

به نام خداوند جان و خرد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدلسازی عددی سازه های مدفون تحت بارگذاری انفجار

نگارنده: مرتضی الطافی

استاد راهنما

دکتر رضا نادری

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۸۸۳۲
تاریخ: ۱۵/۱۲/۹۶

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 آقای مرتضی الطافی با شماره دانشجویی ۹۲۰۲۴۹۴ رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی تحت عنوان مدلسازی عددی سازه های مدفون تحت بارگذاری انفجار که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ درجه)
 مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیات 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: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



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

تقدیم نامہ

این پیمان نامہ را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

- محضر ارزشمند پرومادر عزیزم به خاطر برتری تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونگی زیستن را به من آموخته اند.

- به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرایاری نمودند.

- به آمان که در راه کسب دانش را به ما هدایت نمودند.

- به آمان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه می رانند.

- الهام به من نگاه کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته های آمان جامه می عمل پوشانم.

- پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آمان مقدر نما.

- خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همجو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کنمنال عنایت بفرما

پاس‌گزاری

کمال شکر و قدردانی را از استاد دکتر تقدیر جناب آقای دکتر رضاناوری دارم که همواره مسیر را برای رسیدن به هدف برای بنده هموار ساختند. همچنین از استادان دلسوز جناب آقای دکتر بزرگافشان و جناب آقای دکتر کرامتی که زحمات داوران را متقبل شدند کمال شکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **مرتضی الطافی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران-گرایش خاک و پی** دانشکده **عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدلسازی عددی سازه های مدفون تحت بارگذاری انفجار تحت راهنمایی استاد رضا نادری** متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

یکی از مباحث مهم در بحث طراحی و ساخت سازه‌ها، مقاوم سازی آنها در برابر بارهای دینامیکی وارده بر آنها می‌باشد. یکی از این بارهای دینامیکی که ماهیت غیر خطی و پیچیده‌ای را دارد، بارهای انفجاری می‌باشد. در عصر حاضر با افزایش حملات تروریستی به سازه‌ها و ساختمان‌های پرجمعیت که گاهی نیز جنبه دولتی و سیاسی دارد، این موضوع بیشتر مورد توجه مهندسين و طراحان سازه قرار گرفته است. گاهاً با قرار دادن چند کیلوگرم ماده منفجره در نقاط حساس ساختمانها که بارهای اصلی سازه را تحمل می‌کند، می‌توان خسارات جبران ناپذیری به آن سازه وارد کرد. از سوی دیگر پدیده‌های طبیعی مانند انفجار گاز و یا آتش سوزی نیز می‌توانند بارهای مشابه‌ای را به سازه وارد کنند. این موارد دلایلی کافی برای توجه بیشتر به علم مقاوم سازی سازه‌ها در برابر بارهای گوناگون وارده بر آنها می‌باشد.

خوشبختانه با پیشرفت روزافزون علم و قدرت کامپیوترها این موضوع در مسیری با سرعت بیشتر قرار گرفته است. در این زمینه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی مختلفی اعم از آباکوس، انسیس، اتوداین، ال‌اس‌داین و ... رونمایی شده‌اند که به کمک آنها می‌توان موارد ذکر شده را شبیه‌سازی، تحلیل و بررسی کرد. این امر به کاهش هزینه، پیش‌بینی دقیقتر، راحتتر و سریعتر این امر کمک می‌کند.

با این دیدگاه در این پایان نامه به بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر روی تونل‌های زیرزمینی پرداخته می‌شود. همانطور که می‌دانیم تونل‌ها، از جمله تونل‌های مترو، زیرگذر، روگذر و ... در دنیای امروز زیاد کاربرد دارند و اکثر آنها جمعیت زیادی را در خود قرار می‌دهند و در مقابل نوع و زمان دسترسی به سطح زمین در آنها اهمیت مقاوم بودن آنها را در برابر بارهای گوناگون بیشتر می‌کند. در این پایان‌نامه اثر ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT را در اعماق ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از سطح زمین بر تونل زیرزمینی با استفاده از نرم افزار اتوداین مورد تحلیل قرار گرفته است. برای مدلسازی از روش بدون شبکه SPH استفاده کردیم. پس از تحلیل نمودارهای فشار، تنش و جابجایی مربوط به هرکدام از حالتها را مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه این نمودارها رابطه مستقیم اثر انفجار با جرم ماده منفجره و رابطه معکوس آن را با عمق انفجار نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری، تونل، SPH، شبیه‌سازی عددی.

فهرست مطالب

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۱- هدف از تحقیق	۳
۲-۱- ضرورت تحقیق	۳
۳-۱- روش تحقیق	۳
۴-۱- استفاده کنندگان از نتایج پایان نامه	۴
۵-۱- فصل بندی	۴
۱-۲- تعریف انفجار	۸
۲-۲- انواع انفجار	۸
۳-۲- مراحل انفجار	۸
۴-۲- آثار انفجار	۹
۵-۲- انتشار ترکش ها	۹
۶-۲- امواج دینامیکی	۱۰
۷-۲- امواج حرارتی	۱۰
۸-۲- آسیب‌های ناشی از انفجارهای متعارف در محیط‌های مسکونی	۱۱
۹-۲- ویژگی‌های انفجار	۱۲
۱۰-۲- قدرت انفجاری	۱۲
۱۰-۲- منظر کلی آسیب ناشی از انفجار	۱۳
۱۱-۲- گرمای انفجار	۱۴
۱۲-۲- انرژی انفجار	۱۶
۱۳-۲- آنتروپی انفجار	۱۷
۱۴-۲- قدرت انفجار (تخمین برتلوت)	۱۸

۱۹	۱۵-۲- معادلات حالت گاز ایده‌آل
۱۹	۱۶-۲- تولید موج شوک
۲۱	۱۷-۲- برخوردها و امواج شوک
۲۱	۱۷-۲- شوک در سطح مشترک حالت الف ($Z_B > Z_A$)
۲۴	۱۷-۲- شوک در سطح مشترک ماده حالت ب ($Z_A > Z_B$)
۲۸	۱-۳- مقدمه
۳۰	۲-۳- روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۳۱	۳-۳- اساس روش ذرات هموار متحرک SPH
۳۴	۴-۳- توابع وزن SPH
۴۲	۵-۳- محاسبه مقدار مشتق اول توابع با استفاده از روش SPH
۴۴	۵-۳- محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر در روش SPH
۴۵	۶-۳- شرط هم رفتاری
۴۵	۷-۳- روش هیدرودینامیک ذرات هموار اصلاح شده CSPM
۴۸	۸-۳- روش‌های دیگر از هیدرودینامیک ذرات هموار
۴۸	۹-۳- شرایط مرزی
۴۹	۱۰-۳- اعمال شرایط مرزی، پایدارسازی و بهبود عملکرد روش SPH
۴۹	۱۰-۳-۱- عدم دقت در اعمال شرایط مرزی (تاریخچه)
۵۱	۱۰-۳-۲- تکنیک‌های پایدارسازی
۵۵	۱۱-۳- هیدرودینامیک انفجار در روش SPH
۵۶	۱۲-۳- فرمول‌بندی SPH برای معادلات ناویر - استوکس
۵۶	۱۲-۳-۱- تقریب چگالی ذرات
۶۱	۱۲-۳-۲- تقریب مومنتوم (اندازه حرکت) ذرات
۶۴	۱۲-۳-۳- تقریب انرژی ذرات

۷۰	۱-۴- واکنش تونل خسته شده به وسیله روش ترکیبی SPH-FE
۷۰	۲-۴- مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اوپلری و لاگرانژی در مدلسازی انفجار در آب
۷۱	۳-۴- شبیه سازی امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (I-SPH)
۷۲	۴-۴- مروری بر روش های عددی شبیه سازی موج بلست انفجار
۷۳	۵-۴- شبیه سازی و مدلسازی Peridynamics-SPH از تقسیم بندی انفجار خاک تحت بارهای انفجاری دفن شده
۷۳	۶-۴- بهبود روش بدون المان SPH در حل سیستم های دینامیکی
۷۶	۱-۵- مدلسازی انفجار
۸۳	۲-۵- اثر بارگذاری بر بخش های مختلف تونل
۹۳	۳-۵- بررسی اثر انفجار بر بارگذاری در سقف تونل
۹۶	۴-۵- نحوه توزیع فشار بر بخش های مختلف تونل
۱۰۱	۵-۵- تاریخچه فشار ثبت شده
۱۰۷	۶-۵- تاریخچه سرعت و جایجایی
۱۱۴	۷-۵- تاریخچه تنش وان میس
۱۲۸	۱-۶- نتیجه گیری
۱۲۹	۲-۶- پیشنهادات
۱۳۰	منابع

فهرست اشکال

۱۳	شکل ۱-۲: دیاگرام فشار-زمان برای یک موج انفجار.....
۱۴	شکل ۲-۲: منظر کلی آسیب ناشی از یک موج انفجار.....
۱۹	شکل ۳-۲: دینامیک تولید موج شوک توسط یک پیستون.....
۲۰	شکل ۴-۲: توزیع فشار در طول سیلندر، منطبق با شکل ۲-۳ در حین حرکت پیستون.....
۲۳	شکل ۶-۲: دیاگرام $x-t$ برای شوک در سطح مشترک مواد.....
۲۴	شکل ۷-۲: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $(Z_A > Z_B)$
۲۵	شکل ۸-۲: دیاگرام‌های $p-x$ در سطح مشترک مواد در حالتی که $Z_A > Z_B$. a. قبل از برخورد b. در هنگام برخورد c. بعد از برخورد.....
۲۶	شکل ۹-۲: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $Z_A > Z_B$
۳۲	شکل ۱-۳: نمایش دامنه تأثیر تابع هموارساز W و دامنه مسئله [3].....
۳۳	شکل ۲-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت [3].2D.....
۳۴	شکل ۳-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت [3].3D.....
۳۵	شکل ۴-۳: تابع هموارساز Lucy و مشتق اولش [3].....
۳۶	شکل ۵-۳: تابع هموارساز Monaghan با هسته‌ی گاوسی و مشتق اولش [3].....
۳۷	شکل ۶-۳: تابع هموارساز Cubic Spline و مشتق اولش [3].....
۴۰	شکل ۷-۳: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.3 است با استفاده از روش SPH [3].....
۴۱	شکل ۸-۳: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.75 است با استفاده از روش SPH [3].....
۴۱	شکل ۹-۳: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 1.55 است با استفاده از روش SPH [3].....
۴۱	شکل ۱۰-۳: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 2.6 است با استفاده از روش SPH [3].....
۴۲	۱۱-۳: از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH [3].....
۵۳	شکل ۱۲-۳: مرز مشترک بین دو ماده [3].....
۵۴	شکل ۱۳-۳: ذرات بر روی مرز مشترک دو ماده مختلف و نفوذ ذرات در یکدیگر [3].....
۷۷	شکل ۱-۵: سیکل ۰.....
۷۸	شکل ۲-۵: سیکل ۲۰۰.....
۷۸	شکل ۳-۵: سیکل ۴۰۰.....
۷۹	شکل ۴-۵: سیکل ۶۰۰.....
۷۹	شکل ۵-۵: سیکل ۸۰۰.....
۸۰	شکل ۶-۵: سیکل ۱۰۰۰.....
۸۰	شکل ۷-۵: سیکل ۱۲۰۰.....
۸۱	شکل ۸-۵: سیکل ۱۴۰۰.....
۸۱	شکل ۹-۵: سیکل ۱۶۰۰.....
۸۲	شکل ۱۰-۵: سیکل ۱۸۰۰.....
۸۲	شکل ۱۱-۵: سیکل ۲۰۰۰.....

شکل ۵-۳۴: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۱۵ متر و جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۹۹
شکل ۵-۳۵: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۱۵ متر و جرم ۵۰۰ کیلوگرم.....	۹۹
شکل ۵-۳۶: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و جرم ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۰
شکل ۵-۳۷: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۰
شکل ۵-۳۸: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و جرم ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۱
شکل ۵-۳۹: محل قرارگیری سنجه‌ها.....	۱۰۱
شکل ۵-۴۰: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۲
شکل ۵-۴۱: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۲
شکل ۵-۴۲: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۳
شکل ۵-۴۳: تاریخچه فشار سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۳
شکل ۵-۴۴: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۳
شکل ۵-۴۵: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۴
شکل ۵-۴۶: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۴
شکل ۵-۴۷: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۴
شکل ۵-۴۸: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۵
شکل ۵-۴۹: دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق - زمان در سقف تونل.....	۱۰۶
شکل ۵-۵۰: دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق - زمان در کف تونل.....	۱۰۷
شکل ۵-۵۱: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۷
شکل ۵-۵۱: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۸
شکل ۵-۵۲: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۹
شکل ۵-۵۳: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۰۹
شکل ۵-۵۴: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۱۰
شکل ۵-۵۵: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۱۰
شکل ۵-۵۶: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۱۰
شکل ۵-۵۷: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم.....	۱۱۱
شکل ۵-۵۸: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم.....	۱۱۱

- شکل ۵-۵۹: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۱
- شکل ۵-۶۰: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۲
- شکل ۵-۶۱: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۲
- شکل ۵-۶۲: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم ۱۱۲
- شکل ۵-۶۳: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم ۱۱۳
- شکل ۵-۶۴: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۳
- شکل ۵-۶۵: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۳
- شکل ۵-۶۶: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۴
- شکل ۵-۶۷: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم ۱۱۴
- شکل ۵-۶۸: مدل فرضی وان میس ۱۱۵
- شکل ۵-۶۹: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم ۱۱۶
- شکل ۵-۷۰: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم ۱۱۷
- شکل ۵-۷۱: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم ۱۱۸
- شکل ۵-۷۲: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم ۱۱۹
- شکل ۵-۷۳: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم ۱۲۰
- شکل ۵-۷۴: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم ۱۲۱
- شکل ۵-۷۵: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم ۱۲۲
- شکل ۵-۷۶: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم ۱۲۳
- شکل ۵-۷۷: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم ۱۲۴
- شکل ۵-۷۸: نمودار ماکزیم تنش بر حسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در سقف تونل ۱۲۴
- شکل ۵-۷۹: نمودار ماکزیم تنش بر حسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در کف تونل ۱۲۵
- شکل ۶-۱: نحوه توزیع و برخورد موج شوک درون خاک در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه با تونل ۱۲۷
- شکل ۶-۲: تغییرات چگالی ماده بر حسب فشار ۱۲۸
- شکل ۶-۳: تغییرات چگالی بر حسب سرعت صوت در هنگام باربرداری ۱۲۹

فهرست جدول

- جدول ۱-۳: خلاصه‌ای از اهم توابع هموارساز SPH [3] ۳۹
- جدول ۲-۳: بیان SPH از معادلات ناویر - استوکس (شامل ترم لزجت). [3] ۶۷
- جدول ۳-۳: بیان SPH از معادلات اویلر (فاقد ترم لزجت). [3] ۶۸
- جدول ۱-۵: حالت‌های مختلف بارگذاری انفجاری ۷۶
- جدول ۱-۵: لحظه رسیدن اولین موج شوک به سقف و کف تونل در حالت‌های مختلف بارگذاری ۱۰۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پدافند غیرعامل نوعی دفاع غیر نظامی است و به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که به جنگ‌افزار نیاز ندارد و با اجرای آن می‌توان از وارد شدن خسارات مالی به تجهیزات و تاسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. با توجه به موقعیت استراتژیک ایران در منطقه خاورمیانه لزوم توجه کشور به توسعه سیستم‌های پدافند غیرعامل به موازات سیستم‌های پدافند عامل بیش از پیش مشخص می‌گردد. یکی از اساسی‌ترین اصول مبحث پدافند غیرعامل، ایجاد سازه‌های امن است. از سازه‌های مدفون مثل تونل‌ها، بیمارستان‌های زیرزمینی، عوارض طبیعی و معادن میتوان به عنوان سازه‌های امن برای پدافند غیرعامل استفاده کرد که لازم است قبل از استفاده از این فضاها به عنوان سازه‌های امن، پایداری این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری ناشی از بمب‌ها و موشک‌های مختلف بررسی گشته و مقاوم سازی آن در برابر بارگذاری انفجار و طراحی سازه‌های جدید با در نظر گرفتن اصول طراحی مقاوم در دستور کار قرار گیرد. با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی و توسعه قابل توجه روشهای عددی در دهه‌های اخیر امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه‌های مدفون با دقت بالا فراهم آمده است و در صنایع نظامی و مباحث مربوط به پدافند غیر عامل مدلسازی عددی این پدیده می‌تواند، جایگزین بسیار مناسبی برای بررسی اثرات تخریبی بارگذاری ناشی از انفجار باشد. در این پایان نامه با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و به وسیله نرم افزار ANSYS AUTODYN اثرات انفجار روی یک تونل زیر زمینی به عنوان سازه مدفون بررسی گشته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده آسیب پذیری تونل مورد نظر در مقابل برخی حالات بارگذاری انفجاری فرضی می‌باشد. لذا جهت جلوگیری از آسیب‌های مالی و جانی می‌بایست تمهیدات لازم برای مقاوم سازی و مدیریت بحران پس از تخریب اندیشیده شود. همچنین عمق بهینه تونل از سطح زمین بر اساس میزان آسیب وارده از موج انفجار سطحی مشخص می‌گردد.

۱-۱- هدف از تحقیق

هدف از این تحقیق دستیابی به عمق بهینه طراحی و ساخت تونل های زیرزمینی از دیدگاه پدافند غیر عامل و همچنین مقایسه نتایج حاصل از انفجار تحت مقادیر مشخص ماده منفجره و اعماق مختلف تونل از سطح زمین با یکدیگر می باشد.

۱-۲- ضرورت تحقیق

امروزه با توجه به گسترش حملات انفجاری وارده بر سازه ها، تهدیدات امنیتی ناشی از انفجار انواع بمب یا موشک، تهدیدات تروریستی و همچنین افزایش بلاهای طبیعی بلاخص زلزله، لازم است علاوه بر طراحی ایمنی و مقاومت سازه بر اساس بارهای متعارف، طراحی بارهای نامتعارف ناشی از انفجار و زلزله در دستور کار قرار گیرد. با توجه به اینکه سازه های مدفون از جمله تونل های زیرزمینی دارای کاربرد های مختلف بوده و نقش حیاتی در حفظ جان و مال و تامین زیرساخت های اساسی کشور ایفا میکنند، مقاوم سازی این گونه سازه ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. میتوان با استفاده از تکنولوژی های روز دنیا و پیش بینی تمامی آسیب های احتمالی وارده بر تونل های زیرزمینی و بالطبع مقاوم سازی آن طبق نتایج تحقیقات حاصله گام بزرگی جهت حفظ جان و مال مردم و جلوگیری از آسیب های مادی و معنوی برداشت.

۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق یک تونل بتنی در عمق های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری از سطح زمین در بستر خاکی مدلسازی شده است. مدلسازی بوسیله نرم افزار ANSYS AUTODYN انجام شده و هر مدل سه مرتبه تحت بارگذاری ناشی از انفجار سه عدد بمب سطحی حاوی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلوگرم تی ان تی قرار گرفته است. در هر بارگذاری نتایج حاصل از سنجه (گیج) هایی که در سقف و کف تونل در امتداد بمب کار گذاشته شده است استخراج شده و با بررسی نتایج حاصل بارگذاری این سنجه ها پیشنهادات لازم ارائه گردیده است.

۴-۱- استفاده کنندگان از نتایج پایان نامه

سازمان هایی نظیر : پدافند غیر عامل، وزارت راه و شهرسازی و سایر ارگان های مرتبط میتوانند از نتایج این تحقیق در جهت بهبود عملکرد هرچه بهتر سازه های زیرزمینی با کاربری های مختلف پس از ساخت استفاده نمایند چرا که تخریب این گونه سازه ها پس از حوادث ناگهانی میتواند اثر نامطلوبی از نظر اقتصادی و اجتماعی بر جا بگذارد و باعث تلفات انسانی بسیار گردد.

۵-۱- فصل بندی**۱-۵-۱- فصل ۱: مقدمه**

در این فصل توضیحاتی کلی در مورد موضوع پایان نامه داده شده است. در ادامه نگاهی به انواع تونل ها و توضیح در مورد آنها داده شده است. سپس هدف و ضرورت تحقیق و در پایان استفاده کنندگان از تحقیق توضیح داده شده است.

۱-۵-۲- فصل ۲: شناخت پدیده انفجار

در این فصل نگاهی کلی به پدیده دینامیکی انفجار شده است. پارامترهایی چون انواع انفجار، مراحل انفجار، آثار انفجار و ... در این فصل توضیح داده شده است.

۱-۵-۳- فصل ۳: آشنایی با روش SPH

در این فصل روش SPH و پارامترهای مربوط به آن به صورت خلاصه توضیح داده شده است.

۱-۵-۴- فصل ۴- کاربردهای روش عددی در مدلسازی

در این فصل چند مورد از تاریخچه کارهای انجام شده پیشین که مرتبط به موضوع این پایان نامه هستند ذکر شده است.

۱-۵-۵- مدلسازی عددی انفجار

در این فصل انواع حالت‌های مدلسازی که در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفته است ذکر شده است. در ادامه در مورد انواع حالت‌های و نحوه تغییرات در هر کدام از آنها توضیحات تکمیلی داده شده است. شکل‌های و دیاگرام‌های مرتبط با حالت‌های مختلف در این فصل قرار گرفته و در نهایت به تجزیه و تحلیل هر کدام از آنها پرداخته شده است.

۱-۵-۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل نتایج حاصل از این تحقیق ذکر شده است. همچنین موضوعات مختلف مرتبط جهت تحقیقات بعدی پیشنهاد شده است.

فصل دوم

شناخت پدیده انفجار

۲-۱- تعریف انفجار

انفجار عبارت است از رهایی مقدار زیادی انرژی در مدت زمانی بسیار کوتاه و در فضای محدود .

۲-۲- انواع انفجار

انواع انفجارهایی که در محیط های باز و غیر مسدود رخ می دهند بر سه دسته اند: هوایی، سطحی و زیرزمینی.

الف) انفجارهای هوایی: انفجارهایی است که در ارتفاعی بالاتر از سطح هدف رخ می دهند. در این گونه انفجارها از سیستم های فیوز زمانی استفاده می شود تا قبل از اصابت به هدف و در ارتفاع معینی بر فراز آن، انفجار اجرا شود.

ب) انفجار سطحی: انفجارهایی که بر روی زمین یا خیلی نزدیک به آن رخ دهند، از نوع سطحی محسوب می شوند. در انفجارهای سطحی بر اثر بازتابش و تقویت موج اولیه به وسیله سطح زمین، موج بازتابشی تولید می شد که در همان نقطه انفجار با موج تابشی ترکیب شده و موج واحدی به وجود می آید که به شکل نیمه کروی است. ذکر این نکته نیز ضروری است که متداول ترین روش حملات هوایی به مناطق و اهداف وسیع، بمباران های سطحی است.

ج) انفجار زیر سطحی: مشتمل بر انفجارهایی است که پس از نفوذ یک سیستم انفجاری به درون سطح هدف رخ می دهد. در این گروه از انفجارها که علیه اهداف مهم نظامی اجرا می شوند، سیستم انفجاری برخوردار از فیوز تاخیری است تا فرصت لازم برای نفوذ به درون هدف فراهم گردد.

۲-۳- مراحل انفجار

در تمام انواع انفجارها، مراحل مشخصی شبیه زیر طی می شود:

۱. آزاد شدن شدید و ناگهانی انرژی

۲. پرتاب ترکش های اولیه

۳. انتشار موج انفجار به صورت شعاعی
۴. برخورد به مانع و رسیدن مقدار فشار به اوج
۵. پرتاب ترکش های ثانویه
۶. بازتابش موج تقویت شده
۷. کاهش فشار اوج به فشار محیطی
۸. سقوط فشار به پایین تر از فشار محیطی قبل از انفجار
۹. بازگشت فشار به فشار محیطی.

۲-۴- آثار انفجار

آثار ناشی از عمل یک سیستم انفجاری بر دو دسته است:

- الف) آثار مستقیم شامل انتشار ترکش ها، انتشار امواج دینامیکی و انتشار امواج حرارتی.
- ب) آثار غیر مستقیم شامل بروز آتش سوزی، ریزش آوار و قطع خطوط ارتباطی، شکست پرتاب شیشه ها و مانند آن.

۲-۵- انتشار ترکش ها

اولین نتیجه یک انفجار، پخش دو دسته ترکش های متفاوت است:

۱. ترکش های اولیه مشتمل بر قطعات از هم پاشیده محفظه سیستم انفجاری.
۲. ترکش های ثانویه شامل کلیه مواد و عناصری که تحت تاثیر برخورد ترکش های اولیه یا امواج کوبشی به سرعت به اطراف پرتاب می شوند. اثر ترکش های حاصل از انفجار تابع شکل، وزن، سرعت اولیه ترکش از سویی و نیز فاصله از نقطه انفجار، موقعیت، جهت و فرم سازه از سوی دیگر می باشد.

۲-۶- امواج دینامیکی

به محض بروز انفجار، یک موج کوبشی همراه با یک جبهه پرفشار کوبشی از نقطه انفجار به صورت شعاعی به طرف انتشار می یابد. شدت این فشارها با افزایش فاصله و گذشت زمان کاهش می یابد. هنگامی که جبهه موج به یک مانع برخورد نماید، بخشی از مانع و یا تمام آن را تحت کوبش فشار قرار می دهد. مقدار بارهای انفجاری و نحوه تغذیه فشارهای حاصل بر روی مانع تابع خواص سیستم انفجاری (جنس، وزن و مقدار انرژی آزاد شده)، موقعیت نقطه انفجار نسبت به مانع و مقدار تقویت فشار بر اثر تداخل با زمین یا مانع است. سازهایی که در فاصله کمی از نقطه انفجار قرار گرفته باشند، تحت تاثیر نیروهای دینامیکی وارد شده، به سمت خارج خم می شوند و سپس بر اثر مکش ایجاد شده به طرف مقابل بر می گردند و در نتیجه ترک هایی در آن ها ایجاد می شود که موجب ریزش آن ها به درون فضای باز پیرامونی می گردد. نوع و میزان ریزش آوارهای ساختمانی به درون فضای باز پیرامونی، تابع عوامل زیادی است که عمدتاً به ایستایی و فرم سازه بستگی دارند. ساختمان های بلند و کم عرض معمولاً در جهت عرضی ترک می خورند. در صورتی که در ساختمانهای مکعبی شکل، ترک ها، مورب خواهند بود.

۲-۷- امواج حرارتی

در نتیجه تغییر ناگهانی فشار در لحظه انفجار، انرژی حرارتی زیادی آزاد می شود که مقدار آن تابع ویژگی های سیستم انفجاری است. شعاع اثر امواج حرارتی به مراتب محدودتر از امواج دینامیکی است. آثار غیر مستقیم انفجار در بر گیرنده طیف وسیعی از عوامل تخریبی بوده و محدوده به مراتب گسترده تری نسبت به محدوده آثار مستقیم داشته و بر حسب شرایط محلی ممکن است به شدت بر دامنه خسارات و تلفات بیفزاید. به طور مثال، تمام سطوح و عناصری که تحت تابش بارهای حرارتی قرار می گیرند بر حسب قابلیت اشتغال، به درجات مختلف، دچار سوختگی، حریق و حتی انفجارهای زنجیره ای می گردند. از دیدگاه طراحی، مهار آثار مستقیم انفجار عمدتاً امکان پذیر نیست. ولی نقش

طراحان، تمهید امکان مهار هرچه بیشتر آثار غیر مستقیم انفجارها در مراحل مطالعات و مکانیابی، طراحی، اجرا و بهره برداری از یک مجموعه مسکونی است.

۲-۸- آسیب‌های ناشی از انفجارهای متعارف در محیط‌های مسکونی

بر اثر عملکرد یک سیستم انفجاری متعارف، پنج دسته مکانیزم اصلی تخریب محتمل است:

۱. ترکانش: در نتیجه آزاد شدن فشارهای بسیار نیرومند دینامیکی حاصل از انفجار رخ می‌دهد.

۲. پخش قطعات و ترکش‌ها: که بیشترین آسیب‌های ممکن را به افراد پیاده و وسایل نقلیه و دیگر اهداف نرم وارد می‌شازند.

۳. ایجاد حفره: در نتیجه انفجار بمب‌های دارای سیستم فیوز تاخیری و برای قطع کامل خطوط ارتباطی و تجهیزات زیر سطحی رخ می‌دهد.

۴. نفوذ: به منظور تخریب سازه بک هدف مستحکم، بمب پس از آنکه تا مسافتی به درون هدف نفوذ نمود، منفجر می‌گردد. در نتیجه چنین انفجاری، بیشترین تخریب ممکن ایجاد می‌شود.

۵. ایجاد آتش سوزی در درون اهداف اشتعال پذیر. یک هدف به خصوص معمولاً فقط در برابر یکی از پنج مکانیزم فوق دارای بیشترین آسیب پذیری است. هر چند که در برابر دیگر مکانیزم‌ها با درجات کمتر همچنان آسیب پذیر است. عوامل موثر در تعیین مکانیزم اصلی تخریب یک هدف معین به شرح زیر می‌باشد:

۱. ساختمان و سازه هدف

۲. موقعیت مکانی هدف نسبت به نقطه شروع انفجار

۳. الگوی آثار تخریبی (از میان پنج دسته مکانیزم‌های تخریبی)

۴. سطح و درجه تخریب

۲-۹- ویژگی‌های انفجار

انفجار پدیده‌ای آنی است که در اثر آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی به وجود می‌آید. منشاء این انرژی می‌تواند باروت، بخار متراکم شده در بویلر یا تحولات کنترل نشده اتمی باشد؛ اما به هر حال رهاسازی انرژی باید ناگهانی باشد و یک محیط پرانرژی در اطراف مبدا ایجاد آن به وجود آورد. این انرژی متمرکز شده به سرعت از راه‌های مختلف مانند: موج انفجاری، پرتاب ترکش‌ها، تشعشع حرارتی یا یونیزاسیون پخش می‌گردد. قدرت یک انفجار بر اساس مقدار انرژی که آزاد می‌گردد بیان می‌شود، بنابراین می‌توان آن را به‌طور مستقیم با واحدهای انرژی مانند ژول بیان کرد. برای مقایسه قدرت انفجاری مواد منفجره مبنایها و استانداردهایی در نظر گرفته شده است. یکی از مبنایهای اساسی، انرژی آزاد شده در انفجار ماده منفجره تی‌ان‌تی^۱ می‌باشد. دلیل انتخاب این ماده درصد خلوص، راحتی در اندازه‌گیری و در دسترس بودن است. همچنین تی‌ان‌تی از لحاظ کاربرد ایمن می‌باشد. علاوه بر این نظم کریستالی قابل مشاهده در زیرساختار این ماده منفجره، به وقوع پدیده انفجاری کامل به همراه تمام ویژگی‌های مربوطه منجر می‌گردد. لازم به ذکر است که از انفجار یک گرم تی‌ان‌تی، ۴۶۱۰ ژول یا ۱۰۰ کالری انرژی ایجاد می‌گردد. [۱]

۲-۱۰- قدرت انفجاری^۲

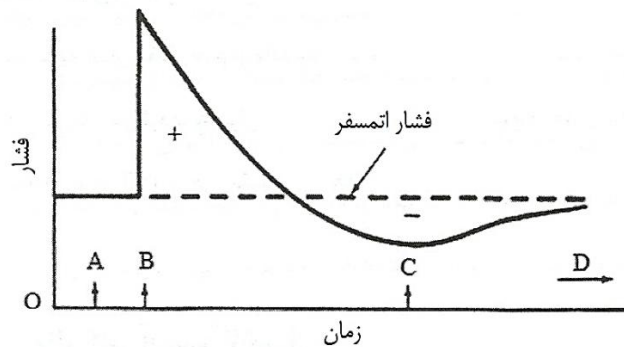
قدرت انفجاری به‌صورت میزان انرژی آزاد شده توسط ماده شیمیایی خاص، نسبت به همان مقدار جرم از ماده منفجره تی‌ان‌تی بیان می‌شود، این نسبت به‌صورت درصد بیان می‌گردد. به‌عنوان مثال ماده منفجره PETN موج انفجاری با انرژی حدود ۱۵۰٪ ماده تی‌ان‌تی به جرم یکسان می‌دهد. [۱]

^۱ TNT

^۲ Explosive Strength

۲-۱۰-۱ منظر کلی آسیب ناشی از انفجار^۱

در شکل ۲-۱ نمودار تقریبی فشار - زمان در فاصله معین از یک انفجار ترسیم شده است؛ همان طور که در شکل قابل مشاهده است این نمودار دارای جهش ناگهانی و فازهای مثبت و منفی است که در طول زمان گسترش یافته‌اند. شکل ۲-۱ تأثیرات اصابت این موج نمونه به هدف را آشکار می‌سازد. همان طور که در این شکل مشخص است، زمان A مربوط به قبل از رسیدن جبهه موج و لحظه B پس از اصابت پیشانی شوک و جهش ناگهانی فشار را نمایان می‌سازد و در لحظه C محدوده زمانی فشار مثبت پایان یافته است و فاز منفی فشار در محیط احساس می‌گردد. این موضوع توأم با وزش باد انفجاری در جهت مخالف با جهت گسترش پیشانی شوک انفجاری است و زمان D مربوط به ناپدید شدن اثرات موج انفجاری و بازگشت فشار به فشار اتمسفر است. [۱]



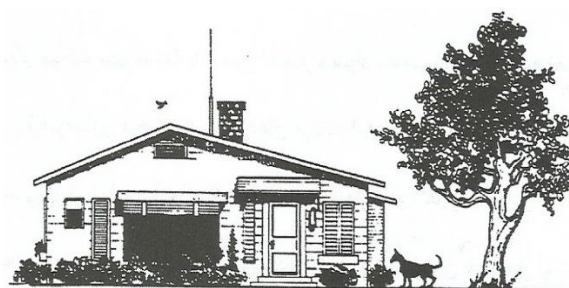
شکل ۲-۱: دیاگرام فشار - زمان برای یک موج انفجار

^۱ - Damaging Aspects

با مشاهده شکل‌های ۲-۲ می‌توان به مکانیزم کلی آسیب‌رسانی یک انفجار نمونه پی برد.



(ب) بلافاصله بعد از مواجهه با موج انفجار



(الف) قبل از برخورد موج انفجار



(د) بعد از فروکش موج انفجار



(ج) فاز منفی فشار با موج برگشتی

شکل ۲-۲: منظر کلی آسیب ناشی از یک موج انفجار

۲-۱۱- گرمای انفجار

انرژی متمرکز شده از یک انفجار به دو شکل مختلف قابل درک می‌باشد، که عبارت است از: ابتدا، انرژی گرمایی، که به شکل افزایش دما ظاهر و دیگری انرژی مکانیکی که به هنگام آزاد شدن گازهای فشرده خود را نمایان می‌سازد. برای مثال، انرژی آزاد شده در انفجارهای هسته‌ای، بیشتر گرمایی است؛ درحالی‌که انرژی آزاد شده در اثر انفجار یک مخزن یا کپسول گاز اکسیژن، بیشتر مکانیکی است. مواد منفجره شیمیایی مانند تی‌ان‌تی، عموماً هر دو شکل انرژی را آزاد می‌کنند.

بخش گرمایی انرژی یک انفجار، "گرمای انفجار"^۱ نامیده شده و سبب اختلاف دما می‌شود. در عمل، گرمای انفجار به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌گردد. با به‌کارگیری کالری‌متر و رعایت نکات زیر می‌توان گرمای انفجار را به دست آورد:

۱. مقدار اندک و معینی از ماده منفجره در داخل اتاقک قرار می‌گیرد.

۲. اتاقک از هوا (اکسیژن) تخلیه شده تا از فرآیند سوختن جلوگیری کند و آن‌گاه با هلیوم یا نیتروژن پر می‌شود.

۳. ماده منفجره می‌گردد.

۴. گرمای منتقل شده از اتاقک به کمک افزایش دمای کالری‌متر و ظرفیت گرمایی آن تعیین می‌گردد.

با توجه به بسته بودن اتاقک کالری‌متر امکان انبساط محصولات وجود نخواهد داشت. لذا آن‌ها تقریباً در حجمی ثابت، از دمای انفجار تا دمای کالری‌متر سرد می‌شوند. بنابراین گرمای انفجار اندازه‌گیری شده برای یک سیستم، مربوط به کاهش انرژی داخلی هم‌دمای آن سیستم است یا:

$$-\Delta E = -(E_2 - E_1) \quad (1-2)$$

گرمای انفجار

گرمای انفجار تفاوت مجموع انرژی داخلی تشکیل (آنتالپی تشکیل) محصولات انفجار E_2 منهای انرژی تشکیل ماده منفجره، E_1 می‌باشد. برای تخمین در مورد یک انفجار معمولاً محصولات نامی انفجار در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شوند. در عمل، اندازه‌گیری مستقیم گرمای انفجار مشکل است. مثلاً کالری‌متر باید قادر باشد تا در برابر انفجار، ایستادگی نماید. علاوه بر این، محصولات تولیدی در اتاقک ممکن است با آن‌چه در واقعیت تولید می‌شوند، تفاوت کند. [۱]

^۱ Heat of Explosion

۲-۱۲- انرژی انفجار

مقدار انرژی منتقل شده از یک انفجار به موج انفجاری آن که انرژی انفجار نامیده می‌شود، کلید اصلی در مطالعه امواج ناشی از انفجار و شوک می‌باشد. این انرژی انفجاری به هر دو شکل دمایی و مکانیکی وجود دارد و همان‌طور که اشاره گردید به صورت تجربی در کالری‌متر انفجاری اندازه‌گیری می‌شود. به صورت تئوری، انرژی انفجار با محاسبه حجم محصولات منبسط شده V منطبق با فشار آن‌ها P ، و محاسبه انتگرال $\int_1^2 p dv$ به دست می‌آید. محاسبه دقیق انتگرال خطی مشکل است، زیرا داشتن اطلاعاتی از شرایط اولیه و نیز رابطه فشار - حجم ضروری است (که البته این رابطه فشار - حجم، مربوط به مخلوط غیر ایده‌آل و پیچیده گازهای حاصل است که دمای آن مرتباً در حال کاهش است). علاوه بر این چون فرآیند آدیباتیک نیست، اتلاف انرژی نیز باید لحاظ شود (البته اتلاف انرژی در محیط پیرامونی هوا نسبت به محیط پیرامونی آب قابل اغماض است). راه حل منطقی‌تر کاربرد آنالیزهای کلی ترمودینامیکی است. یکی از این آنالیزها، انرژی آزاد هلمهولتز^۱ یا تابع A است. این تابع، یک تابع نقطه‌ای (اسکالر) است که شامل جملات TS و انرژی داخلی E می‌باشد.

$$A = E - TS \quad (2-2)$$

هم‌چنین این تابع، شبیه به تابع انرژی آزاد گیبس به صورت زیر است:

$$G = E + PV - TS \quad (3-2)$$

انرژی انفجاری از طریق رابطه زیر به تغییرات انرژی آزاد هلمهولتز (A) حین فرآیند انبساطی انفجار مرتبط می‌گردد:

انرژی انفجاری:

$$\int_1^2 pvd \approx -\Delta A \approx -\Delta E = T \Delta S \quad (4-2)$$

^۱ Helmholtz free energy function

با مقایسه این رابطه با روابط قبل که برای اندازه‌گیری گرمای انفجار استفاده شده است، مشاهده می‌گردد که در محاسبه‌ی گرمای انفجار، انرژی مربوط به انبساط، به هدر رفته است. اما در انفجارهای واقعی، در اتمسفر، این انبساط به صورت انرژی در موج انفجار ظاهر شده است. در مورد تی‌ان‌تی، انرژی انفجار اندازه‌گیری شده 4860 J/gT است و گرمای انفجار آن 2800 J/gT است. این تفاوت مرتبط با افزایش آنتروپی یا ΔS است. انرژی انفجار مربوط به هر ماده منفجره را اصولاً چنین محاسبه می‌کنند که تابع انرژی آزاد هلمهولتز حاصله را با همان مقادیر مربوط به محصولات جمع می‌کنند. اما چنین داده‌هایی عموماً در دسترس نیستند. لذا تخمین این مقادیر، کاربردی خواهد بود. ابتدا فرض می‌شود که محصولات با هم ترکیب می‌شوند، آن‌گاه مقدار کاهش انرژی داخلی و افزایش متناظر آنتروپی آن تخمین زده می‌شود. آن‌گاه این دو جزء مجزا، طبق رابطه قبل، با هم ترکیب می‌شوند. [۱]

۲-۱۳- آنتروپی انفجار

آنتروپی انفجار حاصل افزایش آنتروپی از قبل به بعد از انفجار است:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (5-2)$$

آنتروپی محصولات انفجار را می‌توان از جمع آنتروپی تک‌تک مواد یافت. اما مشاهده گردیده است که آنتروپی محصولات به صورت مخلوط با مجموع آنتروپی تک‌تک محصولات متفاوت است. به طوری که این تفاوت از طریق رابطه زیر قابل بیان است:

$$S_{mixthre} = -R_m \ln y \quad (6-2)$$

در رابطه فوق y نسبت مولی مخلوط و R_m ثابت مولی گازها ($8/31434 \text{ J/mol K}$) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای به دست آوردن آنتروپی مخلوط محصولات انفجار می‌توان رابطه زیر را به کار برد:

$$S = S^0 + S_{mix} = S^0 - R_m \ln y \quad (7-21)$$

$$S_{mix} = 9\Delta n \quad (8-2)$$

که Δn میزان افزایش تعداد مول محصولات گازی است. آنتروپی بسیاری از ترکیبات مواد منفجره، موجود نیست، به همین دلیل ناگزیر، راه حل‌های تخمینی استفاده می‌شود، برای اغلب مواد منفجره متداول در فاز چگال (جامد یا مایع)، این مقدار تقریباً برابر است با:

$$S^0 = 65 + 20nj/mol K \quad (9-2)$$

که n تعداد اتم‌های موجود به جز هیدروژن و اکسیژن است. به علت فرآیند ذوب، آنتروپی مایع معمولاً از آنتروپی جامد همان ماده بیشتر است. آنتروپی مواد در حالت گازی، خیلی از فاز چگال آن‌ها بیشتر است، یعنی آنتروپی انفجار شدیداً وابسته به تولید محصولات گازی است. بنابراین هنگامی که عمده محصولات انفجار حالت گازی باشند تغییر آنتروپی فاز چگال قابل صرف نظر کردن است (رابطه ۲-۵). [۱].

۲-۱۴- قدرت انفجار (تخمین برتلوت)^۱

رابطه برتلوت تخمینی برای قدرت انفجاری مواد منفجره ارائه داده است. به طوری که این قدرت انفجاری هر دو جنبه انرژی آزاد شده توسط انفجار یعنی گرمای انفجار و انرژی مکانیکی (فرآیند انبساط گازها) را لحاظ می‌نماید. قدرت انفجاری به صورت درصدی از قدرت انفجاری جرم معادل مواد منفجره استاندارد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{قدرت انفجاری } (\%TNT) = 840 \times \Delta n \times (-\Delta E) / FM^2 \quad (10-2)$$

در رابطه با Δn تعداد مول‌های گازی تولید شده (آب در فاز گاز فرض می‌شود)، ΔE گرمای مولی انفجار (Kj/mol) و FM جرم مولی است. از مزایای این رابطه، تعداد داده‌های ورودی کم آن است که تخمین مناسبی برای مواد منفجره ارائه می‌دهد. [۱].

^۱ Berthelot

۲-۱۵- معادلات حالت گاز ایده آل

گسترش امواج حاصل از یک انفجار در هوای آزاد، تراکم هوا را به همراه خواهد داشت. چنانچه هوا به عنوان یک گاز ایده آل در نظر گرفته شود معادله حالت مرتبط با آن را به صورت مقابل می توان در نظر گرفت:

$$PV = R_m T \quad (۱۱-۲)$$

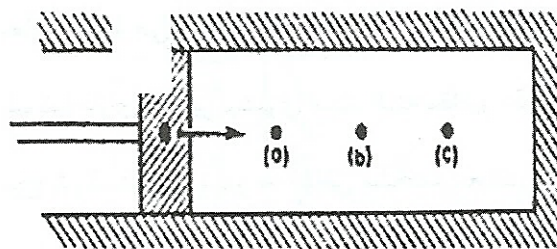
$$P\vartheta = RT \quad (۱۲-۲)$$

$$P = \rho RT \quad (۱۳-۲)$$

در روابط بالا P فشار مطلق، V حجم یک مولکول از گاز ایده آل و T دمای مطلق گاز هوا است و R_m ثابت مولی گاز می باشد که در سیستم متریک مقدار آن $۸/۳۱۴۳۹۴ \text{ J/molK}$ می باشد. [۱]

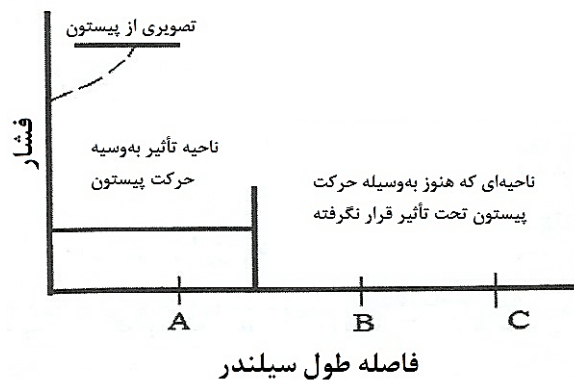
۲-۱۶- تولید موج شوک

برای درک بهتر از چگونگی تولید موج شوک آزمایش زیر انجام می شود. یک راه برای تولید یک موج شوک، حرکت دادن سریع یک پیستون در طول یک سیلندر در بسته است، همانند آنچه در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۳: دینامیک تولید موج شوک توسط یک پیستون

چنانچه پیستون به آرامی و زیر سرعت صوت در سیلندر حرکت داده شود، مولکول‌های سیال که در اثر این حرکت مغشوش شده‌اند، می‌توانند انرژی خود را به سایر مولکول‌ها منتقل کنند، به طوری که فشار در طول حرکت، خیلی آرام تغییر می‌کند. اما چنانچه سرعت حرکت پیستون بیش از سرعت صوت باشد، یک لایه از گاز فشرده شده با چگالی افزون‌تر و فشار بیشتر، نسبت به بقیه گاز داخل سیلندر در جلوی پیستون تشکیل خواهد شد. به طوری که یک خط (یا صفحه) که به‌عنوان جبهه موج شوک شناخته می‌شود تشکیل خواهد شد. توزیع فشار بین منطقه تحت تأثیر واقع شده و منطقه تحت تأثیر واقع نشده متفاوت است. این تغییر فشار در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است، که نقاط A، B و C همان نقاط متناظر در شکل ۲-۳ می‌باشند.



شکل ۲-۴: توزیع فشار در طول سیلندر، منطبق با شکل ۲-۳ در حین حرکت پیستون

مقادیر فشار، چگالی و دما در سمت راست موج شوک برابر با همان مقادیر مرتبط با فشار، چگالی و دمای محیط می‌باشند. درحالی که همین پارامترها در سمت چپ موج شوک (پشت موج شوک) دارای مقادیر بیشتری است. البته مقادیر دقیق آن‌ها، وابستگی شدیدی به شدت موج شوک عبوری و نیز به خواص مشخصه محیطی که موج شوک از آن عبور کرده است، دارد. برای تعیین مقادیر فوق‌الذکر، جبهه شوک به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود، که در حال تبدیل کردن یک سیال با چگالی، دما و فشار کم به سیالی با چگالی، دما و فشار بالاتر است (شکل ۲-۴). فرآیند فوق تقریباً به‌طور منظم در

یک انفجار رخ می‌دهد. بنابراین قوانین نیوتون در دو سوی پیشانی موج انفجار، شامل قانون حرکت نیوتون و نیز قوانین پایستگی (جرم و انرژی) قابل استفاده است. [۱]

۲-۱۷- برخورد ها و امواج شوک

در بررسی رفتار برخورد موج شوک، برخی از مسائل پیچیده دیفرانسیلی مطرح می‌گردد. در مورد رفتار موج شوک توجه به رفتار حاکم بر آن و این که چه فرآیندی قبل از برخورد، در طی برخورد و بعد از برخورد رخ می‌دهد از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این مسائل، دو نمودار گرافیکی معرفی شده است. نمودار $p-x$ تصویری از شوک در یک یا چند زمان دلخواه ارائه می‌دهد و نمودار $x-t$ برای نشان دادن موقعیت نسبی امواج موج شوک و سطوح مواد در یک زمان معین است. [۱]

۲-۱۷-۱ شوک در سطح مشترک حالت الف ($Z_B > Z_A$)

در این وضعیت دو قطعه متفاوت از مواد A و B وجود دارد. قطعه‌ها در تماس با یکدیگر و ساکن هستند. یک شوک راست‌گرا در داخل A به سوی سطح مشترک آن‌ها حرکت می‌کند. وقتی که شوک به سطح مشترک نزدیک می‌شود تغییراتی در آن اتفاق خواهد افتاد، اما قبل از بررسی بیشتر باید یک فاکتور اضافی را در نظر گرفت. با رجوع به معادله مومنتوم و با قرار دادن P_0 و U_0 برابر صفر خواهیم داشت:

$$P = \rho_0 u U \quad (2-14)$$

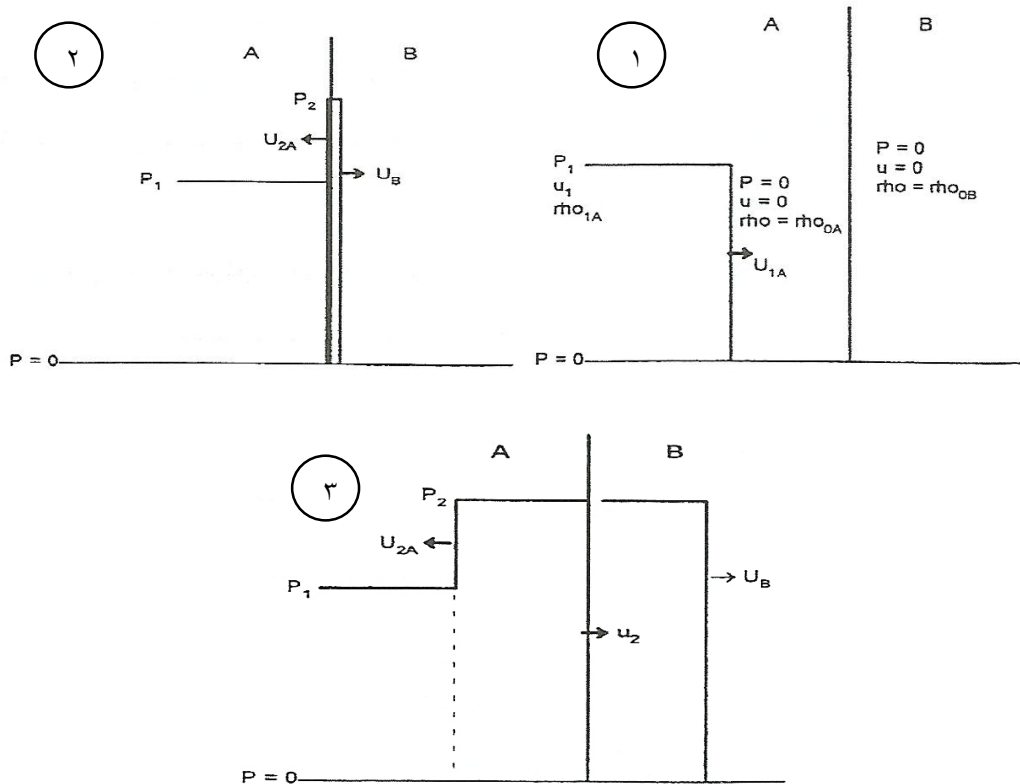
حاصل ضرب $U\rho_0$ تحت عنوان امپدانس^۱ (Z) شوک شناخته شده می‌شود.

$$Z = \rho_0 U \quad (2-15)$$

این نکته قابل توجه است که ρ_0 ثابت و U متغیر است، سرعت شوک با فشار افزایش می‌یابد. بنابراین فاکتور Z یا $U\rho_0$ با فشار، افزایش می‌یابد. اما این افزایش نسبتاً کند است و در حدود بازه‌های مورد

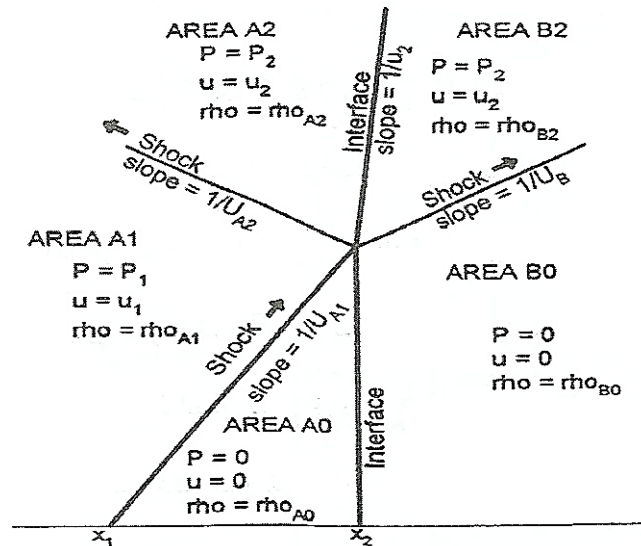
^۱ Impedance

بررسی می‌توان آن مقدار را تقریباً ثابت در نظر گرفت. با توجه به این موضوع می‌توان مواد را به دو دسته، ماده با امیدانس پایین و امیدانس بالا تقسیم کرد. وقتی که شوک از یک ماده با امیدانس کم در سطح مشترک به ماده دیگری با امیدانس بالا می‌رود، شوک فشاری افزایش خواهد یافت، و حالت عکس نیز صادق است. در شکل زیر چگونگی تغییرات شوک فشاری به هنگام عبور از یک ماده با امیدانس پایین (A) و انتقال به یک ماده با امیدانس بالاتر (B) مشاهده می‌شود. دیاگرام $p-x$ ، تغییرات شوک فشاری قبل از سطح مشترک، در سطح مشترک و بعد از سطح مشترک را نشان می‌دهد. شکل ۲-۵ نمودار $x-t$ برای این عبور شوک را نمایش می‌دهد. شوک راست‌گرا، ماده A را از حالت A_0 به حالت A_1 جهش می‌دهد. زمانی که شوک به سطح مشترک می‌رسد، شوکی جدید راست‌گرا با فشار P_2 در ماده B تشکیل می‌شود و ماده را از حالت B_0 به حالت B_2 جهش می‌دهد. هم‌چنین یک شوک به‌سوی ماده A نیز برمی‌گردد. این شوک چپ‌گرا ماده را از حالت A_1 به حالت A_2 جهش می‌دهد. فشارها و سرعت‌های ذره در سطح مشترک مساوی هستند.



شکل ۲-۵: دیاگرام فشار - جابه‌جایی، a. قبل از برخورد b. در هنگام برخورد c. بعد از برخورد

در دیاگرام $x-t$ شیب‌های خطوط، معکوس سرعت‌ها هستند، به همین دلیل هرچه شیب بیشتر باشد، سرعت کمتر است. دیاگرام $x-t$ بر اساس رفتار در مختصات اویلری کشیده شده است، بنابراین سرعت‌های شوک به دست آمده از این شیب‌ها همگی سرعت اویلری هستند.



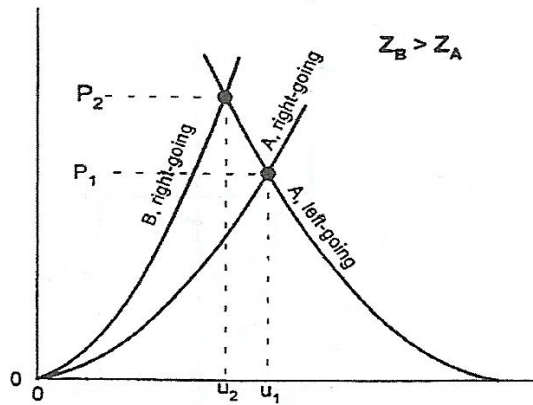
شکل ۲-۶: دیاگرام $x-t$ برای شوک در سطح مشترک مواد

حل کامل چنین مسئله‌ای، مستلزم محاسبه مقادیر U_{AZ} ، U_{BZ} ، u_2 و P_2 است. به این منظور ابتدا هوگونیت راست‌گرای A با فرض $u_0=0$ در نظر می‌گیریم، که این حالت، شوک A قبل از رسیدن آن به سطح مشترک می‌باشد. شکل ۲-۷ از شرایط مرزی مشخص هستند، که شوک در ماده A در شرایط u_1 و P_1 می‌باشد. با توجه به این که هوگونیت چپ‌گرا از این نقطه می‌گذرد، بنابراین می‌توان با انعکاس دادن هوگونیت حول این نقطه، هوگونیت چپ‌گرای A را به دست آورد. هوگونیت‌های انعکاس یافته باید متقارن باشند، بنابراین باید دو برابر این سرعت را روی محور u جدا کرده و با توجه به نقطه انعکاس، نمودار چپ‌گرا را به شکل متقارن رسم کرد. این هوگونیت انعکاس برای A خواهد بود.

$$P = \rho_0 C_{0A} (2u_1 - u) + \rho_0 S_A (2u_1 - u)^2 \quad (۲-۱۶)$$

اکنون هوگونیت چپ‌گرا ماده A که از نقطه u_1 و P_1 عبور می‌کند مشخص گردیده است، بنابراین با ترسیم هوگونیت راست‌گرا ماده ($u_0=0$) برای ماده B، نقطه برخورد این دو منحنی (در این مورد P_2 و

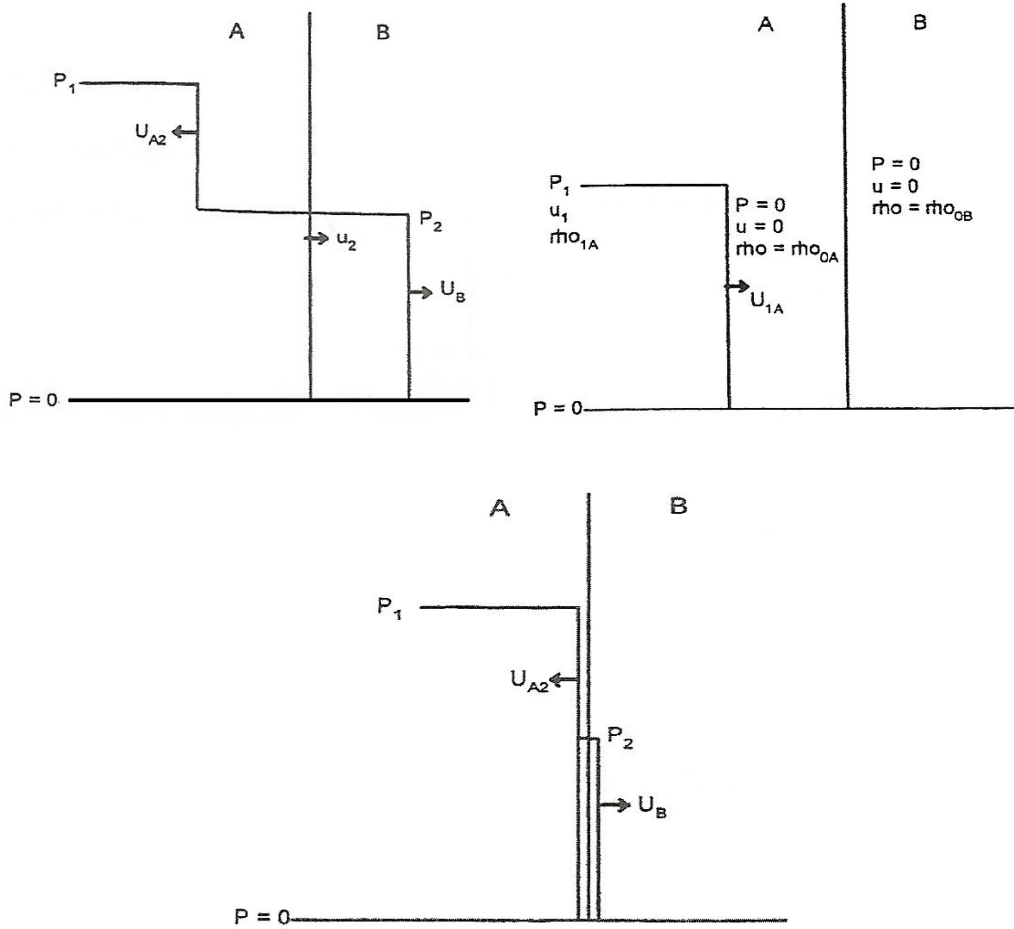
u_2 جواب مسئله است. سرعت شوک در B با توجه به شیب خط اتصال بین $(0, 0)$ تا (P_2, u_2) پیدا می‌شود و سرعت شوک برای موج برگشتی در A از شیب خط اتصال بین P_1 و u_1 تا P_2 و u_2 به دست می‌آید. همان‌گونه که در شکل ۷-۲ نمایان است، فشار موج شوک به هنگام عبور از یک ماده با امپدانس پایین و انتقال به ماده با امپدانس بالاتر، افزایش می‌یابد. [۱]



شکل ۷-۲: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $(Z_A > Z_B)$

۲-۱۷-۲- شوک در سطح مشترک ماده حالت ب $(Z_A > Z_B)$

مشابه حالت قبل تغییرات $p-x$ در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. همین‌طور نمودار $x-t$ برای این حالت انتقال موج شوک مانند حالت قبل است.

