

شماره صفحه	عنوان
1	چکیده
2	فصل اول: مقدمه
5	فصل دوم: معرفی توابع پاسخ فرکانسی
5	1-2- آنالیز ارتعاشی سازه
5	1-1-2- مسیر تئوری یک آنالیز ارتعاشی
9	2-1-2- مسیر تجربی یک آنالیز ارتعاشی
13	2-2- صورت های مختلف FRF
15	1-2-2- اشکال مختلف نمایش FRF
15	1-1-2-2- دیاگرام بود
16	2-1-2-2- دیاگرام نایکوئیست
17	3-1-2-2- دیاگرام حقیقی و موهومی
18	فصل سوم: مروری بر تحقیقات انجام گرفته در زمینه عیب یابی سازه ها
18	1-3- توسعه کشف آسیب ساختاری مبنی بر ارتعاشات

- 22 3-1-1-1- کشف آسیب ساختمانی مبنی بر ارتعاشات نوع سنتی (TTDD)
- 23 3-1-1-1- روش TTDD مبنی بر تغییر فرکانس طبیعی
- 25 3-1-1-2- روش TTDD مبنی بر تغییر مود ارتعاشی ساختمانی
- 28 3-1-1-3- روش TTDD مبنی بر تغییر سختی یا انعطاف ساختمانی
- 29 3-1-1-4- روش TTDD مبنی بر تغییر تابع پاسخ فرکانسی
- 31 3-1-1-5- روش TTDD مبنی بر اطلاعات آماری
- 32 3-1-1-6- روش TTDD مبنی بر جریان برق
- 33 3-1-2- انواع روش های جدید کشف آسیب ساختمانی مبنی بر ارتعاشات
- 33 3-1-2-1- روش تحلیل ویولت
- 36 3-1-2-2- روش شبکه عصبی (Neural Network)
- 41 3-1-2-3- روش ژنتیک الگوریتم
- 44 3-2- مسير توسعه تکنولوژی کشف آسیب ساختمانی
- 45 **فصل چهارم: تئوری های به کار رفته برای عیب یابی**
- 45 4-1- تئوری ترک
- 45 4-1-1- پارامترهای فیزیکی تاثیر گذار بر مشخصه های دینامیکی سازه ترک دار
- 46 4-1-2- دسته بندی ترک ها

47	3-1-4- مودهای شکست
47	1-3-1-4- مود اول
48	2-3-1-4- مود دوم
48	3-3-1-4- مود سوم
49	4-1-4- ضریب شدت تنش $k$ (SIF)
49	5-1-4- ماتریس سختی تیردارای ترک
54	2-4- روش DQM
54	1-2-4- مقدمه
54	2-2-4- روش اصلی DQ
55	1-2-2-4- محاسبه ضرایب وزنی: $(W_{ij})$
55	4-2-2-2- تابع تست
56	3-2-2-4- روش اول بلمن
57	4-2-2-4- روش دوم بلمن
58	3-2-4- روش GDQ
60	1-3-2-4- محاسبه ضرایب وزنی مشتق دوم و مشتق بالاتر
61	2-3-2-4- بسط روش GDQ برای مسائل دوبعدی

- 61 4-2-4- HDQ روش
- 63 4-2-4-1- نحوه انتخاب نقاط گره ای
- 64 4-3- کشف آسیب
- 64 4-3-1- کشف آسیب با استفاده از معیار اطمینان بردار پاسخ
- 67 4-3-1-1- مکان یابی آسیب با استفاده از معیار اطمینان بردار پاسخ
- 68 4-3-1-2- مکان یابی آسیب با استفاده از انحنای تغییرات شکل محیطی
- 68 4-3-2- مکان یابی آسیب به روش ریشه انحراف میانگین مربع
- 69 4-4- ویژگی های معیار های استفاده شده
- 70 **فصل پنجم: شبیه سازی و آزمایش انجام شده در مورد عیب یابی**
- 70 5-1- مقدمه
- 71 5-2- نتایج شبیه سازی تغییر پارامترهای مودال
- 71 5-2-1- نمونه هایی از توابع پاسخ فرکانسی در دو حالت آسیب دیده و سالم
- 73 5-2-2- نمونه هایی از فرکانس های طبیعی به دست آمده در دو حالت آسیب دیده و سالم
- 74 5-2-3- نمونه هایی از شکل مودهای به دست آمده در دو حالت آسیب دیده و سالم
- 76 5-3- نتایج شبیه سازی مکان یابی آسیب
- 76 5-3-1- نتایج شبیه سازی مکان یابی آسیب با استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی

83	5-3-2- نتایج شبیه سازی مکان یابی آسیب با استفاده معیار RMSE
90	5-3-3- مقایسه نتایج شبیه سازی مکان یابی آسیب با استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی و معیار اطمینان بردار پاسخ
96	5-3-4- نتایج شبیه سازی مکان یابی آسیب با تعداد نقاط اندازه گیری محدود
97	5-3-4-1- استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در نقاط اندازه گیری محدود
98	5-3-4-2- استفاده از معیار RMSE در نقاط اندازه گیری محدود
103	5-4-4- آزمایش انجام شده برای مکان یابی آسیب
104	5-4-1- مکان یابی آسیب با استفاده از معیار اطمینان بردار پاسخ
105	5-4-2- مکان یابی آسیب با استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی
106	5-4-3- استفاده از معیار RMSE برای مکان یابی آسیب
107	<b>فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
107	6-1- نتیجه گیری
108	6-2- پیشنهادات
110	<b>فهرست منابع</b>

## فهرست اشکال وجداول

شماره صفحه	عنوان
6	شکل (1-2): مسیر تئوری در یک آنالیز ارتعاشی
7	شکل (2-2): منحنی یک تابع پاسخ فرکانسی نمونه
10	شکل (3-2): قطعه نمونه تحت تحریک در نقطه A
10	شکل (4-2): تحریک و پاسخ قطعه به همراه توابع آن ها
11	شکل (5-2): منحنی تابع پاسخ فرکانسی (FRF)
12	شکل (6-2): مسیر تجربی یک آنالیز ارتعاشی
	شکل (7-2): دیاگرام FRF برای یک سیستم یک درجه آزادی نامیرا (a) Receptance و
15	Mobility(b) و Accelerance(c)
16	شکل (8-2): نمونه دیاگرام Bode برای یک FRF
16	شکل (9-2): یک نمونه نایکوئیست برای یک FRF
17	شکل (10-2): نمونه یک نمودار حقیقی و موهومی بر حسب فرکانس

- 35 شکل (3-1): شاخص آسیب ایجاد شده بر حسب شدت آسیب
- 39 شکل (3-2): صفحه ساندویچی لانه زنبوری با ترک
- 39 شکل (3-3): شبکه عصبی پس انتشار برای شناسایی پارامترهای ترک چندگانه
- 48 شکل (4-1): مود اول ترک
- 48 شکل (4-2): مود دوم ترک
- 49 شکل (4-3): مود سوم ترک
- 50 شکل (4-4): تیر یکسرگیردار با ترک عمق  $a$
- 52 شکل (4-5): شرایط تعادل المان دارای ترک
- 71 شکل (5-1): توابع پاسخ فرکانسی دردو حالت سالم و آسیب دیده
- 72 شکل (5-2): توابع پاسخ فرکانسی دردو حالت سالم و آسیب دیده
- 73 شکل (5-3): توابع پاسخ فرکانسی دردو حالت سالم و آسیب دیده
- 74 شکل (5-4): شکل مود اول سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده
- 75 شکل (5-5): شکل مود دوم سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده
- 75 شکل (5-6): شکل مود دوم سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده
- 76 شکل (5-7): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 77 شکل (5-8): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب

- 77 شکل (9-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 78 شکل (10-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 78 شکل (11-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 79 شکل (12-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 79 شکل (13-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 80 شکل (14-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 80 شکل (15-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 81 شکل (16-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 81 شکل (17-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 82 شکل (18-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 82 شکل (19-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 83 شکل (20-5): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 84 شکل (21-5): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 84 شکل (22-5): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 85 شکل (23-5): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 85 شکل (24-5): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب



- 86 شکل (5-25): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 86 شکل (5-26): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 87 شکل (5-27): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 87 شکل (5-28): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 88 شکل (5-29): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 88 شکل (5-30): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 89 شکل (5-31): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 89 شکل (5-32): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب
- 90 شکل (5-33): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 91 شکل (5-34): استفاده از انحناى تابع پاسخ فرکانسى در مکان یابی آسیب
- 91 شکل (5-35): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 92 شکل (5-36): استفاده از انحناى تابع پاسخ فرکانسى در مکان یابی آسیب
- 92 شکل (5-37): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 93 شکل (5-38): استفاده از انحناى تابع پاسخ فرکانسى در مکان یابی آسیب
- 93 شکل (5-39): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 94 شکل (5-40): استفاده از انحناى تابع پاسخ فرکانسى در مکان یابی آسیب

- 94 شکل (5-41): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 95 شکل (5-42): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 95 شکل (5-43): استفاده از معیار پیشنهادی Maia در مکان یابی آسیب
- 96 شکل (5-44): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب
- 97 شکل (5-45): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 97 شکل (5-46): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 98 شکل (5-47): استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 99 شکل (5-48): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 99 شکل (5-49): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 100 شکل (5-50): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 100 شکل (5-51): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 101 شکل (5-52): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 101 شکل (5-53): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 102 شکل (5-54): استفاده از معیار RMSE در مکان یابی آسیب با نقاط محدود
- 103 شکل (5-55): تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده از تست
- 104 شکل (5-56): آزمایش انجام شده برای مکان یابی آسیب

- 104 شکل (5-57): مکان یابی آسیب با استفاده از معیار پیشنهادی Maia
- 105 شکل (5-58): مکان یابی آسیب با استفاده از انحنای تابع پاسخ فرکانسی
- 106 شکل (5-59): مکان یابی آسیب با استفاده از معیار RMSE
- 14 جدول (2-1): تعریف هایی از توابع پاسخ فرکانسی
- 40 جدول (3-1): خروجی شبکه عصبی حقیقی و خروجی های تئوری مطابق با آسیب
- 73 جدول (5-1): فرکانس های طبیعی دو حالت سالم و آسیب دیده
- 74 جدول (5-2): فرکانس های طبیعی دو حالت سالم و آسیب دیده

## فهرست علائم

$X(t)$	سیگنال زمانی جابجایی سازه
$\dot{X}(t)$	سیگنال زمانی سرعت سازه
$\ddot{X}(t)$	سیگنال زمانی شتاب سازه
$F(t)$	سیگنال زمانی نیروی تحریک
$X_0$	دامنه سیگنال زمانی جابجایی
$F_0$	دامنه سیگنال زمانی نیروی تحریک
$w$	فرکانس دورانی
$jw$	فرکانس دورانی مختلط
$f$	فرکانس
$j$	اختلاف فاز
$R_{ii}$	خود همبستگی سیگنال زمانی $i$ (Auto Correlation)
$R_{ij}$	همبستگی عرضی دو سیگنال زمانی $i, j$ (Cross Correlation)
$S_{ii}$	طیف فرکانسی خود همبستگی سیگنال $i$ (Auto Spectrum)
$S_{ij}$	طیف فرکانسی همبستگی عرضی دو سیگنال $i, j$ (Cross Spectrum)

$H_i$	تخمین زننده تابع پاسخ فرکانسی
$k$	سختی
$m$	جرم
$c$	دمپینگ
$a(w)$	تابع پاسخ فرکانسی بر حسب جابجایی (Receptance)
$V(t)$	سیگنال زمانی سرعت سازه
$V_0$	دامنه سیگنال زمانی سرعت
$Y(w)$	تابع پاسخ فرکانسی بر حسب سرعت (Mobility)
$A_0$	دامنه سیگنال زمانی شتاب
$A(w)$	تابع پاسخ فرکانسی بر حسب شتاب (Accelerance)
$H(jw)$	ماتریس تابع پاسخ فرکانسی
$\{f\}$	بردار شکل مود
$[M]$	ماتریس جرم سازه
$[C]$	ماتریس دمپینگ سازه
$[K]$	ماتریس سختی سازه
$\{X\}$	بردار شتاب سازه

$\{\ddot{x}\}$	بردار سرعت سازه
$\{x\}$	بردار جابجایی سازه
$\{F(t)\}$	بردار نیروی وارد به سازه در حوزه زمان
$\alpha$	ضریب ماتریس جرم در دمپینگ متناسب
$\beta$	ضریب ماتریس سختی در دمپینگ متناسب

## چکیده

امروزه عیب یابی در سازه های انعطاف پذیر<sup>1</sup> یکی از زمینه های تحقیقاتی و مورد توجه صنعت می باشد. اگر نقص در اسکلت فلزی ساختمان ها، هواپیماها، مصنوعات پرنده، کشتیها و سازه های دریایی به موقع شناسایی و ترمیم نشود، احتمال فروریختن و عدم کارایی آن ها وجود دارد. استفاده از اطلاعات ارتعاشی مانند اطلاعات مودال تجربی<sup>2</sup>، مناسب ترین روش برای عیب یابی سازه های انعطاف پذیر می باشد. این روش یکی از روش های آزمایش غیر مخرب است.

هدف این پایان نامه، ارائه روشی برای عیب یابی سازه ها، از طریق اطلاعات مودال به ویژه تابع پاسخ فرکانسی می باشد. در این پایان نامه ضمن مروری بر پژوهش های گذشته، سعی شده است از روش مشتق گیری جدید مربع سازی دیفرانسیل<sup>3</sup> برای به دست آوردن انحناهای توابع پاسخ فرکانسی استفاده شود. سپس عیب یابی سازه، از طریق معیار اطمینان بردار پاسخ، با به کار بردن انحناهای تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده به روش DQM و ریشه انحراف میانگین مربع صورت می گیرد. هر دو روش بر روی دو مدل سازه تیر یکسر گیردار و دو سر گیردار در شبیه سازی به کار رفته است. نتایج شبیه سازی، دقت و کارایی هر دو روش را نشان می دهد. برای تصدیق نتایج شبیه سازی، یک تیر فولادی یک سر گیر دار آزمایش شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش نیز مطابق بر نتایج شبیه سازی می باشد.

## واژه های کلیدی

عیب یابی، روش DQM، معیار اطمینان بردار پاسخ، ریشه انحراف میانگین مربع

---

<sup>1</sup> -Flexible Structures

<sup>2</sup> -Modal Test data

<sup>3</sup> -Differential Quadrature Method

## فصل اول

### مقدمه

تا به حال تقاضاهای زیادی از طرف بخش صنعت برای روش های دقیق آزمایش غیرمخرب<sup>1</sup> مطرح بوده است. روش های آزمایش غیر مخرب برای یافتن نواقص و عیوب در صنعت کاربرد وسیعی دارند. از موارد شایع عیب یابی در صنعت، عیب یابی سازه های انعطاف پذیر می باشد. این سازه ها شامل اسکلت فلزی ساختمان ها و سازه های ساختمانی، هواپیماها، فضاپیماها، ماهواره ها و کلا وسایل پرنده و نیز اسکلت ساختمانی سکوهای استخراج نفت و گاز، دکل های حفاری و برج های پالایش پالایشگاه ها و اسکلت ساختمانی کشتی ها و سایر سازه های دریایی می باشند.

سازه های مذکور حین کارکرد در معرض خسارت هایی هستند که از ضربه ها و برخوردها و خستگی ناشی می شود. برخی سازه ها در معرض محیط خورنده قرار دارند، مواد کامپوزیتی ورقه ورقه می شوند و سازه های فضایی به علت حضور طولانی در فضا تحت تاثیر اثرات محیطی همچون تغییرات دما، تشعشعات حرارتی و فرابنفش قرار گرفته و دچار ضایعات در مواد ساختمانی یا ترک خوردگی می شوند. این مورد علاوه بر شکستهای ناشی از برخورد اشیای فضایی است. به طور کلی امکان شکست یا ترک خوردگی در اجزای ساختمانی یک سازه انعطاف پذیر وجود دارد. اگر نقص های سازه ترمیم نشود، گسترش پیدا کرده و خود موجب خسارت دیگر می شود.

---

<sup>1</sup>-Non Destructive Techniques



بنابراین اجزای سازه پس از مدتی خراب شده و از کار می‌ایستند. لذا هر لحظه احتمال فروریختن سازه یا توقف عملیات ماشینی آن سازه وجود دارد. مهم‌ترین نکته مثلاً در مورد مصنوعات پرنده، این خرابی‌ها امنیت پرواز را تهدید می‌کند. لذا یافتن نقص سازه‌ها و ماشین‌ها حداقل در زمانی که در مدار کارکرد نیستند (off-line)، ضرورت دارد. روش‌های آزمایش غیرمخرب عبارتند از عکس برداری به کمک اشعه x (x-ray)، آزمایش اولتراسونیک، تشدید مغناطیسی<sup>1</sup> یا (MRI)، روش‌های اپتیکی (optical) و بالاخره بازرسی چشمی. اما مشکل این روش‌ها این است که زمان بروموضعی می‌باشند. استفاده از این روش‌ها احتیاج به دسترسی بازرسی به موارد تحت آزمایش و بازبودن مورد برای بازرسی دارد. همچنین تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌های فوق مفصل است. لذا استفاده از این روش‌ها برای آزمایش غیرمخرب سازه‌ها و همچنین ماشین‌آلات صنعتی عظیم با اجزای ساختمانی متعدد که تعداد زیادی از آن‌ها در دسترس نیستند امری غیر ممکن می‌باشد. بنابراین توجه پژوهشگران به استفاده از یک روش عمومی، مثل استفاده از علائم ارتعاشی سیستم برای یافتن نقص در سازه‌ها و ماشین‌آلات بزرگ صنعتی و برای بازیابی عملکرد ماشین‌آلات صنعتی جلب می‌شود. فلسفه استفاده از علائم ارتعاشی در نقص‌یابی دستگاه‌ها و ساختمان‌های انعطاف پذیر این است که اکثر نواقص در یک عضو مانند ترک خوردگی باعث کاهش مشخصات هندسی آن عضو مانند سطح مقطع و ممان اینرسی سطح، یا کاهش خواص ماده مانند مدول الاستیسیته و جرم حجمی و ضریب پواسون می‌شود. لذا کاهش خواص و مشخصات فوق در یک مقطع از عضو، کاهش سختی در آن مقطع را باعث می‌شود. این بدان معنی است که از نقطه نظر اجزای محدود در موضعی از ماتریس سختی کل عضو، کاهش در مولفه‌های ماتریس سختی ظاهر می‌گردد. در نتیجه علائم ارتعاشی چون نمودار تابع پاسخ فرکانسی یا پارامترهای مودال جابه‌جا می‌شوند. حسن استفاده از علائم و داده‌های ارتعاشی برای نقص‌یابی در این است که احتیاجی به دسترسی مستقیم برای اجزای ساختمانی سازه یا ماشین نیست و نیز بایک آزمایش مودال به شرط قرارداد سنسورهای اندازه‌گیری در نقاط مناسب می‌توان از سلامت همه اجزا اطلاع حاصل کرد.

---

<sup>1</sup> - Magnetic Resonance Imaging

علت پایه ریزی نظریه هایی که سعی می کنند عیب را از طریق اطلاعات تجربی مودال مورد جستجو قرار دهند آن است که هرگونه عیب مانند شکست یا مواردی که قبلا اشاره شد، موجب تغییرات کمی در مدل اجزای محدود سازه می گردد. اگر ابعاد تخریب محدود باشد و شکل کلی سازه را عوض نکند، تغییرات کمی در مدل به وجود خواهد آمد. لذا روش عیب یابی سازه به وسیله اطلاعات مودال از طریق تصحیح مدل اجزای محدود نیز صورت می گیرد. فرض کنید مدل تصحیح شده اجزای محدود یک سازه واقعی در دسترس باشد. در این زمان پارامترهای مودال تجربی و تحلیلی بایکدیگر موافقت می کنند. این نتیجه تصحیح مدلی است که قبلا صورت گرفته است. حال ناگهان در اثر خستگی یا برخورد، شکستگی در سازه رخ می دهد و در نتیجه خواص مودال جابه جا می شوند. عملکرد الگوریتم های تصحیح مدل آن است که به گونه ای ماتریس های خواص سازه مثلا ماتریس سختی را تغییر می دهند که خواص مودال تجربی و تحلیلی مجددا باهم وفق پیدا کنند. از بررسی محل تغییرات در ماتریس خواص (سختی) می توان به محل شکست پی برد. همچنین مقدار عددی این تغییرات می تواند نمودار میزان تخریب باشد. بنابراین می بینیم که این روش ها نیز اشکالاتی، همانند احتیاج به مدل تحلیلی یا عددی و شناسایی پارامترهای مودال را دارند. در این پایان نامه از توابع پاسخ فرکانسی برای عیب یابی استفاده شده است.

در فصل سوم به طور مفصل روش های موجود در عیب یابی را با ارائه برخی از روابط و مزایا و معایب آن ها مورد بحث قرار دادیم. در فصل چهارم به بسط و افزایش معادلات و روابط برای به دست آوردن ماتریس سختی المان ترک دار و توضیح استفاده از روش DQM و بحث در مورد روش های عیب یابی استفاده شده می پردازیم. اساس بحث بر روابط محاسبه انحنای توابع پاسخ فرکانسی با استفاده از روش DQM استوار است. در فصل پنجم به بحث در مورد نتایج به دست آمده از شبیه سازی می پردازیم. با استفاده از انحنای به دست آمده با این روش و استفاده از شاخص های قبلی و تصحیح آن ها و نیز معرفی شاخص جدید، مکان آسیب را با دقت بالا شناسایی می کنیم. سپس آزمایش تجربی طراحی شده برای مکان یابی آسیب را ارائه می کنیم و در فصل ششم به نتیجه گیری از اطلاعات به دست آمده می پردازیم.

## فصل دوم

### معرفی توابع پاسخ فرکانسی

#### 2-1-1- آنالیز ارتعاشی سازه

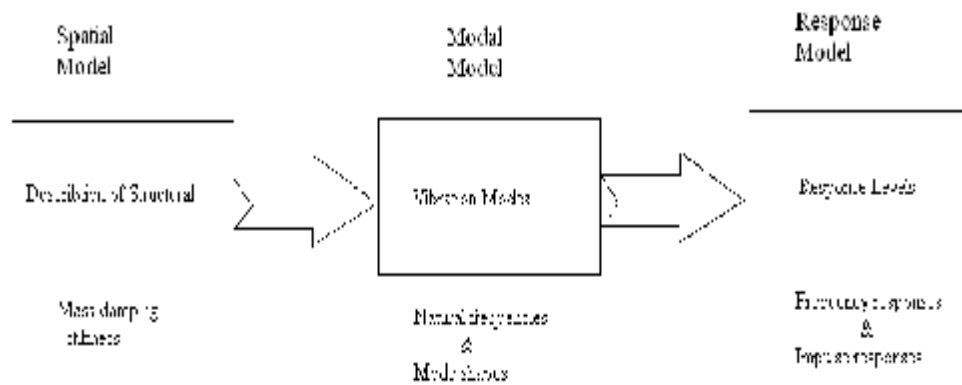
به طور کلی آنالیز ارتعاشی یک سازه از دو روش قابل بررسی است: (1) روش تئوری

(2) روش تجربی

#### 2-1-1- مسیر تئوری یک آنالیز ارتعاشی

مراحل مختلف آنالیز مودال در شکل (2-1) نشان داده شده است، که سه مرحله گوناگون از

یک آنالیز ارتعاشی نمونه را نشان می دهد.



شکل (1-2) مسیر تئوری در یک آنالیز ارتعاشی

به طور کلی، در یک مدل فضایی<sup>1</sup>، خصوصیات فیزیکی سازه به صورت بخش هایی از جرم، سختی و میرایی<sup>2</sup> تقسیم بندی می شود. با بکار بردن تئوری مودال بر روی مدل فضایی، رفتار دینامیکی سازه به صورت یک سری از مودهای ارتعاشی بیان می گردد. این شکل مدل به مدل مودال<sup>3</sup> معروف می باشد. این مدل به صورت یک سری از فرکانسهای طبیعی همراه با ضرایب میرایی مربوطه و شکل مودهای ارتعاشی می باشد. دانستن این مساله حائز اهمیت است که این مدل همیشه بیان کننده ی ارتعاشات آزاد بدون هیچگونه نیرو یا تحریک خارجی را شرح می دهد و خروجی آن مودهای طبیعی یا نرمال سازه می باشند. مرحله سوم به بررسی پاسخ سازه می پردازد و توابع پاسخ فرکانسی<sup>4</sup> یا توابع پاسخ ضربه ای<sup>5</sup> را محاسبه می کند. مدل پاسخ شامل یک سری از توابع پاسخ فرکانسی می باشد که باید بر روی یک بازه فرکانسی تعریف شوند. لذا در خلال آنالیز باید به این سه مرحله و سه نوع مدل فضایی، مودال و پاسخ توجه داشت.

<sup>1</sup> -Spatial model

<sup>2</sup> -Damping

<sup>3</sup> -Modal model

<sup>4</sup> -Frequency Response Functions (FRFs)

<sup>5</sup> -Impulse Response Functions (IRFs)