دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

تأثیر انواع سیستم های تحریک در آزمایش مودال بر روی پارامترهای دینامیکی سازه ها

نگارش:

مینومدرس نژاد

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا اصفهانی

مشاورپایان نامه:

دکتر عباس کرم الدین

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران– گرایش سازه

تابستان۱۳۹۰

چکیده

در این تحقیق آزمایشگاهی، اثر روش های تحریک متفاوت در آزمایش مودال بر روی پارامترهای دینامیکی سازه بررسی می شود. در این پژوهش تمرکز برروی دو روش تحریک مرسوم سازه، تحریک به وسیله چکش ضربه و تحریک به وسیله دستگاه لرزاننده الکترودینامیکی می باشد. به این منظور یک صفحه بتنی از دیواره های یک مخزن U شکل بتنی به عنوان نمونه مورد آزمایش انتخاب شد. مراحل تجهیز و آب بند کردن مخزن مورد نظر با توجه به این نکته که رفتار سازه مورد آزمایش تا حد امکان رفتاری مشابه یک صفحه بتنی یک سر گیردار داشته باشد، انجام گرفت. سپس آزمایش های ارتعاشی به منظور دریافت پارامتر های ذاتی دینامیکی، با دو روش تحریک متفاوت چکش ضربه و لرزاننده بر روی نمونه انجام گرفت. آزمایش ها بر روی صفحه بتنی از سازه مخزن U شکل به صورت مخزن خالی و با چهار ارتفاع مختلف آب انجام شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهند که در آزمایش با تحریک لرزاننده، اتصال دستگاه محرک به سازه مورد آزمایش و اثر متقابل محرک و سازه بر روی پاسخ های سازه موثر است. فرکانس های تشدید به دست آمده از آزمایش با تحریک لرزاننده نسبت به آزمایش با تحریک چکش ضربه کاهش می یابند. فرکانس های تشدید به دست آمده از هر دو روش تحریک و برای مود های مختلف با افزایش سطح آب در نمونه کاهش می یابند. شکل مود های تجربی به دست آمده از دو روش، پردازش شده و انطباق قابل قبولی نشان می دهند. معیارهای MAC و COMAC محاسبه شده و چگونگی انطباق دو روش تحریک بررسی می گردد. نسبت های میرایی نمونه روند افزایشی یا کاهشی مشخصی ندارند با این وجود، نسبت میرایی به دست آمده از نمودار های FRF آزمایشگاهی در آزمایش با تحریک چکش ضربه در مقایسه با آزمایش با تحریک لرزاننده، نسبت های بالاتری می باشند که این موضوع نشان می دهد نسبت ۵٪ در نظر گرفته شده برای نسبت میرایی مخازن مختلف به صورت ثابت در آیین نامه های معتبر، صحیح نمی باشد. سازه مورد آزمایش در حالت خالی به صورت یک صفحه یک سر گیردار توسط نرم افزار Abaqus مدلسازی شد. نتایج به دست آمده از این تحلیل ها شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای سازه به صورت یک صفحه ی کنسول را اثبات می کند.

بایستی توجه داشت که امکان تنظیم نیروی تحریک اعمالی در لرزاننده باعث می شود که این روش تحریک برای اهداف خاص روشی کارا باشد. همچنین عدم نیاز به اپراتور باتجربه برای اعمال این روش تحریک خطاهای انسانی احتمالی را تا حد زیادی کاهش می دهد. از طرف دیگر، آسانی و قابلیت حمل چکش ضربه از مزیت های آزمایش با چکش ضربه در مکان هایی می باشد که امکان نصب و قرارگیری دستگاه لرزاننده نیست. روش های تحریک بر روی پاسخ های به دست آمده موثر بوده و بایستی در انتخاب روش تحریک در آزمایش مودال تجربی، با توجه به شرایط آزمایشگاهی و نوع سازه مورد آزمایش، محتاط بود.

فهرست عنوان ها

چکیده ..... أ
فهرست عنوان ها ..... ج
فهرست شکل ها ..... ز
فهرست جدول ها ..... م
فصل اول ۱
مقدمه و تعاریف ۱
۱-۱پیشگفتار ۱
۱-۲ هدف از انجام تحقیق ۳
۱-۳ طرح کلی پایان نامه ۴
۱-۴خلاصه فصل اول ۵
فصل دوم ۶
مبانی تئوری و روشهای تحلیل ۶
۲-۱ پیشگفتار ۶
۲-۲ الگوی ریاضی پاسخ سازه ۷
۲-۳ روش های نمونه برداری و کاهش خطاهای اندازه گیری داده های مودال ۱۷
۲-۴ مکانیک حرکت لرزاننده ی ارتعاشی ۲۴
۲-۴-۱ مکانیک حرکت کلاهک ۲۴
۲-۴-۲ مدل الکترو مغناطیسی ۲۶
۲-۴-۳ تقویت کننده- مودهای عملکرد ۲۸
۲-۵ خلاصه فصل دوم ۳۱
فصل سوم ۳۳
ابزار و روش های انجام آنالیز مودال ۳۳
۳-۱ پیشگفتار ۳۳

