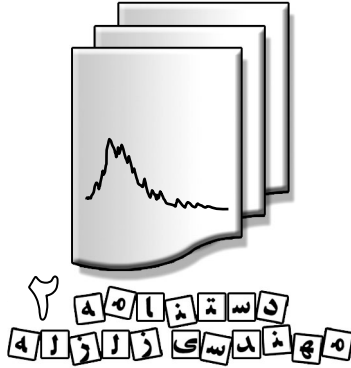


برنام آن که جان را فکرت آموخت



# ارتعاشات ساختمان‌های برشی

تألیف:

دکتر محمدرضا تابش پور

(عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت معلم سبزوار)



سبزوار ایستیس

سرشناسه	: تابش پور، محمدرضا، ۱۳۵۴-۱۳۵۴
عنوان و نام پدیدآور	: ارتعاشات ساختمان‌های برشی / تألیف محمدرضا تابش پور.
مشخصات نشر	: تهران: فدک ایستایس، ۱۳۸۹.
مشخصات ظاهری	: ۱۲۰ ص.
شابک	: ۳۵۰۰۰ ریال : ۲-۱۴-۰۰۱۶۰-۰۰۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۱۰۷.
موضوع	: ساختمان سازی ضد زلزله -- دستنامه‌ها
موضوع	: سازه -- دینامیک -- دستنامه‌ها
رده بندی کنگره	: ۱۳۸۹ الف ۴۴/ت ۲-۴۵۸/۴ TA
رده بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۷۶۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۱۷۴۵۴۹

## ارتعاشات ساختمان‌های برشی



تألیف	: محمدرضا تابش پور
مدیر تولید	: مجیدرضا زروئی
صفحه‌آرایی	: مونا سروری
نوبت چاپ	: اول - ۱۳۸۹
تیراژ	: ۱۵۰۰
لیتوگرافی	: مهران نگار
چاپ	: گنج‌شایگان
صحافی	: کیمیا
قیمت	: ۳۵۰۰۰ ریال
شابک	: ۲-۱۴-۰۰۱۶۰-۰۰۶۰۰-۹۷۸

**دفتر انتشارات :** تهران - خیابان انقلاب - خیابان اردیبهشت - بین‌لبافی‌نژاد و جمهوری - ساختمان ۱۰ (۱۲۶ قدیم)  
 تلفن : ۶۶۴۶۵۸۳۱ - ۶۶۴۸۱۰۹۶ - ۶۶۴۸۲۲۲۱

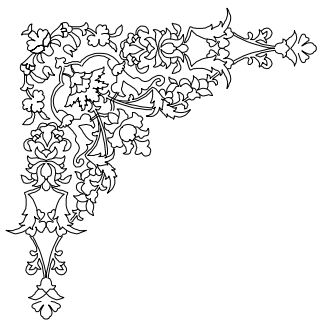
**نمایندگی تهران:** خیابان انقلاب - نبش ۱۲ فروردین - پلاک ۱۴۴۶ - انتشارات صانعی تلفن : ۶۶۴۱۲۳۹۵

**نمایندگی یزد:** میدان آزادی (باغ ملی) - ابتدای خیابان فرخی - جنب مجتمع ستاره  
 تلفن: ۶۲۲۷۴۷۵ - ۶۲۲۶۷۷۱ - ۶۲۲۶۷۷۲

**www.fadakbook.ir - Email: fadakbook@yahoo.com**

کلیه‌ی حقوق و حق چاپ متن و عنوان کتاب که به ثبت رسیده است؛ مطابق با قانون حقوق مولفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸ محفوظ و متعلق به انتشارات فدک ایستایس می‌باشد. هرگونه برداشت، تکثیر، کپی برداری به هر شکل (چاپ، فتوکپی، انتشار الکترونیکی) بدون اجازه کتبی از انتشارات فدک ایستایس، ممنوع بوده و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار خواهند گرفت.

