

مکانیک انفجار، هیدروکدها و تحلیل عددی

مؤلفان:

دکتر جمال زمانی

استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندس محمد وهاب موسوی

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سال ۱۳۹۴

سرشناسه	: زمانی اشنی، جمال، ۱۳۳۵ -
عنوان و نام پدیدآور	: مکانیک انفجار، هیدروکدها و تحلیل عددی جلد ۴
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۳۳۳ ص.: مصور
شابک	: 978-600-7867-02-0
وضعیت فهرست نویسی	: قیپای مختصر
یادداشت	: فهرستنویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
شناسه افزوده	: موسوی، محمدوهاب
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. انتشارات
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۳۴۱۵۸۵

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  <http://publication.kntu.ac.ir>

نام کتاب: مکانیک انفجار، هیدروکدها و تحلیل عددی جلد ۴

مؤلفین: دکتر جمال زمانی، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و محمدوهاب موسوی

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: خرداد ۱۳۹۴

تیراژ: ۲۵۰ جلد

قیمت: ۱۶۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۳۸۸

ISBN: 978-600-7867-02-0

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۸۶۷-۰۲-۰

صحافی: گرنامی

چاپ و لیتوگرافی: چاپ اول

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع

میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۸۸۷۷۲۲۷۷-۰۲۱)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

«بسمه تعالی»

پیشگفتار

حمد و سپاس قادر متعال، که حمد فقط او را سزااست و درود بر سر عالم و نکته آن، و مقصود عالم و هدف آن، سرور راستگویان، حضرت محمد مصطفی صلی الله و علیه و آله، و درود خداوند بر خاندان مطهرش که چراغ‌های فروزانند از برای بشریت، و اما بعد.

امروزه محث مکانیک انفجار به لحاظ ظرفیت بالا در ارائه خدمات مهندسی از جایگاه مهمی در بسیاری از فعالیتهای صنعتی و تحقیقاتی برخوردار است. موضوعات کاربردی همانند شکل‌دهی، شکل‌پذیری، تخریب، سیستم‌های آزمایشگاهی تصادم و برخورد و بسیاری دیگر از امور، فضای مناسبی برای به کارگیری علم مکانیک انفجار ایجاد نموده است. عمده کلید واژه‌ی «مبحث انفجار» را در بسیاری از کاربردها بدون رقیب جلوه‌گر می‌نماید، واژه نیروی دینامیکی، اصل از انفجار و یا بارگذاری با نرخ بالا است. البته این نوع بارگذاری به علت شاخصه‌هایی مانند سرعت و فشار بسیار بالا، یکی از پیچیده‌ترین انواع بارگذاری‌ها محسوب می‌گردد. شناسایی و اطلاع از وضعیت این نوع بارگذاری آن هم در کسر بسیار کوچکی از ثانیه، مستلزم آزمایش‌های تجربی پرهزینه و خطرناک است. فلذا برای جلوگیری از مشکلات فوق‌الذکر، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی به عنوان جایگزین تحقیقات تجربی، با اقبال عمومی محققین در کلیه مراکز علمی مواجه گردیده است.

این نوشتار بر آن است تا در راستای طرح توانمندی‌های تحلیل عددی در حوزه بارگذاری با نرخ بالا، مباحث مرتبط همانند معرفی هیدروکدها، مبانی روش‌های عددی، بررسی معادلات حالت و مدل‌های مادی و شبیه‌سازی برخی مسائل کاربردی را معرفی نماید. البته این مهم با عنایت قادر متعال و یاری بسیاری از محققین امکان پذیر گردیده است. در ادامه بر خود لازم دانسته تا از همه کسانی که در تالیف این کتاب، ما را یاری نموده‌اند

صمیمانه تشکر نماید. به ویژه آقای مهندس محمودهاب موسوی که اهم زحمات تألیف این کتاب بدون اغراق بر دوش ایشان بوده است. همچنین از آقایان مهندس احسان یآوری، مهندس علی اصلانی، مهندس وحید موسی بیکی، مهندس فؤاد نیکمرام و خانم مهندس اسدوندی به لحاظ زحماتشان سپاسگزاری می‌نماید.

