

دینامیک غیر خطی سازه‌ها

ترجمه و تألیف

بهنام ادهمی - عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

آرش رستمی - دانشجوی دکتری مهندسی زلزله

کاوه حقیقی - دانشجوی دکتری مهندسی زلزله

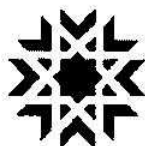


نشر المهران

www.elme-omran.com

Elme@elme-umran.com

عضو:



انجمن نشر کتاب تهران

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	: رستمی، آرش، ۱۳۶۸
عنوان و نام پدیدآور	: دینامیک غیر خطی سازه‌ها/ ترجمه و تالیف بهنام ادهمی، آرش رستمی، کاوه حقیقی.
مشخصات نشر	: تهران: علم عمران، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۲۶۱ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۲۵۰۰۰۰ ریال: 978-600-5176-34-6
موضوع	: دینامیک سازه‌ها
موضوع	: Structural dynamics
موضوع	: دینامیک غیرخطی، Nonlinear Dynamic
شناسه افزوده	: ادهمی، بهنام، ۱۳۴۹ - حقیقی، کاوه، ۱۳۵۷
رده بندی کتبه	: ۱۳۹۶ ر۵۹/ TA۶۵۴
رده بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۶۵۰۹



دینامیک غیر خطی سازه‌ها

ترجمه و تالیف: بهنام ادهمی-آرش رستمی-کاوه حقیقی

چاپ اول	بهار ۱۳۹۶
چاپ	پرستش
تعداد و قطع صفحات	۲۶۱ صفحه وزیری
شمارگان	۱۰۰۰
بهای کتاب	۲۵۰۰۰۰ ریال
شابک ۶-۳۴-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-34-6

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان‌آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱

تلفن: ۸۸۳۵۳۹۳۰-۳۱ دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

اصولاً تحلیل سازه‌های ساختمانی به دو روش استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود. معمولاً آیین‌نامه‌های ساختمانی روشهای استاتیکی و یا دینامیکی طیفی را به لحاظ سهولت انجام، کاهش حجم محاسبات و دقت مناسب برای تحلیل سازه‌ها تجویز می‌کنند. با این وجود دقیق‌ترین و مناسبترین روش برای تحلیل سازه‌ها با توجه به اینکه رفتار اعضای مختلف سازه نیز شامل بتن و فولاد به صورت غیر خطی می‌باشد، روش دینامیکی غیرخطی است. انجام این نوع تحلیل به دلیل پیچیدگی انجام محاسبات، مدت زمان طولانی آن و پیچیدگی تفسیر نتایج معمولاً در کارهای مهندسی انجام نشده و بیشتر در امور تحقیقاتی کاربرد دارد. ولی پیشرفت و افزایش سرعت رایانه‌ها در دهه اخیر و در آینده باعث خواهد شد تا این نوع تحلیل‌ها در حوزه مهندسی نیز جای خود را باز کنند. به همین منظور اطلاع و شناخت پایه و اصول دینامیک غیر خطی سازه‌ها، رفتار واقعی ساختمانها در هنگام زلزله برای مهندسان و دانشجویانی که سالها با مفاهیم دینامیک و مهندسی لرزه آشنا بوده‌اند، اجتناب ناپذیر خواهد بود.

کتاب حاضر به منظور شناسایی و بررسی اصول پایه دینامیک غیر خطی سازه‌ها توسط آقایان دکتر بهنام ادهمی، مهندس آرش رستمی و مهندس ساره حقیقی که از دانشجویان دکتری سازه هستند به رشته نگارش درآمده است. امید است که کتاب حاضر بتواند پاسخگوی برخی نیازهای اساتید، دانشجویان و مهندسان علاقمند به درس دینامیک غیر خطی سازه‌ها باشد.

