به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

آنالیز مودال عملیاتی در حضور تحریک‌های هارمونیک

پایان‌نامه دکتری مهندسی مکانیک

محمد حسن مسجدیان

استاد راهنما

دکتر مهدی کشمیری

۱۳۹۱

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه‌ی دکتری رشته‌ی مهندسی مکانیک آقای محمد حسن مسجدیان

تحت عنوان

آنالیز مودال عملیاتی در حضور تحریک‌های هارمونیک

در تاریخ ۹۱/۱۲/۲۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهدی کشمیری
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر سعید ضیائی‌راد
۳- استاد داور	دکتر حمید مهدیقلی
۴- استاد داور	دکتر علیرضا آریایی
۵- استاد داور	دکتر حمیدرضا میردامادی
۶- استاد داور	دکتر حسن نحوی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

تقدیم به:

همسرم،

...

بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای گرانقدر جناب آقای دکتر کشمیری که بدون حمایت و همراهی ایشان قادر به تکمیل این رساله نبودم، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ پیشگفتار ۲

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده ۶

۱-۲-۱ مروری بر روش‌های *OMA* ۶

۱-۲-۲ *OMA* در حضور تحریک‌های هارمونیک ۱۳

۱-۲-۳ استفاده از *OMA* در کاربردهای مختلف ۱۴

۱-۳ تعریف مسئله ۱۶

۱-۴ ساختار پایان نامه ۱۸

فصل دوم: فرایندهای تصادفی

۲-۱ متغیرهای تصادفی ۱۹

۲-۲ فرایندهای تصادفی در حوزه زمان ۲۶

۲-۳ فرایندهای تصادفی در حوزه فرکانس ۳۱

۲-۴ تخمین پارامترهای فرایندهای تصادفی در حوزه زمان ۳۵

۲-۵ تخمین فرایندهای تصادفی در حوزه فرکانس ۳۸

فصل سوم : مبانی ریاضی روش‌های *OMA* برای کاربرد در ماشین‌های دوار

۳-۱ مقدمه ۴۱

۳-۲ روش تبدیل حوزه فرکانس *(FDD)* ۴۲

۳-۲-۱ پیش زمینه تئوری ۴۲

۳-۲-۲ الگوریتم تخمین پارامترهای مودال ۴۴

۳-۲-۳ شناسایی هارمونیک‌ها ۴۵

۳-۲-٤ روش *EFDD* ۴۵

۳-۲-۵ روش *CFDD* ۴۷

۳-۳ روش بهبود یافته *MCFDD* ۴۸

۳-۴ روش *SSI* ۵۱

۳-٤-۱ فرمولاسیون زمان گسسته ۵۱

۳-۴-۲ ماتریس بلوک هنکل ۵۳

۳-٤-۳ تصویر کردن ۵۴

۳-٤-٤ حالت‌های کالمن ۵۵

۳-٤-۵ تخمین ماتریس سیستم ۵۶

۳-٤-٦ آنالیز مودال ۵۶

عنوان **صفحه**

فصل چهارم: روش‌های شناسایی و تفکیک اجزای هارمونیک

۴-۱ مقدمه ۵۹

۴-۲ روش‌های جداسازی سیگنال ۶۰

۴-۲-۱ روش تقویت‌کننده هارمونیک وفقی *(ALE)* ۶۲

۴-۲-۲ روش *ALE* در حوزهٔ فرکانس ۶۴

۴-۲-۳ روش چندکاناله *ALE* در حوزهٔ فرکانس ۶۵

۴-۳ روشهای تشخیص فرکانس‌های هارمونیک ۶۷

۴-۳-۱ کورتزیز ۶۸

۴-۳-۲ اندیس کورتزیز طیفی ۶۹

۴-۳-۳ روش *ALE* تک کاناله و چند کاناله ۷۳

۴-۴ پیشنهاد یک اندیس تشخیص هارمونیک جدید ۷۳

فصل پنجم: ارزیابی روش‌های مختلف از طریق شبیه‌سازی عددی

۵-۱ مقدمه ۷۷

۵-۲ تشخیص اجزای هارمونیک ۷۸

۵-۲-۱ تأثیر پارامترهای T و δ در اندیس پیشنهادی ۷۹

۵-۲-۲ مقایسه اندیس‌های هارمونیک برای چند *HSR* مختلف ۸۰

۵-۳ استخراج پارامترهای مودال به روش *CFDD* و *MCFDD* ۸۴

۵-۴ جداسازی سیگنال‌ها در حوزهٔ زمان ۸۷

۵-۵ استخراج پارامترهای مودال با استفاده از سیگنال‌های جداسازی شده ۹۰

فصل ششم: آزمایش‌های تجربی

۶-۱ مقدمه ۹۲

