دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

آنالیز مودال غیر خطی سازه ها با انتخاب خودکار پارامترها به کمک روش الگوریتم ژنتیک

دانشجو:

احسان جمشیدی

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا آشوری

شهریور ۱۳۹۲

بنام خدا

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه دکتری

پایان نامه آقای احسان جمشیدی برای اخذ دکتری

تحت عنوان :

آنالیز مودال غیر خطی سازه ها با انتخاب خودکار پارامترها به کمک روش الگوریتم ژنتیک

در جلسه مورخ **۱۳۹۲/۷/۲۳** بررسی و با نمره **۱۹/۳۸** مورد تایید قرار گرفت.

هیئت داوران:

استاد راهنما: دکتر محمد رضا آشوری امضاء

استاد داور: دکتر حمید احمدیان امضاء

استاد داور: دکتر محمد علی حاجی موسی امضاء

استاد داور: دکتر ایرج جعفری امضاء

مسئول تحصیلات تکمیلی: دکتر علی قدوسیان امضاء

تقدیم به

پدر، مادر، همسر و

دختر عزیزم سارا

چکیده

اغلب سازه های مهندسی دربردارنده عناصر غیرخطی اند. بسته به شرایط دینامیکی و سطح نیروهای خارجی وارده، در مواردی فرض خطی بودن رفتار سازه قابل توجیه می باشد. با این وجود، طراحی سازه های پیچیده و حساس نیازمند در نظر گرفتن کوچکترین رفتار غیرخطی می باشد. بنابراین، کشف، مکان یابی و شناسایی پارامتریک موفق عناصر غیرخطی در چنین مواردی اهمیت فوق العاده ای دارد. اکثر روشهای شناسایی غیرخطی نیازمند شناخت ابتدایی از نوع عوامل غیرخطی حاضر در سیستم بوده و از کتابخانه ای از ردپاهای انواع مختلف عوامل غیرخطی، براساس بازرسی بصری به منظور مشخص کردن پارامترهای غیرخطی استفاده می کنند. این شیوه در شرایطی که چندین نوع عامل غیرخطی به طور همزمان در یک یا چندین مکان از سازه وجود داشته باشد و به ویژه در صورت وجود همزمان بیش از یک نوع عنصر غیرخطی در یک نقطه، به دلیل پیچیدگی در شکل نمودارها و مشکلات پیش رو در قضاوت بصری عملی نخواهد بود. این رساله یک روش جدید آنالیز مودال غیرخطی با هدف شناسایی سازه های غیرخطی ضعیف با عناصر غیرخطی محلی ارائه می کند. هدف کلی، تعیین نوع و شناسایی عناصر غیرخطی بدون بازرسی های بصری و با استفاده از کتابخانه ای از ردپای انواع مختلف عناصر غیرخطی است. ابتدا روش در مسیر مستقیم با تحلیل یک سیستم تئوری کلی مطرح می گردد. سپس این مفهوم به منظور استفاده در شناسایی غیرخطی از طریق مسیر معکوس همان روش بسط داده می شود.

روش مسیر مستقیم که "فرمولاسیون هیبریدی"[1] نامیده شده است، بر پایه تکنیک بروزرسانی مدل پیشنهادی در این رساله می باشد.روش یک فرمولاسیون هیبریدی برای توابع پاسخ فرکانسی سیستمهای چند درجه آزادی غیر خطی بر پایه روش SMURF ارائه می کند. این روش توانایی تولید توابع پاسخ فرکانسی[2] در درجات آزادی های دلخواه سازه را دارد. اصطلاح "هیبرید" در عنوان این روش بیانگر این مطلب است که در حالیکه عوامل غیر خطی به فرم توابع توصیفی بر پایه المانهای فضایی به کار گرفته می شوند، زیر سیستم خطی با بیان بصورت FRF کاهش می یابد. این روش از چندین FRF به جای مدل فضایی سیستم استفاده می کند که سبب کاهش هزینه محاسباتی آن می گردد. علاوه بر این، استفاده از توابع پاسخ فرکانسی حاصل از اندازه گیری آزمایشگاهی برای زیر سیستم خطی امکان پذیر است.

معکوس "روش فرمولاسیون هیبریدی"[3]، به عنوان یک ابزار شناسایی ارائه شده است. روش پیشنهادی بر پایه این حقیقت است که سازه های غیرخطی تحت شرایط خاص، خطی رفتار می کنند و از پاسخ های زیر سیستم خطی استفاده می کند. از الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک تکنیک بهینه سازی به منظور استخراج پارامترهای غیرخطی بهره گرفته شده است. با ارائه یک روش حذف ژن و افزودن آن به الگوریتم ژنتیک، قابلیت تشخیص و یافتن مکان و نوع عوامل غیرخطی فراهم گردیده است. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از مفهوم حذف ژن در پروسه بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک توانایی تشخیص عوامل غیرخطی موجود در سیستمهای چند درجه آزادی را در حالی که مکان و نوع عوامل غیرخطی از پیش مشخص نبوده و بدون شناخت در خصوص درصد احتمال حضور انواع مختلف غیرخطی، را داراست.