سید مهدی داودنبی

مدیر نشر علم عمران

پیشگفتار

درس دینامیک سازه‌ها یکی از دروس اصلی، مهم و پایه‌ای در مهندسی عمران بالاخص گرایش زلزله، سازه، سازه‌های فولادی و سازه‌های دریایی می‌باشد. همچنین درک بهتر رفتار سازه در طراحی سازه‌ها می‌تواند بسیار مثمر ثمر باشد و به طراحی بهینه، اصولی و مناسب سازه منجر شود. با این تفاسیر مختصر، می‌توان به درک اهمیت دینامیک سازه‌ها در مهندسی عمران پی برد. همچنین دینامیک به خودی خود به عنوان مفهومی بسیار پایه‌ای در دیگر رشته‌های مهندسی من جمله مکانیک، هوانا، متورن و دیگر رشته‌های مرتبط با این موضوع می‌باشد. اصول پایه‌ای دینامیک غیرخطی یکسان است ولی با توجه به نیاز هر گرایش و موضوع مورد مطالعه بر روی مفاهیم خاصی متمرکز می‌شوند. لذا اهمیت دینامیک سازه برای هیچ کس قابل چشم پوشی نیست.

با توجه به دروس دانشگاهی و مهندسی خلأ چنین کتابی با عنوان و محتوایی پیشرفته‌تر توسط نویسندگان احساس می‌شد. با توجه به اینکه در زمینه دینامیک سازه‌ها مقدماتی کتب بسیار ارزشمند و مفیدی در بازار موجود می‌باشد، که توسط اساتید داخل و خارج از کشور نگارش شده است، ولی کمبود کتاب دینامیک سازه پیشرفته یا دینامیک سازه غیرخطی که از دروس اصلی مقاطع دکتری و گاه ارشد می‌باشد در بین این منابع ارزشمند نمود فراوانی داشت. لذا نویسندگان بر آن شدند تا کتابی مقدماتی در این خصوص با استفاده از کتب، مراجع و مقالات مختلف به رشته نگارش و ترجمه در بیاورند. در این کتاب نیز با توجه به کمبود منابع و مراجع معتبر از کتاب با عنوان دینامیک غیرخطی سازه‌ها که توسط سرجیو اولر نگاشته شده استفاده شده است. درس دینامیک سازه پیشرفته یا دینامیک غیرخطی با توجه به عمق مطالب نیازمند پیش زمینه علمی از دیگر دروس می‌باشد تا دریافت مفاهیم و روابط توسط خواننده را تسهیل نماید. پیش نیاز برای این درس را می‌توان دروس: دینامیک سازه‌ها، روش اجزا محدود، مکانیک محیط‌های

پیوسته، ریاضیات پیشرفته و دروس مرتبط با این مفاهیم دانست.

این کتاب با توجه به محتوا از پنج فصل تشکیل شده که در مقدمه به توضیح فصول پرداخته شده است و لذا از تکرار مکررات در این قسمت پرهیز می‌شود. امید است این کتاب که به عنوان مقدمه‌ای بر دینامیک غیرخطی سازه‌ها یا دینامیک سازه پیشرفته می‌باشد برای خوانندگان مفید واقع گردد. شایان ذکر است که نویسندگان در حال نگارش مباحث پیشرفته در این مبحث هستند که شامل تحلیل‌های غیرخطی سازه‌ها نیز می‌شود که در آینده نزدیک وارد بازار می‌شود که با توجه به تجربه نویسندگان در تدریس درس دینامیک سازه‌ها و دروس مرتبط در محیط دانشگاهی بسیار مفید خواهد بود.

در پایان، ارمی‌دانیم از عزیزانی که در این مسیر راهنما و کمک رسان بودند تشکر و قدردانی نماییم. از سرکار خانم فولادی (دفتر فنی پایتخت) بابت تایپ و سرکار خانم رستمی (کانون تبلیغاتی نقش وار) بابت صفحه آرایی و نیز از جناب آقای دکتر مهدی داودنبی، مدیر مسوول محترم انتشارات علم برای کمک حال اینجانبان در این مسیر بودند تشکر و قدردانی می‌نماییم. همچنین با توجه به اینکه این اثر مانند هر اثری به دور از خطا و لغزش نمی‌باشد از خوانندگان عزیز خواهش می‌کنیم نظرات، پیشنهادات و انتقادات خود را به آدرس ایمیل Rostami.Civil.Books@gmail.com ارسال نمایند تا در ویرایش‌های بعدی باعث ارتقا علمی اثر شود.

