بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان

مقایسه روش‌های آنالیز مودال کلاسیک و آنالیز مودال بر مبنای فقط خروجی در عیب‌یابی سازه‌ها

استاد راهنما

دکتر سید مرتضی همایون صادقی

استاد مشاور

دکتر میر محمد اتفاق

پژوهشگر

حمید برزگر بفروئی

شهریور ۱۳۹۳

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است:

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر **پدرم**

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان مهربان **مادرم**

به پشتوانه ی زندگیم، **همسرم**

به همراه همیشگی‌ام، **برادرم**

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی کران مهربانی‌تان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما.

تقدیر و سپاس

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. اکنون در آستانه راهی نو با سپاس از نعمات بی حد پروردگار بر خود لازم می‌دانم سپاسگزار تمامی عزیزانی باشم که در این پروژه یاری‌ام نمودند.

مراتب تشکر صمیمانه خود را از استاد ارجمندم **جناب آقای دکتر مرتضی همایون صادقی** دارم که در تمام مراحل پروژه با راهنمودهای ارزشمند خود راه‌گشای اینجانب بودند. همچنین از همراهی و مشاوره **جناب آقای دکتر میرمحمد اتفاق** برای به ثمر رسیدن این پروژه مراتب تشکر و قدردانی را به جای می‌آورم.

نام خانوادگی دانشجو : برزگر بفروئی **نام :** حمید

عنوان پایان‌نامه : مقایسه روش‌های آنالیز مودال کلاسیک و آنالیز مودال بر مبنـای فقـط خروجـی در عیب‌یابی سازه‌ها

استاد راهنما : دکتر سید مرتضی همایون صادقی

استاد مشاور : دکتر میر محمد اتفاق

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد **رشته :** مهندسی مکانیک **گرایش :** طراحی کاربردی

دانشگاه : تبریز **دانشکده :** فنی مهندسی مکانیک

تاریخ فارغ التحصیلی : شهریور ۱۳۹۳ **تعداد صفحه : ۸۶**

کلید واژه‌ها : آنالیز مودال، عیب‌یابی، سازه سه بعدی، روش چند جمله‌ای کسری گویا، روش تجزیه حوزه فرکانسی

چکیده :

ایمنی سازه‌ها، یکی از اصلی‌ترین مسائلی است که در سازه‌هایی مثل پل‌ها، ساختمان‌ها، هواپیماها، آنتن های مخابراتی و ... در نظر گرفته می‌شود. از همین رو امـروزه، روش‌هـای پـایش وضـعیت سـازه‌هـا (SHM[1]) به یکی از سرفصل‌های مهم تحقیقاتی-صنعتی تبدیل شده است. این روش‌ها، روش‌هایی هستند که برای نظارت مداوم بر وضعیت سلامتی سازه‌ها به کار گرفته می‌شوند. در ایـن روش‌هـا بـا اسـتفاده از پارامترهای سیستم عیوب سازه ارزیابی می‌گردد. ارزیابی عیوب سازه به چهار مرحله تشخیص وجود عیب، یافتن محل عیب، اندازه عیب و پیش بینی طول عمر باقیمانده سازه تقسیم می‌شود که علی رغم روش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای که در هر کدام از این مراحل انجام پذیرفته، همچنان مسائل حل نشده زیـادی در هر مرحله وجود دارد.

روش‌های متنوعی برای ارزیابی عیوب سازه‌ها با استفاده از پارامترهای ارتعاشی آنها وجـود دارد. از جمله این روش‌ها، روش‌های غیر مخربی هستند که با استفاده از اندازه گیری پارامترهای ارتعاشـی و بـر

[1] Structural Health Monitoring

اساس تغییری که تغییر مشخصات سازه مثل جرم یا سفتی یا ... در مشخصه‌های دینـامیکی سـازه مثـل فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و ... ایجاد می‌کنند عیب را تشخیص می‌دهند.

وقتی صحبت از تست‌های ارتعاشی روی سازه‌های مکانیکی و عمرانی باشد، استفاده از محرک‌های مصنوعی مثل لرزاننده‌ها، رها کردن وزنه‌ها و ... در اکثر موارد، غیر عملی یا پرهزینه می‌باشد. محرک‌های محیطی مثل باد، موج‌های دریا، صدای ترافیک خیابان‌ها و ... می‌توانند جایگزین مناسبی برای آنها باشند. از طرف دیگر ترکیب روشهای محیطی، با روشهای مبتنی بر پـارامترهـای مـودال، تشـخیص مناسـبی از عیوب برخی سازه‌ها خواهند داشت.