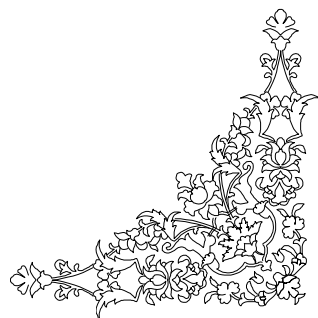
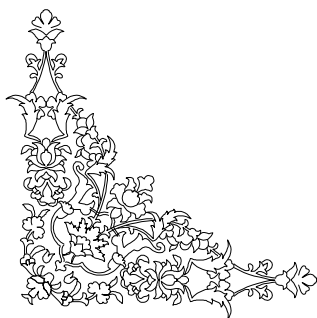
معاونت حقوقی  
 انتشارات فدک ایستایس



تقدیم بہ:

# حمید طاہری شہر آئینی

محمد رضا تابش پور





## سخن مؤلف

با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران باید به دروس و سرفصل‌های مربوط به مهندسی زلزله و طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله توجه خاصی شود. تدوین کتاب‌های درسی منطبق با سرفصل‌های مناسب از فعالیتهای مهم در این راستا است. به‌منظور انجام وظیفه در راستای این رسالت، این‌جانب بر آن شدم تا بر اساس دستاوردهای مهندسی زلزله و با توجه به تجربیات مربوط به زلزله‌های گذشته، دوره‌ی «دستنامه‌ی مهندسی زلزله» را به جامعه‌ی مهندسی عمران و معماری کشور تقدیم کنم. این دوره شامل مجموعه‌ی نسبتاً کاملی از مطالب علمی این زمینه است. کتاب حاضر دومین کتاب از این سری بوده و در سه فصل تدوین شده است.

هدف از این کتاب، بررسی ارتعاشات ساختمان‌های برشی است. ویژگی‌های ارتعاشی این ساختمان‌ها و فراوانی کاربرد آن‌ها به نحوی که دانشجویان دوره‌ی کارشناسی در کنار سرفصل‌های درس مبانی مهندسی زلزله از اهمیت خاصی برخوردار است. هم‌چنین مطالب ارائه‌شده در فصل دوم می‌تواند پاسخ‌گوی برخی از سؤالات دانشجویان کارشناسی ارشد در درس دینامیک سازه‌ها باشد.

از سرکار خانم مریم رحیمی که حروف‌چینی قسمت‌های عمده‌ای از کتاب را برعهده داشته‌اند؛ تشکر می‌شود. سرکار خانم مونا سروری بازخوانی و ویرایش ادبی قسمت‌های عمده‌ای از کتاب و صفحه‌آرایی قسمت‌هایی از آن را بر عهده داشته‌اند که از زحمات ایشان صمیمانه تقدیر می‌شود.

آقای محمد کرمی‌شاهنده کمک بی‌شائبه‌ای در فرآیند تولید این کتاب داشته‌اند. از لطف ایشان صمیمانه تشکر می‌شود. آقای رضا کرمی‌شاهنده علاوه بر مدیریت تولید انتشاراتی فدک ایساتیس، تلاش‌های زیادی در راستای افزایش کیفیت چاپ کتاب و صفحه‌آرایی آن انجام داده‌اند. آقای مجیدرضا زروئی مدیرعامل این انتشاراتی با دقت فراوانی فرآیند تولید کتاب را پی‌گیری می‌کنند؛ از حوصله و زحمات این عزیزان تقدیر می‌شود.

از اساتید، دانشجویان و مهندسان محترم تقاضا می‌شود که نظرات و پیشنهادات خود را برای اصلاح و رفع نقایص کتاب برای نویسنده ارسال فرمایند. پیشاپیش از تمامی منتقدان و پیشنهاددهندگان که اینجانب را مورد منت قرار داده و زحمت ارسال نظرات خود را تقبل می‌کنند، صمیمانه تشکر می‌شود.

محمد رضا تابش‌پور

تهران، ۱۳۸۹

tabeshpour@yahoo.com



## فهرست مطالب

### فصل اول: ارتعاش سیستم یک درجه آزادی

- ۱.۱ معادله‌ی حرکت ۳
- ۲.۱ لزجت ۴
- ۳.۱ ارتعاش آزاد ۴
  - ۱.۳.۱ میرایی اندک ۵
  - ۲.۳.۱ میرایی بحرانی ۶
  - ۳.۳.۱ میرایی زیاد ۷
- ۴.۱ ارتعاش اجباری ۷
  - ۱.۴.۱ تشدید ۹
  - ۲.۴.۱ اتلاف انرژی ۱۱
- ۵.۱ فنر و میراگر معادل ۱۲
- ۶.۱ تحلیل سیستم با استفاده از روش تبدیل لاپلاس ۱۲
- ۷.۱ میرایی هیسترتیک (چرخه‌ای) ۱۴

### فصل دوم: خواص ارتعاشی سازه‌های برشی

- ۱.۲ مقدمه ۲۱
- ۲.۲ معادلات دینامیکی ۲۲
- ۳.۲ تئوری مسأله‌ی معکوس ۲۴
- ۴.۲ مسأله‌ی معکوس برای ماتریس ژاکوبی ۲۷
- ۵.۲ مسأله‌ی معکوس برای سیستم جرم و فنر ۲۸
- ۶.۲ حل مسائل ۳۱