آرش رستمی، بهنام ادهمی، کاوه حقیقی

اسفند ۱۳۹۵

فهرست مطالب

۱۵	فصل اول: مقدمه
۱۹	فصل دوم: اصل ترمودینامیکی معادله حرکت
۲۱	۱-۲. مقدمه
۲۱	۲-۲. سینماتیک اجسام تغییر شکل پذیر
۲۱	۱-۲-۲. تعاریف پایه‌ای تانسورهای سینماتیکی یک نقطه در فضا
۲۴	۲-۲-۲. انداز گیری‌های کرنشی
۲۵	۳-۲-۲. روابط میان متغیرهای مکانیکی
۲۶	۴-۲-۲. مشتق هدف
۲۷	۵-۲-۲. سرعت
۲۹	۶-۲-۲. اندازه گیری‌های تنش
۲۹	۳-۲. اصل ترمودینامیک
۳۰	۱-۳-۲. قانون اول ترمودینامیک
۳۳	۲-۳-۲. قانون دوم ترمودینامیک
۳۶	۳-۳-۲. شکل موضعی یا مکانی لاگرانژی برای اتلاف مکانیکی
۳۸	۴-۳-۲. متغیرهای درونی
۳۹	۵-۲. معادله تعادل دینامیکی برای جسم صلب گسسته
۴۲	۱-۵-۲. مساله غیر خطی - خطی در آوردن معادله تعادل
۴۵	۶-۲. انواع مختلف مسائل دینامیک غیر خطی
۴۷	۱-۶-۲. غیر خطی‌های ماده
۵۱	فصل سوم: راه حل معادله حرکت
۵۳	۱-۳. مقدمه
۵۵	۲-۳. راه حل صریح - ضمنی
۵۷	۳-۳. راه حل ضمنی
۵۸	۱-۳-۳. تعادل در زمان $(t+\Delta t)$
۵۹	۲-۳-۳. راه حل تعادل در روش‌های ضمنی زمانی
۵۹	۱-۲-۳-۳. روش نیومارک
۶۶	۲-۲-۳-۳. روش هوبلت

۶۹	۳-۳-۳- راه حل سیستم معادلات تعادل غیر خطی
۶۹	۳-۳-۱- روش نیوتن - رافسون
۷۱	۳-۳-۲- روش نیوتن - رافسون تغییر یافته
۷۲	۳-۳-۳- شتاب دهنده یا تسریع کننده همگرایی
۷۳	۳-۳-۴- شتاب دهنده Aitken یا الگوریتم برون یابی
۷۴	۳-۳-۵- الگوریتم های B.F.G.S
۷۵	۳-۳-۶- الگوریتم های نیوتن سکانت
۷۶	۳-۳-۷- الگوریتم های «خط - جستجو»
۷۹	۳-۳-۱- حل الگوریتم های کنترل - «طول»
۸۳	فصل چهارم: تحلیل همگایی راه حل دینامیکی
۸۵	۴-۱- مقدمه
۸۵	۴-۲- کاهش به مساله الاستیک خطی
۸۸	۴-۳- راه حل سیستم های بارزن نظم مرتبه دوم
۸۹	۴-۴- معادله تعادل دینامیکی و همگرایی سازگاری و پایداری آن
۹۱	۴-۵- پایداری راه حل سیستم های مسدود خالی مرتبه دوم
۹۱	۴-۵-۱- فرایند تجزیه و تحلیل پایداری
۹۲	۴-۵-۲- تعیین A و L برای نیومارک
۹۶	۴-۵-۳- تعیین A و L برای تفاضل های مرکزی - شکل - روش نیومارک
۱۰۰	۴-۶- پایداری راه حل سیستم های متقارن غیر خطی مرتبه دوم
۱۰۰	۴-۶-۱- پایداری معادله خطی شده
۱۰۱	۴-۶-۲- الگوریتم های حفاظت از انرژی
۱۱۱	فصل پنجم: مدل های مستقل از زمان
۱۱۳	۵-۱- مقدمه
۱۱۳	۵-۲- رفتار الاستیک
۱۱۶	۵-۲-۱- ثابت ها و نامتغیرهای تانسورها
۱۱۸	۵-۳- الاستیسیته غیر خطی
۱۱۸	۵-۳-۱- مقدمه
۱۱۸	۵-۳-۲- مدل های پیر الاستیک غیر خطی
۱۱۹	۵-۳-۲-۱- مدل های پیر الاستیک تنش - محور
۱۲۰	۵-۳-۲-۲- فرضیه های ثبات