۶-۲ آزمون تجربی تیر فولادی ۹۲

۶-۲-۱ شرح آزمایش ۹۲

۶-۲-۲ محاسبه اندیس‌های هارمونیک مختلف ۹۵

۶-۲-۳ استخراج پارامترهای مودال به روش *MCFDD* ۹۹

۶-۲-۴ مقایسه روش‌های *CFDD* و *MCFDD* ۱۰۱

۶-۲-۵ جداسازی سیگنال پاسخ تیر فولادی ۱۰۳

۶-۲-۶ آنالیز مودال عملیاتی با استفاده از سیگنال پاسخ جداسازی شده ۱۰۸

۶-۳ آزمون آنالیز مودال عملیاتی یک ماشین دوار صنعتی ۱۱۰

۶-۳-۱ شناسایی هارمونیک‌ها توسط اندیس‌های هارمونیک مختلف ۱۱۰

۶-۳-۲ استخراج پارامترهای مودال فن فولاد مبارکه به روش *MCFDD* ۱۱۲

فصل هفتم : جمع‌بندی و پیشنهادات

۷-۱ جمع بندی ۱۱۴

۷-۲ پیشنهادات برای کارهای جدید ۱۱۶

مراجع ۱۲۱

فهرست تصاویر و نمودارها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۱-۱- آزمون مودال در آزمایشگاه ۳
شکل ۱-۲- آزمون مودال عملیاتی بر روی موتور یک خودرو ۵
شکل ۲-۱- دیاگرام ون ۲۱
شکل ۳-۱- دیاگرام *SVD* و تابع همبستگی یک درجه آزادی مود انتخاب شده در روش *EFDD* ۴۶
شکل ۳-۲- دیاگرام *SVD* و تابع همبستگی یک درجه آزادی مود انتخاب شده در روش *EFDD* وقتی که یک تحریک هارمونیک در محدوده مود انتخابی وجود داشته است ۴۷
شکل ۳-۳- حذف قله هارمونیک و برازش منحنی یک درجه آزادی در روش *CFDD* ۴۸
شکل ۳-۴- تفاوت انتخاب داده‌ها و برازش منحنی در روش‌های *CFDD* و *MCFDD* ۵۱
شکل ۳-۵- نمونه‌ای از یک دیاگرام پایداری در روش *SSI* و مودهای پایدار ۵۷
شکل ۴-۱- جداسازی بخش هارمونیک سیگنال ۶۱
شکل ۴-۲- نحوه کار تقویت کننده‌های وقفی هارمونیک ۶۱
شکل ۴-۳- ایده جداسازی سیگنال به دو بخش تصادفی و پریودیک ۶۲
شکل ۴-۴- نحوه کار سیستم حذف نویز خود وقفی ۶۴
شکل ۴-۵- جدا کردن قطعات سیگنال و قطعه تاخیری متناظر ۶۵
شکل ۴-۶- نمودار *PSD* یک سیگنال ساخته شده و کورتزیز طیفی این سیگنال ۷۲
شکل ۴-۷- تغیرات معیار کورتزیز برای *PSD* ثابت و تشخیص تحریک هارمونیک ۱۰ هرتز ۷۶
شکل ۴-۸- تغیرات معیار کورتزیز برای *PSD* سیستم یک درجه آزادی و تشخیص تحریک هارمونیک ۱۰ هرتز ۷۶
شکل ۵-۱- اندیس هارمونیک (روش پیشنهادی) برای *HSR=0.01* و $\delta = 2$ ۷۹
شکل ۵-۲- اندیس هارمونیک (روش پیشنهادی) برای *T=20 sec., HSR=0.02* ۸۰
شکل ۵-۳- اندیس هارمونیک مختلف برای *HSR=0.25* ۸۱
شکل ۵-۴- اندیس هارمونیک مختلف برای *HSR=0.02* ۸۲
شکل ۵-۵- اندیس هارمونیک مختلف برای *HSR=0.01* ۸۳
شکل ۵-۶- منحنی *SVD* سیستم چهار درجه آزادی شبیه‌سازی شده ۸۴
شکل ۵-۷- داده‌های انتخابی هر مود به همراه منحنی‌های برازش شده در روش *MCFDD* ۸۴
شکل ۵-۸- نمودار *SVD* سیستم شبیه‌سازی شده تحت نیروهای هارمونیک ۳/۱ و ۵/۵ هرتز ۸۵
شکل ۵-۹- حذف هارمونیک‌ها و برازش منحنی به روش *CFDD* ۸۶
شکل ۵-۱۰- حذف هارمونیک‌ها و برازش منحنی به روش *MCFDD* ۸۶
شکل ۵-۱۱- جداسازی سیگنال به روش *SANC* ۸۸
شکل ۵-۱۲- جداسازی سیگنال به روش *ALE* ۸۹
شکل ۵-۱۳- دیاگرام پایداری در روش *SSI* مربوط به استخراج پارامترهای مودال از سیگنال جداسازی شده به روش *SANC* ۹۰
شکل ۵-۱۴- دیاگرام *SVD* در روش *MCFDD* مربوط به استخراج پارامترهای مودال از سیگنال جداسازی شده به روش *SANC* . ۹۱
شکل ۶-۱- تصویر آزمون تجربی تیر فولادی ۹۳