در نهایت روشهای پیشنهادی به منظور تحلیل یک سازه تجربی با عنصر غیرخطی مرتبه سه استفاده می شوند. محدودیتها و مشکلات پیش روی آزمایشها و تکنیک کنترلی بکارگرفته شده برای بدست آوردن داده های تجربی از تست با جزئیات توضیح داده شده است. به علاوه. یک الگوریتم جدید مقاوم به نویز بر پایه همبستگی، جهت استخراج فاز نسبی بین هارمونیک های سیگنالهای دیجیتال اندازه گیری شده معرفی می گردد، تا به منظور محاسبه دامنه و فاز اجزای اصلی و هارمونیکهای تحریک نیرو و سیگنالهای پاسخ در فرایند کنترل استفاده گردد. توابع پاسخ فرکانسی بازسازی شده از روش HF با نمونه های غیرخطی اندازه گیری شده از سازه مطابقت خوبی نشان داده است. از این نمونه مطالعاتی نتیجه گیری می شود که روشهای ارائه شده توانایی پیش بینی دقیق رفتار دینامیکی سازه را دارند.

[1] Hybrid formulation (HF)
[2] Frequency response function (FRF)
[3] Reverse hybrid formulation (RHF)

تشکر و قدردانی

بدینوسیله تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر محمدرضا آشوری -که راهنمایی اینجانب در انجام این پروژه را بر عهده داشته اند و بدون حمایت ها و راهنمایی های ایشان انجام این پروژه امکان پذیر نبود- ابراز می دارم.

همچنین از آقایان دکتر حمید احمدیان، دکتر محمد علی حاجی موسی و دکتر ایرج جعفری -که داوری این پروژه را به عهده داشته اند- سپاسگذاری و قدردانی می نمایم.

از دوست خوبم آقای دکتر محمد مهدی خطیبی به خاطر همراهی در روزهای سخت و بحث ها و گفتگوهای مفید، برادر عزیزم آقای مهندس بهرام جمشیدی و آقای مهندس فرامرز منشی زادگان مسئول محترم آزمایشگاه مودال دانشگاه سمنان برای همکاری هایشان کمال تشکر را دارم.

همچنین از همسرم خانم مهندس نرجس نعمتی پور به خاطر حمایت های بی دریغ و همکاریهای ایشان متشکرم.

در پایان بر خود لازم میدانم که از مادرم، همسرم و خانواده همسرم برای صبر و حمایت بی قید و شرطشان در طول انجام پروژه و به ویژه در ماههای پایانی آن قدردانی نمایم که بدون حمایت هایشان این پایان نامه کامل نمی شد.

این پایان نامه با حمایت دانشگاه سمنان (پارک علم و فناوری، معاونت آموزشی و معاونت پژوهشی) اجرا شده است.

فهرست اختصارات

AEFRF	Average Error in FRF	درصد متوسط خطا در توابع پاسخ فرکانسی
AEMS	Average Error in Mode Shapes	درصد متوسط خطا در شکل مودها
AENF	Average Error in Natural Frequency	درصد متوسط خطا در فرکانس های طبیعی
CRP	Condition Reverse Path	مسیر معکوس مشروط
DFM	Describing Function Method	توابع توصیفی
DOF	Degree of Freedom	درجه آزادی
FE	Finite Element	اجزای محدود
FEM	Finite Element Method	روش اجزای محدود
FFT	Fast Fourier Transform	تبدیل فوریه سریع
FRF	Frequency Response Function	تابع پاسخ فرکانسی
GA	Genetic Algorithm	الگوریتم ژنتیک
HBM	Harmonic Balance Method	روش بالانس هارمونیک
HF	Hybrid Formulation	فرمولاسیون هیبریدی
NIFO	Nonlinear Identification through Feedback of the Output	پسخورد خروجی
NLI	Nonlinearity Index	اندیس غیرخطی
REF	Reverse Explicit Formulation	معکوس فرمولاسیون صریح
RFM	Response Function Method	روش پاسخ فرکانسی
RHF	Reverse Hybrid Formulation	معکوس روش فرمولاسیون هیبریدی
RHMT	Reverse Hybrid Modal Technique	معکوس روش هیبرید مودال
SMURF	Structural Modification Using Response Function	روش اصلاح سازه با توابع پاسخ فرکانسی
SPP	Sample Per Period	تعداد نمونه در دوره
THD	Total Harmonic Distortion	انحراف هارمونیک کلی

فهرست

فهرست ..... هفت

فهرست اشکال ..... ده

فهرست جداول ..... سیزده

فصل اول

مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه ۳

۱-۲ آنالیز مودال غیرخطی ۵

۱-۳ شناسایی سیستمهای غیرخطی ۷

۱-۴ اهداف رساله ۱۱

۱-۵ مروری بر رساله ۱۲

فصل دوم

بروز رسانی مدل سازه میرا با استفاده از تکنیک اصلاح سازه با توابع پاسخ فرکانسی تجربی(SMURF) ۱۶

