

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران-گرایش خاک و پی

عنوان

مدلسازی عددی اثر انفجار در مورد مخازن روی سطح زمین

نگارش

علی اصغر رحیمیان

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

زمستان ۱۳۹۶

ب

دانشکده: مهندسی عمران

گروه: خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد علی اصغر رحیمیان به شماره دانشجویی ۹۲۳۶۳۲۴ تحت عنوان **مدلسازی عددی اثر انفجار در مورد مخازن روی سطح زمین** در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۱۲ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی عمران - خاک و پی مورد ارزیابی و با درجه‌ی عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
دکتر رضا نادری			

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
دکتر امیر بذرافشان مقدم		دکتر مهدی گلی	
دکتر محسن کرامتی			

تعهد نامه

اینجانب **علی اصغر رحیمیان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-گرایش

خاک و پی دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدلسازی عددی اثر

انفجار در مورد مخازن روی سطح زمین تحت راهنمایی استاد رضا نادری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

قرارگیری سازه‌های سطحی اعم از ثابت و متحرک در برابر بارگذاری‌های مختلف همچون تهدیدات جنگی و تروریستی مانند مواد منفجره و یا انفجار خطوط مواد سوختی مانند نفت و گاز گذرانده شده از نزدیکی این سازه‌ها باعث ایجاد سطح تنش‌های متفاوت با ماهیت تقریباً نوسانی در ماده تشکیل دهنده سازه خواهد شد. در برخی از موارد این سازه‌ها همچون مخازن حامل مواد ذخیره شده اعم از مواد سوختی و پالایشگاهی هستند، و گاهی نیز حامل آب که برای مقابله با احتراق مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در هر صورت از نظر زیست محیطی، شرایط کاربری و حتی ارزش مالی اهمیت مقاوم بودن این سازه‌ها در برابر بارهای مختلف بسیار بالا می‌باشد. اهمیت این موضوع علت اصلی انتخاب موضوع این پایان‌نامه می‌باشد.

با این دیدگاه در این پایان‌نامه به بررسی اثر بارگذاری انفجاری ماده منفجره بر روی مخازن پرداختیم. برای اینکار از نرم‌افزار المان محدود اتوداین برای شبیه‌سازی مسئله استفاده کردیم. برای مدلسازی از حلگر SPH استفاده کردیم و اثر انفجار را در حالت‌های مختلفی مورد تحلیل قرار دادیم.

این بارگذاری‌ها بر روی دو نوع مخزن فولادی و بتنی انجام شدند. ماده منفجره با ۳ جرم مختلف ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در فواصل مشخص ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر از مخزن بر روی زمین قرار داده شدند. برای ثبت پارمترهای انفجار تعداد ۶ سنجه در بخش‌های مختلف مخازن قرار داده شد و در نهایت نتایج حاصل ثبت شده در سنجه‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند.

به عنوان مهمترین نتیجه می‌توان به افزایش اثر بارگذاری انفجاری با افزایش جرم ماده منفجره و در مقابل کاهش اثر بارگذاری با افزایش فاصله از نقطه انفجار بر بخش‌های مختلف مخازن اشاره کرد.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری، مخزن، اتوداین، شبیه‌سازی عددی، SPH.

تقدیم نامه

تقدیم به پدر و مادرم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ کیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند و ستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانگی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

سپاس گذاری

شکر شایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را بهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل
و اندیشمند جناب آقای دکتر رضاناوری به عنوان استاد راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود
قرار داده اند، کمال شکر را دارم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه

.....۲	۱-۱- مقدمه
.....۳	۱-۲- هدف از تحقیق
.....۳	۱-۳- ضرورت تحقیق
.....۳	۱-۴- روش تحقیق
.....۴	۱-۵- استفاده کنندگان از نتایج پایان نامه
.....۴	۱-۶- کاربردهای تحقیق
.....۴	۱-۷- فصل بندی
.....۴	۱-۷-۱- فصل ۱: مقدمه
.....۴	۱-۷-۲- فصل ۲: شناخت پدیده انفجار
.....۴	۱-۷-۳- فصل ۳: آشنایی با روش SPH
.....۵	۱-۷-۴- فصل ۴- کاربردهای روش عددی در مدلسازی
.....۵	۱-۷-۵- فصل ۵: مدلسازی عددی انفجار
.....۵	۱-۷-۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل دوم: شناخت پدیده انفجار

.....۸	۲-۱- تعریف انفجار
.....۸	۲-۲- انواع انفجار
.....۸	۲-۳- مراحل انفجار
.....۹	۲-۴- آثار انفجار
.....۹	۲-۵- انتشار ترکش ها
.....۱۰	۲-۶- امواج دینامیکی

.....۱:	۷-۲- امواج حرارتی
.....۱.۱:	۸-۲- آسیب‌های ناشی از انفجارهای متعارف در محیط‌های مسکونی
.....۱.۱:	۹-۲- ویژگی‌های انفجار
.....۱.۲:	۱۰-۲- قدرت انفجاری
.....۱.۲:	۱۱-۲- منظر کلی آسیب ناشی از انفجار
.....۱.۳:	۱۲-۲- گرمای انفجار
.....۱.۵:	۱۳-۲- انرژی انفجار
.....۱.۶:	۱۴-۲- آنتروپی انفجار
.....۱.۷:	۱۵-۲- قدرت انفجار (تخمین برتلوت)
.....۱.۷:	۱۶-۲- معادلات حالت گاز ایده‌آل
.....۱.۸:	۱۷-۲- تولید موج شوک
.....۱.۹:	۱۸-۲- برخوردها و امواج شوک
.....۲:	۱-۱۸-۲- شوک در سطح مشترک حالت الف ($Z_B > Z_A$)
.....۲.۳:	۲-۱۸-۲- شوک در سطح مشترک ماده حالت ب ($Z_A > Z_B$)

فصل سوم: آشنایی با روش SPH

.....۲.۶:	۱-۳- مقدمه
.....۲.۸:	۲-۳- روش هیدرودینامیک ذرات هموار
.....۲.۸:	۳-۳- اساس روش ذرات هموار متحرک SPH
.....۳.۲:	۴-۳- توابع وزن SPH
.....۳.۹:	۳-۱۱: از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH
.....۳.۹:	[3]
.....۳.۹:	۵-۳- محاسبه مقدار مشتق اول توابع با استفاده از روش SPH
.....۴.۱:	۳-۵-۱ محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر در روش SPH
.....۴.۲:	۳-۶- شرط هم رفتاری
.....۴.۳:	۳-۷- روش هیدرودینامیک ذرات هموار اصلاح شده CSPM

.....۴۵	۸-۳- روش‌های دیگر از هیدرودینامیک ذرات هموار
.....۴۶	۹-۳- شرایط مرزی
.....۴۶	۱۰-۳- اعمال شرایط مرزی، پایدارسازی و بهبود عملکرد روش SPH
.....۴۶	۱-۱۰-۳- عدم دقت در اعمال شرایط مرزی (تاریخچه)
.....۴۸	۲-۱۰-۳- تکنیک‌های پایدارسازی
.....۵۲	۱۱-۳- هیدرودینامیک انفجار در روش SPH
.....۵۳	۱۲-۳- فرمول‌بندی SPH برای معادلات ناویر - استوکس
.....۵۳	۱-۱۲-۳- تقریب چگالی ذرات
.....۵۷	۲-۱۲-۳- تقریب مومنتوم (اندازه حرکت) ذرات
.....۶۰	۳-۱۲-۳- تقریب انرژی ذرات

فصل چهارم: کاربرد روش‌های عددی در مدلسازی

.....۶۶	۱-۴- شبیه‌سازی برای انفجار خاک و اثرات آن بر ساختارها با استفاده از روش SPH
.....۶۶	۲-۴- مدل‌سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز
.....۶۷	۳-۴- شبیه‌سازی امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (I-SPH)
.....۶۸	۴-۴- مروری بر روش‌های عددی شبیه‌سازی موج بلست انفجار
.....۶۸	۵-۴- شبیه‌سازی و مدلسازی Peridynamics-SPH از تقسیم‌بندی انفجار خاک تحت بارهای انفجاری دفن شده
.....۶۹	۶-۴- بهبود روش بدون المان SPH در حل سیستم‌های دینامیکی

فصل پنجم: مدلسازی عددی انفجار

.....۷۱	۱-۵- مدلسازی انفجار
.....۸۵	۳-۵- اثر بارگذاری انفجاری بر روی مخازن فولادی
.....۸۹	۴-۵- بررسی نمودار فشار - زمان
.....۱۰۷	۵-۵- تاریخچه سرعت و جایجایی
.....۱۱۲	۶-۵- بررسی تنش وان میس

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

.....۱۳۸.....	۱-۶- نتیجه‌گیری
.....۱۳۹.....	۲-۶- پیشنهادات برای ادامه مطالعه
.....۱۴۰.....	منابع
پیوست	
.....۲۳۲.....	پ-۱۸۰- مبانی روش‌های عددی مورد استفاده در هایدروکدها
.....۲۳۲.....	روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل نرخ بالا
.....۲۳۷.....	مراحل شکل‌گیری مش‌بندی در یک مسئله انفجار زیر آب به کمک روش ALE
.....۲۳۹.....	محیط گرافیکی نرم‌افزار
.....۲۴۰.....	اجزای رابط کاربری
.....۲۴۴.....	بیت‌مپ‌ها، اسلایدها و انیمیشن‌ها
.....۲۴۵.....	انیمیشن‌های تعاملی (GFA)
.....۲۴۷.....	شرایط اولیه Init. Cond.
.....۲۴۸.....	شرایط مرزی Boundaries
.....۲۴۹.....	ساخت مدل هندسی
.....۲۵۱.....	مجموعه مدل‌ها Component
.....۲۵۲.....	گروه‌ها Groups
.....۲۵۲.....	اتصالات Joins
.....۲۵۴.....	برهم‌کنش Interaction
.....۲۵۵.....	چاشنی‌های انفجاری Detonation
.....۲۵۶.....	۳ موازی‌سازی پردازش‌گرها Parallel
.....۲۵۶.....	کنترل پردازش Controls
.....۲۵۷.....	خروجی‌ها Output
.....۲۵۹.....	متغیرهای تعریف شده توسط کاربر User var.

فهرست اشکال و نمودار

عنوان

صفحه

.....۱.۳	شکل ۱-۲: دیاگرام فشار-زمان برای یک موج انفجار
.....۱.۳	شکل ۲-۲: منظر کلی آسیب ناشی از یک موج انفجار
.....۱.۸	شکل ۳-۲: دینامیک تولید موج شوک توسط یک پیستون
.....۱.۹	شکل ۴-۲: توزیع فشار در طول سیلندر، منطبق با شکل ۳-۲ در حین حرکت پیستون
.....۲.۱	شکل ۵-۲: دیاگرام فشار - جابه‌جایی، a. قبل از برخورد b. در هنگام برخورد c. بعد از برخورد
.....۲.۲	شکل ۶-۲: دیاگرام X-t برای شوک در سطح مشترک مواد
.....۲.۳	شکل ۷-۲: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $(Z_A > Z_B)$
.....۲.۴	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
.....۲.۴	شکل ۹-۲: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $Z_A > Z_B$
.....۳.:	شکل ۱-۳: نمایش دامنه تأثیر تابع هموارساز W و دامنه مسئله [3]
.....۳.۱	شکل ۲-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت 2D [3]
.....۳.۲	شکل ۳-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت 3D [3]
.....۳.۳	شکل ۴-۳: تابع هموار ساز Lucy و مشتق اولش [3]
.....۳.۴	شکل ۵-۳: تابع هموارساز Monaghan با هسته‌ی گاوسی و مشتق اولش [3]
.....۳.۵	شکل ۶-۳: تابع هموار ساز Cubic Spline و مشتق اولش [3]
.....۳.۸	شکل ۷-۳: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.3 است با استفاده از روش SPH. [3]

شکل ۳-۸: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0.75 است با استفاده از روش

SPH [3].

.....۳۸.....

شکل ۳-۹: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 1.55 است با استفاده از روش

SPH [3]

.....۳۹.....

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

.....۳۹..... ۳-۱۱: از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH

.....۵..... شکل ۳-۱۲: مرز مشترک بین دو ماده

.....۵۱..... شکل ۳-۱۳: ذرات بر روی مرز مشترک دو ماده مختلف و نفوذ ذرات در یکدیگر

.....۵۲..... ۳-۱۱- هیدرودینامیک انفجار در روش SPH

.....۵۳..... ۳-۱۲- فرمول‌بندی SPH برای معادلات ناویر - استوکس

.....۷۳..... شکل ۵-۱: مدل آماده به تحلیل

.....۷۴..... شکل ۵-۲: نمایی از مخزن مدلسازی شده

.....۷۵..... شکل ۵-۳: انتشار موج انفجار تا سیکل ۲۰۰

.....۷۵..... شکل ۵-۴: انتشار موج انفجار تا سیکل ۴۰۰

.....۷۶..... شکل ۵-۵: انتشار موج انفجار تا سیکل ۶۰۰

.....۷۶..... شکل ۵-۶: انتشار موج انفجار تا سیکل ۸۰۰

.....۷۷..... شکل ۵-۷: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۰۰۰

.....۷۷..... شکل ۵-۸: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۲۰۰

.....۷۸..... شکل ۵-۹: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۴۰۰

.....۷۸..... شکل ۵-۱۰: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۶۰۰

.....۷۹..... شکل ۵-۱۱: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۸۰۰

.....۷۹..... شکل ۵-۱۲: انتشار موج انفجار تا سیکل ۲۰۰۰ (سیکل آخر)

.....۸۰..... شکل ۵-۱۳: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر

.....۸۱..... شکل ۵-۱۴: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر

.....۸۱..... شکل ۵-۱۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر

.....۸۲	شکل ۵-۱۶: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر
.....۸۲	شکل ۵-۱۷: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر
.....۸۳	شکل ۵-۱۸: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر
.....۸۳	شکل ۵-۱۹: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر
.....۸۴	شکل ۵-۲۰: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر
.....۸۴	شکل ۵-۲۱: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر
.....۸۵	شکل ۵-۲۲: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر
.....۸۵	شکل ۵-۲۳: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر
.....۸۶	شکل ۵-۲۴: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر
.....۸۶	شکل ۵-۲۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر
.....۸۷	شکل ۵-۲۶: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر
.....۸۷	شکل ۵-۲۷: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر
.....۸۸	شکل ۵-۲۸: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر
.....۸۸	شکل ۵-۲۹: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر
.....۸۹	شکل ۵-۳۰: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر
.....۹۰	شکل ۵-۳۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۹۰	شکل ۵-۳۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۹۱	شکل ۵-۳۳: مسیر حرکت موج شوک تا رسیدن به گیج شماره ۱ و ۴
.....۹۱	شکل ۵-۳۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۹۲	شکل ۵-۳۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۹۲	شکل ۵-۳۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۹۲	شکل ۵-۳۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۹۳	شکل ۵-۳۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۹۳	شکل ۵-۳۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۹۳	شکل ۵-۴۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)

.....۹.۴	شکل ۵-۴۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۹.۴	شکل ۵-۴۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۹.۴	شکل ۵-۴۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۹.۵	شکل ۵-۴۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۹.۵	شکل ۵-۴۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۹.۵	شکل ۵-۴۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۹.۶	شکل ۵-۴۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۹.۶	شکل ۵-۴۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۹.۶	شکل ۵-۴۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۹.۷	شکل ۵-۵۰: نمودار جرم فاصله-زمان رسیدن اولین موج شوک به گیج شماره ۱
.....۹.۷	شکل ۵-۵۱: نمودار جرم فاصله-زمان رسیدن اولین موج شوک به گیج شماره ۴
.....۹.۸	شکل ۵-۵۲: توزیع فشار در مدل (500kg-10m-Concrete)
.....۹.۹	شکل ۵-۵۳: توزیع فشار در مدل (500kg-15m-Concrete)
.....۹.۹	شکل ۵-۵۴: توزیع فشار در مدل (500kg-20m-Concrete)
.....۱:۰	شکل ۵-۵۵: توزیع فشار در مدل (1000kg-10m-Concrete)
.....۱:۰	شکل ۵-۵۶: توزیع فشار در مدل (1000kg-15m-Concrete)
.....۱:۱	شکل ۵-۵۷: توزیع فشار در مدل (1000kg-20m-Concrete)
.....۱:۱	شکل ۵-۵۸: توزیع فشار در مدل (2000kg-10m-Concrete)
.....۱:۲	شکل ۵-۵۹: توزیع فشار در مدل (2000kg-15m-Concrete)
.....۱:۲	شکل ۵-۶۰: توزیع فشار در مدل (2000kg-20m-Concrete)
.....۱:۳	شکل ۵-۶۱: توزیع فشار در مدل (500kg-10m-Steel)
.....۱:۳	شکل ۵-۶۲: توزیع فشار در مدل (500kg-15m- Steel)
.....۱:۴	شکل ۵-۶۳: توزیع فشار در مدل (500kg-20m- Steel)
.....۱:۴	شکل ۵-۶۴: توزیع فشار در مدل (1000kg-10m- Steel)
.....۱:۵	شکل ۵-۶۵: توزیع فشار در مدل (1000kg-15m- Steel)

-۱.۵..... شکل ۵-۶۶: توزیع فشار در مدل (1000kg-20m- Steel)
-۱.۶..... شکل ۵-۶۷: توزیع فشار در مدل (2000kg-10m- Steel)
-۱.۶..... شکل ۵-۶۸: توزیع فشار در مدل (2000kg-15m- Steel)
-۱.۷..... شکل ۵-۶۹: توزیع فشار در مدل (2000kg-20m- Steel)
-۱.۸..... شکل ۵-۷۰: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)
-۱.۸..... شکل ۵-۷۱: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)
-۱.۸..... شکل ۵-۷۲: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)
-۱.۹..... شکل ۵-۷۳: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)
-۱.۹..... شکل ۵-۷۴: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)
-۱.۹..... شکل ۵-۷۵: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)
-۱.۱۰..... شکل ۵-۷۶: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۵۰۰ کیلوگرم (Concrete)
-۱.۱۰..... شکل ۵-۷۷: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم (Concrete)
-۱.۱۰..... شکل ۵-۷۸: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم (Concrete)
-۱.۱۱..... شکل ۵-۷۹: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۵۰۰ کیلوگرم (Steel)
-۱.۱۱..... شکل ۵-۸۰: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم (Steel)
-۱.۱۱..... شکل ۵-۸۱: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم (Steel)
-۱.۱۲..... شکل ۵-۸۲: مدل فرضی وان میس
-۱.۱۴..... شکل ۵-۸۳: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-10m-Concrete)
-۱.۱۵..... شکل ۵-۸۴: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-15m-Concrete)
-۱.۱۶..... شکل ۵-۸۵: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-20m-Concrete)
-۱.۱۷..... شکل ۵-۸۶: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-10m-Concrete)
-۱.۱۸..... شکل ۵-۸۷: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-15m-Concrete)
-۱.۱۹..... شکل ۵-۸۸: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-20m-Concrete)
-۱.۲۰..... شکل ۵-۸۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-10m-Concrete)
-۱.۲۱..... شکل ۵-۹۰: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-15m-Concrete)

-۱.۲۲ شکل ۵-۹۱: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-20m-Concrete)
-۱.۲۳ شکل ۵-۹۲: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-10m-Steel)
-۱.۲۴ شکل ۵-۹۳: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-15m-Steel)
-۱.۲۵ شکل ۵-۹۴: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-20m-Steel)
-۱.۲۶ شکل ۵-۹۵: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-10m-Steel)
-۱.۲۷ شکل ۵-۹۶: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-15m-Steel)
-۱.۲۸ شکل ۵-۹۷: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-20m-Steel)
-۱.۲۹ شکل ۵-۹۸: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-10m-Steel)
-۱.۳۰ شکل ۵-۹۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-15m-Steel)
-۱.۳۱ شکل ۵-۱۰۰: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-20m-Steel)
-۱.۳۳ شکل ۵-۱- نمودار جابجایی بر اساس فاصله از محل انفجار در محل سنجه ۴ (مخازن بتنی)
-۱.۳۴ شکل ۵-۲- نمودار جابجایی بر اساس فاصله از محل انفجار در محل سنجه ۴ (مخازن فولادی)

پیوست

.....۱.۴۴.....	پ ۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱.۴۴.....	پ ۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱.۴۴.....	پ ۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱.۴۵.....	پ ۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱.۴۵.....	پ ۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱.۴۵.....	پ ۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱.۴۶.....	پ ۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱.۴۶.....	پ ۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱.۴۶.....	پ ۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱.۴۷.....	پ ۱۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱.۴۷.....	پ ۱۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱.۴۷.....	پ ۱۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱.۴۸.....	پ ۱۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱.۴۸.....	پ ۱۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱.۴۸.....	پ ۱۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱.۴۹.....	پ ۱۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱.۴۹.....	پ ۱۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱.۴۹.....	پ ۱۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱.۵:.....	پ ۱۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱.۵:.....	پ ۲۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱.۵:.....	پ ۲۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱.۵۱.....	پ ۲۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱.۵۱.....	پ ۲۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)

.....۱۵۱.....	پ ۲۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱۵۲.....	پ ۲۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۵۲.....	پ ۲۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۵۲.....	پ ۲۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۵۳.....	پ ۲۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۵۳.....	پ ۲۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۵۳.....	پ ۳۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۵۴.....	پ ۳۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۵۴.....	پ ۳۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۵۴.....	پ ۳۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۵۵.....	پ ۳۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۵۵.....	پ ۳۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۵۵.....	پ ۳۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۵۶.....	پ ۳۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۵۶.....	پ ۳۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۵۶.....	پ ۳۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۵۷.....	پ ۳۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۵۷.....	پ ۴۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۵۷.....	پ ۴۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۵۸.....	پ ۴۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۵۸.....	پ ۴۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۵۸.....	پ ۴۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۵۹.....	پ ۴۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۵۹.....	پ ۴۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۵۹.....	پ ۴۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)

.....۱۶۰.....	پ ۴۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۶۰.....	پ ۴۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۶۰.....	پ ۵۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۶۱.....	پ ۵۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۶۱.....	پ ۵۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۶۱.....	پ ۵۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۶۲.....	پ ۵۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۶۲.....	پ ۵۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۶۲.....	پ ۵۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۶۳.....	پ ۵۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۶۳.....	پ ۵۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۶۳.....	پ ۵۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۶۴.....	پ ۶۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۶۴.....	پ ۶۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۶۴.....	پ ۶۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۶۵.....	پ ۶۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۶۵.....	پ ۶۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۶۵.....	پ ۶۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۶۶.....	پ ۶۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۶۶.....	پ ۶۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۶۶.....	پ ۶۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۶۷.....	پ ۶۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۶۷.....	پ ۷۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۶۷.....	پ ۷۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۶۸.....	پ ۷۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)

.....۱۶۸.....	پ ۷۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱۶۸.....	پ ۷۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱۶۹.....	پ ۷۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱۶۹.....	پ ۷۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)
.....۱۶۹.....	پ ۷۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱۷۰.....	پ ۷۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱۷۰.....	پ ۷۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱۷۰.....	پ ۸۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱۷۱.....	پ ۸۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)
.....۱۷۱.....	پ ۸۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱۷۱.....	پ ۸۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱۷۲.....	پ ۸۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱۷۲.....	پ ۸۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱۷۲.....	پ ۸۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)
.....۱۷۳.....	پ ۸۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱۷۳.....	پ ۸۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱۷۳.....	پ ۸۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱۷۴.....	پ ۹۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱۷۴.....	پ ۹۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)
.....۱۷۴.....	پ ۹۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱۷۵.....	پ ۹۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱۷۵.....	پ ۹۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱۷۵.....	پ ۹۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱۷۶.....	پ ۹۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)
.....۱۷۶.....	پ ۹۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)

.....۱۷۶.....	پ ۹۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱۷۷.....	پ ۹۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱۷۷.....	پ ۱۰۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱۷۷.....	پ ۱۰۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)
.....۱۷۸.....	پ ۱۰۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۷۸.....	پ ۱۰۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۷۸.....	پ ۱۰۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۷۹.....	پ ۱۰۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۷۹.....	پ ۱۰۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)
.....۱۷۹.....	پ ۱۰۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۸۰.....	پ ۱۰۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۸۰.....	پ ۱۰۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۸۰.....	پ ۱۱۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۸۱.....	پ ۱۱۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)
.....۱۸۱.....	پ ۱۱۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۸۱.....	پ ۱۱۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۸۲.....	پ ۱۱۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۸۲.....	پ ۱۱۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۸۲.....	پ ۱۱۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)
.....۱۸۳.....	پ ۱۱۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۸۳.....	پ ۱۱۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۸۳.....	پ ۱۱۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۸۴.....	پ ۱۲۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۸۴.....	پ ۱۲۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)
.....۱۸۴.....	پ ۱۲۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)

.....۱۸۵.....	پ ۱۲۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۸۵.....	پ ۱۲۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۸۵.....	پ ۱۲۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۸۶.....	پ ۱۲۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)
.....۱۸۶.....	پ ۱۲۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۸۶.....	پ ۱۲۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۸۷.....	پ ۱۲۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۸۷.....	پ ۱۳۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۸۷.....	پ ۱۳۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)
.....۱۸۸.....	پ ۱۳۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۸۸.....	پ ۱۳۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۸۸.....	پ ۱۳۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۸۹.....	پ ۱۳۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۸۹.....	پ ۱۳۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)
.....۱۸۹.....	پ ۱۳۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۹۰.....	پ ۱۳۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۹۰.....	پ ۱۳۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۹۰.....	پ ۱۴۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۹۱.....	پ ۱۴۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)
.....۱۹۱.....	پ ۱۴۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۹۱.....	پ ۱۴۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۹۲.....	پ ۱۴۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۹۲.....	پ ۱۴۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۹۲.....	پ ۱۴۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)
.....۱۹۳.....	پ ۱۴۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)

.....۱۹۳.....	پ ۱۴۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۹۳.....	پ ۱۴۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۹۴.....	پ ۱۵۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۹۴.....	پ ۱۵۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)
.....۱۹۴.....	پ ۱۵۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۹۵.....	پ ۱۵۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۹۵.....	پ ۱۵۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۹۵.....	پ ۱۵۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۹۶.....	پ ۱۵۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)
.....۱۹۶.....	پ ۱۵۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۹۶.....	پ ۱۵۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۹۷.....	پ ۱۵۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۹۷.....	پ ۱۶۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۹۷.....	پ ۱۶۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)
.....۱۹۸.....	پیوست ۱۶۲: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (500kg -10m)
Error! Bookmark not defined.	پیوست ۱۶۳: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (500kg -15m)
.....۲:۰:۰.....	پیوست ۱۶۴: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (500kg -20m)
.....۲:۰:۲.....	پیوست ۱۶۵: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (1000kg -10m)
.....۲:۰:۴.....	پیوست ۱۶۶: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (1000kg -15m)
.....۲:۰:۶.....	پیوست ۱۶۷: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (1000kg -20m)
.....۲:۰:۸.....	پیوست ۱۶۸: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (2000kg -10m)
.....۲:۱:۰.....	پیوست ۱۶۹: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (2000kg -15m)
.....۲:۱:۲.....	پیوست ۱۷۰: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (2000kg -20m)
.....۲:۱:۴.....	پیوست ۱۷۱: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (500kg -10m)
.....۲:۱:۶.....	پیوست ۱۷۲: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (500kg -15m)

.....۲.۱۸	پیوست ۱۷۳: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (500kg - 20m)
.....۲.۲۰:	پیوست ۱۷۴: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (1000kg - 10m)
.....۲.۲۲	پیوست ۱۷۵: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (1000kg - 15m)
.....۲.۲۴	پیوست ۱۷۶: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (1000kg - 20m)
.....۲.۲۶	پیوست ۱۷۷: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (2000kg - 10m)
.....۲.۲۸	پیوست ۱۷۸: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (2000kg - 15m)
.....۲.۳۰:	پیوست ۱۷۹: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن فولادی (2000kg - 20m)
.....۲.۳۲.....	پ-۱۸۰ - مبانی روش‌های عددی مورد استفاده در هایدروکدها

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پدافند غیرعامل، به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود تا در صورت بروز جنگ، خسارات احتمالی به حداقل میزان خود برسد. به بیان دیگر هر اقدام غیر مسلحانه‌ای که موجب کاهش آسیب پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تاسیسات، تجهیزات، اسناد و شریان‌های کشور در مقابل عملیات خصمانه و مخرب دشمن گردد، پدافند غیرعامل گفته می‌شود. هدف از اجرای طرح‌های پدافند غیرعامل کاستن از آسیب پذیری نیروی انسانی و تاسیسات و تجهیزات حیاتی و حساس و مهم کشور علی‌رغم حملات خصمانه و مخرب دشمن و استمرار فعالیت‌ها و خدمات زیربنایی و تامین نیازهای حیاتی و تداوم اداره کشور در شرایط بحرانی ناشی از جنگ است. یکی از روش‌های در نظر گرفتن پدافند غیرعامل، مقاوم سازی سازه‌های موجود در برابر بارگذاری انفجار و طراحی سازه‌های جدید با در نظر گرفتن اصول طراحی مقاوم در برابر انفجار است [۱]. استفاده از مخازن سطحی برای نگهداری انواع سیالات نظیر (نفت، گاز، هوا و مواد غذایی) به طور گسترده در کشورهای مختلف جهان به کار گرفته شده است. گاهی اوقات عملیاتی‌هایی که منجر به بارگذاری انفجاری در سازه می‌گردد نظیر عملیات انتحاری، اکتشافات، تروریستی، باعث میشود تا این سازه‌ها نتوانند مقاومت مناسبی در برابر بارگذاری لحظه‌ای از خود نشان دهند در این پایان نامه به بررسی مخازن استوانه‌ای حاوی سیال تحت بارگذاری انفجاری پرداخته خواهد شد. هدف بررسی رفتاری فولاد و برهم کنش آن با سیال تحت بار لحظه‌ای انفجار می‌باشد. در این پایان نامه با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و به وسیله نرم افزار ANSYS AUTODYN مدل سازی شده و تحت بارگذاری انفجاری قرار خواهد گرفت. میزان بیش فشار حاصل از انفجار در حالت‌های مختلف مختلف بدست آمده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مخزن مد نظر در مقابل برخی از سناریوهای بارگذاری انفجاری فرضی آسیب پذیر خواهد بود. لذا بایستی جهت جلوگیری از ضرر اقتصادی، زیست محیطی و ... تدابیر لازم را از قبیل مقاوم سازی، پدافند غیرعامل و مدیریت بحرانپس از تخریب، در نظر گرفت. همچنین بر اساس این نتایج سطوح ایمنی در مخازن پیشنهاد شده است که براساس آن میزان ایمنی مخازن در مقابل انفجارهای سطحی مشخص می‌گردد.

۱-۲-هدف از تحقیق

طراحی سازه‌های ایمن در برابر بلاهای طبیعی مانند زلزله و همچنین انفجار از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این قبیل سازه‌ها تحلیل سازه نه تنها برای بارهای متعارف انجام می‌پذیرد بلکه مقاومت سازه در برابر بارهای ناشی از انفجار نیز در نظر گرفته می‌شود. از جمله تاسیسات مهم یک کشور می‌توان از مخازن نگهداری سیالات نام برد که بایستی در برابر آسیب‌های گوناگون همانند انفجار ایمن باشند. شکست سازه مخازن پس از انفجار علاوه بر زیان اقتصادی، ممکن است قطع آب و نشت مواد سمی را به همراه داشته باشد.

۱-۳- ضرورت تحقیق

امروزه با توجه به گسترش حملات انفجاری وارده بر سازه‌ها، 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 سازه‌های مدفون از جمله تونل‌های زیرزمینی دارای کاربردهای مختلف بوده و نقش حیاتی در حفظ جان و مال و تامین زیرساخت‌های اساسی کشور ایفا می‌کند، مقاوم سازی این گونه سازه‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. می‌توان با استفاده از تکنولوژی‌های روز دنیا و پیش بینی تمامی آسیب‌های احتمالی وارده بر تونل‌های زیرزمینی و بالطبع مقاوم سازی آن طبق نتایج تحقیقات حاصله گام بزرگی جهت حفظ جان و مال مردم و جلوگیری از آسیب‌های مادی و معنوی برداشت.

۱-۴- روش تحقیق

در این تحقیق دو مخزن بتنی و فولادی بر روی 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 سنج (گیج) هایی که در سقف و کف مخازن در امتداد بمب کار گذاشته

شده است استخراج شده و با بررسی نتایج حاصل بارگذاری این سنجه ها پیشنهادات لازم ارائه گردیده است .

۱-۵- استفاده کنندگان از نتایج پایان نامه

از نتایج تحقیق حاضر می توانند سازمان‌هایی نظیر : ارتش، راه‌سازی و پدافند غیرعامل ، سپاه جمهوری اسلامی در بهبود عملکرد هرچه بهتر سازه‌های بتنی و فولادی پس از ساخت استفاده کنند چرا که تخریب این گونه سازه‌ها پس از حوادث ناگهانی می‌تواند اثر نامطلوبی را از نظر اجتماعی و اقتصادی برجا بگذارد و باعث تلفات انسانی بسیار گردد.

۱-۶- کاربردهای تحقیق

می‌توان با ارائه تحقیق حاضر به طراحی مخازن فولادی با مقاومت بیشتر در برابر بارگذاری انفجاری پرداخت. تاثیر نوع بتن فولاد مصرفی با ثابت نگهداشتن سایر شرایط دیده خواهد شد همچنین با ارائه پیشنهاداتی به ساخت هرچه با کیفیت تر این گونه سازه‌ها اشاره می‌گردد.

۱-۷- فصل بندی

۱-۷-۱- فصل ۱: مقدمه

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

۱-۷-۲- 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.

۱-۷-۳- فصل ۳: آشنایی با روش SPH

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

۱-۷-۴- 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.

۱-۷-۵- فصل ۵: مدلسازی عددی انفجار

در این فصل انواع حالت‌های مدلسازی که در این پایان نامه 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.

۱-۷-۶- 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 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 و ... باشد. اما به هر حال رهاسازی انرژی باید ناگهانی باشد و یک محیط پرنرژی در اطراف مبدا ایجاد آن به وجود آورد.

۲-۲- انواع انفجار

انواع انفجارهایی که در محیط‌های باز و غیر مسدود رخ می‌دهند بر سه دسته اند: هوایی، سطحی و زیرزمینی.

الف) انفجارهای هوایی: انفجارهایی است که در ارتفاعی بالاتر از سطح هدف رخ می‌دهند. در این گونه انفجارها از سیستم‌های فیوز زمانی استفاده می‌شود 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 می‌شوند. در انفجارهای سطحی بر اثر بازتابش و تقویت موج اولیه به وسیله سطح زمین، موج بازتابشی تولید می‌شد که در همان نقطه انفجار با موج تابشی ترکیب شده و موج واحدی به وجود می‌آید که به شکل نیمه کره است. ذکر این نکته نیز ضروری است که متداول‌ترین روش حملات هوایی به مناطق و اهداف وسیع، بمباران‌های سطحی است.

ج) انفجار زیر سطحی: مشتمل بر انفجارهایی است که پس از نفوذ یک سیستم انفجاری به درون سطح هدف رخ می‌دهد. در این گروه از انفجارها که علیه اهداف مهم نظامی اجرا می‌شوند، 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 می‌شود:

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. سازه‌هایی 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 آن‌ها 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. ساختمان‌های بلند و کم عرض معمولاً در جهت عرضی ترک می خورند. در صورتی که در ساختمانهای مکعبی شکل، ترک‌ها، 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 ویژگی‌های 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 آتش‌سوزی در درون اهداف اشتعال‌پذیر. یک هدف به خصوص معمولاً فقط در برابر یکی از پنج مکانیزم فوق‌دارای بیشترین آسیب‌پذیری است. هر چند که در برابر دیگر مکانیزم‌ها با درجات کمتر همچنان آسیب‌پذیر 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 پراثری 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 مبنای و استانداردهایی در نظر گرفته شده است. یکی از مبنای 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]

۲-۱۱- منظر کلی آسیب ناشی از انفجار^۳

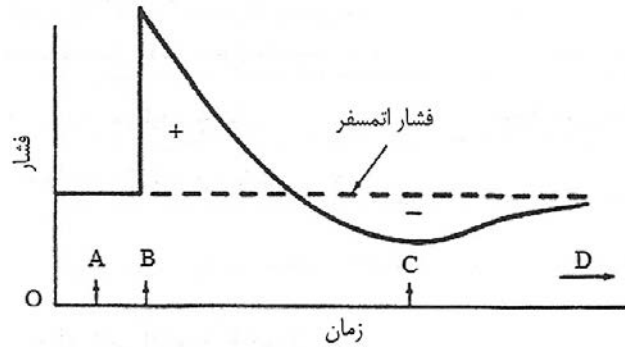
در شکل ۲-۱ نمودار تقریبی فشار - زمان در فاصله معین از یک انفجار ترسیم شده است؛ همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است این نمودار دارای جهش ناگهانی و فازهای مثبت و منفی است که در طول زمان گسترش یافته‌اند. شکل ۲-۱ تأثیرات اصابت این موج نمونه به هدف را آشکار می‌سازد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، زمان A 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

¹ TNT

² Explosive Strength

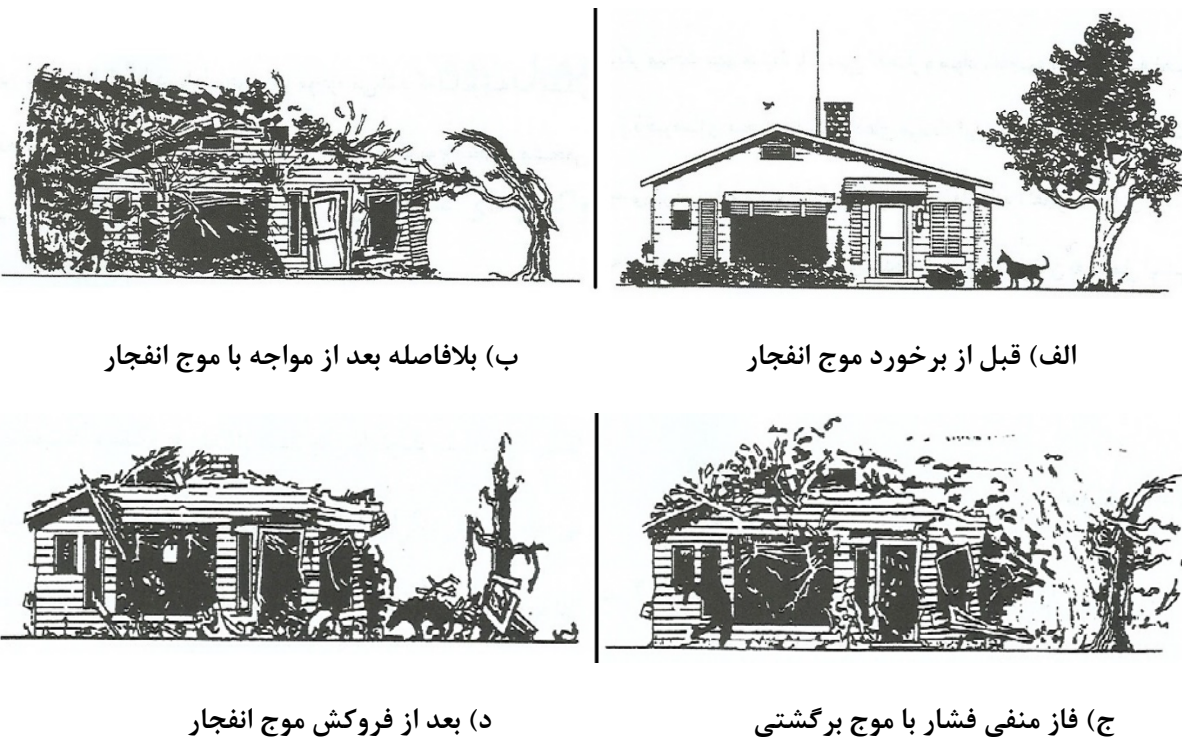
³ - Damaging Aspects

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

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



(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

۲-۱۲- 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 به‌صورت تجربی اندازه‌گیری می‌گردد. با به‌کارگیری کالری‌متر و رعایت نکات زیر می‌توان گرمای انفجار را به‌دست 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 منفجر 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:

$$-\Delta E = -(E_2 - E_1) \quad (1-2) \text{ گرمای انفجار}$$

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]

¹ Heat of Explosion

۲-۱۳- 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:

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

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

انرژی انفجاری:

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

¹ 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/g است و گرمای انفجار آن 2800 J/g 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]

۲-۱۴- 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:

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

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:

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

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

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:

(۹-۲)

$$S^0 = 65 + 20nj/mol K$$

که n تعداد اتم‌های موجود به جز هیدروژن و اکسیژن است. به‌علت 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 صرف‌نظر کردن است (رابطه ۲-۵). [۱]

۲-۱۵- قدرت انفجار (تخمین برتلوت^۱)

رابطه برتلوت تخمینی برای قدرت انفجاری مواد منفجره ارائه داده است. به‌طوری‌که 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 به‌صورت درصدی از قدرت انفجاری جرم معادل مواد منفجره استاندارد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{قدرت انفجاری (\%TNT)} = 840 \times \Delta n \times (-\Delta E) / FM^2 \quad (۱۰-۲)$$

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]

۲-۱۶- معادلات حالت گاز ایده‌آل

گسترش امواج حاصل از یک انفجار در هوای آزاد، تراکم هوا را به‌همراه خواهد داشت. چنان‌چه هوا به‌عنوان یک گاز ایده‌آل در نظر گرفته شود معادله حالت مرتبط با آن را به‌صورت مقابل می‌توان در نظر گرفت:

¹ Berthelot

$$PV = R_m T \quad (11-2)$$

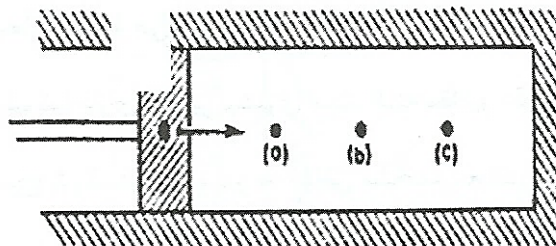
$$P\theta = RT \quad (12-2)$$

$$P = \rho RT \quad (13-2)$$

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 $8/314394 \text{ J/molK}$ می باشد. [۱]

۲-۱۷- تولید موج شوک

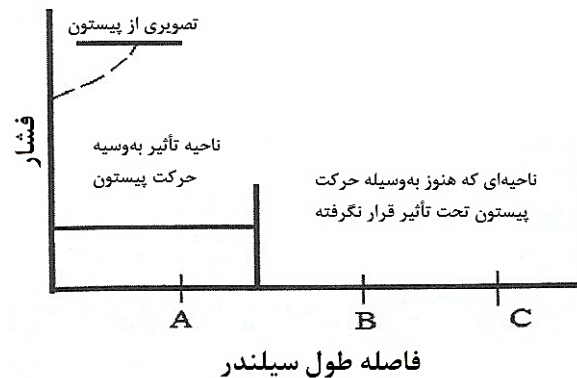
برای درک بهتر از چگونگی تولید موج شوک آزمایش زیر انجام می شود. یک راه برای تولید یک موج شوک، حرکت دادن سریع یک پیستون در طول یک سیلندر در بسته است، همانند آنچه در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است.



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

چنانچه پیستون به آرامی و زیر سرعت صوت در سیلندر حرکت داده شود، مولکول های سیال که در اثر این حرکت مغشوش شده اند، می توانند انرژی خود را به سایر مولکول ها منتقل کنند، به طوری که فشار در طول حرکت، خیلی آرام تغییر می کند. اما چنانچه سرعت حرکت پیستون بیش از سرعت صوت باشد، یک لایه از گاز فشرده شده با چگالی افزون تر و فشار بیشتر، نسبت به بقیه گاز داخل سیلندر در جلوی پیستون تشکیل خواهد شد. به طوری که یک خط (یا صفحه) که به عنوان جبهه موج شوک شناخته می شود 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. در حالی 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 به صورت 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]

۲-۱۸- برخوردها 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]

۲-۱۸-۱- 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 به‌سوی 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 مومنوم و با قرار دادن P_0 و U_0 برابر صفر خواهیم داشت:

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

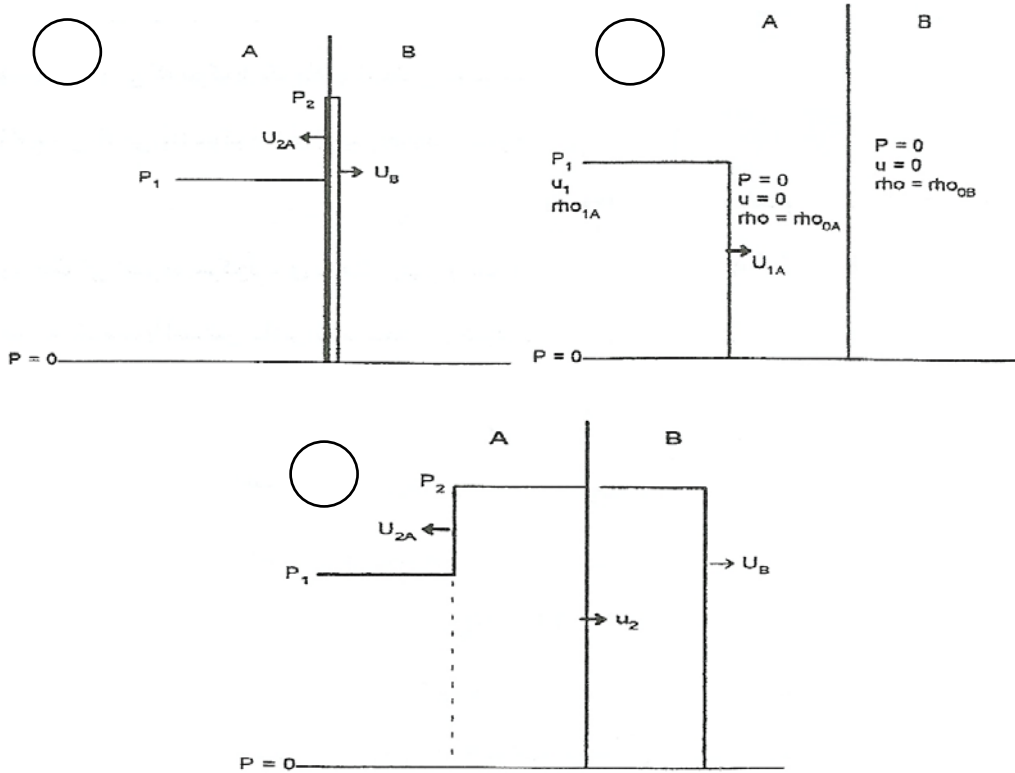
حاصل ضرب $U\rho_0$ تحت عنوان امپدانس^۱ (Z) شوک شناخته شده می‌شود.

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

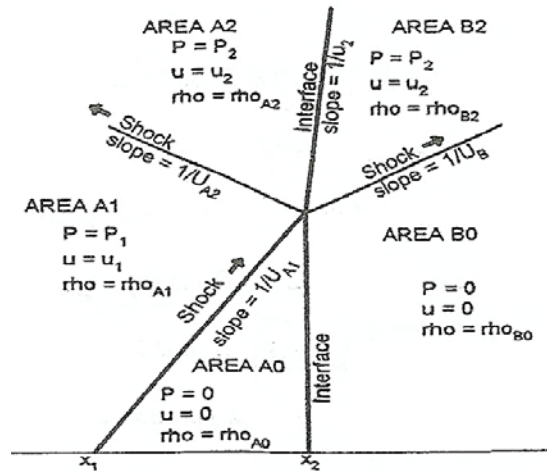
این نکته قابل توجه است که ρ_0 ثابت و U متغیر است، سرعت شوک با فشار افزایش می‌یابد. بنابراین فاکتور Z یا $U\rho_0$ با فشار، افزایش می‌یابد. اما این افزایش نسبتاً کند است و در حدود بازه‌های مورد بررسی می‌توان آن مقدار را تقریباً ثابت در نظر گرفت. با توجه به این موضوع می‌توان مواد را به دو دسته، ماده با امپدانس پایین و امپدانس بالا تقسیم کرد. وقتی که شوک از یک ماده با امپدانس کم در سطح مشترک به ماده دیگری با امپدانس 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 امپدانس پایین (A) و انتقال به یک ماده با امپدانس 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

¹ Impedance

به سوی ماده A نیز برمی گردد. این شوک چپ گرا ماده را از حالت A_1 به حالت A_2 جهش می دهد. فشارها و سرعت های ذره در سطح مشترک مساوی هستند.



شکل ۲-۵: دیاگرام فشار - جابه جایی، a قبل از برخورد b در هنگام برخورد c بعد از برخورد در دیاگرام $x-t$ شیب های خطوط، معکوس سرعت ها هستند، به همین دلیل هرچه شیب بیشتر باشد، سرعت کمتر است. دیاگرام $x-t$ بر اساس رفتار در مختصات اویلری کشیده شده است، بنابراین سرعت های شوک به دست آمده از این شیب ها همگی سرعت اویلری هستند.



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

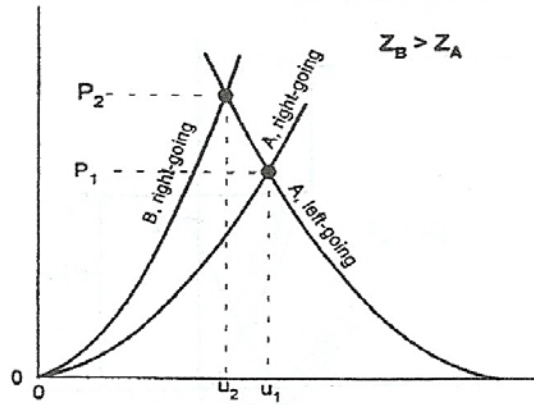
حل کامل چنین مسئله‌ای، مستلزم محاسبه مقادیر U_{AZ} ، U_{BZ} و u_2 و P_2 است. به این منظور ابتدا هوگونیت راست‌گرای A با فرض $u_0=0$ در نظر می‌گیریم، که این حالت، شوک A قبل از رسیدن آن به سطح مشترک می‌باشد. شکل ۲-۷ از شرایط مرزی مشخص هستند، که شوک در ماده A در شرایط u_1 و P_1 می‌باشد. با توجه به این‌که هوگونیت چپ‌گرا از این نقطه می‌گذرد، بنابراین می‌توان با انعکاس دادن هوگونیت حول این نقطه، هوگونیت چپ‌گرای A را به‌دست 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.

(۲-۱۶)

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

اکنون هوگونیت چپ‌گرای ماده A که از نقطه u_1 و P_1 عبور می‌کند مشخص گردیده است، بنابراین با ترسیم هوگونیت راست‌گرای 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 (u_1 و P_1) تا (u_2 و P_2) پیدا می‌شود و سرعت شوک برای موج برگشتی در A از شیب خط اتصال بین u_1 و P_1 تا u_2 و P_2 به‌دست می‌آید. همان‌گونه که در شکل ۲-۷ نمایان است، فشار موج شوک به هنگام عبور از یک ماده با

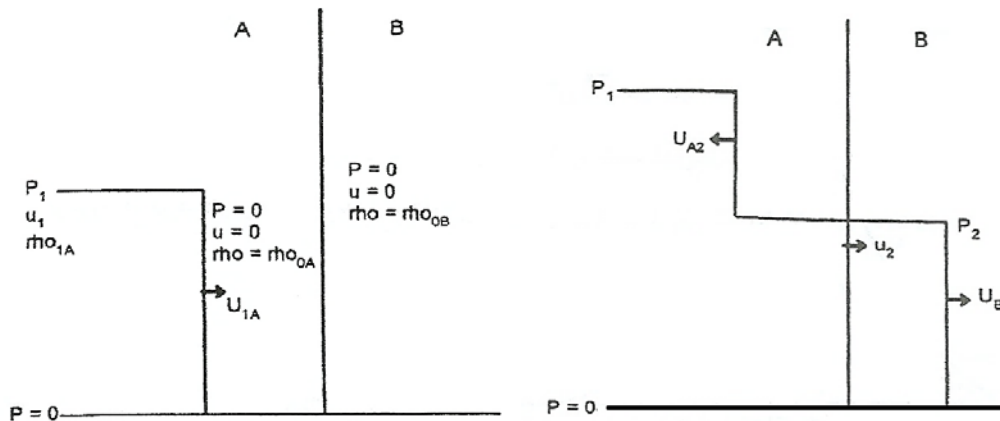
امپدانس پایین و انتقال به ماده با امپدانس بالاتر، افزایش می‌یابد. [۱]

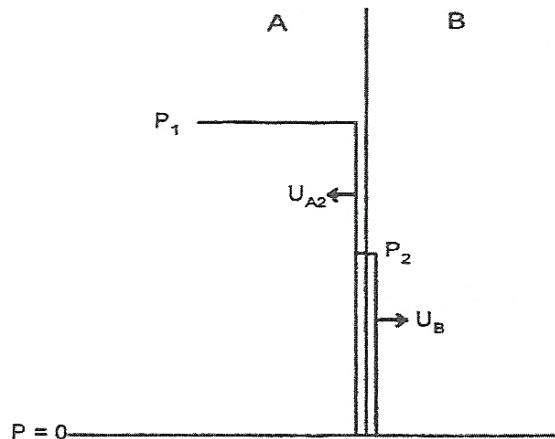


شکل ۲-۷: حل برای یک شوک در سطح مشترک در موردی که $(Z_A > Z_B)$

۲-۱۸-۲- شوک در سطح مشترک ماده حالت ب $(Z_A > Z_B)$

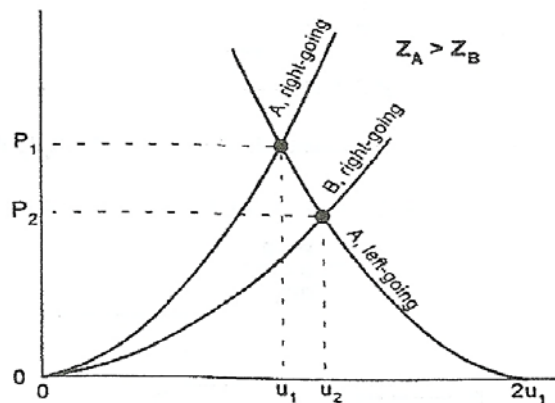
مشابه حالت قبل تغییرات $p-x$ در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. همین‌طور نمودار $x-t$ برای این حالت انتقال موج شوک مانند حالت قبل است.





شکل ۲-۸: دیاگرام‌های $p-x$ در سطح مشترک مواد در حالتی که $Z_A > Z_B$ قبل از برخورد a و بعد از برخورد c در هنگام 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 هوگنیت‌های 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 به‌جای یک موج چپ‌گرا در ماده A به حرکت درمی‌آید. مطابق حالت قبل یک موج شوک راست‌گرا نیز در ماده B به حرکت درمی‌آید. [۱]

¹ Rare Fraction Wave

فصل سوم

آشنایی با روش SPH

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، مهندسیین 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، مهندسیین 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 به‌دلیل 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 به راحتی 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 ... به چشم 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 به خاطر گستردگی و در دسترس بودن، شاید در کشور ما بیشتر مورد توجه باشد. این که نرم‌افزار ابتدا به صورت مستقل ارائه شد (یعنی یک بسته نرم‌افزاری) و سپس با گسترده‌تر شدن قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ^۷ به صورت یکی از نرم‌افزارهای عمل‌کننده تحت این برنامه درآمد. [۳]

۳-۲- روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۸

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

¹ Autodyn

² Dyna

³ Epic

⁴ Dysmas

⁵ Pronto

⁶ ZeuS

⁷ Ansys Workbench

⁸ Smoothed Particle Hydrodynamics

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.

۳-۳-۳- 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 می باشد که در روابط (۱-۳) و (۲-۳) ذکر شده اند.

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

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

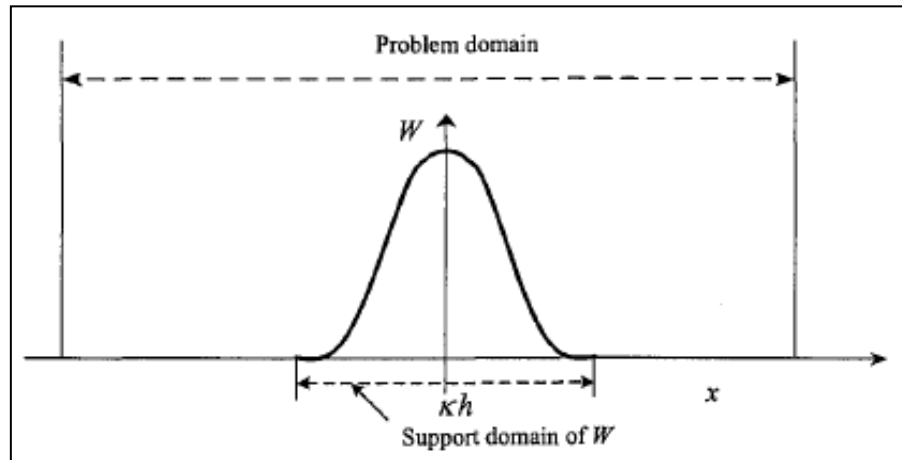
$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(\xi) \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \quad (2-3)$$

$u(x_i)$ مقدار تابع u در نقطه x_i می باشد. برای کاربردی نمودن خاصیت تابع دلتای دیراک، در روش SPH این تابع با تابع وزن w جایگزین می گردد. 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 می باشد. شکل این تابع به صورت زنگوله ای می باشد 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 شده اند.

(۳-۳)

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

که Ω_1 دامنه هموارسازی با دامنه تأثیر و $w(|x_j - x_i|, h)$ مقدار تابع وزن می باشد 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 می شود. مسائل حل شده در این پژوهش بر فرض مقدار $k=1$ استوارند. شکل ۱-۳ چگونگی تعریف این پارامترها را بر هندسه ی مسئله ای یک بعدی نشان می دهد.



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

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

$d\Omega_i$ 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.

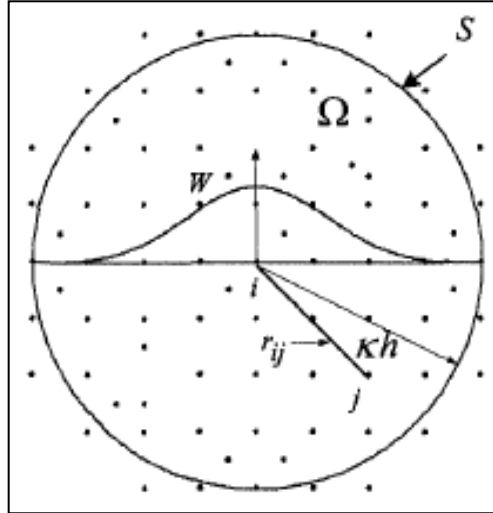
$$u(x_i) \approx u^h(x_i) = \int_{\Omega_i} u(x) w(|x - x_i|, h) d\Omega_i \quad (۴-۳)$$

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

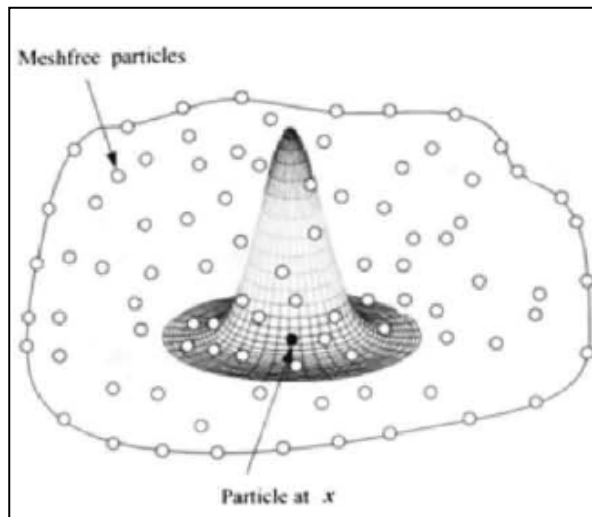
$$u^h(x_i) \approx \sum_{j=1}^N u_j w(|x_j - x_i|, h) \Delta v_j \quad (۵-۳)$$

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 (۳-۵) می‌توان مقادیر میانی از یک رشته داده گسسته را درونیابی نمود.



شکل ۳-۲: 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:

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

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

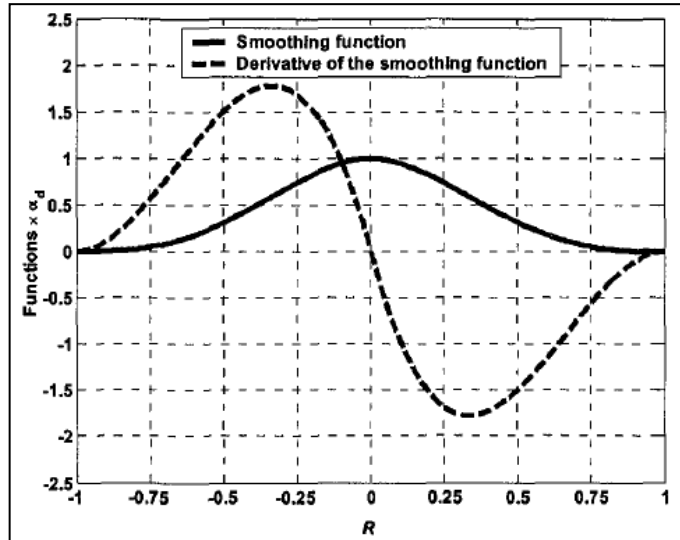
$$\text{مقادیر } \frac{105}{16\pi h^3}, \frac{5}{\pi h^2}, \frac{5}{4h} \text{ خواهد بود و } [3,4]. R = \frac{r_{ij}}{h}$$

فاصله‌ی نسبی بین دو ذره را این‌گونه تعریف می‌کنیم:

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = |x_{ij}| \quad (۷-۳)$$

$$s = \frac{r_{ij}}{h}$$

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]

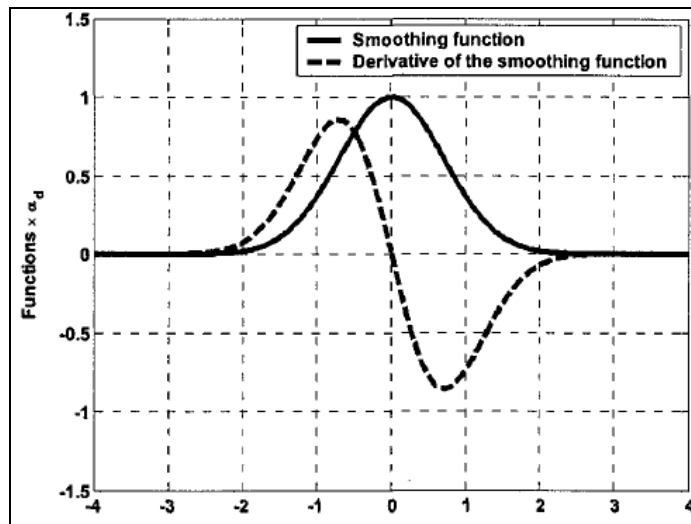
چندی بعد (1992) Monaghan در مقالات خود به این نتیجه رسید که هسته‌ی تابع هموار ساز SPH می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین منظور استفاده از تابع گاوسی را پیشنهاد نمود:

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

a_d تابع هموار ساز (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 هموار ساز *Monaghan* با هسته‌ی گاوسی و مشتق اولش [3]

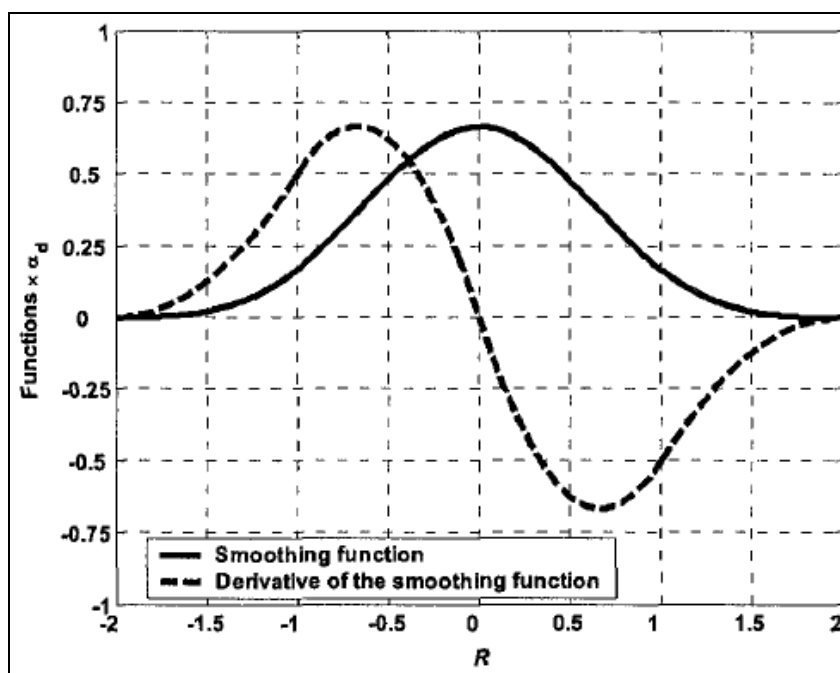
پس از تحقیقات متعدد، Monaghan and Lattanzio (1985) تابع هموارسازی برپایه‌ی کثیرالجمله‌های درجه سه ارائه کرد.

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

a_d تابع هموارساز (9-3)، 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]

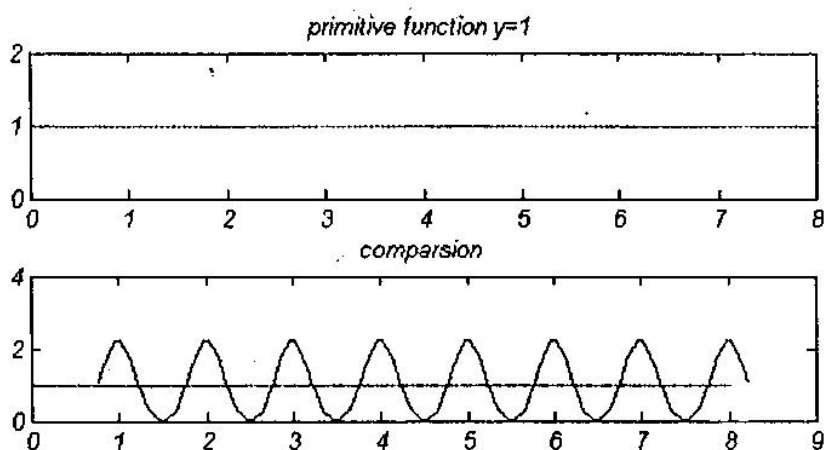
طی سالیان اخیر، محققان به فراخور موضوع کاری در صدد استخراج توابعی برآمدند که حداکثر کارایی و حداقل خطا را در آن زمینه فراهم آورد. لذا، دامنه‌ی گسترده‌ای از انواع گوناگون توابع هموارساز SPH در دسترس است که در ادامه به اهم آن‌ها در قالب جدول ۳-۱ اشاره‌ای گذرا خواهد شد.

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]

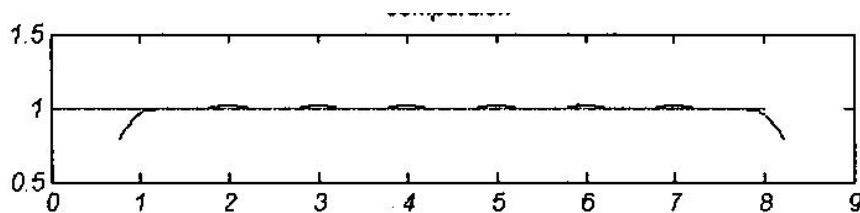
Name	Smoothing function $W(R, h)$	
Quartic (Lucy, 1977)	$\alpha_d(1 + 3R)(1 - R)^3$	$R \leq 1$
Gaussian (Gingold and Monaghan, 1977)	$\alpha_d e^{-R^2}$	
Piecewise cubic spline (Monaghan and Lattanzio, 1985)	$\alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2} R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \end{cases}$	
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

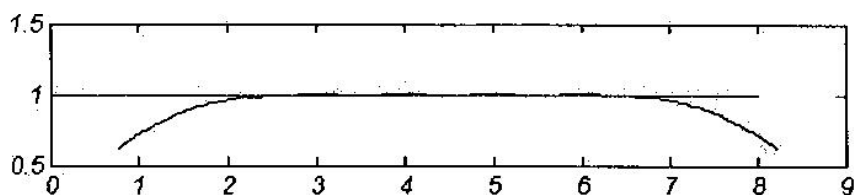
[3].SPH

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

[3].SPH

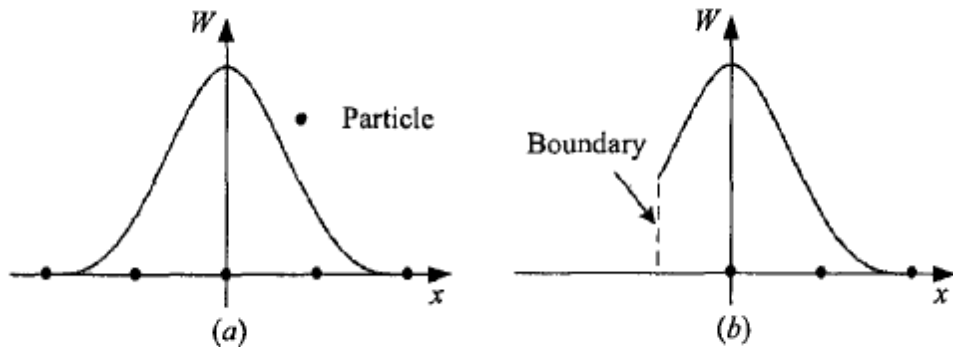


شکل ۳-۹: عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 1.55 است با استفاده از روش [3].SPH



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

نتیجه دیگری که از اشکال ۳-۷ تا ۳-۱۰ دریافت می‌گردد عدم دقت روش SPH در نقاط نزدیک به مرز و روی مرز 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]



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

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 (۴-۳). با استفاده از روش انتگرالگیری جزء به جزء امکان‌پذیر است. [۴]

$$\left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right) \approx \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i =$$

$$u(x) \cdot w(|x - x_i|, h) \Big|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i \quad (10-3)$$

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

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

$$s = |x - x_i| / h = r / h \quad (12-3)$$

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

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

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

$$\frac{dw(s, h)}{ds} = \alpha_d \begin{cases} -2s + 3/2s^2 & 0 \leq s < 1 \\ -0.5(2-s)^2 & 1 \leq s \leq 2 \\ 0 & s > 2 \end{cases} \quad (۱۳-۶)$$

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:

$$\left(\frac{\partial(u+c)}{\partial x_a}\right)_i^h = -\sum_{j=1}^N (u_j + c) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \approx -\sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j = \left(\frac{\partial u}{\partial x_a}\right)_i^h \quad (۱۴-۶)$$

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.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h &\approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_a^2} w(|x-x_i|, h) d\Omega_i = \\ &\left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right)_i^h \cdot w(|x-x_i|, h) \Big|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot \frac{\partial w(|x-x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i \\ &= \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot w(|x-x_i|, h) \Big|_0^{kh} - u(x) \cdot \frac{\partial w(|x-x_i|, h)}{\partial x_a} + \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial^2 w(|x-x_i|, h)}{\partial x_a^2} d\Omega_i \end{aligned} \quad (۱۵-۳)$$

توابع وزن به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که دو جمله اول رابطه (۱۵-۳) حتی‌المقدور 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 i واقع در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی i می‌باشد که از رابطه (16-3) محاسبه می‌گردد. با همین شیوه می‌توان رابطه کلی تری 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 (18-3) محاسبه می‌شود.

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

$$s = |x - x_i| / h = r / h \quad (18-3)$$

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

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

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.

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

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 آنچه 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 آنچه 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:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i = \frac{\int [u(x) - u(x_i)] w dx - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i \int (x - x_i) w dx}{\frac{1}{2} \int (x - x_i)^2 w dx} \quad (۳-۲۲)$$

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 (۳-۲۲) با w^s جایگزین می‌گردد و در نهایت فرم عددی رابطه (۳-۲۲) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۲۳) نوشت.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i^h = \frac{\sum_{j=i}^N (u_j - u_i) w_{ij}^s \Delta x_j - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i^h \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^s \Delta x_j}{\frac{1}{2} \sum_{j=i}^N (x_j - x_i)^2 w_{ij}^s \Delta x_j} \quad (۳-۲۳)$$

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

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i^h = \frac{\sum_{j=i}^N (u_j - u_i) w_{ij}^s \Delta x_j \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^a \Delta x_j - \sum_{j=1}^N (u_j - u_i) w_{ij}^a \Delta x_j \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) w_{ij}^s \Delta x_j}{\frac{1}{2} \sum_{j=i}^N w_{ij}^s (x_j - x_i)^2 \Delta x_j \sum_{j=1}^N w_{ij}^a (x_j - x_i) \Delta x_j} \quad (۳-۲۴)$$

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:

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

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]

$$du = W^{-1} \cdot u \quad (25-3)$$

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 شوونده 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 پایدارسازی

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 پایدار 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 پایدارسازی حل دارد. رابطه (۲۶-۳) یکی از متداول‌ترین ترم‌های پایدارساز می‌باشد که در سال ۱۹۸۳ توسط Monaghan و Gingold پیشنهاد شده است.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-a_1 \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta_1 \cdot \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & \text{if } v_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26-3)$$

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

که \bar{c}_{ij} متوسط سرعت موج در ذرات i, j بوده و ρ_{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 a_1, β_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.

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

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.

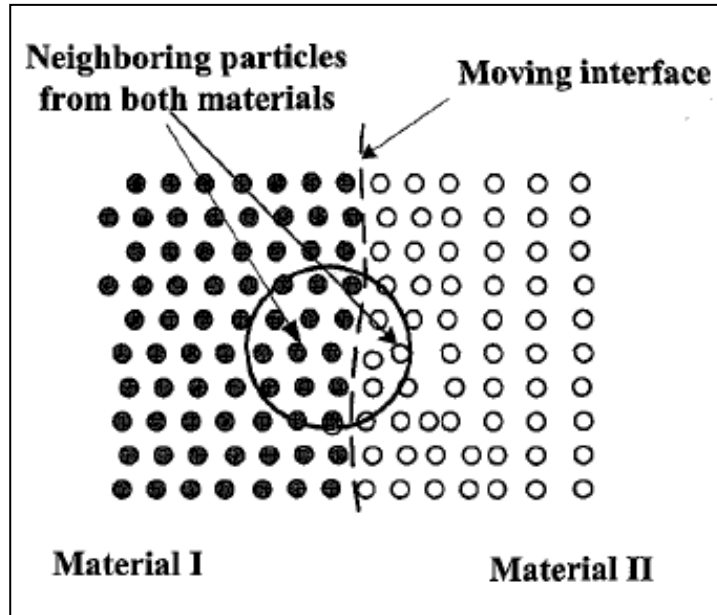
(ب) روش هموارسازی برای پایدارسازی

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

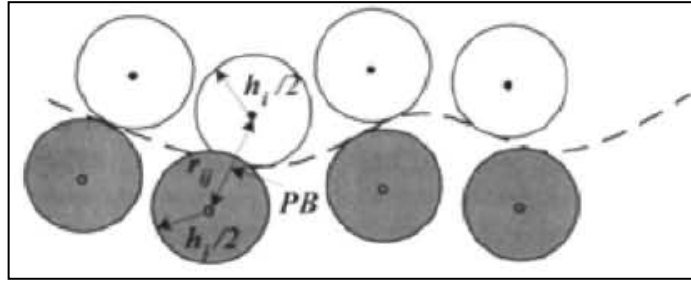
است که به طریقی از این درهم آمیختگی که محصول شدت میدان فشار و سرعت به ویژه حالات چند ماده‌ای (چند فازی) است. جلوگیری شود. همان‌گونه که در شکل ۳-۱۲ ملاحظه می‌شود، برخی از ذرات مرز مشترک مجاور دو ماده در یک گام زمانی، ممکن است در گام زمانی بعدی درون همسایگی ذره مرکزی نگنجند.



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 (۳-۲۹) به دست می‌آورند.

$$pe = \frac{h_i + h_j}{2r_{ij}} \geq 1 \quad (۳-۲۹)$$



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 (۳-۳۰) 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 پایدار ساز لزجت مصنوعی ملحوظ نمود:

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

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 پنالتی 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، جزییات 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. هم‌اکنون با در دست داشتن معادله حالت مناسب و سه معادله قبلی که حاصل 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 پایان‌نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد - دلایل انتخاب این روش از میان ده‌ها روش موجود و برتری‌های آن بر رقبا، 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]

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

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.

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

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

که در رابطه اخیر (33-3) 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 جمله‌ای درجه سه را برگزیدیم. دقت شود که W_{ij} دارای واحد معکوس حجم است. معادله (31-3) به سادگی بیان می‌کند که چگالی ذرات را می‌توان با میانگیری وزنی چگالی‌های ذرات موجود در دامنه پشتیبانی ذره مورد نظر تقریب زد.

رویکرد دوم

رویکرد دوم جهت تقریب ذرات را می‌توان چگالی پیوستگی دانست که چگالی را براساس معادله پیوستگی با استفاده از مفاهیم تقریبات SPH به همراه برخی تبدیلات دیگر، تقریب می‌زند. تبدیل با عملیات متفاوتی بر روی معادله پیوستگی (34-3) به شکل دیگری از معادلات تقریب چگالی می‌انجامد. یکی از راه‌های ممکن این است که تقریب SPH تنها بر روی قسمت دیورژانس میدان سرعت اعمال شود مادامی‌که چگالی در معادله پیوستگی (34-3) بر روی ذره‌ای که گرادیانش محاسبه می‌شود. برآورد شود. که با این تفاسیر و ذکر مجدد رابطه پیوستگی (34-3):

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

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

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]:

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

که می‌تواند در فرم زیر نوشته شود:

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

با افزودن معادله (37-3) که مطابق رابطه (36-3) صفر است، به معادله (35-3)، شکل دیگری از معادله تقریب چگالی به صورت زیر ارائه خواهد شد

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

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

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

معادله (39-3) 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 1985, 1982, 1988 و Libersky 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 (38-3) استفاده می‌کردند. یک شکل بسیار رایج‌تر از چگالی پیوستگی نیز این است که

مانند آنچه در رابطه (۳-۴۰) می بینیم، از ایده‌ای بهره گیریم که چگالی را به درون آرگومان عملگر گرادیان می برد:

$$-\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = -\left(\frac{\partial(\rho v^\beta)}{\partial x^\beta} - v^\beta \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta}\right) \quad (۳-۴۰)$$

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 گرادیان آنها ارزیابی می شود، مرسومترین معادله چگالی پیوستگی را به صورت زیر می توان عرضه نمود:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta - \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۳-۴۱)$$

معادله (۳-۴۱) به وضوح نشان می دهد که نرخ تغییرات چگالی یک ذره، در ارتباط مستقیم با سرعت‌های نسبی بین همان ذره و سایر ذرات موجود در دامنه پشتیبانی نظیرش است. گرادیان تابع هموارساز SPH، میزان مشارکت (سهام) این سرعت‌های نسبی را تعیین می کند. همان گونه 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 می دارد و این فرایند را با انتگرال گیری (مجموع گیری) از چگالی بر روی تمام دامنه مسئله و مساوی قرار دادن آن یا مجموع جرم تمام ذرات انجام می دهد حال آن که رویکرد چگالی پیوستگی فاقد این ویژگی است. (Fulk, 1994, Monaghan, 1992) با این حال، رویکرد چگالی مجموع دارای اثرات مرزی می باشد که هنگام به کارگیری برای ذرات روی مرز سیال بروز می کند و چگالی آنها را از هموار بودن (که اساس روش SPH است) خارج می کند و از این رو به نتایج غیرمنطقی و نادرست می انجامد. 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 نمی دهد. 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 میانگین گیری 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 فرمول‌بندی 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 گرادیان 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 مومنتوم 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:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{a\beta}}{\partial x^\beta} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{\sigma^{a\beta}}{\rho} \right) + \frac{\sigma^{a\beta}}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} \quad (46-3)$$

با در نظر داشتن رابطه (46-3) و به کارگیری تقریب SPH ذرات برای گرادیان، خواهیم داشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \rho_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (47-3)$$

پس از یک بازنویسی ساده و مرتب کردن رابطه‌ی (47-3) خواهیم داشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (48-3)$$

رابطه‌ی اخیر، رایج‌ترین بیان برای استخراج و ارزیابی مومنتوم به شمار می‌آید. می‌توان معادلات (3-48) و (48-3) را به ترتیب زیر و با جزئیات بیشتر نوشت:

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mu_i \varepsilon_i^{a\beta} + \mu_j \varepsilon_j^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (48-3)$$

$$\frac{Dv_i^a}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\mu_i \varepsilon_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\mu_j \varepsilon_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (49-3)$$

بخش اول از روابط (48-3) و (49-3) در واقع تقریب SPH برای فشار می‌باشند و قسمت دوم معادلات (48-3) و (49-3) 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:

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

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

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

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} = v_i^\beta \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} \right) = 0 \quad (۳-۵۱)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i^\alpha \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = v_i^\alpha \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \right) = 0 \quad (۳-۵۲)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_i \nabla_i W_{ij} = v_i \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \nabla_i W_{ij} \right) = 0 \quad (۳-۵۳)$$

با تفریق کردن اتحادهای سه گانه‌ی فوق از معادله (۳-۵۰) برای این که 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:

$$\varepsilon_i^{a\beta} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^\beta \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^a} + \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^a \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \left(\frac{2}{3} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji} \nabla_i W_{ij} \right) \delta^{a\beta} \quad (۳-۵۳)$$

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:

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

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = \frac{p}{\rho^2} \left(-\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \right) = \frac{p}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} \quad (55-3)$$

با توجه به رابطه‌ی (۲۵-۷)، کار ناشی از فشار را می‌توان با استفاده مستقیم از فرمول‌بندی چگالی

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{p_i}{\rho_i^2} \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_1^\beta} \quad (56-3)$$

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = -\frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{p v^\beta}{\rho} \right) + v^\beta \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(\frac{p}{\rho} \right) \quad (57-3)$$

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i}{\rho_i^2} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_1^\beta} \quad (58-3)$$

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (59-3)$$

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

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{p_i}{\rho_i} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (60-3)$$

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x^\beta} (p v^\beta) - v^\beta \frac{\partial p}{\partial x^\beta} \right] \quad (61-3)$$

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

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_j}{\rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (62-3)$$

با جمع کردن رابطه (62-3) با (60-3)، یک معادله SPH مفید و عملی در مورد کار ناشی از فشار به دست می‌آید:

$$-\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i^\beta}{\partial x_i^\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (63-3)$$

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

فرم اول:

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

فرم دوم:

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

ذکر این نکته ضروری است که در ماهیت روابط (64-3) و (65-3) 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 3-1 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 ۱-۳ و ۳-۲ 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 روش‌های عددی در مدل‌سازی

۴-۱- شبیه سازی برای انفجار خاک و اثرات آن بر ساختارها با استفاده از روش SPH

در سال ۲۰۱۷ جیان یو چن و فوئی سانگ لیین از دپارتمان مکانیک دانشگاه و اترلو مقاله ای تحت عنوان شبیه سازی برای انفجار خاک و اثرات آن بر ساختارها با استفاده از روش SPH را در نشریه الزویویر به چاپ رساندند. در این مقاله آمده است:

شبیه سازی عددی انفجار مین زمینی یک کار بسیار دشوار است. در این مقاله روش هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH) برای مقابله با انفجار در خاک با تغییر شکل بسیار زیاد و اثرات انفجار بر ساختارها مورد استفاده قرار می گیرد. در ابتدا، ایده اولیه روش SPH و تکنیک های مرتبط با ویسکوزیته مصنوعی مونوگنه، در رابطه با نسبت تراکم بالا، اجرای شرایط مرزی، استرس مصنوعی، اصلاح گرادیان هسته و به روز رسانی فیزیکی متغیر است. سپس سه مسئله معیار برای تایید مدل های انفجار، خاک و ساختار به انجام می رسد. پس از آن، شبیه سازی انفجار در خاک و بارگیری آن در سازه بر اساس بررسی این سه مدل صورت گرفته است. مشاهده شد که محاسبات عددی توافق خوبی با نتایج تجربی است، که نشان می دهد که روش SPH می تواند مسائل مربوط به تغییر شکل بزرگ با نسبت تراکم بالا را به طور موثر حل کند. [۵]

۴-۲- مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار

ساز

در سال ۲۰۱۶ بهنام کریمی فرزقی و رضا نادری از دانشگاه صنعتی شاهرود مقاله ای تحت عنوان مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز را در نشریه علوم و فناوری های پدافند نوین، جلد ۸، شماره ۲ به چاپ رساندند. در این مقاله آوردند:

تحلیل دقیق تر و مطمئن تر سازه ها در صورتی امکان پذیر است که بتوان با دقت بیشتر عوامل مؤثر در تحلیل را شناسایی کرد. یکی از عوامل مهم در تحلیل، تعیین نوع و میزان بارگذاری سازه است. در بین انواع بارگذاری، بارهای دینامیکی به ویژه بارهای ناشی از انفجار و ضربه، بسیار پیچیده تر و تعیین دقیق آن ها مشکل تر می باشد. با توجه به مشکلات مدل سازی های آزمایشگاهی انفجار، استفاده از مدل سازی های عددی برای تحلیل این پدیده قابل توجه است. در این بین روش های با شبکه بندی مانند اجزای محدود با توجه به خصوصیات انفجار مانند سرعت بسیار بالا و تغییر شکل

های شدید، در برخی مواقع باعث ایجاد خطاهای عددی می شوند. در این مقاله انفجار در زیر آب، با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموارساز SPH توسط زبان برنامه نویسی فرتن برنامه نویسی و مدل سازی شده و فشار ناشی از انفجار در زیر آب و تغییرات سطح آب در اثر انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان نیز نتایج مثال حل شده با رابطه تجربی مورد مقایسه گرفته که نتایج قابل قبولی ارائه می نماید. برنامه نوشته شده می تواند برای مدل سازی های انفجار در آب مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل از این مدل سازی در تعیین فشار و ضربه وارد بر سازه های دریایی مورد استفاده قرار گیرد. [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، روشهای 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 ای 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 الزیویر 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 سیستمهای دینامیکی

در سال ۱۳۹۳ حسن استاد حسین و سهیل محمدی از دانشگاه مقاله ای تحت عنوان بهبود روش بدون المان SPH در حل سیستمهای 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 مدل سازی 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

پس از انجام مدلسازی و انجام تمام مراحل، نتایج حاصله را می‌پردازیم.

در این پایان نامه به بررسی اثر بارگذاری انفجاری به وسیله ماده منفجره TNT بر روی مخازن آب از جنس فولاد و بتن بر روی زمین در فواصل مشخص پرداخته شده است. مدلسازی به وسیله نرم افزار انسیس و تحلیل ها به وسیله هایدروکد اتوداین انجام شده است. جدول ۵-۱ حالت های مختلف بارگذاری انفجاری را نشان می دهد.

