

۱۲۸۱۹۵۳

مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی مسائل کلاسیک ضربه با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA

نگارندگان:

دکتر محسن لیاقت

(استاد مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس)

دکتر سجاد منوری

(دانش‌آموخته دانشگاه تربیت مدرس و عضو هیأت علمی دانشگاه ولیعصر «عج» رفسنجان)

دکتر هادی صبوری

(دستیار پژوهشی، دانشگاه تربیت مدرس)

۱۳۹۲



سرشناسه: لیاقت، غلامحسین، ۱۳۳۸ - مدیر مسئول
عنوان و نام پدیدآور: مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی مسایل کلاسیک ضربه با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA
نگارندگان غلامحسین لیاقت، سجاد صیغوری، هادی صبوری.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، ۱۳۹۲.

مشخصات ظاهری: ۳۶۴ ص. مصوره، جدول.

شابک: 978-600-5394-83-2

وضعیت فهرست نویسی: فیا

یادداشت: واژه‌نامه.

یادداشت: نمایه.

موضوع: نرم‌افزار ال. اس. داینا

موضوع: ضربه (فیزیک) — شبیه‌سازی

موضوع: شوک مکانیکی — شبیه‌سازی

شناسه افزوده: صیغوری، سجاد، ۱۳۶۰-

شناسه افزوده: صبوری، هادی، ۱۳۵۷-

شناسه ف. ه. دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی

رده بندی کنگره: TA ۳۴۷/۹ ۱۳۹۲

رده بندی دیویی: ۶۲۰/۰۰۱۵۱۵۳۵

ساره کتابخانه ملی: ۳۴۰۷۹۳۶

مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی حائل، میک ضربه با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA

نگارندگان: دکتر غلامحسین لیاقت، دکتر سجاد صیغوری، دکتر هادی صبوری

ویراء تار ادب: رضایات

ویراستار فنی: فائز صافی

طراح جلد: هادی ششمی

حروفچینی: سیده عارفه جعفری

شماره انتشار: ۱۶۶/۲۱

شماره پیاپی: ۱۸۷

تاریخ انتشار: ۱۳۹۲

شمارگان: ۱۰۰۰

شابک: 978-600-5394-83-2 ۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۴-۸۳-۲ ISBN

ناشر: مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس

نوبت چاپ: اول

کارشناس اجرایی: فاطمه طالبی

ناظر چاپ: مصطفی جانجانی

لیتوگرافی:

چاپ و صحافی:

مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران،

دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، صندوق پستی: ۱۴۱۱۵-۳۱۸

تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹۶ دورنگار: ۸۲۸۸۳۰۳۲

بها: ۱۵۰۰۰۰ ریال

صحت مطالب کتاب بر عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

ط	پیشگفتار ناشر	۱
ک	پیشگفتار نگارندگان	۱
۱	فصل ۱ تحلیل مسائل مقدماتی ضربه الاستیک به کمک اندازه حرکت و انرژی	۱
۲	۱-۱ مقدمه	۲
۴	۱-۲ برخورد مرکز به مرکز مستقیم	۴
۵	۳-۱ برخورد مرکز به مرکز مایل	۵
۶	۴-۱ برخورد چرخی	۶
۸	۵-۱ برخورد خارج از مرکز	۸
۱۰	۶-۱ برخورد مستقیم دو گلوله	۱۰
۲۵	تمرین	۲۵
۲۶	۷-۱ بسته سقوط آزاد	۲۶
۲۷	۱-۷-۱ ساخت مدل یا وارد کردن آن به نرم افزار	۲۷
۳۴	۲-۷-۱ تنظیم قسمت DTM	۳۴
۴۲	۳-۷-۱ حل مسئله و بررسی نتایج	۴۲
۴۷	فصل ۲ انتشار موج‌های تنش محوری ناشی از ضربه در میله‌های بلند	۴۷
۴۸	۱-۲ انتشار امواج در میله‌های بلند منشوری	۴۸
۴۸	۲-۲ انتشار موج تنش فشاری	۴۸
۵۱	۳-۲ حل معادله موج	۵۱
۵۳	۴-۲ سرعت موج تنش طولی الاستیک	۵۳
۵۳	۵-۲ انتشار موج تنش پیچشی در میله بلند استوانه‌ای	۵۳
۵۷	۶-۲ انعکاس موج‌های تنش	۵۷
۵۸	۷-۲ انتقال انرژی و اندازه حرکت در برخورد سه میله یکسان	۵۸