۲-۱ مقدمه ۱۷

۲-۲ تئوری ۱۹

۲-۳ نمونه مطالعاتی عددی ۲۵

۲-۴ بررسی نتایج ۲۷

۲-۵ نتیجه گیری ۳۶

فصل سوم

روش فرمولاسیون تابع پاسخ فرکانسی هیبریدی برای سیستم های چند درجه آزادی غیرخطی ۳۸

۳-۱ مقدمه ۳۹

۳-۲ تئوری ۴۰

۳-۳ نمونه مطالعاتی عددی ۴۳

۳-۴ بررسی نتایج ۴۷

۳-۵ نتیجه گیری ۵۰

فصل چهارم

شناسایی پارامترهای غیرخطی از طریق الگوریتم ژنتیک با کد حقیقی ۵۲

۴-۱ مقدمه ۵۳

۴-۲ تئوری ۵۵

۴-۳ مساله بهینه سازی الگوریتم ژنتیک ۶۰

۴-۴ نمونه های مطالعاتی عددی ۶۴

۴-۵ بررسی نتایج ۶۶

۴-۵-۱ نمونه ۱: سختی مرتبه سه ۶۶

۴-۵-۲ نمونه ۲ : اصطکاک ۷۰

۴-۵-۳ نمونه ۳: ترکیب سختی مرتبه سه و اصطکاک ۷۳

۴-۶ نتیجه گیری ۷۵

فصل پنجم

تست ۷۸

۵-۱ مقدمه ۷۹

۵-۲ ملاحظات اندازه گیری توابع پاسخ فرکانسی سازه های غیرخطی ۷۹

۵-۳ برنامه تست دینامیکی غیرخطی ۸۱

۵-۳-۱ الگوریتم کنترل نیرو ۸۲

۵-۳-۲ برنامه کنترل هارمونیک اصلی ۸۴

۵-۳-۳ برنامه کنترل چند هارمونیک ۸۷

۵-۴ چیدمان تست ۹۰

۵-۵ تئوری الگوریتم استخراج فاز ۹۳

۵-۶ الگوریتم عملی روش استخراج فاز ۹۵

۵-۷ نمونه تجربی ۱۰۲

۵-۷-۱ تست استاتیکی ۱۰۴

۵-۷-۲ استخراج توابع پاسخ فرکانسی خطی، زیر سیستم خطی ۱۰۶

۵-۷-۳ تست دینامیکی غیرخطی ۱۰۸

۵-۸ بررسی نتایج ۱۲۲

۵-۹ نتیجه گیری ۱۲۳

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۲۶

۶-۱ نتیجه گیری ۱۲۷

۶-۱-۱ درباره روش بروز رسانی مدل سازه میرا ۱۲۷

۶-۱-۲ درباره روش فرمولاسیون تابع پاسخ فرکانسی هیبریدی (HF) ۱۲۷

۶-۱-۳ درباره روش شناسایی پارامترهای غیرخطی از طریق الگوریتم ژنتیک ۱۲۸

۶-۱-۴ درباره روش حذف ژن ۱۲۹

۶-۱-۵ درباره الگوریتم استخراج فاز نسبی ۱۳۰

۶-۱-۶ درباره تست و نمونه تجربی ۱۳۱

۶-۲ خلاصه نوآوری ها ۱۳۲

۶-۳ پیشنهادات برای کارهای آینده ۱۳۳

مراجع ۱۳۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ دیاگرام کلی روش های شناسایی خطی ۷
شکل ۱-۲ دیاگرام کلی معلومات و مجهولات در روش های شناسایی غیرخطی ۸
شکل ۱-۳ مروری بر رساله ۱۲
شکل ۲-۱ سیستم N درجه آزادی (الف)غیردقیق (ب) دقیق ۱۹
شکل ۲-۲ دیاگرام آزاد سیستم N درجه آزادی ۲۰
شکل ۲-۳ سیستم جرم، فنر و دمپر دوازده درجه آزادی ۲۶
شکل ۲-۴ همگرایی ضرایب اصلاح جزئی جمعی مربوط به m_4 (--)، k_5 (—۰)، k_6 (—) و c_5 (۰) برای نمونه داده کامل ۲۸
شکل ۲-۵ ضرایب اصلاح جزئی جمعی نهایی برای نمونه داده کامل ۲۸
شکل ۲-۶ همگرایی ضرایب اصلاح جزئی جمعی به m_4 (--)، k_5 (—۰)، k_6 (—) و c_5 (۰) برای نمونه داده ناکامل ۳۱
شکل ۲-۷ ضرایب اصلاح جزئی جمعی نهایی برای نمونه داده ناکامل ۳۲
شکل ۲-۸ همگرایی ضرایب m_4 (--)، k_5 (—۰)، k_6 (—) و c_5 (۰) برای نمونه داده ناکامل با ۲٪ نویز ۳۴
شکل ۲-۹ ضرایب اصلاح جزئی جمعی نهایی برای نمونه داده ناکامل با ۲٪ نویز ۳۵
شکل ۲-۱۰ متوسط خطای شکل مودها (AEMS) بعد از پروسه بروز رسانی ۳۶
شکل ۲-۱۱ متوسط خطای توابع پاسخ فرکانسی (AEFRF) بعد از پروسه بروز رسانی ۳۶
شکل ۲-۱۲ توابع پاسخ فرکانسی مدل تجربی (—) ، تحلیلی (..) و بروز رسانی شده(■) برای پوشش یک مود ۳۶
شکل ۳-۱ (الف) سیستم N درجه آزادی غیرخطی (ب) زیر سیستم خطی ۴۱
شکل ۳-۲ دیاگرام آزاد سیستم N درجه آزادی ۴۱
شکل ۳-۳ دیاگرام نمونه عددی مورد بررسی ۴۴
شکل ۳-۴ FRF های زیر سیستم خطی(----)، سیستم غیرخطی از طریق روش HF (•) سیستم غیرخطی از طریق HBM (-) برای نمونه سختی مرتبه سه (بزرگنمایی نواحی رزونانس ها در شکل بعد نشان داده است) ۴۸
شکل ۳-۵ FRF های غیرخطی برای نمونه سختی مرتبه سه (بزرگنمایی یک یک رزونانس ها) ۴۸
شکل ۳-۶ FRF های زیر سیستم خطی (----)، سیستم غیرخطی از طریق روش HF (•) و سیستم غیرخطی از طریق HBM (-) برای نمونه دمپینگ اصطکاکی (بزرگنمایی نواحی رزونانس ها در شکل بعد نشان داده شده است.) ۴۹
