fluid Mechanics: Selected Topics in Geological and Geomorphological Fluid Mechanic, 582, pp 319-338.

[6] Bovet E. (2012), PhD thesis, "Mechanics of snow avalanches and interaction with structures", Politecnico di Torino, Italy.

[7] Balmforth N. J., Provenzale A., "Geomorphological fluid mechanics", pp 322.

[8] Sen Nag O. (2017), "WORDAtlas.com". <http://www.worldatlas.com/articles/deadliest-avalanches-in-history.html>

[۹] باشگاه خبرنگاران جوان، "ریزش مرگبار بهمن در حوالی پیست اسکی"، کد خبر: ۵۱۱۸۸۴۵، ۱۲ بهمن ۱۳۹۳.

[۱۰] پاکزاد پ.، ایرنا، "سقوط بهمن در سردشت ۴ کشته بجا گذاشت"، کد خبر: ۸۲۴۰۶۸۴۲ (۵۸۰۵۴۸۲)، ۱۰ بهمن ۱۳۹۵.

[۱۱] خبرگزاری صدا و سیما مرکز آذربایجان غربی، "۴ کشته در حادثه سقوط بهمن در خوی"، کد خبر: ۱۵۶۴۵۱۰، ۲ فروردین ۱۳۹۶.

[۱۲] خبرگزاری ایسنا، "سقوط بهمن در روستای برده سور ارومیه"، کد خبر: ۹۵۱۱۲۸۱۹۷۲۱، ۲۸ بهمن ۱۳۹۵.

[۱۳] سایت الف، "عظیم‌ترین بهمن جهان در جاده هراز"، ۵ فروردین ۱۳۹۳.

[۱۴] خبرگزاری مهر، "ریزش بهمن در محور هراز".

[۱۵] شهروند خیرنگار استان البرز، "بهمن تلخ البرز در پر تردد ترین جاده کشور/کرج - چالوس دستخوش ۴۰ بهمن در یک روز!"، کد خبر: ۲۳۵۰۸، ۱۱ بهمن ۱۳۹۵.

[16] Abdelrazek A. M., Kimura I., Shimizu Y. (2014), "Numerical simulation of a small-scale snow avalanche tests using non-Newtonian SPH model", River Flow 2014, pp 681-690.

[17] Beghin P., Olagne X. (1991), "Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches", Cold Regions Science and Technology, 19(3), pp 317-326.

[18] Sovilla B., Burlando P., Bartelt P. (2006), "Field experiments and numerical modeling of mass entrainment in snow avalanches", J. Geophys. Res., 111 (F3), F03007.

[19] Gauer P., Kern M., Kristensen K., Lied K., Rammer L., Schreiber H. (2007), "On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics", Cold Reg. Sci. Technol., 50 (1), 55-71.

[20] Hopfinger E.J., Tochon-Danguy J.C. (1997), "A model study of powder-snow avalanches", Journal of Glaciology, 19(81), pp 343-356.

[21] Hermann F., Hutter K. (1991), "Laboratory experiments on the dynamics of powder-snow avalanches in the run-out zone", Journal of Glaciology, 37(126), pp 281-295.

[22] Bozhinskiy A.N., Sukhanov L.A. (1991), "Physical modelling of avalanches using an aerosol cloud of powder materials", Annals of Glaciology, 26, pp 242-246.

[23] Monaghan J. J., Cas R. A. F., Kos A. M., Hallworth M. (1999), "Gravity currents descending a ramp in a stratified tank", Journal of Fluid Mechanics, 379, pp 39-69.

[24] McElwaine J., Nishimura k. (2001), "Ping-pong ball avalanche experiments", Annals of Glaciology, 32, pp 241-250.

[25] Wan Z. H., Wang Z. Y. (1994), "Hyperconcentrated Flow, IAHR Monograph".

[۲۶] ویکی جزوه، مکانیک سیالات، آشنایی با سیال، رده: سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی.

<https://fa.wikibooks.org/wiki>

[27] Yndestad, L. K. (2011), Master, thesis, "Particle-based Powder-snow Avalanche Simulation Using GPU", Norwegian University of Science and Technology.

[28] Kern M. A., Tiefenbacher F., and McElwaine J. N. (2004), "The rheology of

snow in large chute flows”, *Cold Regions Science and Technology*, 39(23), pp 181-192.

[29] Gourlay M. J. (2011), “Fluid simulation for video games”.

[30] Oremus R. M. (2006), Master's Thesis, “A one-dimensional model of dense snow avalanches using mass and momentum balances”, The Faculty of Humboldt State University.

[31] Gucer D., Ozguc H. B. (2014), “Simulation of a flowing snow avalanche using molecular dynamics”, *Turk J Elec & Comp Sci*, 22, pp 1596-1610.

[32] Sampl P., Granig M. (2009), “Avalanche Simulation with SAMOS-AT”, *International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings*, pp 519-523.

