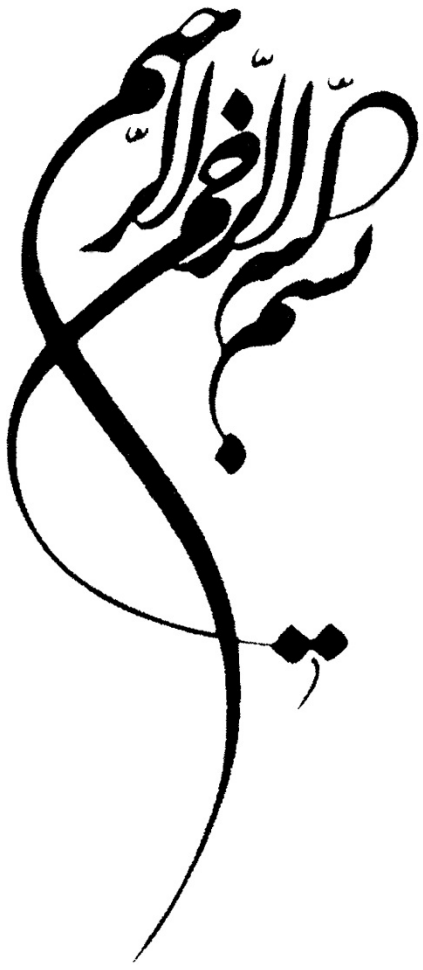
بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان :

میزان سازی دقیق شکل مودها در آنالیز مودال محیطی

توسط:

سید مازیار مرعشی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر محمد رضا آشوری

شهریورماه ۱۳۹۱

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر محمدرضا آشوری، که با هدایت و راهنمایی ارزنده ایشان، این پروژه به اتمام رسیده است، صمیمانه تشکر می نمایم. همچنین از دوست خوبم جناب آقای مهندس محمدمهدی خطیبی که همواره مشکل گشای بنده بوده کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از دوستان عزیزم جناب آقای مهندس مسعود معصومی و جناب آقای مهندس هیربد نیستانی که در مسیر این پروژه یار و همراه من بوده اند نیز قدردانی می گردد.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید،

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند،

این مجموعه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می کنم.

فهرست

مقدمه ۱

۱- مروری بر آنالیز مودال کلاسیک و آنالیز مودال محیطی [14,15] ۵

۱-۱- مقدمه ۵

۱-۲- مروری بر آنالیز مودال ۶

۱-۳- آنالیز مودال چیست؟ ۷

۱-۴- تست مودال چیست؟ ۹

۱-۵- کاربردهای آنالیز مودال ۱۳

۱-۶- کاربردهای عملی آنالیز مودال ۱۴

۱-۷- معرفی آنالیز مودال محیطی ۱۶

۱-۸- محدودیت های آنالیز مودال سنتی (EMA) ۱۷

۱-۹- تاریخچه OMA ۱۹

۱-۱۰- مزیت های OMA ۲۱

۱-۱۱- مروری بر روش های مهم OMA ۲۳

۲- مروری بر میزان سازی ۲۶

۲-۱- مقدمه ۲۶

۲-۲- روش ارائه شده توسط پارلو و همکارانش (Parloo et al.) ۲۸

۲-۳- روش ارائه شده توسط برینکر و اندرسن (Brincker & Andersen) ۳۳

۲-۴- روش ارائه شده توسط برنال(Bernal) ۳۵
۲-۴-۱- روابط تئوری حاکم ۳۵
۲-۴-۲- فرمولاسیون تصویرسازی ۳۷
۲-۵- روش ارائه شده توسط خطیبی و همکارانش(Khatibi et al.) ۳۹
۲-۶- روش ارائه شده توسط فرناندز و همکارانش(Fernandez et al.) ۴۰
۲-۷- فرمولهای دقیقتر ۴۴
۲-۸- روش ارائه شده توسط آئله و همکارانش(Aenlle et al.) ۴۵
۲-۸-۱- عدم قطعیت ۴۵
۲-۸-۲- استراتژی تغییر جرم ۴۸
۲-۸-۳- اندازه تغییر جرم ۴۹
۲-۸-۴- تعداد جرم ۵۰
۲-۸-۵- مکان جرمها ۵۱
۲-۹- روش ارائه شده توسط آئله و همکارانش(Aenlle et al.) ۵۲
۲-۹-۱- روند تصویرسازی توسعه یافته ۵۴
۲-۱۰- بدست آوردن روابط قبلی با استفاده از معادله (۲-۸۷) ۵۶
۳- میزان سازی دقیق شکل مودها ۵۸
۳-۱- مقدمه ۵۸
۳-۲- جرم بهینه ۵۹
۴- شبیه سازی ۶۷