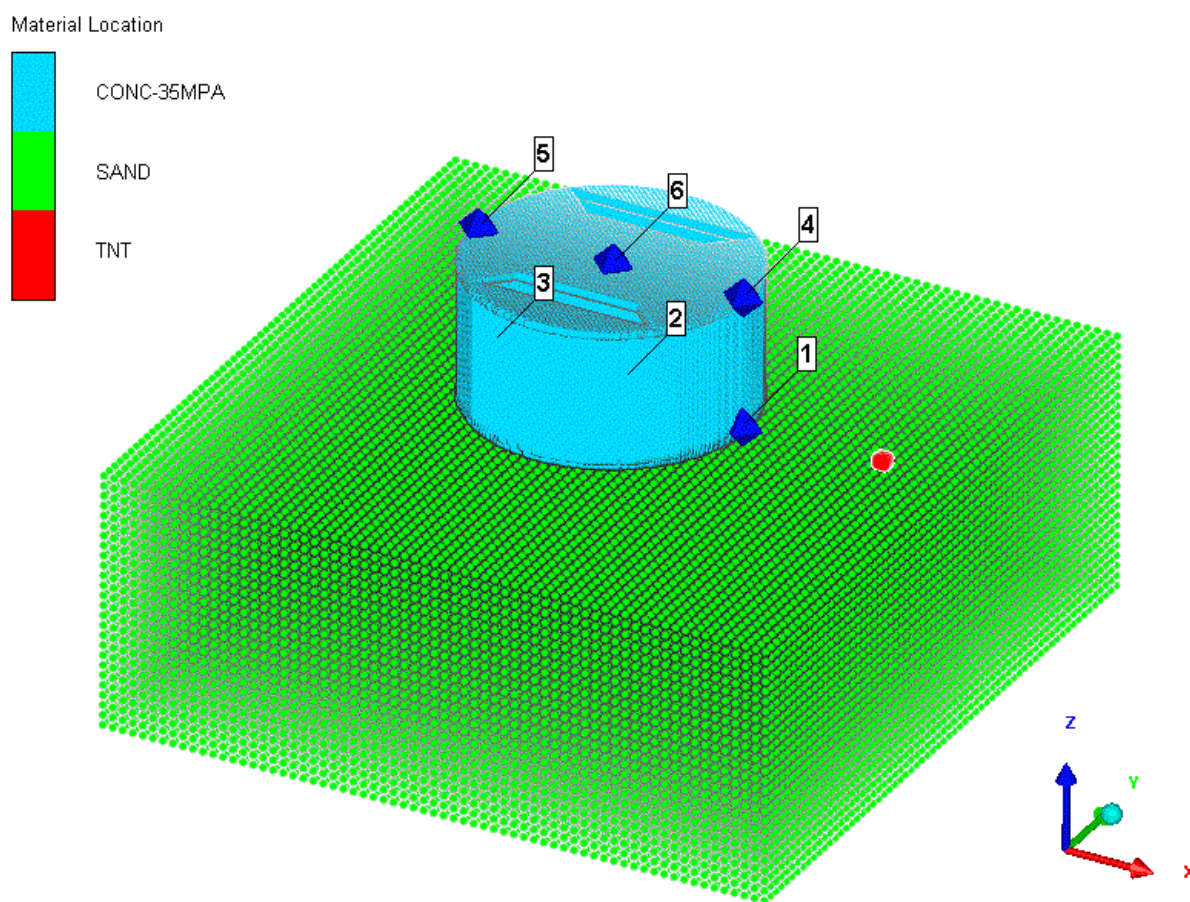
جدول ۵-۱- حالت های مختلف بارگذاری انفجاری بر روی مخازن

مخزن فولادی	مخزن بتنی	
فاصله ۱۰ متری	فاصله ۱۰ متری	۵۰۰ کیلوگرم TNT
فاصله ۱۵ متری	فاصله ۱۵ متری	
فاصله ۲۰ متری	فاصله ۲۰ متری	
فاصله ۱۰ متری	فاصله ۱۰ متری	۱۰۰۰ کیلوگرم TNT
فاصله ۱۵ متری	فاصله ۱۵ متری	
فاصله ۲۰ متری	فاصله ۲۰ متری	
فاصله ۱۰ متری	فاصله ۱۰ متری	۵۰۰۰ کیلوگرم TNT
فاصله ۱۵ متری	فاصله ۱۵ متری	
فاصله ۲۰ متری	فاصله ۲۰ متری	

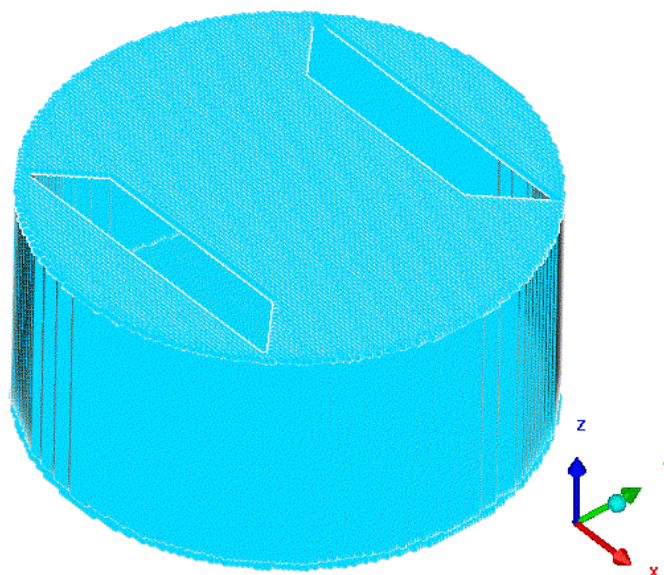
همانطور که در جدول ۵-۱ مشخص است مدلسازی در سه فاصله مختلف و هر حالت با سه جرم مختلف از ماده منفجره انجام شده اند.

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 نشان می‌دهد.

شکل ۱-۵ نمایی از مدلسازی مخازن بر روی سطح زمین را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵: مدل آماده به تحلیل

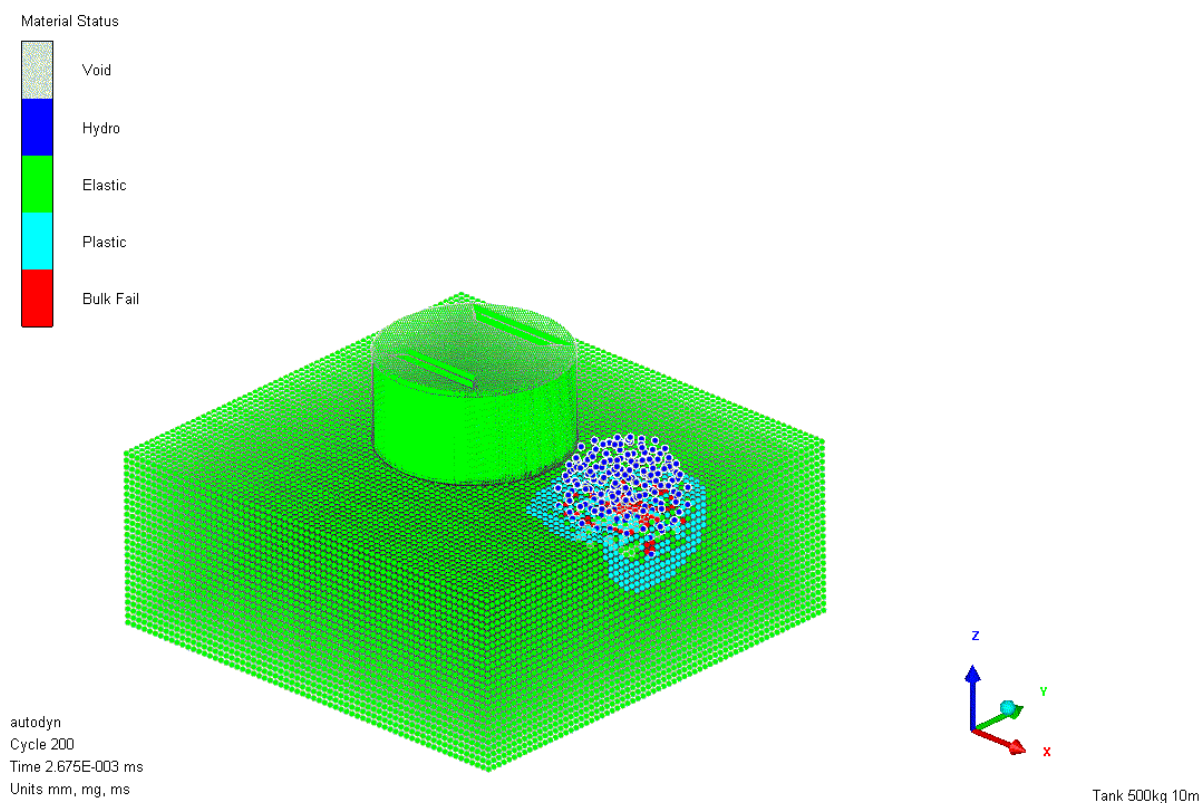


شکل ۵-۲: نمایی از مخزن مدلسازی شده

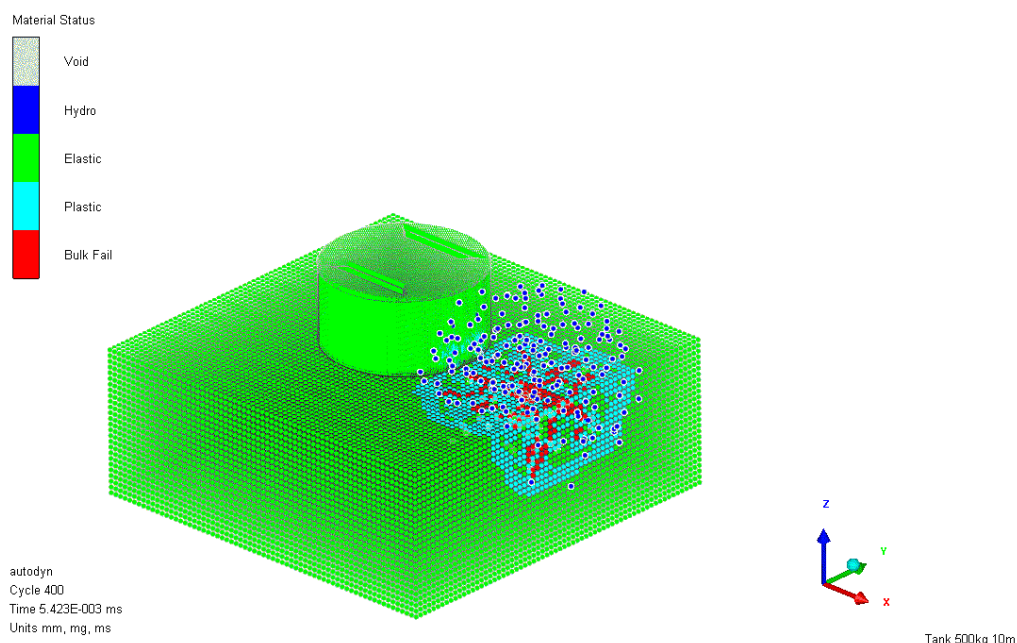
همانطور که در شکل مشخص است مخزن از نوع استوانه‌ای می‌باشد که بر روی سطح زمین قرار دارد. انفجار در فواصل مشخص از مخزن انجام خواهد شد و برای ثبت پارامترهای مربوط به انفجار تعداد ۶ سنجه^۱ بر روی قسمت‌های مختلف سطح مخزن قرار داده شده است.

اشکال ۵-۳ تا ۵-۱۲ نمایی از تغییرات و نحوه انتشار موج انفجار و اثرگذاری بر روی مخزن و سطح زمین را در یکی از حالها نشان می‌دهد.

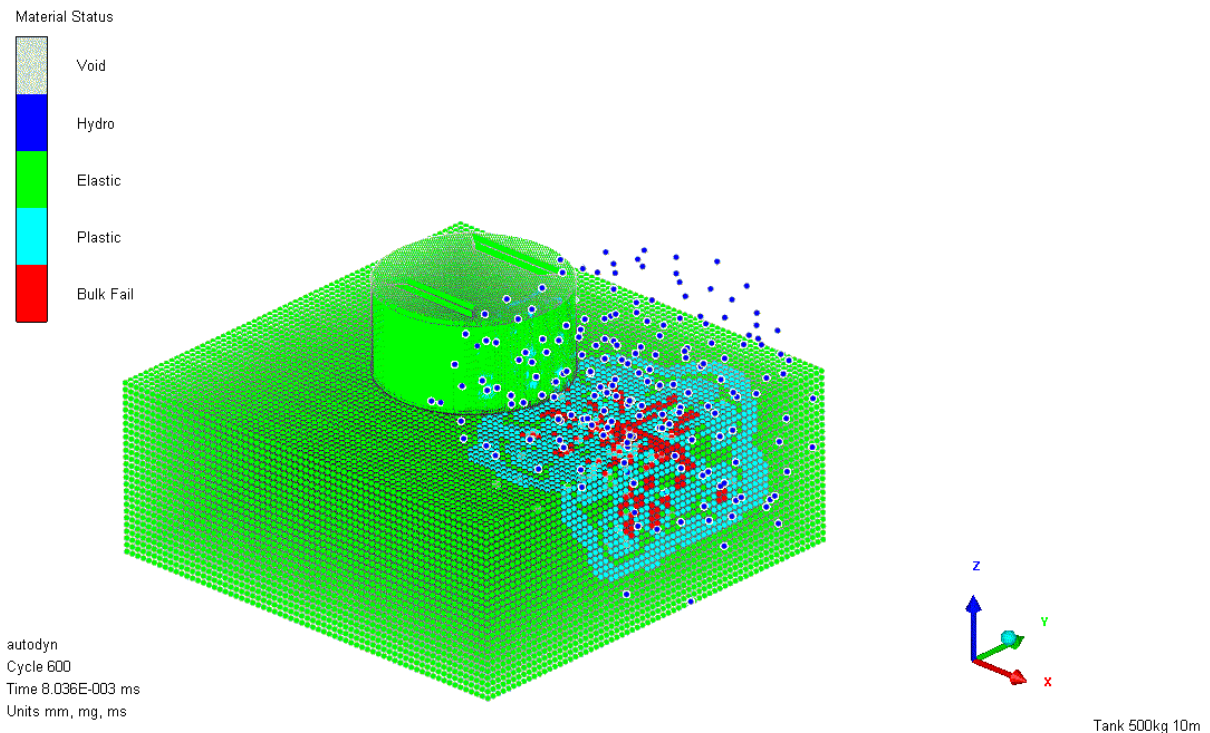
¹-Gauge



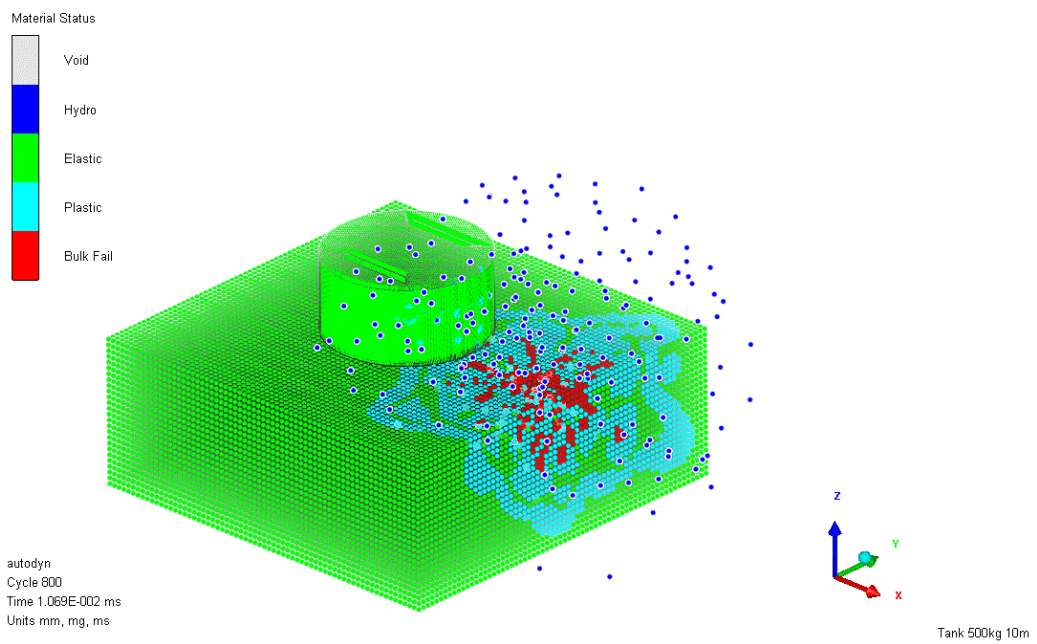
شکل ۵-۳: انتشار موج انفجار تا سیکل ۲۰۰



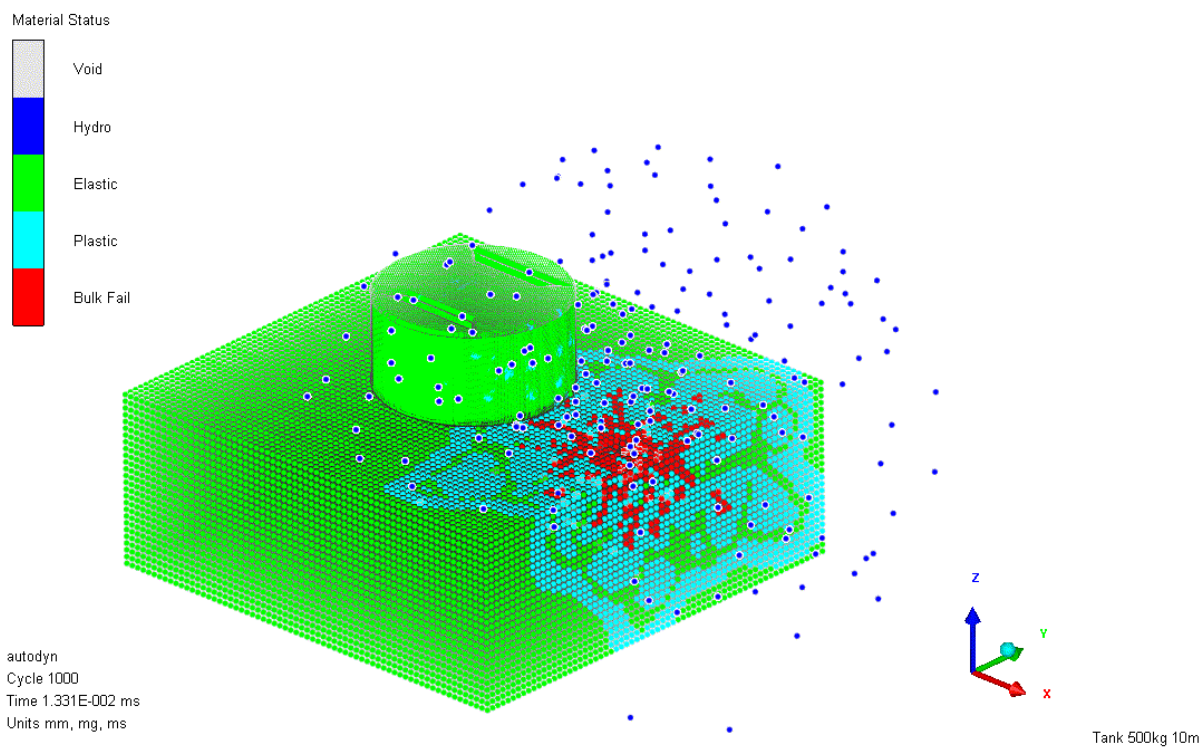
شکل ۵-۴: انتشار موج انفجار تا سیکل ۴۰۰



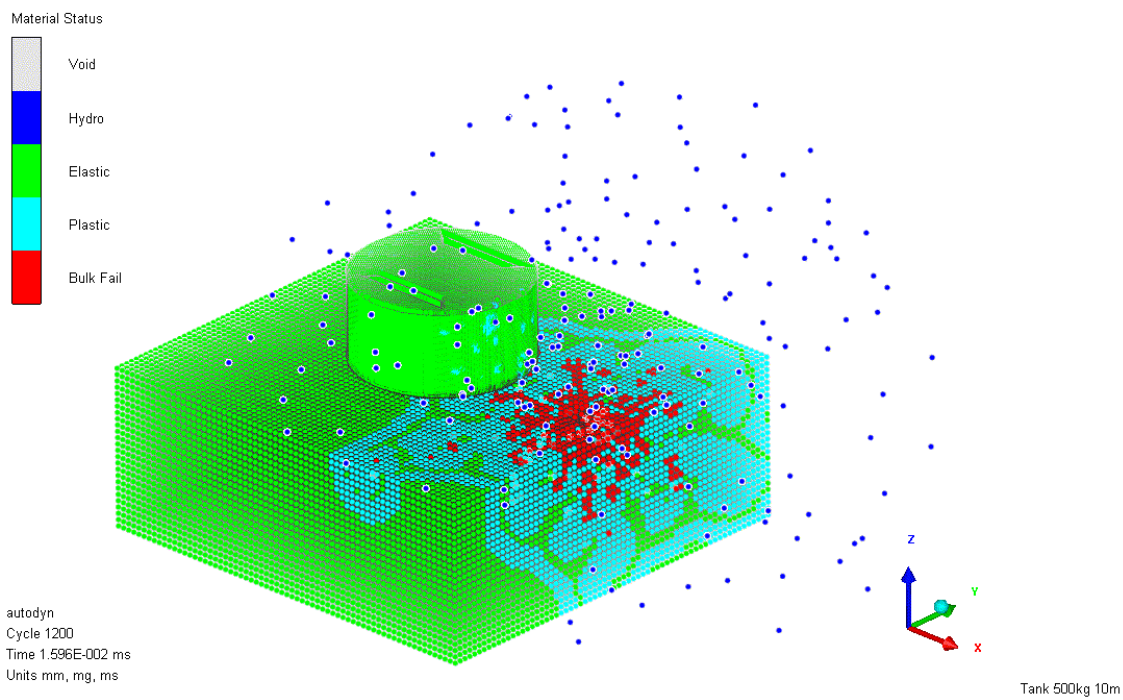
شکل ۵-۵: انتشار موج انفجار تا سیکل ۶۰۰



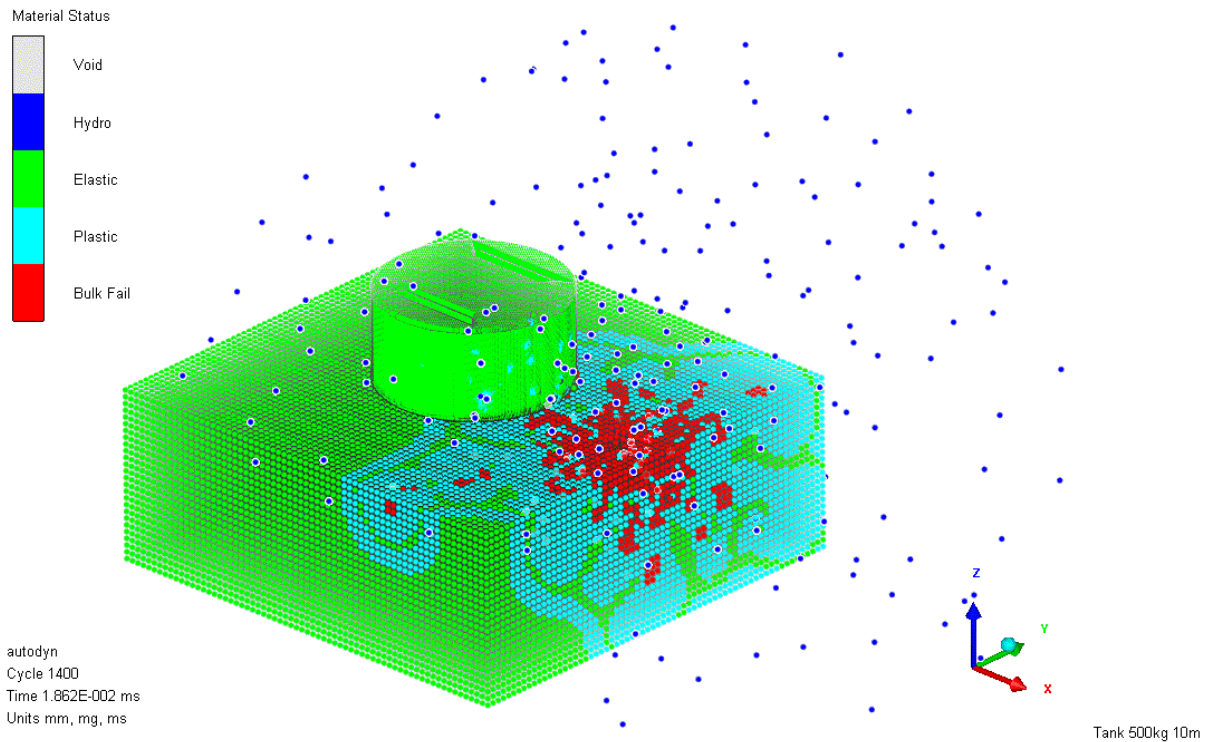
شکل ۵-۶: انتشار موج انفجار تا سیکل ۸۰۰



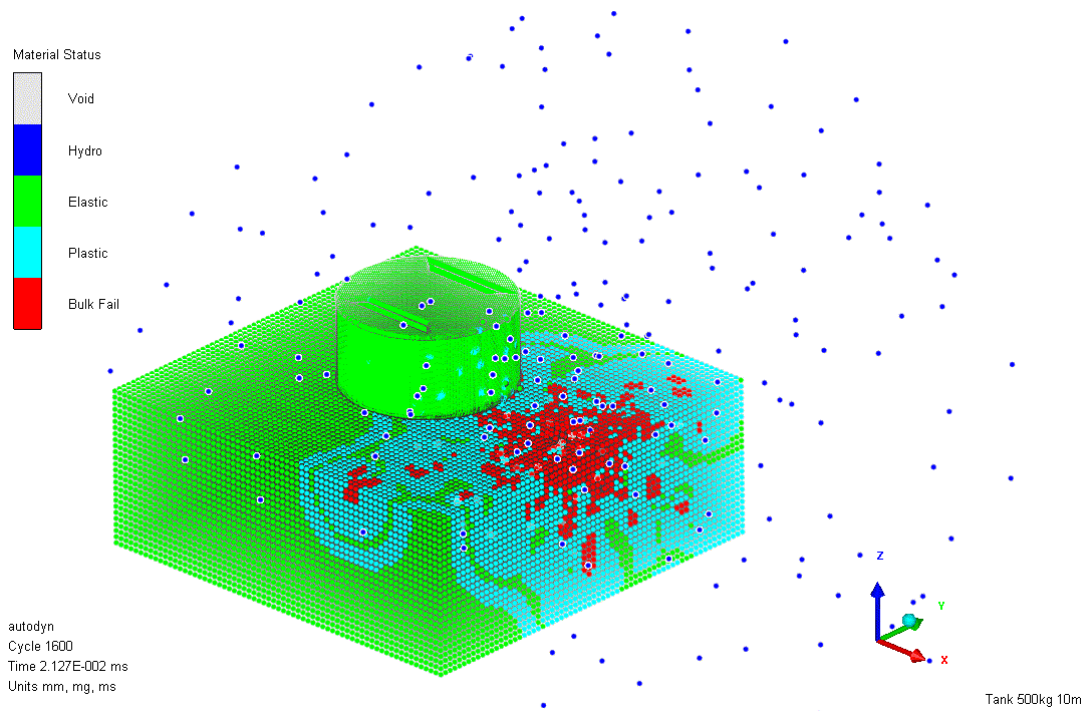
شکل ۵-۷: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۰۰۰



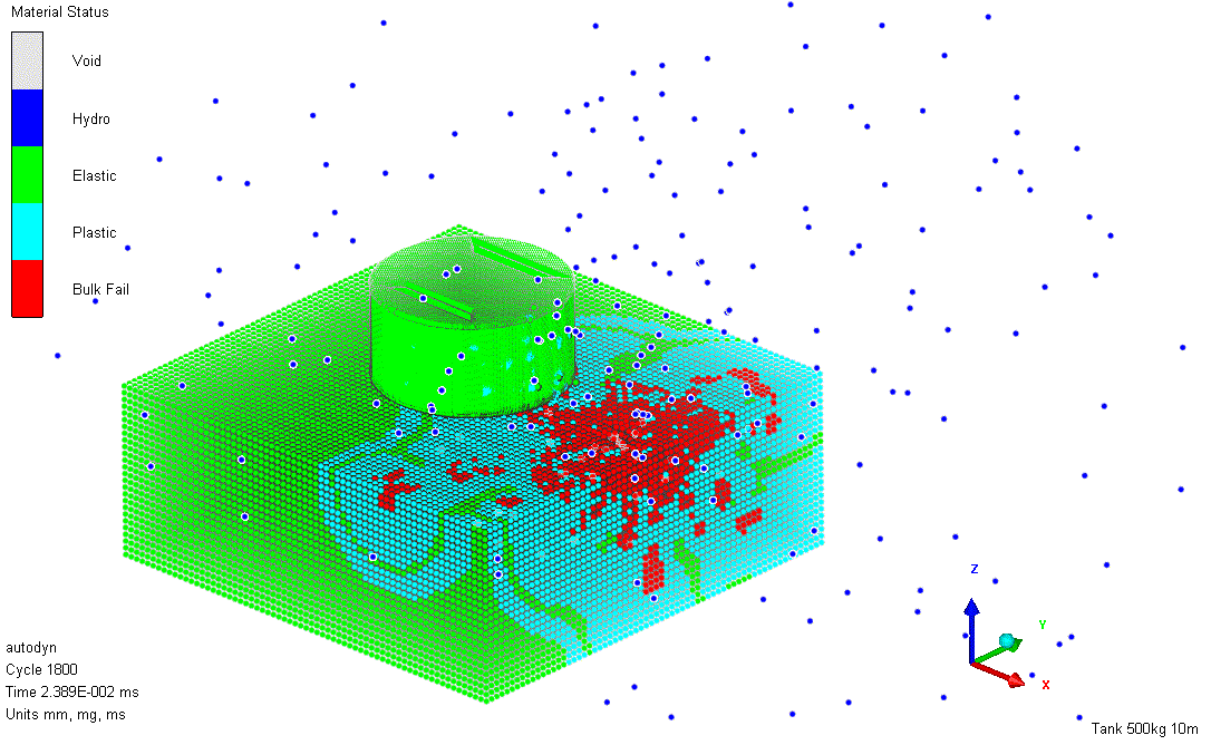
شکل ۵-۸: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۲۰۰



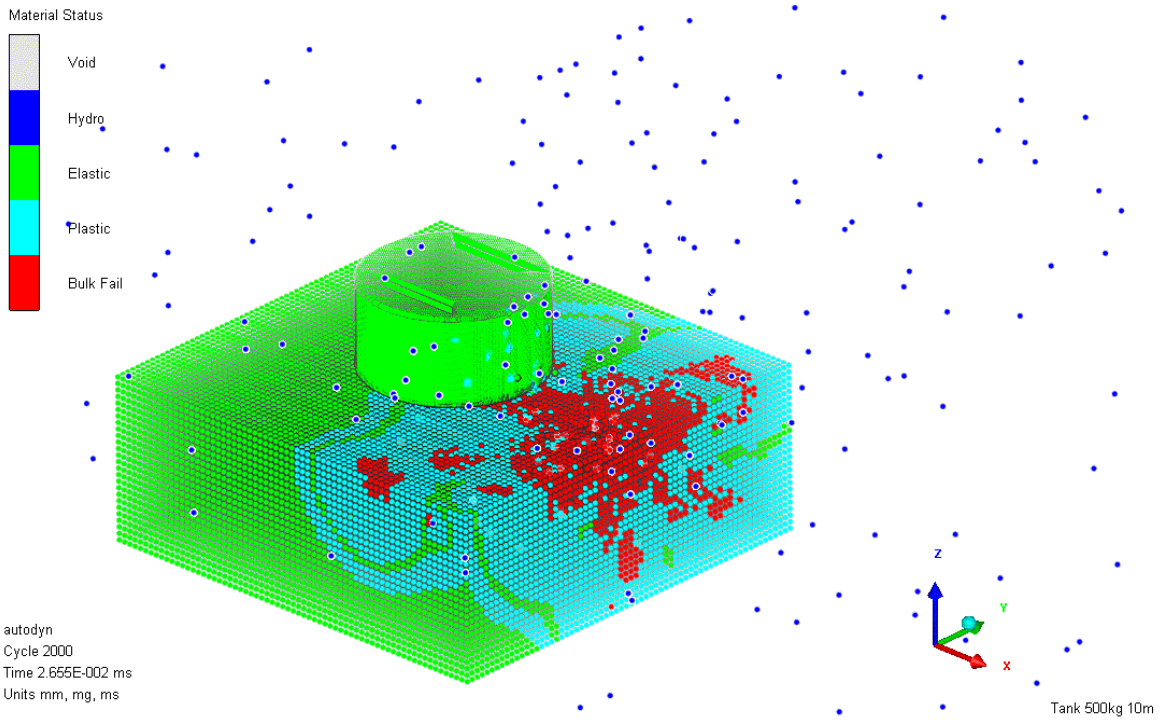
شکل ۵-۹: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۴۰۰



شکل ۵-۱۰: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۶۰۰



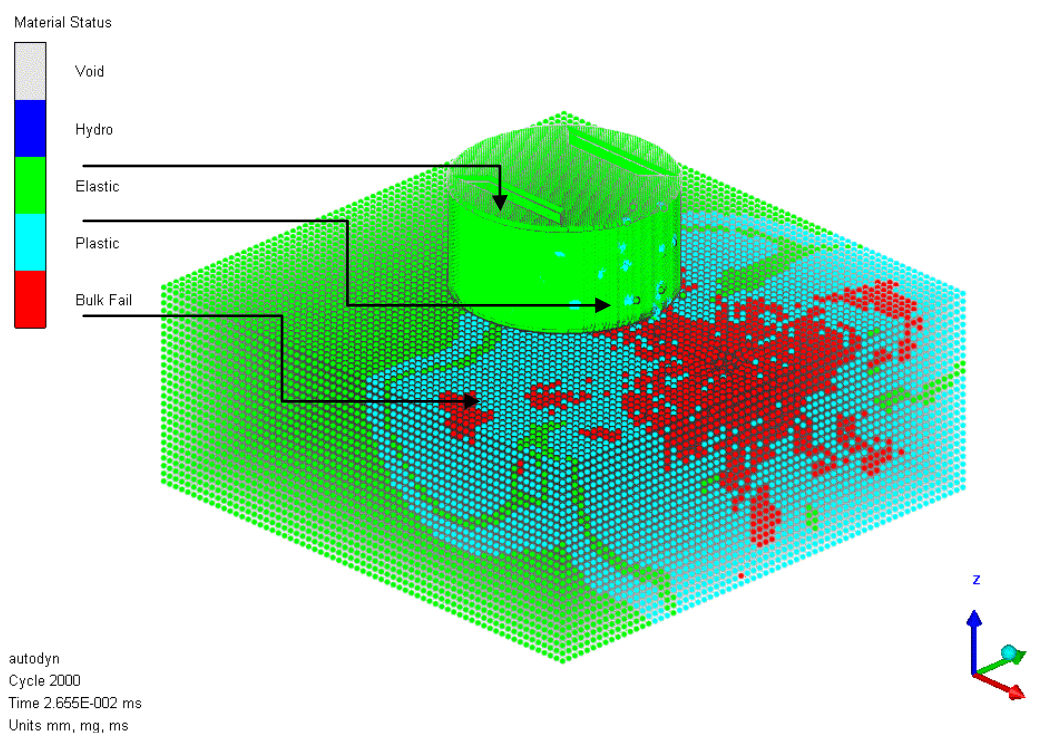
شکل ۵-۱۱: انتشار موج انفجار تا سیکل ۱۸۰۰



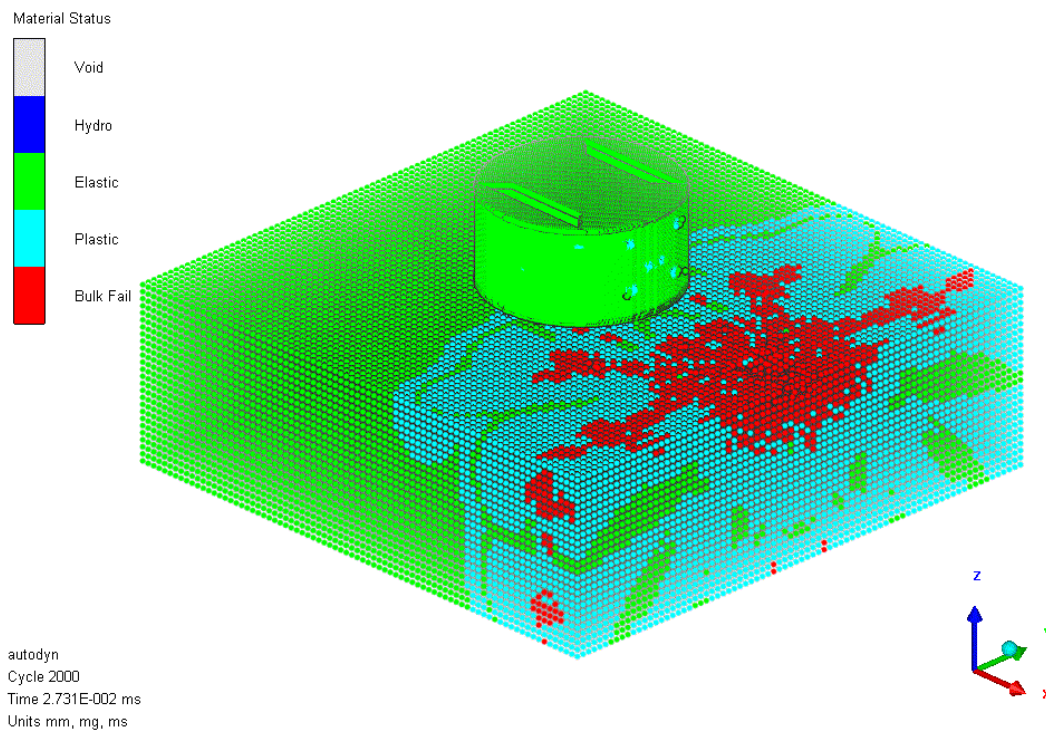
شکل ۵-۱۲: انتشار موج انفجار تا سیکل ۲۰۰۰ (سیکل آخر)

۵-۲- اثر بارگذاری بر روی مخازن بتنی

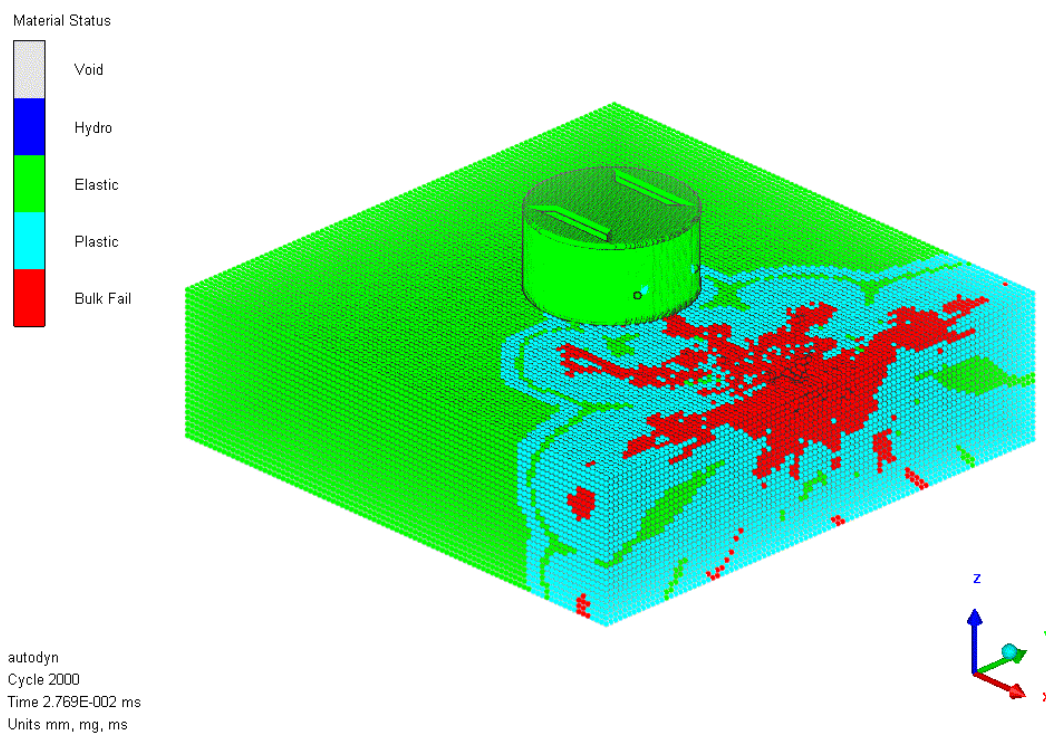
اشکال ۵-۱۳ اثر انفجار را بر روی سطح زمین و مخزن، در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری در سیکل ۲۰۰۰ (لحظه ۰/۰۲۶ میلی ثانیه) نشان می دهد. نواحی الاستیک (رنگ سبز)، پلاستیک (آبی فیروزه‌ای) و نواحی از بین رفته (رنگ قرمز) در شکل کاملاً مشخص هستند. در محل انفجار به دلیل فشار بالای انفجار گودالی حفر شده که همان ذرات قرمز رنگ می باشند. در ادامه نحوه انتشار موج شوک را سایر بخش‌های مدل که با رنگ آبی مشخص شده را ملاحظه می کنید. اشکال ۵-۱۴ تا ۵-۳۰ نیز این نواحی را در سایر حالت‌های بارگذاری نشان می دهد. همانطور که در اشکال دیگر قابل مشاهده است میزان اثرگذاری بار انفجاری با افزایش جرم ماده منفجره افزایش و با افزایش فاصله نقطه شروع انفجار کاهش می یابد.



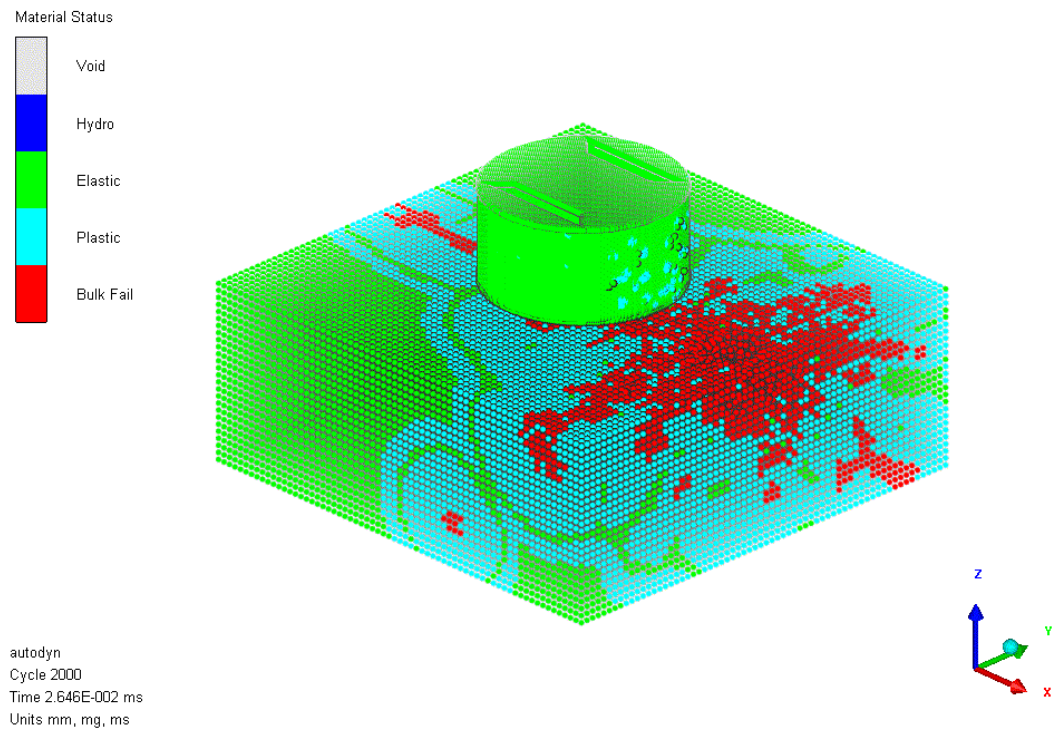
شکل ۵-۱۳: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر



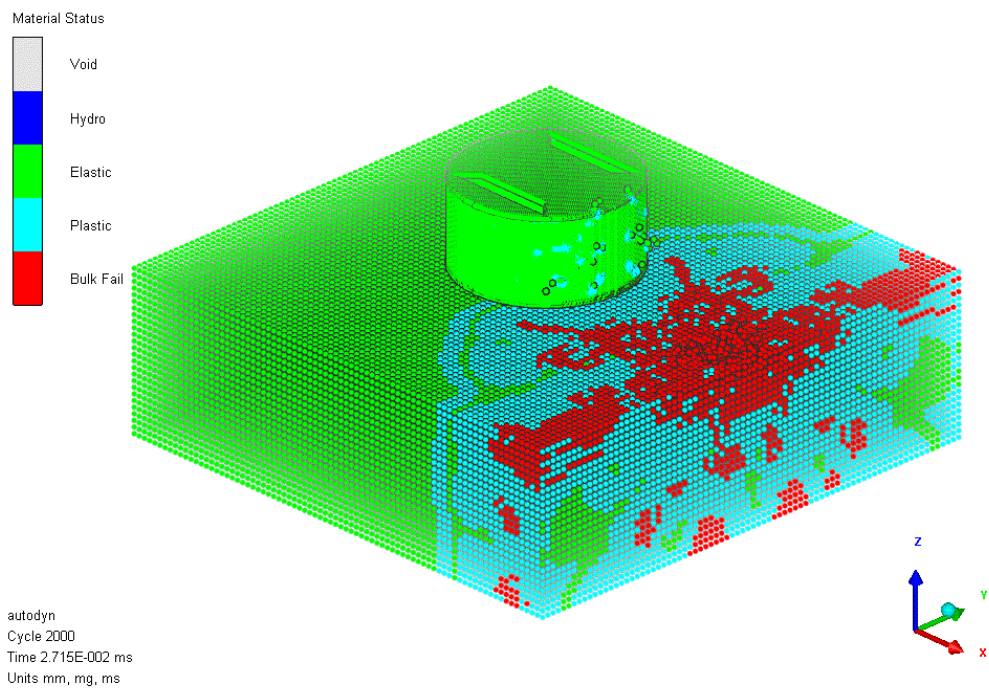
شکل ۵-۱۴: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر



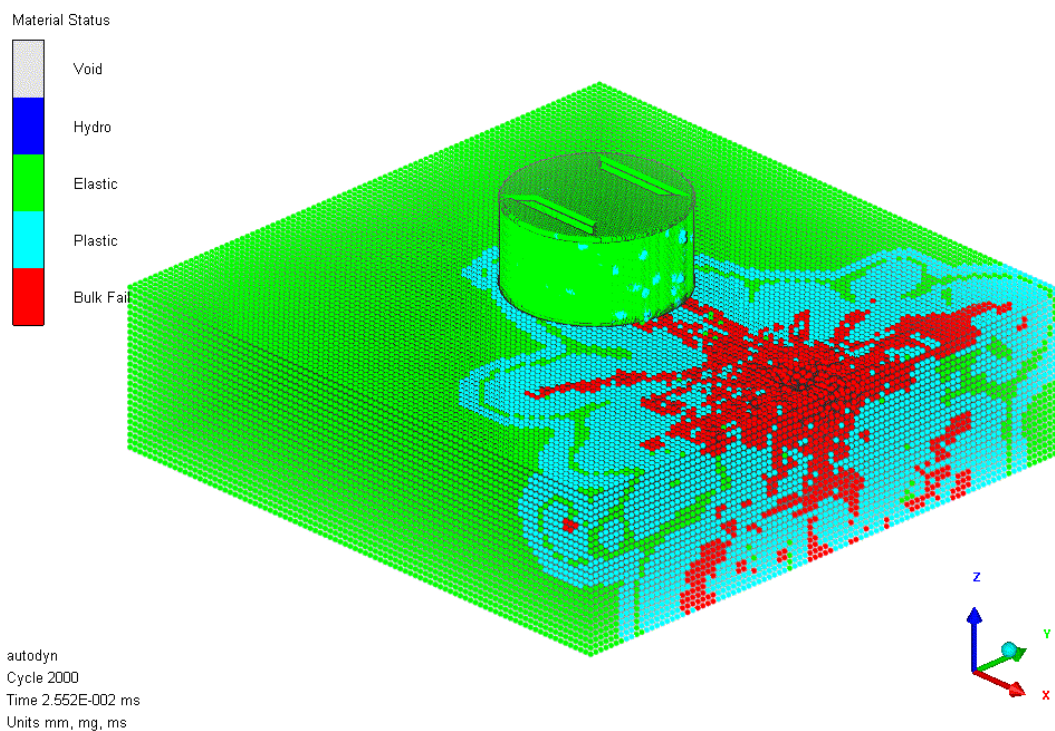
شکل ۵-۱۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر



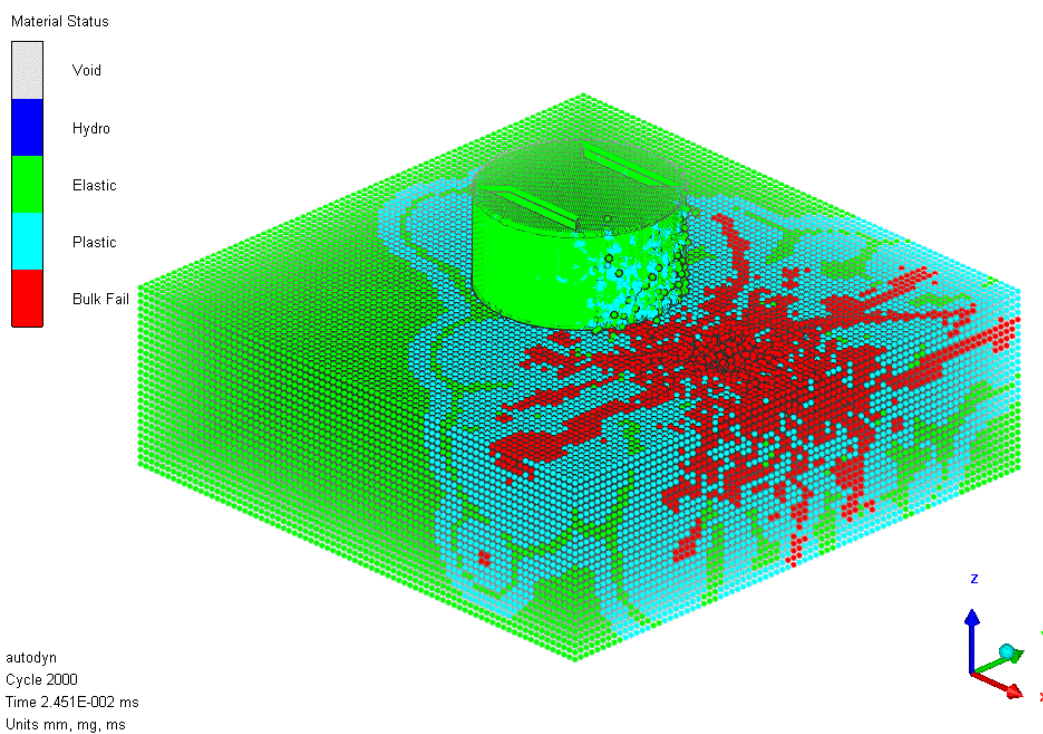
شکل ۵-۱۶: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر



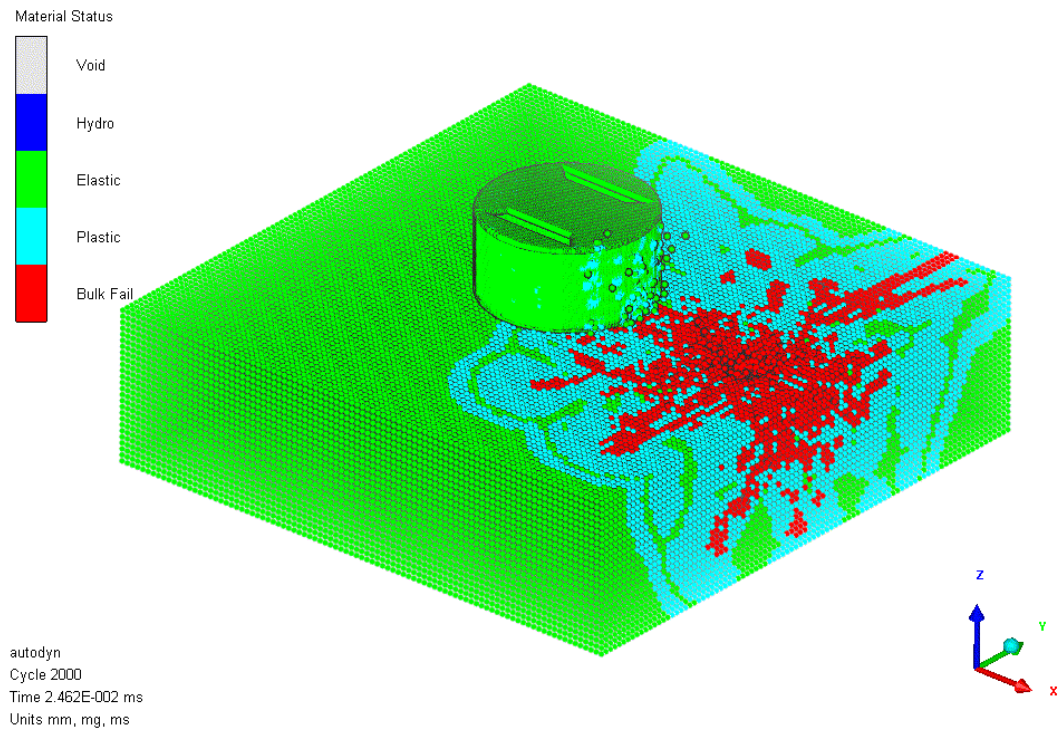
شکل ۵-۱۷: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر



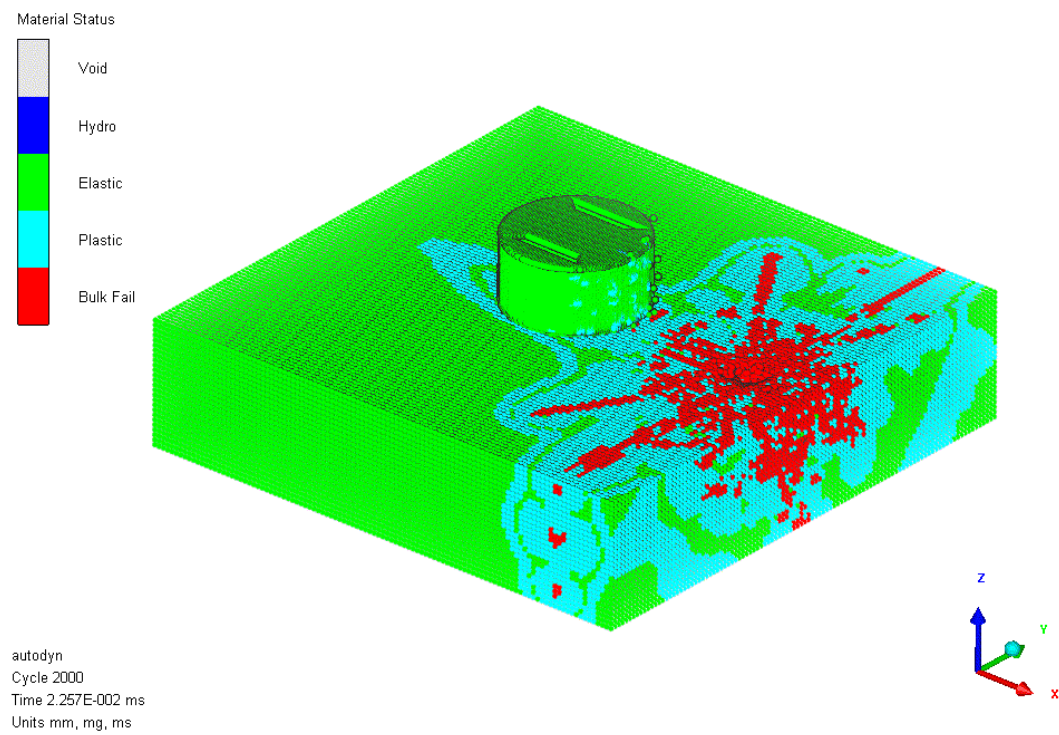
شکل ۵-۱۸: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر



شکل ۵-۱۹: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر

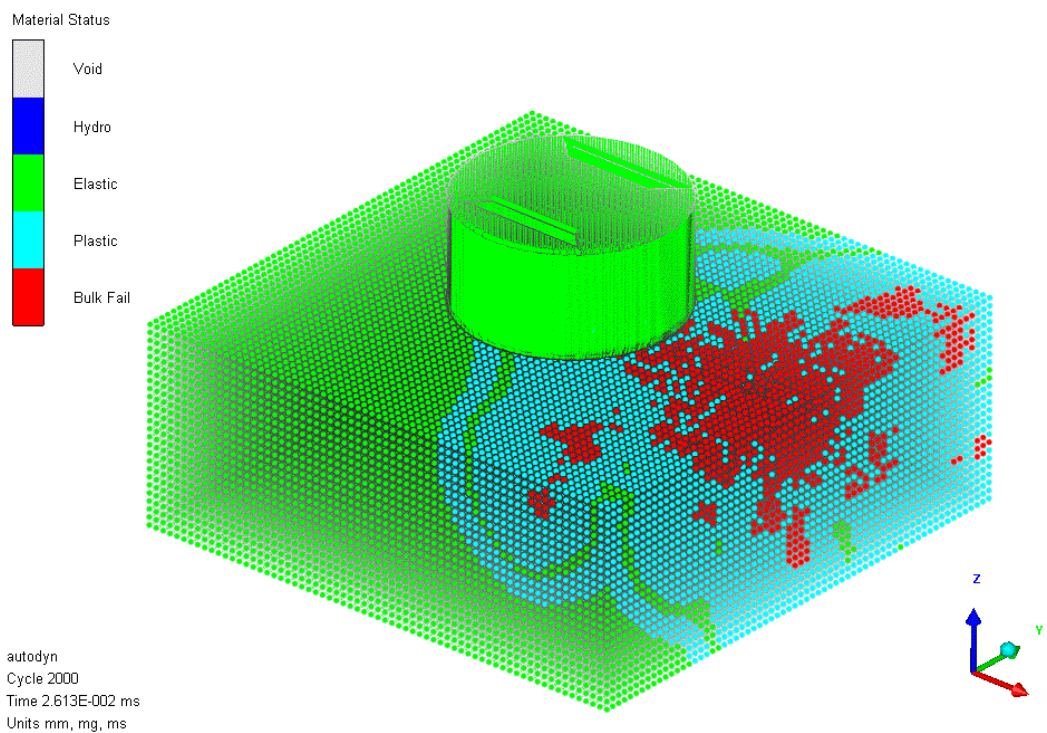


شکل ۵-۲۰: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر

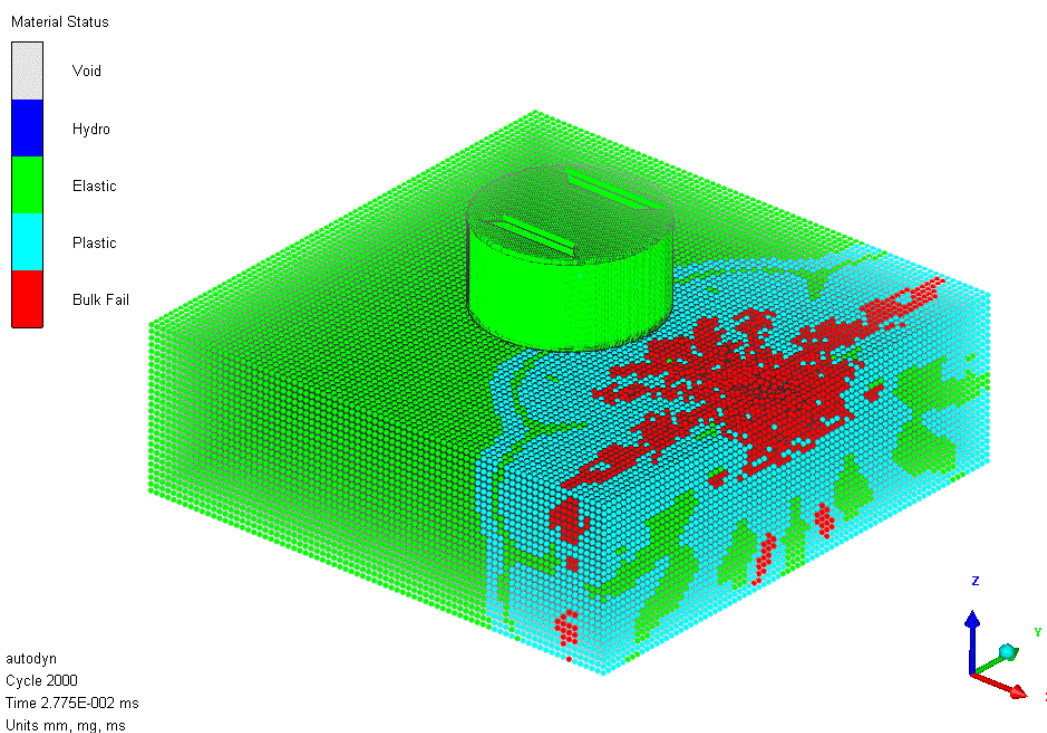


شکل ۵-۲۱: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر

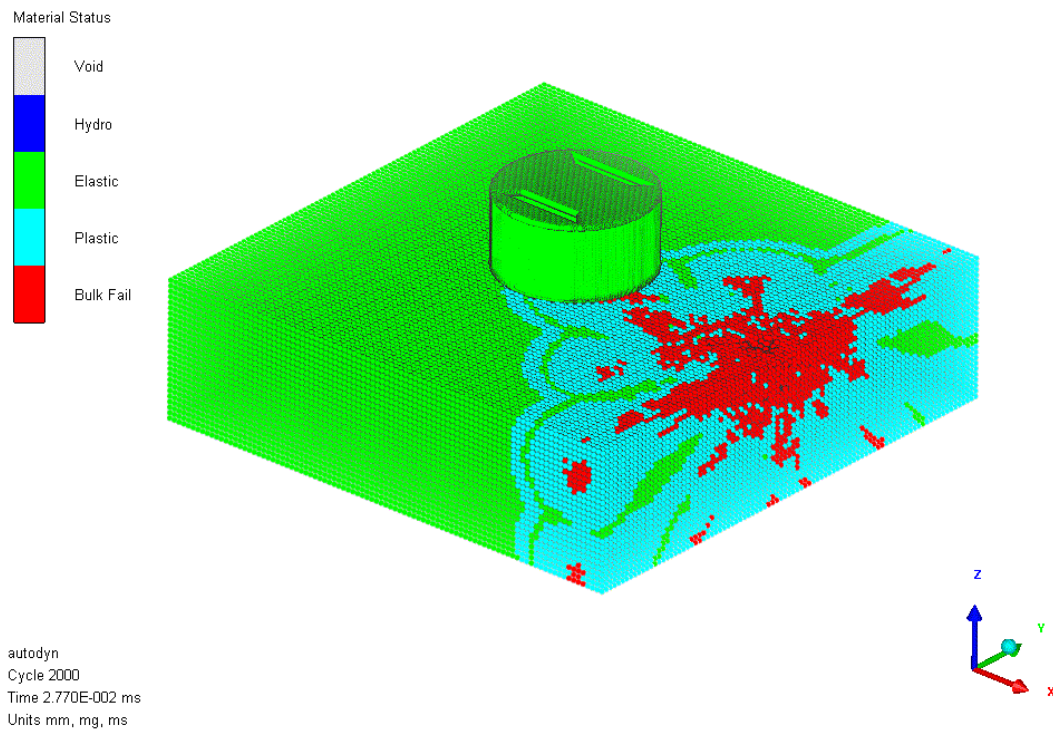
۳-۵- اثر بارگذاری انفجاری بر روی مخازن فولادی



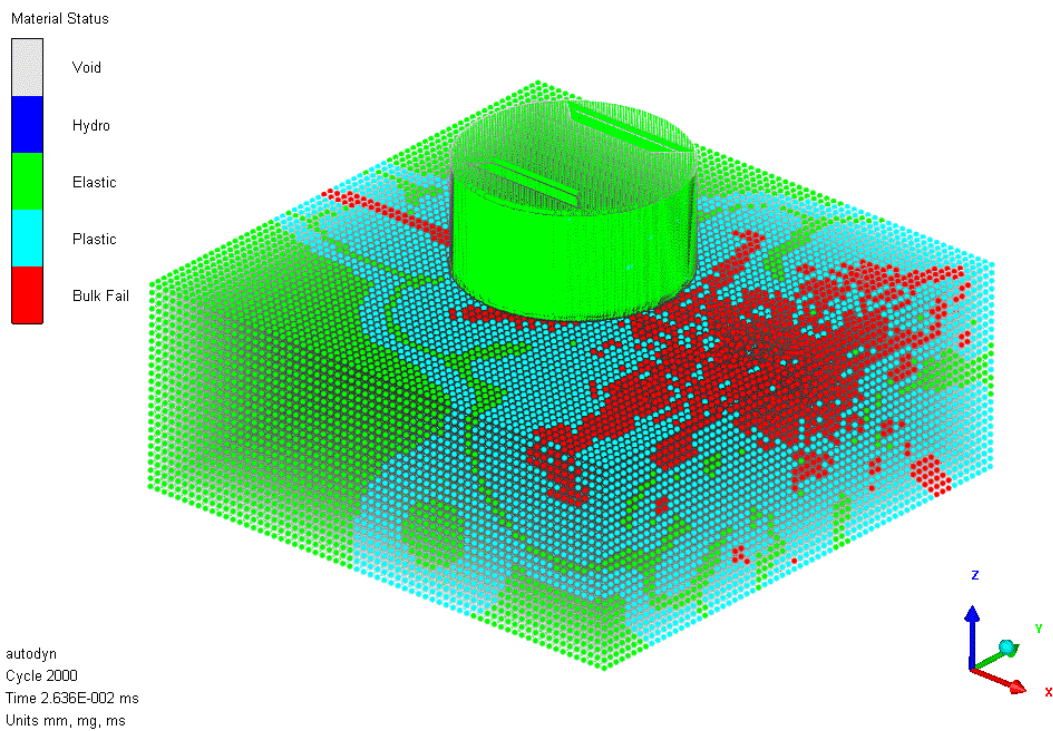
شکل ۲۲-۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر



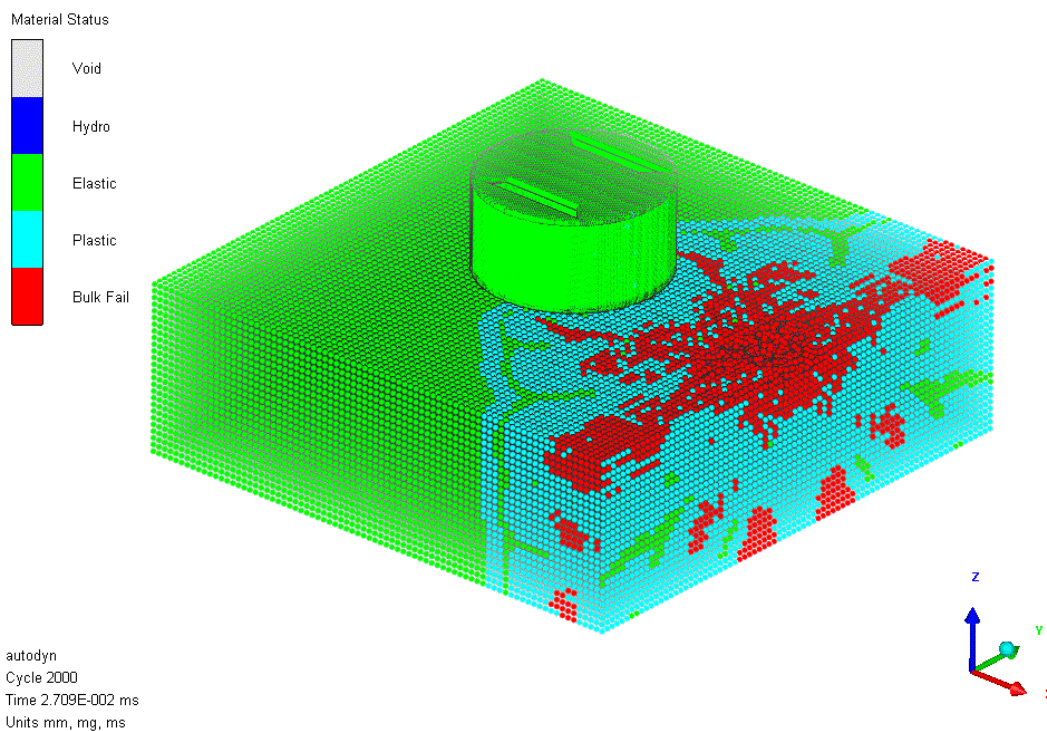
شکل ۲۳-۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر



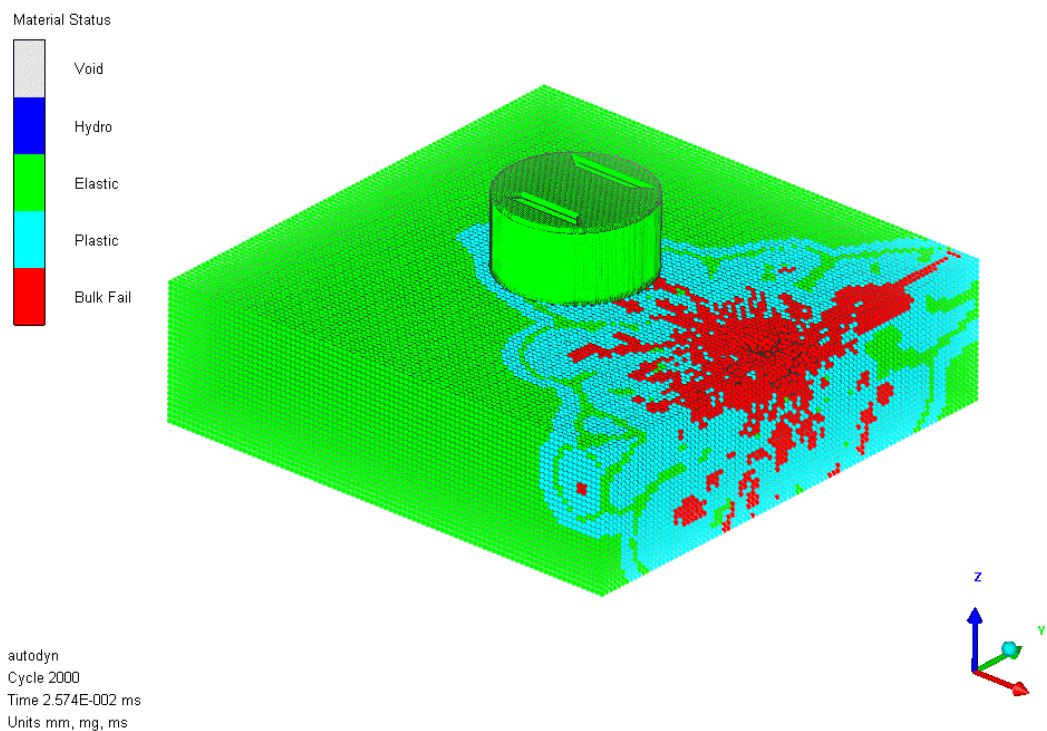
شکل ۵-۲۴: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۵۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر



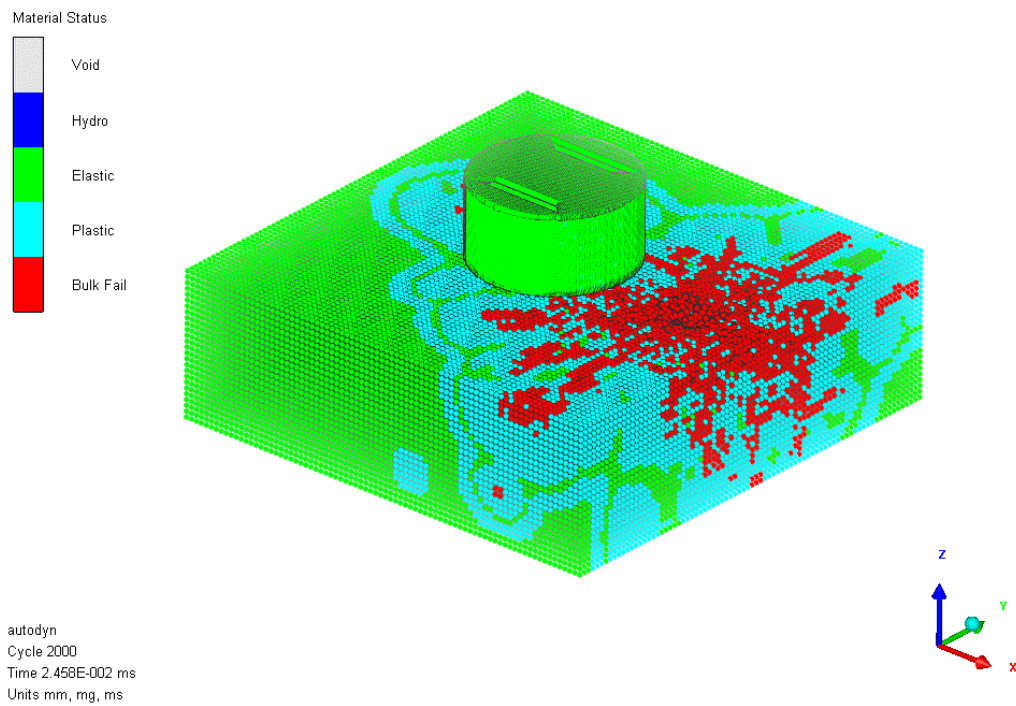
شکل ۵-۲۵: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر



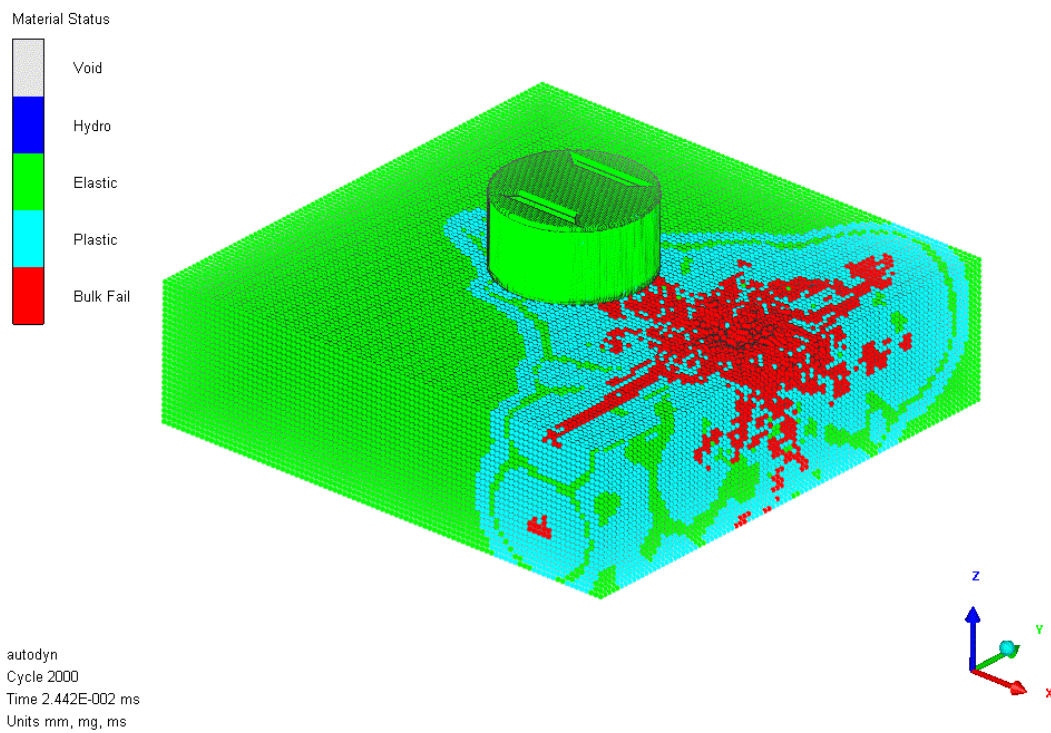
شکل ۵-۲۶: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر



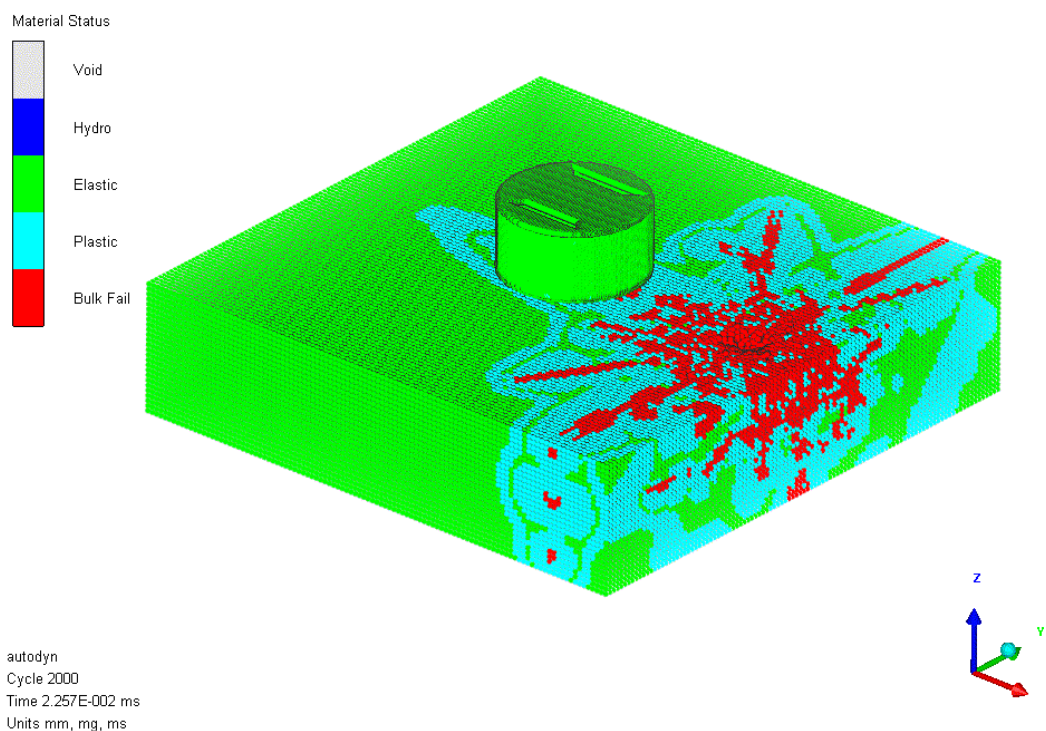
شکل ۵-۲۷: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر



شکل ۵-۲۸: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۰ متر



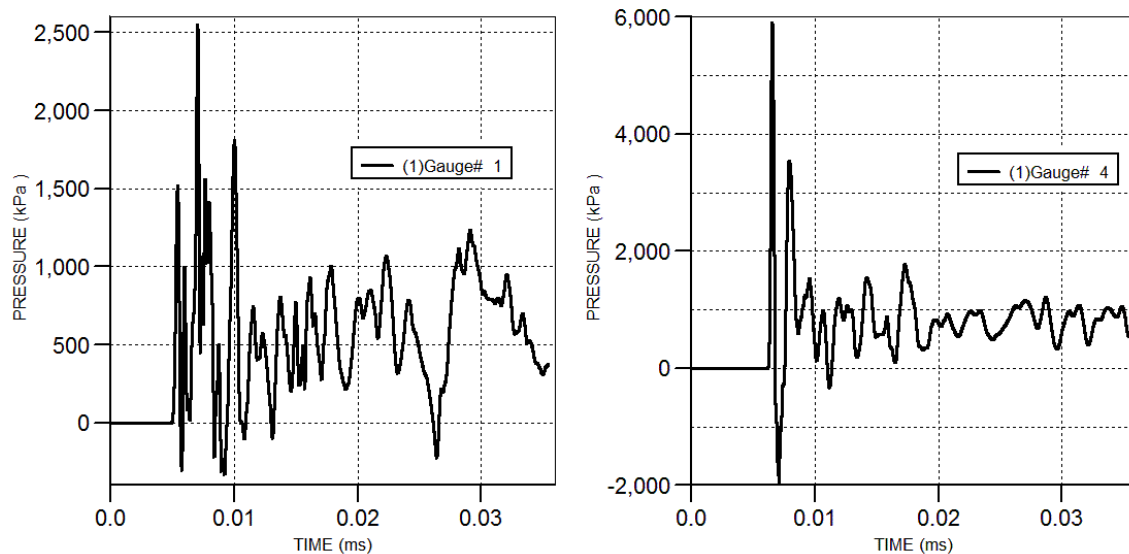
شکل ۵-۲۹: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۱۵ متر



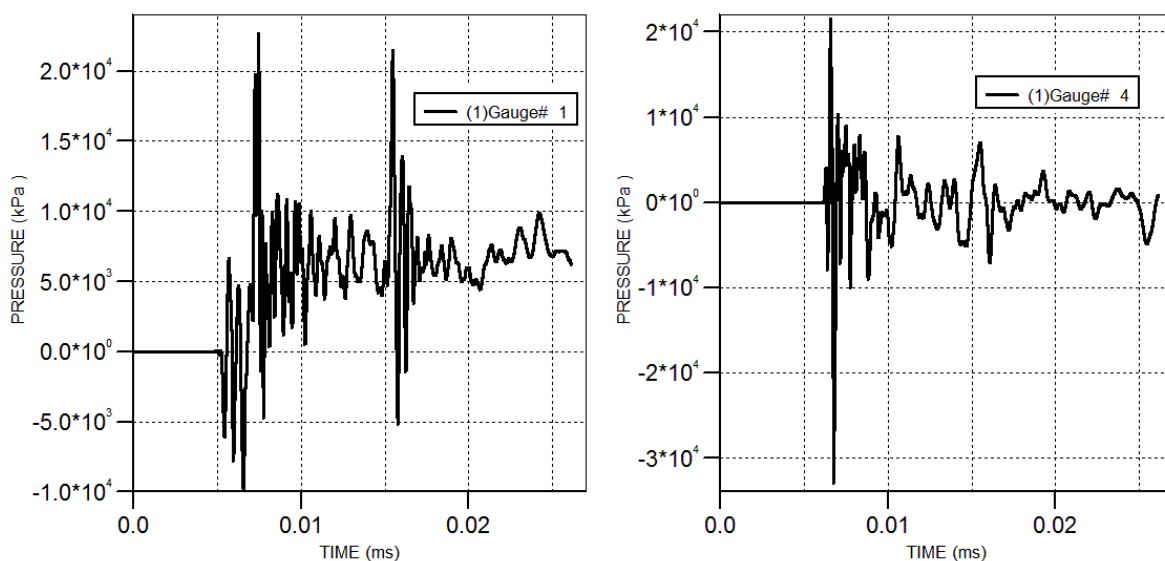
شکل ۵-۳۰: نواحی الاستیک و پلاستیک در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم و ۲۰ متر

۵-۴- بررسی نمودار فشار - زمان

پارامتر فشار حاصل از انفجار از جمله مواردی است که بررسی آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. تعداد ۶ سنجه در هر کدام از مخازن برای ثبت پارامترهای مربوط به انفجار قرار داده شده است که ثبت فشار در گذر زمان یکی از این پارامترها می باشد. در این قسمت ۲ مورد از سنجه‌ها را که در لبه‌ی بالایی و پایینی نزدیک محل انفجار قرار دارد (گیج شماره ۱ و ۴) را برای بررسی در نظر می‌گیریم. شکل‌های ۵-۳۱ تا ۵-۴۹ نمودارهای فشار ثبت شده توسط گیج‌های قرار داده شده در بخش جلویی مخزن در مقابل نقطه انفجار می‌باشند.



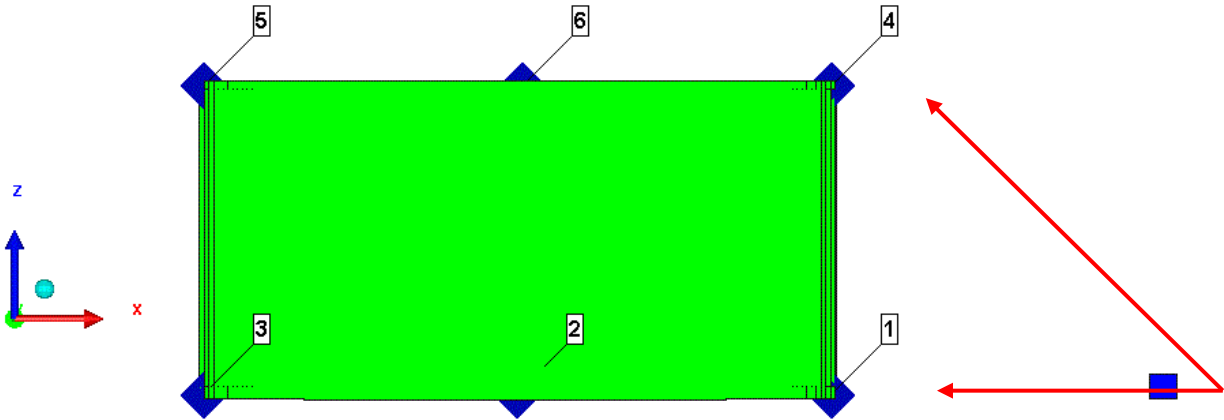
شکل ۵-۳۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)



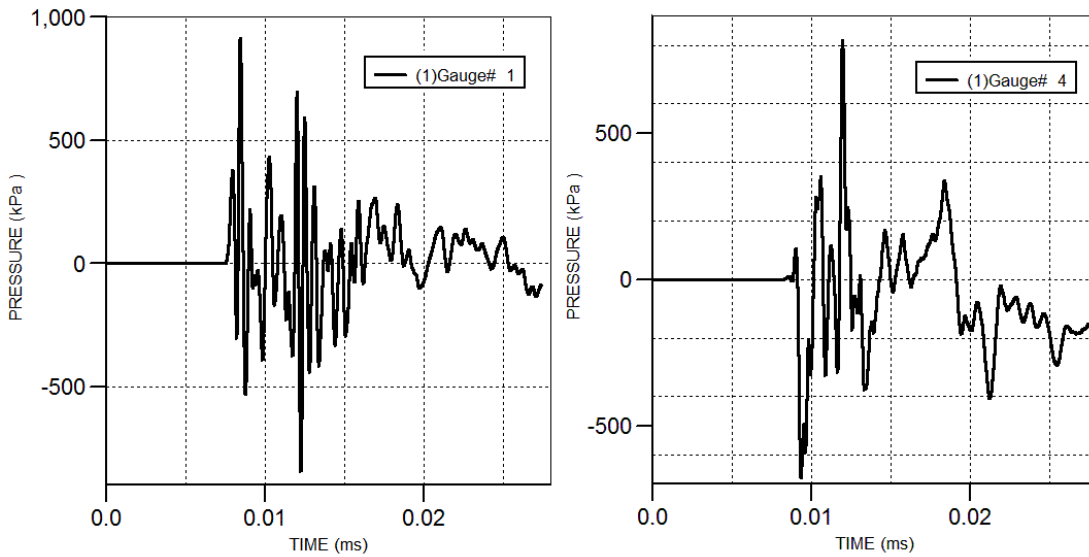
شکل ۵-۳۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)

همانطور که از شکل‌ها مشخص است لحظه رسیدن اولین موج شوک انفجار در هر دو حالت مخزن بتنی و فولادی برابر است. در هر دو حالت اولین موج شوک در لحظه حدودی ۰/۰۰۵ میلی‌ثانیه به لبه پایینی مخزن (گیج شماره ۱) رسیده‌اند. همچنین زمان رسیدن اولین موج شوک به لبه بالایی که مربوط به گیج شماره ۴ می‌شود، حدود ۰/۰۰۷ میلی‌ثانیه است. مقدار این فشارها در لحظات مختلف نیز در نمودارها کاملاً مشخص می‌باشد. مثلاً مقدار ماکزیمم فشار ثبت شده در مخزن بتنی توسط

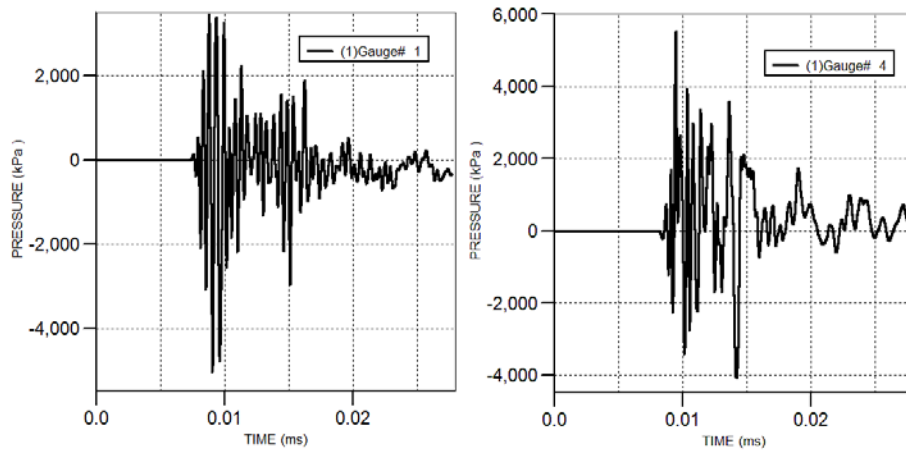
گیج شماره ۱ حدود ۲۵۰۰ کیلوپاسگال و این مقدار برای گیج شماره ۴ حدود ۶۰۰۰ کیلوپاسگال می‌باشد. به همین ترتیب برای سایر نمودارهای مقادیر را می‌توان مشخص کرد.



