



مباحثی از

مکانیک ضربه و انفجار

شرحی بر کاربردهای ضربه و انفجار، انتشار امواج تنش، تحلیل پلاستیک سازه‌ها، مکانیک نفوذ پرتابه‌ها، جاذبه‌های ضربه، انفجار در هوا، تئوری انفجار و موج شک، و روش‌های عددی در تحلیل مسائل ضربه و انفجار
قابل استفاده دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مواد، عمران، پدافند غیرعامل و...

تألیف:

دکتر حسین خدارحی

دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

سرشناسه: خدارحمی - حسین - ۱۳۴۳
 عنوان و نام پدیدآور: مباحثی از مکانیک ضربه و انفجار / تألیف: حسین خدارحمی
 مشخصات نشر: سمتان: موسسه آموزش عالی ایوانکی، ۱۳۹۴.
 مشخصات ظاهری: ۳۰۰ص: مصور، جدول، نمودار
 شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۸۳۰۰۰۳-۱
 وضعیت فهرست نویسی: فیبا
 موضوع: مکانیک ضربه - مکانیک انفجار
 موضوع: پدافند غیرعامل
 رده بندی کنگره: ۱۳۹۳ ق ۴/م ۲/ BV۴۷۴۰
 رده بندی دیویی: ۶۲۱/۴
 شماره کتابشناسی ملی: ۳۷۵۱۱۱۶



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
 موسسه آموزش عالی ایوانکی

مباحثی از مکانیک ضربه و انفجار

تألیف: حسین خدارحمی

ناشر: موسسه آموزش عالی ایوانکی

مدیر تولید: مهدی عالی

ناظر فنی چاپ: فرزانه تنکفی

خدمات صفحه آرایی چاپ و صحافی: موسسه انتشاراتی جهان جام جم

نوبت و سال چاپ: اول - ۱۳۹۴

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۱۹۸۰۰ تومان

www.pub.eyc.ir

نشانی نشر: ایوان کی - بلوار آیت اله طالقانی - خیابان دانشگاه - دانشگاه ایوان کی

نشانی توزیع: تهران- میدان انقلاب- خیابان کارگر جنوبی- خیابان لبافی نژاد غربی - انتهای کوچه سیمین - پلاک ۵

تلفکس: ۶۶۵۹۶۶۱۸ - تلفن: ۶۶۹۲۶۶۳۴ - ۶۶۵۶۵۸۲۵

پیش‌گفتار

نظام مقدس جمهوری اسلامی ایران حاصل خون هزاران شهیدی است که با مجاهدت خود زمینه‌های پیروزی انقلاب اسلامی را پس از ۱۴ قرن از بعثت نبی گرامی (ص) و انقلاب صدر اسلام فراهم نمودند. شهادت ابا عبدالله‌الحسین (ع) و یارانش در کربلا و تلاش و مجاهدت زینب کبری (س) و امام سجاد (ع) و سایر ائمه اطهار (ع) برای زنده نگه داشتن پیام عاشورا با هدف حفظ اسلام و هدایت و تعالی انسان‌ها بر مبنای تعالیم مرفعی مکتب اسلام واقع شد. در طول صدها سال گذشته، مجاهدت علمای بزرگ شیعه و فداکاری و مبارزه آنها با آرزوی تحقق نظام اسلامی بر مبنای عدالت و پیاده‌سازی احکام نورانی اسلام صورت گرفت. این تلاش و مبارزه ادامه یافت تا با انفجار نور انقلاب اسلامی به رهبری امام عظیم‌الشان خمینی کبیر (رض) این آرزو و رؤیای دیرینه با اراده الهی محقق شد و با پیروزی انقلاب، نظام مقدس جمهوری اسلامی حاکم گردید. فجر انقلاب، امیدی در دل محرومین جهان زنده نمود و راه رسیدن جدیدی را در مقابل آنان گشود که برخلاف میل زورگویان و ستمکاران بود. لذا مکر و حيله شیطان، ای محدود نمودن پیام انقلاب منجر به جنگ تحمیلی شد ولی رشادت و شهادت‌طلبی رزمندگان اسلام، آن را فرصتی برای تحکیم پایه‌های انقلاب مبدل نمود. شهدای مظلوم دفاع مقدس در پاسخ ندای امام‌شان که فرمود: "حفظ نظام از اوجب واجبات است"، با هدف حفظ نظام اسلامی خون خود را هدیه نمودند و امروز حفظ این میراث گرانبهادر ابعاد مختلف بر عهده همه ما ست. پیشرفت علمی کشور یکی از ابعاد این مبارزه است، که به جد مورد تأکید رهبر فرزانه انقلاب امام خامنه‌ای عزیز قرار دارد.