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۶-۴-اندیس‌های هارمونیک مختلف برای آزمون تیر با نیروهای هارمونیک قوی ۹۶
شکل ۶-۲- دستگاه آنالایزر ارتعاشی پیشرفته ۸ کاناله ۹۴
شکل ۶-۳- تصویر آزمون ضربه ۹۵
شکل ۶-۵-اندیس‌های هارمونیک مختلف برای آزمون تیر با نیروهای هارمونیک متوسط ۹۷
شکل ۶-۶-اندیس‌های هارمونیک مختلف برای آزمون تیر با نیروهای هارمونیک ضعیف ۹۸
شکل ۶-۷- نمودار *SVD* مربوط به آزمون تیر فولادی به روش *MCFDD* ۹۹
شکل ۶-۸- نمودار *SVD* مربوط به آزمون تیر فولادی بعد از حذف هارمونیک‌ها ۱۰۰
شکل ۶-۹- داده‌های انتخابی برای هر مود به همراه منحنی‌های برازش شده به روش *MCFDD* ۱۰۰
شکل ۶-۱۰- منحنی *SVD* تیر فولادی – نیروی هارمونیک ۲۳۳ هرتز ۱۰۲
شکل ۶-۱۱- برازش منحنی مود سوم به روش *CFDD* ۱۰۲
شکل ۶-۱۲ برازش منحنی مود سوم به روش *MCFDD* ۱۰۲
شکل ۶-۱۳- جداسازی سیگنال پاسخ تیر به روش *SANC* – شدت هارمونیک ضعیف ۱۰۴
شکل ۶-۱۴- جداسازی سیگنال پاسخ تیر به روش *ALE* – شدت هارمونیک ضعیف ۱۰۵
شکل ۶-۱۵- جداسازی سیگنال پاسخ تیر به روش *SANC* – شدت هارمونیک قوی ۱۰۶
شکل ۶-۱۶- جداسازی سیگنال پاسخ تیر به روش *ALE* – شدت هارمونیک قوی ۱۰۷
شکل ۶-۱۷- دیاگرام پایداری برای آزمون تیر و سیگنال جداسازی شده به روش *SANC* ۱۰۸
شکل ۶-۱۸- نمودار *SVD* برای آزمون تیر و سیگنال جداسازی شده به روش *SANC* ۱۰۹
شکل ۶-۱۹- تصویر آزمون تجربی فن فولاد مبارکه ۱۱۰
شکل ۷-۲۰- اندیس‌های هارمونیک مختلف برای آزمون فن فولاد مبارکه ۱۱۱
شکل ۶-۲۱- دیاگرام *SVD* مربوط به آزمون فن فولاد مبارکه ۱۱۲
شکل ۶-۲۲- دیاگرام *SVD* مربوط به آزمون فن فولاد مبارکه بعد از حذف اجزای هارمونیک ۱۱۲