۴-۱- مقدمه ۶۷
۴-۲- مدل المان محدود تیر ۶۸
۴-۳- آنالیز مودال محیطی ۷۴
۴-۴- میزان سازی جرمی ۷۸
۴-۵- جرم بهینه ۸۱
۴-۶- میزان سازی با استفاده از جرم بهینه ۸۴
۵- تست مودال کلاسیک و تست ارتعاش محیطی ۸۸
۵-۱- مقدمه ۸۸
۵-۲- طراحی تست ۸۹
۵-۳- تست مودال کلاسیک ۹۱
۵-۴- تست ارتعاش محیطی ۹۴
۵-۵- تغییر جرم سازه و تکرارتست ارتعاش محیطی ۹۹
۵-۵-۱- تغییر جرم دلخواه و تکرارتست ارتعاش محیطی ۹۹
۵-۵-۲- تغییر جرم بهینه و تکرارتست ارتعاش محیطی ۱۰۳
۶- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۸
۶-۱- نتیجه گیری ۱۰۸
۶-۲- پیشنهادات ۱۱۰
مراجع ۱۱۱

فهرست اشکال

شکل(۱-۱): مسیر تئوری آنالیز ارتعاشات..... ۸

شکل(۱-۲): مسیر عملی آنالیز ارتعاشات..... ۹

شکل(۱-۳): چگونگی انجام تست مودال ۱۰

شکل(۱-۴): مجموعه اندازه گیری با تحریک لرزشگر..... ۱۱

شکل(۱-۵): مجموعه اندازه گیری با تحریک چکش..... ۱۱

شکل(۱-۶): مثال هایی از انجام تست مودال. (a) تست ارتعاشات هواپیما توسط لرزشگر (b) تست ارتعاشات یک قاب چندتکه توسط لرزشگر (c) تست یک قاب توسط چکش (d) تست یک قطعه فلزی توسط لیزر..... ۱۵

شکل(۱-۷): مثال هایی از سازه های محیطی برای OMA:سازه های مهندسی عمران مانند (a) پل ها (b) ساختمان ها (c) سکوهای دریایی. سازه های مهندسی مکانیک مانند (d) هواپیماها (e) وسایل نقلیه (f) ماشین آلات کشاورزی..... ۲۰

شکل(۲-۱): دیاگرام کلی روش تغییر جرم ۳۳

شکل(۲-۲): دیاگرام روش تغییر جرم به صورت منفرد[24]..... ۴۱

شکل(۲-۳): دیاگرام روش تغییر جرم مستقیم با اعمال سه جرم بطور همزمان[24]..... ۴۱

شکل(۲-۴): دیاگرام روش تغییر جرم متوالی با اعمال سه جرم[24]..... ۴۲

شکل(۲-۵): تاثیر نسبت فرکانسی در عدم قطعیت ضریب میزان سازی[25]..... ۴۷

شکل(۲-۶): سهم جرم واحد در تغییر فرکانس[25]..... ۵۲

شکل (۴-۱): درجات آزادی المان تیر[30] ۶۹

شکل(۴-۲): المانی از تیر که به منظور استخراج روابط مورد بررسی قرار می گیرد[30]..... ۶۹