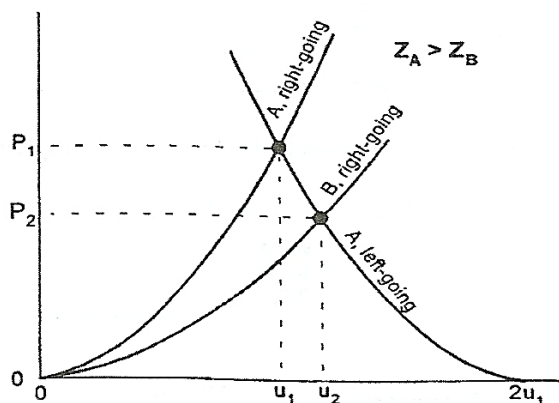


شکل ۲-۸: دیاگرام‌های $p-x$ در سطح مشترک مواد در حالتی که $Z_A > Z_B$ a. قبل از برخورد b. در هنگام

برخورد c. بعد از برخورد

با دقت بیشتر تفاوت‌های اندکی در نمودارهای $p-x$ و نمودارهای هوگنیت $p-u$ نسبت به حالت قبل دیده می‌شود. هوگنیت‌های راست‌گرا و چپ‌گرا کاملاً شبیه حالت الف است، تنها تفاوت زمانی که

$Z_A > Z_B$ پایین‌تر بودن نمودار هوگنیت ماده B است که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۹: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $Z_A > Z_B$

برای حل کامل مسئله نقطه برخورد هوگونیت‌های چپ‌گرا و راست‌گرا باید مشخص گردد. در این حالت، فشار موج برگشتی در ماده A از P_1 تا P_2 پایین خواهد آمد. به همین دلیل یک موج کم تراکم^۱ به جای یک موج چپ‌گرا در ماده A به حرکت درمی‌آید. مطابق حالت قبل یک موج شوک راست‌گرا نیز در ماده B به حرکت درمی‌آید. [۱]

^۱ Rare Fraction Wave

فصل سوم

آشنایی با روش SPH

۳-۱- مقدمه

بشر از دیرباز علاقه خاصی به پیش‌بینی وقایع طبیعی داشته است. بی‌شک یکی از روش‌هایی که می‌تواند با دقت بالایی به تحقق این امر کمک کند، مدل‌سازی ریاضی وقایع است. تمام اتفاقاتی که در طبیعت می‌افتد، ماهیت دینامیکی دارند و در حقیقت خود شما هستید که با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده‌کننده سعی در هموار کردن مسیر رسیدن به پاسخ مسائل دارید. این فرضیات به‌وفور در علوم مهندسی استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال در مهندسی‌های عمران و مکانیک با انجام تعاریفی هم‌چون مسئله استاتیکی و شبه‌استاتیکی سعی در حذف عوامل غیرخطی و به عبارتی پیچیده‌کننده مسئله می‌شود. مدل‌های ریاضی ابتدایی مسائل نیز بر اساس چنین فرضیاتی بنا نهاده شده‌اند. طبیعی است که نتایج حاصل از چنین مدل‌هایی در بسیاری از مواقع با خطاهای چشم‌گیری روبرو هستند. از این رو برای جبران این کمبودها، مهندسين اغلب به ناچار از ضرایب طراحی بالا که منجر به خروج طرح از محدوده بهینه می‌شد، استفاده می‌نمودند. کاهش منابع طبیعی در دسترس و هم‌چنین پیشرفت تکنولوژی که در نهایت به رقابتی‌تر شدن بازار محصولات مهندسی منجر می‌شد، مهندسين را به صرفت انداخت تا محاسبات را با دقت بالاتری انجام دهند. چون این دقیق‌تر شدن محاسبات نیاز به استفاده از مواد بیشتر در طرح‌ها را موجب نمی‌شد، هم‌زمان با بهینه شدن طرح به کاهش هزینه‌ها هم کمک شایانی می‌نمود. یکی از روش‌هایی که محاسبات مورد نیاز مهندسی را به واقعیت نزدیک‌تر می‌ساخت، استفاده از مدل‌های دقیق ریاضی بود. در این مدل‌ها تا حد ممکن به تمام مسائل درگیر در مسئله پرداخته می‌شود و در نظر گرفتن این چنین نکاتی به راحتی بر پیچیدگی محاسبات می‌افزود. در مسائل دینامیکی این پیچیدگی‌ها با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی میان ذرات و ماده هم‌چنین تغییر در ماهیت رفتار ماده در حضور نیروهای دینامیکی، ایجاد می‌شود. در مقام مقایسه، در حالت استاتیکی، ذرات در عمل هیچ‌گونه شتابی نمی‌گیرند تا نیروهای اینرسی تولید شوند و به دلیل نرخ کرنش پایین، ماده تغییری در رفتار بنیادین خود نشان نمی‌دهد. اغلب اوقات حل این مسائل فقط به وسیله‌ی روش‌های عددی مقدور می‌شوند. روش‌های عددی در عین حال که بسیار مفید و قدرتمند

هستند، دارای مشکلات حجم محاسبات بالا می‌باشند که در عمل انجام آن به‌وسیله خود انسان بسیار دور از عقل می‌نماید. به‌عنوان مثال برای رسیدن به دقت قابل قبول در یک مسئله ساده استاتیکی، گاه به محاسبه معکوس دترمینان یک ماتریس ۱۰ در ۱۰۰ نیازمندید! در این میان ظهور رایانه این محدودیت را هرچه بیشتر از میان برداشت. با پیشرفته‌تر شدن روش‌های عددی و همچنین قوی‌تر شدن رایانه‌ها، بشر به انجام محاسبات دقیق‌تر و منطبق بر واقعیت حریص‌تر شده است. در این میان، مباحث دینامیکی با نرخ بسیار بالا، از آن دسته مسائل درگیر با محاسبات به شدت غیرخطی هستند که حتی با پیشرفت‌های امروزی بشر، رسیدن نتایج به حد انطباق بر واقعیت به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، باب تحقیقات در این زمینه همچنان مفتوح می‌باشد. البته تاریخچه استفاده این نرم‌افزارها به دهه ۶۰ میلادی، زمانی که کامپیوترهای شروع به پیشرفت چشم‌گیر در قدرت محاسبات کردند، باز می‌گردد. در آن زمان کاربرد این دسته از نرم‌افزارها به مسائل پیش‌بینی برخوردهای سرعت بالا محدود بود، ولی با پیشرفت روش‌های عددی و قدرت رایانه‌ها مسائل پیچیده‌تری که به برهم کنش سیال و سازه نیز مرتبط می‌شدند، بدین فهرست افزوده شد. کاربردهای ویژه این بسته‌های نرم‌افزاری باعث شده است که میان مهندسين از شهرت بالایی برخوردار نباشند. از جمله کاربری‌های این نرم‌افزارها به غیر از کاربردهای گسترده در صنایع نظامی، در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار و برخورد می‌باشد. این نوع سازه‌ها در نیروگاه‌ها، پالایش‌گاه، صنایع هوا - فضایی، صنایع شکل‌دهی پیشرفته و ... به‌چشم می‌خورند. تا کنون هایدروکدهای مختلف با کاربردهای متفاوت به بازار ارائه شده‌اند. از آن جمله می‌توان به اتوداین^۱، داینا^۲، اپیک^۳، دایس‌مس^۴، پرونتو^۵ و زئوس^۶ اشاره کرد. در این میان نرم‌افزار اتوداین به دلیل قدرت زیاد در حل مسائل با نرخ بالا و بسیار بالا و همچنین به‌خاطر گستردگی و در دسترس بودن، شاید در کشور ما بیشتر مورد توجه باشد. این که نرم‌افزار ابتدا

¹ Autodyn

² Dyna

³ Epic

⁴ Dysmas

⁵ Pronto

⁶ Zeus

به صورت مستقل ارائه شد (یعنی یک بسته نرم‌افزاری) و سپس با گسترده‌تر شدن قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس و رک‌بنچ^۱ به صورت یکی از نرم‌افزارهای عمل‌کننده تحت این برنامه درآمد. [۳]

۳-۲- روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۲

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ برای حل مسائل اخترشناسی، مانند برخورد ستارگان و حرکت اجرام آسمانی در نزدیکی سیاه چاله‌ها مورد استفاده قرار گرفت. وجود قابلیت‌های منحصر به فرد این روش موجب شد علیرغم بروز اشکالاتی نظیر عدم دقت و ناپایداری، تاکنون در حل بسیاری از مسائل فیزیکی که ماهیت دینامیکی دارند مورد استفاده قرار گیرد. [۴]

رویکرد به این روش در دهه نود میلادی در زمینه‌های پاسخ دینامیکی مصالح، مدلسازی ترک‌خوردگی، مدل‌سازی برخورد، مصالح ترد، شکل‌دهی فلزات، دینامیک سیالات، پدیده انفجار و انفجار در زیر آب بوده است. کاربردهای جالب‌تری از روش ذرات متحرک در زمینه اندرکنش فاز مایع و جامد مانند بررسی اندرکنش خون و رگ و اندرکنش آب و شیر کنترل لاستیکی در مقالات اخیر مشاهده می‌شود. [۴]

پیشرفت کاربردهای روش ذرات هموار متحرک SPH پشتوانه‌ای برای تلاش محققین در رفع نقیصه‌های آن گردید تا جایی که علاوه بر پیشنهاد روش‌هایی برای اصلاح روش ذرات هموار متحرک، روش‌های جدیدتری که عاری از مشکلات روش استاندارد بودند به وجود آمدند. در این فصل مروری بر مبنای روش ذرات هموار متحرک SPH از جنبه نظری و ریاضی انجام شده، فرمول‌بندی اساسی و معادلات پایه ذکر شده است.

¹ Ansys Workbench

² Smoothed Particle Hydrodynamics

۳-۳- اساس روش ذرات هموار متحرک SPH

روش SPH از جهاتی مشابه روش تفاضل محدود است که برای حل معادلات دیفرانسیل در فرم قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجه تشابه روش ذرات هموار متحرک SPH با روش تفاضل محدود در ارائه روابطی جهت برآورد عددی مشتقات یکسری داده در نقاط مورد نظر می‌باشد. در مقابل، برتری آن در قابلیت مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده با توزیع نسبتاً نامنظم ذرات است. بعلاوه ذرات امکان حرکت آزادانه در فضا را دارند که مدل‌سازی مسائل دینامیک سیالات و مسائل مکانیک جامدات درگیر با تغییر شکل‌های بزرگ را در دیدگاه لاگرانژی ممکن می‌نماید. این در حالیست که روش تفاضل محدود، تنها قابلیت حل مسائل را در دیدگاه اویلری دارد. روش SPH مبتنی بر تخمین مقدار تابع و یا مقادیر مشتقات آن در یک ذره برحسب مقادیر موجود در ذرات همجوار می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان فرم عددی مشتقات را در معادلات دیفرانسیل جایگزین فرم دقیق نموده و معادله را به صورت عددی حل نمود. ایده اساسی SPH برپایه خاصیتی از تابع دلتای دیراک می‌باشد که در روابط (۱-۳) و (۲-۳) ذکر شده‌اند.

تابع دلتای دیراک تابعی است که در تمام نقاط دامنه دارای مقدار صفر می‌باشد و تنها در نقطه $\xi = x_i$ مقدار بی‌نهایت را دارد.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \xi) d\xi = 1 \quad (1-3)$$

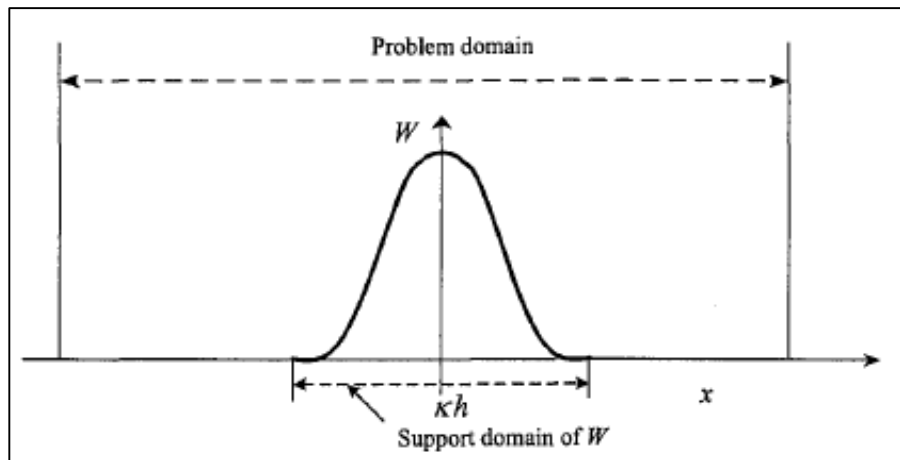
$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(\xi) \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \quad (2-3)$$

$u(x_i)$ مقدار تابع u در نقطه x_i می‌باشد. برای کاربردی نمودن خاصیت تابع دلتای دیراک، در روش SPH این تابع با تابع وزن w جایگزین می‌گردد. تابع وزن مورد استفاده باید مثبت باشد و مقادیر غیر صفر تابع در همسایگی نقطه مرکزی قرار داشته باشند. این همسایگی، دامنه هموارسازی نام دارد و در خارج از این همسایگی تابع وزن دارای مقدار صفر می‌باشد. شکل این تابع به صورت زنگوله‌ای می‌باشد

و سطح زیر نمودار آن مشابه خاصیت دلتای دیراک باید برابر یک باشد. خصوصیات و شروط اساسی تابع وزن w به طور خلاصه در روابط (۳-۳) ذکر شده‌اند.

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1) w > 0 & \text{Over } \Omega_i \text{ (Positivity)} \\ 2) w = 0 & \text{Outside } \Omega_i \text{ (Compact)} \\ 3) \int_{\Omega_i} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = 1 & \text{(Unity)} \\ 4) \text{Monotonically decreasing function} & \text{(Decay)} \\ 5) w \rightarrow \delta & \text{(Delta function behavior)} \end{array} \right. \quad (3-3)$$

که Ω_i دامنه هموارسازی با دامنه تأثیر و $w(|x_j - x_i|, h)$ مقدار تابع وزن می‌باشد که تابع فاصله بین ذره i , j و طول هموارسازی h است. شعاع این محدوده ضریبی از طول هموارسازی h (یعنی kh) در نظر گرفته می‌شود. مسائل حل شده در این پژوهش بر فرض مقدار $k=1$ استوارند. شکل ۱-۳ چگونگی تعریف این پارامترها را بر هندسه‌ی مسئله‌ای یک بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: نمایش دامنه تأثیر تابع هموارسازی W و دامنه مسئله. [3]

مجدداً متذکر می‌شود که مقدار تابع هموارسازی، خارج از دامنه تأثیرش، مقدار صفر دارد.

جزء حجم اشغال شده در اطراف نقطه x می‌باشد و عبارت $|x - x_i|$ مبین فاصله نقطه x واقع در دامنه هموارسازی تا ذره مرکزی i می‌باشد.

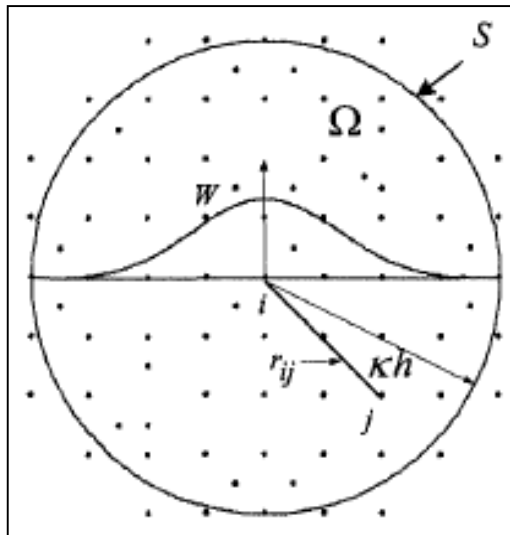
با به کارگیری تابع وزن مناسب که جزئیات آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، مقدار دقیق $u(x_i)$ با مقدار تقریبی $u^h(x_i)$ با استفاده از رابطه (۴-۳) جایگزین می‌شود.

$$u(x_i) \approx u^h(x_i) = \int_{\Omega_i} u(x) w(|x - x_i|, h) d\Omega_i \quad (4-3)$$

فرم ناپیوسته رابطه (۴-۳) مشابه یک میانگین‌گیری وزنی از مقادیر تابع در ذرات موجود در دامنه تأثیر ذره i می‌باشد.

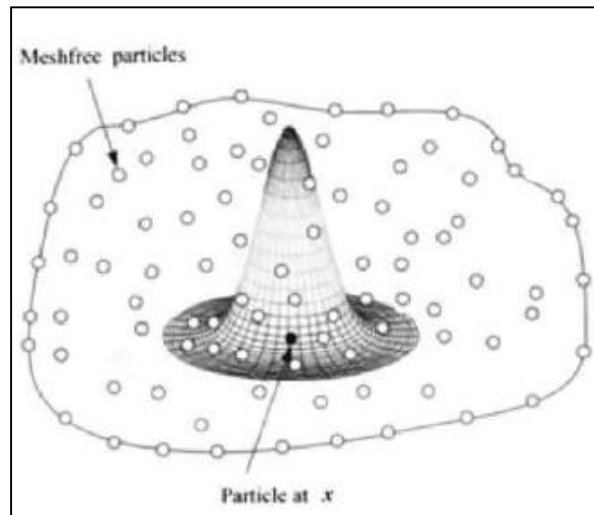
$$u^h(x_i) \approx \sum_{j=1}^N u_j w(|x_j - x_i|, h) \Delta v_j \quad (5-3)$$

که N تعداد ذرات همجوار موجود در دامنه هموارسازی Ω_i و Δv_j فضای اشغال شده توسط ذره j می‌باشد. در مسائل یک بعدی Δv_j به Δx_j تبدیل می‌شود که متوسطی است از فاصله ذره j تا نقاط همجوار. همان‌طور که در اشکال ۲-۳ و ۳-۳ مشخص شده است با دور شدن از ذره مرکزی مقدار تابع وزن کاهش می‌یابد، به بیان دیگر مقدار وزن در ذره j که در دامنه هموارسازی ذره مرکزی i واقع شده است تابع فاصله $r_{ij} = |x_j - x_i|$ از آن می‌باشد. با استفاده از رابطه (۵-۳) می‌توان مقادیر میانی از یک رشته داده گسسته را درونیابی نمود.



شکل ۲-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت

[3].2D



شکل ۳-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت

[3].3D

۳-۴- توابع وزن SPH

در مورد انتخاب و ساختن توابع وزن تحقیقات زیادی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به

تحقیقات Liu و همکارانش [3] اشاره کرد. نتایج این تحقیقات را مرور می‌کنیم؛

در اولین مقاله SPH, Lucy (1977) از تابع زنگوله‌ای شکل زیر استفاده کرده بود:

$$W(x-x', h) = W(R, h) = a_d \begin{cases} (1+3R)(1-R)^3 & \text{for } R \leq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۶-۳)$$

در تمام روابط ارائه شده برای توابع هموارساز گوناگون. پارامتری جهت ارضاء شرط سوم از رابطه (۳-)

(۶) یعنی شرط واحد (واحد بودن سطح زیر نمودار تابع وزن) و نرمالیزه کردن ملحوظ می‌گردد. این

پارامتر را a_d می‌نامیم. a_d تابع هموارساز (۶-۶). در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر

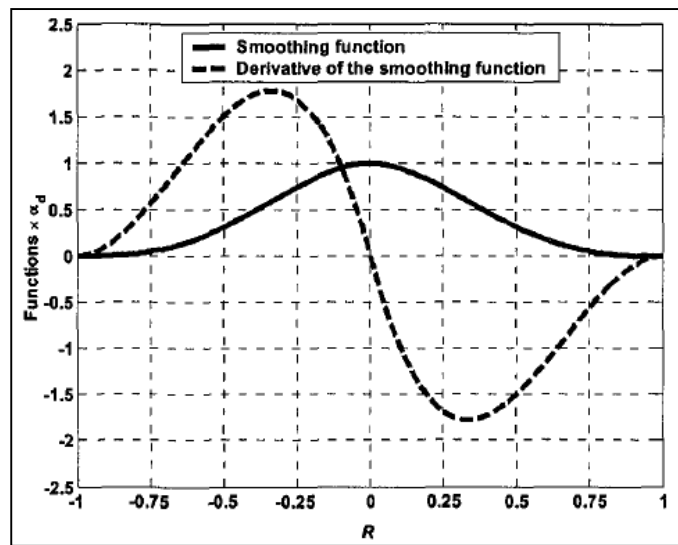
$$[3,4]. R = \frac{r_{ij}}{h} \text{ خواهد بود و } \frac{105}{16\pi h^3}, \frac{5}{\pi h^2}, \frac{5}{4h}$$

فاصله‌ی نسبی بین دو ذره را این‌گونه تعریف می‌کنیم:

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = |x_{ij}|$$

$$s = \frac{r_{ij}}{h} \quad (۷-۳)$$

در برخی نوشتجات، s را با نام R نیز می‌شناسند (مانند رابطه (۶-۶)). شکل ۳-۴ نمایانگر تابع هموارساز (۶-۶) است.



شکل ۳-۴: تابع هموار ساز Lucy و مشتق اولش. [3]

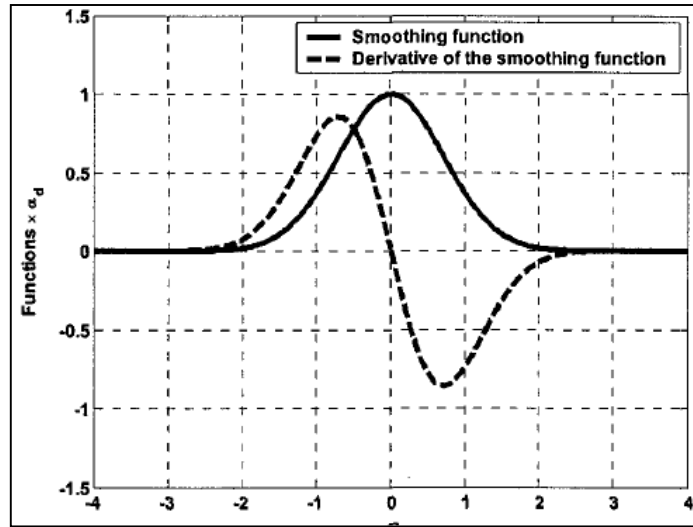
چندی بعد (1992) Monaghan در مقالات خود به این نتیجه رسید که هسته‌ی تابع هموارساز SPH می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین‌منظور استفاده از تابع گاوسی را پیشنهاد نمود:

$$W(R, h) = a_d e^{-R^2} \quad (۸-۳)$$

a_d تابع هموارساز (۸-۳)، در حالات یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر

$$\frac{1}{h^3 \sqrt{\pi^3}}, \frac{1}{\pi h^2}, \frac{1}{h \sqrt{\pi}}$$

خواهد بود.



شکل ۳-۵: تابع هموارساز Monaghan با هسته‌ی گاوسی و مشتق اولش [3]

پس از تحقیقات متعدد، Monaghan and Lattanzio (1985) تابع هموارسازی برپایه‌ی کثیرالجمله‌های درجه سه ارائه کرد.

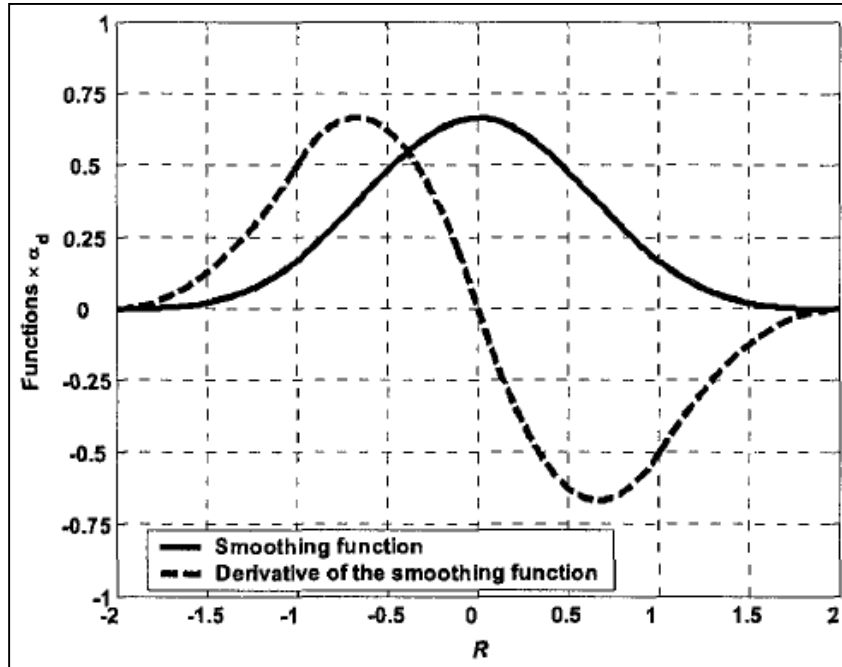
$$W(R, h) = a_d \times \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2} R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6} (2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9-3)$$

a_d تابع هموارساز (۹-۳)، در حالات یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{3}{2h^3\pi}$ ، $\frac{15}{7\pi h^2}$ ، $\frac{1}{h}$ خواهد بود.

به دلایل پرشماری از جمله شباهت به هسته‌ی گاوسی، اثرات کمتر فشردگی در مرزها و هموار باقی ماندن تابع هموارساز در برخی مشتقات مراتب بالاتر (برخلاف تابع گاوسی)، تابع اخیر را به عنوان

متداول‌ترین هسته SPH می‌شناسند که اغلب در مقالات و پژوهش‌های اخیر از آن استفاده می‌شود.

[۴]



شکل ۳-۶: تابع هموار ساز Cubic Spline و مشتق اولش. [3]

طی سالیان اخیر، محققان به فراخور موضوع کاری در صدد استخراج توابعی برآمدند که حداکثر کارایی و حداقل خطا را در آن زمینه فراهم آورد. لذا، دامنه‌ی گسترده‌ای از انواع گوناگون توابع هموارساز SPH در دسترس است که در ادامه به اهم آن‌ها در قالب جدول ۳-۱ اشاره‌ای گذرا خواهد شد.

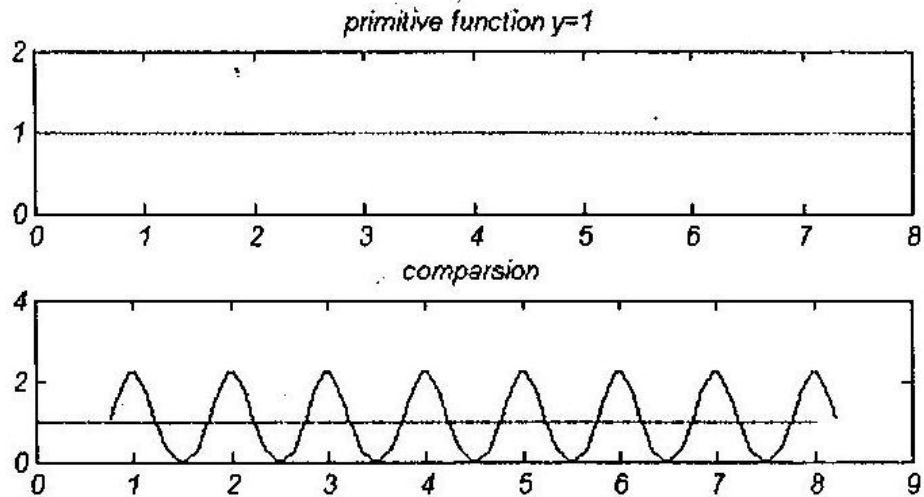
پس از بررسی عامل (مقدار تابع وزن در هر ذره) W از روابط SPH، اکنون بر روی پارامتر طول هموارساز تمرکز می‌کنیم. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در دقت روش SPH مقدار طول هموارسازی h می‌باشد. در صورتی که h کوچک باشد تعداد نقاط قرار گرفته در دامنه تأثیر تابع وزن کم شده و ممکن است به صفر برسد در این صورت مقدار برآورد شده در نقطه میانی قابل اعتماد نمی‌باشد، برعکس در صورتی که h بزرگ باشد نقاط دور از نقطه مورد نظر نیز در برآورد مقدار مؤثر

خواهد بود و نتایج حل مسئله به سوی همواری شدید می‌گرایند، به این ترتیب، جواب مناسب و با دقت قابل قبول به دست نمی‌آید. [۴]

به عنوان مثال اگر تابع دلتای دیراک را، که در آن h به سمت صفر میل می‌کند، برای برازش نقاط گسسته استفاده کنیم شکل تابع برازش هموار نیست و به صورت ضربانی (نوسانات خیلی شدید) می‌باشد. در این صورت جواب، تنها در نقاط داده کاملاً دقیق بوده و در بقیه نقاط صفر است. برای روشن‌تر شدن مطلب فوق تابع $y=1$ را که بر روی مجموعه دامنه رشته داده ورودی به صورت مجموعه اعداد طبیعی بین یک تا هشت $X=\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ تعریف شده است در نظر می‌گیریم. نتایج حاصل از درونیابی با استفاده از رابطه (۳-۵) در بیست نقطه با توزیع یکنواخت در بازه یک تا هشت با بکارگیری تابع وزن ذکر شده در رابطه (۳-۹) در شکل (۳-۷) نمایش داده شده است. [۴]

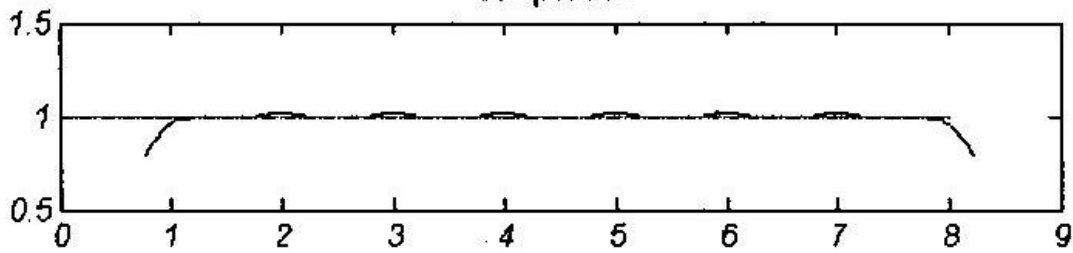
جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از اهم توابع هموارساز SPH [3]

Name	Smoothing function $W(R, h)$	
Quartic (Lucy, 1977)	$\alpha_d(1+3R)(1-R)^3$	$R \leq 1$
Guassian (Gingold and Monaghan, 1977)	$\alpha_d e^{-R^2}$	
Piecewise cubic spline (Monaghan and Lattanzio, 1985)	$\alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2-R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \end{cases}$	
Piecewise quartic (Morris, 1996)	$\alpha_d \begin{cases} (R+2.5)^4 - 5(R+1.5)^4 + 10(R+0.5)^4 & 0 \leq R < 0.5 \\ (2.5-R)^4 - 5(1.5-R)^4 & 0.5 \leq R < 1.5 \\ (2.5-R)^4 & 1.5 \leq R \leq 2.5 \end{cases}$	
Piecewise quintic (Morris, 1996)	$\alpha_d \begin{cases} (3-R)^5 - 6(2-R)^5 + 15(1-R)^5 & 0 \leq R < 1 \\ (3-R)^5 - 6(2-R)^5 & 1 \leq R < 2 \\ (3-R)^5 & 2 \leq R \leq 3 \end{cases}$	
Quadratic (Johnson et al., 1996b)	$\alpha_d \left(\frac{3}{16}R^2 - \frac{3}{4}R + \frac{3}{4} \right)$	$0 \leq R \leq 2$
Super Gaussian (Monaghan and Lattanzio, 1985)	$\alpha_d \left(\frac{3}{2} - R^2 \right) e^{-R^2}$	$0 \leq R \leq 2$
Dome-shaped quadratic (Hicks and Liebrock, 2000)	$\alpha_d(1-R^2)$	$0 \leq R \leq 1$
New quartic (Liu, Liu and Lam, 2002)	$\alpha_d \left(\frac{2}{3} - \frac{9}{8}R^2 + \frac{19}{24}R^3 - \frac{5}{32}R^4 \right)$	$0 \leq R \leq 2$

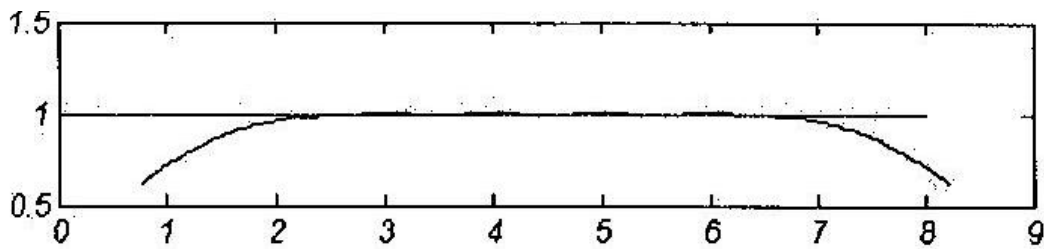


شکل ۳-۷: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.3 است با استفاده از روش SPH [3].

اولین نکته‌ای که از شکل ۳-۷ برداشت می‌شود تأثیر انتخاب طول دامنه هموارسازی h در دقت عملیات درون‌یابی با استفاده از روش ذرات هموار متحرک SPH است. همان‌گونه که از اشکال ۳-۸ و ۳-۹ استنباط می‌شود. با روند افزایش طول دامنه هموارسازی رفتار تابع تقریبی حاصل از آنالیز SPH به رفتار تابع دقیق اولیه می‌گراید. چنان‌چه این افزایش طول دامنه هموارسازی بی‌وقفه ادامه یابد، به همواری بیش از حد می‌انجامد و نتایج تحلیل غیرقابل اعتماد خواهد بود، همان‌گونه که از شکل ۳-۱۰ برمی‌آید. لذا، در این مثال (و اغلب مسائل یک بعدی)، مناسب‌ترین مقدار برای h متوسط فاصله نقطه مرکزی از نقاط همجوار آن می‌باشد که در صورت متساوی‌الفاصله بودن نقاط موجود در دامنه اطلاعات ورودی، این طول برابر فاصله نقاط لحاظ می‌گردد.



شکل ۳-۸: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.75 است با استفاده از روش SPH [3].

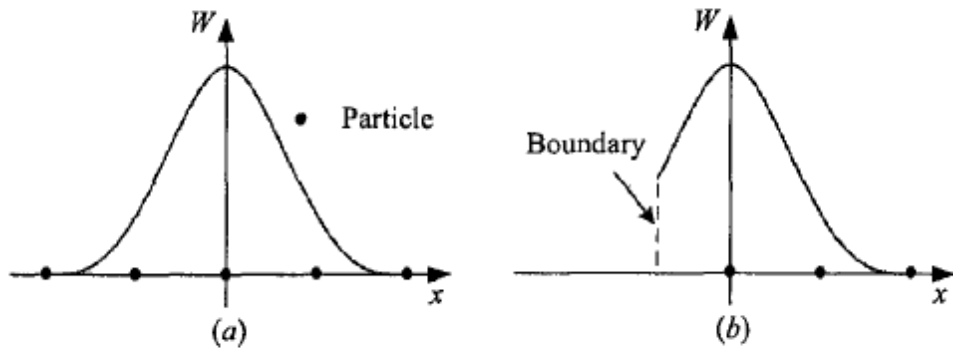


شکل ۳-۹: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 1.55 است با استفاده از روش SPH [3].



شکل ۳-۱۰: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 2.6 است با استفاده از روش SPH [3].

نتیجه دیگری که از اشکال ۳-۷ تا ۳-۱۰ دریافت می‌گردد عدم دقت روش SPH در نقاط نزدیک به مرز و روی مسأله (نقاط ۱ و ۸) می‌باشد که علت آن از بین رفتن شرط واحد بودن سطح زیر تابع وزن می‌باشد. این نقیصه در شکل ۳-۴۵ به خوبی نشان داده شده است. [۴]



۳-۱۱: از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH [3]

۳-۵- محاسبه مقدار مشتق اول توابع با استفاده از روش SPH

در روش اجزای محدود مشتق میدان متغیر به صورت مقادیر گرهی ضربدر مشتق توابع شکل تقریب زده می‌شود. به طور مشابه در روش ذرات متحرک نیز محاسبه مشتق یک تابع عددی معلوم در نقاط دامنه با دانستن مقادیر مشتق تابع وزن در نقاط واقع در دامنه هموارسازی ممکن می‌گردد. یکی از شرایط حصول مشتقات مراتب بالاتر مشتق‌پذیری مراتب بالاتر تابع وزن باشد. در صورتی که مختصات گره مرکزی x_i باشد، برآورد مقدار مشتق نسبت به متغیر x_a ، در نقطه i با در نظر گرفتن داشتن رابطه (۳-۴). با استفاده از روش انتگرالگیری جزء به جزء امکان‌پذیر است. [۴]

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right) &\approx \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = \\ &u(x) \cdot w(|x - x_i|, h) \Big|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i \end{aligned} \quad (10-3)$$

در صورتی که تابع وزن به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار آن در مرز دامنه هموارسازی صفر باشد، جمله اول رابطه (۳-۱۰) صفر می‌شود و فرم گسسته این رابطه را می‌توان به فرم رابطه (۳-۱۱) نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x_a} \approx \left(\frac{\partial u}{\partial x_a}\right)_i^h = - \sum_{j=1}^N u(x_j) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \quad (11-3)$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a}$ مقدار عددی مشتق تابع وزن نسبت به متغیر x_a در نقطه واقع در

مختصات $x_j = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_j$ که در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی به مختصات

$x_i = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_i$ می‌باشد. در عمل برای محاسبه مشتق تابع وزن نسبت به متغیر مستقل x_a با

توجه به قاعده زنجیری مشتق، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} = \frac{\partial s}{\partial x_a} \cdot \frac{dw(s, h)}{ds}$$

$$s = |x - x_i| / h = r / h$$

$$r = \sqrt{(x_a - (x_a)_i)^2 + (x_\beta - (x_\beta)_i)^2 + (x_\gamma - (x_\gamma)_i)^2} \quad (12-3)$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_a} = \frac{1}{h} \cdot \frac{x_a - (x_a)_i}{r}$$

بدین ترتیب مشتق تابع وزن معرفی شده در رابطه (۹-۳) براساس رابطه (۱۳-۳) قابل محاسبه است.

$$\frac{dw(s, h)}{ds} = \alpha_d \begin{cases} -2s + 3/2s^2 & 0 \leq s < 1 \\ -0.5(2-s)^2 & 1 \leq s \leq 2 \\ 0 & s > 2 \end{cases} \quad (13-6)$$

شکل ۶-۶ تابع وزن معرفی شده در رابطه (۹-۳) و مشتق نظیرش را که در رابطه (۱۳-۳) به

دست آمد نشان می‌دهد. با توجه به شکل زنگوله‌ای تابع وزن و فرم متقارن آن مشتق این تابع نسبت

به متغیرهای مستقل x_a پاد متقارن می‌باشد. این نکته به عنوان یک تست برای صحت روابط

مشتق‌گیری می‌تواند به کار رود. به این صورت که افزودن مقدار ثابت c به مقادیر تابع در نقاط دامنه

در مقدار مشتق در نقطه i تأثیر نخواهد گذارد:

$$\left(\frac{\partial(u+c)}{\partial x_a}\right)_i^h = -\sum_{j=1}^N (u_j + c) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \approx -\sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j = \left(\frac{\partial u}{\partial x_a}\right)_i^h \quad (14-6)$$

در رابطه فوق و روابط آتی برای ساده شدن بیان روابط، مقدار عددی تابع در یک نقطه مانند z به

جای $u(x_j)$ با u_j نشان داده می‌شود. مشابه عملیات درون‌یابی، برآورد مشتقات مرتبه اول با استفاده

از روش ذرات هموار متحرک به دلیل عدم ارضاء شرط یکتایی تابع وزن در نواحی مرزی توأم با عدم دقت می‌باشد. [۴]

۳-۵-۱ محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر در روش SPH

برای محاسبه مشتق دوم نیز مجدداً از روش انتگرال‌گیری جزء به جزء استفاده می‌گردد.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right) &\approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_a^2} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = \\ &\left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right) \cdot w(|x - x_i|, h) \Big|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i \quad (15-3) \\ &= \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot w(|x - x_i|, h) \Big|_0^{kh} - u(x) \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} + \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial^2 w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a^2} d\Omega_i \end{aligned}$$

توابع وزن به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که دو جمله اول رابطه (۱۵-۳) حتی المقدور حذف گردد.

این نکته قابل توجه است که برخلاف روند محاسبه مشتق اول، حذف تمامی جملات مرزی با استفاده از انتخاب تابع وزن مناسب برای محاسبه مشتق دوم دشوار می‌باشد. بنابراین در نظر گرفتن رابطه مشتق دوم تابع u به صورت زیر با تقریب همراه می‌باشد.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right) \approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h = \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial w_{ij}^2}{\partial x_a^2} \Delta v_j \quad (16-3)$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w_{ij}^2}{\partial x_a^2}$ مقدار عددی مشتق دوم تابع وزن نسبت به متغیر x_a در نقطه z واقع

در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی i می‌باشد که از رابطه (۱۶-۳) محاسبه می‌گردد. با همین شیوه می‌توان رابطه کلی‌تری برای محاسبه مقدار مشتق دوم توابع چند متغیره در فرم گسسته نوشت.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a \partial x_\beta}\right) \approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a \partial x_\beta}\right)_i^h = \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial^2 w_{ij}}{\partial x_a \partial x_\beta} \Delta v_j \quad (17-3)$$

مشتق تابع وزن نسبت به متغیرهای مستقل از رابطه (۱۸-۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial w(|x-x_i|, h)}{\partial x_a \partial x_\beta} = \frac{\partial s}{\partial x_a} \left(\frac{d^2 w(s, h)}{ds^2} + \frac{1}{s} \frac{dw(s, h)}{ds} \right) \frac{\partial s}{\partial x_\beta} + \frac{\delta_{a\beta}}{sh^2} \frac{dw(s, h)}{ds}$$

$$s = |x - x_i| / h = r / h$$

$$r = \sqrt{(x_a - (x_a)_i)^2 + (x_\beta - (x_\beta)_i)^2 + (x_\gamma - (x_\gamma)_i)^2}$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_a} = \frac{1}{h} \cdot \frac{x_a - (x_a)_i}{r}$$

(۱۸-۳)

۳-۶- شرط هم رفتاری

اگر یک روش تقریبی بتواند چند جمله‌ای از درجه k را به طور دقیق بازیافت نماید، گفته می‌شود این روش از درجه k هم رفتار است. روش SPH دچار فقدان هم رفتاری در نواحی مرزی و نزدیک مرز می‌باشد. تلاش‌های بسیاری جهت بهبود این نقیصه انجام شده است که به معرفی روش‌های ذرات متحرک جدیدتر CSPM, MSPH, RKPM منتهی گردید. در ادامه اساس روش CSPM و برتری‌های آن بر محاسبه مقادیر مرزی نسبت به روش SPH تشریح می‌شود.

۳-۷- روش هیدرودینامیک ذرات هموار اصلاح شده CSPM

روش CSPM توسط Chen و همکارانش در سال ۱۹۹۹ و براساس بسط سری تیلور معرفی گردید. از آن‌جا که تعاریف اساسی در این بخش از روش ذرات هموار متحرک SPH اقتباس شده است در بیان روابط مربوط به روش اصلاح شده تعاریف مجدد پارامترهایی که در بخش قبل ذکر شده‌اند انجام نشده است. در ابتدای این بخش روش مورد نظر در فضای یک بعدی توضیح داده می‌شود و سپس تعمیم آن برای حالات چند بعدی بیان می‌گردد. سری بسط تیلور تابع $u(x)$ در اطراف نقطه x_i تا جمله سوم در فضای یک بعدی به صورت رابطه ۳-۱۹ در نظر گرفته می‌شود.

$$u(x) = u(x_i) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i (x - x_i) + 1/2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i (x - x_i)^2 + O(\Delta x^3) \quad (۱۹-۳)$$

جمله $O(\Delta x^3)$ مبین مرتبه خطای رابطه فوق بر حسب Δx است که فاصله نقطه برآورد x تا

نقطه مرکزی x_i می‌باشد.

برای برآورد مقدار u در یک نقطه دلخواه x_i برحسب مقادیر معلوم تابع در نقاط مجاور x_j ، با استفاده از روش CSPM تنها اولین جمله از سری بسط تیلور لحاظ می‌گردد. با ضریب رابطه (۳-۱۹) در یک تابع وزن متقارن w^s ، با صرف نظر از جملات مراتب بالاتر و انتگرال گیری در دامنه هموارسازی مشابه آن چه در روش ذرات هموار متحرک انجام شد، فرم ناپیوسته زیر به دست می‌آید:

$$(u)_i^h = \frac{\sum_{j=i}^N u_j \cdot w_{ij}^s \Delta x_j}{\sum_{j=i}^N w_{ij}^s \Delta x_j} \quad (۳-۲۰)$$

با لحاظ نمودن دو جمله اول بسط سری تیلور و در پیش گرفتن روندی مشابه آن چه برای رسیدن به رابطه (۳-۲۰) انجام گرفت، با ضریب تابع وزن پاد متقارن w^a فرم ناپیوسته برای برآورد اولین مشتق u ، به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i^h = \frac{\sum_{j=i}^N (u_j - u_i) w_{ij}^a \Delta x_j}{\sum_{j=1}^N w_{ij}^a (x_j - x_i) \Delta x_j} \quad (۳-۲۱)$$

توابع وزن متقارن و پاد متقارن مورد استفاده در روابط (۳-۲۰) و (۳-۲۱) به ترتیب می‌توانند تابع وزن معرفی شده در (۳-۹) و مشتق آن (۳۱۳) باشند. با این تفاوت که دیگر لزومی به برقراری شرط سطح واحد زیر نمودار تابع وزن نمی‌باشد و نیازی به در نظر گرفتن ضریب a_d نیست. روابط (۳-۲۰) و (۳-۲۱) خطای موجود در روش SPH استاندارد را کاهش می‌دهد. Chen و همکارانش در حالت چند بعدی نشان دادند که این روش می‌تواند مشتقات میدان‌های ثابت و خطی را در نواحی مرزی به طور دقیق بازتولید نماید.

برای محاسبه مشتق دوم یک تابع، تنها سه جمله اول رابطه (۳-۲۱) را برای تقریب در نظر گرفته، تابع وزن مورد نظر به مرکزیت نقطه i را در طرفین ضرب نموده و انتگرال گیری می‌نماییم:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i = \frac{\int [u(x) - u(x_i)] w dx - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i \int (x - x_i) w dx}{\frac{1}{2} \int (x - x_i)^2 w dx} \quad (22-3)$$

تابع وزن w در رابطه فوق باید متقارن باشد تا امکان صفر شدن مخرج در بعضی حالات خاص وجود نداشته باشد بنابراین w در رابطه (۲۲-۳) با w^s جایگزین می‌گردد و در نهایت فرم عددی رابطه (۲۲-۳) را می‌توان به صورت رابطه (۲۳-۳) نوشت.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i^h = \frac{\sum_{j=1}^N (u_j - u_i) w_{ij}^s \Delta x_j - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i^h \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^s \Delta x_j}{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (x_j - x_i)^2 w_{ij}^s \Delta x_j} \quad (23-6)$$

مقدار $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i$ در رابطه (۲۳-۳) از رابطه (۲۱-۳) مقدار دهی می‌شود و رابطه (۲۴-۳) برای محاسبه مشتق دوم به روش CSPM به دست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i^h = \frac{\sum_{j=1}^N (u_j - u_i) w_{ij}^s \Delta x_j \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^a \Delta x_j - \sum_{j=1}^N (u_j - u_i) w_{ij}^a \Delta x_j \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^s \Delta x_j}{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N w_{ij}^s (x_j - x_i)^2 \Delta x_j \sum_{j=1}^N w_{ij}^a (x_j - x_i) \Delta x_j} \quad (24-3)$$

محاسبه مشتق دوم با استفاده از روش CSPM به این صورت است که بسط تیلور باید حاوی مشتق‌های مرتبه دوم باشد. این مشتق‌ها در حالت سه بعدی عبارتند:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_\beta \partial x_\gamma}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_a \partial x_\gamma}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_a \partial x_\beta}, \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x_\gamma}, \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x_\beta}, \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x_a}$$

پس از ضرب بسط تیلور در هر یک از عبارات

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x_\beta \partial x_\gamma}, \frac{\partial^2 w}{\partial x_a \partial x_\gamma}, \frac{\partial^2 w}{\partial x_a \partial x_\beta}, \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x_\gamma}, \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x_\beta}, \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x_a}$$

و انتگرال‌گیری در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی i شش معادله به دست خواهد آمد که حاوی مشتقات اول و دوم می‌باشد. با محاسبه مشتقات مرتبه اول از معادله کلی (۲۵-۳) این شش معادله

تنها دارای شش مجهول شامل مشتقات مرتبه دوم تابع u می‌باشند و با تبدیل فرم انتگرالی به فرم عددی به راحتی محاسبه‌اند. Chen و همکارانش در حالت چند بعدی نشان دادند که این روش می‌تواند مشتقات مرتبه دوم میدانهای ثابت، خطی و سهمی را در نواحی مرزی به طور دقیق بازتولید نماید. [۴]

$$du = W^{-1} \cdot u \quad (۲۵-۳)$$

۳-۸- روش‌های دیگر از هیدرودینامیک ذرات هموار

روش دیگری در سال ۲۰۰۴ توسط G.M. Zhang, R. C. Batra پیشنهاد شده است به این ترتیب که برای برآورد مشتقات تا مرتبه دوم یک تابع سه متغیره براساس بسط تیلور حاوی مشتقات اول و دوم، ده معادله ساخته شده و به طور همزمان حل می‌گردند. این ده معادله از ضرب بسط تیلور در تابع وزن (یک معادله)، مشتقات اول تابع وزن (سه معادله) و مشتقات دوم تابع وزن (شش معادله) و انتگرال‌گیری در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی و نوشتن فرم عددی روابط حاصل به دست می‌آیند. ده معادله حاصل به طور همزمان حل شده و ده مجهول که شامل تابع و کلیه مشتقات اول و دوم آن هستند، به طور همزمان قابل محاسبه می‌باشند. این روش به نام MSPH معروف است و نسبت به روش CSPM از دقت نسبتاً بیشتری برخوردار است. روش ذرات هسته بازیافتی [RKPM] در سال ۱۹۹۵ توسط W.K.Liu و همکارانش برای رسیدن به درجه هم رفتاری مورد نظر ابداع گردید. در این روش می‌توان با ضرب کردن یک تابع تصحیح در تابع وزن، ضمن دستیابی به درجه هم رفتاری لازم، دقت در مرزها را نیز بالا برد. جهت تمرکز بر روش مورد استفاده در این پژوهش و نیز پرهیز از ذکر مطالب مازاد، از ذکر جزئیات و فرمول‌بندی آن‌ها صرف‌نظر می‌کنیم.

۳-۹- شرایط مرزی

مورد دیگری که در روش ذرات متحرک بسیار حایز اهمیت است اعمال شرایط مرزی می‌باشد. در روش ذرات متحرک اصلاح شده یا CSPM از آن‌جا که دقت حل در مرزها قابل قبول می‌باشد.

می‌توان شرایط مرزی را به طور مستقیم ارضا کرد. پس از انجام مروری سریع بر روش‌های ذرات متحرک و ارائه کاربردهای ساده از روش CSPM و آشنایی با مشکل بروز ارتعاشات ناخواسته که در مسائل چند بعدی حل را ناپایدار می‌نماید. در ادامه به ریشه‌یابی این خطاها و مروری بر روشهای رفع این ناپایداری‌ها، معرفی پایدارسازهای متداول و تکنیک اعمال شرایط مرزی پرداخته خواهد شد.

۳-۱۰- اعمال شرایط مرزی، پایدارسازی و بهبود عملکرد روش SPH

علیرغم کاربرد وسیع روش ذرات هموار متحرک SPH، گسترش آن با موانعی مواجه بوده است. از مشکلات این روش می‌توان به فقدان هم رفتاری، و نتیجتاً نبود دقت در مرزها و عدم امکان اعمال شرایط مرزی به طور مستقیم اشاره نمود. هم‌چنین بروز مودهای ناپایداری از جمله مشکلات عمده روش ذرات هموار متحرک می‌باشد.

در این بخش ابتدا مرور مختصری بر روش‌های اعمال شرایط مرزی در صورت استفاده از روش ذرات هموار متحرک SPH انجام می‌گیرد سپس تعدادی از روش‌های پایدارسازی روش مذکور معرفی می‌گردند.

۳-۱۰-۱- عدم دقت در اعمال شرایط مرزی (تاریخچه)

همان‌طور که پیش از این اشاره گردید برآورد مقادیر میدانی با استفاده از روش SPH استاندارد، در ذرات واقع در روی مرز و یا در نزدیکی آن، به علت این‌که نقاط همسایه تنها در یک طرف ذره مرکزی قرار می‌گیرند و شرط یکه (واحد) بودن از بین می‌رود، با عدم دقت همراه می‌باشد، این مسأله اعمال شرایط مرزی را دچار مشکل می‌نماید. روش‌هایی که تاکنون برای بهبود بخشیدن این نارسایی به کار گرفته شده است عبارتند از: در سال ۱۹۸۹، Campbel شرط مرزی را با در نظر گرفتن جمله مرزی که در نتیجه انتگرال‌گیری جزء به جزء به دست می‌آید اعمال کرد.

برخلاف نقاط داخلی که در آن‌ها این جمله صفر می‌باشد، در نزدیکی مرز این جمله صفر نمی‌باشد. در سال ۱۹۹۳، Libersky و Petschek برای اولین بار نقاط مجازی را که به صورت قرینه ذرات حقیقی

نسبت به مرز تعریف می‌شدند، در نظر گرفتند. روش پیشنهادی Monaghan در سال ۱۹۹۴ با تعریف ذراتی که درست روی مرز قرار داشتند انجام شد. خصوصیت این ذرات این بود که با نزدیک شدن ذرات داخلی به آن‌ها، نیروی رانشی متناسب با فاصله نسبی ذره نزدیک شوند وارد می‌کردند. این نیرو برای جلوگیری از نفوذ ذرات داخلی در مرزهای مسأله تعریف شده بود. بعدها در سال ۱۹۹۶، Johnson یک تابع وزنی نرمالایز شده را برای مسائل متقارن محوری تعریف کرد که مبتنی بر شرط سرعت کرنش یکنواخت بود. این روش را بعدها به حالت سه بعدی تعمیم داد. در کاری که Liu در سال ۲۰۰۲، درباره بررسی انفجار زیر آب انجام داده است شرط مرزی جامد با تعریف دونوع ذره مجازی اعمال شده است. دسته اول ذرات مجازی که درست روی مرز واقع می‌باشد مشابه کار Monaghan در سال ۱۹۹۴ می‌باشد. دسته دوم ذرات مجازی مشابه کار Libersky در سال ۱۹۹۳ می‌باشد که ذرات مجازی روی مرز تعریف می‌شوند. این ذرات مجازی درست قرینه ذرات داخلی حقیقی که فاصله آن‌ها تا مرز کمتر از طول هموارسازی می‌باشد تعریف می‌شوند. فشار و چگالی آن‌ها درست به اندازه ذره حقیقی متناظرشان است و سرعت آن‌ها قرینه آینه‌ای سرعت ذرات حقیقی متناظر آن‌ها نسبت به مرز می‌باشد. ذرات مجازی نوع دو برای جلوگیری از نفوذ ذرات حقیقی به داخل مرز کافی نمی‌باشد، بنابراین از ذرات مجازی نوع یک نیز استفاده می‌شود. بنابراین سه نوع ذره می‌توانند در محدوده دامنه هموارسازی ذرات نزدیک مرز قرار گیرند:

(۱) ذرات حقیقی

(۲) ذرات مجازی نوع یک (ذرات روی مرز که وارد کننده نیروی رانشی می‌باشند)

(۳) ذرات مجازی نوع دو (ذرات خارج از مرز)

این نکته قابل ذکر است که موقعیت و متغیرهای فیزیکی ذرات مجازی نوع یک تغییر نمی‌کند. اما ذرات نوع دو در هر گام زمانی باید به گونه‌ای باز تولید شوند که خصوصیات ذکر شده از نظر تقارن را

دارا باشند. نتایج عددی ارائه شده نشان می‌دهند که اعمال شرایط مرزی به ترتیب ذکر شده بسیار پایدار و مؤثر می‌باشد. [۴]

۳-۱۰-۲- تکنیک‌های پایداری

یکی از روش‌های متداول برای پیشگیری از خطای پراکندگی در روش ذرات متحرک افزودن جملاتی مشابه جملات خطا، به معادله دیفرانسیل می‌باشد. این جمله اضافه تحت عنوان ویسکوزیته مصنوعی از نفوذ ذرات در یکدیگر جلوگیری می‌نماید. اولین بار Monaghan ویسکوزیته مصنوعی را برای پایداری نمودن مسأله موج شوک مورد استفاده قرار داد. Chen و همکارانش استفاده از معادلات حاکم بر مبنای تغییر مکان را برای کاهش ارتعاشات فرکانس بالا پیشنهاد نمود [3,4,5,30]. یکی از روش‌های دیگر هموارسازی میدان متغیرهاست که در بند بعدی تشریح می‌شود. به علاوه، اعمال نیروی پنالته (نیروی دافعه) نیز از رویکردهای پایداری سازی روند حل عددی است که در انتهای این فصل به آن اشاره خواهد شد.

الف) روش ویسکوزیته مصنوعی

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کاهش خطای پراکندگی عددی و نفوذ ذرات در یکدیگر روش ویسکوزیته مصنوعی می‌باشد که با افزودن جمله اضافه به معادلات پایه سعی بر پایداری حل دارد. رابطه (۲۶-۳) یکی از متداول‌ترین ترم‌های پایداری می‌باشد که در سال ۱۹۸۳ توسط Monaghan و Gingold پیشنهاد شده است.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-a_l \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta_l \cdot \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & \text{if } v_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26-3)$$

$$\mu_{ij} = \frac{h_{ij} \cdot v_{ij} \cdot x_{ij}}{|r_{ij}|^2 + kh_{ij}^2} \quad (27-3)$$

که \bar{c}_{ij} متوسط سرعت موج در ذرات i, j بوده و $\bar{\rho}_{ij}$ و h_{ij} به ترتیب متوسط چگالی و متوسط طول هموارسازی ذرات i, j می‌باشد v_{ij} نیز سرعت نسبی این دو ذره است. موقعیت نسبی دو ذره نیز با x_{ij} نشان داده می‌شود. پارامترهای β_1, a_1 و k ثابت می‌باشند و مقادیر آنها نسبت به مسئله مورد نظر تغییرپذیر است و حدود استاندارد آنها در مسائل انفجار توسط Liu در مرجع [3] بیان شده است. در اغلب شرایط می‌توان مقادیر روبرو را پذیرفت.

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ \beta_1 &= 1 \\ k &= 0.01 \end{aligned}$$

با اعمال ترم پایدارساز (۲۶-۳) معادله تعادل در ذره i ، به صورت رابطه (۲۸-۳) بازنویسی می‌شود.

$$\rho_i \frac{dw_i}{dt} = \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)_i + \sum_{j=1}^N m_j \Pi_{ij} \frac{\partial w_{ij}}{\partial x} \quad (28-3)$$

جهت اطلاعات بیشتر در مورد این پایدار سازها و انواع آنها می‌توان مرجع [3] را دید. در نهایت ترم‌های پایدارساز به صورت نیروهای بین ذره‌ای عمل کرده و هنگامی که ذرات در اثر ارتعاشات زائد، با سرعت زیاد به هم نزدیک می‌شوند از نفوذ آنها در یکدیگر ممانعت می‌نماید.

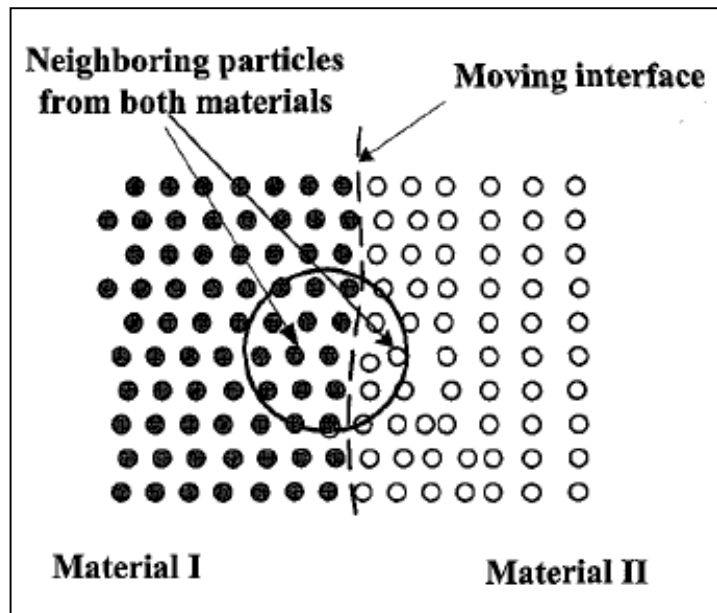
(ب) روش هموارسازی برای پایدارسازی

از خواص مهم برازش تابع با استفاده از SPH و CSPM این است که این روش‌ها نوعی متوسط‌گیری وزنی می‌باشند. در این روش دو دامنه هموارسازی با دو طول هموارسازی مختلف تعریف می‌شود. یکی برای برآورد عددی مشتق که با h نشان داده می‌شود و دیگری برای هموارسازی میدان نوسانی استفاده می‌شود که با h' نشان داده می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده این مطلب به وضوح قابل برداشت است که رفتار کلی مسائل پایدار شده با روش‌های مختلف از لحاظ حذف پراکندگی عددی و القاء میرایی عددی مشابه می‌باشد. نکته مهمی که باید در انتخاب مقدار h' توجه داشت این است که این مقدار نسبت به h از طرفی نباید آن قدر کم باشد که مانع انجام عملیات

هموارسازی گردد و از طرفی نباید خیلی زیاد باشد، که میرایی بیش از اندازه به سیستم وارد نماید و موجب از دست رفتن غیرقابل قبول انرژی سیستم گردد. [30]

(ج) نیروی پنالتی

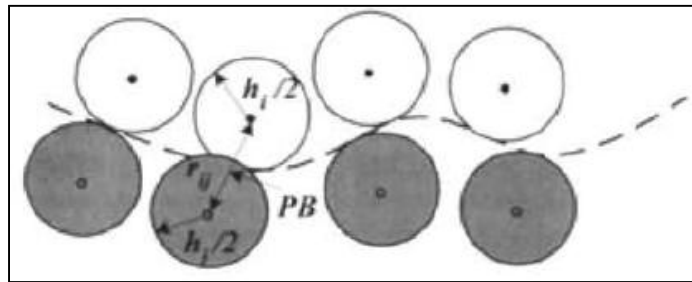
برای مسائلی با شدت نیرویی بسیار زیاد و شماری از اندرکنش‌های مرزی مانند آنچه در پدیده‌ی انفجار زیر آب رخ می‌دهد، نفوذ غیرفیزیکی و اختلاط ذرات گوناگون در یکدیگر یکی از مسئله‌سازترین مواردی است که جهت دستیابی به حلی پایدار، می‌بایست در جهت رفع آن کوشید. از آن‌جا که نفوذ غیرفیزیکی ذرات روش SPH در هم، موجب بروز جواب‌های واگرا، ناپایدار و بی‌معنی می‌شود، لذا لازم است که به طریقی از این درهم آمیختگی که محصول شدت میدان فشار و سرعت به ویژه حالات چند ماده‌ای (چند فازی) است. جلوگیری شود. همان‌گونه که در شکل ۳-۱۲ ملاحظه می‌شود، برخی از ذرات مرز مشترک مجاور دو ماده در یک گام زمانی، ممکن است در گام زمانی بعدی درون همسایگی ذره مرکزی نگنجد.