نماد نامه

C_X	ضریب تغییرات متغیر تصادفی X
$[D]$	ماتریس میرایی سیستم
$E[*]$	عملگر امید ریاضی
f	اندیس فرکانس در طیف فوریه مجزا
$f_X(x)$	تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی X
$f_{XY}(x,y)$	تابع چگالی احتمال توأم
$F(t)$	بردار نیروی وارد بر سیستم
G_{XX}	تابع چگالی خودطیفی
G_{XY}	تابع چگالی دگرطیفی
$[H]$	ماتریس توابع پاسخ فرکانسی
$[K]$	ماتریس سختی سیستم
k	شماره مود
$[\mathrm{M}]$	ماتریس جرم سیستم
N	تعداد نمونه پاسخ
$P_k(\omega)$	نیم طیف مثبت چگالی توان مود k ام
$P(\omega)$	نیم طیف مثبت چگالی توان
$P(A)$	احتمال وقوع پیشامد A
$P_X(x)$	تابع جرم احتمال متغیر تصادفی X
p	تعداد ورودی‌ها
q	تعداد پاسخ‌ها
$[r_k]$	ماتریس مانده‌ها
R_{XX}	تابع خود همبستگی
R_{XY}	تابع دگرهمبستگی
R_k	تابع همبستگی یک درجه آزادی مود k ام
R_l	تخمین ماتریس همبستگی با تأخیر زمانی l
S	پیشامد تصادفی کل
S_{XX}	تابع چگالی خودطیفی دو طرفه
S_{XY}	تابع چگالی دگرطیفی دو طرفه
$s(\omega)$	اولین مقدار منفرد
$s_k(\omega)$	اولین مقدار منفرد در محدوده مود k ام
$[S]$	ماتریس مقادیر منفرد
t	زمان
$[U]$	ماتریس بردارهای منفرد
$X(t)$	پاسخ سیستم در فضای حالت
$Y(t)$	بردار پاسخ سیستم
α_k	منفی قسمت حقیقی قطب
β_k	بردار مشارکت مودال
φ_k	بردار شکل مود
γ	کورتزیز
κ_4	کامولانت چهارم
κ_2	کامولانت دوم
λ_k	قطب
Λ_{XY}	تابع هم‌دوس
μ_X	میانگین متغیر تصادفی X
ρ_{XY}	ضریب همبستگی
σ_X^2	پراش (واریانس) متغیر تصادفی X
σ_X	انحراف استاندارد متغیر تصادفی X
σ_{XY}	هم‌پراش
ω	فرکانس
ω_k	فرکانس طبیعی مود k ام
ω_f	فرکانس خط f ام در طیف فوریه مجزا
ζ_k	نسبت میرایی مود k ام
$\hbar$	اندیس هارمونیک
$\aleph$	کورتزیز طیفی

چکیده

امروزه آنالیز مودال تجربی کاربردهای گسترده‌ای در تصحیح دینامیک سازه‌ها، بهبود مدل‌های تحلیلی، طراحی دینامیکی بهینه، کنترل ارتعاشات، عیب‌یابی و پایش سلامت سازه‌ها در زمینه‌های مهندسی هوافضا، مکانیک و عمران پیدا کرده است. برای انجام آزمون مودال معمولاً سیستم مورد نظر به آزمایشگاه منتقل شده و پس از شبیه‌سازی شرایط مرزی با اعمال نیروهای تحریک ساخته شده و معین به ارتعاش واداشته می‌شود. سپس با استفاده از پاسخ و نیروی تحریک اندازه‌گیری شده توابع پاسخ فرکانسی محاسبه و از طریق روش‌های مختلف آنالیز مودال، پارامترهای مودال سیستم شامل فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها استخراج می‌شود. برای بسیاری از سیستم‌های ارتعاشی نظیر سازه‌های بزرگ صنعتی و عمرانی آنالیز مودال تجربی با مشکلات و محدودیت‌هایی روبرو می‌شود. به عنوان نمونه انتقال یک پل یا یک ماشین صنعتی بزرگ به آزمایشگاه در عمل ناممکن است. اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی در محل نیز مستلزم خارج کردن مجموعه از سرویس کاری، حذف تمام نویزهای مزاحم مکانیکی و الکتریکی و تحریک آن سازه بزرگ بوده که بسیار مشکل و گاه ناممکن است. از طرف دیگر در بسیاری مواقع شرایط کاری سیستم با شرایط آزمون متفاوت و نتایج حاصل جوابگوی نیازها نخواهد بود.