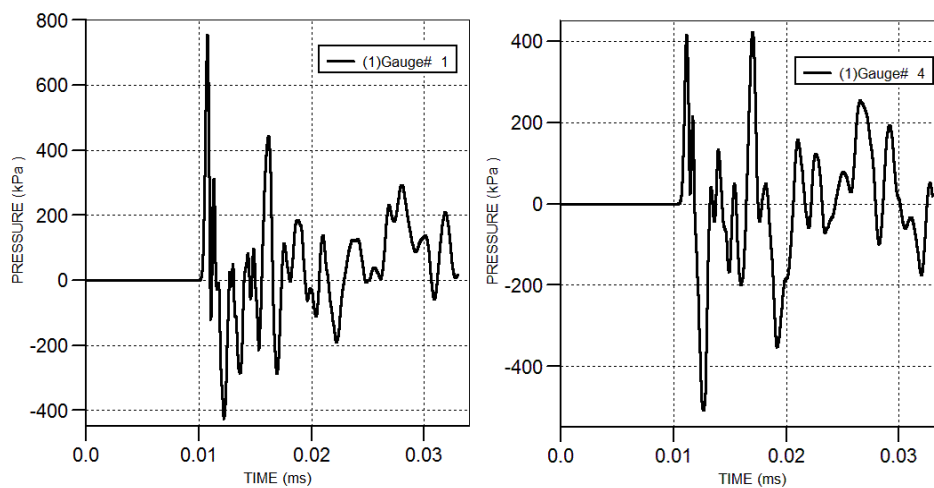
شکل ۵-۳: مسیر حرکت موج شوک تا رسیدن به گیج شماره ۱ و ۴



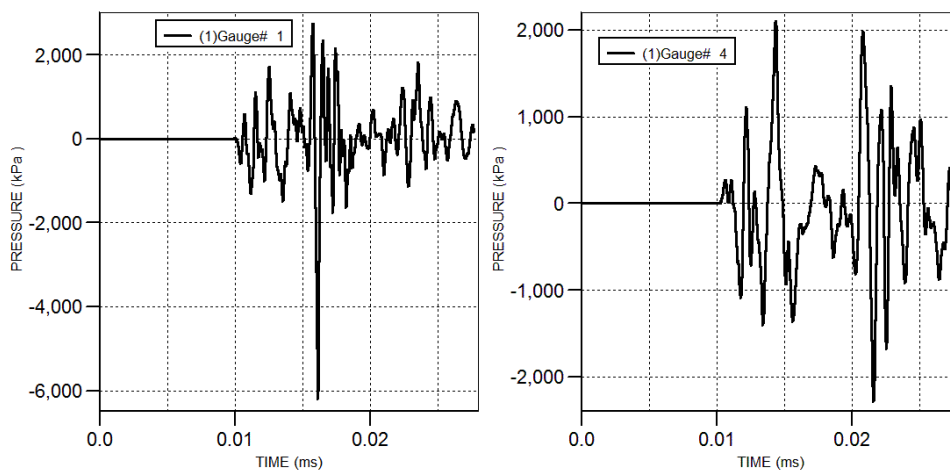
شکل ۵-۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)



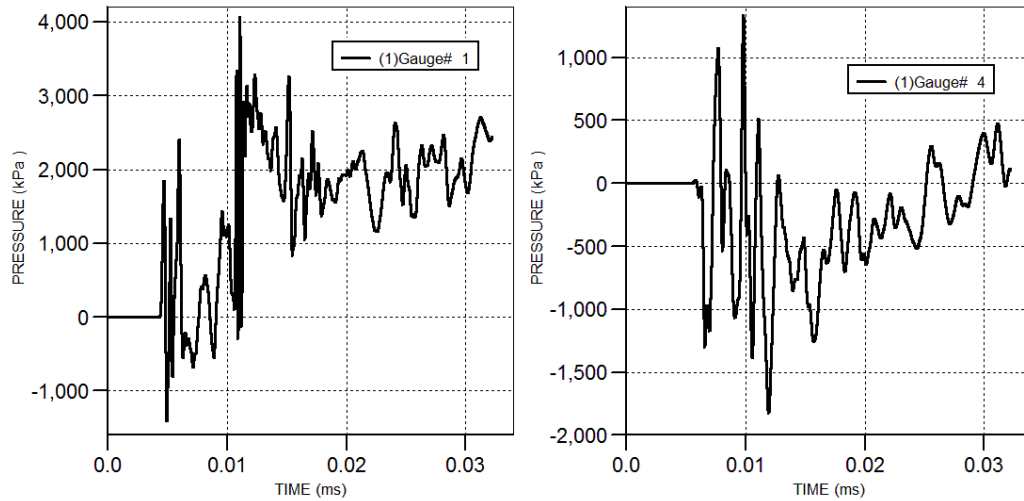
شکل ۵-۳۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)



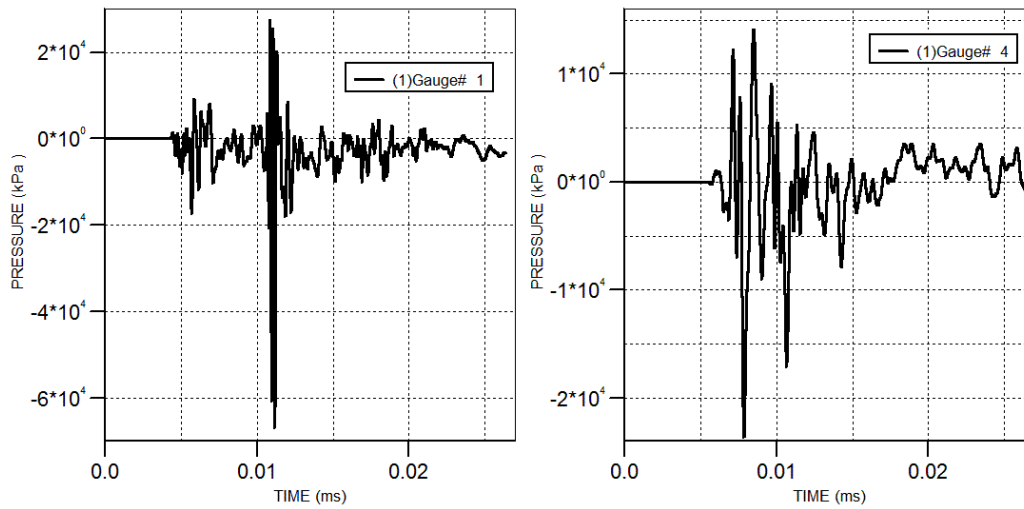
شکل ۵-۳۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)



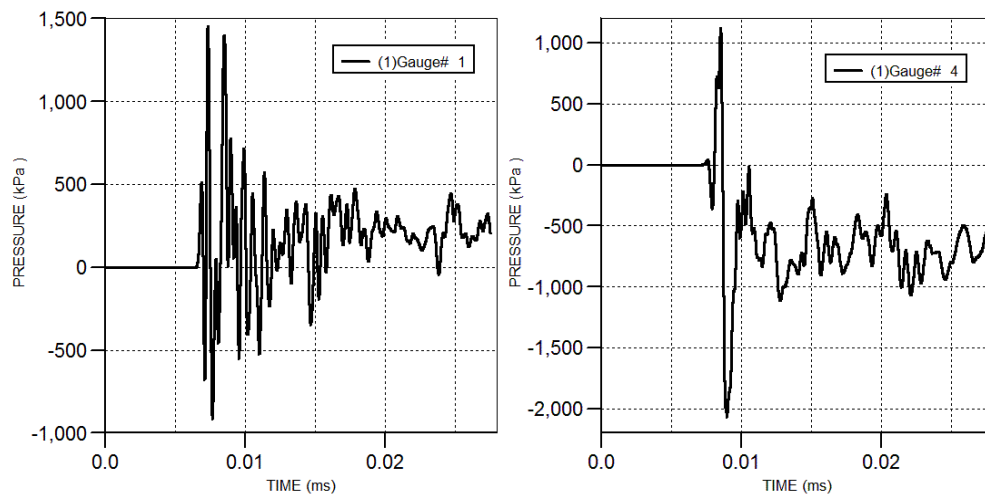
شکل ۵-۳۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)



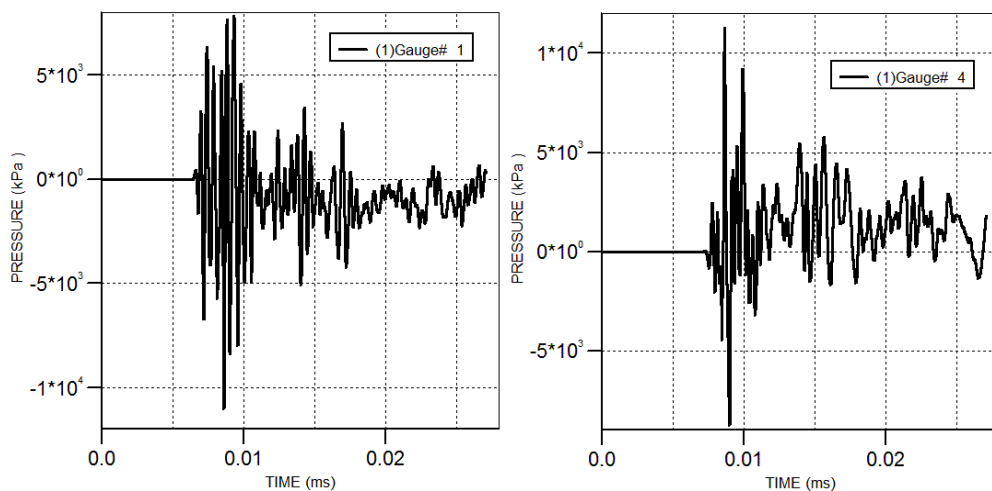
شکل ۵-۳۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)



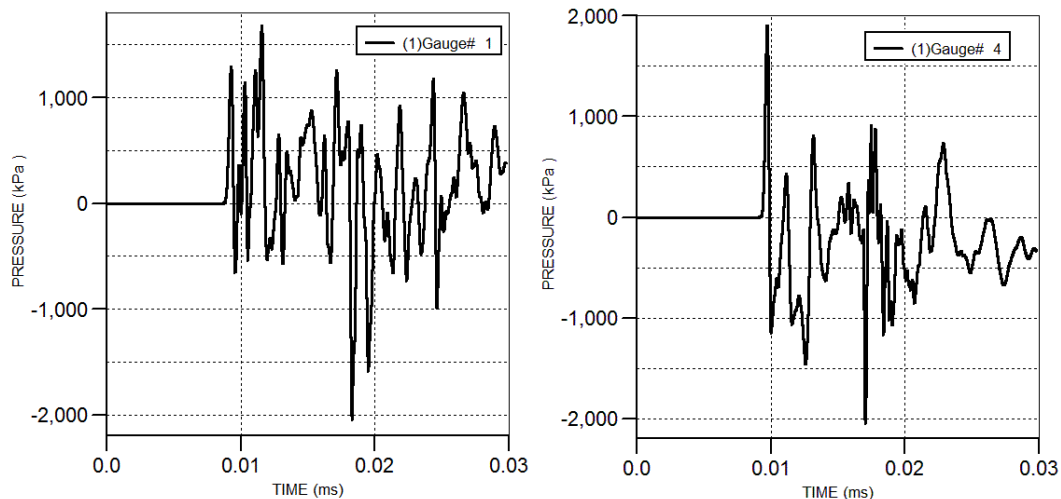
شکل ۵-۳۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)



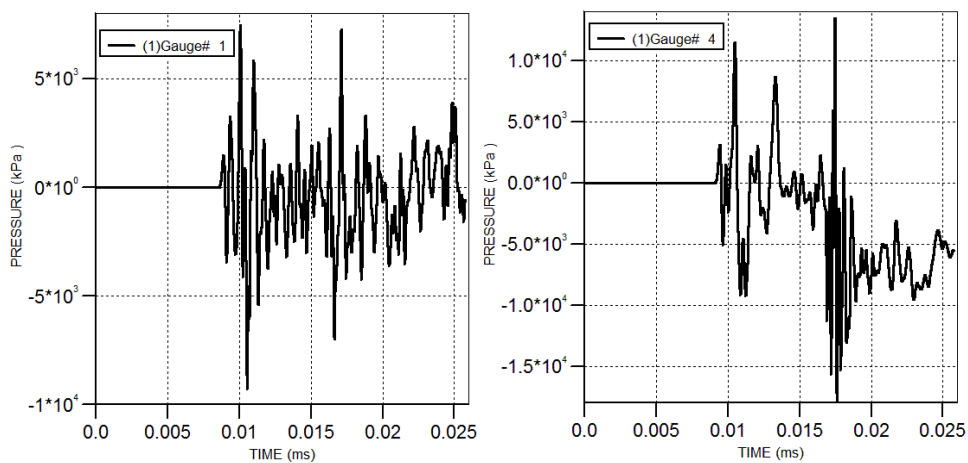
شکل ۵-۴۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)



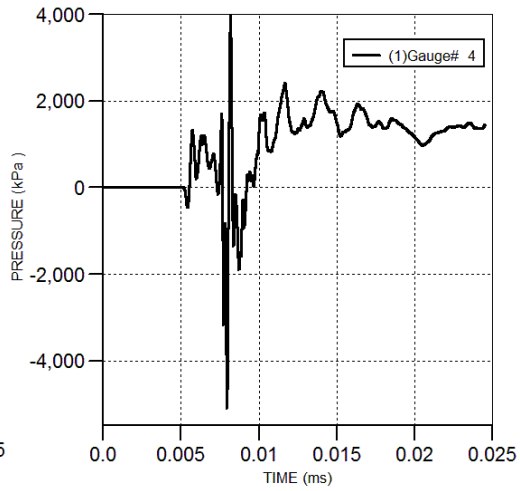
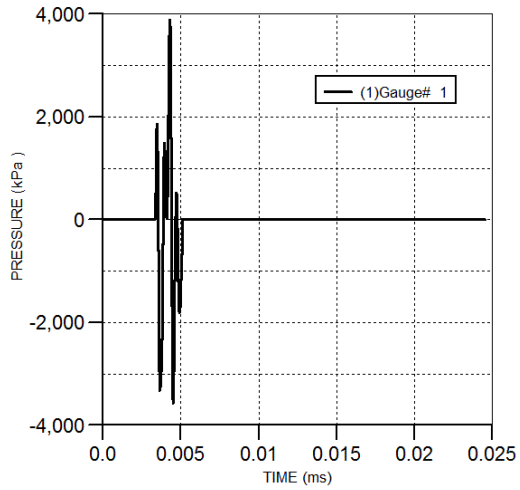
شکل ۵-۴۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)



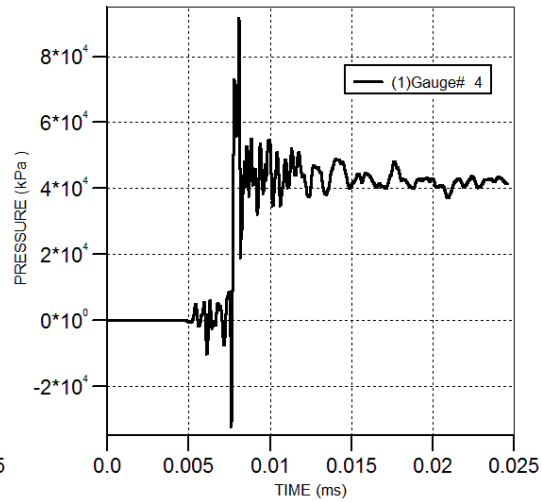
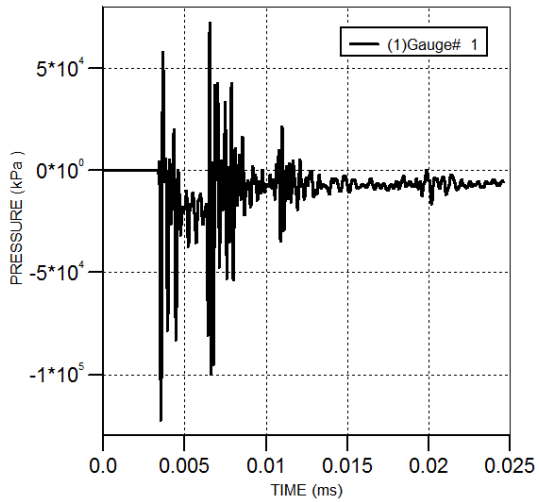
شکل ۵-۴۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)



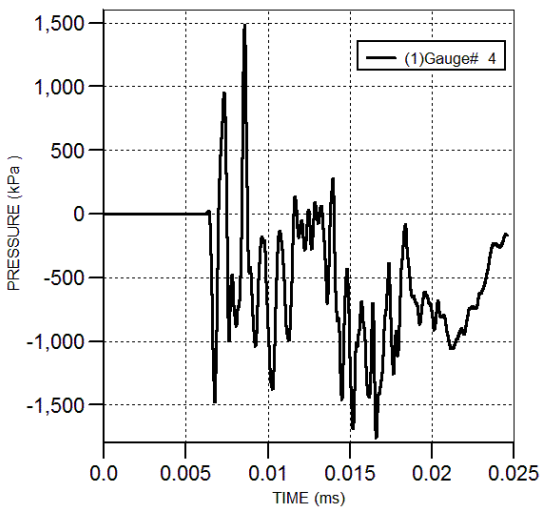
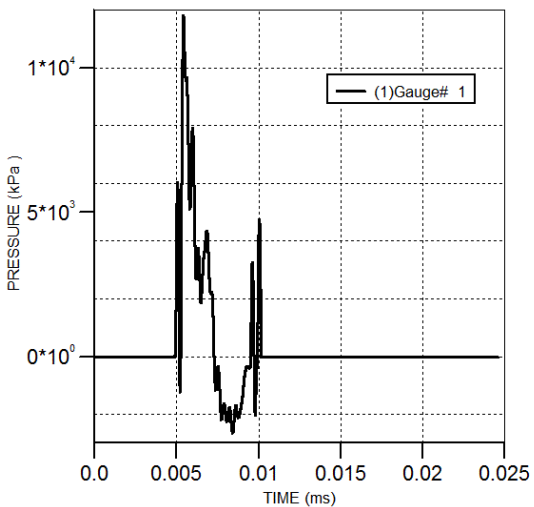
شکل ۵-۴۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)



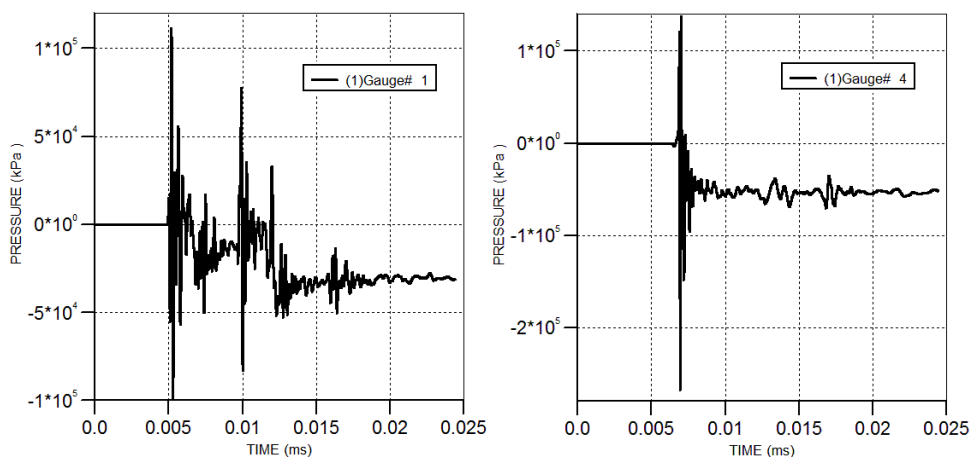
شکل ۵-۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)



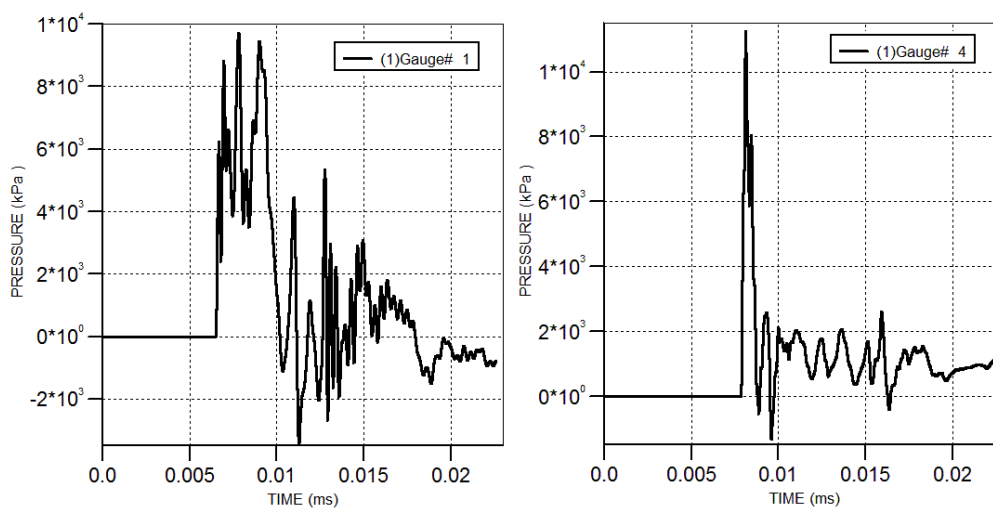
شکل ۵-۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)



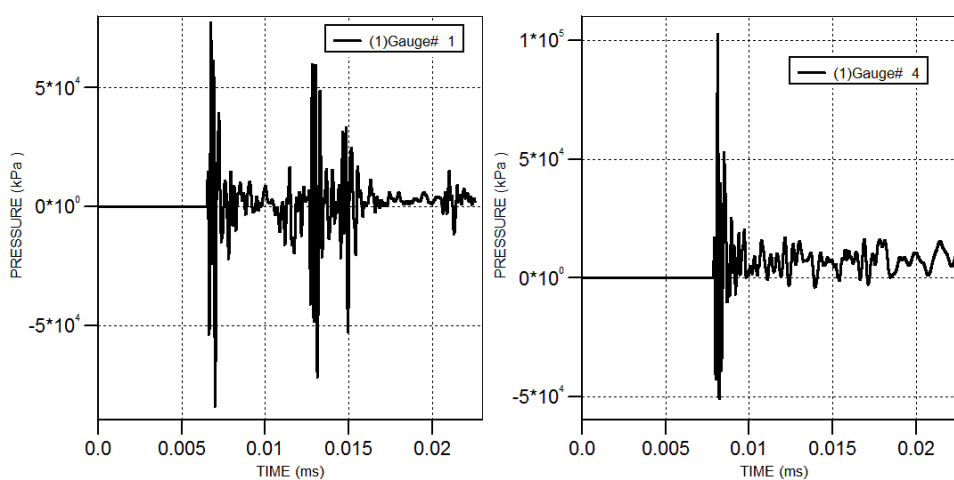
شکل ۵-۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)



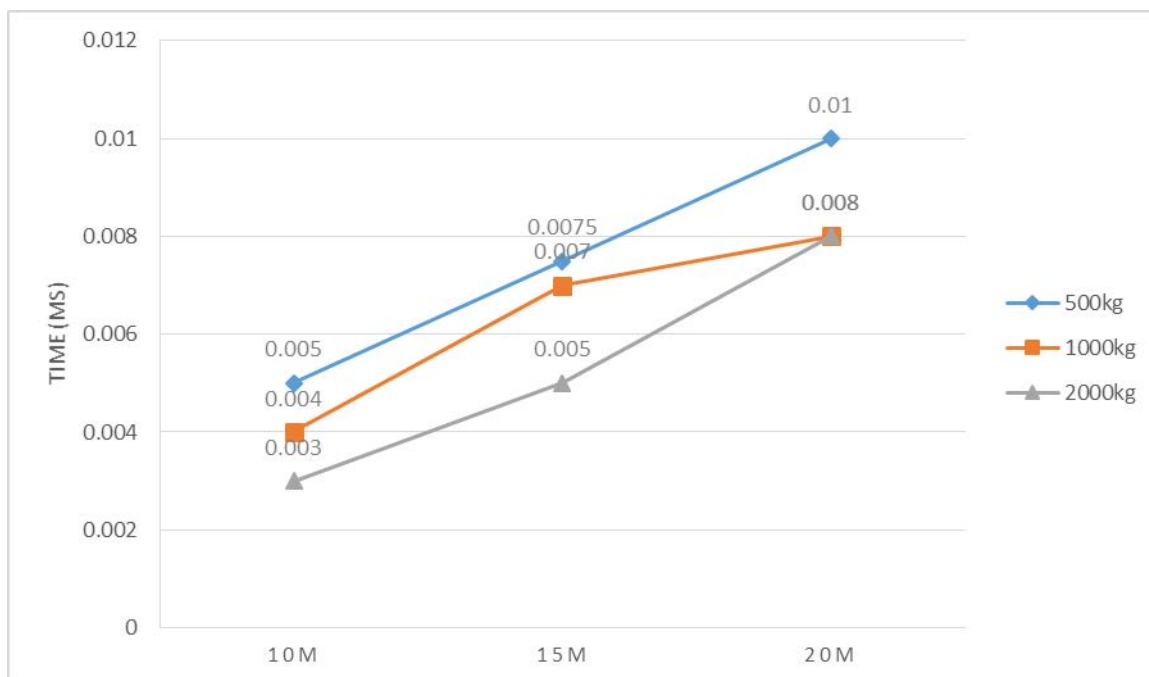
شکل ۵-۴۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)



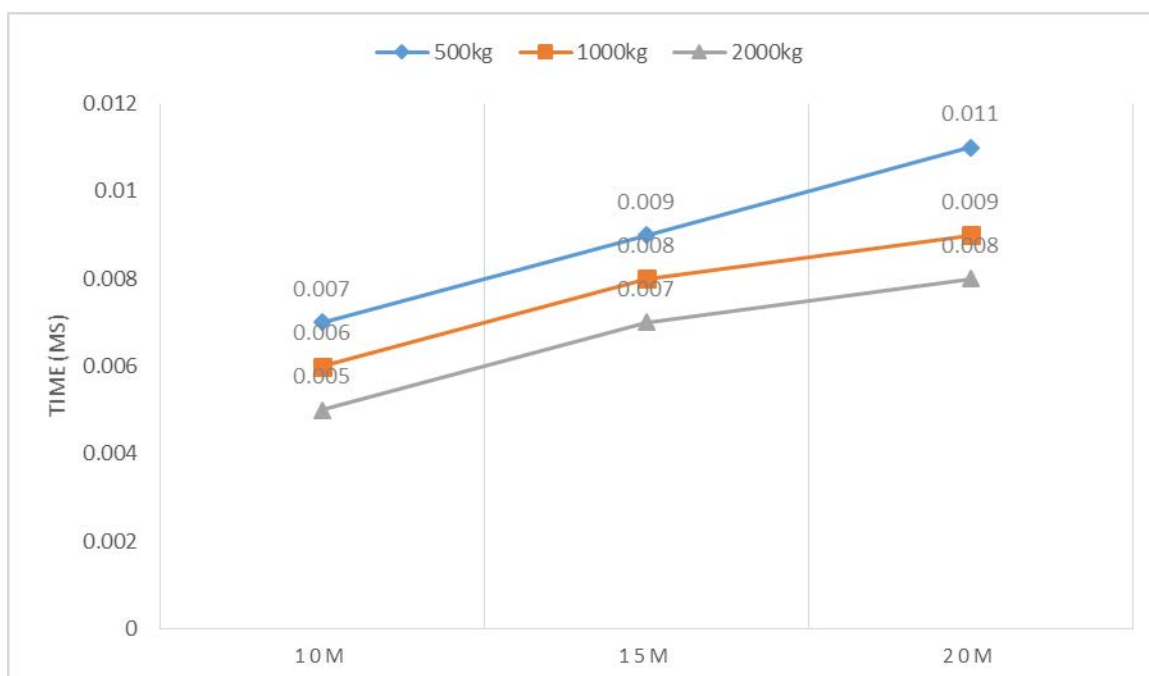
شکل ۵-۴۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)



شکل ۵-۴۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)

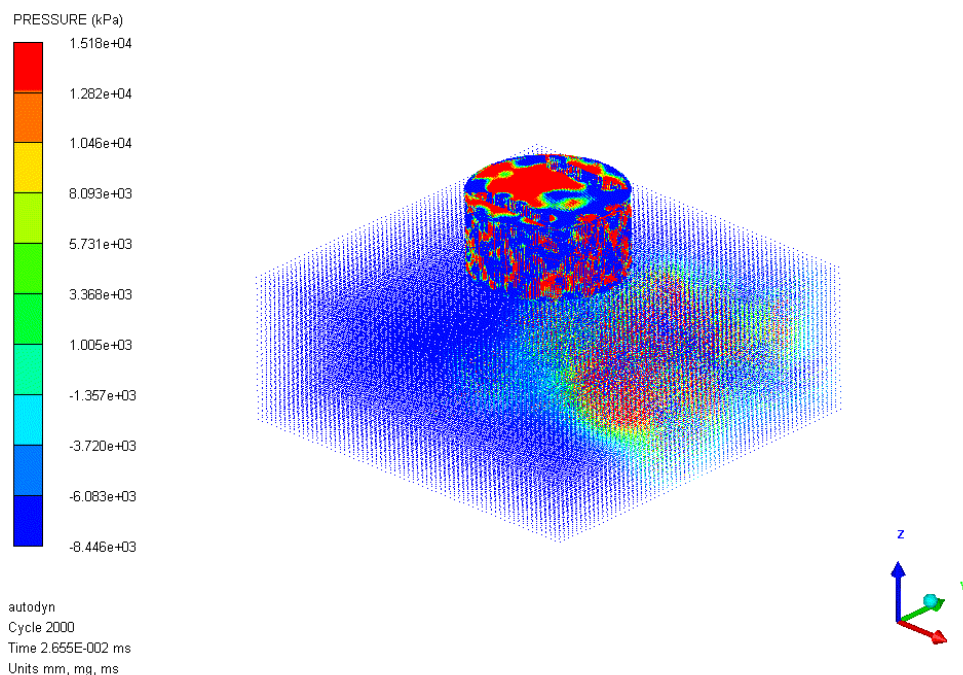


شکل ۵-۵: نمودار جرم فاصله-زمان رسیدن اولین موج شوک به گیج شماره ۱

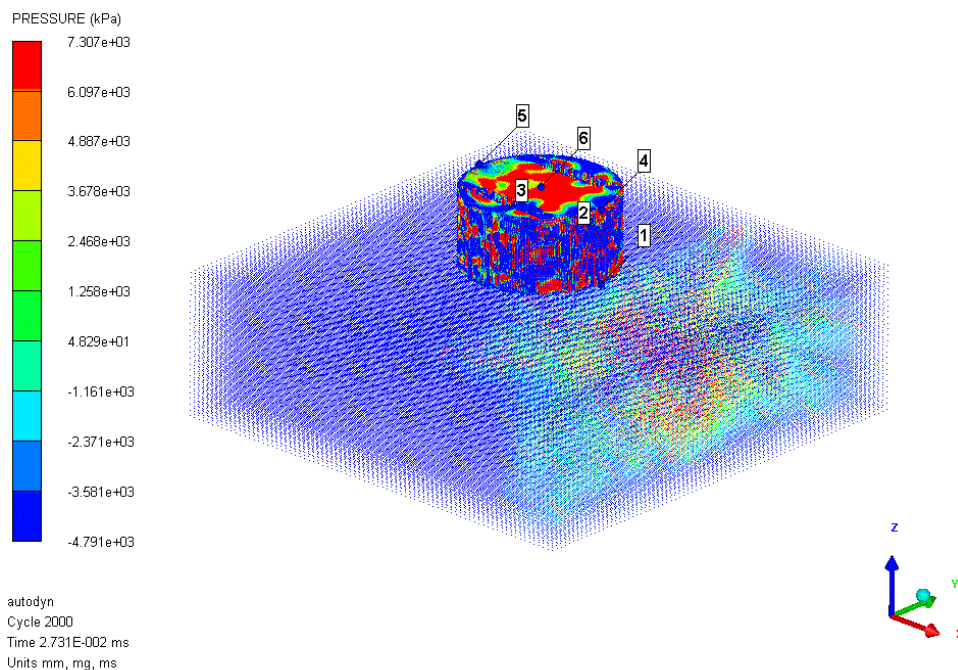


شکل ۵-۵: نمودار جرم فاصله-زمان رسیدن اولین موج شوک به گیج شماره ۴

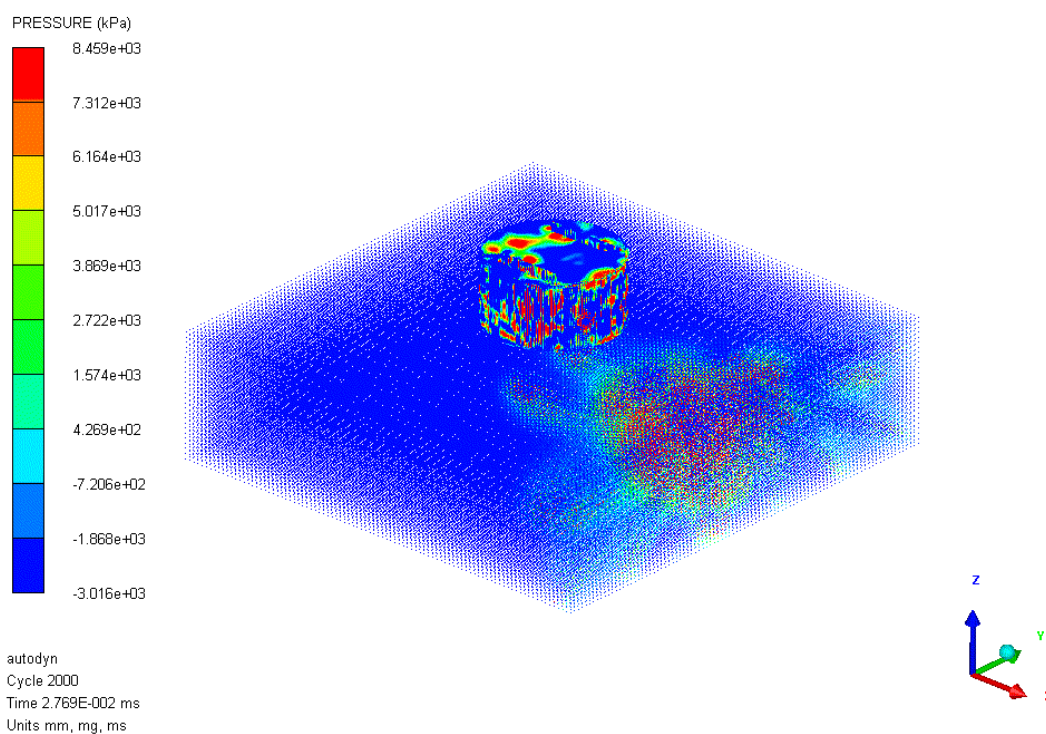
اشکال ۵-۵۲ تا ۵-۶۷ نحوه توزیع فشار را در هر یک از حالت‌های بارگذاری در بخش‌های مختلف مدل اعم از خاک و مخازن در سیکل ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. کانتور رنگی که سمت چپ مدل قرار دارد مقادیر تنش را قسمت‌های گوناگون مدل با رنگ‌های مختلف مشخص کرده است.



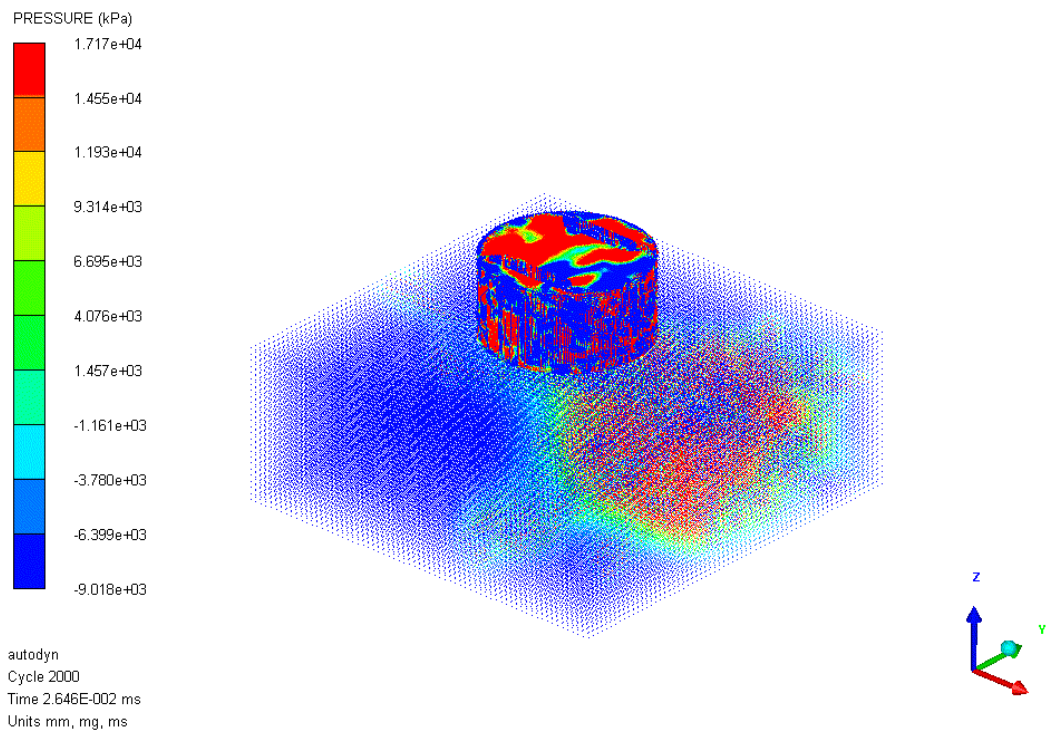
شکل ۵-۵۲: توزیع فشار در مدل (500kg-10m-Concrete)



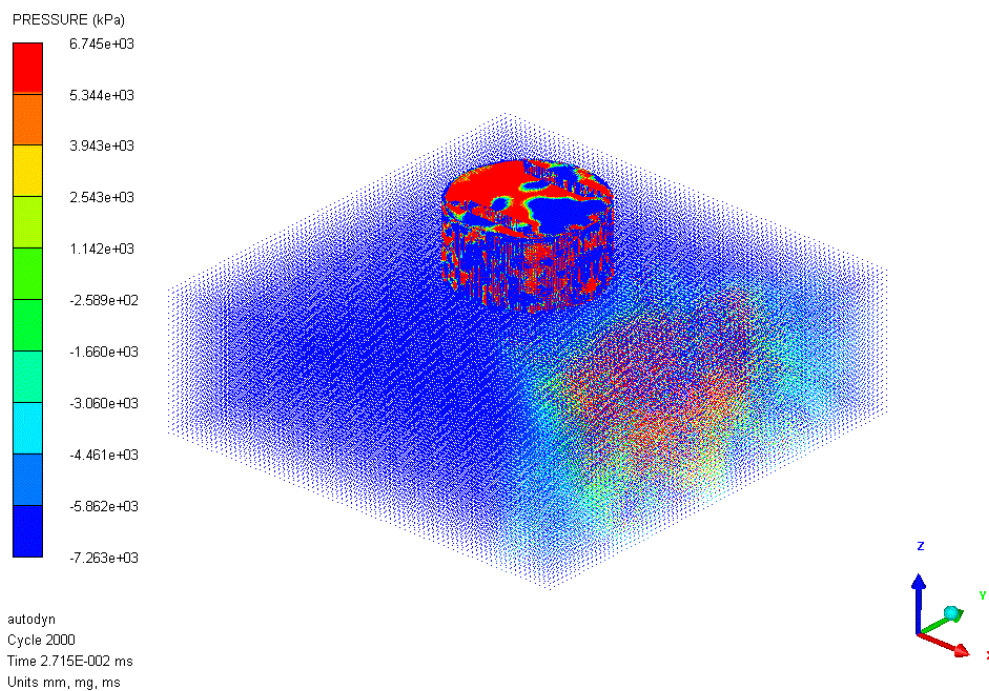
شکل ۵-۳: توزیع فشار در مدل (500kg-15m-Concrete)



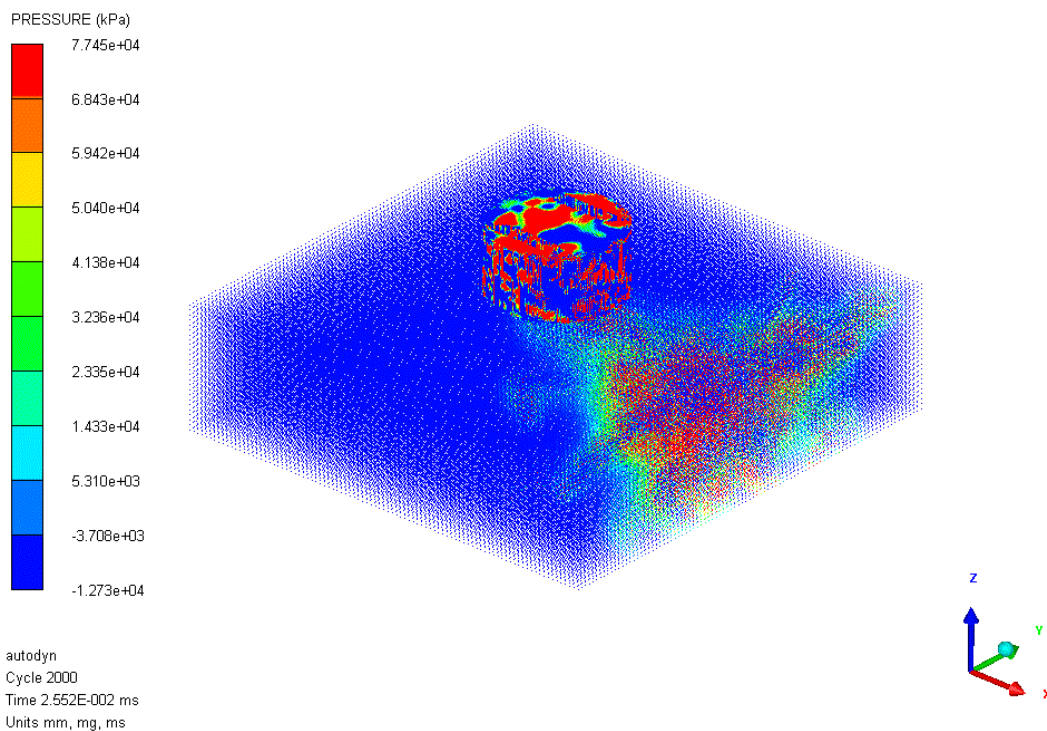
شکل ۵-۴: توزیع فشار در مدل (500kg-20m-Concrete)



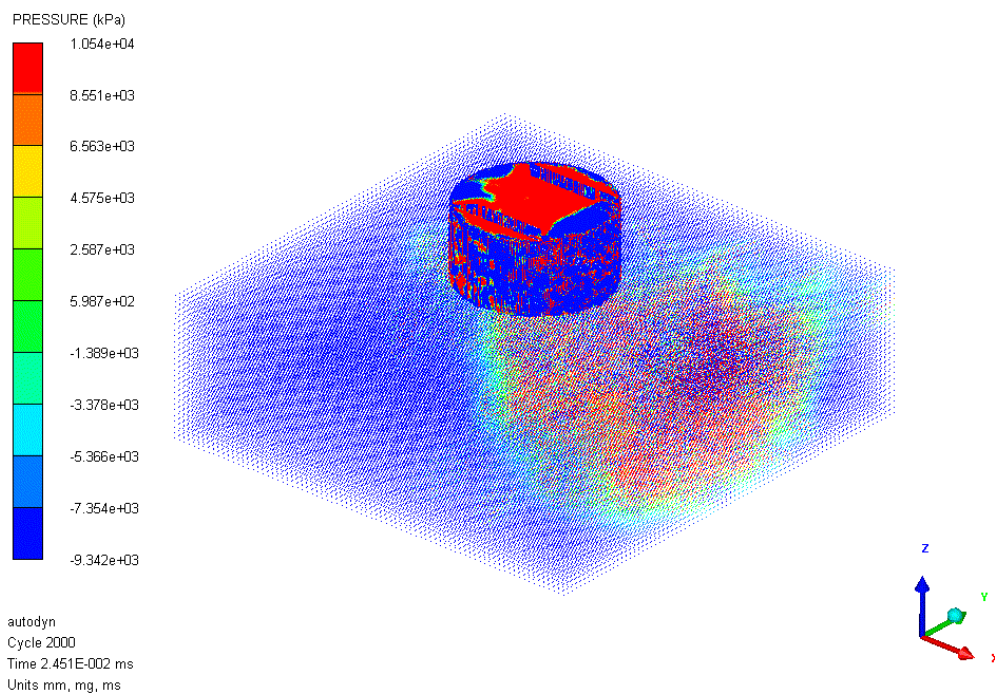
شکل ۵-۵۵: توزیع فشار در مدل (1000kg-10m-Concrete)



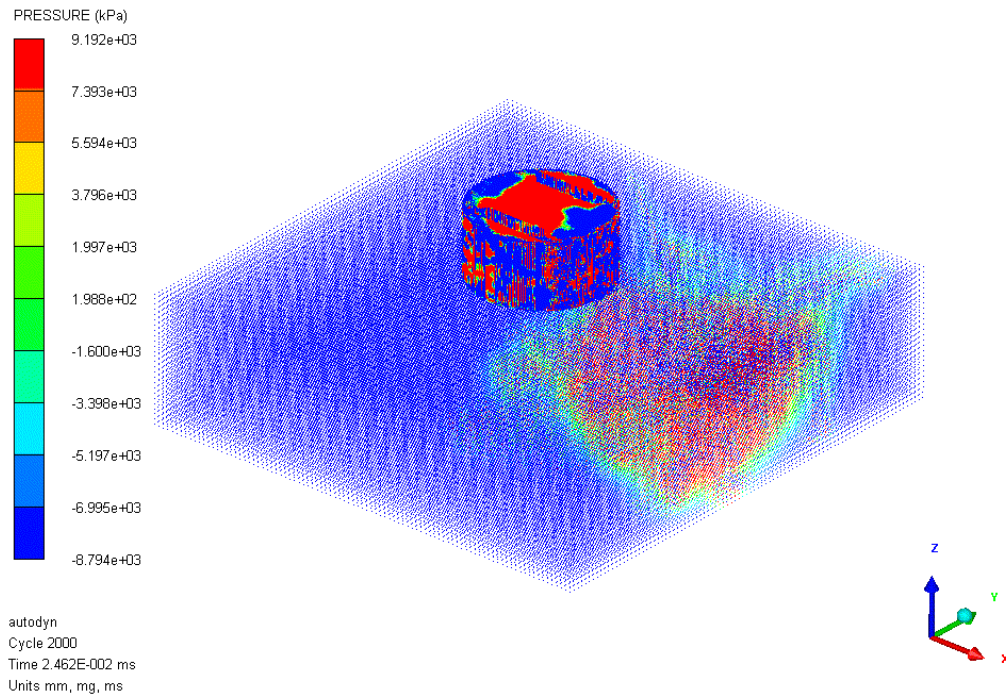
شکل ۵-۵۶: توزیع فشار در مدل (1000kg-15m-Concrete)



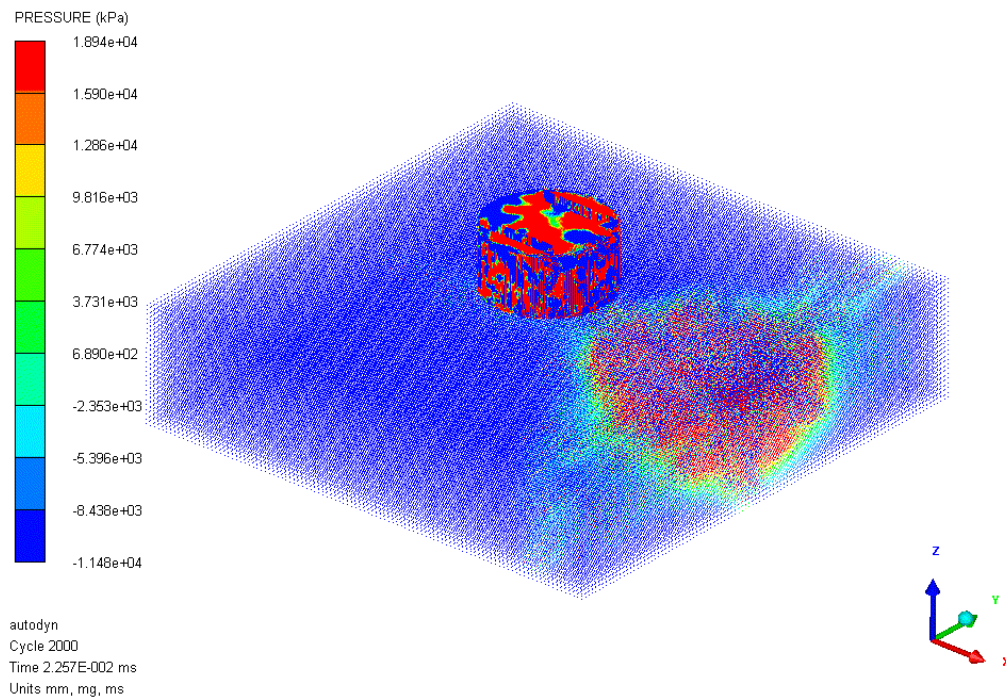
شکل ۵-۵۷: توزیع فشار در مدل (1000kg-20m-Concrete)



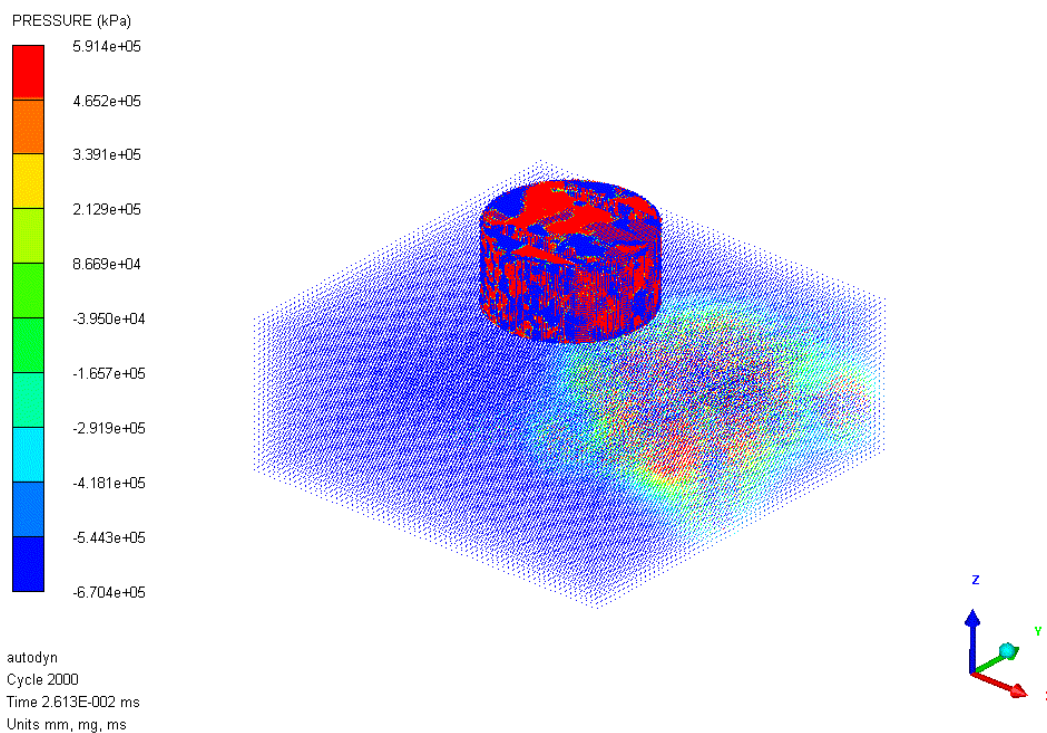
شکل ۵-۵۸: توزیع فشار در مدل (2000kg-10m-Concrete)



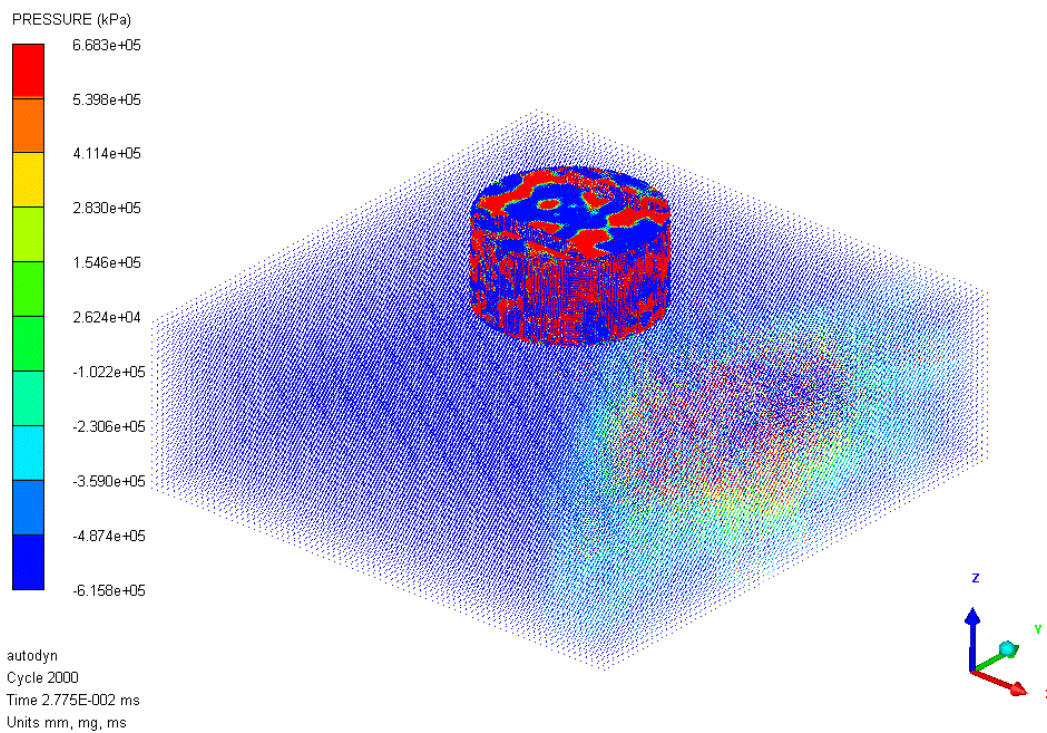
شکل ۵-۵۹: توزیع فشار در مدل (2000kg-15m-Concrete)



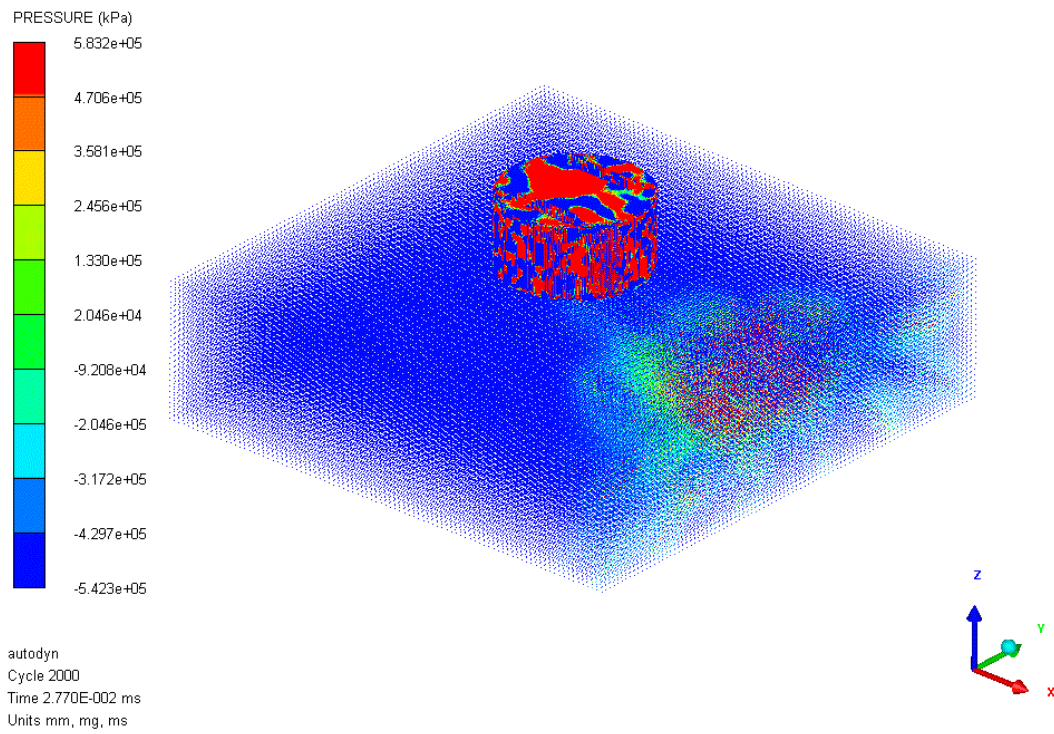
شکل ۵-۶۰: توزیع فشار در مدل (2000kg-20m-Concrete)



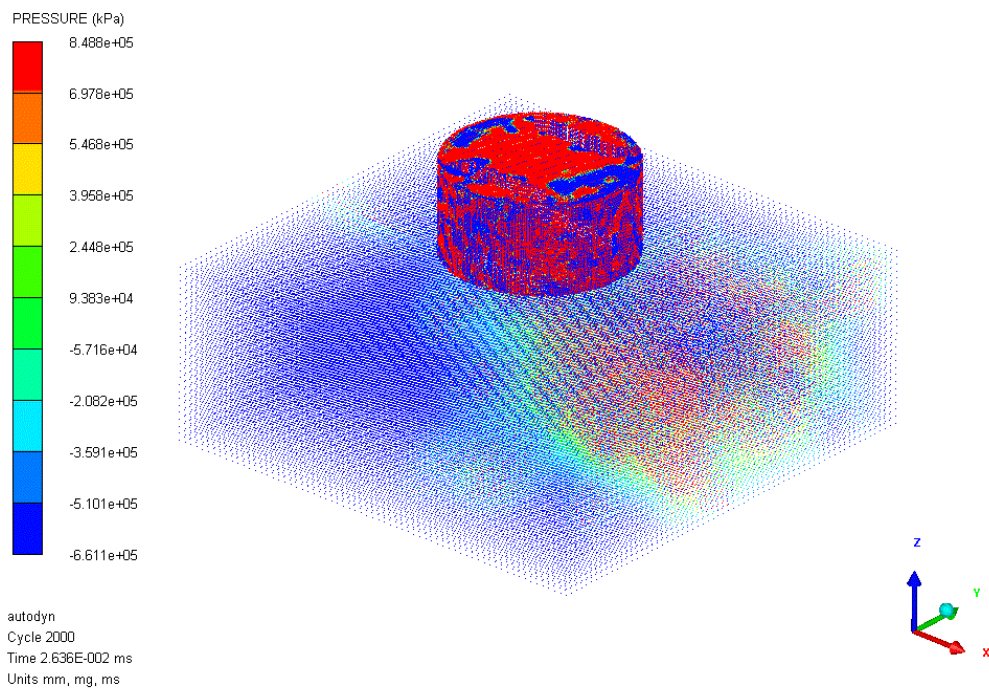
شکل ۵-۶۱: توزیع فشار در مدل (500kg-10m-Steel)



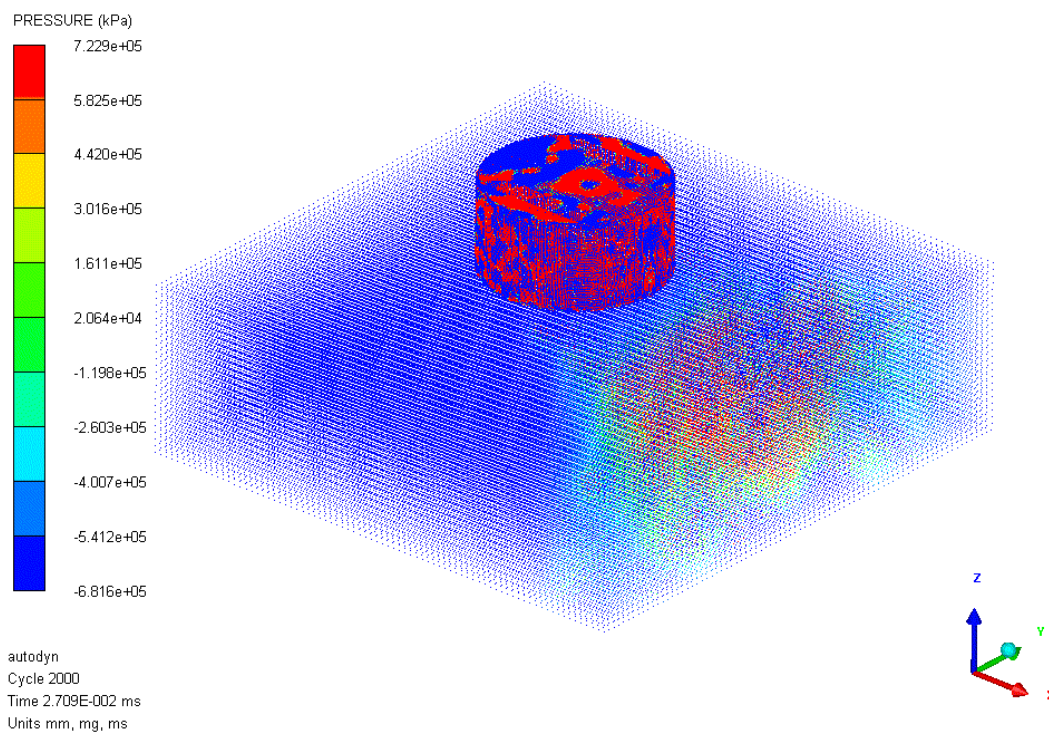
شکل ۵-۶۲: توزیع فشار در مدل (500kg-15m-Steel)



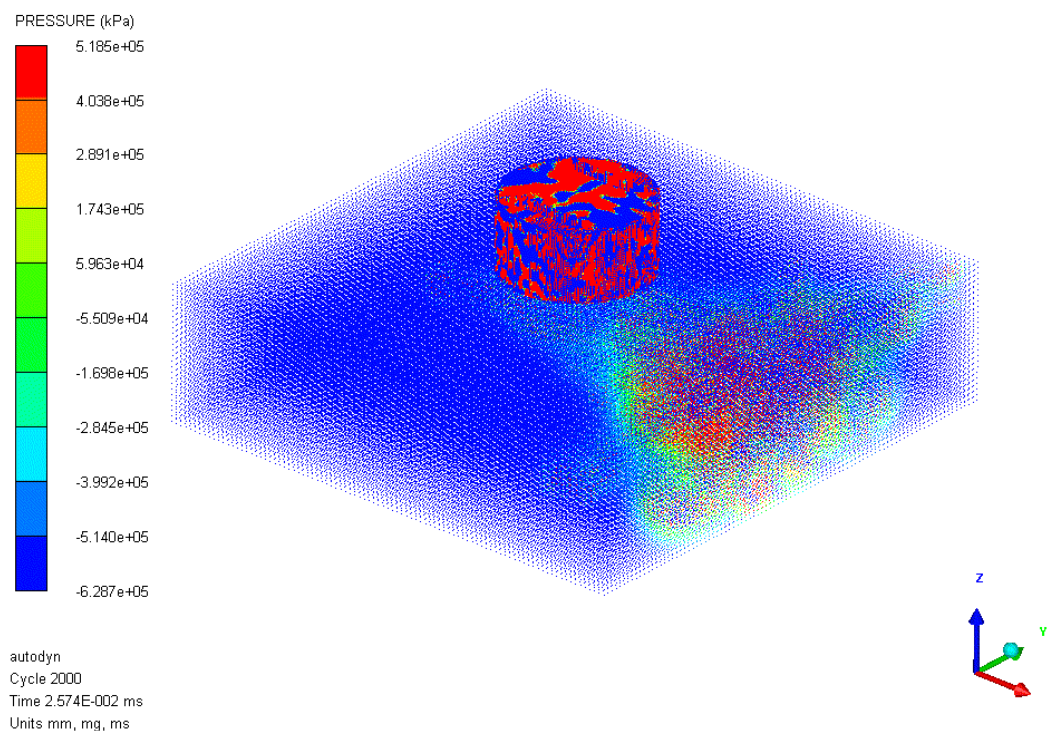
شکل ۵-۶۳: توزیع فشار در مدل (500kg-20m- Steel)



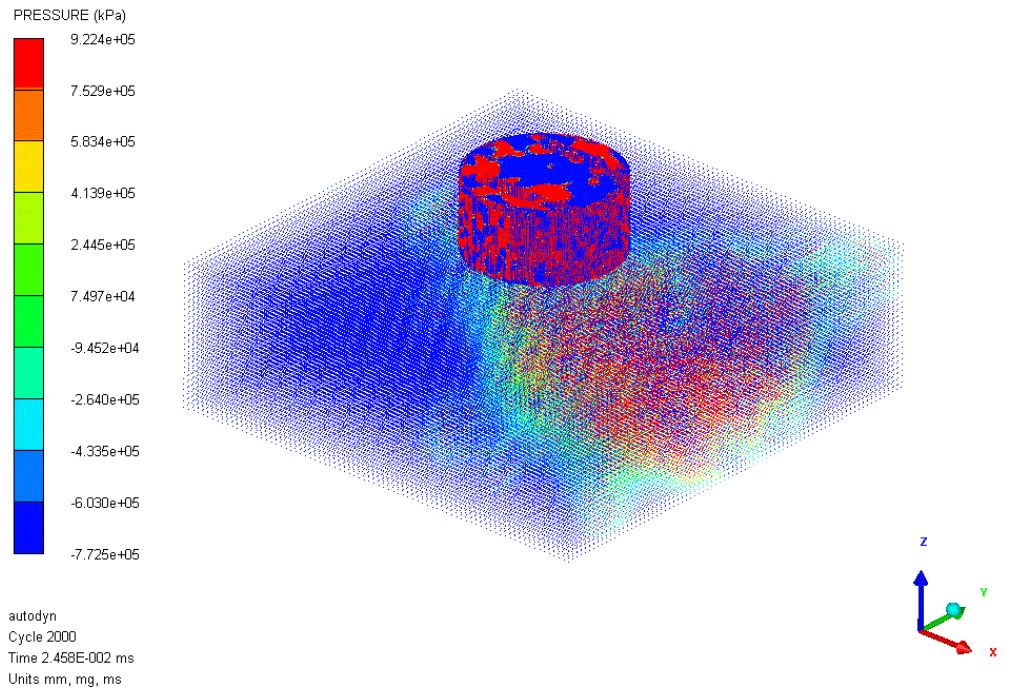
شکل ۵-۶۴: توزیع فشار در مدل (1000kg-10m- Steel)



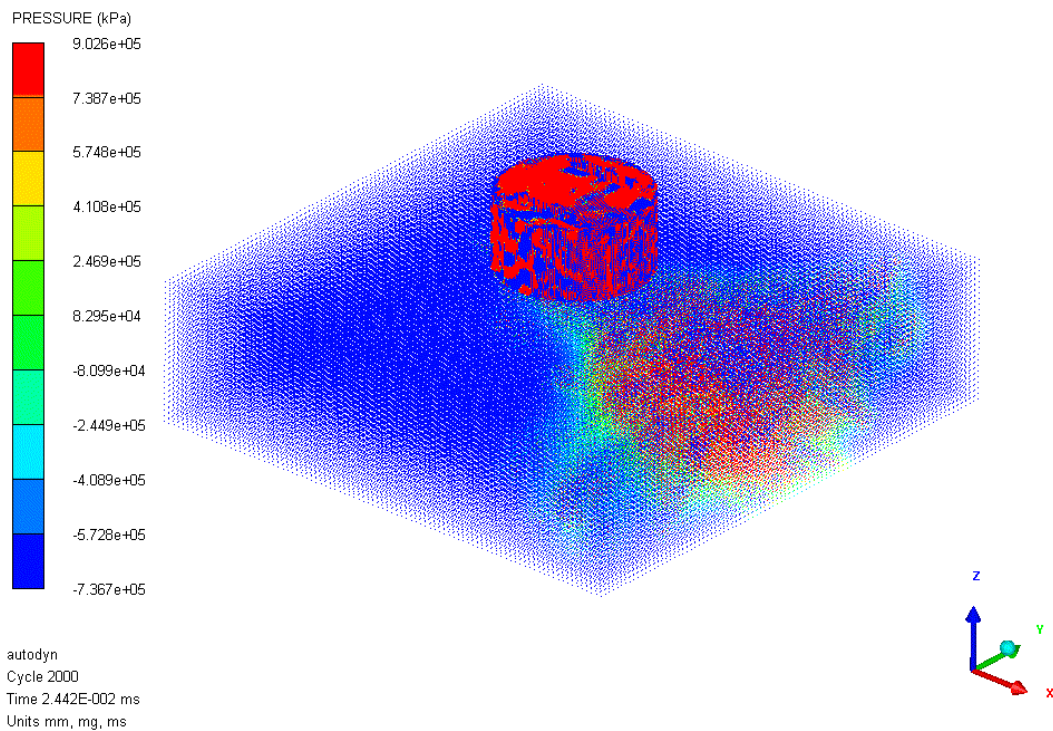
شکل ۵-۶۵: توزیع فشار در مدل (1000kg-15m- Steel)



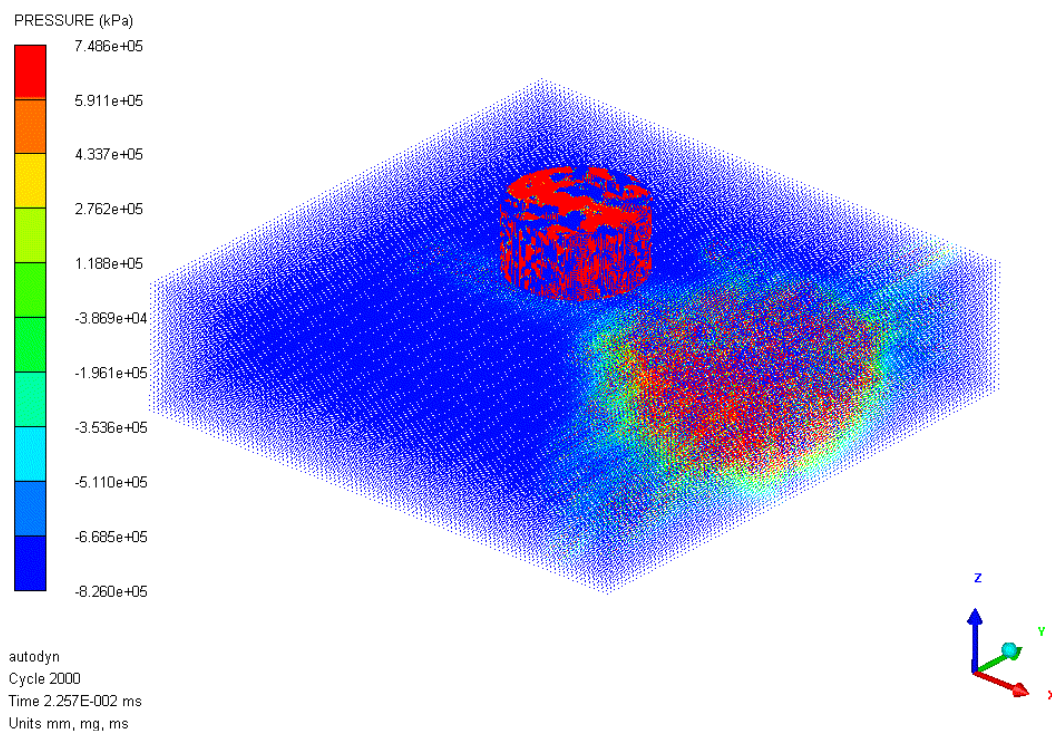
شکل ۵-۶۶: توزیع فشار در مدل (1000kg-20m- Steel)



شکل ۵-۶۷: توزیع فشار در مدل (2000kg-10m- Steel)



شکل ۵-۶۸: توزیع فشار در مدل (2000kg-15m- Steel)

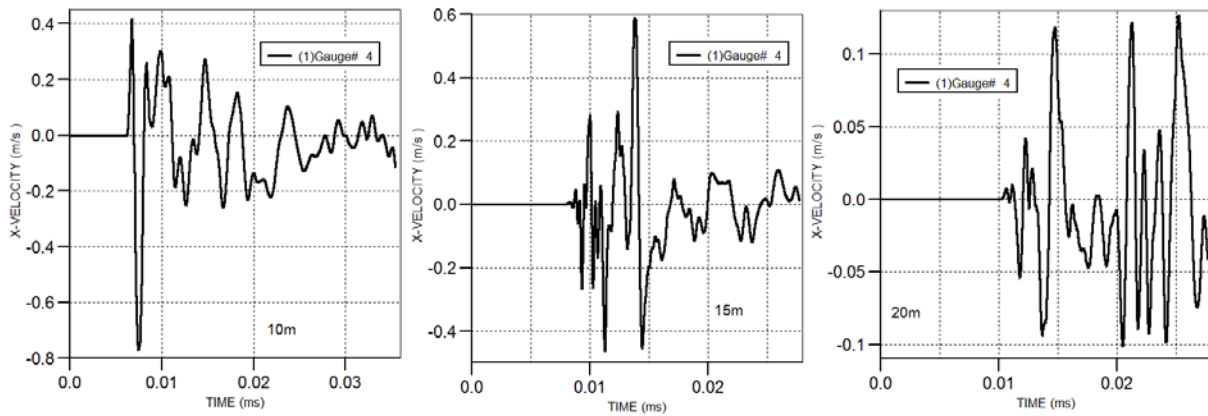


شکل ۵-۶۹: توزیع فشار در مدل (2000kg-20m- Steel)

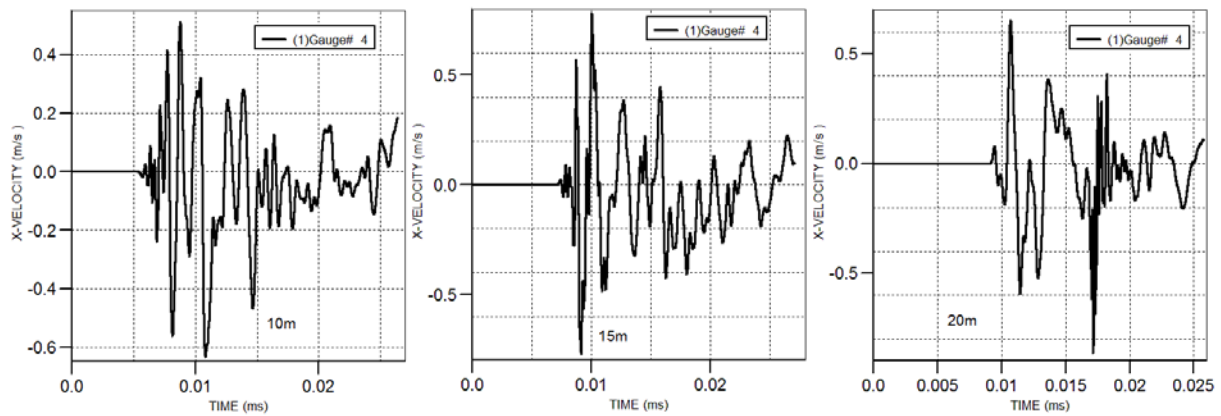
شکل ۵-۶۷ نحوه توزیع فشار را در بخش‌های مختلف مدل نشان می‌دهد. در این شکل مخزن فولادی می‌باشد. ماکزیمم فشار وارد بر مخزن در این حالت که سیکل ۲۰۰۰ معادل لحظه ۰/۰۲۲ میلی‌ثانیه می‌باشد، ۷۴۸۶۰۰ کیلوپاسگال می‌باشد که با رنگ قرمز در بخش‌های مدل مشخص شده است. به همین ترتیب سایر رنگها مقادیر مختلف فشار را در این لحظه در این مدل و سایر مدل‌ها مشخص می‌کنند.

۵-۵-تاریخچه سرعت و جابجایی

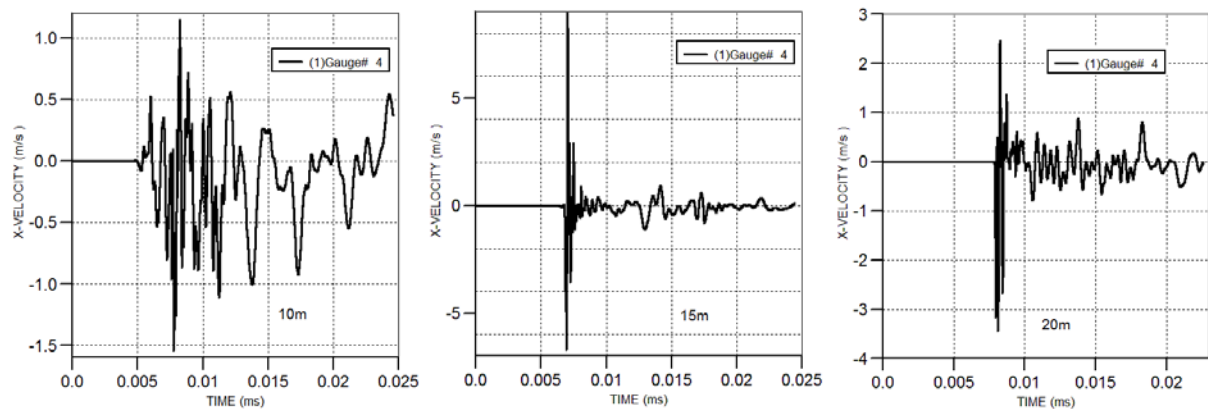
یکی دیگر از پارامترهای ثبت شده توسط گیج‌های قرار داده شده در بخش‌های مختلف مخازن، پارامتر سرعت حرکت آن قسمتی از مدل می‌باشد که با وارد شدن فشار به آن محل، باعث جابه‌جایی با سرعتی مشخص می‌شود. اشکال ۵-۶۸ تا ۵-۷۲ نمودارهای سرعت-زمان را در لبه بالایی مقابل محل انفجار (گیج شماره ۴) را نشان می‌دهند. همچنین با انتگرال‌گیری از این دیاگرام‌ها می‌توان تغییر شکل (میزان جابجایی) در نقاط مذکور را بدست آورد.



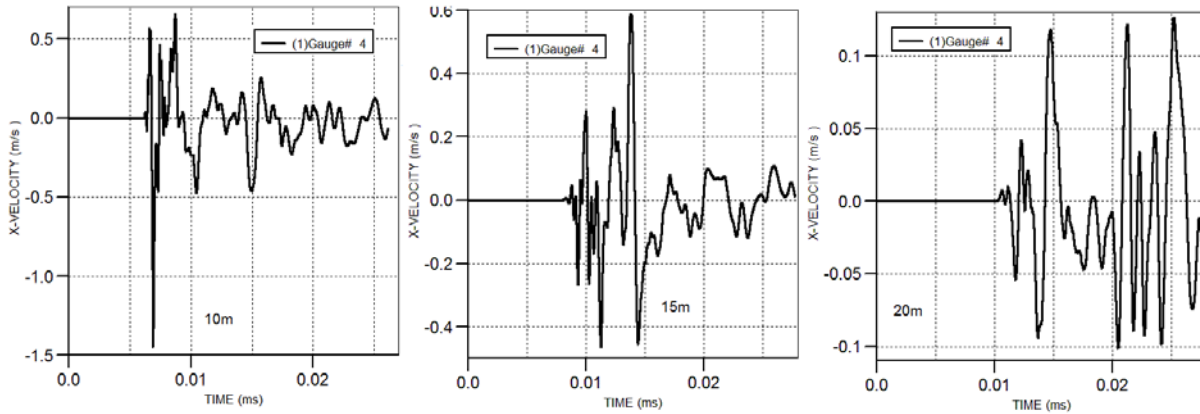
۷۰-۵: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)



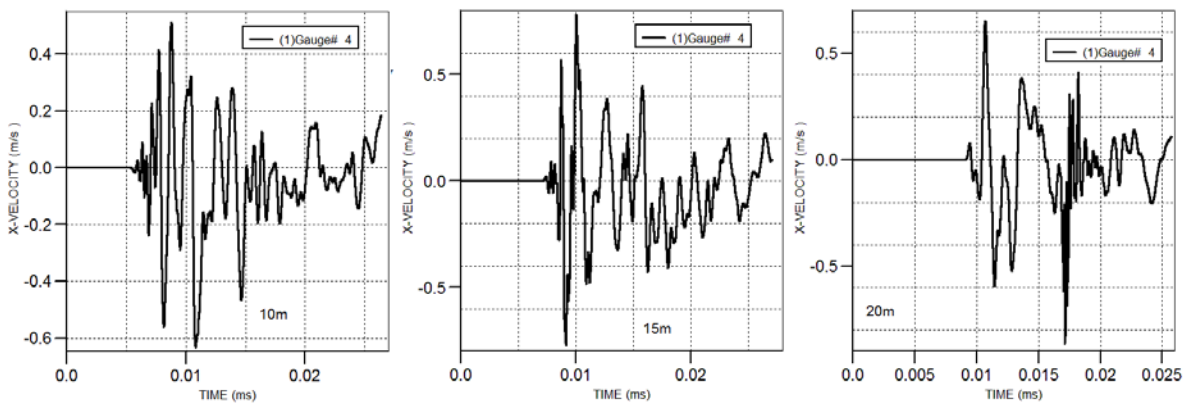
۷۱-۵: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)



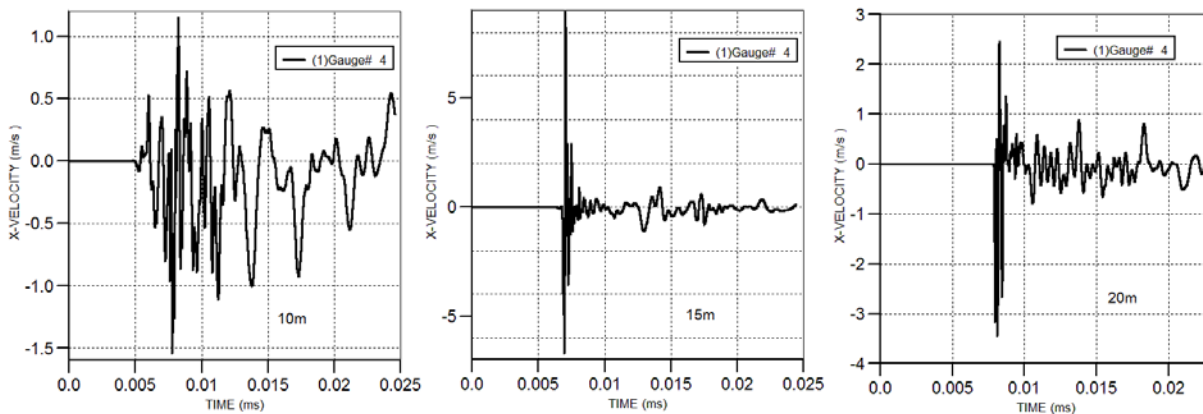
۷۲-۵: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Concrete)



۵-۷۳: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)

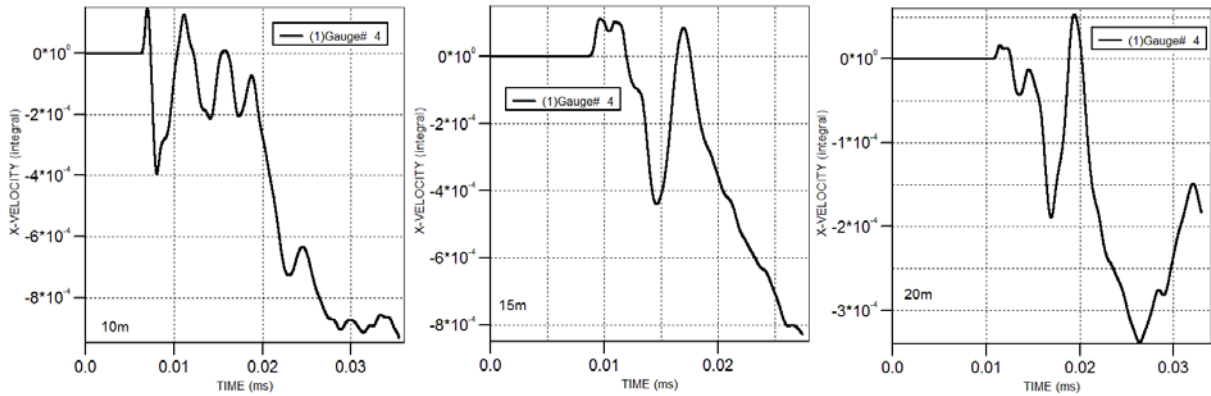


۵-۷۴: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)

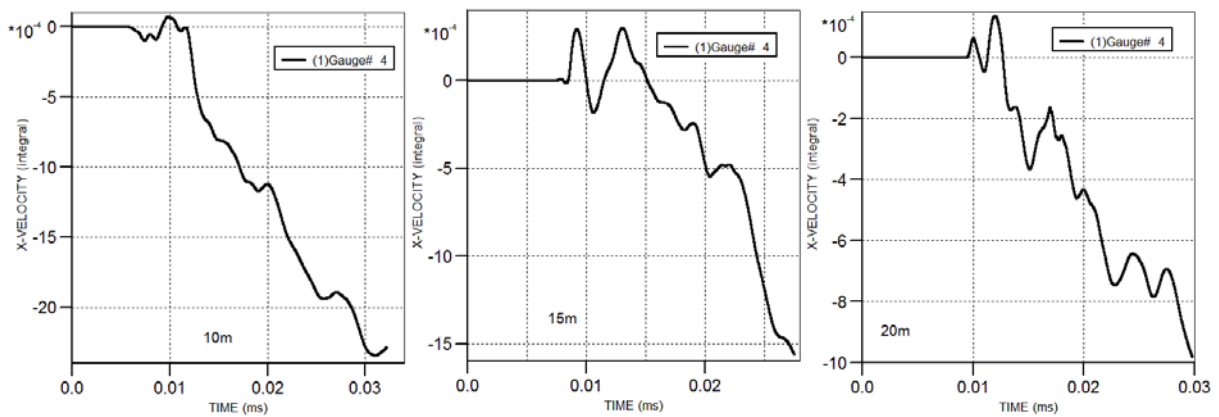


۵-۷۵: تغییرات سرعت و جابجایی در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره (Steel)

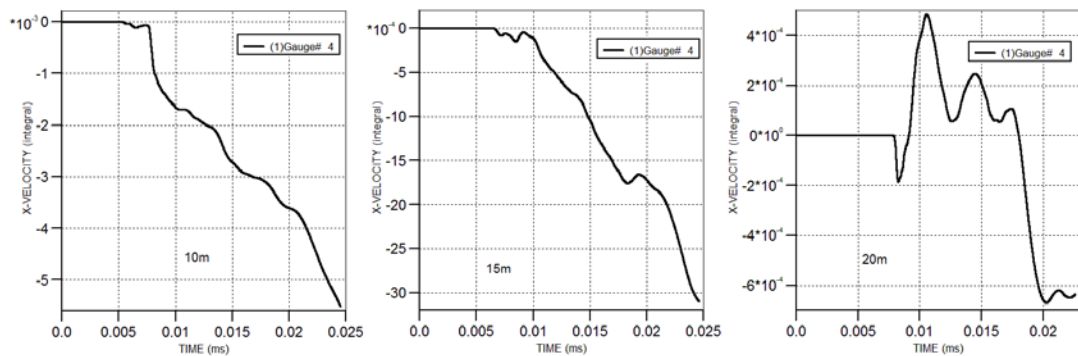
حال با انتگرال گیری از نمودارهای ۵-۶۸ تا ۵-۷۲ می توانیم مقدار جابه جایی را که توسط گیج شماره ۴ بر حسی میلی متر بر ثانیه ثبت شده است را بدست آوریم. نمودارهای ۵-۷۳ تا ۵-۷۸ این جابه جایی را در لحظات مختلف نشان می دهند.