۳-۲ آنالیز مودال تجربی (Expremental Modal Analysis) ۳۳
۳-۳ تست مودال ۳۵
۳-۴ روش های تحریک سازه ۳۶
۳-۴-۱ اعمال تحریک ۳۷
۳-۴-۲ انتخاب نیروی تحریک ۴۱
3-۵ تابع پاسخ فرکانس (FRF) ۴۷
۳-۶ آزمایش ضربه (Impact Test) ۴۸
۳-۶-۱ چکش ضربه ۴۸
۳-۶-۲ مزیت های آزمایش ضربه ۵۲
۳-۶-۳ معایب آزمایش ضربه ۵۳
۳-۶-۴ نکات اساسی در آزمایش ضربه ۵۳
۳-۷ آزمایش با تحریک لرزاننده (Shaker Test) ۵۵
۳-۷-۱ لرزاننده الکترودینامیکی ۵۶
۳-۷-۲ کارایی محرک برای لرزه ی تصادفی ۵۹
۳- ۷-۳ نصب محرک ۶۰
۳-7-۴ نکات اساسی در آزمایش با تحریک لرزاننده ۶۱
۳-۸ شتاب سنج ۶۲
۳-۹ مبدل نیرو (Force Transducer) ۶۵
۳-۹-۱ نصب ترانسدیوسر ۶۶
۳-۹-۲ بار ناشی از ترانسدیوسر برشی مورد آزمایش ۶۷
۳-۹-۳ مشخصات مبدل نیرو در آزمایشگاه دینامیک سازه ۶۷
۳-۹-۴ کالیبره کردن مبدل نیرو ۶۸
۳-۱۰ مبدل پاسخ ۶۸
۳-۱۱ مقایسه آزمایش تحریک لرزاننده و تحریک ضربه از نظر تئوری ۶۸

3-11-۱ بررسی آزمایش ضربه از نظر تئوری..... ۶۹
3-11-۲ بررسی آزمایش تحریک لرزاننده از نظر تئوری..... ۷۰
۳-۱۲ خلاصه فصل سوم ۷۱
فصل چهارم..... ۷۳
مطالعات نظری و آزمایشگاهی..... ۷۳
۴-۱ پیشگفتار ۷۳
۴-۲ تاثیر سیستم های تحریک بر رفتار دینامیکی سازه ها ۷۳
۴-۲-۱مشخصات سازه ی تحت آزمایش..... ۷۴
۴-۲-۲ نتایج آزمایشات تجربی..... ۷۵
۴-۲-۳ نتایج تئوری ۷۷
۴-۳ مقایسه ی روش های آنالیز مودال بر روی سازه های بتنی..... ۸۱
۴-۳-۱ مشخصات سازه ی تحت آزمایش..... ۸۲
۴-۳-۲ سیستم های اندازه گیری ۸۳
۴-۳-۳ نتایج به دست آمده ۸۵
۴-۳-۴ نتیجه ی نهایی..... ۸۹
۴-۴ خلاصه فصل چهارم..... ۹۰
فصل پنجم..... ۹۱
آزمایش ها و نتایج..... ۹۱
۵-۱ پیشگفتار ۹۱
۵-۲ مشخصات مصالح و روند ساخت نمونه..... ۹۲
۵-۳ روش آزمایش ارتعاشی وتنظیم ابزار های اندازه گیری ارتعاشی..... ۹۵
۵-۴ تعیین ویژگی های مودال بنیادی نمونه ۹۸
۵-۴-۱ فرکانس ها..... ۹۹
۵-۴-۳ شکل مود ها ی تجربی..... ۱۰۷

۵-۴-۲ مدلسازی با نرم افزار Abaqus ۱۱۳
۵-۴-۴ میرایی ۱۱۶
۵-۵ خلاصه فصل پنجم ۱۲۲
فصل ششم ۱۲۳
نتیجه گیری وپیشنهادات ۱۲۳
۶-۱پیشگفتار ۱۲۳
۶-۲ نتایج ۱۲۳
۶-۳ پیشنهادات ۱۲۵
مرجع ها ۱۲۷
Abstract ۱۳۴

فهرست شکل ها

شکل۲-1 نمودار بخش حقیقی پاسخ در دامن فرکانس برای سازه یک درجه آزادی بدون میرایی (Lynch, 2005) ۱۱
شکل۲-2 نمودار پاسخ در دامنه فرکانس (FRF) با مقیاس لگاریتمی و زاویه فاز برای سازه یک درجه آزادی بدون میرایی (Lynch, 2005) ۱۲
شکل۲-3 نمودار پاسخ در دامنه فرکانس (FRF) برای سازه چند درجه آزادی (Avitabile, 2001) ۱۳
شکل۲-۴ نمایش بخش های حقیقی، انگاری و زاویه فاز تابع های پاسخ فرکانسی (Richardson and Formenti, 1982) ۱۴
شکل۲-5 یافتن شکل مودهای تجربی برای یک تیر آلومینیومی (Richardson, 1997) ۱۶
شکل۲-۶ تحلیلگر رقمی دوکاناله موجود در آزمایشگاه ۱۸
شکل۲-7 تحلیلگر رقمی دو کاناله (Bruel and Kjaer, 1993a) ۱۸
شکل۲-۸ بریدن سیگنال زمانی با پنجره مستطیلی (Richardson, 1978b) ۲۰
شکل۲-۹ نمونه برداری از داده های پنجره مستطیلی (Richardson, 1978b) ۲۰
شکل۲-۱۰ پنجره مستطیلی و خطای نشت (Garaygordobil, 2003) ۲۱
شکل۲-۱۱ نمونه برداری از طیف زلزله El Centro با پنجره Hanning (Lynch, 2005) ۲۲
شکل۲-۱۲ خطای روی هم افتادگی سیگنال ها (Garaygordobil, 2003) ۲۲
شکل۲-۱۳ نمونه ای از نمودارهای FRF و Coherenc (Allemang, 1999) ۲۳
شکل۲-14 مدل دو درجه آزادی دینامیکی کلاهک (Varoto et al., 2002) ۲۵
شکل۲-15 نمودار شتاب بدون بعد برای کلاهک لرزاننده (Varoto et al., 2002) ۲۶
شکل۲-16 مدل الکترو مکانیکی لرزاننده (Varoto et al., 2002) ۲۷
شکل۲-۱۷ رفتار E_{bemf} به علت تغییرات دامنه و فرکانس (Varoto et al., 2002) ۲۸
شکل۲-18 شتاب بدون بعد میز (Varoto et al., 2002) ۳۱