- ۸-۲ مثال برخورد محوری سه میله یکسان ۶۰
- ۱-۸-۲ مدل‌سازی ۶۰
- ۲-۸-۲ ایجاد مدل به وسیله مش زدن خطوط ۶۱
- ۳-۸-۲ تعریف المان ۶۲
- ۴-۸-۲ کپی و انتقال المان‌ها برای دو میله A و B ۶۳
- ۵-۸-۲ تعریف Material ۶۳
- ۶-۸-۲ تخصیص Property ۶۵
- ۷-۸-۲ تعریف تماس ۶۵
- ۸-۸-۲ تعریف شرایط مرزی ۶۶
- ۹-۸-۲ تنظیم خروجی‌ها ۶۷
- ۱۰-۸-۲ بررسی نتایج ۶۹
- تمرین ۷۳
- فصل ۳ نظریه مکانیک نفوذ ۷۵
- ۱-۳ نفوذ ۷۶
- ۱-۱-۳ مفاهیم و تعاریف اساسی نفوذ ۷۶
- ۲-۳ پارامترهای مؤثر در نفوذ ۷۶
- ۱-۲-۳ پارامترهای مؤثر پرتابه ۷۶
- ۲-۲-۳ پارامترهای مؤثر هدف ۷۸
- ۳-۳ نفوذ عمودی پرتابه تحت در هدف فلزی ۷۹
- ۱-۳-۳ معرفی مدل هندسی و مدل ماده ۷۹
- ۲-۳-۳ تنظیم‌ها ۸۱
- ۳-۳-۳ انتخاب المان ۸۲
- ۴-۳-۳ تعیین نوع و خواص مواد ۸۵
- ۵-۳-۳ مدل‌سازی ۸۸
- ۶-۳-۳ شبکه‌بندی ۹۰
- ۷-۳-۳ تعیین نوع تماس ۹۲

۹۳	۸-۳-۳ اعمال شرایط مرزی
۹۴	۹-۳-۳ اعمال شرایط اولیه
۹۵	۱۰-۳-۳ تنظیم زمان حل و تحلیل مسئله
۹۵	۱۱-۳-۳ بررسی نتایج
۹۹	۴-۳ محاسبه عمق نفوذ پرتابه‌های اجیوال در هدف بتنی
۱۰۴	۵-۳ محاسبه سرعت باقیمانده برای نفوذ کامل پرتابه در هدف بتنی
۱۰۴	۱-۵-۳ محاسبه سرعت باقیمانده از روابط فورستال [۲۲]
۱۰۵	۳-۵ محاسبه سرعت باقیمانده بر اساس نظریه تشکیل پلاگ برشی
۱۰۹	۶-۳ محاسبه عمق نفوذ برای هدف بتنی
۱۱۰	۱-۶-۳ مرحله اول
۱۱۰	۲-۶-۳ مرحله دوم
۱۱۱	۳-۶-۳ مرحله سوم
۱۱۱	۷-۳ نفوذ عمودی پرتابه اجیوال در هدف بتنی
۱۱۱	۱-۷-۳ تعریف مسئله
۱۱۲	۲-۷-۳ انتخاب المان
۱۱۳	۳-۷-۳ تعریف نوع و خواص مواد
۱۱۴	۴-۷-۳ مدل‌سازی
۱۱۶	۵-۷-۳ شبکه‌بندی
۱۱۸	۶-۷-۳ تعیین نوع تماس
۱۱۹	۷-۷-۳ اعمال شرایط مرزی
۱۱۹	۸-۷-۳ اعمال شرایط اولیه
۱۲۱	۹-۷-۳ تنظیم زمان حل و ایجاد k کد
۱۲۲	۱۰-۷-۳ وارد کردن k کد به محیط نرم‌افزار LS-DYNA
۱۲۷	۱۱-۷-۳ تحلیل نتایج
۱۳۳	۸-۳ نفوذ مایل پرتابه با دماغه کروی در هدف فلزی
۱۳۳	۱-۸-۳ مدل‌سازی و مش‌بندی