شکل ۳-۷ FRF های غیرخطی برای نمونه دمپینگ اصطکاکی (بزرگنمایی یک یک رزونانس ها) ۴۹
شکل ۴-۱الف) سیستم N درجه آزادی غیرخطی (ب) زیر سیستم خطی ۵۶
شکل ۴-۲ دیاگرام آزاد سیستم N درجه آزادی ۵۶
شکل ۴-۳ فلوچارت الگوریتم ژنتیک با کد حقیقی استاندارد ۶۱
شکل ۴-۴ فلوچارت ساده شده الگوریتم ژنتیک کد حقیقی ۶۳
شکل ۴-۵ دیاگرام نمونه عددی مورد بررسی ۶۴
شکل ۴-۶ دیاگرام احتمال وجود عوامل غیرخطی در نمونه عددی مورد بررسی ۶۶
شکل ۴-۷ پاسخ زیر سیستم خطی (----)، نقاط فرکانسی (•) و سیستم غیرخطی از طریق HBM (-) برای نمونه سختی مرتبه سه.. ۶۷
شکل ۴-۸ اثر تعداد نقاط فرکانسی بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۱) ۶۸
شکل ۴-۹ اثر نویز بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۱) ۶۹
شکل ۴-۱۰ اثر تعداد نقاط انتخابی بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۱) ۶۹
شکل ۴-۱۱ پاسخ زیر سیستم خطی (----)، نقاط فرکانسی (•) و سیستم غیرخطی از طریق HBM (-) برای نمونه اصطکاک ۷۰

شکل ۴-۱۲ اثر انتخاب نقاط بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۲)..... ۷۱
شکل ۴-۱۳ اثر نویز بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۲) ۷۲
شکل ۴-۱۴ اثر تعداد نقاط فرکانسی بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۲) ۷۲
شکل ۴-۱۵ پاسخ زیر سیستم خطی (---)، نقاط فرکانسی (•) و سیستم غیرخطی از طریق HBM (-) برای نمونه سختی مرتبه سه و اصطکاک..... ۷۳
شکل ۴-۱۶ اثر انتخاب نقاط بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۳)..... ۷۴
شکل ۴-۱۷ اثر نویز بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۳) ۷۵
شکل ۴-۱۸ اثر تعداد نقاط فرکانسی بر خطا در پارامترهای تخمینی (نمونه عددی ۳)..... ۷۵
شکل ۵-۱ سازه مورد آزمایش [۲]..... ۷۹
شکل ۵-۲ بیان شماتیک الگوریتم کنترل نیروی غیرخطی..... ۸۵
شکل ۵-۳ بیان شماتیک الگوریتم کنترل چند هارمونیک نیروی غیرخطی ۸۸
شکل ۵-۴ چیدمان کلی تست..... ۹۱
شکل ۵-۵ بلوک دیاگرام چیدمان تست نمونه تجربی [۲]..... ۹۱
شکل ۵-۶ کالیبراسیون تجهیزات ۹۲
شکل ۵-۷ شماتیک مراحل ۵ تا ۸ روش استخراج فاز نسبی..... ۹۶
شکل ۵-۸ باز سازی سیگنال با ۲۰ ٪ نویز..... ۹۷
شکل ۵-۹ باز سازی سیگنال با ۳۰ ٪ نویز..... ۹۸
شکل ۵-۱۰ سیگنال باز سازی شده برای SPP=10 ..... ۹۸
شکل ۵-۱۱ سیگنال باز سازی شده برای SPP=20 ..... ۹۹
شکل ۵-۱۲ سیگنال باز سازی شده برای SPP=40 ..... ۹۹
شکل ۵-۱۳ سیگنال باز سازی شده برای SPP=200 ..... ۱۰۰
شکل ۵-۱۴سیگنال باز سازی شده با فرکانس های نزدیک به هم..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۵سیگنال های نیروی مستخرج از تست و باز سازی شده..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۶ نمونه تجربی استفاده شده در تست های مودال [۲]..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۷ ابعاد نمونه آزمایشگاهی [۲]..... ۱۰۳
شکل ۵-۱۸ تست استاتیکی بخش خطی نمونه تجربی..... ۱۰۴
شکل ۵-۱۹ تست استاتیکی نمونه تجربی..... ۱۰۵
شکل ۵-۲۰ رابطه نیرو - جابجایی بخش خطی و غیرخطی نمونه تجربی..... ۱۰۵
شکل ۵-۲۱ نمودار های اکسلرنس A_{11} با ولتاژهای تحریک مختلف..... ۱۰۷
شکل ۵-۲۲ نمودار های رسپتنس α_{11} با ولتاژهای تحریک مختلف..... ۱۰۷
شکل ۵-۲۳ نمودار های اکسلرنس $A_{۱۳}$ با ولتاژهای تحریک مختلف..... ۱۰۷
شکل ۵-۲۴ نمودار های رسپتنس $\alpha_{۱۳}$ با ولتاژهای تحریک مختلف..... ۱۰۸
شکل ۵-۲۵ نمودار الف) THD نیرو ب) نقاط با THD کمتر از۰/۰۰۱..... ۱۱۱
شکل ۵-۲۶ نمودار الف) THD پاسخ در نقطه ۱ ب) بزرگنمایی..... ۱۱۱
شکل ۵-۲۷ نمودار الف) THD پاسخ در نقطه ۲ ب) بزرگنمایی..... ۱۱۲
شکل ۵-۲۸ نمودار الف) THD پاسخ در نقطه ۳ ب) بزرگنمایی..... ۱۱۲

