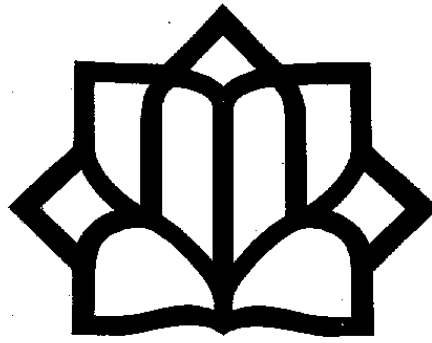


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک (طراحی کاربردی)

عنوان :

بررسی پدیده برخورد با سرعت بالا با استفاده از روش

بدون المان (Mesh Free Method)

اساتید راهنما :

دکتر بهزاد سلطانی

دکتر عباس لقمان

استاد مشاور :

دکتر مجید سبز پوشانی

به وسیله :

ماهان اریاب

دی ماه ۱۳۸۸

تقدیم به

پدرم

مادرم

و دو خواهر مهربانم

که تنها آرزویم فرا رسیدن روزیست که تقدیر مجال جبران فداکاری‌های

ایشان را به من بدهد.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از استاد گرامی و بزرگوار **جناب آقای دکتر سلطانی** که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده و مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند، نهایت تشکر و سپاسگزاری را داشته‌باشم.

و با تشکر از تمامی اساتید بزرگوار بویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم یاری نموده‌اند.

چکیده

در این تحقیق ابتدا با توجه به ویژگی‌های پدیده‌ی برخورد با سرعت بالا که عبارتند از تغییر شکل‌های بزرگ که منجر به یک مسئله‌ی غیر خطی هندسی و مادی میشود، سطوح مادی در حال حرکت و سطوح آزاد، مرزهای تغییر شکل پذیر و سیستم گسسته بر پایه‌ی قوانین محیط پیوسته، روش SPH از میان روش‌های عددی انتخاب گردیده، سپس نحوه‌ی تخمین زدن متغیر میدان در این روش، روند فرمول نویسی SPH و همچنین جایگاه این روش در میان روش‌های عددی بیان شده است. در ادامه معادلات حاکم و بیان SPH این معادلات برای جامدات، تئوری الاستو-پلاستیک مورد استفاده برای دو حالت الاستوپلاستیک کامل و ترموویسکوپلاستیک با استفاده از مدل جانسون-کوک و معادله حالت که برای محاسبه‌ی فشار حاصل از هیدرودینامیک ناشی از استحکام ماده بکار رفته است، ذکر شده و با توجه به این روابط یک الگوریتم حل مناسب برای اعمال روش SPH در مسائل مربوط به جامدات، ارائه شده است. سپس معادلات حاکم در مختصات استوانه‌ای آورده شده‌اند و با توجه به اصلاحی که در نحوه‌ی تخمین SPH در مختصات استوانه‌ای اعمال گردیده، معادلات حاکم برای حل مسائل تقارن محوری جامدات با بیان SPH حاصل شده‌اند. بر اساس الگوریتم ارائه شده و روابط بدست آمده، یک برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده و با استفاده از آن پدیده‌ی برخورد با سرعت بالا و نفوذ بصورت دو بعدی در حالت کرنش صفحه‌ای در جامدات بررسی شده‌اند. همچنین آزمایش برخورد تیلور، به صورت تقارن محوری شبیه سازی شده است. نحوه‌ی توزیع تنش مؤثر، کرنش پلاستیک مؤثر و دما در دامنه‌ی مسئله برای هر سه مثال بدست آمده است. در پدیده‌ی نفوذ نتایج با نتایج تجربی و در آزمایش برخورد تیلور نتایج با نتایج روش‌های عددی دیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: روش‌های ذره‌ای بدون شبکه، هیدرودینامیک ذرات روان (SPH)، برخورد با سرعت بالا، نفوذ، ترموویسکوپلاستیک، آزمایش برخورد تیلور، مسائل تقارن محوری.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول

۱	مقدمه‌ای بر روشهای عددی
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- فرم‌های قوی و فرم‌های ضعیف
۵	۳-۱- روش باقیمانده‌های وزن‌دار
۸	۱-۳-۱- روش کالوکیشن
۹	۲-۳-۱- روش زیرحوزه‌ای
۹	۳-۳-۱- روش حداقل مربعات
۱۰	۴-۳-۱- روش moment
۱۰	۵-۳-۱- روش گالرکین
۱۱	۴-۱- فرم ضعیف GLOBAL برای جامدات
۱۲	۵-۱- فرم ضعیف LOCAL برای جامدات
۱۳	۶-۱- انواع روش‌های تخمین‌زدن متغیر میدان
۱۶	۷-۱- انواع روش‌های نمایش دامنه‌ی مسئله
۱۶	۸-۱- روش‌های بر پایه‌ی شبکه (Grid - based)
۱۷	۱-۸-۱- شبکه‌ی لاگرانژی (Lagrangian grid)
۱۸	۲-۸-۱- شبکه‌ی اویلری (Eulerian grid)
۲۰	۳-۸-۱- ترکیب شبکه‌های اویلری و لاگرانژی
۲۰	۴-۸-۱- محدودیت‌های روش‌های بر پایه‌ی شبکه
۲۱	۹-۱- روش‌های بدون شبکه (MESHFREE)

۲۱	..... ۱-۹-۱- چرا روش‌های بدون شبکه
۲۳	..... ۲-۹-۱- معرفی روش‌های بدون شبکه
۲۴	..... ۳-۹-۱- روند حل روش‌های بدون شبکه
۳۰	..... ۱۰-۱- روش‌های ذره‌ای بدون شبکه (MPMs)
۳۲	..... ۱-۱۰-۱- روند حل روش‌های MPM
۳۵	..... ۲-۱۰-۱- نتیجه‌گیری از توضیحات داده شده مربوط به MPMs
۳۶	..... ۱۱-۱- Smoothed Particle Hydrodynamics
۳۶	..... ۱-۱۱-۱- روش SPH
۳۷	..... ۲-۱۱-۱- مختصری از تاریخ روش SPH
۳۷	..... ۳-۱۱-۱- برخی کاربردهای اخیر SPH

فصل دوم

۳۹	..... آشنایی با روش SPH و فرمولاسیون آن
۴۰	..... ۱-۲- ایده‌ی اصلی SPH
۴۱	..... ۲-۲- فرمولاسیون اساسی SPH
۴۱	..... ۱-۲-۲- نمایش انتگرالی یک تابع
۴۴	..... ۲-۲-۲- نمایش انتگرالی مشتق یک تابع
۴۶	..... ۳-۲-۲- تخمین ذره (particle approximation)
۴۹	..... ۳-۲- دامنه‌ی تأثیر و دامنه‌ی حمایت (support and influence domain)
۵۲	..... ۴-۲- نحوه‌ی ساختن تابع smoothing
۵۳	..... ۱-۴-۲- تخمین‌زدن یک تابع میدان
۵۵	..... ۲-۴-۲- تخمین‌زدن مشتقات یک تابع میدان
۵۵	..... ۱-۲-۴-۲- تخمین‌زدن مشتق مرتبه‌ی اول یک تابع میدان
۵۷	..... ۲-۲-۴-۲- تخمین‌زدن مشتق مرتبه‌ی دوم یک تابع میدان
۶۱	..... ۳-۴-۲- ساختن تابع smoothing

