

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی

تألیف:

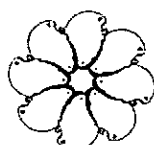
آلوک سینها

مترجمین:

دکتر کرامت ملک‌زاده فرد (دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

مهندس مهدی عزیزی (کارشناس ارشد مکانیک)

مهندس حسن توحیدی (دانشجوی دکتری مکانیک)



انتشارات شبازی

سرشناسه	:	سینها، آلوک کی، ۱۹۵۶ - م.
عنوان و نام پدیدآور	:	Sinha, Alok ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی / آلوک سینها؛ مترجمان کرامت ملکزاده‌فرد، مهدی عزیزی، حسن توحیدی.
مشخصات نشر	:	تهران: انتشارات شهبازی، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	:	۴۰۰ ص: مصور، جنول، نمودار.
شابک	:	۲۴۰۰۰۰ ریال ۳-۵-۹۴۲۴۵-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	:	فنی
یادداشت	:	عنوان اصلی: Vibration of mechanical systems
موضوع	:	ماشین‌آلات -- ارتعاش
شناسه افزوده	:	ملکزاده فرد، کرامت، ۱۳۴۷ - مترجم
شناسه افزوده	:	توحیدی، حسن، ۱۳۶۷ - مترجم
شناسه افزوده	:	عزیزی، مهدی، ۱۳۶۳ - مترجم
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۲ ۴/الف ۹/ص TJ1177
رده بندی دیویی	:	۶۲۱/۸۱۱
شماره کتابشناسی ملی	:	۲۳۸۲۱۶۱

نام کتاب: ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی
مترجمین: کرامت ملک زاده فرد-مهدی عزیزی-حسن توحیدی
ناشر: انتشارات شهبازی
ناظر فنی: یوسف محمودی
حروفچینی و صفحه آرایی: قاسمی (رها)
طراحی جلد: مجتبی فراهادی
چاپ و صحافی: گنجینه نگار
نوبت چاپ: اول ۱۳۹۲
شمارگان: ۵۰۰ جلد
قیمت: ۵۴۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۲۴۵-۳-۵ ISBN: 978-600-94245-3-5

تلفن: ۴۴۱۳۸۶۴۴ همراه: ۰۹۱۲۱۸۳۴۱۴۴

ShahbaziPub@gmail.com

www.ShahbaziPub.ir

نماینده‌ی فروش تهران: بخش علوم پویا، میدان انقلاب، خیابان اردیبهشت (منبری جاوید)،
نیش کوچه نوروز، پلاک ۵۱، واحد ۱. تلفن: ۶۶۹۶۰۷۷۳-۶۶۴۱۹۵۶۷-۶۶۹۶۰۷۷۲-۶۶۹۶۰۷۷۲

توجه: کلیه حقوق مادی و معنوی چاپ و نشر، طرح روی جلد و عنوان کتاب با توجه به قانون حمایت حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان، مصوب سال ۱۳۴۸ برای انتشارات شهبازی محفوظ است. هرگونه استفاده بدون مجوز کتبی از ناشر تخلف بوده و بر اساس بند (۵) ماده ۲۳ قانون قابل پیگیری در محاکم قضایی می باشد.

مقدمه مترجمان

تخداوند را سپاسگذاريم که توانستيم ترجمه اين اثر را به پايان برسانيم. اين کتاب ترجمه چاپ اول "ارتعاشات سيستم‌های مکانیکی" اثر آلوک سینه‌ها می‌باشد. هم‌اکنون کتاب‌های زیادی در زمینه ارتعاشات در مقاطع تحصیلی کارشناسی و کارشناسی ارشد وجود دارد. مزیت نسبی این کتاب نسبت به کتاب‌های دیگر در مثال‌های متعددی است که نویسنده آن‌ها را به صورت ساده و روان برای فهم بیشتر خواننده در این کتاب استفاده کرده است. همچنین استفاده از نرم افزار MATLAB در تحلیل برخی مسائل باعث متمایز شدن این کتاب شده است. مطالب این کتاب با سرفصل درسی ارتعاشات مکانیکی هم‌خوانی دارد و می‌تواند مرجع خوبی برای این درس در دوره کارشناسی - خصوصاً رشته مهندسی مکانیک - و همچنین دانشجویانی که قصد ادامه تحصیل در مقاطع تحصیلی بالاتر را دارند، داشته باشد.

