بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

تحلیل ضربه درمواد غیر ایزوتروپ با روش SPH

استاد راهنما

دکتر علیرضا شفیعی

استاد مشاور

دکتر مجتبی محزون

پژوهش و نگارش

عدنان اقتصاد

بهمن ۱۳۸۹

تقدیم به:

حامی و دلسوز همیشگی، مادر عزیزم

پشتوانه محکم، پدربزرگ عزیزم

مشوق دائمی، پدر و برادر عزیزم

تقدیر:

با تشکر از اساتید گرامی، جناب آقای دکتر شفیعی و جناب آقای دکتر مخزون که در انجام این پروژه مرا یاری نمودند.

چکیده

تحلیل مسائل با مرزهای دارای تغییر شکل مداوم در طول حل مسئله، به خصوص درمسائل با تغییر شکل‌های زیاد که توام با اعوجاج بیش از حد المان‌ها و کاهش فاحش دقت در حل هستند، از نقاط ضعف روش‌ها ی مبتنی بر شبکه می‌باشد. برای حل این مشکلات، معمولا از روش‌های جایگزین مانند روش‌های بدون مش استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها که به طور خاص برای مسائل ضربه، نفوذ و شکست، قابلیت ویژه‌ای دارد، روش هیدرودینامیک ذرات هموار می‌باشد.

در پروژه حاضر، از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای تحلیل برخورد در مواد فلزی نرم و پیش‌بینی آسیب و شکست در مواد سرامیکی و مواد هدفمند استفاده می‌شود. برای افزایش دقت حل در مرزها از مدل اصلاح شده روش هیدرودینامیک ذرات هموار که اصطلاحا CSPM نامیده می‌شود، استفاده شده است. برای تحلیل فلزات نرم از مدل مقاومتی جانسون-کوک با ویژگی کرنش سختی و حرارت نرمی، و برای بررسی آسیب و شکست در مواد ترد مانند سرامیک از مدل شکست JHB بهره گرفته شده است که کاملترین مدل موجود برای تحلیل مواد ترد است. برای افزایش دقت حل در محاسبه تنش تسلیم، از معادله هدایت حرارتی با ضریب هدایت متغیر به منظور استخراج دامنه دمایی با دقت بیشتر بهره گرفته شده است. معادلات مقاومتی و شکست در ماده هدفمند به کمک فرمول‌بندی هلالی شبیه‌سازی شده‌اند. این مدل، بیشترین تاثیر را در کاهش تنش‌های پسماند در مواد مرکب و هدفمند داراست.

پروژه‌ی حاضر نشان می‌دهد که ترکیب روش اصلاح‌شده هیدرودینامیک ذرات هموار با مدل-های مقاومتی تسلیم جانسون-کوک شامل مدل هدایت حرارتی کارآمد و شکست JHB، به کمک فرمول‌بندی هلالی، با دقت بسیار خوبی می‌تواند رفتار ترکیبی تسلیم پلاستیک، آسیب و شکست ترد را در ماده غیر همگن هدفمند تحت بارهای ضربه‌ای و شرایط برخورد با سرعت‌های بسیار بالا پیش‌بینی کند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مکانیک ضربه ۱