به منظور رفع این محدودیت‌ها، روش آنالیز مودال عملیاتی (OMA) توسعه و بکار گرفته شده است. در این روش پاسخ ارتعاشی سیستم تحت تأثیر نیروهای محیطی در شرایط کاری عادی اندازه‌گیری شده و به منظور استخراج پارامترهای مودال سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای این روش در مقایسه با آنالیز مودال متعارف عدم نیاز به دستگاه‌های تحریک و شبیه‌سازی شرایط مرزی، خارج نکردن سازه از سرویس کاری و در نتیجه سرعت بالاتر و هزینه کمتر است. به علاوه در این روش مدل خطی شده حول شرایط نیرویی و مرزی واقعی برای کل سیستم (و نه بخش جدا شده‌ای از آن) بدست می‌آید. آنالیز مودال ماشین‌های دوار بزرگ و سازه‌های مرتبط با آنها یکی از مواردی است که به دلیل وجود نیروهای ارتعاشی حاصل از ماشین و بروز مسایل و مشکلات ارتعاشی، کاربرد زیادی دارد اما به دلیل محدودیت‌های ذکر شده انجام آزمون مودال تجربی به روش‌های متعارف معمولاً غیر ممکن و یا بسیار پر هزینه است. OMA می‌تواند روشی کاربردی برای استخراج پارامترهای مودال ماشین‌های دوار باشد. اما پاسخ ارتعاشی ماشین‌های دوار حاوی تحریک‌های هارمونیک متعدد و قدرتمندی است که روش‌های OMA را با مشکل روبرو می‌کند. زیرا در همه این روش‌ها نیروهای تحریک بصورت نویز سفید فرض می‌شوند. به منظور استفاده از OMA در شرایط وجود تحریک‌های هارمونیک لازم است اجزای هارمونیک ابتدا شناسایی شده و سپس تأثیر آنها در OMA و پارامترهای مودال حاصل مد نظر قرار گیرند و یا اینکه سیگنال پاسخ ابتدا به دو قسمت تصادفی و پریودیک جداسازی شده و سپس بخش تصادفی مورد استفاده قرار گیرد.

در این رساله اندیس‌های مختلف تشخیص اجزای هارمونیک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته به منظور افزایش دقت و حساسیت در تشخیص هارمونیک‌ها یک اندیس جدید پیشنهاد گردیده‌است. به منظور استخراج پارامترهای مودال روش‌های مبتنی بر تبدیل حوزه فرکانس (FDD) شامل $EFDD$ و $CFDD$، مورد مطالعه و پیاده‌سازی قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها قبل از استخراج پارامترهای مودال، اجزای هارمونیک شناسایی شده بوسیله اندیس هارمونیک، از طریق میانیابی خطی از توابع پاسخ فرکانسی حذف می‌گردند. به منظور بهبود عملکرد این روش‌ها در شرایط وجود تحریک‌های هارمونیک در این رساله روش اصلاح شده $MCFDD$ پیشنهاد شده است. روش دیگری که در این پروژه برای عبور از مشکل وجود تحریک‌های هارمونیک مورد استفاده قرار گرفته جداسازی سیگنال‌های پاسخ قبل از آنالیز مودال عملیاتی است. پس از مطالعه و بررسی روش‌های مختلف موجود جهت جداسازی سیگنال‌ها به دو بخش تصادفی و پریودیک، روش‌های مناسب پیاده‌سازی و مورد استفاده قرار گرفته است. از بخش تصادفی سیگنال جهت استخراج پارامترهای مودال توسط روش‌های FDD در حوزهٔ فرکانس و SSI در حوزه زمان استفاده شده است. دقت و کارآیی روش‌های موجود و پیشنهادی ابتدا از طریق شبیه‌سازی نرم‌افزاری بررسی و مقایسه شده و سپس کارآیی آنها در آزمایشات عملی از طریق آزمون آنالیز مودال عملیاتی یک تیر فولادی و یک فن شرکت فولاد مبارکه ارزیابی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های عملی بهبود نتایج حاصل از روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود را نشان داده است.

کلمات کلیدی: ۱- آنالیز مودال عملیاتی ۲-تحریک هارمونیک ۳-ماشین دوار ۴- جداسازی سیگنال

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها و بکارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی یک سیستم ارتعاشی است. این مدل ریاضی مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند. به فرایند استخراج پارامترهای مودال یک سیستم با استفاده از نتایج حاصل از آزمون مودال، شناسایی مودال[1] گفته می‌شود.

آزمون مودال، تکنیک تجربی برای به دست آوردن مدل مودال یک سیستم خطی نامتغیر با زمان است. در مجموع آنالیز مودال تجربی شامل سه مرحله آماده‌سازی برای آزمون، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و استخراج پارامترهای مودال است. آماده سازی آزمون شامل انتخاب تکیه‌گاه، نوع تحریک، نقاط تحریک و سخت‌افزارهای اندازه‌گیری از یک طرف و تعیین هندسه مدل و شناسایی عوامل ایجاد خطا از طرف دیگر است. در طول آزمون یک مجموعه، تابع پاسخ فرکانسی[2] *(FRF)* اندازه‌گیری و ذخیره می‌شود تا در مرحله بعد به منظور تعیین پارامترهای مودال، آنالیز شوند.

