

ارتعاشات تصادفی سازه‌ها

نویسنده:

سید علی ینگ

ترجمه:

محمد علی رهبر

استاد یار گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

سید صابر آل صاحب فصول

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

بهار ۱۳۹۲

سرشناسه

یانگ، دزونگ یوان

Zongyuan, Yang

عنوان و نام پدیدآور

ارتعاشات تصادفی سازه‌ها/ نویسنده سی‌وای یانگ؛ ترجمه محمدعلی رهگذر، سیدصابر آل صاحب‌فصول.

مشخصات نشر

اصفهان: دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۱.

مشخصات ظاهری

۴۱۰ص: مصور، جدول، نمودار.

روست

انتشارات دانشگاه اصفهان؛ ۵۸۴.

شک

۹۷۸-۶۰۰-۱۱۰۰-۰۴۵-۱

وضعیت فهرست‌نویسی

فیپا

ندداشت

عنوان اصلی: Random vibration of structures.

موضوع

سازه - دینامیک

موضوع

ارتعاش اتفاقی

شناسه افزوده

رهگذر، محمدعلی، ۱۳۴۴ - مترجم

شناسه افزوده

آل صاحب‌فصول، سیدصابر، ۱۳۶۶ - مترجم

شناسه افزوده

دانشگاه اصفهان

رده بندی کنگره

۱۳۹ تف ۵۴/۱ TA۶۵۴۱

رده بندی دیویی

۶۲۰۷۶

شماره کتابشناسی ملی

۳۰۳۶۱۳۶



انتشارات دانشگاه اصفهان

ترجمه: دکتر محمد علی رهگذر، مهندس صابر آل صاحب فصول.

ناشر: دانشگاه اصفهان

نوبت چاپ: چاپ اول - بهار ۱۳۹۲

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

چاپ و صحافی: چاپخانه دانشگاه اصفهان

بهاء: ۱۳۵۰۰۰ ریال

کلیه حقوق نشر برای ناشر محفوظ است

مراکز فروش کتاب:

اصفهان: میدان آزادی - خیابان دانشگاه - فروشگاه کتاب دانشگاه

تلفن: ۰۳۱۱-۷۹۳۲۱۷۷ پست الکترونیکی: entesharat@ui.ac.ir

تهران: میدان انقلاب - خیابان نصرت - خیابان دکتر قرب، نرسیده به خیابان فرصت - پلاک ۱۱

موسسه کتابیران، مرکز پخش کتابهای دانشگاهی - تلفن: ۰۲۱-۶۶۵۶۶۵۱۰-۱۵

پیش‌گفتار مطالب

برآورد ایمنی یکی از مهم‌ترین امور در حوزه‌ی مهندسی و طراحی سازه‌ها می‌باشد که به دلیل عدم قطعیت موجود در تعیین بسیاری از پارامترهای حائز اهمیت در طرح نهایی، معمولاً امر پیچیده‌ای تعدادی کرده به عنوان مثال در طراحی یک ساختمان بلند، اطلاعات موجود راجع به نوع خاک زمین، ساختمان (فونداسیون)، فشار باد و یا نوع زلزله در منطقه‌ی ساختمان معمولاً با عدم قطعیت همراه است. هدف اصلی در مطالعه‌ی ارتعاشات تصادفی سازه‌ها برای مهندسان عمران و مکانیک، تحلیل و درک این عدم قطعیت‌ها در بارگذاری‌های دینامیکی و تأثیرات آن بر روی ایمنی سازه‌ها می‌باشد.