- ۱۲۳ ۴-۵- پلاستیسیته در تغییر شکل های کوچک
- ۱۲۳ ۱-۴-۵- مقدمه
- ۱۲۶ ۲-۴-۵- رفتار گسستگی یا معیار شکست پلاستیک
- ۱۳۰ ۵-۵- رفتار الاستو-پلاستیک
- ۱۳۰ ۱-۵-۵- تنوری Levy-Mises
- ۱۳۱ ۲-۵-۵- Prandtl-Reus تنوری
- ۱۳۲ ۶-۵- تنوری کلاسیک پلاستیسیته
- ۱۳۳ ۱-۶-۵- واحد پلاستیک یا کار ویژه
- ۱۳۵ ۲-۶-۵- سطح بارگذاری پلاستیک-متغیر سخت شدن پلاستیک
- ۱۳۶ ۱-۲-۶-۵- حث مدگی ایزوتروپیک
- ۱۳۸ ۲-۲-۶-۵- سخت شدگم کینماتیک
- ۱۳۹ ۳-۶-۵- رابطه تنش - کرنش. ثبات پلاستیک و سختی تانژانتی
- ۱۴۰ ۷-۵- فرضیه ثبات Drucker حد اکثر میزان پراکندگی یا اتلاف پلاستیکی
- ۱۴۳ ۸-۵- شرط ثبات
- ۱۴۳ ۱-۸-۵- ثبات مکانی
- ۱۴۴ ۲-۸-۵- ثبات کلی
- ۱۴۶ ۹-۵- شرط یکپارچگی unicity در راه حل
- ۱۴۶ ۱۰-۵- Kuhn-Tucker. شرط بارگذاری - عدم بارگذاری
- ۱۴۷ ۱۱-۵- معیار کلاسیک شکست یا گسستگی پلاستیک
- ۱۴۸ ۱-۱۱-۵- معیار Rankine حداکثر تنش انقباضی
- ۱۵۰ ۲-۱۱-۵- معیار Tresca برای حداکثر تنش برشی
- ۱۵۱ ۳-۱۱-۵- معیار Von Mises در تنش برشی هشت وجهی
- ۱۵۳ ۴-۱۱-۵- معیار Mohr-Coulomb در تنش برشی هشت وجهی
- ۱۵۸ ۵-۱۱-۵- Drucker-Prager معیار
- ۱۵۹ ۱۲-۵- پلاستیسیته ژئومتریال ها
- ۱۶۱ ۱۳-۵- مبنای مدل تخریب پلاستیک
- ۱۶۳ ۱-۱۳-۵- رفتار مکانیکی لازم برای فرمول بندی مدل تشکیل دهنده
- ۱۶۴ ۲-۱۳-۵- برخی ویژگی های مدل تخریب پلاستیک
- ۱۶۷ ۱۴-۵- متغیرهای اصلی مدل تخریب - پلاستیک
- ۱۶۸ ۱-۱۴-۵- تعریف متغیر تخریب پلاستیک