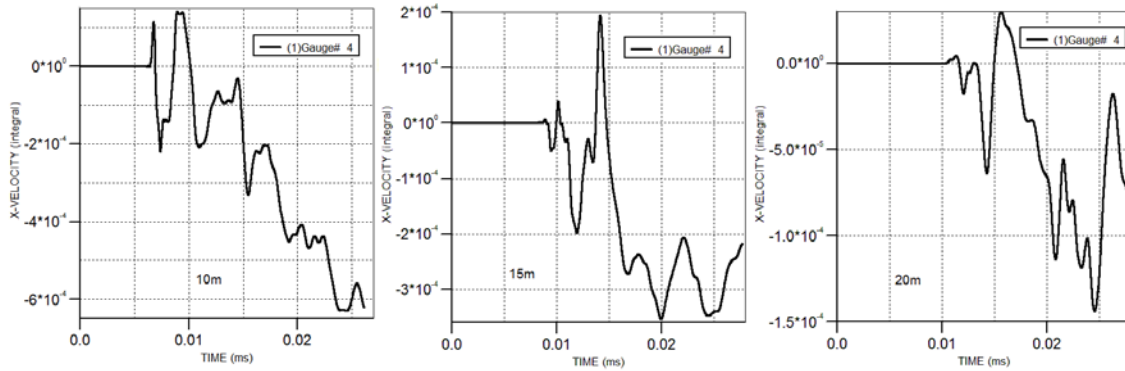
۵-۷۶: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۵۰۰ کیلوگرم (Concrete)



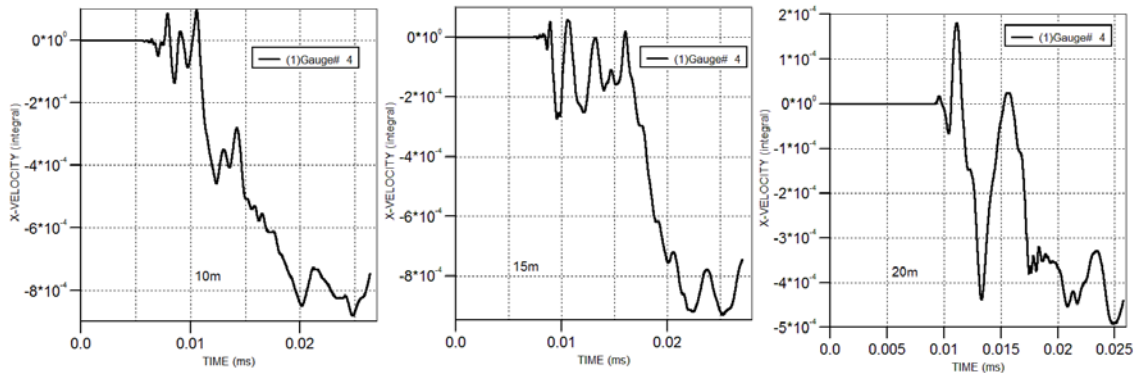
۵-۷۷: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم (Concrete)



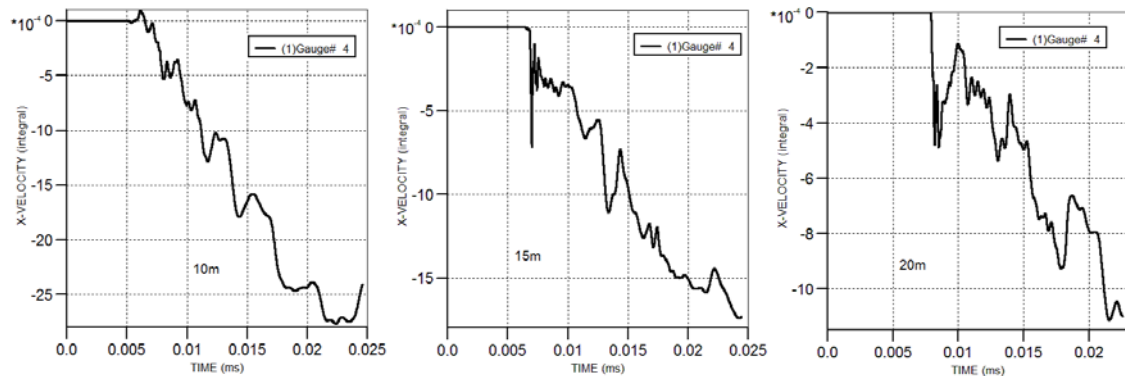
۵-۷۸: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم (Concrete)



۷۹-۵: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۵۰۰ کیلوگرم (Steel)



۸۰-۵: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۱۰۰۰ کیلوگرم (Steel)



۸۱-۵: نمودار جابجایی-زمان در حالت ۲۰۰۰ کیلوگرم (Steel)

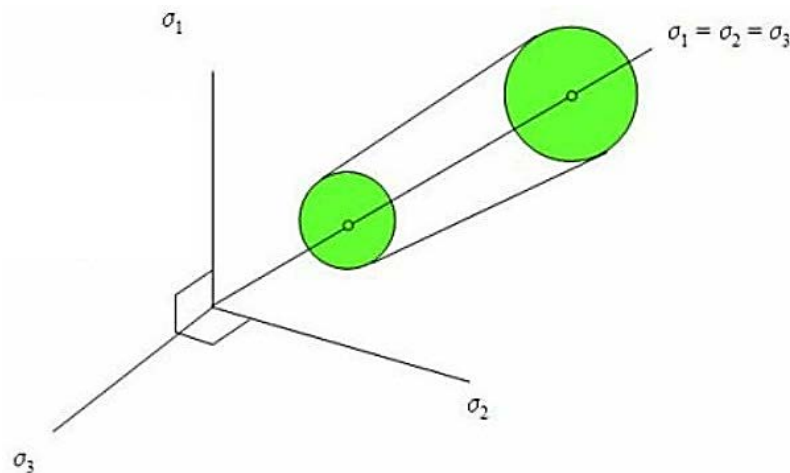
مقادیر جابه‌جایی در نمودارهای با گذر زمان افزایش یافته‌اند. اما همانطور که از این مقادیر مشخص است اعداد بسیار کوچک بوده و بعضاً به یک میلی‌متر هم نرسیده‌اند. دلیل این امر را می‌توان اثر کم ماده منفجره در آن نقطه به دلیل فاصله زیاد از محل انفجار و شکل هندسی مخزن در نظر گرفت. توجه داشته باید که علامت منفی جهت حرکت را نشان می‌دهد.

۵-۶- بررسی تنش وان میس

شکل‌های ۷۹-۵ تا ۹۶-۵ نحوه توزیع تنش وان میس را در هر یک از حالت‌ها، از لحظه شروع انفجار تا پایان نشان می‌دهد. این شکل‌های ۲۰۰ سیکل در میان نمایش داده شده‌اند.

تنش وان میس برای طراحی پناه‌گاه‌های امن استفاده می‌شود. در صورتی که مقدار ماکزیمم تنش وان میس ناشی شده از معادلات مصالح موجود بیشتر باشد، سازه قدرت تحمل تنش‌های ایجاد شده را نخواهد داشت. این مدل از فرض اولیه وان میس استفاده می‌کند. برطبق مدل اولیه وان میس، تنش تسلیم دارای یک مقدار ثابت است. در نتیجه، استوانه وان میرز 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.

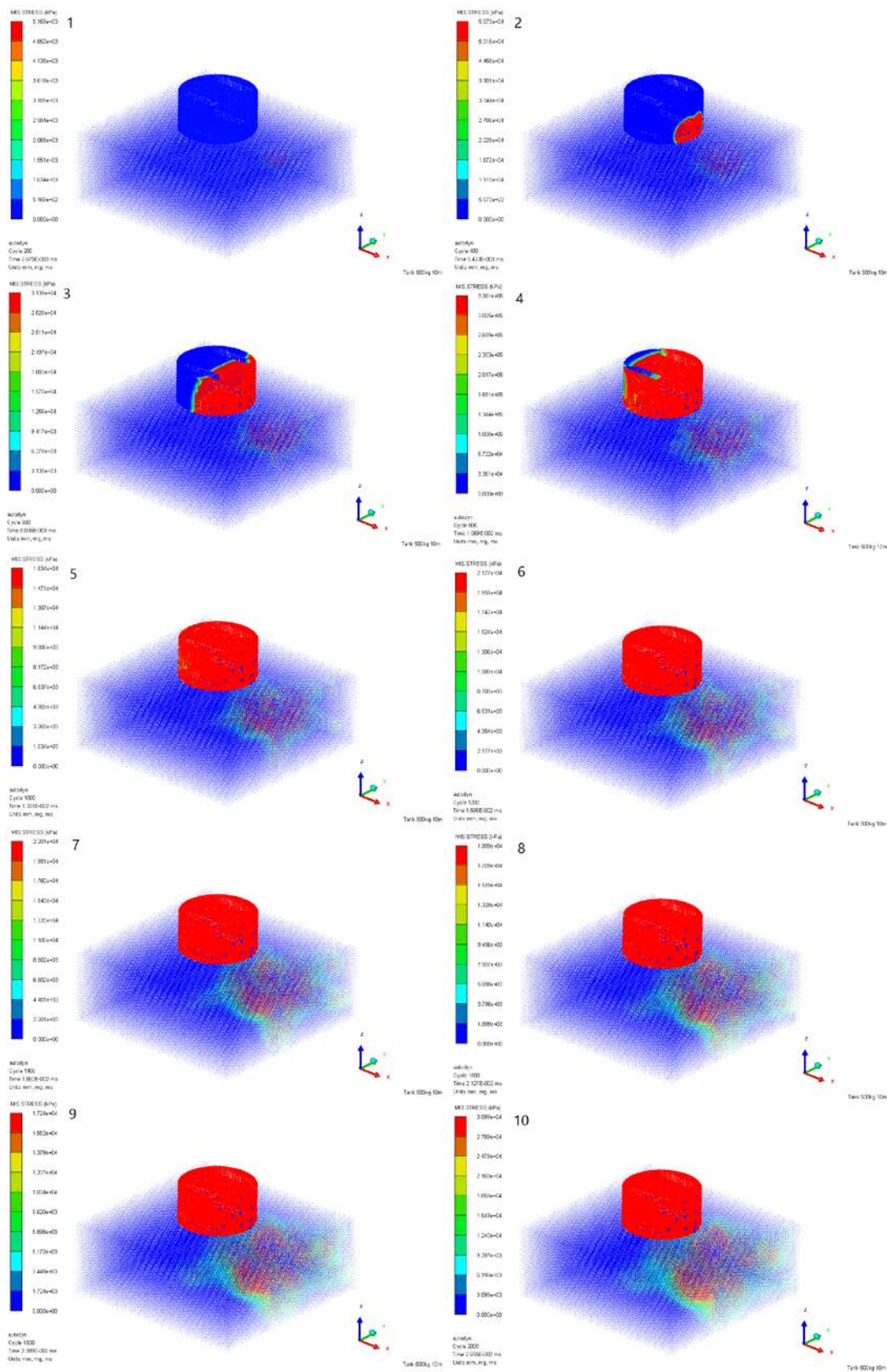


شکل ۵-۸۲: مدل فرضی وان میس

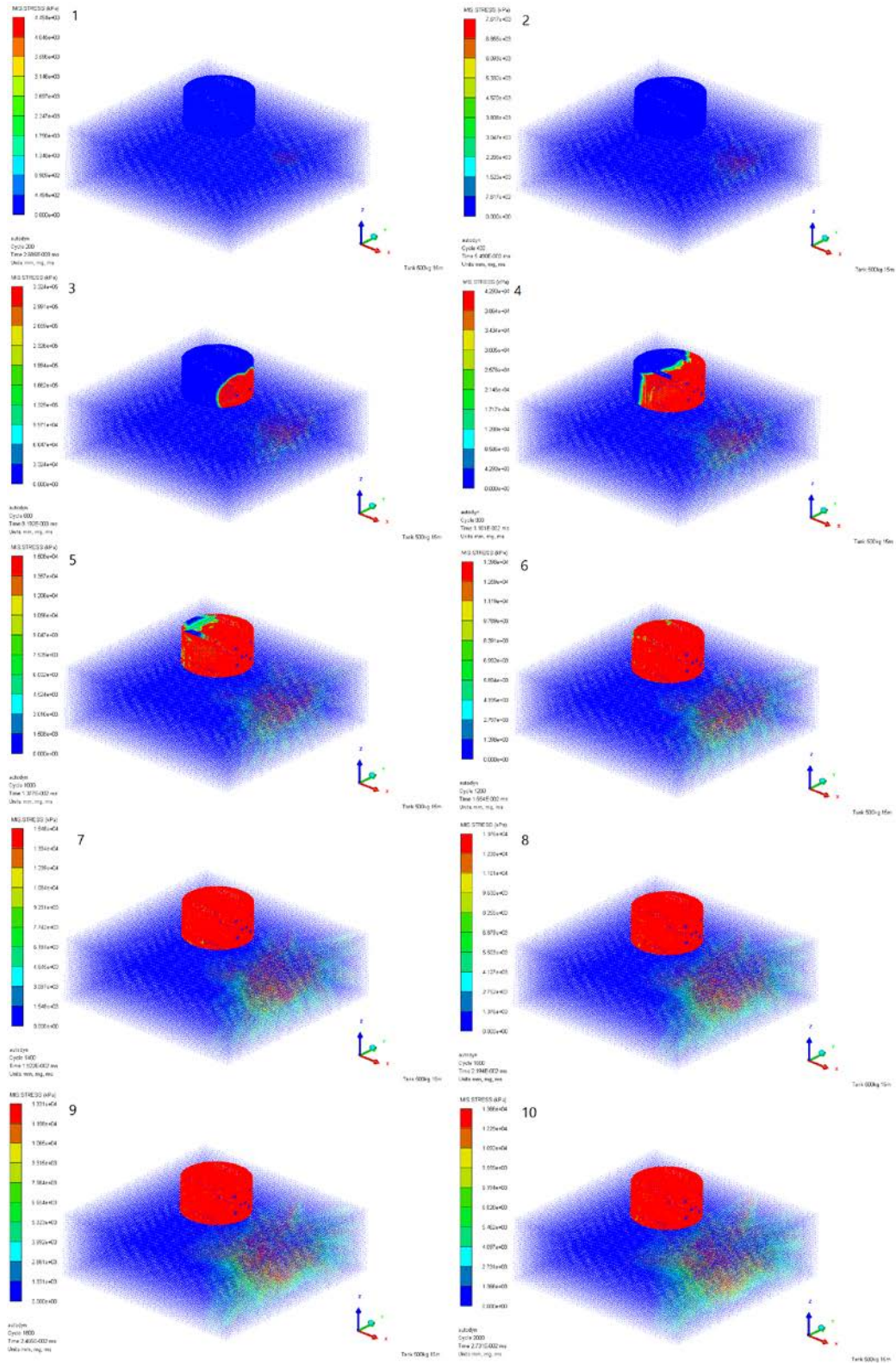
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

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

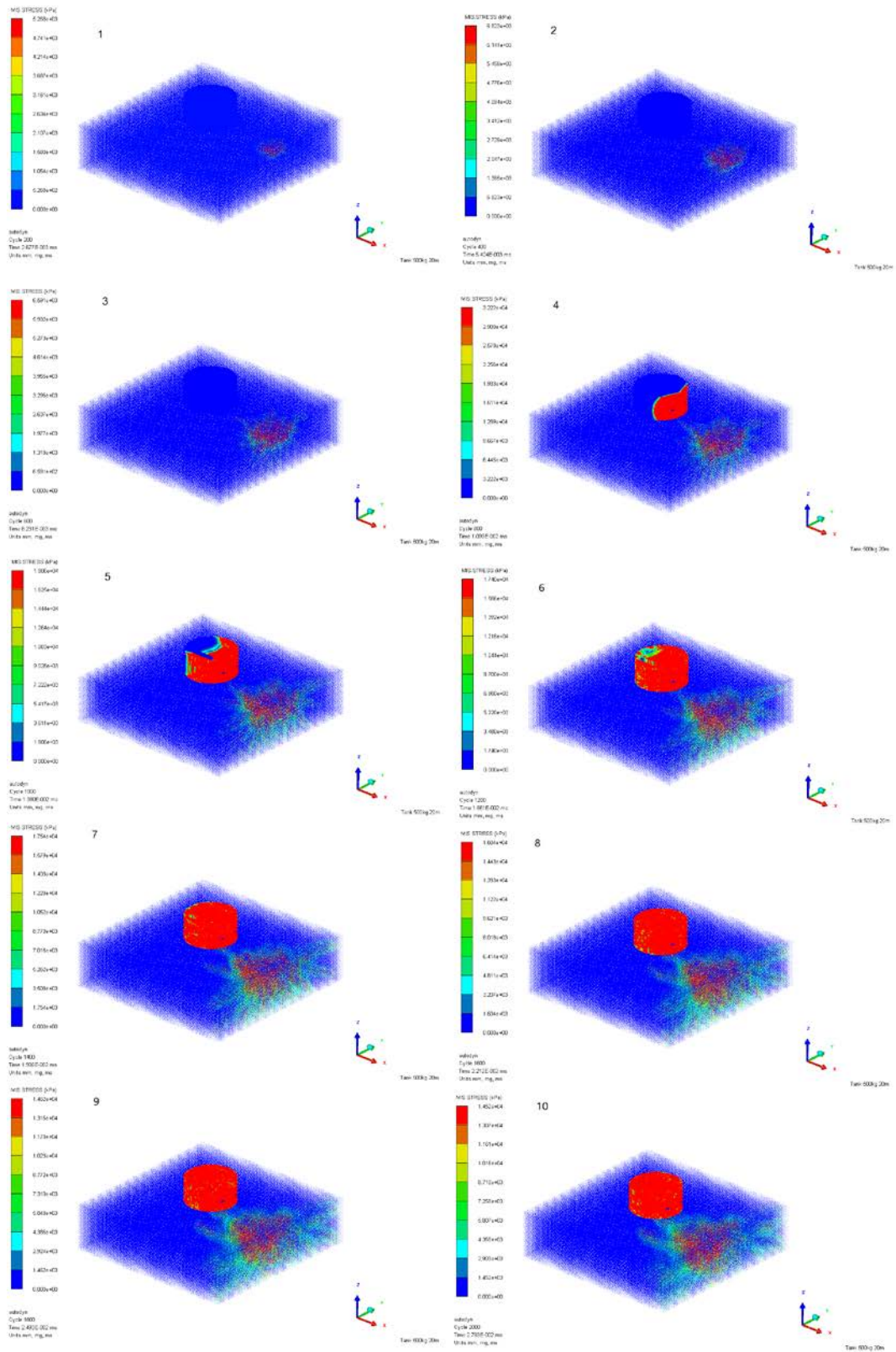
کانتور رنگی سمت چپ هر کدام از اشکال مقادیر این تنش را در بخش‌های مختلف مدل در سیکل مورد نظر نشان می‌دهد. به طور مثال در سیکل ۲۰۰۰، در حالت ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری در مخزن بتنی (شکل ۵-۷۹) مقدار ماکزیمم تنش وان میس در مدل که با رنگ قرمز نمایش داده شده است معادل ۳۰۹۹۰ کیلوپاسگال می‌باشد و این مقدار در مخزن فولادی معادل ۱۹۷۱۰۰۰ کیلوپاسگال می‌باشد. به همین ترتیب می‌توان مقادیر تنش وان میس را در بخش‌های مختلف مدلها از روی اشکال مشخص کرد.



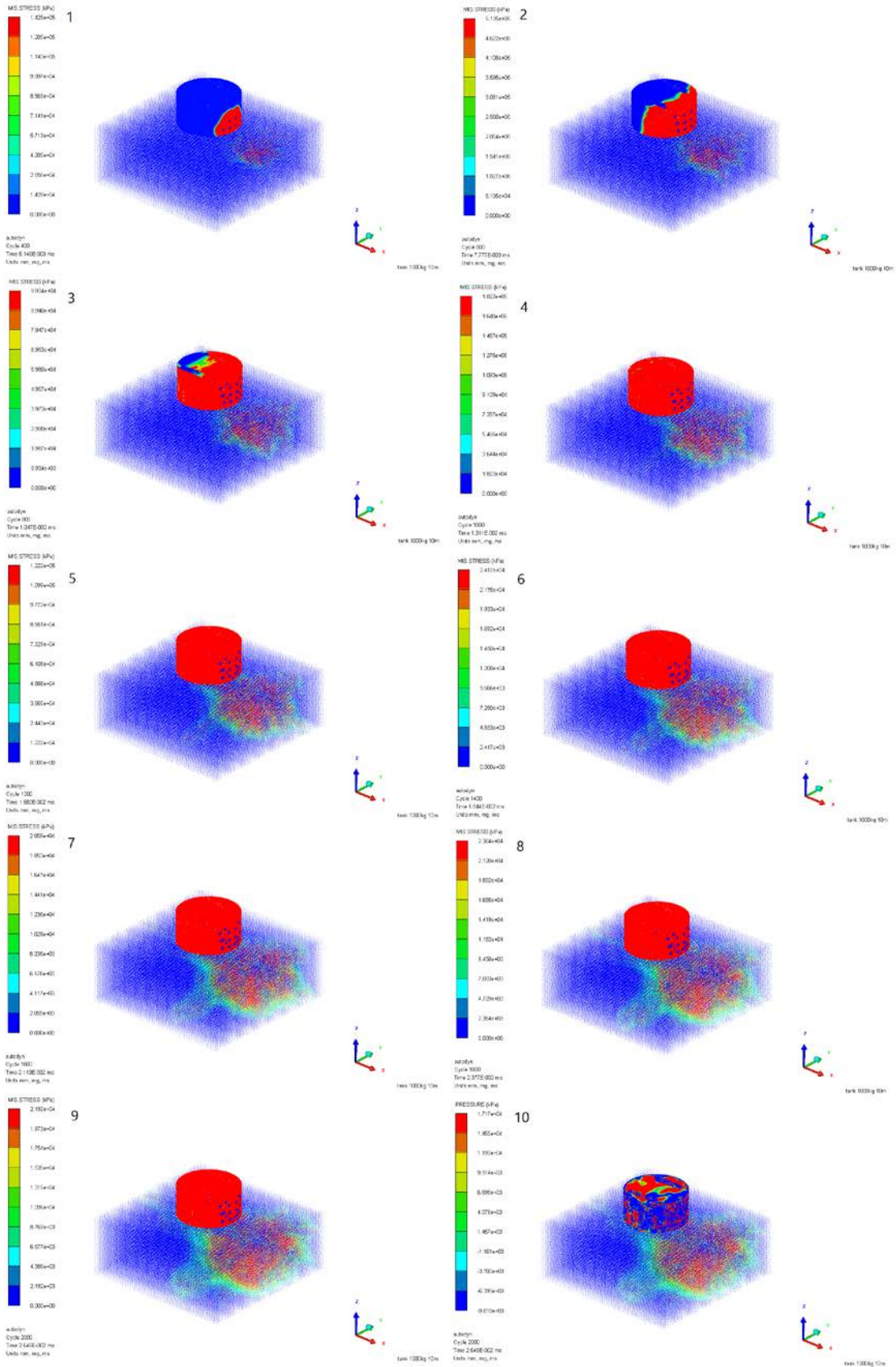
شکل ۵-۸۳: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-10m-Concrete)



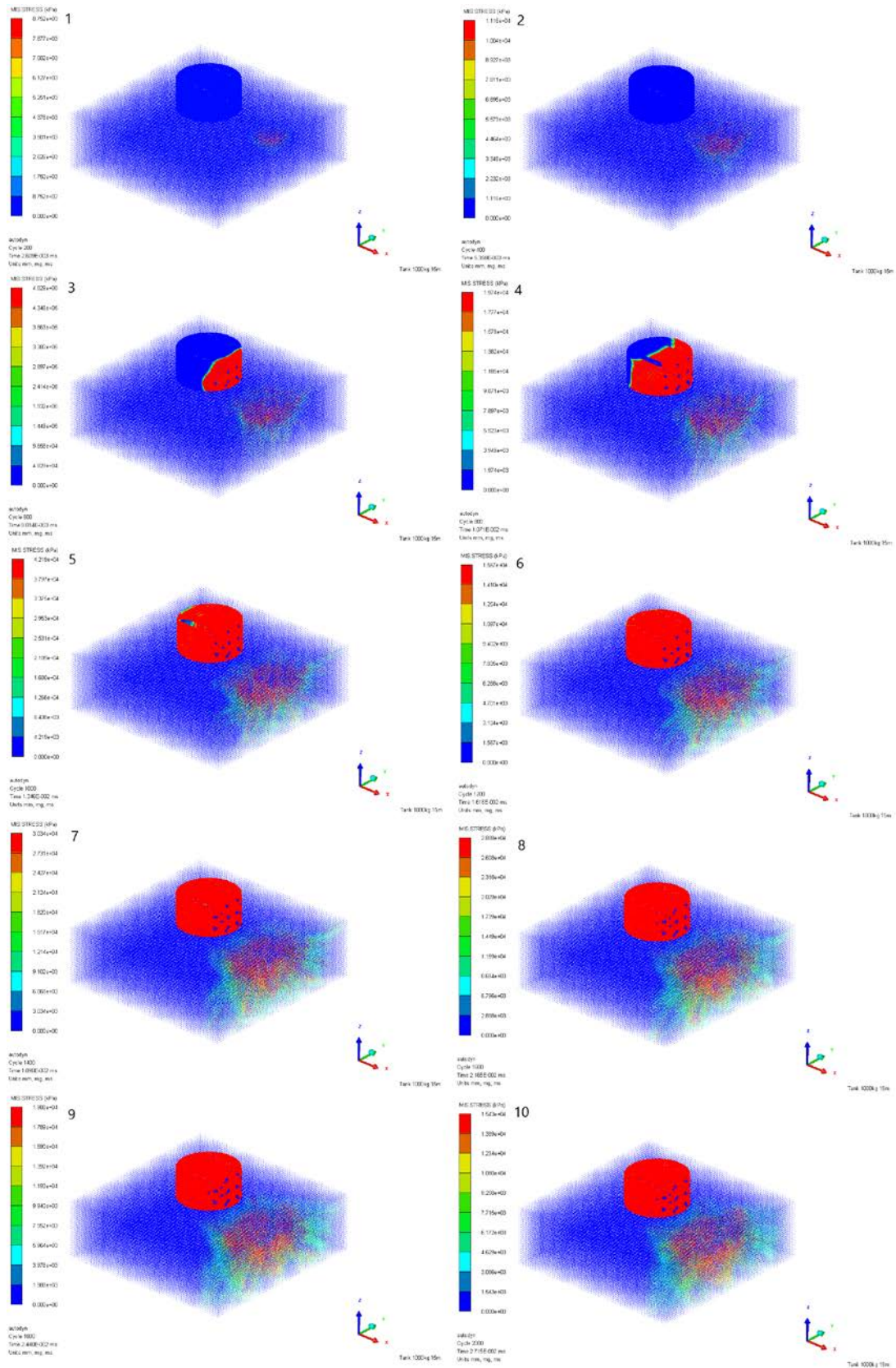
شکل ۵-۸۴: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-15m-Concrete)



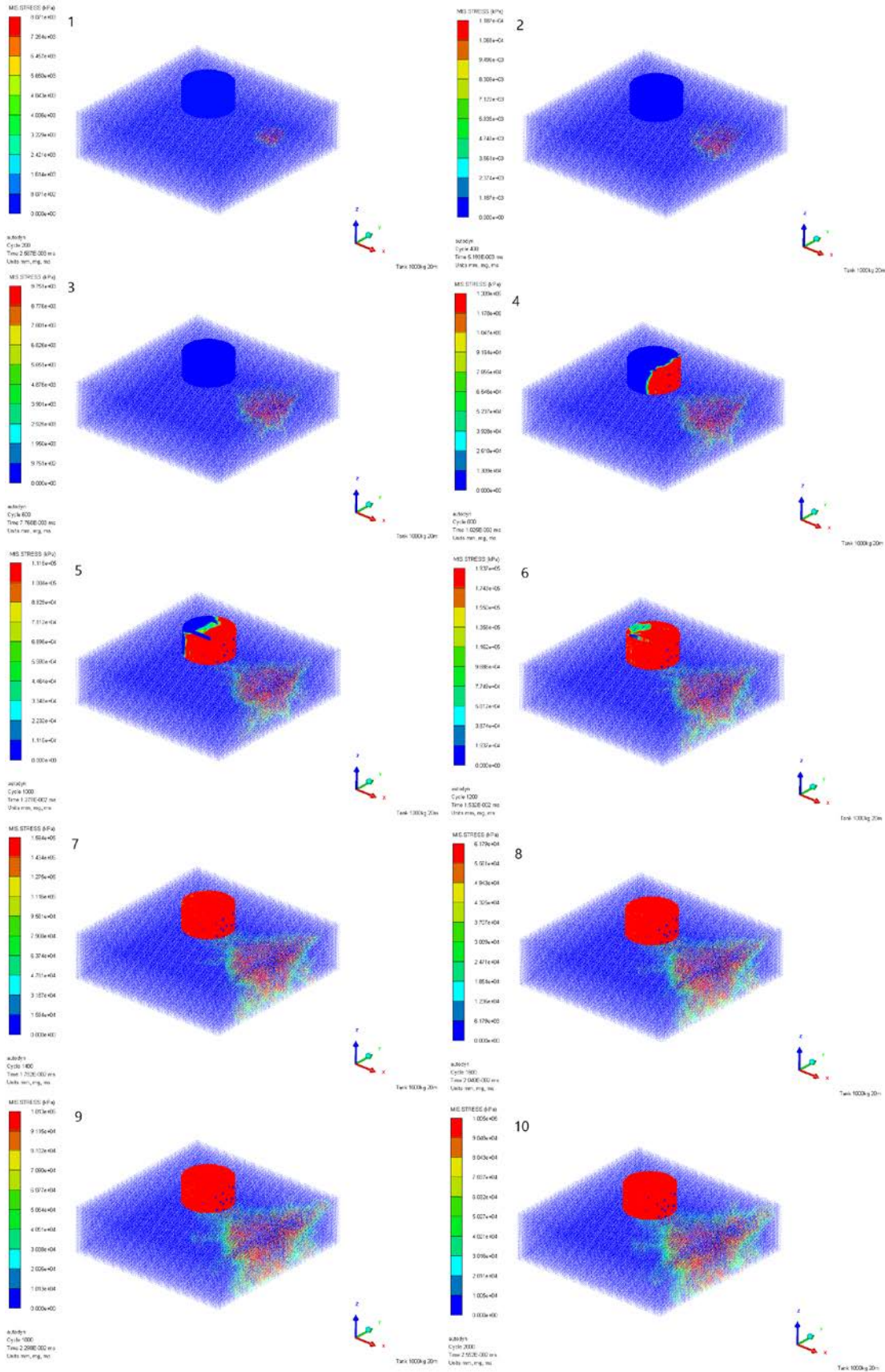
شکل ۵-۸۵: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-20m-Concrete)



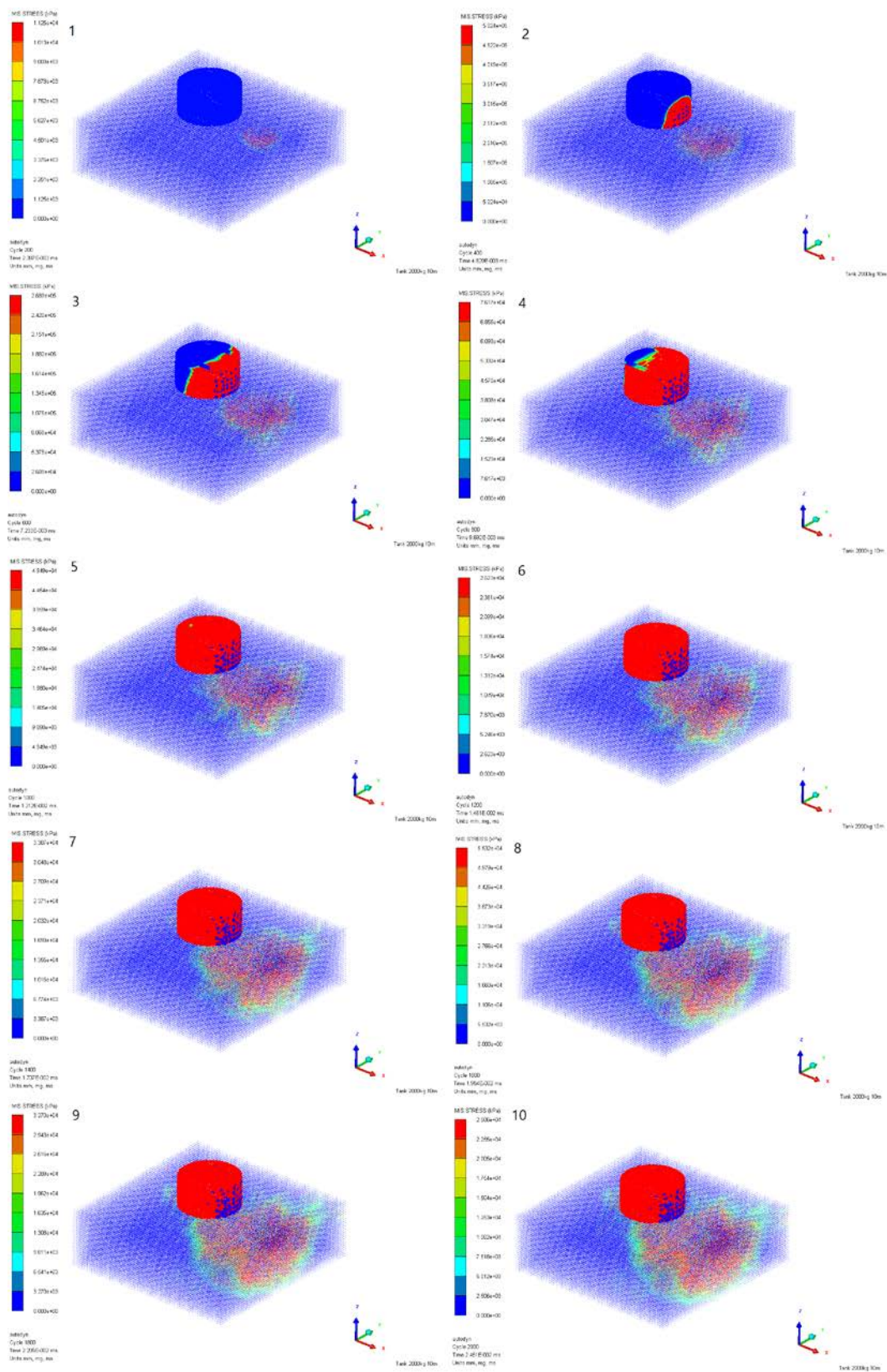
شکل ۵-۸۶: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-10m-Concrete)



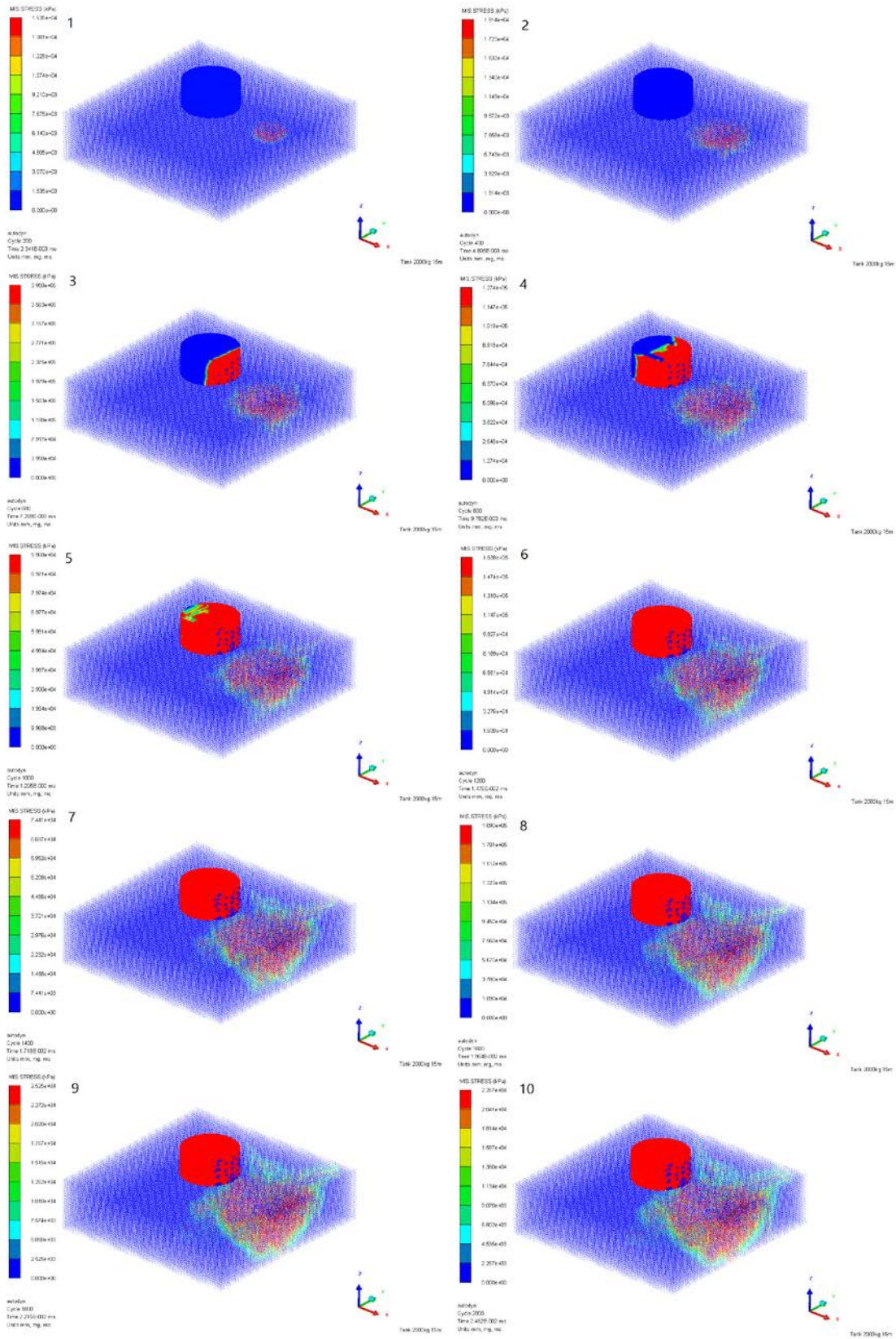
شکل ۵-۸۷: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-15m-Concrete)



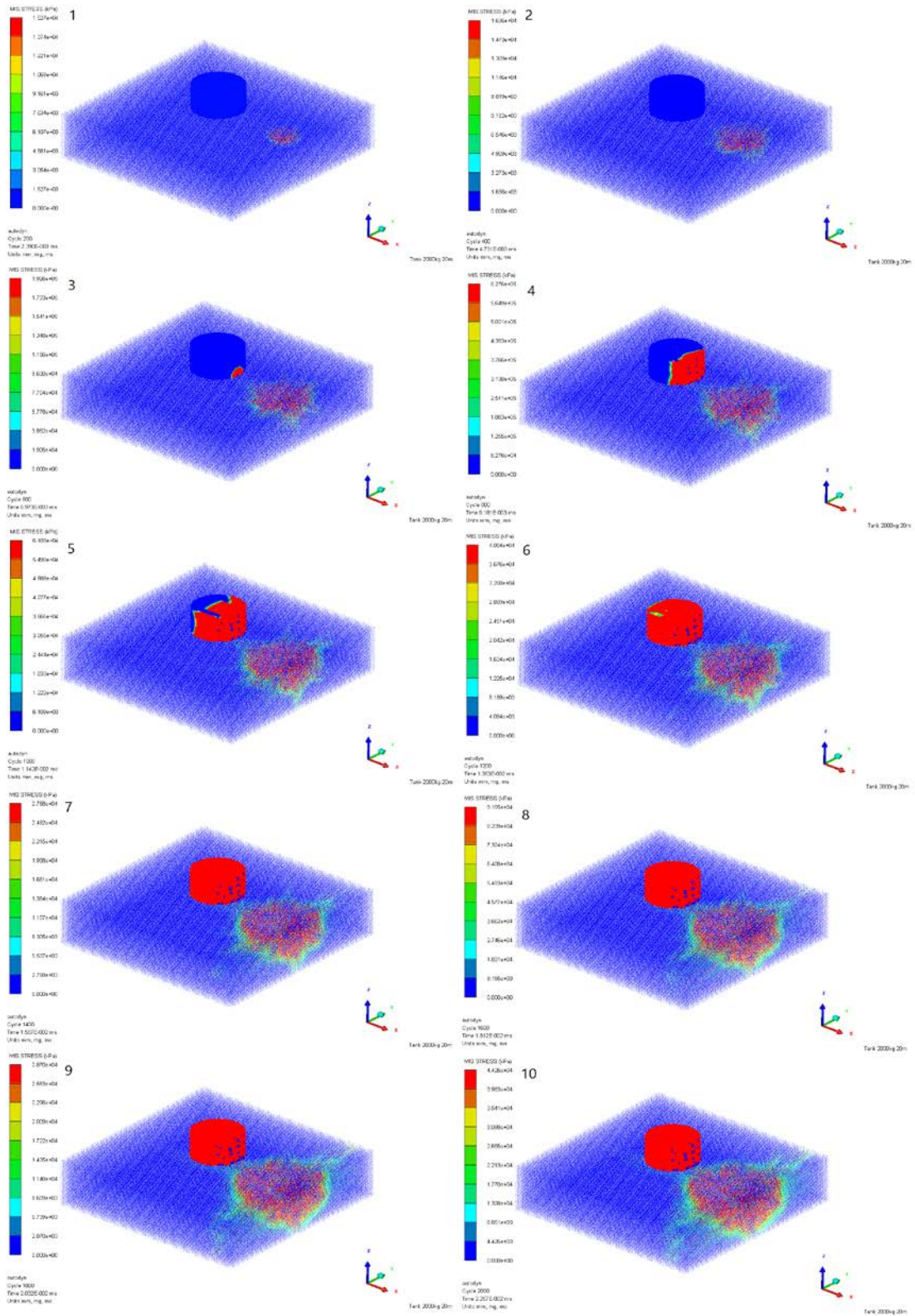
شکل ۵-۸: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-20m-Concrete)



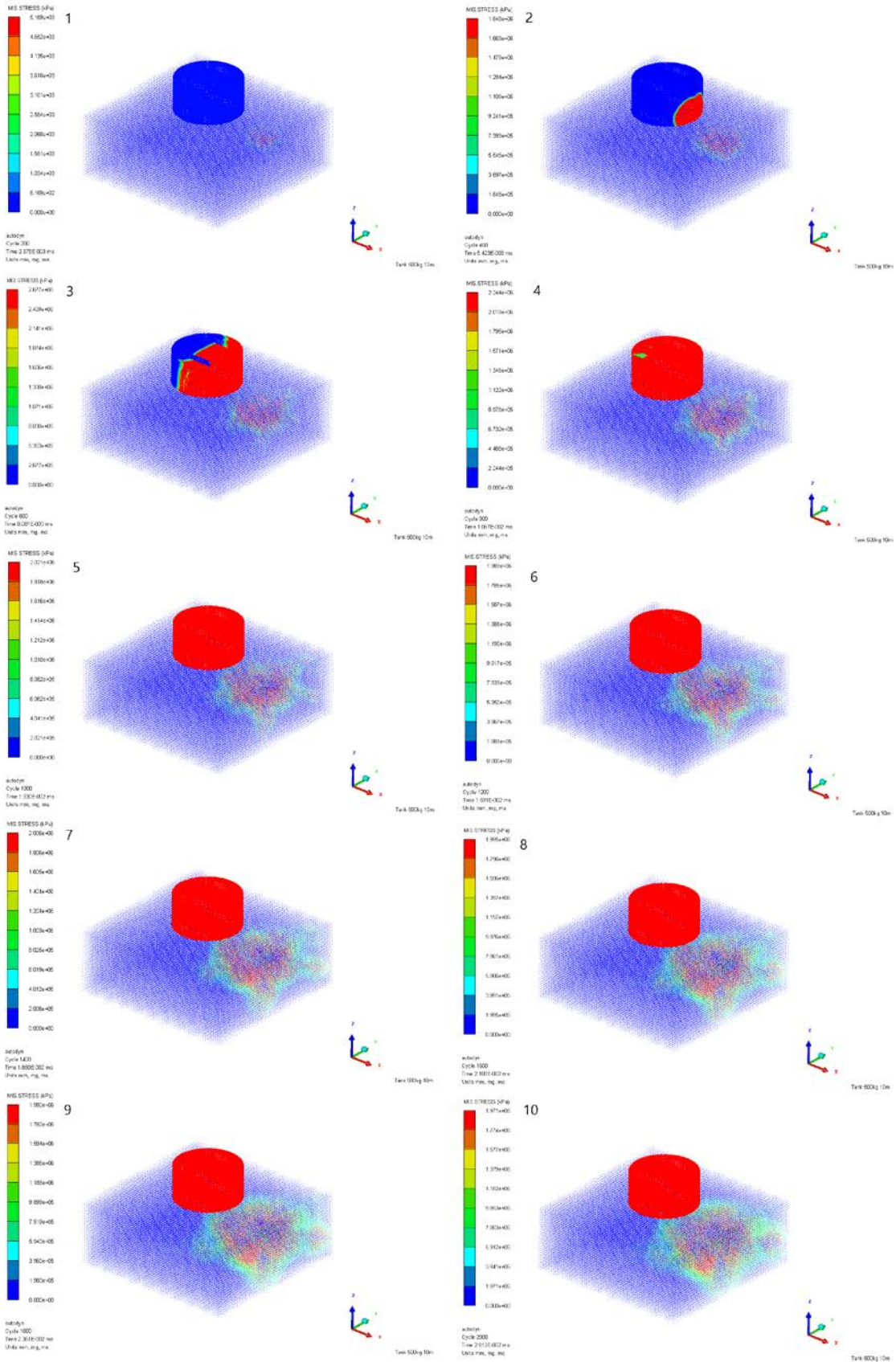
شکل ۵-۸۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-10m-Concrete)



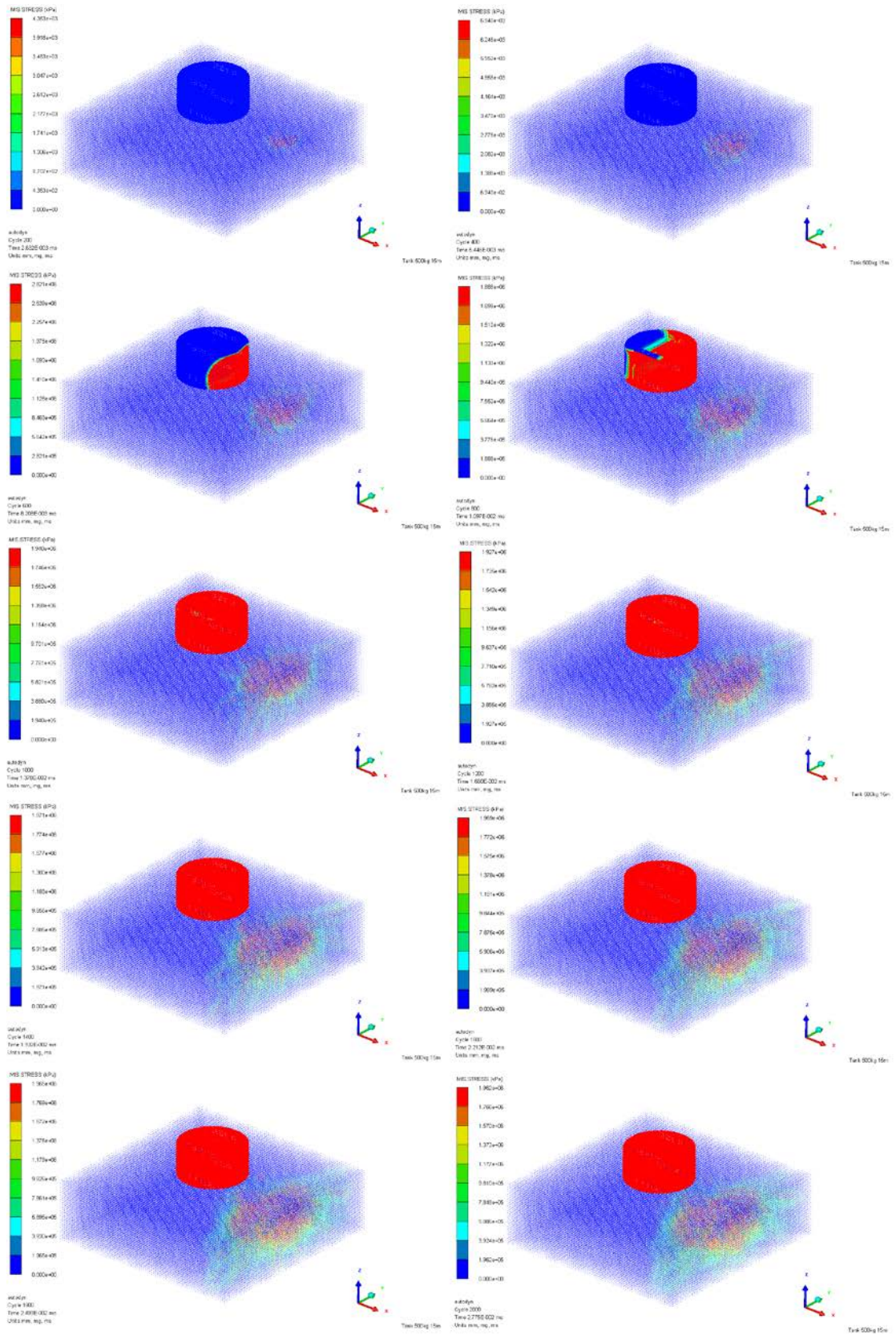
شکل ۵-۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-15m-Concrete)



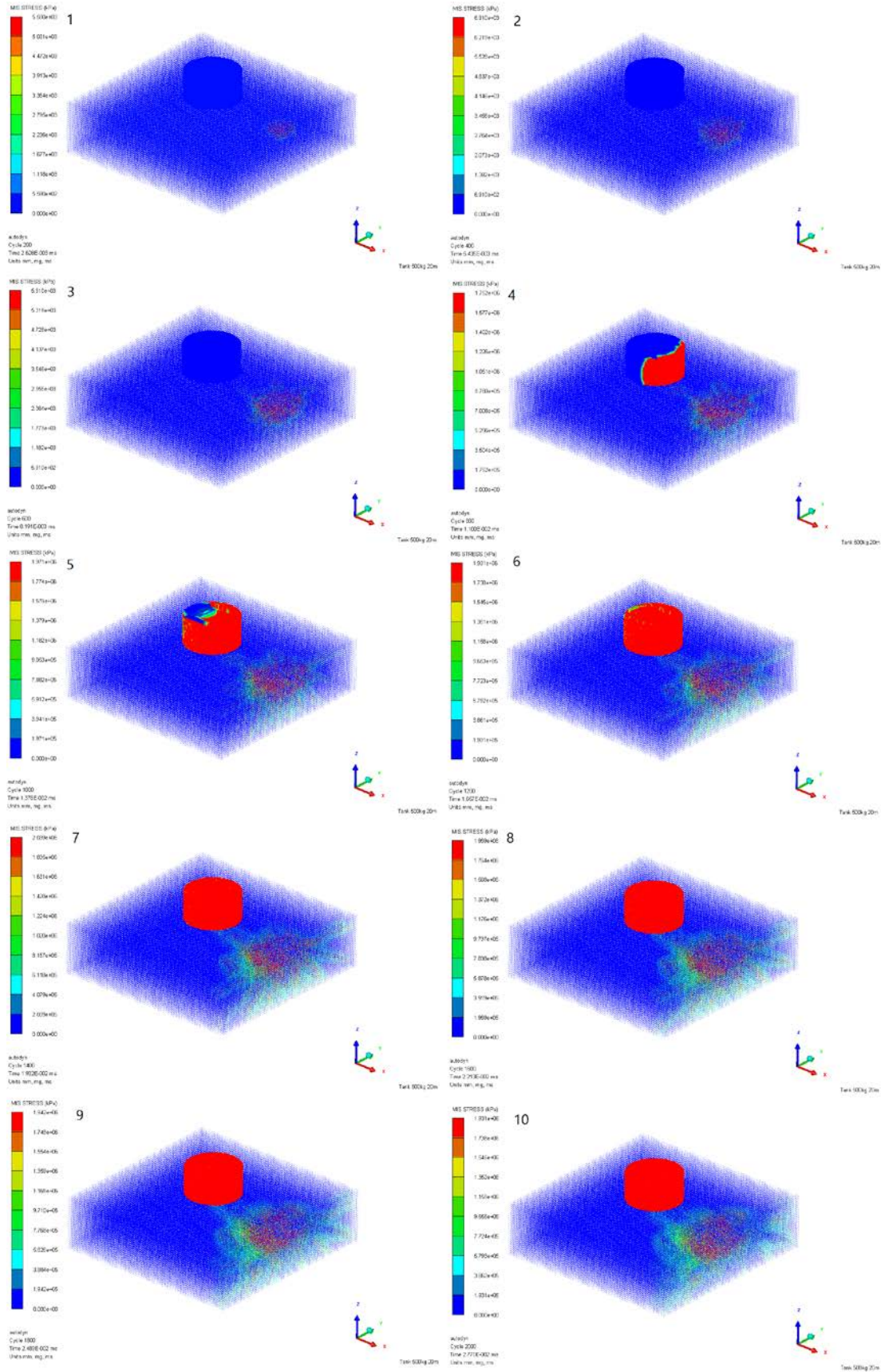
شکل ۵-۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-20m-Concrete)



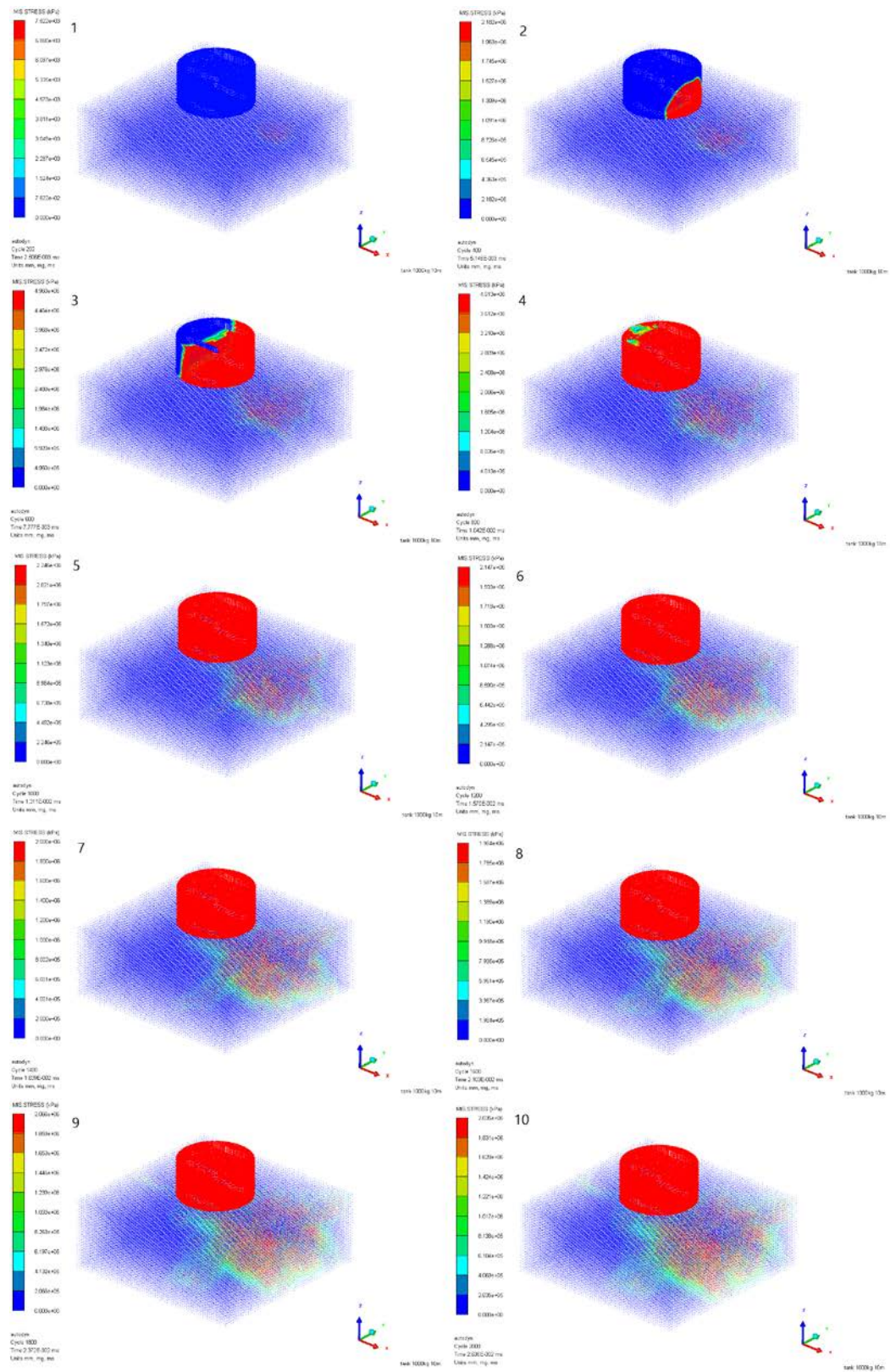
شکل ۵-۹۲: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-10m-Steel)



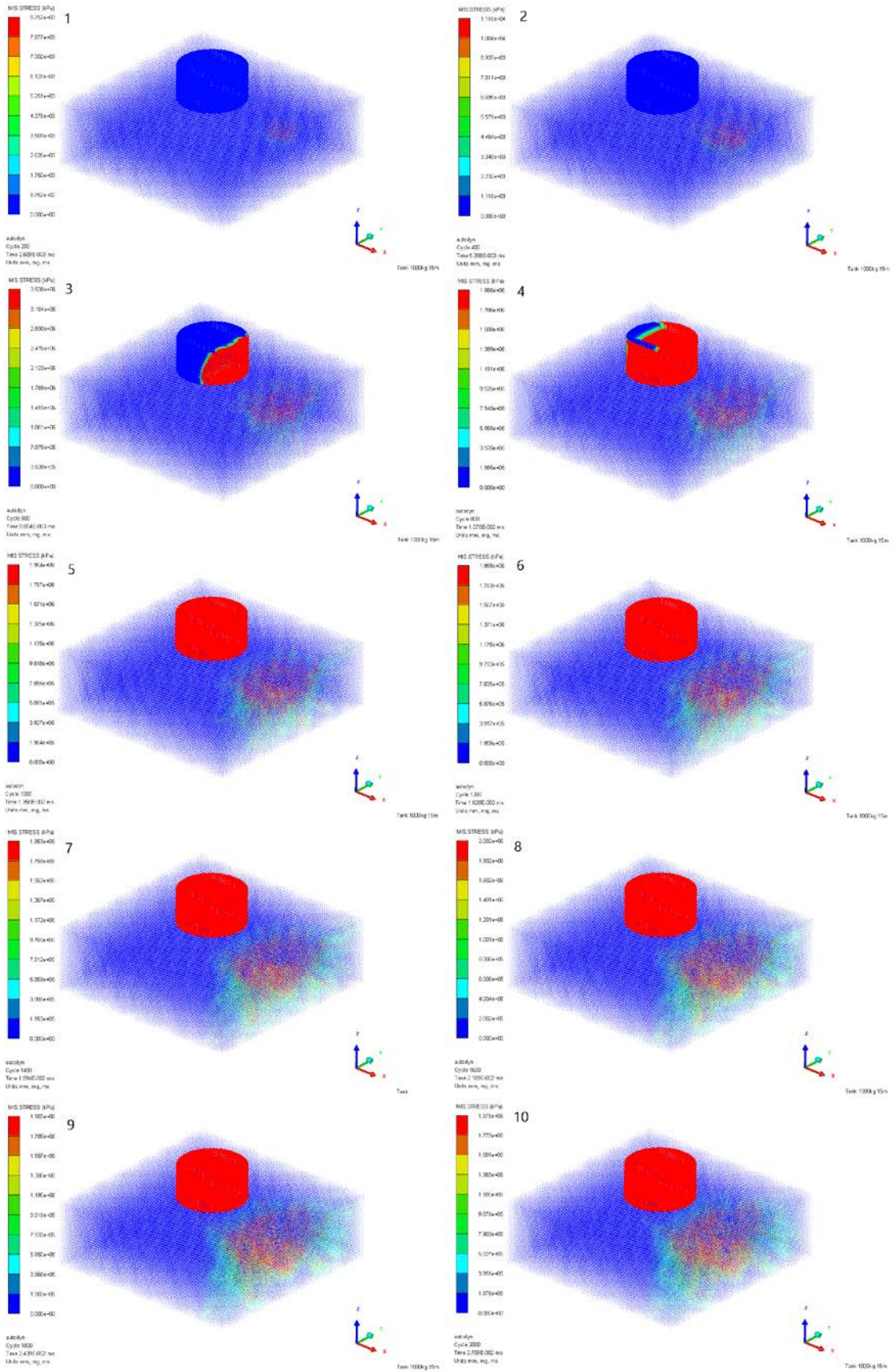
شکل ۵-۹۳: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-15m-Steel)



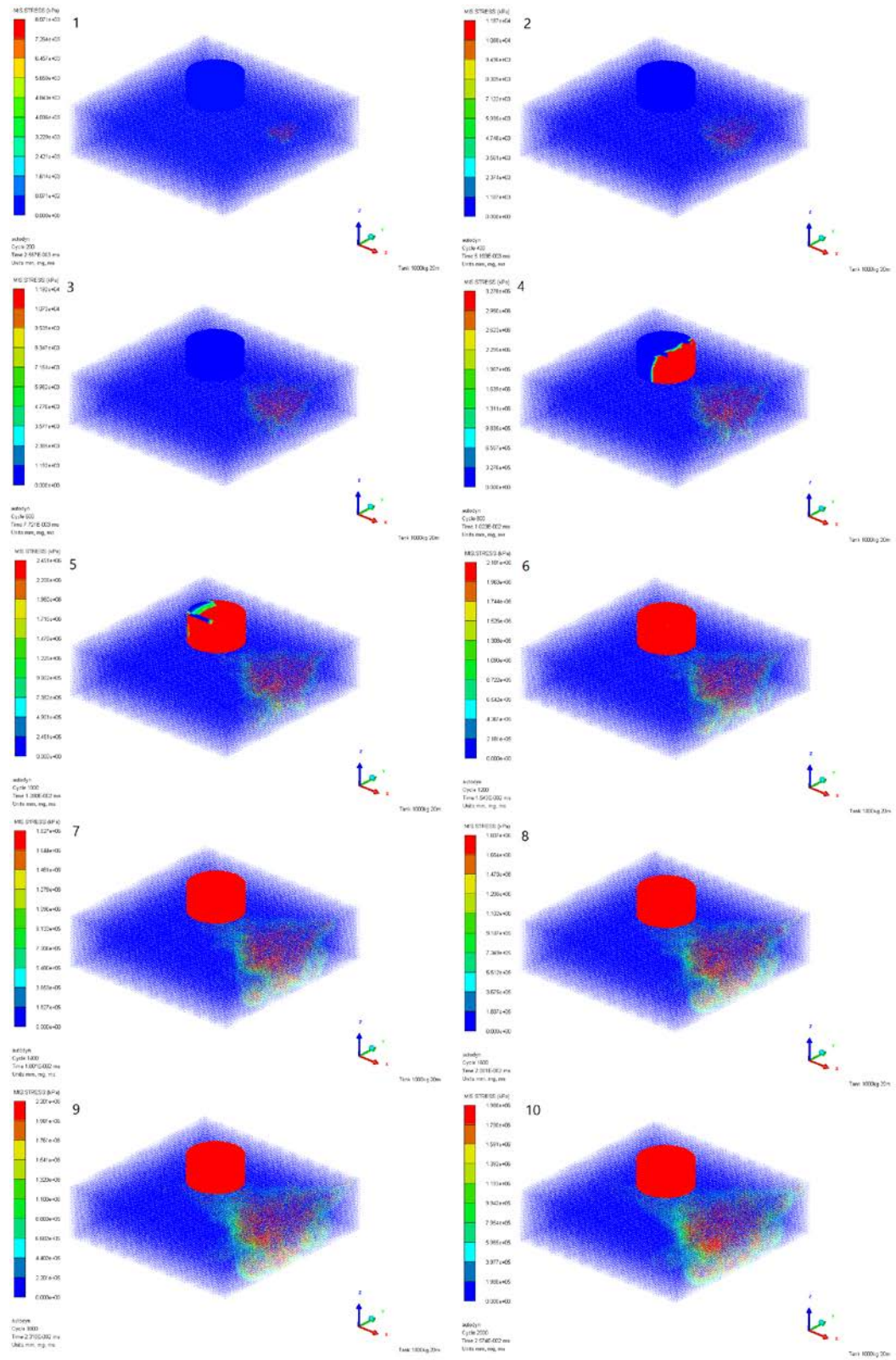
شکل ۵-۹۴: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (500kg-20m-Steel)



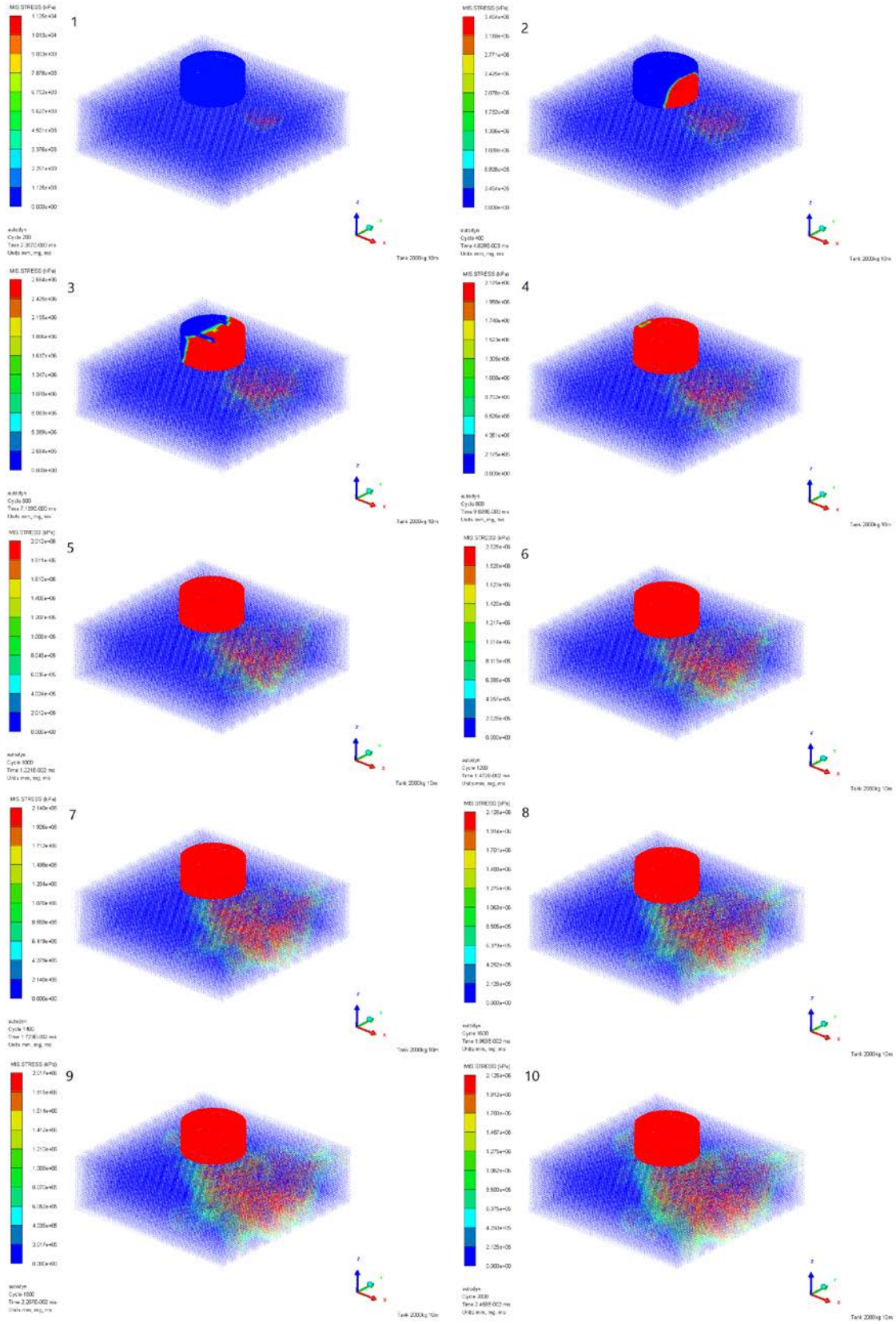
شکل ۵-۹۵: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-10m-Steel)



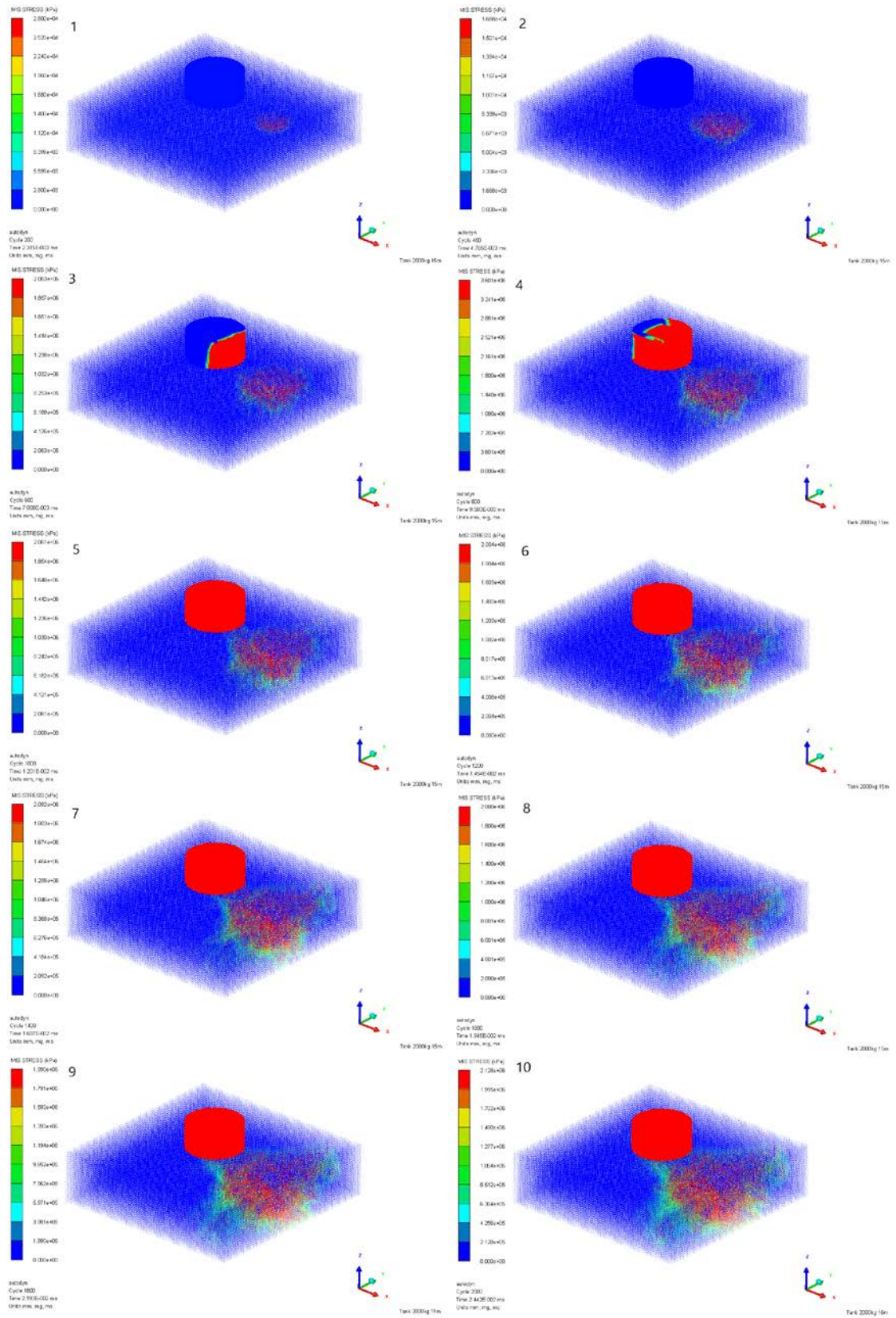
شکل ۵-۹۶: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-15m-Steel)



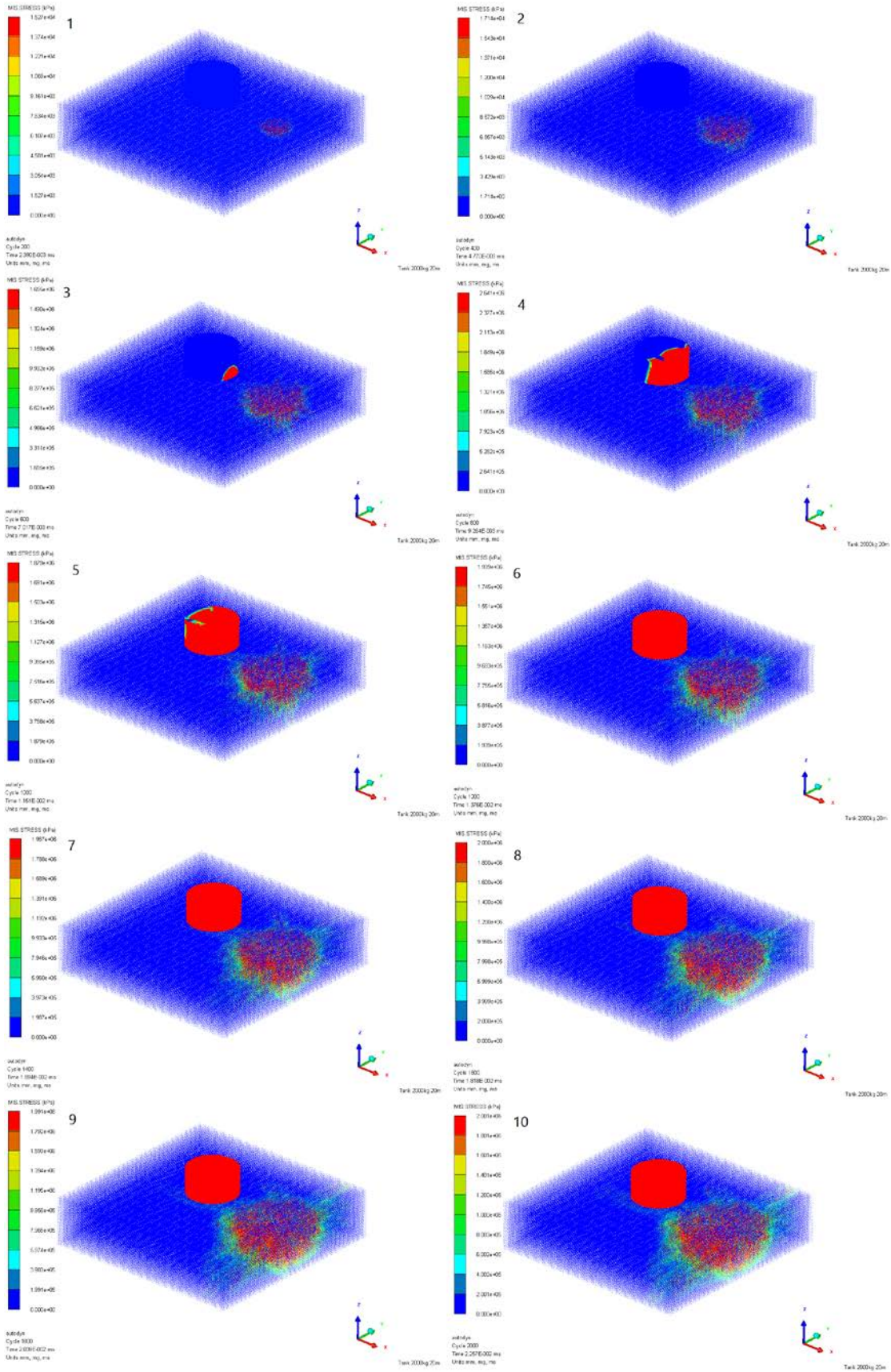
شکل ۵-۹۷: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (1000kg-20m-Steel)



شکل ۵-۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-10m-Steel)



شکل ۵-۹۹: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-15m-Steel)



شکل ۵-۱۰: نحوه توزیع تنش وان میس در مدل با گذر زمان (2000kg-20m-Steel)

در این پایان نامه به یک مبحث مهم و قابل توجه در مورد بارگذاری بر روی سازه‌ها پرداخته شده است. بررسی بارگذاری دینامیکی و به‌طور ویژه بارگذاری انفجاری بر روی سازه‌ها در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه مهندسان و طراحان و پیشتر از آن محقق قرار گرفته است. یکی از دلایلی که به اهمیت بررسی چنین بارگذاری توجیه می‌دهد، تعدد حملات تروریستی به اماکن و سازه‌های معمولی شهری در سالهای اخیر است. خصوصاً اکثر مراجعی که در این زمینه اقدام به انتشار اسناد و مدارک علمی می‌کنند به حادثه ۱۱ سپتامبر اشاره دارند. شاید اگر با دقت بیشتری به ابعاد بارگذاری انفجاری بر روی سازه‌ها دقت شود، احتمال فروریزش و نابودی آنی آنها در چنین شرایطی بسیار پایین خواهد آمد.

یکی از این سازه‌هایی که نقش بسزایی در جریان‌های حیاتی و سیستم‌های مهندسی محیط زیست ایفا می‌کند مخازن می‌باشد. این مخازن نقش حساسی را در ذخیره مواد نفتی و پالایشگاهی، تامین آب آشامیدنی و سیستم‌های اطفاء حریق ایفا می‌کنند. از آنجایی که در زمینه آسیب پذیری مخازن در برابر بارگذاری‌های انفجاری، پژوهش‌های چندانی صورت نگرفته است، اهمیت بررسی این نوع سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری افزایش می‌یابد.

در اینجا ما به بررسی اثر بارگذاری انفجاری ماده منفجره TNT با جرم‌های مختلف در ۹ حالت مختلف بر روی دو نوع مخزن بتنی و فولادی پرداختیم.

در نگاه اول و بررسی مخازن پس از از بارگذاری انفجاری دو نتیجه کلی بدست آمد:

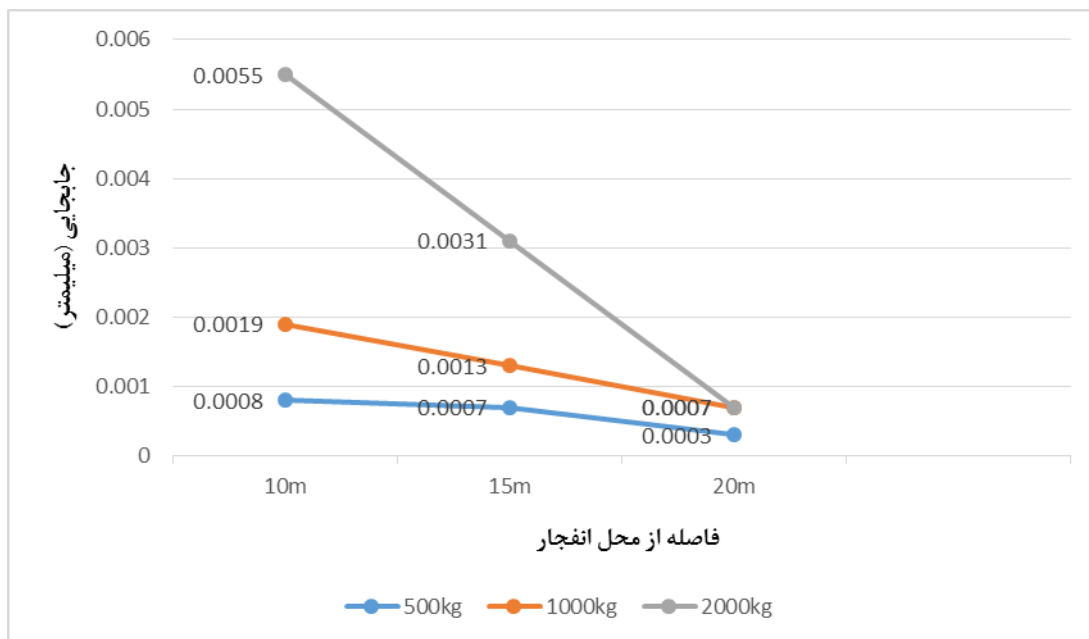
۱- با افزایش جرم ماده منفجره میزان تاثیر بار انفجاری بیشتر شده است. بنابراین آسیب حاصل از بارگذاری با جرم ماده منفجره رابطه مستقیم دارد.

۲- با افزایش فاصله نقطه انفجار میزان تاثیر بارگذاری انفجاری کاهش یافته است. بنابراین آسیب حاصل از بارگذاری انفجاری با فاصله رابطه معکوس دارد.

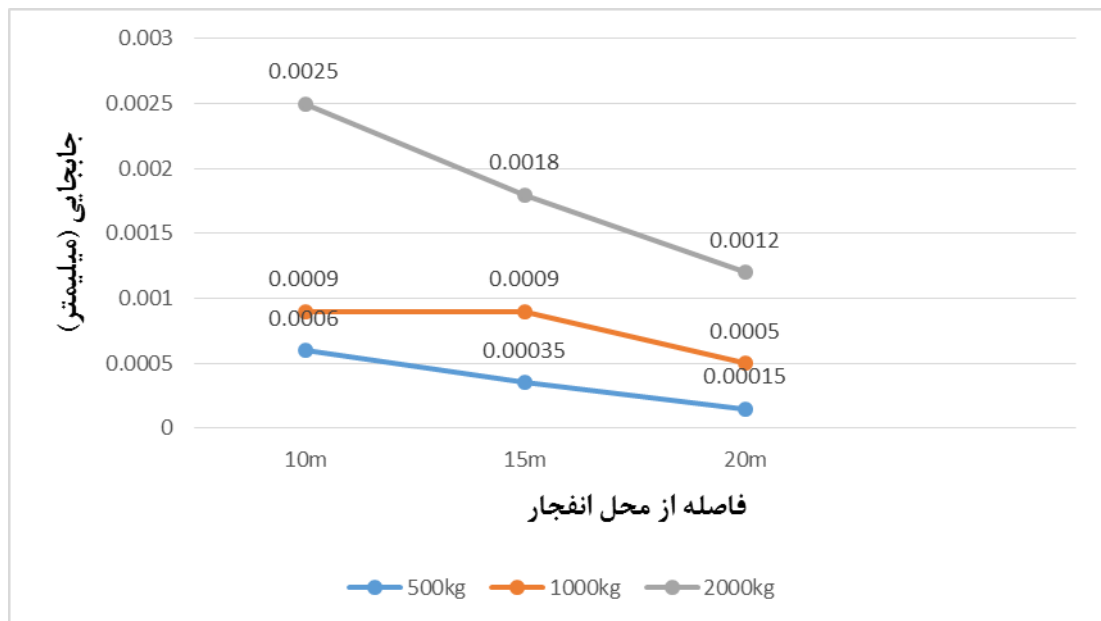
بررسی نواحی الاستیک و پلاستیک در مدلها گواه از این موضوع می‌دهد اثر بارگذاری در حالت‌های مشابه در مخازن بتنی بیشتر از مخازن فولادی بوده است.

بررسی دیاگرام‌های فشار-زمان نیز این موضوع را که با افزایش فاصله نقطه انفجار از مخزن میزان فشار وارده و اثر گذاری کمتر می‌شود را اثبات می‌کنند. به طور مثال ماکزیمم فشار وارده که توسط سنجه شماره ۱ در مخزن بتنی در سه حالت ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری ثبت شده به ترتیب معادل ۲۵۰۰، ۹۰۰ و ۶۸۰ کیلوپاسگال می‌باشد. به همین ترتیب در سایر حالتها، کاهش فشار در بخش‌های مختلف مخزن با افزایش فاصله مشاهده شد.

بررسی دیاگرام‌های جابه‌جایی در لحظات مختلف می‌تواند نحوه اثر گذاری بار انفجاری را با تغییر جرم ماده منفجره به ما نشان دهد. برای این کار نمودارهای شکل ۵-۱ و ۵-۲ را بررسی می‌کنیم. این دو نمودار میزان جابه‌جایی محلی از مخازن را که گیج ۴ در آنجا قرار گرفته به ما نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱- نمودار جابه‌جایی بر اساس فاصله از محل انفجار در محل سنجه ۴ (مخازن بتنی)



شکل ۵-۲- نمودار جابجایی بر اساس فاصله از محل انفجار در محل سنجه ۴ (مخازن فولادی) همانطور که از هردو نمودار مشخص است با افزایش جرم ماده منفجره در هرکدام از حالتها میزان جابه‌جایی افزایش یافته است. از طرفی با افزایش فاصله از نقطه انفجار این جابه‌جایی‌ها کاهش یافته‌اند.

بررسی نمودارها و نحوه توزیع پارامترهای مختلف در مدلها مقاومت بیشتر مخازن فولادی را نسبت به مخازن بتنی در حالت‌های مشابه بارگذاری انفجاری نشان دادند. بنابراین می‌توان مخازن فولادی را گزینه مناسبتری برای رسیدن به اهداف ذخیره سازی مواد در نظر گرفت. با این حال باید در نظر داشت که این موضوع امری مطلق نمی‌تواند باشد و با توجه به ماهیت خاص بارگذاری‌های انفجاری که با توجه به شرایط مختلف اعم از فاصله انفجار و یا جرم ماده منفجره متغیر هستند، بررسی و تحقیق با توجه به نیاز قبل از اقدام امری ضروری است.