شکل۳-1 تجهیزات آزمایش با لرزاننده الکترودینامیکی و تار کششی ۳۹
شکل۳-2 لرزاننده ی الکترودینامیکی ۴۰
شکل۳-3 تجهیزات آزمایش با لرزاننده اینرسیایی ۴۰
شکل۳-۴ لرزاننده ی الکترو هیدرولیکی ۴۱
شکل۳-5 یک نمونه از اندازه گیری ها در روش تصادفی ۴۳
شکل۳-6 تحریک تصادفی w / Hanning ۴۳
شکل۳-7 یک نمونه از اندازه گیری ها در روش تصادفی پیوسته ۴۳

شکل۳-8 تحریک تصادفی پیوسته ۴۴
شکل ۳- 9 FRF برای تحریک تصادفی و تحریک تصادفی پیوسته ۴۴
شکل۳-10 تحریک سینوسی چلچله ای Sine Chirp ۴۶
شکل۳-11 مدل تیر با سه درجه آزادی (DOF) ۴۷
شکل۳-12 مقادیرفاز، قسمت حقیقی و موهمی ماتریس تابع پاسخ فرکانسی ۴۸
شکل۳-13 شکل ضربه برای سرهای چکش با سختی متفاوت (Bruel and Kjaer, 1984) ۵۰
شکل۳-۱۴ چکش ضربه نوع ۸۲۰۰ با سر های با سختی متفاوت (Bruel and Kjaer, 1984) ۵۰
شکل۳-15 سرچکش برای تحریک تمام مودها مناسب می باشد (Avitible, 2001) ۵۴
شکل۳-16 سر چکش برای تحریک تمام مودها کافی نمی باشد (Avitible, 2001) ۵۴
شکل۳-۱۷ پنجره نمایی برای کمینه کردن تاثیرات نشت (Leakage) (Avitible, 2001) ۵۵
شکل۳-۱۸مقطع لرزاننده الکترودینامیکی (Bruel and Kjaer, 1993) ۵۶
شکل۳-19 حدود بارگذاری براساس فرکانس را برای صفحه لرزه مدل ۴۸۱۷ برای اهداف عمومی(Bruel and Kjaer, 1984) ۵۸
شکل ۳- 20 پاسخ فرکانس صفحه لرزه مدل ۴۸۱۷(Bruel and Kjaer, 1984) ۵۸
شکل۳-21 تنوع دامنه موجود برای وزن جسم مورد آزمایش برای صفحه ی مدل ۴۸۱۷ (Bruel and Kjaer, 1984) ۵۹
شکل۳-22 بیشترین تراکم شتاب قابل حصول، .ϕ، برای صفحه ی ارتعاشی مدل ۴۸۱۷ (Bruel and Kjaer, 1984) ۶۰
شکل۳-23 تحریک تصادفی با پنجره هانینگ (Avitible, 2001) ۶۱
شکل۳-24 تحریک تصادفی بدون پنجره (Avitible, 2001) ۶۲
شکل۳-25 تحریک سینوسی بدون پنجره (Avitible, 2001) ۶۲
شکل۳-26 نمودار حساسیت بر حسب فرکانس برای یک شتاب سنج نمونه (ضیایی راد و همکاران، ۱۳۸۴) ۶۳
شکل۳-27 مدل یک درجه آزادی از شتاب سنج و پایه ی نصب آن (ضیایی راد و همکاران، ۱۳۸۴) ۶۴
شکل۳-۲۸ ساختار یک شتاب سنج پیزوالکتریک (ضیایی راد و همکاران، ۱۳۸۴) ۶۴
شکل۳-۲۹ مبدل نیرویی از جنس پیزوالکتریک (ضیایی راد و همکاران، ۱۳۸۴) ۶۶
شکل۳-۳۰ اندازه گیری های آزمایش ضربه ۷۰
شکل۳-31 اندازه گیری های آزمایش تحریک لرزاننده ۷۱

شکل۴-1 سازه ی تحت آزمایش(Heylen et al., 1996) ۷۴

شکل۴-2 آزمایش با لرزاننده اینرسیایی (Heylen et al., 1996) ۷۵
شکل۴-3 آزمایش با لرزاننده الکترودینامیکی و تارکششی (Heylen et al., 1996) ۷۵
شکل۴-۵ نتایج FRF آزمایشات (دومین بازه ی فرکانس) (Heylen et al., 1996) ۷۷
شکل۴-4 نتایج FRF آزمایشات (اولین بازه ی فرکانس) (Heylen et al., 1996) ۷۶
شکل۴-6 مقایسه ی مود ها (شکل سمت چپ بدون لرزاننده و شکل سمت راست با لرزاننده) (Heylen et al., 1996) ۷۸
شکل۴-7 مقایسه ی مود ها (شکل سمت چپ بدون لرزاننده و شکل سمت راست با لرزاننده) (Heylen et al., 1996) ۷۹
شکل۴-8 جزئیات خمش اتصال سازه – لرزاننده (Heylen et al., 1996) ۸۰
شکل۴-10 مقایسه ی مود ها (شکل سمت چپ بدون لرزاننده و شکل سمت راست با لرزاننده) (Heylen et al., 1996) ۸۱
شکل۴-11 هندسه ی تیرها (De Roeck et al., 2000) ۸۳
شکل۴-12 مقطع تیرها (De Roeck et al., 2000) ۸۳
شکل۴-13 ساختار آزمایش دینامیکی (De Roeck et al., 2000) ۸۴
شکل۴-14 اکتساب داده های آزمایشگاهی (De Roeck et al., 2000) ۸۴
شکل۴-15 فرکانس های ویژه بر حسب دامنه تحریک (De Roeck et al., 2000) ۸۸
شکل۴-16 ضرایب میرایی مودال بر حسب دامنه تحریک (De Roeck et al., 2000) ۸۸
شکل۴-17 اشکال مود تجربی سومین تیر بتن مسلح (De Roeck et al., 2000) ۸۹