Email: k.malekzadeh@gmail.com

با تشکر و سپاس

زمستان ۹۲

فهرست

فصل اول- سیستم یک درجه آزادی و ارتعاش آزاد.....	۱
۱.۱ درجه‌های آزادی.....	۳
۱.۲ المانهای یک سیستم ارتعاشی.....	۶
۱.۲.۱ جرم و یا ممان اینرسی جرمی.....	۶
۱.۲.۲ فنر.....	۹
۱.۲.۳ دمپر.....	۱۱
۱.۳ جرم، سختی و ثابت میرایی معادل برای یک سیستم یک درجه آزادی.....	۱۵
۱.۳.۱ سیستم روتور شفت.....	۱۵
۱.۳.۲ جرم معادل فنر.....	۱۶
۱.۳.۳ فنر های سری و موازی.....	۱۹
۱.۳.۴ سیستم یک درجه آزادی با دو فنر و دارای حرکت ترکیبی دورانی و انتقالی ..	۲۲
۱.۳.۵ دمپرهای ویسکوز به شکل سری و موازی.....	۲۵
۱.۴ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزادی نامیرا.....	۲۹
۱.۴.۱ معادله دیفرانسیل حرکت.....	۲۹
۱.۴.۲ حل معادله دیفرانسیل حرکت حاکم بر ارتعاش آزاد سیستم جرم- فنر نامیرا.....	۳۸
۱.۵ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزادی با میرایی ویسکوز.....	۴۵
۱.۵.۱ معادله دیفرانسیل حرکت.....	۴۵
۱.۵.۲ حل معادله دیفرانسیل حرکت حاکم ارتعاش آزاد یک سیستم جرم- فنر میرا.....	۴۶
۱.۵.۳ کاهش لگاریتمی: تعیین ضریب میرایی برای پاسخ آزاد یک سیستم با کند میرا.....	۵۷
۱.۶ پایداری سیستم یک درجه آزادی جرم- فنر- دمپر.....	۶۳
مسائل تمرینی.....	۷۱
فصل دوم- ارتعاش سیستم یک درجه آزادی تحت تحریک ثابت و هارمونیک خالص.....	۸۱
۲.۱ پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی میرا و نامیرا نسبت به یک نیروی ثابت.....	۸۲

۲.۲ پاسخ سیستم یک درجه آزادی نامیرا تحت تحریک هارمونیک.....	۹۵
۲.۳ پاسخ سیستم یک درجه آزادی میرا به یک تحریک هارمونیک.....	۱۰۳
۲.۳.۱ پاسخ حالت پایدار.....	۱۱۲
۲.۳.۲ انتقال نیرو.....	۱۲۰
۲.۳.۳ ضریب کیفیت و پهنای باند.....	۱۲۷
۲.۴ نابالانسی دوار.....	۱۳۱
۲.۵ تحریک پایه.....	۱۴۰
۲.۶ ابزارهای اندازه گیری ارتعاشات.....	۱۴۷
۳.۶.۱ ارتعاش سنج.....	۱۴۹
۳.۶.۲ شتاب سنج.....	۱۵۳
۲.۷ میرایی ویسکوز معادل برای اتلاف انرژی غیرویسکوز.....	۱۵۵
مسائل تمرینی.....	۱۶۱
فصل سوم-پاسخ های یک سیستم یک درجه آزادی جرم- فنر-دمپر تحت نیروهای متناوب و دلخواه.....	۱۶۹
۳.۱ پاسخ سیستم یک درجه آزادی نسبت به یک نیروی متناوب.....	۱۷۰
۳.۱.۱ تابع متناوب و بسط سری های فوریه آن.....	۱۷۰
۳.۱.۲ توابع متناوب زوج و فرد.....	۱۷۵
۳.۱.۳ بسط سری های فوریه تابع با دوره تناوب محدود.....	۱۸۲
۳.۱.۴ انتگرال خصوصی (پاسخ حالت پایدار همراه با میرایی) تحت تحریک متناوب.....	۱۸۷
۳.۲ پاسخ به یک تحریک با طبیعت دلخواه.....	۱۹۲
۳.۲.۱ تابع ضربه واحد $\delta(t-a)$	۱۹۳
۳.۲.۲ پاسخ ضربه واحد یک سیستم یک درجه آزادی با شرایط اولیه صفر.....	۱۹۴
۳.۲.۳ انتگرال کانولوشن: پاسخ به تحریک دلخواه با شرایط اولیه صفر.....	۱۹۸
۳.۲.۴ انتگرال کانولوشن: پاسخ به یک تحریک دلخواه با شرایط اولیه غیر صفر.....	۲۰۴
۳.۳ تبدیل لاپلاس.....	۲۰۸
۳.۳.۱ خواص تبدیل لاپلاس.....	۲۱۰