شکل(۴-۳): ابعاد تیر مدل شده برای شبیه سازی ۷۱
شکل(۴-۴): نمای شماتیک تیر یک سرگیردار ۷۲
شکل(۴-۵): توابع پاسخ فرکانسی – حل اجزاء محدود ۷۳
شکل(۴-۶): پنج شکل مود اول تیر یک سر درگیر – حل اجزاء محدود ۷۴
شکل(۴-۷): نمودار مقادیر تکین طیف پاسخ تیر به تحریک اتفاقی ۷۵
شکل(۴-۸): مقایسه شکل مودهای نامیزان محاسبه شده به روش تجزیه فرانسی با حل اجزاء محدود(خط چین: شکل مود تجزیه فرکانسی و خط پیوسته: شکل مود دقیق) ۷۶
شکل(۴-۹): نمودار MAC سه بعدی بین شکل مودهای نامیزان و حل اجزاء محدود ۷۷
شکل(۴-۱۰): نمای شماتیک تیر یک سرگیردار و جرم های اضافه شده ۷۸
شکل(۴-۱۱): تغییر فرکانس برای جرم های متفاوت (به ترتیب از چپ به راست:مود اول تا مود پنجم) ۷۹
شکل(۴-۱۲): خطای میزان سازی- به ترتیب از چپ به راست: Bernal,BA,E-BA,Parloo ۸۰
شکل(۴-۱۳): نمودار خطای میزان سازی بر حسب مقدار تغییر جرم در حوالی اکسترمم نسبی ۸۱
شکل(۴-۱۴): نمودار مشتق دوم خطای میزان سازی بر حسب مقدار تغییر جرم ۸۲
شکل(۴-۱۵): نمودار مشتق اول خطای میزان سازی برای نقاط شکستگی ۸۲
شکل(۴-۱۶): نمودار خطای میزان سازی برای نقاط شکستگی ۸۳
شکل(۴-۱۷): تغییر فرکانس برای جرم بهینه ۸۵
شکل(۴-۱۸): نمودار شکل مود دقیق و نامیزان برای تغییر جرم بهینه (خط پر: دقیق ، خط چین: نامیزان) ۸۵
شکل(۴-۱۹): نمودار MAC سه بعدی بین حل اجزاء محدود و شکل مودهای نامیزان برای تغییر جرم بهینه ۸۶

شکل(۴-۲۰): نمودار مقایسه شکل مودهای نامیزان، میزان شده ودقیق (خط چین: شکل مود نامیزان، خط پر: شکل مود دقیق، خط مربع: شکل مود میزان شده)..... ۸۷
شکل(۵-۱): انتخاب بهترین نقطه برای قرار دادن شتاب سنج..... ۸۹
شکل(۵-۲): انتخاب بهترین نقطه برای تحریک با چکش..... ۹۰
شکل(۵-۳): تیر تحت تست مودال کلاسیک..... ۹۱
شکل(۵-۴): نمودارهای توابع پاسخ فرکانسی حاصل از تست مودال کلاسیک..... ۹۲
شکل(۵-۵): نمودارهای توابع ارتباط حاصل از تست مودال کلاسیک..... ۹۳
شکل(۵-۶): تحلیل نتایج حاصل از تست مودال کلاسیک در نرم افزار ICATS..... ۹۳
شکل(۵-۷): تیر تحت تست ارتعاش محیطی..... ۹۴
شکل(۵-۸): نمونه ای از سیگنال شتاب اندازه گیری شده..... ۹۵
شکل(۵-۹): نمودار مقادیر تکین محاسبه شده حاصل از تست ارتعاش محیطی..... ۹۶
شکل(۵-۱۰): مقایسه فرکانس های طبیعی تست مودال و تست ارتعاش محیطی..... ۹۶
شکل(۵-۱۱): مقایسه شکل مودهای تست مودال و تست ارتعاش محیطی(خط پر: تست مودال، خط چین: تست ارتعاش محیطی)..... ۹۷
شکل(۵-۱۲): نمودار MAC سه بعدی بین شکل مودهای تست ارتعاش محیطی و تست مودال کلاسیک..... ۹۸
شکل(۵-۱۳): درصد تغییر فرکانس طبیعی در اثر تغییر جرم دلخواه..... ۹۹
شکل(۵-۱۴): مقایسه شکل مودهای پس از تغییر جرم دلخواه با شکل مودهای قبل از جرم گذاری(خط پر: تست ارتعاش محیطی قبل از جرم گذاری، خط چین: تست ارتعاش محیطی پس از تغییر جرم دلخواه)..... ۱۰۰
شکل(۵-۱۵): مقایسه شکل مودهای میزان شده برای جرم دلخواه و تست مودال کلاسیک(خط