شکل۵-1 نمایش سازه مورد آزمایش ۹۲
شکل۵-۲ قاب نصب شده بر روی مخزن بتنی U شکل به منظور اتصال صفحه فولادی به دیواره های بتنی ۹۳
شکل۵–۳ تزریق چسب هیلتی ۹۳
شکل۵-4 نصب پیچ های هیلتی ۹۳
شکل۵-۵ نوار چسب نصب شده پشت نبشی ها به منظور آب بند کردن درزها ۹۴
شکل۵-6 آب بندی درز اتصال قاب نبشی فولادی و صفحه بتنی توسط نوار چسب، چسب هیلتی و چسب آکواریوم ۹۴
شکل۵-7 نمونه مورد آزمایش مخزن U شکل بتنی ۹۵
شکل۵-8 درجات آزادی به کار رفته در آزمایش مودال ۹۵
شکل۵-9 نمونه و تجهیزات آزمایش چکش ضربه ۹۷
شکل۵-10 نمونه وتجهیزات آزمایش لرزاننده ۹۷
شکل۵-11نمودار تابع پاسخ فرکانسی (FRF) برای مخزن خالی در آزمایش با تحریک لرزاننده ۹۸

شکل۵-12 نمودارتابع وابستگی(Coherence) برای مخزن خالی در آزمایش با تحریک لرزاننده ۹۸
شکل۵-۱۳ نمودار FRF یکی از درجات آزادی مربوط به مخزن خالی در آزمایش چکش ضربه ۹۹
شکل۵-۱۴ نمودار بخش حقیقی پاسخ تحریک مربوط به مخزن خالی در آزمایش چکش ضربه ۹۹
شکل۵-15 نمودار بخش موهومی پاسخ تحریک مربوط به مخزن خالی در آزمایش چکش ضربه ۱۰۰
شکل۵-16 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن خالی برای دو روش تحریک ۱۰۱
شکل۵-17 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن خالی در مود خمشی اول برای دو روش تحریک ۱۰۱
شکل۵-18 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن یک چهارم پر برای دو روش تحریک ۱۰۱
شکل۵-19 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن یک چهارم پر در مود خمشی اول برای دو روش تحریک ۱۰۲
شکل۵-20 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن نیمه پر برای دو روش تحریک ۱۰۲
شکل۵-21 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن نیمه پر در مود خمشی اول برای دو روش تحریک ۱۰۲
شکل۵-22 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن سه چهارم پر برای دو روش تحریک ۱۰۳
شکل۵-23 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن سه چهارم پر در مود خمشی اول برای دو روش تحریک ۱۰۳
شکل۵-24 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن پر برای دو روش تحریک ۱۰۳
شکل۵-25 مقایسه نمودار FRF مربوط به مخزن پر در مود خمشی اول برای دو روش تحریک ۱۰۴
شکل۵-26 روند کاهش فرکانس با افزایش ارتفاع آب داخل مخزن و برای دو روش تحریک ۱۰۶
شکل۵-27 مقایسه نمودار های FRF مخزن خالی و پردر آزمایش چکش ضربه ۱۰۷
شکل۵-28 مقایسه نمودار های FRF مخزن خالی و پردر آزمایش لرزاننده ۱۰۷
شکل۵-29 شکل مود ۱ در آزمایش لرزاننده بر روی مخزن پر، در فرکانس 31/62 هرتز ۱۰۸
شکل۵-30 شکل مود ۲ در آزمایش لرزاننده بر روی مخزن پر، در فرکانس 232/25 هرتز ۱۰۸

شکل۵-۳۱ شکل مود اول و دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده در مخزن خالی ۱۰۸
شکل۵-32 شکل مود اول و دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده در مخزن یک چهارم پر ۱۰۹
شکل۵-33 شکل مود اول و دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده در مخزن نیمه پر ۱۰۹
شکل۵-34 شکل مود اول و دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده در مخزن سه چهارم پر ۱۰۹
شکل۵-35 شکل مود اول و دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده در مخزن پر ۱۱۰
شکل۵-۳۶ معیار MAC برای سطوح مختلف آب درون مخزن در مود اول و دوم با دو روش تحریک ۱۱۱
شکل۵-37 معیار 1-MAC برای سطوح مختلف آب درون مخزن در مود اول و دوم با دو روش تحریک ۱۱۱
شکل۵-38 معیار COMAC در درجات آزادی بر روی تار میانی نمونه مورد آزمایش و برای سطوح مختلف آب درون مخزن و برای دو روش تحریک ۱۱۲
شکل۵-39 المان solid هشت گرهی برای ماده بتن در مدل اجزا محدود CAE (User Manual, 2010) ۱۱۳
شکل۵-۴۰ المان خرپایی ۲ گرهی برای مدلسازی آرماتورها CAE User Manual, (2010) ۱۱۳
شکل۵-۴۱ شکل مود ۱ خمشی در نرم افزارAbaqus ۱۱۴
شکل۵-42 شکل مود ۲ خمشی در نرم افزارAbaqus ۱۱۵
شکل۵-۴۳ شکل مود اول تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده مدلسازی با نرم افزار Abaqus در مخزن خالی ۱۱۶
شکل۵-۴۴ شکل مود دوم تار میانی صفحه از دو روش تحریک با چکش ضربه و لرزاننده مدلسازی با نرم افزار Abaqus در مخزن پر ۱۱۶
شکل۵-45 نسبت های میرایی مود اول از آزمایش با دو روش تحریک با کمک نمودار پاسخ های فرکانسی FRF ۱۱۸
شکل۵-۴۶ نسبت های میرایی مود دوم از آزمایش با دو روش تحریک با کمک نمودار پاسخ های فرکانسی FRF ۱۱۸
شکل۵-۴۷ بخش حقیقی و بخش موهومی از یک نمودار FRF برای تعیین درصد میرایی ۱۲۰
شکل۵-48 نسبت های میرایی مود اول از آزمایش با دو روش تحریک با کمک نمودار بخش حقیقی و بخش موهومی ۱۲۱

