

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

دینامیک غیر خطی سازه‌ها

ترجمه و تالیف

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

آرش رستمی - دانشجوی دکتری مهندسی زلزله

کاوه حقیقی - دانشجوی دکتری مهندسی زلزله



نشر علم عمران

www.elme-omran.com

Info@elme-omran.com

عضو:



انجمن فنی نشر کتاب جمهوری اسلامی ایران

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این

اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

| | |
|---------------------|--|
| 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 | : ۹۷۸-۶۰۰-۵۱۷۶-۳۴-۶ ریال: ۲۵۰۰۰۰ |
| موضوع | : دینامیک سازه‌ها |
| موضوع | : Structural dynamics |
| موضوع | : Nonlinear Dynamic، دینامیک غیر خطی، |
| شناسه افزوده | : ادهمی، بهنام، ۱۳۴۹ - حقیقی، کاوه، ۱۳۵۷ |
| رده بندی کنگره | : ۱۳۹۶ ۵۹/۵۴/۴ TA۶۵۴ |
| رده بندی دیویی | : ۶۲۴/۱۷۱ |
| شماره کتابشناسی ملی | : ۴۶۵۰۹۲۷ |



نشر علم عمران

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 و وزیری |
| شمارگان | ۱۰۰۰ |
| بهای کتاب | ریال ۲۵۰۰۰۰ |
| 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: ۸۱۳۵۳۹۳۰-۳۱ دورنگار: ۸۱۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

پیشگفتار ناشر

اصولا تحلیل سازه‌های ساختمانی به دو روش استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود. معمولا 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 معمولا 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 و رفتار واقعی ساختمانها در هنگام زلزله برای مهندسان و دانشجویانی که سالها با مفاهیم دینامیک و مهندسی زلزله آشنا بوده‌اند، اجتناب ناپذیر خواهد بود.

کتاب حاضر به منظور شناخت و بررسی اصول پایه دینامیک غیر خطی سازه‌ها توسط آقایان دکتر بهنام ادهمی، مهندس آرش رستمی و مهندس کاوه 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 داودنپی

مدیر نشر علم عمران

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

زندگی صحنه یکتایی هنرمندی ماست

هر کسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته به جاست

خرم آن نغمه که مردم بسیارند به یاد...

با توجه به سرمایه‌گذاری شخصی در چاپ کتاب کلیه هزینه حاصل از فروش
به موسسه خیریه «مهرانه» و «انجمن خیریه حمایت از بیماران کلیوی» تقدیم می‌گردد.

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم

و

تقدیم به اسطوره های جاوید سرزمینم، خواصان دست بسته ای که بی بال پرکشیدند.

آرش رستمی

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

تقدیم به

اسطوره‌های جاوید سرزمینم، غواصان دست بسته‌ای که بی‌بال پرکشیدند.

کادو حقیقی و به‌نام ادبی

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

پیشگفتار

درس دینامیک سازه‌ها یکی از دروس اصلی، مهم و پایه‌ای در مهندسی عمران بالاخص گرایش زلزله، سازه، سازه‌های هیدرولیکی و سازه‌های دریایی می‌باشد. همچنین درک بهتر رفتار سازه در طراحی سازه‌ها نیز 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، هوافضا، متالوژی 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 سازه 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 سرژیو 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

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

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 لازم می‌دانیم 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 واره) بابت صفحه آرایی و نیز از جناب آقای دکتر مهدی داودنپی، مدیر مسوول محترم انتشارات علم عمران که دلسوزانه 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 تقاضا داریم 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 | ۱-۲-۱. مقدمه |
| ۲۱ | ۲-۲-۱ سینماتیک اجسام تغییرشکل پذیر |
| ۲۱ | ۱-۲-۲ تعاریف پایه‌ای تانسورهای سینماتیکی یک نقطه در فضا |
| ۲۴ | ۲-۲-۲ اندازه‌گیری‌های کرنشی |
| ۲۵ | ۳-۲-۲ روابط میان متغیرهای مکانیکی |
| ۲۶ | ۴-۲-۲ مشتق هدف |
| ۲۷ | ۵-۲-۲ سرعت |
| ۲۹ | ۶-۲-۲ اندازه‌گیری‌های تنشی |
| ۲۹ | ۳-۲-۳ 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 | ۴-۲-۴ متغیرهای درونی |
| ۳۹ | ۵-۲-۴ معادله تعادل دینامیکی برای جسم صلب گسسته |
| ۴۲ | ۱-۵-۲ مساله غیرخطی - خطی در آوردن معادله تعادل |
| ۴۵ | ۶-۲-۴ انواع مختلف مسایل دینامیک غیرخطی |
| ۴۷ | ۱-۶-۲ غیرخطی‌های ماده |
| ۵۱ | فصل سوم: راه حل معادله حرکت |
| ۵۳ | ۱-۳-۱ مقدمه |
| ۵۵ | ۲-۳-۱ راه حل صریح - ضمنی |
| ۵۷ | ۳-۳-۱ 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 |