۱۴۶	۲-۸-۳ تعریف Material
۱۴۸	۳-۸-۳ تخصیص Property
۱۴۹	۴-۸-۳ تعریف تماس
۱۵۰	۵-۸-۳ شرایط مرزی
۱۵۲	۶-۸-۳ شرایط اولیه
۱۵۳	۷-۸-۳ تنظیم خروجی‌ها
۱۵۵	۸-۸-۳ حل مسئله و بررسی نتایج
۱۵۹	فصل ۴ کماتش پیش‌رونده دینامیکی
۱۶۰	۱-۴ مقدمه
۱۶۰	۲-۴ مودهای فروریزی لوله دایروی
۱۶۴	۳-۴ روابط ارائه شده برای بار متوسط فروریزی لوله‌های دایروی در مود متقارن محوری
۱۶۴	۱-۳-۴ در نظر گرفتن فاصله مود فروریزی
۱۶۶	۲-۳-۴ سخت‌شوندگی بر اثر افزایش سخت بارگذاری
۱۶۷	۴-۴ شبیه‌سازی عددی کماتش دینامیکی لوله مود
۱۶۸	۱-۴-۴ انتخاب سیستم واحدها
۱۶۸	۲-۴-۴ تعریف و ترسیم لوله
۱۷۰	۳-۴-۴ تعریف و ترسیم مولد وزنه سقوط کننده
۱۷۲	۴-۴-۴ المان‌بندی
۱۷۵	۵-۴-۴ ادغام گره‌های فصل مشترک
۱۷۶	۶-۴-۴ معرفی خواص مکانیکی
۱۸۰	۷-۴-۴ تعریف مجموعه قطعات
۱۸۰	۸-۴-۴ تعیین فرمول‌بندی حل مسئله
۱۸۱	۹-۴-۴ تعریف تماس
۱۸۲	۱۰-۴-۴ اعمال شرط مرزی
۱۸۴	۱۱-۴-۴ اعمال سرعت اولیه به ضربه‌زننده
۱۸۴	۱۲-۴-۴ تنظیم زمان حل و فرکانس ثبت نتایج
۱۸۵	۱۳-۴-۴ ذخیره‌سازی فایل و ایجاد فایل ورودی برای LS-DYNA

۱۸۵	۴-۴-۱۴ اجرای فایل ورودی
۱۸۶	۴-۴-۱۵ بررسی نتایج
۱۹۴	تمرین
۱۹۵	۴-۵-۵ کمانش دینامیکی پروفیل مربعی و کنترل شبکه‌بندی تطبیقی
۱۹۵	۴-۵-۱ مدل‌سازی و مش‌بندی
۱۹۹	۴-۵-۲ ایجاد المان‌های کمکی
۲۰۲	۴-۵-۳ تعریف Material
۲۰۳	۴-۵-۴ تخصیص Property
۲۰۴	۴-۵-۵ تعریف تماس
۲۰۵	۴-۵-۶ شرایط مرزی
۲۰۸	۴-۵-۷ روابط
۲۰۹	۴-۵-۸ تنظیم خروجی‌ها
۲۱۰	۴-۵-۹ کنترل مش تطبیقی (Adaptivity)
۲۱۲	۴-۵-۱۰ حل مسئله و بررسی نتایج
۲۱۵	۴-۶-۶ مجاله شدن پوسته استوانه‌ای
۲۱۵	۴-۶-۱ مدل‌سازی و مش‌بندی
۲۱۸	۴-۶-۲ تعریف Material
۲۲۰	۴-۶-۳ تخصیص Property
۲۲۰	۴-۶-۴ تعریف دستگاه‌های مختصات محلی
۲۲۶	۴-۶-۵ شرایط مرزی
۲۳۲	۴-۶-۶ شرایط اولیه
۲۳۴	۴-۶-۷ تنظیم خروجی‌ها
۲۳۷	۴-۶-۸ کنترل مش تطبیقی (Adaptivity)
۲۳۸	۴-۶-۹ حل مسئله و بررسی نتایج
۲۴۳	فصل ۵ مسائل عمومی مکانیک ضربه
۲۴۴	۵-۱ اتصال دو ورق با قید Spotweld
۲۴۴	۵-۱-۱ مدل‌سازی