۱-۱ مفهوم ضربه ۱

۱-۲ مروری بر تاریخچه مکانیک ضربه ۲

۱-۳ انواع مسائل ضربه ۳

۱-۳-۱ برخوردهای صلب ۴

۱-۳-۲ برخوردهای الاستیک-الاستیک ۴

۱-۳-۳ برخوردهای الاستیک-پلاستیک ۴

۱-۳-۳-۱ تئوری رفتار هیدرودینامیکی اجسام برخوردکننده ۵

۱-۳-۳-۲ تئوری انتشار موج پلاستیک یا جریان پلاستیک ۵

۱-۳-۳-۳ مسائل برخورد با سرعت‌های پایین ۵

۱-۳-۳-۴ مسائل برخورد با سرعت‌های بسیار بالا ۶

فصل دوم: روش‌های عددی ۱۴

۲-۱ مقدمه‌ای بر روش‌های عددی ۱۴

۲-۲ مراحل شبیه‌سازی عددی ۱۵

۲-۳ روش‌های عددی مبتنی بر شبکه ۱۷

۲-۴ محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه ۱۷

۲-۵ روش‌های عددی بدون مش ۱۹

۲-۵-۱ مروری بر تاریخچه روش‌های عددی بدون مش ۲۰

۲-۵-۲ انواع روش‌های بدون مش ۲۱

۲-۶ روش‌های بدون مش ذره‌ای ۲۲

۲-۶-۱ مروری بر تاریخچه روش‌های بدون مش ذره‌ای ۲۴

۲-۶-۲ مزایای روش‌های بدون مش ذره‌ای ۲۷

فصل سوم: روش هیدرودینامیک ذرات هموار ۲۸

۳-۱ روش ذره‌ای هیدرودینامیک ذرات هموار ۲۸

۳-۲ مروری بر تاریخچه روش هیدرودینامیک ذرات هموار ۳۱

۳-۳ فرمولاسیون روش هیدرودینامیک ذرات هموار ۳۲

۳-۳-۱ دامنه پوشش ۳۳

۳-۳-۲ طول هموارکننده متغیر ۳۴

۳-۳-۳ ذرات همسایه ۳۴

۳-۳-۴ مشخصات تابع کرنل ۳۵

۳-۳-۵ تقریب ذره‌ای در روش هیدرودینامیک ذرات هموار ۳۶

۳-۳-۶ تقریب انتگرالی مشتق تابع ۳۷

۳-۳-۷ تقریب ذره‌ای مشتق تابع ۳۸

۳-۳-۸ توابع کرنل ۳۹

۳-۳-۸-۱ کرنل زنگوله‌ای ۳۹

۳-۳-۸-۲ کرنل گوسی ۴۰

۳-۳-۸-۳ کرنل مرتبه دوم ۴۰

۳-۳-۸-۴ کرنل مرتبه سه معروف به کرنل B. Spline ۴۱

فصل چهارم: روش هیدرودینامیک ذرات هموار در مسائل ضربه‌ای با سرعت‌های بسیار بالا ۴۲

۴-۱ مقدمه ۴۲
۴-۲ پیوستگی ۴۳
۴-۳ مومنتم ۴۵
۴-۴ انرژی ۴۷
۴-۵ معادلات ساختاری ۴۸
۴-۶ امواج ضربه ۴۹
۴-۷ منحنی مرجع هوگونیت ۵۰
۴-۷-۱ منحنی $U-u$ ۵۰
۴-۷-۲ منحنی $P-v$ ۵۱
۴-۷-۳ منحنی $P-u$ ۵۲
۴-۸ معادلات حالت (EOS) ۵۳
۴-۸-۱ معادله حالت Mie-Gruneisen ۵۴
۴-۸-۲ معادله حالت Tillotson ۵۵
۴-۹ لزجت مصنوعی ۵۷
۴-۱۰ مدل مقاومتی ماده ۵۹
۴-۱۰-۱ مدل مقاومتی در مواد نرم ۵۹
۴-۱۰-۲ مدل شکست در مواد ترد ۶۰
۴-۱۰-۲-۱ مدل آسیب ۶۱
۴-۱۰-۲-۲ مدل مقاومت در برابر شکست ۶۲
۴-۱۱ معادله هدایت حرارتی ۶۳
۴-۱۲ مدل اصلاح شده CSPM ۶۴