معمولاً اثر بارها و تحریکات دینامیکی ناشی از فشار باد، زلزله و امواج اقیانوس‌ها توسط روش‌های خامی نظیر انتخاب یک تابع «پیشینه بار طراحی-زمان» یا میانگین چند تابع مهم «بار طراحی-زمان» بیان می‌شود. هر دو روش فوق اساساً کارا نیستند زیرا اگرچه در بعضی موارد نشانه‌هایی منطقی از شرایط آینده‌ی بارگذاری به دست می‌دهند ولی نمی‌توانند مهندس سازه را در رسیدن به پاسخی دقیق، کمی و منطقی به مسائل وسعت ایمنی سازه یاری رسانند. علاوه بر مورد فوق، به دلیل گستره‌های عموماً وسیع در محاسبه و شدت‌های بسیار تصادفی مؤلفه‌های فرکانسی مختلف، پاسخ سازه نیز می‌تواند دارای شدت‌های بسیار تصادفی و همراه با باند فرکانسی بسیار گسترده باشد که این امر مسأله ایمنی سازه را بسیار پیچیده و حل آن را بسیار مشکل می‌سازد.

ارتعاشات تصادفی سازه‌ها یکی از شاخه‌های مهندسی است که در سه مرحله‌ی اساسی به مسائل مربوط به چنین عدم قطعیت‌های پیچیده‌ای می‌پردازد. مرحله‌ی نخست، مشخص کردن تحریکات تصادفی در واقعی‌ترین حالت، با استفاده از روش‌های آماری است. سپس سیستم سازه تحت یک تحلیل تحریک-پاسخ قرار می‌گیرد و در نهایت ایمنی سازه بر مبنای معیارهای مختلف شکست، ارزیابی می‌گردد. در این روش، عدم قطعیت موجود در تحریک تصادفی در کل مسأله‌ی طراحی سازه، مورد ارزیابی و تحلیل ریشه‌ای قرار می‌گیرد. هم‌چنین مراحل دوم و سوم دارای هیچ‌گونه عدم قطعیتی اضافه بر فرض‌های موجود در مدل سازه (چه سختی و میرایی) و معیارهای شکست (تسلیم و خستگی) نمی‌باشند. حاصل چنین تحلیل از ارتعاشات تصادفی، بیانی از سطح ایمنی سازه با استفاده از معادلات احتمالاتی است که منجر به ارزیابی برنامه‌ریزی و طراحی سازه ارزشمند می‌باشد.

این نوشتار به بررسی مهندسی فوق در ذهن مؤلف شکل گرفته و با تجربه‌ی به دست آمده طی بیش از هجده سال تدریس، تجربه و تحقیق در دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه دلویر (Delware) آمریکا تهیه شده است. این کتاب به دلیل پیش‌زمینه‌های مورد نیاز مانند دینامیک سازه‌ها، ریاضیات معادلات دیفرانسیل و آمار و احتمالات، در وهله‌ی اول برای دانشجویان دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری رشته‌های مهندسی عمران و مکانیک مناسب است. دانشجویان سال آخر دوره‌ی کارشناسی با پیش‌زمینه‌ی مناسب نیز می‌توانند در کلاس‌های ده تا پانزده نفری و راهنمایی‌های استادگانه، استاد مربوطه، به برداشت‌های مشابهی با دانشجویان دوره‌های بالاتر دست یابند. این کتاب برای مهندسين سازه‌ی مشغول در دفاتر فنی نیز درکی قابل قبول از مفاهیم بنیادی و کاربرد ارتعاشات تصادفی سازه‌ها ارائه می‌دهد و به آنان کمک می‌کند تا از یک سو از عهده‌ی انجام مسائل عملی برآیند و از سوی دیگر به فهم نتایج آخرین تحقیقات در این زمینه، نایل شوند. تأکید این کتاب بیش‌تر از تحلیل‌های ریاضی، بر روی دریافت مفاهیم مهندسی مورد بحث، قرار داده شده است. افرادی که موضوع ارتعاشات تصادفی را به طور خاص جالب و مفید می‌یابند، می‌توانند از این کتاب به عنوان سکوی پرتابی در انجام کارهای تئوریک گسترده‌تر در حوزه‌های آماری و نیز انجام تحقیقات پیچیده‌تر و مسائل مهندسی در کار خود استفاده نمایند.

این مجموعه از ده فصل تشکیل شده است. فصول یک تا سه شامل معرفی موضوع ارتعاشات تصادفی سازه‌ها و ابزارهای ریاضی و آماری مورد نیاز می‌باشند. ارائه‌ی مطالب در هر قسمت با این فرض انجام شده است که پیش‌زمینه‌ی فنی دانشجو، فراتر از سطح دانشجویان سال آخر مهندسی عمران و مکانیک نبوده و سعی شده تعاریف پایه‌ای، با بیانی مختصر و مفید انجام گیرد. فصل چهارم به معرفی مدل‌های تحریک تصادفی راه‌ها، حرکت زلزله و امواج اقیانوس‌ها حول محور مهم‌ترین توصیف‌گر آماری یعنی تابع چگالی طیفی توان، می‌پردازد. فصل‌های پنجم، ششم و هفتم به ترتیب راه‌حل‌های سیستم‌های یک درجه آزادی (SDOF)، درجه آزادی (MDOF) و پیوسته را نسبت به این تحریکات تصادفی ارائه می‌دهند. فصل هشتم به موضوع اصلی، یعنی ایمنی سازه‌ها در برابر معیارهای شکست تسلیم و خستگی می‌پردازد. در فصل نهم تحلیل تحریک- پاسخ برای موارد ایستا و غیر ایستا بسط داده می‌شود که عمدتاً در طراحی سازه در برابر تحریکاتی هم‌چون زلزله بسیار مهم هستند. فصل دهم به معرفی مختصری از ارتعاشات غیرخطی تصادفی ارائه می‌دهد.

این کتاب برای دو ترم تحصیلی تدوین گردیده است که فصل‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ در ترم اول ارائه می‌گردند. برای تقویت یادگیری دانشجویان تعداد مناسبی از مثال‌ها و تمرین‌ها ارائه گردیده و همچنین منابع و مراجعی نیز برای مطالعه بیشتر آورده شده است.

تصدیق می‌نمایم که علت و انگیزه‌ی اصلی و عامل علاقه‌ی به تدریس و تحقیق در این زمینه و در نهایت نوشتن این کتاب نشأت گرفته از دوره‌ی عالیه‌ی ارتعاشات تصادفی است که در سال ۱۹۶۵ توسط پروفسور استفن اس کراندال (Stephen A. Crandall) در دانشگاه MIT ارائه گردید. پروفسور وای. کی لین (Y. K. Lin) نیز از دانشگاه اینیوی مشوق دائمی من بوده‌اند. همکار من در دانشگاه دلوور، پروفسور رابرت ام. استارک (Robert M. Starks) نیز فضای فکری مناسب و مفیدی جهت تبادل نظر در حوزه‌ی وسیع احتیاطات مهندسی ایجاد نمودند. هم‌چنین پروفسور جان آر. زیمرمن (John R. Zimmerman) در دانشگاه دلوور صمیمی‌ترین همکار من در زمینه‌ی تدریس و یاری رسان در مسائل پیوست «ب» بوده‌اند. دوره‌ی یک‌ساله‌ی مطالعاتی من که تحت حمایت پروفسور جوزف پن‌زین (Joseph Penzien) در دانشگاه کالیفرنیا پرکلی بود، زمان مناسبی را برای تهیه‌ی نخستین

پیش‌نویس این کتاب در اختیار من گذاشت. هم‌چنین همکاری محبت‌آمیز خانم بتی برامبل
در تایپ حجم وسیع علائم و معادلات نیز مورد قدردانی قرار می‌گیرد.

سی‌وای‌ینگ

نیوارک، دلوور

دسامبر ۱۹۸۵

www.ketab.ir

مقدمه مترجمان

با توجه به ماهیت تصادفی نیروهای دینامیکی طراحی سازه‌ها، از جمله نیروهای زلزله و باد، علم ارتعاشات تصادفی سازه‌ها از اهمیت مضاعفی برخوردار خواهد بود. کاربرد این علم در تدوین آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها در برابر این گونه بارها و از طرف دیگر گسترش این علم در بین مهندسان و طراحان دانشجویان درس ارتعاشات تصادفی سازه‌ها در سطوح مختلف آموزشی از جمله دغدغه‌های مترجمان این کتاب بوده است. کتابی با این محتوا متأسفانه کمتر در کشورمان مشاهده می‌شود و حال آنکه در بحث لرزه‌خیزی، ایران یکی از مبتلایان عمده به زلزله بوده که ماهیتاً از تصادف‌ترین نیروهای طراحی می‌باشد. متن کتاب اصلی متعلق به پروفیسور سی وای یوگور دانشگاه دلوور آمریکا بوده و از جمله کتاب‌های مطرح در این زمینه در سراسر جهان خاور میانه در کشور آمریکا می‌باشد. آنچه این کتاب را از دیگر متون این رشته متمایز می‌سازد هدف اصلی متن و بیان تئوری‌های ذاتا پیچیده‌ی این رشته از مهندسی به زبانی بسیار ساده و روان می‌باشد. امید است ترجمه‌ی این کتاب قدم کوچکی در گسترش علم ارتعاشات تصادفی سازه‌ها در کشورمان بوده و مورد توجه کلیه‌ی دست‌اندرکاران طراحی انواع مختلف سازه‌ها به‌ویژه مهندسان عمران و مکانیک قرار گیرد.

در خاتمه مترجمان بر خود لازم می‌دانند از انتشارات دانشگاه اصفهان که امکان نشر این اثر را فراهم نموده است کمال تقدیر و تشکر را بنمایند. همچنین ایشان از مهندس محسن

حبيب‌الهی که در تهیه‌ی شکل‌ها، بازنویسی فرمول‌ها و طرح جلد یاری رسان بودند نهایت
تشکر را دارند.

محمد علی رهگذر

سید صابر آل صاحب فصول

بهار ۱۳۹۲

www.ketab.ir

فهرست

فصل ۱. مقدمه	۱
۱. ارتعاش تصادفی	۳
۲. فرآیندهای تصادفی، آمار و احتمال	۵
۱. ۲. ۱. تعریف فراوانی احتمال و بسطی	۶
۱. ۲. ۲. ۱. چگالی احتمال توأم $p(x_1, x_2)$	۱۰
۱. ۲. ۳. احتمال شرطی و استقلال	۱۴
۱. ۲. ۴. آمار	۱۶
۱. ۲. ۵. آمارهای مهم کاربردی	۱۹
۱. ۲. ۶. مقایسه‌ی جسم صلب	۲۴
مسائل	۲۷

فصل ۲. فرآیند تصادفی ایستا، خودهم‌بستگی و چگالی طیفی	۳۱
۱. ۲. فرآیند ایستا	۳۳

۳۵	۲.۲. تابع خودهم‌بستگی $R(\tau)$
۴۰	۲.۳. سری فوریه و انتگرال فوریه
۴۹	۲.۴. چگالی طیفی توان $S(\omega)$
۵۷	مسائل

۶۱	فصل ۳. فرآیندهای ارگادیک و آمار زمانی
۶۳	۳.۱. فرآیند ارگادیک
۶۷	۳.۲. خودهم‌بستگی زمانی $\Phi(\tau)$
۷۴	۳.۳. چگالی طیفی زمانی $W(w)$
۷۷	۳.۴. تعریف دیگری از چگالی طیفی زمانی $W(f)$
۷۸	۳.۵. هم‌ارزی دو تعریف $W(f)$
۸۰	بیان نتایج
۸۲	مسائل

۸۵	فصل ۴. مدل‌های تحریکات تصادفی
۸۸	۴.۱. مسیر تصادفی (مدل ایستا)
۹۰	۴.۱.۱. مدل گسسته
۹۴	۴.۱.۲. مدل پیوسته
۹۶	۴.۲. حرکت زلزله‌ی تصادفی (مدل غیر ایستا)
۹۷	۴.۲.۱. مدل گسسته
۹۹	۴.۲.۲. مدل پیوسته

۴. ۳. امواج اقیانوسی تصادفی (مدل ایستای چند متغیره)..... ۱۰۲

۴. ۳. ۱. مدل گسسته..... ۱۰۶

۴. ۳. ۲. مدل پیوسته..... ۱۰۸

۴. ۳. ۳. چگالی طیفی نیروی موج..... ۱۱۰

مسائل..... ۱۱۴

فصل ۵. سازه‌های یک درجه آزادی (SDOF)..... ۱۱۹

۵. ۱. روابط انتقال..... ۱۲۱

۵. ۱. ۱. راه حل حوزه فرکانس..... ۱۲۲

۵. ۱. ۲. راه حل حوزه زمان..... ۱۲۹

۵. ۱. ۳. راه حل‌های حوزه زمان در برابر حوزه فرکانس..... ۱۳۵

۵. ۲. تحریکات تصادفی و پاسخ..... ۱۳۶

۵. ۲. ۱. روش حوزه زمان..... ۱۳۷

۵. ۲. ۲. روش حوزه فرکانس..... ۱۴۴

۵. ۲. ۳. یک راه حل مستقیم آماری..... ۱۴۸

مسائل..... ۱۵۲

فصل ۶. پاسخ سیستم‌های چند درجه آزادی خطی (MDOF)..... ۱۵۷

۶. ۱. سیستم‌های دو درجه آزادی (TDOF)..... ۱۵۹

۶. ۱. ۱. ارتعاش قطعی..... ۱۵۹

۶. ۱. ۲. تحریکات تصادفی..... ۱۶۵

۱۶۶.....	۳.۱.۶. خودهم‌بستگی پاسخ
۱۶۸.....	۴.۱.۶. چگالی طیفی پاسخ
۱۷۰.....	۵.۱.۶. ارتعاش قطعی میرا
۱۷۴.....	۶.۱.۶. خودهم‌بستگی پاسخ میرا
۱۷۶.....	۷.۱.۶. چگالی طیفی پاسخ میرا
۱۷۸.....	۲.۶. سیستم‌های MDOF
۱۷۸.....	۱.۲.۶. ارتعاش قطعی
۱۸۰.....	۲.۶. ارتعاش تصادفی ایستا
۱۸۲.....	۱.۶. یکپارچه‌سازی مساوی
۱۸۳.....	۱.۳.۶. ارتعاش قطعی
۱۸۴.....	۲.۳.۶. پاسخ فرکانس مختلف $[H(\omega)]$
۱۸۵.....	۳.۳.۶. پاسخ ضربه $[u(t)]$
۱۸۶.....	۴.۳.۶. ارتعاش تصادفی ایستا
۱۹۲.....	مسائل
۱۹۷.....	فصل ۷. پاسخ سیستم‌های پیوسته
۱۹۹.....	۱.۷. تیرهای برشی
۱۹۹.....	۱.۱.۷. ارتعاش قطعی
۲۰۱.....	۲.۱.۷. ارتعاش تصادفی ایستا
۲۰۴.....	۳.۱.۷. تحریک تصادفی متمرکز
۲۰۹.....	۲.۷. تیرهای خمشی

۲۰۹.....	۱. ارتعاش قطعی
۲۱۱.....	۲. ارتعاش تصادفی ایستا
۲۱۵.....	۳. صفحات نازک
۲۱۵.....	۱. ارتعاش قطعی
۲۱۷.....	۲. ارتعاش تصادفی ایستا
۲۱۹.....	۴. راه حل دیگر (تیرهای برشی)
۲۲۰.....	۱. ارتعاش قطعی
۲۲۲.....	۲. پاسخ ضربه $h_F(x, t)$
۲۲۷.....	۳. پاسخ فرکانس مختلط $H_F(x, \omega)$
۲۲۸.....	۴. ارتعاش تصادفی ایستا
۲۳۰.....	۵. مخزن سد (تحریک قائم)
۲۳۰.....	۱. فرمول بندی
۲۳۲.....	۲. تابع پاسخ ضربه
۲۳۹.....	۳. تابع پاسخ فرکانس
۲۴۲.....	۴. چگالی طیفی توانی پاسخ
۲۴۴.....	۵. میانگین مربعات پاسخ
۲۴۸.....	۶. مخزن سد (تحریک افقی)
۲۴۸.....	۱. فرمول بندی
۲۵۰.....	۲. پاسخ فرکانس مختلط
۲۵۸.....	۳. ارتعاش قطعی
۲۵۹.....	۴. ارتعاش تصادفی
۲۶۳.....	مسائل

۲۶۵.....	فصل ۸. طراحی سازه‌ها برای تحریکات تصادفی
۲۶۷.....	۸.۱. فرآیند گاوسی ایستا
۲۷۲.....	۸.۲. احتمال گذر به بالا
۲۷۵.....	۸.۳. چگالی احتمال اوج‌ها
۲۷۷.....	۸.۴. چگالی احتمال پوش
۲۸۰.....	۸.۵. طراحی سازه‌ای در برابر شکست تسلیم
۲۹۰.....	۸.۶. طراحی سازه‌ای در برابر خستگی
۲۹۱.....	۸.۷. فرض قطعیت پالم گرن و ماینر
۲۹۴.....	۸.۸. رگرسیون تصادفی اند باریک ایستا
۲۹۸.....	مسائل
۳۰۳.....	فصل ۹. پاسخ غیر ایستا
۳۰۵.....	۹.۱. سیستم‌های SDOF با تحریک ایستا
۳۰۷.....	۹.۱.۱. سیستم غیر میرا
۳۰۷.....	۹.۱.۲. سیستم‌های کم میرا
۳۰۹.....	۹.۲. سیستم‌های مخزن سد با تحریک ایستا
۳۰۹.....	۹.۲.۱. تحریک شتاب قائم
۳۱۴.....	۹.۲.۲. تحریک شتاب افقی
۳۱۴.....	۹.۳. سیستم‌های SDOF با تحریک غیر ایستا
۳۱۶.....	۹.۳.۱. مدل پرستلی
۳۱۸.....	۹.۳.۲. پاسخ سیستم‌های SDOF
۳۲۰.....	۹.۳.۳. سیستم‌های SDOF غیر میرا

۳۲۲.....	۴.۳.۹ سیستم‌های SDOF کم میرا
۳۲۶.....	۵.۳.۹ مدل بندت و پیرسول
۳۲۹.....	۴.۹ سیستم‌های مخزن سد با تحریک غیر ایستا
۳۲۹.....	۱.۴.۹ تحریک شتاب قائم
۳۳۳.....	۲.۴.۹ تحریک شتاب افقی
۳۴۱.....	مسائل

۳۴۵.....	فصل ۱۰ ارتعاش تصادفی غیر خطی
۳۴۸.....	۱.۱۰ استفاده از مدل گام تصادفی
۳۴۸.....	۱.۱.۱۰ تعاریف اساسی احتمال
۳۴۸.....	۲.۱.۱۰ معادله‌ی چایمن - کوکس - اسمولوکوسکی
۳۵۰.....	۳.۱.۱۰ مدل گام تصادفی
۳۵۳.....	۴.۱.۱۰ احتمال انتقال تک مرحله‌ای p
۳۵۵.....	۲.۱۰ کاربردهای مدل گام تصادفی
۳۵۹.....	۳.۱۰ معادله‌ی فوکر - پلانک
۳۶۱.....	۴.۱۰ راه حل معادله‌ی فوکر - پلانک
۳۶۵.....	مسائل

۳۶۷.....	پیوست (الف) تبدیل سریع فوریه (FFT) در ارتعاش تصادفی
۳۶۹.....	الف-۱) مفاهیم اصلی
۳۷۰.....	الف-۲) استفاده از زیر روال کامپیوتری FFT

- پیوست (ب) شبیه سازی مونت کارلو ۳۷۷
- ب-۱) ساخت یکا تابع نمونه با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو ۳۷۹
- ب-۲) ایجاد اعداد تصادفی در کامپیوتر ۳۸۰
- ب-۳) مرتب سازی بر اساس جاب ساده ۳۸۱
- تابع ۳۸۳