فصل سوم

- معادلات حاکم و فرمولاسیون کلی SPH برای هیدرودینامیک ناشی از استحکام ماده..... ۶۶
- ۱-۳- معادلات حاکم..... ۶۷
- ۱-۱-۳- قوانین بقاء..... ۶۸
- ۱-۱-۱-۳- بقاء جرم..... ۶۸
- ۱-۱-۲-۳- بقاء ممتم..... ۶۸
- ۱-۱-۳-۳- بقاء انرژی..... ۶۹
- ۲-۱-۳- معادلات سازگاری و روابط مربوط به کرنش و تغییر مکان..... ۷۰
- ۳-۱-۳- معادله‌ی متشکله..... ۷۰
- ۱-۳-۱-۳- معادله‌ی حالت..... ۷۱
- ۱-۱-۳-۱-۳- سرعت صوت..... ۷۲
- ۲-۱-۳-۱-۳- دما..... ۷۳
- ۲-۳-۱-۳- معیار تسلیم..... ۷۳
- ۲-۳- فرمولبندی SPH برای معادلات حاکم..... ۷۴
- ۱-۲-۳- قوانین بقاء..... ۷۴
- ۱-۱-۲-۳- بقاء جرم..... ۷۴
- ۲-۱-۲-۳- بقاء ممتم..... ۷۷
- ۳-۱-۲-۳- بقاء انرژی..... ۷۹
- ۲-۲-۳- نرخ کرنش و نرخ چرخش..... ۸۱
- ۳-۳- بیان لزجت و گرمای مصنوعی..... ۸۱
- ۱-۳-۳- لزجت مصنوعی..... ۸۱
- ۲-۳-۳- گرمای مصنوعی..... ۸۱

فصل چهارم

- ۸۲ارائه‌ی الگوریتم کلی حل روش SPH برای جامدات
- ۸۳۱-۴- مقدمه‌ای بر الگوریتم کلی روش SPH
- ۸۶۲-۴- ورودی مسئله
- ۸۷۳-۴- مراحل‌ی که باید در هر مرحله‌ی زمانی انجام گیرد (تحلیل اصلی SPH)
- ۸۷۱-۳-۴- ایجاد مرزها
- ۸۸۲-۳-۴- گشتن به دنبال ذرات موجود در دامنه‌ی حمایت هر ذره (NNPS)
- ۸۹۱-۲-۳-۴- نحوه‌ی محاسبه‌ی smoothing length
- ۹۰۲-۲-۳-۴- گشتن به دنبال تمام جفت‌ها (all-pair search)
- ۹۱۳-۳-۴- محاسبات تابع smoothing
- ۹۲۴-۳-۴- محاسبات مربوط به چگالی
- ۹۳۵-۳-۴- محاسبات مربوط به نیروهای داخلی
- ۹۴۱-۵-۳-۴- محاسبه‌ی تنش هیدرواستاتیک
- ۹۴۲-۵-۳-۴- محاسبه‌ی نرخ کرنش و نرخ چرخش
- ۹۴۳-۵-۳-۴- محاسبات الاستوپلاستیک
- ۹۵۱-۳-۵-۳-۴- محاسبه‌ی تنش دویاتوریک
- ۹۶۲-۳-۵-۳-۴- محاسبه‌ی تنش مصنوعی
-۳-۳-۵-۳-۴- بررسی حالت الاستیک یا پلاستیک و محاسبه‌ی دما
- ۹۸در صورت لزوم
- ۱۰۴۶-۳-۴- محاسبه‌ی نیروهای خارجی
- ۱۰۴۷-۳-۴- محاسبه‌ی لزجت و گرمای مصنوعی
- ۱۰۵۸-۳-۴- به‌روزرودن متغیرهای میدان
- ۱۰۶۹-۳-۴- خروجی مسئله
- ۱۰۶۴-۴- روش انتگرالگیری عددی
- ۱۰۹۵-۴- الگوریتم SPH ارائه شده برای جامدات