شکل۵-۴۹ نسبت های میرایی مود دوم از آزمایش با دو روش تحریک با کمک نمودار بخش حقیقی و بخش موهومی ۱۲۱

فهرست جدول ها

جدول۳-1 مشخصات مربوط به ساختار های ضربه ی متفاوت در هنگام ضربه به یک صفحه ی فلزی بزرگ (Bruel and Kjaer, 1984) ۵۱

جدول۴-1 نتایج آنالیز مودال معمولی برای هر دو ترکیب (Heylen et al., 1996) ۷۷

جدول۴-2 پارامتر های تحریک: لرزاننده ی الکترو دینامیک (De Roeck et al., 2000) ۸۵

جدول۴-3 فرکانس های ویژه و ضرایب میرایی مودال روش تعیین مستقیم پارامترهای فرکانسی FDPI (De Roeck et al., 2000) ۸۵

جدول۴-۴ فرکانس های ویژه و ضرایب میرایی مودال با روش شناسایی فضای فرعی اتفاقی SSI (De Roeck et al., 2000) ۸۷

جدول۵-1 مشخصات چکش به کار رفته در آزمایشگاه ۹۶

جدول۵-2 فرکانس های ویژه دو مود اول ارتعاشی نمونه بادو روش تحریک چکش ضربه و لرزاننده ۱۰۵

جدول۵- 3 فرکانس ها در دو مود اول خمشی مدل تحلیل شده در Abaqus ۱۱۴

جدول۵-۴ مقایسه فرکانس های تشدید به دست آمده از آزمایش و نتایج مدلسازی ۱۱۵

جدول۵-5 نسبت های میرایی برای دو مود اول در ترازهای مختلف آب درون مخزن در آزمایش با دو روش تحریک ۱۱۹

جدول۵-۶ نسبت های میرایی برای دو مود اول در ترازهای مختلف آب درون مخزن در آزمایش با دو روش تحریک با استفاده از بخش حقیقی و موهومی نمودارهای FRF ۱۲۰

۱

فصل اول

مقدمه و تعاریف

۱-۱ پیشگفتار

در دهه ی گذشته سنجش (ارزیابی) غیر مخرب سیستم های سازه ای (Nondestructive Evaluation) مورد توجه روز افزونی توسط محققین در زمینه های مختلف مهندسی از سلامت یابی سازه های فضایی تا تشخیص خرابی در سیستم های سازه های عمران قرار گرفته است. در میان این روش ها، روش های مبتنی بر شناسایی مودال بر پایه ی این اصل می باشد که تغییرات در مشخصات ماده و یا هندسه ی سیستم ها تغییراتی در پارامترهای مودال مانند فرکانس‌های تشدید، ضرایب میرایی مودال، شکل مودها و مشتقات آن‌ها، ایجاد می کند. آنالیز مودال تجربی به عنوان یک تکنولوژی برای تعیین پارامترهای مودال سازه بر اساس داده های لرزه ای اندازه گیری شده آن، استفاده می شود. برای این شیوه دستگاه آزمایش مودال به کار می رود . این دستگاه ها می توانند رفتار سازه را پیش بینی و عاملهای مهم مانند سختی، میرایی و شکل مودها و مشتقات آنها را با اعمال روش انحنای مناسب برروی یک سری تابع پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده (FRF ها) و یا بر روی تاریخچه زمانی پاسخ دینامیکی سازه ها محاسبه کنند. برای پردازش داده های این دستگاه ها، الگوریتمهای عددی ویژه ای وجود دارند و در نتیجه در کنار کارهای تجربی باید از روشهای عددی مانند اجزای محدود بهره گرفت.

یکی از اصلی ترین مسائل در آنالیز مودال تجربی این می باشد که تخمین پارامترهای مودال تحت تأثیر متغیرهای مختلفی مانند شرایط محیطی، روش های تحریک، پارامترهای دریافت اطلاعات، روش های پردازش اطلاعات و فاکتورهای انسانی می باشد که بعضی اوقات ارزیابی و کنترل آن ها دشوار است.

از آزمایش های انجام شده در گذشته مشاهده شده است که روش های تحریک، دریافت اطلاعات و راه های پردازش اطلاعات بر روی تخمین (ارزیابی) پارامترهای مودال تأثیر می گذارند. اصلی ترین دلیل این تاثیر برای سازه های بتنی رفتار غیرخطی بتن می باشد که حتی در دامنه های لرزه ای بسیار پایین نیز مشاهده می شود. در اکثر موارد فرض می شود که تأثیر روش های تحریک، دریافت اطلاعات و راه های پردازش اطلاعات برروی فرکانس های تشدید و شکل مود ها قابل صرف نظر است. این وضعیت برای ضرایب میرایی مودال صادق نیست

و درنتیجه تخمین این پارامترها غیرقابل اطمینان است(Ndambi,1999).