هدف از انجام این پایان‌نامه مقایسه دو روش آنالیز مـودال کلاسـیک (CMA[1]) و آنـالیز مـودال بـر مبنای فقط خروجی (OMA[2]) در عیب‌یابی سازه‌ها می‌باشد. برای نیل به این هدف ابتـدا یـک دکـل سـه بعدی در مقیاس آزمایشگاهی در محیط نرم افزاری به صورت المان محدود، مدل‌سازی مـی‌شـود. سـپس یک عیب سازه‌ایِ تغییرات سفتیِ عضوهای برشی در مدل المان محدود وارد می‌شـوند و بـا انجـام آنـالیز مودال عددی، تغییرات فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی بررسـی مـی‌گردنـد. سـپس عیـب مزبور، به صورت تجربی در مدل واقعی دکل در مقیاس آزمایشگاهی، اعمال شـده و مودهـای ارتعاشـی و فرکانس‌های طبیعی از دو روش CMA و OMA محاسبه شده و نتایج با هم و همچنـین بـا مـدل عـددی بررسی و مقایسه خواهند شد.

[1] Classical Modal Analysis

[2] Operational Modal Analysis

فهرست

۱- فصل اول- مقدمه ۲

۲- فصل دوم- پیشینه پژوهش ۷

۲-۱- تاریخچه توسعه المان محدود ۷

۲-۲- تاریخچه توسعه آنالیز مودال کلاسیک ۸

۲-۳- تاریخچه توسعه آنالیز مودال بر مبنای فقط خروجی ۱۰

۲-۳-۱-روش NExT ۱۱

۲-۳-۲-روش SSI ۱۴

۲-۳-۳-روش FDD ۱۵

۲-۳-۴-روش ARMA ۱۷

۲-۳-۵-روش مشاهده تصادفی ۱۸

۲-۴- تاریخچه توسعه عیب‌یابی ۱۸

۲-۴-۱-فرکانس‌های طبیعی ۱۸

۲-۴-۲-شکل مودها ۱۹

۲-۴-۳-تابع پاسخ فرکانسی ۲۰

۲-۴-۴-انرژی کرنشی مودال ۲۱

۲-۴-۵-انعطاف‌پذیری دینامیکی ۲۱

۲-۴-۶-آنتی رزونانس ۲۲

۲-۴-۷-آنالیز زمانی – فرکانسی ۲۳

۲-۴-۸-آنالیز اجزاء اصلی ۲۳

۲-۴-۹-انتشار موج ۲۴

۳- فصل سوم- مبانی نظری آنالیز مودال عددی ۲۶

۳-۱- آنالیز مودال عددی بر مبنای مسأله مقدار ویژه ۲۶

۳-۲- مراحل حل در آنالیز مودال عددی بر مبنای مدلسازی المان محدود ۲۸

۳-۳- روش‌های حل در آنالیز مودال عددی ۲۹

۴- فصل چهارم- مبانی نظری آنالیز مودال تجربی بر مبنای ورودی - خروجی ۳۱

۴-۱- فرضیات به کار رفته در آنالیز مودال تجربی ۳۱

۴-۲- تابع پاسخ فرکانسی ۳۲

۴-۳- تحریک سازه تحت آزمایش ۳۴

۴-۳-۱-مکانیزم تحریک ۳۵

۴-۳-۲-انتخاب نیروهای تحریک ۳۵

۴-۴- استخراج پارامترهای مودال ۳۶

۴-۵- روش چند جملهایهای کسری گویا ۳۷

۵- فصل پنجم- مبانی نظری آنالیز مودال تجربی برمبنای فقط خروجی ۴۱

۵-۱- استخراج پارامترهای مودال ۴۱

۵-۱-۱-روش تجزیه حوزه فرکانسی ۴۲

۵-۱-۲-روش تجزیه مقادیر تکین ۴۴

۶- فصل ششم- مبانی نظری عیب‌یابی ۴۶

۶-۱- تعریف عیب ۴۶

۶-۲- فرآیند پایش وضعیت سازه ۴۶

۶-۲-۱-ارزیابی عملیاتی ۴۷

۶-۲-۲-داده‌برداری، ترکیب و پاک‌سازی داده‌ها ۴۸

۶-۲-۳-استخراج پارامتر و تراکم اطلاعات ۴۸

۶-۲-۴-توسعه آماری مدل برای تفکیک مشخصه‌ها ۴۹