در همین خصوص شبیه‌سازی‌های عددی به وسیله نرم‌افزارهای مختلف المان محدود کمک بسیار خوبی برای پیش‌بینی نتایج حاصل از اینگونه بارگذاری‌ها بر روی سازه‌ها می‌تواند باشد. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از این نوع نرم‌افزارها را برای تحلیل دقیق‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر بیشتر مد نظر قرار داد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اتوداین، مخازن روی سطح زمین 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:

در نگاه اول و بررسی مخازن پس از از بارگذاری انفجاری دو نتیجه کلی بدست آمد:

۱- با افزایش جرم ماده منفجره میزان تاثیر بار انفجاری بیشتر شده است. بنابراین آسیب حاصل از بارگذاری با جرم ماده منفجره رابطه مستقیم دارد.

۲- با افزایش فاصله نقطه انفجار میزان تاثیر بارگذاری انفجاری کاهش یافته است. بنابراین آسیب حاصل از بارگذاری انفجاری با فاصله رابطه معکوس دارد.

۳- بررسی نواحی الاستیک و پلاستیک در مدلها گواه از این موضوع می دهد اثر بارگذاری در حالت های مشابه در مخازن بتنی بیشتر از مخازن فولادی بوده است.

بررسی دیاگرام های فشار-زمان نیز این موضوع را که با افزایش فاصله نقطه انفجار از مخزن میزان فشار وارده و اثر گذاری کمتر می شود را اثبات می کنند. به طور مثال ماکزیمم فشار وارده که توسط سنج شماره ۱ در مخزن بتنی در سه حالت ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری ثبت شده به ترتیب معادل ۲۵۰۰، ۹۰۰ و ۶۸۰ کیلوپاسگال می باشد. به همین ترتیب در سایر حالتها، کاهش فشار در بخش های مختلف مخزن با افزایش فاصله مشاهده شد.

۶-۲- پیشنهادات برای ادامه مطالعه

در همین خصوص شبیه‌سازی‌های عددی به وسیله نرم‌افزارهای مختلف المان محدود کمک بسیار خوبی برای پیش‌بینی نتایج حاصل از اینگونه بارگذاری‌ها بر روی سازه‌ها می‌تواند باشد. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از این نوع نرم‌افزارها را برای تحلیل دقیق‌تر، سریع‌تر و ارزانتر بیشتر مد نظر قرار داد.

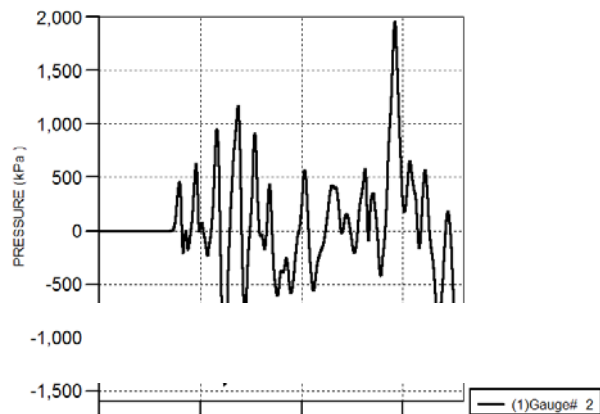
طراحی مخازن سطحی با روش (SPH) با در نظر گرفتن فاصله بهینه جهت کاهش اثرات ناشی از بارگذاری انفجاری.

بررسی اثر انفجار روی مخازن سطحی با در نظر گرفتن مصالح بکار رفته به عنوان متغیر با روش (SPH)

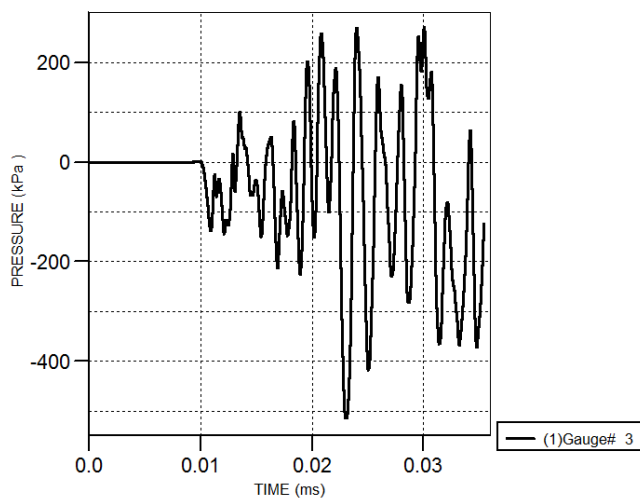
- [1]. Zamani, j. Introduction to explosion mechanic. Khaje nasir tusi publishers, Tehran, 1391, 46-89.
- [2]. Lopez Jimeno. C, Drilling and Blasting Of Rocks. aa balkema, rotterdam Brookfield, 1995, 11.
- [3]. Saedi darian, A. Impact and explosion engineering with Autodyn comprehensive guide. Darian publishers, Tehran, 1391, 1-29.
- [4]. Khayat Zadeh, H. Simulation of under water explosion. Master thesis, 1391, 124-165.
- [5]. Chen, J. Simulation for soil explosion and its effects on structures using SPH method. Internationa journal of impact engineering, Elsevier, 2018. 41-51.
- [6]. Karimi Farzaghi,B. Naderi, R Numerical modeling of explosive in the water by SPH method. New defense science and technology, 2016. 161-169.
- [7]. Mofidi, J. Azaram sa, A. Siah Saraei, A. Simulation od sun-surface landslide waves by using numerically hydrodynamic method of irregularly planer particles (i-sph). Univesity of sea scince 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 dunamic systems. 1393.
- [11]. Liu G.R ,Liu M.B(2003), "Smoothed Prticle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method" ; World Scientific Publishing,PP.473.
- [12]. Liu G.R ,Gu Y.T(2005) , "AN INTRODUCTHION 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 its effects in effect of impact and explosion,summery tech.Rep DW2,NRDC, Washington,Vol 1,chap2.
- [19].Lampson CW (1946) "Effect of impact and explosions", Explosions in Earth 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,institutt 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.

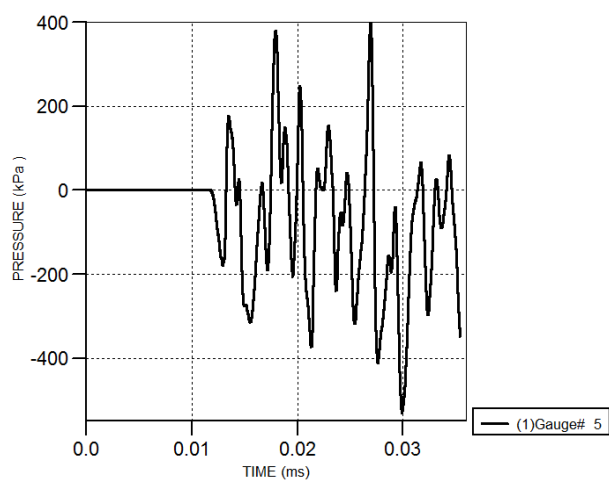
پیوست



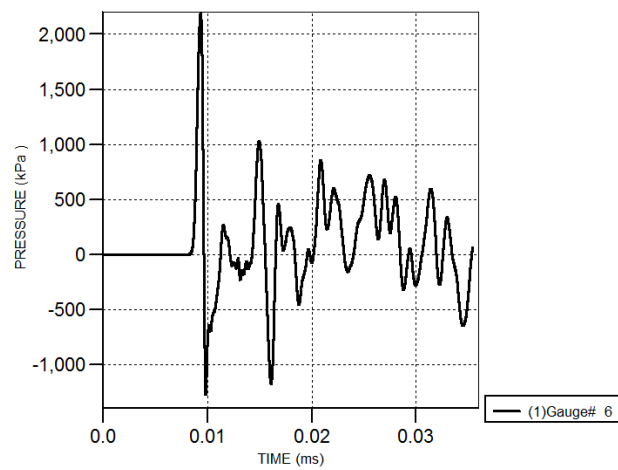
پ ۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)



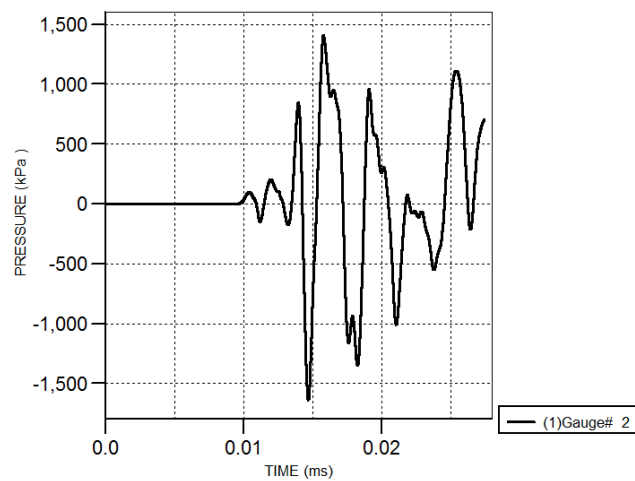
پ ۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)



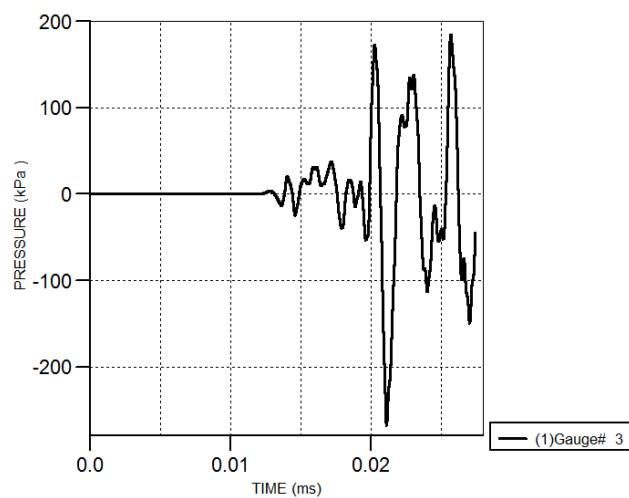
پ ۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)



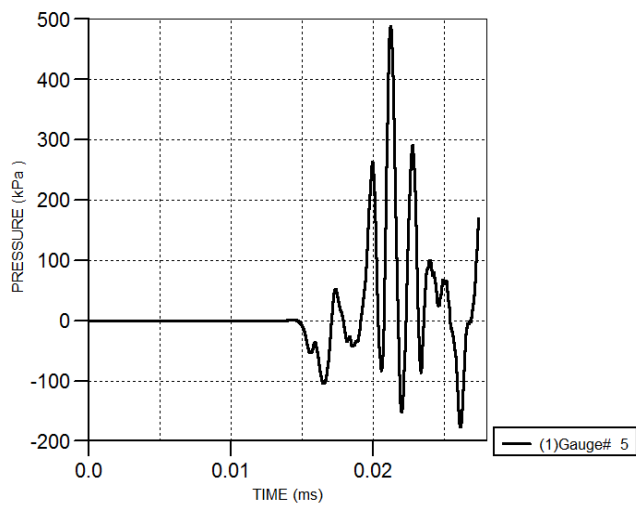
پ ۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-10m)



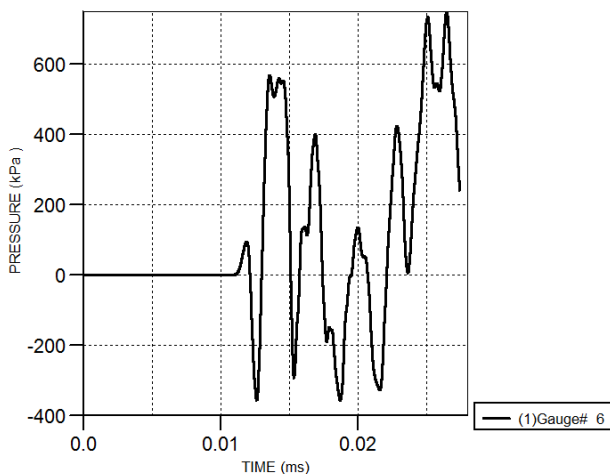
پ ۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)



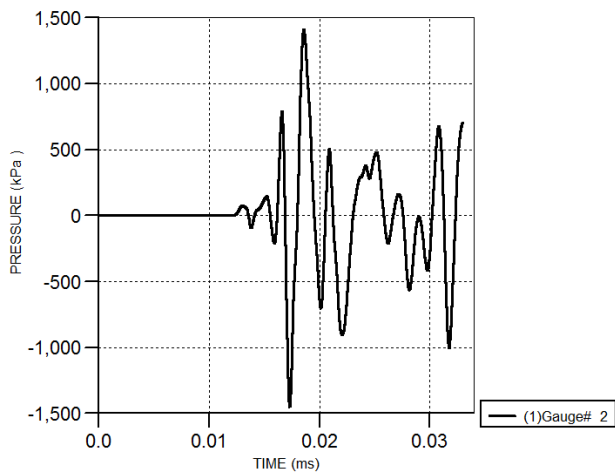
پ ۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)



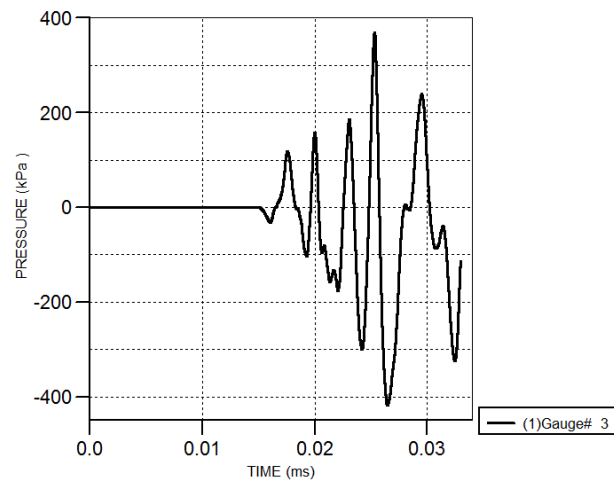
پ ۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)



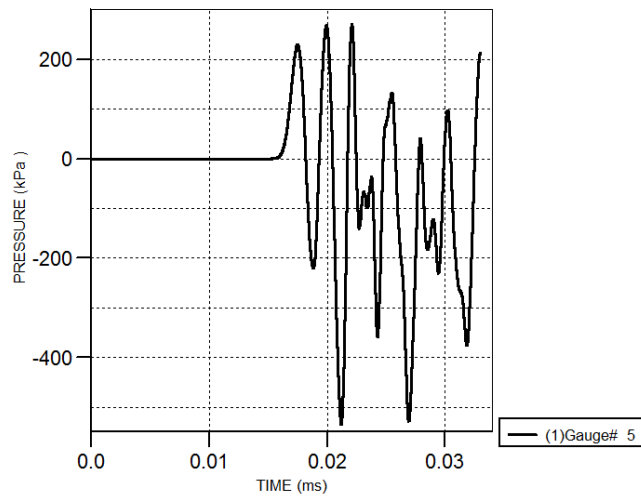
پ ۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-15m)



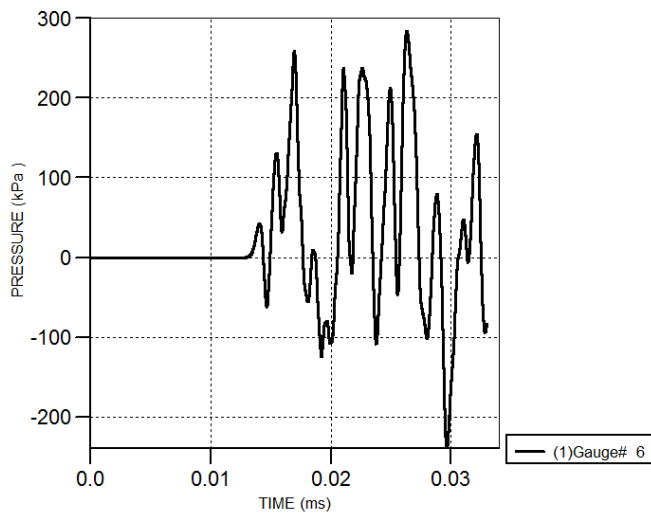
پ ۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)



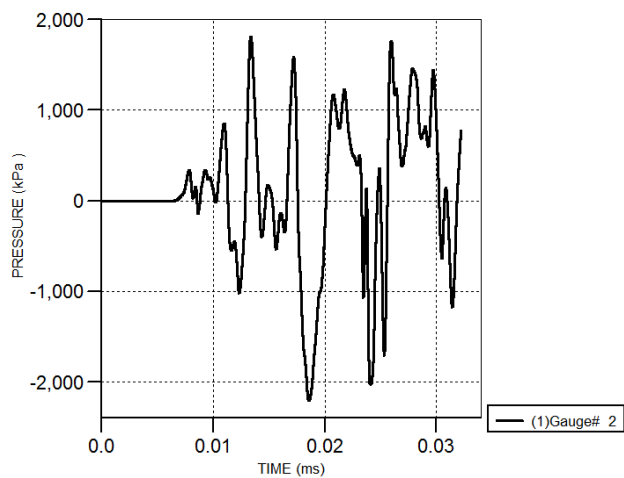
پ ۱۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)



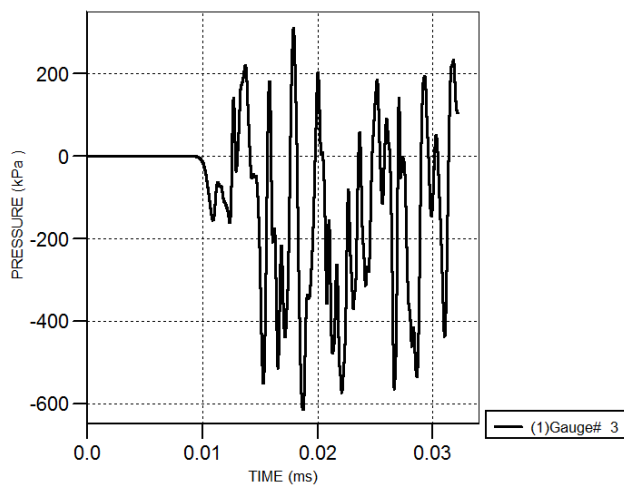
پ ۱۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)



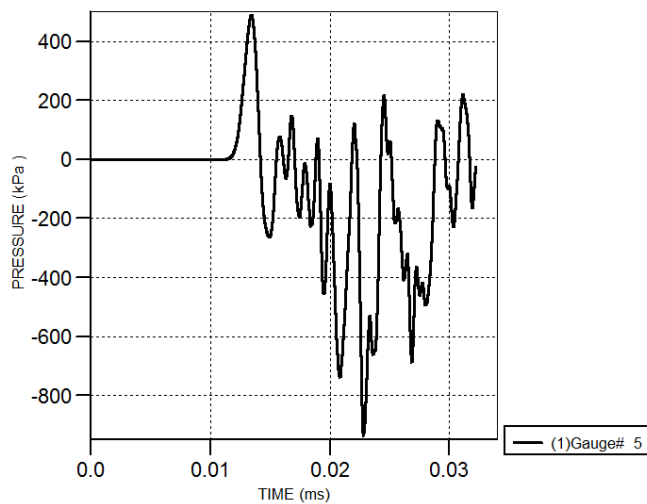
پ ۱۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (500kg-20m)



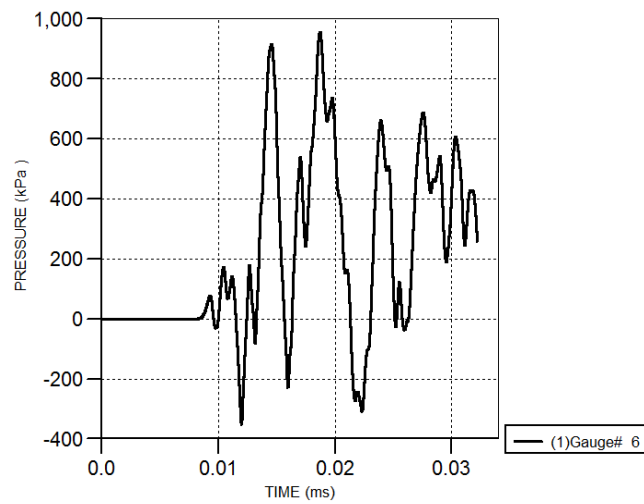
پ ۱۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)



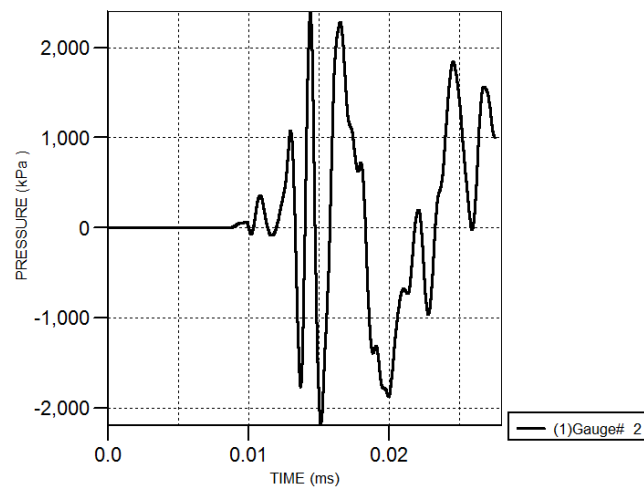
پ ۱۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)



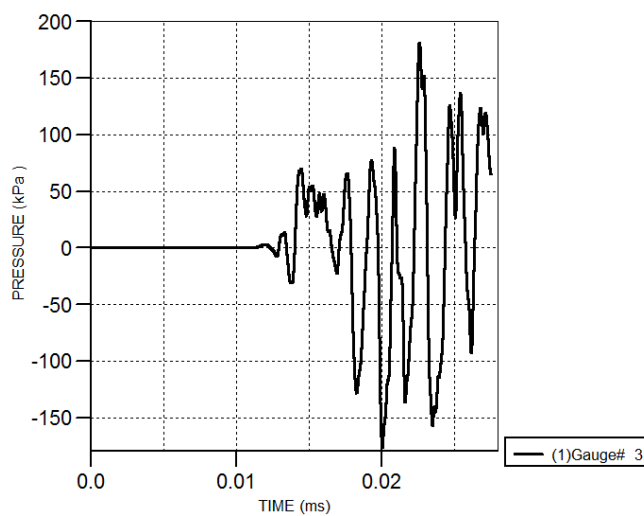
پ ۱۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)



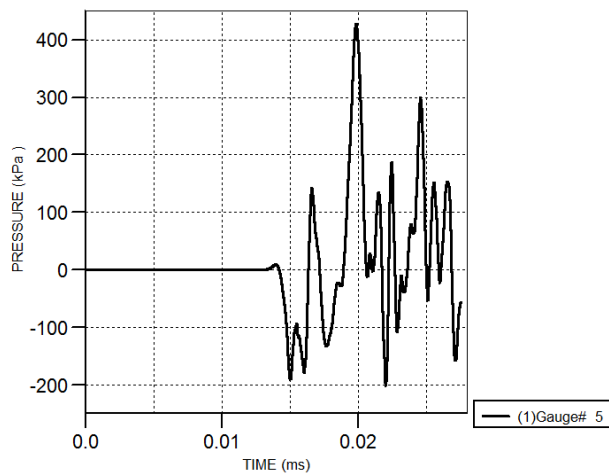
پ ۱۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-10m)



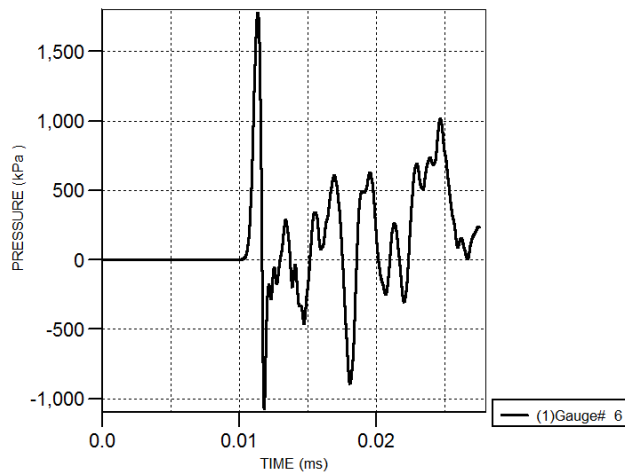
پ ۱۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)



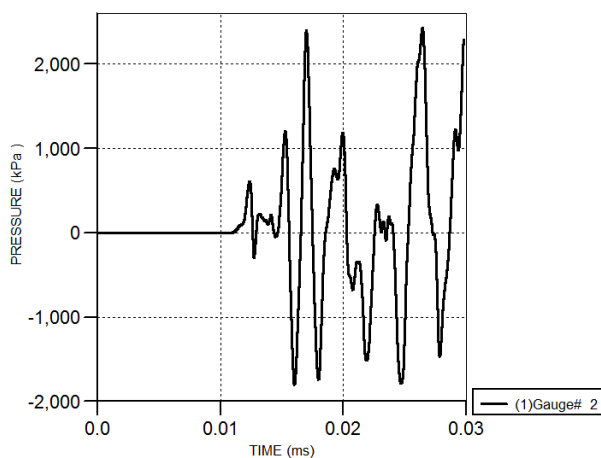
پ ۱۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)



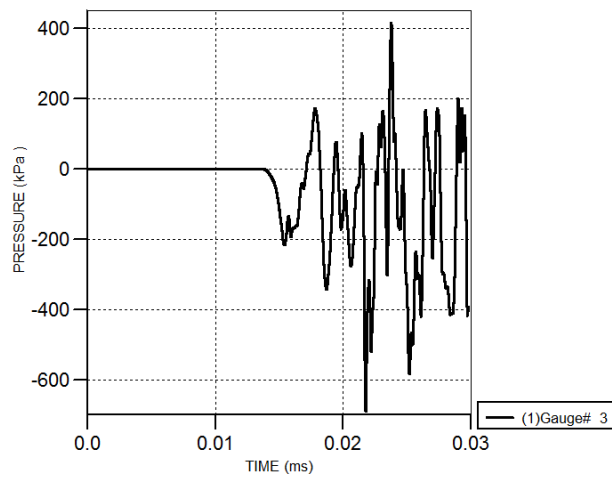
پ ۱۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)



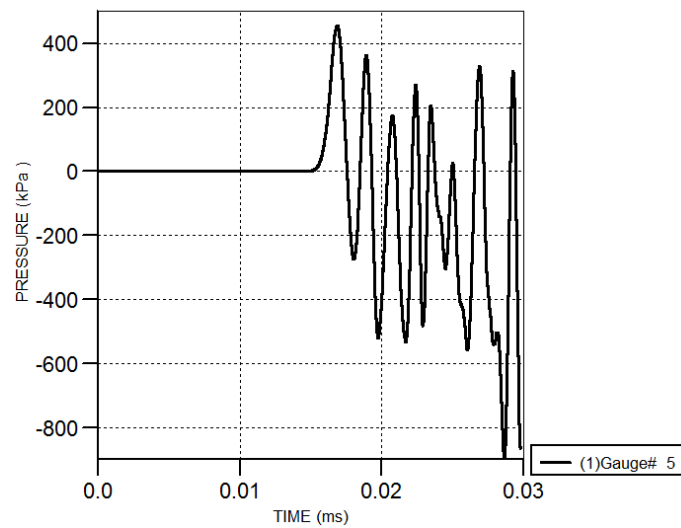
پ ۲۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-15m)



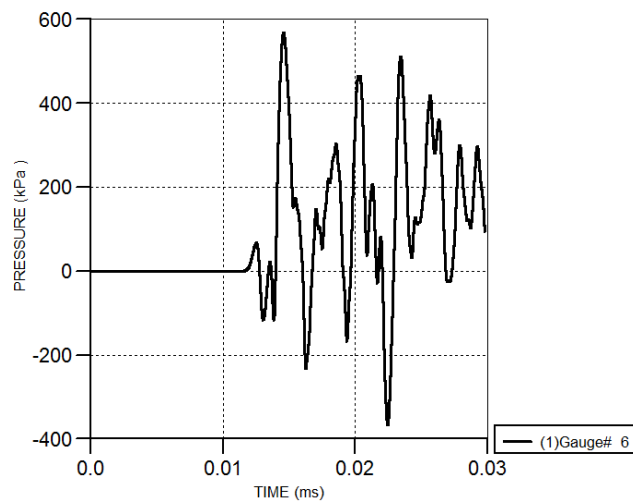
پ ۲۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)



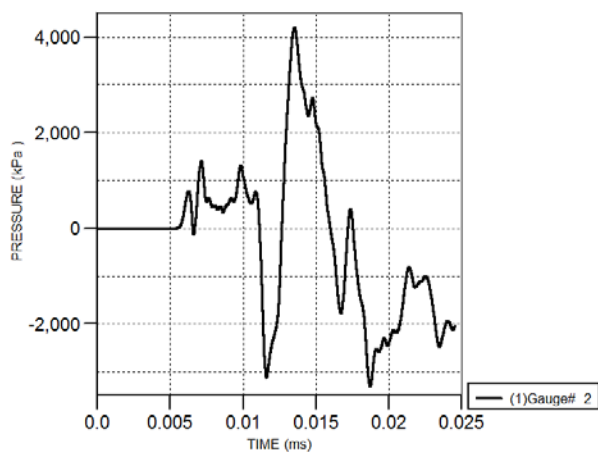
پ ۲۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)



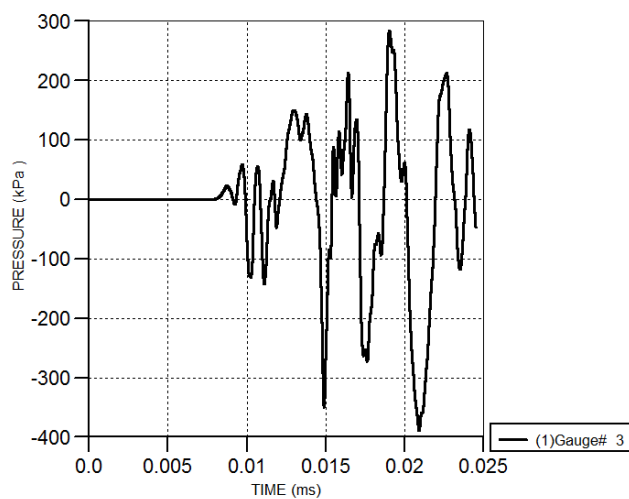
پ ۲۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)



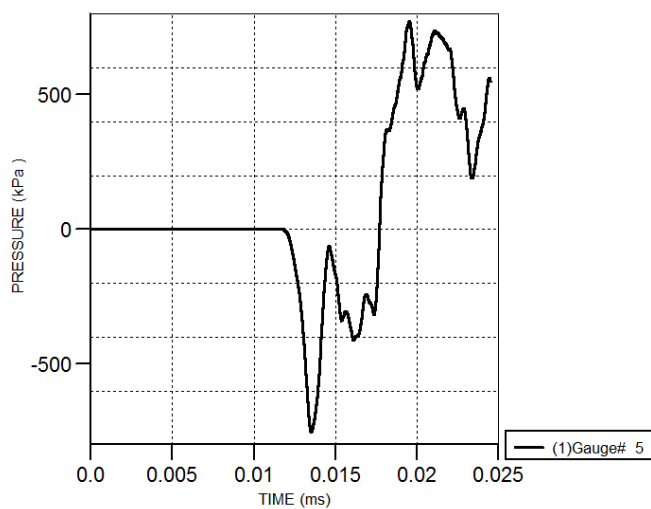
پ ۲۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (1000kg-20m)



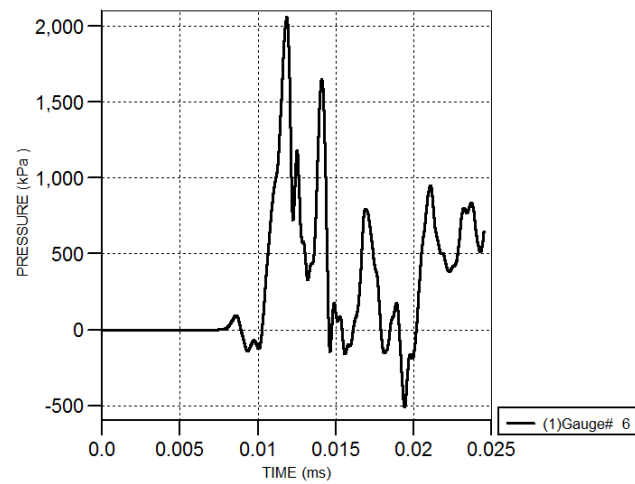
پ ۲۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)



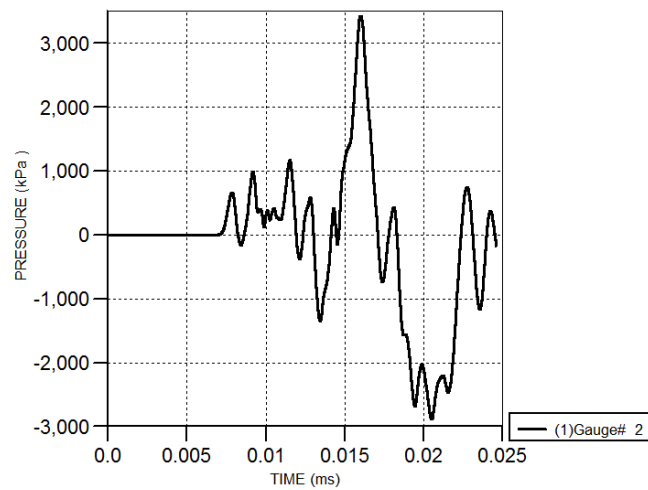
پ ۲۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)



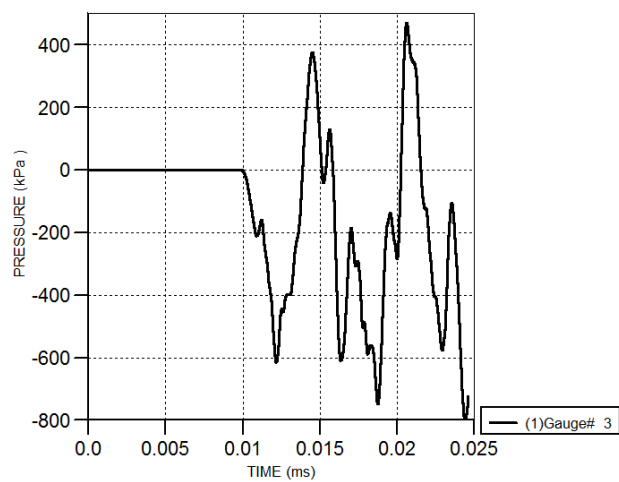
پ ۲۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)



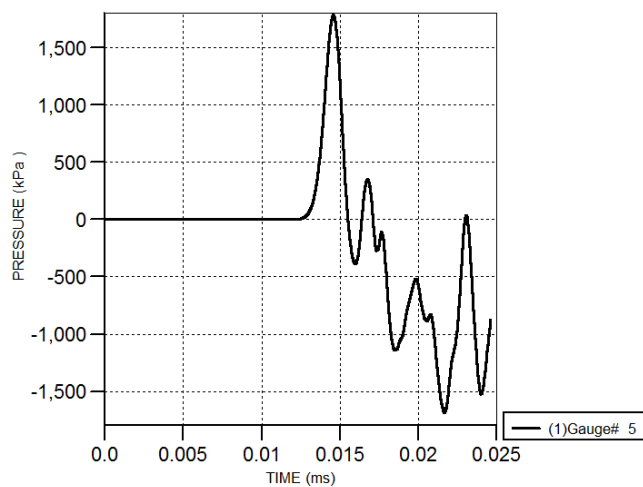
پ ۲۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-10m)



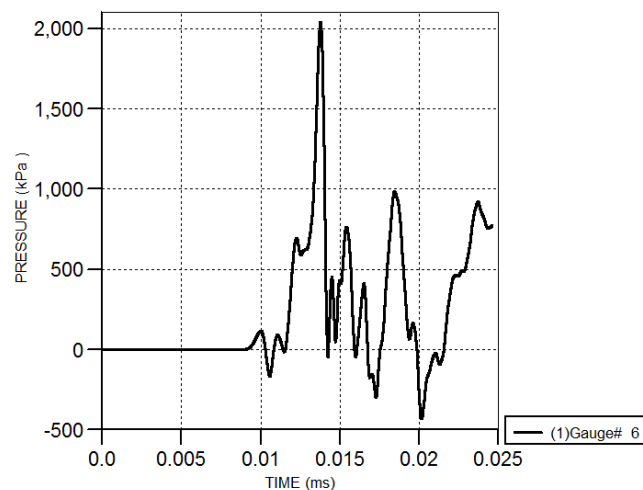
پ ۲۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)



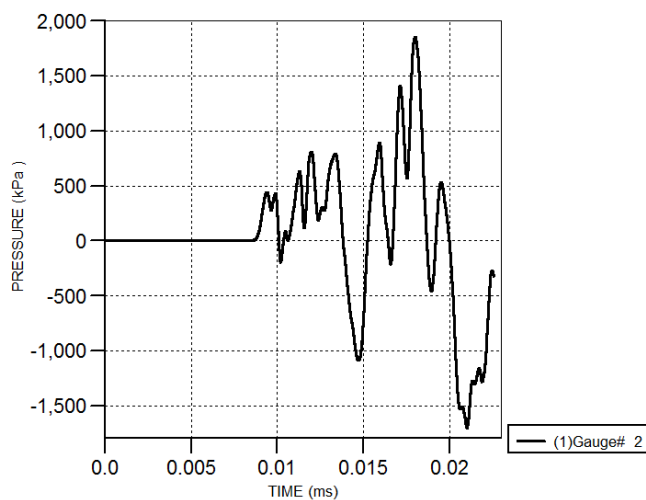
پ ۳۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)



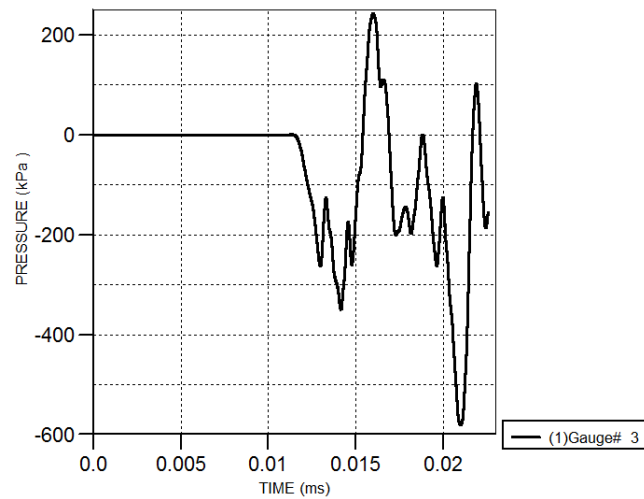
پ ۳۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)



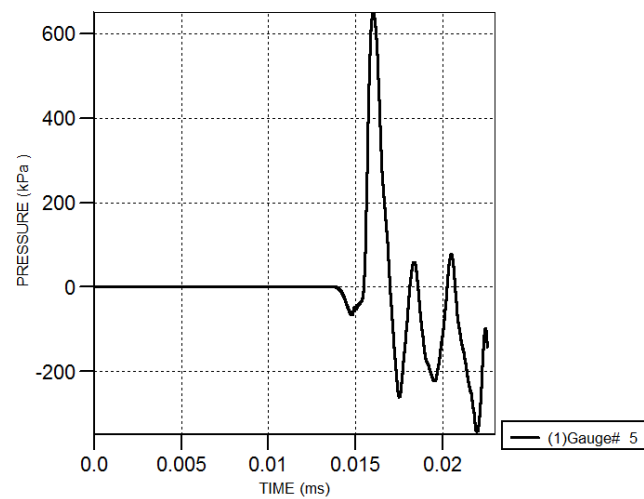
پ ۳۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-15m)



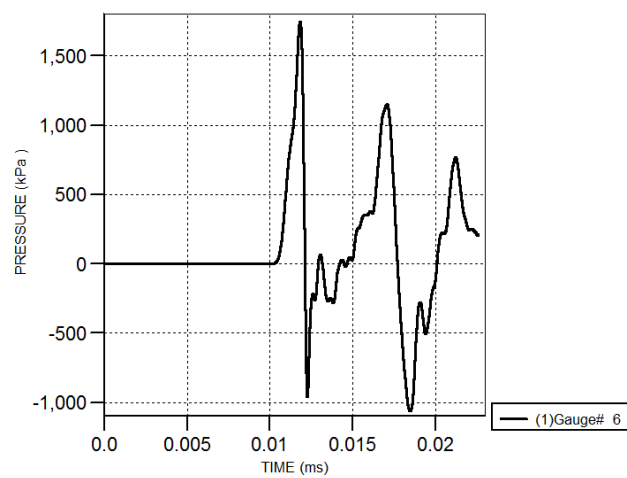
پ ۳۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)



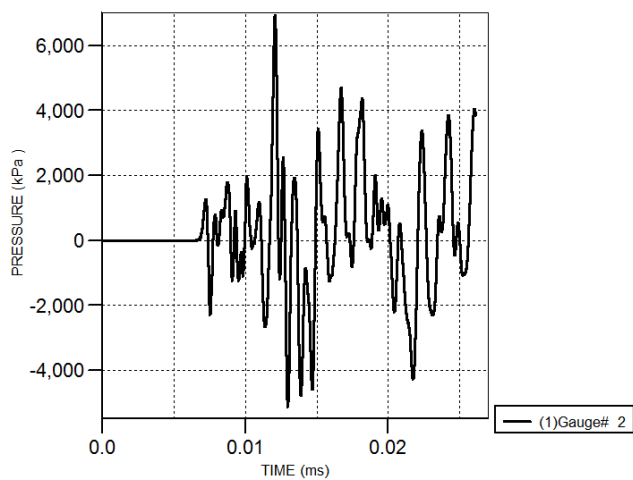
پ ۳۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)



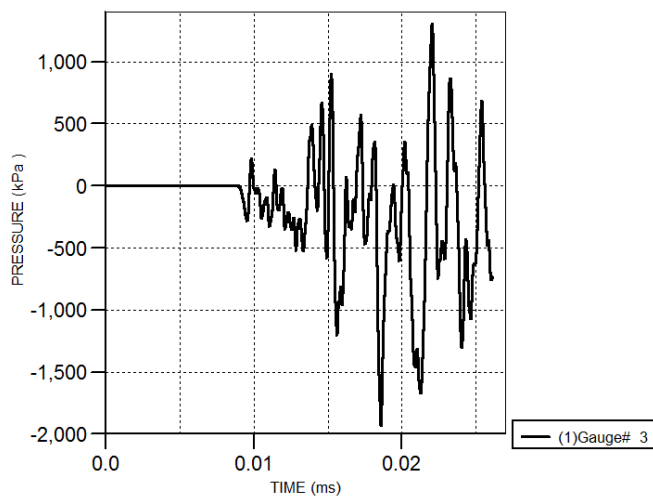
پ ۳۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)



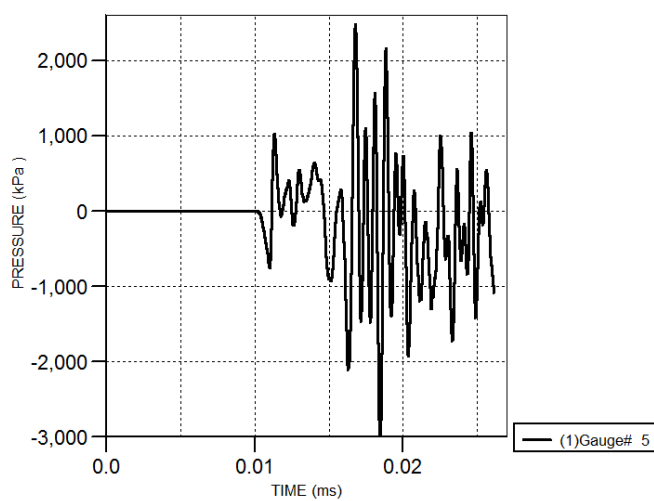
پ ۳۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن بتنی (2000kg-20m)



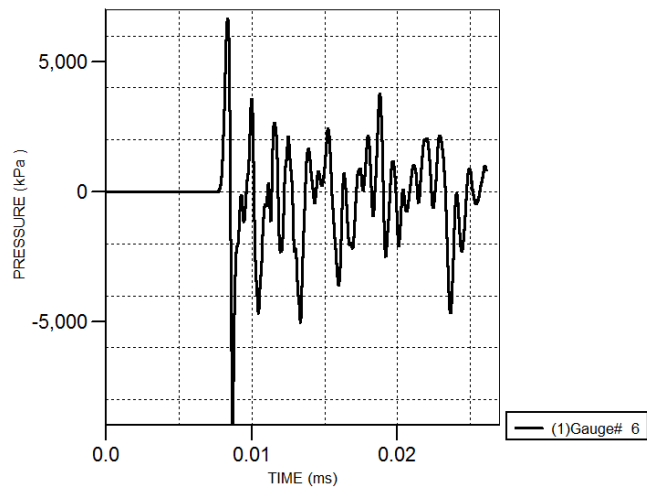
پ ۳۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)



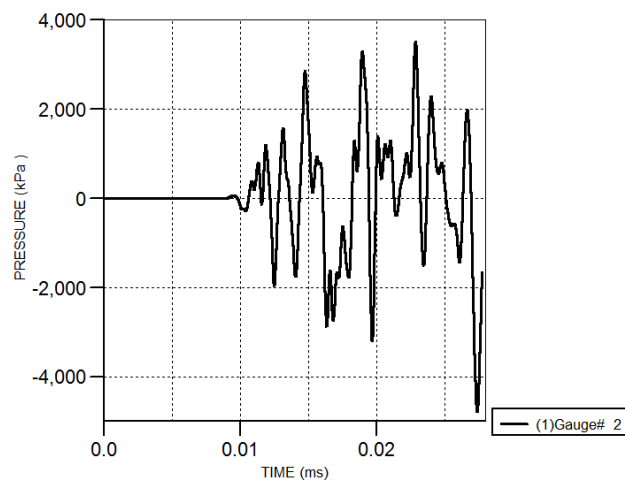
پ ۳۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)



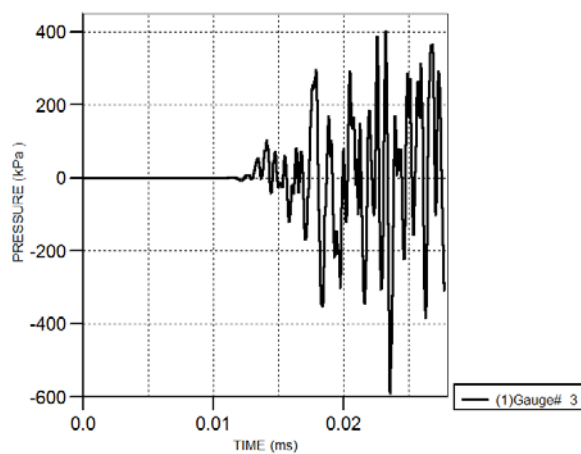
پ ۳۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)



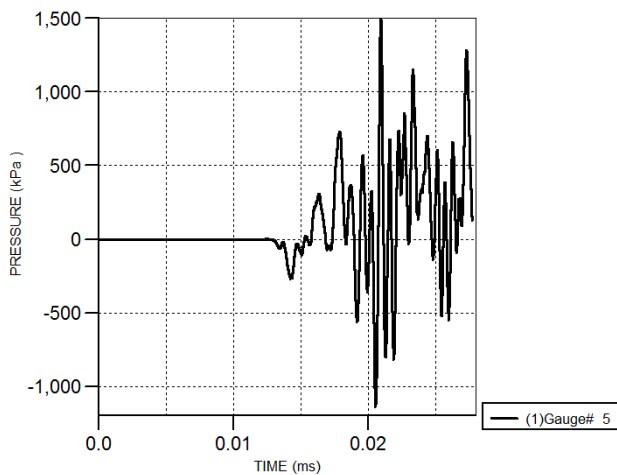
پ ۴۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-10m)



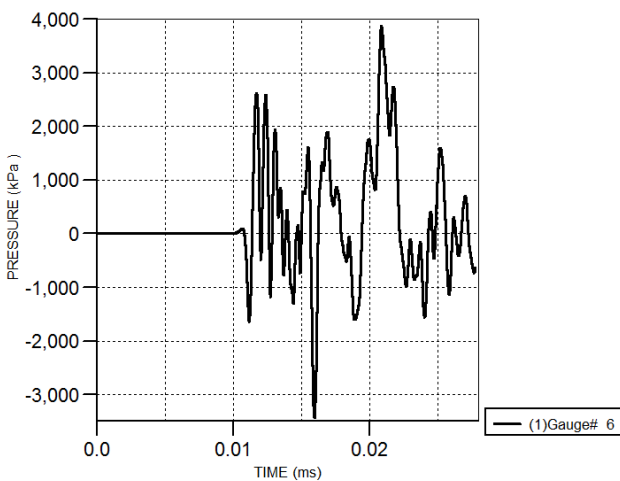
پ ۴۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)



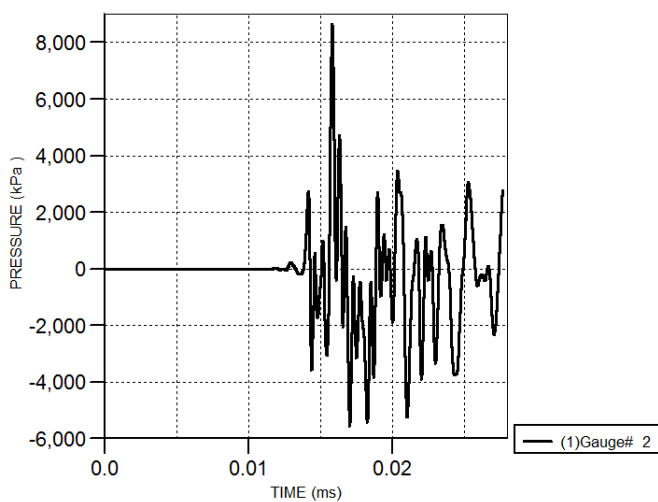
پ ۴۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)



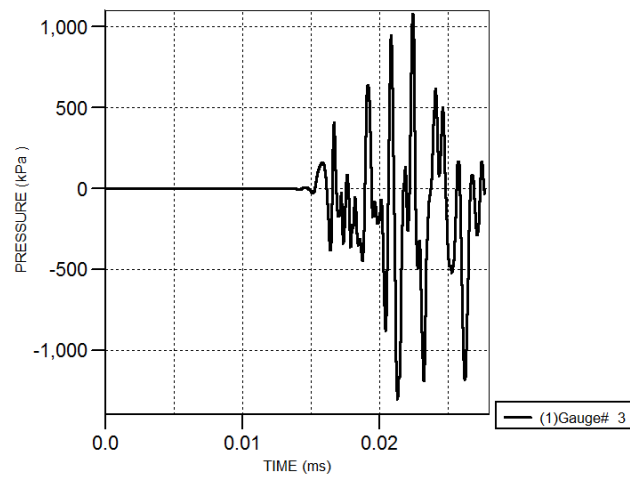
پ ۴۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)



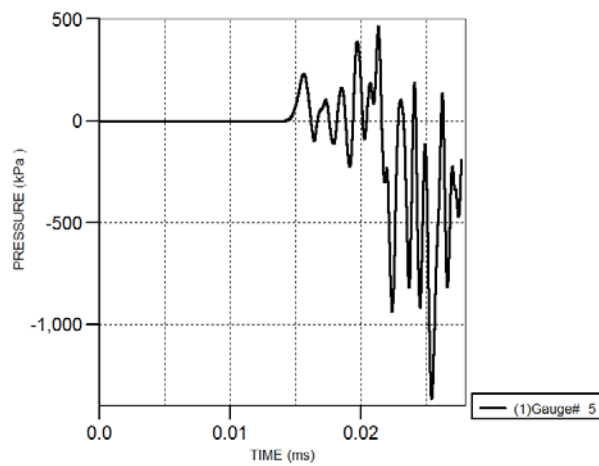
پ ۴۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-15m)



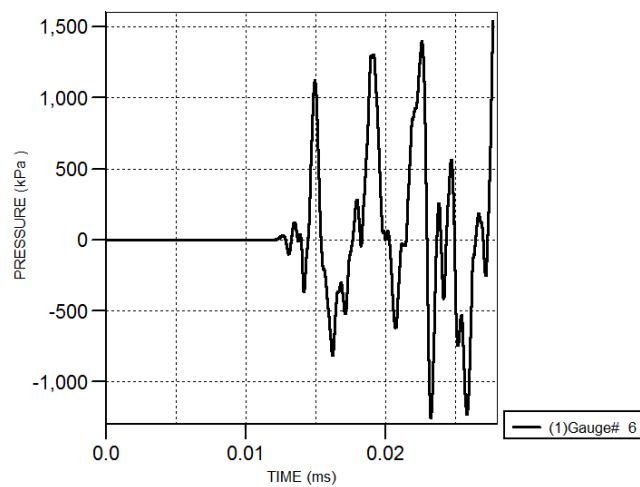
پ ۴۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)



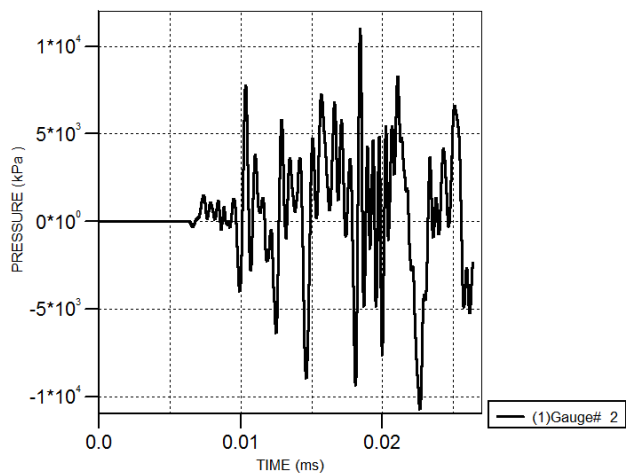
پ ۴۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)



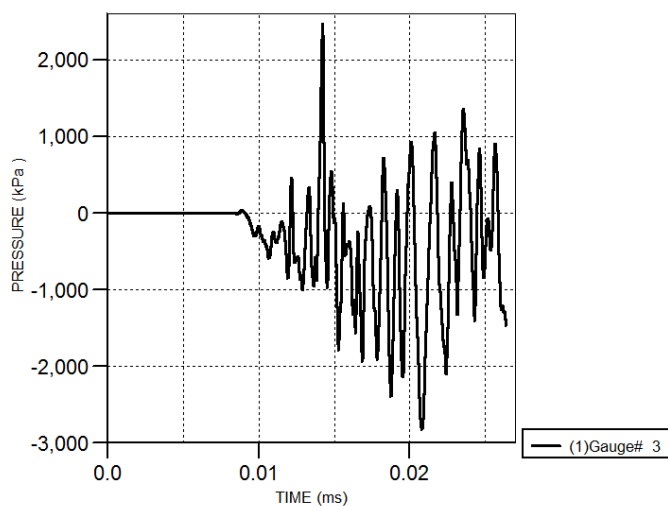
پ ۴۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)



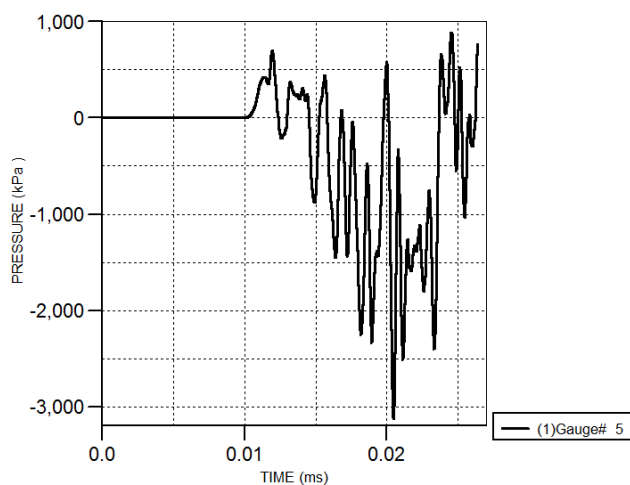
پ ۴۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (500kg-20m)



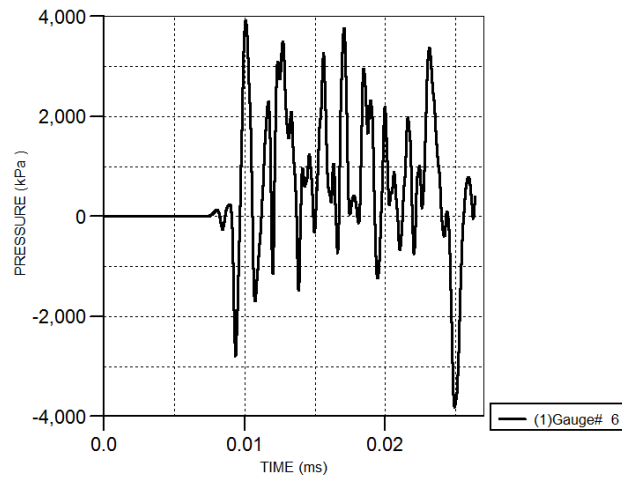
پ ۴۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)



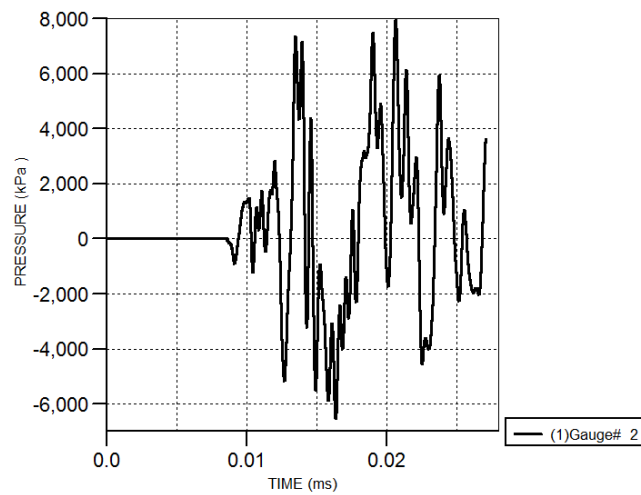
پ ۵۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)



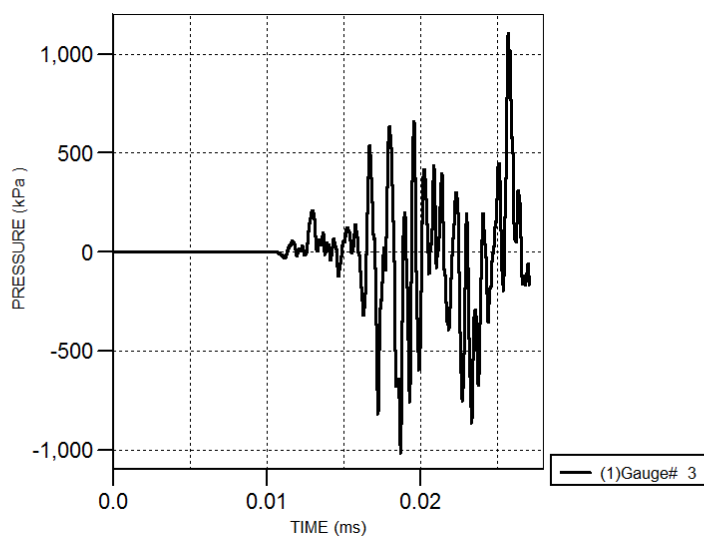
پ ۵۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)



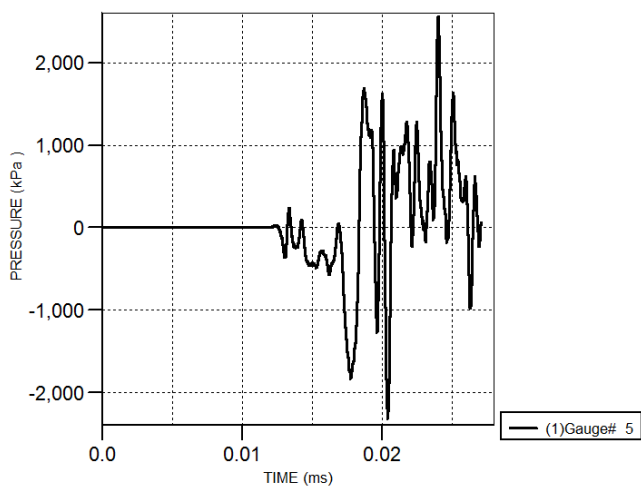
پ ۵۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-10m)



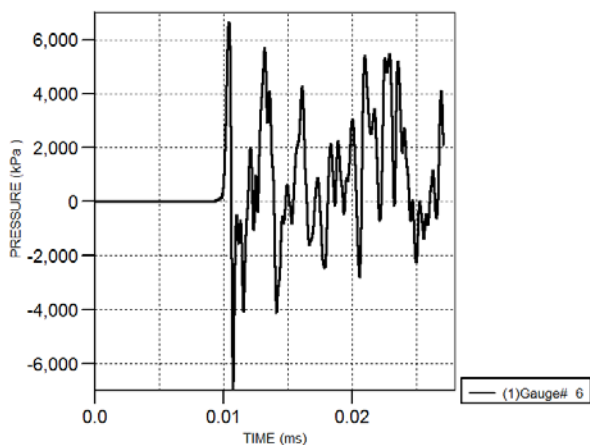
پ ۵۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)



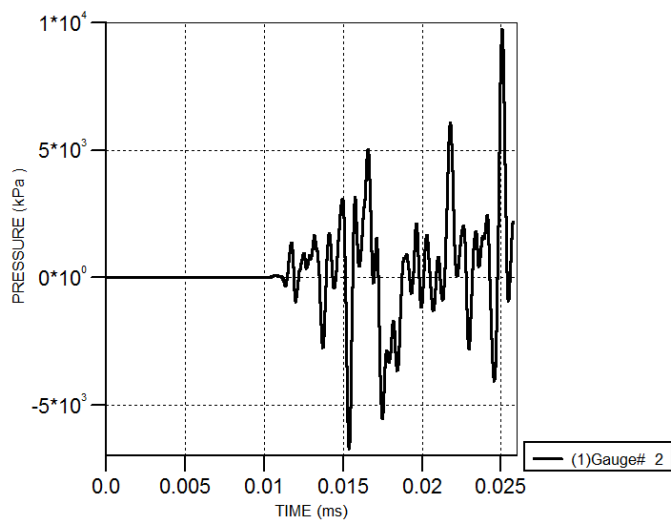
پ ۵۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)



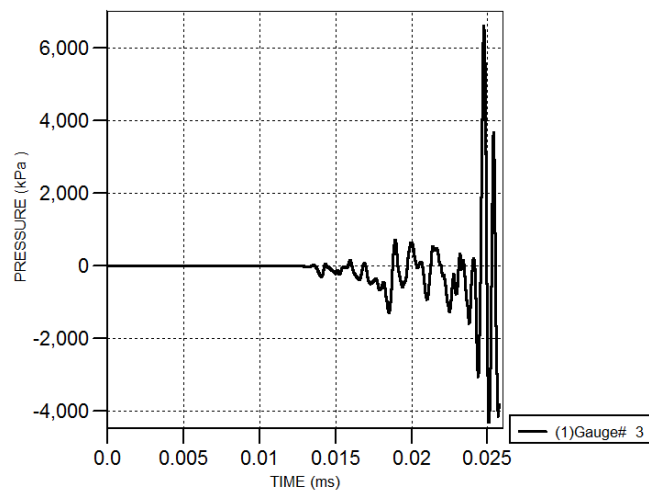
پ ۵۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)



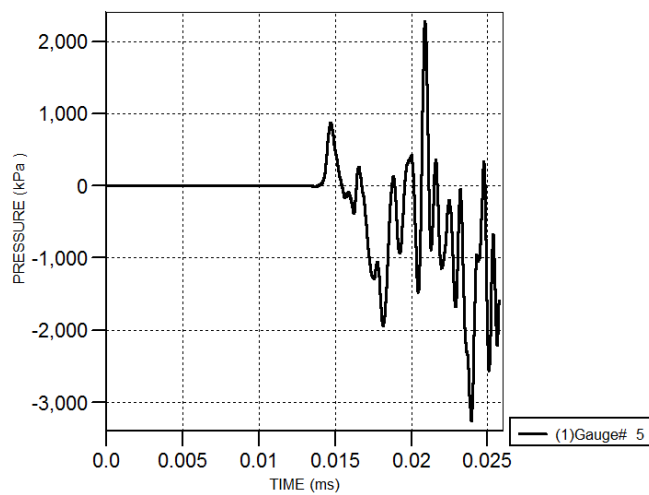
پ ۵۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-15m)



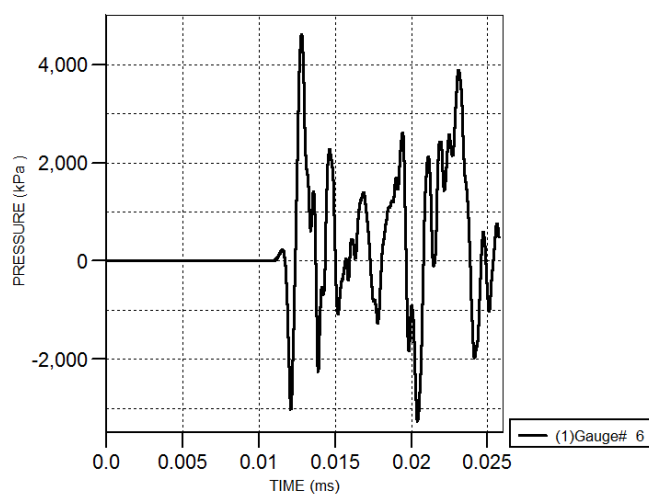
پ ۵۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)



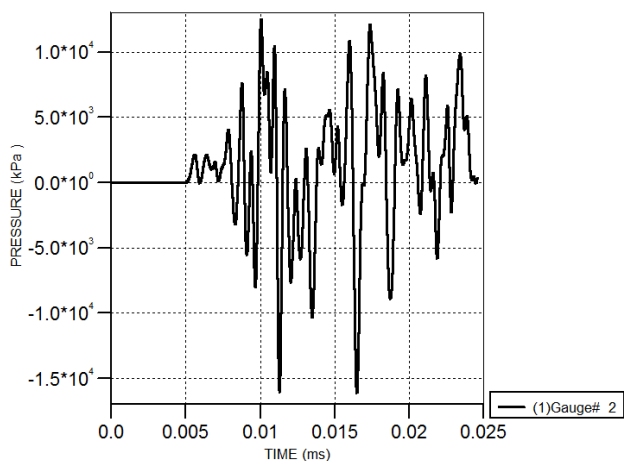
پ ۵۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)



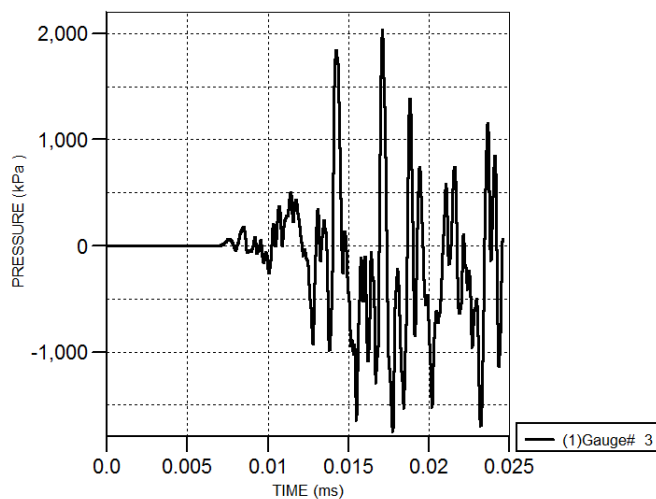
پ ۵۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)



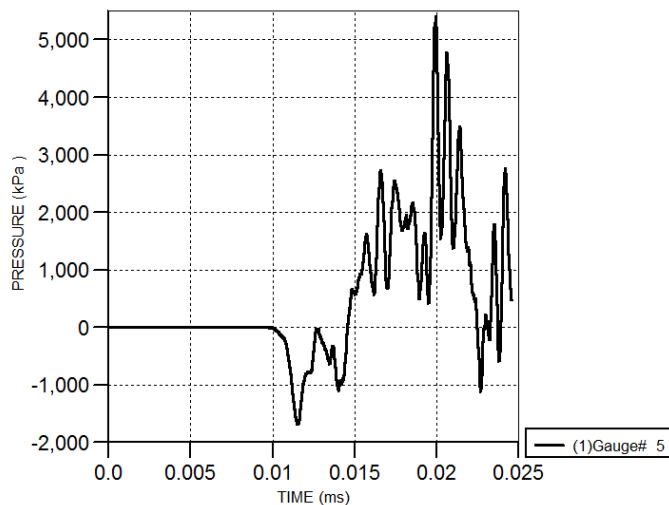
پ ۶۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (1000kg-20m)



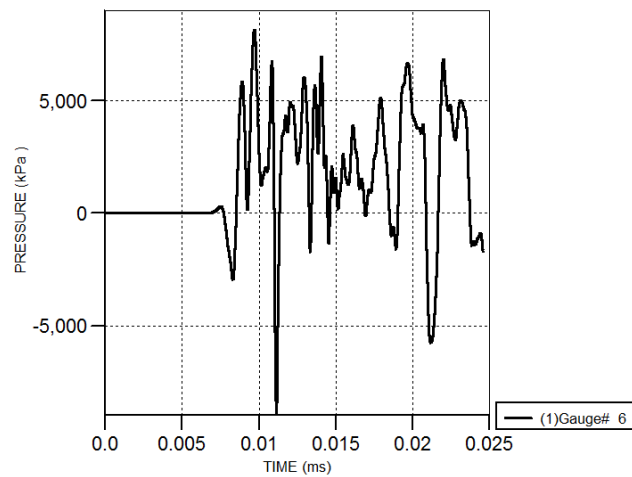
پ ۶۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)



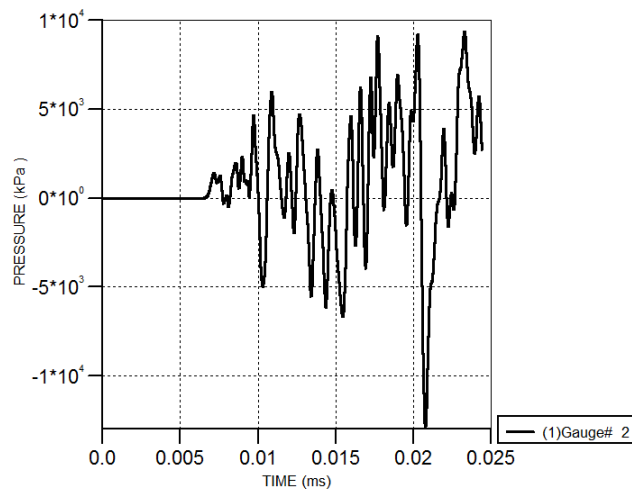
پ ۶۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)



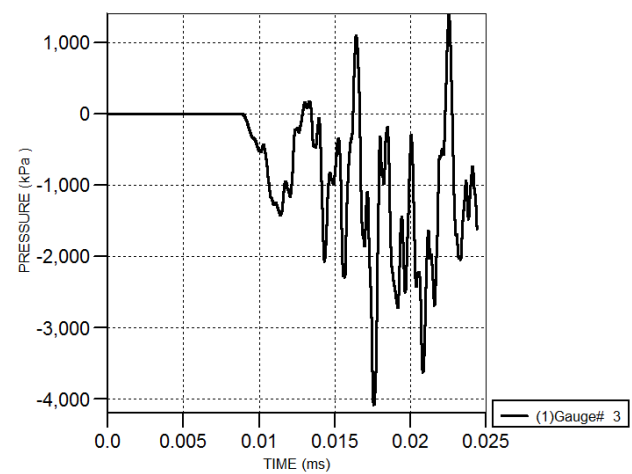
پ ۶۳: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)



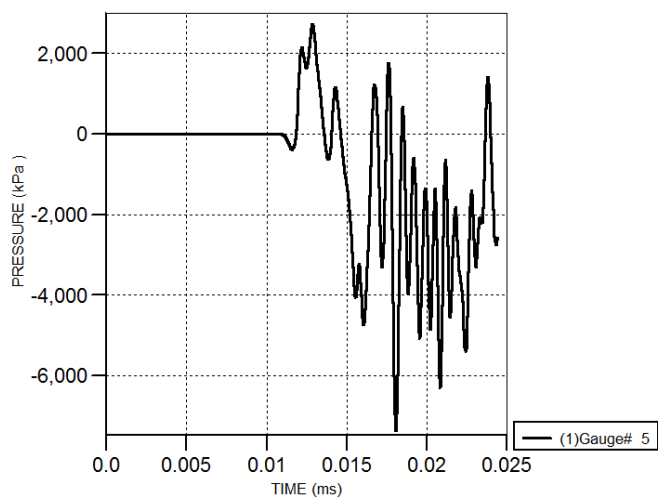
پ ۶۴: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-10m)



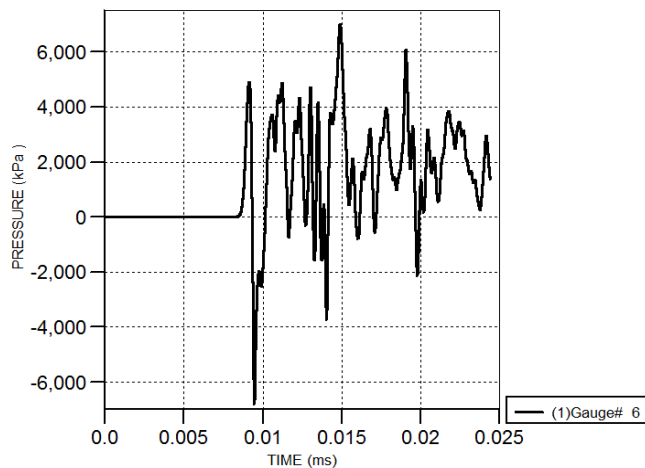
پ ۶۵: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)



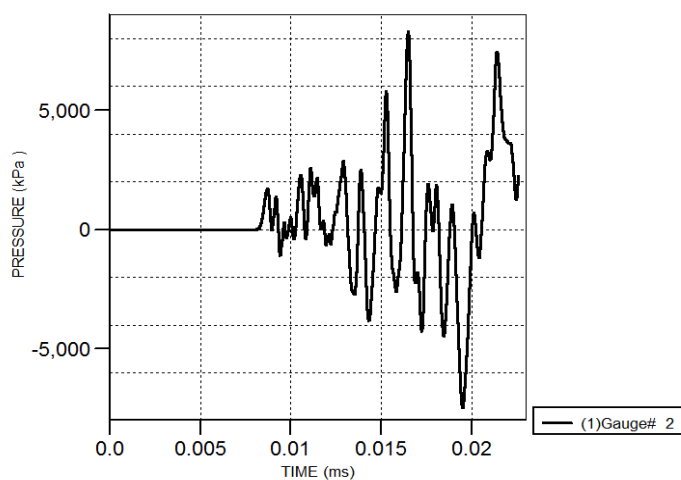
پ ۶۶: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)



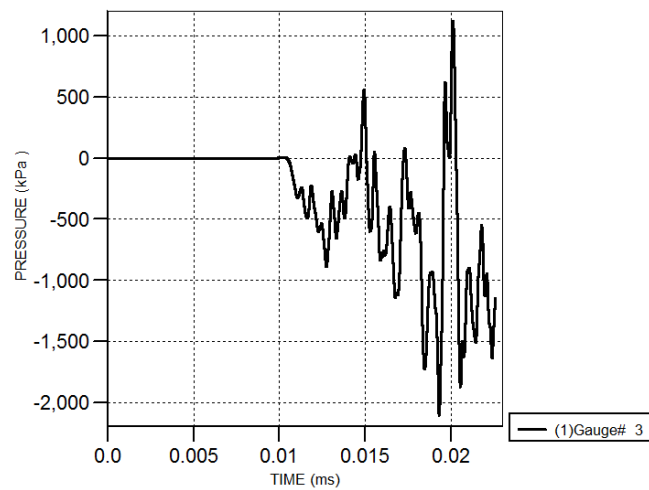
پ ۶۷: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)



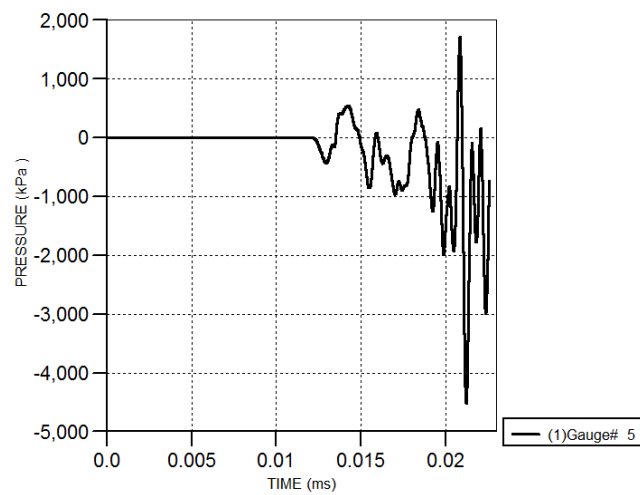
پ ۶۸: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-15m)



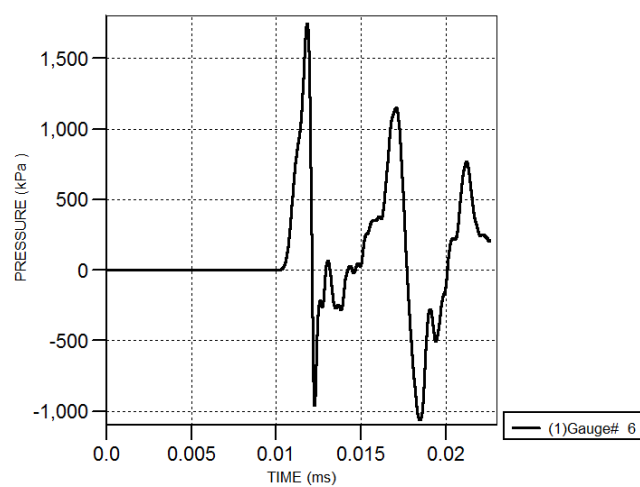
پ ۶۹: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)



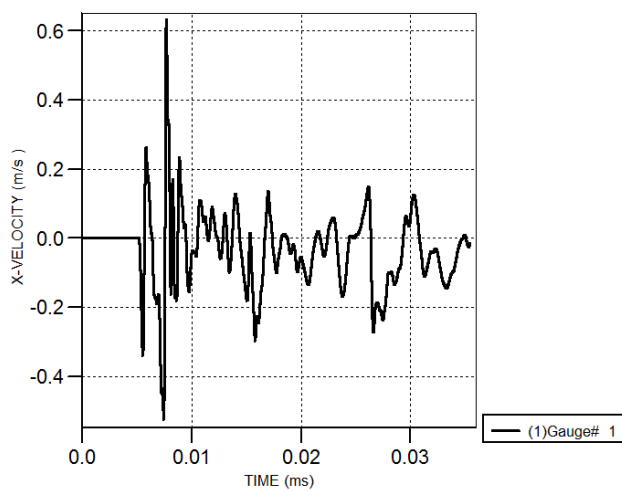
پ ۷۰: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)



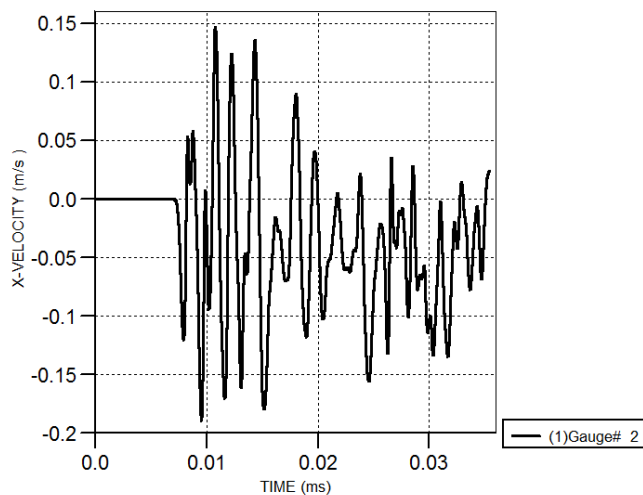
پ ۷۱: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)



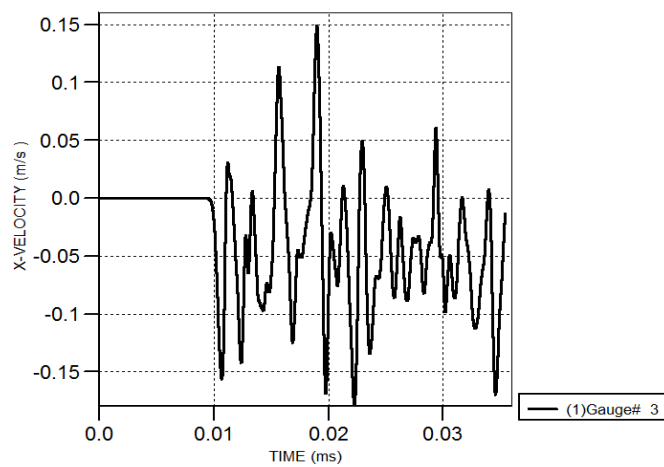
پ ۷۲: نمودار فشار-زمان ثبت شده در مخزن فولادی (2000kg-20m)



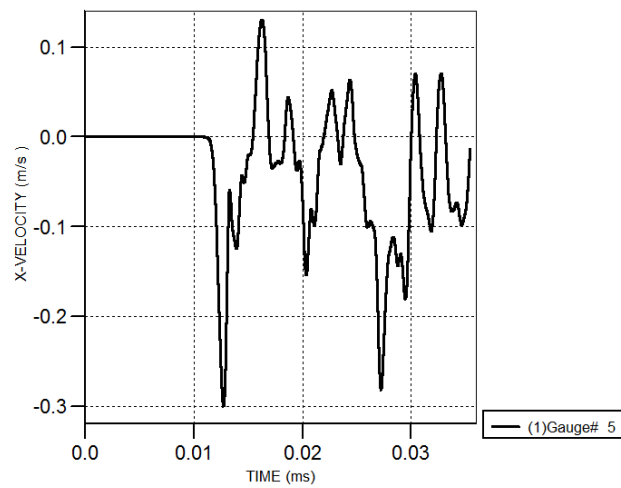
پ ۷۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)



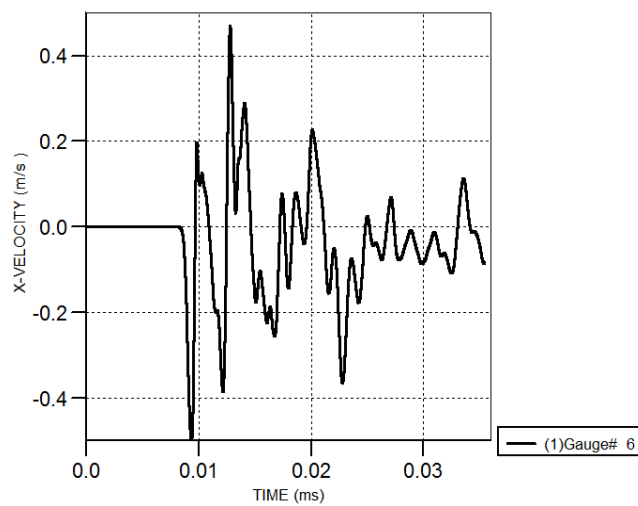
پ ۷۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)



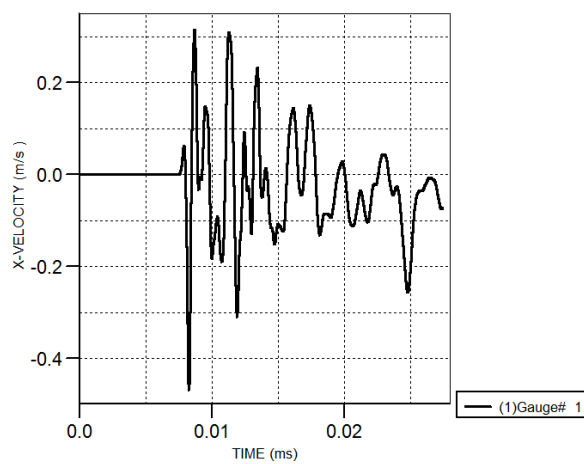
پ ۷۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)



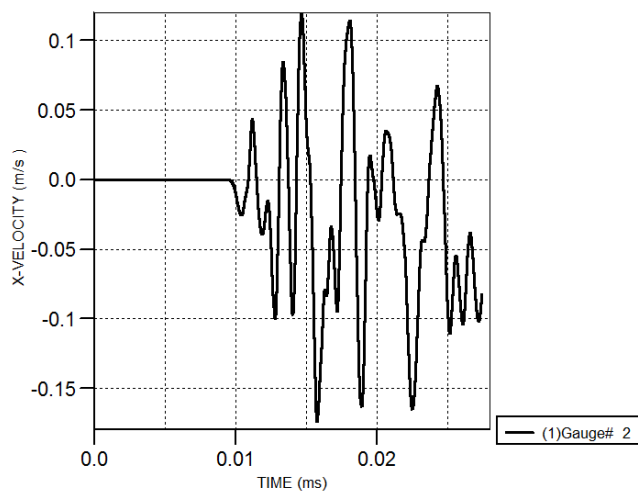
پ ۷۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)



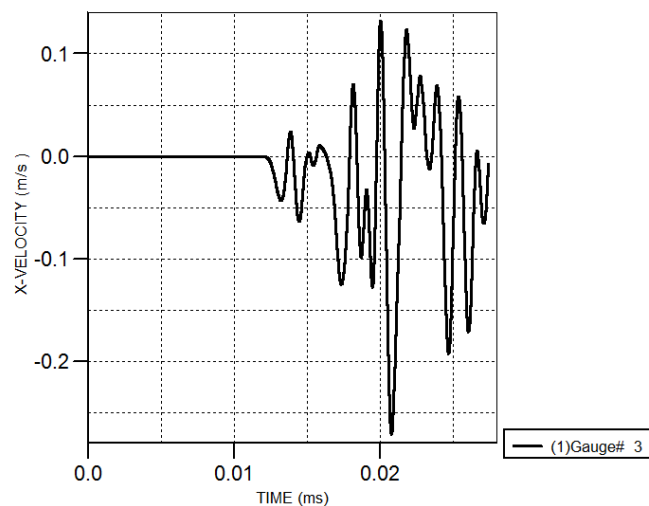
پ ۷۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-10m)



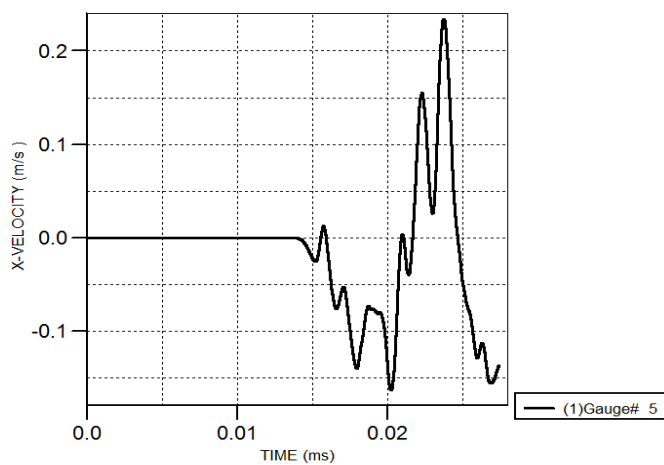
پ ۷۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)