[33] Tsuda Y., Yue Y., Dobashi Y. (2010), “Visual simulation of mixed-motion avalanches with interactions between snow layers”, *Vis Comput*, 26, pp 883-891.

[34] Etienne J., Rastello M., Hopfinger E. J. (2006), “Modelling and Simulation of Powder-Snow Avalanches”, *C. R. Mechanique* 334, pp 545-554.

[35] Calgaro C., Creuse E. and Goudon T. (2015), “Modelling and Simulation of Mixture Flows: Application to Powder-Snow Avalanches”, *Computers & Fluids*, 107, pp 100-122.

[36] Kato, H., Otsuki, M., Saito, N., Shimizu, Y., Kimura, I. (2012), “Refinement of MPS Method for Practical Application on Large Scale Snow Avalanches”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), pp 1231-1236.

[37] Gabl R., Seibl J., Gems B., Aufleger M. (2015), “3-D-numerical approach to simulate an avalanche impact into a reservoir”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, pp 4121-4157.

[38] Lucy L. B. (1997), “A numerical approach to testing the fission hypothesis”, *The Astronomical Journal*, 82(12), pp 1013-1024.

[39] Gingold R. A., Monaghan J. J. (1977), “Smoothed particle hydrodynamics - theory and application to non-spherical stars”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 181, pp 375-389.

[40] Monaghan J. J. (1994), “Simulating Free Surface Flows with SPH”, *Journal of Computational Physics*, 110, pp 399-406.

[41] Monaghan J. J., Lattanzio J. C. (1985), “A refined particle method for astrophysical problems”, 149, pp 135-143.

[42] Morris J. P. (1996), “A study of the stability properties of smooth particle

hydrodynamics”, 13, pp 97-102.

[43] Johnson G. R., Stryk R. A., Beissel S. R. (1996), “Sph for high velocity impact computations”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1-4), pp 347-373.

[44] Liu M. B., Liu G. R., Lam K. Y. (2003), “Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 155(2), pp 263-284.

[45] Müller M., Charypar D., Gross M (2003), “Particle-based fluid simulation for interactive applications”, In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp 154-159.

[46] Kelager M. (2006), Master, thesis, “Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics”, Department of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark.

[47] Enright D., Marschner S., Fedkiw R. (2002), “Animation and rendering of complex water surfaces”, *ACM Trans. Graph.*, 21, pp 736-744.

[48] Solenthaler B., Pajarola R. (2009), “Predictive-corrective incompressible sph”, *ACM Trans. Graph.*, 28(40), pp 1-6.

[49] Desbrun M., Gascuel M. P. (1996), “Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies”, pp 61-76.

[50] Monaghan J. J. (2005), “Smoothed particle hydrodynamics”, *Reports on Progress in Physics*, 68(8), pp 1703-1759.

## **Abstract**

Avalanche is a mass of snow, which suddenly and quickly starts to fall down a mountainside on the slope because of the gravity or external forces such as explosion. This natural phenomenon often occurs in mountain areas, especially in winter, and causes a lot of damage every year in Iran and in the world to visitors or those who live in the cold mountainous areas. Therefore, recognizing the avalanche flowing and movements can provide solutions to reduce its damage. In this thesis, avalanche has been simulated as a powder-snow avalanche (cloud consisting of two fluids with different properties) and avalanche consisting of a dense core of snow that is covered by powder snow (dense-powder avalanche) by using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method and by using the ABAQUS® software.

SPH is a meshless Lagrangian method, which presents the fluid through a set of particles instead of mesh in which each particle has its own place, velocity and mass. In this thesis, avalanche is simulated as a mass of snow, which starts to move on the slope because of the gravity force and only applied frictional force to the avalanche. Finally, effect of the obstacles on the progression and velocity of avalanche has been investigated. At last, the obstacle that causes the greatest reduction in speed and progression of avalanche has been chosen. As it is seen, using obstacle in the separated form reduces the velocity and progression length of the avalanche. However the space between obstacles must be chosen in a way to have the biggest influence.

Sometimes due to the existence of water at the end of the slope, when avalanche impacts to the water, it makes a wave and it causes overflowing of water from a dam, which can be a serious threat for towns, roads and infrastructures in downstream. In this thesis at first, the motion of avalanche on slope, created wave by impact of avalanche with water and velocity and height of water at the moment of crossing the dam have been simulated. Then according to the obtained results, global obstacle and obstacle in the separated form has been used in this model. In each case avalanche velocity at the moment of impactation, wave's height, height and velocity of water at the moment of crossing the dam are compared with no obstacle case.

**Keywords : avalanche, obstacle, ABAQUS®, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method**



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

**Numerical modeling of avalanche**

**By : Mahtab Fayaz Torshizi**

**Supervisor:**

**Dr. R. Naderi**

**September-2017**