شکل ۳-۱۲: مرز مشترک بین دو ماده [3]

در نتیجه، یک نیروی پنالتی به ذراتی از مواد مختلف در مجاورت مرز مشترکشان و هنگامی که به یکدیگر نزدیک شده و تمایل به نفوذ در همدیگر را دارند، اعمال می‌گردد. معیار سنجش نفوذ را با نشانگر pe و مطابق رابطه‌ی (۲۹-۳) به دست می‌آورند.

$$pe = \frac{h_i + h_j}{2r_{ij}} \geq 1 \quad (29-3)$$



شکل ۳-۱۳: ذرات بر روی مرز مشترک دو ماده مختلف و نفوذ ذرات در یکدیگر [3]

نیروی پنالتی کاملاً شبیه قالب نیروی بین مولکولی ندارد - جونز و به صورت دو به دو بر روی دو ذره‌ی نزدیک شونده وارد می‌شود. این نیرو، در امتداد خط واصل مراکز دو ذره و در خلاف جهت یکدیگر وارد می‌آید (به گونه‌ای که دو ذره را دفع و از هم دور کند). توجه شود که این نیروی مجازی رابطه‌ی (۳۰-۳) می‌بایست با تقسیم بر جرم هر ذره، در قالب و بُعد شتاب بیان شود تا بتوان آن را در معادلات اندازه حرکت (مومنتوم) و به موازات جملات پایدارساز لزجت مصنوعی ملحوظ نمود:

$$PB_{ij} = \begin{cases} \bar{p}((pe)^{n_1} - (pe)^{n_2}) \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2} & pe \geq 1 \\ 0 & pe < 1 \end{cases} \quad (30-3)$$

در رابطه‌ی اخیر، پارامترهای \bar{p}, n_1, n_2 را به ترتیب مقادیر ۶، ۱۲ و ۱۰^۵ برمی‌گزینند. در حقیقت می‌توانند جهت متعادل‌سازی شرایط هر مسئله تنظیم و کالیبره شوند. از این‌رو، سرعت نزدیک شدن (در مسائل برخورد یا سرعت زیاد) و نیز نیروی به دست آمده (در مسائل انفجار) می‌توانند در بازه‌ی گسترده‌ای تغییر کنند. اگرچه نوسانات عددی در نزدیکی مرزهای مشترک (مانند ذرات روی مرز

حباب گاز ناشی از انفجار زیر آب) کماکان وجود دارند. با این حال به کارگیری نیروی مجازی پنالته با ضرایب معقول به خوبی از نفوذ ذرات در یکدیگر جلوگیری کرده و روند حل شبیه‌سازی عددی را پایدار می‌کند. [۴]

۳-۱۱- هیدرودینامیک انفجار در روش SPH

پس از استخراج معادلات اساسی هیدرودینامیکی حاکم بر انفجار زیر آب، درمی‌یابیم که حل همزمان معادلات سه گانه بقای جرم، مومنتوم و انرژی با حضور ۴ مجهول اصلی ذیل میسر نمی‌شود.

۱- چگالی ۲- فشار ۳- انرژی ۴- سرعت

نکته‌ی اخیر ما را بر آن می‌دارد تا به استفاده از معادله حالت (رفتار) مناسب در محیط مربوطه دست ورزیم. در این راستا از دستاوردهای فصل گذشته از همین تحقیق بهره می‌جوییم. در فصل مذکور، جزئیات این معادلات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از انتخاب معادله حالت مناسب در محیط انفجار، در واقع یک معادله جبری بین مجهول فشار و مجهولات انرژی و چگالی برقرار کرده‌ایم و این مهم به منزله‌ی ارائه معادله چهارمی در دستگاه ناقص قبلی است. هم اکنون با در دست داشتن معادله حالت مناسب و سه معادله قبلی که ماحصل مباحث گذشته (روابط هیدرودینامیک) بودند. به یک سیستم ۴ معادله ۴ مجهول دست می‌یابیم. در این دستگاه معادلات با ۳ معادله دیفرانسیل و ۱ معادله جبری درگیر خواهیم بود. معادلات دیفرانسیل مورد نظر به صورت تحلیلی و همزمان قابل حل نمی‌باشند. لذا از روش‌های عددی و گسسته‌سازی زمانی آن‌ها جهت حل عددی و تقریبی مسئله بهره می‌جوییم. با توجه به این‌که روش عددی بدون المان SPH در این پایان نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد - دلایل انتخاب این روش از میان ده‌ها روش موجود و برتری‌های آن بر رقبایش، در فصل ۲ به تشریح آمده است - لذا پیکربندی دستگاه معادلات انفجار (۳ معادله دیفرانسیل از ۴ معادله کلی) را در قالب روش SPH بیان گردیده و گسسته‌سازی دامنه حل را بر روی متغیر اصلی مسئله یعنی

"زمان" انجام می‌دهیم. در ادامه این فصل با فرمولاسیون روش SPH برای معادلات مذکور آشنا خواهیم شد. [۴]

۳-۱۲- فرمول‌بندی SPH برای معادلات ناویر – استوکس

۳-۱۲-۱- تقریب چگالی ذرات

تقریب چگالی در فرم SPH از آن‌جا اهمیت دو چندان می‌باید که اصولاً در این روش، چگالی ذرات، توزیع آن‌ها را تعیین کرده و تغییرات طول هموارساز را موجب می‌شود. در روش‌های متعارف SPH دو رویکرد عمده جهت استخراج و بیان چگالی مطرح است.

رویکرد نخست

مجموع چگالی، که مستقیماً در تقریبات SPH به جای خود چگالی اعمال می‌شود. برای ذره i ، چگالی یا رویکرد مجموع چگالی‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود: [3]

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (3-31)$$

N : تعداد ذرات موجود در دامنه پشتیبانی ذره i ام.

m : جرم ذره j ام.

W_{ij} : مقدار تابع هموارساز (تابع وزن SPH) ذره i در ذره j ام که با طول هموارساز h مرتبط است.

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h) = W(|x_i - x_j|, h) = W(R_{ij}, h) \quad (3-32)$$

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{h} = \frac{x_i - x_j}{h} \quad (3-33)$$

که در رابطه اخیر (۳-۳۳) فاصله نسبی بین ذرات i ، j را با R_{ij} تعریف کرده‌ایم توجه شود که r_{ij} فاصله حقیقی بین دو ذره i ، j است. انتخاب نوع تابع هموارساز مقتضی (تابع وزن SPH) را بررسی

نمودیم و تابع وزن چند جمله ای درجه سه را برگزیدیم. دقت شود که W_{ij} دارای واحد معکوس حجم است. معادله (۳-۳۱) به سادگی بیان می کند که چگالی ذرات را می توان با میانگیری وزنی چگالی های ذرات موجود در دامنه پشتیبانی ذره مورد نظر تقریب زد.

رویکرد دوم

رویکرد دوم جهت تقریب ذرات را می توان چگالی پیوستگی دانست که چگالی را براساس معادله پیوستگی با استفاده از مفاهیم تقریبات SPH به همراه برخی تبدیلات دیگر، تقریب می زند. تبدیل با عملیات متفاوتی بر روی معادله پیوستگی (۳-۳۴) به شکل دیگری از معادلات تقریب چگالی می انجامد. یکی از راه های ممکن این است که تقریب SPH تنها بر روی قسمت دیورژانس میدان سرعت اعمال شود مادامی که چگالی در معادله پیوستگی (۳-۳۴) بر روی ذره ای که گرادیانش محاسبه می شود، برآورد شود. که با این تفاسیر و ذکر مجدد رابطه پیوستگی (۳-۳۴):

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (3-34)$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i} v_j^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (3-35)$$

حاصل عملگر گرادیان بر اعداد ثابت حاصلی غیر از صفر ندارد. لذا با توجه به بیان فوق از هسته SPH و تقریب ذرات بر روی گرادیان واحد، خواهیم داشت [3]:

$$\nabla 1 = \int 1 \cdot \nabla W(x - x', h) dx' = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = 0 \quad (3-36)$$

که می تواند در فرم زیر نوشته شود:

$$\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i} v_j^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = \rho_i v_i^\beta \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \right) \quad (3-37)$$

با افزودن معادله (۳-۳۷) که مطابق رابطه (۳۶-۷۳) صفر است، به معادله (۳-۳۵)، شکل دیگری از معادله تقریب چگالی به صورت زیر ارائه خواهد شد

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (3-38)$$

که پیشاپیش می‌دانستیم سرعت نسبی بین ذرات i , j مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$v_{ij}^\beta = (v_i^\beta - v_j^\beta) \quad (3-39)$$

معادله (۳-۳۹) اختلاف سرعت را برای تقریب دو ذره مجزا معرفی می‌کند و اغلب اوقات در فرمول‌بندی SPH ترجیح داده می‌شود. این برتری به این دلیل است که بیان اخیر، سرعت نسبی هر جفت از ذرات موجود در دامنه پشتیبانی را تشریح می‌کند و می‌تواند معیار نسبی نزدیکی و نفوذ ذرات در یکدیگر باشد و از طرفی در جملات پایدار سازها نیز در همین قالب به کار رود از این رو در محاسبات و ارزیابی‌های آینده‌ی ما بسیار مفید خواهد بود. فایده‌ی دیگر استفاده از این سرعت نسبی بین ذرات در فرمولاسیون SPH این است که در فرم‌های نامتقارن، خطای ناشی از مسائل پراکندگی ذرات ناهم رفتار را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد [3]. محققان زیادی از جمله Monaghan در سال‌های 1982, 1985, 1988 و همکارانش در سال‌های 1993, 1991 هنگامی که برای نخستین بار روش SPH را در مسائل هیدرودینامیکی با مقاومت مصالح به کار بردند، از معادله‌ی تقریب چگالی (۳-۳۸) استفاده می‌کردند. یک شکل بسیار رایج‌تر از چگالی پیوستگی نیز این است که مانند آنچه در رابطه (۳-۴۰) می‌بینیم، از ایده‌ای بهره‌گیریم که چگالی را به درون آرگومان عملگر گرادیان می‌برد:

$$-\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = -\left(\frac{\partial(\rho v^\beta)}{\partial x^\beta} - v^\beta \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} \right) \quad (3-40)$$

به طور مشابه اگر چنانچه از تقریب SPH در تمام گرادیان‌ها استفاده شود. و مؤلفه‌ی سرعتی که خارج از آرگومان گرادیان دوم است مانند رابطه (۳-۴۰). درست در همان ذراتی ارزیابی شود که

گرادین آن‌ها ارزیابی می‌شود، مرسوم‌ترین معادله چگالی پیوستگی را به صورت زیر می‌توان عرضه نمود:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta - \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (3-41)$$

معادله (۳-۴۱) به وضوح نشان می‌دهد که نرخ تغییرات چگالی یک ذره، در ارتباط مستقیم با سرعت‌های نسبی بین همان ذره و سایر ذرات موجود در دامنه پشتیبانی نظیرش است. گرادین تابع هموارساز SPH، میزان مشارکت (سهام) این سرعت‌های نسبی را تعیین می‌کند. همان‌گونه که در تمام روش‌های گوناگون و استفاده از آن‌ها در آنالیز مسائل فیزیکی جنبه‌های مثبت و منفی کثیری مستتر است. در به کارگیری دو رویکرد اخیر برای ارائه تقریب مناسبی از چگالی ذرات یعنی چگالی مجموع (رویکرد اول) و چگالی پیوستگی (رویکرد دوم) نیز فواید و مضراتی وجود دارد. رویکرد چگالی مجموع، جرم را دقیقاً پایستار نگه می‌دارد و این فرایند را با انتگرال‌گیری (مجموع‌گیری) از چگالی بر روی تمام دامنه مسئله و مساوی قرار دادن آن یا مجموع جرم تمام ذرات انجام می‌دهد حال آن‌که رویکرد چگالی پیوستگی فاقد این ویژگی است. (Fulk, 1994, Monaghan, 1992) با این حال، رویکرد چگالی مجموع دارای اثرات مرزی می‌باشد که هنگام به کارگیری برای ذرات روی مرز سیال بروز می‌کند و چگالی آن‌ها را از هموار بودن (که اساس روش SPH است) خارج می‌کند و از این‌رو به نتایج غیرمنطقی و نادرست می‌انجامد. اما این مشکل در طی سالیان گذشته حل شده است. در نهایت، مشکلات ناشی از بروز اثر لبه‌ای، با استفاده از ذرات مرزی مجازی یا روش‌های هموارساز دیگری که در فصل ۶ به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است، برطرف شد. توجه داریم که اثرات لبه‌ای تنها در مجاورت مرزها رخ نمی‌دهد. بلکه در سطح مشترک مواد، چنان‌چه در محاسبات، مجاز به مشارکت ذرات از دو ماده‌ی مختلف نباشیم نیز با چنین مشکلاتی مواجه خواهیم بود. یکی دیگر از نواقصی که در رویکرد چگالی مجموع ذکر می‌شود، حجم سنگین عملیات و محاسبات عددی آن است. به این ترتیب که چگالی، می‌بایست قبل از تمام پارامترها محاسبه گردد تا بتوان پارامترهای دیگر مسئله را

نیز یافت. این مهم خود نیازمند آنست که تابع هموارساز، پیشاپیش محاسبه شده باشد چون در تمام جملات مربوط به تخمین چگالی ذرات، رد پای تابع هموار ساز دیده می‌شود. جالب این‌جاست که با رویکرد چگالی پیوستگی به مسئله، نیازی به محاسبه چگالی ذرات در ابتدای امر و برآورد آن پیش از تمام پارامترهای دیگر نبوده و با این ویژگی، حجم قابل ملاحظه‌ای از اطلاعات را می‌توان ذخیره کرد و درصد زیادی از فضای محاسباتی که در رویکرد قبل توسط چگالی ذرات اشغال شده بود، آزاد مانده و قابل دسترسی است. پر واضح است که مزیت مذکور بیش از سایر زمینه‌های دیگر مورد توجه محققانی قرار می‌گیرد که در صدد ارائه الگوریتم کارا و سریع یا برنامه‌نویسی بهینه و به ویژه سیستم‌های حل موازی جهت تحلیل عددی این دسته مسائلند. با همه‌ی این احوال، رویکرد چگالی مجموع در کاربردهای عملی SPH، به دلیل این‌که ماهیت و جوهره‌ی روش SPH را نمایان می‌کند. بسیار رایج تر به نظر می‌رسد. محققان گوناگون، پاره‌ای از اصلاحات را به منظور بهبود عملکرد و بالابردن دقت این رویکرد پیشنهاد داده‌اند. یکی از این اصلاحات، نرمالیزه کردن فرمول با مجموع‌گیری SPH از خود توابع هموارساز بر روی ذرات همسایه است.

(Randies & Libersky, 1996; Chen et al. 2000) با چنین ترفندی که یادآور یک میانگین‌گیری وزنی (مطابق آنچه در محاسبه مختصات مرکز سطح یک سطح مرکب نیز به کار می‌رفت) است، رابطه مهم (۳-۴۲) که پارامترهای آن را پیش از این معرفی کرده بودیم، بیان می‌شود:

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j W_{ij}}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j}\right) W_{ij}} \quad (۳-۴۲)$$

این تعبیر، دقت نتایج را، هم در مجاورت سطوح مرزی آزاد و هم در فصل مشترک مواد با یک ناپیوستگی در چگالی (مثلاً مرز بین فاز گاز منفجره TNT با آب پیرامونش در مسائل انفجار زیر آب) هنگامی که سیگما، تنها بر روی ذراتی انجام می‌شود که دارای جنس یکسان بوده و به تعبیری متعلق به یک ماده‌اند، بالا می‌برد. طبیعی است که روش اخیر، در مسائل عمومی جریانات سیال که فاقد

هرگونه ناپیوستگی از قبیل امواج شوک و ... هستند، مناسب به نظر می‌رسد، جهت شبیه‌سازی مسائل عمومی دینامیک سیالات محاسباتی، رویکرد اصلاح شده چگالی مجموع، نتایج بهتری را می‌دهد و برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی با ناپیوستگی شدید (مانند انفجار، برخورد با سرعت بالا و ...) رویکرد چگالی پیوستگی - فرمول (۳-۴۱) - توصیه می‌شود. [۴]

۳-۱۲-۲- تقریب مومنتوم (اندازه حرکت) ذرات

استخراج فرمول بندی SPH برای تقریب تغییرات مومنتوم ذرات تا حدودی شبیه رویکرد چگالی پیوستگی است و غالباً شامل تبدیلاتی می‌شود. مجدداً، استفاده از تبدیلات مختلف می‌تواند به شکل‌های گوناگون معادلات تقریب مومنتوم بیانجامد. اعمال مستقیم مفاهیم تقریب ذرات SPH به روی گرادینان از معادله مومنتوم، معادله‌ی زیر را می‌دهد:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^N mj \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۳)$$

با توجه به این‌که اندیس تانسور کلی تنش فارغ از شمارنده‌ی اپراتور سیگما است، می‌توان بدون هیچ تغییری در کلیت رابطه (۳-۴۳)، تانسور کلی تنش را از داخل سیگما به بیرون آن منتقل کرد و این ایده را در قالب رابطه (۳-۴۴) خلاصه نمود:

$$\sum_{j=1}^N mj \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i} \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \right) = 0 \quad (۳-۴۴)$$

دقت شود رابطه (۷-۱۳) به این دلیل صفر می‌شود که اثری از تانسور کلی تنش برای ذرات همسایه‌ی ذره مرکزی i که در دامنه پشتیبانی آن واقعند، وجود ندارد یا به عبارتی در این رابطه، جمله تانسور کلی تنش فاقد شمارنده j است. حال اگر ایده‌ی (۳-۴۴) را با طرف سمت راست معادله (۳-۴۳) جمع جبری کرده و خلاصه‌نویسی کنیم، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N mj \frac{\sigma_i^{a\beta} + \sigma_j^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۵)$$

معادله (۳-۴۵) از فرمول بندی‌های بسیار رایج جهت استخراج مومنتم به شمار می‌آید. یکی از مزایای این معادله‌ی همگن و متقارن، کاهش قابل ملاحظه‌ی خطایی است که در اثر پراکندگی ذرات ناهم رفتار رخ می‌دهد (Monaghan, 1988, 1982, 1985).

با توجه دانسته‌هایمان از ریاضیات عالی و مشتقات زنجیره‌ای داریم:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{a\beta}}{\partial x^\beta} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{\sigma^{a\beta}}{\rho} \right) + \frac{\sigma^{a\beta}}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} \quad (۳-۴۶)$$

با در نظر داشتن رابطه (۳-۴۶) و به کارگیری تقریب SPH ذرات برای گرادیان، خواهیم داشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \rho_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۷)$$

پس از یک بازنویسی ساده و مرتب کردن رابطه‌ی (۳-۴۷) خواهیم داشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۸)$$

رابطه‌ی اخیر، رایج‌ترین بیان برای استخراج و ارزیابی مومنتوم به شمار می‌آید. می‌توان معادلات (۳-۴۵) و (۳-۴۷) را به ترتیب زیر و با جزئیات بیشتر نوشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mu_i \varepsilon_i^{a\beta} + \mu_j \varepsilon_j^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۸)$$

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\mu_i \varepsilon_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\mu_j \varepsilon_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} \quad (۳-۴۹)$$

بخش اول از روابط (۳-۴۸) و (۳-۴۹) در واقع تقریب SPH برای فشار می‌باشند و قسمت دوم

معادلات (۳-۴۸) و (۳-۴۹) را می‌توان تقریب SPH از نیروهای ویسکوز دانست. بدیهی است که

قسمت دوم از روابط فوق‌الذکر در ارتباط با لزجت فیزیکی هستند. تقریب SPH برای $\varepsilon^{a\beta}$ و در ذره

نمی‌تواند در فرم زیر بازنویسی شود:

$$\varepsilon^{a\beta} = \frac{\partial v^\beta}{\partial x^a} + \frac{\partial v^a}{\partial x^\beta} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot v)\delta^{a\beta} \quad (50-3)$$

$$\varepsilon_i^{a\beta} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^a \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \left(\frac{2}{3} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j \nabla_i w_{ij} \right) \delta^{a\beta}$$

با بهره‌گیری از رابطه (۳-۳۵) که گرادیان عدد ثابت یک را صفر می‌دانست. اتحادهای زیر را خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i^\beta \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^a} = v_i^\beta \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^a} \right) = 0 \quad (51-3)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i^a \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} = v_i^a \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} \right) = 0 \quad (52-3)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i \nabla_i w_{ij} = v_i \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \nabla_i w_{ij} \right) = 0 \quad (53-3)$$

با تفریق کردن اتحادهای سه گانه‌ی فوق از معادله (۳-۵۰) برای این‌که اختلاف سرعت‌ها را شامل شود و بیان صحیحی از نرخ تغییرات کرنش ویسکوز ارائه دهد، تقریب SPH نهایی از $\varepsilon^{a\beta}$ و حول ذره i می‌تواند در فرم زیر آورده شود:

$$\varepsilon_i^{a\beta} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^a \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \left(\frac{2}{3} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji} \nabla_i w_{ij} \right) \delta^{a\beta} \quad (53-3)$$

تقریب SPH نهایی از $\varepsilon^{a\beta}$ و حول ذره i نیز می‌تواند به طریق مشابهی و با الهام از (۷-۲۴) بیان می‌شود. پس از محاسبه $\varepsilon^{a\beta}$ برای ذرات مرکزی i ، j ، شتاب نظیر (مشتق زمانی سرعت) را می‌توان از روابط (۳-۴۸) و (۳-۴۹) محاسبه نمود.

۳-۱۲-۳- تقریب انرژی ذرات

به منظور تحلیل تغییرات انرژی درونی e در رابطه (۳-۵۴)، قسمتی که شامل نرخ تغییرات کرنش است را می‌توان با کمک معادله (۳-۵۳) تقریب زد. جهت یادآوری، معادله (۳-۵۴) را مجدداً ذکر می‌کنیم:

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} + \frac{\mu}{2\rho} \varepsilon^{\alpha\beta} \varepsilon^{\alpha\beta} \quad (۳-۵۴)$$

برای بخش اول که شامل کار ناشی از فشار است، راه‌های متعددی جهت به دست آوردن فرمول‌بندی متناظر SPH وجود دارد.

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = \frac{p}{\rho^2} \left(-\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \right) = \frac{p}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} \quad (۳-۵۵)$$

با توجه به رابطه‌ی (۷-۲۵)، کار ناشی از فشار را می‌توان با استفاده مستقیم از فرمول‌بندی چگالی پیوستگی در معادلات (۳-۳۴) و (۳-۳۷) و (۳-۴۰). مادامی‌که جمله $\frac{p}{\rho^2}$ در ذرات مرتبط برآورد می‌شود، تقریب زد. برای مثال با استفاده از چگالی پیوستگی در معادله (۳-۴۰)، کار ناشی از فشار با رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{p_i}{\rho_i^2} \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_1^\beta} \quad (۳-۵۶)$$

روش دیگر برای تقریب کار ناشی از فشار، استفاده از اتحاد زیر برای مشتقات زنجیره‌ای جزئی است:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = -\frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{p v^\beta}{\rho} \right) + v^\beta \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{p}{\rho} \right) \quad (۳-۵۷)$$

که با اعمال این ترفند در قالب عمومی رابطه (۳-۵۶) می‌توان گفت:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i}{\rho_i^2} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_1^\beta} \quad (۳-۵۸)$$

و اکنون با جمع جبری روابط (۳-۵۶) و (۳-۵۸)، متداول‌ترین بیان از کار ناشی از فشار به فرم زیر در قالب SPH نمایان می‌گردد:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۵۹)$$

با کمی دقت درمی‌یابیم که متغیرهای موجود در رابطه‌ی فوق همگن و متقارن‌اند. تقریب زدن نرخ

زمانی تغییرات چگالی در رابطه (۳-۵۵) با استفاده از معادله (۳-۳۷) و ارزیابی جمله $\frac{p}{\rho}$ در ذرات مورد نظر نتیجه می‌دهد:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{p_i}{\rho_i} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۶۰)$$

با فاکتورگیری از عکس چگالی و اعمال قاعده مشتق‌گیری زنجیره‌ای در فرم جزیی خواهیم داشت:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_i^\beta} (p v_i^\beta) - v_i^\beta \frac{\partial p}{\partial x_i^\beta} \right] \quad (۳-۶۱)$$

حال با استفاده از رابطه فوق می‌توان شکل دیگر تقریب SPH برای کار ناشی از فشار را ارائه نمود:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۶۲)$$

با جمع کردن رابطه (۳-۶۲) با (۳-۶۰)، یک معادله SPH مفید و عملی در مورد کار ناشی از فشار به دست می‌آید:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۶۳)$$

دو شکل زیر را می‌توانیم به عنوان متداول‌ترین انواع بیان SPH از انرژی درونی قلمداد کنیم:

فرم اول:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \varepsilon_i^{a\beta} \varepsilon_i^{a\beta} \quad (3-64)$$

فرم دوم:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_j \rho_i} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \varepsilon_i^{a\beta} \varepsilon_i^{a\beta} \quad (3-65)$$

ذکر این نکته ضروری است که در ماهیت روابط (۳-۶۴) و (۳-۶۵) تفاوت بنیادی وجود ندارد و تنها نحوه بیان و نمایش است که متفاوت می‌نمایند. مضافاً بدانیم که خطای ناشی از هر دو روش در تقریبات SPH به یک میزان بوده و اختلافی وجود نخواهد داشت. روابط SPH برای معادلات بنیادی ناویر - استوکس یعنی استخراج چگالی، مومنتوم و انرژی را به طور خلاصه در جدول ۳-۱ ارائه کرده‌ایم. ذکر یک نکته در اینجا ضروری است، آن‌که به دلیل سرعت فوق‌العاده بالای پدیده‌ی انفجار که موضوع اصلی پژوهش ماست، از جملاتی که به گونه‌ای شامل لزجت یا ویسکوزیته باشند، می‌توان صرف نظر کرد. نتیجه‌ی چنین فرض بزرگی، تبدیل معادلات ناویر - استوکس به حالتی است که فاقد ترم لزجت است و این دقیقاً تعریف سیستم معادلات اوایلر خواهد بود. کوتاه سخن این‌که معادلات اوایلر بر مسئله حاکمند. صحت و اعتبار این فرض در مسائل انفجار، تغییر شکل‌های بسیار بزرگ و برخورد با سرعت بسیار بالا اثبات شده است. خلاصه‌ای از روابط مورد بحث در قالب جداول ۳-۱ و ۳-۲

۲ ارائه شده است. [۴]

جدول ۳-۲: بیان SPH از معادلات ناویر - استوکس (شامل ترم لزجت). [3]

Conservation of Mass
$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij}$
$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j W_{ij}}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j}\right) W_{ij}}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
Conservation of Momentum
$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_i^{a\beta} + \sigma_j^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
Conservation of Energy
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_j \rho_j} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \varepsilon_i^{a\beta} \varepsilon_i^{a\beta}$
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \varepsilon_i^{a\beta} \varepsilon_i^{a\beta}$

جدول ۳-۳: بیان SPH از معادلات اوایلر (فاقد ترم لزجت). [3]

Conservation of Mass
$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij}$
$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j W_{ij}}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j}\right) W_{ij}}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_j^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
Conservation of Momentum
$\frac{Dv_i^a}{Dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a}$
$\frac{Dv_i^a}{Dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a}$
Conservation of Energy
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_j \rho_j} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$

فصل چهارم

کاربرد روش های عددی در مدلسازی

۴-۱- واکنش تونل خسته شده به وسیله روش ترکیبی SPH-FE

در سال ۲۰۱۴ سیوالینگام کنشواران، دیوید تامبیریتمن و چمیندا گالیچ از دانشگاه علوم و مهندسی کوئین ایسلند استرالیا مقاله ای تحت عنوان واکنش تونل خسته شده به وسیله روش ترکیبی SPH-FE را در نشریه الزویویر به چاپ رساندند. در این مقاله آمده است:

تونل های حمل و نقل زیرزمینی به حوادث انفجاری آسیب پذیر هستند. این مقاله یک تکنیک کاملا متصل با استفاده از تکنیک های هیدرودینامیک ذرات صاف و تکنیک های عددی محدود را برای بررسی پاسخ انفجار تونل های ناهموار تقسیم می کند. یافته ها نشان می دهد که چندین پیچ و مهره در جهت طولی به علت توزیع بار انفجار به حلقه های مجاور تونل شکست خورده است. بخش های تونل به عنوان مکانیسم های قوس در جهت عرضی پاسخ می دهند و به طور عمده به علت تنش خمشی بالا رنج می برند. اطلاعات جدید از مطالعه حاضر، طرح های امن تر تونل های دفن را فراهم می کند و مرجع رسمی برای تحولات آینده در این منطقه را ارائه می دهند. [۵]

۴-۲- مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اویلری و لاگرانژی در مدلسازی

انفجار در آب

در سال ۱۳۹۵ بهنام کریمی فرزقی و رضا نادری از دانشگاه صنعتی شاهرود مقاله ای تحت عنوان مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اویلری و لاگرانژی در مدلسازی انفجار در آب را در نشریه علوم و فناوری های پدافند نوین، جلد ۶، شماره ۳ به چاپ رساندند. در این مقاله آوردند:

با توجه به ماهیت بارهای انفجاری و زمان کوتاه تأثیر این نوع بارهای ضربه ای، تفاوت های عمده ای بین رفتار این نوع بارها با سایر بارهای متداول وجود دارد. بررسی اثرات انفجار زیر آب برای برآورد خرابی های ناشی از فعالیت های خرابه کارانه و تروریستی در سازه های دریایی و هیدرولیکی نظیر اسکله ها، سدها، خطوط انتقال کف دریا و ... مهم است. هزینه های بالای مدل سازی آزمایشگاهی انفجار و همچنین خطرهای ناشی از بارهای انفجاری، با توجه به تغییر شکل های شدید و ناگهانی

ناشی از بارهای انفجاری در زمان کوتاه، استفاده از روش های عددی را توجیه می کند. در این مقاله سعی شده است نتایج تجربی با مدل سازی عددی با دو روش دارای شبکه بندی (از دو دیدگاه اولری و لاگرانژی) و بدون شبکه ذرات هموارساز (SPH) مورد مقایسه قرار گیرد. برای مدل سازی از نرم افزار عددی *LS-Dyna*، استفاده شده و مقدار حداکثر فشار تولیدی با فاصله از مرکز انفجار، منحنی های تاریخچه زمانی فشار در نقاط مختلف و تغییرات سطح آب در روش های عددی مقایسه شده است. با بررسی نتایج مشخص می شود که نتایج حاصل از روش بدون شبکه و دیدگاه لاگرانژی در تعیین فشار ناشی از انفجار مقادیری بیش از دیدگاه اولری ارائه می نمایند. همچنین با استفاده از روش بدون شبکه، می توان فشار انفجار را تا فاصله کمتری از مرکز انفجار نسبت به روش های دارای شبکه بندی تعیین کرد. [۶]

۳-۴- شبیه سازی امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی با استفاده از روش عددی

هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (I-SPH)

در سال ۲۰۱۱ جلال مفیدی، سید علی آزر م سا و امیر سیه سرانی مقاله ای تحت عنوان شبیه سازی امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (I-SPH) را در نشریه علوم و فناوری دریا، دوره ۵۷ به چاپ رساندند. در این مقاله آوردند:

روش هیدرودینامیک ذرات هموار به عنوان روش عددی مناسبی برای مدلسازی هیدرودینامیکی جریان های همراه با تغییر شکل های بزرگ شناخته شده است. این روش به دو صورت مورد توجه قرار گرفته است: روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر یا C-SPH و روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر یا I-SPH. در این تحقیق ضمن معرفی روش عددی SPH و نحوه گسسته سازی معادلات با این روش، امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی با استفاده از روش عددی I-SPH شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده برای صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای بررسی میزان کارآمدی مدل عددی I-SPH، نتایج بدست آمده را با نتایج حاصل از مدل عددی

اویلری NASA-VOF و نیز مدل لاگرانژی C-SPH مقایسه کرده و نتایج را به صورت پروفیل سطح آب در زمان های و ارائه نموده ایم. نتایج حاکی از نزدیک تر بودن پروفیل موج بدست آمده از روش عددی I-SPH به نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش های NASA-VOF و C-SPH می باشد. [۷]

۴-۴- مروری بر روش های عددی شبیه سازی موج بلست انفجار

در سال ۱۳۹۵ سینا باقری، سعید توانگر، محمدرضا صابر و هادی معمد الشریعتی از دانشگاه صنعتی مالک اشتر مقاله ای تحت عنوان مروری بر روش های عددی شبیه سازی موج بلست انفجار را در مجله تحقیق و توسعه مواد پرنرژی به چاپ رساندند. آنها در این مقاله آوردند:

با گسترش فناوری و افزایش قدرت محاسباتی، امکان شبیه سازی موج بلست انفجار دقیقتر از قبل ایجاد شده است. برای انجام یک شبیه سازی عددی مناسب علاوه بر روش حل عددی، عوامل دیگری مثل: مدل آشفتگی، معادله حالت محصولات انفجار و روش اعمال انرژی انفجار موثر بوده و می توانند موجب نزدیکتر شدن نتایج شبیه سازی عددی به نتایج آزمایشهای تجربی شوند. این مقاله علاوه بر بررسی روشهای عددی مانند روش حجم محدود، المان محدود، المان مرزی، روش های بدون شبکه (SPH) و ...، عوامل موثر بر نتایج شبیه سازی عددی موج بلست انفجار را مورد بررسی قرار داده و تلاشهای محققین در این زمینه را مرور کرده است. به عنوان نتیجهی مقاله می حاضر، مشخص گردید که استفاده از روشهای عددی برای شبیه سازی موج بلست میتواند تا حدود ۵٪ خطا با استفاده از روش حجم محدود و کمتر ۳٪ با استفاده از روش المان محدود داشته باشد. همچنین اضافه کردن ترم چشمه به معادله انرژی، دقیقترین نتایج را با استفاده از این روش خصوصاً برای مواد منفجره حاوی پودر فلزی ارائه میدهد. [۸]

۴-۵- شبیه سازی و مدل سازی Peridynamics-SPH از تقسیم بندی انفجار خاک تحت

بارهای انفجاری دفن شده

در سال ۲۰۱۷ هوفو فان و شائوفان لی از دپارتمان مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه کالیفرنیا مقاله ای تحت عنوان شبیه سازی و مدل سازی Peridynamics-SPH از تقسیم بندی انفجار خاک تحت بارهای انفجاری دفن شده در نشریه الزویور به چاپ رساندند. در این مقاله آمده است:

در این کار، ما یک مطالعه محاسباتی بر روی مدل سازی و شبیه سازی پری دینامیک خاک در زیر بارهای انفجاری دفن شده گزارش می کنیم. ما چندین مدل ژئوماتیکی خاک را در فرمول پری دینامیک مبتنی بر حالت اجرا کرده ایم که می تواند به بررسی اثرات نرم کننده شدن کرنش، ویسکوزیپلاستی و تخلخل خاک بپردازد. علاوه بر این، ما یک الگوریتم تکاملی ذرات را در Peridynamics مبتنی بر حالت برای تغییر شکل محدود برای شبیه سازی قطعه خاک به کار بردیم. یک عنصر اصلی فنی شبیه سازی، اتصال بین خاک و روش های مدل سازی مواد منفجره است که توسط اتصال مدل مبتنی بر پری دینامیک (خاک) مبتنی بر حالت با مدل هیدرودینامیکی ذرات صاف شده (انفجاری) ساخته شده است. فرمول اصلاح شده SPH که در اینجا استفاده می شود یک پویایی ذرات سازگار غیر محلی است که در پیکربندی جاری (فضایی) فرموله شده است. نتایج عددی شبیه سازی با داده های آزمایشی اندازه گیری شده مقایسه شده است. تطابق کلی بین نتایج شبیه سازی و داده های تجربی وجود دارد، و مدل محاسباتی که در اینجا ارائه شده، ظرفیت پیش بینی مشخصی را نشان می دهد. [۹]

۴-۶- بهبود روش بدون المان SPH در حل سیستم های دینامیکی

در سال ۱۳۹۳ حسن استاد حسین و سهیل محمدی از دانشگاه مقاله ای تحت عنوان بهبود روش بدون المان SPH در حل سیستم های دینامیکی را به چاپ رساندند. آنها در این مقاله نوشتند:

یکی از روشهای عددی از گروه روشهای تحلیل بدون المان میباشد. در روشهای Smoothed Particle Hydrodynamics روش تحلیل بدون المان، بر خلاف روش اجزاء محدود نیاز به تعریف یک المان استاندارد برای تفسیر رفتار فیزیکی نمیباشد و در این روشها گروهی از گره ها جایگزین شبکه المانها میشوند. اساسا علت استقبال از این روشها کاهش زمان زیادی است که صرف تولید شبکه بر پایه بیان مقادیر عددی گره ها SPH میشود. روش (adaptive) در روش اجزاء محدود، مخصوصا در تحلیلهای دینامیکی و فکپذیر بصورت میانگین وزنی از مقادیر عددی گره های مجاور میباشد. برتری این روش نسبت به روش تفاضلهای محدود، قابلیت مدلسازی و بکار گیری آن در برازش SPH محیط هایی با هندسه پیچیده و توزیع نامنظم گره ها میباشد. در این مقاله ضمن بیان اصول روش یک تابع و محاسبه مقادیر مشتقات مرتبه یک و بالاتر آن، مشکلات این روش، بخصوص دقت این روش در مرزهای محدوده برازش، مورد بررسی قرار گرفته است و راه حلهایی برای بهبود قابل ملاحظه دقت در این نقاط معرفی شده است. برای روشنتر شدن طریقه کاربرد و مقایسه نتایج روش کلاسیک با الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی، حل دو مسئله فیزیکی مطرح گردیده است. در مثال اول که انتشار موج ضربه در محیط یک بعدی میباشد، کاربرد محاسبه مشتق اول بصورت عددی، با استفاده از روش فوق ارائه شده است. در این مثال ارضاء شرط مرزی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی با نتایج حاصل از روش آنالیز دینامیکی به روش آنالیز مودال مقایسه شده است. مثال دوم عبارتست از مساله انتقال حرارت در محیط یک بعدی که کاربرد محاسبه مشتق دوم تابع در آن قابل ملاحظه است. در این مثال نیز به نحوه اعمال شرایط مرزی مختلف اشاره شده است و نتایج بهبود یافته با وضعیت اولیه مقایسه گردیده اند. [۱۰]

فصل پنجم

مدلسازی عددی انفجار

۵-۱- مدلسازی انفجار

آزمایش شبیه‌سازی عددی بارگذاری انفجاری بر روی تونل به کمک نرم افزار اتوداین در ۹ حالت مختلف انجام شده است. این ۹ حالت به شرح زیر در جدول ۴-۱ مشخص شده‌اند.

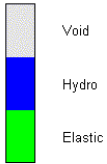
جدول ۵-۱: حالت‌های مختلف بارگذاری انفجاری

جرم ماده منفجره	عمق قرار گیری تونل
۵۰۰ کیلوگرم TNT	تونل در عمق ۱۰ متری از سطح زمین
۱۰۰۰ کیلوگرم TNT	
۵۰۰۰ کیلوگرم TNT	
۵۰۰ کیلوگرم TNT	تونل در عمق ۱۵ متری از سطح زمین
۱۰۰۰ کیلوگرم TNT	
۵۰۰۰ کیلوگرم TNT	
۵۰۰ کیلوگرم TNT	تونل در عمق ۲۰ متری از سطح زمین
۱۰۰۰ کیلوگرم TNT	
۵۰۰۰ کیلوگرم TNT	

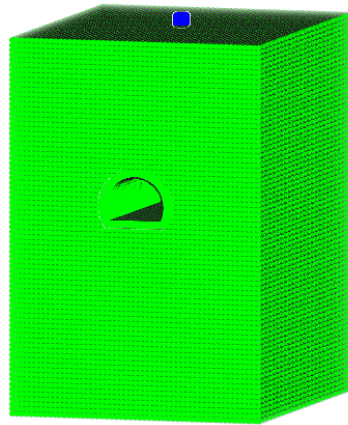
همانطور که در جدول ۵-۱ مشخص است مدلسازی در سه عمق مختلف و هر حالت با سه جرم مختلف از ماده منفجره انجام شده‌اند.

مدلسازی به کمک روش SPH انجام شده است. برای تحلیل هرکدام از مدلها تعداد ۲۰۰۰ سیکل در نظر گرفته شده است. اشکال ۱-۵ تا ۱۱-۵ سیکل‌های مختلف تحلیل و تغییر مدل با گذشت زمان را در یکی از حالت‌های مدل‌سازی (تونل در عمق ۲۰ متری با ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT) نشان می‌دهد.

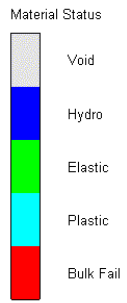
Material Status



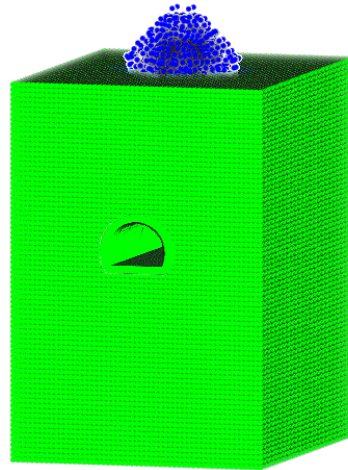
tunnel-20h-tnt-5000kg
Cycle 0
Time 0.000E+000 ms
Units mm, mg, ms



شکل ۱-۵: سیکل ۰



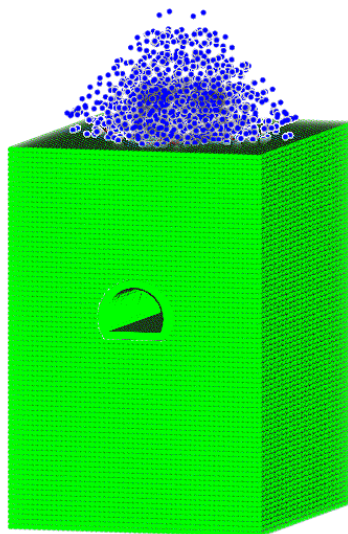
tunel-20h-tnt-5000kg
Cycle 200
Time 2.278E-003 ms
Units mm, mg, ms



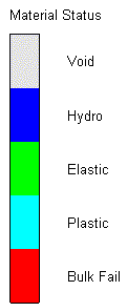
شکل ۵-۲: سیکل ۲۰۰



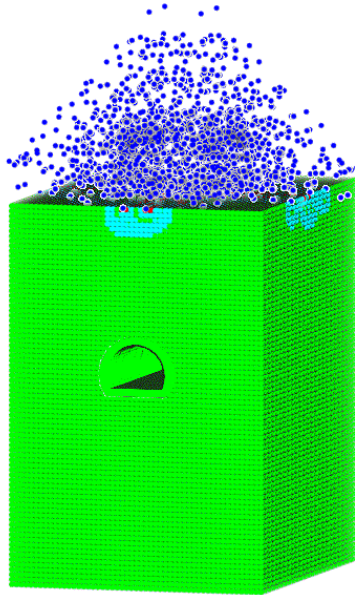
tunel-20h-tnt-5000kg
Cycle 400
Time 4.632E-003 ms
Units mm, mg, ms



شکل ۵-۳: سیکل ۴۰۰



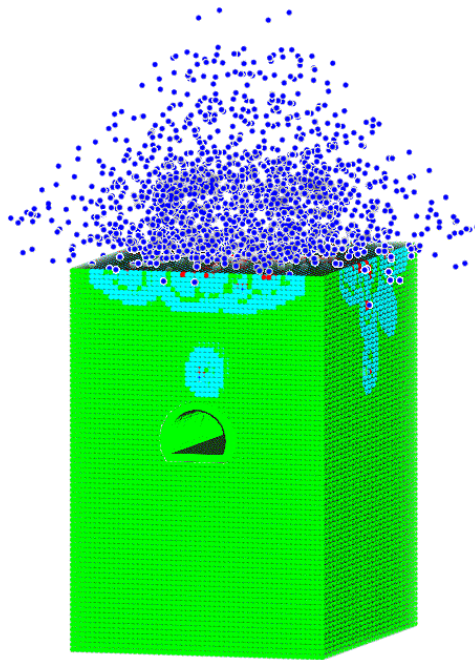
tunnel-20h-tnt-5000kg
Cycle 600
Time 7.028E-003 ms
Units mm, mg, ms



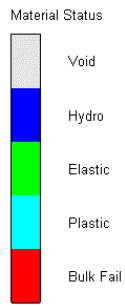
شکل ۵-۴: سیکل ۶۰۰



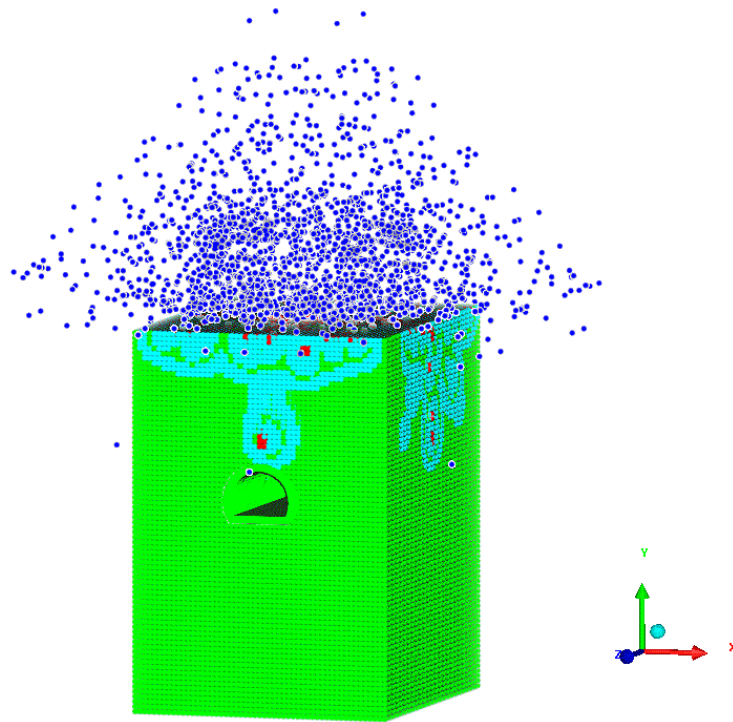
tunnel-20h-tnt-5000kg
Cycle 800
Time 9.430E-003 ms
Units mm, mg, ms



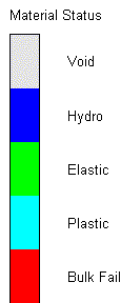
شکل ۵-۵: سیکل ۸۰۰



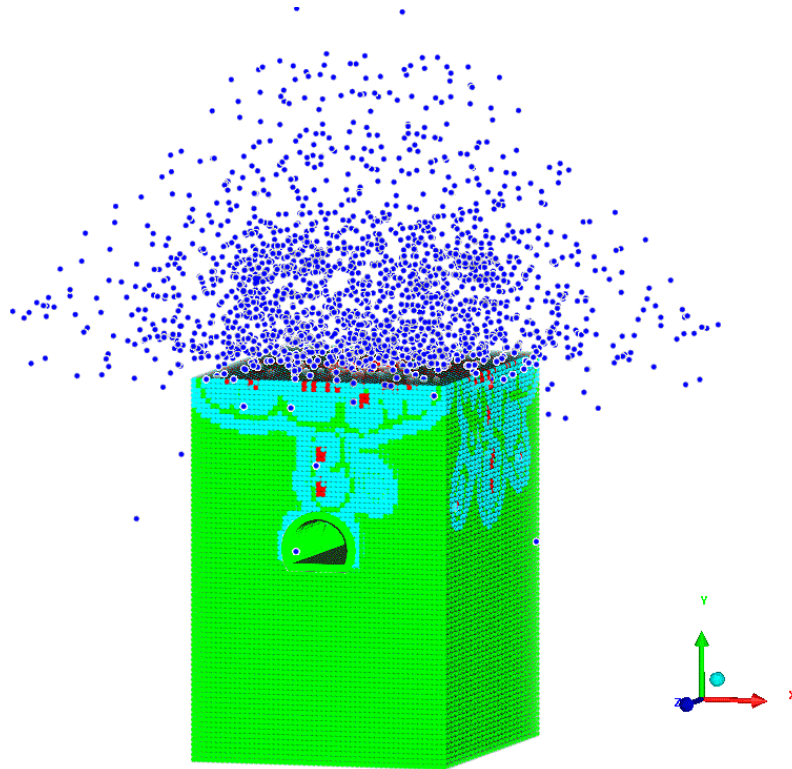
tunel-20h-tnt-5000kg
 Cycle 1000
 Time 1.183E-002 ms
 Units mm, mg, ms



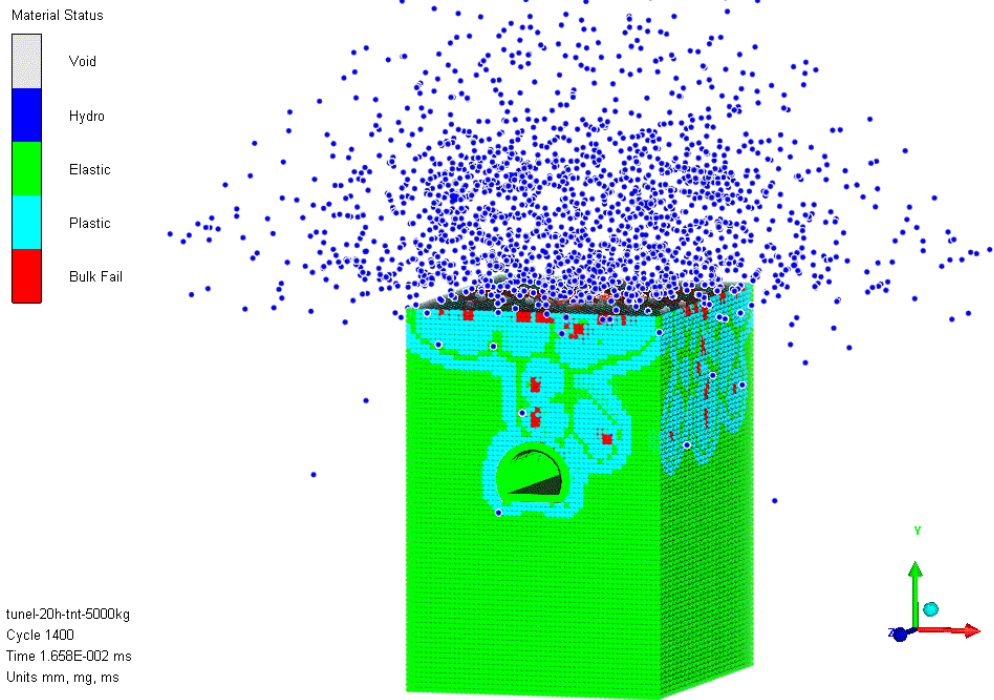
شکل ۵-۶: سیکل ۱۰۰۰



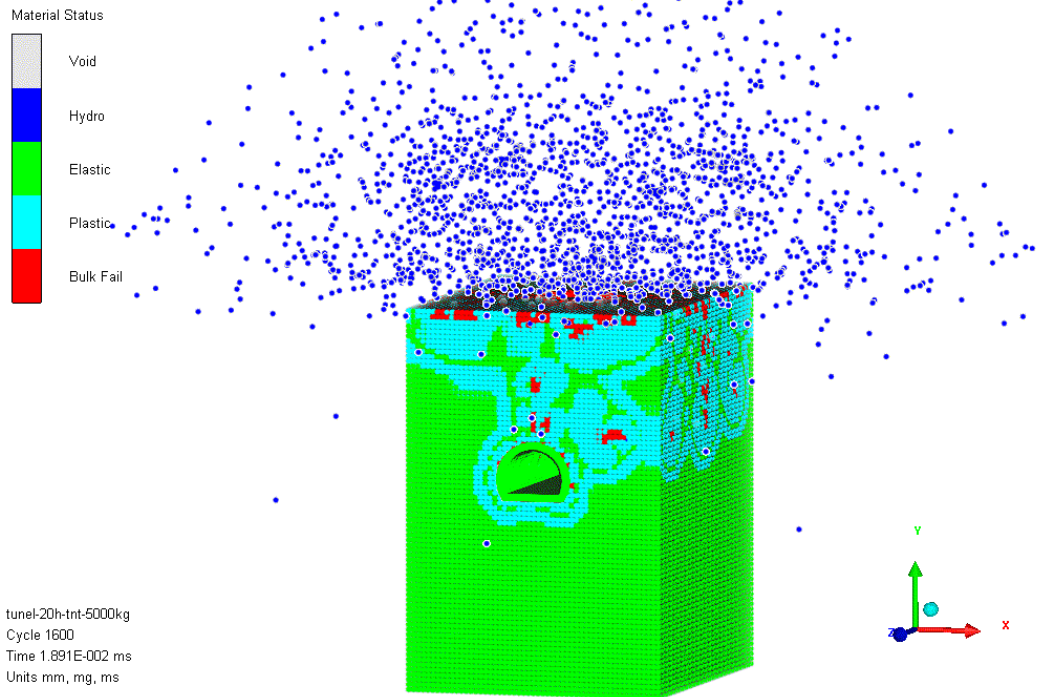
tunel-20h-tnt-5000kg
 Cycle 1200
 Time 1.423E-002 ms
 Units mm, mg, ms



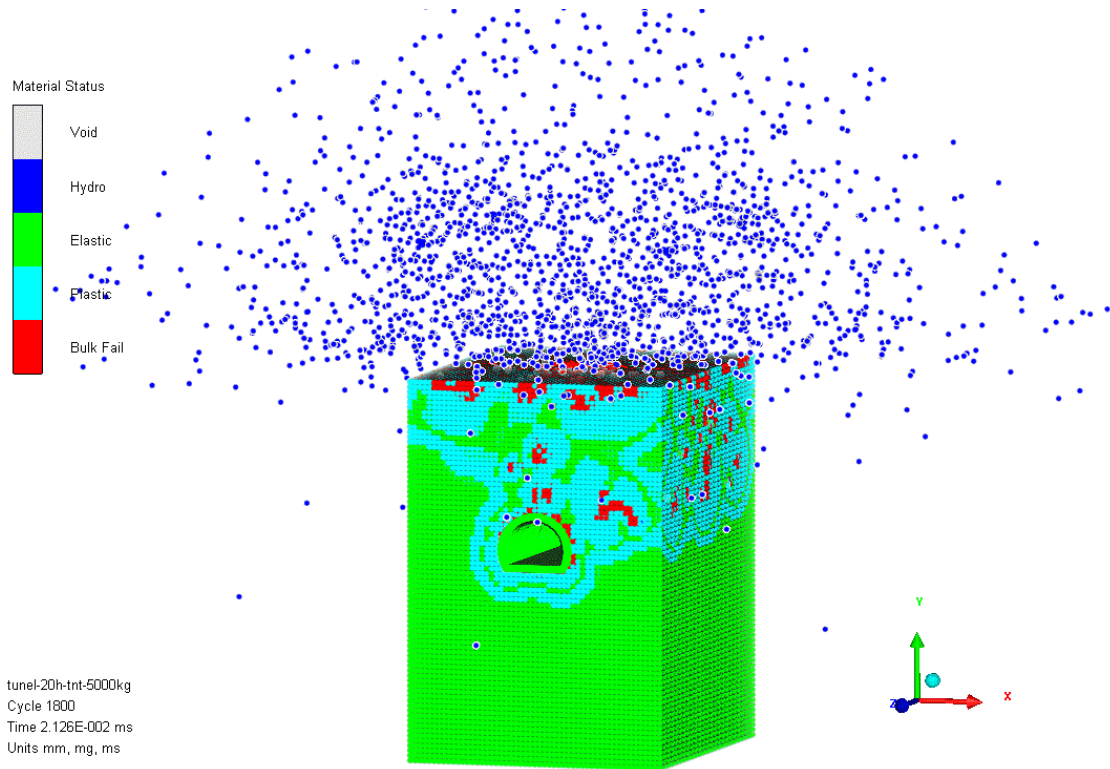
شکل ۵-۷: سیکل ۱۲۰۰



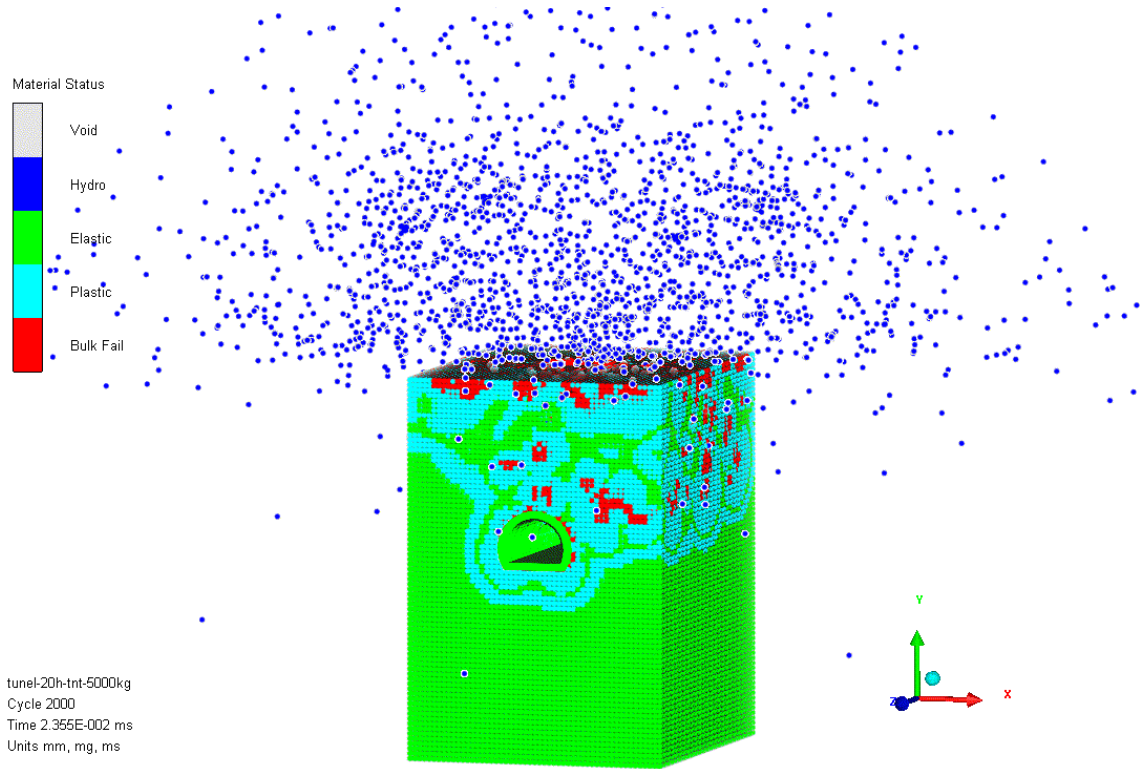
شکل ۵-۸: سیکل ۱۴۰۰



شکل ۵-۹: سیکل ۱۶۰۰



شکل ۵-۱۰: سیکل ۱۸۰۰

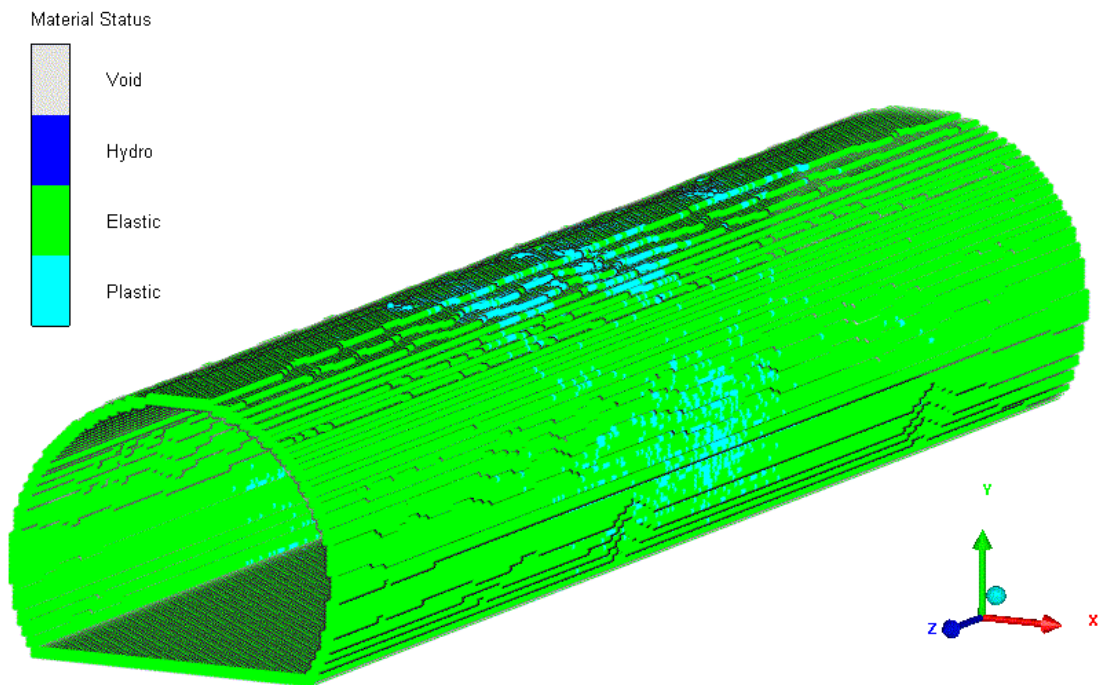
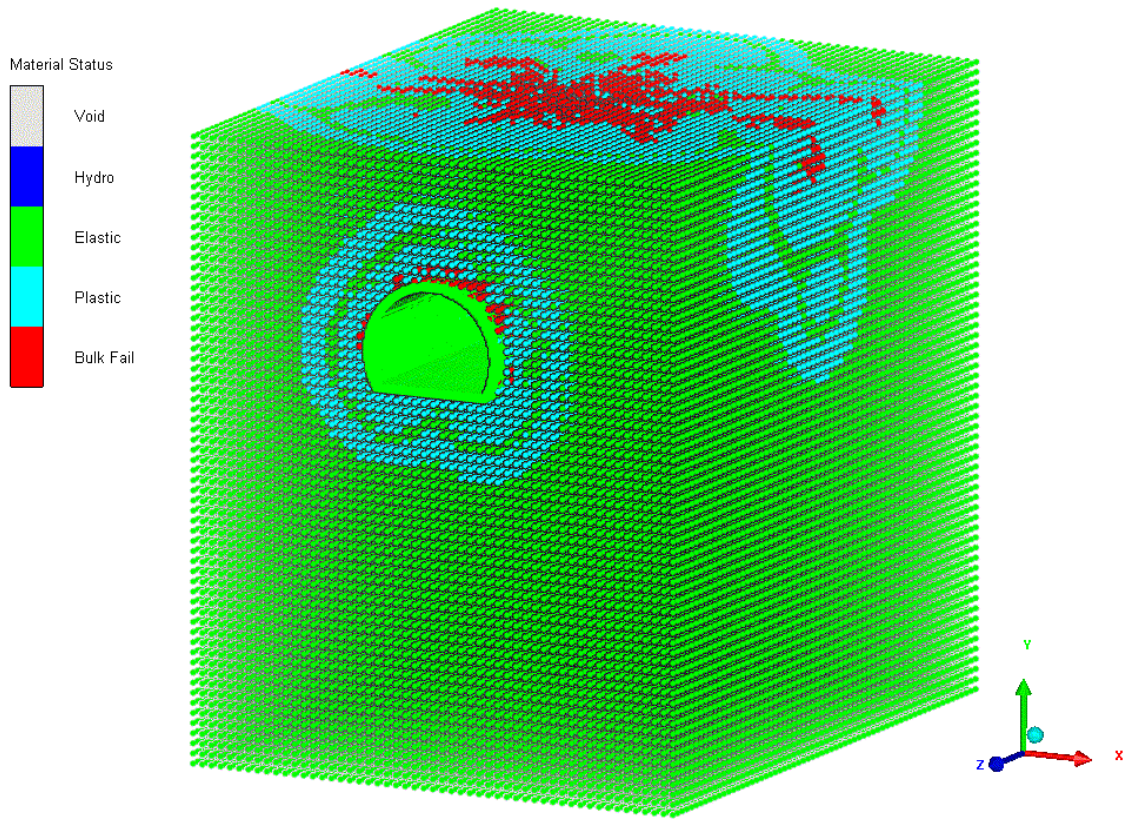


شکل ۵-۱۱: سیکل ۲۰۰۰

همانطور که در این اشکال نمایان است، با گذر زمان و افزایش سیکل‌ها ذرات SPH ماده منفجره از هم گسیخته شده و در فضای اطراف پراکنده شده‌اند. انرژی حاصل از این انفجار به خاک و از طریق آن به تونل و بخش‌های مختلف آن منتقل شده و این انرژی باعث بوجود آمدن نواحی الاستیک و پلاستیک و بخش‌های گسیخته شده می‌شود. این نواحی در بخش‌های مختلف مدل با رنگ‌های سبز (الاستیک)، آبی (پلاستیک) و قرمز (بخش‌های از بین رفته) مشخص شده‌اند. نحوه‌ی توزیع انرژی حاصل از ماده منفجره در بخش‌های مختلف مدل در سایر حالتها نیز همانند شکل بالا می‌باشد.