فصل پنجم

- شبيه‌سازی پديده‌ی برخورد با سرعت بالا و نفوذ بصورت کرنش صفحه‌ای ۱۱۱
- ۱-۵- مقدمه ۱۱۲
- ۲-۵- روند حل و معادلات مورد استفاده ۱۱۳
- ۳-۵- خواص مواد مورد استفاده ۱۱۵
- ۴-۵- اعداد مورد استفاده در روند حل با روش SPH ۱۱۶
- ۵-۵- برخورد با سرعت بسيار بالا (نفوذ) استوانه‌ی آلومينيومی روی صفحه‌ی آلومينيومی ... ۱۱۶
- ۱-۵-۵- هندسه‌ی مسئله ۱۱۷
- ۲-۵-۵- نتايج حاصل از شبيه‌سازی ۱۱۹
- ۶-۵- برخورد با سرعت بالای جسم آهنی آرمکو بر روی سطح صلب ۱۲۹
- ۱-۶-۵- هندسه‌ی مسئله ۱۲۹
- ۲-۶-۵- نتايج حاصل از شبيه‌سازی ۱۲۹

فصل ششم

- اعمال روش SPH در مسائل تقارن محوری جامدات و شبيه‌سازی آزمایش برخورد تیلور
- بصورت تقارن محوری ۱۳۵
- ۱-۶- مقدمه ۱۳۶
- ۲-۶- روند حل و معادلات مورد استفاده برای اعمال روش SPH در مسائل تقارن محوری
- جامدات ۱۳۷
- ۱-۲-۶- محاسبات مربوط به چگالی ۱۳۷
- ۲-۲-۶- محاسبات مربوط به نيروهای داخلی ۱۳۸
- ۳-۲-۶- محاسبات مربوط به بقاء انرژی ۱۴۰
- ۴-۲-۶- به‌روزکردن متغیرهای میدان ۱۴۱
- ۳-۶- شبيه‌سازی آزمایش برخورد تیلور بصورت تقارن محوری ۱۴۲
- ۱-۳-۶- خواص ماده ۱۴۳

۱۴۳	.....	۶-۳-۲- اعداد مورد استفاده در روند حل با روش SPH
۱۴۴	.....	۶-۳-۳- نتایج حاصل از شبیه سازی
۱۴۸	.....	نتیجه گیری
۱۴۹	.....	منابع و مأخذ
۱۵۱	.....	پیوست

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- مقایسه‌ی روش‌های اویلری و لاگرانژی.....	۱۹
جدول ۲-۱- تفاوت‌های بین المان محدود و بدون شبکه.....	۲۶
جدول ۱-۵- اعداد مربوط به معادله‌ی حالت Mie-Gruneison برای مواد مورد استفاده ...	۱۱۵
جدول ۲-۵- اعداد مربوط به مدل الاستوپلاستیک برای مواد مورد استفاده.....	۱۱۵
جدول ۳-۵- ضرایب مربوط به محاسبه‌ی لزجت و گرمای مصنوعی.....	۱۱۶
جدول ۴-۵- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی.....	۱۲۰
جدول ۵-۵- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر بدست آمده توسط لیو و همکارانش.....	۱۳۰
جدول ۱-۶- اعداد مربوط به معادله‌ی حالت Mie-Gruneison برای فولاد کم استحکام	
..... ۴۳۴۰	۱۴۳
جدول ۲-۶- اعداد مربوط به مدل الاستوپلاستیک فولاد کم استحکام ۴۳۴۰.....	۱۴۳
جدول ۳-۶- ضرایب مربوط به محاسبه‌ی لزجت و گرمای مصنوعی.....	۱۴۳
جدول ۴-۶- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر بدست آمده توسط باترا و ژنگ	
در سال ۲۰۰۸.....	۱۴۴