پر:تست مودال کلاسیک، خط چین: میزان شده) ۱۰۱
شکل(۵-۱۶): خطای حاصل در فرآیند میزان سازی شکل مودها توسط جرم دلخواه ۱۰۲
شکل(۵-۱۷): تیر تحت تست به همراه جرم های نصب شده بر روی آن ۱۰۳
شکل(۵-۱۸): درصد تغییر فرکانس طبیعی در اثر تغییر جرم بهینه ۱۰۴
شکل(۵-۱۹): مقایسه شکل مودها پس از تغییر جرم بهینه و قبل از جرم گذاری (خط پر: تست ارتعاش محیطی قبل از جرم گذاری، خط چین: تست ارتعاش محیطی پس از تغییر جرم بهینه) ۱۰۴
شکل(۵-۲۰): نمودار MAC سه بعدی بین شکل مودهای تست ارتعاش محیطی با جرم بهینه و تست مودال کلاسیک ۱۰۵
شکل(۵-۲۱): مقایسه شکل مودهای میزان شده برای تغییر جرم بهینه و تست مودال کلاسیک(خط پر:تست مودال کلاسیک، خط چین: میزان شده) ۱۰۶
شکل(۵-۲۲): خطای حاصل در فرآیند میزان سازی شکل مودها توسط جرم بهینه ۱۰۷

فهرست جداول

جدول ۴-۱: پنج فرکانس طبیعی اول تیر یک سر درگیر– حل اجزاء محدود..... ۷۳

جدول ۴-۲: مقایسه فرکانس بدست آمده از تجزیه فرکانسی و اجزاء محدود..... ۷۶

جدول ۴-۳: مقدار جرم های اضافه شده در نقاط مختلف تیر بر حسب درصد..... ۷۹

جدول ۴-۴: خطای میزان سازی برای نقاط شکستگی ۸۳

جدول ۴-۵: مقدار جرم های اضافه شده و خطای میزان سازی مربوط به هر کدام ۸۴

فهرست علائم

شکل مودi از درجه آزادی j	ϕ_{ji}
تغییر جرم درجه آزادی k	m_k
ضریب میزان‌سازی مودال	b_i
قطب مود iام	λ_i
تعداد شکل مود	Nm
فرکانس طبیعی مود i	ω_i
ضریب میزان‌سازی محیطی برای مود i	α_i
تغییر فرکانس iام	$\Delta\omega_i$
خطای نسبی ε در اندازه گیری انتقال فرکانس	ε
ماتریس جرم سازه	$[M]$
ماتریس جرم اضافه شده بر سازه	$[\Delta M]$
شکل مود قبل از تغییر جرم	ϕ_0
شکل مودسازه تغییر جرم یافته(اصلاحی)	ϕ_I
ترانهاده بردار شکل مود	$\{\phi\}^T$
شکل مود نامیزان	ψ
شکل مود میزان شده	ϕ
ماتریس قطری شامل تمام ثوابت میزان‌سازی	$\bar{\alpha}$

پارامتر میزان سازی	β
فضای پوچ ستونی	$\mathrm{N}(.)$
ماتریس سختی سازه	$[K]$
ماتریس سختی اضافه شده بر سازه	$[\Delta K]$
نسبت فرکانسی	η
بردار نیروی وارد به سازه در حوزه زمان	$\{p(t)\}$
ماتریس واحد	$[I]$
بردار جابجایی سازه	$\{u\}$
بردار سرعت سازه	$\{\dot{u}\}$
بردار شتاب سازه	$\{\ddot{u}\}$
سختی	K
جرم	m
ماتریس دمپینگ سازه	$[C]$
دمپینگ	C
فرکانس طبیعی قبل از تغییر جرم سازه	ω_0
فرکانس طبیعی بعد از تغییر جرم سازه	ω_I
بردار شکل مود میزان	$\{\phi\}$
بردار شکل مود نامیزان نرمال شده نسبت به طول	$\{\psi_L\}$

ضریب میزان سازی برای شکل مودهای نرمال شده نسبت به طول	α_L
بردار شکل مود میزان شده قبل از تغییر جرم سازه	$\{\phi_0\}$
بردار شکل مود نامیزان قبل از تغییر جرم سازه	$\{\psi_0\}$
بردار شکل مود میزان شده بعد از تغییر جرم سازه	$\{\phi_I\}$
بردار شکل مود نامیزان بعد از تغییر جرم سازه	$\{\psi_I\}$
ضریب ماتریس جرم در دمپینگ متناسب	A
ضریب ماتریس سختی در دمپینگ متناسب	B