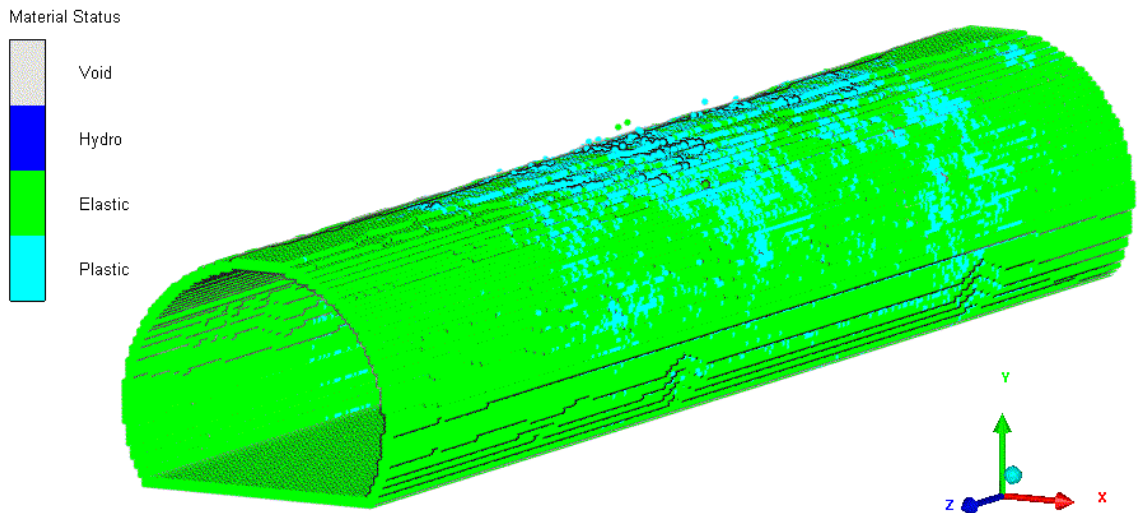
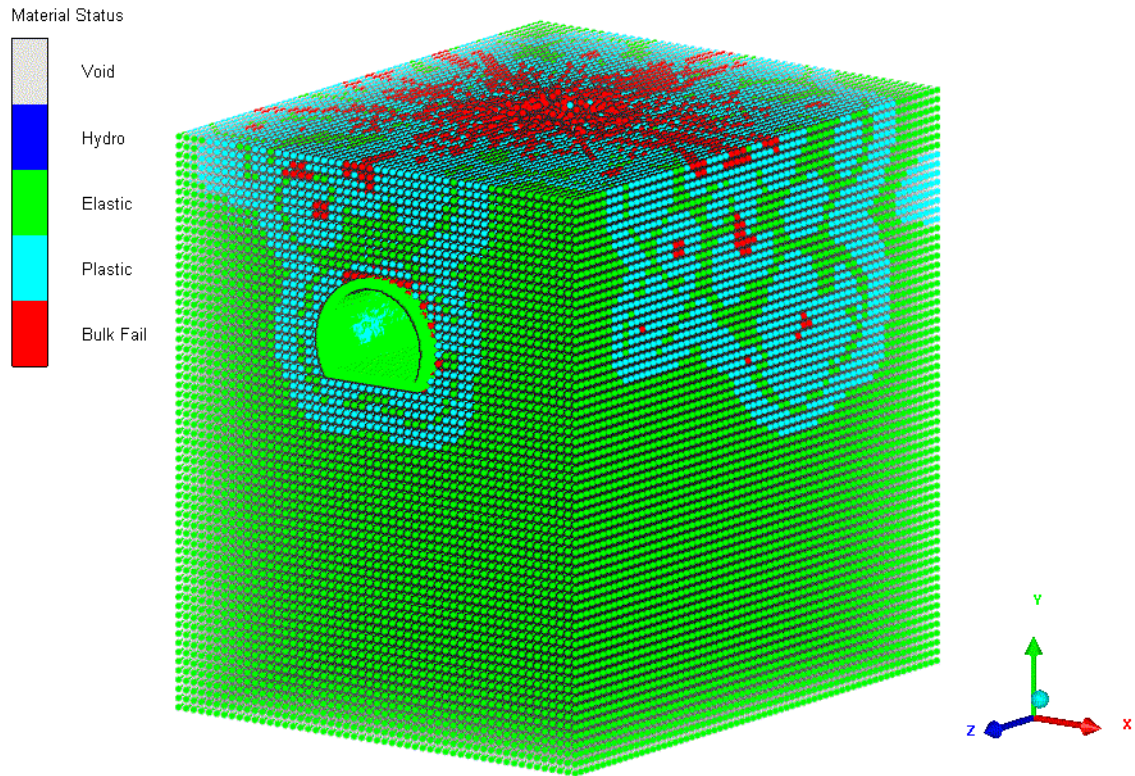
۵-۲- اثر بارگذاری بر بخش‌های مختلف تونل

شکل‌های ۵-۱۲ تا ۵-۲۰ اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین (نقطه انفجار) و بخش‌های مختلف تونل را پس از گذشت ۲۰۰۰ سیکل معادل $0.2/0$ میلی ثانیه پس از انفجار را نشان می‌دهد.



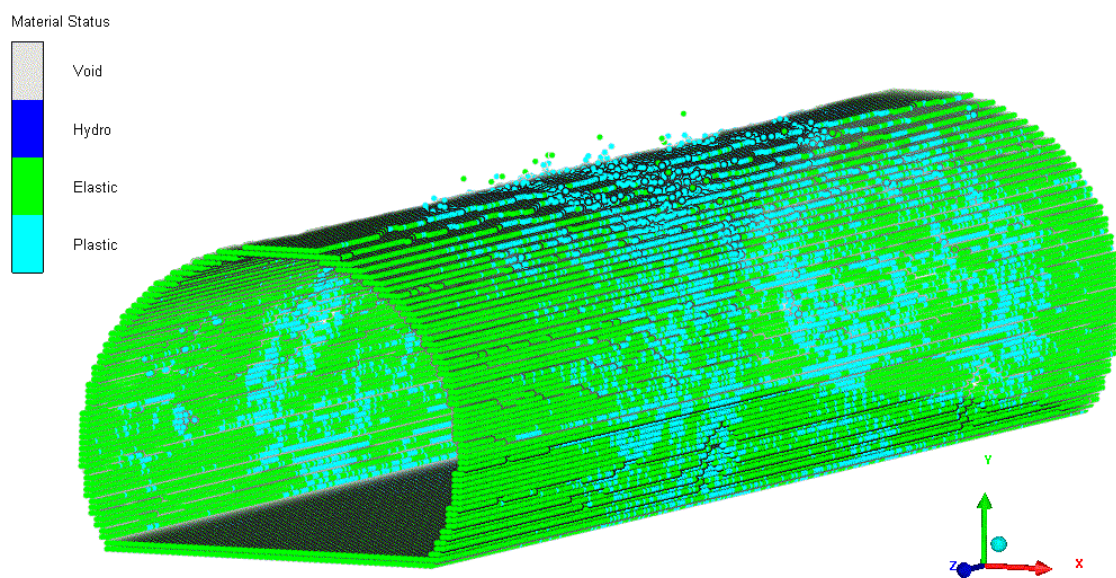
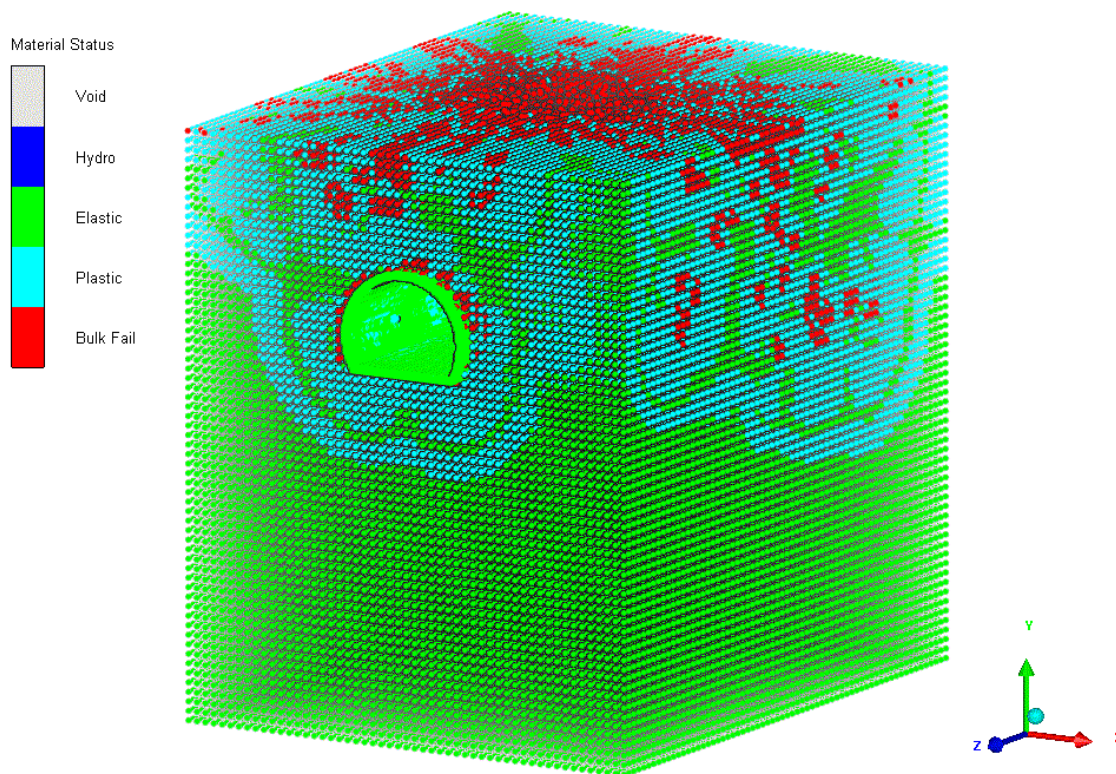
شکل ۵-۱۲: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۵۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



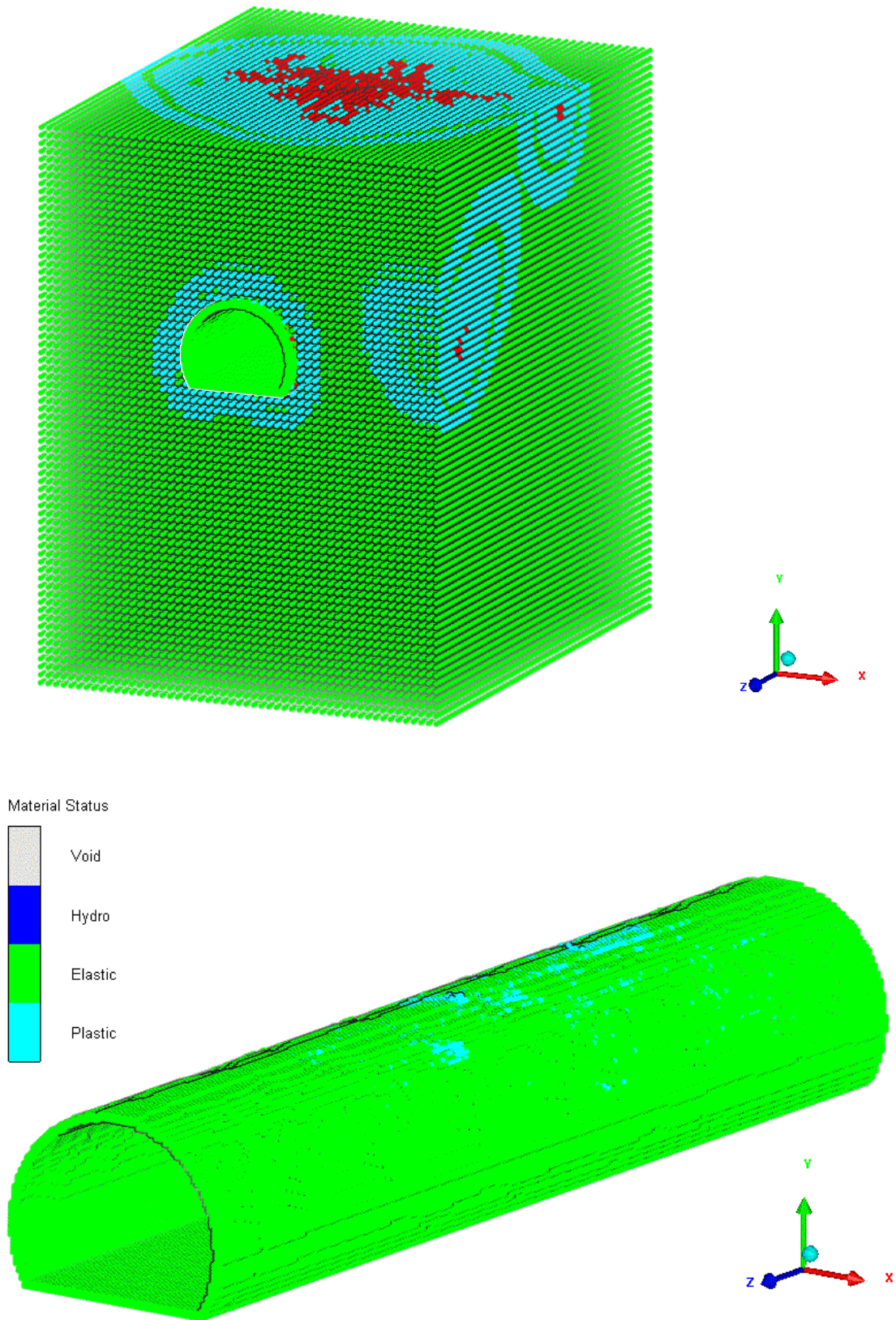
شکل ۵-۱۳: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۱۰۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



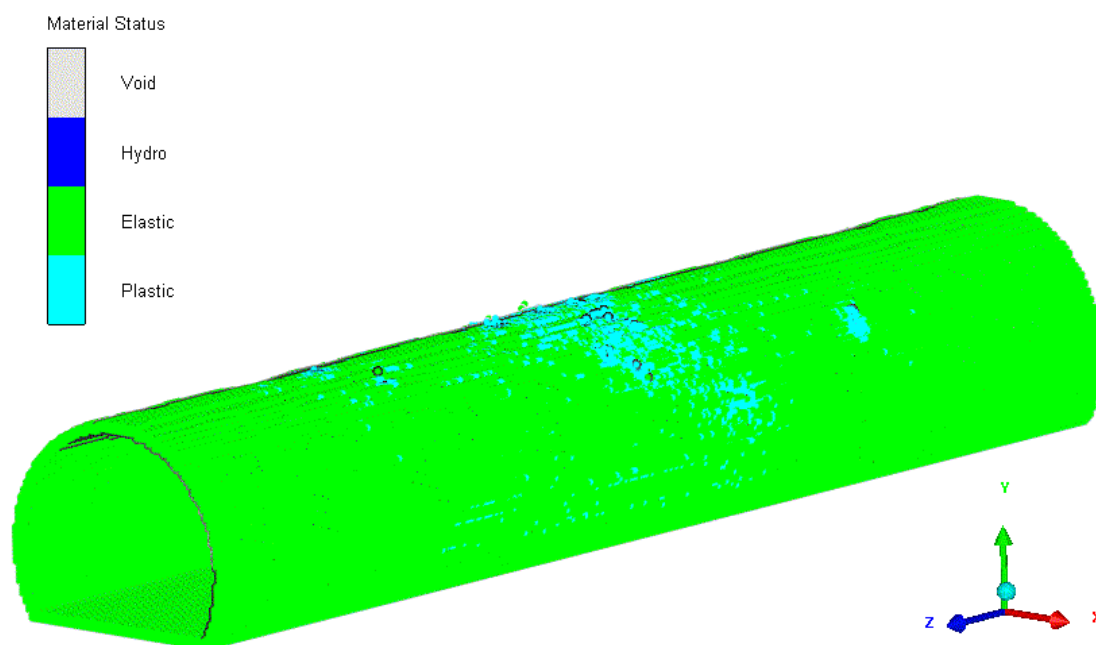
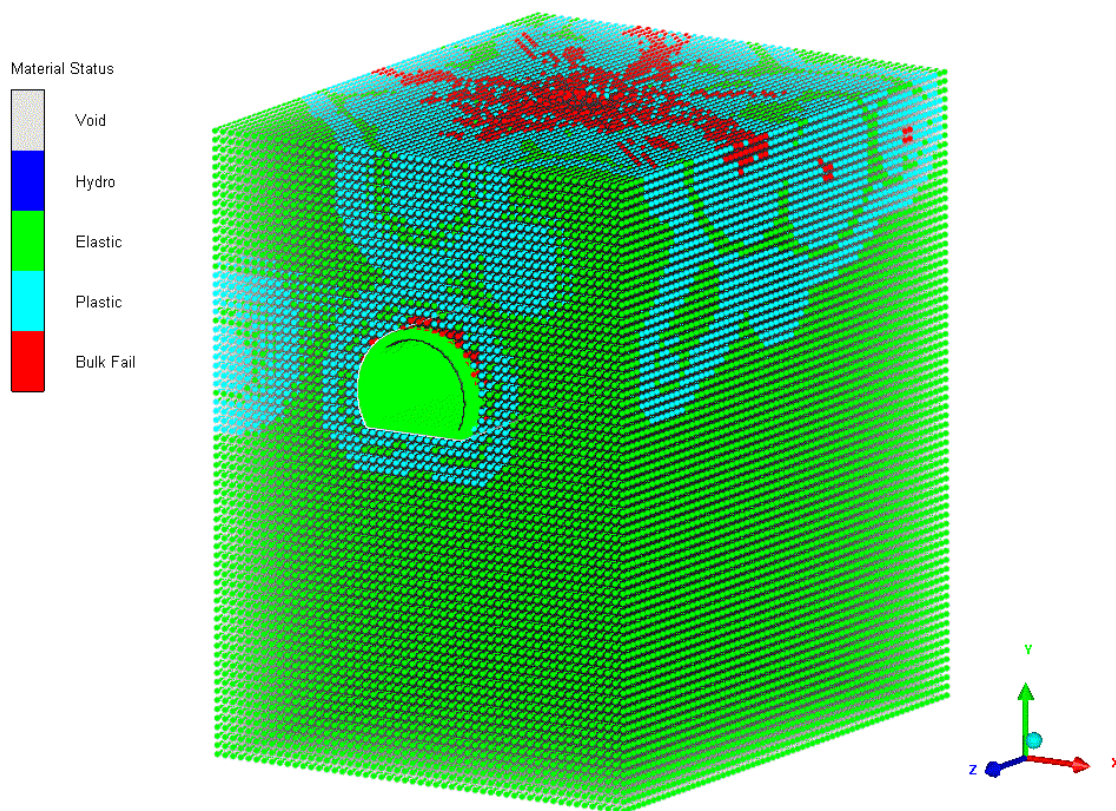
شکل ۵-۱۴: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



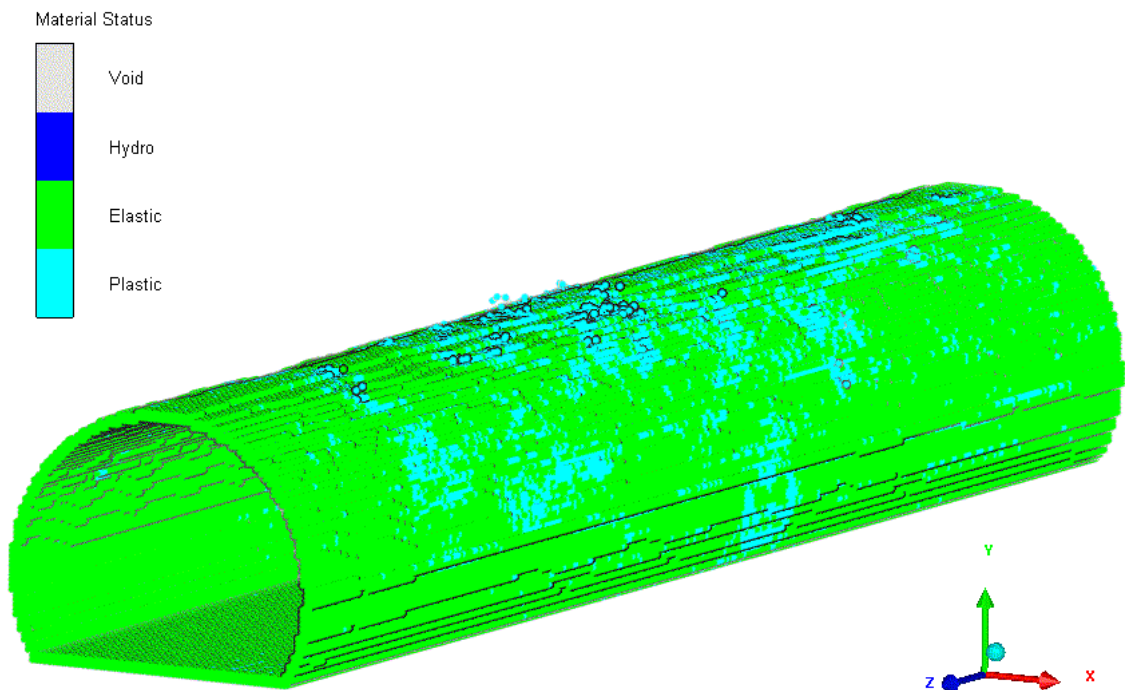
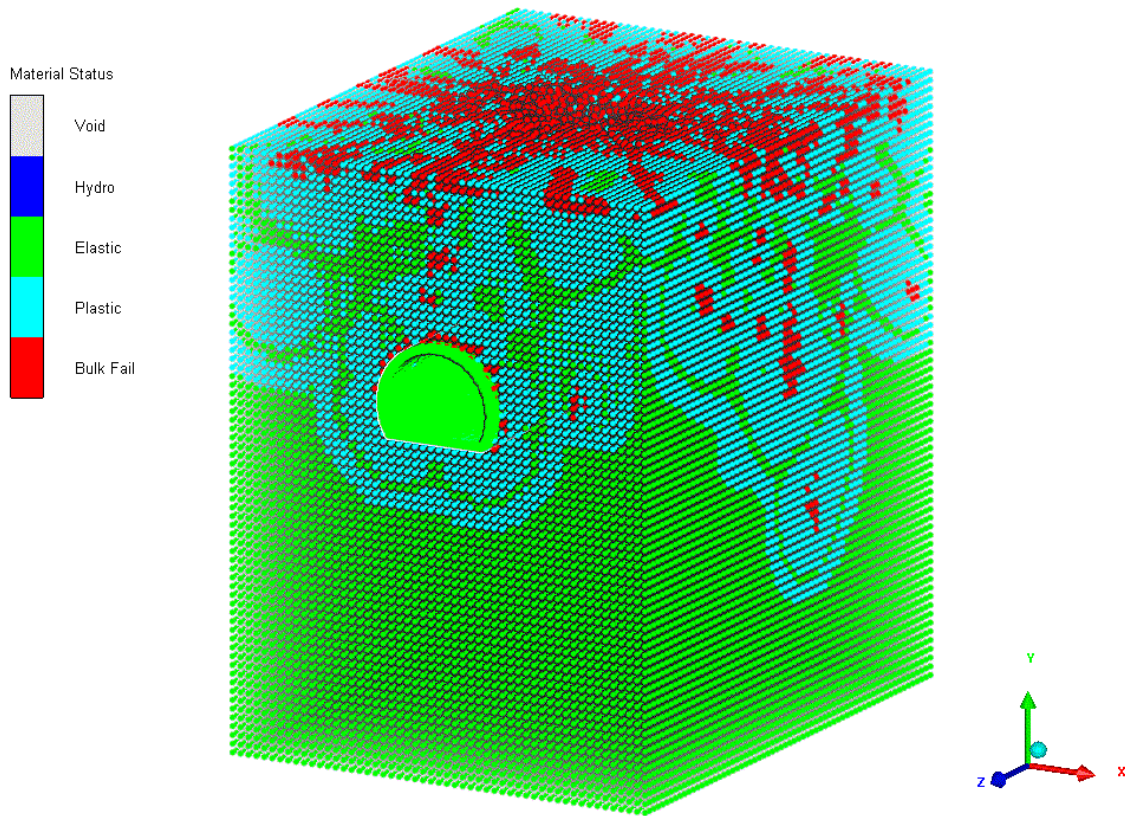
شکل ۵-۱۵: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و

۵۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



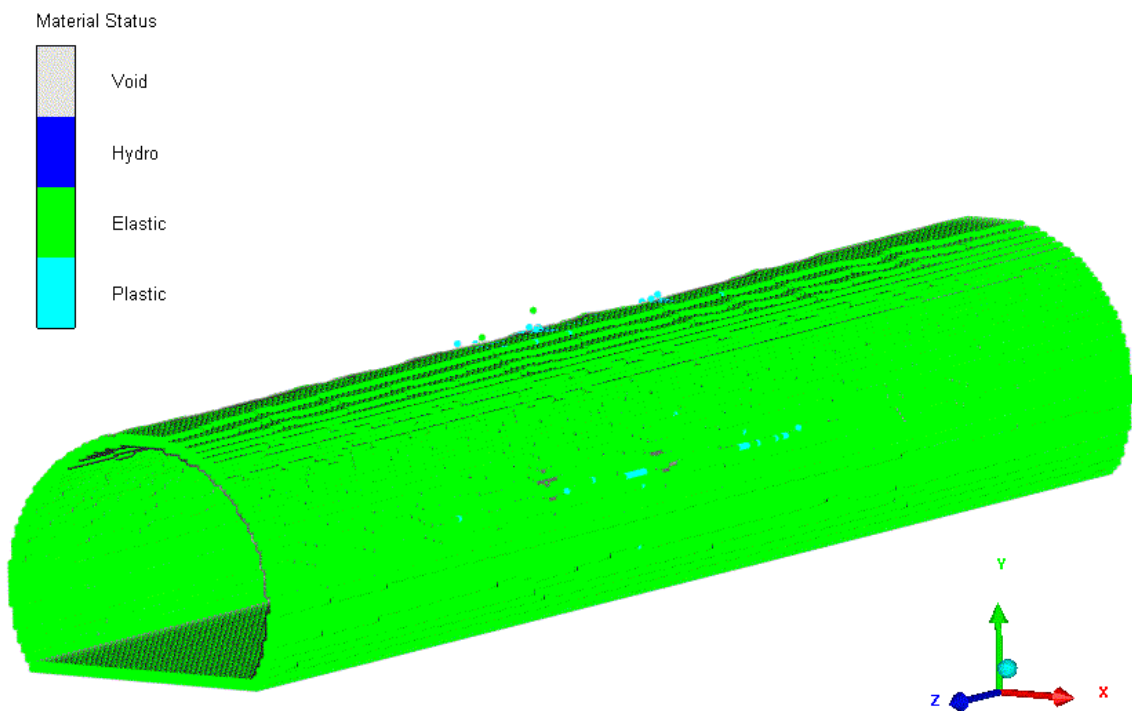
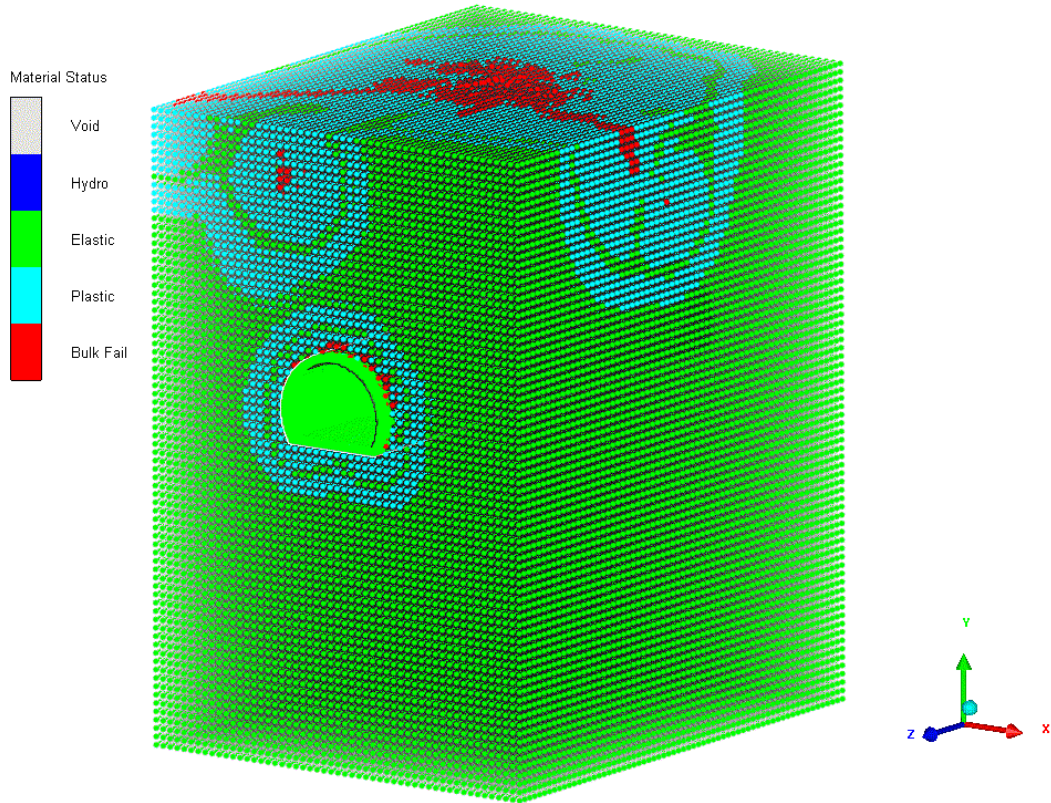
شکل ۵-۱۶: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و ۱۰۰۰

کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



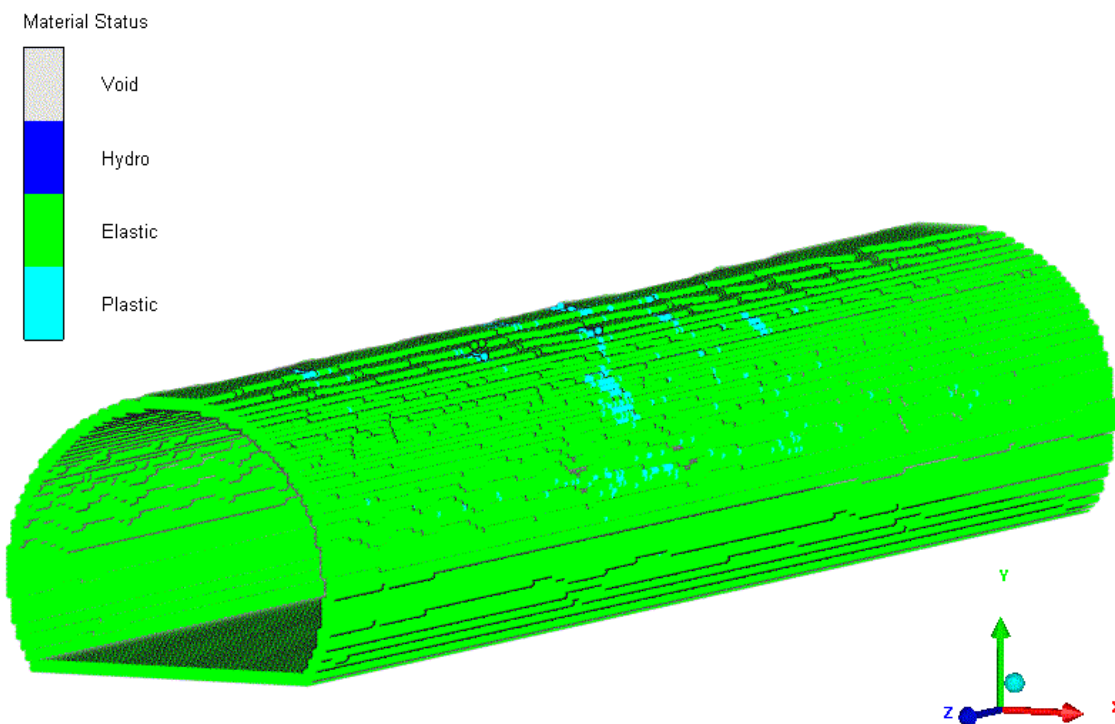
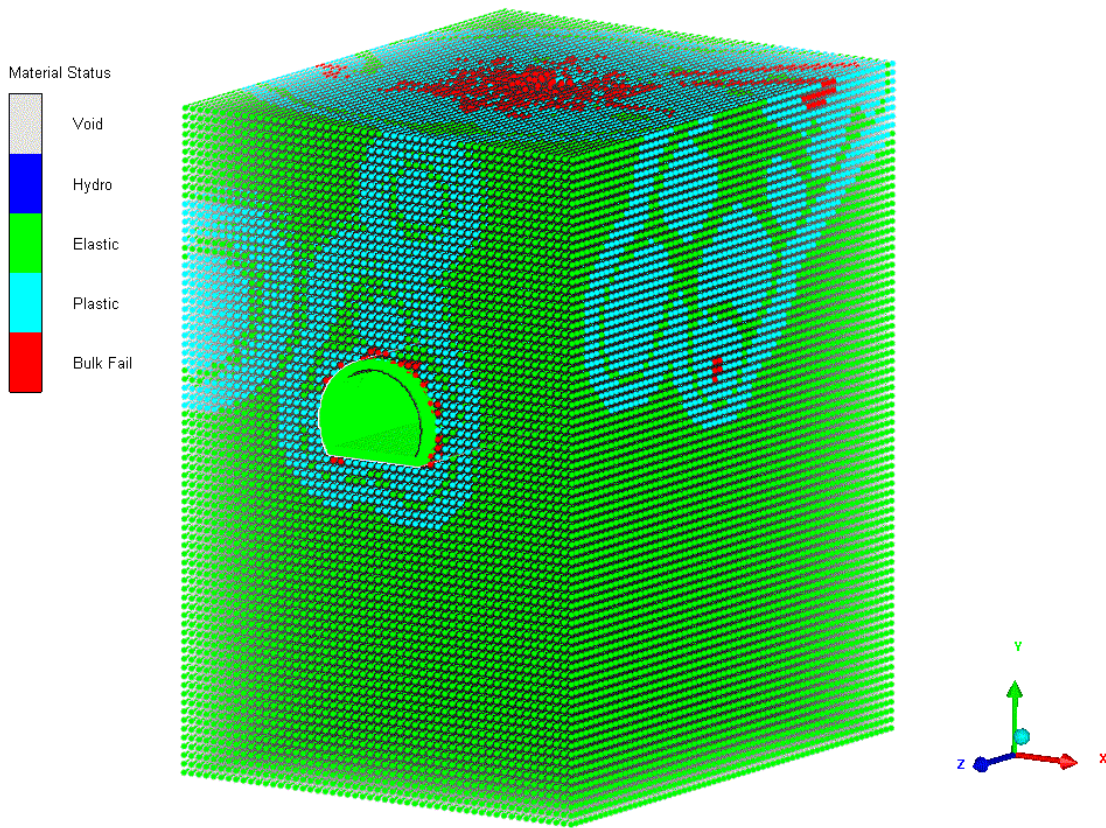
شکل ۵-۱۷: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



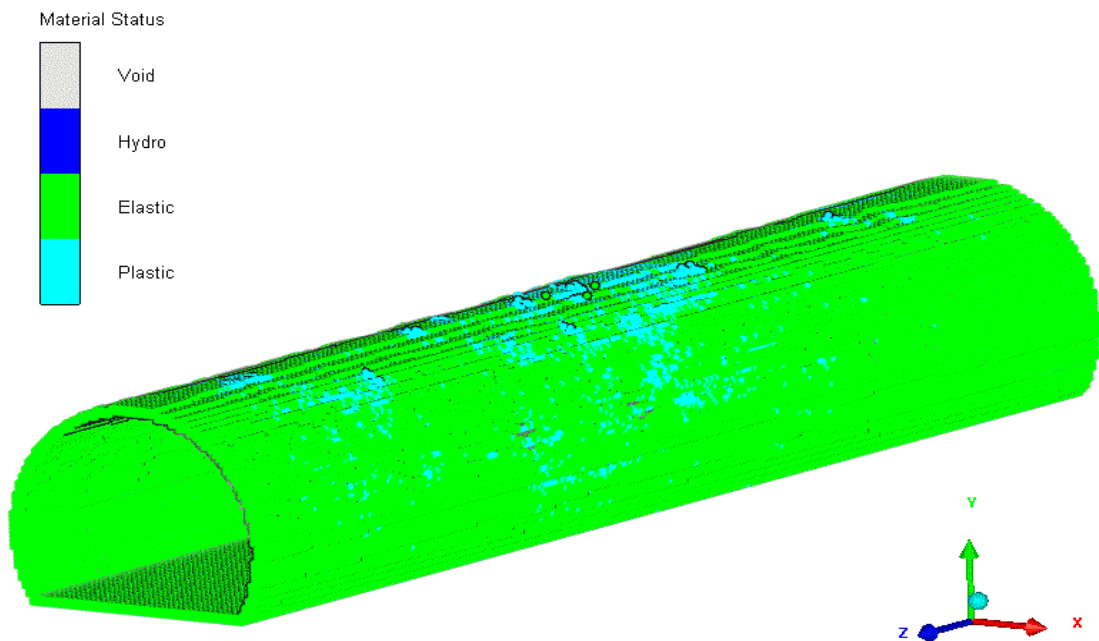
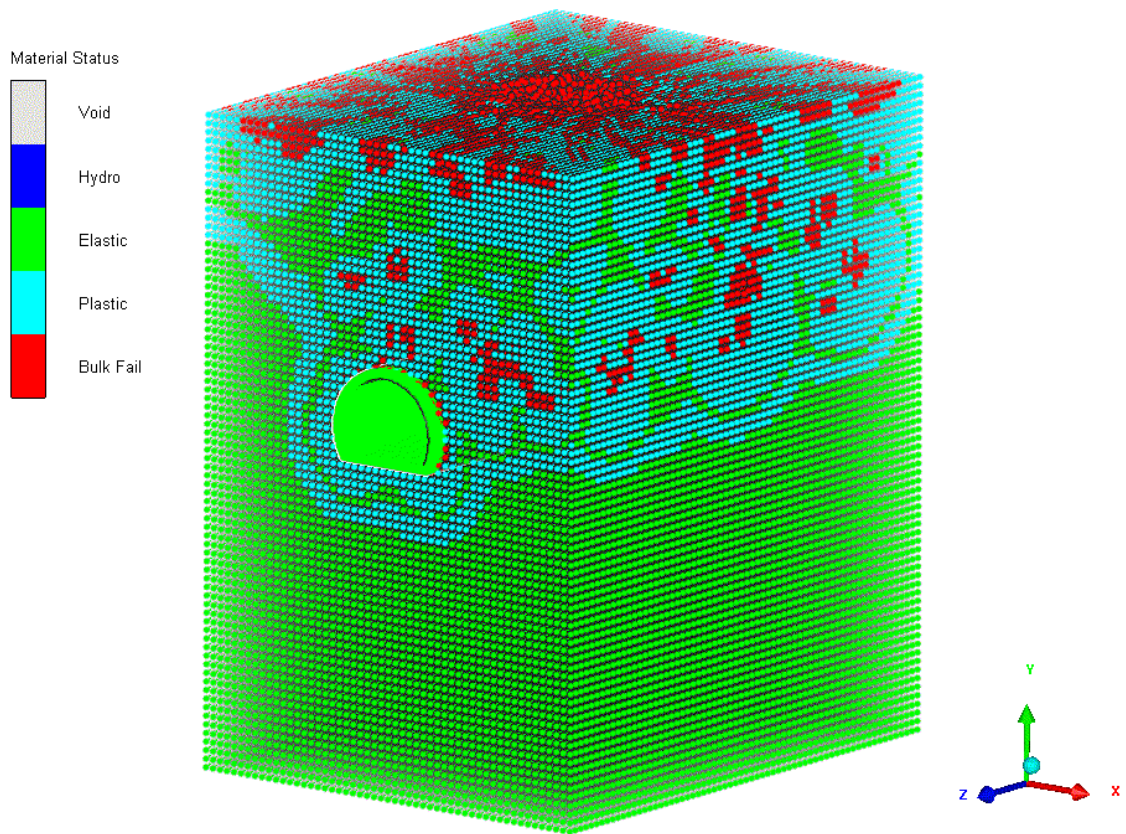
شکل ۵-۱۸: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰متر و

۵۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



شکل ۵-۱۹: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰ متر و

۱۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



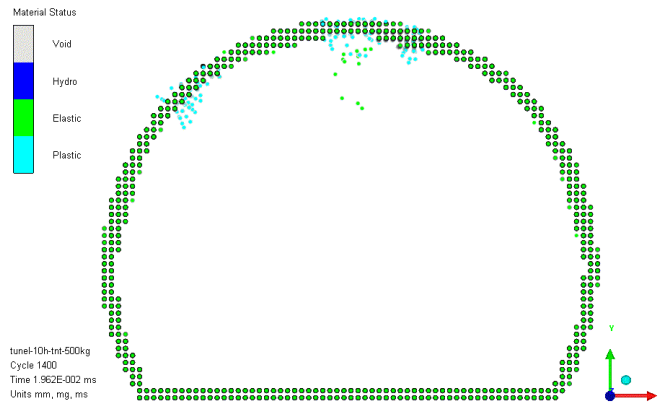
شکل ۵-۲۰: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه

همانطور که از شکل‌های بالا مشخص است جرم ماده منفجره و فاصله از نقطه شروع انفجار تاثیر مسقیمی بر اثر بارگذاری انفجاری بر روی تونل دارد. با افزایش جرم ماده منفجره و کاهش فاصله از نقطه شروع انفجار اثر بارگذاری بیشتر و با کاهش جرم ماده منفجره و افزایش فاصله از نقطه شروع انفجار اثر بارگذاری کمتر خواهد شد.

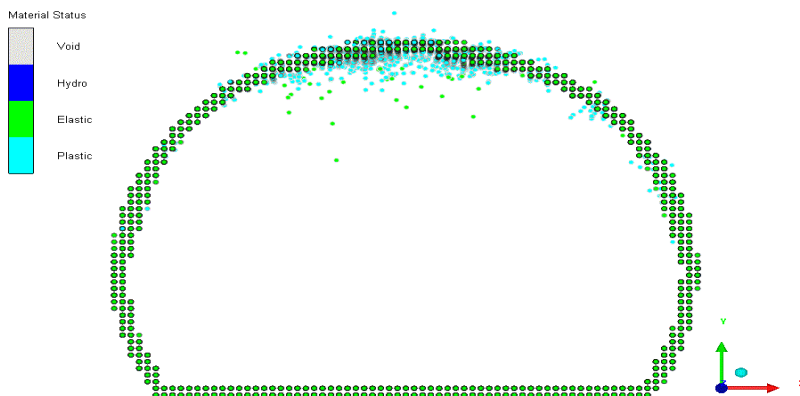
۵-۳- بررسی اثر انفجار بر بارگذاری در سقف تونل

میزان آسیب دیدگی در تونل که بیشتر در بخش سقف تونل به چشم می‌خورد در اشکال ۵-۲۱ تا ۵-۲۹ قابل مشاهده است.



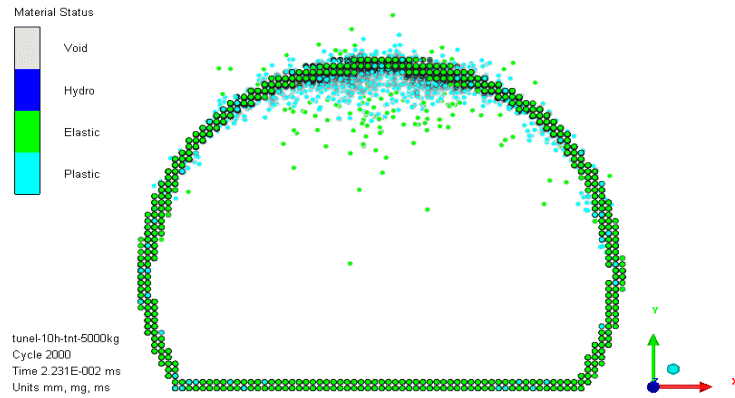
شکل ۵-۲۱: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۵۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



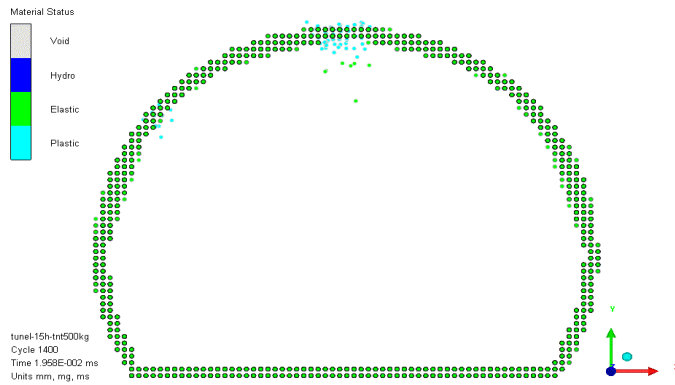
شکل ۵-۲۲: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۱۰۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



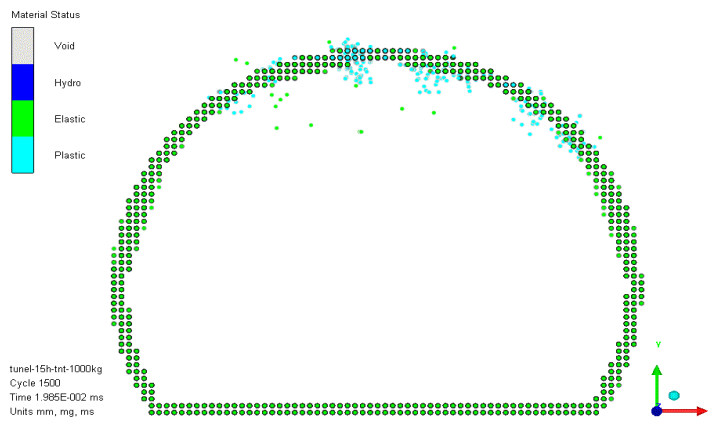
شکل ۵-۲۳: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۰متر و

۵۰۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



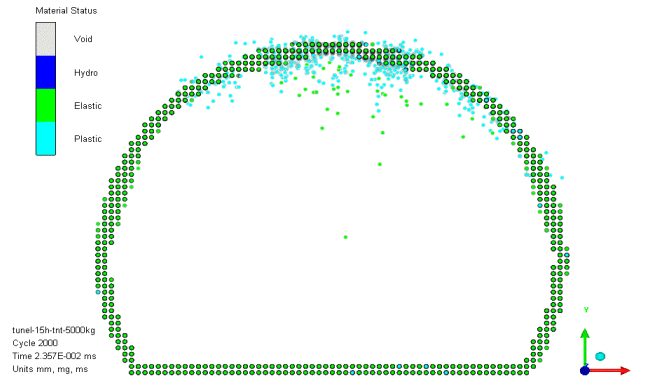
شکل ۵-۲۴: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و

۵۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



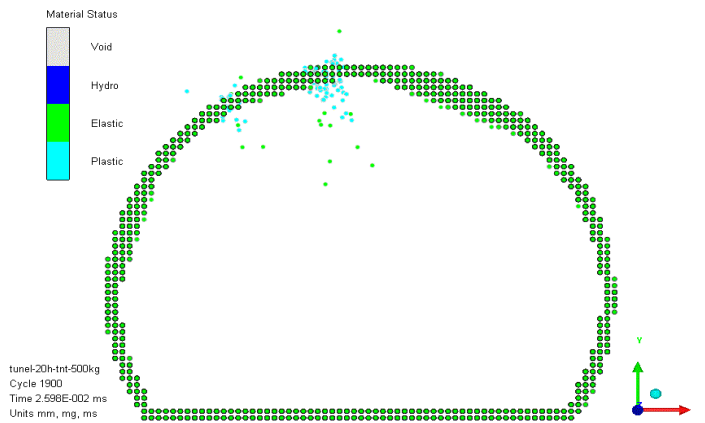
شکل ۵-۲۵: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و

۱۰۰۰کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



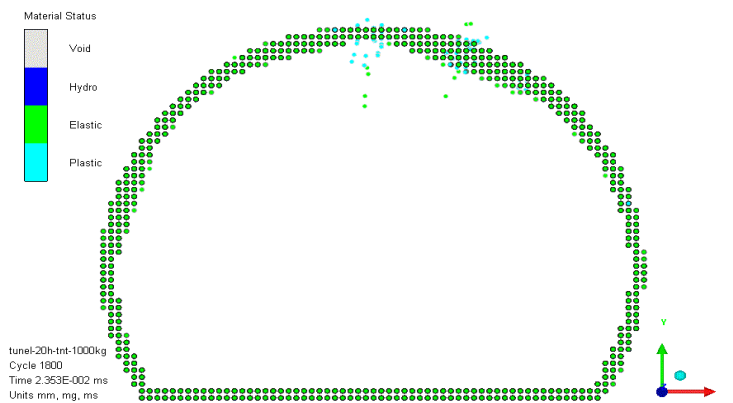
شکل ۵-۲۶: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۱۵متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



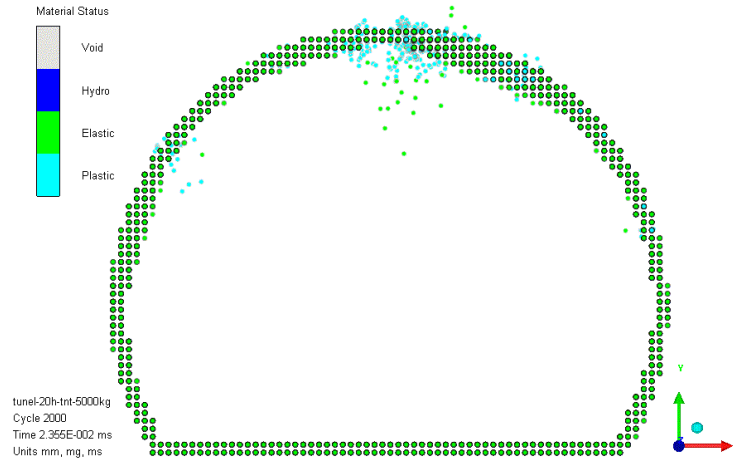
شکل ۵-۲۷: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰متر و ۵۰۰

کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



شکل ۵-۲۸: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰متر و

۱۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



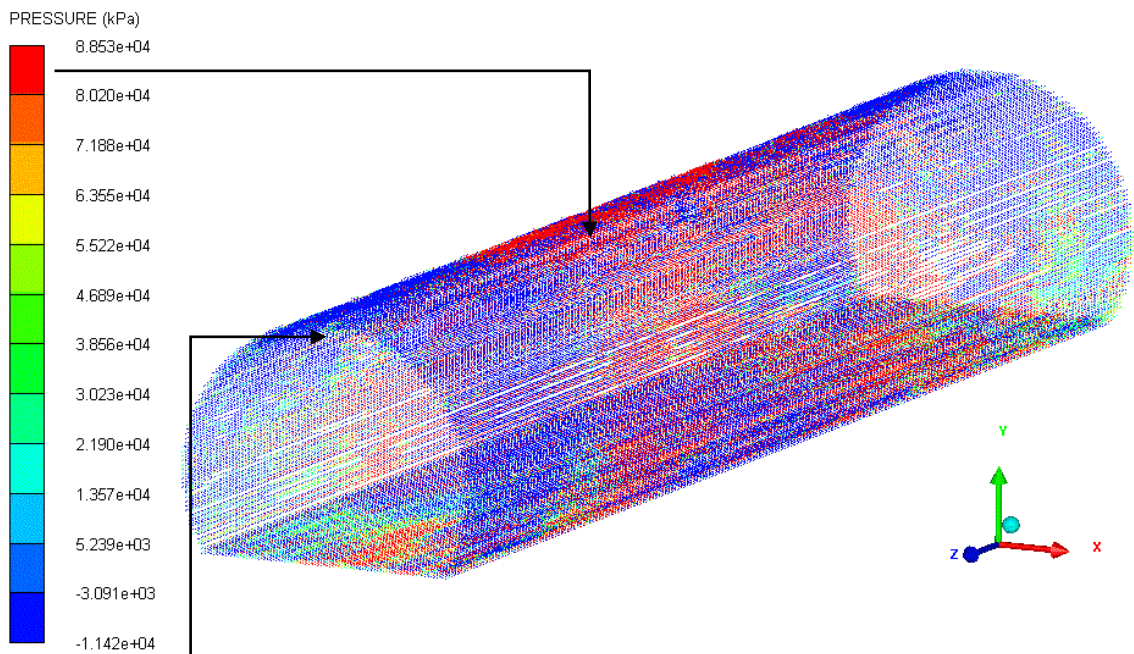
شکل ۵-۲۹: اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین و بخش‌های مختلف تونل در حالت (۲۰متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم) در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه

۵-۴- نحوه توزیع فشار بر بخش‌های مختلف تونل

شکل ۵-۳۰: نمایانگر توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه در حالت تونل

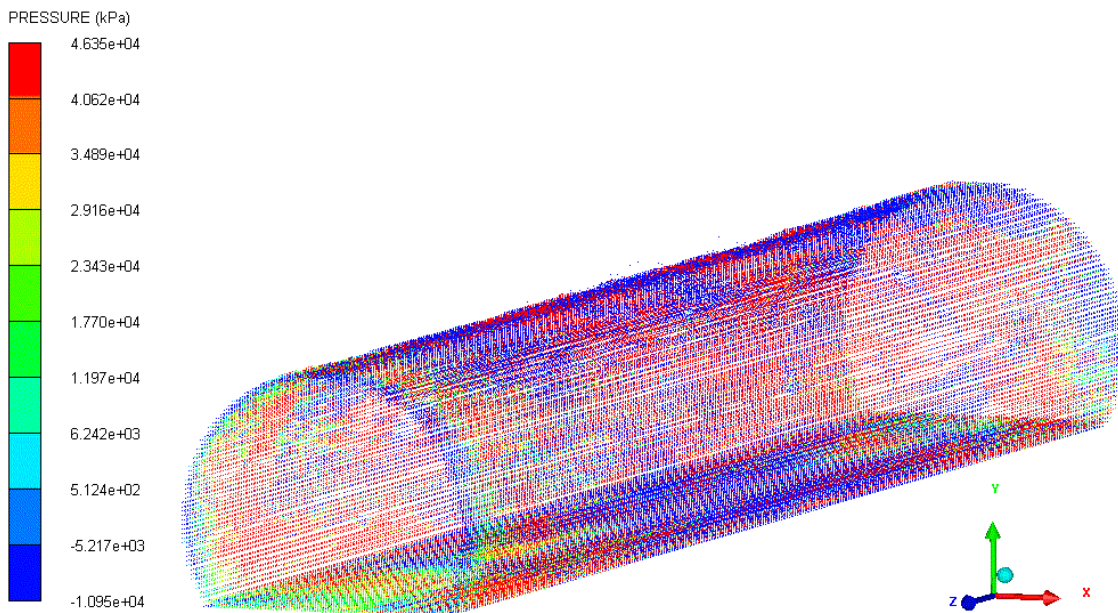
در عمق ۱۰ متری و ماده منفجره با جرم ۵۰۰ کیلوگرم است.



شکل ۵-۳۰: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه در حالت عمق ۱۰ متر و

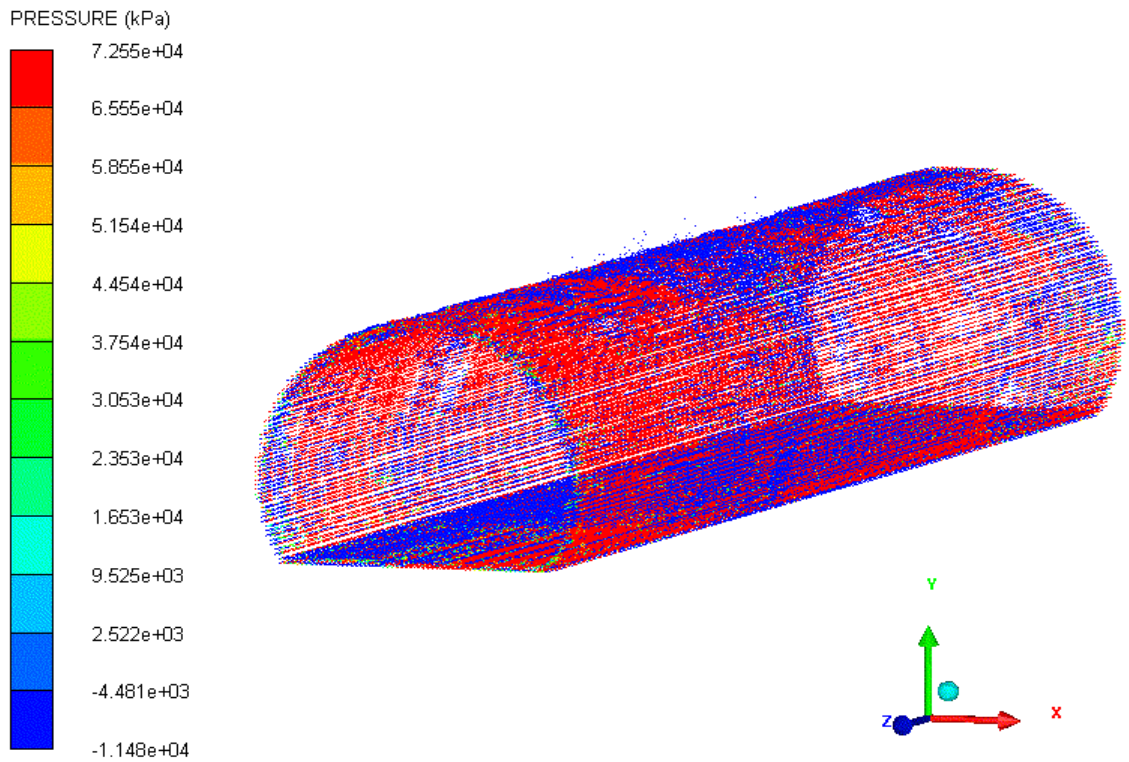
جرم ۵۰۰ کیلوگرم

کانتور رنگی که در سمت چپ شکل قرار گرفته است مقدار این فشار را در بخش‌های مختلف تونل با استفاده از رنگ‌های مختلف بر حسب کیلوپاسگال نشان می‌دهد. برای مثال رنگ قرمز ماکزیمم فشار را در این لحظه به مقدار ۸۸۵۳۰ کیلوپاسگال و رنگ آبی مینیمم فشار را با مقدار ۱۱۴۲۰- کیلوپاسگال نشان می‌دهند. نکته قابل توجه در اینجا علامت منفی کنار کانتور آبی می‌باشد که این علامت نشان دهنده فشار حاصل از موج برگشتی (فاز منفی موج) می‌باشد که در مکانیک انفجار با پارامترهای موج شوک حاصل از انفجار و انواع آن آشنا شده‌ایم. شکل‌های ۵-۳۱ تا ۵-۳۸ نحوه توزیع فشار را در حالت‌های دیگر بارگذاری در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد.