از اساتید بزرگوaram جناب آقای دکتر ابوالفضل درویره، جناب آقای دکتر لیاقت و همچنین آقایان دکتر قریشی، دکتر وحدتی، دکتر اعتمادی و دکتر علوی‌نیا برای تمامی همکاری‌ها، محبت‌ها و الطاف، تقدیر و سپاسگزاری می‌نماید و برای آن بزرگواران توفیق الهی را از درگاه ایزد تعالی خواستارم.

از مدیریت محترم انتشارات دانشگاه و پرسنل خدوم واحد انتشارات به ویژه جناب آقای صالحی قدردانی می‌نمایم.

چنانچه در مباحث مطرح شده کتاب قصور و اشتباهی رخ داده باشد متوجه این جانب و اگر نکته ارزشمند و مفیدی ملاحظه گردد، از عنایت حق تعالی و زحمات آقای مهندس محمودهاب موسوی می‌باشد. احتمالاً اگر در کتابی از منابع و مراجع غفلت شده است از مالکیت منبع و مرجع مورد نظر پیشاپیش پوزش می‌طلبید.

در پایان این نوشتار را تقدیم می‌دارد به آن دسته از محققین و اساتیدی که متوجه حفظ مرزهای و یافته‌های علمی این سرزمین پر دشمن بود و تمامی هم و غمشان پیشرفت، استقلال علمی و اعتلای میهن اسلامی است.

والسلام علیکم

دکتر جمال زمانی

استاد دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بهار ۱۳۹۴

فهرست مطالب

۱ - مقدمه‌ای بر مکانیک انفجار.....	۷
۱-۱ - مقدمه.....	۷
۱ - فایند تشکیل موج انفجار.....	۸
۲-۲-۱ - موج شوق.....	۹
۳-۲-۱ - معادلات برش - نکین - هوگونیت.....	۱۰
۴-۲-۱ - میرایی برش شک.....	۱۲
۵-۲-۱ - تئوری چاپمن زوگ.....	۱۳
۳-۱ - انفجار در هوا.....	۱۵
۲-۳-۱ - ایمپالس.....	۱۶
۳-۳-۱ - برخی معادلات تجربی و نیمه تجربی برای محاسبه بیش فشار در هوا.....	۱۶
۴-۳-۱ - انعکاس موج شوک حاصل از انفجار در هوا.....	۱۸
۴-۱ - انفجار زیر آب.....	۱۹
۲-۴-۱ - برخی روابط تجربی و نیمه تجربی محاسبه بیش فشار انفجار زیر آب.....	۲۱
۵-۱ - برهمکنش امواج انفجار با فلز.....	۲۷
۱-۵-۱ - امیدانس.....	۲۷
۲-۵-۱ - معادلات گارنی.....	۲۸
۶-۱ - مراجع.....	۳۱
۲ - مبنای روش‌های عددی در شبیه‌سازی مسائل دینامیکی.....	۳۳
۱-۲ - مقدمه.....	۳۳
۲-۲ - هیدروکدها.....	۳۴
۳-۲ - حل‌های پیش رونده در گام‌های زمانی.....	۳۵
۴-۲ - گسسته‌سازی با استفاده از هیدروکدها.....	۳۷
۲-۴-۲ - روش لاگرانژی.....	۳۹