Mottershead و Frizwell (1993) تحقیقی در ارتباط با مدلسازی اجزاء محدود ارائه دادند که به صورت گسترده برای تشخیص سلامت سازه استفاده می شود. مطالعه ی دیگری از روش های سنجش غیر مخرب (NDE) برای بررسی شرایط سازه در کار Housner و همکاران (۱۹۹۷) موجود می باشد. Doebling و همکاران (۱۹۹۸،۱۹۹۶) و Sohen و همکاران (۲۰۰۳) مرور جامعی با موضوع تشخیص، مکان یابی و تعیین درجه خسارت در سازه با استفاده از روشی که تغییرات در خصوصیات دینامیکی و یا مشخصاتی که از اندازه گیری های دینامیکی نتیجه می شود، ارائه داده اند. Zo و همکاران (۲۰۰۰) روش های موجود برای تشخیص خسارت نوسانی در سازه های کامپوزیت، با تاکید بر تکنیک های مدلسازی برای لایه لایه شدگی و روش های تشخیص آن را به طور خلاصه ارائه دادند.

اهمیت اثرات بار دینامیکی به علت وسایل تحریک در کار Olbrechts و همکاران(۱۹۹۶) بحث شده است. در این پژوهش نشان داده می شود که فرکانس تشدید با ابزارهای متفاوت تحریک، تغییرمی کند و بایستی در مورد تفسیر نتایج به دست آمده محتاط بود. . Olbrechts و همکاران (۱۹۹۶) اهمیت اثرات بار دینامیکی به علت وسایل تحریک را بحث کرده اند. در این تحقیق نشان داده می شود که فرکانس تشدید به دست آمده با ابزارهای متفاوت تحریک، تغییر می کند و بایستی در مورد تفسیر نتایج به دست آمده محتاط بود. نتایج به دست آمده توسط Maeck و همکاران (۲۰۰۰) نشان می دهد که تخمین پارامتر های مودال تحت تاثیر روش های دریافت و پردازش داده ها، بیشتر در مورد ضرایب میرایی مودال و کمتر برای فرکانس های تشدید، می باشد. ضرایب میرایی مودال بسیار حساس می باشند و به سختی اندازه گیری می شوند. رفتار غیرخطی حتی در دامنه لرزه ای بسیار پایین مشاهده می شود. با این وجود، برای دامنه های تحریک مورد استفاده در آزمایشات پژوهش انجام شده توشط Maeck و همکاران (۲۰۰۰)، مشاهده می شود که تغییرات به علت رفتار غیرخطی، برای فرکانس های تشدید، برخلاف ضرایب میرایی مودال، کوچک و قابل صرفنظر می باشد. Ndambi و همکاران (۲۰۰۰) برروی تیرهای شبیه سازی شده پل های بتنی بررسی انجام داده و تیر ها را با دو روش چکش ضربه و سیگنال های شبه تصادفی و سینوسی ناشی از دستگاه لرزاننده الکترودینامیکی تحریک کردند. Ndambi و همکارانش (۲۰۰۰) از این آزمایش ها انتظار پاسخ یکسانی داشتند ولی چنین نتیجه ای به دست نیآمد.

دینامیک لرزاننده و اثر متقابل آن با سازه مورد آزمایش توسط نویسنده های مختلفی بررسی شده است. Tomlinson (۱۹۷۹) اثر متقابل بین لرزاننده و سازه ی مورد آزمایش را با توجه مخصوص به افت نیرو مطالعه می کند. این اثر هنگامی رخ می دهد که سازه در مجاورت فرکانس طبیعی اش مرتعش شود. این کار همچنین بر مشخصات غیرخطی تأکید می کند که ناشی از میدان الکترو مغناطیسی است که در حین سیکل کار لرزاننده تولید می شود. Olsem (۱۹۸۶) تأثیرات جرم کلاهک لرزاننده و سختی ملحقات لرزاننده را در داده های اندازه گیری

شده بررسی و به این موضوع اشاره می کند که تأثیرات جرم کلاهک بر توابع پاسخ فرکانسی (FRF) اندازه گیری شده می تواند با انتخاب محرک مناسب برای هر تست به کمترین مقدار برسد. Rao (۱۹۸۷) اساس کار توسعه یافته توسط Olsem (۱۹۸۶) را دنبال کرد، اما افت نیروی تحریک در این کار با جزئیات بیشتری آنالیز شد. براساس این مطالعات پدیده ی افت به طور اساسی به علت اثر متقابل مکانیکی میان جرم کلاهک لرزاننده و سازه و مشخصات الکترومغناطیسی مودار سیم پیچ لرزاننده می باشد.

مکانیک حرکت محرک علاوه بر اثر متقابل آن با سازه مورد آزمایش، در کتاب های مختلف آزمایش مودال و ارتعاشی، بحث و بررسی شده است. Ewins (1989) مدل دینامیکی ساده ای را که اثر متقابل مکانیکی بین کلاهک لرزاننده و سازه ی مورد آزمایش را توضیح می دهد، رابطه سازی کرده است. نویسنده توجه را معطوف به این حقیقت کرده است که نیروی تحریک بایستی مستقیماً در حین آزمایش اندازه گیری شود تا اندازه گیری های FRF قابل اعتماد ی حاصل شود. McConnell (2008) مطالعه وسیعی بر روی مکانیک حرکت لرزاننده و اثر متقابل آن با سازه ی مورد آزمایش انجام داده است. در این مطالعات مدل های تحلیلی متعددی برای توضیح اندرکنش مکانیکی میان لرزاننده و سازه ی مورد آزمایش به صورت معلق و نصب شده بر روی پایه، بررسی شده است. به علاوه، در این کار او مشخصات الکتریکی سیستم تقویت کننده نیرو در لرزاننده در حین انجام آزمایش را بررسی کرده و نشان می دهد که تفاوت اساسی ولتاژ یا مودهای اعمالی هنگام استفاده از تقویت کننده ی نیرو رخ می دهد. Maia (۱۹۹۷) همچنین مطالعه ی جالبی در این موضوع با استفاده از مدل های دینامیکی ساده برای مدلسازی اندرکنش میان لرزاننده متصل به پایه انجام داده است. مقاله ای توسط lang (۱۹۹۷) به چاپ رسیده که در آن تست های متعدد و ساده ای به منظور ارزیابی مکانیک حرکت لرزاننده انجام شده است.