مباحث مکانیک ضربه و انفجار هم از جهت صنعتی کاربردهای گسترده‌ای دارد و هم از جهت دفاعی، و برای آنان که ابزار علم را وسیله‌ای برای جهاد در راه خدا می‌خواهند، این موضوع جذابیت‌های ویژه‌ای دارد. موضوع بارگذاری ضربه‌ای و انتشار موج ضربه، جذب انرژی، مکانیک نفوذ پرتابه و شناخت پارامترهای انفجار، از موضوعاتی است که علاوه بر کاربردهای صنعتی از قبیل شکل‌دهی انفجاری، جوشکاری انفجاری و مکانیزم‌های جاذب انرژی در خودروها و... در کاربردهای مهم دفاعی همچون طراحی پرتابه‌ها، مهمات، سرچنگی‌ها، انواع زره‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نقش ویژه‌ای دارد.

کتاب حاضر قدم بسیار کوچکی در مسیر گسترش علوم کاربردی، با هدف صیانت از دستاوردهای انقلاب و پاسداری از آن است. در فصل اول تعاریف کلی از بارگذاری ضربه‌ای و تفاوت آن با بارگذاری

استاتیکی بیان شده و کاربردهای متنوعی از موضوعات ضربه و انفجار در بخش‌های صنعتی و دفاعی ارائه شده است. در فصل دوم معادلات موج، انتشار موج الاستیک و انعکاس و انتقال امواج، برخورد اجسام و شکست‌های ناشی از بار ضربه‌ای بحث شده است. در فصل سوم انتشار امواج الاستیک - پلاستیک و در فصل چهارم تحلیل پلاستیک و فروریزش سازه‌ها آمده است.

فصل پنجم در زمینه مکانیک نفوذ پرتابه‌ها بوده و برخی از مدل‌های تحلیلی و روابط تجربی نفوذ ارائه شده است. در فصل ششم جاذب‌های ضربه و روش‌های جذب انرژی ضربه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. فصل هفتم در زمینه انفجار در هوا، پارامترهای انفجار، انعکاس موج انفجار و اثرات انفجار بر سازه‌های ساختمانی و بدن انسان بحث شده است. در فصل هشتم تئوری انفجار و موج شک و در فصل نهم نکات مهمی در زمینه شبیه‌سازی عددی مسائل ضربه و انفجار ارائه شده است. اگرچه کتاب حاضر حاصل چندین سال تدریس در این حوزه‌ها بوده است، ولی از نظر نگارنده بسیار جای اصلاح، تکمیل و ارتقاء دارد. لذا از تمامی مخاطبان محترم از جمله اساتید، دانشجویان و محققین گرامی تقاضا دارد که نظرات اصلاحی خود را برای اعمال در چاپ‌های بعدی به آدرس اینجانب ارسال نمایند.

و کلام آخر:

این ناچیز را با احترام تقدیم می‌کنم. شهدای مظلوم دفاع از حرم و حریم اهل بیت (ع) و

شهید سرافرازمان محبت آژند

روحشان شاد و راهشان پر رهبر باد.