چکیده

یکی از ضروریات مهم طراحی سازه‌ها شناسایی پارامترهای دینامیکی آن‌ها می‌باشد.در سازه‌های بـزرگ نظیر پل‌ها، ساختمان‌ها، برج‌ها، هواپیماها و غیره اندازه‌گیری نیروهای وارد از محیط به سازه مشکل یـا غیر ممکن می‌باشد.در چنین سازه‌هایی فقط می‌توان پاسخ را اندازه‌گیری نمود. روش‌هایی که بر مبنای پاسخ، پارامترهای مودال[1] سازه را تخمین می‌کنند آنالیز مودال محیطی[2] نامیده می‌شوند. از آنجا که در این روش‌ها نیروی ورودی به سازه اندازه‌گیری نمی‌شود، شکل مودهای حاصـل از آنـالیز نـامیزان مـی-باشند که نامیزانی شکل مودها یکی از مشکلات اساسی آنالیز مودال محیطی اسـت.تـاکنون روش‌هـای متعددی برای میزان‌سازی شکل مودها[3] ارائه شده است.در این پایان‌نامه با استفاده از آنالیز حساسـیت، مقدار جرم بهینه[4] برای یکی از دقیق‌ترین روابط میزان‌سازی بدست آمـده اسـت. ایـن روابـط نیازمنـد شناخت مدل المان محدود سازه است. بدین منظور از مدل المان محدود تیر یـک سـرگیردار اسـتفاده شده است. تیر با موج راندوم تحریک و پاسخ اندازه‌گیری شده سـپس روش تجزیـه فرکانسـی اعمـال و شکل مودهای نامیزان بدست آمدند. صحت رابطه بدست‌آمده به صورت عددی بررسی که مقدار تغییـر جرم بهینه، خطای میزان‌سازی شکل مودها را مینیمم نمـوده اسـت. همچنـین ایـن روش بـه صـورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های عددی و تجربی، کارایی مناسب رابطه ارائه شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

آنالیز مودال محیطی، شکل مود، میزان سازی، تغییر جرم بهینه

[1] Modal parameters
[2] Operational modal analysis
[3] Scaling of mode shapes
[4] Optimum masschange

مقدمه

طراحی دقیق و تعمیر و نگهداری سازه های گوناگون از قبیل ساختمان ها، پل ها، سدها، هواپیما ها، قطار ها و غیره لازم و ضروری می باشد. یکی از ابزارهای طراحی و تعمیر و نگهداری سازه ها، تحلیل دینامیکی می باشد. به جهت در دسترس نبودن جواب تحلیلی برای سازه های پیچیده، با بارگذاری ها و شرایط مرزی مختلف و نیز وجود خطاهایی نظیر خطاهای حاصل از بکارگیری فرضیات و تئوری های نامناسب، خطا در مدل کردن جزئیات سازه های پیچیده وعدم اطلاع صحیح از خواص مواد،مدلهای تقریبی عددی نظیر روش اجزاء محدود[1]،نیز با مشکلاتی مواجه خواهند بود. از این رو تست مودال، ابزار مناسبی برای دستیابی به خواص

[1]Finite Element Method (FEM)

دینامیکی سازه، شناخته می شود.در سازه های بزرگ و پیچیده، تست مودال کلاسیک با دو مشکل اساسی مواجه است:

۱.دشوار بودن تحریک سازه های بزرگ، مثلا درسازه هایی مانند پل ها و ساختمانها.

۲. وجود نویز زیاد در محیط اندازه گیری.