- ۴۰-۲-۴-۳- روش اویلری.....
- ۴۱-۲-۴-۴- روش لاگرانژی اویلری دلخواه.....
- ۴۱-۲-۵- روش اختلاف محدود.....
- ۴۲-۲-۵-۱- اختلافات محدود برای معادلات دیفرانسیل معمولی.....
- ۴۳-۲-۵-۲- اختلافات محدود برای معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی.....
- ۴۴-۲-۵-۳- انتگرال گیری زمانی با روش اختلاف محدود.....
- ۴۹-۲-۵-۴- دقت.....
- ۴۹-۲-۶- روش حجم محدود.....
- ۵۰-۲-۶-۱- سیستم سازی معادلات بقاء.....
- ۵۰-۲-۶-۲- انواع حجم کنترل ها.....
- ۵۱-۲-۶-۳- تقریب معادلات تداصل.....
- ۵۳-۲-۷- روش المان محدود.....
- ۵۳-۲-۷-۱- استخراج معادلات حاکم در تغییر شکل دینامیکی.....
- ۵۷-۲-۷-۲- المان های شش ضلعی.....
- ۵۹-۲-۷-۳- انتگرال گیری حجمی.....
- ۶۰-۲-۷-۴- کنترل پدیده ساعت شنی.....
- ۶۳-۲-۷-۵- به هنگام کردن تنش.....
- ۶۷-۲-۷-۶- کنترل گام زمانی.....
- ۶۷-۲-۸- روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH).....
- ۶۸-۲-۸-۱- روند محاسبات در روش SPH.....
- ۷۲-۲-۹- روش های شبیه سازی موج شوک در هیدروکدها.....
- ۷۳-۲-۹-۱- ویسکوزیته مصنوعی.....
- ۷۳-۲-۹-۲- فرمول بندی ویسکوزیته مصنوعی.....
- ۷۵-۲-۹-۳- روش گودنف.....
- ۷۷-۲-۱۰- معرفی برخی نرم افزارهای دارای قابلیت شبیه سازی انفجار و پاسخ سازه ها به بارگذاری ناشی از آن.....
- ۷۸-۲-۱۰-۱- نرم افزار Autodyn.....
- ۷۹-۲-۱۰-۲- نرم افزار Ls-Dyna.....
- ۸۰-۲-۱۰-۱- نرم افزار Abaqus.....
- ۸۲-۲-۱۰-۲- نرم افزار CTH.....
- ۸۴-۲-۱۱- مراجع.....

۸۷	۳ - معادلات حالت و مدل های مادی
۸۷	۱-۳ - مقدمه
۸۸	۲-۳ - معادلات حالت
۸۹	۱-۲-۳ - معادله حالت گرونازن
۹۰	۲-۲-۳ - معادله حالت مای-گرونازن
۹۱	۳-۲-۳ - معادله حالت تیلوتسان
۹۳	۴-۲-۳ - معادله حالت پاف
۹۴	۵-۲-۳ - معادلات حالت محیط واسط
۹۶	۶-۲-۳ - معادلات حالت مواد منفجره
۱۰۱	۳-۳ - مدل های مادی در تغییر شکل غیر الاستیک در نرخ کرنش بالا
۱۰۲	۲-۳-۳ - مدل جانسون-کوک
۱۰۳	۱-۳-۳ - مدل زرلی-آرمسترانگ
۱۰۳	۴-۳-۳ - مدل اشتن-ک-کوچران-گوینان
۱۰۴	۵-۳-۳ - مدل کریگر-یمرندز
۱۰۵	۴-۳ - مراجع
۱۰۷	۴ - واماندگی، آسیب و شکست در بارگذاری دینامیکی
۱۰۷	۱-۴ - مقدمه
۱۰۸	۲-۴ - مکانیک آسیب پیوسته
۱۰۸	۱-۲-۴ - مفاهیم هم‌ارزی تنش و کرنش مؤثر
۱۱۲	۲-۲-۴ - کاهش سفتی و توابع انباشتگی آسیب
۱۱۴	۳-۴ - مدل های واماندگی ایزوتروپیک
۱۱۴	۱-۳-۴ - معیارهای ماکزیمم تنش یا کرنش
۱۱۵	۲-۳-۴ - مدل میکرومکانیکی گرسون برای شکست نرم
۱۱۶	۳-۳-۴ - مدل شکست جانسون-کوک
۱۱۶	۱-۳-۴ - مدل شکست جانسون-هلمکووست
۱۱۸	۴-۴ - شکست دینامیک
۱۱۸	۱-۴-۴ - خصوصیات منحصر به فرد شکست دینامیک
۱۱۹	۲-۴-۴ - تأثیر نرخ کرنش بر چقرمگی شکست
۱۱۹	۳-۴-۴ - تشکیل ترکش
۱۲۰	۴-۴-۴ - نگاه میکروسکوپی به فرایند شکست دینامیک و تشکیل ترکش
۱۲۲	۵-۴-۴ - تئوری تشکیل ترکش موت