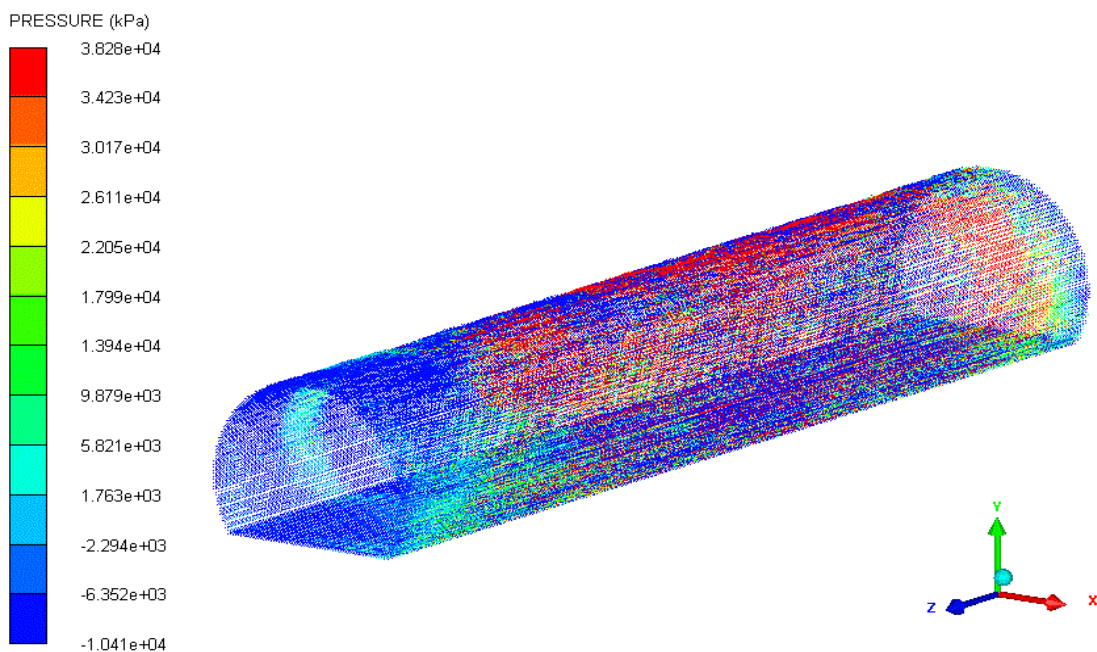


شکل ۵-۳۱: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۱۰ متر و

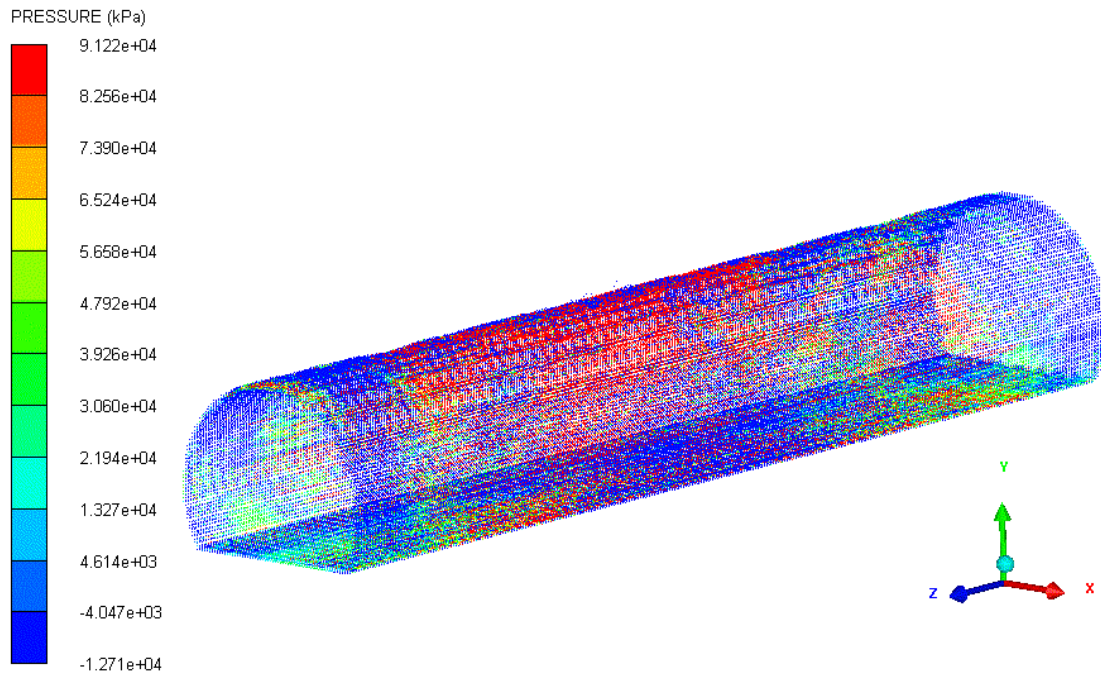
جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۳۲: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه 0.2 میلی ثانیه در حالت عمق ۱۰ متر و جرم ۵۰۰۰ کیلوگرم

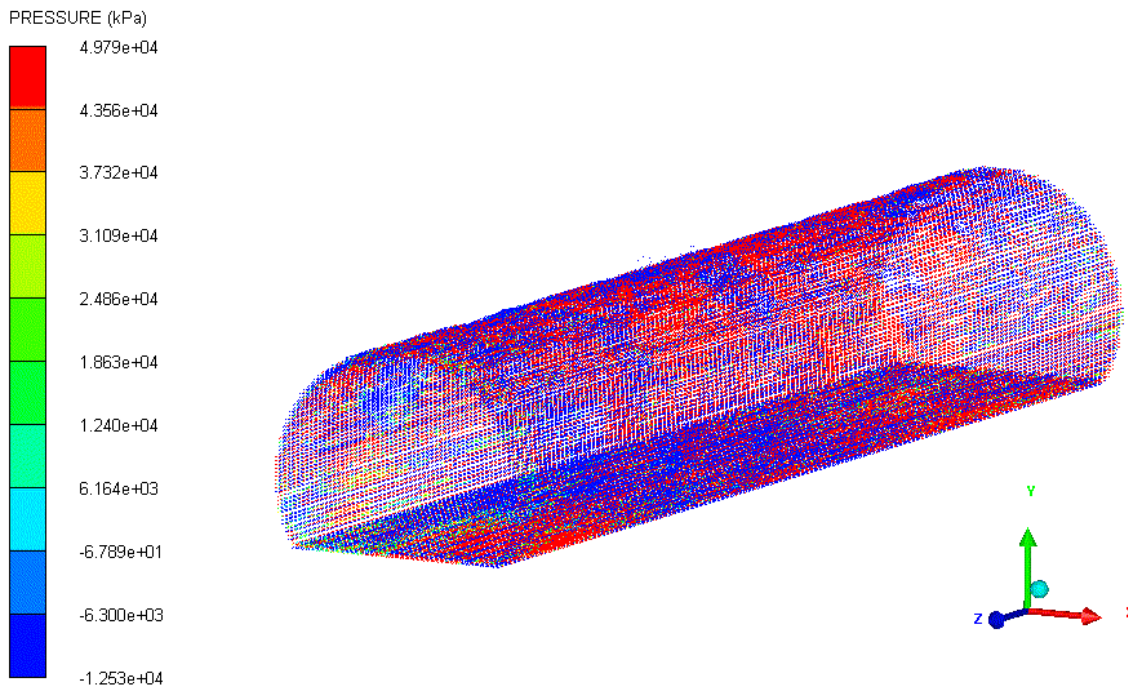


شکل ۵-۳۳: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه 0.2 میلی ثانیه در حالت عمق ۱۵ متر و جرم ۵۰۰ کیلوگرم



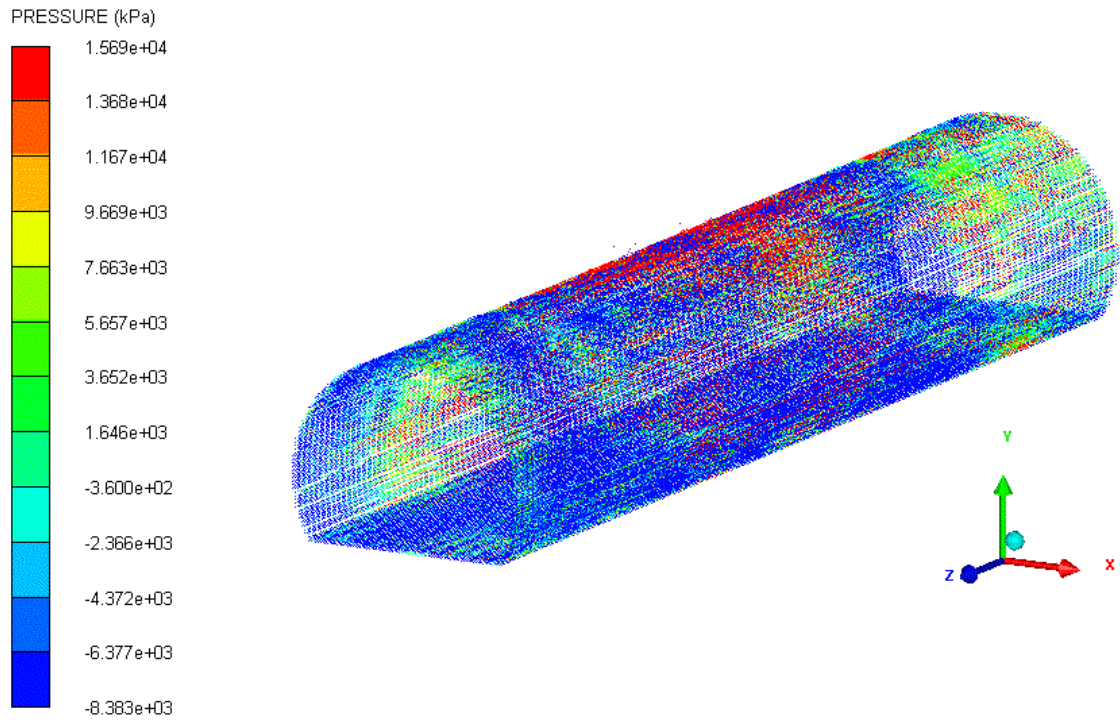
شکل ۵-۳۴: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه 0.02 میلی ثانیه در حالت عمق 15 متر و

جرم 1000 کیلوگرم



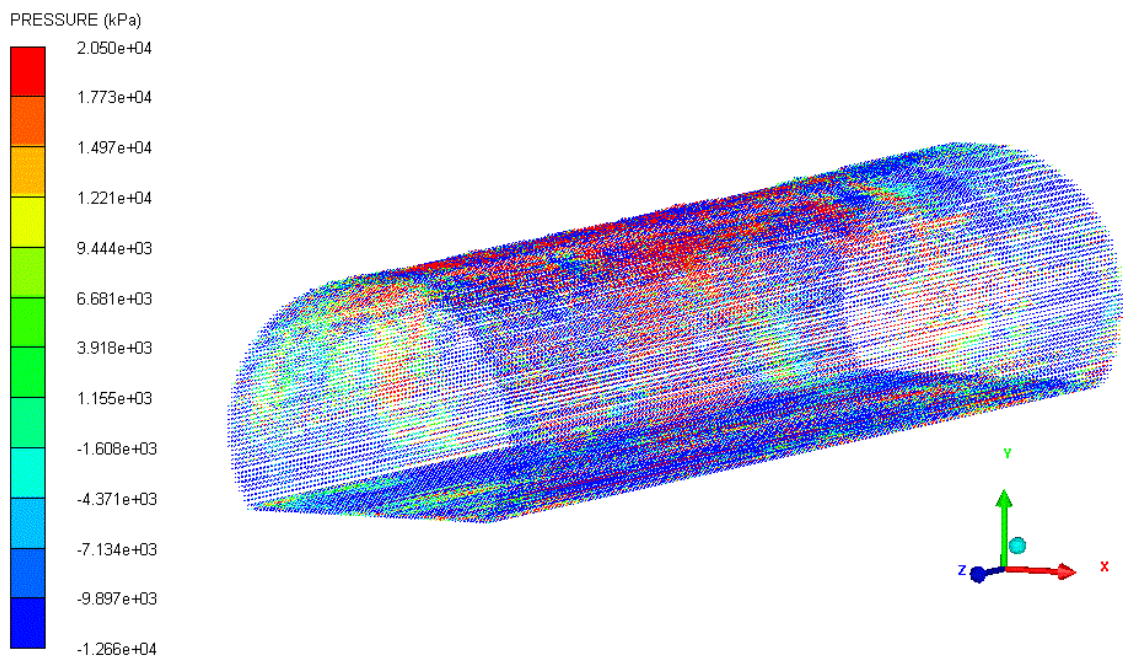
شکل ۵-۳۵: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه 0.02 میلی ثانیه در حالت عمق 15 متر و

جرم 5000 کیلوگرم



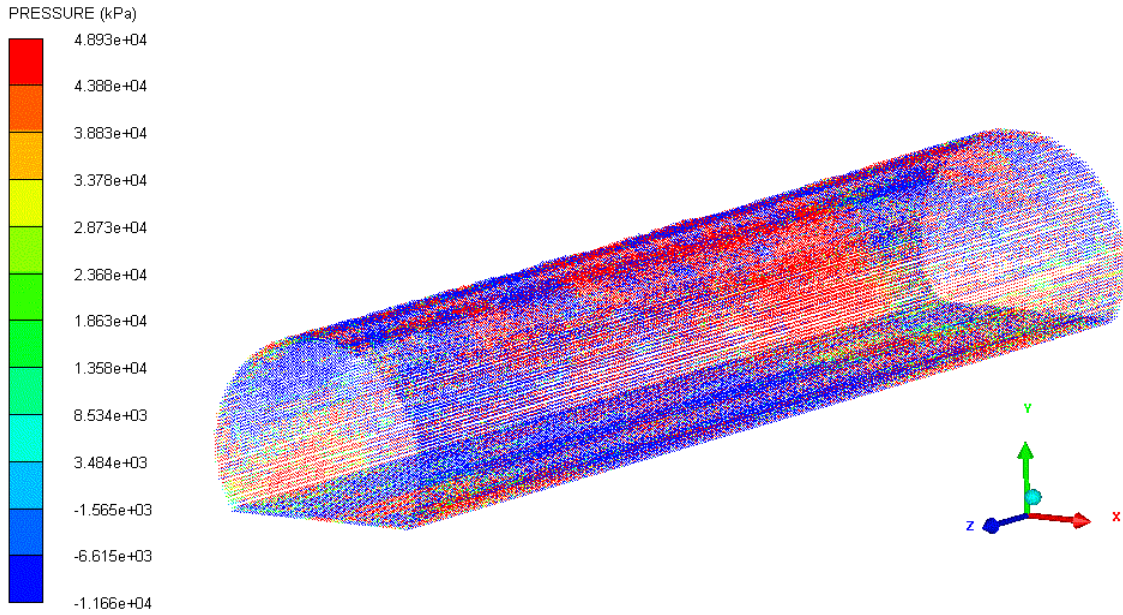
شکل ۵-۳۶: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و

جرم ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۳۷: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و

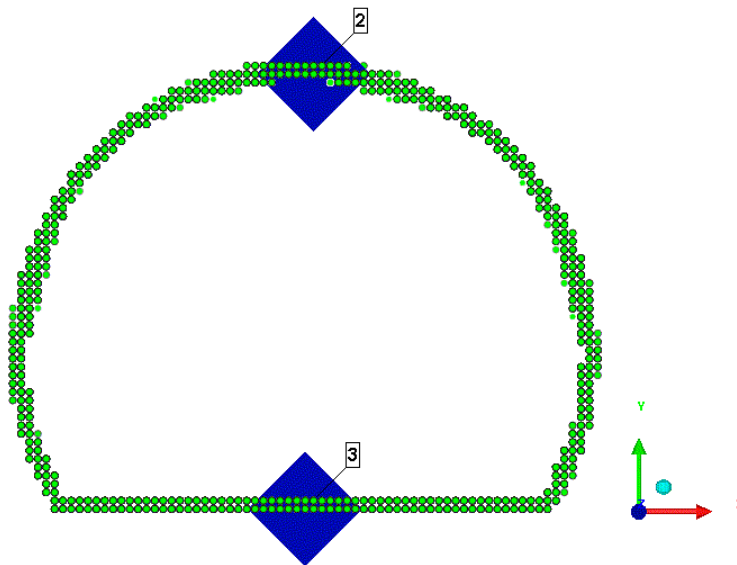
جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۳۸: نحوه توزیع فشار در بخش‌های مختلف تونل در لحظه ۰/۰۲ میلی‌ثانیه در حالت عمق ۲۰ متر و جرم ۵۰۰۰ کیلوگرم

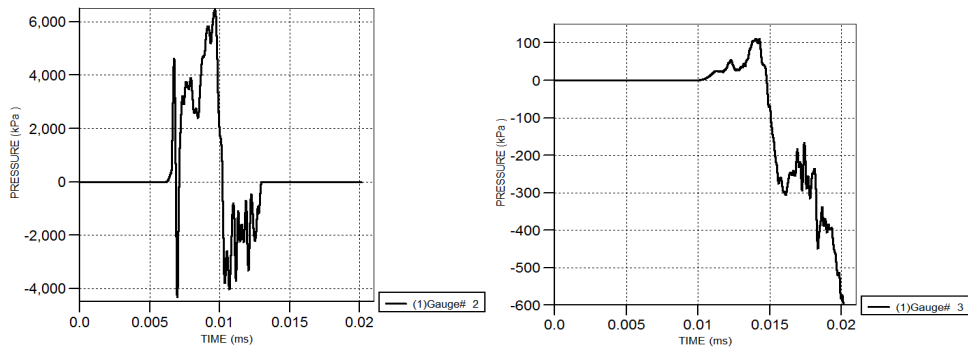
۵-۵- تاریخچه فشار ثبت شده

برای ثبت تاریخچه پارامترهای حاصل از موج انفجار تعداد ۲ سنجه (گیج) در سقف و کف تونل در زیر نقطه انفجار قرار داده شده است که به صورت شکل ۵-۳۹ می‌باشد.



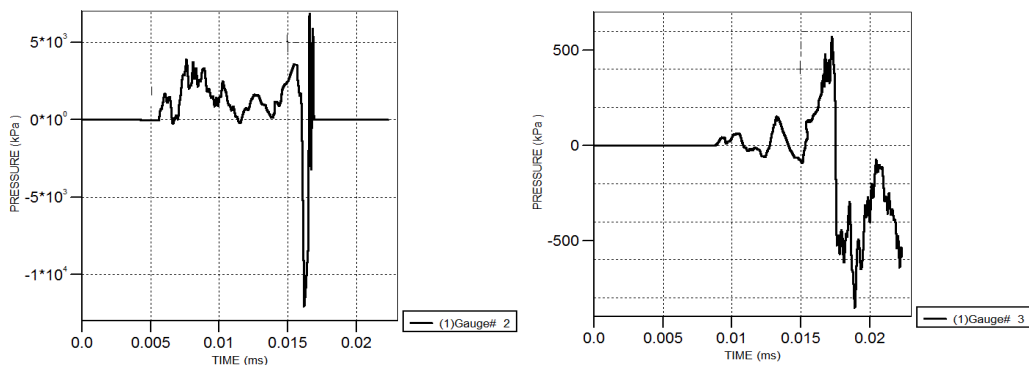
شکل ۵-۳۹: محل قرارگیری سنجه‌ها

شکل‌های ۴۰-۵ تاریخچه فشار ثبت شده توسط سنجه‌ها را در دو موقعیت ذکر شده نشان می‌دهد.

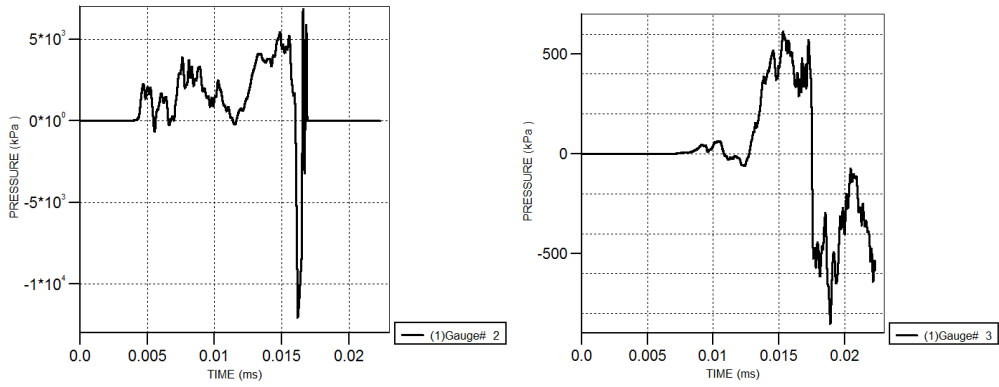


شکل ۴۰-۵: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

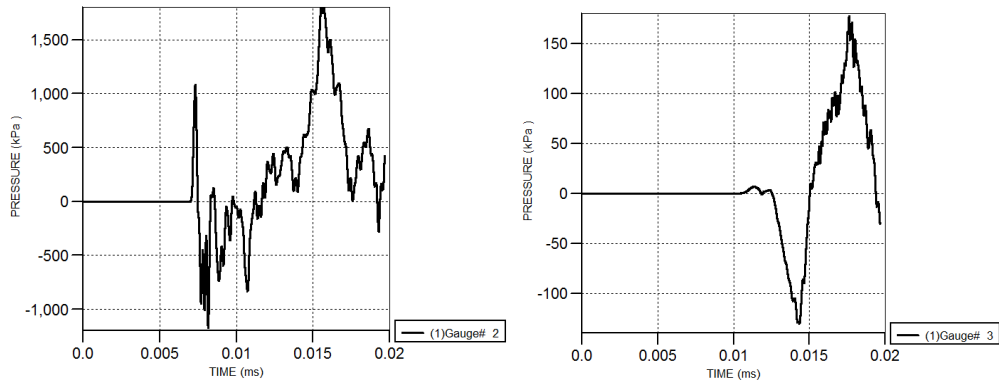
همانطور که از منحنی‌های شکل ۴۰-۵ مشخص است، فشار حاصل از انفجار مدت زمانی حدود ۰/۰۰۷ میلی‌ثانیه را گذرانده و پس از طی کردن عمق ۱۰ متر به سقف تونل، زیر محل انفجار رسیده است. ماکزیمم فشار ثبت شده در این نقطه حدود ۶۰۰۰ کیلوپاسگال می‌باشد که در لحظه (حدوداً) ۰/۰۱ میلی‌ثانیه ثبت شده است. فاز مثبت و منفی موج شوک انفجار کاملاً مشخص است. همچنین در ادامه فشار انفجار پس از مدت زمانی حدود ۰/۰۱ میلی‌ثانیه به کف تونل رسیده است. ماکزیمم مقدار ثبت شده فشار انفجار در کف تونل حدود ۱۰۰ کیلوپاسگال می‌باشد. در ادامه فشار انفجار در سقف و کف تونل در شکل‌های زیر نمایش داده شده است.



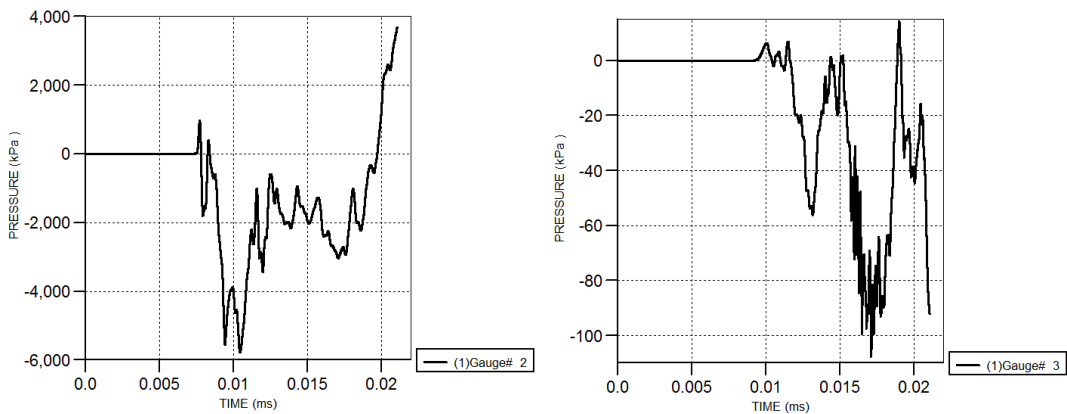
شکل ۴۱-۵: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



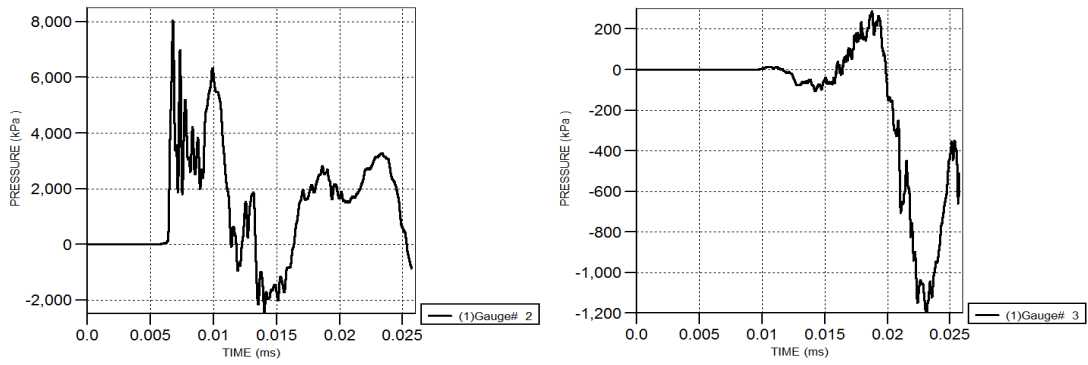
شکل ۵-۴۲: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۴۳: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

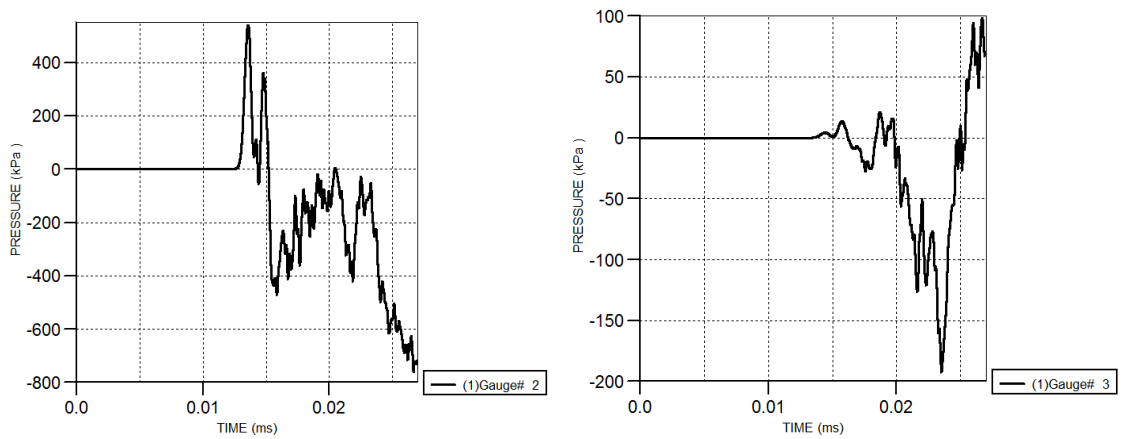


شکل ۵-۴۴: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



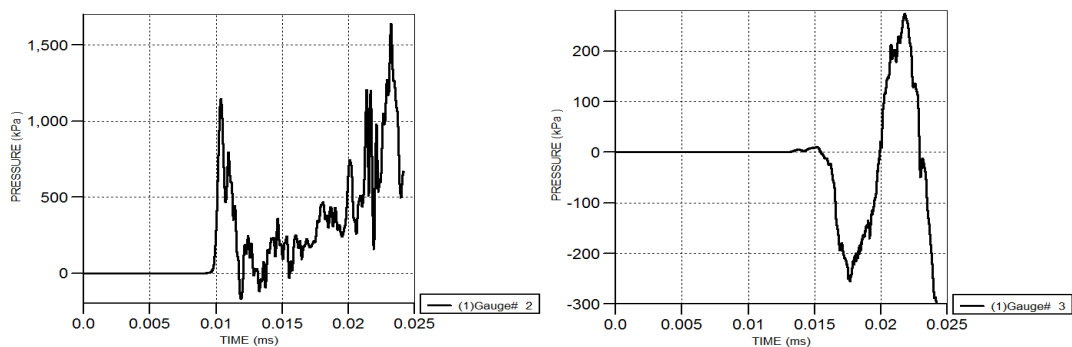
شکل ۵-۴۵: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق

۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



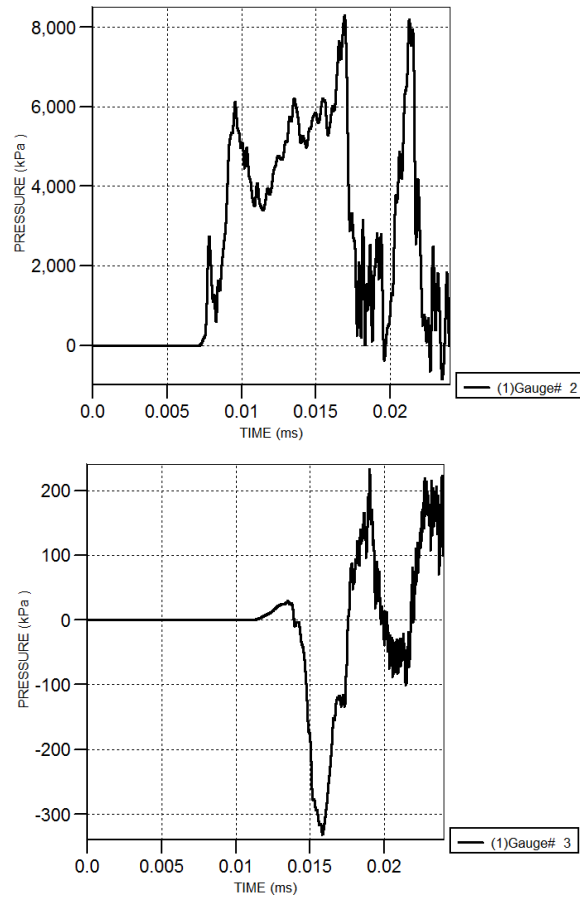
شکل ۵-۴۶: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق

۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۴۷: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق

۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



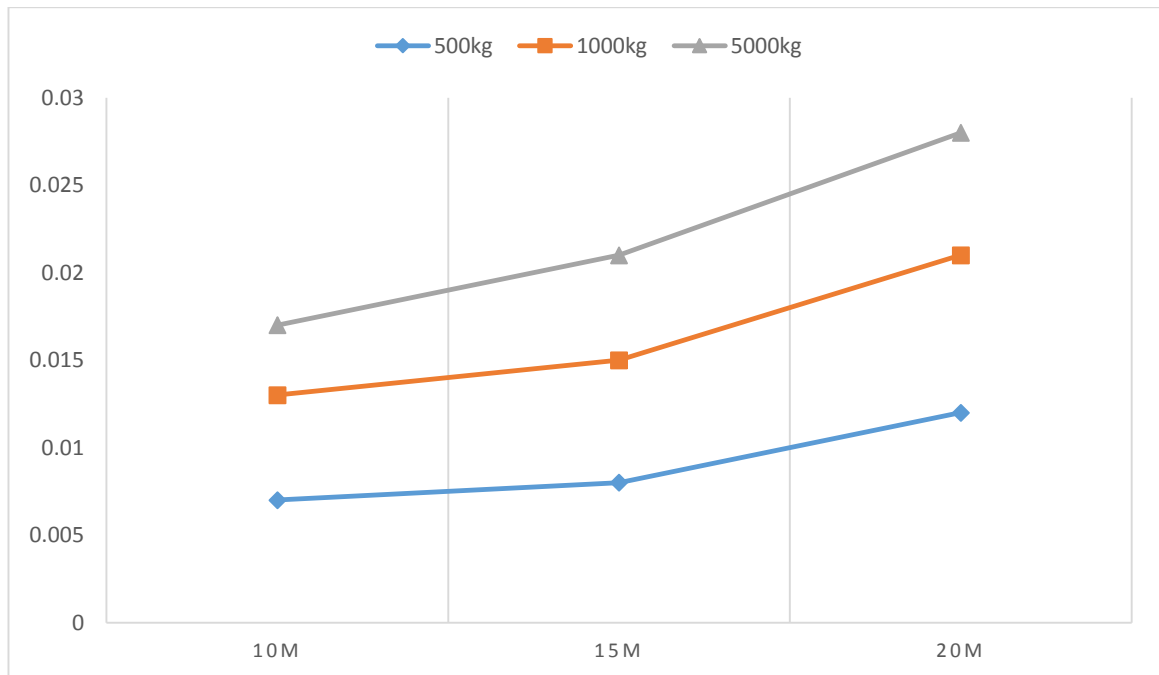
شکل ۵-۴۸: تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در زیر محل انفجار در حالت عمق

۲۰متر و ۵۰۰۰کیلوگرم

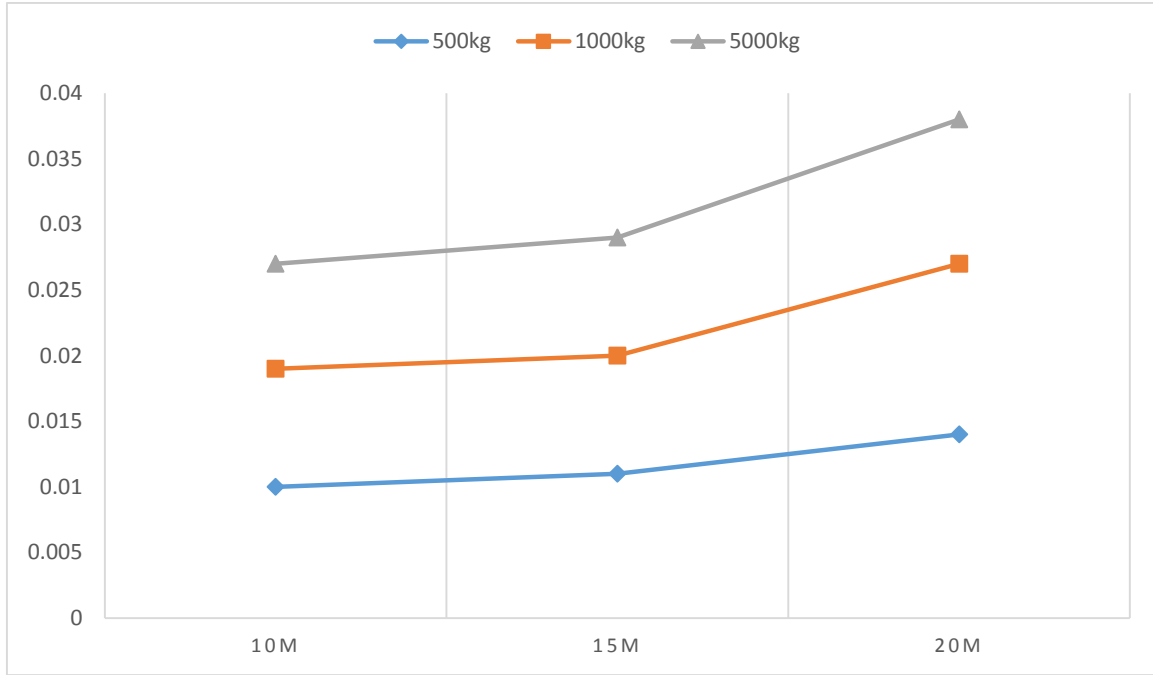
همانطور که در نمودارهای فشار - زمان ثبت شده توسط سنجه‌ها مشخص است عمق و جرم ماده منفجره تاثیر مستقیمی بر زمان رسیدن اولین موج شوک ناشی از انفجار به تونل دارند.

جدول ۵-۱: لحظه رسیدن اولین موج شوک به سقف و کف تونل در حالت‌های مختلف بارگذاری

زمان رسیدن اولین موج شوک با توجه به جرم TNT در کف تونل (ms)			زمان رسیدن اولین موج شوک با توجه به جرم TNT در سقف تونل (ms)			عمق
۵۰۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۵۰۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۱۰ متر
۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۱۵ متر
۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۲۰ متر



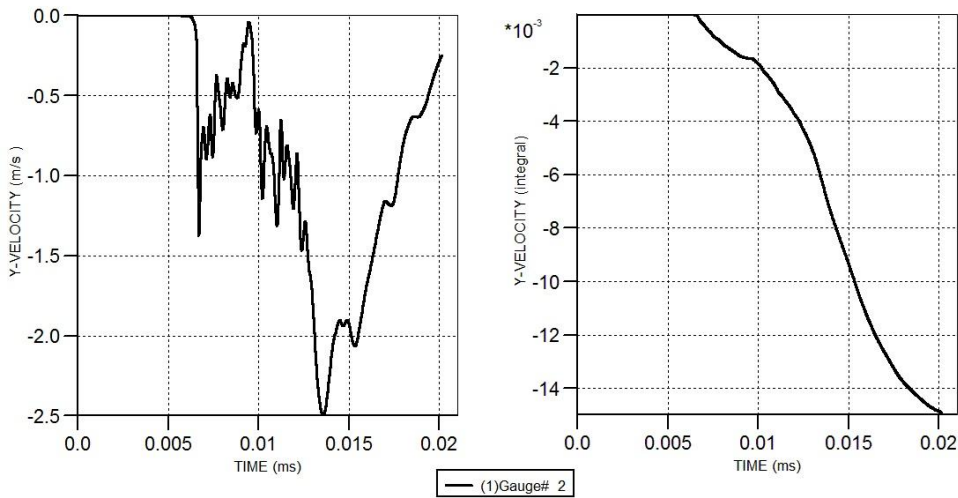
شکل ۵-۴۹: دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق - زمان در سقف تونل



شکل ۵-۵: دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق - زمان در کف تونل

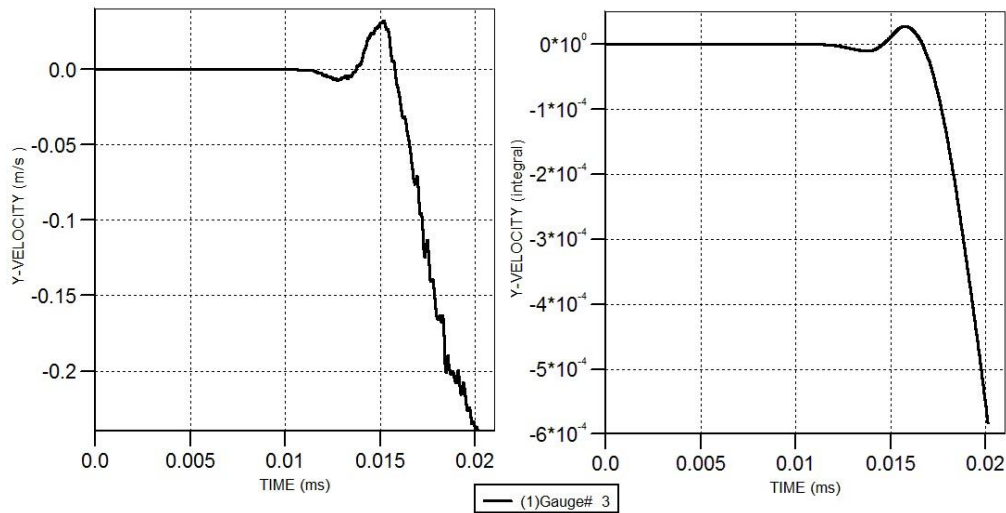
۵-۶- تاریخچه سرعت و جابجایی

سرعت حرکت مرکز سقف و کف تونل در راستای عمود بر نقطه انفجار (بردار Y) می‌توان از نمودارهای شکل‌های ۵-۵۱ و ۵-۵۲ بدست آورد. همچنین با انتگرال‌گیری از این دیاگرام‌ها می‌توان تغییر شکل (میزان جابجایی) در نقاط مذکور را بدست آورد.



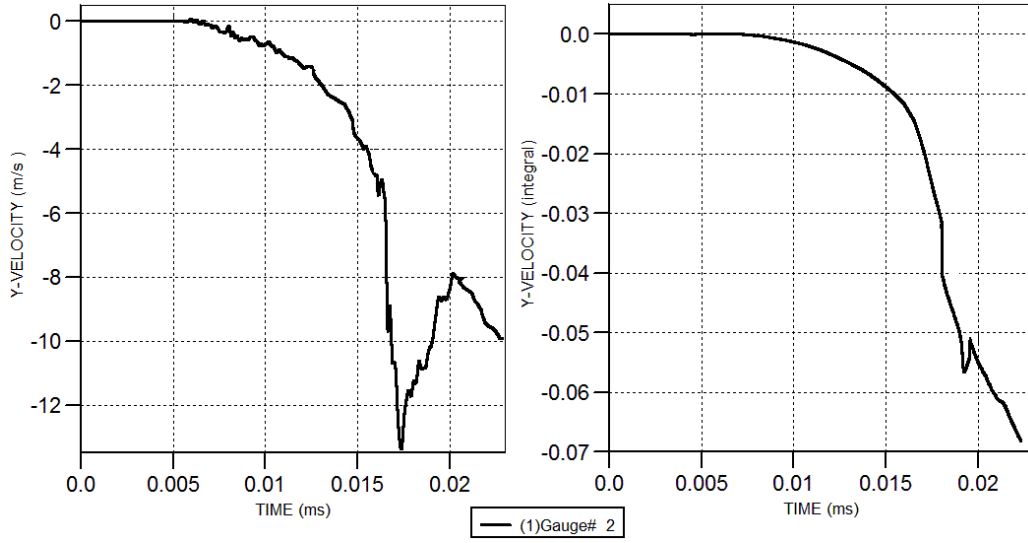
شکل ۵-۵۱: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم

همانطور که در شکل ۵-۵۱ مشخص است میزان تغییر شکل مرکز سقف تونل تا لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه در راستای بردار Y (راستای عمود بر محل انفجار) حدود ۰/۰۱۴۲- میلی‌متر می‌باشد که این مقدار بسیار ناچیز و اندک است. البته قطعا با ادامه تحلیل و گذشت زمان بیشتر این مقدار افزایش خواهد یافت. توجه داشته باشد که علامت منفی جهت حرکت را نشان می‌دهد که به سمت پایین می‌باشد.

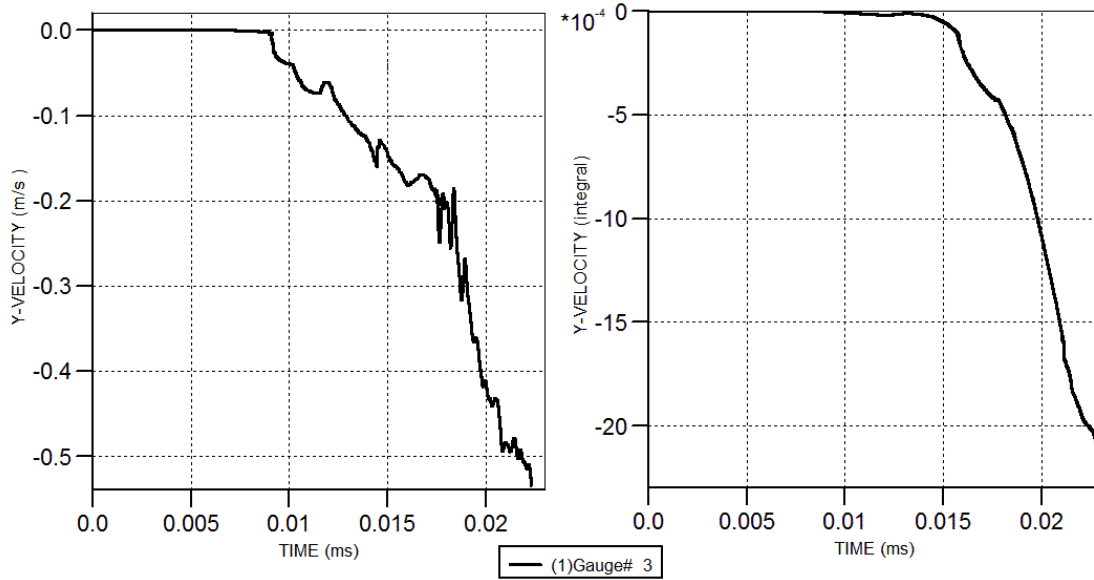


شکل ۵-۵۱: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم

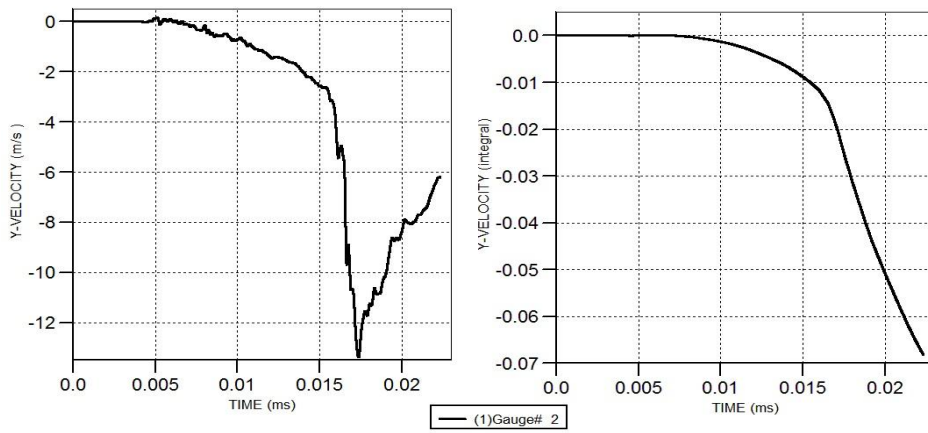
قطعا با ادامه روند تحلیل انتظار می‌رود میزان جابجایی و تغییرات سرعت در کف تونل نسبت به سقف کاهش بیشتری داشته باشد. این تغییرات را در دیاگرام شکل ۵-۵۱ می‌توان مشاهده کرد. همانطور که در شکل مشخص است میزان جابجایی حدود ۰/۰۰۰۶- میلی‌متر است. شکل‌های ۵-۵۲ تا ۵-۶۷ این تغییرات را در حالت‌های دیگر بارگذاری نمایش می‌دهند.



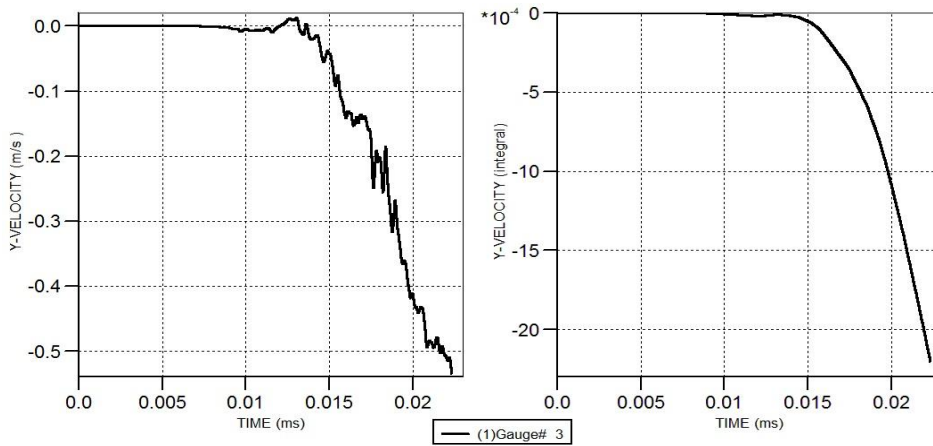
شکل ۵-۵۲: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



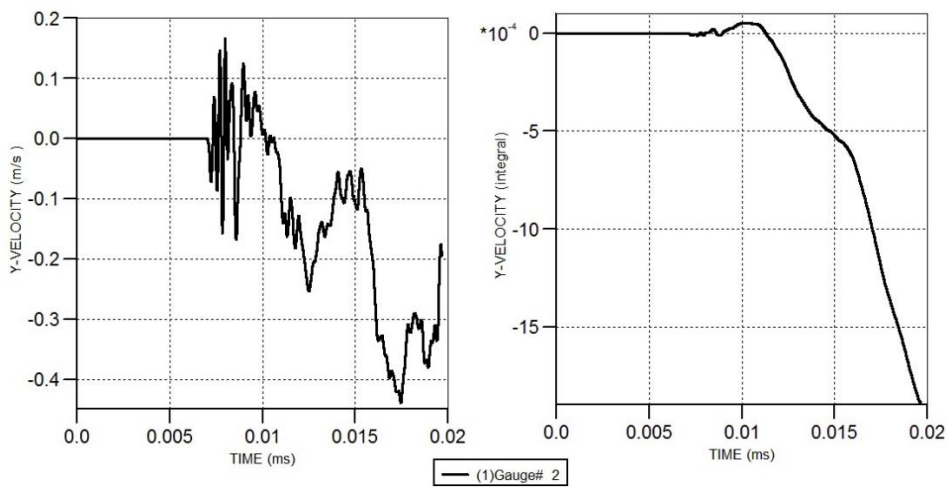
شکل ۵-۵۳: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



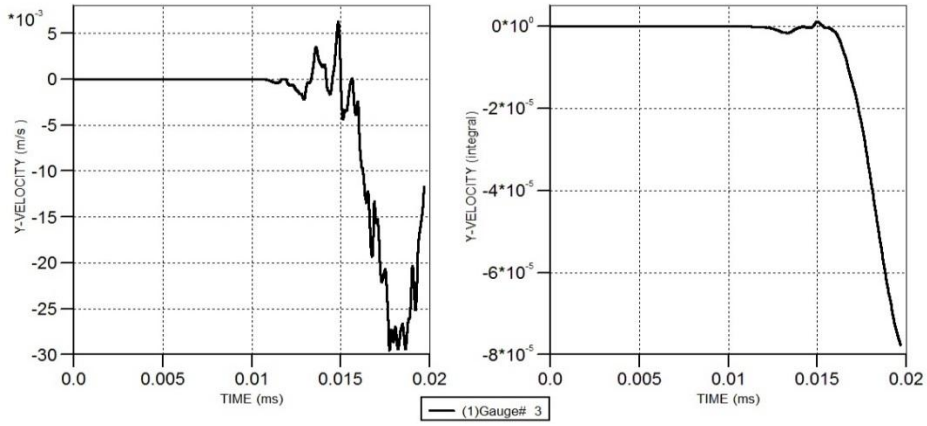
شکل ۵-۵۴: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم



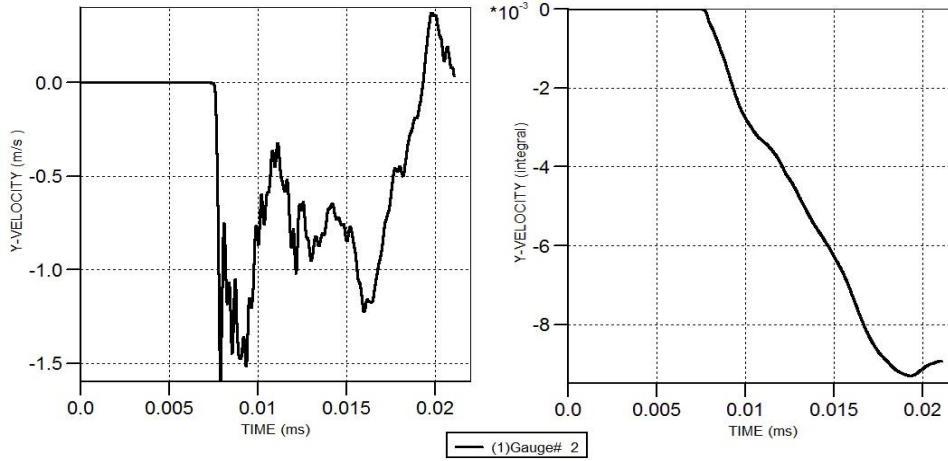
شکل ۵-۵۵: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم



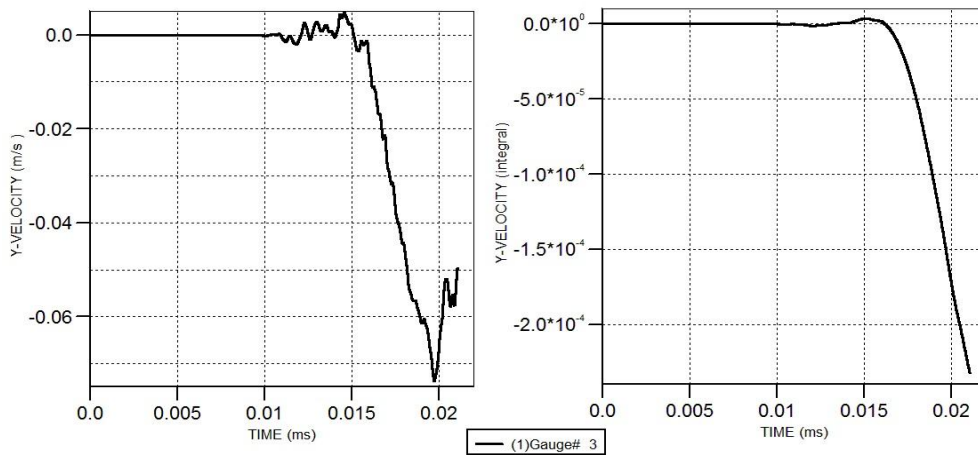
شکل ۵-۵۶: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلو گرم



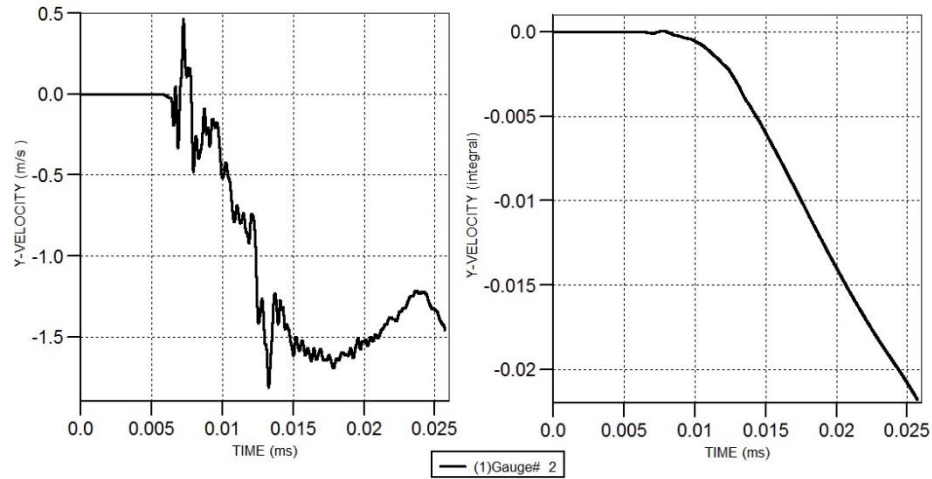
شکل ۵-۵۷: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلو گرم



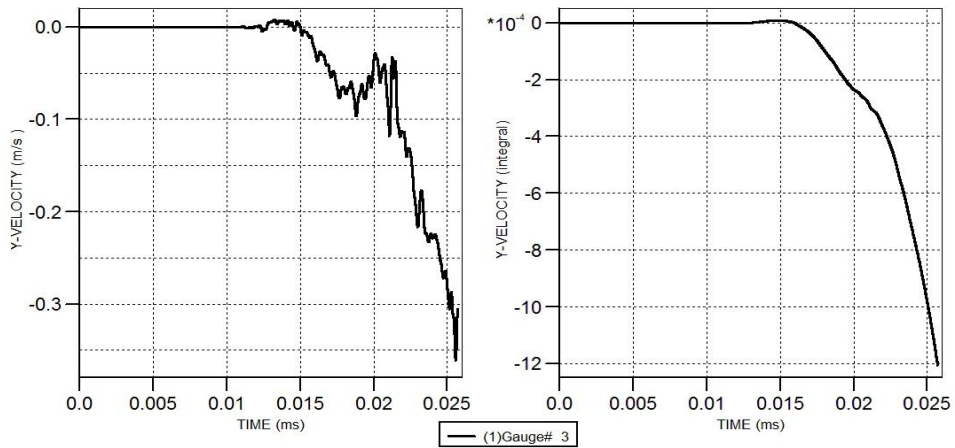
شکل ۵-۵۸: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



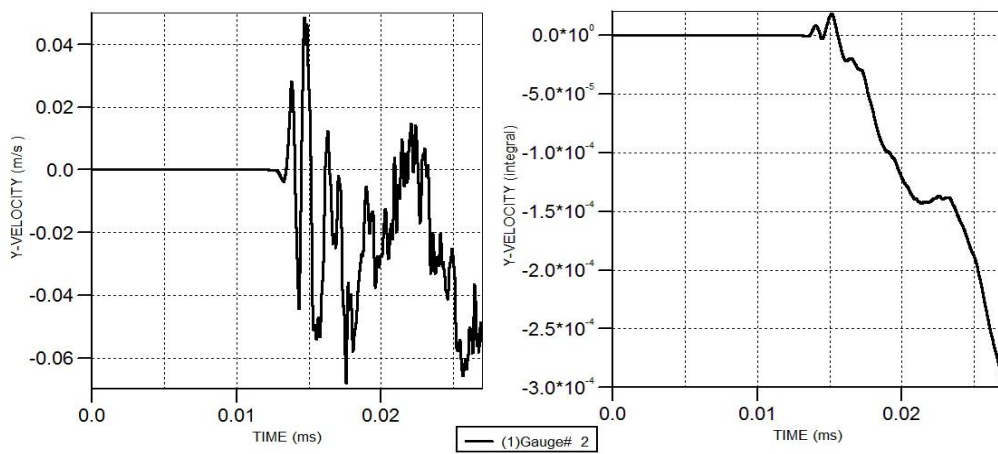
شکل ۵-۵۹: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



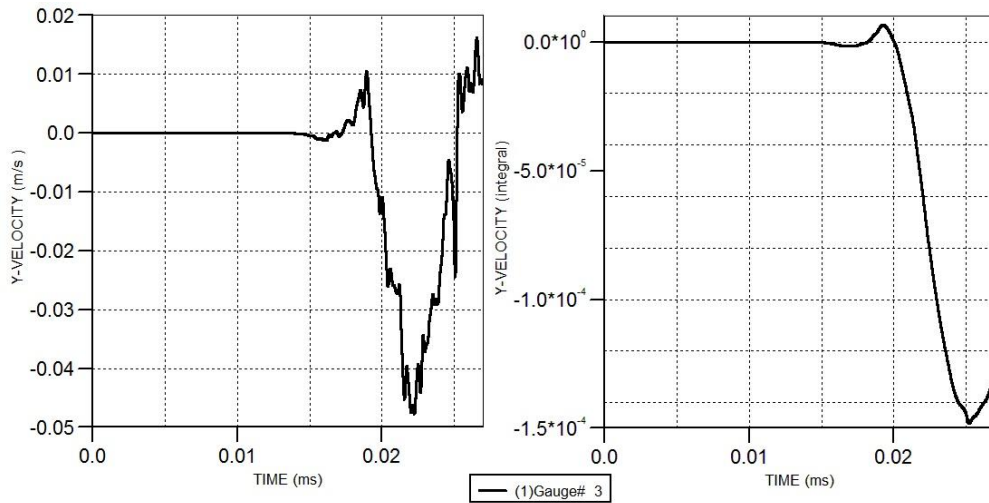
شکل ۵-۶۰: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم



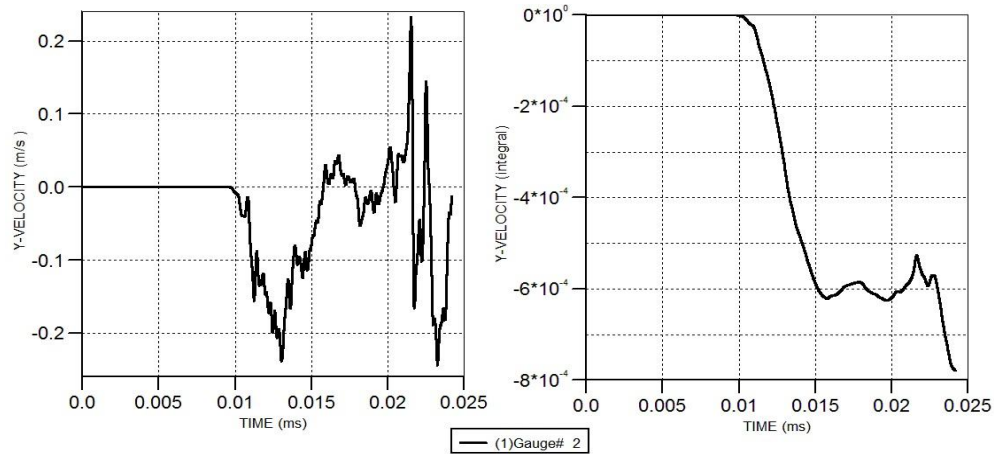
شکل ۵-۶۱: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم



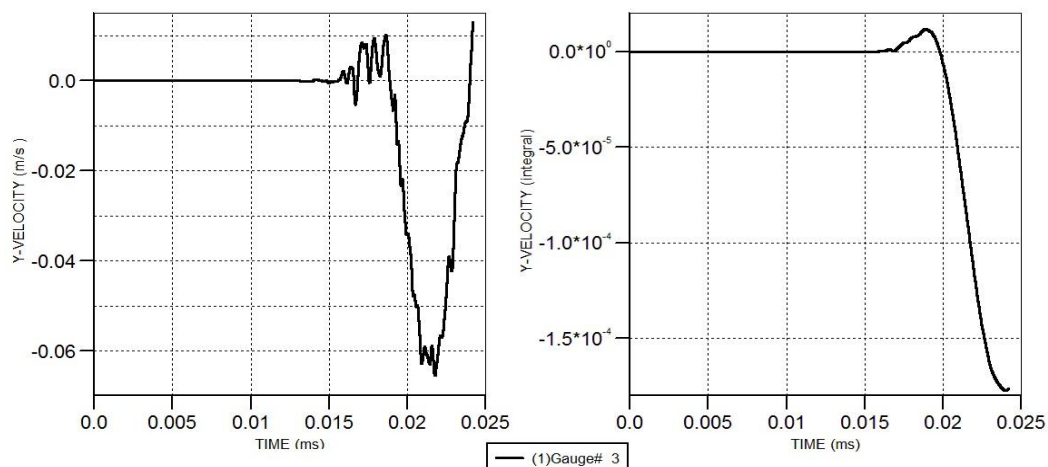
شکل ۵-۶۲: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم



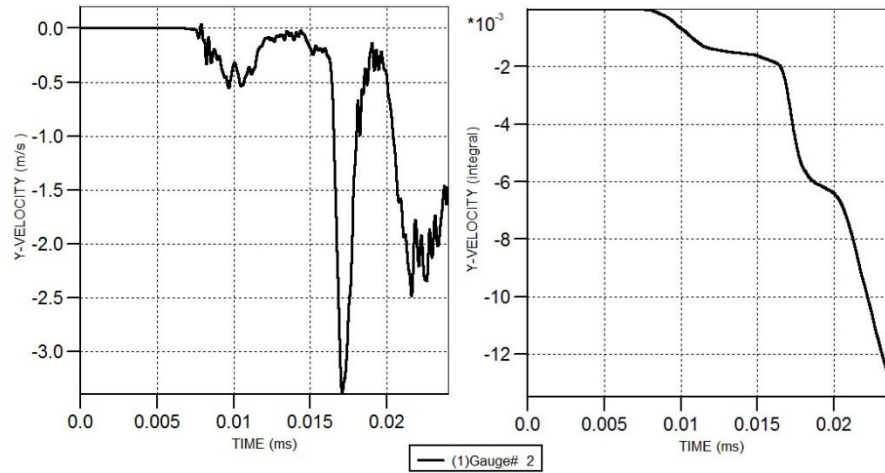
شکل ۵-۶۳: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلو گرم



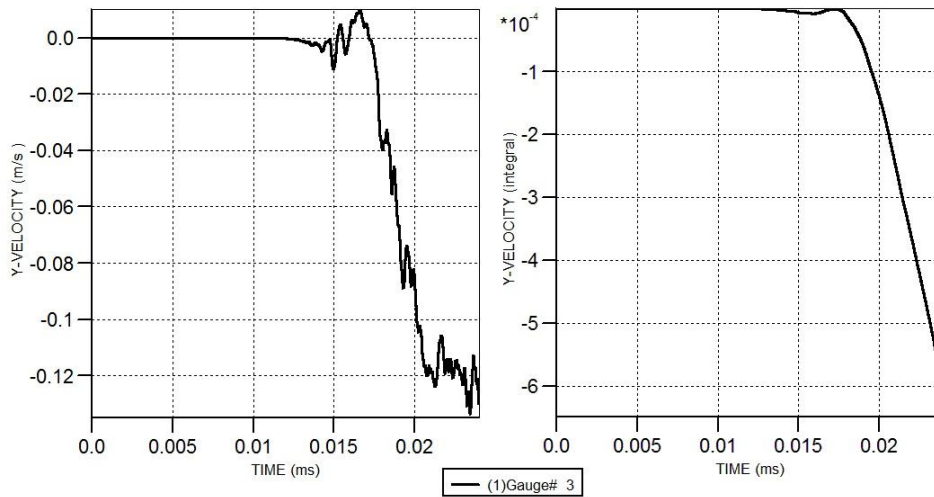
شکل ۵-۶۴: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



شکل ۵-۶۵: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلو گرم



شکل ۵-۶۶: تغییرات سرعت و جابجایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم



شکل ۵-۶۷: تغییرات سرعت و جابجایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلو گرم

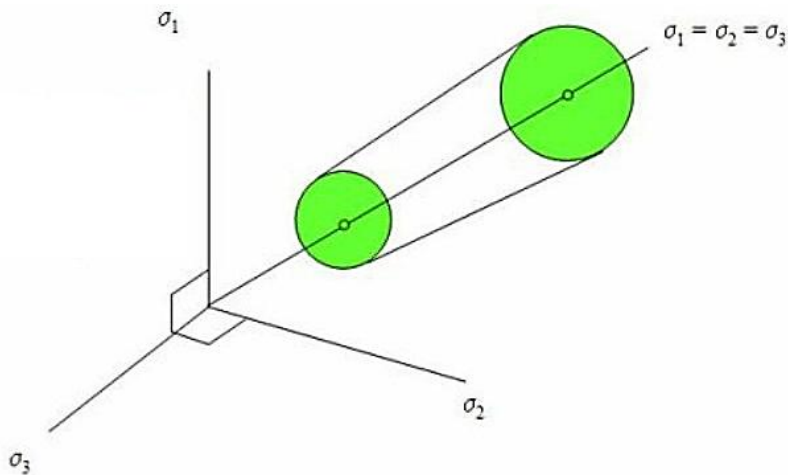
۵-۷- تاریخچه تنش وان میس

شکل های ۵-۶۹ تا ۵-۷۷ دیگرآم های تنش وان میس - زمان را نشان می دهند.