شکل ۵-۲۹ نمودار هیستوگرام THD سیگنالهای نیرو و پاسخ..... ۱۱۳
شکل ۵-۳۰ الف) دامنه سیگنال نیرو ب) نمای دوبعدی دامنه..... ۱۱۳
شکل ۵-۳۱ دامنه سیگنال پاسخ نقطه ۱ الف) جابجایی ب) شتاب..... ۱۱۴
شکل ۵-۳۲ دامنه سیگنال پاسخ نقطه ۲ الف) جابجایی ب) شتاب..... ۱۱۴
شکل ۵-۳۳ دامنه سیگنال پاسخ نقطه ۳ الف) جابجایی ب) شتاب..... ۱۱۵
شکل ۵-۳۴ اثر استفاده از نقاط با THD های مختلف بر ضریب سختی مرتبه سه..... ۱۱۶
شکل ۵-۳۵ توابع اکسلرنس در سطوح مختلف نیروی ثابت(مقیاس خطی) ۱۱۸
شکل ۵-۳۶ توابع اکسلرنس در سطوح مختلف نیروی ثابت (مقیاس لگاریتمی)..... ۱۱۸
شکل ۵-۳۷ بزرگنمایی توابع اکسلرنس در سطوح مختلف نیروی ثابت (مقیاس لگاریتمی)..... ۱۱۹
شکل ۵-۳۸ دامنه هارمونیک اصلی (•-) و دامنه سیگنال نیرو (o-) برای نیروی ۰/۲ نیوتن..... ۱۲۰
شکل ۵-۳۹ دامنه هارمونیک اصلی (•-) و دامنه سیگنال نیرو (o-) برای نیروی ۱ نیوتن..... ۱۲۰
شکل ۵-۴۰ دامنه هارمونیک اصلی (•-) و دامنه سیگنال نیرو (o-) برای نیروی ۱/۵ نیوتن..... ۱۲۱
شکل ۵-۴۱ توابع پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده (-+-) ، بازسازی شده (o) و خطی (_)..... ۱۲۳

فهرست جداول

جدول ۲-۱ اندیسهای خطا برای نمونه داده کامل تجربی ۲۹
جدول ۲-۲ اندیسهای خطا برای نمونه داده ناکامل تجربی ۳۰
جدول ۲-۳ اندیسهای خطا برای نمونه ناکامل با ۲٪ نویز ۳۳
جدول ۳-۱ ضرایب غیرخطی نمونه های عددی ۱و۲ ۴۵
جدول ۴-۱ نیروهای بازگشتی غیرخطی و توابع توصیفی برای غیرخطی های مختلف[۱, ۲, ۴, ۵, ۸, ۱۲-۱۴, ۲۳, ۷۱] ۵۹
جدول ۴-۲ پارامترهای شبیه سازی برای الگوریتم ژنتیک ۶۳
جدول ۴-۳ ضرایب پارامترهای غیرخطی ۶۵
جدول ۴-۴ نتایج برای فرایند شناسایی نمونه عددی ۱ ۶۷
جدول ۴-۵ نتایج فرایند شناسایی برای نمونه عددی ۲ ۷۱
جدول ۴-۶ نتایج فرایند شناسایی برای نمونه عددی۳ ۷۳
جدول ۵-۱ پارامترهای شبیه سازی برای الگوریتم ژنتیک ۱۱۵
جدول ۵-۲ مقادیر پارامترهای غیرخطی شناسایی شده ۱۱۵
جدول ۵-۳ مقادیر پارامترهای غیرخطی شناسایی شده ۱۲۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

یکی از روشهای معمول مطالعه و پیش بینی رفتار سازه های واقعی در علوم مهندسی، مدلسازی است. در گذشته پیش از ساخت قطعات و سازه ها از مدلهای فیزیکی و مدلهای مقیاس کوچک جهت پیش بینی رفتار سازه استفاده می شده است. مدل یک مفهوم کلی است و به نمونه فیزیکی یا انتزاعی از شیئی که انجام تحلیل مستقیم بر روی خود آن سخت بوده و از نظر رفتار دینامیکی با آن شیء مشابهت داشته و به جای آن مورد آنالیز قرار می گیرد، اطلاق می گردد.