۷- فصل هفتم– مدلسازی المان محدود دکل سه بعدی و آنالیز مودال عددی بر مبنای آن ۵۲

۷-۱- انتخاب نرم افزار مناسب برای تحلیل مودال ۵۲

۷-۲- مدلسازی هندسی دکل ۵۲

۷-۲-۱-تعریف خصوصیات اجزا ۵۴

۷-۲-۲-تعریف شرایط مرزی ۵۵

۷-۲-۳-مشبندی مدل ۵۵

۷-۳- آنالیز مودال عددی دکل ۵۶

۷-۴- ایجاد عیب در سازه ۵۶

۸- فصل هشتم- آنالیز مودال تجربی دکل بر مبنای ورودی - خروجی ۶۰

۸-۱- سیستمهای سخت افزاری و نرم افزاری مورد استفاده ۶۰

۸-۱-۱-سیستمهای سخت افزاری مورد استفاده ۶۰

۸-۱-۲-سیستمهای نرم افزاری مورد استفاده ۶۲

۸-۲- شرح آزمایش ۶۲

۸-۲-۱-آمادهسازی برای تست ۶۲

۸-۲-۲-داده برداری ۶۵

۸-۲-۳-ایجاد عیب در سازه ۶۶

۸-۲-۴-استخراج نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی ۶۶

۸-۲-۵-استخراج پارامترهای مودال از دادههای تابع پاسخ فرکانسی ۶۹

۹- فصل نهم- آنالیز مودال عددی و تجربی دکل بر مبنای فقط خروجی ۷۰

۹-۱- آمادهسازی دکل جهت انجام تست ۷۰
۹-۲- استخراج فرکانسهای طبیعی ۷۰
۹-۳- تشخیص عیب با استفاده از طبقه بند نزدیکترین همسایه ۷۳

۱۰-فصل دهم- بررسی نتایج و بحث ۷۵

۱۰-۱-نتایج بدست آمده از آنالیز مودال عددی ۷۵
۱۰-۲-نتایج بدست آمده از تست تجربی بر مبنای ورودی - خروجی ۷۵
۱۰-۳-نتایج بدست آمده از آنالیز مودال تجربی بر مبنای فقط خروجی ۷۶
۱۰-۴-بررسی نتایج و تشخیص وجود عیب ۷۶

۱۱-جمعبندی ۸۰

۱۲- پیشنهادات ۸۱

۱۳-منابع و مراجع ۸۲

فهرست نمادهای انگلیسی

A:	ماتریس مربعی
A_r و B_r و R_k:	باقیمانده
B:	ماتریس متقارن
C:	ماتریس میرایی
D:	ماتریس مختلط $m \times n$
E:	بردار خطا
F_j:	ورودی در درجه آزادی j
$F(\omega)$:	اطلاعات فرکانسی سیگنال ورودی
$G_{xx}(\omega)$:	ماتریس چگالی طیفی توان ورودی
$G_{yy}(\omega)$:	ماتریس چگالی طیفی توان خروجی
$H(\omega)$:	تابع پاسخ فرکانسی
I:	ماتریس همانی
J:	خطای انحراف کلی
K:	ماتریس سفتی
M:	ماتریس جرمی
P_r:	قطب مود r
$R_{ff}(\tau)$:	تابع خودهمبستگی ورودی f
$R_{xx}(\tau)$:	تابع خودهمبستگی خروجی x
R_{fx}و R_{xf}:	تابع همبستگی متقاطع ورودی f و خروجی x
S_{ff}:	تابع چگالی طیفی توان ورودی
S_{xx}:	تابع چگالی طیفی توان خروجی
S_{fx} و S_{xf}:	تابع چگالی طیفی متقاطع ورودی f و خروجی x
T:	ماتریس سه قطری
U و V:	ماتریس‌های متعامد بردارهای تکین
X:	جابه‌جایی
$X(\omega)$:	اطلاعات فرکانسی‌سیگنال خروجی
X_i:	خروجی در درجه آزادی i
$\dot{X}$:	سرعت
$\ddot{X}$:	شتاب
$Z(\omega)$:	تابع امپدانس
d_k:	فاکتور مقیاس
e_j:	تابع خطا
e'_j:	تابع خطای اصلاح شده
f (t):	محرک خارجی
q_i:	بردار Lanczos
s_i:	مقدار تکین
u:	بردار جابه‌جایی‌های فیزیکی

فهرست نمادهای یونانی

Φ:	ماتریس بردارهای تکین
Σ:	ماتریس قطری مقادیر تکین
ϕ:	بردار ویژه
λ:	مقدار ویژه
σ:	میرایی مودال
ω:	فرکانس
ξ:	نسبت میرایی
$\gamma^2_{fx}(\omega)$	تابع وابستگی
ω_{dk}:	فرکانس طبیعی میرایی مود kام
λ_k:	قطب مود kام
ζ_i:	جابه‌جایی مودال i ام
ϕ_i:	شکل مود i ام

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: نمایی از دکل سه بعدی مورد نظر برای تحقیق ۶
شکل ۷-۱: مدل المان محدود سازه سالم ۵۴
شکل ۷-۲: مدل المان محدود سازه معیوب ۵۷
شکل ۷-۳: شکل مودهای سازه سالم حاصل از حل عددی ۵۹
شکل ۷-۴: شکل مودهای سازه معیوب حاصل از حل عددی ۵۹
شکل ۸-۱: محل نصب شتابسنجها بر دکل ۶۴
شکل ۸-۲: چینش تجهیزات آزمایش آنالیز مودال ۶۵
شکل ۸-۳: توابع پاسخ فرکانسی برای سازه سالم ۶۷
شکل ۸-۴: توابع پاسخ فرکانسی برای سازه معیوب ۶۷
شکل ۸-۵: تابع وابستگی برای سازه سالم ۶۸
شکل ۸-۶: تابع وابستگی برای سازه معیوب ۶۸
شکل ۹-۱: شمارهگذاری ستونهای دکل ۷۱
شکل ۹-۲: نمودار مقادیر تکین برای سه شتابسنج نصب شده بر روی ستون ۱ برای سازه سالم ۷۱
شکل ۹-۳: نمودار مقادیر تکین برای سه شتابسنج نصب شده بر روی ستون ۱ برای سازه معیوب ۷۲
شکل ۹-۴: نمودار لگاریتمی مقادیر تکین برای سه شتابسنج نصب شده بر روی ستون ۱ برای سازه سالم ۷۲
شکل ۹-۵: نمودار لگاریتمی مقادیر تکین برای سه شتابسنج نصب شده بر روی ستون ۱ برای سازه معیوب ۷۲

فهرست جداول

جدول ۴-۱: روشهای تخمین پارامترهای مودال بر اساس ورودی-خروجی در حوزه فرکانسی ۳۶

جدول ۴-۲: روشهای تخمین پارامترهای مودال بر اساس ورودی-خروجی در حوزه زمانی ۳۷

جدول ۵-۱: روش های تخمین پارامترهای مودال بر اساس فقط خروجی ۴۱

جدول ۷-۱ مشخصات مکانیکی دکل ۵۴

جدول ۷-۲: فرکانسهای طبیعی دکل سالم بر حسب هرتز.....۵۷

جدول ۷-۳: فرکانس‌های طبیعی دکل معیوب بر حسب هرتز.....۵۸

جدول ۸-۱: سیستمهای سختافزاری مورد استفاده در تستها همراه با مشخصات آنها ۶۱

جدول ۸-۲: فرکانسهای طبیعی (هرتز) دکل با استفاده از تست مودال بر مبنای ورودی - خروجی.....۶۹

جدول ۹-۱: فرکانسهای طبیعی (هرتز) دکل سالم و معیوب با استفاده از آنالیز مودال بر مبنای فقط خروجی ...۷۳

جدول ۹-۲: نتایج حاصل از طبقه‌بند نزدیکترین همسایه با استفاده از SVD ها.....۷۳

جدول ۹-۳: نتایج حاصل از طبقه‌بند نزدیکترین همسایه با استفاده از فرکانس‌های طبیعی.....۷۴

جدول ۱۰-۱: فرکانس‌های طبیعی (هرتز) دکل سالم و معیوب بدست آمده از روش‌های مختلف.....۷۷

بخش اول

مقدمه و پیشینه پژوهش

فصل اول- مقدمه

آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، نسبت میرایی و شکل مودها و به‌کارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم می‌باشد. این مدل ریاضی، مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند.

آنالیز مودال بر این اصل استوار است که پاسخ ارتعاشی یک سیستم دینامیکی خطی و نامتغیر با زمان را می‌توان به صورت ترکیب خطی مجموعه‌ای از حرکات هماهنگ ساده، که به شکل مودهای ارتعاشی موسومند، در نظر گرفت. این مفهوم، مشابه استفاده از ترکیب فوریه امواج سینوسی و کسینوسی برای نمایش یک شکل موج پیچیده می‌باشد. شکل مودهای ارتعاشی، وابسته به دینامیک سیستم بوده و توسط خواص فیزیکی (جرم، سفتی، میرایی) و نحوه توزیع فضایی آنها، تعیین می‌شوند. هر مود بر حسب پارامترهای مودال همان مود شامل فرکانس طبیعی، نسبت میرایی مودال و الگوی جابجایی در آن مود، که شکل مود نامیده می‌شود، توصیف می‌شود. شکل مود ممکن است حقیقی و یا موهومی باشد. هر مود، متناظر با یک فرکانس طبیعی می‌باشد. میزان مشارکت هر مود طبیعی در ارتعاش کلی سیستم، به مشخصات منبع تحریک و همچنین به شکل مود مربوطه بستگی دارد.

آنالیز مودال، هر دو مبحث تئوری و تجربی را در بر می‌گیرد. آنالیز مودال تئوری، بر اساس یک مدل فیزیکی از سیستمی دینامیکی شامل خواص جرمی، سفتی و میرایی می‌باشد. این خواص ممکن است به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای موجود باشند. به عنوان مثال، معادله موج یک تار یکنواخت مرتعش با توجه به توزیع جرمی و خواص ارتجاعی تار حاصل می‌شود. از حل این معادله، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای تار و همچنین پاسخ ارتعاش اجباری آن به دست می‌آید. با این حال، یک مدل فیزیکی واقعی‌تر معمولاً شامل خواص جرم، سفتی و میرایی بر حسب توزیع فضایی آنها یعنی ماتریس‌های جرم، سفتی و میرایی خواهد بود. این ماتریس‌ها معادلات دیفرانسیل معمولی حرکت را

تشکیل می‌دهند. با استفاده از اصل برهم‌نهی سیستم‌های دینامیکی خطی، قادر خواهیم بود این معادلات را به یک مسأله مقدار ویژه تبدیل کنیم. از حل این مسأله، اطلاعات مودال سیستم حاصل خواهد شد. به کمک تحلیل المان محدود مدرن می‌توان تقریبا هر سازه دینامیکی خطی را گسسته‌سازی کرد که در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای قابلیت و میدان کاری آنالیز مودال تئوریک افزایش یافته است. از سوی دیگر، گسترش سریع توانایی‌های داده‌برداری و پردازش داده‌ها، در دو دهه اخیر باعث پیشرفت‌های زیادی در عرصه آنالیز مودال تجربی، که تست مودال نامیده می‌شود، شده است.

در سال های اخیر، روش جدیدی در کاربرد آنالیز مودال ظهور کرده است. این روش آنالیز مودال محیطی[۱](OMA) یا آنالیز مودال بر مبنای فقط خروجی[۲] نامیده می شود. به نظر می رسد صنعت در این خصوص بر روی لبه دوران جدیدی ایستاده است که به کاربردهای جدید به منظور فعالیت‌های حرفه‌ای در حوزه صوت و ارتعاشات می پردازد.

آنالیز مودال تجربی[۳](EMA) از ورودی (تحریک) و خروجی (پاسخ) به منظور تخمین پارامترهای مودال استفاده می‌کند. این پارامترها شامل، فرکانس‌های مودال، ضرایب میرایی، شکل مودها و فاکتورهای مشارکت‌پذیری مودال می‌باشند. در هر حال آنالیز مودال کلاسیک دارای برخی محدودیت‌ها است:

۱- در آنالیز مودال کلاسیک معمولاً از تحریک مصنوعی به منظور اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی[۴](FRF) یا توابع پاسخ ضربه[۵](IRF) استفاده می‌شود. بسیار مشکل یا حتی غیرممکن می‌باشد که این توابع را در فضای تست یا در سازه‌های بزرگ محاسبه نمود.

۲- آنالیز مودال کلاسیک به محیط آزمایشگاه محدود می‌شود. در هر حال در بسیاری از

[۱] Operational Modal Analysis
[۲] Output Only Modal Analyisis
[۳] Emprical Modal Analysis
[۴] Frequency Response Function
[۵] Impulse Response Function

کاربردهای صنعتی، شرایط عملی واقعی به وضوح، متفاوت از شرایطی است که در آزمایشگاه وجود دارد.

۳- اغلب در آزمایشگاه یک ترکیب بـه جـای سیسـتم کامـل تسـت مـی شـود، و شـرایط مـرزی می‌بایست به شکل قابل قبولی شبیه‌سازی شود.

۴- غیرخطی بودن بسیاری از سیستم‌ها و سختی ایجاد تحریک چنین سیستم‌هایی.

در روزهای نخستین که محققین کار خود را در حوزه آنالیز مودال آغاز کردند، ایده OMA و اینکه چگونه می‌توان در مواردی که ورودی‌ها دقیقا شناخته شده نیستند، اطلاعات مودال را به دست آورد، در کلیه تفکرات وجود داشت. محققان از این مسأله آگاهی یافته‌انـد و بسـیاری از مقـالات قـدیمی بـا ایـن نمونه‌ها سروکار داشتند. بحث‌ها در خصوص ورودی‌ها شروع شد و این نتیجه حاصل شد که بـا دانسـتن ورودی‌ها دیگر نیاز به تخمین آنها نیست. در ادامه محققـین در مـورد SISO[۱]، SIMO[۲] و MIMO[۳] (یـک ورودی یک خروجی، یک ورودی چند خروجی و چند ورودی چند خروجی) بحث کردند. در این فرآینـد OMA به جز در موارد اندکی که با سازه های بزرگ سروکار داشته‌اند، مورد فراموشی واقع شـد. از آغـاز دهه ۱۹۷۰ تا اواخر دهه ۱۹۹۰ برخی پیشرفت‌ها در زمینه OMA اتفاق افتاد، امـا در کـاربرد بـا شکسـت مواجه شد؛ اما اینکه دلیل این شکست چه بود، شاید به این دلیل بود که صنعت دچار فقـدان تجهیـزات قابل‌قبول بود.

در حوالی سال ۲۰۰۰ میلادی شرکت‌های نرم‌افزاری مختلف شروع به توسعه ابزارهای مختلف برای OMA کردند و کم‌کم به نقطه‌ای رسید که اکنون OMA به یک تکنولوژی قابل‌قبول تبدیل شده اسـت. اکنون کنفرانس‌های فراوانی وجود دارند که منحصرا به این موضوع پرداخته‌اند و نرم‌افزارهـای گونـاگونی در این زمینه وجود دارد.

از جمله مزیت‌های OMA را می‌توان چنین نام برد:

[۱] Single Input Single Output
[۲] Single Input Multi Output
[۳] Multi Input Multi Output

۱- OMA ارزان است و با سرعت زیادی انجام می‌گیرد؛ زیرا به تجهیزات پیچیده تحریک و شرایط مرزی شبیه‌سازی شده نیاز ندارد.

۲- مشخصه‌های دینامیکی سیستم کامل به جای ترکیب در نقاط بیشتری به دست می‌آید.

۳- مشخصه‌های مدل تحت بارگذاری واقعی در تحریکات با باند تصادفی پهن خطی خواهد بود.

۴- تمامی و یا بخشی از نقاط می‌تواند به عنوان مرجع استفاده شود؛ بنابراین الگوریتم مورد استفاده برای OMA می‌بایست از نوع MIMO باشد. در نتیجه مودهای نزدیک هم یا حتی مودهای تکراری به راحتی تشخیص داده می‌شوند که برای سازه‌های واقعی مختلط مناسب می‌باشد.

۵- OMA نه تنها برای طراحی دینامیکی و کنترل سازه‌ها بلکه برای عیب‌یابی، نظارت بر درستی و طول عمر سازه‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶- سازه‌های بزرگ نظیر پل‌ها و ساختمان‌ها می‌توانند توسط نیروی باد، بار ترافیکی و امواج صوتی تحریک شوند و در سیستم‌های مکانیکی نظیر خودروها، تحریک میتواند بارگذاری آیرودینامیکی، تحریک تجهیزات خود سیستم، ارتعاشات ناشی از جاده و ریل باشد، OMA از این نیروها برای تحریک سازه استفاده می‌کند، و به کمک میانگین‌گیری و یا فیلترینگ سعی در حذف نویزهای محیطی می‌کند.

۷- OMA خصوصیات مودال سیستم را در حین کار به دست می‌آورد. حتی اگر سیستم را بتوان در شرایط آزمایشگاه قرارداد و EMA را بر روی آن بررسی کرد باز هم نمی‌توان، حتی با تحریک هوشمندانه تحریکی همراه با اغتشاش، سطح و نوع تحریکات موجود در محل کار را ایجاد کرد.

۸- بیشتر سیستم‌ها از خود، خواص غیرخطی نشان می‌دهند، بنابراین خصوصیات مودال به دست آمده از روش EMA نمی‌تواند ارتباط دقیقی با آن خصوصیات در محیط کاری داشته باشد، بنابراین آنها را خصوصیات مودال کاری می‌نامند، که دارای اهمیت بسیاری می‌باشد.

سیستمی که در این تحقیق مورد نظر است یک سازه دکل سه بعدی است که در شکل زیر نمایی

از آن نشان داده شده است.

شکل ۱-۱: نمایی از دکل سه بعدی مورد نظر برای تحقیق

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌نمایید، با توجه به آنکه ابعاد پایه دکل مورد نظر نسبت به پایه بتونی موجود در آزمایشگاه بزرگ بود برای آنکه بتوان این دکل را روی پایه بتونی مدنظر ثابت کرد، بر روی یک صفحه فلزی با ابعادی کمی بزرگتر از پایه‌های دکل و ضخامتی برابر با یک سانتیمتر جوش داده شده و سپس دکل به همراه صفحه فلزی بر روی پایه بتونی بسته شده است.

در بخش اول مطالعاتی که از گذشته تا به امروز بر روی موضوعات مشابه انجام شده را به طور خلاصه ذکر می‌کنیم، در بخش دوم تئوری روش‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر مطرح خواهد شد، سپس در بخش سوم مدل‌سازی‌ها و تست‌های انجام شده به طور کامل شرح داده شده و در مورد نتایج استخراج شده بحث و در پایان پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

فصل دوم- پیشینه پژوهش

در این فصل به دلیل اهمیت موضوع المان محدود در این تحقیق، ابتدا در قسمت (۲-۱) تاریخچه‌ای از توسعه المان محدود مطرح می‌شود، سپس در قسمت (۲-۲) تاریخچه‌ای از توسعه آنالیز مودال کلاسیک را بیان کرده و در قسمت (۲-۳) تاریخچه توسعه آنالیز مودال بر مبنای فقط خروجی و مهم‌ترین روش‌های موجود در این حیطه بیان می‌شود.

۲-۱- تاریخچه توسعه المان محدود [۱]

روش المان محدود امروزه یکی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین قسمت‌های طراحی و آنالیز مهندسی می‌باشد و انتظار می‌رود که بیش از این نیز مورد استفاده قرار بگیرد. این روش به صورت وسیعی در شاخه‌های مختلف مهندسی برای آنالیز سازه‌ها، جامدات، سیالات و انتقال حرارت به کار برده می‌شود و حقیقتا روش المان محدود در تمام شاخه‌های آنالیز مهندسی سودمند می‌باشد.

توسعه روش المان محدود برای حل مسائل عملی مهندسی، با ظهور کامپیوترهای دیجیتالی آغاز شد. اساس حل یک مسأله مهندسی با استفاده از المان محدود بدین صورت است که یک سری از معادلات جبری حاکم بر مسأله استخراج شده و حل می‌شوند و این فقط به واسطه استفاده از کامپیوترهای دیجیتالی بود که این فرایند توانست به صورت مؤثری به کار گرفته شده و به صورت عمومی قابلیت اجرا داشته باشد. این دو خاصیت (کارایی و قابلیت اجرا به صورت عمومی در آنالیزهای مهندسی) اساس تئوری مورد استفاده است که برای محاسبات عملی تا مراتب بالاتر توسعه یافته است و سبب شده است به صورت وسیعی در مسائل مهندسی به این روش رجوع گردد.

با توجه به این که این روش غالب اوقات موضوعی با پیشرفت ابتکاری بوده است، اعلام تاریخ دقیق ابداع این روش مشکل می‌باشد، ولی ریشه‌های روش المان محدود را می‌توان در سه گروه تحقیقاتی جداگانه ردیابی کرد: ۱- ریاضیات کاربردی (توسط کورانت[۱] در سال ۱۹۴۳ [۲])، ۲- فیزیک (توسط

[۱] R. Courant