تنش وان میس برای طراحی پناه گاه های امن استفاده می شود. در صورتی که مقدار ماکزیمم تنش وان میس ناشی شده از معادلات مصالح موجود بیشتر باشد، سازه قدرت تحمل تنش های ایجاد شده را نخواهد داشت. این مدل از فرض اولیه وان میس استفاده می کند. برطبق مدل اولیه وان میس، تنش

تسلیم دارای یک مقدار ثابت است. در نتیجه، استوانه وان میزز دارای یک شعاع ثابت است. تنش درون استوانه، الاستیک است. حالات سطح استوانه، پلاستیک است.

این مدل عموماً تأثیر سخت شدگی کرنش، حساسیت مقدار کرنش یا نرم شدگی دمایی را مدنظر قرار نمی‌دهد. در هر حال، این تأثیرات می‌تواند تا حدی با مشخص کردن مثلاً مقدار متوسط دینامیک برای تنش تسلیم گنجانده شود. یک عامل تقویت دینامیک به طور موفقیت آمیزی توسط ویلکینز برای شبیه‌سازی آزمون‌های استوانه به کار رفت.

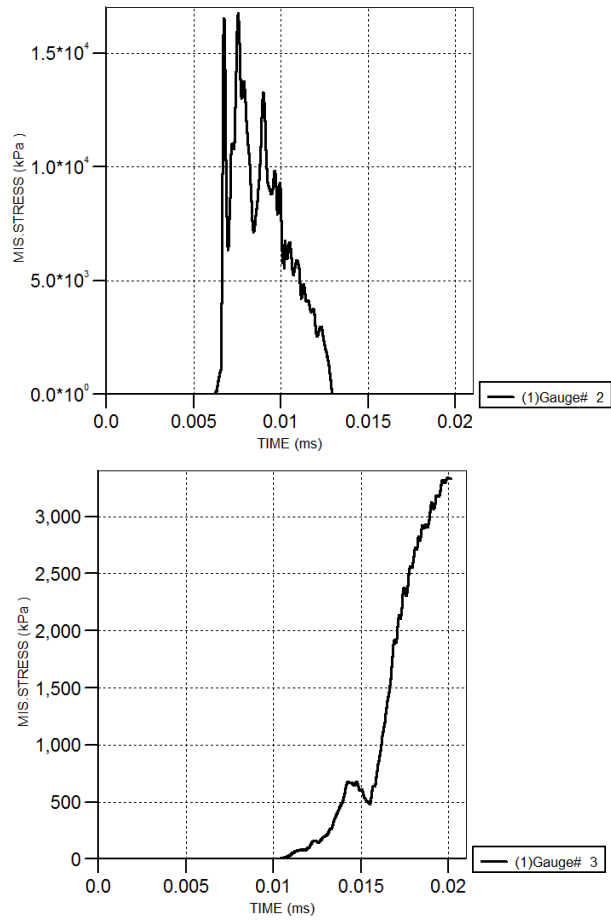


شکل ۵-۶۸: مدل فرضی وان میس

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

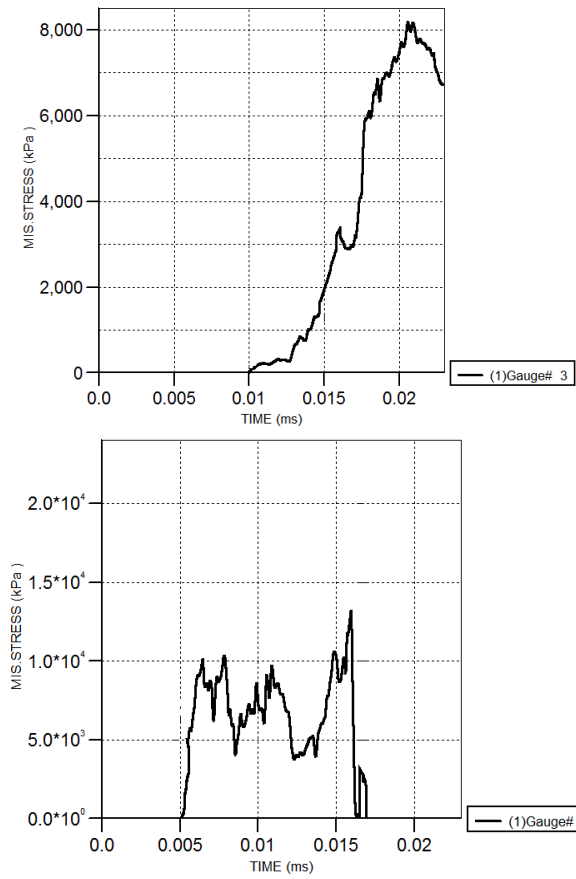
$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = \frac{2Y^2}{3}$$

بنابراین بررسی این دیاگرام‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.



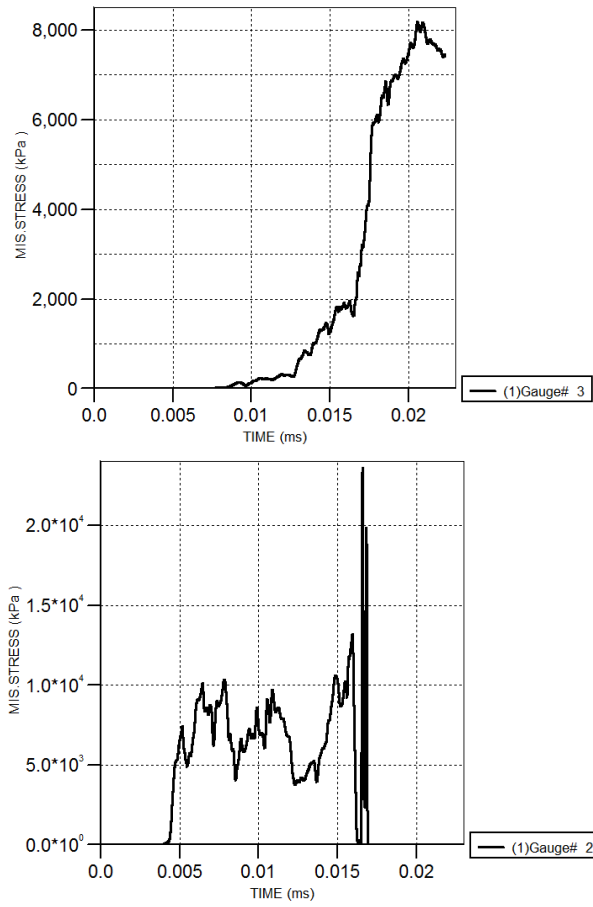
شکل ۵-۶۹: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و

۵۰۰ کیلوگرم



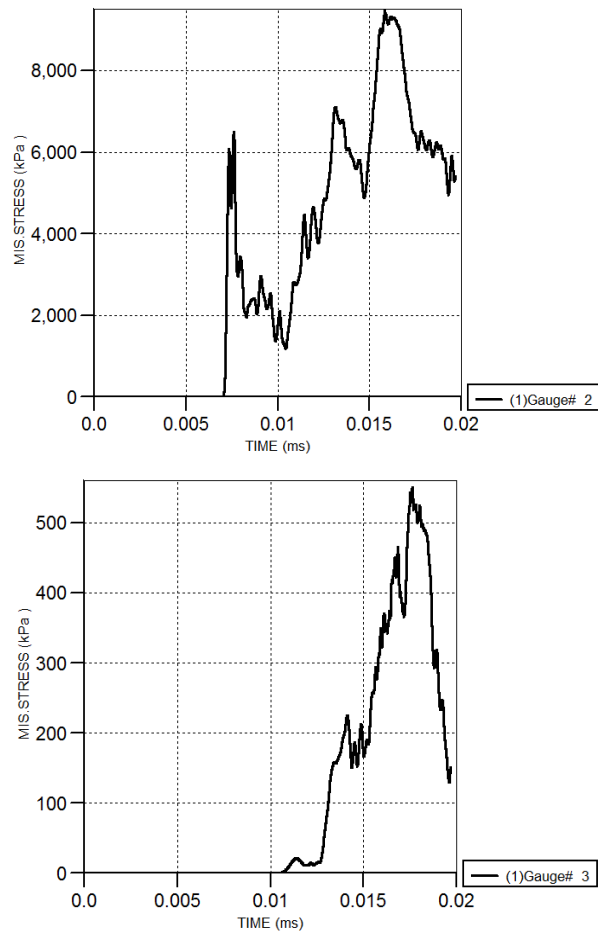
شکل ۵-۷: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و

۱۰۰۰ کیلوگرم



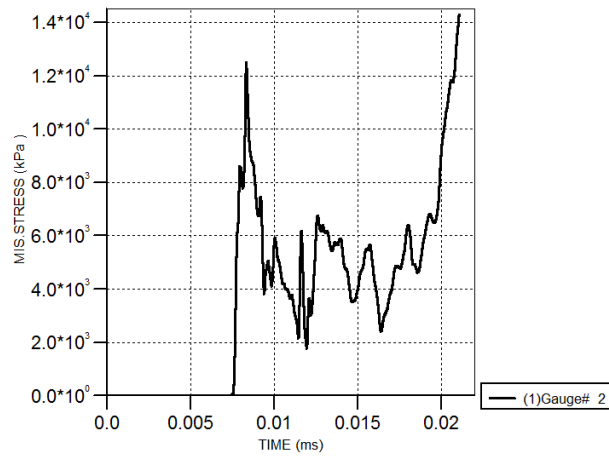
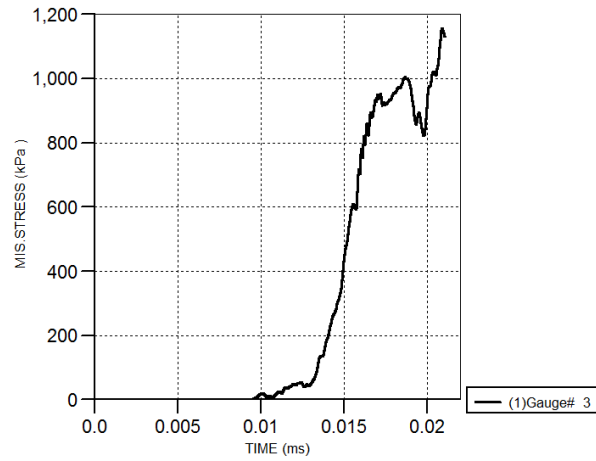
شکل ۵-۷۱: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم



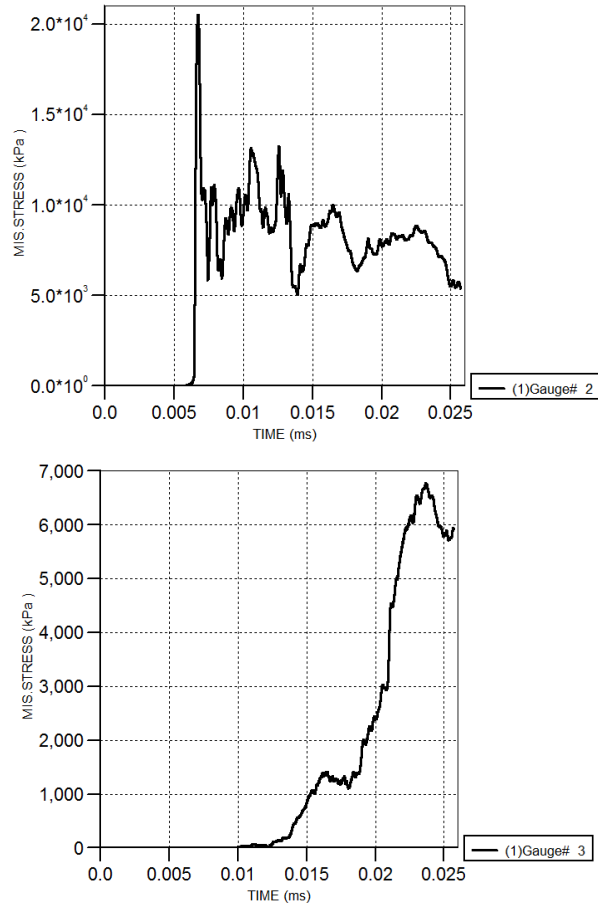
شکل ۵-۷۲: دیاگرام تنش وان میس - زمان سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) تونل در حالت ۱۵ متر و

۵۰۰ کیلوگرم



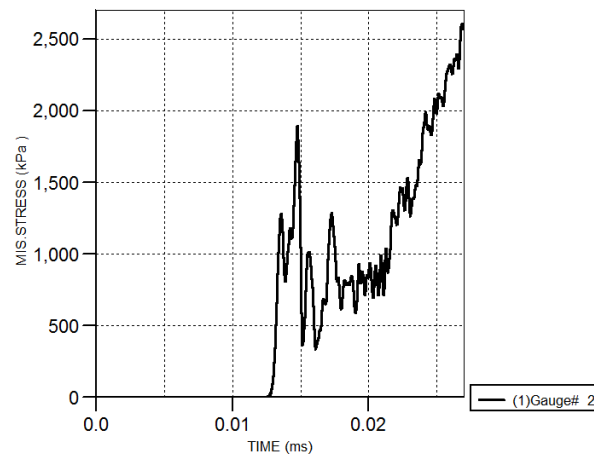
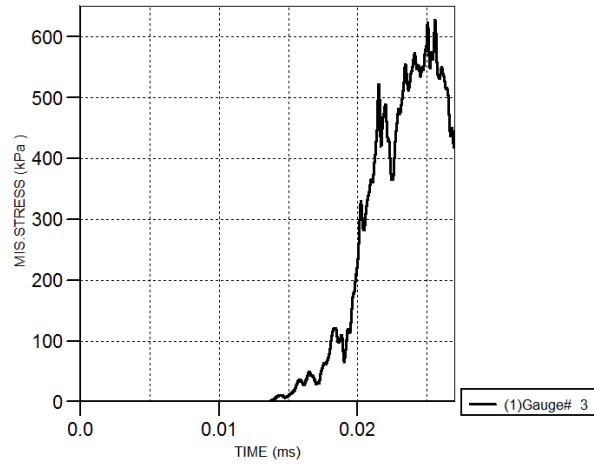
شکل ۵-۷۳: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و

۱۰۰۰ کیلوگرم



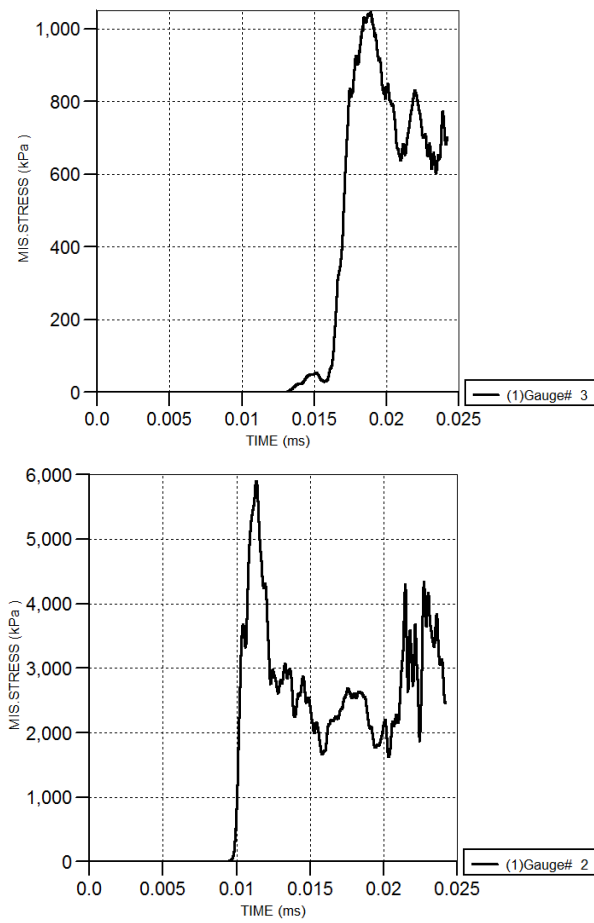
شکل ۵-۷۴: دیاگرام تنش وان میس - زمان سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) تونل در حالت ۱۵ متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم



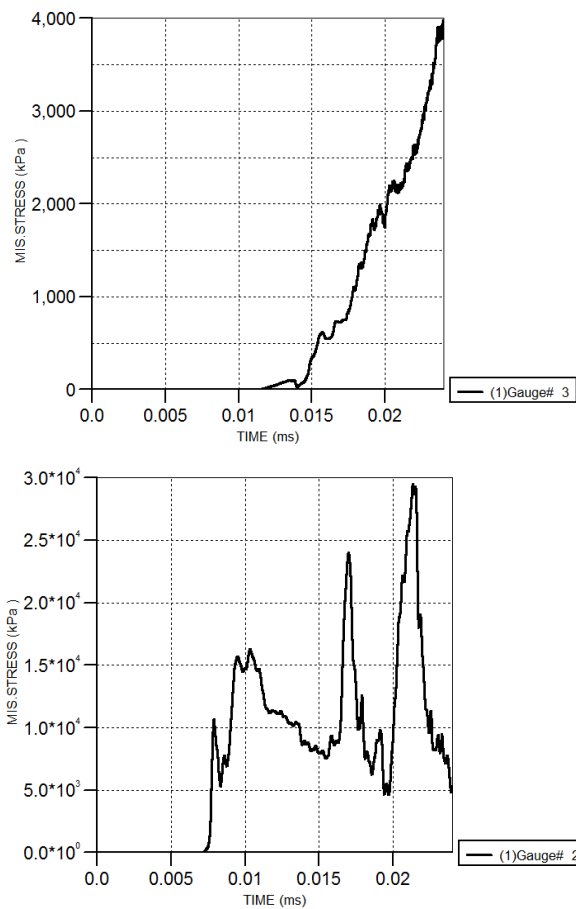
شکل ۵-۷۵: دیاگرام تنش وان میس - زمان سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) تونل در حالت ۲۰ متر و

۵۰۰ کیلوگرم



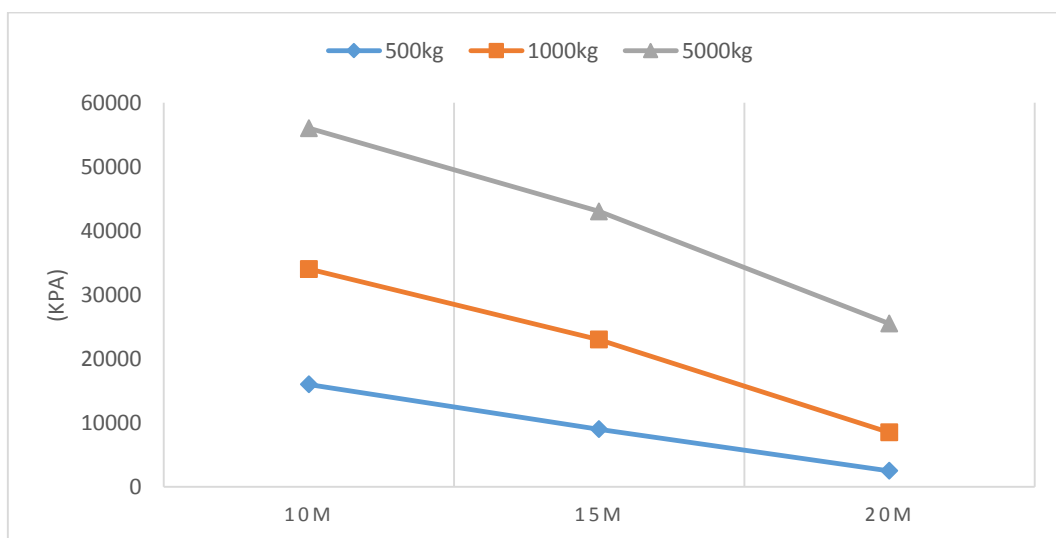
شکل ۵-۷۶: دیاگرام تنش وان میس - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و

۱۰۰۰ کیلوگرم

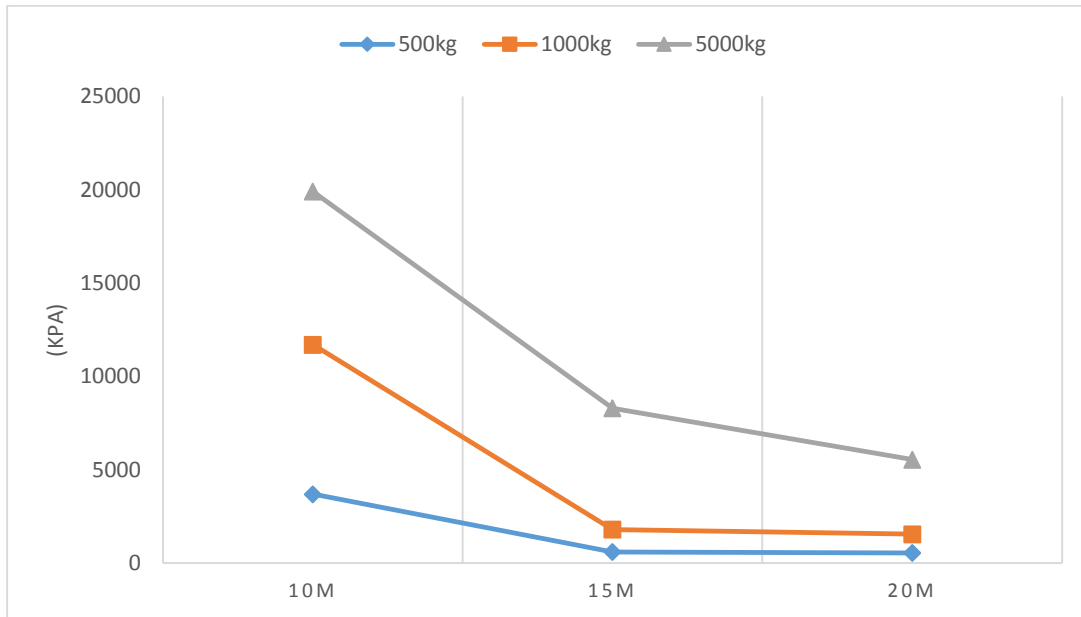


شکل ۵-۷۷: دیاگرام تنش وان میس - زمان سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و

۵۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۵-۷۸: نمودار ماکزیمم تنش بر حسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در سقف تونل



شکل ۵-۷۹- نمودار ماکزیمم تنش بر حسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در کف تونل

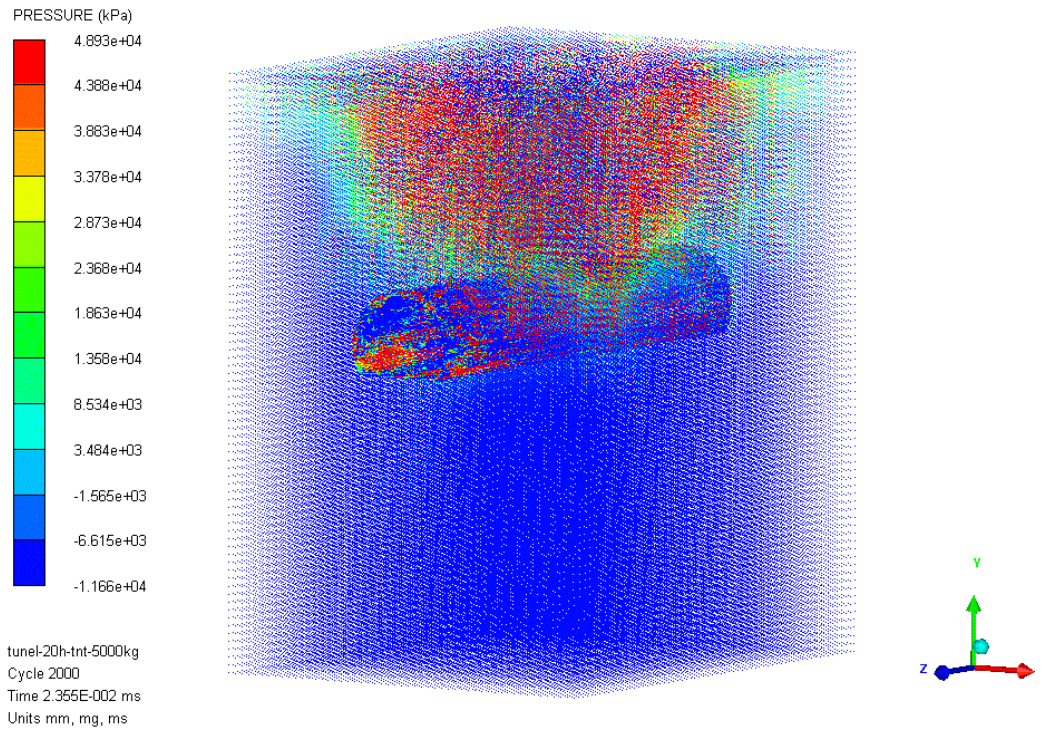
با بررسی شکل های ۷۸-۵ و ۷۹-۵ نتیجه می‌گیریم اثر انفجار هر میزان مشخص از TNT تا عمق خاصی بر روی تونل تاثیر گذاشته و چنانچه تونل در عمقی بیشتر از این عمق خاص قرار گیرد هیچ اثر تخریبی روی آن رخ نمی دهد و این نکته در طراحی سازه های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می باشد.

بی تردید مهندسين به اهمیت طراحی صحیح سازه‌های ایمن در برابر بارگذاری انفجاری واقف هستند. ولی سازه‌های مهندسی دارای کاربردهای متعدد و مختلفی می‌باشند که همین حوزه کاربرد، نوع بارگذاری و شدت آن را متغیر خواهد ساخت. بعضی از سازه‌ها دارای کاربردهای عمومی و چندگانه مانند انواع ساختمان‌های مسکونی، ورزشگاه‌ها، بیمارستان‌ها، تونل‌ها و ... بوده و یکی از وظایف طراح در این موارد، مقاوم‌سازی سازه در برابر بارگذاری‌های انفجاری مرسوم، با سطح شدت متوسط و در محدوده قدرت بمب‌های تروریستی، تعریف می‌گردد. در این نوع طراحی‌ها، عملاً هدف اصلی طراح

ایجاد مقاومت در برابر فرو ریزش آبی است و نباید انتظار داشت که سازه‌ای با چنین سطح از طراحی که در برابر بارگذاری انفجاری قرار گرفته است، قابلیت استفاده مجدد را داشته باشد. البته این استفاده مجدد با انجام تعمیرات جزئی و بعضاً اساسی میسر خواهد شد. در چنین مواردی بیشتر تمرکز بر ایجاد فرصت مختصر برای خروج از محوطه خطر و نجات جان ساکنین سازه می‌باشد. به عبارتی تحمل سازه‌ای که یکبار در برابر بارگذاری انفجاری قرار گرفته و شاید از لحاظ ظاهری نیز دچار مشکل چندانی نباشد، برای بارگذاری با شدت مشابه بعدی قابل تضمین نیست.

با این نگاه در این پایان‌نامه به بررسی ۹ حالت مختلف از بارگذاری انفجاری بر روی تونل‌های زیرزمینی پرداختیم. تونل‌های زیر زمینی اعم از تونل‌های مترو، زیرگذرها، تونل‌هایی با کاربردهای نظامی، پناهگاه‌ها و ... به دلیل قرار گیری در عمق مشخصی از زمین و دسترسی به سطح زمین اهمیت این موضوع را چندین برابر می‌کند.

مدلسازیها در حالت‌های متفاوتی از عمق قرارگیری تونل در خاک و جرم ماده منفجره به کار رفته که TNT بود، انجام شدند. برای ساخت مدل‌ها از نرم افزار انسیس استفاده شد و همچنین برای تحلیل مدل‌ها از نرم افزار اتوداین. نتایج بدست آمده از پایان تحلیل حاکی از فشار بالای انفجار در همان لحظات اولیه شروع تحلیل در خود ماده منفجره و انتقال موج شوک‌های حاصل از آن به عمق زمین تا رسیدن به تونل بود. با پیشروی این موج در درون خاک، دامنه فشار کاهش محسوسی پیدا می‌کند. شکل ۵-۱ لحظه برخورد موج شوک درون خاک را در لحظه $0/002$ میلی‌ثانیه به تونل را در یکی از حالتهای مدلسازی را نشان می‌دهد که به شکل کروی می‌باشد. برخورد این موج شوک باعث القای تنش فشاری در سازه پناهگاه خواهد شد.



شکل ۶-۱: نحوه توزیع و برخورد موج شوک درون خاک در لحظه ۰/۰۰۲ میلی ثانیه با تونل

دو مورد از اصلی‌ترین نتایج که از مقایسه رفتار موج شوک و اثر گذاری آن در در همه حالتها به چشم می‌خورد، عبارت بود از:

۱. کاهش اثر بارگذاری بر روی تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل در خاک.

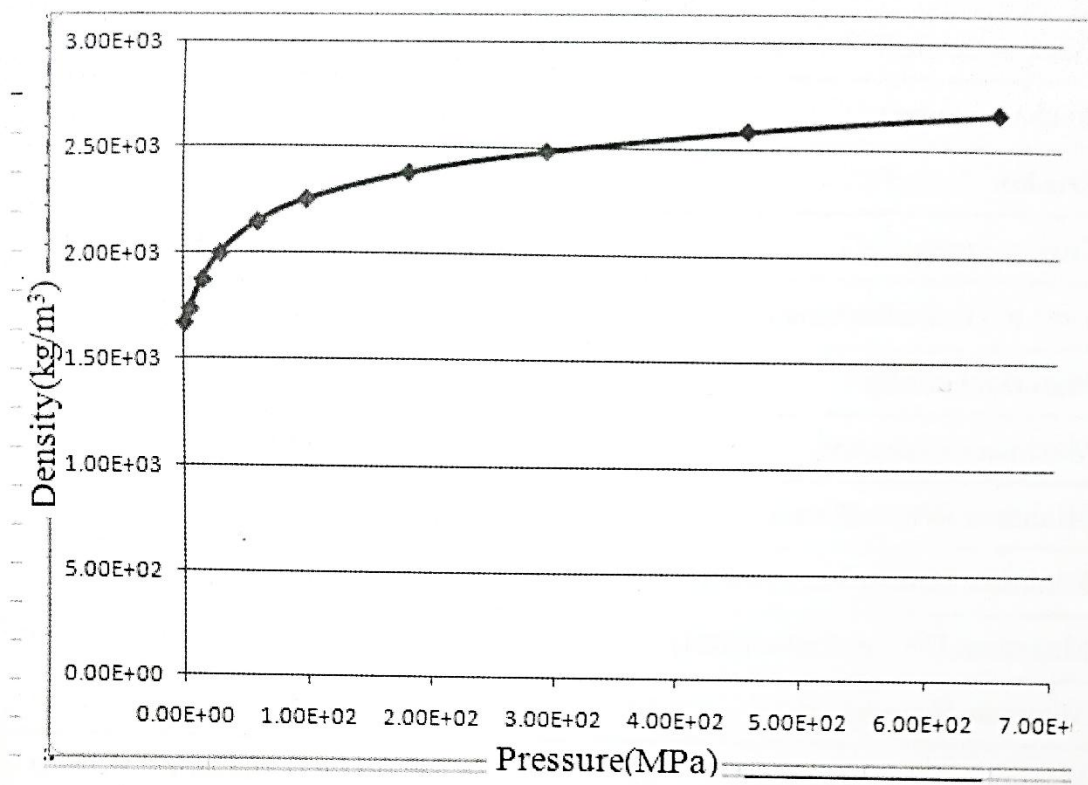
۲. افزایش اثر بارگذاری بر روی تونل با افزایش جرم ماده منفجره.

بنابراین می‌توانیم بگوییم که اثر بارگذاری انفجاری با جرم ماده منفجره رابطه مستقیم و با عمق قرارگیری هدف در خاک رابطه معکوس دارد.

همانطور که می‌دانید خاک ماده‌ای با تخلخل بالا است. این خلل و فرج درون ماده توسط هوا و یا آب و یا ناخالصی‌های جامد و مایع مختلف پر شده است. به همین دلیل چگالی خاک با بارگذاری‌های مختلف متغیر است. به عبارتی تنش هیدرو استاتیک وارده بر المان‌های مکعبی شکل بی‌نهایت کوچک خاک، باعث تغییر چگالی آن می‌شود. وجود آب، این خاصیت (تراکم‌پذیری) را به‌طور محسوسی بالا

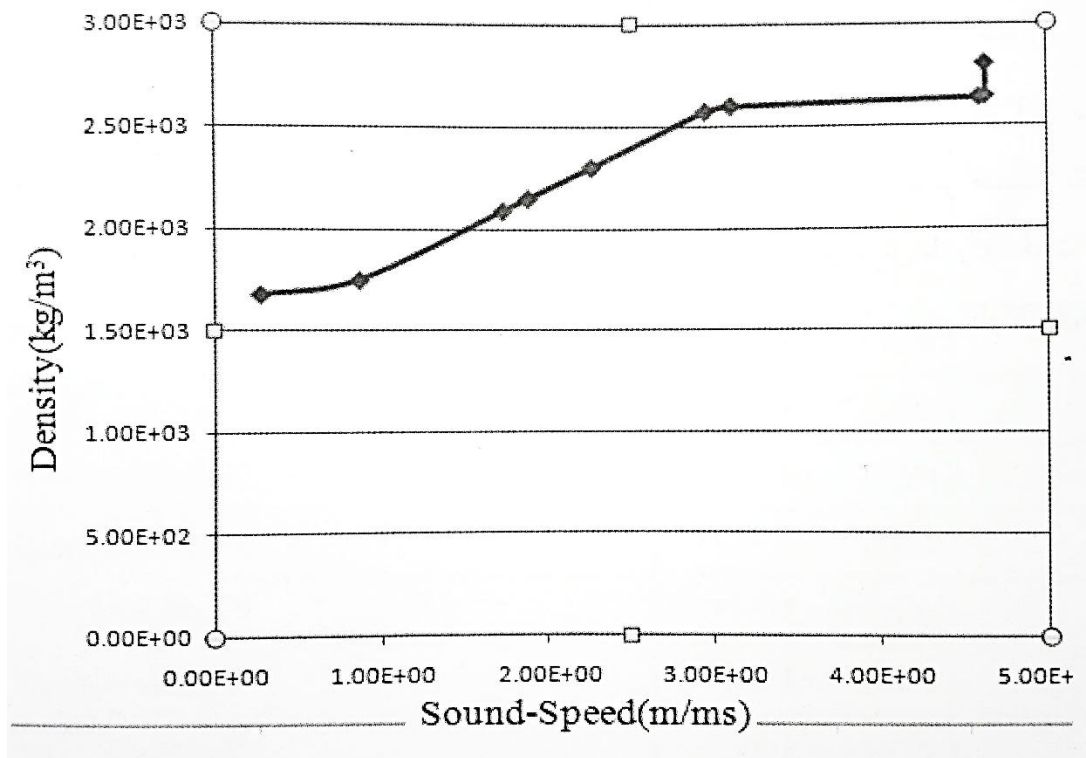
می‌برد. به همین دلیل تعریف معادله حالت^۱ برای چنین ماده بسیار ضروری بوده، زیرا در تعریف معادله حالت رابطه تنش هیدرواستاتیک و چگالی ماده و یا سایر پارامترهای ترمودینامیکی ماده مشخص می‌شود. ما در این مدل‌ها از معادله حالت Compaction برای تعریف متریال خاک استفاده کردیم.

در شکل ۲-۵ نمودار تغییرات چگالی بر حسب تنش هیدرواستاتیک (فشار) ماده رسم شده است. همچنین هنگام باربرداری از روی شن و یا خاک نیز رفتار ماده را بر حسب تغییرات سرعت صوت در آن بیان می‌کنند. در شکل ۳-۵ تغییرات چگالی بر حسب تغییرات سرعت صوت بیان شده است. کاهش سرعت صوت به معنای کاهش فشار بر روی ماده است.



شکل ۲-۶: تغییرات چگالی ماده بر حسب فشار

¹-Equation of State



۳-۶: تغییرات چگالی بر حسب سرعت صوت در هنگام باربرداری

استفاده از خاصیت تکیه‌گاهی خاک اطراف تونل و همچنین و به حداقل رسیدن نیروی وزن سازه با قرار گرفتن در عمق مشخصی از زمین باعث کاهش محسوس نیروهای لختی می‌شود. پارامتر دیگری که شاید اهمیت آن از مورد قبلی بیشتر باشد، مربوط به استفاده از خاصیت میرایی و ویسکوالاستیک خاک است که با شدت هرچه تمام تر دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی و زیرسطحی را به حداقل می‌رساند.

فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہ اداوات

۱-۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اتوداین، تونل زیر زمینی تحت بارگذاری انفجار با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مدل سازی شده است. بر اساس تحلیل های انجام شده می توان نتایج زیر را ارائه نمود:

۱- کاهش اثر بارگذاری بر روی تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل در خاک. در این خصوص می توان به این نتیجه دست یافت که با افزایش عمق تونل و رسیدن به یک عمق خاص در انفجار میزان جرم ثابتی از TNT، هیچ اثر تخریبی ناشی از انفجار روی سازه مدفون رخ نمی دهد و این عمق خاص در طراحی سازه مدفون بسیار حائز اهمیت می باشد.

۲- افزایش اثر بارگذاری بر روی تونل با افزایش جرم ماده منفجره. مشاهده شد که هرچقدر جرم ماده منفجره افزایش می یابد اثر بارگذاری نیز روی تونل افزایش می یابد و با در نظر گرفتن عمق به عنوان یک پارامتر ثابت میزان اثر تخریب هر جرم از TNT روی قسنت های مختلف تونل متفاوت می باشد.

۳- اثر انفجار هر میزان مشخص از TNT تا عمق خاصی بر روی تونل تاثیر گذاشته و چنانچه تونل در عمقی بیشتر از این عمق خاص قرار گیرد هیچ اثر تخریبی روی آن رخ نمی دهد و این نکته در طراحی سازه های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می باشد.

۶-۲- پیشنهادات برای ادامه مطالعه

با توجه به تازه بودن موضوع بررسی اثر انفجار روی سازه های مدفون با روش SPH، می توان در این زمینه بررسی های بیشتری انجام داد که در ادامه به برخی از آن ها اشاره میگردد:

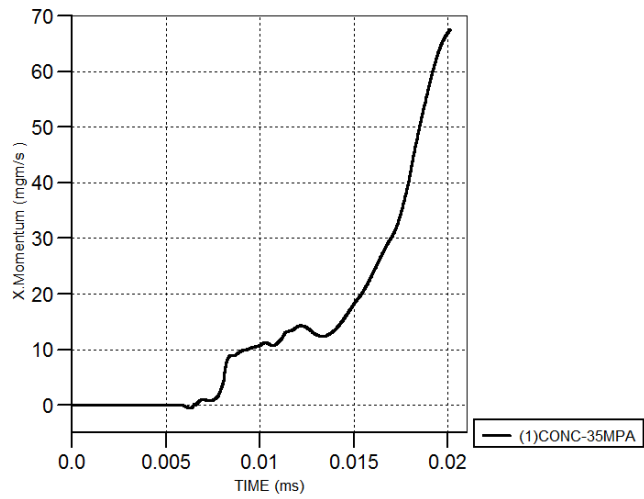
- ۱- مدلسازی آزمایشگاهی نمونه های این تحقیق انجام و نتایج حاصله بررسی و مقایسه گردد.
- ۲- مدلسازی با نرم افزار های دیگر انجام شود.
- ۳- جنس خاک و لایه بندی تونل تغییر پیدا کرده و نتایج آن تحت بارگذاری انفجار بررسی گردد.
- ۴- عمق و اندازه تونل تغییر پیدا کرده و نتایج آن بررسی گردد.

منابع

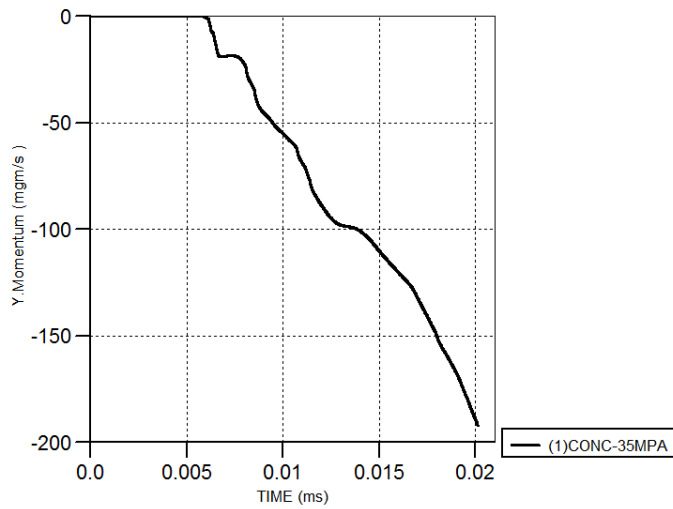
- [1]. Zamani, j. Introduction to explosion mechanic. Khaje nasir tusi publishers, Tehran, 1391, 46-89.
- [2]. Lopez Jimeno. C, Drilling and Blasting Of Rocks. aa balkema, rotterdam Brookfield, 1995, 11.
- [3]. Saedi darian, A. Impact and explosion engineering with Autodyn comprehensive guide. Darian publishers, Tehran, 1391, 1-29.
- [4]. Khayat Zadeh, H. Simulation of under water explosion. Master thesis, 1391, 124-165.
- [5]. Sivalingam, K. Chaminda, G. Blast response of segmented bored tunnel using coupled SPH-FE method. Structures, Elsevier, 2015. 183-191.
- [6]. Karimi Farzaghi, B. Naderi, R. Comparison of the SPH type numerical method and the Euler and Lagrangian views in modeling the explosion in water. New defense science and technology, 2016. 161-169.
- [7]. Mofidi, J. Azaram sa, A. Siah Saraei, A. Simulation of sun-surface landslide waves by using numerically hydrodynamic method of irregularly planer particles (i-sph). University of sea science imam komeini. 2011.
- [8]. Bagheri, S. Tavangar, S. A review of numerical methods of explosion wave simulation. Research and development of high energy materials. 1395.
- [9]. Houfo, F. A peridynamics-SPH modeling and simulation of blast fragmentation of soil under buried explosive loads. Computer methods in applied mechanics and engineering, Elsevier, 2017. 349-381.
- [10]. Ostad hossein, H. Mohammadi, S. Improvement of the SPH –free method in solving dynamic systems. 1393.
- [11]. Liu G.R, Liu M.B(2003), "Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method" ; World Scientific Publishing, PP.473.
- [12]. Liu G.R, Gu Y.T(2005) , "AN INTRODUCTION TO MESHFREE METHODS AND THEIR PROGRAMMING ", Springer, Netherlands, PP.496.
- [13]. Zhongqi Wang, Yong Lu, Hong Hao . Karen chong (2005), "A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface ", Comput struct., 83, PP 339-356

- [14]. Monaghan JJ(1992), "SMOOTHED particle hydrodynamics:Annual Review of Astronomical and Astrophysics " , 30: PP 543-574
- [15]. Benz W . (1989) , "Smoothed particle hydrodynamics : a review" , NATO Workshop , les; Arcs, France.
- [16].Smith,P.D and Hetherington JG (1994). "Blast and Ballistic loading of structures ". Butterworth Heinemann, CRC Press,1,PP:336
- [17]. bulson , P.S(2003),"Explosive loading of engineering structures",an imprint of champan & hall.
- [18]. Kenndy WD(1946) ."Explosion and explosives in Aie" in effect of impact and explosion,summery tech.Rep DW2,NRDC,Washington,Vol 1,chap2.
- [19].Lampson CW (1946) "Effect of impact and explosipns", Explosions in Erth NRDC Washingtone , USA,Voll, chapter 3.
- [20]. Chadwic P , Cox A.D and Hopkins MG(1964). "Mechanics of deep underground explosion",phil.trans.Roy Soc, series A,No . 1096,VOL 256,April.
- [21].Christopherson DG(1946)."Structural Defense", UK Ministry of security ,Research and experiments Department, Rc 450.
- [22]. Lampson CW (1946) ,"Effect of impact and explosions explosion in earth", summery tech. Dept DW 2 ,NRDC Washington USA, VOL 1, Chapter3.
- [23]. Christian Kaurin,Magnos olaf Varsolt(2010),"blast loading on square steel plates", Master thesis,instituttt for Konstruksjonsteknikk.
- [24].Lio H(2009),Dynamic Analysis of subway structures under blast loading",Depatment of Civil engineering,the city collage og new York,NY 10031,USA
- [25].JI Chong An (2010).PHD thesis, "soil behavior under blast loading", univercity of Nebraska.

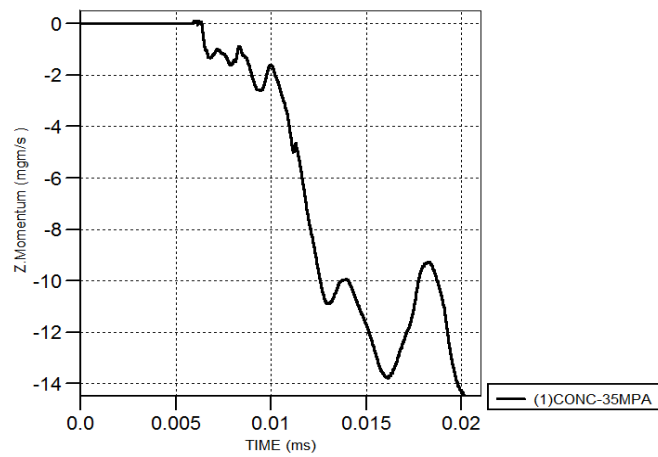
پوست



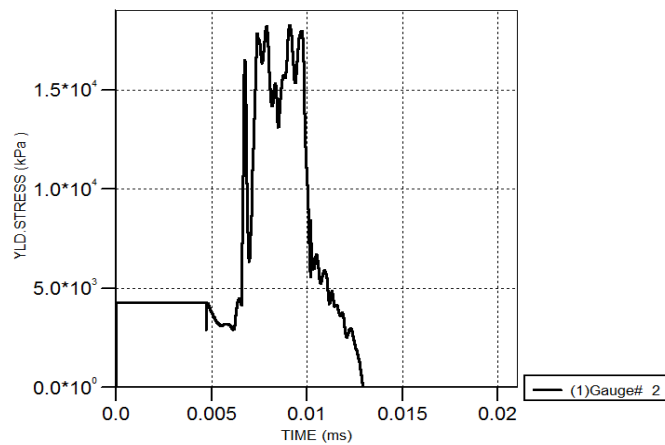
پ ۱: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



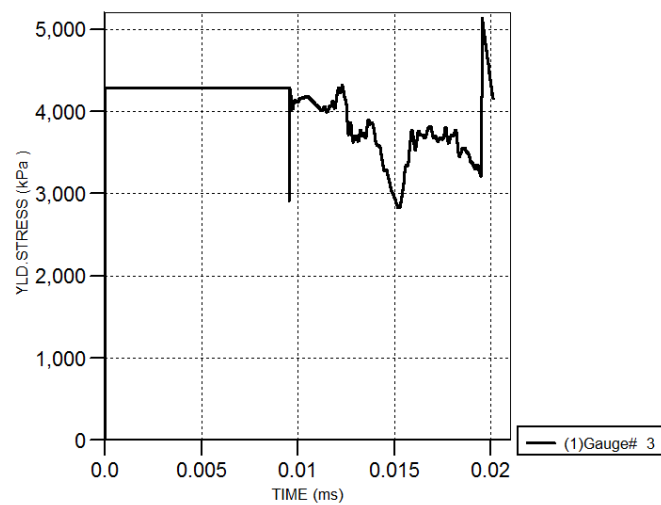
پ ۲: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



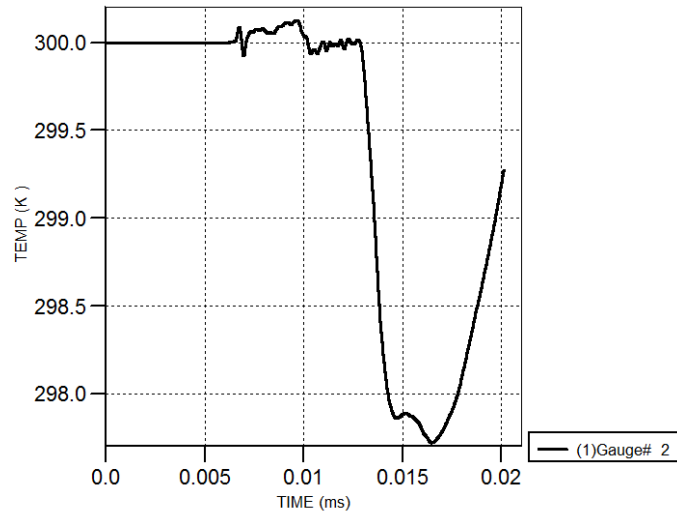
پ ۳: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



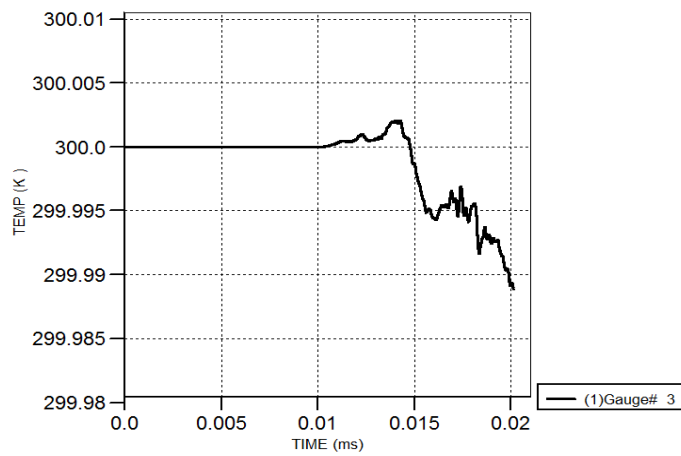
پ ۴: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



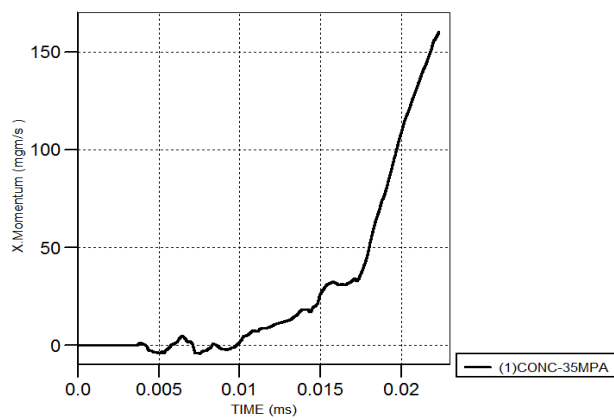
پ ۵: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



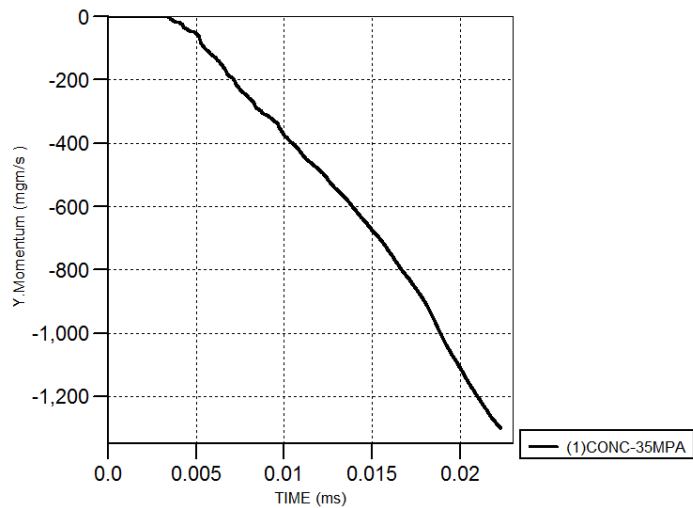
پ ۶: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



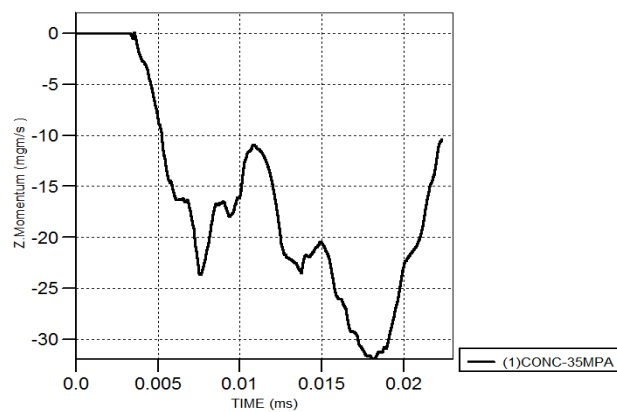
پ ۷: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



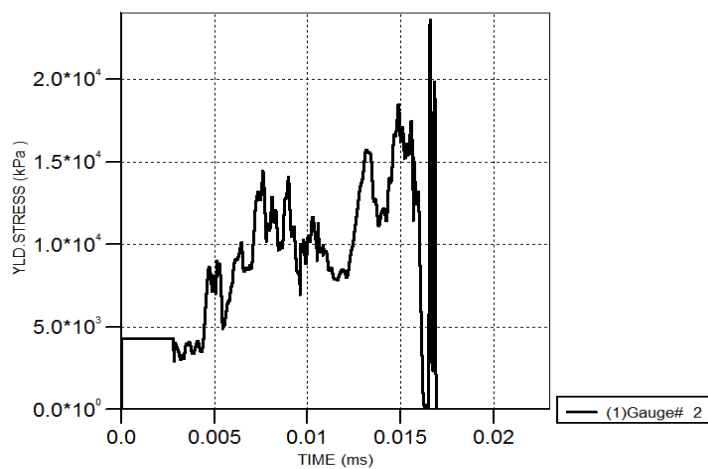
پ ۸: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



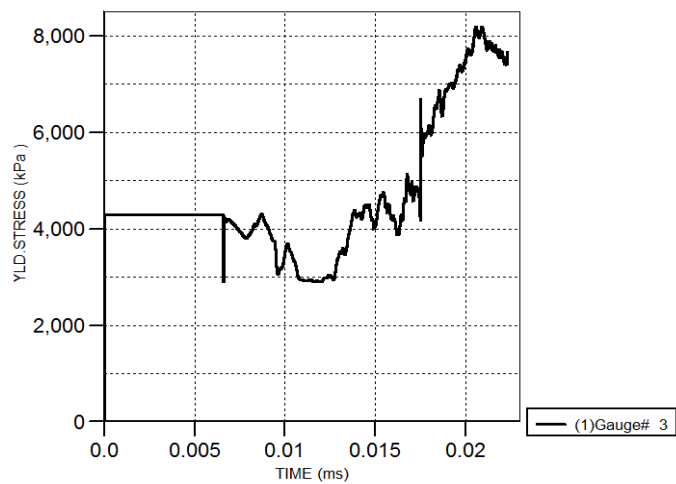
پ ۹: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



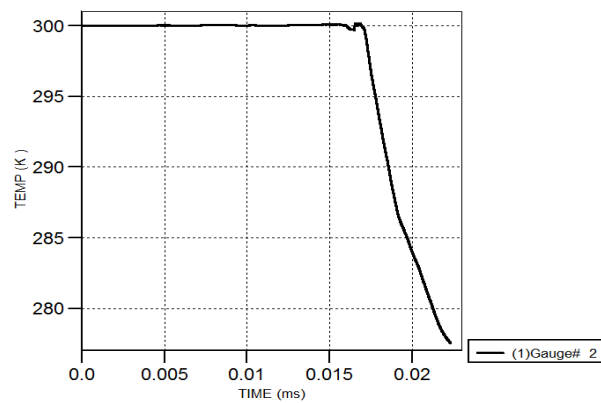
پ ۱۰: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



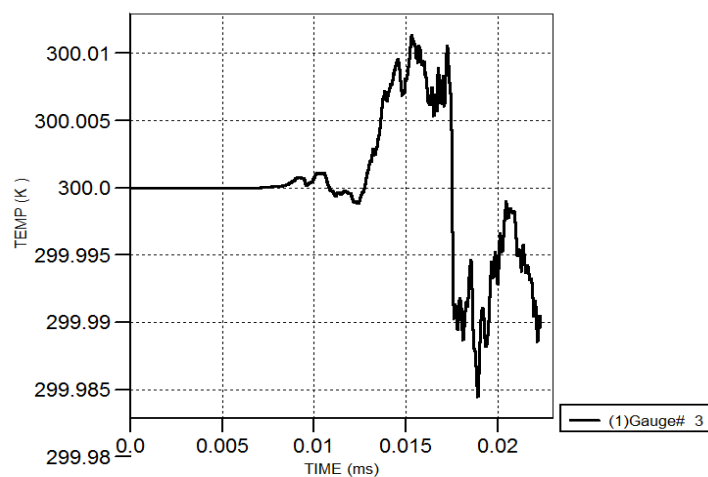
پ ۱۱: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



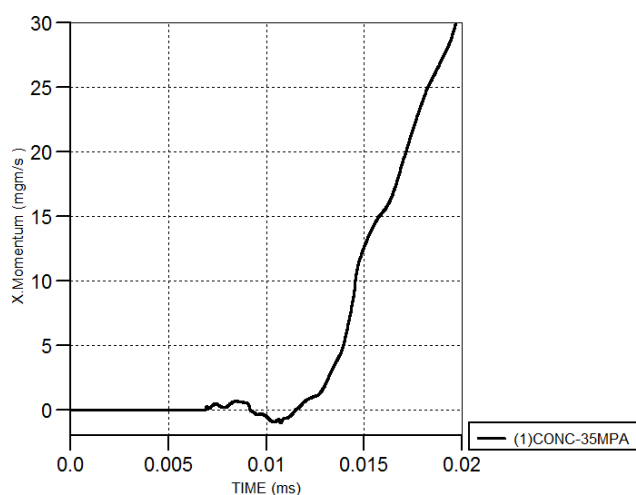
پ ۱۲: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



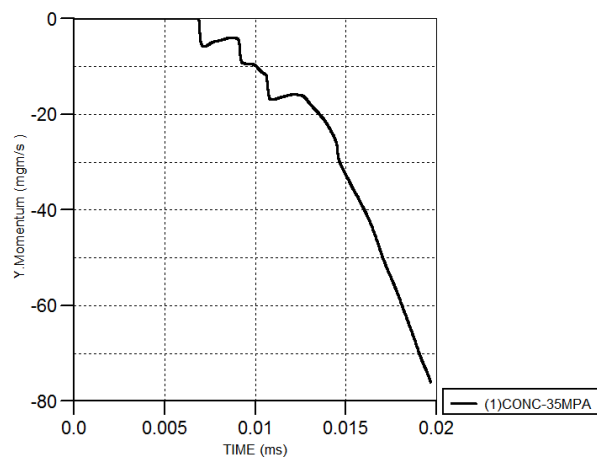
پ ۱۳: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



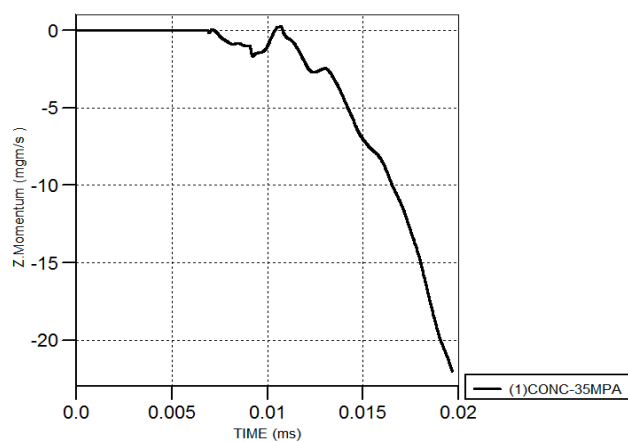
پ ۱۴: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



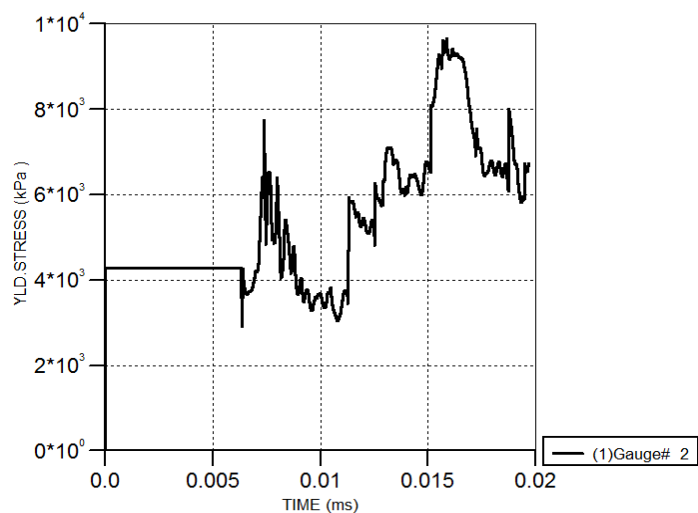
پ ۱۵: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



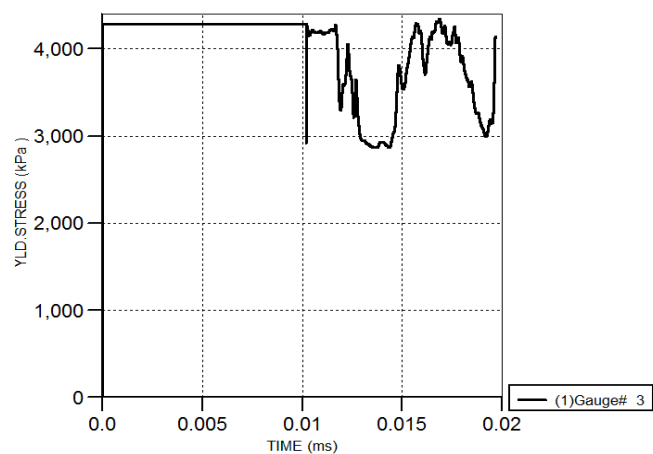
پ ۱۶: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