وقتی سازه های بزرگ به منظور اجرای تست مودال تحریک می شوند، باید سطح تحریک در حدی باشد که تعادل مجموعه را در همه نقاط بر هم زند. بنابراین برای تحریک کل سازه، مقدار نیروی زیادی مورد نیاز است.از طرف دیگر، سطح تحریک اعمالی نمیتواند، خیلی زیاد باشد، زیرا موجب آسیب محلی سازه و بروز رفتار غیر خطی در سازه میگردد. همچنین در محیطی که سازه قرار دارد اغتشاشاتی مانند باد، آلودگی صوتی، تردد خودرو و غیره وجود دارد که باعث ایجاد نویز می شود و فرآیند اندازه گیری و تست را دشوار می کند. بنابراین محققان در چند دهه اخیر روش هایی ارائه کرده اند که در آنها از تحریک سازه به کمک اغتشاشات محیطی استفاده شده که صرفا با اندازه گیری پاسخ سازه، خصوصیات دینامیکی آن بدست می آید. این روش ها با عناوین مختلف: آنالیز ارتعاشات محیطی، آنالیز مودال در حین کار[1] یا آنالیز مودال بر مبنای پاسخ[2]، شناخته می شوند[1].اولین موارد کاربرد این روشها، در زمینه بررسی ارتعاشات پل معلق[2] و ارتعاشات سازه ها [3] صورت گرفته است که نتایج مطلوبی به دنبال نداشته است[4]. با پیشرفت کامپیوترها و روش های محاسباتی در دهه ی اخیر، فعالیت گسترده تری صورت گرفته و روش های مختلفی در این زمینه ارائه شده است. همچنین آزمایش های متعددی بر روی ساختمان ها[5]، پل ها[6]، قطارها[7] و غیره صورت گرفته است.

[1]Operational Modal Analysis (OMA)
[2]Output OnlyModal Analysis (OOMA)

در نتیجه اجرای این روش ها، پارامترهای مودال سازه شامل فرکانس های طبیعی، ضرایب دمپینگ و شکل مودهای نامیزان[1] بدست خواهند آمد. یکی از مشکلات روش های آنالیز ارتعاش محیطی، عدم دستیابی به شکل مودهای میزان شده است که موجب محدودیت کاربرد نتایج حاصل، در مسائل کاربردی نظیر بررسی وضعیت سازه[2]، پیش بینی پاسخ[3] ، اصلاح سازه[4] و بهبود مدل[5] شده است. این روش ها نیازمند شکل مود های میزان شده می باشند. تاکنون چندین روش برای میزان سازی شکل مودها ارائه شده است. برخی از این روش ها از روش اجزاء محدود[8] استفاده کرده اند و یا فرضیات محدود کننده ای برای تحریک قائل شده اند[9]. همچنین روش های دیگری نیز به کمک انجام تست ارتعاش اجباری بر روی برخی نقاط سازه، ارائه شده است[10]. ولی در تمامی این روش ها از داده ها و اطلاعاتی علاوه بر نتایج تست استفاده شده است. روش های دیگری نیز وجود دارند که صرفا با استفاده از نتایج تست، به میزان سازی شکل مودها پرداخته اند[11,12,13].

در این تحقیق میزان سازی شکل مودهای حاصل از آنالیز ارتعاشات محیطی با استفاده از تغییر جرم مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از آنالیز حساسیت تغییر جرم بهینه برای یکی از دقیق ترین روابط میزانی سازی جرمی بدست آمده است. شکل مودهای نامیزان از روش تجزیه فرکانسی[6] محاسبه و با استفاده از تغییر جرم بهینه میزان شده اند.

در این رساله، ابتدا در فصل اول توضیحاتی در خصوص آنالیز مودال کلاسیک و آنالیز مودال محیطی ارائه شده است. در فصل دوم به توضیح برخی از روش های میزان سازی جرمی پرداخته شده است. در فصل سوم آنالیز حساسیت بکار گرفته شده تا مقدار تغییر جرم بهینه

[1]Unscaled mode shpaes
[2]Ambient Vibration Monitoring (AVM)
[3]Response prediction
[4]Structural Dynamic Modification (SDM)
[5]Model updating
[6]Frequency Domain Decomposition (FDD)

برای یکی از دقیق ترین روابط میزان سازی بدست آید. در فصل چهارم به شبیه سازی روش میزان سازی جرمی با استفاده از تغییر جرم بهینه پرداخته شده است. بدین منظور از مدل یک تیر یک سر درگیر با ۱۴ درجه آزادی استفاده شده است. در فصل پنجم، یک تیر دوسر آزاد تحت تست مودال کلاسیک و تست ارتعاش محیطی در یک آزمایش واقعی قرار گرفته است و در ادامه شکل مودهای حاصل با استفاده از تغییر جرم بهینه میزان و نتایج آن ارائه شده است.