- ۱۷۰- ۲-۱۴-۵- تعریف قانون سیر تکاملی چسبندگی C-Kp
- ۱۷۲- ۳-۱۴-۵- تعریف متغیر Φ زاویه اصطکاک داخلی
- ۱۷۶- ۴-۱۴-۵- تعریف متغیر Ψ زاویه اتساع
- ۱۷۷- ۱۵-۵- تعمیم دادن مدل تخریب با کاهش سختی
- ۱۷۷- ۱-۱۵-۵- مقدمه
- ۱۷۹- ۲-۱۵-۵- معادله تشکیل دهنده الاستو پلاستیک با تجزیه یا تلاشی سختی
- ۱۸۲- ۳-۱۵-۵- معادله تشکیل دهنده تانژانتی برای فرآیندهای تجزیه یا تلاشی سختی
- ۱۸۳- ۴-۱۵-۵- رابع شکست خاص
- ۱۸۳- ۱-۱۵-۵- تابع تغییر یافته Mohr-Coulomb
- ۱۸۷- ۱-۴-۱۵-۵- تابع تغییر یافته Drucker-Prager
- ۱۸۸- ۱۶-۵- مقدمه ای بر تخریب ایزوتروپیک پیوسته
- ۱۸۹- ۱-۱۶-۵- مدل تخریب ایزوتروپیک
- ۱۹۰- ۱۷-۵- انرژی آزاد هلمهولتز و معادله تشکیل دهنده
- ۱۹۲- ۱۸-۵- معیار آستانه تخریب
- ۱۹۳- ۱۹-۵- قانون بسط متغیر تخریب داسی
- ۱۹۴- ۲۰-۵- تانسور تشکیل دهنده تانژانتی برای تخریب
- ۱۹۵- ۲۱-۵- توصیف دقیق معیار تخریب
- ۱۹۵- ۱-۲۱-۵- نرم شدگی کلی یا عمومی
- ۱۹۸- ۲-۲۱-۵- نرم شدگی نمایی یا تصاعدی
- ۱۹۹- ۳-۲۱-۵- نرم شدگی خطی
- ۲۰۰- ۲۲-۵- توضیح دقیق تابع آستانه تنش
- ۲۰۰- ۱-۲۲-۵- Simo-Ju مدل
- ۲۰۰- ۱-۱-۲۲-۵- تعیین پارامتر A برای مدل Simo-Ju
- ۲۰۲- ۲-۲۲-۵- Mazars و Lemaitre مدل
- ۲۰۳- ۳-۲۲-۵- مدل کلی برای سطوح تخریب مختلف
- ۲۰۳- ۴-۲۲-۵- تعیین کردن پارامتر A
- ۲۰۷- فصل ششم: مدل های وابسته به زمان
- ۲۰۹- ۱-۶- مقدمه
- ۲۰۹- ۲-۶- معادلات تشکیل دهنده بر مبنای شباهت های فنر- میرایی
- ۲۱۰- ۱-۲-۶- مدل ساده مش کلوین

- ۲۱۱ ۶-۲-۲- مدل ساده شده کلسیون
- ۲۱۲ ۶-۲-۳- مدل کلوین کلی شده
- ۲۱۴ ۶-۲-۴- مدل چندگانه تعمیم یافته کلوین
- ۲۱۶ ۶-۲-۵- مدل تعمیم یافته مکسول
- ۲۱۹ ۶-۲-۶- مدل مکسول تعمیم یافته چندگانه
- ۲۲۱ ۶-۲-۱- محاسبه اتلاف
- ۲۲۲ ۶-۳-۳- تعمیم سازی چندمحوری قوانین تشکیل دهنده ویسکوالاستیک
- ۲۲۲ ۶-۳-۱- شکل چندمحوری مدل های ویسکوالاستیک
- ۲۲۴ ۶-۳-۲- راه حل عددی انتگرال ها و الگوریتم ها
- ۲۲۷ ۶-۴-۴- مدل کلوین در مسائل دینامیک
- ۲۲۸ ۶-۴-۱- اتلاف مدل کله بن
- ۲۲۹ ۶-۴-۲- معادله تعادل دینامیک برای معادله کلوین
- ۲۳۱ ۶-۴-۳- مقایسه تنش مدل ایلی در مقابل مدل کلوین
- ۲۳۱ ۶-۴-۴- مقایسه اتلاف مدل ایلی در مقابل مدل کلوین
- ۲۳۳ ۶-۴-۵- میله معلق (طره)
- ۲۳۵ ۶-۴-۶- قاب با میله صلب و جرم متحرک
- ۲۳۷ ۶-۵-۵- ویسکوپلاستیسیته
- ۲۳۹ ۶-۵-۱- حالت های محدود ویسکوپلاستیسیته
- ۲۴۰ ۶-۵-۲- تابع فوق تنشی
- ۲۴۱ ۶-۵-۳- الگوریتم انتگرال گیری برای معادله تشکیل دهنده ویسکوالاستیک
- ۲۴۳ ۶-۵-۴- حالت های خاصی از مدل Duvaut-Lyon
- ۲۴۵ برای ماده ویسکوپلاستیک Von-Mises لغتنامه