۱-۲ هدف از انجام تحقیق

برای به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه، آن را با چکش ضربه یا لرزاننده در درجات آزادی مورد نظر تحریک می کنند.. ورودی و خروجی ها به وسیله روش(Fast Fourier Technique) FFT اندازه گیری و تجزیه و تحلیل می گردند. پاسخ فرکانسی از بررسی طیف ورودی که به وسیله ترانسدیوسر نیرو اندازه گیری می شود و طیف خروجی که از روی شتاب سنج خوانده می شود، انجام می پذیرد (Bruel & Kjaer,1993). تحریک کننده ها وسائل ارزشمندی جهت اعمال نیروی ارتعاشی متفاوت سینوسی، ضربه، تصادفی و یا سیگنال های باند پهن به سازه وبررسی اثرات آن هستند. لرزاننده الکترو مغناطیس که لرزاننده الکترودینامیک نیز نامیده می شود رایج ترین لرزاننده مورد استفاده در تست مودال می باشد. لرزاننده الکترو مغناطیسی دارای محدوده کاری وسیعی از نظر فرکانس، دامنه و بازه دینامیکی می باشد (ضیایی راد و همکاران، ۱۳۸۴). در عمل لرزاننده و مبدل پاسخ در حین آزمایش مودال بر روی سازه تاثیر می گذارند. در حقیقت سازه تحت آزمایش، سازه تنها نخواهد بود بلکه بایستی سازه به همراه تمام موارد دخیل در اکتساب داده در نظر گرفته شود. این موارد می تواند معلق کردن سازه،

جرم مبدل های متصل، اثرات سخت کنندگی بالقوه تنظیمات لرزاننده- تار کششی، اثرات غیرعمدی بار به وجودآمده در طی آزمایش مودال به وسیله شتاب سنج ها، محرک ها و شرایط تکیه گاهی سازه باشد.

چکش ضربه از دیگر انواع تحریک کننده می باشد.آزمایش با تحریک چکش ضربه مزایایی دارد. در آزمایش با تحریک چکش ضربه تعداد بسیار کمی تجهیزات موردنیاز است. سریع ترین روش آزمایش برای محیط های با نویز پایین می باشد. قابل حمل بوده وبرای استفاده در فضاهای محدود که امکان قرارگیری دستگاه لرزاننده نمی باشد، ایده آل است. تعداد محدودی میانگین گیری مورد نیاز است. هیچ بار متغیر جرمی به سازه اعمال نمی شود، و هزینه آن بسیار پایین است (Bruel & Kjaer,1984). در کنار این مزایا آزمایش ضربه معایبی دارد که از جمله می توان به ضریب تاج (Crest Factor) بسیار بالا اشاره کرد که ممکن است سازه ی مورد آزمایش را به حدی فراتر از حد پاسخ خطی برساند. درنتیجه این روش برای سیستم های ذاتاً غیرخطی مناسب نمی باشد. از آنجا که انرژی ورودی کمی به سیستم وارد می شود، سیگنال ضعیفی برای نویز(Noise) مشخصه ها دارد. مراقبت های به خصوصی بایستی برای حذف اضافه بار و ضربه های چندگانه (Multiple Impact) اعمال شود. برای اعمال انرژی کافی برای تحریک یک سازه بزرگ ضربه ای با پیک زیاد مورد نیاز است که ممکن است باعث تخریب موضعی سازه شود(Bruel & Kjaer,1984) .

از دید تئوری این موضوع که توابع پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده از آزمایش محرک به دست آمده و یا از آزمایش ضربه تفاوتی نخواهد داشت. آزمایش چکش ضربه عموما منجر به اندازه گیری یکی از ردیف های ماتریس تابع پاسخ فرکانس (FRF) خواهد شد در حالیکه آزمایش محرک اندازه گیری یکی از ستون های ماتریس تابع پاسخ فرکانسی را نتیجه خواهد داد. از آنجا که ماتریس معرف سازه متقارن می باشد، از نظر تئوری، تفاوتی میان لرزاننده و چکش ضربه نخواهد بود. درنتیجه در حالیکه از نظر تئوری تفاوتی بین یک آزمایش لرزاننده و آزمایش چکش ضربه وجود ندارد جنبه های عملی اساسی وجود دارد که منجر به تفاوت خواهد شد (Avitabile, 2001). این پژوهش اثرات بار دینامیکی را که روش های تحریک متفاوت بر روی سازه های مورد آزمایش می گذارند، بررسی می کند. در اینجا تمرکز برروی دو روش تحریک مرسوم سازه، تحریک به وسیله چکش ضربه و تحریک به وسیله دستگاه لرزاننده می باشد.

۱-۳ طرح کلی پایان نامه

این پایان نامه در ۶ فصل تدوین شده است. در فصل دوم مبانی تئوری و روابط تحلیلی مربوط به آزمایش مودال و مکانیک حرکت لرزاننده توضیح داده می شود. آنالیز مودال علاوه بر اینکه یک ابزار کارا برای شناخت و الگوسازی رفتار سازه می باشد، وسیله ای بسیار موثر در تجسم دینامیک سازه ای می باشد. فصل سوم مخصوص معرفی روش ها و ابزار آنالیز مودال می باشد.

در فصل چهارم نمونه های کار های پژوهشی انجام شده به منظور بررسی اثر ادوات و روش های مختلف تحریک در آزمایش مودال بر عامل های بنیادی بررسی شده است.