- ۲-۱-۵ روش اول: ایجاد مدل به‌وسیله مش زدن خطوط ۲۴۵
- ۱-۲-۱-۵ ایجاد خطوط ۲۴۵
- ۲-۲-۱-۵ تعریف المان ۲۴۷
- ۳-۱-۵ روش دوم: ایجاد المان با تعریف گره ۲۴۷
- ۱-۳-۱-۵ تعریف گره ۲۴۷
- ۴-۱-۵ روش سوم: ساخت المان‌ها با استفاده از Extrusion ۲۵۱
- ۵-۱-۵ کپ کردن و انتقال المان‌های Shell برای Plate ۲۵۵
- ۱-۶-۱-۵ اتصال و Plate به‌وسیله Spotweld ۲۵۶
- ۷-۱-۵ تعریف Material ۲۵۷
- ۸-۱-۵ تخصیص Property ۲۵۸
- ۹-۱-۵ تعریف تماس ۲۵۹
- ۱۰-۱-۵ تعریف شرایط مرزی ۲۵۹
- ۱۱-۱-۵ تنظیم خروجی‌ها ۲۶۲
- ۱۲-۱-۵ بررسی نتایج ۲۶۶
- ۲-۵ کنترل میرایی تیر یک سر گیردار ۲۷۱
- ۱-۲-۵ مدل‌سازی و مش‌بندی ۲۷۱
- ۲-۲-۵ تعریف Material ۲۷۴
- ۳-۲-۵ تخصیص Property ۲۷۵
- ۴-۲-۵ تخصیص سطح مقطع برای تیر ۲۷۶
- ۵-۲-۵ شرایط مرزی و بارگذاری ۲۷۷
- ۶-۲-۵ تنظیم خروجی‌ها ۲۸۰
- ۷-۲-۵ ایجاد خاصیت میرایی برای سه حالت مختلف ۲۸۳
- ۸-۲-۵ حل مسئله و بررسی نتایج ۲۸۴
- ۳-۵ برخورد سپر اتومبیل به مانع صلب ۲۹۱
- ۱-۳-۵ وارد کردن مدل و مش زدن دیواره صلب ۲۹۱
- ۲-۳-۵ المان‌بندی (مش زدن) دیگر قسمت‌ها ۲۹۶
- ۳-۳-۵ بررسی پیوستگی شبکه‌بندی المان محدود ۲۹۸
- ۴-۳-۵ ایجاد اتصال بین قسمت‌ها ۲۹۹

۳۰۱	 ۵-۳-۵ تعیین خواص ماده
۳۰۴	 ۶-۳-۵ تخصیص مواد به قسمت‌ها
۳۰۵	 ۷-۳-۵ تخصیص خاصیت (Property) به مدل
۳۰۶	 ۸-۳-۵ تعریف تماس (Contact)
۳۰۷	 ۹-۳-۵ تعریف شرایط مرزی
۳۰۹	 ۱۰-۳-۵ تعریف شرایط اولیه
۳۱۱	 ۱۱-۳-۵ ارسال مدل ایجاد شده به عنوان مدل ورودی به LS-DYNA
۳۱۳	 ۱۲-۳-۵ بررسی نتایج
۳۱۷	 پیوست آشنایی کلی با نرم افزار LS-DYNA
۳۱۹	 پ-۱ ترسیم و توسعه نرم افزار LS-DYNA
۳۲۲	 پ-۲ قابلیت‌های نرم افزار LS-DYNA
۳۲۳	 پ-۳ معادلات حاکم و روش حل آن‌ها
۳۲۶	 پ-۴ آشنایی با روش نصب و زیر مجموعه‌های اصلی نرم افزار LS-DYNA
۳۲۶	 پ-۴-۱ Pre-Processing
۳۲۷	 پ-۴-۲ Post-Processing
۳۲۷	 پ-۴-۳ Graph-Processing
۳۲۸	 پ-۴-۴ LSTC Prepost-Processing
۳۲۹	 مراجع
۳۳۳	 واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۳۳۵	 واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۳۳۷	 نمایه

پیشگفتار نگارندگان

مکانیک ضربه، شاخه‌ای از مهندسی مکانیک است که به مطالعه رفتار قطعات و سازه‌ها تحت بارگذاری الاستاتیکی یا ناآرام می‌پردازد. مطالعه رفتار مکانیکی مواد، تغییر شکل‌ها، نیروها و عکس‌العمل‌های تولید شده در زمان بارگذاری ناآرام و پاسخ قطعات و سازه‌ها، جزء مطالب مهم مورد بحث در این شاخه از علم مکانیک است.

باتوجه به سرعت بارگذاری ضربه‌ای، شتاب ایجادشده معمولاً بزرگ بوده و نیروهای اینرسی که در بارگذاری الاستاتیکی در نظر گرفته نمی‌شوند، قابل توجه هستند. از سوی دیگر، بیش‌تر مواد در بارگذاری سریع، رفتار بسیار متفاوتی را نسبت به بارگذاری آرام نشان می‌دهند. به‌علاوه، رفت و برگشت امواج تنش ناشی از بارگذاری با سرعت بالا در درون جسم، سبب ایجاد تنش‌های متفاوتی نسبت به حالت الاستاتیکی می‌شود. در نتیجه، وضعیت تغییر شکل و شاید تخریب قطعات در بارگذاری ضربه‌ای، با شرایط الاستاتیکی متفاوت است. باتوجه به موارد بالا- که دلایل اصلی تفاوت بارگذاری‌های الاستاتیکی (آرام) و ضربه‌ای (ناآرام) است- لازم است مکانیک ضربه، با رویکردی متفاوت در مقایسه با مقاومت مصالح الاستاتیکی مطالعه شود. مکانیک ضربه، دامنه وسیعی از کاربردها را پوشش می‌دهد؛ مانند حوزه‌های تفریحی و ورزشی، کاربردهای مهندسی و تولید برخی قطعات، حفاظت نیروگاه‌های هسته‌ای، صنایع نفتی، معادن، صنایع دفاعی و نظامی. برخورد، ضربات الاستیک و الاستیک-پلاستیک، سقوط، تصادم و جذب انرژی ناشی از آن، شوک، نفوذ، انفجار، شکل‌دهی و جوشکاری و برش انفجاری، تراکم پودر، خرج گود، انهدام انفجاری، پیروتکنیک و پدافند غیر عامل مثال‌هایی از کاربردهای عملی این علم است.