۱۲۳	۴-۴-۶- مدل شکست تیلور
۱۲۴	۴-۵- اسپال
۱۲۵	۴-۵-۲- معیارهای شکست اسپال
۱۲۶	۴-۶- روش‌های عددی شبیه‌سازی آسیب
۱۲۶	۴-۶-۱- روش حذف المان
۱۲۷	۴-۶-۲- استفاده از توابع ناپیوسته غنی شده
۱۲۸	۴-۶-۳- روش SPH
۱۳۰	۴-۷- مراجع
۱۳۳	۵- شبیه‌سازی برخی مسائل کاربردی
۱۳۳	۵-۱- مقدمه
۱۳۴	۵-۲- محاسبه بیشترین حاصل انفجار C4 کروی شکل در هوا
۱۳۴	۵-۲-۱- مراحل شبیه‌سازی
۱۴۲	۵-۲-۲- تحلیل و بررسی نتایج
۱۴۶	۵-۳- شبیه‌سازی تبدیل انعکاس منظم به انعکاس مایخ در انفجار بالای سطح زمین
۱۴۶	۵-۳-۱- مقدمه
۱۴۶	۵-۳-۲- تبدیل انعکاس منظم به انعکاس مایخ
۱۴۸	۵-۳-۳- مراحل شبیه‌سازی
۱۵۰	۵-۳-۴- تحلیل و بررسی نتایج
۱۵۴	۵-۴- شبیه‌سازی تغییر شکل پلاستیک ورق آلومینیومی بر اثر بارگذاری انفجاری در هوا
۱۵۴	۵-۴-۱- مقدمه
۱۵۵	۵-۴-۲- مراحل شبیه‌سازی
۱۵۸	۵-۴-۳- تحلیل و بررسی نتایج
۱۶۱	۵-۵- شبیه‌سازی تغییر شکل پلاستیک ورق ساندویچی با هسته لانه زنبوری بر اثر بارگذاری انفجاری در هوا
۱۶۱	۵-۵-۱- مقدمه
۱۶۲	۵-۵-۲- مراحل شبیه‌سازی
۱۶۵	۵-۵-۳- تحلیل و بررسی نتایج
۱۶۹	۵-۶- بررسی تغییر شکل پلاستیک یک پوسته استوانه‌ای کاملاً بسته تحت انفجار داخلی
۱۶۹	۵-۶-۱- مقدمه
۱۷۰	۵-۶-۲- آزمایش‌ها
۱۷۲	۵-۶-۳- مراحل شبیه‌سازی

۱۷۵	۴-۶-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۱۷۹	۷-۵- شبیه‌سازی پدیده اسپال در حالت تماس ماده منفجره با یک صفحه فلزی ضخیم
۱۷۹	۱-۷-۵- مقدمه
۱۷۹	۲-۷-۵- مراحل شبیه‌سازی
۱۸۱	۳-۷-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۱۸۵	۸-۵- شبیه‌سازی تشکیل ترکش در یک پوسته استوانه‌ای پر از ماده منفجره با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۱۸۵	۱-۸-۵- مقدمه
۱۸۶	۲-۸-۵- شبیه‌سازی
۱۸۸	۳-۸-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۲۰۱	۹-۵- شبیه‌سازی تشکیل جت و نفوذ خرج گود در فولاد ۴۳۴۰
۲۰۱	۱-۹-۵- مقدمه
۲۰۱	۲-۹-۵- خرج گود
۲۰۴	۳-۹-۵- کاربردی خرج گود
۲۰۶	۴-۹-۵- مراحل شبیه‌سازی
۲۰۹	۵-۹-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۲۱۵	۱۰-۵- شبیه‌سازی شکل‌گیری نفوذ پرتابه شکل یافته انفجاری در فولاد زرهی
۲۱۵	۱-۱۰-۵- مقدمه
۲۱۵	۲-۱۰-۵- پرتابه شکل یافته انفجاری
۲۱۶	۳-۱۰-۵- مراحل شبیه‌سازی
۲۱۹	۴-۱۰-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۲۲۳	۱۱-۵- مراجع