برنامه کار آزمایشگاهی و روش های پردازش داده ها در فصل پنجم ارائه شده است. برنامه آزمایشگاهی در این کار پژوهشی شامل تجهیز نمونه و دستگاه های آزمایش مودال تجربی، دریافت و ثبت داده ها می باشد. در بخش پردازش داده ها با تاکید بر بررسی اثر عامل تحریک در کار آزمایشگاهی، روش هایی با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی، شکل مود های تجربی و ضرایب میرایی عنوان و بر روی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده بررسی می شود. به منظور درک بهتر رفتار سازه مدلسازی با نرم افزار Abaqus انجام ونتایج مربوط به آن ارائه خواهد شد.

در فصل ششم که پایان بخش این مجموعه می باشد، نتیجه گیری ها و پیشنهاد ها برای پژوهش های آینده به نظر خواهد رسید.

۱-۴خلاصه فصل اول

در این فصل به بحث پیرامون هدف های این پژوهش پرداخته شد. این اهداف در بخش تئوری و تجربی بررسی می شود. در بخش تجربی، رفتار یک صفحه بتن مسلح از مخز ن U شکل در آزمایش ارتعاشی بررسی می شود. در پایان این فصل، روند ارائه مبانی تئوری و تجربی مورد نظر همراه با چگونگی تنظیم فصل های پایان نامه شر ح داده شد. در فصل بعدی تئوری ها، تعاریف و روابط حاکم در تست ارتعا شی عنوان می شود.

۲

فصل دوم

مبانی تئوری و روشهای تحلیل

۲-۱ پیشگفتار

برای سنجش غیر مخرب سیستم های سازه ای (NDE, Nondestructive Evaluation of Structural Systems) ، روش ها وتکنیک های متنوعی وجود دارد. تمام این روش ها می توانند به روش های محلی و کلی طبقه بندی شوند. دسته اول شامل روش هایی است که برای تامین اطلاعات درباره ناحیه ی به نسبت کوچکی از سیستم موردنظر با استفاده از اندازه گیری های محلی طراحی شده است. این روش ها روش های اولتراسونیک، آکوستیک، انتشار و دمانگاری مادون قرمز می باشند. روش های دسته دوم، منطبق بر اندازه گیری از ردیف های پراکنده از سنسورها برای به دست آوردن اطلاعات کلی از وضعیت سیستم می باشد. این دو روش مکمل یکدیگرند. بهینه ترین انتخاب در روش سنجش غیر مخرب (NDE) به حوزه ی مساله ی در دست بررسی و طبیعت شبکه سنسورها بستگی دارد. از میان روش های سنجش غیر مخرب کلی، روش هایی است که بر پایه آنالیز اندازه گیری لرزه ای به منظور دست یافتن به اطلاعات کلی درباره ی شرایط یا وضعیت سلامتی سازه ی مورد آزمایش انجام می شود. Moaveni (۲۰۰۷) تحقیق جامعی در مرور روش های سنجش غیر مخرب کلی (Global Nondestructive Evaluation) انجام داده است. در این بررسی روش های تعیین خسارت به ۱۳ طبقه تقسیم می شوند:

۱- روش های بر پایه تجزیه وتحلیل بیزی (Bayesian)

۲- روش های بر پایه تئوری کنترل

۳- روش های بر پایه شاخص خسارت

۴- روش های بر پایه تجزیه مود تجربی و انتقال

۵- روش های بر پایه تغییر در مقاومت ظاهری الکتریکی

۶- روش های بر پایه انرژی کرنشی مودال

۷- روش های بر پایه مدل به روز شده جزء محدود

۸- روش های بر پایه شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک

۹- روش های بر پایه آنالیز جزء اصلی وتجزیه مقدار یگانه

۱۰- روش های بر پایه تشخیص مودال (این روش شامل ۶ بخش می شود)

۱۰-۱- روش های بر پایه تغییر در فرکا نس طبیعی

۱۰-۲- روش های بر پایه تغییر در قابلیت انعطاف

۱۰-۳- روش های بر پایه تغییر در توابع پاسخ فرکانسی

۱۰-۴- روش های بر پایه تغییر در منحنی مودال

۱۰-۵- روش های بر پایه تغییر در سختی

۱۰- ۶ - سایر روش ها

۱۱- روش های بر پایه نیروهای باقیما نده

۱۲- روش های بر پایه اطلاعات دامنه زمانی

۱۳- روش های بر پایه انتقال امواج کوچک

با وجود اینکه یک سازه در طول عمر بهره برداری خود ممکن است انواع متعددی خسارت را تجربه کند، در بیشتر روش های تشخیص خسارت بررسی شده در تحقیق Moaveni (۲۰۰۷) فرض می شود خسارت تنها سبب کاهش سختی و نه کاهش جرم در یک یا چند ناحیه از سازه می شود. مساله دیگر در نظارت سلامت سازه، جداسازی تغییرات در رفتار دینامیکی سازه ناشی از منابع دیگری چون شرایط محیطی (رطوبت، باد، و مهمتراز سایر شرایط درجه حرارت) و تغییرات در شرایط بهره برداری (سبک ویا سنگین بودن ترافیک بر روی پل) می باشد. در بیشتر روش های بیان شده در تحقیق Moaveni (۲۰۰۷) فرض می شود که تغییرات در رفتار دینامیکی سازه تنها ناشی از خسارت می باشد.

۲-۲ الگوی ریاضی پاسخ سازه

برای بررسی رفتار سازه و طراحی ویژگی های مورد نظر به یک الگوی ریاضی نیاز است. با داده های آزمایشگاهی می توان میزان دقت و کامل بودن این الگوی ریاضی را بررسی کرد. برای این منظور آزمایش های