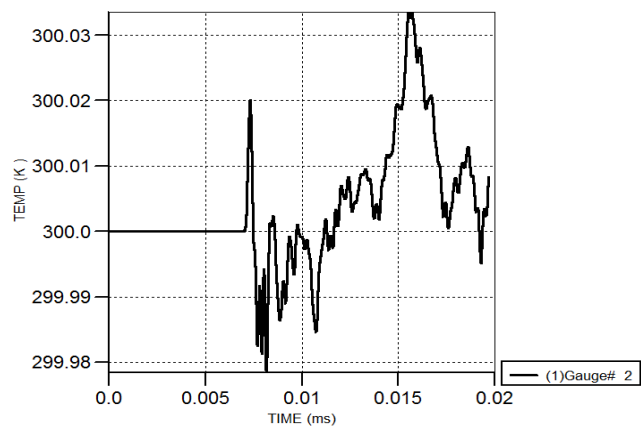
پ ۱۷: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



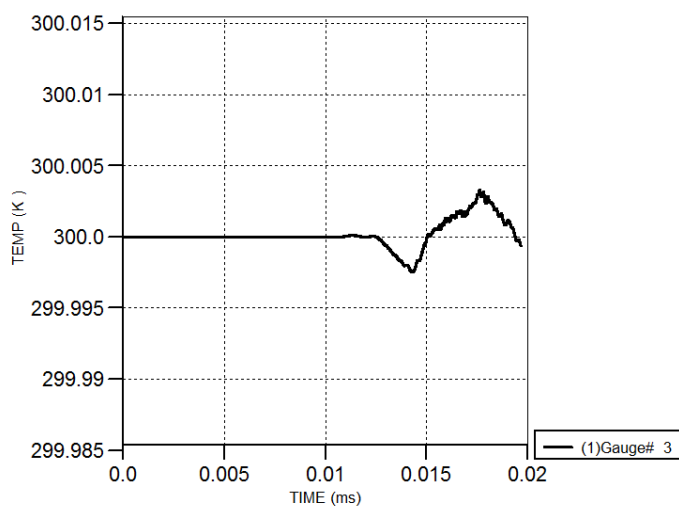
پ ۱۸: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



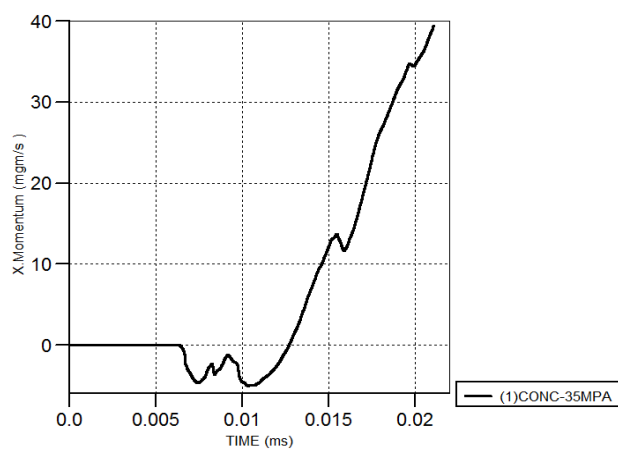
پ ۱۹: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



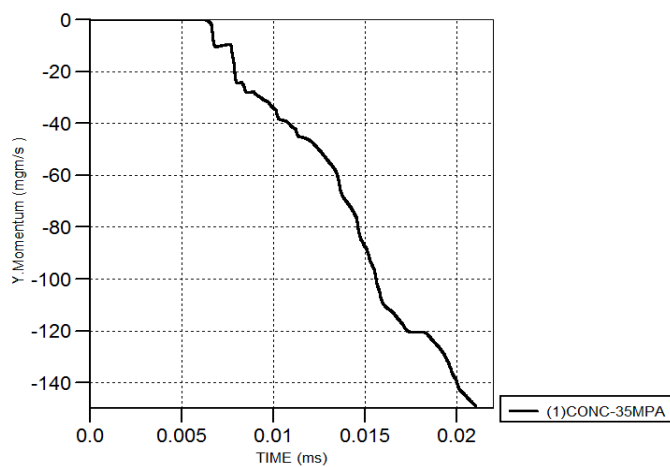
پ ۲۰: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



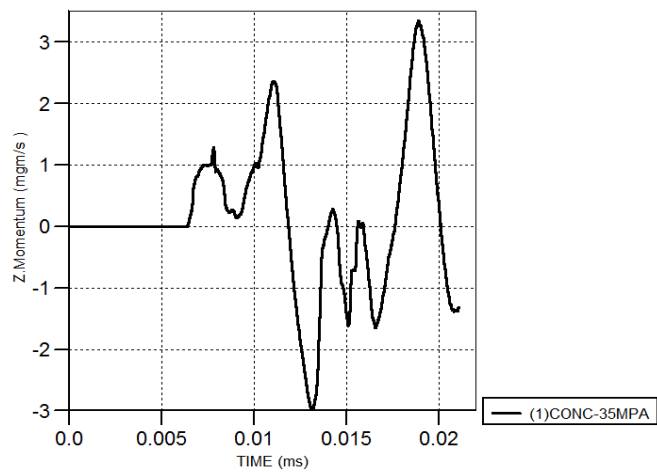
پ ۲۱: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



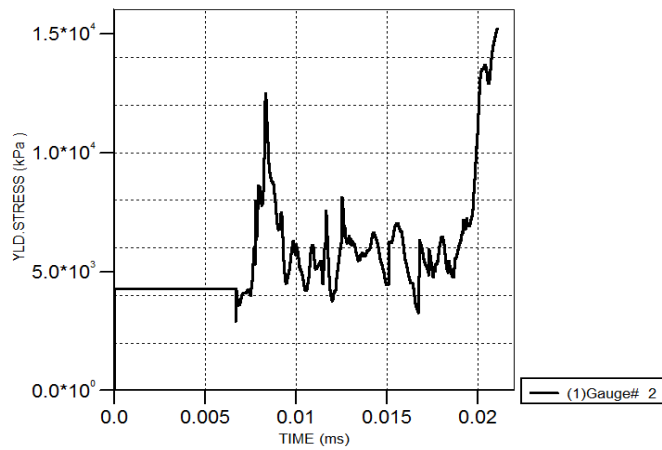
پ ۲۲: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



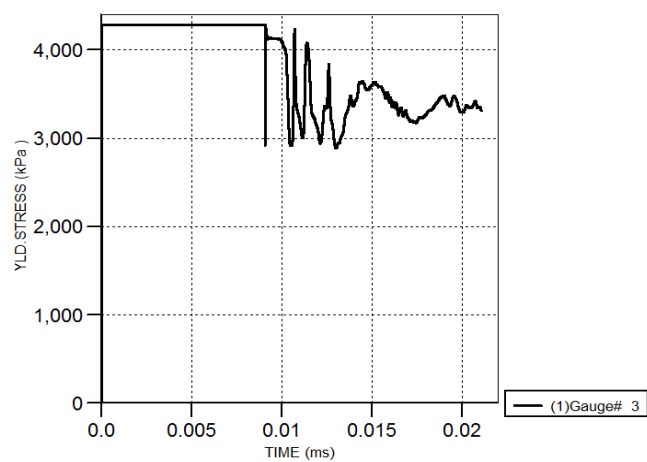
پ ۲۳: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



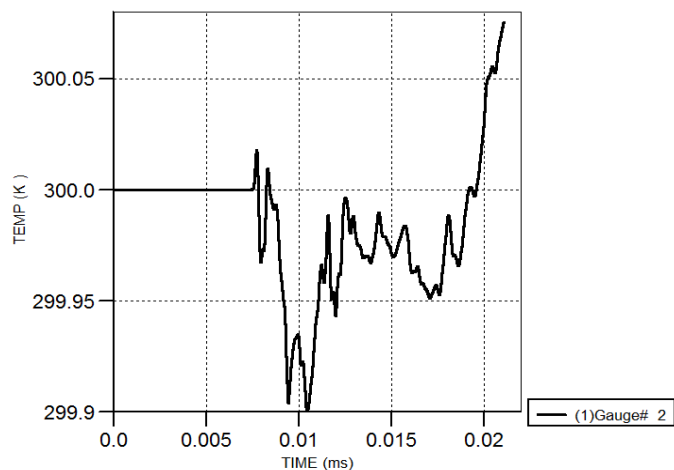
پ ۲۴: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



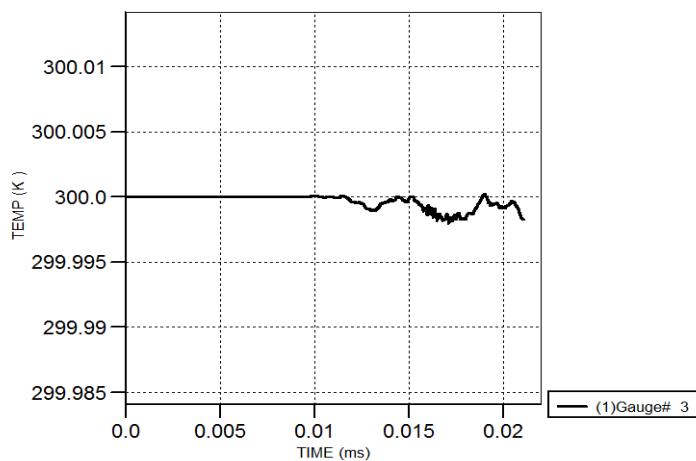
پ ۲۵: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



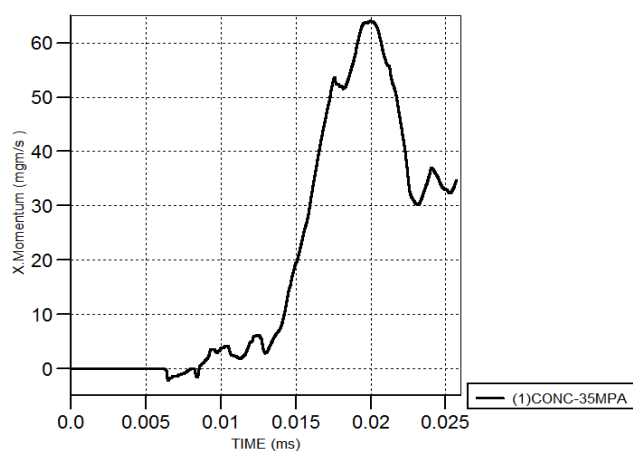
پ ۲۶: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



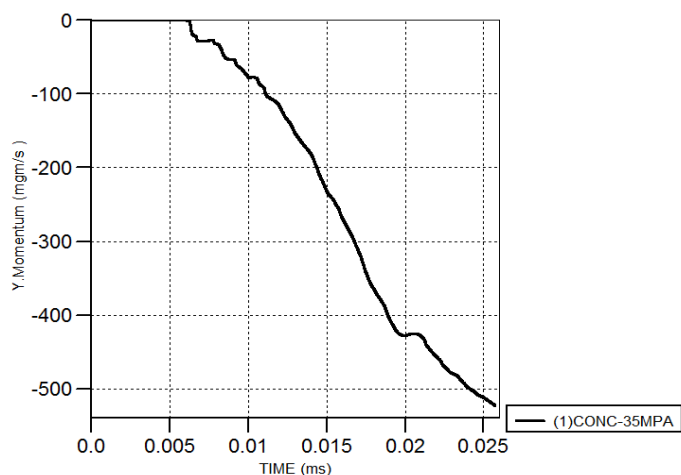
پ ۲۷: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



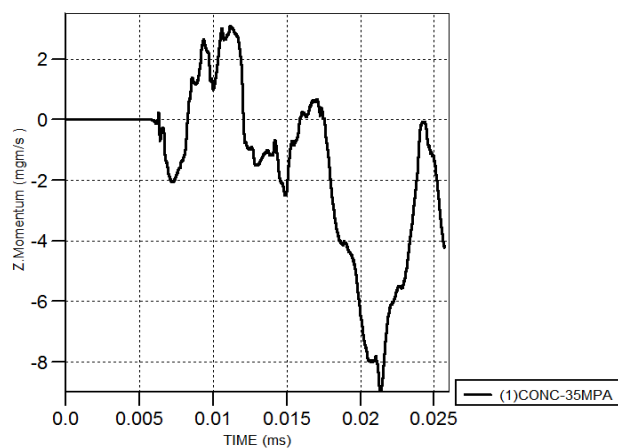
پ ۲۸: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



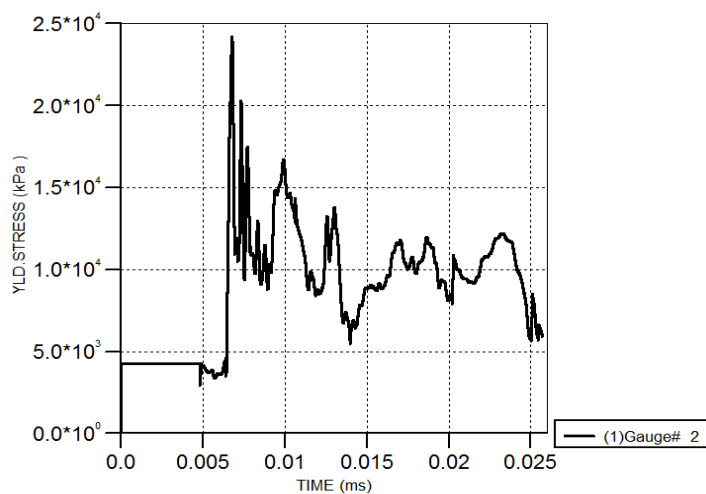
پ ۲۹: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



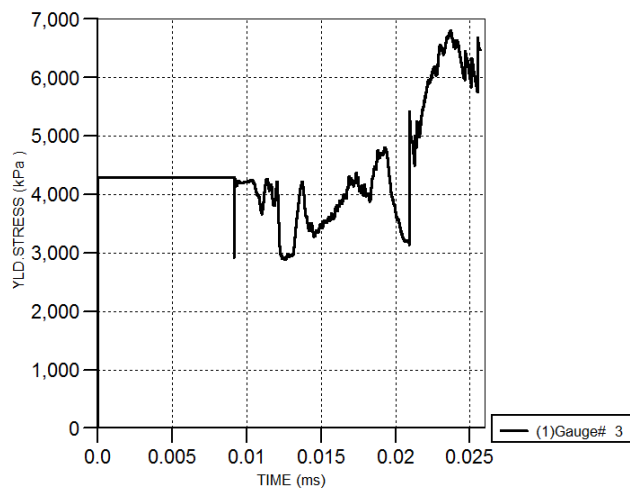
پ ۳۰: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



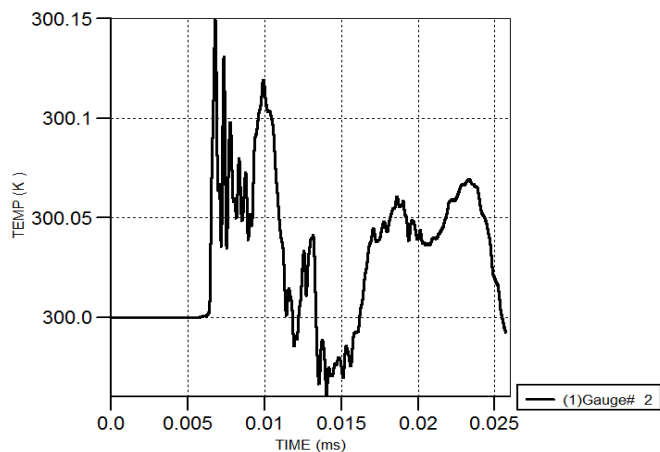
پ ۳۱: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



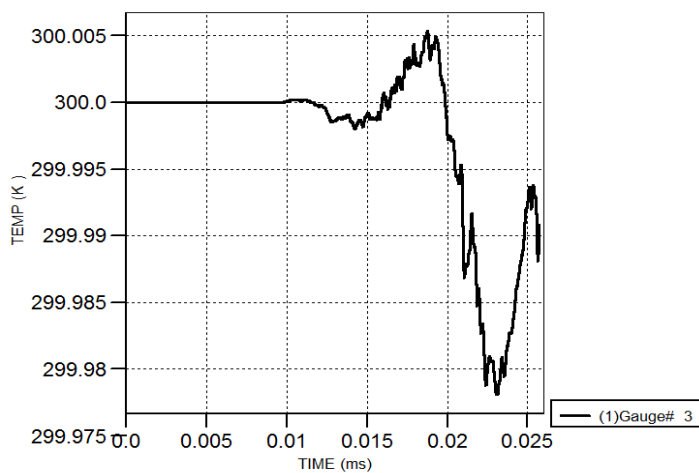
پ ۳۲: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



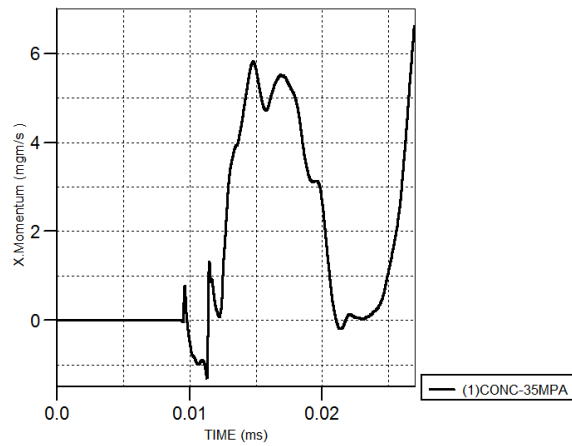
پ ۳۳: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



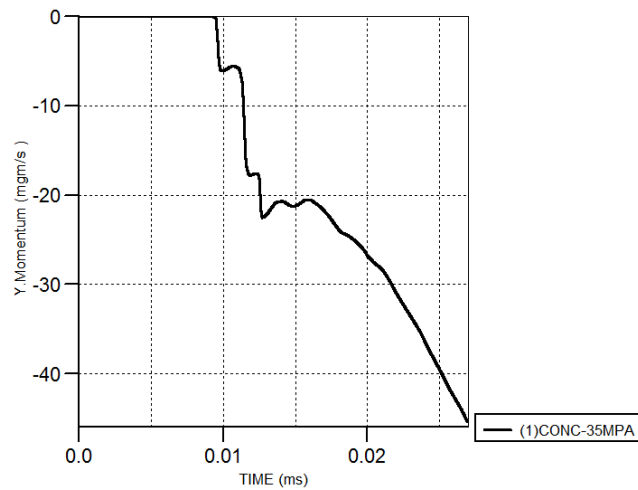
پ ۳۴: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



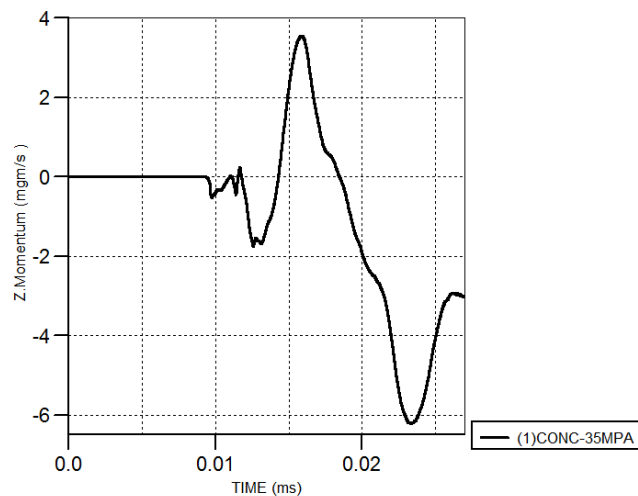
پ ۳۵: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۱۵ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



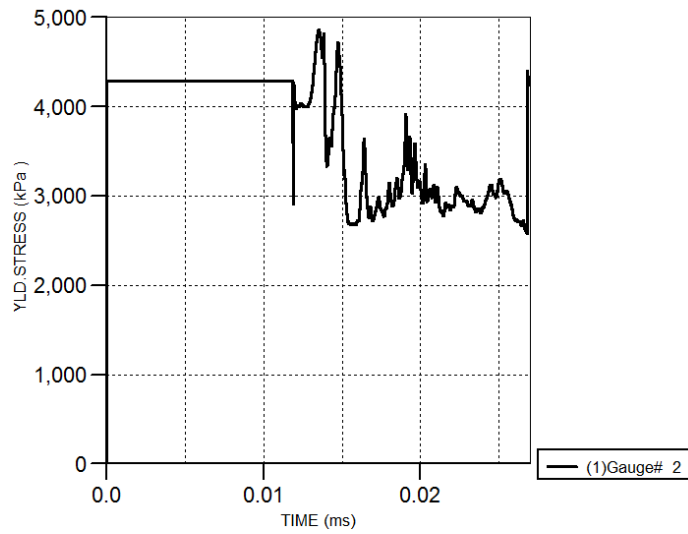
پ ۳۶: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



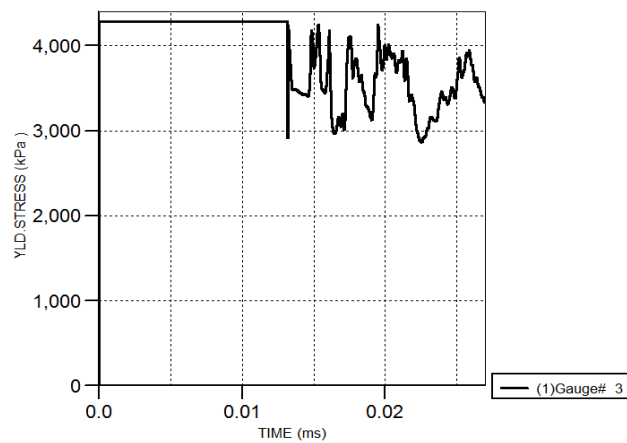
پ ۳۷: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



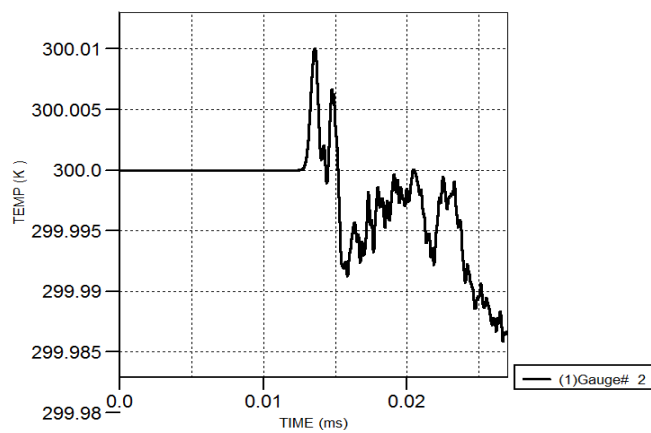
پ ۳۸: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



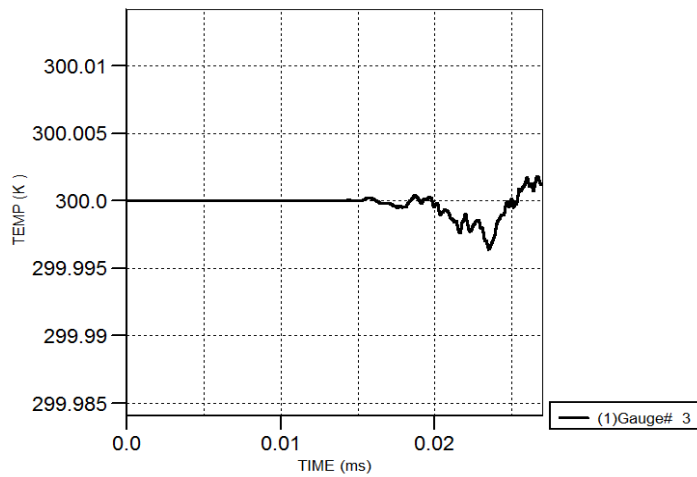
پ ۳۹: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



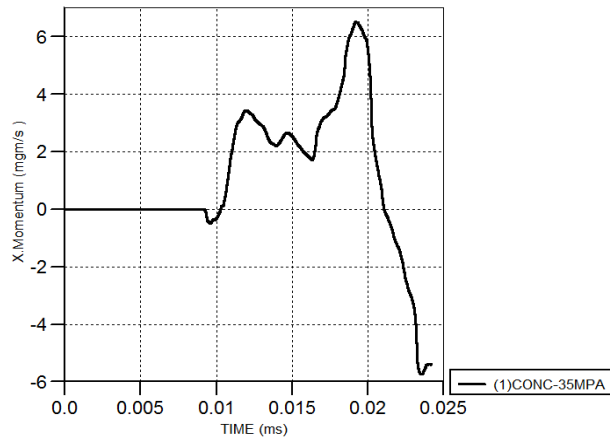
پ ۴۰: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



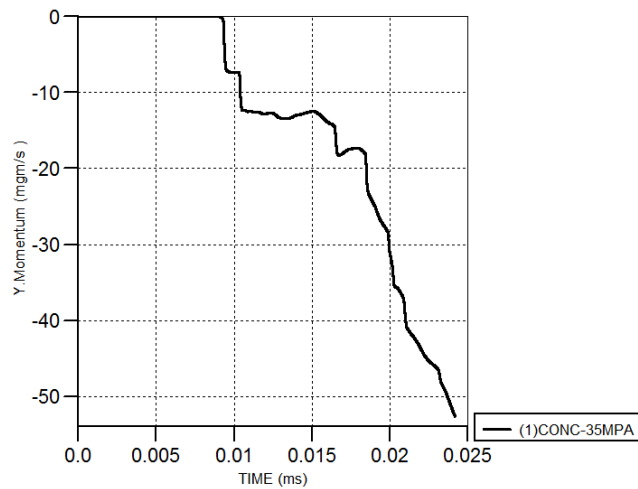
پ ۴۱: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



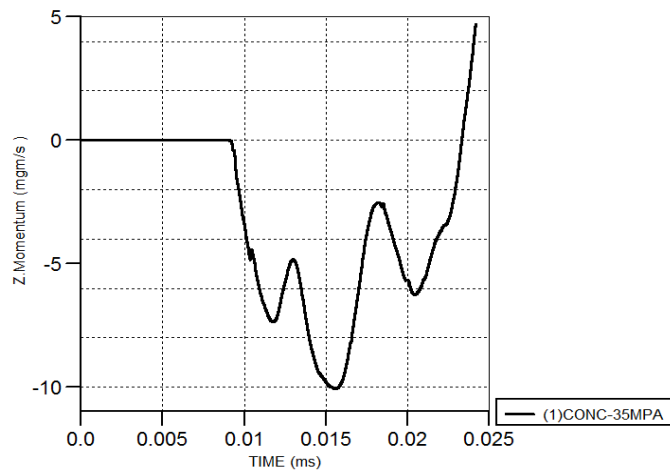
پ ۴۲: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰ کیلوگرم)



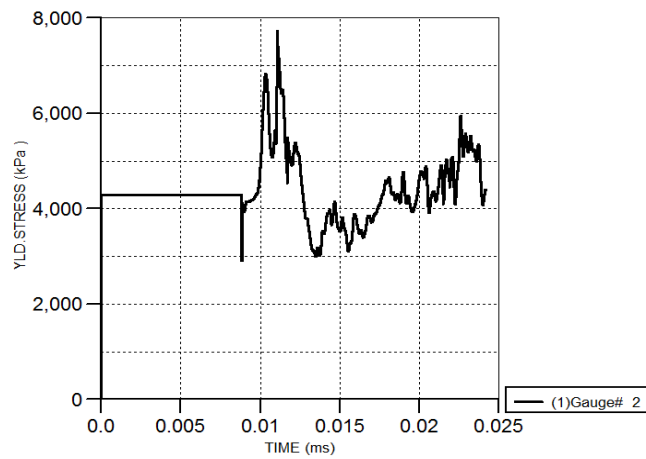
پ ۴۳: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



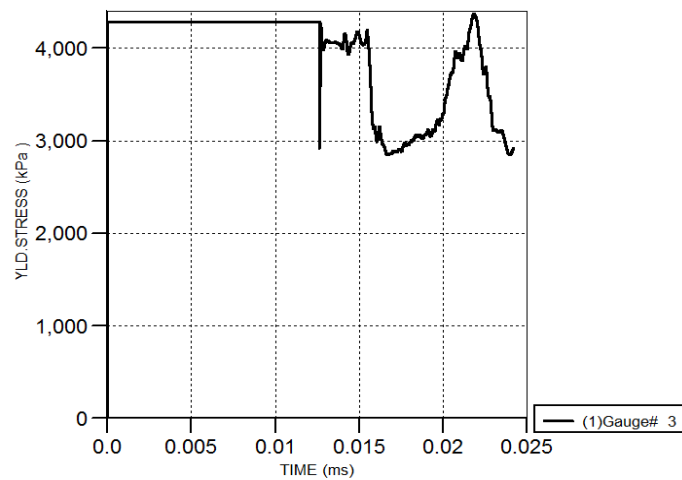
پ ۴۴: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



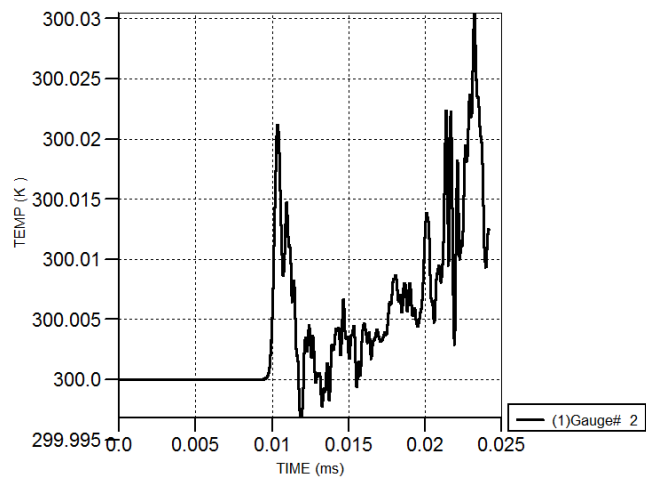
پ ۴۵: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



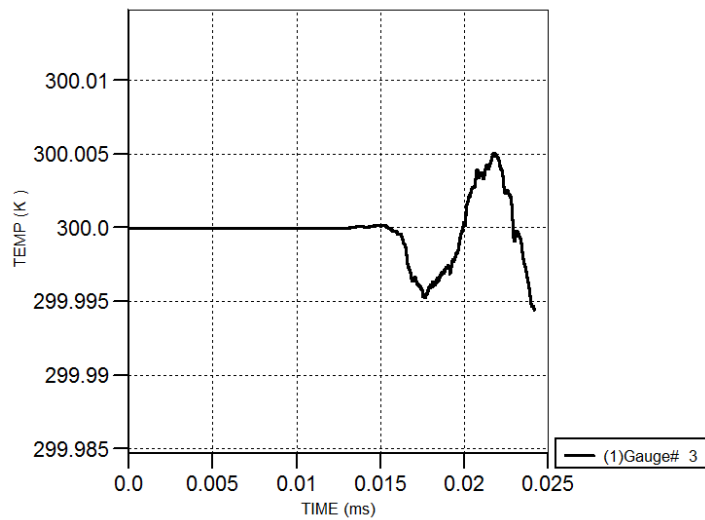
پ ۴۶: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



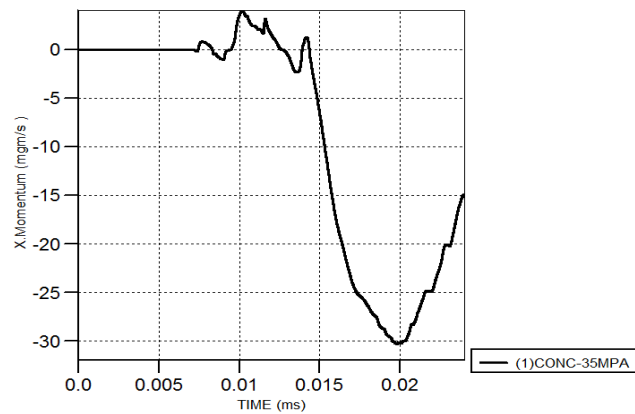
پ ۴۷: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



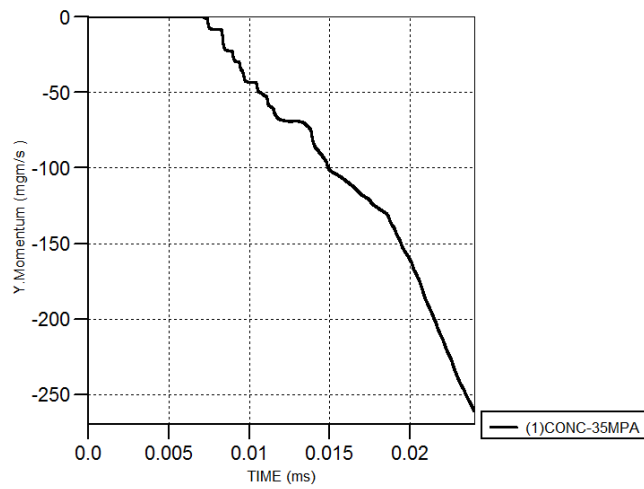
پ ۴۸: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



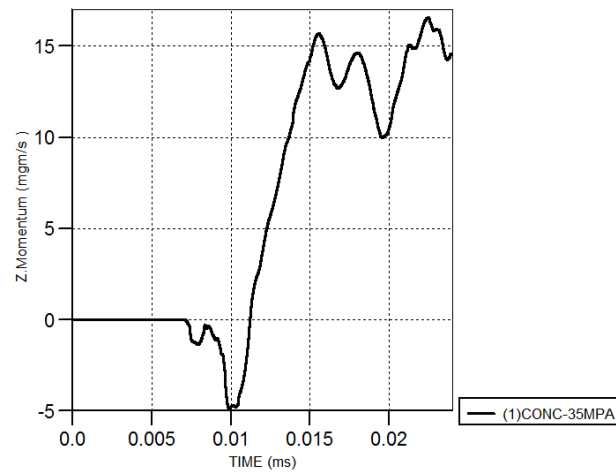
پ ۴۹: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۱۰۰۰ کیلوگرم)



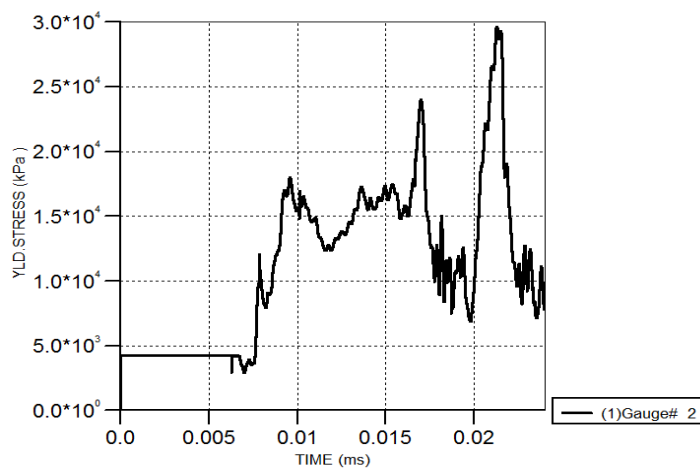
پ ۵۰: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار X در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



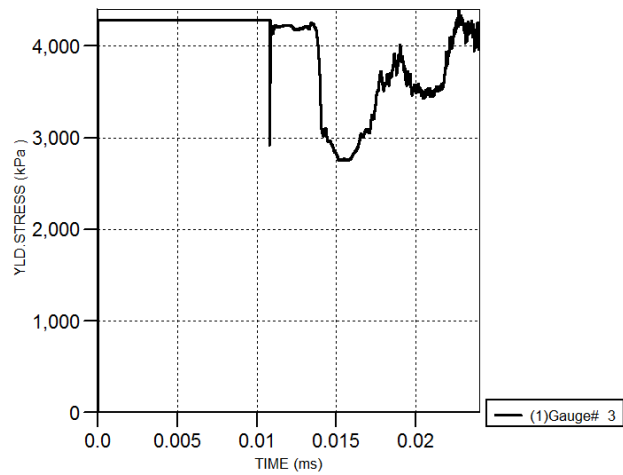
پ ۵۱: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Y در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



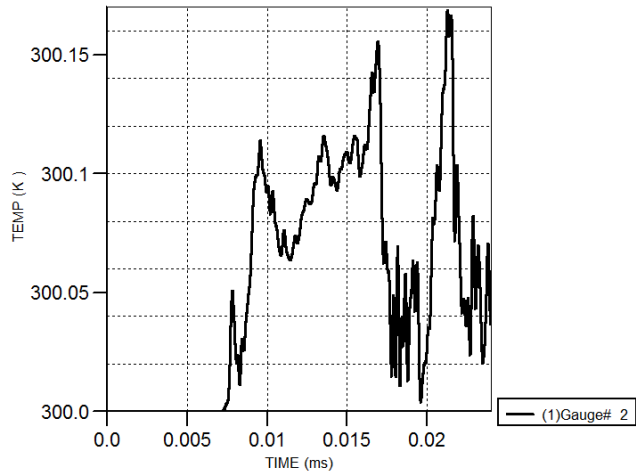
پ ۵۲: نمودار تغییرات مومنتوم - زمان در راستای بردار Z در تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



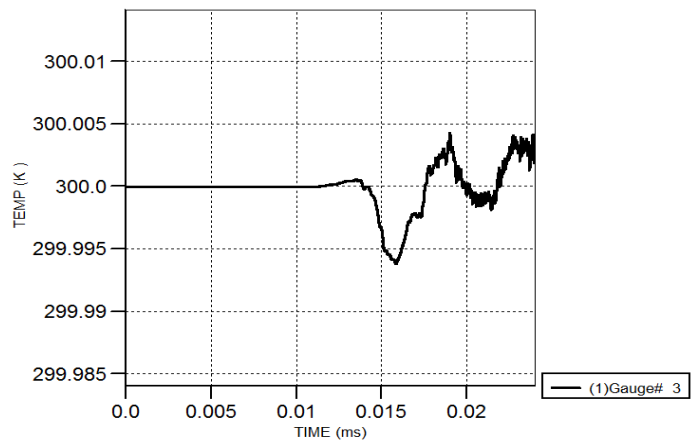
پ ۵۳: نمودار تنش تسلیم - زمان در سقف تونل (حالت ۲۱۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



پ ۵۴: نمودار تنش تسلیم - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



پ ۵۵: نمودار دما - زمان در سقف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)



پ ۵۶: نمودار دما - زمان در کف تونل (حالت ۲۰ متر - ۵۰۰۰ کیلوگرم)

پ-۵۷- مبانی روش‌های عددی مورد استفاده در هایدروکدها

روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل نرخ بالا

باتوجه به این که اغلب مسائل مکانیکی نرخ بالا، با تغییر شکل‌های بسیار بزرگ همراه هستند، یکی از عوامل بسیار مهم در آماده‌سازی مسائل برای تحلیل، دقت به این عامل است. به‌منظور تحلیل مسائل مهندسی، تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. در این ردیف روش‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود^۱، تفاضل محدود^۲، المان مرزی^۳، روش‌های بدون شبکه‌بندی^۴ و ... قرار دارند. هرکدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. ذکر این نکته در این جا خالی از لطف نیست که استفاده از هایدروکدها به اذعان بسیاری از مراجع معتبر، نیازمند دانش وسیعی از مباحث عددی است و صحت پاسخ گرفته شده از این دسته نرم‌افزارها به شدت به کاربر وابسته است. به‌طوری که در یک مسئله یکسان، میان نتایج حاصل از تحلیل‌های دو کاربر با تجربه برابر، احتمال وقوع اختلاف بسیار بالا است. طبق‌گفته همین مراجع برای به‌دست‌آوردن مهارت کافی در استفاده از هایدروکدها به زمانی مابین ۶ تا ۴۸ ماه نیاز است! این زمان منوط به همکاری و استفاده از دانش کاربران ماهرتر می‌باشد.

الف) دیدگاه لاگرانژی

این روش تحلیل مسائل، بر اساس دیدگاه لاگرانژی بنا نهاده شده است. این دیدگاه بر اساس تعقیب مسیر حرکت ذرات ماده می‌باشد. پس انتظار این‌که این روش قدرت بالایی در پیش‌بینی محل مرزهای ماده و همچنین سرعت و جابه‌جای مواد داشته باشد، دور از منطقی نیست. در حقیقت این روش ایده‌آل‌ترین روش برای به‌دست آوردن تاریخچه حرکت ماده در طول تحلیل است. برای استفاده از این روش محیط حل (ماده) به‌صورت یک سری المان تقسیم‌بندی می‌شود. نقاط گره‌ای این المان‌ها به ماده متصل هستند و با تغییر شکل ماده تغییر مکان می‌دهند. به همین دلیل شکل هندسی

1 - Finite Element Method

2 - Finite Difference Method (FDM)

3 - Boundary Element Method (BEM)

4 - Meshless Methods

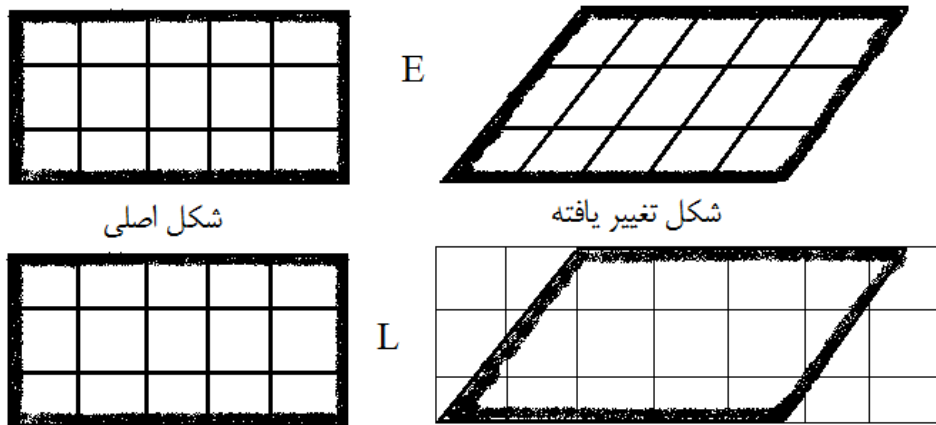
المان‌ها در هنگام تحلیل دست‌خوش تغییر خواهد شد. روش لاگرانژی به‌دو صورت به‌روز رسان و ثابت فرمولیته می‌شود. در هر کدام از این روش‌ها، دستگاه مختصات یا به‌روز می‌شود و یا در یک سیستم جهانی، ثابت خواهد بود. در مسائل دینامیکی که اغلب با تغییر فرم‌های بزرگ همراه است، در صورت استفاده از این روش باید دقت نمود؛ زیرا با تغییر شکل بیش از حد المان‌ها، اضلاع المان‌ها هم‌دیگر را قطع می‌نمایند و باعث منفی شدن ژاکوبین ماتریس نگاشت المان خواهند شد. بر این محدودیت باید تغییر و افزایش نسبت منظری المان را نیز افزود. این عامل باعث بی‌کیفیت شدن المان و پاسخ‌های بدون دقت و دور از واقعیت خواهد شد. از این رو همیشه در مسائلی که در آن‌ها ماده دچار تغییر فرم‌های بسیار بزرگ می‌شود، باید به طریقی بر این مشکل فائق آمد. به‌عنوان مثال استفاده از المان‌های بیشتر، یکی از راه‌حل‌های موجود است. البته باید خاطر نشان کرد که استفاده از این روش در مدل‌سازی جامدات بسیار گسترده می‌باشد؛ زیرا این دسته از مواد ماهیت خود در بارگذاری‌ها، به نسبت دچار تغییر فرم کمتری خواهند شد.

ب) دیدگاه اوپلری

این دیدگاه در مقابل دیدگاه لاگرانژی است، از دیدگاه اوپلری برای شبیه‌سازی حرکت ماده استفاده می‌شود. در این روش ناظر ساکن بوده و ماده از کنار آن عبور می‌کند. به عبارتی در این روش، شبکه‌بندی ماده در فضای تحلیل ثابت بوده و این ماده است که در میام شبکه‌بندی اجازه عبور دارد. به‌همین دلیل این روش محدودیت روش لاگرانژی را نداشته و تغییر فرم‌های بسیار بزرگ به‌راحتی عمل می‌کند. این عامل باعث شده است که این روش در شبیه‌سازی حرکت سیالات به‌وفور مورد استفاده قرار گیرد. بیشتر فرمولاسیون دینامیک سیالات محاسباتی^۱ بر مبنای این روش نوشته شده است. در این روش معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی ارضا می‌شوند. درجات آزادی خروجی این روش، سرعت، فشار و دما هستند. جابه‌جایی‌هایی در این روش توسط انتگرال‌گیری از سرعت به‌دست می‌آیند. این روش به‌خاطر ماهیت ویژه خود در پش‌بینی مرزهای ماده دچار ضعف بزرگی است؛

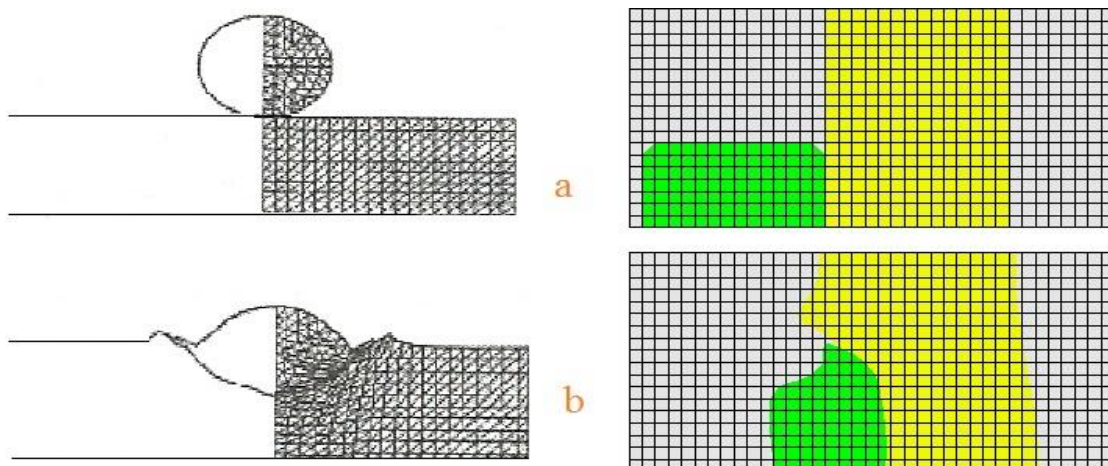
^۱ - Computational Fluid Dynamics (CFD)

به همین دلیل اغلب برای محاسبه نیروها و فشارهای عمل کننده بر روی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای گسترده این روش، شبیه‌سازی مسائل برهم‌کنش سیال و سازه^۱ است. شکل ۳-۱ نمایشگر تفاوت دیدگاه لاگرانژی با اویلری می‌باشد.



تفاوت دیدگاه لاگرانژی (بالا) با ویلری (پایین)

شکل بالا دو نمونه کاربرد شبکه‌بندی لاگرانژی و اویلری را در یک مسئله برخورد ساده نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روش اویلری دارای محدودیت بالایی در پیش‌بینی مرزهای ماده است.

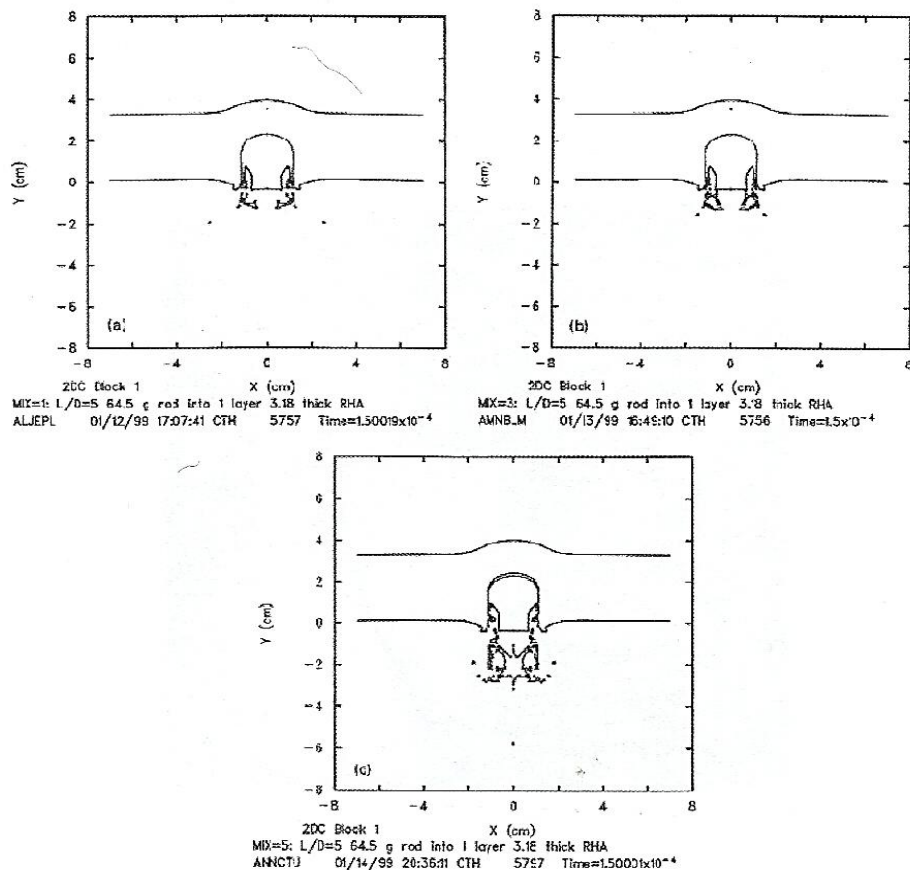


مقایسه نتایج تحلیل روش‌های لاگرانژی و اویلری در یک مسئله برخورد - راست روش اویلری - چپ روش

لاگرانژی

^۱ - Fluid Solid Intraction (FSI)

روش اویلری نیز به نوبه خود به دو دسته روش چند ماده و تک ماده تقسیم می‌شود. در روش اول امکان شبیه‌سازی چند ماده در یک شبکه‌بندی وجود داشته در حالی که نوع دوم امکان نسبت دادن تنها یک ماده را به شبکه‌بندی مهیا می‌سازد. روش دوم دارای دقت بالاتری است؛ چون برهم‌کنش مواد مختلف در آن وجود نخواهد داشت. به هر ترتیب در شبکه‌بندی اویلری امکان آن که در آن واحد د یک سلول خاص چند ماده وجود داشته باشد، بسیار بالاست. محاسبات سرعت و فشار و ... در این سلول تنها به کمک توابع شکل این سلول وجود دارد، در نتیجه برای محاسبات نیازمند یک ماده معادل در این سلول آمیخته هستید. تاکنون روش‌های متعددی بر اساس روش‌های میانگین وزنی در این زمینه ارائه شده‌اند ولی پاسخ مناسبی از هیچ‌کدام دریافت نشده است. شکل زیر نمایش‌گر تفاوت نتایج تحلیل در یک مسئله برخورد با استفاده از روش‌های مختلف سلول معادل است.

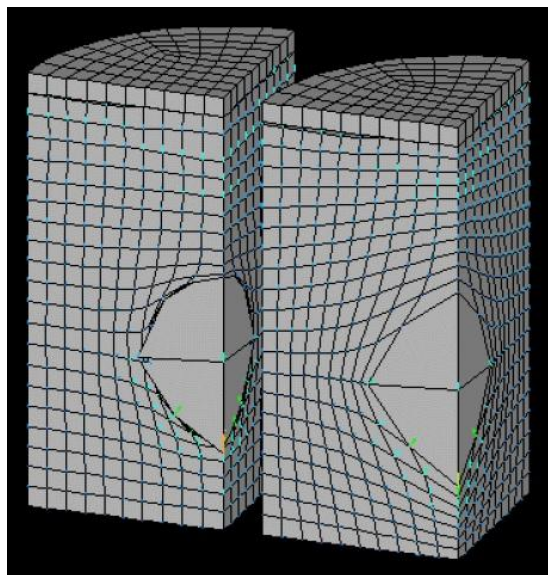


نتایج حاصل از تحلیل روش اویلری یک مسئله خاص با استفاده از تکنیک‌های مختلف سلول آمیخته

معادل [۵]

ج) روش ALE¹

در سطور گذشته پیرامون ویژگی‌های هر کدام از روش‌های لاگرانژی و اویلری توضیحاتی داده شد. برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های فوق، روشی مبتنی بر تلفیق این روش‌ها به نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط پیوسته منحصر به فرد است، هر وقت تغییر فرم المان‌های لاگرانژی از حدی بیشتر شد، با استفاده از روش اویلری ماده درون سلول‌ها جابه‌جا شده و مش‌بندی جدید لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب هم می‌توان از قابلیت منحصر به فرد روش اویلری در تغییر فرم‌های بسیار بزرگ بهره برد و هم مرزهای مواد را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. روش ALE به‌وفور در مدل‌سازی محیط‌های واسط در مسائل FSI مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال در مدل‌سازی آب در اطراف ماده منفجره در یک مسئله انفجار زیر آب^۲. شکل زیر مراحل تغییر و تحول مربوط به انفجار در یک مخزن آب را نشان می‌دهد.

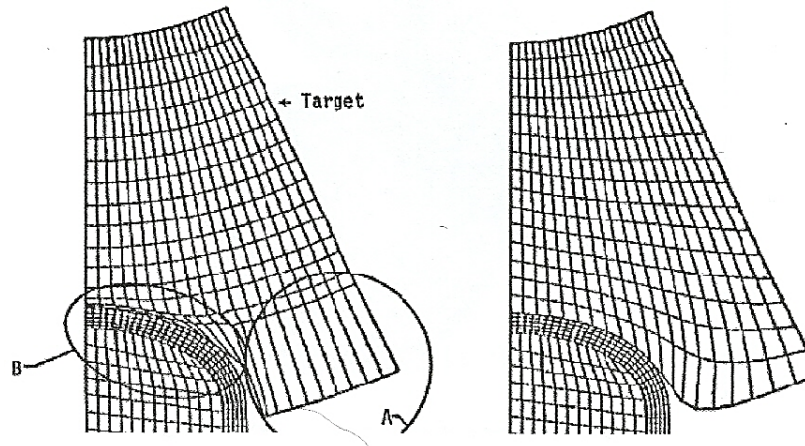


مراحل شکل‌گیری مش‌بندی در یک مسئله انفجار زیر آب به کمک روش ALE

¹ - Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method

² - Under Water Explosion (UNDEX)

روش ALE در مسائل برخورد نیز کاربرد داشته و در آن امکان بررسی دقیق تغییر شکل نهایی دو قطعه درگیر بر برخورد وجود دارد. شکل زیر نیز نمایشی از کاربرد این روش در مسائل برخورد است.

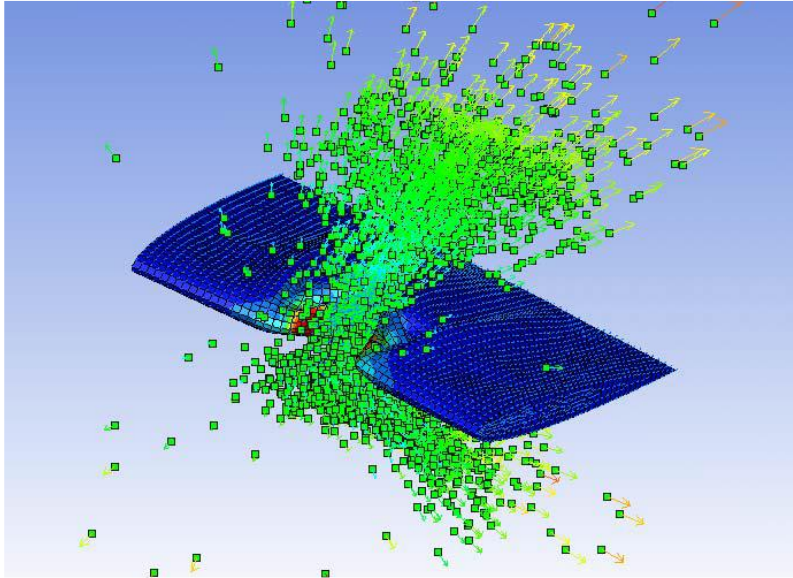


شکل ۳-۵: تأثیر روش ALE در مسئله برخورد

(د) روش SPH^۱

این دیدگاه بر مبنای روش بدون مش ارائه شده است. به این ترتیب که محیط پیوسته به یک سری ذرات که به صورت منظم پخش شده‌اند، تقسیم‌بندی می‌شوند. توزیع درجات آزادی مجهول نیز بر اساس توابع خاص آماری است. این روش در کاربردهایی که در اثر بارگذاری شدید و با نرخ بالا، به صورت ذرات متلاشی می‌شوند، بسیار مناسب است. این روش را می‌توان جزء قابلیت‌های پیشرفته شبیه‌سازی دسته‌بندی کرد که بر اساس روش‌های عددی نوین فرمولیته شده است. از جمله مواردی که می‌توان با استفاده از این روش به نتایج قابل توجهی رسید، بحث شبیه‌سازی ذرات خاک است. البته در برخوردهای سرعت بالا نیز، فلزات به صورت ذرات بسیار ریز در محیط پخش خواهند شد. شکل زیر یک نمونه از برخورد با سرعت بالا که توسط نرم‌افزار اتوداین شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد.

^۱ - Soft Particile Hydrodynamics

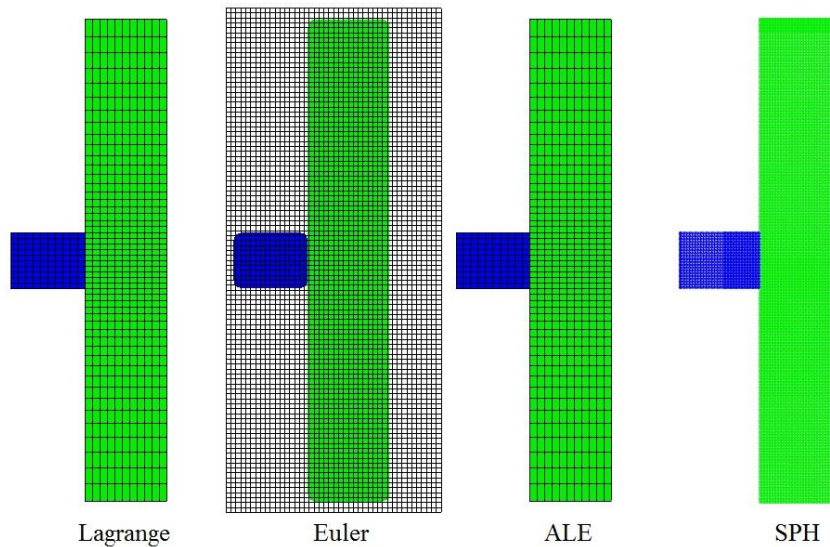


شبیه‌سازی یک برخورد بسیار پر سرعت به کمک روش SPH

ه) روش‌های المان مرزی

این روش به دلیل پیچیدگی‌های ریاضی که دارد، به راحتی به الگوریتم‌های قابل تعمیم تبدیل نمی‌شود، از این رو نرم‌افزارهایی که از این روش پشتیبانی می‌کنند، اندک هستند. در این روش، مرزهای مسئله مش بندی می‌شوند و مسئله به صورتی حل می‌شود که خطا بر روی مرزهای مسئله صفر گردد. نتایج این تحلیل بسیار دقیق بوده و در مسائل بسیار حساس کاربرد دارد. از آن جمله در طراحی اجزای شتاب دهنده ذرات که دستگاه‌های بسیار حساس و دقیقی هستند، از این روش استفاده می‌شود. از جمله روش‌های ریاضی که در روش BEM مورد استفاده قرار می‌گیرد، معادلات انتگرالی است. از دیگر کاربردهای این روش بحث مکانیک شکست^۱ می‌باشد. [۵]

^۱ - Fracture Mechanics



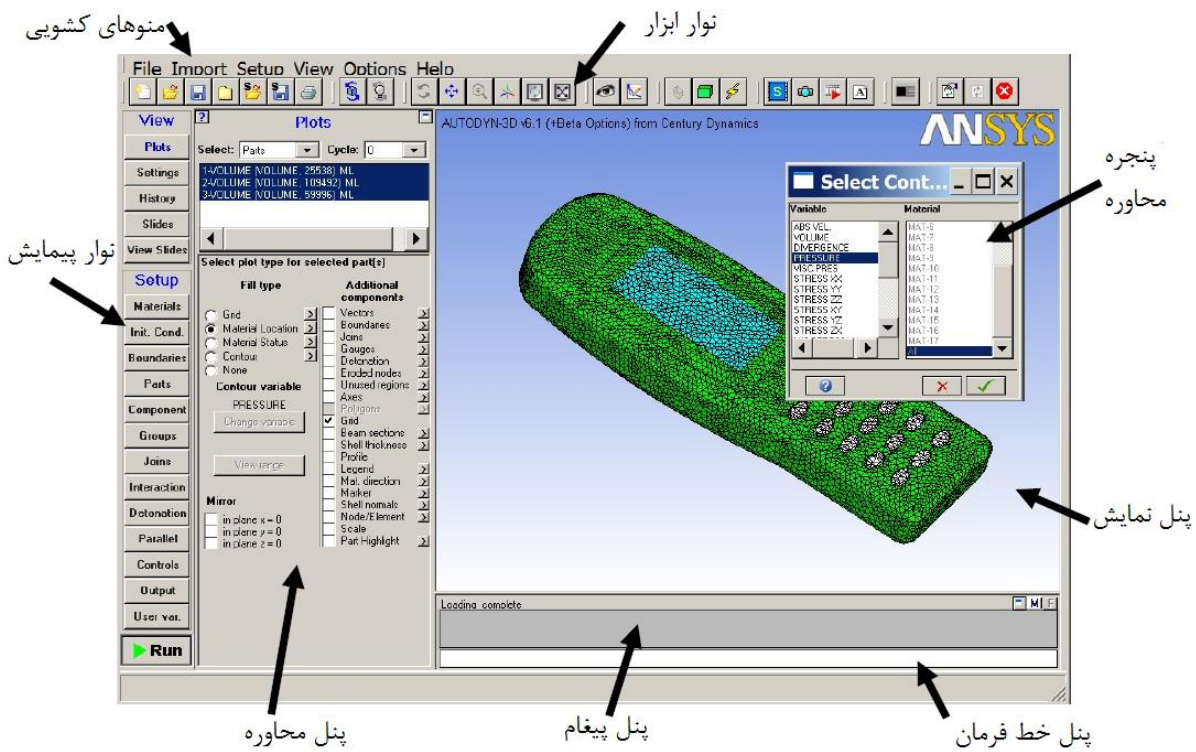
مقایسه حلگرها با یکدیگر

محیط گرافیکی نرم افزار

همان طور که گفته شد شرکت Dynamic Century نرم افزار اتوداین را ابتدا به صورت نسخه مستقل ارائه می کرد. بعدها با افزایش قابلیت های نرم افزار انسیس ورک بنچ نرم افزار اتوداین تحت این برنامه ارائه شده و عمل می کند (از نسخه ۱۰ به بعد). این امر باعث افزایش قابلیت های مدل سازی نرم افزار اتوداین گردیده است. البته محیط های واسط گرافیکی هر دو حالت تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و فقط در نسخه جدیدتر نمایه ها به سمت چپ انتقال یافته اند. هم چنین نسخه جدیدتر نرم افزار دارای کتابخانه غنی از ویژگی های مواد مختلف که در مسائل نرخ بالای دینامیکی به چشم می خوردند، هستند. شکل زیر نمایش گر شمای کلی پنجره رابط نرم افزار با کاربر است. همان طور که مشخص می باشد این محیط تا حد امکان ساده ولی قدرتمند طراحی شده است. از ویژگی های نرم افزار اتوداین مهیا کردن امکانات هم زمان پیش پردازش، پردازش و پس پردازش در محیط یکسان است تا از تعداد عملیات ورود و خروج فایل کاسته شود. البته همان طور که خواهید دید این نرم افزار دارای قدرت بالای مدل سازی نیست و فقط امکان ساخت مدل های نسبتاً ساده در آن مهیا گردیده است. در این مورد نیز با

ترفندهای خاصی می توان تا حد امکان این کمبود را برطرف کرد. در سمت راست، رابط گرافیکی و ادوات کنترل پیش پردازش و پس پردازش مسئله گنجانده شده است.