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱-۱- روند بررسی یک شبیه‌سازی عددی..... ۳
- شکل ۲-۱-۲- روش‌های نمایش تابع میدان در x با استفاده از اطلاعات موجود در همسایگی آن..... ۱۵
- شکل ۳-۱-۳- فلوجارتی برای روش‌های المان محدود و بدون شبکه..... ۲۵
- شکل ۴-۱-۴- نمایش دامنه در FEM و روش Mfree..... ۲۸
- شکل ۵-۱-۵- دامنه‌های حمایتی موضعی برای ساختن توابع شکل در روش بدون شبکه..... ۲۸
- شکل ۶-۱-۶- تولید ذرات برای یک محیط پیوسته‌ی دو بعدی با استفاده از شبکه‌ی مثلثی..... ۳۴
- شکل ۷-۱-۷- دامنه‌ی حمایتی ذره‌ای که در مکان x واقع شده..... ۳۴
- شکل ۱-۲-۱- دامنه‌ی تأثیر تابع smoothing که در داخل دامنه‌ی مسئله قرار گرفته‌است..... ۴۵
- شکل ۲-۲-۲- دامنه‌ی تأثیر تابع smoothing که دامنه‌ی مسئله را قطع کرده است..... ۴۶
- شکل ۳-۲-۳- Particle approximation با استفاده از ذرات داخل دامنه‌ی حمایت (W) smoothing function، مربوط به ذره‌ی i ام (دایره‌ای با شعاع kh)..... ۴۷
- شکل ۴-۲-۴- شکل و ابعاد مختلف دامنه‌ی حمایت برای نقاط مختلف..... ۵۱
- شکل ۵-۲-۵- دامنه‌ی تأثیر برای گره‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ برای تخمین متغیر میدان در نقطه‌ی x ۵۱
- شکل ۶-۲-۶- تابع smoothing استفاده شده توسط لوسی در سال ۱۹۷۷، به همراه مشتق اول آن..... ۶۴
- شکل ۷-۲-۷- گوسین کرنل و مشتق مرتبه‌ی اول آن..... ۶۵
- شکل ۸-۲-۸- کرنل cubic spline و مشتق اول آن..... ۶۵
- شکل ۱-۴-۱- الگوریتم کلی حل به روش SPH..... ۸۵
- شکل ۲-۴-۲- نمایش ذرات حقیقی و دو نوع ذره‌ی مجازی برای شبیه‌سازی مرزجسم جامد... ۸۹
- شکل ۳-۴-۳- روش گشتن all-pair برای انجام NNPS در فضای دو بعدی..... ۹۱

- شکل ۴-۴- سخت شونده‌گی همسانگرد، سطح تسلیم با تغییر شکل پلاستیک تغییر می‌کند
و منحنی تنش کرنش تک جهتی مربوطه ۹۹
- شکل ۴-۵- سطح تسلیم فن مایرز در حالت تنش صفحه‌ای که در آن جهت افزایش کرنش
پلاستیک نشان داده شده است ۱۰۰
- شکل ۴-۶- روش بازگشت شعاعی برای معادلات پلاستیسیته‌ی فن مایرز ۱۰۳
- شکل ۴-۷- منحنی تغییرات یک متغیر میدان a_i نسبت به زمان ۱۰۸
- شکل ۴-۸- الگوریتم SPH برای جامدات ۱۱۰
- شکل ۵-۱- هندسه‌ی مسئله و نحوه‌ی توزیع ذرات ۱۱۸
- شکل ۵-۲- پارامترهای محاسبه شده ۱۲۰
- شکل ۵-۳- توزیع تنش مؤثر (الف) الاستوپلاستیک کامل
(ب) الاستوپلاستیک با استفاده از مدل جانسون- کوک ۱۲۱
- شکل ۵-۴- توزیع کرنش پلاستیک مؤثر برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از
مدل جانسون- کوک ۱۲۵
- شکل ۵-۵- توزیع دما برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از
مدل جانسون- کوک ۱۲۷
- شکل ۵-۶- مقایسه نتایج حالت پایدار بعد از برخورد : (الف) شبیه‌سازی انجام شده
(ب) شبیه‌سازی لیبو و همکارانش ۱۳۰
- شکل ۵-۷- توزیع تنش مؤثر پیش و بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با
استفاده از مدل جانسون- کوک ۱۳۱
- شکل ۵-۸- توزیع کرنش پلاستیک مؤثر بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک
با استفاده از مدل جانسون- کوک ۱۳۳
- شکل ۵-۹- توزیع دما بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از مدل
جانسون- کوک ۱۳۴
- شکل ۶-۱- هندسه‌ی مسئله و نحوه‌ی توزیع ذرات ۱۴۲