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

- ۶۹ ۳-۳-۳- راه حل سیستم معادلات تعادل غیرخطی
- ۶۹ ۱-۳-۳-۳- روش نیوتن - رافسون
- ۷۱ ۲-۳-۳-۳- روش نیوتن - رافسون تغییر یافته
- ۷۲ ۳-۳-۳-۳- شتاب‌دهنده یا تسریع کننده همگرایی
- ۷۳ ۴-۳-۳-۳- شتاب‌دهنده Aitken یا الگوریتم برون‌یابی
- ۷۴ ۵-۳-۳-۳- الگوریتم‌های B.F.G.S
- ۷۵ ۶-۳-۳-۳- الگوریتم‌های نیوتن سکانت
- ۷۶ ۷-۳-۳-۳- الگوریتم‌های «خط - جستجو»
- ۷۹ ۸-۳-۳-۳- حل الگوریتم‌های کنترل - «طول»
- ۸۳ **فصل چهارم: تحلیل همگرایی راه حل دینامیکی**
- ۸۵ ۱-۴- مقدمه
- ۸۵ ۲-۴- کاهش به مساله الاستیک خطی
- ۸۸ ۳-۴- راه‌حل سیستم‌های متقارن خطی مرتبه دوم
- ۸۹ ۴-۴- معادله تعادل دینامیکی و همگرایی-سازگاری و پایداری آن
- ۹۱ ۵-۴- پایداری راه‌حل سیستم‌های متقارن خطی مرتبه دوم
- ۹۱ ۱-۵-۴- فرآیند تجزیه و تحلیل پایداری
- ۹۲ ۲-۵-۴- تعیین **A** و **L** برای نیومارک
- ۹۶ ۳-۵-۴- تعیین **A** و **L** برای تفاضل‌های مرکزی- شکل صریح روش نیومارک
- ۱۰۰ ۶-۴- پایداری راه‌حل سیستم‌های متقارن غیرخطی مرتبه دوم
- ۱۰۰ ۱-۶-۴- پایداری معادله خطی شده
- ۱۰۱ ۲-۶-۴- الگوریتم‌های حفاظت از انرژی
- ۱۱۱ **فصل پنجم: مدل‌های مستقل از زمان**
- ۱۱۳ ۱-۵- مقدمه
- ۱۱۳ ۲-۵- رفتار الاستیک
- ۱۱۶ ۱-۲-۵- ثابت‌ها و نامتغیرهای تانسورها
- ۱۱۸ ۳-۵- الاستیسیته غیرخطی
- ۱۱۸ ۱-۳-۵- مقدمه
- ۱۱۸ ۲-۳-۵- مدل هایپر الاستیک غیرخطی
- ۱۱۹ ۱-۲-۳-۵- مدل هایپر الاستیک تنش - محور
- ۱۲۰ ۲-۲-۳-۵- فرضیه‌های ثابت

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

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

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

- 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- توابع شکست خاص
- ۱۸۳ ۱-۴-۱۵-۵- تابع تغییر یافته Mohr-Coulomb
- ۱۸۷ ۲-۴-۱۵-۵- تابع تغییر یافته Drucker-Prager
- ۱۸۸ ۱۶-۵- مقدمه‌ای 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 داخلی
- 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- مدل Simo-Ju
- ۲۰۰ ۱-۱-۲۲-۵- تعیین پارامتر A برای مدل Simo-Ju
- ۲۰۲ ۲-۲۲-۵- مدل Mazars و Lemaitre
- ۲۰۳ ۳-۲۲-۵- مدل کلی برای سطوح تخریب مختلف
- ۲۰۳ ۴-۲۲-۵- تعیین کردن پارامتر A
- ۲۰۷ **فصل ششم: مدل‌های وابسته به زمان**
- ۲۰۹ ۱-۶- مقدمه
- ۲۰۹ ۲-۶- معادلات تشکیل دهنده بر مبنای شباهت‌های فنر- میرایی
- ۲۱۰ ۱-۲-۶- مدل ساده مش کلوین

فهرست کتاب با اجازه ناشر منتشر شده است

- ۲۱۱ ۶-۲-۲- مدل ساده شده کلسیون
- ۲۱۲ ۶-۲-۳- مدل کلویین کلی شده
- ۲۱۴ ۶-۲-۴- مدل چندگانه تعمیم یافته کلویین
- ۲۱۶ ۶-۲-۵- مدل تعمیم یافته مکسول
- ۲۱۹ ۶-۲-۶- مدل مکسول تعمیم یافته چندگانه
- ۲۲۱ ۶-۲-۶-۱- محاسبه اتلاف
- ۲۲۲ ۶-۳- 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- مدل کلویین در مسائل دینامیک
- ۲۲۸ ۶-۴-۱- اتلاف مدل کلویین
- ۲۲۹ ۶-۴-۲- معادله تعادل دینامیک برای معادله کلویین
- ۲۳۱ ۶-۴-۳- مقایسه تنش، مدل رایلی در مقابل مدل کلویین
- ۲۳۱ ۶-۴-۴- مقایسه اتلاف مدل رایلی در مقابل مدل کلویین
- ۲۳۳ ۶-۴-۵- میله معلق (طره)
- ۲۳۵ ۶-۴-۶- قاب با میله صلب و جرم متمرکز
- ۲۳۷ ۶-۵- 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 ویسکو پلاستیک
- ۲۴۳ ۶-۵-۴- حالت های خاصی از مدل Duvaut-Lyon
برای ماده ویسکوپلاستیک Von-Mises
- ۲۴۵ لغتنامه