فصل پنجم: مواد هدفمند ۶۵

۵-۱ مقدمه ۶۵

۵-۲ تاریخچه ۶۶

۵-۳ مواد هدفمند و کاربرد در صنعت ۶۷

۵-۴ انواع مواد هدفمند از لحاظ میکروساختار ۶۸

۵-۵ شبیه‌سازی مواد هدفمند ۷۱

۵-۵-۱ فرمول‌بندی توانی ۷۱

۵-۵-۲ فرمول‌بندی نمایی ۷۲

۵-۵-۳ فرمول‌بندی هلالی ۷۳

۵-۶ لزوم بررسی برخورد در مواد هدفمند ۷۵

۵-۷ انتخاب مدل شبیه‌ساز رفتارماده هدفمند مورد استفاده در تحلیل برخورد ۷۵

۵-۸ کمیت‌ها و ضرایب متغیر در مسئله برخورد ۷۶

فصل ششم: تحلیل عددی و نتایج ۷۷

۶-۱ مقدمه ۷۷

۶-۲ تایید صحت دقت کد ۷۸

۶-۲-۱ تشریح مدل تجربی ۷۸

۶-۲-۲ مقایسه تحلیل عددی هیدرودینامیک ذرات هموار با نتایج تجربی ۸۱

۶-۳ تحلیل برخورد در سرامیک با استفاده از روش SPH ۸۸

۶-۳-۱ شرح مسئله ۸۹

۶-۳-۲ اعمال شرایط مرزی ۹۱

۶-۳-۲-۱ شرط مرزی شائو ۹۱

۶-۳-۳ نتایج ۹۲

۶-۳-۳-۱ مقایسه زوایای مختلف برخورد ۹۲

۶-۴ تحلیل برخورد در ماده هدفمند فلز- سرامیک در روش SPH ۱۰۰

۶-۴-۱ نتایج ۱۰۰

فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات ۱۰۸

۷-۱ بحث در نتایج ۱۰۸

۷-۲ پیشنهادات.....۱۰۹

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱- ۱ نمونه‌ای از برخورد با سرعت پایین در آزمایش تیلور [۳] ۸

شکل ۱- ۲ مدل شبکه‌بندی شده مجموعه خودرو و مانع [۴] ۹

شکل ۱- ۳ طرح اولیه مجموعه خودروی مسابقه‌ای و مانع قبل از برخورد [۴] ۹

شکل ۱- ۴ کانتورهای تنش معادل و تغییر شکل برای زوایای مختلف برخورد. a) تنش معادل و b) جابه‌جایی [۴] ۱۰

شکل ۱- ۵ نفوذ در سازه فولادی در برخورد با سرعت‌های بسیار بالا [۵] ۱۱

شکل ۱- ۶ نفوذ کامل در برخورد با سرعت‌های بسیار بالا [۶] ۱۲

شکل ۱- ۷ خرد شدن در برخورد با سرعت‌های بسیار بالا در نواحی اطراف برخورد [۶] ۱۳

شکل ۱- ۸ قطعه قطعه شدن در مسئله برخورد در تست تیلور [۲] ۱۳

شکل ۲- ۱ مراحل تحلیل عددی [۷] ۱۶

شکل ۲- ۲ نمونه‌ای از اعوجاج بیش از حد المان‌ها در مسائل برخورد با سرعت‌های بالا [۶] ۱۹

شکل ۲- ۳ گسسته‌سازی دامنه حل به کمک ذرات [۷] ۲۵

شکل ۳- ۱ بیان جریان سطحی سیال به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار (حرکت سیال درون محفظه) [۳۲] ۲۹

شکل ۳- ۲ بیان جریان سطحی سیال به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار (جریان آزاد پس از باز کردن دریچه سد) [۳۲] ۲۹