## فصل سوم: ارتعاش ساختمان‌های چند طبقه

- ۱.۳ مقدمه ۳۷
- ۲.۳ حل معادله‌ی تعادل دینامیکی ۳۷
- ۳.۳ تعامد مودها ۴۴
- ۴.۳ غیردرگیر بودن معادلات تعادل دینامیکی ۴۵
- ۵.۳ ارتعاش آزاد با شرایط اولیه ۴۸
- ۶.۳ تحلیل مودی سیستم میرا ۵۳
- ۷.۳ ارتعاش اجباری ۵۵
- ۸.۳ ارتعاش اجباری تحت نیروی هارمونیک ۵۶
- ۹.۳ ارتعاش اجباری تحت بار غیردائمی ۵۹
- ۱۰.۳ تحریک پایه ۶۵
- ۱۱.۳ تحلیل طیفی مودی (تحلیل شبه‌دینامیکی) ۷۹
- ۱۲.۳ جابه‌جایی بیشینه‌ی مودی ۸۲
- ۱۳.۳ برش پایه ۸۸
- ۱۴.۳ لنگر واژگونی ۸۸
- ۱۵.۳ جمع کردن نتایج حاصل از مودهای مختلف ... ۹۱
  - ۱.۱۵.۳ بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی سازه ۹۱
  - ۲.۱۵.۳ بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه ۹۱
  - ۳.۱۵.۳ بیشینه‌ی برش طبقه ۹۲
  - ۴.۱۵.۳ بیشینه‌ی برش پایه ۹۲
  - ۵.۱۵.۳ بیشینه‌ی لنگر واژگونی طبقه ۹۳
  - ۶.۱۵.۳ بیشینه‌ی لنگر واژگونی پایه ۹۳
- ۷.۱۵.۳ نیروهای استاتیکی معادل مرتبط با بیشینه‌ی ... ۹۳
  - ۱۶.۳ بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقات ۹۵
  - ۱۷.۳ بیشینه‌ی نیروی طبقه ۹۶
  - ۱۸.۳ مقدار بیشینه‌ی برش طبقه ۹۶



۱۹.۳	مقدار بیشینه‌ی برش پایه	۹۷
۲۰.۳	بیشینه‌ی لنگر واژگونی	۹۸
۲۱.۳	مقدار بیشینه‌ی لنگر واژگونی پایه	۹۹
۲۲.۳	نیروهای معادل استاتیکی	۹۹
۲۳.۳	رابطه‌ی برش پایه و توزیع نیرو در ارتفاع ساختمان	۱۰۰



## فهرست شکل‌ها

- ۱.۱ سازه و مدل سیستم یک‌درجه آزادی ۳
- ۲.۱ پاسخ ارتعاش آزاد سیستم میرا ۶
- ۳.۱ ارتعاش آزاد سیستم دارای میرایی بحرانی و بزرگ ۶
- ۴.۱ دامنه‌ی حرکت ارتعاش اجباری بر حسب فرکانس ۹
- ۵.۱ پاسخ معادله‌ی دیفرانسیل مسأله‌ی (۱-۱) ۱۰
- ۶.۱ زاویه‌ی فاز در حالت ارتعاش میرا ۱۰
- ۷.۱ پاسخ معادله‌ی دیفرانسیل مسأله‌ی (۲-۱) ۱۱
- ۸.۱ پاسخ سیستم به بارگذاری پله‌ای ۱۴
- ۹.۱ دامنه‌ی ارتعاش اجباری با میرایی چرخه‌ای ۱۶
- ۱۰.۱ زاویه‌ی فاز مربوط به ارتعاش اجباری در حالت میرایی چرخه‌ای ۱۷
- ۱.۲ ساختمان برشی ۲۳
- ۲.۲ مدل کمکی ۲۹
- ۳.۲ ساختمان مسأله‌ی سوم ۳۲
- ۱.۳ ساختمان مسأله‌ی (۱-۳) ۴۰
- ۲.۳ پاسخ سیستم به جابه‌جایی اولیه، حالت الف. ۵۱
- ۳.۳ رابطه‌ی بین میرایی و فرکانس برای میرایی رایلی ۵۵
- ۴.۳ سازه تحت نیروی هارمونیک ۵۷
- ۵.۳ ساختمان و بارگذاری مربوط به مسأله‌ی (۴-۳) ۶۰
- ۶.۳ شکل‌های مودی و پریودهای سازه ۶۱
- ۷.۳ پاسخ درجات آزادی غیردرگیر مربوط به مسأله (۴-۳) ۶۳
- ۸.۳ نیروهای مودی (مود i) ۶۷
- ۹.۳ ساختمان مسأله (۵-۳) ۶۹
- ۱۰.۳ پریود و شکل‌های مودی مسأله‌ی (۵-۳) ۷۱
- ۱۱.۳ پاسخ مختصات غیردرگیر مربوط به مسأله‌ی (۵-۳) ۷۳
- ۱۲.۳ تاریخچه‌ی زمانی پاسخ جابه‌جایی بام برای مودهای مختلف مربوط... ۷۸
- ۱۳.۳ برش پایه‌ی سازه ۷۹
- ۱۴.۳ تاریخچه‌ی لنگر واژگونی سازه ۷۹
- ۱۵.۳ طیف پاسخ جابه‌جایی برای رکورد زلزله‌ی السترو (مسأله ۳-۶) ۸۱
- ۱۶.۳ جابه‌جایی‌های بیشینه در هر مود ۸۴