۳.۳.۲	پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی توسط تبدیل لاپلاس	۲۱۱
۳.۳.۳	تابع تبدیل و تابع پاسخ فرکانس	۲۱۵
۲۲۵	مسائل تمرینی	
۳۳۵	فصل چهارم- ارتعاش سیستم های دو درجه آزادی	
۴.۱	ماتریس های جرم، سختی و میرایی	۲۳۶
۴.۲	فرکانس های طبیعی و شکل مودها	۲۴۲
۴.۲.۱	تفسیر مقدار ویژه/ بردار ویژه	۲۴۷
۴.۳	پاسخ آزاد یک سیستم دو درجه آزادی نامیرا	۲۴۸
۴.۴	پاسخ اجباری یک سیستم دو درجه آزادی نامیرا تحت تحریک سینوسی	۲۵۱
۴.۵	ارتعاش آزاد سیستم دو درجه آزادی میرا	۲۵۳
۴.۶	پاسخ حالت پایدار یک سیستم دو درجه آزادی میرا تحت تحریک سینوسی	۲۶۰
۴.۷	جذب کننده ارتعاش	۲۶۲
۴.۷.۱	جذب کننده ارتعاشی نامیرا	۲۶۳
۴.۷.۲	جذب کننده ارتعاشی میرا	۲۷۱
۴.۸	تجزیه مودال پاسخ	۲۷۹
۲۸۳	مسائل تمرینی	
۲۹۱	فصل پنجم- سیستم های ابعادی (پیوسته) محدود و نامحدود	
۵.۱	سیستم های چند درجه آزادی	۲۹۲
۵.۱.۱	فرکانس های طبیعی و بردارهای مودال (شکل مودها)	۲۹۳
۵.۱.۲	تعامد بردارهای ویژه برای ماتریس های متقارن جرم و سختی	۲۹۸
۵.۱.۳	تجزیه مودال	۳۰۱
۵.۲	سیستم های پیوسته تحت معادلات موج حاکم شده	۳۰۷
۵.۲.۱	ارتعاش عرضی یک نخ	۳۰۸
۵.۲.۲	ارتعاش طولی یک میله	۳۱۸
۵.۲.۳	ارتعاش پیچشی یک شفت دایره ای	۳۲۲
۵.۳	سیستم های پیوسته: ارتعاش عرضی یک تیر	۳۲۷

۳۲۷	۵.۱.۳ معادله دیفرانسیل مشتق جزئی حرکت حاکم بر مساله
۳۲۹	۵.۳.۲ فرکانس هاس طبیعی و شکل مودها
۳۳۸	۵.۳.۳ محاسبه پاسخ
۳۴۵	۵.۴ آنالیز اجزا محدود
۳۴۶	۵.۶.۴ ارتعاش طولی یک میله
۳۵۵	۵.۴.۲ ارتعاش عرضی یک تیر
۳۶۷	مسائل تمرینی
۳۷۳	منابع
۳۷۵	ضمیمه الف: سختی‌های معادل (ثابت‌های فنر) تیرها، شفت‌های پیچشی و میله‌های طولی
۳۷۹	ضمیمه ب: برخی از فرمول‌های ریاضی
۳۸۱	ضمیمه ج: جدول تبدیل لایپلاس

درباچه

این کتاب برای درس ارتعاشات دانشجویان دوره های لیسانس و فوق لیسانس مهندسی مکانیک در نظر گرفته شده است و بر اساس یادداشت‌های درسی دوره (ME370) بنده می‌باشد که برای سال‌های متمادی در دانشگاه ملی پنسیلوانیا^۱ و دانشگاه یارک^۲ به تدریس پرداخته‌ام. درس ارتعاشات درس اصلی مورد نیاز در دوره لیسانس مهندسی مکانیک می‌باشد و برای دانشجویان سال سوم ارائه می‌شود. کتابهای درسی که در دانشگاه پنسیلوانیا (PSU) استفاده شده‌اند به قرار زیر می‌باشند:

هاتون^۳ (۱۹۸۱)، راتو^۴ (۱۹۹۵) و نخستین ویرایش (۱۹۸۶). بنده نیز از کتاب تامسون^۵ (۱۹۹۳ و نخستین ویرایش ۱۹۷۲) به عنوان یک مرجع مهم برای تدریس این درس استفاده کرده‌ام. این سوالاتی منطقی می‌باشد، اگر کسی بپرسد چرا در حالی که کتابهای زیادی در زمینه ارتعاشات از زمانیکه دن هارتاگ^۶ کتاب کلاسیک را در سال ۱۹۵۶ تألیف کرد، وجود دارند در حال نوشتن کتاب دیگری می‌باشم. یک دلیل اینست که اکثر کتابهایی که برای دانشجویان دوره فوق لیسانس در نظر گرفته شده است. در نتیجه استاد‌های دانشگاه‌ها کتاب مناسبی را برای دانشجویان دوره لیسانس مناسب ندیده بودند. انگیزه دیگر برای تألیف این کتاب اینست که بنده روشهای بی نظیر ارائه مفاهیم ارتعاشات را با توجه به تجربه‌ام از پیش زمینه دانشجویان دوره لیسانس در گروه آموزشی و زمان موجود در طول ترم تحصیلی ارائه داده‌ام. بعضی از مثالها به قرار زیر هستند: مرور

^۱ Pennsylvania State University (PSU)

^۲ University Park

^۳ Hutton

^۴ Rao

^۵ Thomson & Dahleh

^۶ Den Hartog

عناوین انتخاب شده در مکانیک؛ تشریح فصل سیستم‌های یک درجه آزادی¹ برحسب جرم، سختی و میرایی معادل؛ رفتار واحد مسائل با پاسخ اجباری گوناگون مانند تحریک پایه و بالانسی دوار؛ معرفی رفتار سیستم، با تأکید بر این واقعیت که تحلیل یک درجه آزادی عنصر سازنده برای تحلیل‌های سیستم پیوسته و چند درجه آزادی² از طریق تحلیل مودال می‌باشد؛ و یک معرفی ساده تحلیل المان محدود مربوط به تحلیل‌های سیستم پیوسته و سیستم چند درجه آزادی.

همانطور که قبلاً گفته شد، کتابهای زیادی در زمینه ارتعاشات وجود دارد اما به خاطر میل به گنجاندن هر چیزی در آنها، بسیاری از این کتابها اغلب برای دانشجویان دوره لیسانس دشوار می‌باشند. در این کتاب، همه مفاهیم بنیادی در ارتعاشات مکانیکی به طور واضح شناسایی و با روش ساده همراه با مثال‌های عملی و گویا بیان می‌شوند. من همچنین سعی کرده‌ام که این کتاب را در حد امکان جامع و کامل جلوه بدهم.

برای مثال، موارد مورد نیاز از دوره‌های قبل، نظیر معادلات دیفرانسیل و مسائل مهندسی مکانیک ارائه می‌شوند. در آخر هر فصل مسائل تمرینی و استفاده از نرم افزار MATLAB گنجانده شده است.

¹ سیستم یک درجه آزادی SDOF

² سیستم چند درجه آزادی MDOF

سازماندهی کتاب

در فصل ۱، درجه های آزادی و المان های پایه ارتعاشی سیستم مکانیکی ارائه شده است. سپس مفاهیم جرم معادل، سختی معادل و میرایی معادل برای ایجاد یک مدل یک درجه آزادی معادل تعریف شده است. سپس معادله دیفرانسیل حرکت سیستم جرم و فنر بدون میراکننده SDOF به همراه حل آن به دست آورده شده است. سپس حل معادله دیفرانسیل حرکت یک سیستم جرم و فنر و دمپر SDOF به دست آورده شده است. سه حالت میرایی (کند میرا^۱، میرایی بحرانی^۲ و تند میرا^۳) در جزئیات بحث می شوند. در آخر، مفهوم پایداری یک سیستم جرم- فنر-دمپر یک درجه آزادی ارائه شده است.