شکل ۳- ۳ انواع نواحی پوشش [۷] ۳۳

شکل ۳- ۴ توزیع ذرات همسایه در دامنه پوشش [۷۹] ۳۴

شکل ۴- ۱ انتشار امواج ضربه در اثر برخورد دو صفحه آلومینیمی ۴۹

شکل ۴- ۲ جبهه موج ضربه و کمیتهای فیزیکی اطراف آن ۵۰

شکل ۴- ۳ منحنی $U - u$، برای ماده 6061 Aluminum [۵] ۵۱

شکل ۴- ۴ منحنی هوگونیت $P-v$ [۵] ۵۲
شکل ۴- ۵ منحنی هوگونیت $P-u$ ۵۳
شکل ۴- ۶ منحنی ترمودینامیکی فشار-حجم برای معادله حالت تیلتسون [۵] ۵۶
شکل ۵- ۱ نحوه تغییرات خواص فیزیکی در a) کامپوزیت و b) ماده هدفمند ۶۶
شکل ۵- ۲ ماده هدفمند با ساختار ذره‌ای [۱۰۷] ۶۸
شکل ۵- ۳ ماده هدفمند با ساختار ذره‌ای [۱۰۸] ۶۹
شکل ۵- ۴ مواد هدفمند با ساختار اسکلتی [۱۰۹] ۷۰
شکل ۵- ۵ مواد هدفمند با ساختارستونی [۱۰۹] ۷۰
شکل ۵- ۶ نحوه قرار گرفتن دستگاه مختصات بر روی ماده هدفمند برای بیان تغییرات کمیت های فیزیکی در راستای ضخامت ۷۱
شکل ۵- ۷ منحنی تغییرات کمیت دلخواه X برای مقادیر مختلف p در راستای ضخامت ماده هدفمند در مدل توانی [۱۱۲] ۷۲
شکل ۵- ۸ منحنی تغییرات کمیت دلخواه X در راستای ضخامت ماده هدفمند در مدل نمایی [۱۱۲] ۷۳
شکل ۵- ۹ منحنی تغییرات کمیت دلخواه X برای مقادیر مختلف p در راستای ضخامت ماده هدفمند در مدل هلالی [۱۱۲] ۷۴
شکل۶- ۱ نمای جانبی از دستگاه متداول تست برخورد در سرعت‌های بالا [۱۱۵] ۷۹
شکل۶- ۲ نمونه‌ای از دستگاه تست برخورد با سرعت‌های بالا مشهور به دستگاه دلتا [۱۱۷] ... ۸۰
شکل۶- ۳ دستگاه‌های تست برخورد با سرعت‌های بالا در سازمان نیروی هوایی آرنولد [۱۱۶] . ۸۰
شکل۶- ۴ طرح شماتیکی از گلوله و صفحه قبل از برخورد [۱۱۵] ۸۱
شکل۶- ۵ پیکربندی اولیه ذرات در گلوله و مانع ۸۲
شکل۶- ۶ کانتور توزیع چگالی ($kg/m3$) در گلوله و مانع در زمان ۲۰μs پس از برخورد ۸۵
شکل۶- ۷ کانتور توزیع سرعت (m/s) در گلوله و مانع در زمان ۲۰μs پس از برخورد ۸۶

شکل۶- ۸ کانتور توزیع تنش ون میس (Pa) در گلوله و مانع در زمان ۲۰μs پس از برخورد ... ۸۶
شکل۶- ۹ کانتور توزیع بردارهای سرعت در گلوله و مانع در زمان ۲۰μs پس از برخورد ۸۷
شکل۶- ۱۰ نمایی از قطر حفره ایجاد شده در مانع و طول و پهنای توده ابر تشکیل شده در پشت مانع در زمان ۲۰μs پس از برخورد a) نتایج تحلیل SPH b) نتایج تجربی ۸۷
شکل۶- ۱۱ شماتیکی از مدل SPH پرتابه و مانع سرامیکی قبل از برخورد ۹۰
شکل۶- ۱۲ بیان شرایط مرزی در الگوریتم هیدرودینامیک ذرات هموار به کمک ذرات مجازی ۹۳
شکل۶- ۱۳ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد نرمال به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۴
شکل۶- ۱۴ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه ° ۱۵ به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۵
شکل۶- ۱۵ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه ° ۳۰ به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۶
شکل۶- ۱۶ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه ° ۴۵ به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۷
شکل۶- ۱۷ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه ° ۶۰ به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۸
شکل۶- ۱۸ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه ° ۸۰ به سرامیک a) توزیع چگالی b) توزیع سرعت c) توزیع آسیب ۹۹
شکل۶- ۱۹ نحوه تغییرات تدریجی کمیت چگالی در ماده هدفمند ۱۰۱
شکل۶- ۲۰ پیکربندی اولیه ذرات قبل از برخورد در ماده هدفمند..... ۱۰۲
شکل۶- ۲۱ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد نرمال به ماده هدفمند سرامیک- فلز a) توزیع سرعت b) توزیع آسیب ۱۰۳