- ۱۷.۳ جابه‌جایی نسبی بیشینه‌ی طبقات برای هر مود ۸۵
- ۱۸.۳ نیروهای بیشینه برای هر مود ۸۶
- ۱۹.۳ بیشینه‌ی برش طبقات در هر مود ۸۷
- ۲۰.۳ دیاگرام لنگر واژگونی طبقات برای هر مود ۸۹
- ۲۱.۳ جرم مؤثر مودی برای مود اول ۱۰۴

## فهرست جداول

- ۱.۲ مقادیر ویژه‌ی مثال‌ها ( $\lambda_i = \omega_i^2$ ) ۳۲
- ۲.۲ ورودی مثال‌ها ۳۳
- ۳.۲ خروجی مثال‌ها ۳۳
- ۱.۳ مقادیر متناظر با پیوندها از روی طیف ۸۲
- ۲.۳ مقادیر جابه‌جایی بیشینه برای درجات آزادی غیردرگیر ۸۲
- ۳.۳ مقادیر جابه‌جایی نسبی بیشینه‌ی طبقات (درصدی از ارتفاع طبقه) ۸۴
- ۴.۳ مقادیر برش مودی طبقات ۸۷
- ۵.۳ مقادیر بیشینه‌ی لنگر واژگونی طبقات در مودهای مختلف ۸۸
- ۶.۳ مقایسه‌ی مقادیر حاصل از مسائل ۳-۵ و ۳-۶ ۹۰
- ۷.۳ مقادیر طیفی مودی برش طبقه ۹۷
- ۸.۳ لنگر واژگونی طبقات در مودهای مختلف ۹۸
- ۹.۳ مقایسه‌ی نتایج مسأله‌های (۳-۵) و (۳-۶) و (۳-۷) ۱۰۰
- ۱۰.۳ سهم مود اول برای مقادیر مختلف  $k$  ۱۰۵



ارتعاش سیستم یک درجه آزادی



# فصل



## ۱.۱ معادله‌ی حرکت

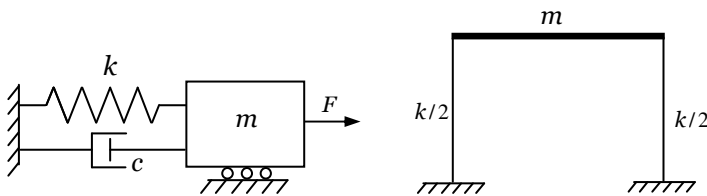
مطابق شکل ۱.۱ یک سیستم یک درجه آزادی را در نظر بگیرید. با توجه به قانون تعادل دینامیکی (قانون دوم نیوتن) می‌توان نوشت:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = P(t) \quad (1-1)$$

که در آن  $P(t)$  کل نیروی وارده به جرم و  $u$  جابجایی جرم است. اگر به جرم، فنر با سختی  $k$  و میراگر  $c$  متصل باشد و نیروی خارجی  $F$  نیز به آن وارد شود، می‌توان نوشت:

$$P(t) = F(t) - ku - c \frac{du}{dt} \quad (2-1)$$

$ku$  نیروی فنر و  $c \frac{du}{dt}$  نیروی میراگر است.



سازه و مدل سیستم یک‌درجه آزادی

شکل ۱.۱