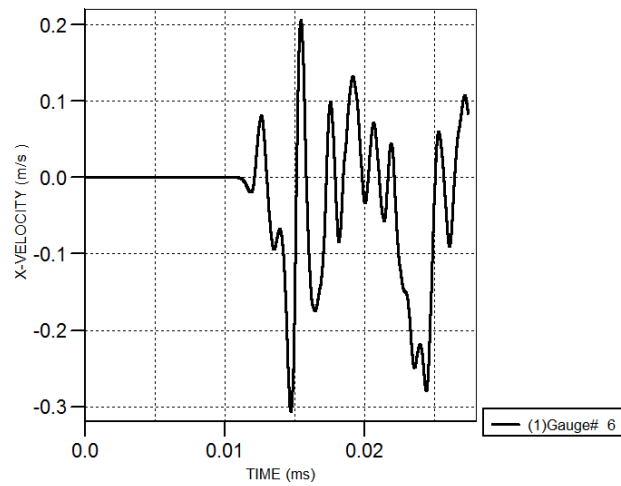
پ ۷۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)



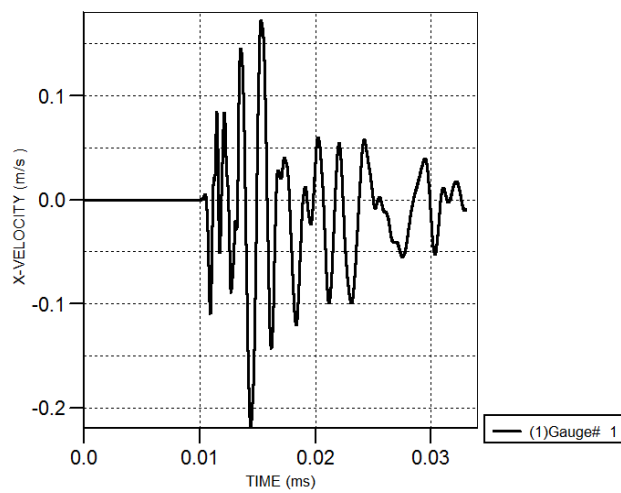
پ ۸۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)



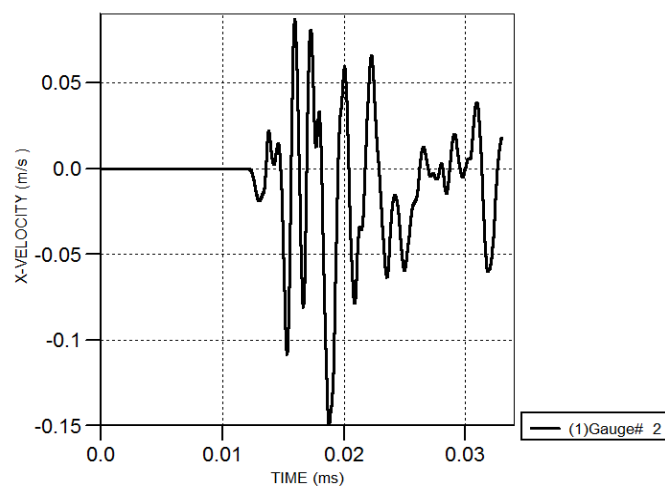
پ ۸۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)



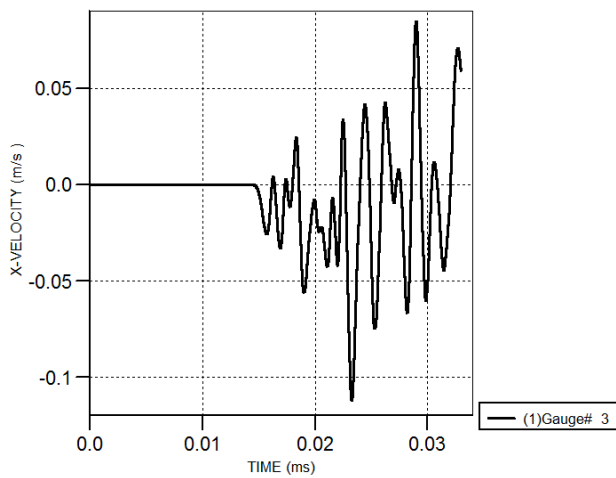
پ ۸۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-15m)



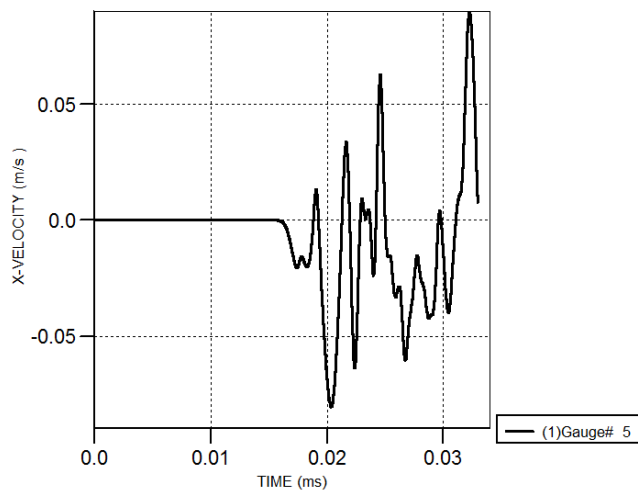
پ ۸۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)



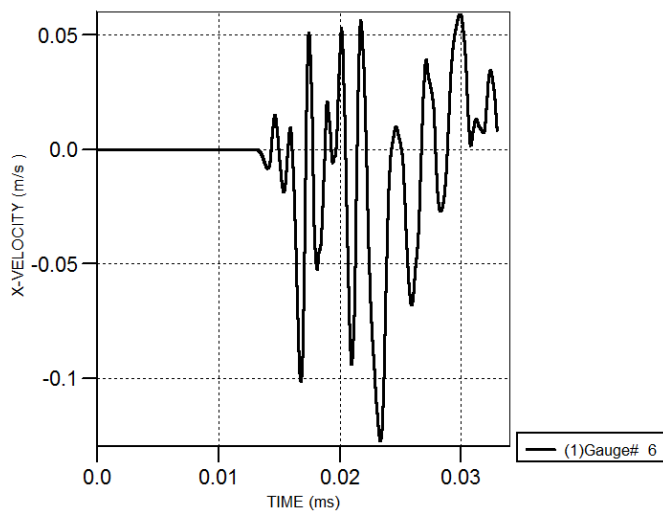
پ ۸۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)



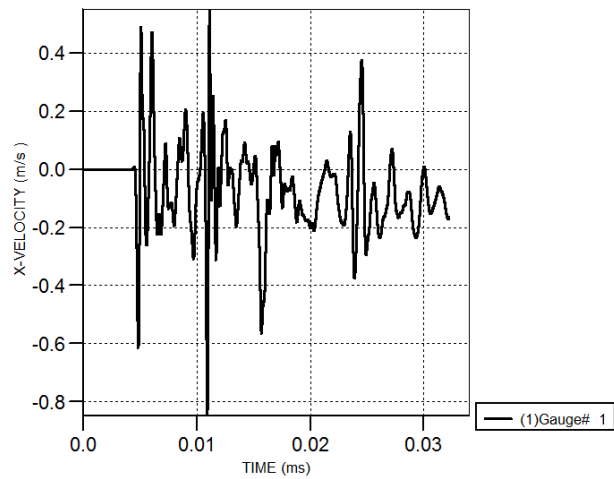
پ ۸۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)



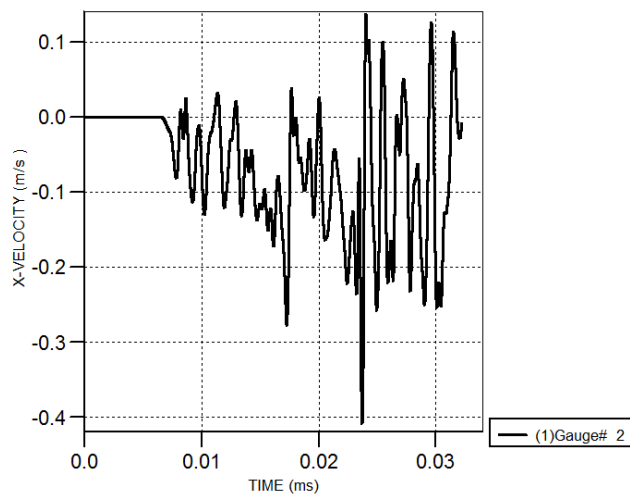
پ ۸۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)



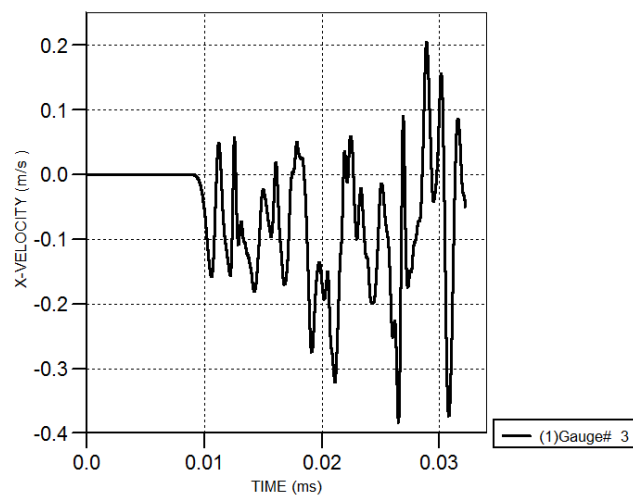
پ ۸۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (500kg-20m)



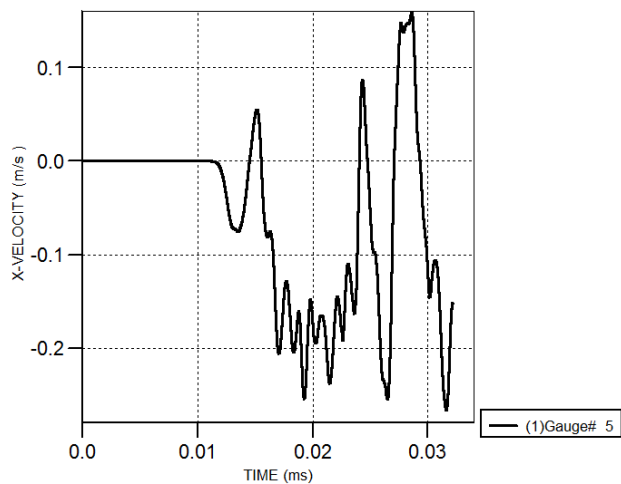
پ ۸۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)



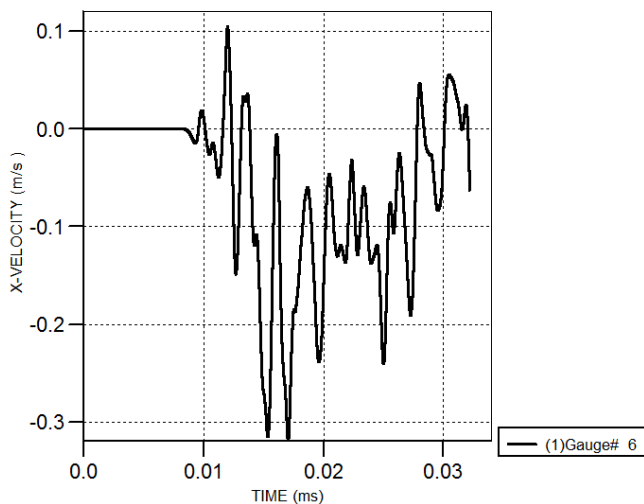
پ ۸۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)



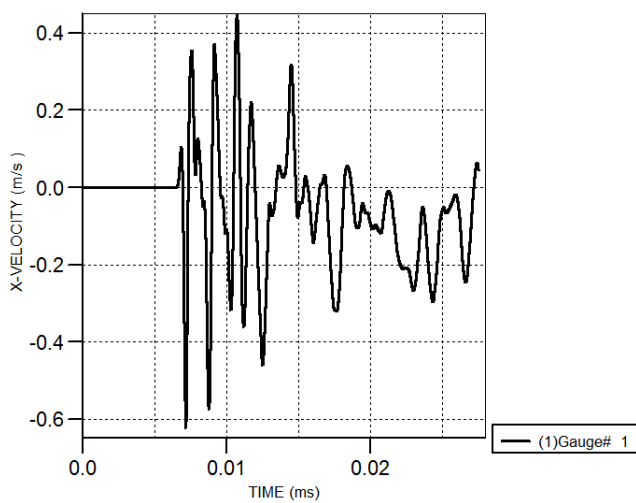
پ ۹۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)



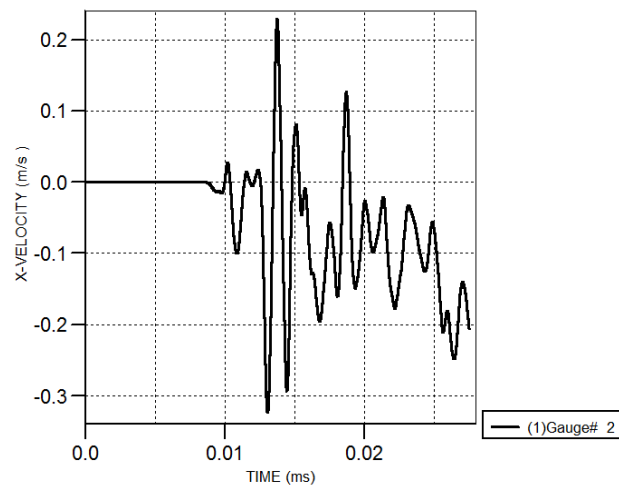
پ ۹۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)



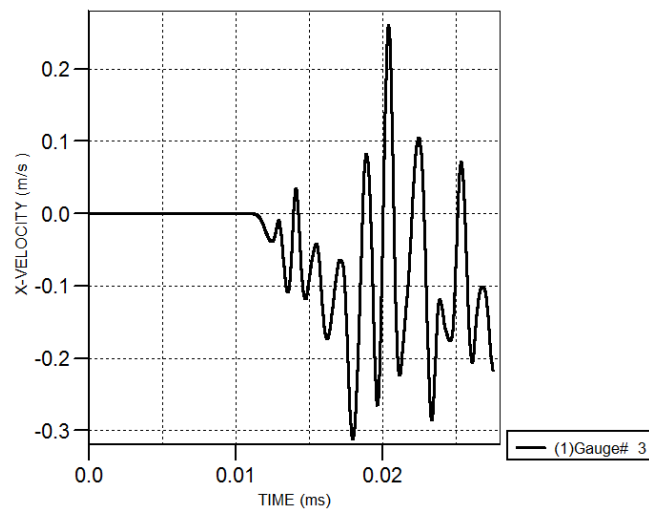
پ ۹۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-10m)



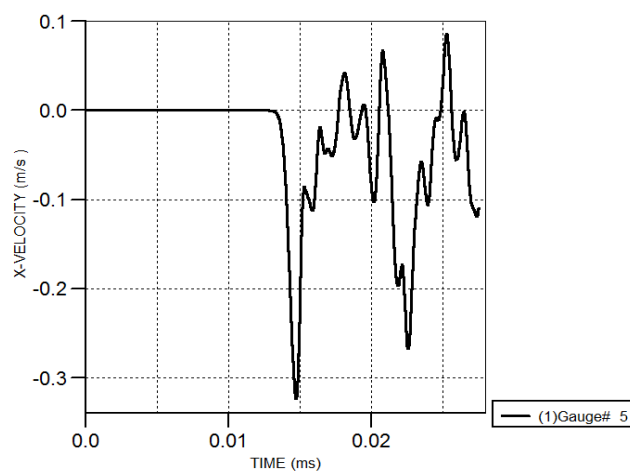
پ ۹۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)



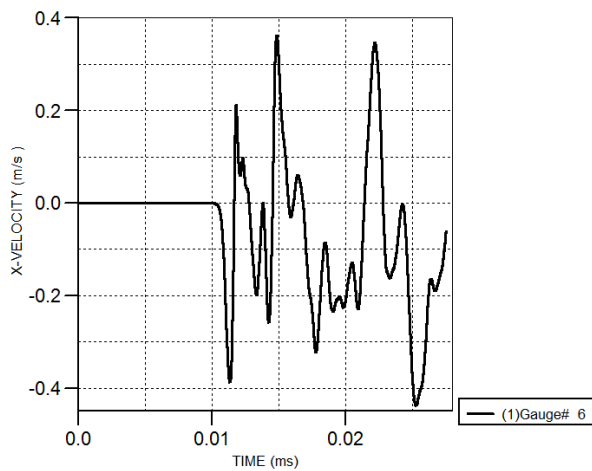
پ ۹۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)



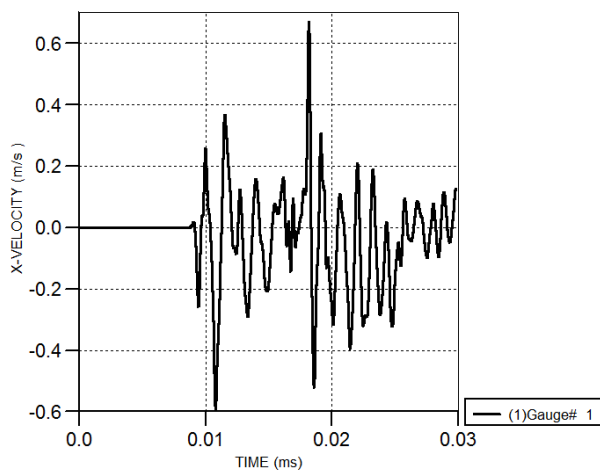
پ ۹۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)



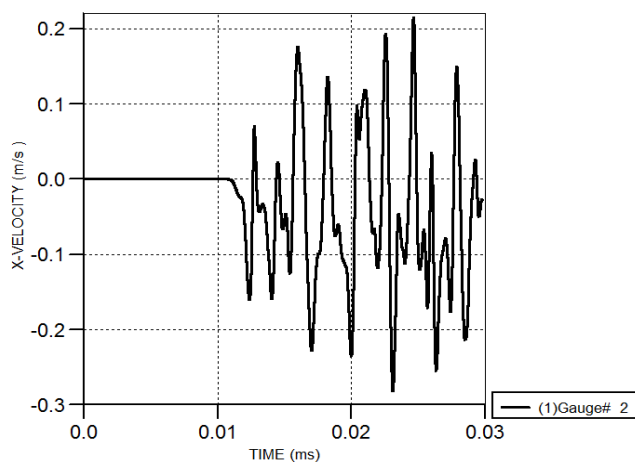
پ ۹۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)



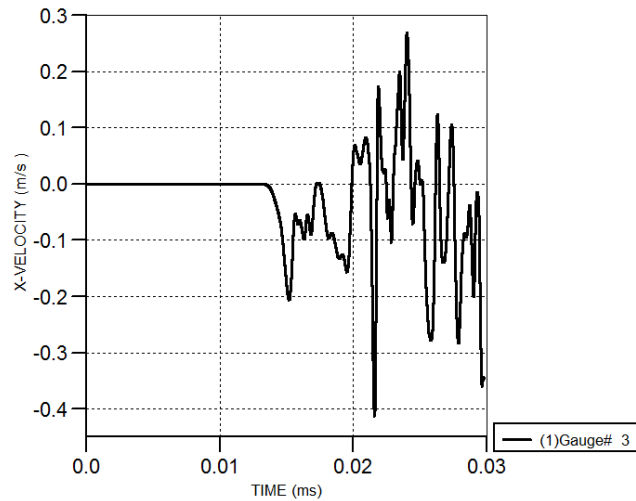
پ ۹۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-15m)



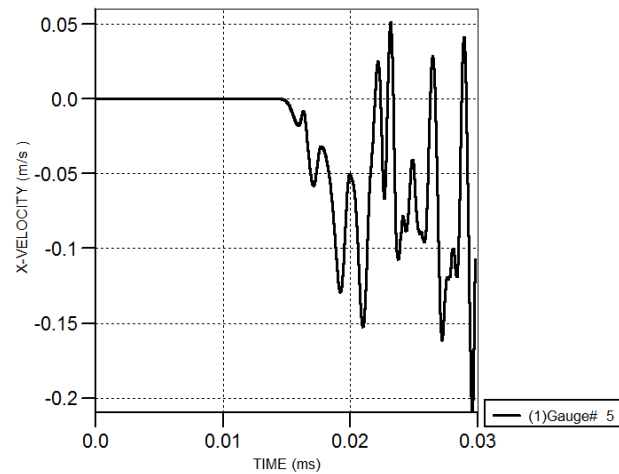
پ ۹۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)



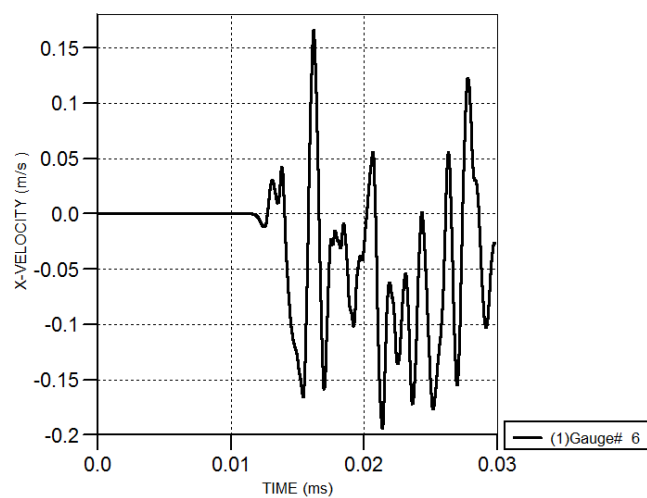
پ ۹۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)



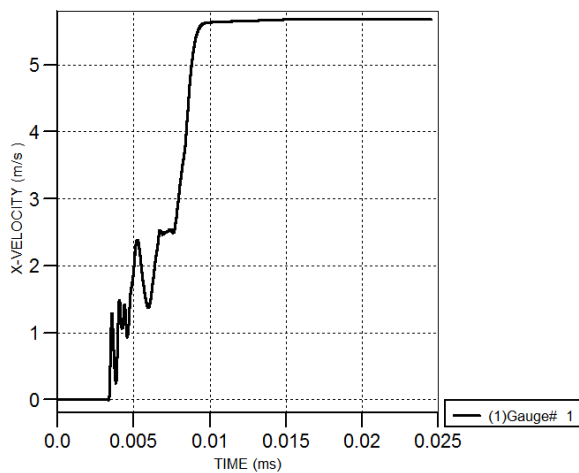
پ ۱۰۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)



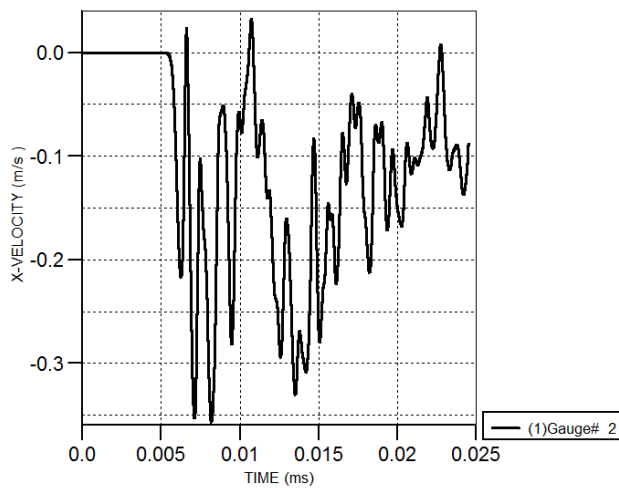
پ ۱۰۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)



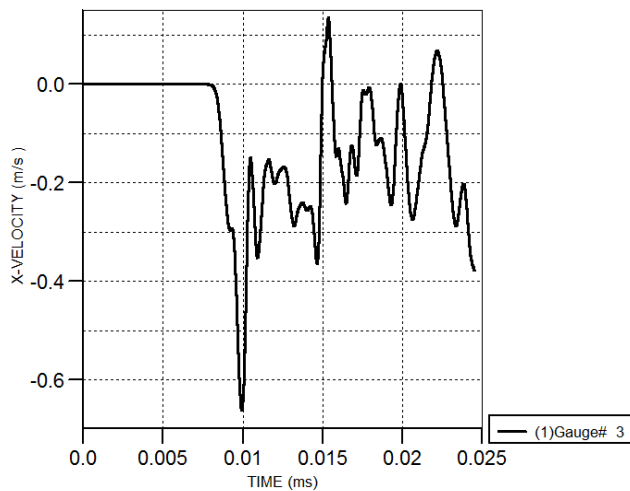
پ ۱۰۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (1000kg-20m)



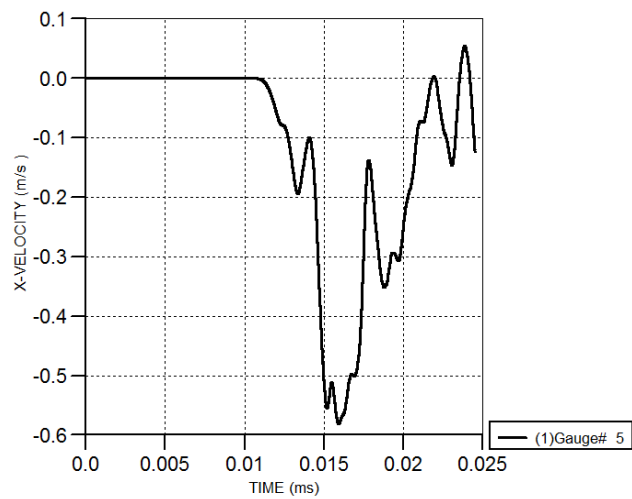
پ ۱۰۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)



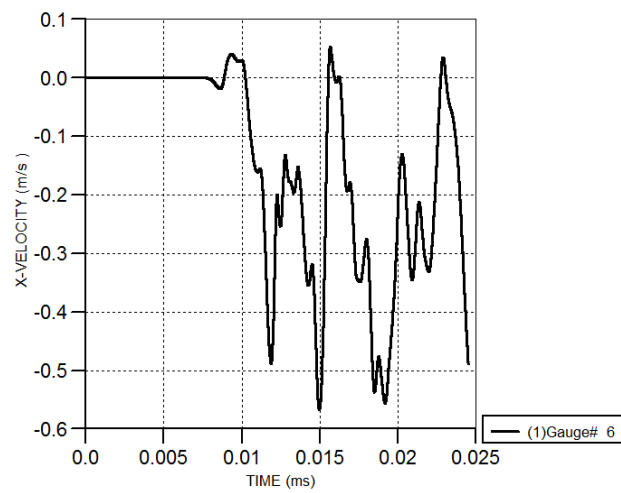
پ ۱۰۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)



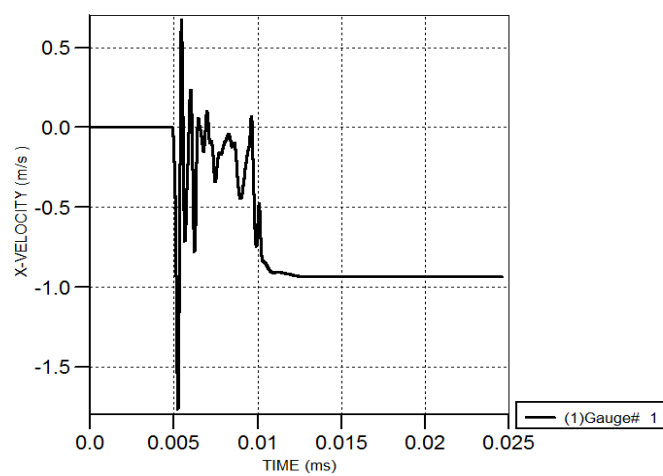
پ ۱۰۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)



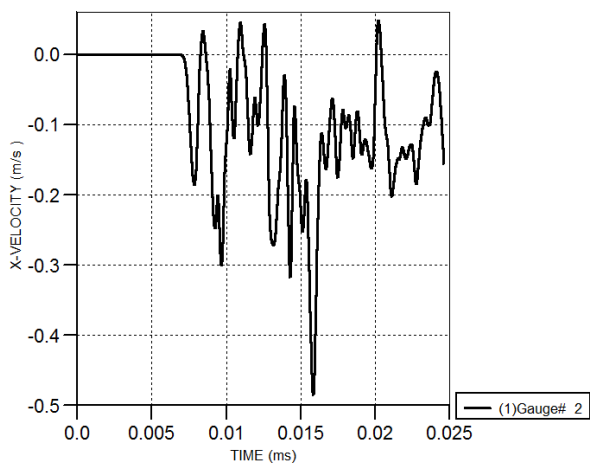
پ ۱۰۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)



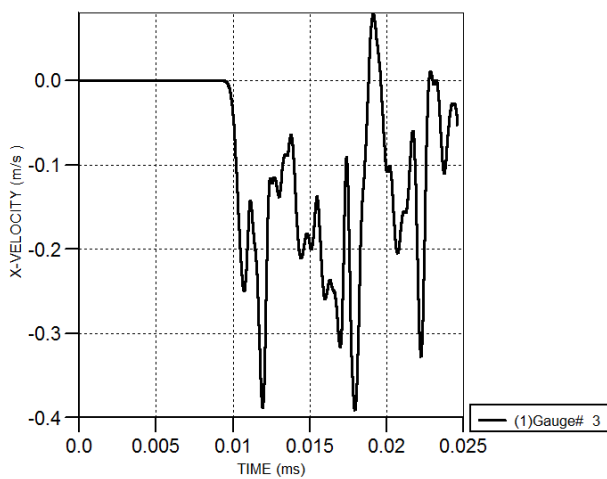
پ ۱۰۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-10m)



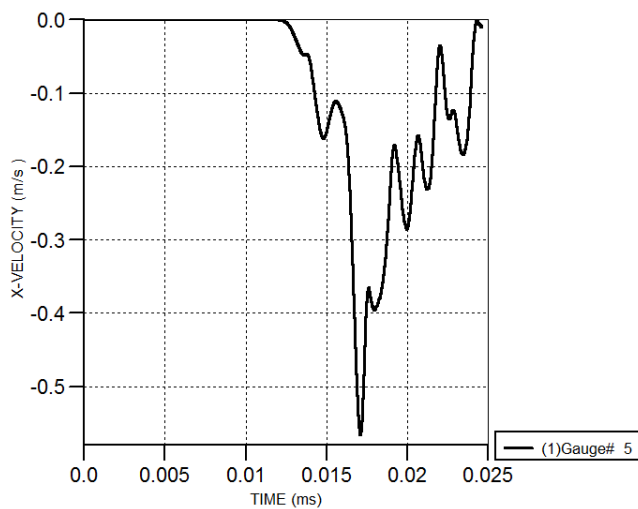
پ ۱۰۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)



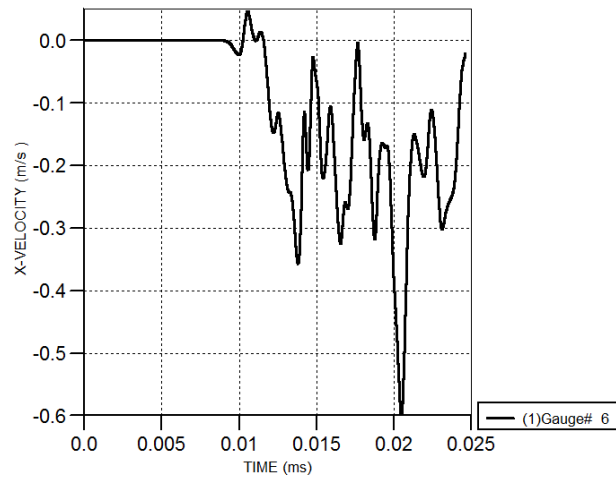
پ ۱۰۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)



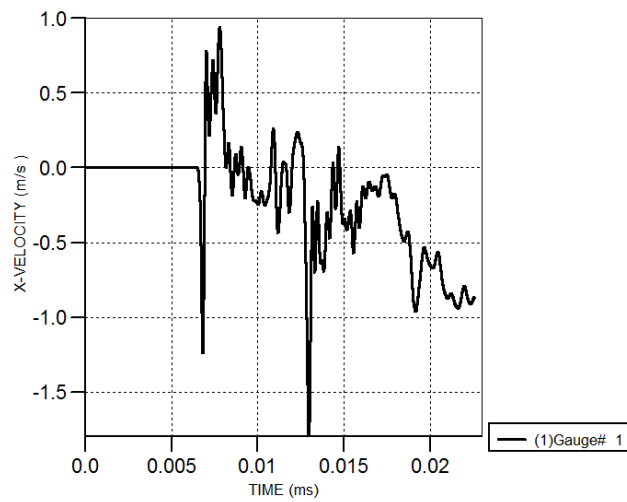
پ ۱۱۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)



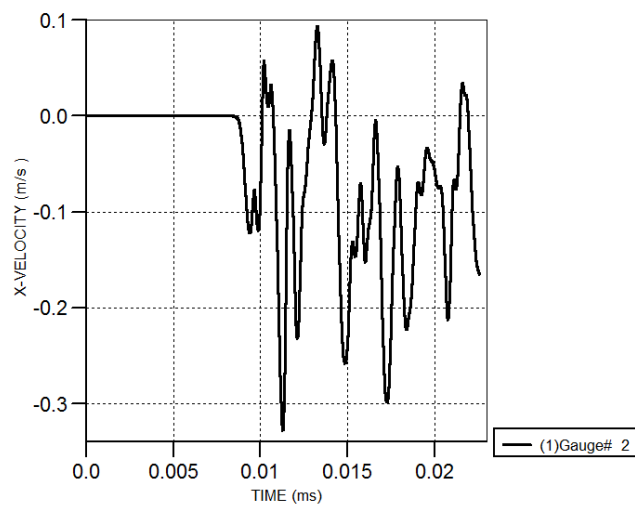
پ ۱۱۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)



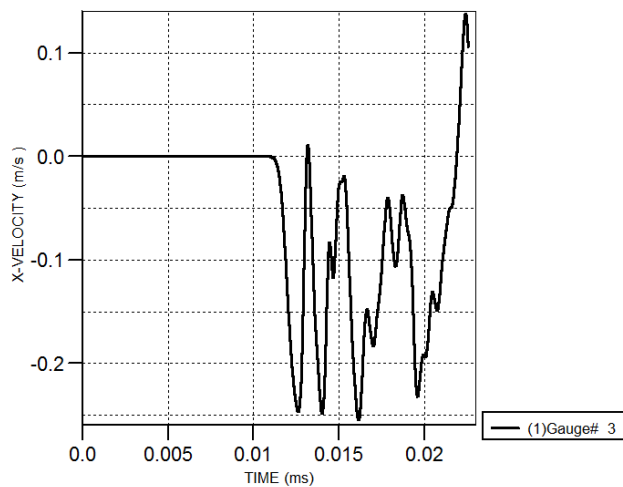
پ ۱۱۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-15m)



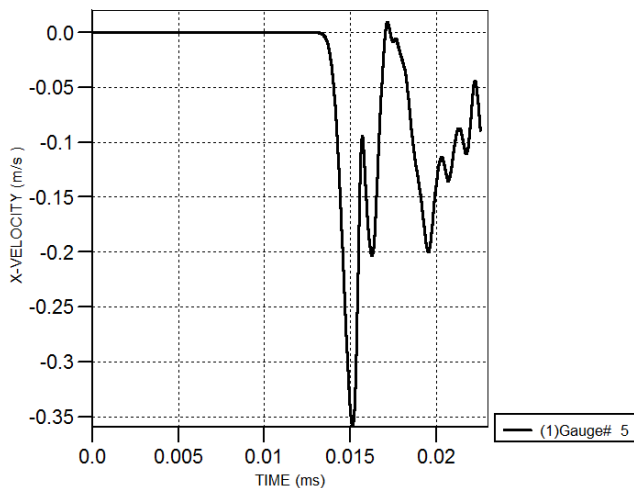
پ ۱۱۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)



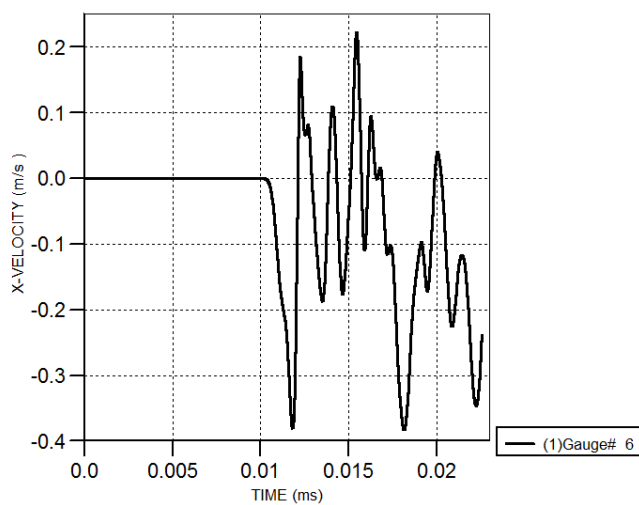
پ ۱۱۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)



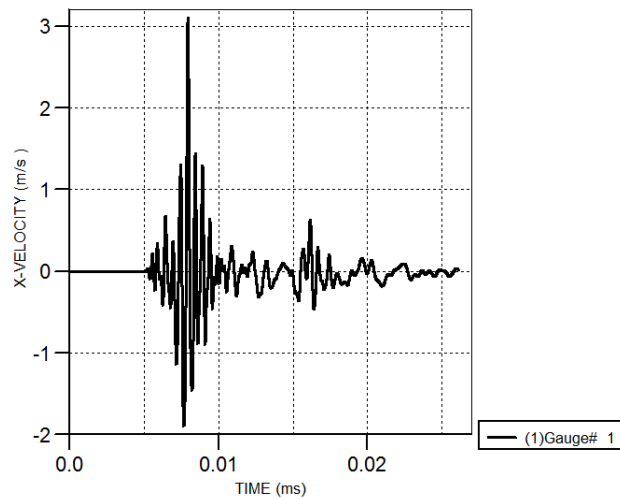
پ ۱۱۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)



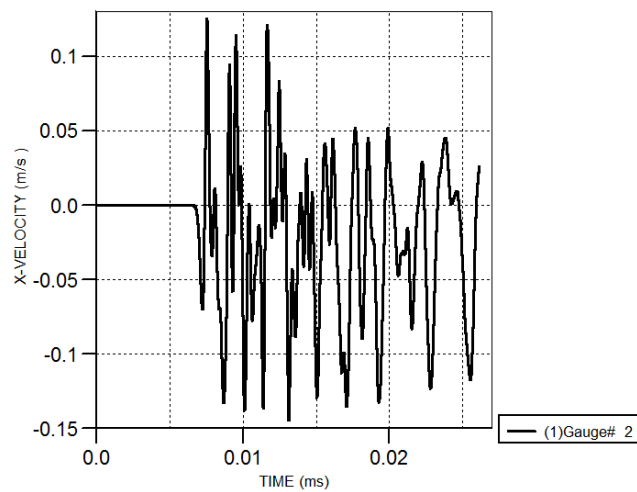
پ ۱۱۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)



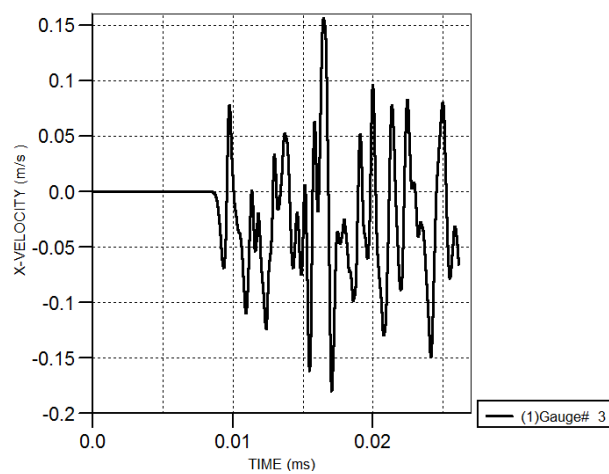
پ ۱۱۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن بتنی (2000kg-20m)



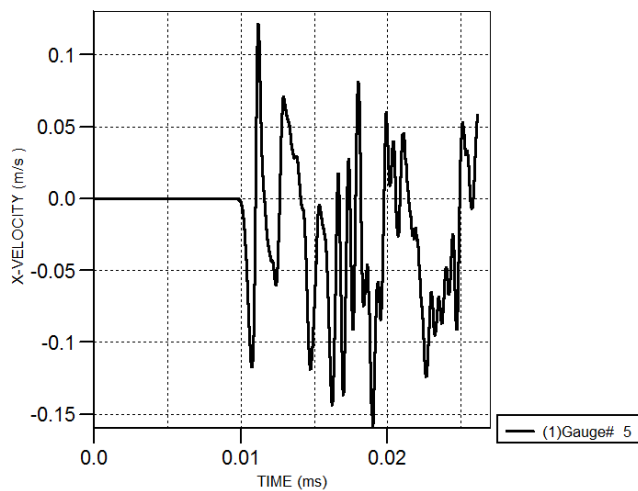
پ ۱۱۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)



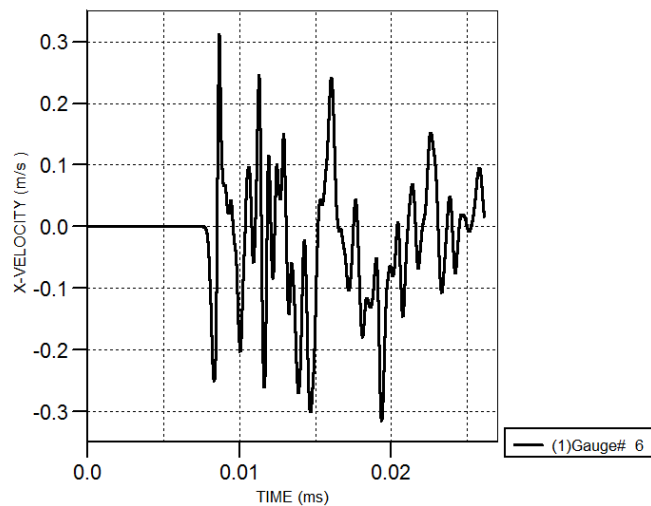
پ ۱۱۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)



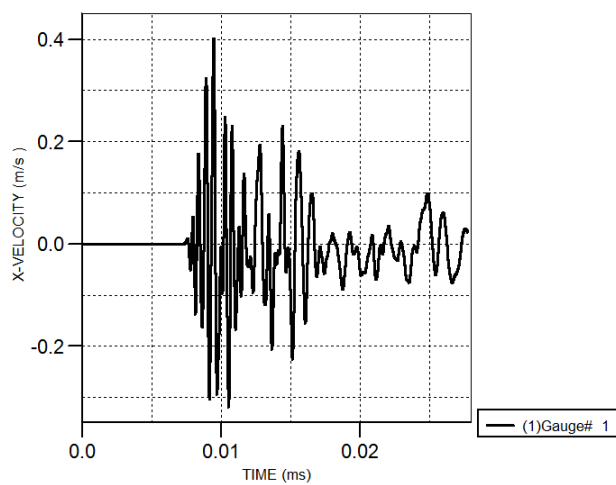
پ ۱۲۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)



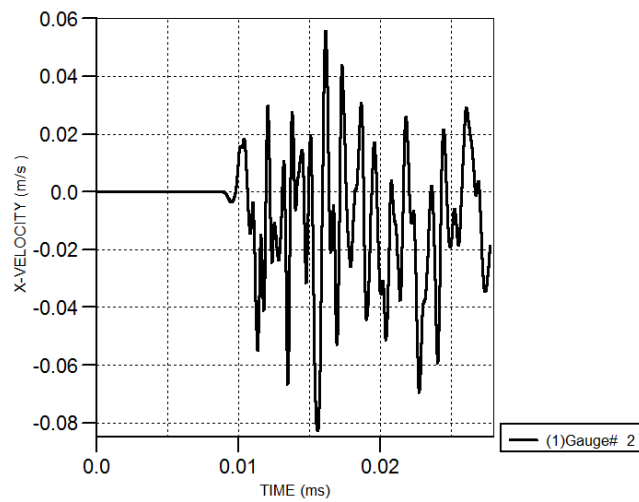
پ ۱۲۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)



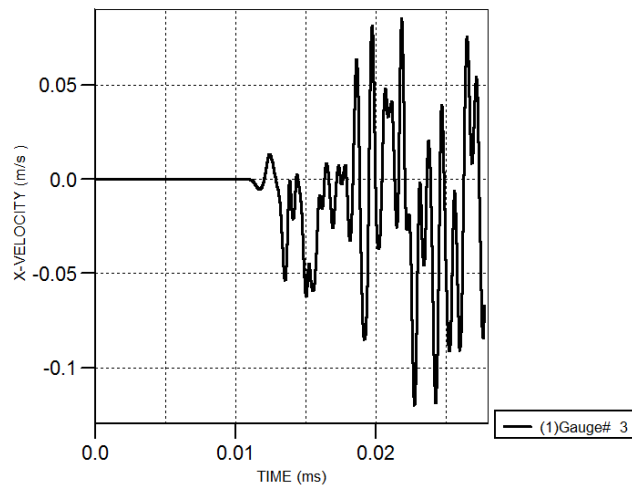
پ ۱۲۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-10m)



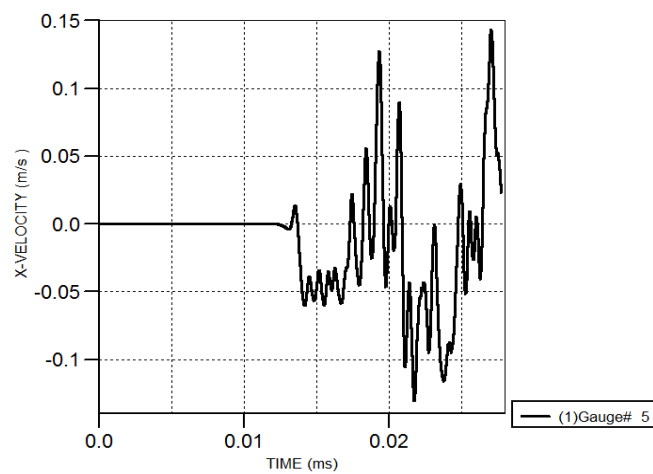
پ ۱۲۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)



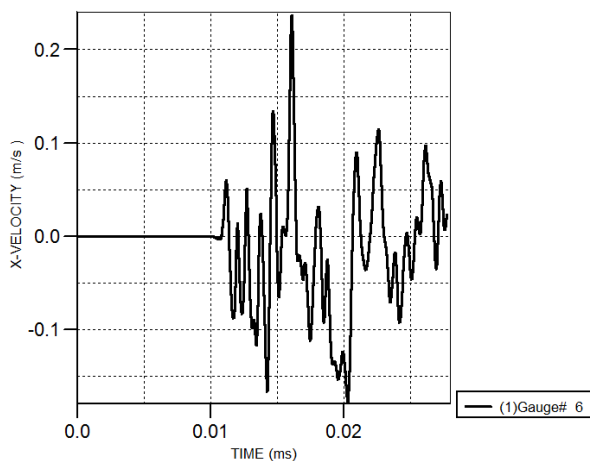
پ ۱۲۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)



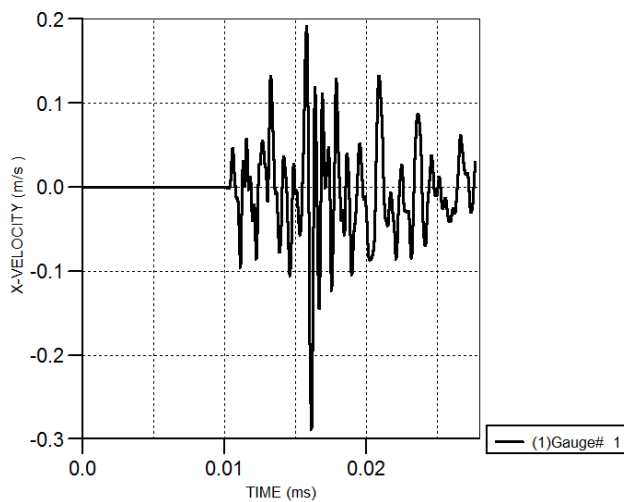
پ ۱۲۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)



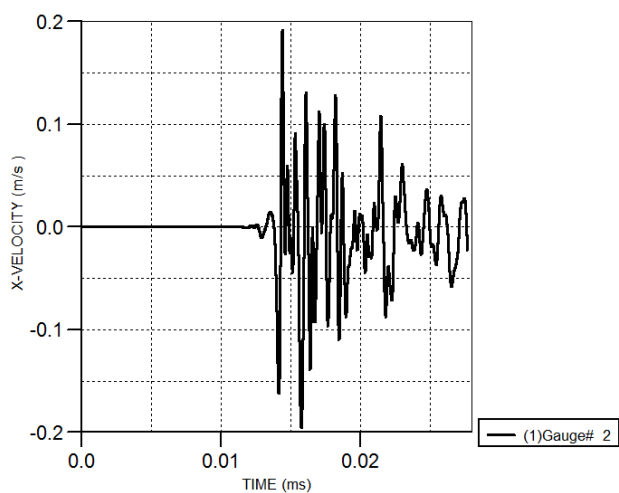
پ ۱۲۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)



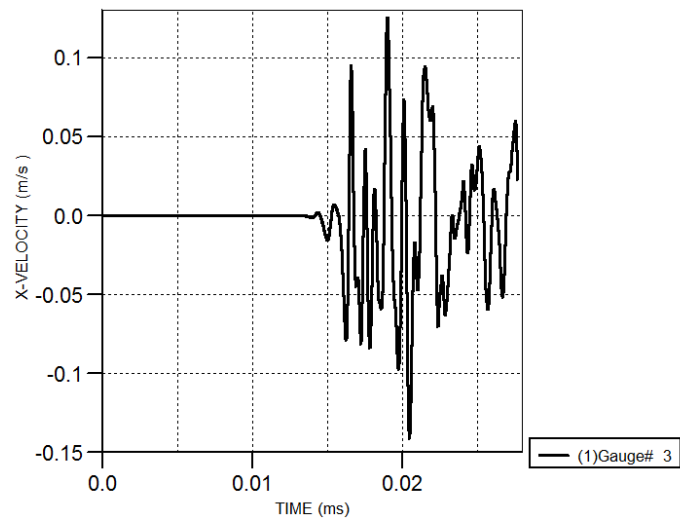
پ ۱۲۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-15m)



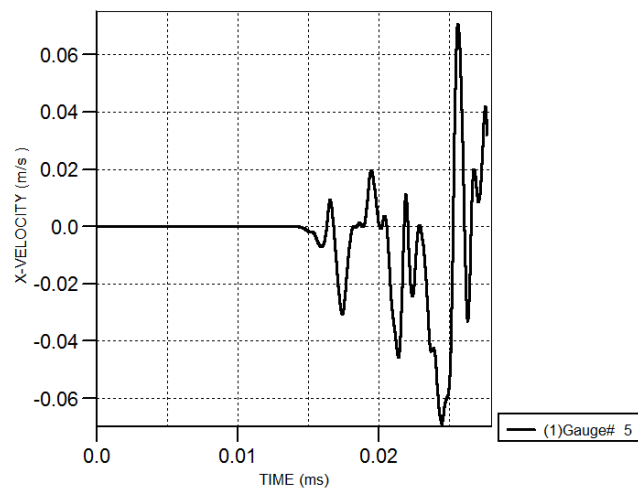
پ ۱۲۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)



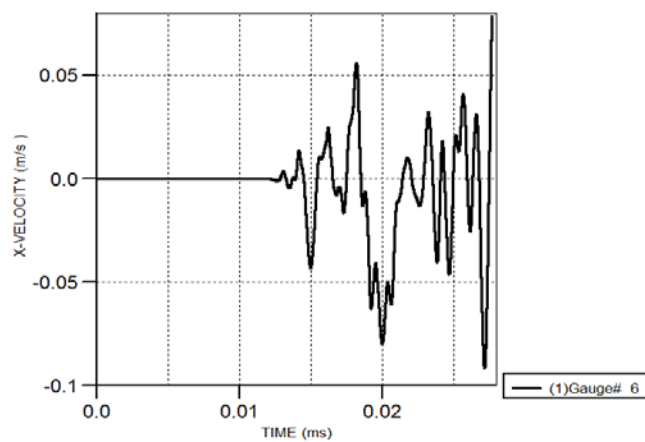
پ ۱۲۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)



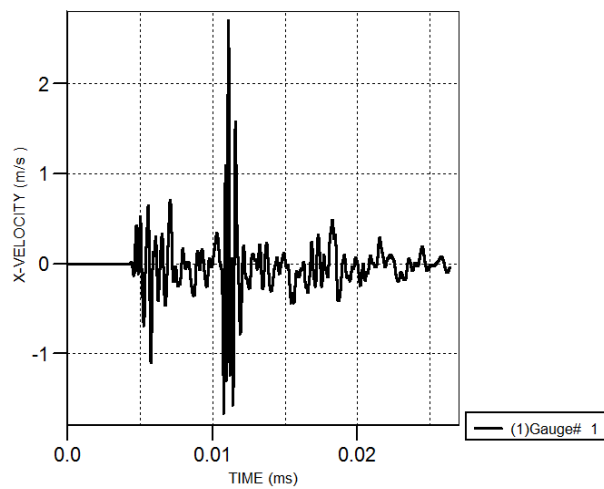
پ ۱۳۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)



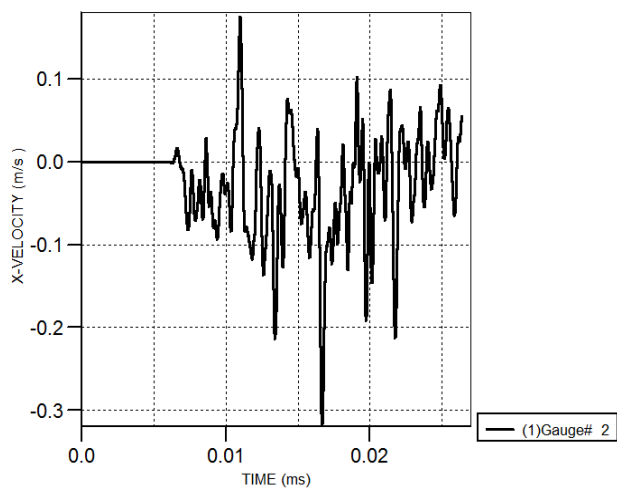
پ ۱۳۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)



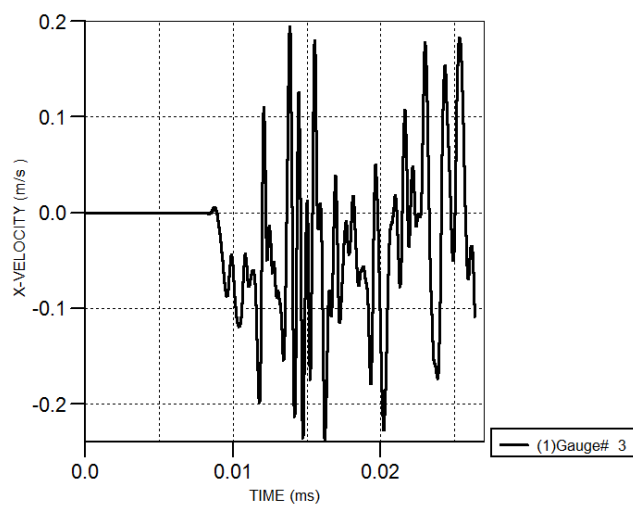
پ ۱۳۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (500kg-20m)



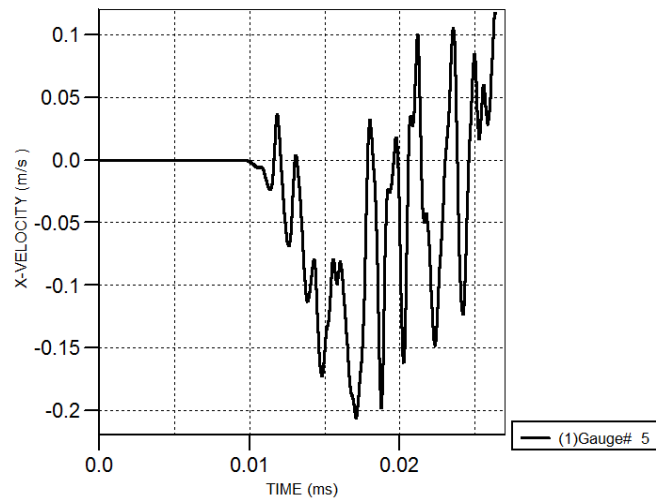
پ ۱۳۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)



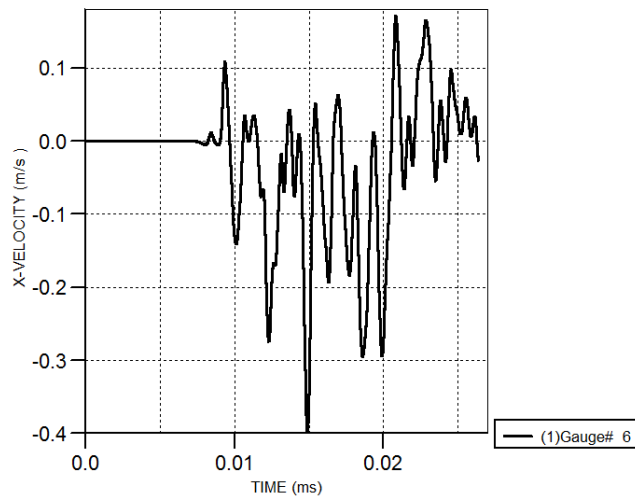
پ ۱۳۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)



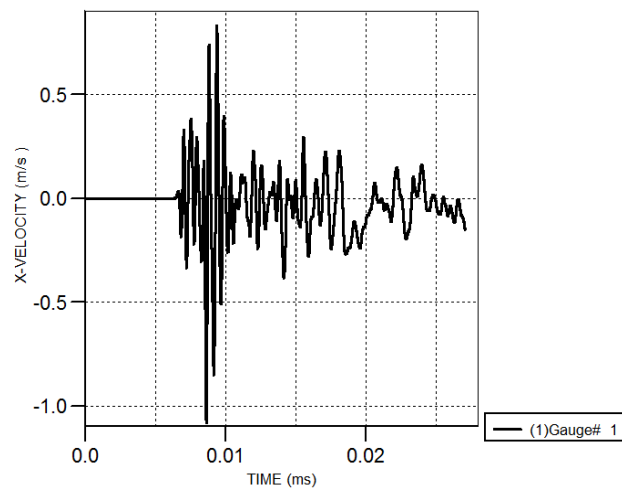
پ ۱۳۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)



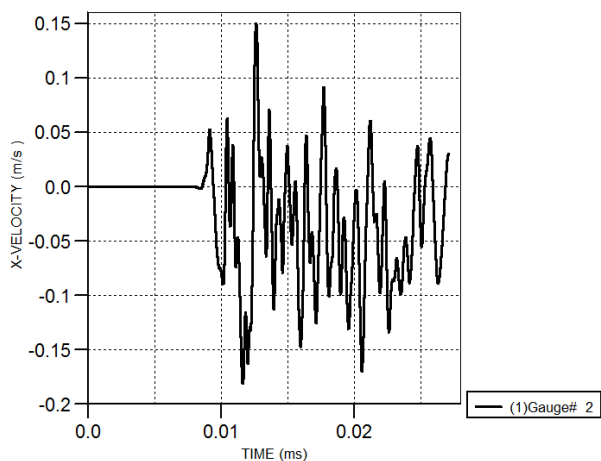
پ ۱۳۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)



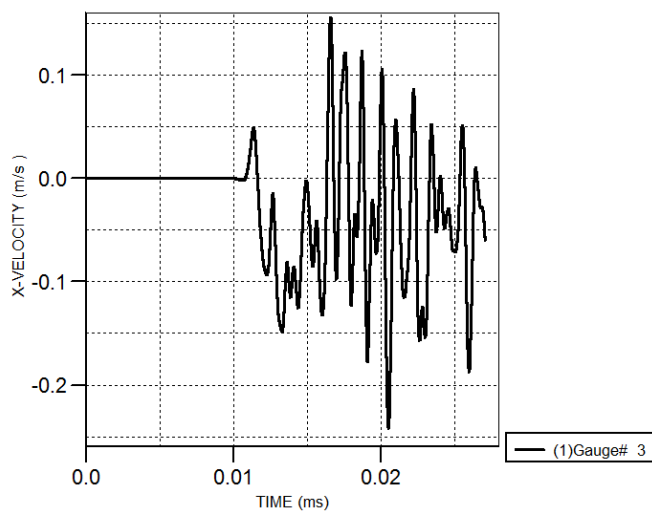
پ ۱۳۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-10m)



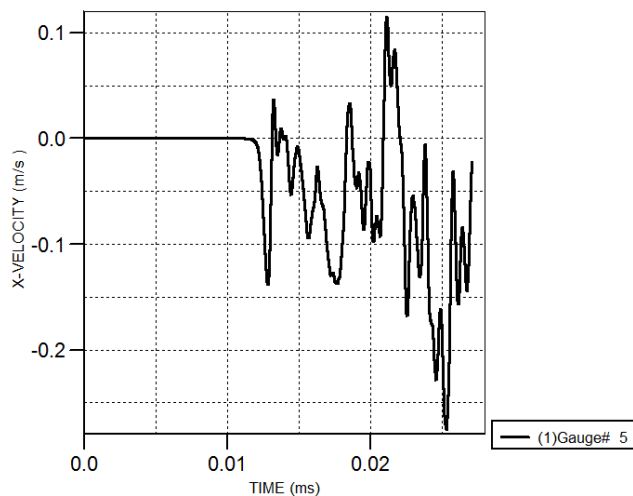
پ ۱۳۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)



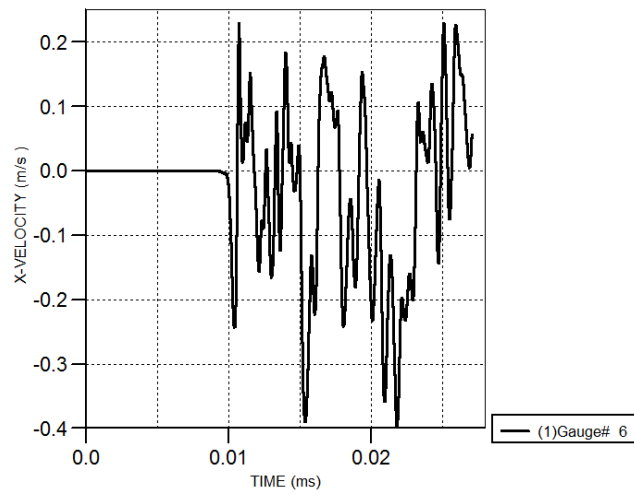
پ ۱۳۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)



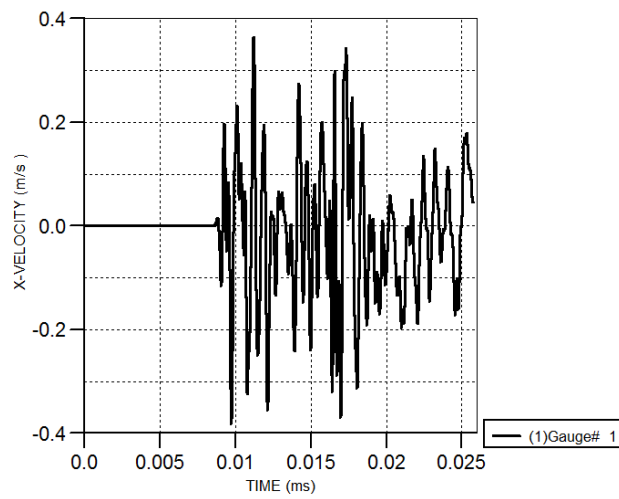
پ ۱۴۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)



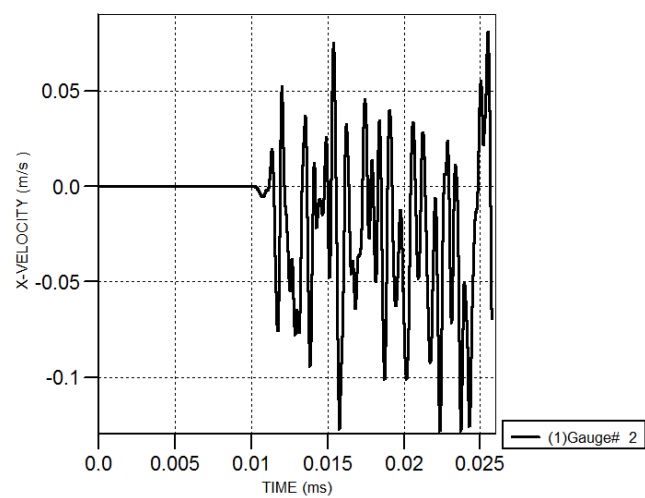
پ ۱۴۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)



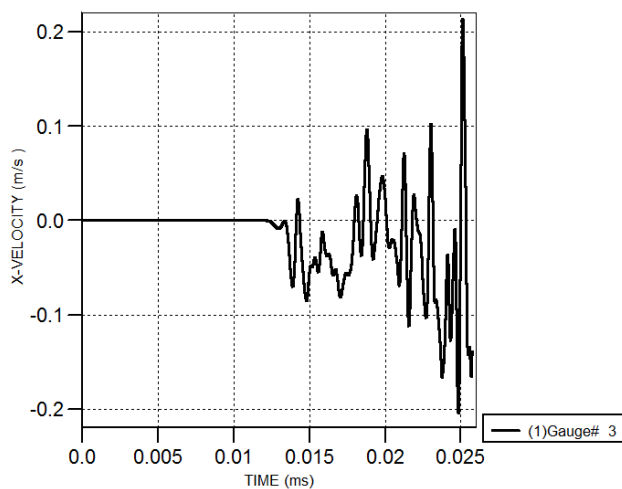
پ ۱۴۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-15m)



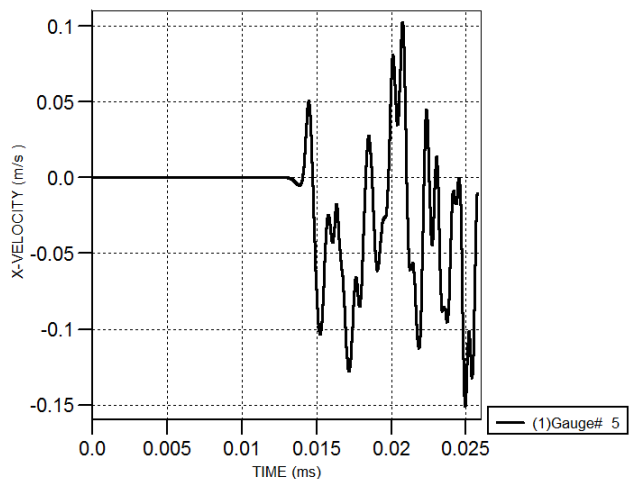
پ ۱۴۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)



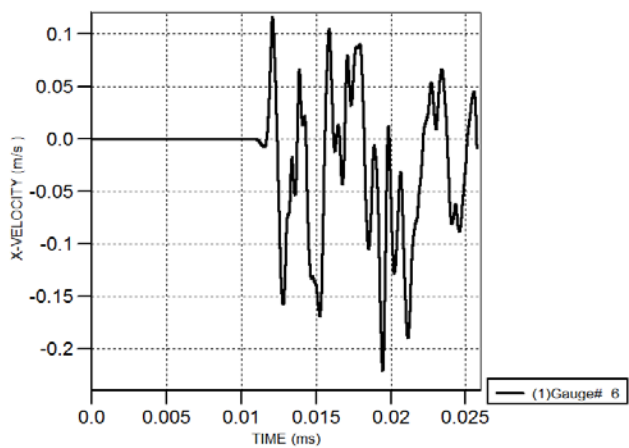
پ ۱۴۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)



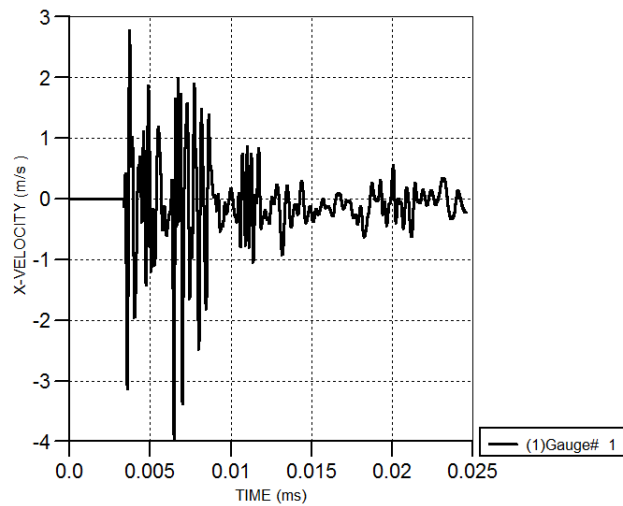
پ ۱۴۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)



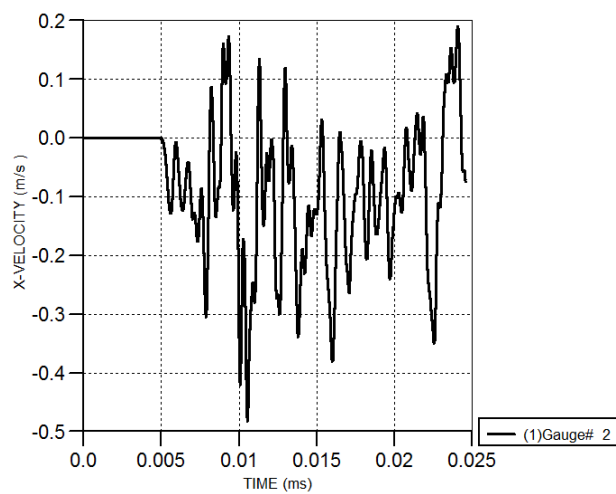
پ ۱۴۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)



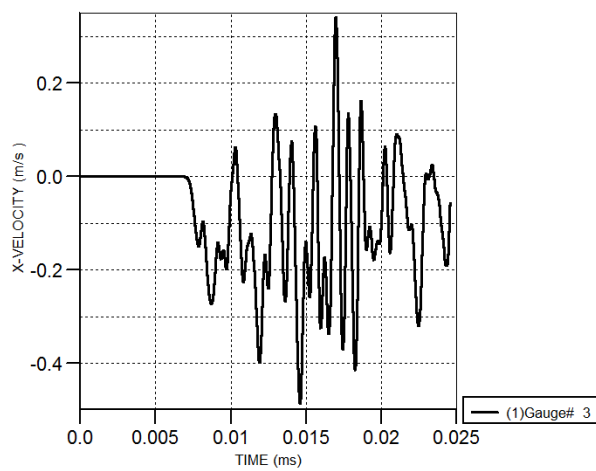
پ ۱۴۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (1000kg-20m)



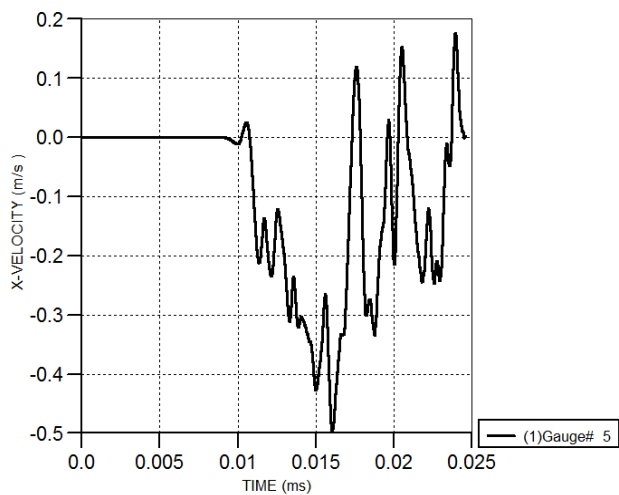
پ ۱۴۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)



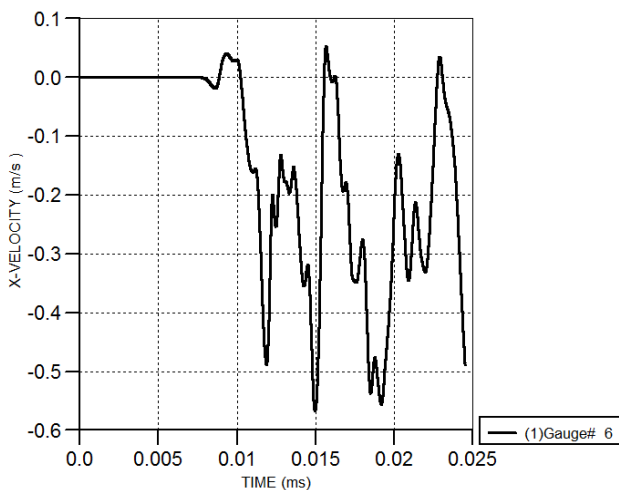
پ ۱۴۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)



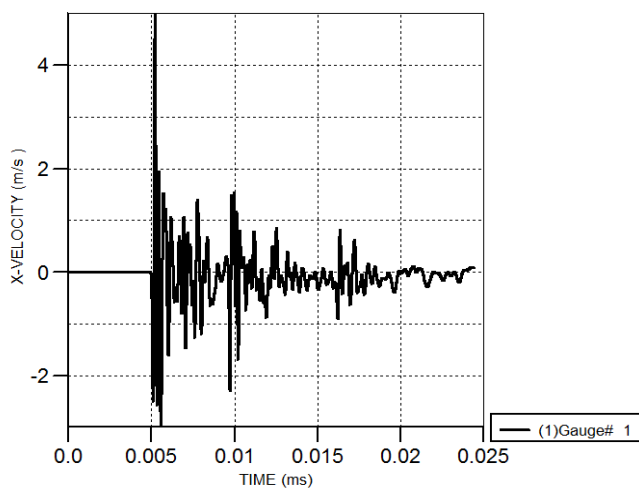
پ ۱۵۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)



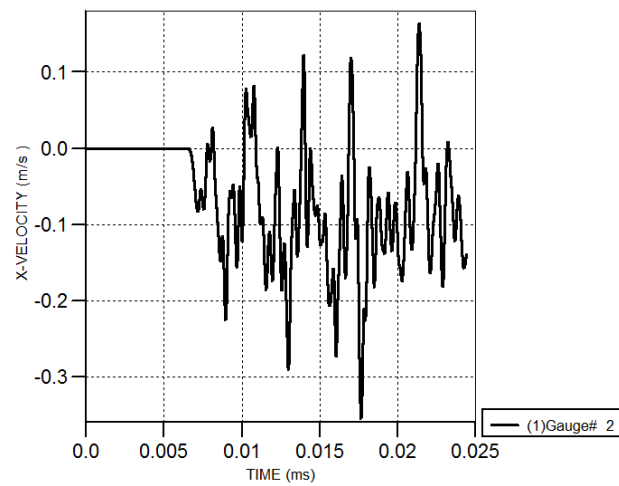
پ ۱۵۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)



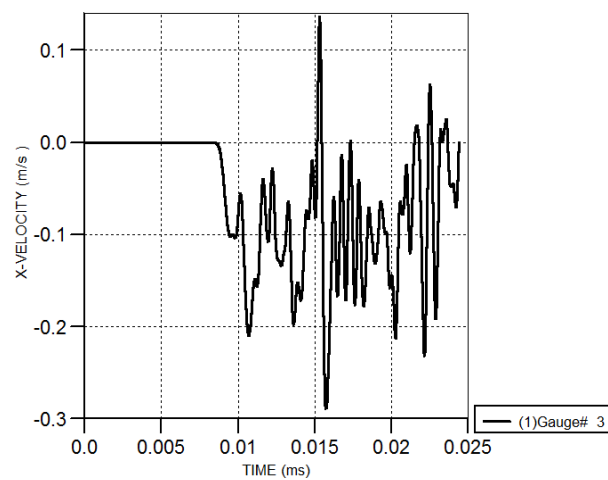
پ ۱۵۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-10m)



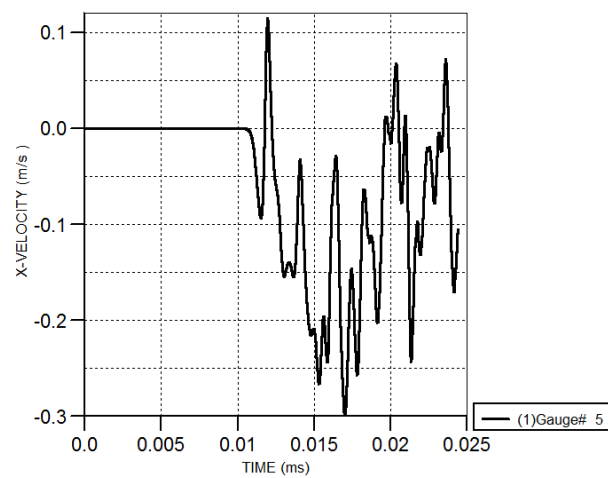
پ ۱۵۳: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)



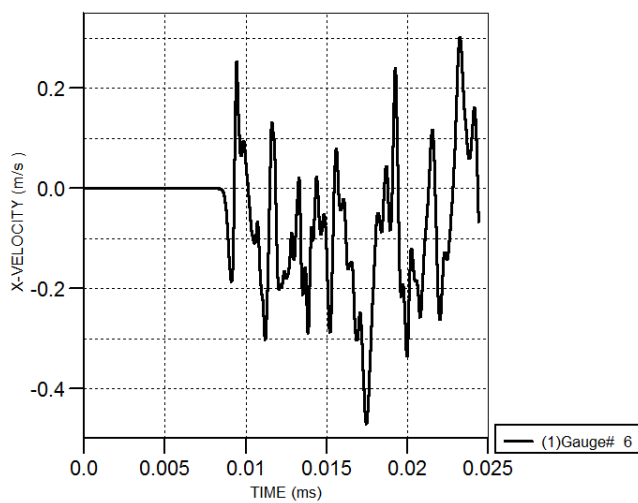
پ ۱۵۴: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)



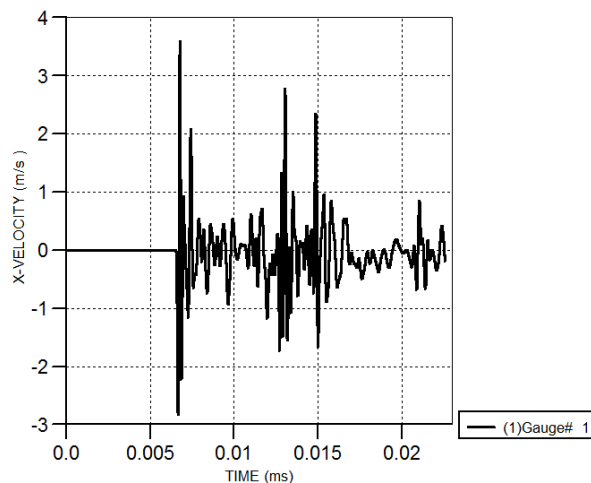
پ ۱۵۵: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)



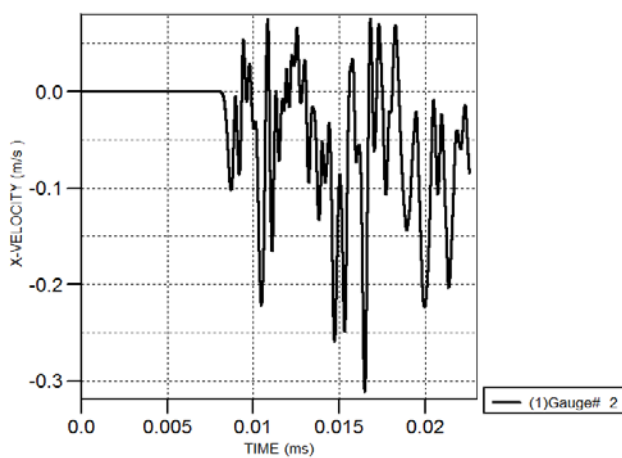
پ ۱۵۶: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)



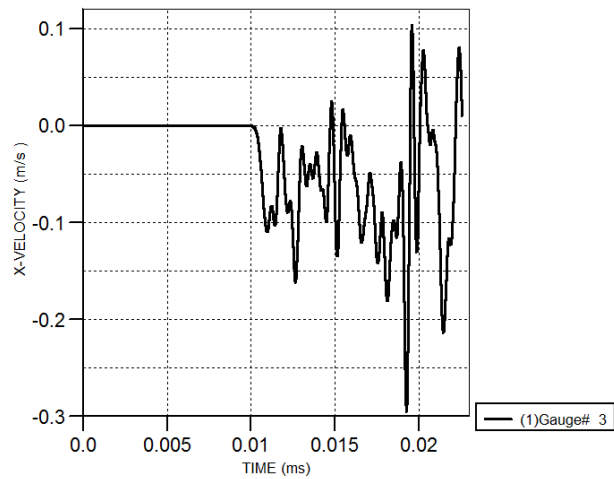
پ ۱۵۷: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-15m)



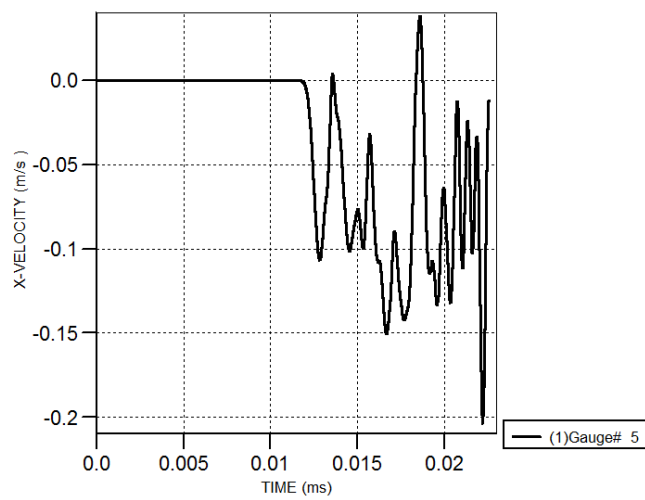
پ ۱۵۸: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)



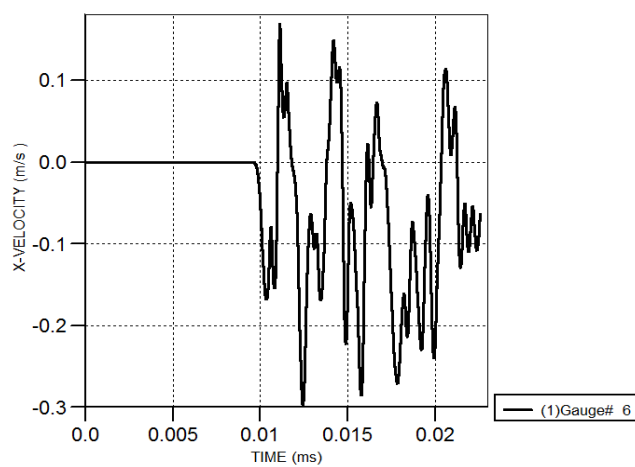
پ ۱۵۹: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)



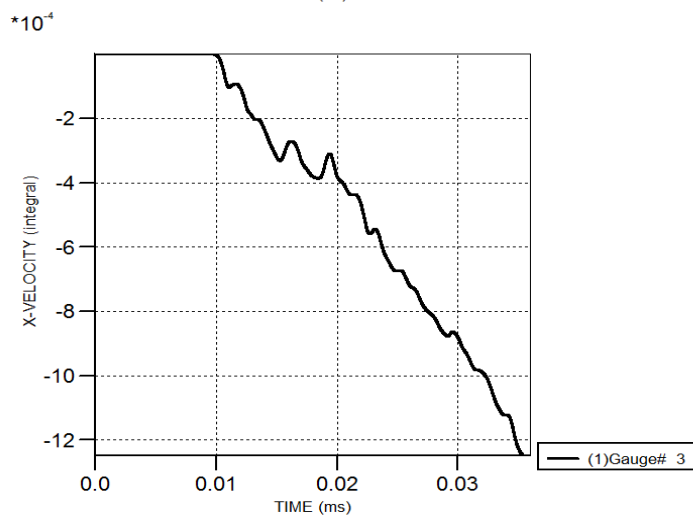
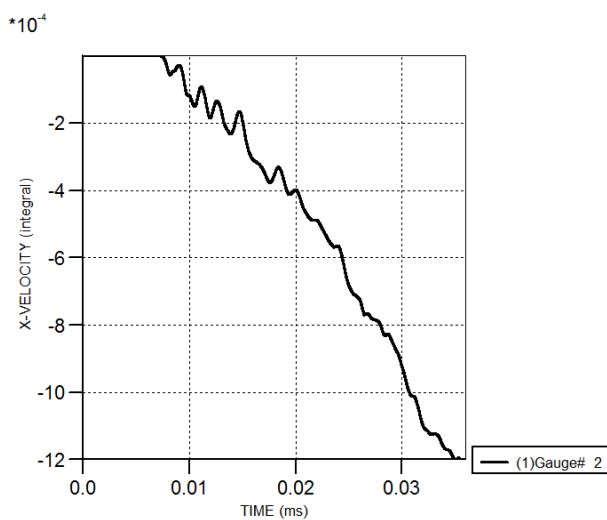
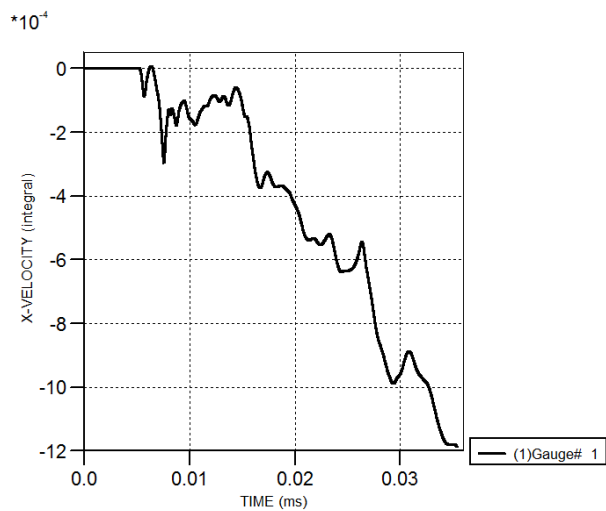
پ ۱۶۰: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)



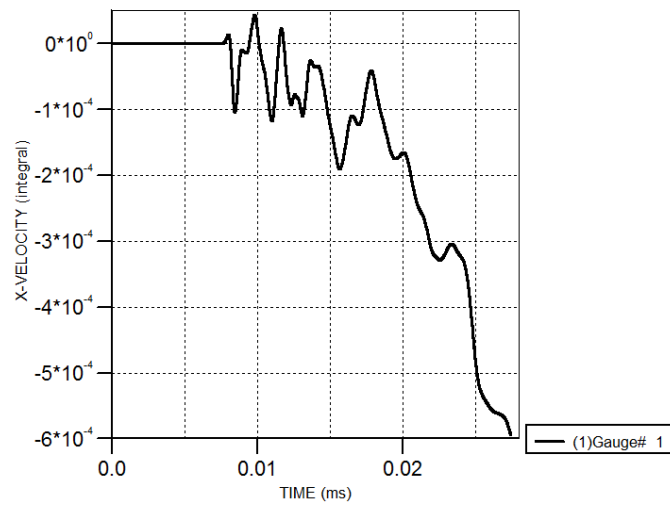
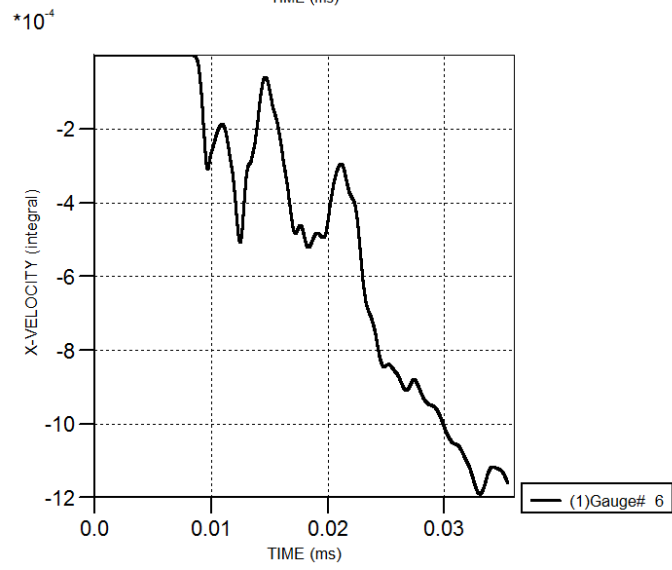
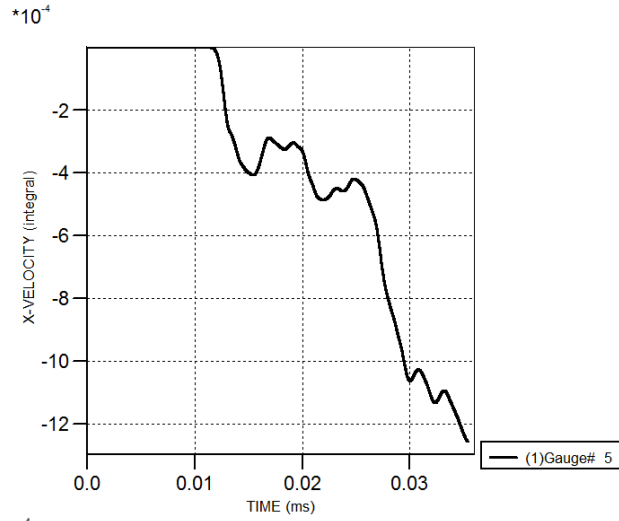
پ ۱۶۱: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)