شکل۶- ۲۲ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه° ۱۵ به ماده هدفمند سرامیک- فلز a) توزیع سرعت b) توزیع آسیب ۱۰۴
شکل۶- ۲۳ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه° ۳۰ به ماده هدفمند سرامیک- فلز a) توزیع سرعت b) توزیع آسیب..... ۱۰۵
شکل۶- ۲۴ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویـه° ۴۵ به ماده هدفمند سرامیک- فلز a) توزیع سرعت b) توزیع آسیب ۱۰۶
شکل۶- ۲۵ کانتورهای کمیت‌های فیزیکی در گام‌های زمانی متفاوت در برخورد با زاویه° ۶۰ به ماده هدفمند سرامیک- فلز a) توزیع سرعت b) توزیع آسیب ۱۰۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲- ۱ متداول‌ترین روش‌های عددی بدون مش [۷] ۲۳

جدول ۲- ۲ متداول‌ترین روش‌های عددی بدون مش ذره‌ای [۷] ۲۶

جدول ۶- ۱ مقادیر بهدست آمده برای قطر حفره و نسبت طول به عرض توده ابر حاصله در تست تجربی پس از گذشت ۲۰μs از شروع برخورد ۸۱

جدول ۶- ۲ خواص فیزیکی آلومینیم ۸۳

جدول ۶- ۳ ثوابت رابطه تسلیم جانسون- کوک ۸۳

جدول ۶- ۴ پارامترهای معادله حالت Gruneisen ۸۳

جدول ۶- ۵ ثوابت معادله حالت Tillotson ۸۴

جدول ۶- ۶ مقادیر به دستآمده برای قطر حفره و نسبت طول به عرض توده پس از گذشت ۲۰μs از شروع برخورد ۸۴

جدول ۶- ۷ درصدخطای بین نتایج تجربی و الگوریتم SPH در برخورد گلوله آلومینیمی به ورق آلومینیمی ۸۵

جدول ۶- ۸ ویژگیهای فیزیکی سرامیک آلومینیم نیترید ۸۸

جدول ۶- ۹ ثوابت مربوط به معادله حالت سرامیک ۸۹

فصل اول

مکانیک ضربه

۱-۱ مفهوم ضربه

پدیده برخورد در شرایط مختلفی مانند ضربه زدن میخ توسط چکش، بازی بیلیارد، تصادف اتومبیل، برخورد شهاب‌سنگ به ماهواره‌ها و . . . وجود دارد. نکته قابل توجه این است که مفهوم برخورد فیزیکی از مفهوم بار ضربه‌ای[1] ، که در آن فقط یک جسم جامد وجود دارد و نه چندین جسم، کاملا جداست. در پروژه حاضر، مقصود از ضربه در واقع همان ضربه فیزیکی است که در آن اجسام با یکدیگر اصابت می‌کنند.

اجسام برخوردکننده در ناحیه برخورد تولید امواجی می‌کنند که در طول فرآیند برخورد در آن‌ها انتشار می‌یابد. در برخی موارد، برخورد اجسام منجر به نفوذ یکی در دیگری می‌شود و این

[1] Impulsive loading

میزان نفوذ بستگی به موارد مختلفی چون زاویه برخورد، جنس مواد تشکیل‌دهنده اجسام برخورد-کننده، شکل هندسی، محیط رخداد فرآیند برخورد و ... دارد.

۱-۲ مروری بر تاریخچه مکانیک ضربه [۱]

اولین مفاهیم برخورد، بر روی اجسام صلب مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهای مختلف موثر در اتلاف انرژی در حین برخورد اجسام صلب مورد تحقیق و بررسی واقع شد. نتایج به دست آمده از مطالعات اولیه در این زمینه هنوز هم در کتاب‌های مختلف دینامیک اجسام صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک مرحله مهم در پیشرفت مسائل برخورد، آنالیز یک بعدی ارتعاشاتی اجسام برخوردکننده بود. پس از آن پیشرفت‌های انجام شده در زمینه تئوری الاستیسیته، آنالیز چند بعدی انتشار امواج در اجسام و بررسی تنش‌های ایجاد شده در ناحیه تماس را امکان‌پذیر ساخت.