در فصل ۲، پاسخهای سیستم های جرم- فنر یک درجه آزادی میرا و نامیرا ارائه شده است. مثال مهمی در ابتدا نشان داده شده است. سپس حل کامل هر دو سیستم جرم- فنر میرا و نامیرا تحت نوسان سینوسی بدست آورده شده است. دامنه ها و فازهای پاسخ حالت پایدار همراه با انتقال نیرو، ضریب کیفیت و پهنای باند مورد بررسی قرار می گیرند. سپس حل مسائل نابالانسی دوار و تحریک پایه فراهم شده است. بعد از آن، اصول پایه ای به دنبال طراحی یک ارتعاش سنج و یک شتاب سنج ارائه شده است. سپس، مفهوم میرایی ویسکوز معادل برای اتلاف انرژی غیر ویسکوز ارائه شده است.

در فصل ۳، روشهای محاسبه پاسخ سیستم یک درجه آزادی برای نوسان متناوب همراه با بسط سری های فوریه ارائه شده است. سپس نشان میدهد که چگونه پاسخ تحریک دلخواه به کمک انتگرال کانولوشن^۴ و پاسخ ضربه واحد

¹ Underdamped

² Critically damped

³ Overdamped

⁴ Convolution Integral

بیه‌دست آورده شده است. در آخر، روش تبدیل لاپلاس ارائه شده است. همچنین مفهوم تابع انتقال، قطب‌ها، صفرها، و تابع پاسخ فرکانس توضیح داده می‌شوند.

در فصل ۴، ماتریس جرم، ماتریس سختی، ماتریس میرایی و بردار نیرو معرفی شده‌اند. سپس روش محاسبه فرکانسهای طبیعی و شکل مودها ارائه شده است. سپس ارتعاش آزاد و اجباری سیستم‌های دو درجه آزادی میرا و نامیرا تحلیل شده‌اند. در آخر روش‌های طراحی جذب کننده‌های ارتعاش میرا و نامیرا ارائه شده است.

در فصل ۵، محاسبه فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای سیستم‌های پیوسته و سیستم‌های چند درجه آزادی گسیخته توضیح داده شده است. سپس خاصیت متعامد بودن شکل مودها نشان داده می‌شود. روش تجزیه مودال برای محاسبه پاسخ‌های اجباری و آزاد توضیح داده می‌شود. در زیر موارد سیستم‌های پیوسته در نظر گرفته می‌شوند: ارتعاش عرضی ریلمان، ارتعاش طولی میله، ارتعاش پیچشی شفت مدور و ارتعاش عرضی تیر. در آخر روش المان محدود با کمک مثالهای ارتعاش طولی میله و ارتعاش عرضی تیر معرفی شده است.

فصل اول: سیستم یک درجه آزادی و ارتعاش آزاد

درس ارتعاشات مکانیکی یکی از درس‌های مهم دانشجویان دوره لیسانس مهندسی مکانیک می باشد. این درس برای گسترش و اجرای بسیاری از محصولات مدرن مهندسی مانند اتومبیل، موتورهای جت، راکت‌ها، پل‌ها، موتورهای الکتریکی، ژنراتورهای الکتریکی و غیره لازم است. هنگامیکه یک سیستم مکانیکی شامل المان‌های ذخیره سازی برای انرژی‌های پتانسیل و جنبشی باشد، ارتعاش بوجود خواهد آمد. ارتعاش سیستمهای مکانیکی یک تبادل پیوسته بین انرژی‌های پتانسیل و جنبشی می باشد. سطح ارتعاش با به کار گذاشتن المانهای اتلاف انرژی در سیستم کاهش داده می شود. مسئله ارتعاشی بیشتر بخاطر وجود تحریکهای خارجی وابسته به زمان پدید می آید. برای مثال پدیده تشدید در ماشین دوار توسط وجود اجتناب ناپذیر نابالانسی روتور پدید می آید. در بسیاری از مواقع ارتعاش توسط تحریک داخلی بوجود می آید که به سطح ارتعاش بستگی دارد. این نوع ارتعاش به عنوان نوسانات خودالقایی شناخته می شوند. برای مثال شکست پل معلق تاکوما¹ و لرزش بال یک هواپیما². این درس به مشخصات و محاسبات پاسخ سیستم مکانیکی که توسط تحریک های وابسته به

¹ Tacoma suspension bridge

² Billah and Scanlan, 1991