اجزای رابط کاربری



شمای کلی پنجره رابط کاربری



پرونده گردانی



تصویرسازی



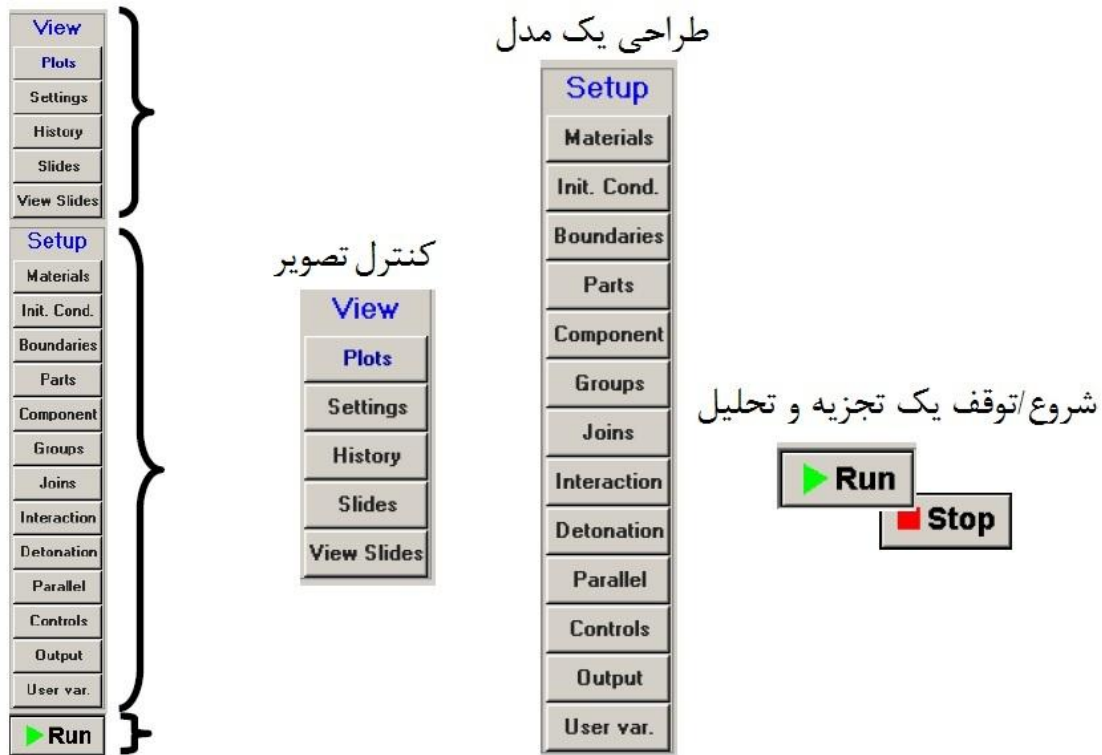
انیمیشن



تعامل

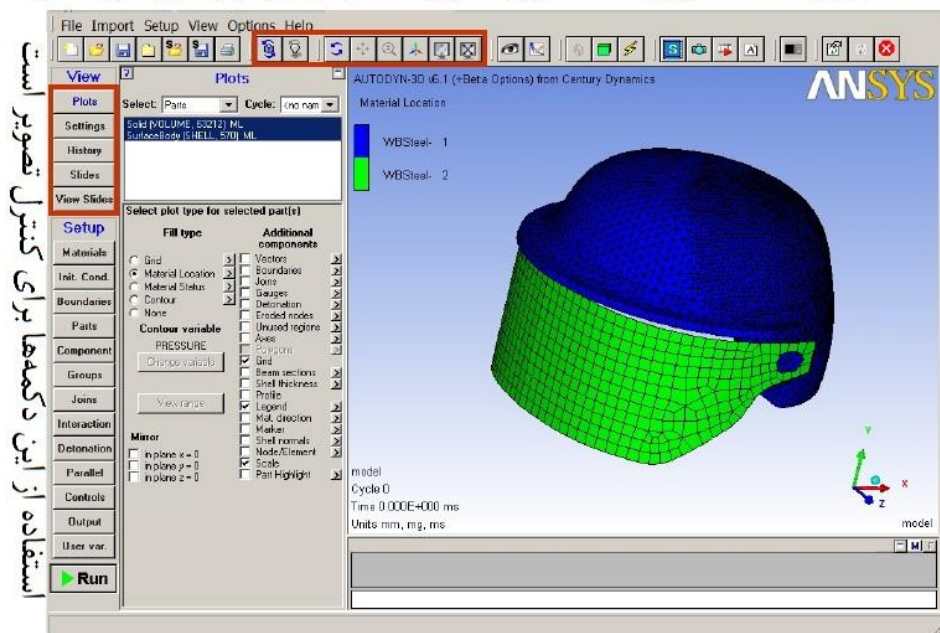


نوار ابزار



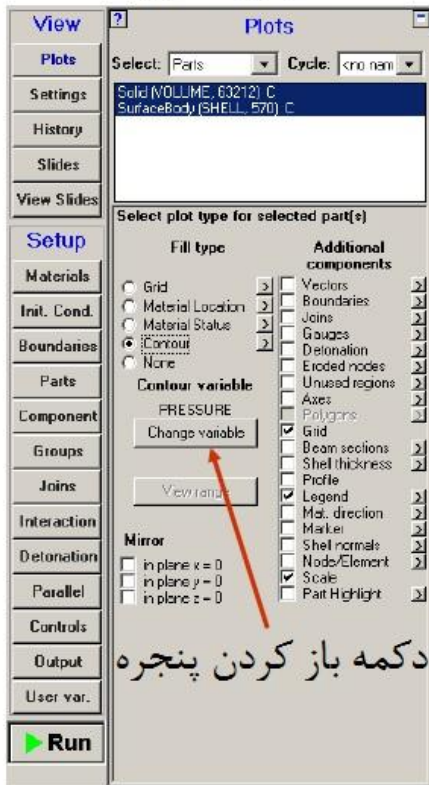
نوار پیمایش

استفاده از این دکمه‌ها برای دست‌کاری تصویر است (مقیاس، چرخش، ترجمه و ...)

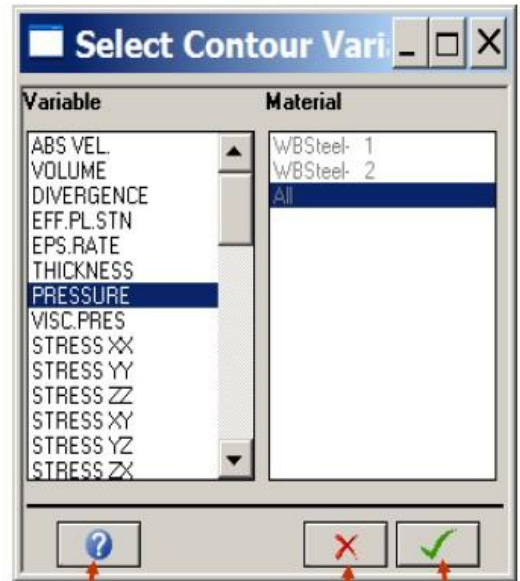


پنل‌های تصویر

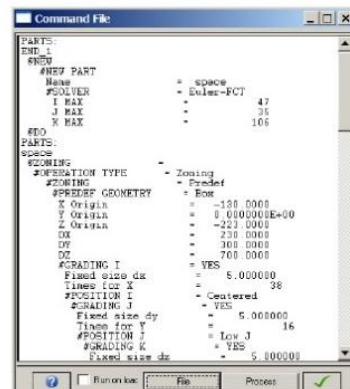
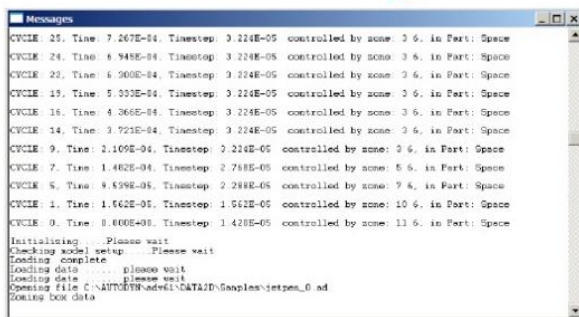
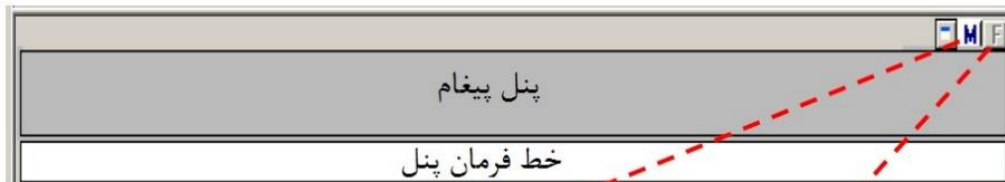
پنل محاوره



پنجره محاوره

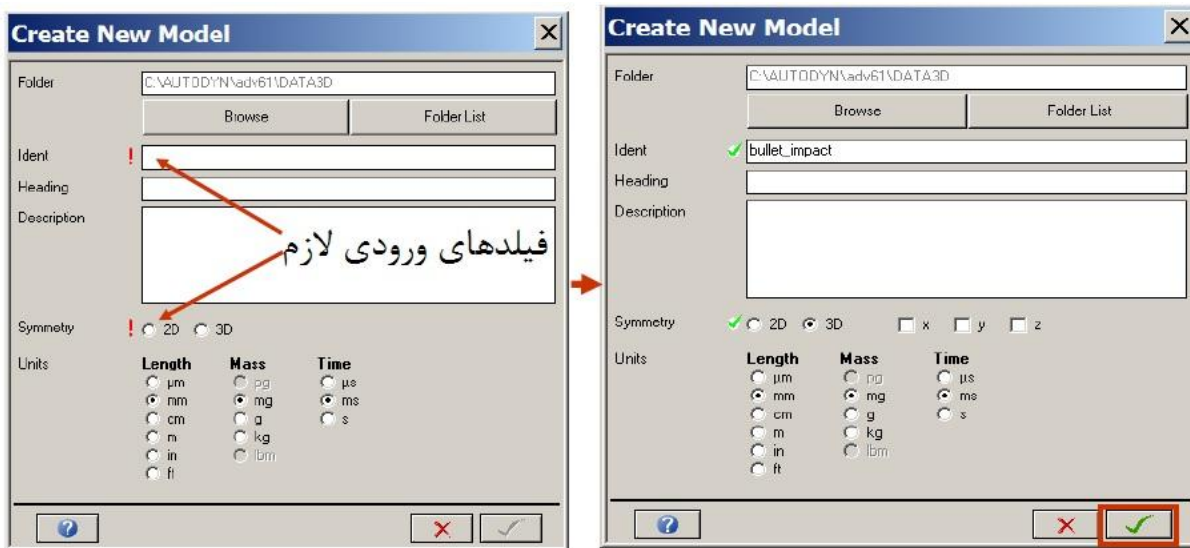


پنجره و پنل محاوره

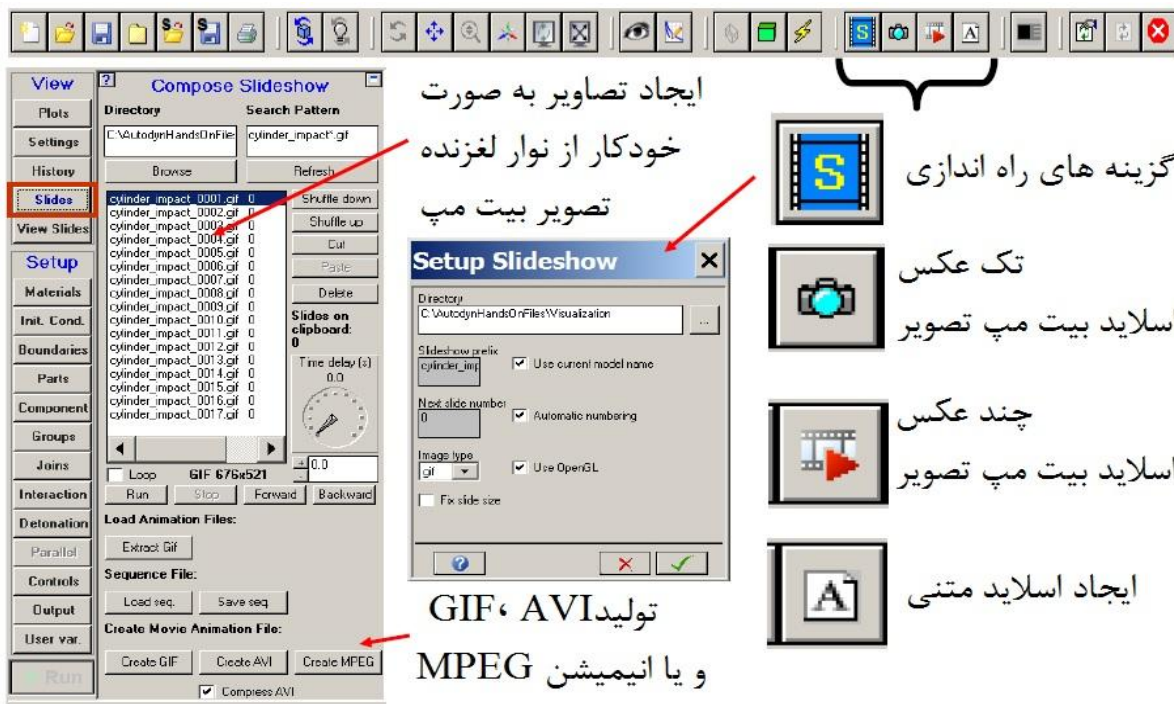


پیغام و خط فرمان پنل

فیلدهای ورودی لازم برای شناسایی و تقارن، قبل از ورود کار با AUTODUN این فیلدها باید پر شوند



مدل جدید / فیلدهای ورودی لازم



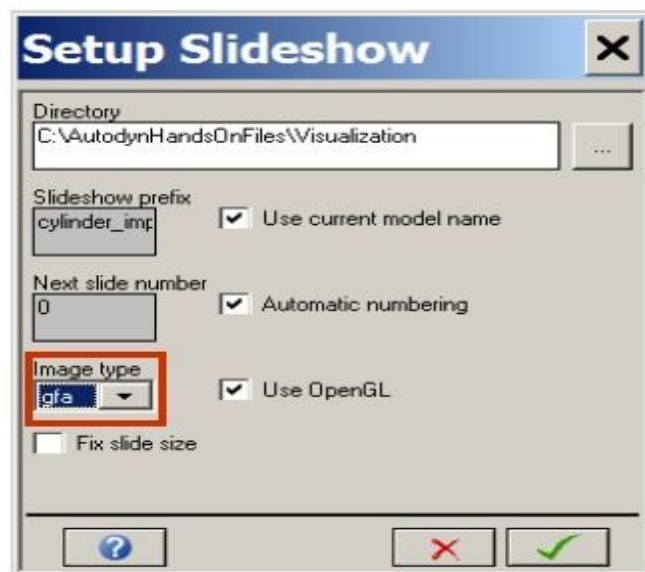
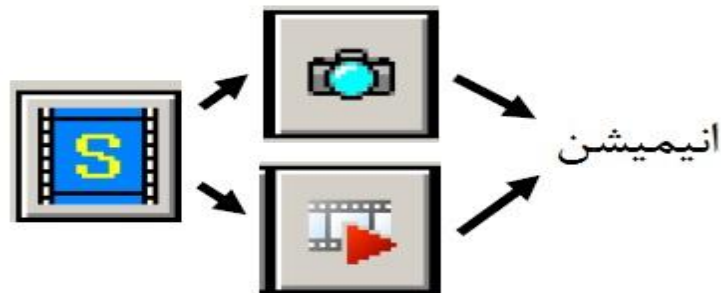
بیت مپ ها، اسلایدها و انیمیشن ها

ایجاد یک تصویر 3D و یا یک توالی و یا تصاویر 3D

- گزینه ساخت وجود ندارد
- انیمیشن GFA بلافاصله پس از جذب از یک تصویر یا توالی از تصاویر ایجاد می شود
- پسوند فایل GFA است.

باز پخش با استفاده از AD ANSYS

- زوم
- چرخش
- انتقال

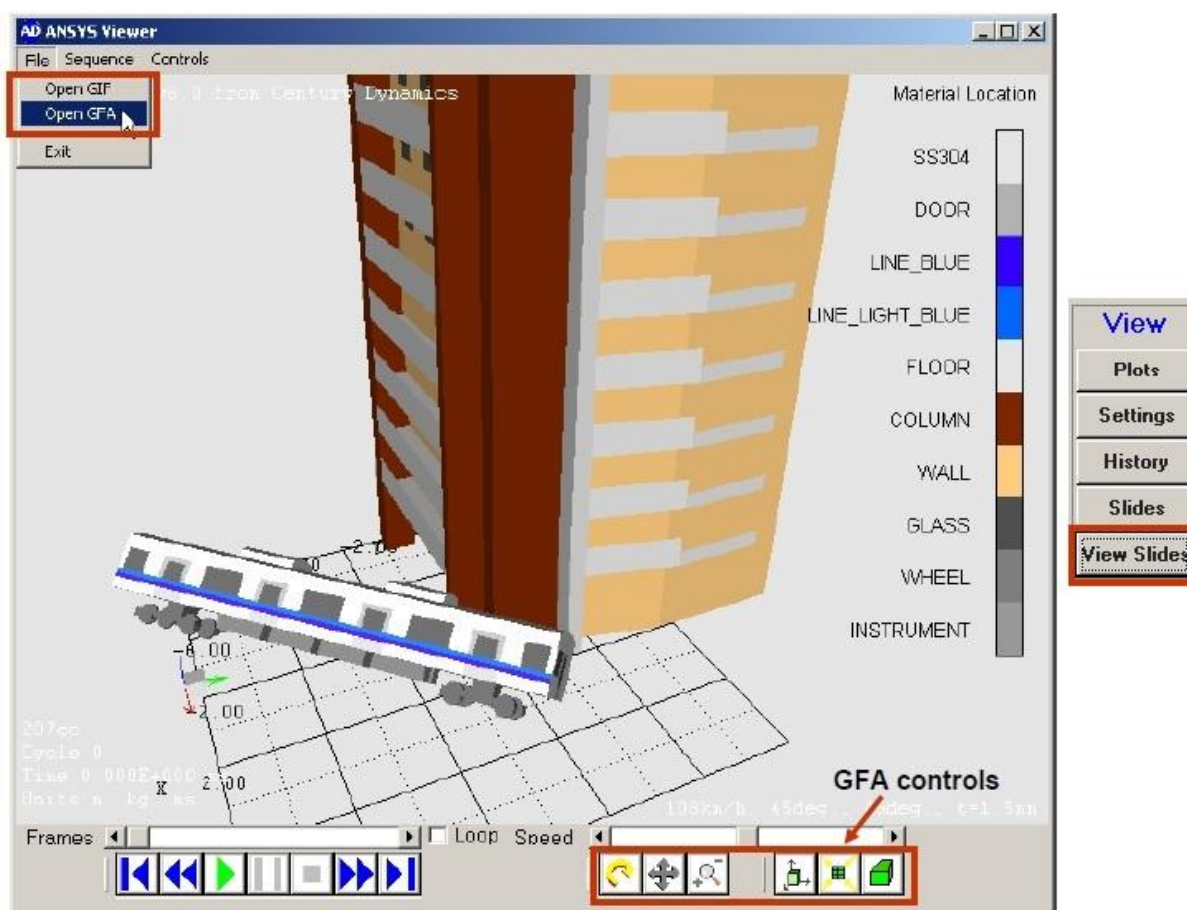


انیمیشن های تعاملی (GFA)

شروع توسط فشار دادن دکمه نمایش اسلاید در نوار منوی بالای سایت

برای نمایش از فایل‌های GIF یا GFA استفاده می‌شود

مجموعه ای جامع از دکمه ها برای کنترل تمام جنبه های انیمیشن



نمایش گر AD ANSYS

پنجره تنظیم مواد Materials

با اشاره کردن به این نمایه پنجره‌ای مطابق شکل بعد آشکار می‌شود. در این پنجره دو روش مختلف برای تعریف مواد مورد نیاز در مسئله مهیا شده است. یک روش بارگذاری مارد مورد نیاز، از کتابخانه بسیار مجهز خود نرم‌افزار است که اغلب مواد مهندسی مورد نیاز را در بر می‌گیرد. بدین منظور با زدن نمایه Load، کتابخانه نرم‌افزار بالا می‌آید. البته خاطر نشان می‌سازد، امکان این که کتابخانه فوق در

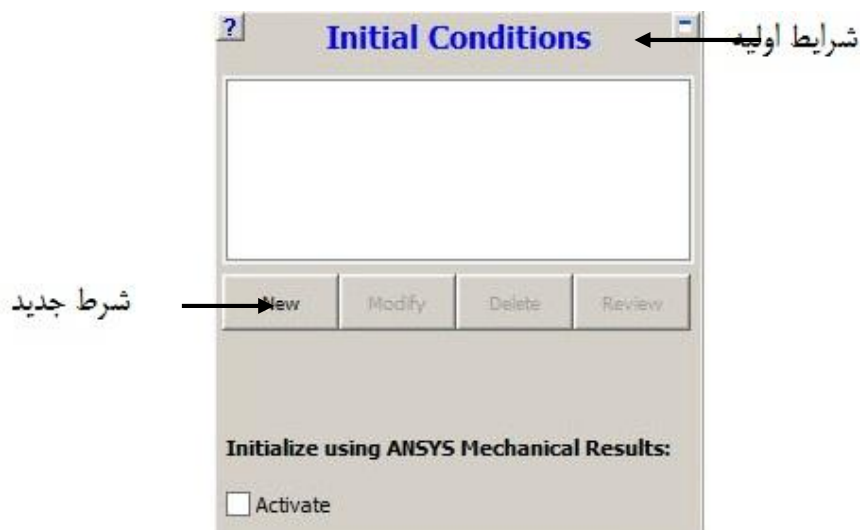
نسخه در دست شما نباشد، وجود دارد. در این صورت و یا در صورت موجود نبودن ماده مورد نظر، باید به صورت دستی آن را تعریف کنید. از این رو با زدن کلید New، می توان به صفحه تنظیمات تعریف ماده می توان به صفحه تنظیمات تعریف ماده دسترسی پیدا کرد. در این پنجره با امکانات مختلفی اعم از پاک کردن یک ماده و همچنین تغییر در مقادیر مشخصه ماده می توان کنترل خوبی بر ماهیت مواد موجود در مسئله داشت.



پنجره تنظیم خصوصیات مواد

شرایط اولیه. Init. Cond.

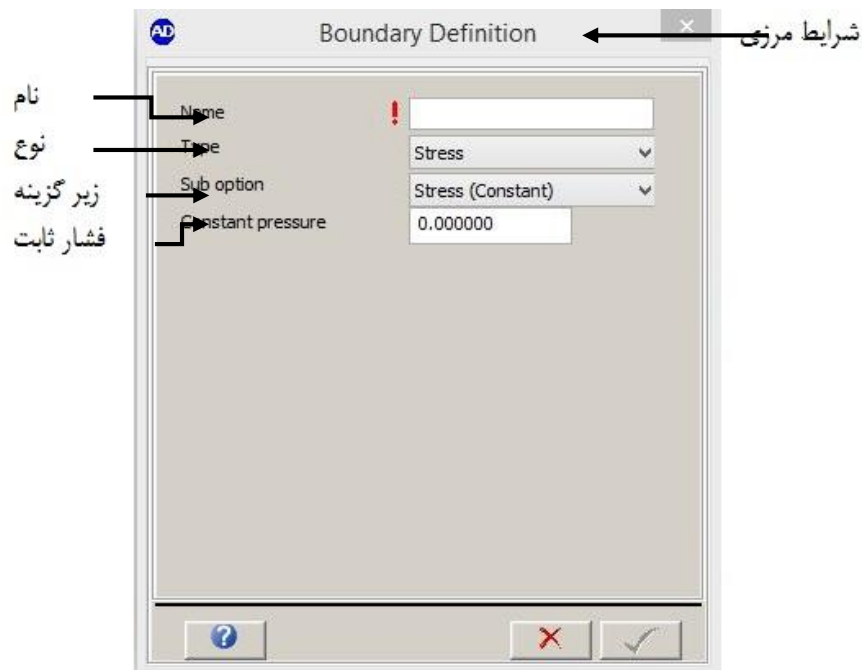
با زدن کلید فوق امکان تعریف کردن شرایط اولیه حاکم بر مسئله ایجاد شده و گزینه New، امکان تعریف یک شرایط اولیه که ممکن است از جنس سرعت، تنش و ... باشد فراهم می نماید؛ این شرایط اولیه معمولاً به مواد اعمال می شوند تا به مدل های هندسی.



پنجره تعریف شرایط اولیه حاکم بر مسئله

شرایط مرزی Boundaries

در یک مسئله عددی، فارغ از این که از چه نوعی باشد، یکی از مهم‌ترین عواملی که در نتایج تأثیر مستقیم دارد، اعمال درست شرایط مرزی است. با استفاده از نمایه فوق می‌توان انواع شرایط مرزی را متناسب با نوع حل‌گر به مدل‌ها اعمال نمود. شکل زیر حاوی تنظیمات این نمایه را نمایش می‌دهد. توجه داشته باشید که هر نوع شرط مرزی را نمی‌توان به هر نوع حل‌گری اعمال نمود. به‌عنوان مثال کاربر نمی‌تواند شرط خروج ماده از یک وجه را به یک مدل لاگرانژی اعمال نماید، زیرا این شرط مرزی برای حل‌گر اویلری در نظر گرفته شده است و اصولاً اعمال چنین شرطی بر یک مدل لاگرانژی بی‌معناست. نکته‌ای که باید در این‌جا بدان اشاره کنیم علامت ! ، که در کنار نوارها مشاهده می‌شود، است. هر وقت چنین علامتی را در هر پنجره‌ای مشاهده کردید، باید حتماً مقدار و یا نامی را برای آن در نظر بگیرید. با انجام این کار و زدن کلید Tab نمایه باید \checkmark ، فعال خواهد شد که با فشردن آن تنظیمات انجام شده را تأیید می‌کنید.



پنجره حاوی تنظیم شرایط مرزی

ساخت مدل هندسی

در این مرحله مهم‌ترین بخش تحلیل یعنی ساخت مدل‌ها و همچنین شبکه‌بندی آن‌ها به همراه انتخاب نوع حل‌گر، قرار دارد. در هایدروکد اتوداین، برای ساخت هر مدلی ابتدا باید نوع حل‌گر آن انتخاب شود. این کار بر خلاف روند موجود در نرم‌افزارهای معمولی اجزا محدود است. در این نرم‌افزار مدل‌های هندسی بدون توجه به حل‌گر آن ساخته می‌شود و بعد از انجام مراحل پیش‌پردازش به شبکه‌بندی مدل پرداخته می‌شود. به دلیل گستردگی حل‌گرهای موجود در هایدروکد، انتخاب نوع حل‌گر پیش از هر عملی انجام می‌شود. با اشاره کردن به نماه فوق پنجره‌ای مطابق شکل ظاهر می‌گردد.



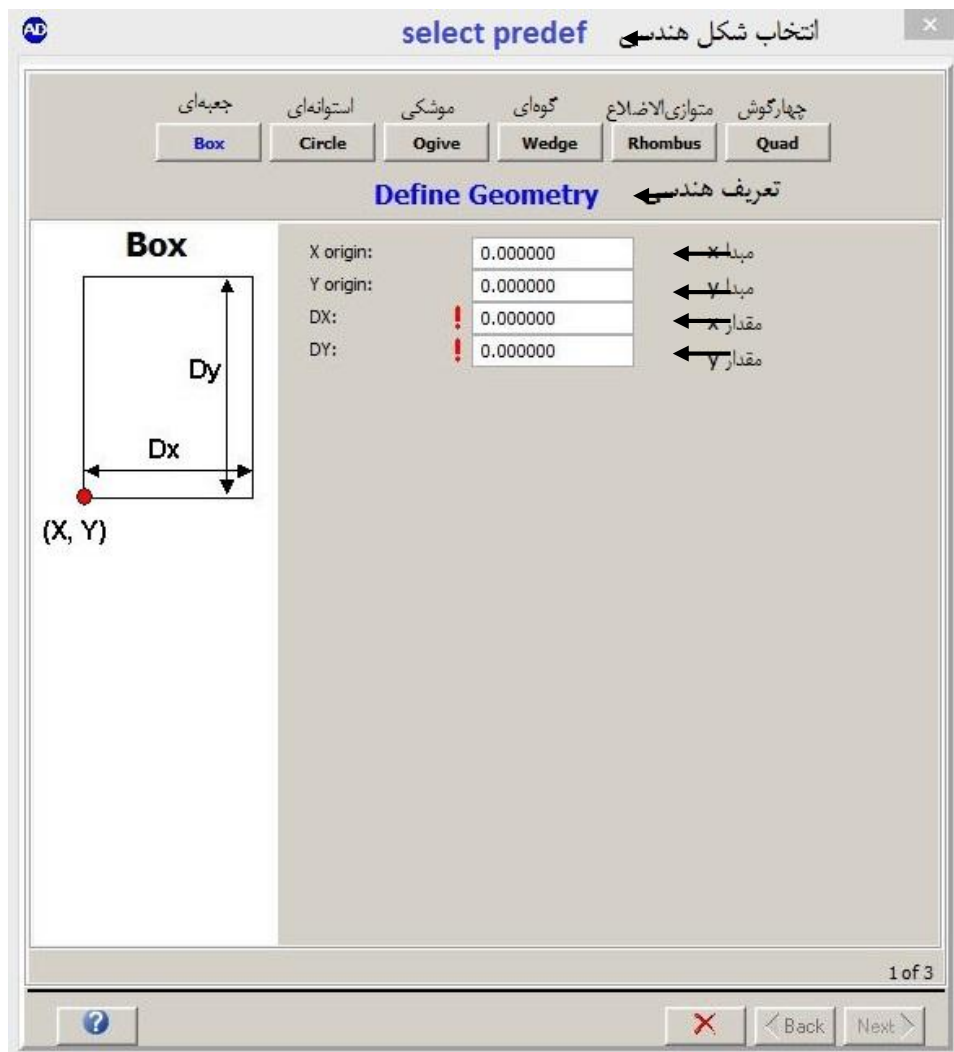
نمایی از پنجره Parts

با زدن دکمه New ، پنجره‌ای مطابق شکل زیر باز خواهد شد.



تعیین نام و مدل و انتخاب حل‌گر

با وارد کردن نام مدل و همچنین انتخاب نوع حل گر، پنجره‌ای مانند شکل زیر باز خواهد شد، خاطر نشان می‌سازد که بسته به نوع حل گر امکانات مدل‌سازی مختلفی در اختیار است، مثلاً در مورد لاگرانژی به صورت زیر است.



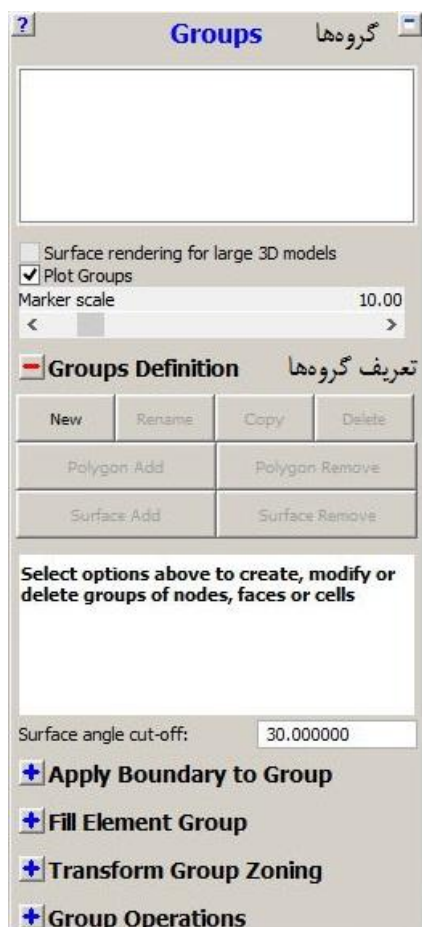
انتخاب شکل هندسی برای مدل

مجموعه مدل‌ها Component

در مسائل پیچیده گاه تعداد مدل‌های مورد استفاده زیاد است. همچنین ممکن است که این مدل‌ها دارای شرایط یکسانی از لحاظ شرای اولیه و یا مرزی باشند، در این هنگام می‌توان با تعریف کردن یک مجموعه، این مدل‌ها را در آن ثبت‌نام کرده و بدین ترتیب از لحاظ زمانی صرفه‌جویی کرد.

گروه‌ها Groups

کاربری این گزینه هم‌چون مورد قبل است، با این تفاوت که امکان تعریف بعضی از مدل‌ها هم‌چون تیرها، با کمک این ابزار انجام می‌پذیرد. هم‌چنین می‌توان با استفاده از این نمایه، مجموعه‌ای از گره‌ها، المان‌ها و غیره را نیز تعریف کرد تا در صورت لزوم حذف شده و یا تغییر داده شوند.

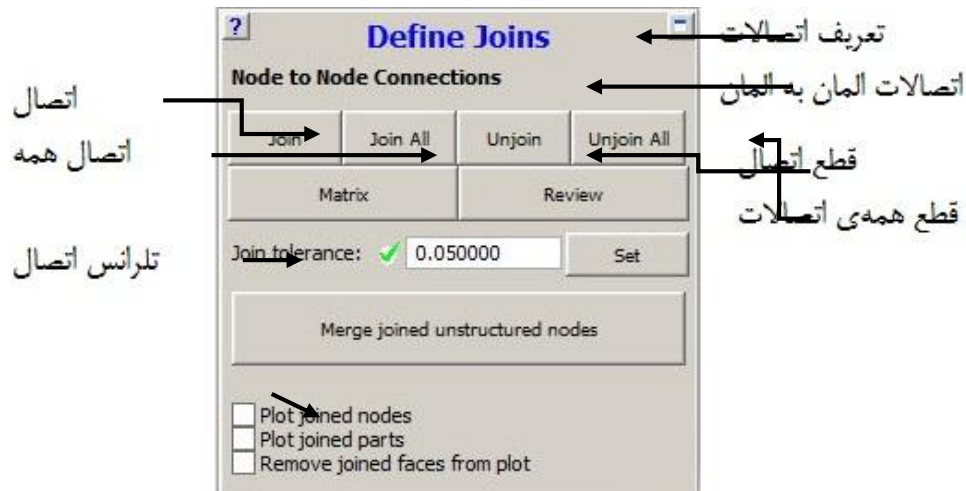


نمایی از پنجره گروه‌ها

اتصالات Joins

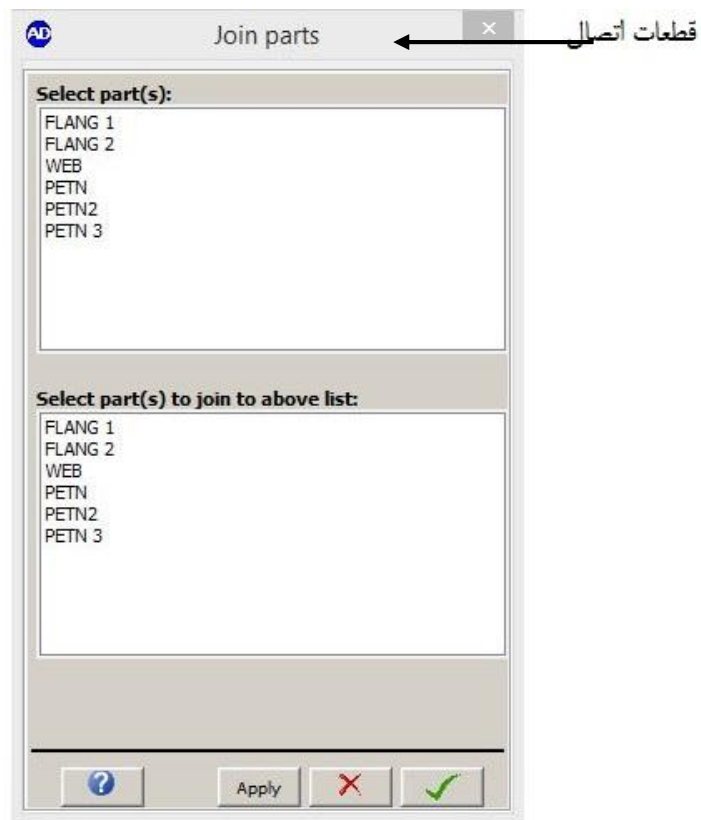
در مسائل مختلف گاهی اوقات از چند مدل مجزا باید در نقاط خاصی به هم متصل شوند. با این کار نقاط محل اتصال هم‌چون یک گره عمل کرده و محاسبات بر اساس این نقاط مشترک انجام خواهد

گرفت. با استفاده از این امکان می‌توان مدل‌های پیچیده‌تری که از ترکیب چند مدل سازه تشکیل شده است را نیز مورد بررسی قرار داد. با زدن نمایه فوق پنجره‌ای مطابق شکل زیر ظاهر می‌شود.



شرایط اتصال بخش‌های مختلف

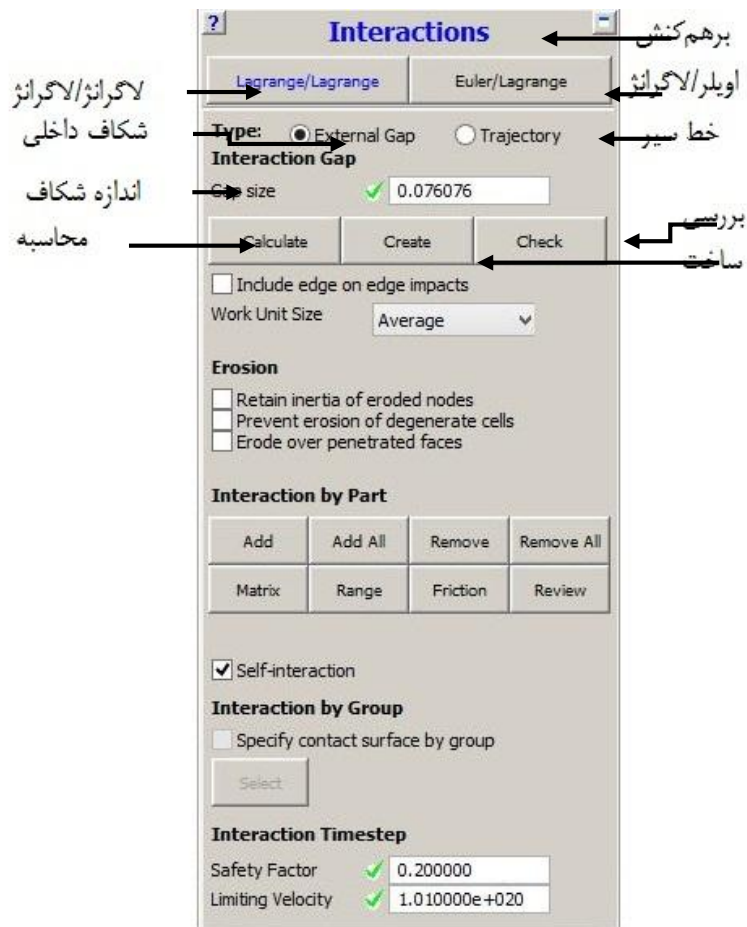
با اشاره به نمایه Join می‌توان از لیست‌های ارائه شده، مدل‌هایی که باید به هم متصل شوند را انتخاب نمود. همچنین با فعال ساختن گزینه plot joined nodes می‌توان گره‌هایی که با یک تولرانس به هم نزدیک هستند و اتصال مابین آن‌ها ایجاد شده است را نمایش داد. برای این که میان گره‌های مجاور، یک اتصال برقرار شود نیز تولرانس تعریف می‌گردد. این کار احتمال وقوع خطا را کاهش می‌دهد.



نحوه اتصال چند بخش مختلف

برهم کنش Interaction

اصولاً بدون تعریف برهم کنش میان مدل‌های مختلف و هم‌چنین حل‌گرهای متفاوت، شبیه‌سازی بی‌فایده می‌نماید. از این‌رو این گزینه در نرم‌افزار گنجانده شده است.

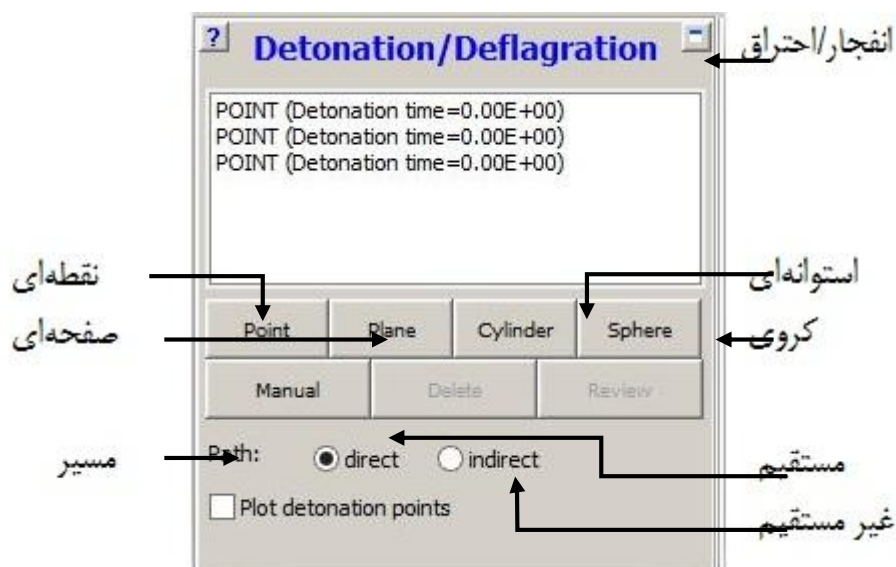


تعریف اندرکنش احتمالی بین بخش‌های مختلف

با اشاره به این نمایه پنجره‌ای مطابق شکل بالا مشاهده خواهد شد. در بالای این پنجره دو گزینه برای تعریف برهم‌کنش قرا گرفته است. یکی از این گزینه‌ها برای تعریف برهم‌کنش میان دو حل‌گر لاگرانژی است که در کاربردهایی مانند نفوذ و برخورد کاربرد دارد و دیگری برای ایجاد تقابل برای حل‌گرهای اویلری و لاگرانژی تدارک دیده شده است. نوع دوم برای کاربردهایی مانند برهم‌کنش سیال و سازه و انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی در هنگام تعریف برهم‌کنش، کاربر باید دقت خاصی به‌نوع مسئله مبذول دارد.

چاشنی‌های انفجاری Detonation

یکی از نکات مهم در مسائل نرخ بالا، بارگذاری انفجاری^۱ بر روی سازه‌هاست. بارگذاری انفجاری به‌خاطر تقابل عوامل مختلف غیرخطی هم‌چون: برهم‌کنش سیال و سازه، فعل و انفعالات شیمیایی، تغییر شکل‌های بزرگ، تغییر درماهیت مواد در نرخ کرنش‌های بالا و ... مسئله‌ای به‌شدت پیچیده است. این بارگذاری در طراحی سازه‌های زره‌ای و تقویت شده با کاربردهای نظامی و غیرنظامی بسیار اهمیت داشته و برای رسیدن به پاسخ مناسب باید کاربر دارای تجربه کافی در زمینه ماهیت مسئله و بحث انفجار باشد. یکی از عوامل مهم در بارگذاری انفجاری مهم شروع انفجار در خود ماده منفجره است. این محل از آن جهت اهمیت دارد که با تغییر دادن محل چاشنی، در حقیقت جهت‌گیری انرژی آزاد شده از ماده منفجره تغییر می‌کند. این نمایه امکان تعریف چاشنی‌های مختلف انفجاری را برای ماده منفجره با تعریف مختصات آ ایجاد می‌کند. چاشنی‌ها ممکن است به صورت نقطه‌ای و یا خطی و یا حتی صفحه‌ای تعریف شوند.



چاشنی‌های انفجاری

^۱ - Blast Loading

۳ موازی سازی پردازش گر ها Parallel

امروزه با پیشرفته شدن رایانه ها و همچنین افزایش سرعت پردازش آن ها، بسیاری از تحلیل ها حتی به وسیله کامپیوترهای خانگی نیز قابل انجام است. ولی گاهی اوقات با افزایش حجم بسیار زیاد یک مسئله، یک پردازنده از عهده حل آن بر نمی آید. نرم افزار اتوداین امکان استفاده موازی از چند پردازنده رایانه های شبکه بندی شده را به کاربر می دهد. با استفاده از این قابلیت امکان حل مسائل بزرگ به وسیله مجموعه ای از رایانه های شخصی نیز مهیا می شود. شایان ذکر است در مسائل عادی به این گزینه حتی احتیاجی ندارید.

کنترل پردازش Controls

با استفاده از این نمایه می توان پارامترهای مختلف مربوط به پردازش مسئله را تنظیم نمود. به عنوان مثال تعداد سیکل های مورد نیاز برای تحلیل، زمان حل، میزان میرایی عددی، نمره های زمانی و ... در این قسمت تعیین می شود. با کلیک بر روی نمای + ، می توان به زیرنمایه های دیگری دسترسی پیدا کرد.



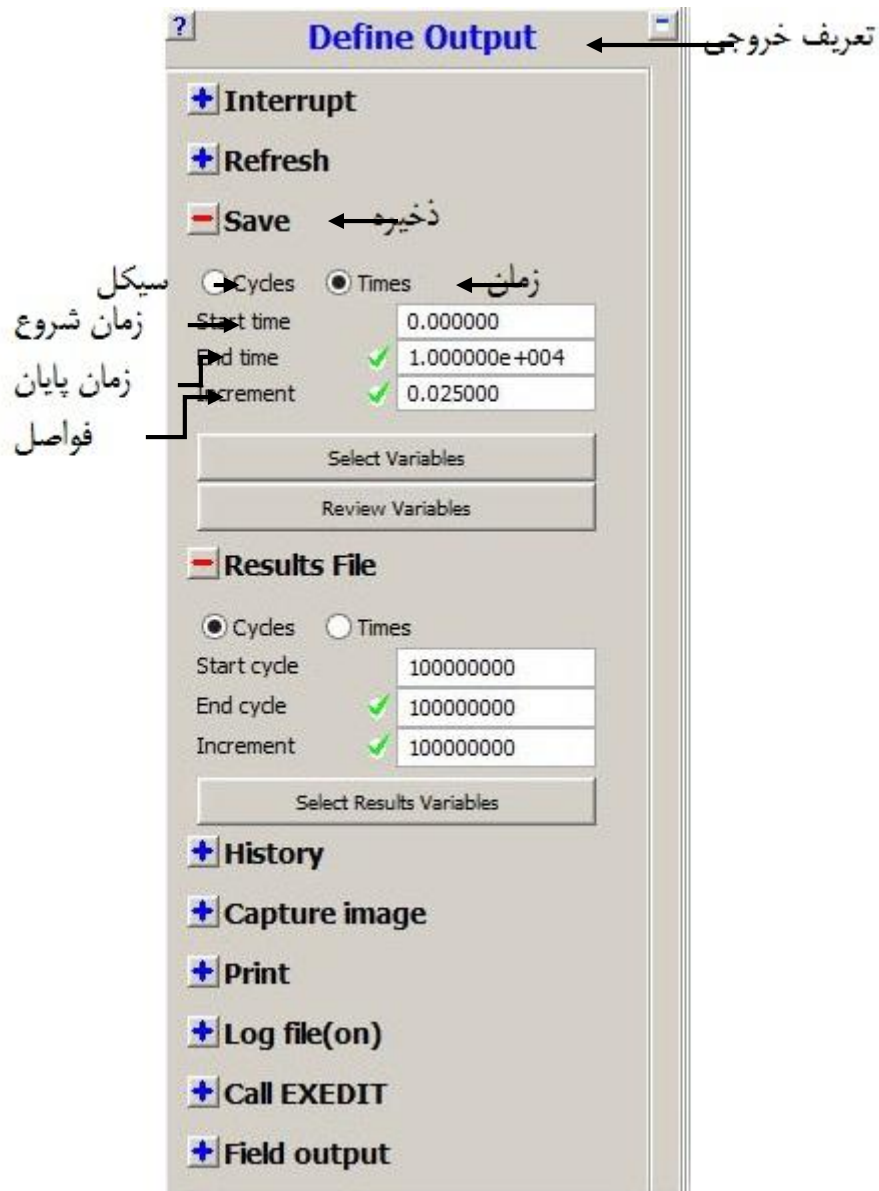
تعریف شرایط کنترلی برای حل مسئله [۵]

در این بخش امکان تعریف شتاب‌های گرانشی در سه جهت محور مختصات نیز وجود دارد. در مسائلی که نیروهای جاذبه اهمیت دارند باید دقت در واحد شتاب گرانشی، آن را در قسمت Gravity وارد نمود.

خروجی‌ها Output

در پایان هر تحلیل مقادیر درجه آزادی نقاط گره‌ای و مینگین المانی، به‌عنوان خروجی تولید می‌شوند. برخی از این مقادیر مستقیم و برخی غیر مستقیم و با انجام عملیات ریاضی بر روی سایر متغیرها به‌دست می‌آیند. هم‌چنین در حین تحلیل و با پیش‌روی در زمان، نرم‌افزار در هر تعداد معینی سیکل

اقدام به نمایش متغیرها می‌نماید. همه این اقدامات و بسیاری از تنظیمات دیگر در همین مدول انجام می‌پذیرد.



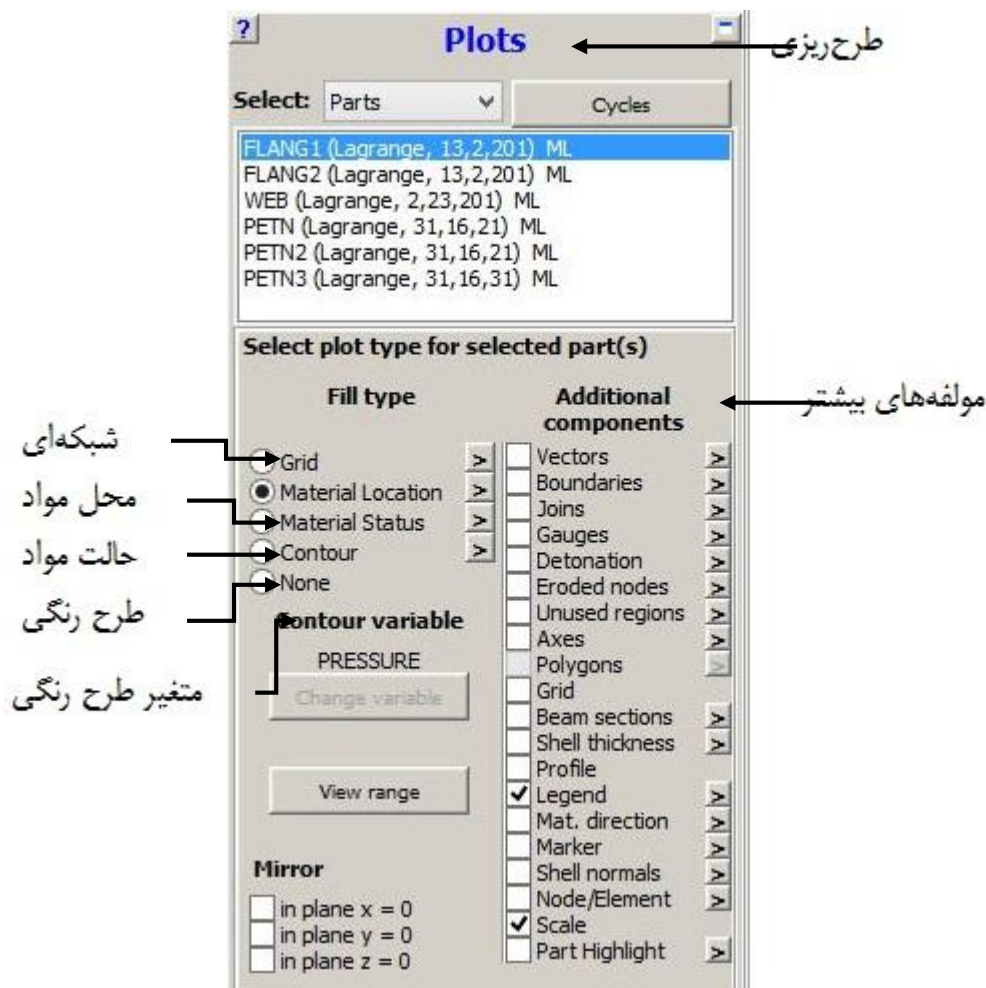
تنظیمات مربوط به خروجی‌ها

متغیرهای تعریف شده توسط کاربر. User var.

در این قسمت، که بیشتر برای کاربران پیشرفته در نظر گرفته شده است، متغیرهایی که در خود نرم افزار پیش بینی نشده اند و یا خیلی ویژه بوده و با کاربردهای خاصی همراه هستند، در این مدول تنظیم و فراخوانی خواهند شد.

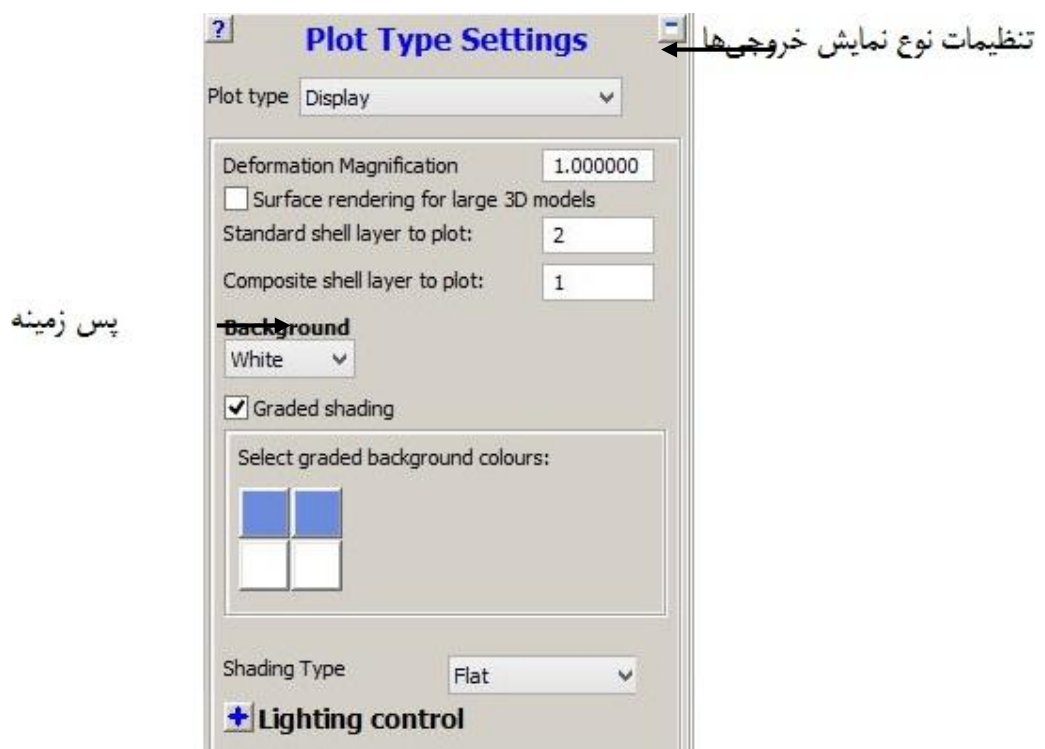
واحد پس پردازش (مدول View)

این مدول برای تنظیم نمایش خروجی ها می باشد. در این قسمت امکانات بسیار زیادی برای انواع نمایش خروجی در نظر گرفته شده است.



پنجره نمایش خروجی ها

شکل بالا، زیر نمایه‌ای که با اشاره به نمایه Plot مشاهده می‌شود را نشان می‌دهد. ردیف سمت چپ شامل متغیرهایی است که به صورت کانتور قابل نمایش هستند. به عنوان مثال حل نمایش مواد مختلف در تحلیل و وضعیت مواد از لحاظ ناحیه رفتار در این قسمت دسته‌بندی شده‌اند. متغیرهایی مانند فشار، تنش و ... نیز در این بخش جای گرفته‌اند. با اشاره به >، یک منوی گسترده برای تنظیم نحوه نمایش هر یک از قسمت‌ها نشان داده می‌شود. در بخش راست، متغیرهایی که قابلیت نمایش به صورت کانتور را ندارند، قرار گرفته‌اند. مثلاً بردارها، محل نقاط چاشنی انفجاری، محورها و ... در این بخش هستند. با اشاره به Setting، پنجره‌ای مطابق شکل زیر ظاهر می‌شود.



تنظیمات مربوط به نمایش خروجی‌ها

در پنجره فوق می‌توان، پارامترهای نمایش اعم از: رنگ، پس‌زمینه، نمایش‌های مربوط به ضخامت پوسته‌ها، میزان بزرگ‌نمایی در تغییر شکل‌ها و ... را تغییر داد. با تغییر دادن Plot Type گزینه‌های دیگری نیز برای تغییر در دسترس قرار می‌گیرند. کاربران با تغییر دادن و امتحان کردن گزینه‌ها، بیشتر با این بخش آشنا خواهند شد. همیشه بعد از انجام یک تحلیل نیازمند تنظیم یک گزارش

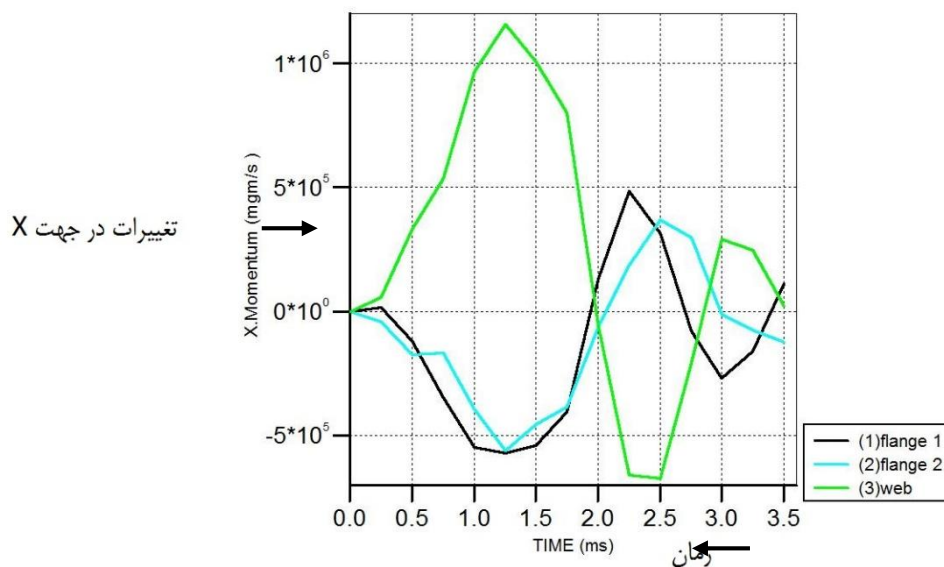
هستید. نمودارها، بهترین بیانگر تغییرات یک متغیر هستند. در تحلیل‌های صریح دینامیکی، معمولاً خواسته بر به دست آوردن تغییرات پارامترها در دامنه زمان استوار هستند. در نرم‌افزار اتوداین این قابلیت در نمایه History، گنجانده شده است. با اشاره به این نمایه پنجره‌ای باز می‌شود که به کاربر امکان انتخاب متغیرهای مورد نظر در محل نصب سنجه‌های مختلف در مدل‌های یک مسئله را می‌دهد. همچنین تغییرات بعضی از متغیرهای کل دامنه حل، مانند انرژی و تکانه کل نیز بر حسب زمان در آن گنجانده شده است.



تنظیمات مربوط به دریافت خروجی‌ها در قالب تاریخچه

در این بخش امکان نمایش چند منحنی به صورت هم‌زمان در یک نمودار، وجود دارد. این قابلیت در مقایسه میان تغییرات یک پارامتر در تحلیل‌های مختلف و یا نقاط مختلف یک مدل بسیار سودمند می‌باشد. البته در نرم‌افزار امکان این که در یک تحلیل، محوری غیر از زمان نیز به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شود نیز وجود دارد. به عنوان مثال سرعت یکی از متغیرهاست که ممکن است در تحلیل‌هایی که نیاز به تعیین میزان میرایی سازه‌ای باشد مورد استفاده قرار گیرد. در بعد یک نمودار که با استفاده از این مدول به دست آمده است، نشان داده شده است. این نمودار مربوط به تغییرات بال‌ها و جان یک تیر آهن ۱۲ در معرض بارگذاری انفجاری تماسی در جهت محور X می‌باشد. [۳]

Part Summary (Ident 0 - autodyn)



نمودار به دست آمده از مدول History

Abstract

One of the important issues in the design and construction of structures is to observe them against the dynamic loads they are subjected to. One of these dynamic loads, which is non-linear and complex, has explosive loads. In the present era, this issue has become more of a concern for engineers and designers by increasing the terrorist attacks on structures and high-rise buildings that sometimes have a state and political dimension. Occasionally, placing a few kilograms of explosives in sensitive locations can withstand irreparable damage to buildings that carry the main loads of the structure. On the other hand, natural phenomena such as gas explosion or fire can also be easily incorporated into the structure. These are enough reasons to pay more attention to the science of rebuilding structures against different loads on them.

Fortunately, with the advent of science and the computer, this issue is on a more rapid pace. In this area, various simulation software such as Abaqus, Ansys, Autodyn, Ls-dyna and others have been obtained. With the help of them, you can try, analyze, and check out the above. This helps reduce costs, more precise, easier, and faster prediction.

In this thesis, we examined the impact of explosive loading on underground tunnels. As we know, tunnels, including metro tunnels, underpasses, overpasses, etc., are used in today's world and often contain a large number of them, and, against the type and timing of access to the earth's surface, they are of resistive importance. They are more against different loads. In this thesis, we analyzed the effects of 500, 1000 and 5000 kilograms of TNT at depths of 10, 15 and 20 from ground level ground on a tunnel using data analysis. For modeling, a non-networked SPH solver is used. After analyzing pressure, tension and displacement diagrams for each mode, they are compared. The results of the comparison of these graphs showed that the explosion has exploded with mass and inverted with explosive depth.

Keywords: Explosive Loading, Tuunel, SPH, Numerical Simulation.



Shahrood University of Technology
Department of civil Engineering

Numerical modeling of buried structures under explosive loading

By : Morteza Altafi

Supervisor :
Dr Reza Naderi

February 2018