امروزه در کاربردهای مهندسی علاوه بر مدلهای فیزیکی[۱] از مدلهای انتزاعی[۲] نیز استفاده می شود، که به فرم مجموعه ای از متغیرها و روابط منطقی بین آنها بیان می گردند. از آنجا که این روابط معمولا به فرمهای ریاضی بیان می گردند، این مدلها به مدلهای ریاضی مشهورند. همچنین از مدلهای ریاضی به طور گسترده در مدلسازی دینامیکی سازه ها استفاده می گردد. این مدلها معمولا در مرحله طراحی محصول به کار برده می شوند تا امکان بررسی اصلاحات پیاپی به منظور بهبود عملکرد سازه فراهم گردد. در گذشته این اصلاحات به صورت فیزیکی و بر پایه تجربه و یا سعی و خطا بر روی محصول انجام می شد و پیش از ساخت محصول نهایی، نمونه های متعددی از آن ساخته و تست می شد که زمان بر و از نظر اقتصادی هزینه بر بود. این مساله سبب توسعه روشهای مدلسازی سازه در مهندسی گردید. با پیشرفت تکنولوژی همه روزه تقاضا برای مدلهای دقیق تر و با کیفیت تر به سرعت در حال افزایش است. زیرا اولا، سیکل طراحی و توسعه محصولات به دلیل رشد رقابت در صنعت، در حال کوتاهتر شدن است که این امر با کاهش زمان تست و شبیه سازی میسر می گردد. ثانیاً با پیچیده تر شدن محصولات انجام تست های فیزیکی در مقایسه با انجام شبیه سازی بر روی مدلهای تحلیلی خیلی گران تمام می شود. ثالثاً، با توسعه سریع تکنولوژی محاسباتی امکان شبیه سازی دقیق تر فراهم می گردد.

مدلهای دینامیکی سازه ای به سه دسته کلی، مدلهای فضایی[۳]، مدلهای مودال[۴] و مدلهای پاسخ[۵] دسته بندی می شوند. مدل فضایی، مدلی تئوری است که در آن معادلات دیفرانسیل حرکت از روشهای مختلفی بدست می آیند. یکی از محبوب ترین و رایج ترین این روشها، روش اجزای محدود[۶] (FEM) است. اگرچه یک سازه پیچیده از طریق روش FEM قابل مدلسازی است، این مدلسازی بر پایه فرضیات ساده کننده ای است که سبب بروز خطا و ایجاد مدل تخمینی از سازه واقعی می گردد.

[1] Physical models
[2] Abstract models
[3] Spatial models
[4] Modal models
[5] Response models
[6] Finite element method (FEM)

مدل مودال نیز مدلی تئوری است که از استخراج خصوصیات دینامیکی نظیر فرکانسهای طبیعی[1]، شکل مودها[2] و نسبت های دمپینگ[3] از توابع پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده تحلیلی یا تجربی حاصل می گردد. اگرچه مدل مودال در مقایسه با مدل فضایی به سازه واقعی نزدیک تر است، در این مدل نیز در صورت مقایسه نتایج ارتعاشی حاصل از مدلهای تحلیلی و فیزیکی اختلافاتی مشاهده می شود. این امر بدلیل آن است که مدل ریاضی حاصل از اندازه گیری های غیردقیق، ناکامل و همراه نویز است.

مدل پاسخ، مدلی تحلیلی و یا تجربی است که به صورت نسبت پاسخ سازه به نیروی سینوسی توصیف می شود. این مدل معمولاً بیانی دقیق تر و اطمینان بخش تر از مدل فیزیکی، به نسبت سایر مدلها ارائه می دهد. زیرا که هیچ تخمینی به دلیل ساده سازی و ایده آل سازی و ناکاملی اندازه گیری ها دربر ندارد. با این وجود، همچنان دربردارنده مشکل نویز و خطای سیستماتیک آزمایش است. در اغلب روشهای تحلیلی موجود استخراج مدلهای فضایی، مودال و پاسخ سازه ها بر پایه این فرضند که سازه تحت تحلیل، خطی است و مدلهای حاصل برای بررسی پاسخ دینامیکی سازه های خطی استفاده می شوند. دقت پاسخ دینامیکی در هنگام استفاده از مدل فضایی به شدت به ساده سازی سیستم و نوع المان بندی آن وابسته است. در حالی که مدل مودال به کامل بودن اطلاعات مودال سازه وابسته است. علیرغم این حقیقت که مدلهای ریاضی هرگز توانایی توصیف کامل سازه های واقعی را به دلیل ساده سازی های مدل در فرایند جزء بندی[4] و عدم دقت در پارامترها ندارند، می توانند از طریق برقراری ارتباط بین داده های تجربی و تحلیلی طی فرایندی به نام بروز رسانی مدل[5] بهبود یابند تا بیان بهتری از سازه تحت بررسی ارائه کنند. با این وجود گاهی اوقات در صورت حضور عوامل غیرخطی، اگر این عوامل در مدل لحاظ نگردند، بهبود مدلهای ریاضی امکان پذیر نخواهد بود. تنها راهکار برای بهبود مدل این سازه ها ارائه مدلهای غیرخطی است. اگرچه منابع متعددی از رفتار غیرخطی وجود دارد، اغلب سازه های مکانیکی واقعی درجه خاصی از رفتار غیرخطی را به شکل محلی یا کلی ارائه می دهند. غیرخطی کلی[6] در سختی سازه های با دامنه ارتعاش بزرگ و یا خصوصیت غیرخطی مواد یافت می شود. از طرف دیگر، به دلیل طبیعت برخی سازه ها که از مونتاژ قطعات دیگر ساخته شده اند، عناصر غیرخطی محلی[7] در سختی اتصالات، لقی ها و دمپینگ های غیرخطی دیده می شود. اگر عناصر غیرخطی به صورت محلی قابل شناسایی باشد، می توان با تعریف مدل مناسب جداگانه ای برای عناصر غیرخطی و سازه خطی و سپس ارائه مدلی ترکیبی برای کل سازه، تعریفی بهتر برای مدل سازه یافت.