انگیزه‌های اصلی پدیدآورندگان این اثر عبارت است از:

- آموزش مفاهیم اصلی مکانیک ضربه؛

- تشریح مفاهیم اصلی در قالب مثال‌های مختلف؛

- بهره‌گیری از نرم‌افزار قدرتمند LS-DYNA برای توضیح مفاهیم اصلی؛

- آموزش قسمت‌های مختلف این نرم‌افزار و امکانات آن.

در این کتاب هر فصل به معرفی یکی از مباحث مکانیک ضربه اختصاص دارد و پس از بیان مفاهیم نظری مورد نیاز، به شرح و حل مثالی با استفاده از LS-DYNA می‌پردازیم.

در پیوست نرم‌افزار LS-DYNA معرفی شده و مقدماتی درباره روش اجزای محدود دینامیکی ارائه شده است. فصل اول به تحلیل مسائل مقدماتی ضربه الاستیک به کمک اندازه حرکت و انرژی می‌پردازد. در این بخش برخورد الاستیک با استفاده از بقای مومنتم و بقای انرژی شرح داده شده و مثالی در مورد نرم‌افزار حل می‌شود. بخش سقوط آزاد (Drop Test) نرم‌افزار در این فصل معرفی می‌شود. برخورد الاستیک میله‌ها با استفاده از نظریه امواج تنش در فصل دوم ارائه و مثالی کامل در این زمینه شرح داده شده است. نفوذ که یکی از مسائل مهم و کاربردی در مکانیک ضربه است، در فصل سوم تشریح می‌شود. پس از مرور مختصر نظریه‌های نفوذ، مثال‌هایی مانند نفوذ گلوله سرتخت در یک تیر و نفوذ گلوله اوجیوال در هدف بتنی، تحلیل شده است. کمانش پیش‌رونده دینامیکی درباره زورهای تقارن محوری در فصل چهارم مطالعه می‌شود. در این فصل همچنین به معرفی روش شانه‌ای و تطبیقی پرداخته و مثال‌هایی مانند مچالگی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری جانبی و کمانش یک تیر با یک پروفیل مربعی تشریح می‌شود.

در فصل آخر درخصوص مسائل عمومی مکانیک ضربه مثال‌هایی کاربردی ارائه شده است. این مثال‌ها شامل بارگذاری دینامیکی اتصال نقطه‌جوش، پاسخ دینامیکی تیرها با میرایی ساختاری و تصادم سیر اتومبیل با مانع سخت می‌شود.

در این کتاب سعی شده از تجربه دو دهه گذشته در تدریس مکانیک ضربه در دوره‌های تحصیلات تکمیلی و همچنین اطلاعات حاصل از چندین طرح تحقیقاتی و پایان‌نامه‌ها و رساله‌های کارشناسی ارشد و دکترای استفاده شود.

مخاطبان این کتاب، دانشجویان تحصیلات تکمیلی و مهندسان شاغل در صنعت است. تحلیل مثال‌ها، به‌صورت گام به‌گام، یادگیری را برای افرادی که آشنایی اولیه‌ای با برنامه‌های مدل‌سازی و نرم‌افزارهای اجزای محدود داشته باشند، ساده می‌کند. در پایان هر فصل، تعدادی تمرین ارائه شده که اجرای آن‌ها، در یادگیری و درک مباحث مطرح‌شده مفید بوده و توصیه می‌شود.

نگارندگان صمیمانه از پیشنهادها و نظریات اصلاحی خوانندگان و صاحب‌نظران برای بهبود این اثر در چاپ‌های بعدی استقبال می‌کنند. برای این منظور لطفاً به پست الکترونیکی sajja.seifoori@gmail.com و یا به آدرس www.seifoori.com مراجعه فرمایید.

دکتر غلامحسین لیاقت،

دکتر سجاد صیفوری و دکتر هادی صبوری

اسفند ۱۳۹۲