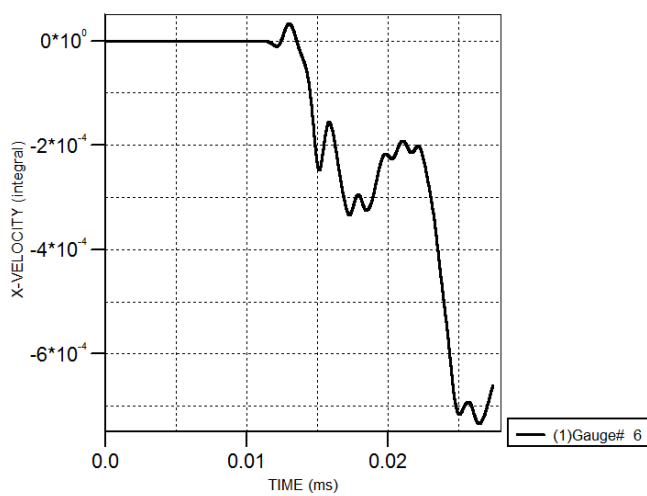
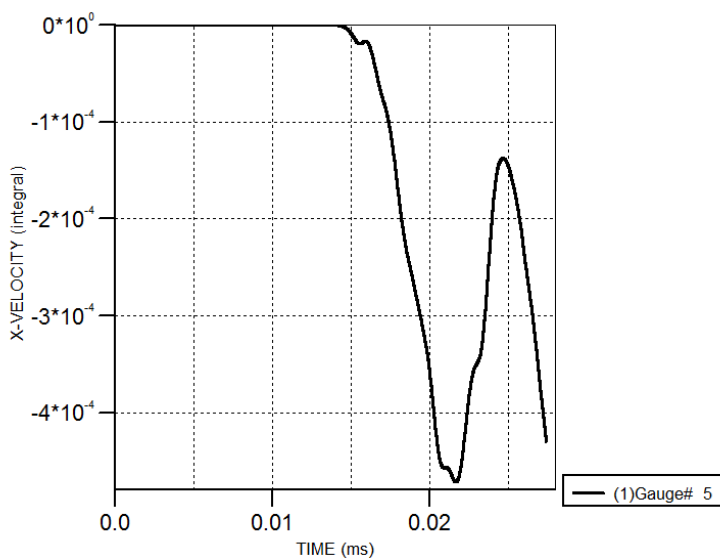
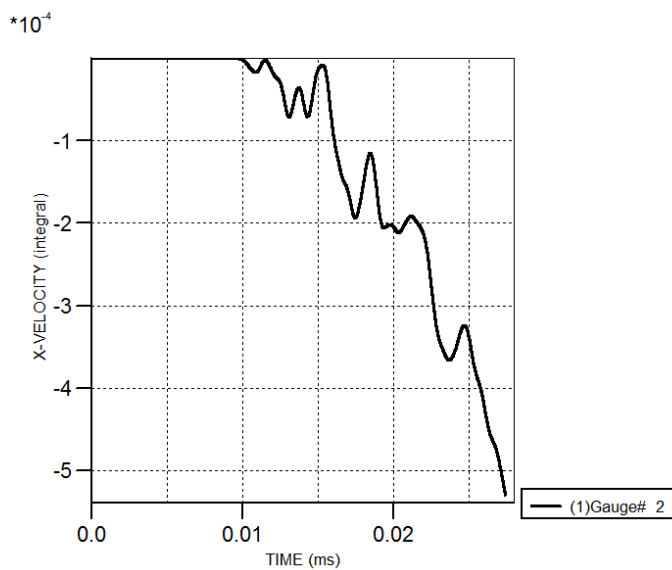


پ ۱۶۲: نمودار سرعت - زمان در مخزن فولادی (2000kg-20m)

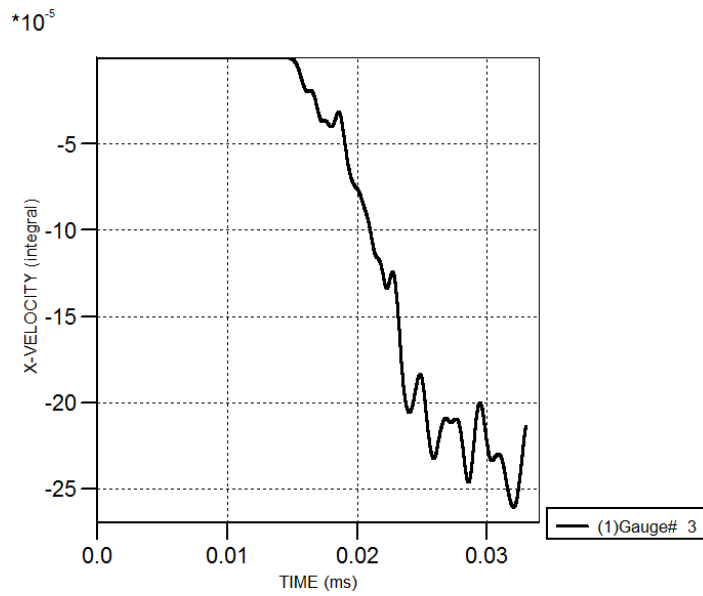
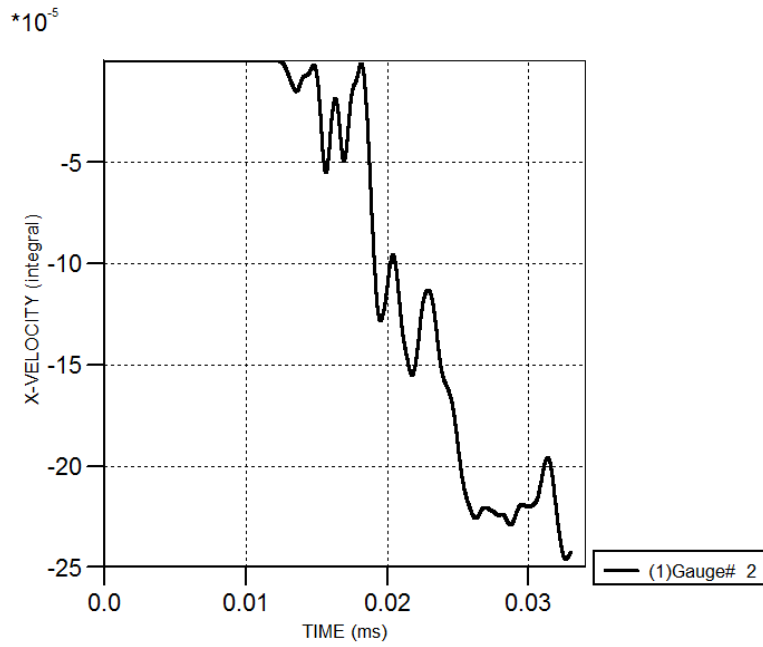
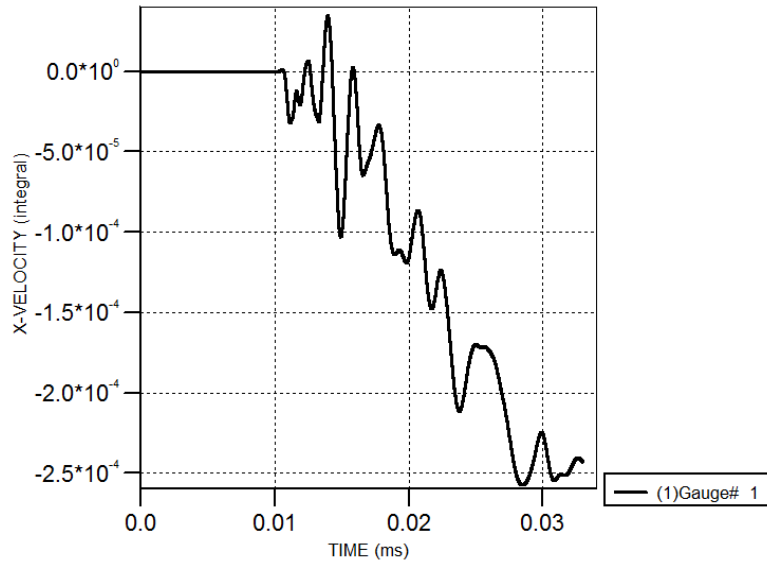


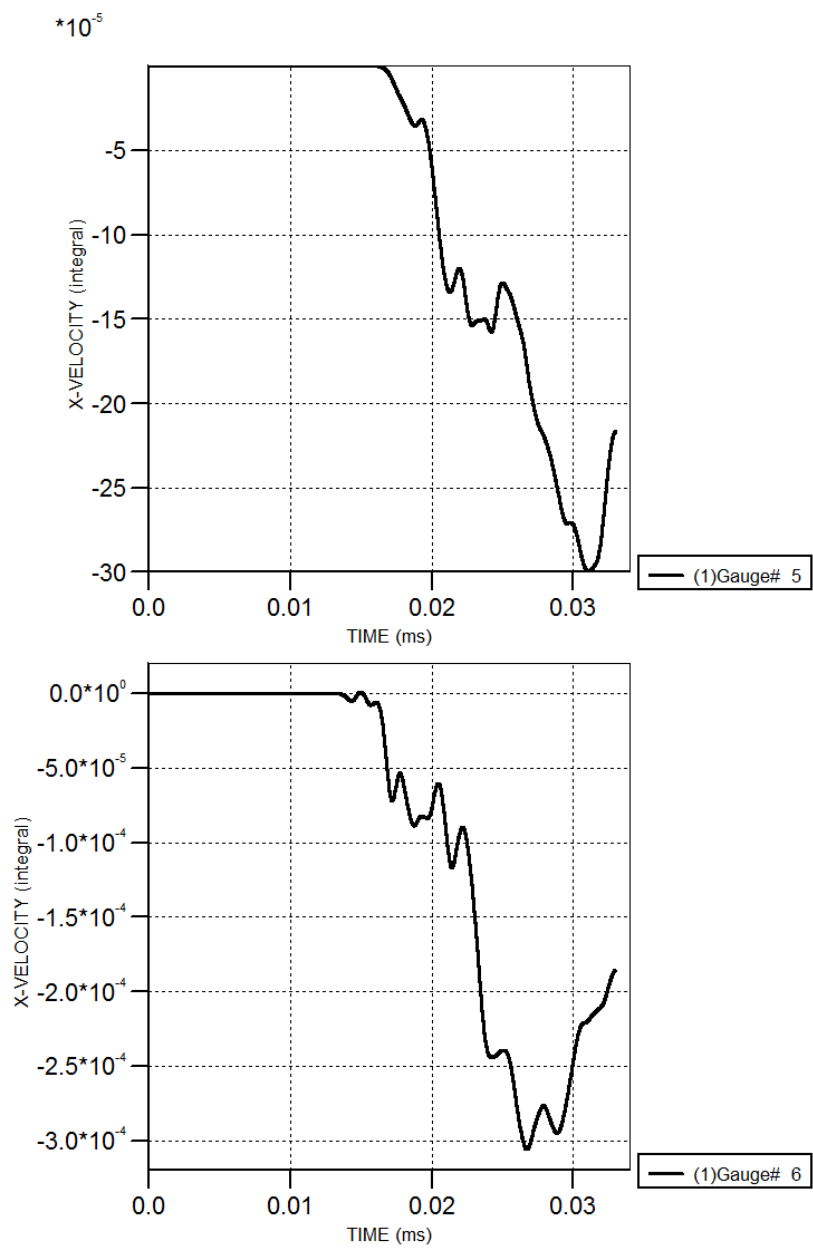
پیوست ۱۶۳: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (500kg -10m)



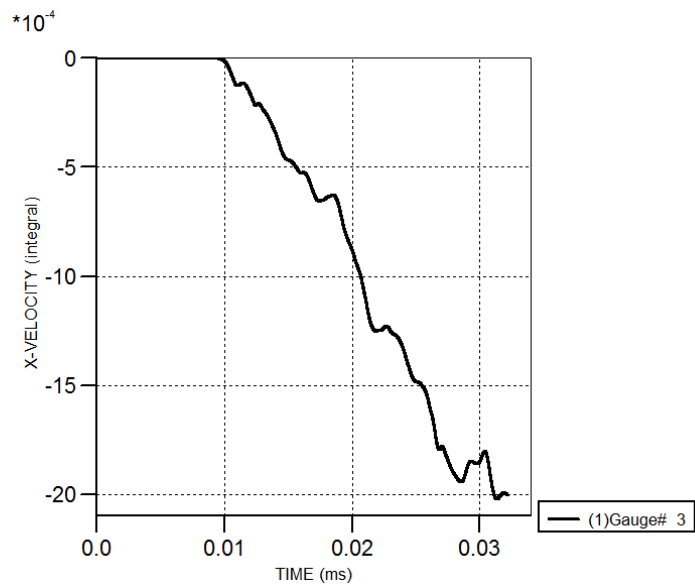
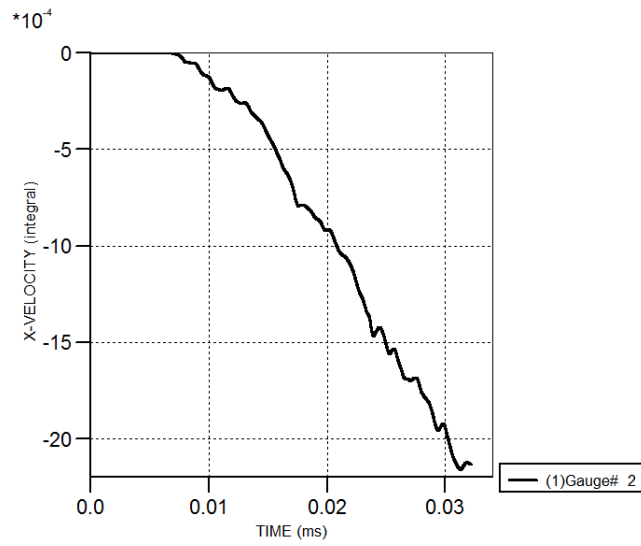
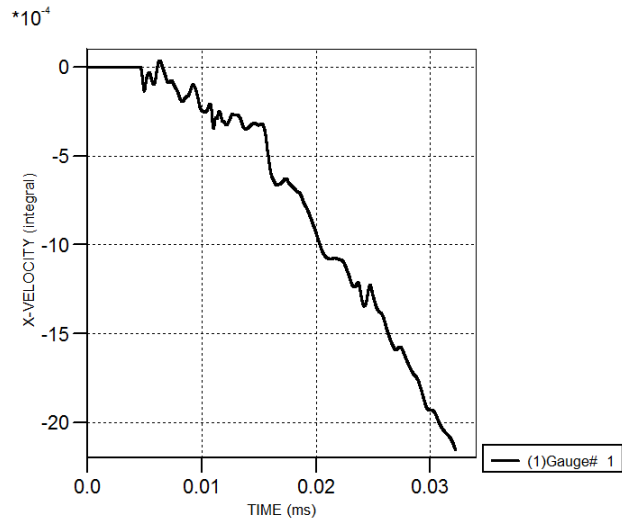


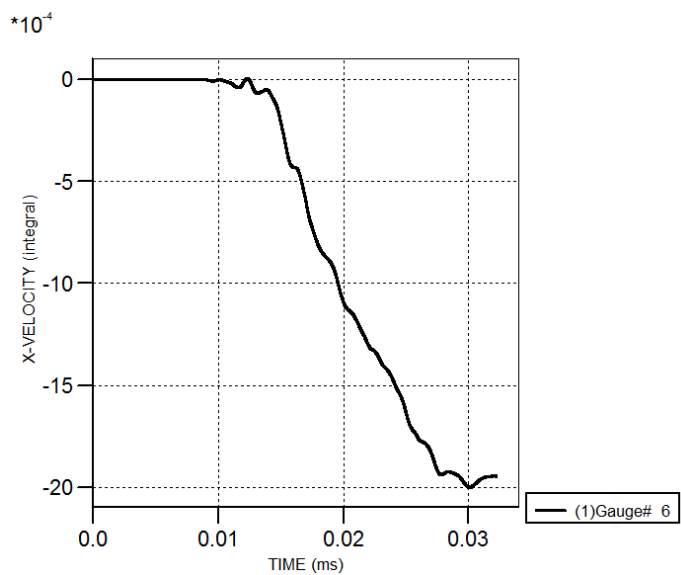
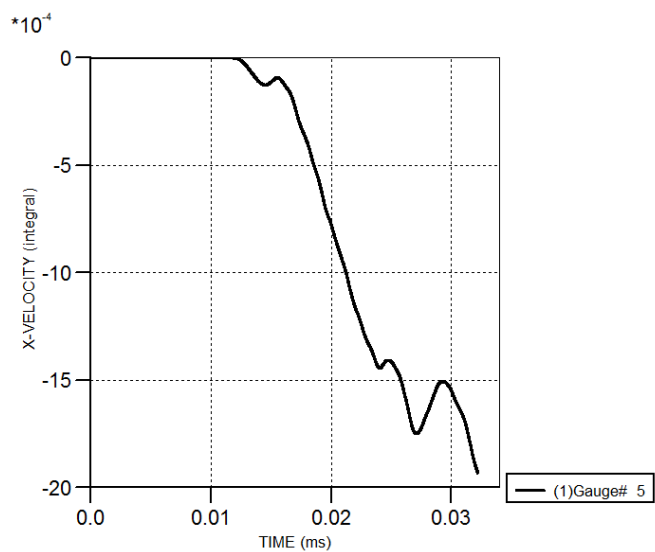
پیوست ۱۶۴: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (500kg -20m)



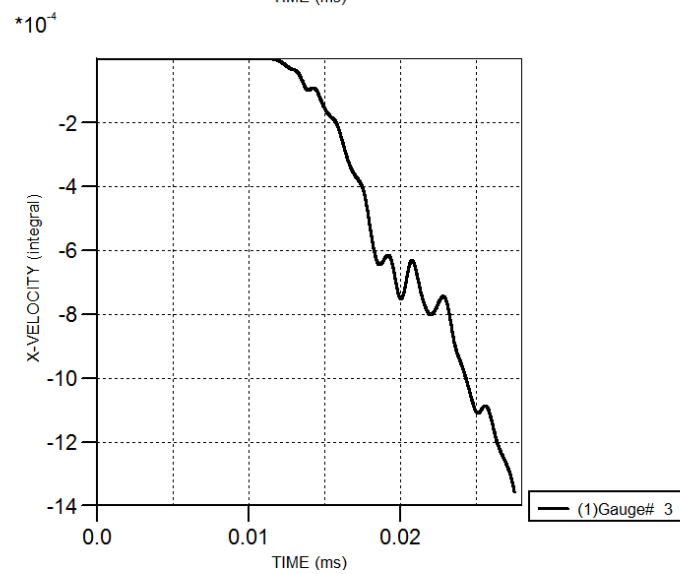
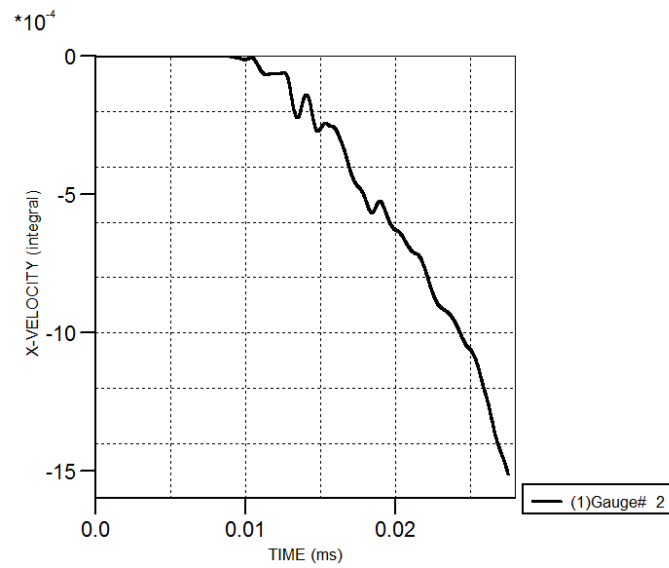
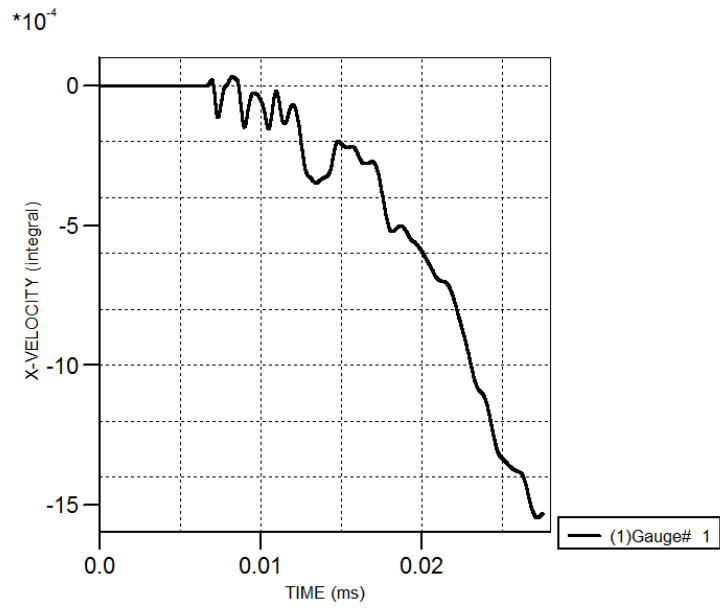


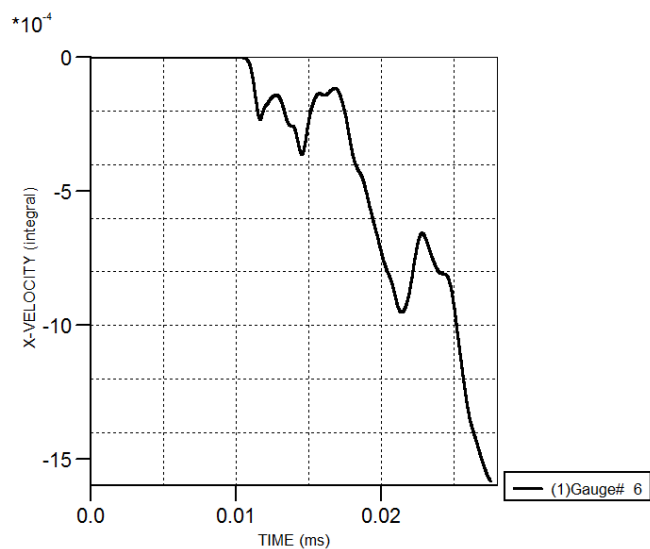
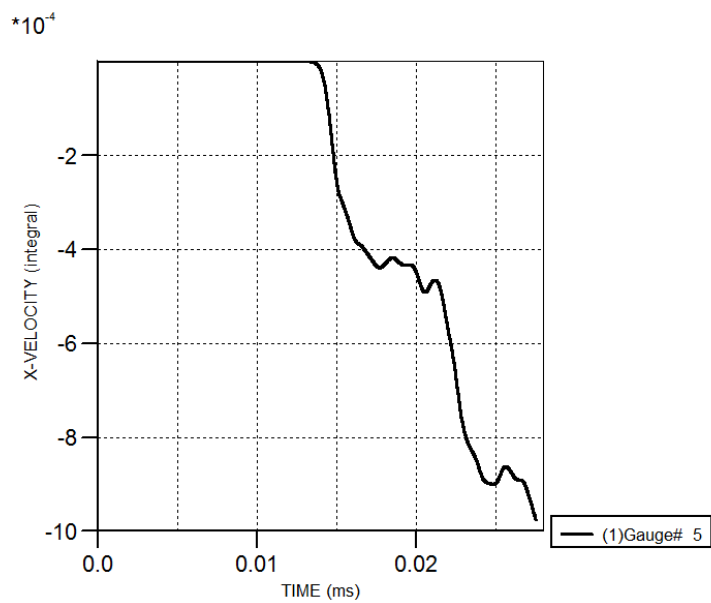
پیوست ۱۶۵: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (10m -1000kg)



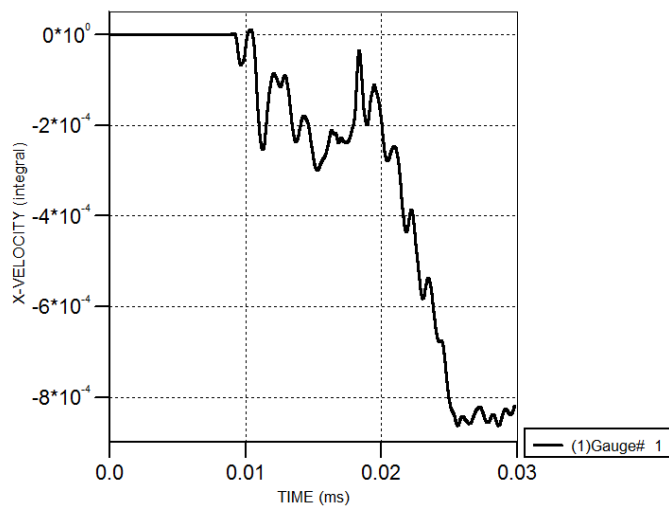


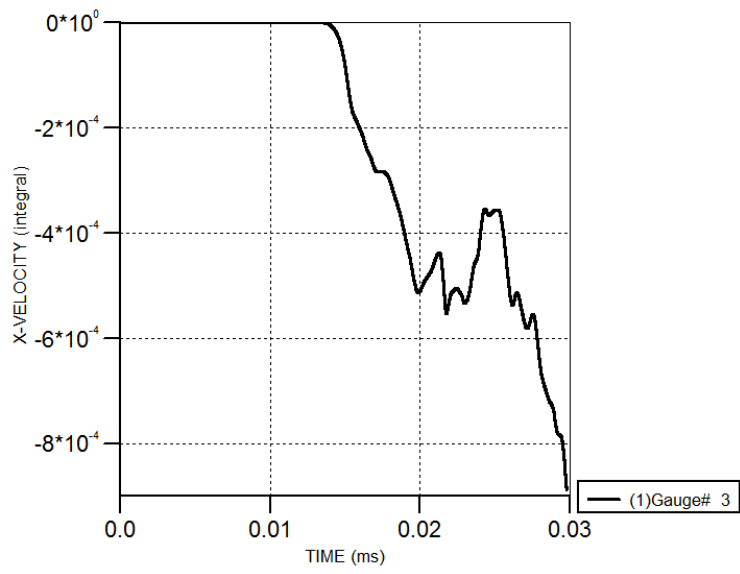
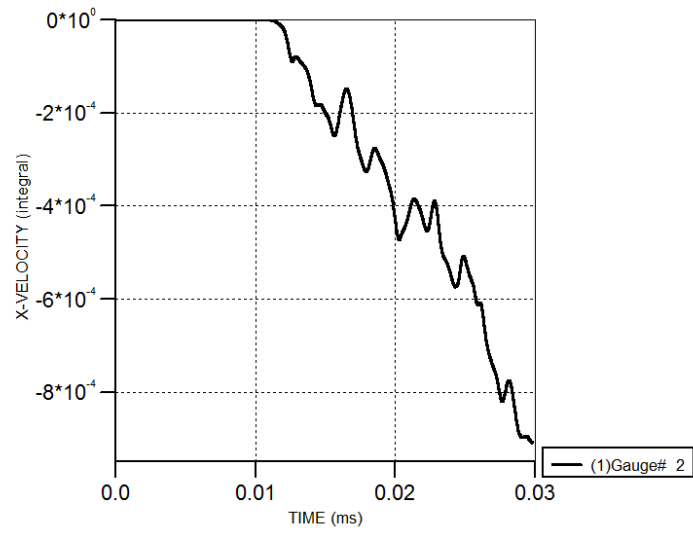
پیوست ۱۶۶: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (1000kg -15m)

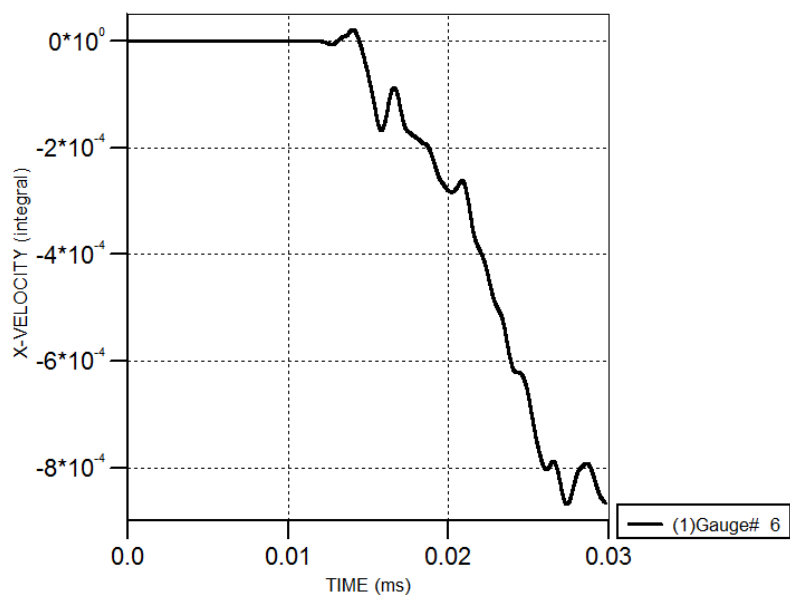
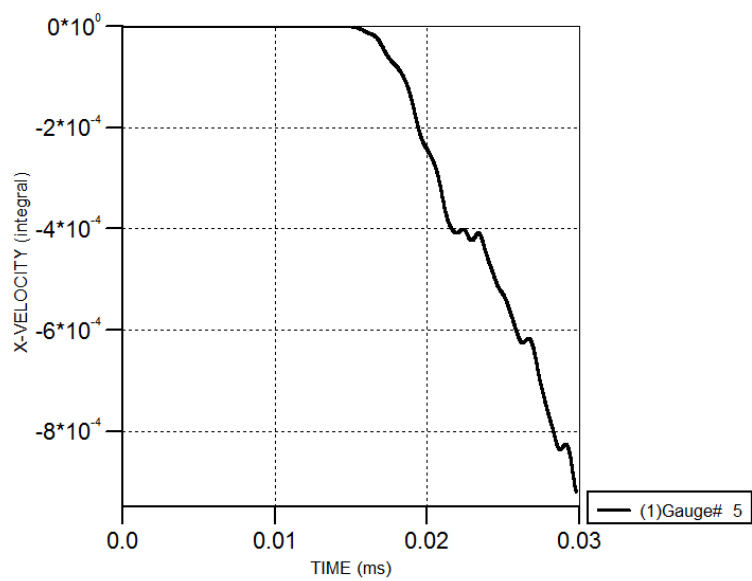




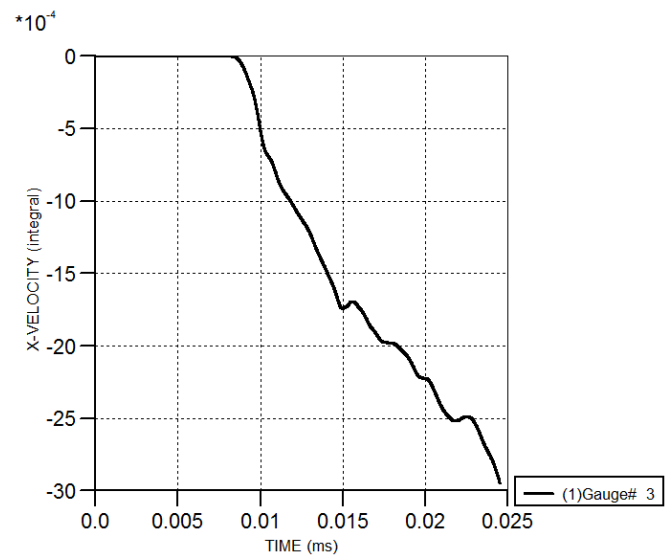
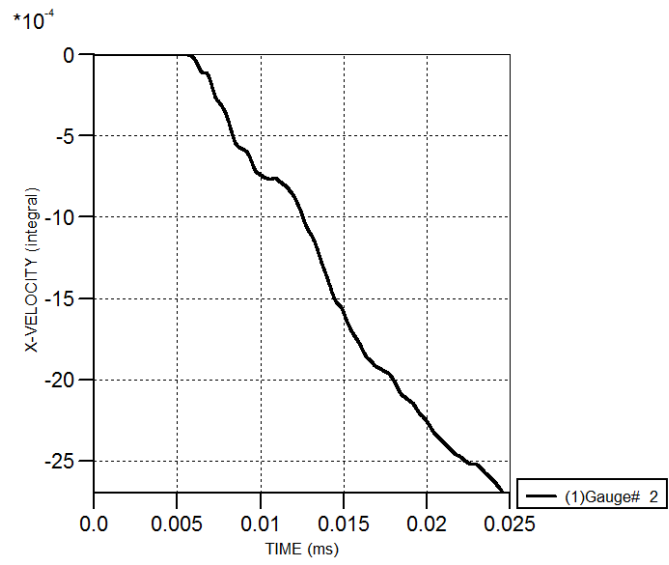
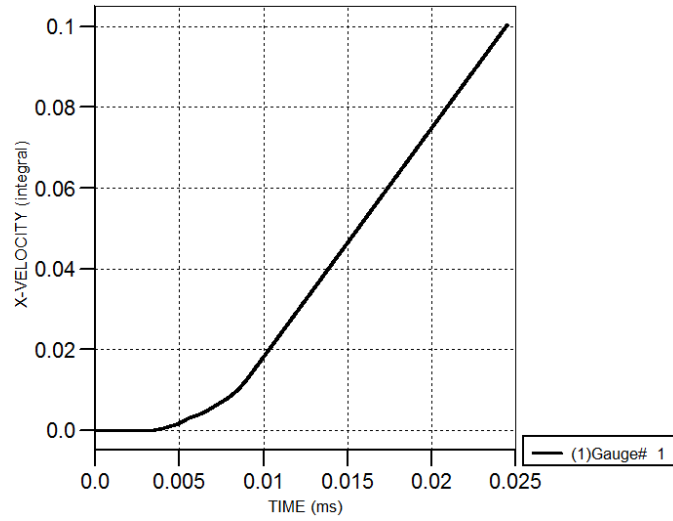
پیوست ۱۶۷: نمودارهای جابجایی - زمان در مخازن بتنی (1000kg -20m)

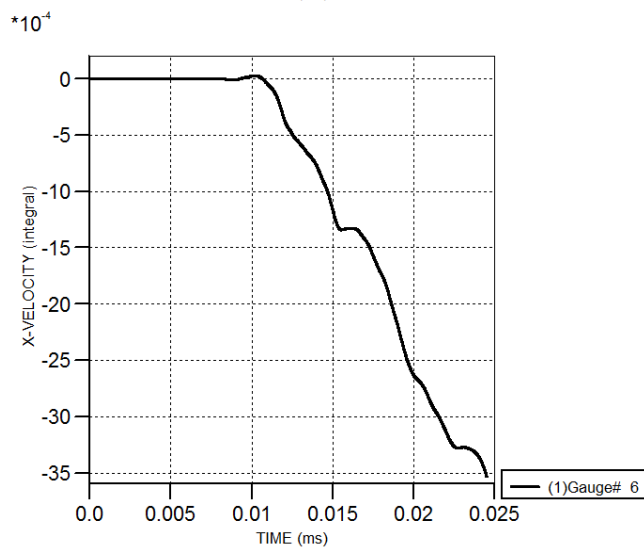
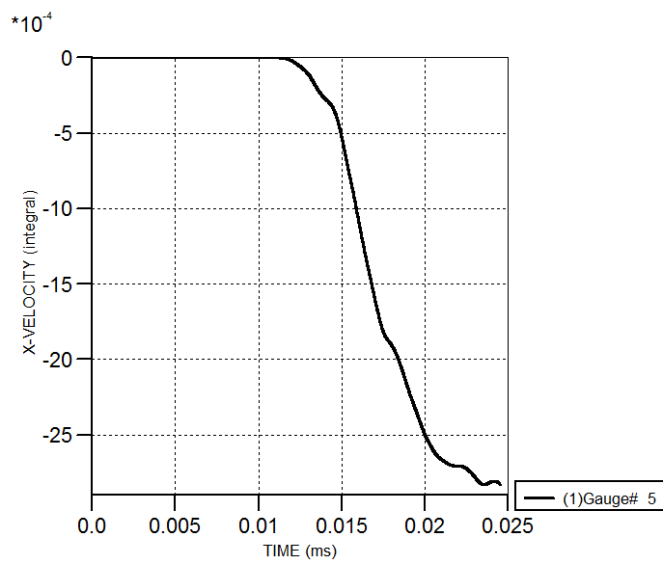




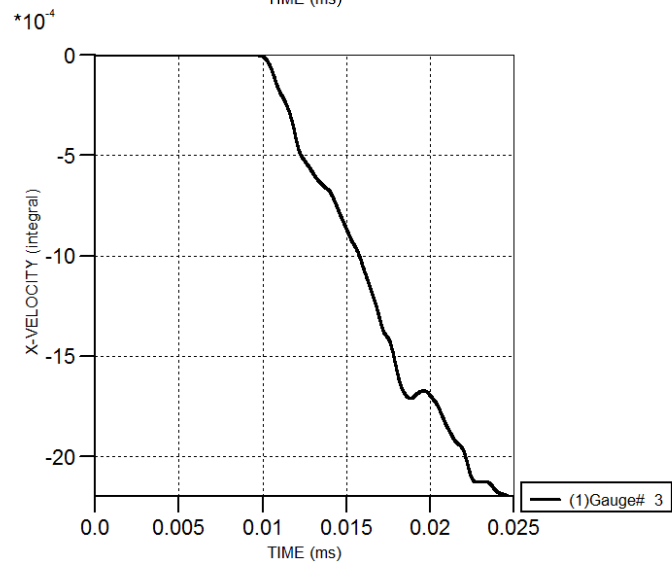
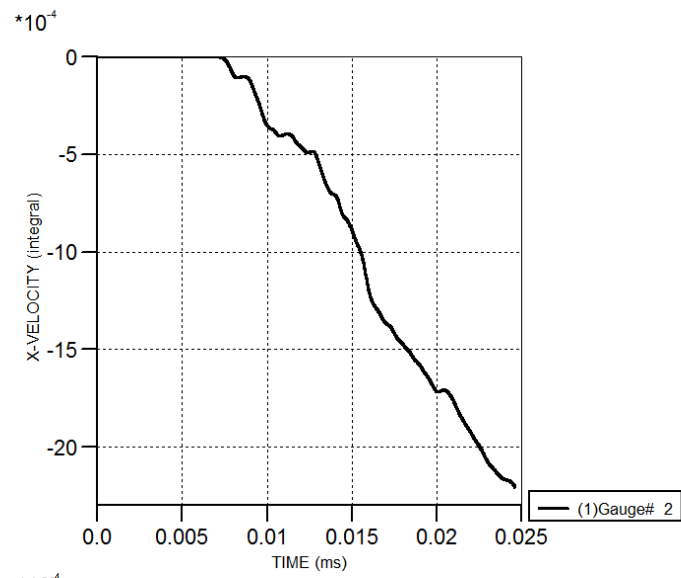
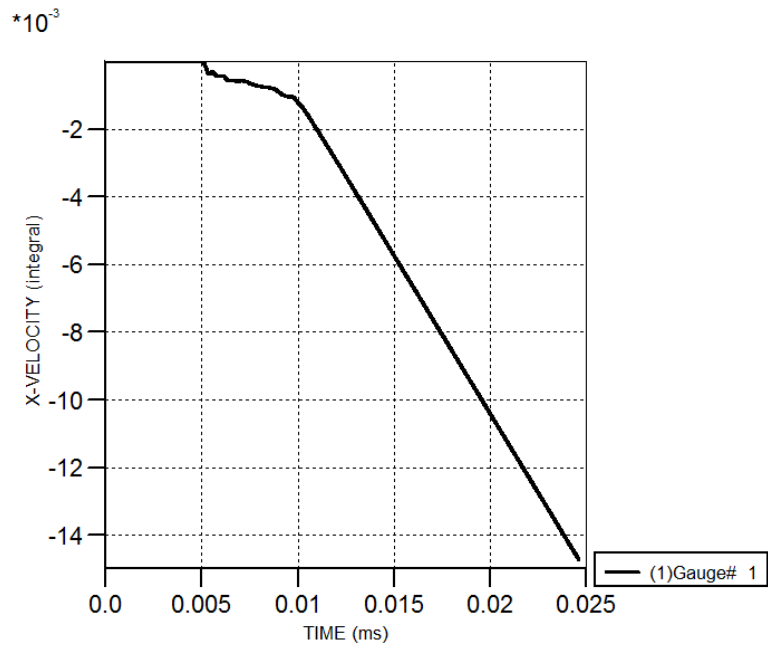


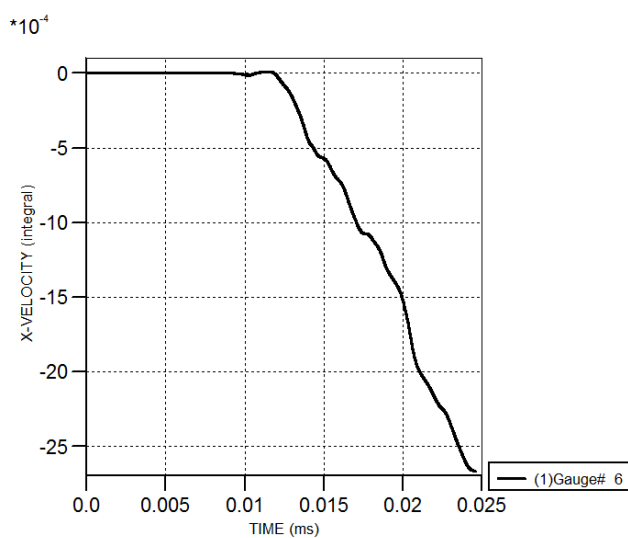
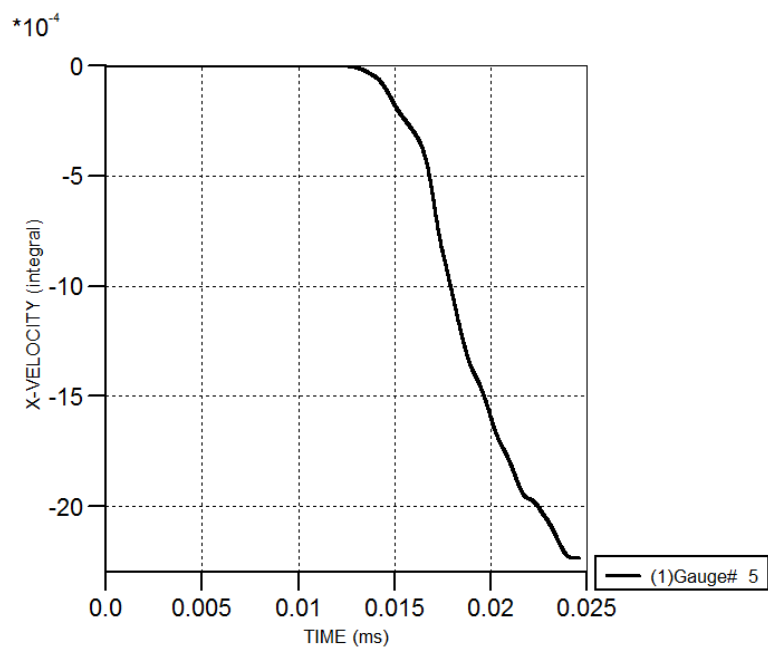
پیوست ۱۶۸: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (2000kg -10m)



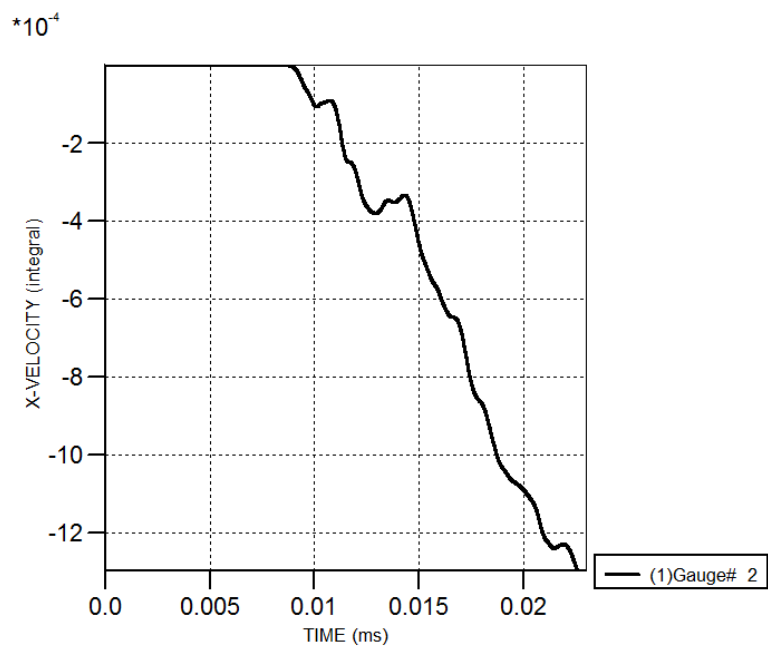
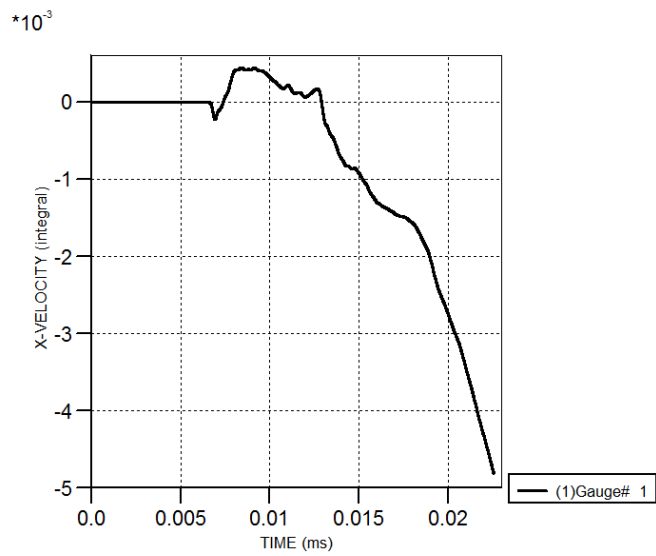


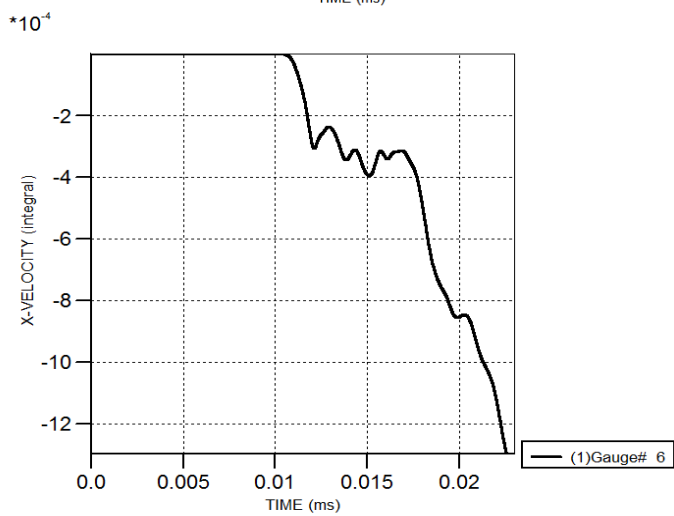
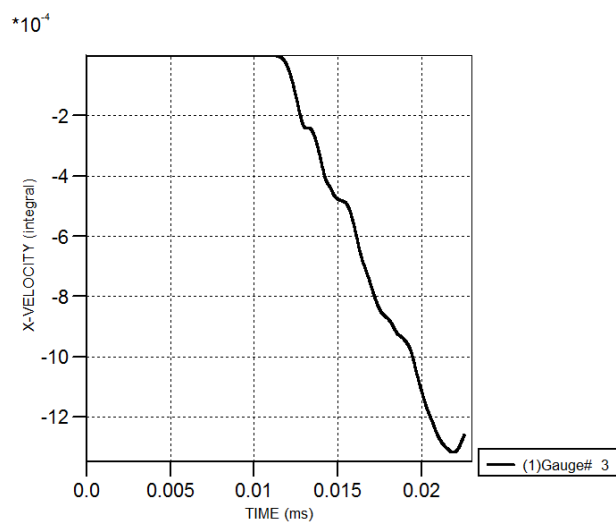
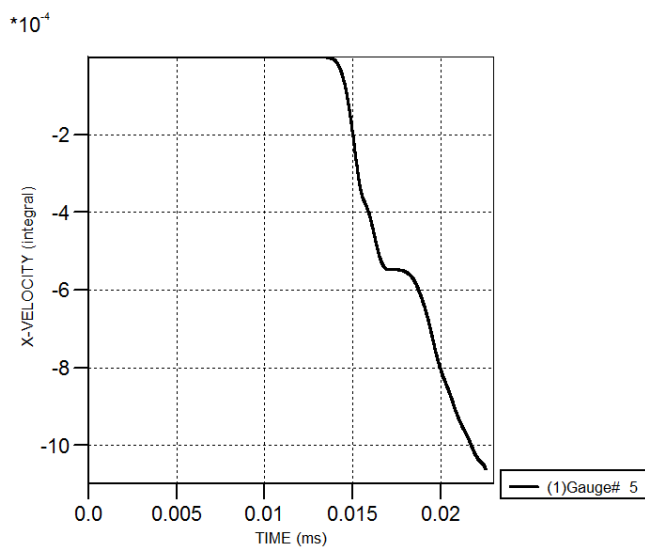
پیوست ۱۶۹: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (2000kg -15m)



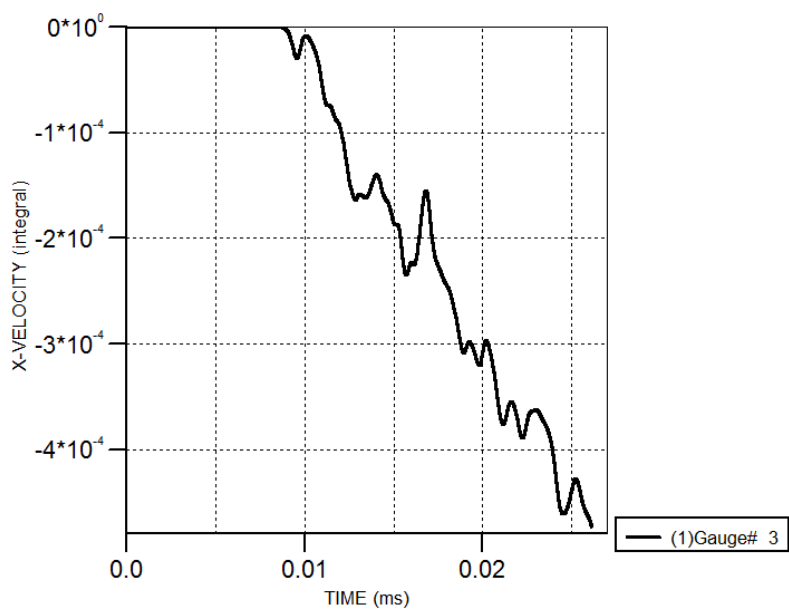
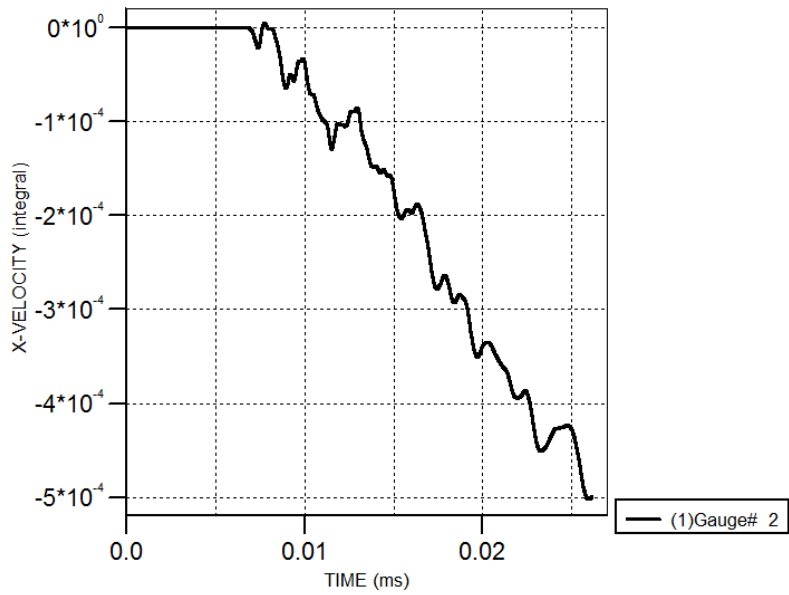
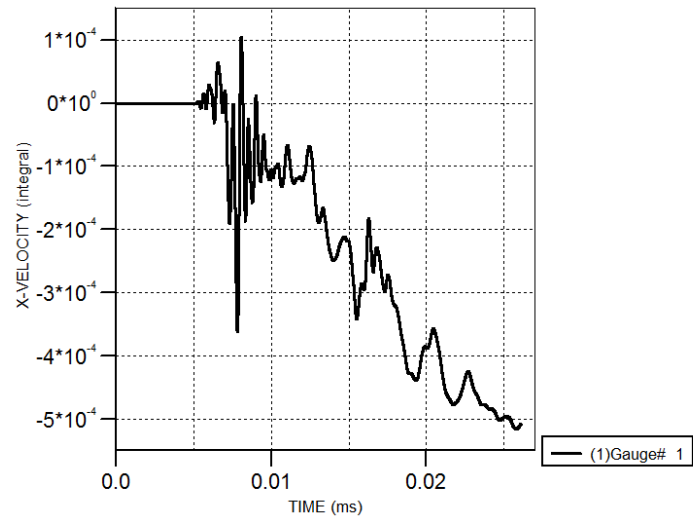


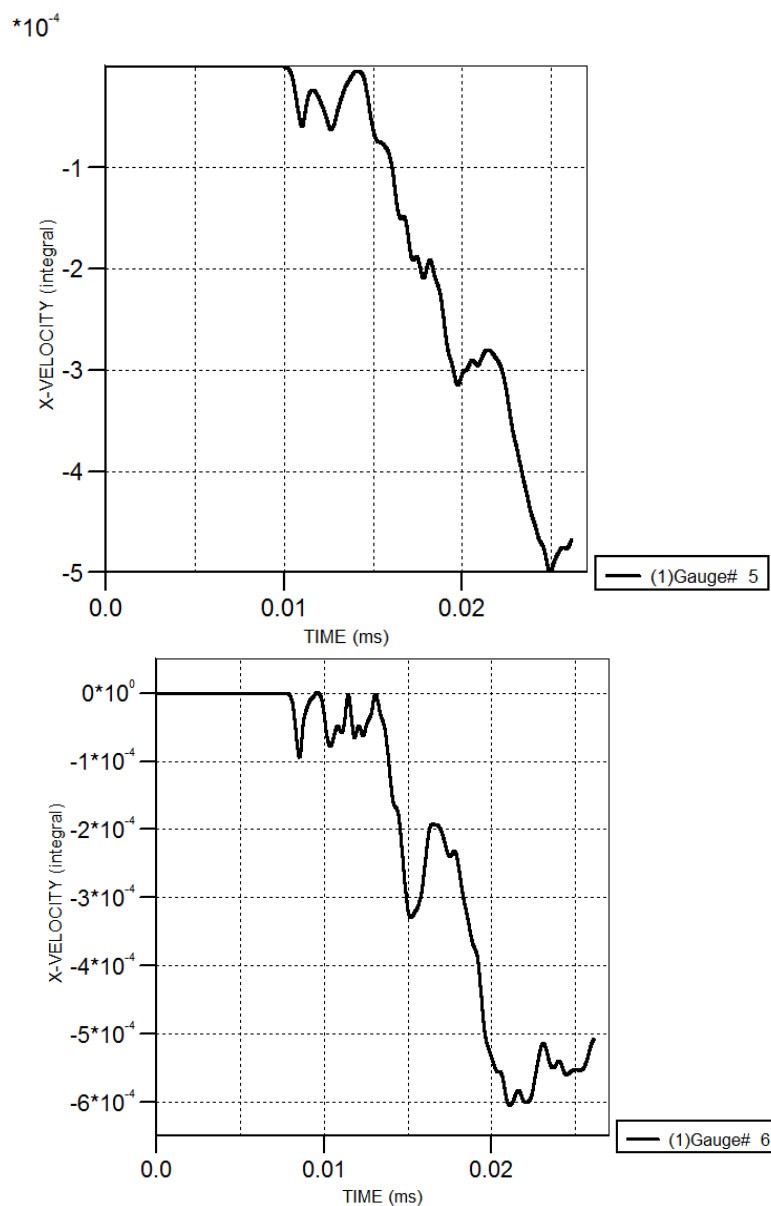
پیوست ۱۷۰: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن بتنی (20m -2000kg)



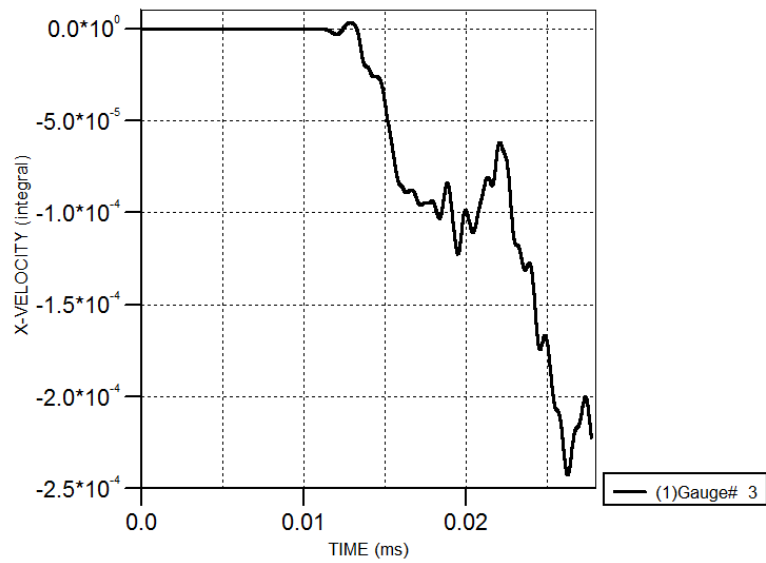
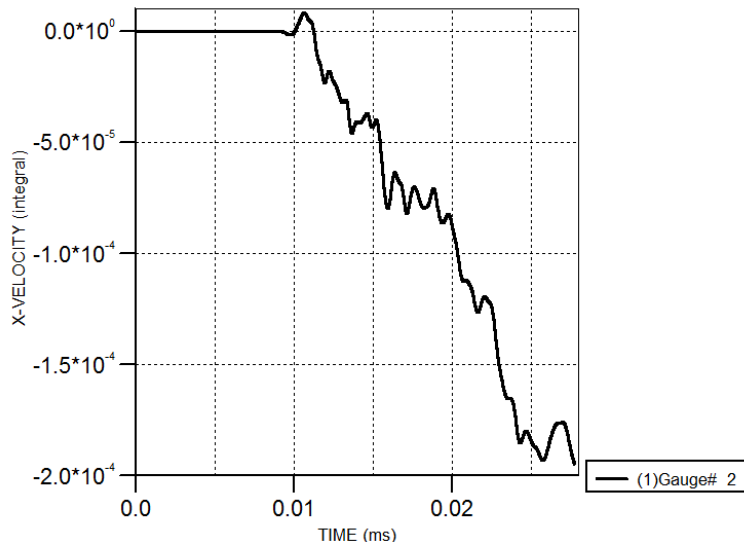
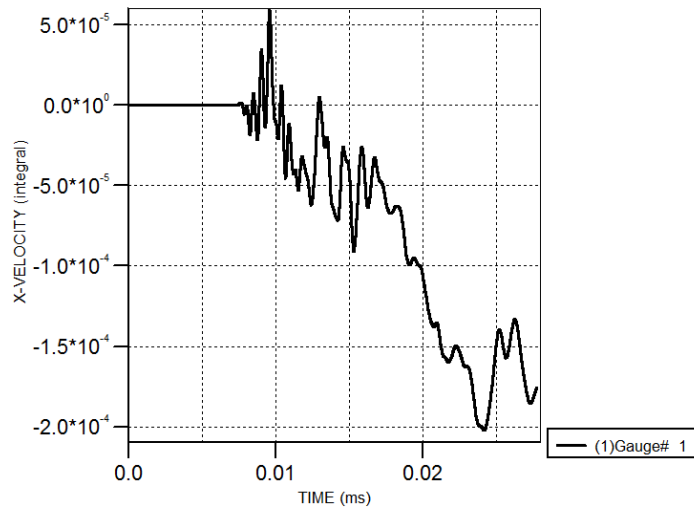


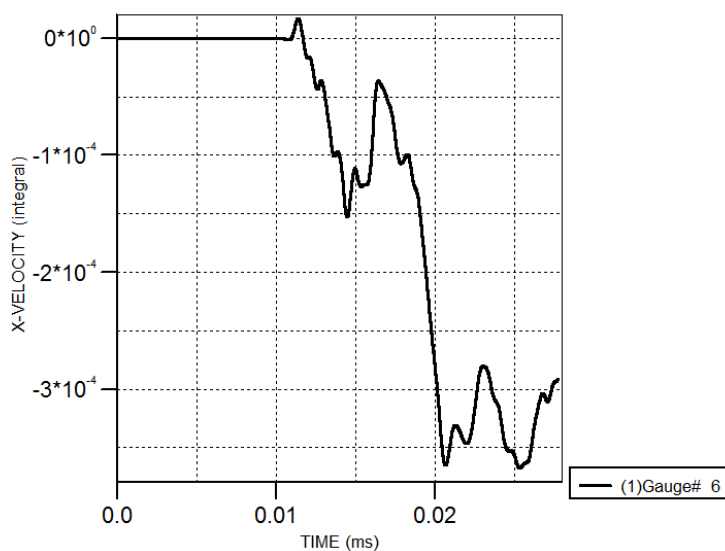
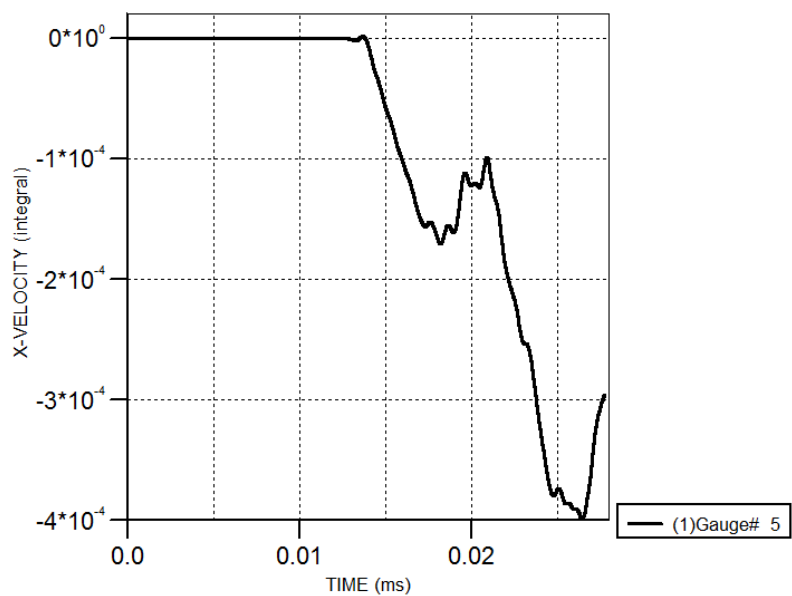
پیوست ۱۷۱: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (500kg -10m)



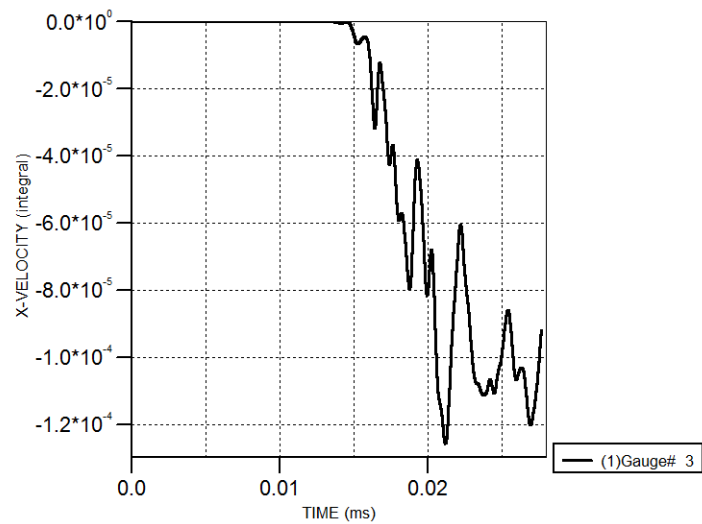
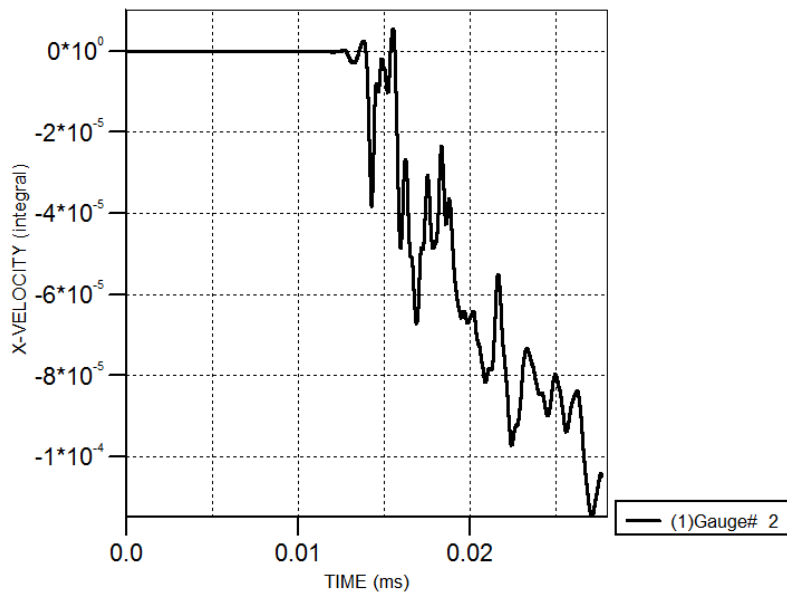
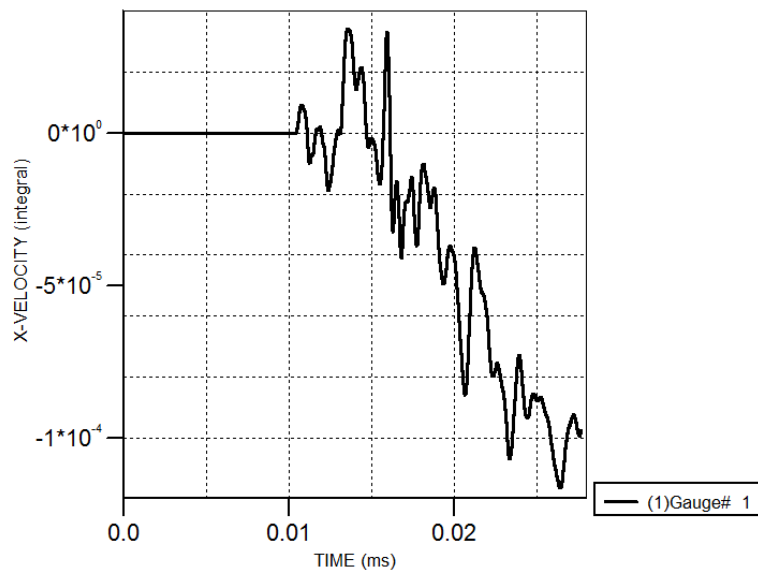


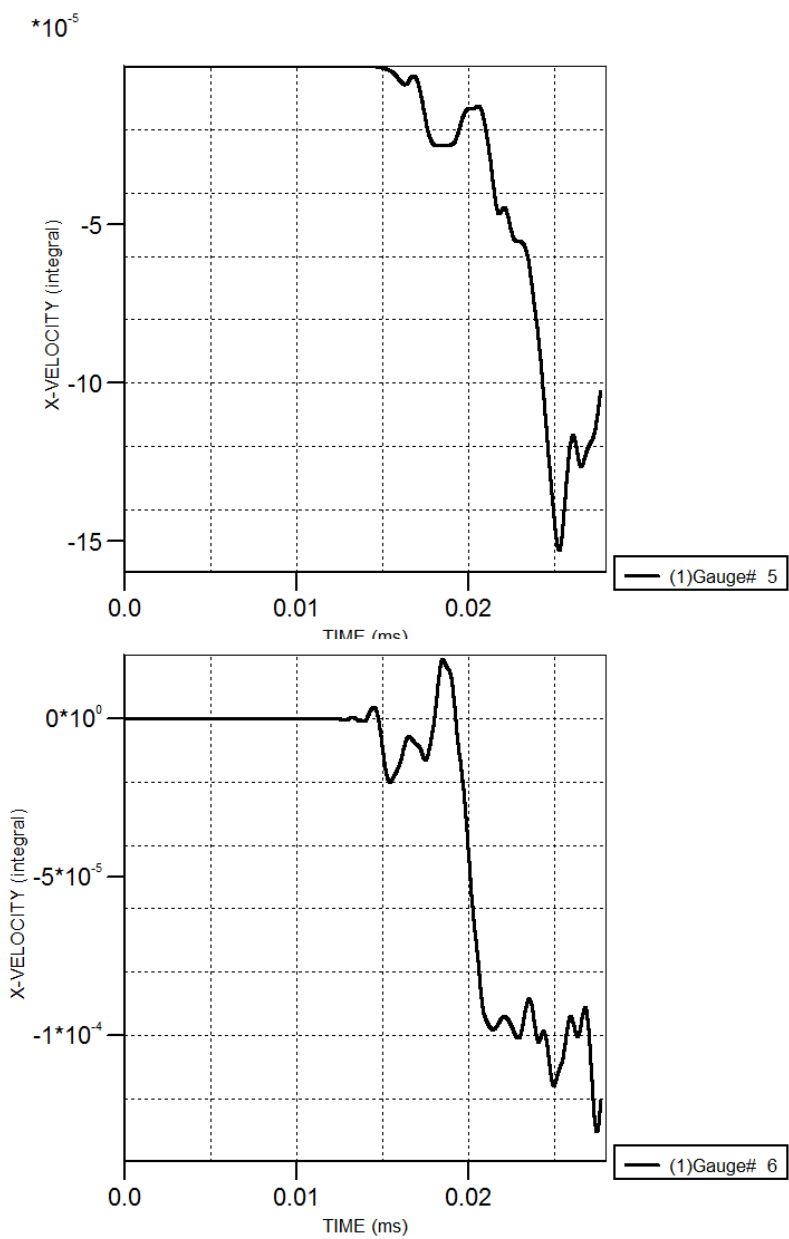
پیوست ۱۷۲: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (500kg -15m)



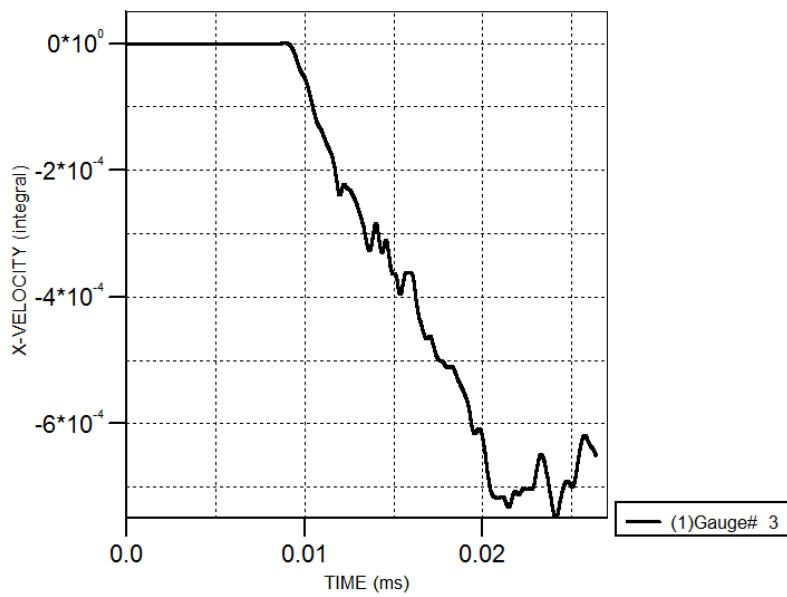
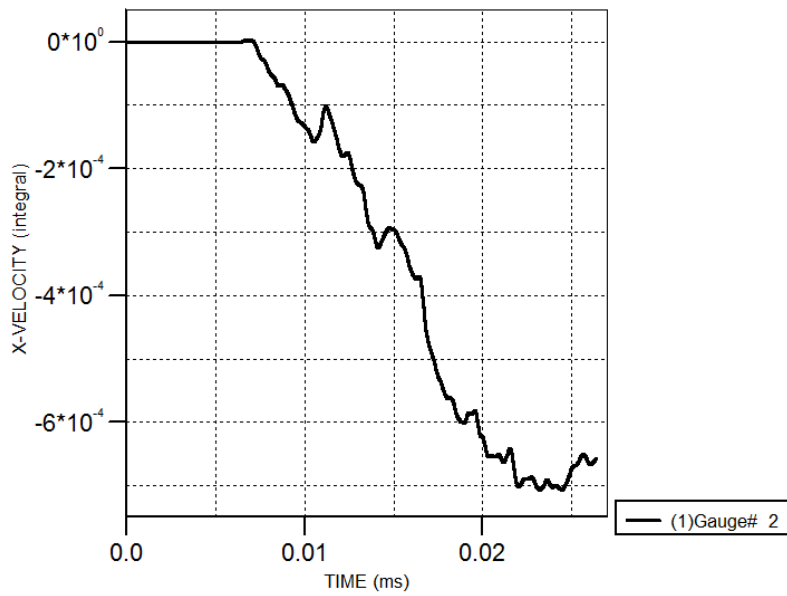
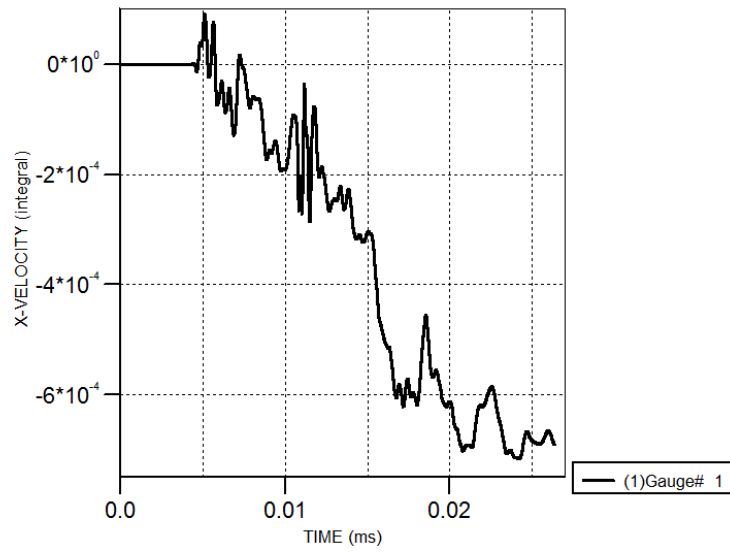


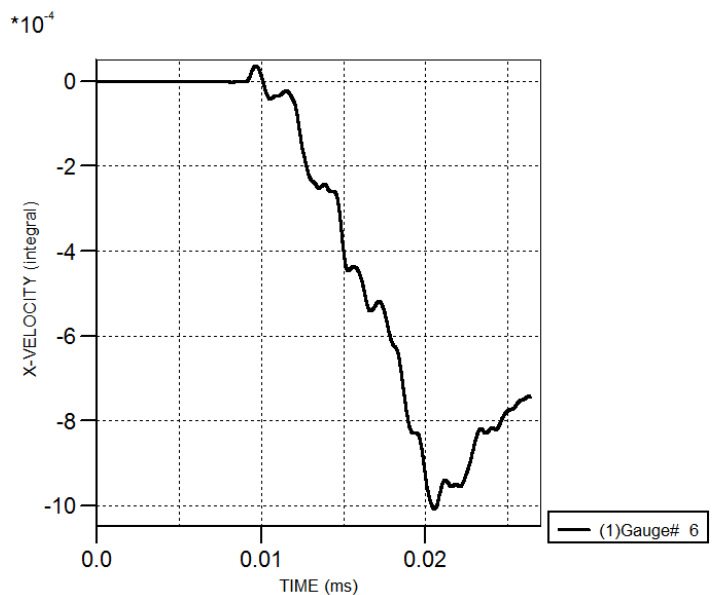
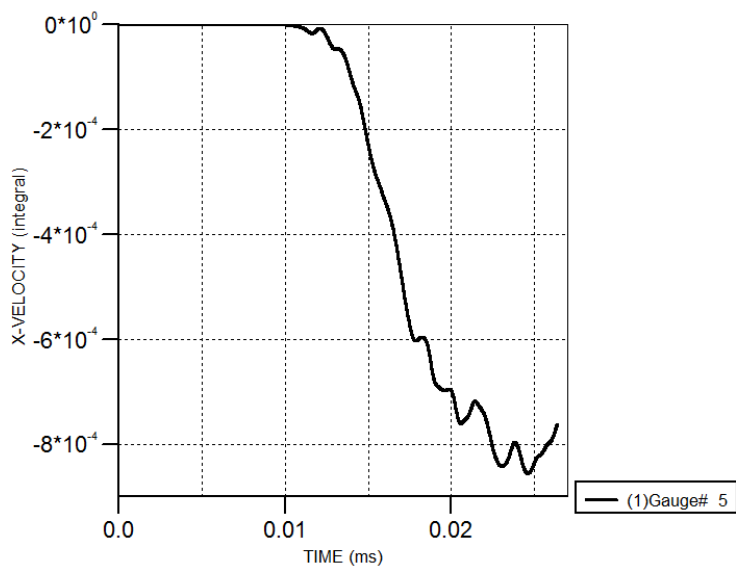
پیوست ۱۷۳: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (500kg -20m)



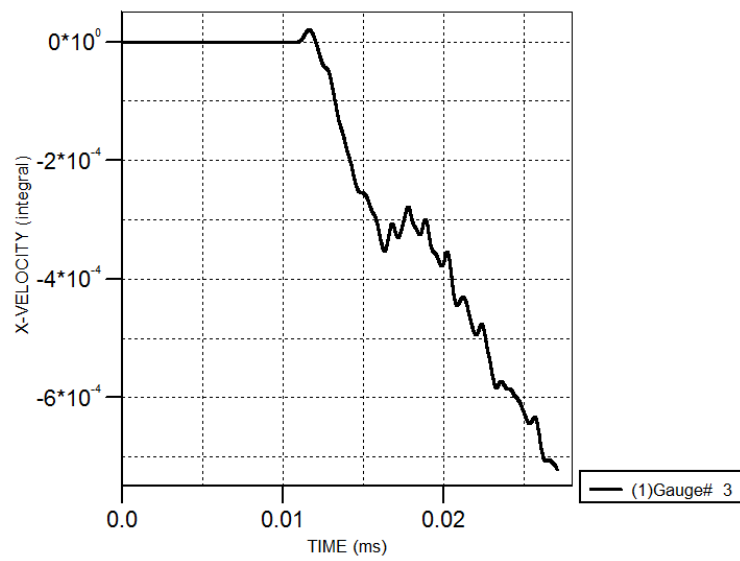
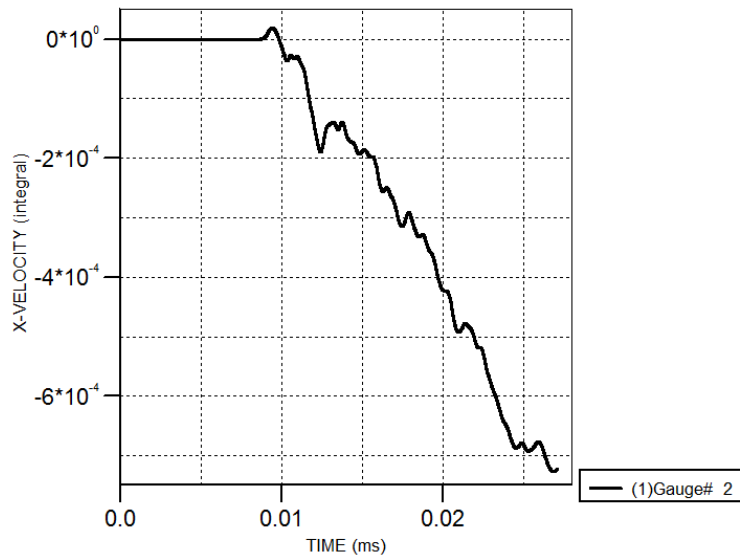
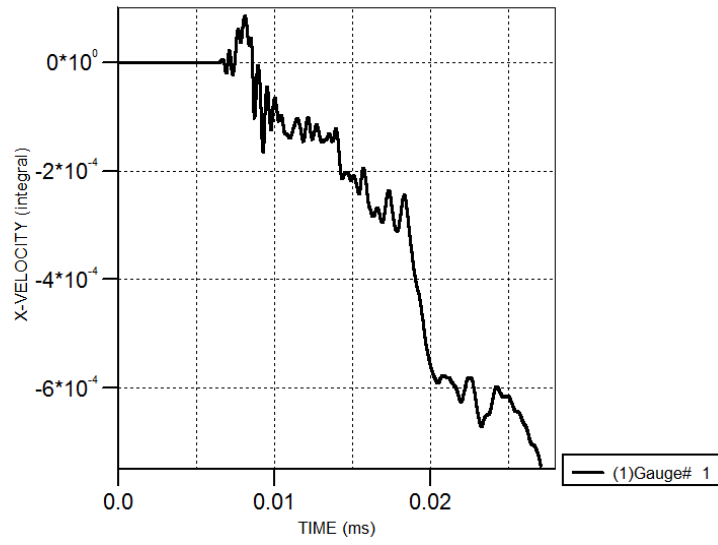


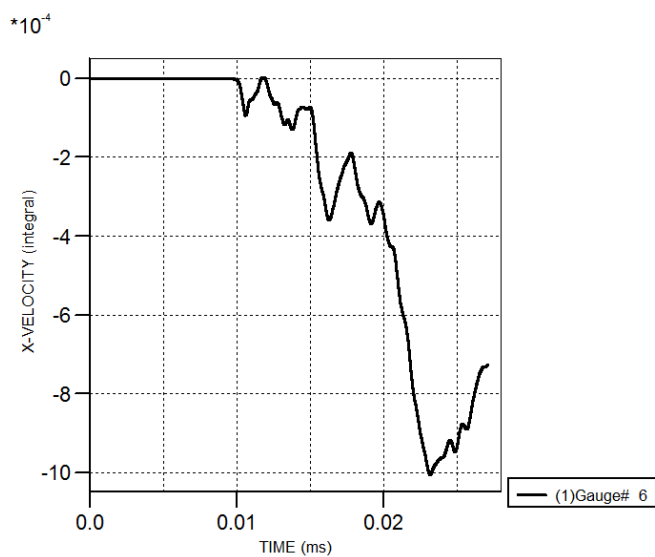
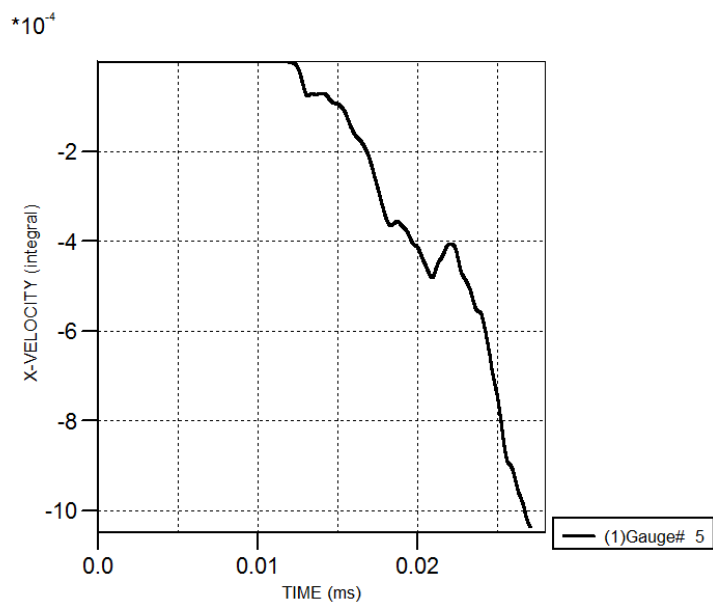
پیوست ۱۷۴: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (1000kg -10m)



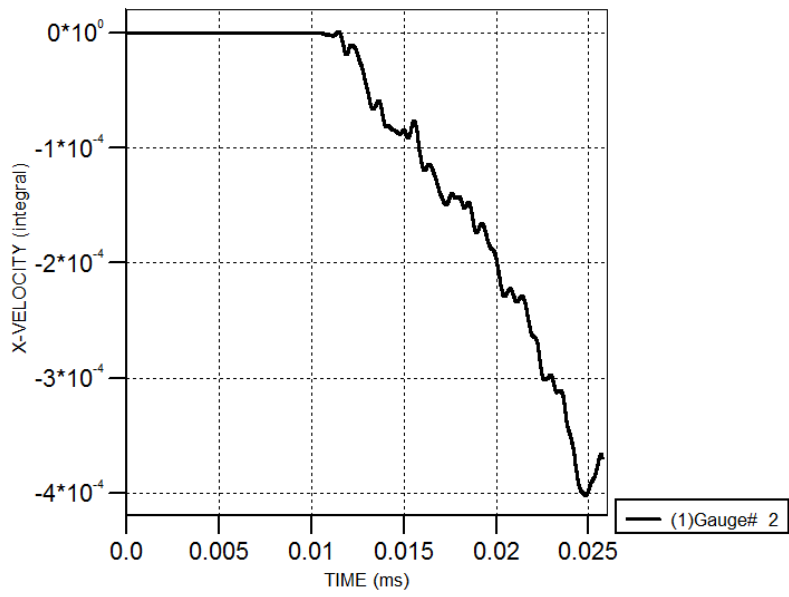
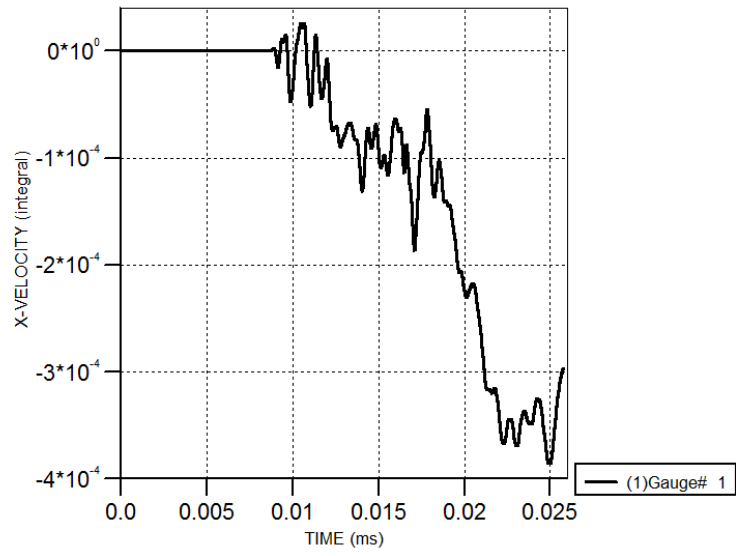