آنالیز اولیه برخورد صلب، توسط گالیله انجام گرفت. او دریافت که برخورد، قابلیت انجام کار را دارد. اما در ارتباط با مفاهیم انرژی و مومنتوم در این زمینه ایده‌های مورد قبولی ارائه نداد. نیوتون نه تنها قوانین مربوط به حرکت را ارائه داد، بلکه ضریب بازگشت در مسائل برخورد را مد نظر قرار داد که هم‌اکنون نیز در دینامیک اجسام صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نظریه‌های بیشتر در زمینه برخورد صلب اجسام توسط مارسی[1] و هویگنز[2] موجود است. آنالیز ارتعاشات به وجود آمده در میله‌های الاستیکی تحت برخورد طولی، در ابتدا توسط برنولی، ناویر و پواسون انجام شد.

یانگ و کاکس[3]، روابط ساده‌ای را برای ارتعاشات دینامیکی عرضی تیرها تحت ضربه به دست آوردند. یک مدل کامل برای آنالیز یک‌بعدی طولی و عرضی میله‌ها تحت ضربه توسط سن و نان و بوسینسک[1] ارائه شد.

[1] Marci
[2] Huygens
[3] Cox

در برخی از تحقیقاتی که در قرن نوزدهم انجام شد، سعی بر آن بود که بین روابط تجربی و روابط تئوری در ارتعاشات، با در نظر گرفتن یک لایه شبه استاتیکی در محل تماس، ارتباط برقرار شود. این مفهوم نهایتا منجر به تئوری هرتز در زمینه تماس محلی شد. تئوری هرتز، علیرغم مفهوم پایه‌ای استاتیکی و الاستیک بودنش، کاربردهای وسیعی در مسائل مختلف داراست. سییرز[۲] قانون تماس هرتز را به برخوردهای طولی اعمال کرد و تیموشنکو از نتیجه سییرز برای آنالیز برخورد یک کره به یک تیر به صورت عرضی استفاده کرد. هم‌چنین در این زمینه، اشکال مختلفی چون ورق، تیرهای چندقسمتی[۳] و ستون‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند.

بررسی برخوردهای الاستیک-پلاستیک و محاسبه کرنش‌های پلاستیک در آن‌ها توسط دانل[۴] مطرح شد. در پی آن تئوری‌های کامل‌تری توسط کارمن[۵] و دوئز[۶]، تیلور، لی[۷] و سیموندز[۸]، مالورن[۹] و سایرین بیان شد، و تلاش‌های زیادی برای کاهش دشواری‌های موجود در حل عددی این‌گونه مسائل به انجام رسید.

۱-۳ انواع مسائل ضربه

مسائل برخورد، از لحاظ رفتار مواد در هنگام برخورد، به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- برخوردهای صلب

۲- برخوردهای الاستیک-الاستیک

۳- برخوردهای الاستیک-پلاستیک

---

[1] Boussinesq
[2] Sears
[3] Multi-Span Beams
[4] Donnell
[5] Karman
[6] Duwez
[7] Lee
[6] Symonds
[9] Malvern

۱-۳-۱ برخوردهای صلب

در این دسته از مسائل، برخورد به صورت کاملا صلب انجام می‌شود و تحلیل آن‌ها به کمک قوانین بقای مومنتم برای اجسام صلب انجام می‌پذیرد. در میان انواع مسائل ضربه، کمترین پیچیدگی در معادلات ریاضی مربوط به این دسته مسائل است. در این‌گونه مسائل، به تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل‌های گذرا پرداخته نمی‌شود و فقط با استفاده از سرعت‌های اولیه و نهایی برخورد به کمک قوانین ضربه-مومنتم، مسائل بررسی می‌شوند.