به امید پیروزی نهایی و ظهور حضرت حجت (عجل الله تعالی فرجه الشریف)

حسین خدارحمی ۲۲ بهمن ۱۳۹۴

ایمیل: hkhdrhmi@ihu.ac.ir

مقدمه

۳

فصل اول: مکانیک ضربه و کاربردهای آن

۱-۱- بارگذاشتن دینامیکی و ضربه‌ای

۲-۱- کاربردهای متنوع مکانیک ضربه و انفجار

فصل دوم: انتشار موج تنش الاستیک ناشی از بار ضربه‌ای

۱-۲- مقدمه

۲-۲- انتشار موج تنش بعدی موج ضربه‌ای

۳-۲- سرعت موج تنش طولی الاستیک

۴-۲- انتشار موج تنش محوری در سازه‌های ترکیبی صفحه‌ای

۵-۲- انتشار موج تنش محوری برای ماده‌های چند جهت‌های عرضی

۶-۲- رابطه شدت تنش با سرعت موج و ذرات

۷-۲- انتشار موج پیچشی

۸-۲- ترکیب یا جمع آثار امواج تنش

۹-۲- انعکاس امواج تنش

۱۰-۲- برخورد هم محور دو میله با سطح مقطع یکسان و امپدانس صوتی

۱۱-۲- برخورد هم محور میله‌های یکسان

۱۲-۲- برخورد دو میله همجنس با طول‌های نابرابر با سرعت مساوی

۱۳-۲- انتقال انرژی و مومنتم در برخورد ۳ میله یکسان

۱۴-۲- برخورد هم محور دو میله غیر همجنس و سطح مقطع نابرابر

۱۵-۲- انتقال و انعکاس موج تنش در میله دارای ناپیوستگی

۱۶-۲- انتقال و انعکاس موج تنش در میله ۳ پله

۱۷-۲- انتقال و انعکاس امواج پیچشی در میله دارای ناپیوستگی

۱۸-۲- برخورد محوری یک وزنه صلب به انتهای آزاد یک میله بلند یکسره گیردار

۱۹-۲- برخورد محوری یک وزنه صلب به انتهای یک میله آزاد

۲۰-۲- سقوط وزنه روی صفحه انتهایی یک میله

۲۱-۲- شمع کوب

۴۴	۲-۲۲-تله مومنتم یا اندازه حرکت
۴۶	۲-۲۳-میله فشار هاپکینسون
۴۶	۲-۲۴-اسپالینگ یا اسکینگ در میله‌ها و صفحات
۵۰	۲-۲۵-اسپالینگ چندگانه در یک میله بتونی
۵۲	۲-۲۶-شکست اسکینگ در سنگ‌ها
۵۳	۲-۲۷-اسپالینگ چند گانه در میله تحت ضربه
۵۶	۲-۲۸-کمانش میله‌ها در اثر بار ضربه‌ای
۵۷	۲-۲۹-تنشهای حرارتی دینامیکی
۵۷	۲-۳۰-انرژی موج الاستیک در یک صفحه نازک
۵۹	۲-۳۱-شار موج الاستیک در اجسام ایزوتروپ ۳ بعدی: امواج بدنی
۶۱	۲-۳۲-امواج برشی یا حجم ثابت
۶۲	۲-۳۳-امواج غیر برشی یا حجمی
۶۵	فصل سوم: اندامها - امواج تنش الاستیک - پلاستیک
۶۵	۳-۱-امواج تنش الاستیک - پلاستیک
۶۹	۳-۲-موج باربرداری
۷۰	۳-۳-برخورد یک میله یکنواخت با اول محدود به یک مانع صلب
۷۲	۳-۴-تحلیل دینامیکی فشرده‌گی یک میله استوانه‌ای کوتاه در بین یک پرس
۷۵	۳-۵-تحلیل یک میله استوانه‌ای روی میله صلب تحت ضربه حاصل از برخورد جرم
۷۷	۳-۶-بررسی مدل‌های برخورد پرتابه تغییر فرم پذیر به سطح صلب
۸۹	فصل چهارم: تحلیل پلاستیک سازه‌ها تحت بار ضربه‌ای
۸۹	مقدمه:
۸۹	۴-۱-فشرده‌گی سریع استوانه کوتاه
۹۱	۴-۲-تنش‌های الاستیک - پلاستیک در استوانه تحت فشار
۹۳	۴-۳-خمش پلاستیک تیرها
۹۴	۴-۴-محاسبه بار فروریزش (Collapse) در تیرها به کمک لولای پلاستیک
۹۵	۴-۵-لولای پلاستیک در حلقه‌های دایره‌ای
۹۶	۴-۶-لولای پلاستیک در قاب‌ها
۹۶	۴-۷-مخازن جدار نازک تحت فشار داخل
۹۶	۴-۸-فروریزش پلاستیکی در ورق‌های تخت و نازک
۱۰۱	۴-۹-بار دینامیکی روی ورق‌ها
۱۰۲	۴-۱۰-ورق چهارگوش تحت بار دینامیکی
۱۰۳	۴-۱۱-پوسته استوانه‌ای جدار نازک
۱۰۷	فصل پنجم: مکانیک برخورد و نفوذ پرتابه در هدف