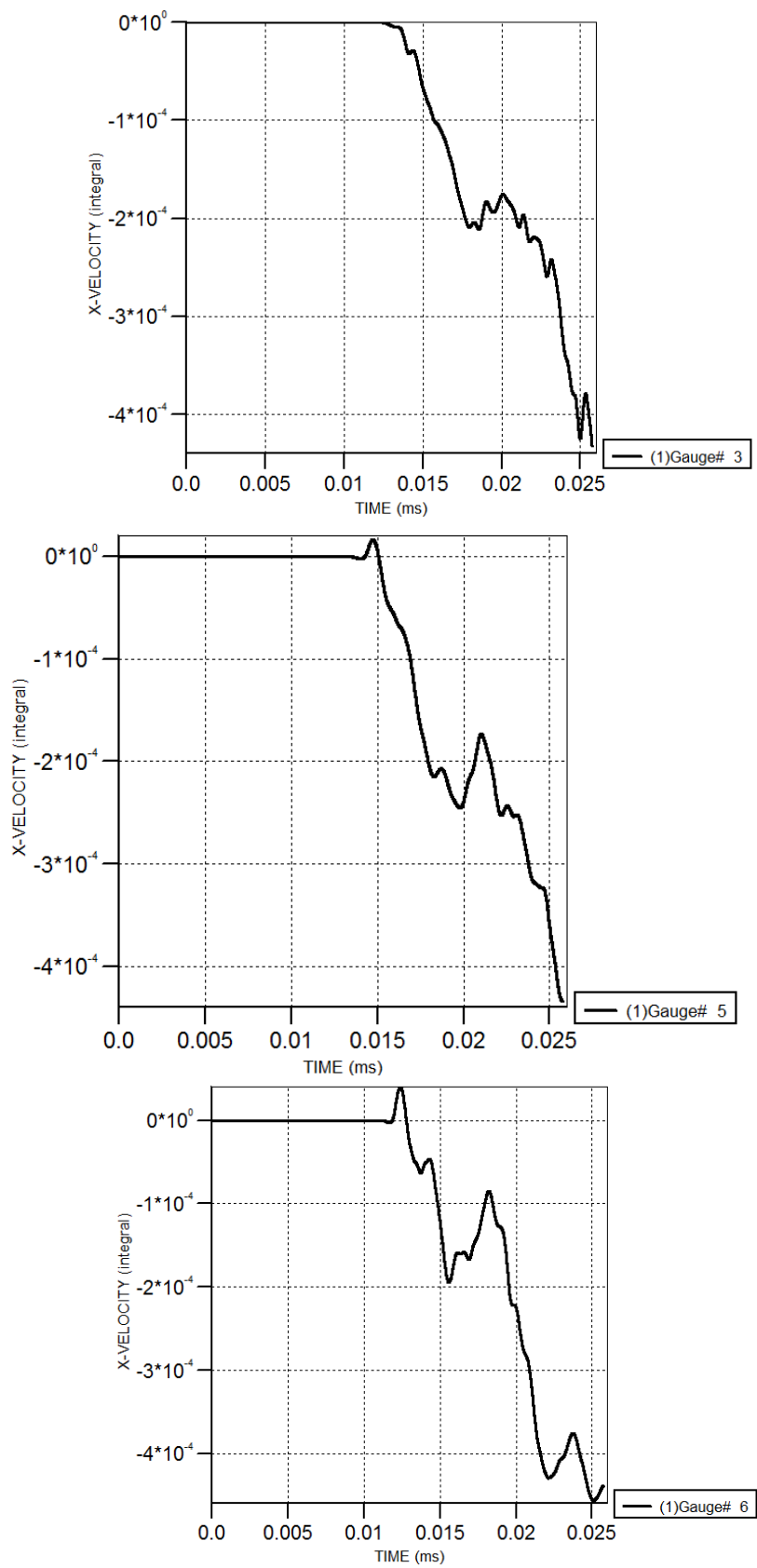
پیوست ۱۷۵: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (1000kg -15m)



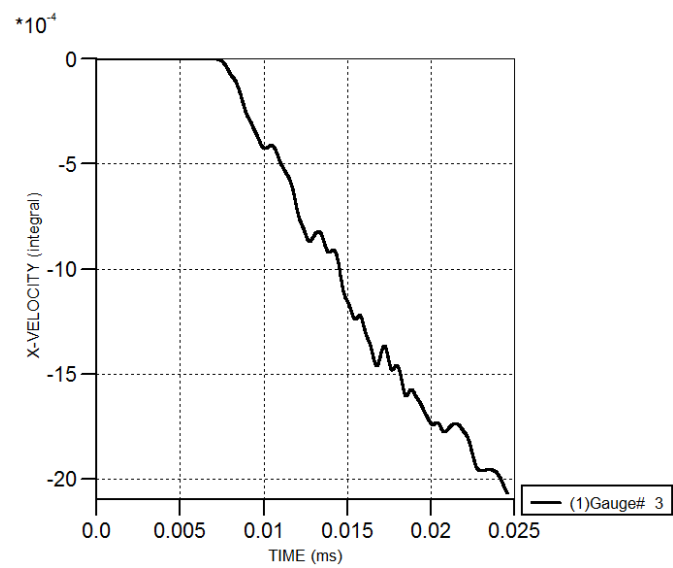
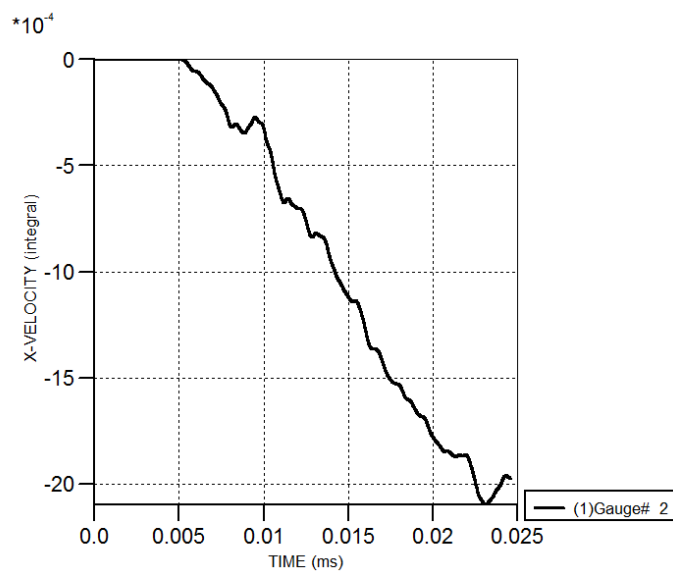
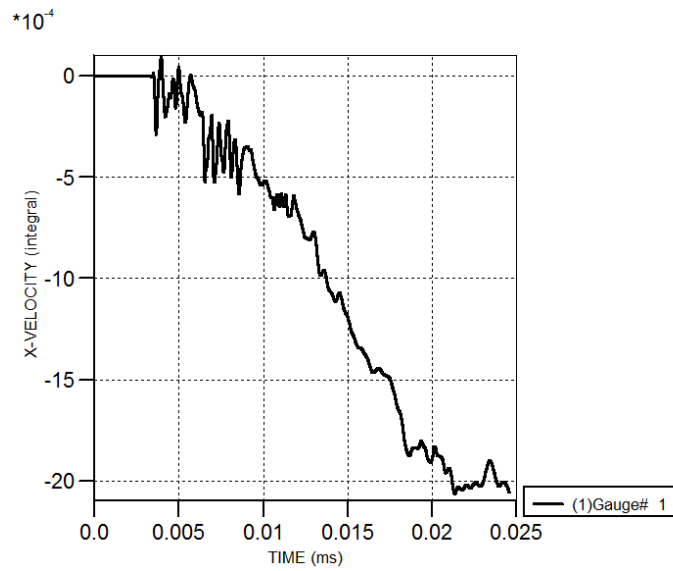


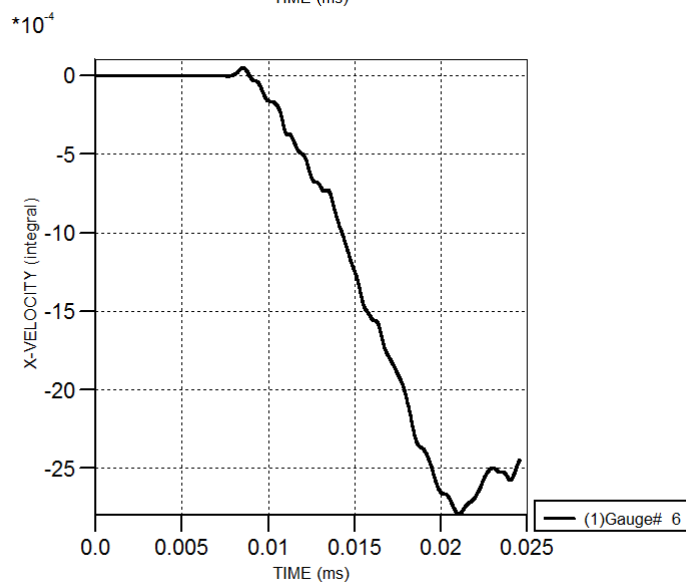
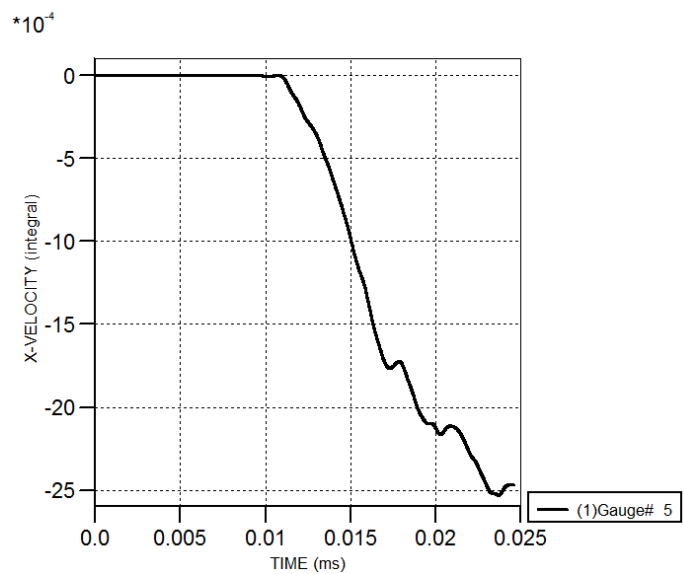
پیوست ۱۷۶: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (1000kg -20m)



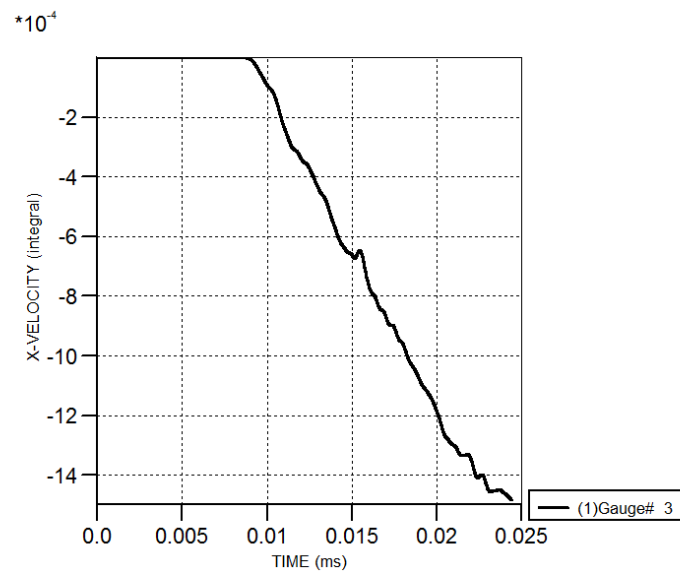
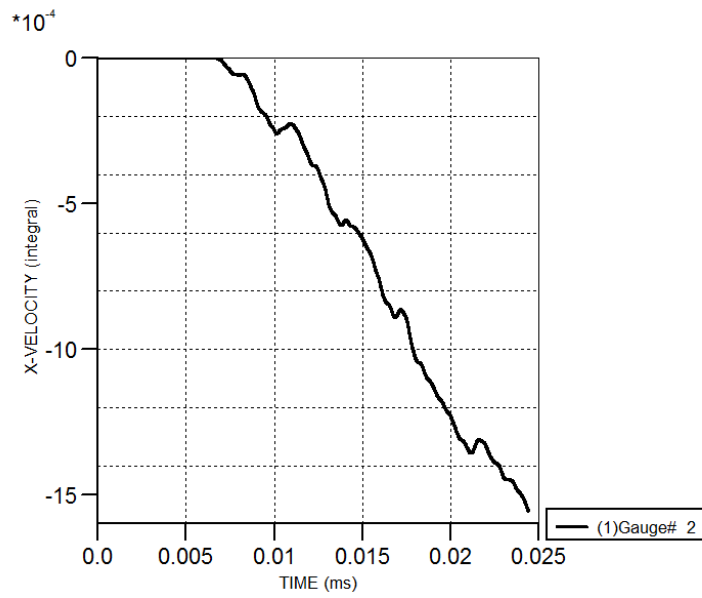
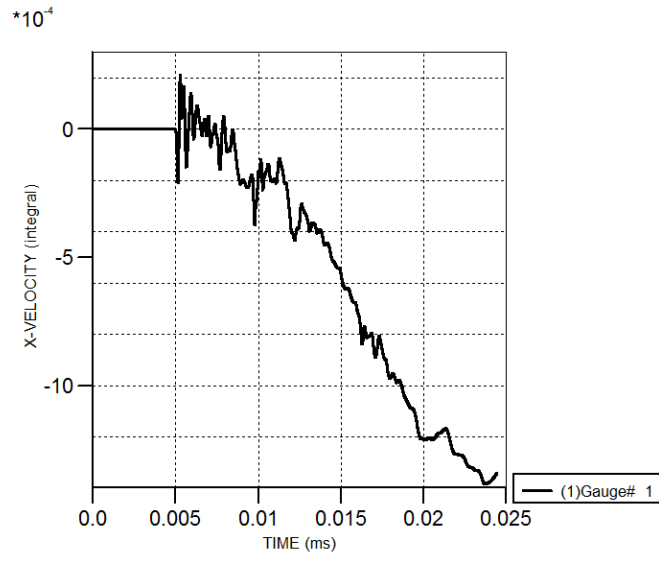


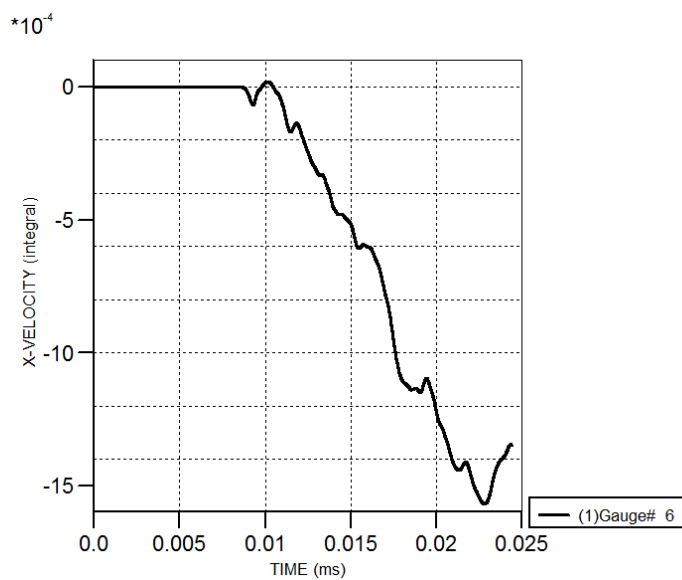
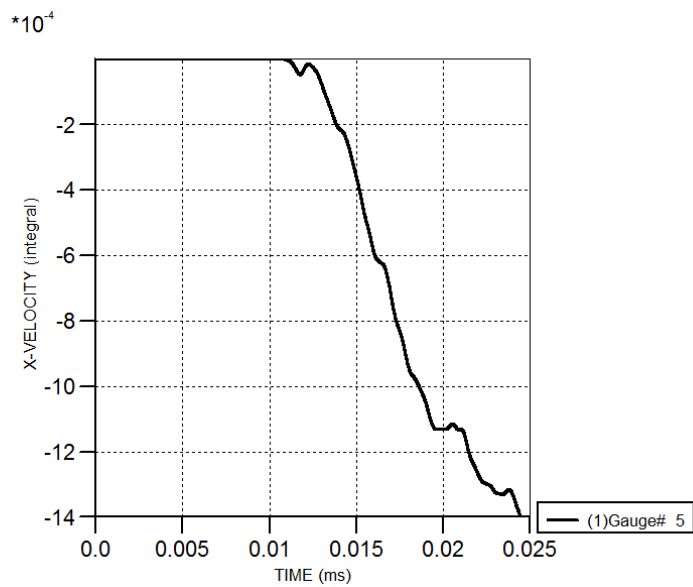
پیوست ۱۷۷: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (2000kg -10m)



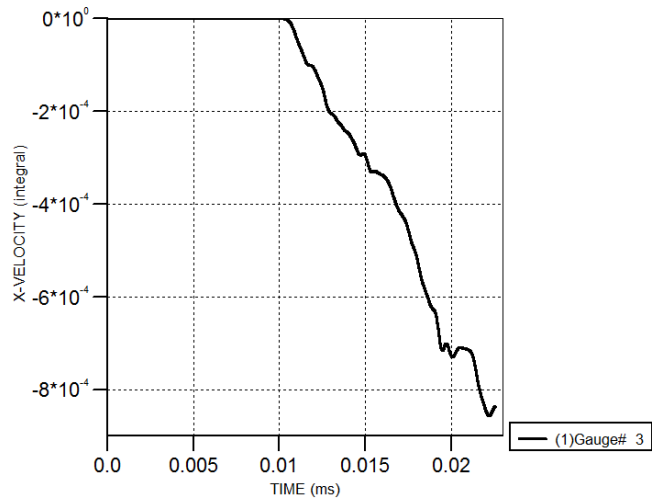
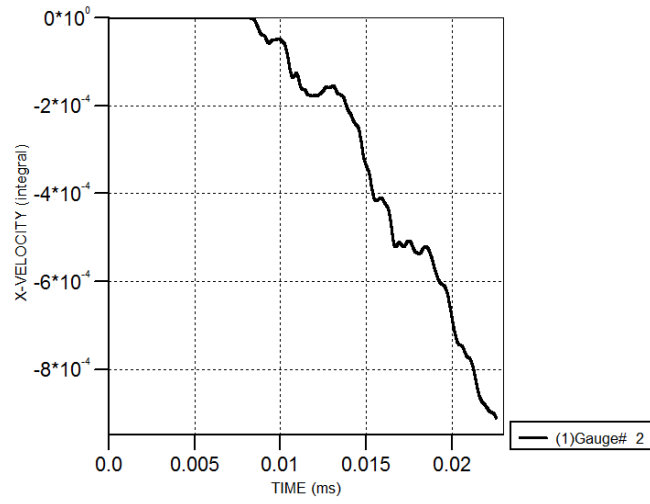
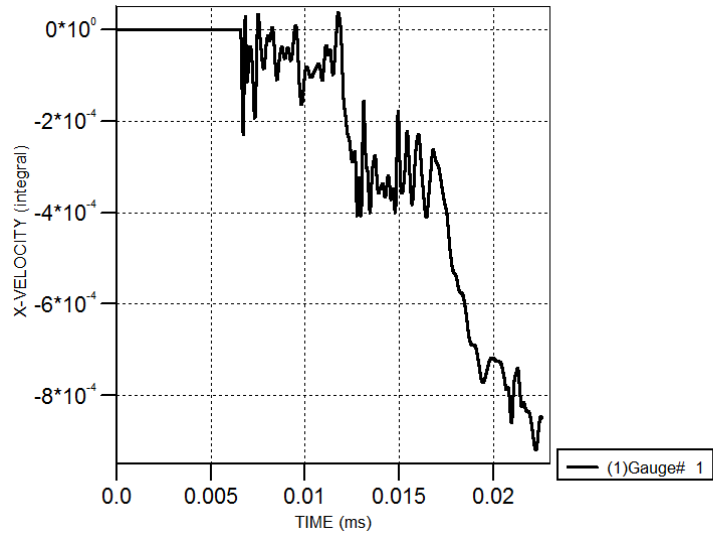


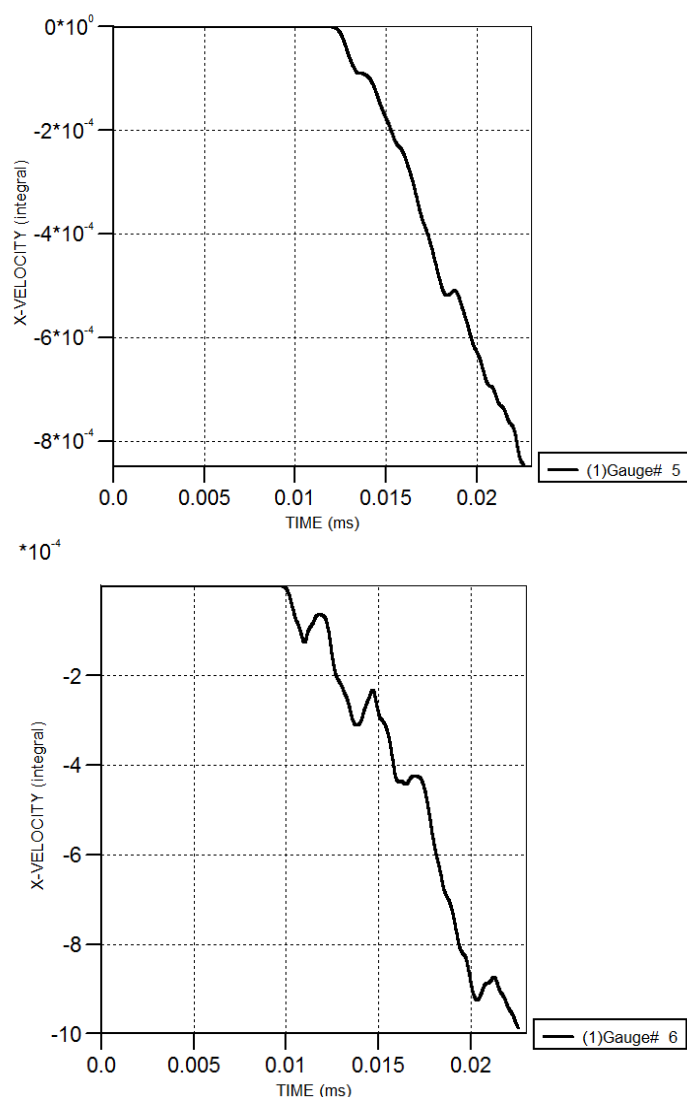
پیوست ۱۷۸: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (2000kg -15m)





پیوست ۱۷۹: نمودارهای جابجایی-زمان در مخازن فولادی (2000kg -20m)





پ-۱۸۰- 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^۱ و ... قرار دارند. هرکدام از این

1 - Finite Element Method

2 - Finite Difference Method (FDM)

3 - Boundary Element Method (BEM)

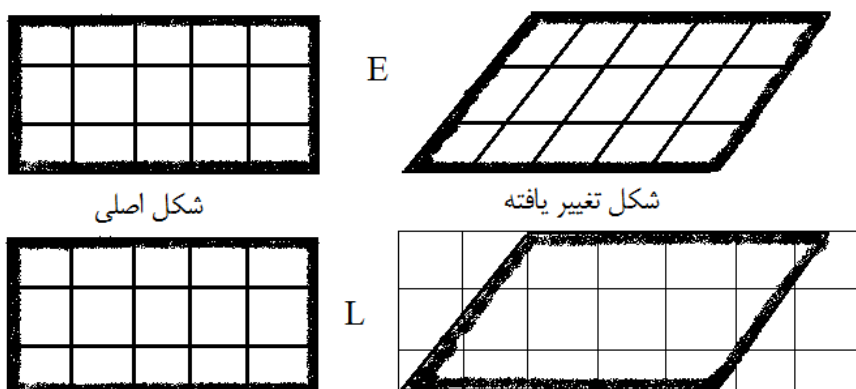
روش‌ها دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. ذکر این نکته در این جا خالی از لطف نیست که استفاده از هایدروکدها به اذعان بسیاری از مراجع معتبر، نیازمند دانش وسیعی از مباحث عددی است و صحت پاسخ گرفته شده از این دسته نرم‌افزارها به شدت به کاربر وابسته است. به طوری که در یک مسئله یکسان، میان نتایج حاصل از تحلیل‌های دو کاربر با تجربه برابر، احتمال وقوع اختلاف بسیار بالا است. طبق گفته همین مراجع برای به دست آوردن 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 این که 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 به دست آوردن تاریخچه حرکت ماده در طول تحلیل است. برای استفاده از این روش محیط حل (ماده) به صورت 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 المان‌ها در هنگام تحلیل دست‌خوش تغییر خواهد شد. روش لاگرانژی به دو صورت به روز رسانی و ثابت فرمولیته می‌شود. در هر کدام از این روش‌ها، دستگاه مختصات یا به روز 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. به عنوان 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. به همین دلیل این روش محدودیت روش لاگرانژی را نداشته و تغییر فرم‌های بسیار بزرگ به راحتی 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 به دست می‌آیند. این روش به خاطر ماهیت ویژه خود در پیش‌بینی مرزهای ماده دچار ضعف بزرگی است؛ 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^۲ است. شکل ۳-۱ نمایشگر تفاوت دیدگاه لاگرانژی با اوپلری می‌باشد.

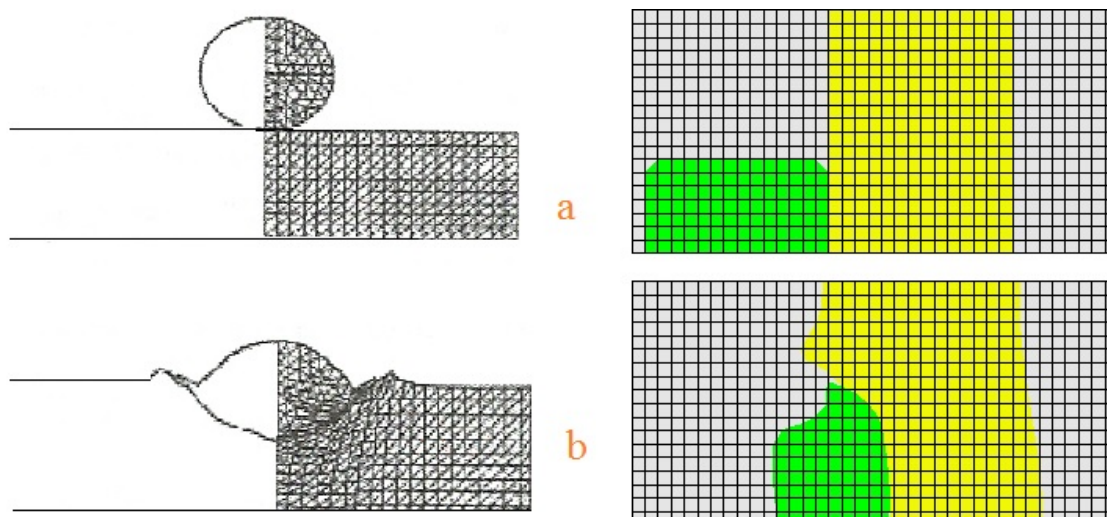


تفاوت دیدگاه لاگرانژی (بالا) با اوپلری (پایین)

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

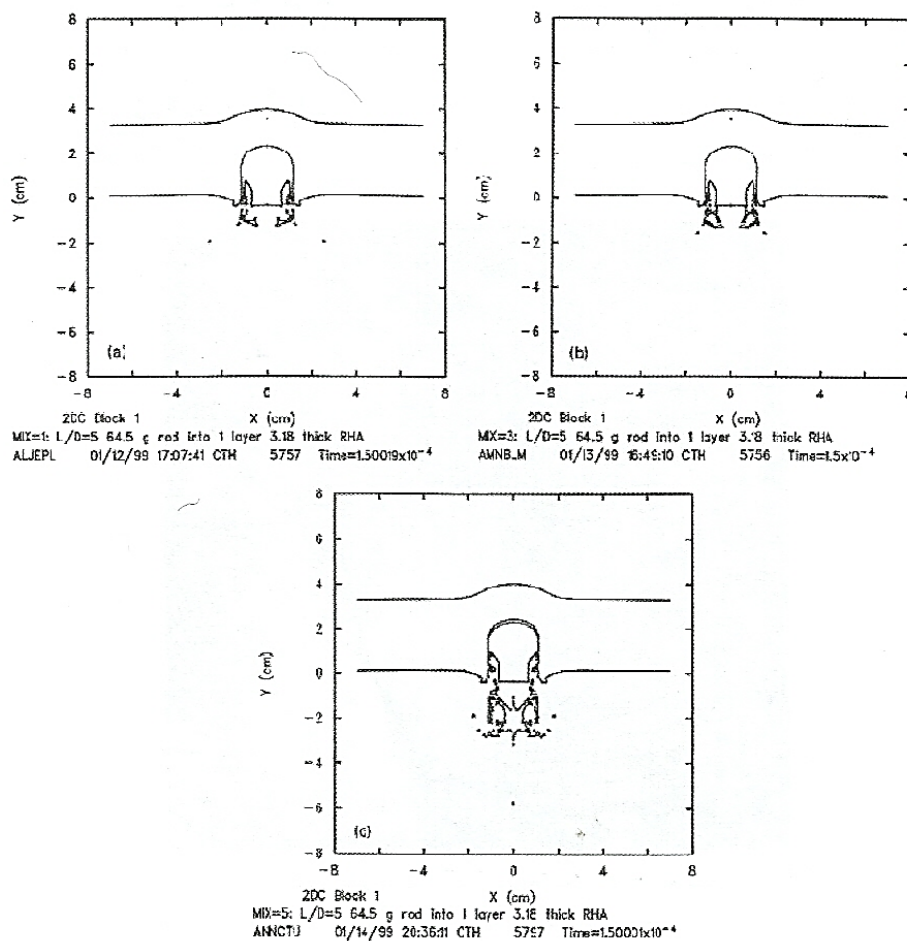
¹ - Computational Fluid Dynamics (CFD)

² - Fluid Solid Intraction (FSI)



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

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

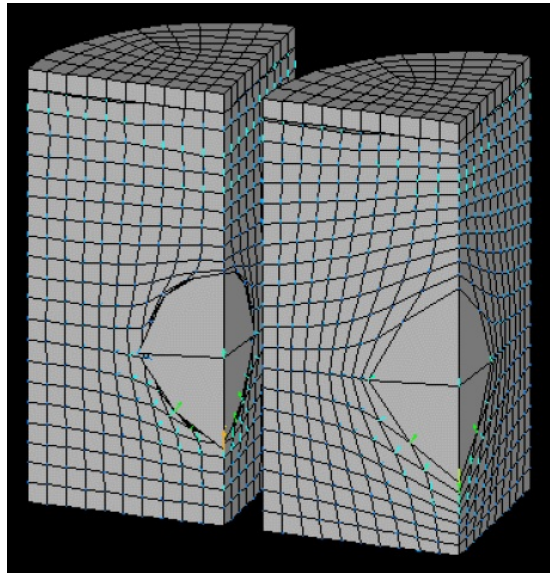
آمیخته معادل [۵]

ج) روش ALE¹

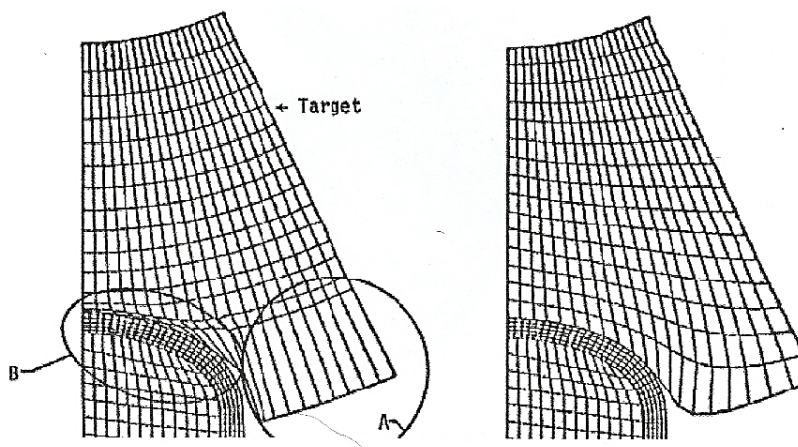
در سطور گذشته پیرامون ویژگی‌های هر کدام از روش‌های لاگرانژی و اویلری توضیحاتی داده شد. برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های فوق، روشی مبتنی بر تلفیق این روش‌ها به نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط پیوسته منحصر به فرد است، هر وقت تغییر فرم المان‌های لاگرانژی از 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

¹ - Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method

محیط‌های واسط در مسائل FSI مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال در مدل‌سازی آب در اطراف ماده منفجره در یک مسئله انفجار زیر آب^۱. 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 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.

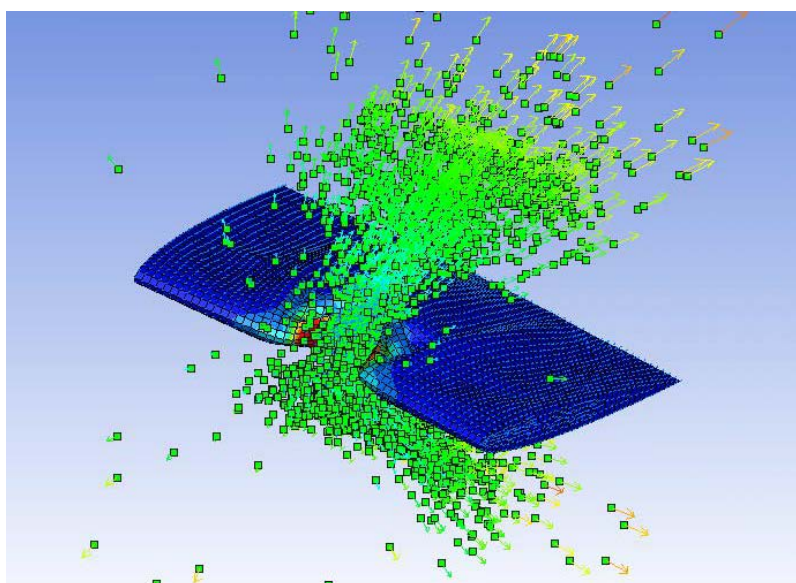


شکل ۳-۵: تأثیر روش ALE در مسئله برخورد

^۱ - Under Water Explosion (UNDEX)

د) روش SPH¹

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.

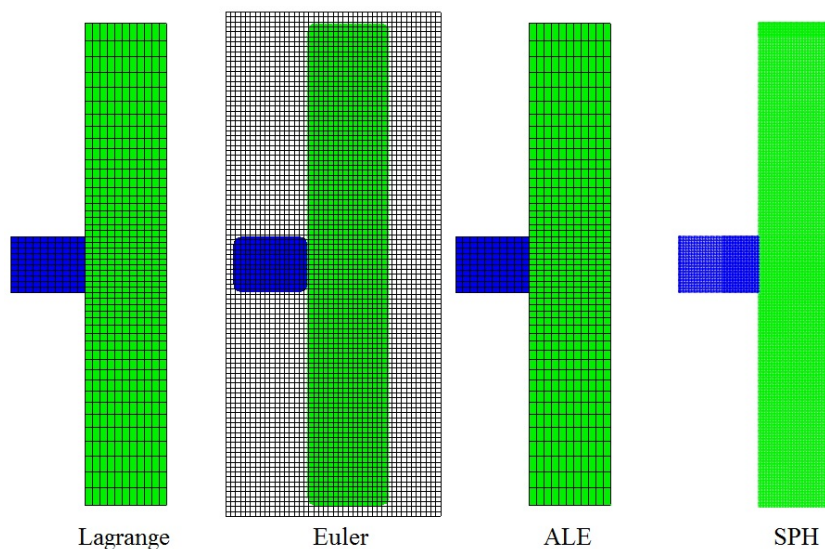


شبیه‌سازی یک برخورد بسیار پر سرعت به کمک روش SPH

ه) روش‌های المان مرزی

¹ - Soft Participle Hydrodynamics

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]



مقایسه حلگرها با یکدیگر

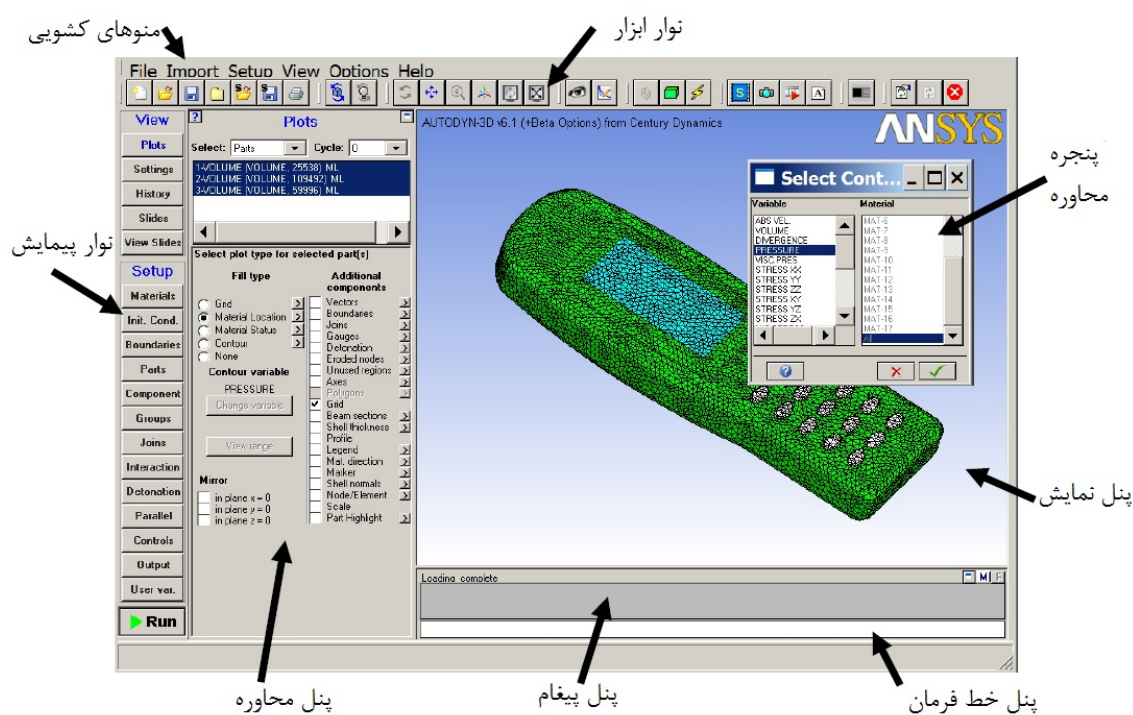
محیط گرافیکی نرم‌افزار

همان‌طور که گفته شد شرکت Dynamic Century نرم‌افزار اتوداین را ابتدا به صورت نسخه مستقل ارائه می‌کرد. بعدها با افزایش قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ نرم‌افزار اتوداین تحت این برنامه ارائه شده و عمل می‌کند (از نسخه ۱۰ به بعد). این امر باعث افزایش قابلیت‌های مدل‌سازی نرم‌افزار اتوداین گردیده است. البته محیط‌های واسط گرافیکی هر دو حالت تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و فقط در نسخه جدیدتر نمایه‌ها به سمت چپ انتقال یافته‌اند. هم‌چنین نسخه جدیدتر نرم‌افزار دارای کتابخانه غنی از ویژگی‌های مواد مختلف که در مسائل نرخ بالای دینامیکی به چشم می‌خورند، هستند. شکل زیر نمایش‌گر شمای کلی پنجره رابط نرم‌افزار با کاربر است. همان‌طور که مشخص می‌باشد این

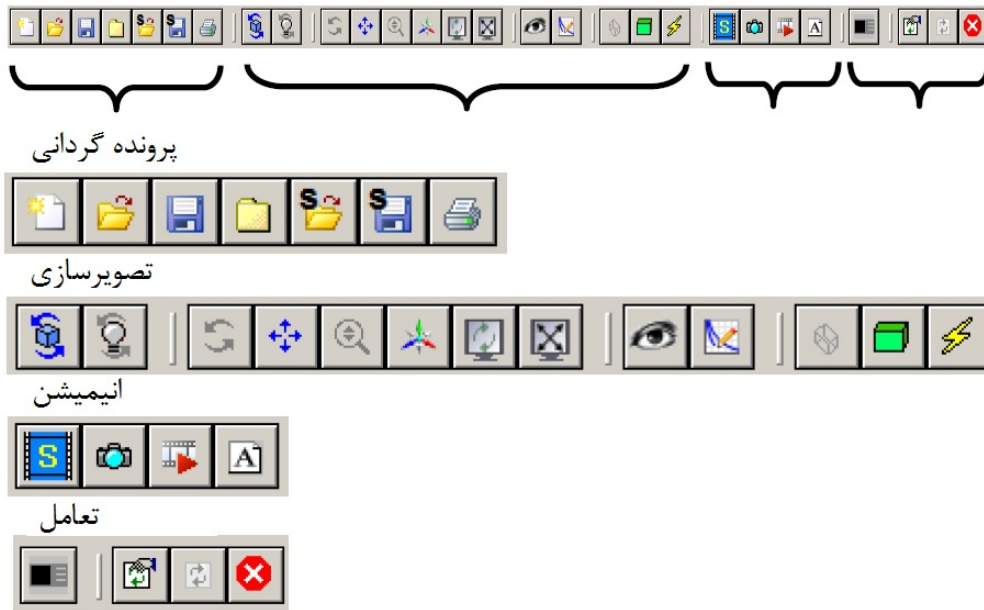
¹ - Fracture Mechanics

محیط تا حد امکان ساده ولی قدرتمند طراحی شده است. از ویژگی‌های نرم‌افزار اتوداین مهیا کردن امکانات هم‌زمان پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش در محیط یکسان است تا از تعداد عملیات ورود و خروج فایل کاسته شود. البته همان‌طور که خواهید دید این نرم‌افزار دارای قدرت بالای مدل‌سازی نیست و فقط امکان ساخت مدل‌های نسبتاً ساده در آن مهیا گردیده است. در این مورد نیز با ترفندهای خاصی می‌توان تا حد امکان این کمبود را برطرف کرد. در سمت راست، رابط گرافیکی و ادوات کنترل پیش‌پردازش و پس‌پردازش مسئله گنجانده شده است.

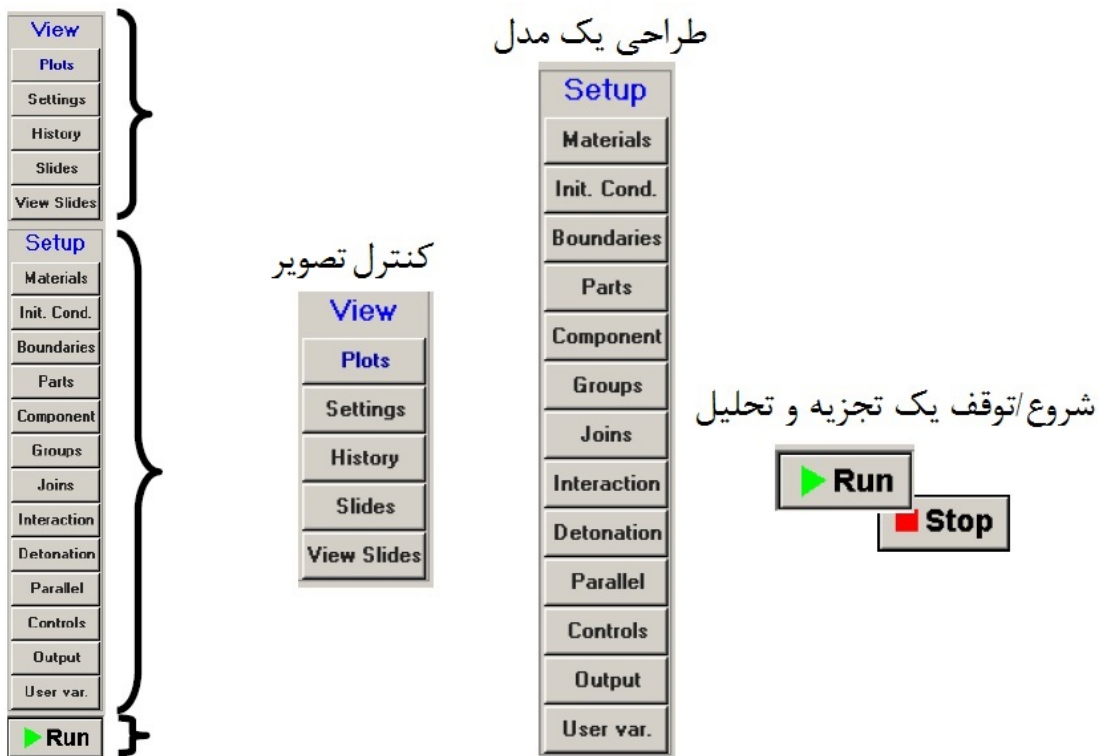
اجزای رابط کاربری



شمای کلی پنجره رابط کاربری

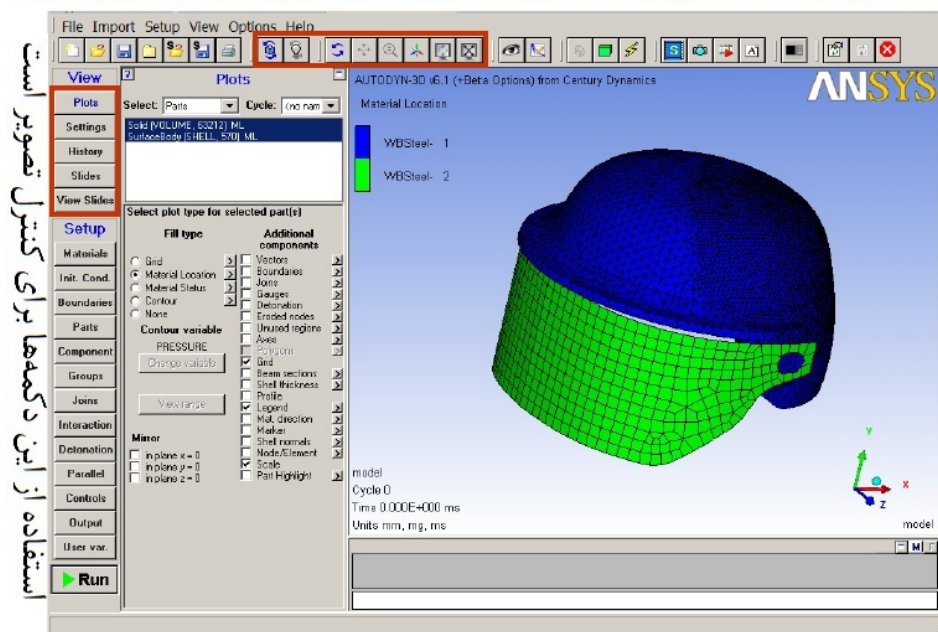


نوار ابزار



نوار پیمایش

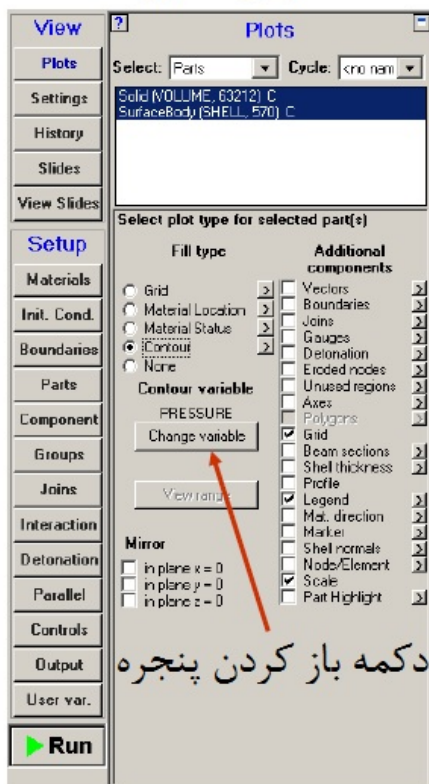
استفاده از این دکمه‌ها برای دست‌کاری تصویر است (مقیاس، چرخش، ترجمه و ...)



استفاده از این دکمه‌ها برای کنترل تصویر است

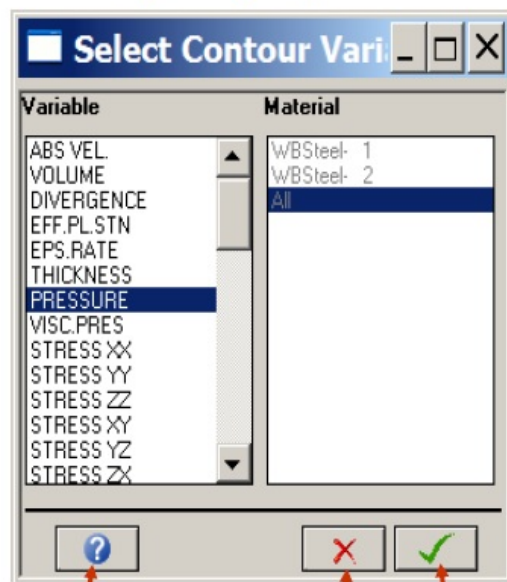
پنل‌های تصویر

پنل محاوره



دکمه باز کردن پنجره

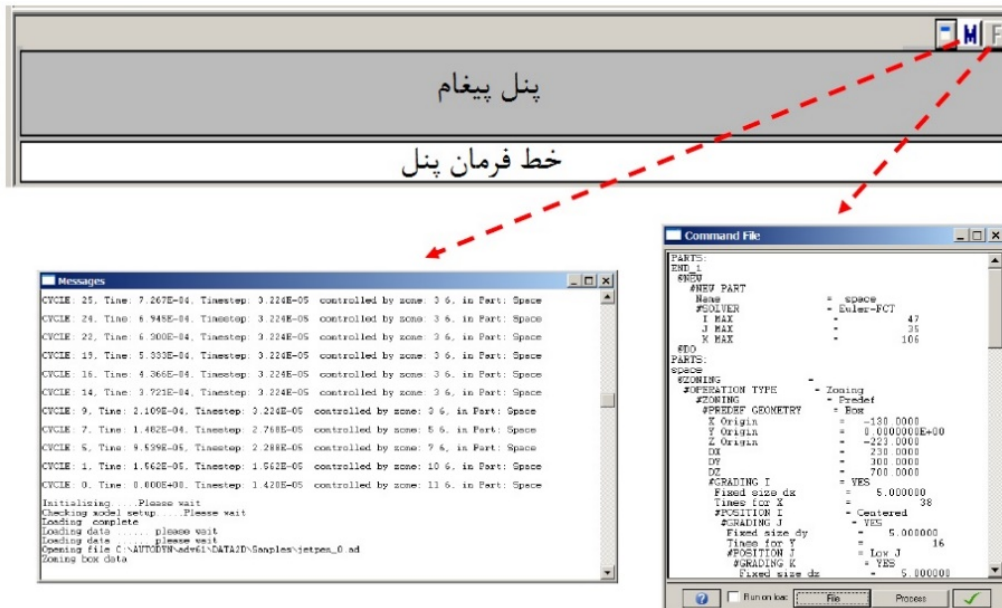
پنجره محاوره



راهنما

پذیرفتن رد کردن

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

ایجاد تصاویر به صورت خودکار از نوار لغزنده تصویر بیت مپ

گزینه های راه اندازی

تک عکس

اسلاید بیت مپ تصویر

چند عکس

اسلاید بیت مپ تصویر

ایجاد اسلاید متنی

تولید GIF، AVI و یا انیمیشن MPEG

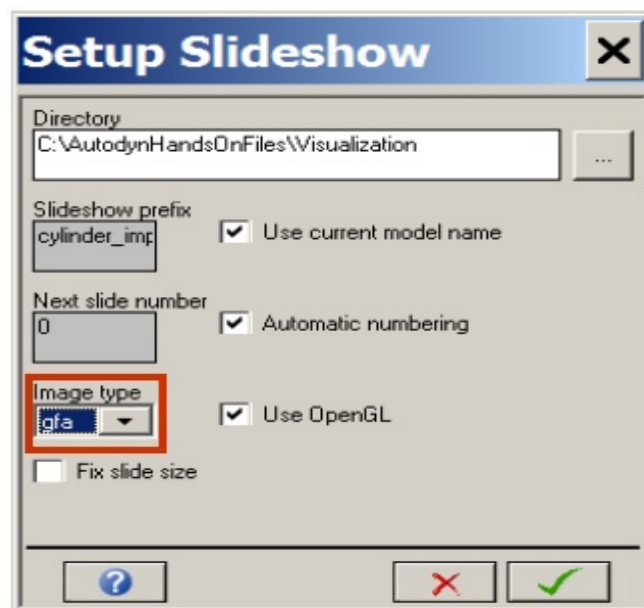
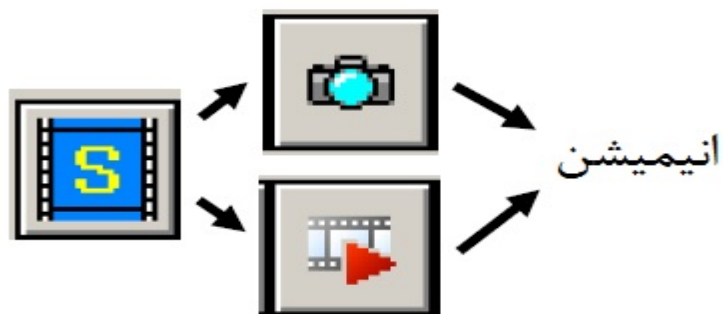
بیت مپ ها، اسلایدها و انیمیشن ها

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

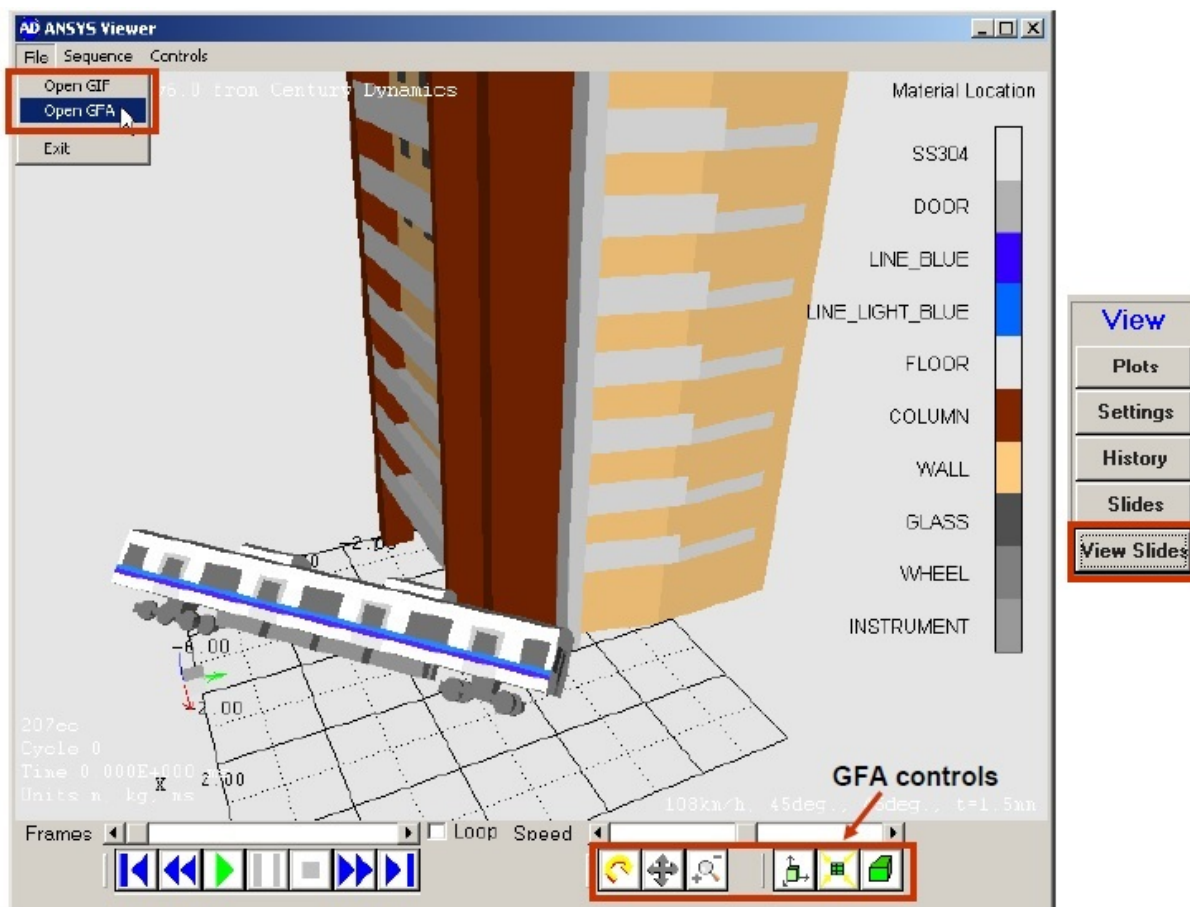


انیمیشن های تعاملی (GFA)

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

برای نمایش از فایل های GIF یا GFA استفاده می شود

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



نمایش‌گر AD ANSYS

پنجره تنظیم مواد Materials

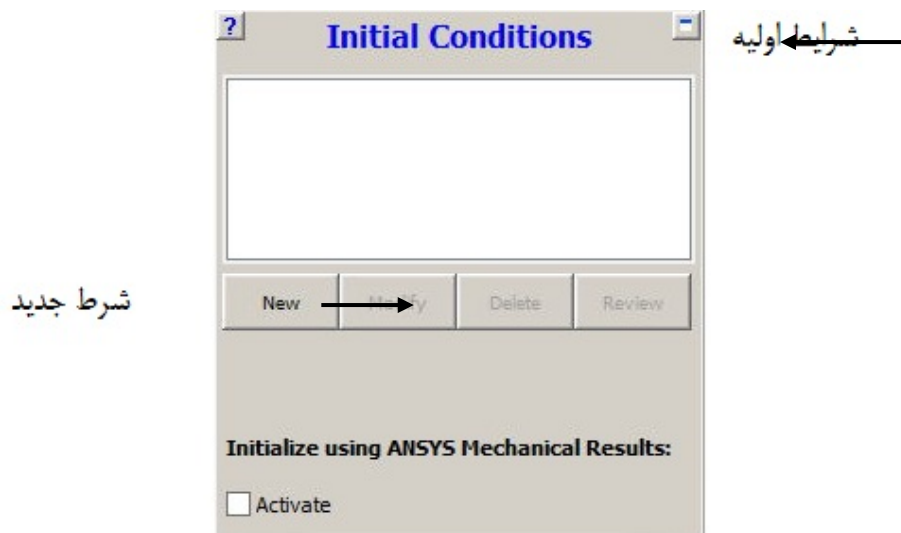
با اشاره کردن به این نمایه پنجره‌ای مطابق شکل بعد آشکار می‌شود. در این پنجره دو روش مختلف برای تعریف مواد مورد نیاز در مسئله مهیا شده است. یک روش بارگذاری مارد مورد نیاز، از کتابخانه بسیار مجهز خود نرم‌افزار است که اغلب مواد مهندسی مورد نیاز را در بر می‌گیرد. بدین منظور با زدن نمایه Load، کتابخانه نرم‌افزار بالا می‌آید. البته خاطر نشان می‌سازد، امکان این‌که 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 این‌رو با زدن کلید New، می‌توان به صفحه تنظیمات تعریف ماده می‌توان 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 می‌توان کنترل خوبی بر ماهیت مواد موجود در مسئله داشت.



پنجره تنظیم خصوصیات مواد

شرایط اولیه Init. Cond.

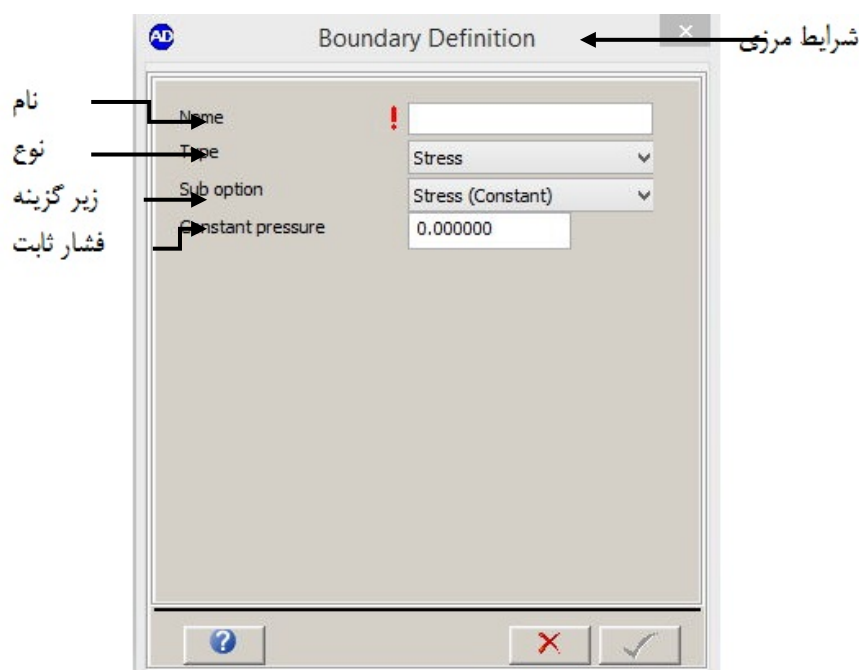
با زدن کلید فوق امکان تعریف کردن شرایط اولیه حاکم بر مسئله ایجاد شده و گزینه New، امکان تعریف یک شرایط اولیه که ممکن است از جنس سرعت، تنش و ... باشد فراهم می‌نماید؛ این شرایط اولیه معمولاً به مواد اعمال می‌شوند تا به مدل‌های هندسی.



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 ✓، فعال خواهد شد که با فشردن آن تنظیمات انجام شده را تأیید می‌کنید.



پنجره حاوی تنظیم شرایط مرزی

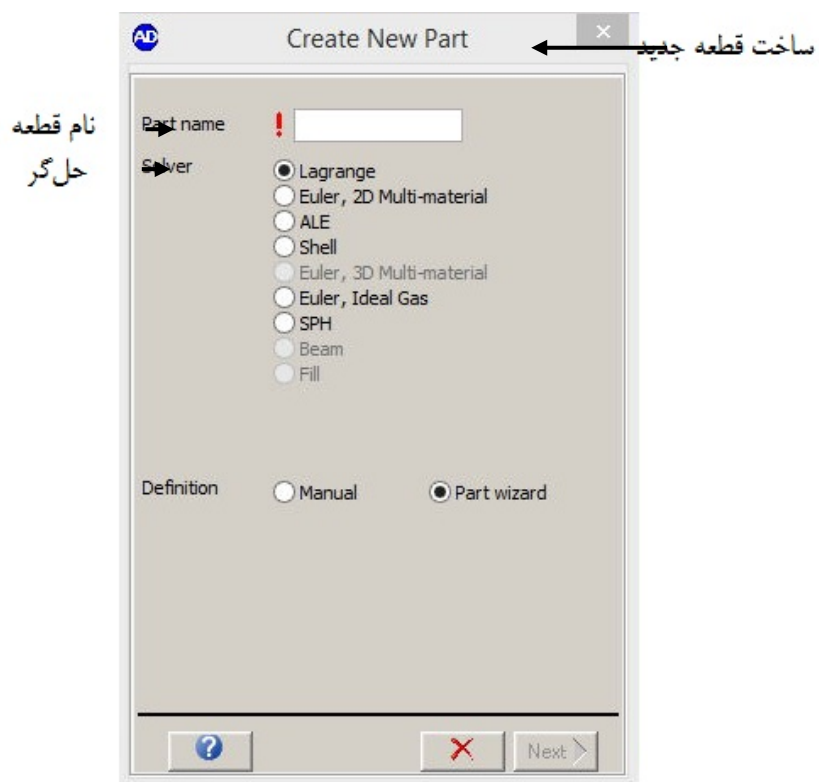
ساخت مدل هندسی

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.



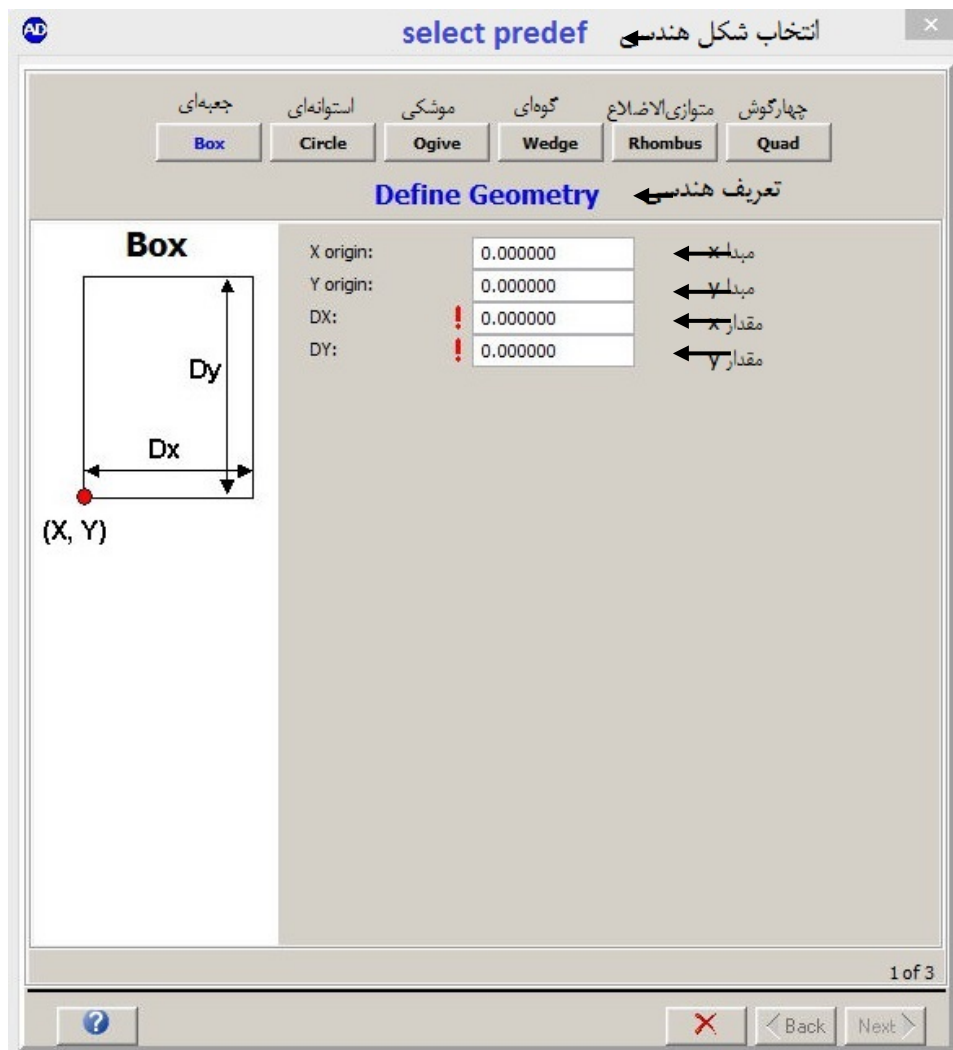
نمایی از پنجره Parts

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



تعیین نام و مدل و انتخاب حل گر

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

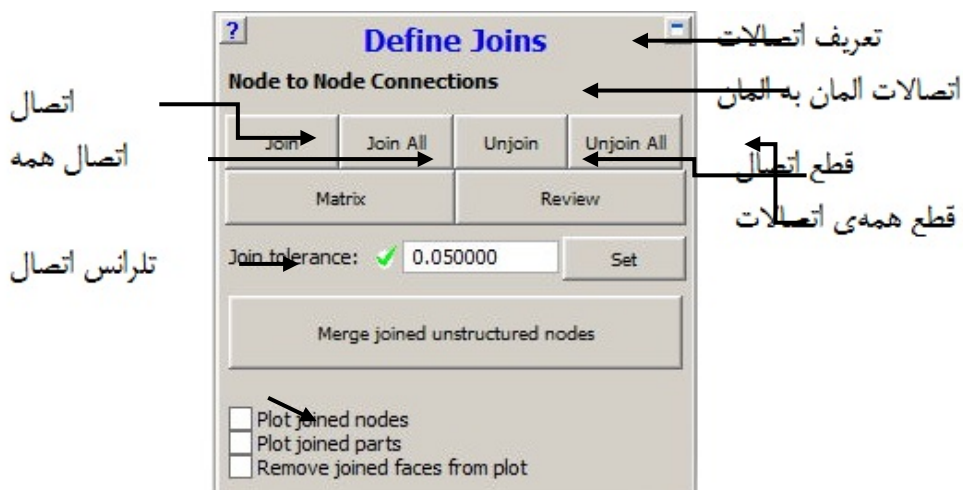
کاربری این گزینه هم‌چون مورد قبل است، با این تفاوت که امکان تعریف بعضی از مدل‌ها هم‌چون تیرها، با کمک این ابزار انجام می‌پذیرد. هم‌چنین می‌توان با استفاده از این نمایه، مجموعه‌ای از گره‌ها، المان‌ها و غیره را نیز تعریف کرد تا در صورت لزوم حذف شده و یا تغییر داده شوند.



نمایی از پنجره گروه‌ها

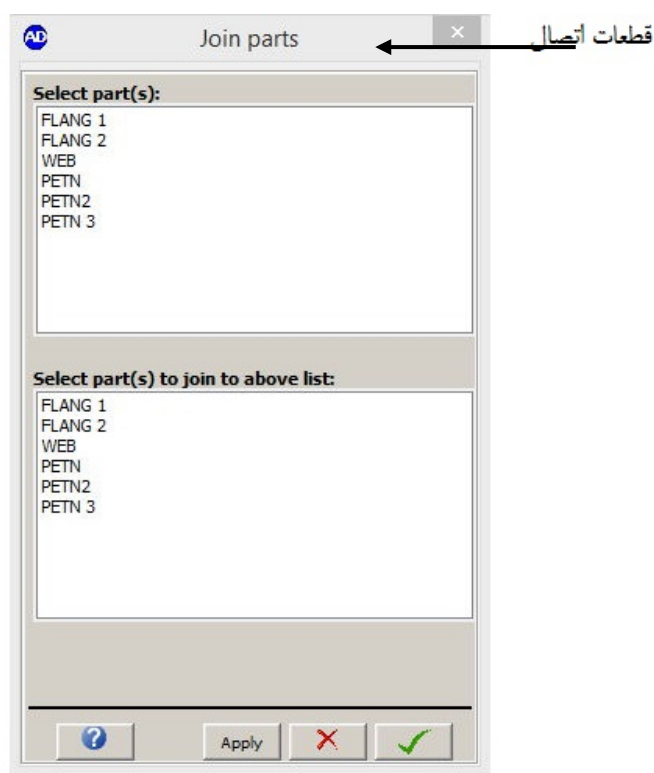
اتصالات Joins

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 بخش های مختلف

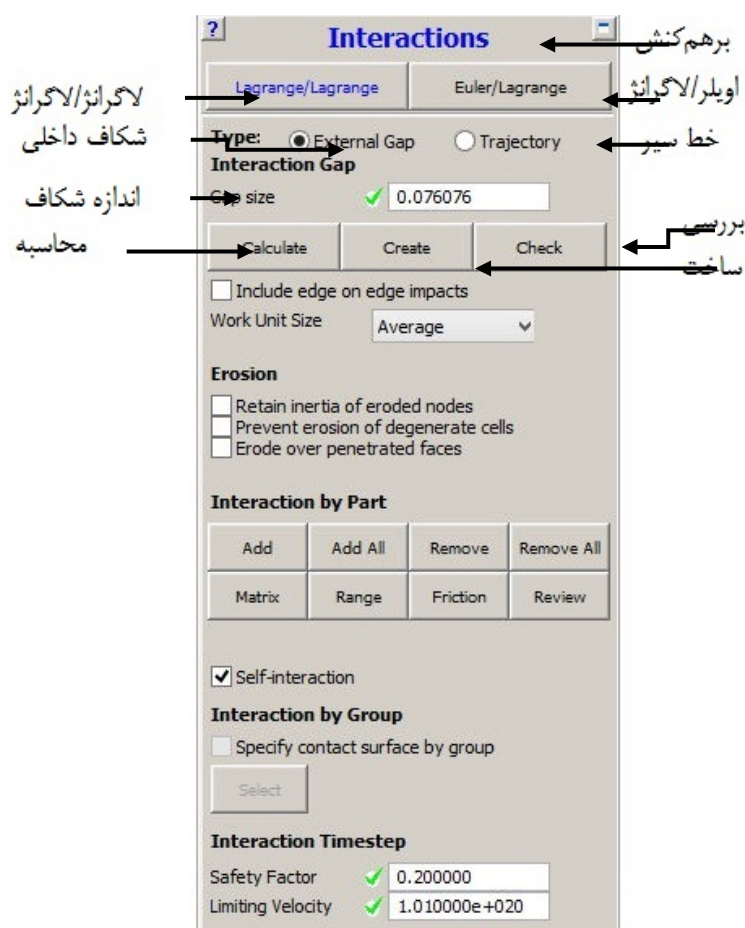
با اشاره به نمایه Join می توان از لیست های ارائه شده، مدل هایی که باید به هم متصل شوند را انتخاب نمود. همچنین با فعال ساختن گزینه plot joined nodes می توان گره هایی که با یک تolerانس به هم نزدیک هستند و اتصال مابین آنها ایجاد شده است را نمایش داد. برای این که میان گره های مجاور، یک اتصال برقرار شود نیز تolerانس تعریف می گردد. این کار احتمال وقوع خطا را کاهش می دهد.



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.

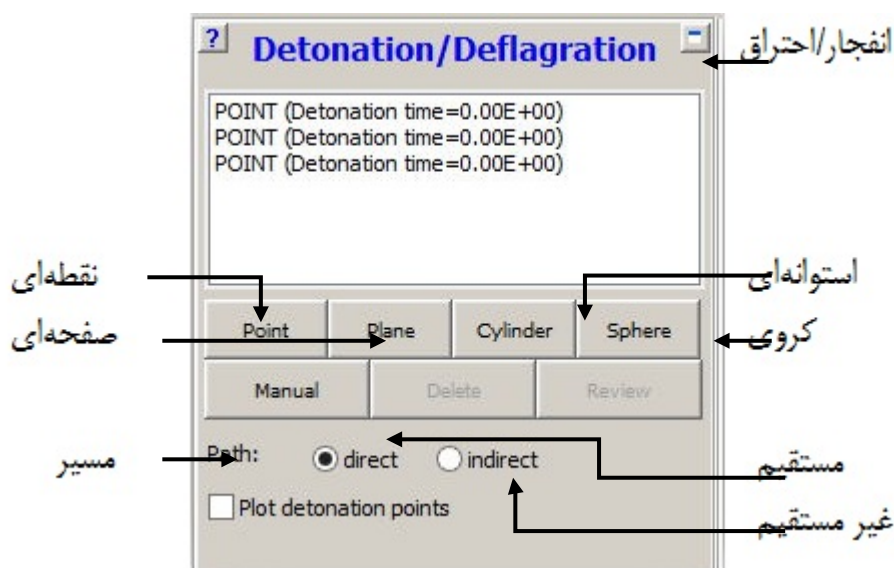


تعریف اندرکنش احتمالی بین بخش‌های مختلف

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

¹ - Blast Loading

۳ موازی سازی پردازش گر ها Parallel

امروزه با پیشرفته شدن رایانه ها و هم چنین 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، نمودهای زمانی و ... در این قسمت تعیین می شود. با کلیک بر روی نمای + ، می توان به زیرنمایه های دیگری دسترسی پیدا کرد.



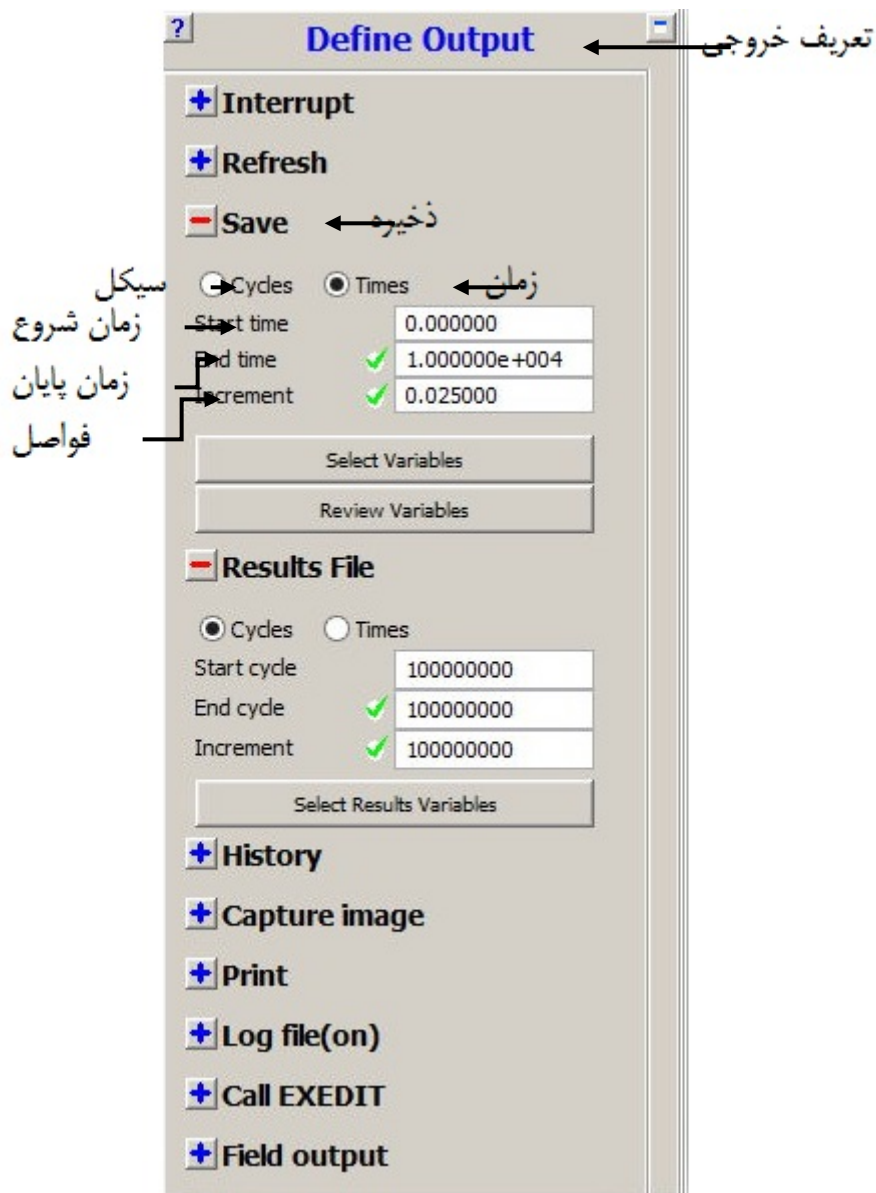
تعریف شرایط کنترلی برای حل مسئله [۵]

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.



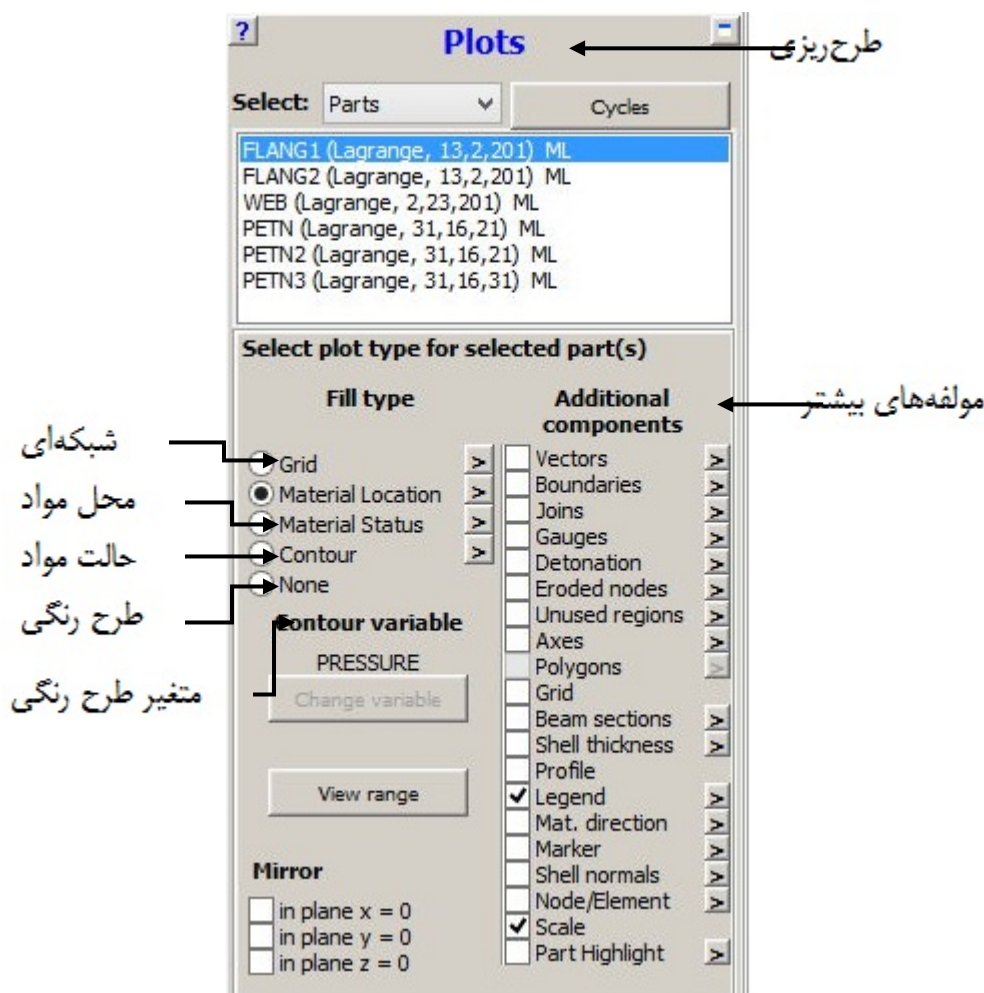
تنظیمات مربوط به خروجی‌ها

متغیرهای تعریف شده توسط کاربر. User var.

در این قسمت، که بیشتر برای کاربران پیشرفته در نظر گرفته شده است، متغیرهایی که در خود نرم‌افزار پیش‌بینی نشده‌اند 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 خروجی‌ها می‌باشد. در این قسمت امکانات بسیار زیادی برای انواع نمایش خروجی در نظر گرفته شده است.



بنجره نمایش خروجی‌ها

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 به‌دست 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

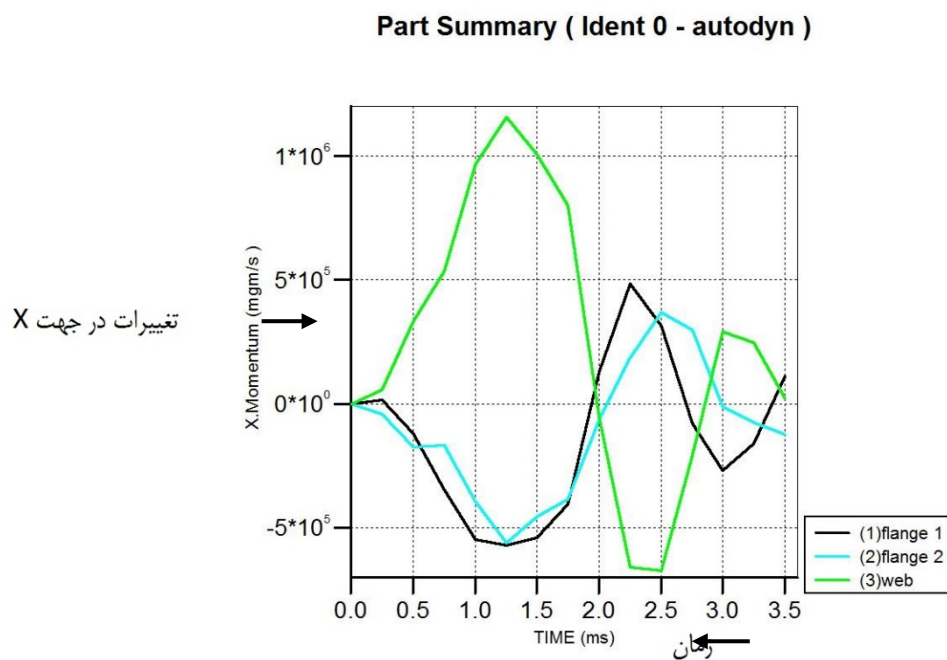
امکان انتخاب متغیرهای مورد نظر در محل نصب سنج‌های مختلف در مدل‌های یک مسئله را می‌دهد. همچنین تغییرات بعضی از متغیرهای کل دامنه حل، مانند انرژی و تکانه کل نیز بر حسب زمان در آن گنجانده شده است.



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]



نمودار به دست آمده از مدول History

Abstract

The placement of surface structures, such as fixed and movable against various loads such as war and terrorist threats, such as explosives or explosion of fuel lines such as oil and gas, in close proximity to these structures, results in the formation of a level of tensions with an almost oscillating nature in the constituent material will be. In some cases, these structures are like reservoirs containing stored materials, including fuel and refinery, and sometimes also water carriers that will be used to combat combustion. In any case, environmental considerations, conditions of use and even financial value are very important for the stability of these structures against different loads. The importance of this is the main reason for choosing the topic of this thesis.

This thesis examines the effect of explosive explosive loading on reservoirs. To do this, we used Adobe Autodyn's finite element software to simulate the problem. We used SPH solver for modeling and analyzed the effect of explosion in different situations.

These loads were carried out on two types of steel and concrete reservoirs. Explosive materials with three different masses of 500, 1000 and 2000 kilograms were placed at a distance of 10, 15 and 20 meters from the reservoir on the ground. In order to record the explosion parameters, six measurements were carried out in different sections of the reservoir and finally the results of the measurements recorded in the measurements were compared.

The most important result is the increase in the effect of explosive loading with the increase of explosive mass and in comparison with the decrease in the effect of increasing the distance from the explosion point on different sections of the reservoirs.

Keywords: Blast loading, Tank, Autodyn, Numerical Simulation, SPH.



**Shahrood University
Department of Mechanical Engineering**

Title

**Numerical Modeling of the Explosion Effect on Reservoirs on
the Earth's surface**

Written by:

Ali Asghar Rahimiyan

Supervisor:

Dr Reza Naderi

Winter 2018