[1] Natural frequencies
[2] Mode shapes
[3] Damping ratio
[4] Discretization
[5] Model updating
[6] Global nonlinearity
[7] Local nonlinearity

این رساله بیشتر بر توسعه مدلی ریاضی از سازه با عناصر غیرخطی محلی تمرکز دارد. با توجه به خصوصیات مدلهای مذکور، روشی ارائه شده که مدل پاسخ زیر سیستم خطی و مدل فضایی عناصر غیرخطی محلی را بدست آورد و با ترکیب آنها مدل کلی سازه را تولید کند.

۱-۲ آنالیز مودال غیرخطی

آنالیز مودال به عنوان یک روش مهندسی در طول ۶۰ سال گذشته رشد قابل توجهی داشته است. این روند با پیشرفت های سخت افزاری، نرم افزاری و محاسباتی شتاب بیشتری گرفته است و هم اکنون این روش در کنار روشهایی مانند روش اجزای محدود به ابزاری استاندارد در تحلیل های دینامیکی تبدیل گشته است. این روشها حتی در مواردی که سازه درجات پایینی از رفتار غیرخطی را شامل باشد نیز به عنوان مسیری قابل اعتماد برای تحلیل مطرحند. متاسفانه در شرایطی که دقت پیش بینی پاسخ از اهمیت بالایی برخوردار باشد و یا اثرات غیرخطی مهم و بارزند، آنالیزهای خطی به طور کلی غیرقابل اعتمادند. به همین دلیل ارائه و یا انتخاب روشهایی که توانایی استخراج نتایج دقیق تر و قابل اعتمادتری را در این شرایط داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. همانطور که Worden و Tomilson [۱] اشاره کرده اند، در چند دهه آینده شاهد انفجاری از ارائه روشهایی خواهیم بود که با مسائل غیرخطی سروکار دارند و نهایتاً جعبه ابزاری از تکنیک های قدرتمند که توانایی استفاده در شرایط و موارد خاص را دارند، خواهیم داشت. این تکنیکها به همین دلیل شدیداً حساس به موردند[1]. تنوع منابع رفتارهای غیرخطی در سازه های مهندسی باعث می شود که به حساب آوردن همه آنها در عمل غیر ممکن باشد و مهندسین در حد توان سعی کنند که در مواجهه با این موارد، از آنها صرف نظر کنند. این رفتارها تا حدی به دلیل فقدان تئوری واحد برای استفاده در تمامی نمونه های غیرخطی است که توانایی برقراری ارتباط با روشهای خطی استاندارد را دارا باشند. به دلایل متعددی ارائه یک روش آنالیز مودال غیرخطی کلی سخت است. اولاً عناصر غیرخطی محلی می توانند تاثیر کلی بارزی بر سازه داشته و در عین حال بر برخی از بخشهای سازه بی تاثیر باشند. ثانیاً اثرات غیرخطی معمولاً تنها به چندین مود و مختصات محدود می شود و مابقی مودها و مختصات به صورت خطی رفتار می کنند. ثالثاً، به دلیل وابستگی رفتار غیرخطی سازه به دامنه نوسانات راهی ساده برای بیان پاسخ غیرخطی به صورت یک تابع جبری کلی با فرم بسته وجود ندارد.

[1] Case sensitive

با وجود تلاشهای زیادی که تاکنون برای ارائه یک متدولوژی آنالیز مودال غیرخطی استاندارد، با وارد کردن پارامترهای غیرخطی و ترکیب آنها با روشهای خطی صورت گرفته است، هنوز یک تئوری عمومی غیرخطی با خصوصیات فوق الذکر ارائه نشده است.

تابع پاسخ فرکانسی[1] FRF بهترین ابزار در آنالیز مودال به منظور توصیف رابطه ورودی – خروجی در یک سیستم است. گرچه کاربردهای این تابع فراتر از زمینه های ارتعاشاتی است، در مهندسی از آن به عنوان اولین مرحله برای ارزیابی خصوصیات دینامیکی یک سازه استفاده می شود. برای مثال، رزونانس ها و آنتی رزونانس ها –که نشان دهنده نقاط فرکانسی هستند که در آنها ماکزیمم دامنه ارتعاش و مینیمم آن اتفاق می افتد- میزان استهلاک – که مکانیزمی برای جذب انرژی است – و اختلاف فاز پاسخ به نسبت نیروی ورودی به صورت بصری از این توابع قابل استخراجند. علاوه بر این با اندازه گیری پاسخ ها در نقاط مختلف سازه، نحوه حرکت سازه در هر فرکانس طبیعی قابل نمایش و قابل مقایسه با شکل مودهای تحلیلی خواهد بود.