۱-۵- مقدمه

۱۰۷

۲-۵- تعاریف و مفاهیم اولیه

۱۰۸

۳-۵- بررسی مدل‌های تحلیلی و روابط تجربی نفوذ پرتابه‌های صلب

۱۱۶

۴-۵- بررسی مدل‌های نفوذ پرتابه‌های تغییرفرم‌پذیر

۱۳۵

فصل ششم: جاذب‌های ضربه مکانیکی

۱۶۳

۱-۶- مقدمه

۱۶۳

۲-۶- لهیدگی لوله‌های استوانه‌ای تحت بار محوری فشاری

۱۶۴

۳-۶- لهیدگی پیشرونده دینامیکی در لوله‌های استوانه‌ای

۱۷۱

۴-۶- لهیدگی محوری در لوله‌های شیاردار تحت بار محوری

۱۷۲

۵-۶- وارو سی‌ر جاذب‌های استوانه‌ای تحت بار محوری

۱۷۷

۶-۶- لهیدگی محوری در لوله‌ها همراه با شکافته شدن دیواره آنها

۱۸۰

۷-۶- لهیدگی شعاعی لوله‌های فلزی تحت بار خارجی

۱۸۲

۸-۶- تیرهای لوله‌ای تحت بار عرضی

۱۸۳

فصل هفتم: انفجار در همراه اثرات زمین

۱۸۵

۱-۷- مقدمه

۱۸۵

۲-۷- موج انفجار یا موج بلست

۱۸۶

۳-۷- انتشار موج شاک در هوا و فشار دینامیکی

۱۹۳

۴-۷- انعکاس یا اندرکنش امواج انفجار با زمین و سازه‌ها

۱۹۵

۵-۷- انفجار سطحی

۲۰۲

۶-۷- اثرات موج شاک ناشی از انفجار

۲۰۳

۷-۷- آسیب ساختمانها در اثر موج انفجار

۲۰۵

۸-۷- مقاومت ساختمان‌ها

۲۰۹

۹-۷- آسیب‌های کلی و موضعی ناشی از انفجار بر سازه‌ها

۲۱۱

۱۰-۷- اثرات بلست بر بدن انسان

۲۱۳

فصل هشتم: تئوری انفجار و موج شاک

۲۱۹

۱-۸- مقدمه

۲۱۹

۲-۸- تئوری حاکم بر انفجار

۲۱۹

۳-۸- تئوری حاکم بر موج شوک

۲۲۱

۴-۸- تعیین پارامترهای حالت یک ماده تحت موج شوک

۲۲۵

۵-۸- انتقال موج شوک از یک محیط به محیط دیگر

۲۲۸

فصل نهم: روش‌های عددی در حل مسائل ضربه و انفجار

۲۳۱

۱-۹- مقدمه

۲۳۱

۲۳۱ ۹-۲- کلیات و مفاهیم اساسی در شبیه‌سازی عددی مسائل ضربه و انفجار

۲۳۶ ۹-۳- معرفی اجمالی کد LS-DYNA

۲۳۷ ۹-۴- شرحی بر مدل‌های مادی و معادلات حالت

۲۷۱ مراجع

www.ketab.ir

آشنایی با مفاهیم اولیه انتشار موج تنش، تغییرفرم‌های سریع و بارگذاری ضربه‌ای امروزه یک نیاز اساسی برای مهندسين است. بارگذاری ضربه‌ای در بسیاری از حوادث اطراف ما اتفاق می‌افتد. تصادف خودرها، برخورد هواپیما، قطار، کشتی و ...، برخورد شهاب‌سنگ‌ها به ماهواره‌ها و فضاپیماها، برخورد گلوله به اهداف مختلف، انفجار بمب‌ها و بارهای حاصل از انفجار بر روی مخازن و ساختمان‌ها و نمونه‌ای از بارهای ضربه‌ای است.