- شکل ۶-۲- توزیع تنش مؤثر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ μs بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از مدل جانسون-کوک ۱۴۵
- شکل ۶-۳- توزیع کرنش پلاستیک مؤثر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ μs بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از مدل جانسون-کوک ۱۴۶
- شکل ۶-۴- توزیع دما ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ μs بعد از برخورد برای تحلیل بصورت الاستوپلاستیک با استفاده از مدل جانسون-کوک ۱۴۷

فهرست علائم و اختصارات

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
e	انرژی داخلی
G	مدول برشی
h	smoothing length
h	ضریب سخت شوندگی پلاستیک
H_i	گرمای مصنوعی
m	جرم
N	تعداد ذراتی که در داخل ناحیه حمایت ذره i ام می‌باشند.
\dot{R}	نرخ چرخش
$R_{ij}^{\alpha\beta} + f_{ij}^n$	ترم تنش مصنوعی
t	زمان
T	دما
T_0	دمای محیط
T_m	دمای ذوب
v	سرعت
W	تابع smoothing
\dot{W}	نرخ کار
W_{ij}	مقدار تابع smoothing ذره i ام روی ذره j ام
x	مکان
علائم یونانی	
ρ	چگالی
σ	تانسور تنش
σ_y	تنش تسلیم

تنش تسلیم اولیه	σ_{y_0}
تانسور تنش دویاتوریک	τ
تانسور نرخ تنش دویاتوریک	$\dot{\tau}$
دلتای کرونیکر	δ
پارامتر گرونایزن	Γ
تانسور کرنش	ε
تانسور نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}$
بازه‌ی زمانی انتگرالگیری	Δt
لزجت مصنوعی	π_{ij}

زیرنویس

مؤثر	e
به منحنی هوگونیوت مربوط است	H
ذره‌ای که برای آن تخمین می‌زنیم	i
ذرات موجود در دامنه‌ی حمایت ذره‌ی i ام	j
تسلیم	y

بالانویس

تصحیح شده	cor
پلاستیک	p
در راستای شعاع	r
اولیه	tr
در راستای ارتفاع	z
در راستای زاویه‌ای	θ



The University of Kashan
Faculty of Engineering
Department of Mechanic

Thesis
For Degree of Master of Science (MSc)
In Mechanical Engineering-Applied Design

Title:

**Study on the High Velocity Impact
(HVI) using Mesh Free Method**

Supervisors:
Dr.B.Soltani
Dr.A.Loghman

Adviser:
Dr.M.Sabzpoushani

By:
Mahan Arbab

December 2009

Abstract

In this study, Smoothed particle hydrodynamics (SPH) is utilized to simulate the high velocity impact (HVI) problems based on their properties such as large deformation that leads to a materially and geometrically nonlinear problem, moving interfaces, free surfaces, deformable boundaries and discrete system based on the continuum mechanics laws. The formulation procedure and function approximation of SPH and its position in categories of numerical methods are stated. Moreover the governing equations and related SPH formulation for solids, elasto-plastic relations (for elasto-rigid plastic and elasto thermo-visco-plastic by usage of Johnson-Cook model) and equation of state (which is used to calculate the pressure of hydrodynamics with material strength) are mentioned. As a result an appropriate algorithm for application of SPH in solid mechanics is presented. Furthermore governing equations for cylindrical coordinates are expressed and by considering the modification applied in this coordinates, the governing equations for axisymmetric problems are achieved. A computer program is developed based on the algorithm and the relations. HVI and penetration are investigated by this program in 2D assuming plane strain condition. Taylor impact test is also simulated with axisymmetric assumption. The distribution of effective stress, effective plastic strain and temperature in the domain of all problems are computed. The penetration results are compared with experimental results while Taylor impact test results are compared with other numerical method results.

Key words:

Mesh free particle methods, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), High Velocity Impact (HVI), Thermo-visco-plastic, Taylor impact test, Axisymmetric.