خصوصیت کلیدی FRF که آن را برای آنالیزهای خطی سیستم ها جذاب می کند، تغییر ناپذیری آن نسبت به تحریک ورودی به دلیل فرض خطی است. این حقیقت سبب می گردد که امکان استفاده از تحریک های متنوعی همانند سینوسی پله ای، رندوم، ضربه و غیره فراهم گشته و در نهایت FRF مشابهی بدست آید. خصوصیت دیگر تعامد شکل مودهاست که امکان تجزیه به پاسخ های مودال را فراهم می آورد. این امر استفاده از برهم نهی مودال را امکان پذیر می کند. اصلی ترین مشکل بر سر راه بسط مفهوم FRF برای توصیف سیستم های غیرخطی آن است که ضرایب مدل ریاضی یک FRF خطی (فرکانسهای طبیعی، فاکتورهای دمپینگ و شکل مودها) ثابت هستند. حال آنکه در حالت غیرخطی این ضرایب وابسته به دامنه نوسان خواهند بود. همچنین دیگر فرض تعامد مودهای غیرخطی بر قرار نیست. در نتیجه حضور عوامل غیرخطی، FRF در مقایسه با نمونه خطی آن دچار انحراف می گردد.

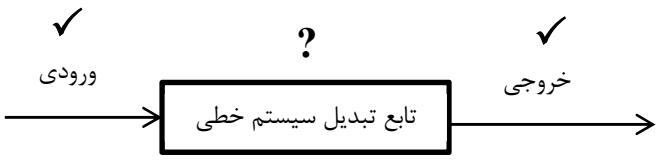
به منظور توسعه یک روش آنالیز مودال غیرخطی، یک بیان ساده و کلی از FRF غیرخطی لازم است. این بیان نیازمند دربر گرفتن ترکیبی از ضرایب خطی و غیرخطی است. برای این منظور روش توابع توصیفی[2](DFM) نتایج خوبی برای حصول ضرایب وابسته به دامنه از المانهای غیرخطی با متوسط گیری از نیروهای غیرخطی در یک سیکل ارائه می کند. با وارد کردن این ضرایب و بکارگیری آنها در یک فرمولاسیون کلی می توان به یک بسط غیرخطی از تعریف FRF دست یافت.

روش ارائه شده در این رساله از مزایای DFM مرتبه اول برای فرمولاسیون FRF غیرخطی بهره می برد.

[1] Frequency response function (FRF)
[2] Describing function method

۱-۳ شناسایی سیستمهای غیرخطی

هر سیستمی از طریق متغیرهای حالت ورودی، خروجی و تابع تبدیل به طور کامل قابل توصیف است. در واقع این مجموعه متغیرهای حالت بیش معین[1] بوده و با اطلاع از دو متغیر، امکان محاسبه دیگری وجود خواهد داشت. این ایده اولیه نقطه آغازین اکثر مسائل شناسایی[2] است. در یک سیستم خطی خروجی با اطلاع از خصوصیات سیستم (تابع تبدیل) و تحریک ورودی قابل تشخیص است. در شناسایی سیستم های خطی، به دنبال تعیین تابع تبدیل و کشف و شناسایی مجموعه ای از ضرایب خطی –که به بهترین نحو، به توصیف تابع تبدیل سیستم بپردازد – هستیم (شکل ۱-۱). این امر با اندازه گیری متغیرهای حالت ورودی و خروجی در حالات مختلف و مشاهده رفتار تابع تبدیل برحسب این حالات امکان پذیر می باشد.



شکل ۱-۱ دیاگرام کلی روش های شناسایی خطی

مشکل از آنجا آغاز می شود که رفتار سیستم وابسته به دامنه باشد. این شرایط در اکثر سازه های مهندسی در بردارنده عوامل غیرخطی بروز می کند. پیچیدگی ایجاد شده را می توان به صورت یک فرم حلقه بسته با پسخورد خروجی سیستم بیان کرد که سبب ایجاد آثار غیرخطی در پاسخ می گردد (شکل ۱-۲). شناسایی این نوع سیستم ها موضوع اصلی این رساله است. هدف در این رساله به طور خاص، شناسایی عناصر غیرخطی تابع تبدیل سیستم با دانستن ورودی و خروجی و همچنین تابع تبدیل زیر سیستم خطی است. بطور کلی در آنالیز مودال غیرخطی، مساله شناسایی به این صورت بیان می گردد که با داشتن اطلاعات اولیه از سیستم (بیان خطی سیستم) و نحوه رفتار آن تحت تحریک شناخته شده (پاسخهای اندازه گیری شده)، تابع تبدیل و همچنین المانهای غیرخطی درون سیستم که سبب رفتار غیرخطی سیستم می شوند، محاسبه می شوند (شکل ۱-۲).

[1] Over determinined
[2] Identification problem