یک بار دینامیکی سبب انتشار امواج الاستیک و پلاستیک درون اجسام و سازه‌ها شده و می‌تواند سبب شکست اجسام شود. بسیاری از پدیده‌های فیزیکی و شکست ایجاد شده در قطعات و سازه‌ها جز با مفاهیم انتشار موج و مکانیک ضربه قابل تفسیر نیستند. این پدیده‌ها می‌تواند در زمانهای از مرتبه میکروثانیه اتفاق بیافتد. تحقیقات انجام شده در زمینه مکانیک ضربه منجر به رشد توان طراحی سیستم‌ها و سازه‌ها شده است. طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، افزایش ایمنی سرنشین‌ها در حوادث خودرویی از طریق استفاده از جاذب‌های ضربه در بدنه و سپر خودروها، استفاده از سیستم‌های جاذب ضربه در ساختمانها از قبیل گارد ریل، مقاوم سازی بدنه خودروها در برابر گلوله، طراحی جلیقه‌ها و کلاه‌خود برای پلیس، مقاوم سازی راکتورهای اتمی در برابر حملات و برخورد هواپیما و موشک، مقاوم سازی خودروهای حمل مواد هسته‌ای، طراحی فلاسک‌های حمل مواد هسته‌ای مقاوم در برابر سقوط و بارهای ضربه‌ای، و طراحی مقاوم در برابر انفجار نمونه‌هایی از کاربردهای علم مکانیک ضربه است.

در طراحی سازه‌ها و قطعات معمولاً بارگذاری بصورت استاتیکی فرض می‌شود، که این فرض می‌تواند در بسیاری از مسائل فرض نادرستی باشد. توجه به این نکته که مواد تحت اثر بارهای ضربه‌ای و دینامیکی رفتار متفاوتی نشان می‌دهد و خواص آنها تغییر می‌کند، اهمیت مطالعه و بررسی در این زمینه را روشن‌تر می‌کند.

بارهای دینامیکی را می‌توان به دو نوع بار دینامیکی گذرا و بار ضربه‌ای تقسیم کرد. در بار دینامیکی گذرا، محدوده زمانی اعمال بار هرچند کوتاه است ولی در مقایسه با زمان پیشرفت موج تنش قابل ملاحظه است. اگر زمان اعمال بار خیلی کم شود و در عین حال مقدار بار محدود نگهداشته شود، بار ضربه‌ای نامیده می‌شود. در بارگذاری دینامیکی گذرا عمدتاً مباحث ارتعاش سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و در بارهای ضربه‌ای تحلیل سازه و محاسبه تنش‌ها و تغییرفرم‌ها و شکست بیشتر مورد توجه است.

www.ketab.ir