۱-۳-۲ برخوردهای الاستیک-الاستیک

در این دسته از مسائل برخورد، بیشتر به جنبه ارتعاشاتی مسئله و انتشار امواج بر مبنای نظریه الاستیک خطی پرداخته می‌شود. در این نوع مسائل برخورد، به کمک روابط موجود در تئوری الاستودینامیک (روابط هوک و ناویر برای تنش‌ها وکرنش‌ها)، می‌توان تنش‌ها، نیروها و جابه‌جایی-ها را در محدوده الاستیک خطی استخراج کرد.

۱-۳-۳ برخوردهای الاستیک-پلاستیک

در این‌گونه برخوردها، به علت سرعت زیاد برخورد، انرژی جنبشی اجسام برخوردکننده منجر به تغییر شکل پلاستیک در ناحیه برخورد شده، و مقدار زیادی از این انرژی به حرارت تبدیل می‌شود. در نتیجه، دمای اجسام در ناحیه برخورد، تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد. معادلاتی که برای حل این‌گونه مسائل به کار می‌روند، باید بیان کننده رفتار مواد در کرنش‌های زیاد باشند.

برای لحاظ کردن کرنش‌های پلاستیک در حل این نوع مسائل، از دو دیدگاه اصلی استفاده می شود:

۱- تئوری رفتار هیدرودینامیکی اجسام برخوردکننده

۲- تئوری انتشار موج پلاستیک یا جریان پلاستیک

۱-۳-۳-۱ تئوری رفتار هیدرودینامیکی اجسام برخوردکننده

در این تئوری، رفتار محیط پیوسته مورد بررسی، مانند یک سیال تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود که توانایی تحمل تنش برشی را ندارد و از یک ویسکوزیته مصنوعی برای جلوگیری از نوسانات بیش از حد در حل مسئله استفاده می‌شود.

در واقع با به وجود آمدن امواج ضربه در این مسائل، تغییرشکل‌های به وجودآمده اغلب ناشی از تغییر در مدول حجمی ماده یا به عبارت ساده‌تر، تغییر در چگالی ماده است.

در این تئوری، قوانین بقای جرم و مومنتم و انرژی به همراه معادله حالت ماده، فرمول‌بندی مسئله را تشکیل می‌دهند. معادله حالت ماده، در حقیقت، رابطه‌ای ترمودینامیکی است که ارتباط فشار و چگالی ماده را در دماهای مختلف، بیان می‌کند.

۱-۳-۳-۲ تئوری انتشار موج پلاستیک یا جریان پلاستیک

در این دیدگاه، از قوانین پایه در تئوری پلاستیسیته استفاده می‌شود. ماده به صورت جسم جامدی با مدول برشی محدود در نظر گرفته می‌شود و رفتار آن به کمک روابط الاستیک-پلاستیک موجود برای تنش، کرنش و نرخ کرنش بررسی می‌گردد (معادلات ساختاری).

برخوردهای الاستیک-پلاستیک از لحاظ سرعت برخورد اجسام، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- مسائل برخورد با سرعت‌های پایین (گستره‌ی سرعتی ۰- ۴۰۰ متر بر ثانیه)

۲- مسائل برخورد با سرعت‌های بسیار بالا (گستره‌ی سرعتی ۲۰۰۰- ۱۰۰۰۰ متر بر ثانیه)

۱-۳-۳-۳ مسائل برخورد با سرعت‌های پایین

در این دسته از برخوردها، رفتار مواد درست در ناحیه برخورد، بیشتر به صورت الاستیک-پلاستیک بوده و با دور شدن از ناحیه برخورد، رفتار ماده اغلب به صورت الاستیک خطی مشاهده می‌شود. معادلات موج در این دسته از مسائل نقش مهمی را در تحلیل ضربه وارد شده ایفا می‌کنند. معادلات موج را بر روی یک موج ضربه‌ای ناشی از برخورد می‌توان به صورت زیر بیان کرد: