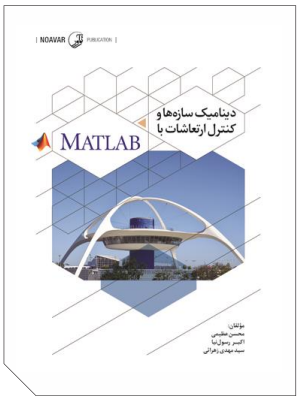
دینامیک سازه‌ها و کنترل ارتعاشـات با MATLAB



مؤلفان:

محسن عظیمی (دانشگاه بریتیش کلمبیا)

اکبر رسول‌نیا (دانشگاه علم و صنعت ایران)

دکتر سید مهدی زهرائی (دانشگاه تهران)

سرشناسه: عظیمی، محسن، ۱۳۶۶ -
عنوان و نام پدیدآور: دینامیک سازه‌ها و کنترل ارتعاشات با MATLAB/ مولفان محسن عظیمی، اکبر رسول‌نیا، سیدمهدی زهرایی.
مشخصات نشر: تهران : نوآور، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۳۲۶ ص.
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸۴۹۴-۴
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
موضوع: متلب -- MATLAB
موضوع: دینامیک سازه‌ها -- Structural dynamics
موضوع: مهندسی سازه -- برنامه‌های کامپیوتری -- Structural engineering -- Computer programs
شناسه افزوده: رسول‌نیا، اکبر، ۱۳۶۵ -
شناسه افزوده: زهرایی، سیدمهدی، ۱۳۴۳ -
رده بندی کنگره: ۶۵۴TA
رده بندی دیویی: ۱۷۱/۶۲۴
شماره کتابشناسی ملی: ۶۲۰۷۵۷۹

دینامیک سازه‌ها و کنترل ارتعاشات با MATLAB

مؤلفان: محسن عظیمی، اکبر رسول‌نیا، سید مهدی زهرائی
ناشر: نوآور
مدیر فنی: محمدرضا نصیرنیا
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۴۹۴-۴

نشرنوآور

مرکز پخش:

نوآور، تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶ تلفن: ۹۲ـ ۶۶۴۸۴۱۹۱ www. noavarpub. com

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی‌دی، دی‌وی‌دی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

لطفاً جهت دریافت الحاقات و اصلاحات احتمالی این کتاب به سایت انتشارات نوآور مراجعه فرمایید.
www.noavarpub.com https://telegram.me/noavarpub https://www.instagram.com/noavarpub/

فـهرست مطالب

مقدمه ۷

فصل اول / مفاهیم بنیادی دینامیک سازه‌ها ۹

۱-۱- انواع مختلف بارهای دینامیک ۱۰

۱-۲- تفاوت بین مسائل دینامیک و استاتیکی ۱۱

۱-۳- ارتعاشات ۱۲

۱-۴- تعیین معادلات حرکت سیستم یک‌درجه‌آزادی ۱۳

۱-۴-۱- تعیین معادله حرکت بر اساس قانون دوم نیوتن ۱۳

۱-۴-۲- روش تعادل دینامیکی بر اساس اصل دالامبر ۱۳

۱-۴-۳- اصل کار مجازی ۱۷

۱-۴-۴- روش انرژی ۲۰

۱-۴-۴-۱- انرژی نوسانگر هارمونیک ساده ۲۰

۱-۴-۵- اصل همیلتون ۲۲

۱-۵- سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی تعمیم‌یافته ۲۴

۱-۵-۱- سیستم با پارامترهای گسسته ۲۴

۱-۵-۲- سیستم با پارامترهای پیوسته ۲۹

فصل دوم / ارتعاش‌آزاد سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی ۳۱

۲-۱- میرایی ۳۱

۲-۲- ارتعاش‌آزاد سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی بدون میرایی ۳۲

۲-۳- ارتعاش‌آزاد میرا ۴۰

۲-۳-۱- سیستم با میرایی بحرانی ۴۱

۲-۳-۲- سیستم با میرایی زیربحرانی ۴۲

۲-۳-۳- سیستم با میرایی فوق‌بحرانی ۴۷

۲-۴- کاهش لگاریتمی (استهلاک ارتعاش) ۵۰

۲-۵- اتلاف انرژی در میرایی ویسکوز ۵۴

۲-۶- میرایی هیسترزیس ۵۵

۲-۷- میرایی کولمب (میرایی اصطکاک خشک) ۵۷

فصل سوم / سیـستم‌های یک‌درجه‌آزادی تحت بارگذاری یکنواخت و هارمونیک ۶۴

۳-۱- سیستم‌های نامیرا تحت نیروی یکنواخت ۶۴

۳-۲- سیستم‌های میرا تحت نیروی یکنواخت ۶۶

۳-۳- سیستم‌های نامیرا تحت نیروی هارمونیک ۶۷

۳-۴- تشدید ۷۱

۳-۵- ضربان ۷۴

۳-۶- سیستم‌های میرا تحت بارگذاری هارمونیک ۷۷

۳-۶-۱- فرکانس‌های تشدید و پاسخ‌های تشدید ۸۳
۳-۷- بارهای وابسته به فرکانس ۸۹
۳-۸- انتقال نیرو و مجزاسازی ارتعاش ۹۲
۳-۹- ارتعاش پایه ۹۶
۳-۹-۱- ارتعاش پایه به‌صورت جابجایی ۹۶
۳-۹-۲- تحریک پایه به‌صورت شتاب ۹۸
۳-۱۰- ارزیابی میرایی ۱۰۱
۳-۱۰-۱- استهلاک ارتعاش آزاد ۱۰۱
۳-۱۰-۲- آزمایش تشدید ۱۰۱
۳-۱۰-۳- روش نیم‌توان ۱۰۱

فصل چهارم / سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی تحت بارگذاری ضربه‌ای ۱۰۴
۴-۱- سیستم‌های نامیرا تحت ضربه مستطیلی ۱۰۴
۴-۲- سیستم‌های نامیرا تحت ضربه مثلثی ۱۰۸
۴-۳- سیستم‌های نامیرا تحت ضربه نیم‌سینوسی ۱۱۳
۴-۴- طیف جابجایی تحت بار ضربه ۱۱۴
۴-۵- تحلیل تقریبی برای بار ضربه‌ای کوتاه‌مدت ۱۱۶
۴-۶- انتگرال دوهامل ۱۱۶
۴-۷- کاربرد تابع STEP در سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی ۱۲۱

فصل پنجم / پاسخ دینامیکی سازه‌ها با استفاده از روش‌های عددی ۱۲۶
۵-۱- روش‌های گامبندی زمانی ۱۲۶
۵-۲- انواع روش‌های گامبندی زمانی ۱۲۸
۵-۲-۱- درون‌یابی تابع تحریک ۱۲۸
۵-۲-۲- انتگرال‌گیری مستقیم معادله حرکت ۱۳۲
۵-۲-۳- روش‌های گام واحد ۱۳۷
۵-۲-۴- روش‌های شتاب مفروض ۱۴۲
۵-۲-۵- روش شتاب مفروض ۱۴۷
۵-۲-۶- روش‌های گامبندی ۱۵۰
۵-۲-۷- روش پایدار مشروط ۱۵۳
۵-۳- پاسخ به تحریک پایه ۱۵۷
۵-۴- روند ویلسون (توصیه شده) ۱۶۱
۵-۴-۱- ارتعاش آزاد میرا به دلیل شرایط اولیه ۱۶۱
۵-۴-۲- جواب عمومی تحت بارگذاری تصادفی ۱۶۲
۵-۵- پاسخ سیستم یکدرجه‌آزادی الاستو-پلاستیک ۱۶۶
۵-۶- طیف پاسخ با انتگرال عددی ۱۷۱
۵-۷- روش عددی برای ارزیابی انتگرال دوهامل ۱۷۲
۵-۷-۱- برای یک سیستم نامیرا ۱۷۲
۵-۷-۲- برای سیستم با میرایی زیربحرانی ۱۷۴
۵-۸- انتخاب روش انتگرال‌گیری مستقیم ۱۷۵

فصل ششم / سیستم‌های دودرجه‌آزادی ۱۷۶
۶-۱- ارتعاش‌آزاد سیستم دودرجه‌آزادی بدون میرایی ۱۷۷
۶-۱-۱- تعیین ماتریس‌های ضرایب به روش سختی و نرمی ۱۸۰
۶-۱-۲- سیستم دودرجه‌آزادی نامیرا تحت نیروی هارمونیک ۲۰۲
۶-۲- سیستم دودرجه‌آزادی میرا (ارتعاش‌آزاد و واداشته) ۲۱۱

فصل هفتم / ارتعاش سیستم‌های چنددرجه‌آزادی ۲۲۷
۷-۱- مدل‌سازی سیستم پیوسته به‌صورت چنددرجه‌آزادی ۲۲۸
۷-۲- مشخصات الاستیک سیستم‌های چنددرجه‌آزادی ۲۲۸
۷-۲-۱- نرمی ۲۲۸
۷-۲-۲- سختی ۲۲۹
۷-۲-۳- اینرسی ۲۲۹
۷-۲-۴- میرایی ویسکوز ۲۳۰
۷-۳- ارتعاش‌آزاد سیستم‌های چنددرجه‌آزادی نامیرا ۲۳۰
۷-۴- قانون بتی ۲۳۹
۷-۵- اصل تعامد اشکال مودی ۲۴۱
۷-۶- تغییر مختصات (تبدیل معکوس) ۲۴۲
۷-۷- نرمال کردن مودها ۲۴۴
۷-۸- تراکم استاتیکی ماتریس سختی ۲۴۷
۷-۹- معادلات مودال برای تحلیل سیستم نامیرا تحت نیروی وابسته به زمان ۲۴۸
۷-۱۰- معادلات مودال ارتعاش واداشته میرا ۲۵۴

فصل هشتم / کنترل سازه‌ها ۲۶۱
۸-۱- کنترل فعال ساختمان چندطبقه با استفاده از تاندون‌های فعال ۲۶۷
۸-۱-۱- معادلات حرکت کنترل لرزه‌ای با استفاده از میراگرهای جرمی فعال ۲۷۰
۸-۱-۲- معادلات حرکت سازه کنترل‌شده به شکل معادلات حالت ۲۷۲
۸-۱-۳- قانون بازخورد و طراحی کنترلر ۲۷۴
۸-۱-۴- حل معادله حالت ۲۷۶
۸-۱-۵- الگوریتم‌های کنترل ۲۷۹
۸-۱-۵-۱- الگوریتم اختصاص قطب‌ها ۲۸۸
۸-۱-۶- بهینه‌سازی با ازدحام ذرات (*PSO*) ۲۹۱
۸-۱-۷- کنترل منطق فازی ۲۹۴
۸-۲- میراگرهای هیدرولیکی و اصول عملکردی آن ۲۹۵
۸-۳- میراگرهای مغناطیسی و اصول عملکردی آن ۲۹۷
۸-۴- مثال ۱: کنترل ساختمان‌های نامنظم با میراگر جرمی تنظیم‌شده دوقلو ۳۰۰
۸-۵- مثال ۲: کنترل ساختمان با جداگرهای لرزه‌ای همراه با آلیاژهای حافظه‌دار ۳۰۷
۸-۶- مثال ۳: کنترل سازه سه‌بعدی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه ۳۱۴

منابع و مآخذ ۳۲۴

فراخوان مساعدت فرهنگی و علمی

خوانندهٔ فرهیخته و بزرگوار

نشر نوآور ضمن ارج نهادن و قدردانی از اعتماد شما به کتاب‌های این انتشارات، به استحضارتان می‌رساند که همکاران این انتشارات، اعم از مؤلّفان و مترجمان و کارگروه‌های مختلف آماده‌سازی و نشر کتاب، تمامی سعی و همّت خود را برای ارائهٔ کتابی درخور و شایستهٔ شما فرهیختهٔ گرامی به‌کار بسته‌اند و تلاش کرده‌اند که اثری را ارائه نمایند که از حدّاقل‌های استاندارد یک کتاب خوب، هم از نظر محتوایی و غنای علمی و فرهنگی و هم از نظر کیفیّت شکلی و ساختاری آن، برخوردار باشد.

بااین‌وجود، علی‌رغم تمامی تلاش‌های این انتشارات برای ارائهٔ اثری با کمترین اشکال، باز هم احتمال بروز ایراد و اشکال در کار وجود دارد و هیچ اثری را نمی‌توان الزاماً مبرّا از نقص و اِشکال دانست. ازسوی‌دیگر، این انتشارت بنابه تعهّدات حرفه‌ای و اخلاقی خود و نیز بنابه اعتقاد راسخ به حقوق مسلّم خوانندگان گرامی، سعی دارد از هر طریق ممکن، به‌ویژه از طریق فراخوان به خوانندگان گرامی، ازهرگونه اشکال احتمالی کتاب‌های منتشرهٔ خود آگاه شده و آن‌ها را در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی رفع نماید.

لذا دراین راستا، از شما فرهیختهٔ گرامی تقاضا داریم درصورتی‌که حین مطالعهٔ کتاب با اشکالات، نواقص و یا ایرادهای شکلی یا محتوایی در آن برخورد نمودید، اگر اصلاحات را بر روی خود کتاب انجام داده‌اید پس از اتمام مطالعه، کتاب ویرایش‌شدهٔ خود را با هزینهٔ انتشارات نوآور، پس از هماهنگی با انتشارات، ارسال نمایید، و نیز چنانچه اصلاحات خود را بر روی برگهٔ جداگانه‌ای یادداشت نموده‌اید، لطف کرده عکس یا اسکن برگهٔ مزبور را با ذکر نام و شمارهٔ تلفن تماس خود به ایمیل انتشارات نوآور ارسال نمایید، تا این موارد بررسی شده و در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی کتاب اِعمال و اصلاح گردد و باعث هرچه پربارترشدن محتوای کتاب و ارتقاء سطح کیفی، شکلی و ساختاری آن گردد.

نشر نوآور، ضمن ابراز امتنان از این عمل متعهّدانه و مسئولانهٔ شما خوانندهٔ فرهیخته و گرانقدر، به‌منظور تقدیر و تشکّر از این همدلی و همکاری علمی و فرهنگی، درصورتی‌که اصلاحات درست و بجا باشند، متناسب با میزان اصلاحات، به‌رسم ادب و قدرشناسی، نسخهٔ دیگری از همان کتاب و یا چاپ اصلاح‌شدهٔ آن و نیز از سایر کتب منتشرهٔ خود را به‌عنوان هدیه، به انتخاب خودتان، برایتان ارسال می‌نماید، و درصورتی‌که اصلاحات تأثیرگذار باشند در مقدّمهٔ چاپ بعدی کتاب نیز از زحمات شما تقدیر می‌شود.

همچنین نشر نوآور و پدیدآورندگان کتاب، از هرگونه پیشنهادها، نظرات، انتقادات و راه‌کارهای شما عزیزان در راستای بهبود کتاب، و هرچه بهتر شدن سطح کیفی و علمی آن صمیمانه و مشتاقانه استقبال می‌نمایند.

نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

www.noavarpub.com

info@noavarpub.com

مقدمه

با گذر زمان شاهد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در سبک زندگی مردم، و متناسب با درک مخاطره‌ها و فرصت‌ها، شاهد ساخت سازه‌های بزرگ و پیچیده در قرن اخیر هستیم. بالطبع تغییر در جوامع انسانی مستلزم بوجود آمدن تسهیلات و ساخت سازه‌هایی نظیر برج‌ها، پل‌ها، سدها، دکل‌های مخابراتی، دودکش‌ها و غیره برای زندگی در کنار یکدیگر است. این قبیل سازه‌ها در طول عمر خود در معرض انواع مختلف بارها قرار می‌گیرند که می‌توان در دو دسته کلی استاتیکی و دینامیکی جای داد. در عمل باری که به سازه وارد می‌شود کاملاً استاتیکی نیست. با توجه به دخیل بودن عامل زمان در حین اعمال بار به سازه و ماهیت طبیعی عالم خاکی، برای تحلیل دقیق این سازه‌ها باید عامل زمان در اعمال بار را در تحلیل لحاظ کرد. بنابراین، اکثر ماشین‌ها و سازه‌های مهندسی تا حدودی ارتعاش را تجربه می‌کنند و طراحی آن‌ها نیز بالطبع نیازمند ملاحظات رفتار نوسانی است. با توجه به این‌که روش‌های دینامیکی روش‌های پیچیده و در اکثر مواقع مستلزم محاسبات عددی پیچیده‌ای است، رایانه به‌عنوان وسیله محاسباتی با سرعت بالا توجه مهندسان را به خود جلب کرده است و مهندسان و شرکت های مهندسی سعی در تدوین و ایجاد نرم‌افزارهایی که قابلیت تحلیل سیستم‌های دینامیکی را دارا باشند کرده‌اند. دراین‌بین نرم‌افزار متلب (MATLAB) به‌عنوان ابزاری قدرتمند در عرصه محاسبات عددی و پیچیده ریاضی چند دهه‌ای است که جلوه نموده و پیشتاز است.

در این کتاب سعی شده مباحث پایه دینامیک سازه‌ها پوشش داده‌شده و توضیحات اجمالی برای هر مبحث آورده شود. با توجه به فراگیری علم دینامیک سازه‌ها، بدون دارا بودن توانایی در کاربرد آن و فقدان منبع منسجم به زبان فارسی در زمینه کاربرد نرم‌افزار متلب در دینامیک سازه‌ها و عدم آشنایی دانشجویان مهندسی عمران با دستورات مربوط، عمده تلاش در این کتاب به ارائه مثال های کاربردی دینامیک سازه‌ها در محیط متلب متمرکزشده است.

ضمن تشکر از دوستانی که در نوشتن و ویرایش محتوا همراه ما بودند، از خوانندگان گرامی نیز خواهشمندیم که ما را از نظرات و انتقادات سازنده خود در ارتباط با این کتاب مطلع سازند، تا در ویرایش‌های آتی راهگشا و راهنمای ما باشند.

Noavar33@yahoo.com

هشـــدار

کلّیهٔ حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقـوق مؤلّفـان و مصـنّفان و هنرمنـدان مصوّب سال ۱۳۴۸ و آیین‌نامهٔ اجرایی آن مصوّب ۱۳۵۰، برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلّق بـه نشـر نوآور است. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از مطالب، اشکال، نمودارها، جداول، تصاویر ایـن کتـاب در دیگر کتب، مجلات، نشریات، سایت‌ها و موارد دیگر، و نیز هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از کتـاب به هـر شـکل از قبیـل هـر نـوع چـاپ، فتـوکپی، اسـکن، تایـپ از کتـاب، تهیّـهٔ پـی دی اف از کتـاب، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به‌صـورت اینترنتـی، سـی دی، دی وی دی، فـیلم، فایـل صوتی یا تصویری و غیره بـدون اجازهٔ کتبی از نشر نوآور ممنوع و غیرقانونی بـوده و **شرعاً نیـز حـرام** است، و متخلّفین تحت **پیگرد قانونی و قضایی** قرار می‌گیرند.

با توجّه به اینکه هیچ کتابی از کتب نشـر نـوآور بـه‌صـورت فایـل ورد یـا پـی دی اف و مـوارد این‌چنین، توسط این انتشارات در هیچ سایت اینترنتی ارائه نشده است، لـذا درصـورتی‌کـه هـر سایتی اقدام به تایپ، اسکن و یا موارد مشابه نماید و کل یا قسمتی از متن کتب نشـر نـوآور را در سایت خود قرار داده و یا اقدام به فروش آن نماید، توسـط کارشناسـان امـور اینترنتـی ایـن انتشارات، که مسئولیّت ادارهٔ سایت را به عهده دارند و به طور روزانه به بررسی محتوای سایت‌ها می‌پردازند، بررسی و درصورت مشخص شدن هرگونه تخلّف، ضمن اینکه این کار از نظر قانونی غیرمجاز و از نظر شرعی نیز حرام می‌باشد، وکیل قانونی انتشـارات از طریـق وزارت فرهنـگ و ارشاد اسلامی، **پلیس فتا** (پلیس رسیدگی به جرایم رایانه‌ای و اینترنتـی) و نیـز سـایر مراجـع قانونی، اقدام به مسدود نمودن سایت متخلّـف کـرده و طـیّ انجـام مراحـل قـانونی و اقـدامات قضایی، خاطیان را مورد **پیگرد قانونی و قضـایی** قـرار داده و کلّیّـهٔ خسـارات وارده بـه ایـن انتشارات از متخلّف اخذ می‌گردد.

همچنین درصورتی‌که هر کتابفروشی، اقدام به تهیّهٔ کپی، جزوه، چاپ دیجیتـال، چـاپ ریسـو، اُفست از کتب انتشارات نوآور نموده و اقدام به فروش آن نماید، ضـمن اطـلاع‌رسـانی تخلّفـات کتابفروشی مزبور به سایر همکاران و مُوَزّعین محترم، از طریق وزارت فرهنگ و ارشاد اسـلامی، اتحادیهٔ ناشران، و انجمن ناشران دانشگاهی و نیز مراجع قـانونی و قضـایی اقـدام بـه اسـتیفای حقوق خود از کتابفروشی متخلّف می‌نماید.

خرید، فروش، تهیّه، استفاده و مطالعه از روی نسخهٔ غیراصلِ کتاب،
از نظر قانونی غیرمجاز و شرعاً نیز حرام است.

انتشارات نوآور از خوانندگان گرامی خود درخواست دارد که در صورت مشاهدهٔ هر گونه تخلّف از قبیـل مـوارد فـوق، مراتب را یا از طـریق تلفـن‌های انتشارات نـوآور بـه شـماره‌هـای۲- ۶۶۴۸۴۱۹۱ ۰۲۱ و ۰۹۱۲۳۰۷۶۷۴۸ و یا از طریق ایمیل انتشارات به آدرس *info@noavarpub.com* و یـا از طریق منوی تماس با ما در سایت *www.noavarpub.com* به این انتشارات ابلاغ نمایند، تا از تضییع حقوق ناشر، پدیدآورنده و نیز خود خواننـدگان محتـرم جلـوگیری بـه‌عمـل آیـد، و نیز به‌عنوان تشکّر و قدردانی، از کتب انتشارات نوآور نیز هدیه دریافت نمایند.

فصل اول

مفاهیم بنیادی دینامیک سازه‌ها

در این فصل، مباحث بنیادی که در مسائل دینامیک سازه‌ها وجود دارد توضیح داده‌شده است. انواع مختلف بارهای دینامیکی تعریف‌شده و تفاوت بین مسائل دینامیکی و استاتیکی بیان‌شده است. در ادامه انواع ارتعاشات و مبانی روش‌های مختلف تعیین معادلات حرکت سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی با استفاده از قانون دوم نیوتن، روش تعادل دینامیکی، اصل کار مجازی، روش انرژی و اصل همیلتون بحث شده است و سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی تعمیم‌یافته با پارامترهای گسسته و پیوسته بحث شده است.

در عمل هیچ‌کدام از بارهایی که به سازه وارد می‌شوند کاملاً استاتیکی نیستند. همه اجسام دارای جرم و انعطاف‌پذیری، توانایی ارتعاش دارند. بنابراین، اکثر ماشین‌ها و سازه‌های مهندسی تا حدی ارتعاش را تجربه می‌کنند؛ بنابراین، طراحی آن‌ها نیز نیازمند در نظر گرفتن خصوصیات رفتاری نوسانی است. یک نوع از این ارتعاشات، ارتعاشات دوره‌ای یا پریودیک نامیده می‌شود (ارتعاشی که مرتباً بعد از یک بازه زمانی معین تکرار می‌شود. این بازه زمانی، زمان پریود سیستم یا ارتعاش نام دارد).

ارتعاش ایجادشده در سیستم هم تأثیرات خوب و هم تأثیرات بد دارد. به‌طور مثال در مهندسی عمران از تأثیرات مفید ارتعاش در تراکم بتن تازه استفاده می‌شود اما تأثیرات بد ارتعاش روی سازه، به هنگام اعمال نیروهای طبیعی و مکانیکی مثل بار باد، زلزله، حرکت ماشین و قطار ظاهر می‌شود.

سیستم‌های نوسانی ازنظر رفتاری به دو دسته اصلی با رفتار خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. برای سیستم‌های خطی، اصل برهم‌نهی کاربرد دارد و روش‌های ریاضی برای این سیستم‌ها به‌طور کامل ایجادشده‌اند. به دلیل اینکه مشخصات سیستم از قبیل سختی و میرایی در طول پاسخ سیستم در ناحیه غیرخطی تغییر می‌کنند، روش‌های ریاضی برای سیستم‌های غیرخطی کمتر شناخته شده و یا روش‌های پیچیده‌تری می‌باشند.

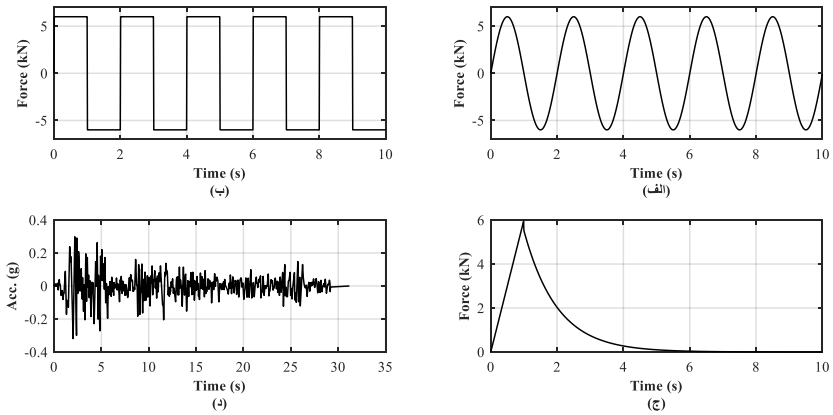
در کل، ارتعاش می‌تواند به‌صورت ارتعاش‌آزاد و ارتعاش واداشته (اجباری) دسته بندی شود. ارتعاش‌آزاد زمانی ایجاد می‌شود که به سیستم شرایط اولیه (سرعت و جابجایی اولیه) اعمال شده و سیستم تحت عکس‌العمل نیروهای داخلی خود و در غیاب نیروهای خارجی دچار نوسان شود. سیستم در حالت ارتعاش‌آزاد در یک یا چند فرکانس طبیعی خود که از مشخصات ذاتی دینامیکی خود سیستم محسوب می‌شود، نوسان خواهد کرد. ارتعاشی که تحت تحریک نیروهای خارجی ایجاد می‌شود ارتعاش واداشته نام

دارد. اگر فرکانس تحریک با یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم برابر باشد، رزونانس[1] یا تشدید اتفاق می‌افتد و باعث نوسانات با دامنه بزرگ در سازه شده و ممکن است به خرابی سازه منجر شود.

۱-۱- انواع مختلف بارهای دینامیک

بارهای دینامیکی را می‌توان به دو دسته معین و نامعین تقسیم‌بندی نمود. اگر اندازه، نقطه و جهت اعمال بار و تغییرات بار نسبت به زمان مشخص باشد، گفته می‌شود که بارگذاری معین است و تحلیل سیستم برای چنین باری به‌صورت تحلیل معین تعریف می‌شود. اما اگر تغییرات بار نسبت به زمان مشخص نباشد، بارگذاری به‌صورت بارگذاری تصادفی[2] شناخته شده و تحلیل متناظر با آن به‌صورت تحلیل نامعین شناخته می‌شود. در این نوع از بارگذاری مقدار بار و رفتار سازه با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی تعیین می‌شود.

بارهای دینامیکی معین به‌صورت بارهای پریودیک (متناوب یا تناوبی) و غیر پریودیک (نامتناوب) دسته‌بندی شوند. زمانی که یک بار در بازه‌های زمانی یکسان تکرار شود، بار پریودیک نامیده می‌شود. یک نمونه از بارهای پریودیک ساده، بار سینوسی است. این نوع بارگذاری همچنین تحریک هارمونیک ساده نامیده می‌شود که در شکل ۱-۱-الف نشان داده‌شده است. نوع بارگذاری نشان داده‌شده در شکل ۱-۱-ب بارگذاری پریودیک اما غیرهارمونیک است. بارهای پریودیک غیرهارمونیک می‌توانند به‌صورت مجموعی از تعداد کافی از عبارت‌های هارمونیک در سری فوری نشان داده شوند. هر بارگذاری که در گروه بارهای پریودیک قرار نگیرد به‌صورت بارهای غیر پریودیک شناخته می‌شود. بارهای غیر پریودیک نیز به انواع بارهای ضربه‌ای کوتاه‌مدت یا بلندمدت تقسیم‌بندی می‌شوند. بارگذاری انفجاری و نیروی زلزله نشان داده‌شده در شکل ۱-۱-ج و شکل ۱-۱-د به ترتیب نمونه‌ای از بارهای غیر پریودیک کوتاه‌مدت و بلندمدت هستند.

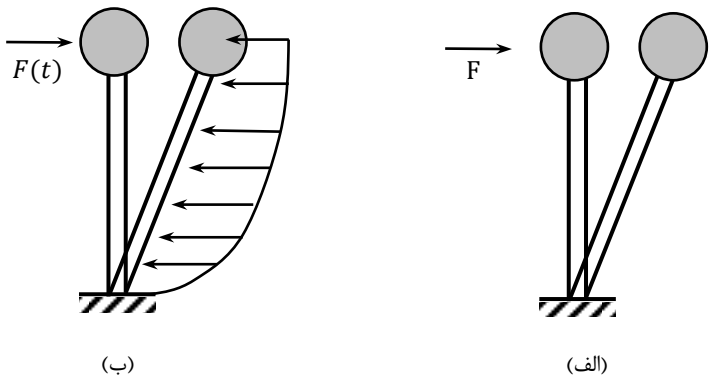


شکل ۱-۱: انواع مختلف نیروهای دینامیکی شامل: الف) هارمونیک ساده، ب) پریودیک غیرهارمونیکی، ج) غیر پریودیک (کوتاه‌مدت)، د) غیر پریودیک (بلندمدت).

1-Resonance
2-Random or Stochastic

۱-۲- تفاوت بین مسائل دینامیک و استاتیکی

مسائل دینامیکی با مسائل استاتیکی تفاوت زیادی دارند. اولین و مشهودترین این تفاوت‌ها تغییرات بار با زمان و تغییرات پاسخ با زمان است. این تفاوت باعث می‌شود تحلیل پاسخ و رفتار سازه در حالت دینامیکی، در حوزه زمان و با لحاظ تغییرات زمانی بار و رفتار سازه در هرلحظه صورت گیرد. ازاین‌رو تحلیل دینامیکی نسبت به تحلیل استاتیکی پیچیده بوده و نیاز به محاسبات و زمان زیاد و هزینه بالا دارد. تفاوت دیگر بین مسائل دینامیکی و استاتیکی ایجاد نیروهای اینرسی[1] به دلیل وجود جرم در سیستم به هنگام اعمال نیروهای دینامیکی است. مخزن آب نشان داده‌شده در شکل ۱-۲-الف را در نظر بگیرید. این مخزن تحت نیروی F در بالا قرارگرفته است. تغییرشکل ایجادشده، نیروی برشی و ممان خمشی می‌تواند بر اساس اصول تحلیل استاتیکی سازه‌ای محاسبه شود. از طرف دیگر درصورتی‌که مطابق شکل ۱-۲-ب بار متغیر با زمان $F(t)$ در بالای مخزن اعمال شود، سازه تحت تحریک متغیر با زمان قرار خواهد گرفت و شتاب ناشی از نیروی اینرسی در آن ایجاد خواهد شد. مطابق قانون دوم نیوتن، نیروی اینرسی با شتاب متناسب است. نیروهای اینرسی با جرم نیز متناسب بوده و در خلاف جهت شتاب عمل خواهد کرد. مشارکت نیروی اینرسی در نیروی برشی و لنگر خمشی، تعیین‌کننده رفتار دینامیکی یا استاتیکی پاسخ سازه خواهد بود.

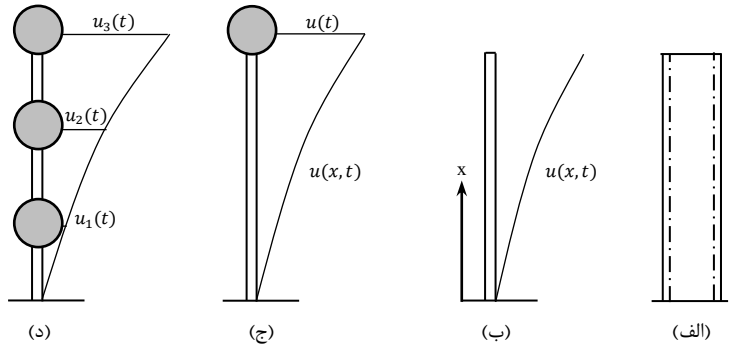


شکل ۱-۲: مخزن آب تحت نیروهای الف) استاتیکی و ب) دینامیکی

یک مسئله فیزیکی بر اساس فرضیات مشخص با تعریف هندسه، سینماتیک بارگذاری و شرایط مرزی، به‌صورت یک مدل مکانیکی ایده‌آل‌سازی می‌شود. سپس معادلات دیفرانسیلی حاکم بر سیستم برای به دست آوردن پاسخ دینامیکی حل شده و نتایج به‌صورت منطقی تفسیر می‌شوند. برای سازه‌های پیچیده، ممکن است نیاز به اصلاح تحلیل با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر برای مدل مکانیکی باشد. در مدل مکانیکی، درجات آزادی نامحدود به درجات آزادی محدود تبدیل شده و برای هر درجه‌آزادی، یک فرکانس طبیعی وجود دارد که در آن، سازه در یک مد ارتعاشی خاصی نوسان می‌کند. مدل مکانیکی

1-Inertia Forces

می‌تواند به‌صورت پیوسته یا گسسته دسته‌بندی شود. دودکش نشان داده‌شده در شکل ۱-۳-الف را در نظر بگیرید. در سازه واقعی، مشخصات جرم و سختی پوسته در طول ارتفاع مشخص است. مدل پیوسته دودکش در شکل ۱-۳-ب نشان داده‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل ریاضی پیوسته، جرم و سختی گسترده را در به دست آوردن پاسخ سیستم در نظر می‌گیرد. جابجایی $u(x,t)$ تابعی از مکان و زمان است. از طرف دیگر، می‌توانیم کل جرم را در بالای دودکش همان‌طور که در شکل ۱-۳-ج دیده می‌شود قرار دهیم و سیستم مذکور را به‌صورت سیستم یک‌درجه‌آزادی (SDOF) در نظر بگیریم که در آن، کل جرم سازه (m) در بالای سازه‌ای با سختی ثابت قرار می‌گیرد. در این حالت جابجایی مستقل از مکان $u(t)$ فقط تابعی از زمان است. جرم‌های متمرکز نشان داده‌شده در شکل ۱-۳-د مدل‌سازی دودکش توسط یک سیستم سه‌درجه‌آزادی با جرم‌های متراکم m_1، m_2، m_3 با جابجایی‌های متناظر u_1، u_2، u_3 را نشان می‌دهد. تحلیل دینامیکی سیستم‌های چنددرجه‌آزادی (MDOF) با درجات آزادی زیاد، پیچیده بوده و در حالت کلی با روش‌های تحلیل عددی کامپیوتری مثل روش المان محدود آنالیز می‌شوند.



شکل ۱-۳: مدل‌های مکانیکی مختلف دودکش: الف) نمایش فیزیکی، ب) مدل پیوسته، ج) مدل گسسته سیستم یک‌درجه‌آزادی، د) مدل گسسته سیستم سه‌درجه‌آزادی.

۱-۳- ارتعاشات

ارتعاش می‌تواند در یک سازه با اعمال شرایط اولیه که به‌صورت ورود انرژی درنظر گرفته می‌شود ایجاد شود. اگر شرط اولیه سرعت باشد، انرژی جنبشی تولید می‌شود. اگر شرط اولیه دارای جابجایی باشد، انرژی پتانسیل ایجاد می‌شود. اگر ارتعاش سازه در غیاب نیروهای خارجی باشد، این ارتعاش با عنوان ارتعاش‌آزاد شناخته می‌شود. ارتعاش‌آزاد معمولاً در فرکانس طبیعی اصلی رخ می‌دهد. به علت وجود میرایی در سیستم، ارتعاش‌آزاد به‌تدریج میرا می‌شود. اگر ارتعاش تحت تحریک نیروی خارجی ایجاد شود، ارتعاش از نوع واداشته خواهد بود. در ارتعاش واداشته پاسخ سیستم هم دارای حالت پایدار و هم دارای حالت گذرا خواهد بود. پاسخ حالت پایدار در فرکانس تحریک نوسان می‌کند. پاسخ گذرا به دلیل انرژی اولیه ذخیره‌شده در سازه است. برای مثال اگر سازه تحت نیروهای انفجاری قرار گیرد، در سیستم پاسخ گذرا بوجود می‌آید.

۱-۴- تعیین معادلات حرکت سیستم یک‌درجه‌آزادی

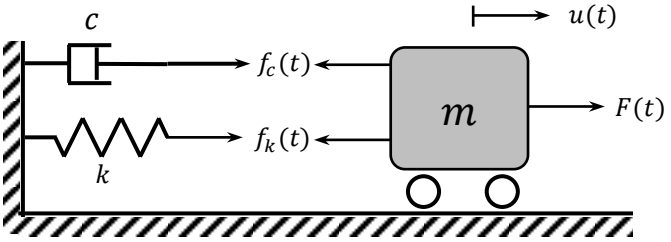
معادله حاکم بر حرکت را می‌توان با استفاده از تئوری تحریک هارمونیک، قانون دوم نیوتن، روش انرژی، روش رایلی یا اصل دالامبر[1] بیان کرد. در زیر این روش‌ها به‌اختصار توضیح داده‌شده است.

۱-۴-۱- تعیین معادله حرکت بر اساس قانون دوم نیوتن

طبق قانون دوم نیوتن حاصل‌جمع نیروهای وارد بر یک جسم با حاصل‌ضرب جرم سیستم در شتاب حرکت آن برابر است. نیروهای وارد بر یک سیستم جرم-فنر-میراگر در شکل ۱-۴ نشان داده‌شده است. نیروهای وارد بر این جسم عبارت‌اند از نیروی خارجی $F(t)$ ، نیروی مقاوم فنر که می‌تواند به‌صورت نیروی الاستیک یا غیر الاستیک باشد $f_k(t)$ و نیروی مقاوم میرایی $f_c(t)$ می‌باشند. بنابراین، طبق قانون دوم نیوتن داریم:

$$-f_k(t) - f_c(t) + F(t) = m\ddot{u}(t) \qquad (۱-۱)$$

به‌بیان‌دیگر سیستم زیر را که تحت نیروی $F(t)$ قرارگرفته در نظر بگیرید. نیروی متناظر با تغییر ضربه اعمال‌شده به سیستم نسبت به زمان به‌صورت زیر است.



شکل ۱-۴: سیستم جرم-فنر-میراگر یک‌درجه‌آزادی

$$F = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(m\dot{u}) = m\ddot{u} \qquad (۲-۱)$$

در عبارات بالا I نشانگر ضربه است و به‌صورت حاصل‌ضرب جرم در سرعت سیستم تعریف می‌شود. نیروی حاصل از ضربه با برآیند نیروهای وارده بر سیستم برابر است. با تعریف نیروی فنر به‌صورت $f_k(t) = ku(t)$ و نیروی میرایی به‌صورت $f_c(t) = c\dot{u}(t)$ معادله بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$-f_k(t) - f_c(t) + F(t) = m\ddot{u}(t) \qquad (۳-۱)$$

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \qquad (۴-۱)$$

نیروهای داخلی مقاوم الاستیک و میرایی در خلاف جهت حرکت سیستم عمل می‌کنند و به ترتیب در برابر تغییرشکل و سرعت سیستم مقاومت می‌کنند.

۱-۴-۲- روش تعادل دینامیکی بر اساس اصل دالامبر

ریاضیدان فرانسوی دالامبر در کتابی با عنوان اصول دینامیکی[2] اصلی را پیشنهاد داد که معادلات

1-Jean le Rond d'Alembert
2- Traite de Dynamique