---

1. Modal Identification
2 . Frequency Response Function (FRF)

آنالیز مودال که در سه دهه اخیر توسعهٔ زیادی پیدا کرده امروزه کاربردهای گسترده‌ای در اصلاح دینامیکی سازه‌ها، بهبود مدل‌های تحلیلی، طراحی بهینه دینامیکی، کنترل ارتعاشات، عیب‌یابی و همچنین پایش ارتعاشی سلامت سازه‌ها در مهندسی هوا فضا، مکانیک و عمران پیدا کرده است. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای انجام آزمون مودال و همچنین تکنیک‌های متنوعی برای استخراج پارامترهای مودال ارائه شده است. این تکنیک‌ها برای حالات یک ورودی- یک خروجی[1]، یک ورودی- چند خروجی[2] و چند ورودی- چند خروجی[3] در حوزهٔ زمان[4] و در حوزهٔ فرکانس[5] توسعه یافته‌اند. امروزه روش‌های مختلف آنالیز مودال در قالب نرم‌افزارهای تجاری به بازار عرضه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر چه آزمون مودال به خوبی در صنعت و کاربردهای مختلف آن مورد استفاده قرار گرفته است لیکن روش‌های معمول با سه محدودیت عمدهٔ زیر روبرو هستند:

- در آزمون مودال برای اندازه‌گیری *FRF* و یا تابع پاسخ ضربه[6] *(IRF)* از تحریک‌های ساخته‌شدهٔ معینی استفاده می‌شود لیکن اندازه‌گیری *FRF* یا *IRF* در محل سازه‌های بزرگ بسیار مشکل و یا غیرممکن است.
- در بسیاری از کاربردهای صنعتی شرایط کاری واقعی با شرایط آزمون متفاوت هستند.
- در آزمایشگاه تنها بخشی از سازه مورد آزمایش قرار می‌گیرد و لذا ایجاد شرایط مرزی مطابق با واقعیت مشکل و همراه با خطا است.

در شکل ۱-۱ تصویری از آزمون مودال در آزمایشگاه نشان داده شده است.

شکل ۱-۱- آزمون مودال در آزمایشگاه

1. Single Input Single Output (SISO)
2. Single Input Multiple Output (SIMO)
3. Multiple Input Multiple Output (MIMO)
4. Time Domain
5. Frequency Domain
6. Impulse Response Function (IRF)

امروزه به منظور رفع این محدودیت‌ها در بسیاری از کاربردها از آنالیز مودال عملیاتی[1] (*OMA*) استفاده می‌شود. به این روش، آنالیز مودال با تحریک طبیعی[2]، آنالیز مودال محیطی[3] و آنالیز مودال برپایه خروجی تنها[4] نیز گفته می‌شود. *OMA* از ابتدای دهه ۱۹۹۰ در مهندسی عمران، مکانیک و هوا فضا به دلیل مزایای اصلی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- آزمون محیطی نسبت به آزمون مودال معمول ارزانتر و سریعتر بوده و نیازی به دستگاه‌های تحریک و شبیه‌سازی شرایط مرزی ندارد.
- در *OMA* بدون نیاز به ایجاد شرایط مرزی مناسب، مشخصات دینامیکی کل سیستم به جای بخشی از آن بدست می‌آید.
- در این روش در اثر استفاده از نیروهای تصادفی واقعی اعمال شده در نقاط زیادی از سازه، مدل خطی شده حول شرایط نیروی واقعی بدست می‌آید.
- در این روش همه یا بخشی از اندازه‌گیری‌ها به عنوان مرجع به کار می‌روند و الگوریتم شناسایی بایستی بصورت *MIMO* باشد. بنابراین مودهای تکراری و یا نزدیک به هم به راحتی قابل تشخیص هستند و لذا *OMA* روشی مناسب برای سازه‌های مرکب و پیچیدهٔ امروزی هستند.
- *OMA* به خوبی می‌تواند نه تنها برای کنترل سازه‌ها بلکه به منظور سلامت سنجی مبتنی بر ارتعاشات سازه‌ها و تشخیص خرابی‌های آنها به کار گرفته شود.

در شکل ۱-۲ تصویری از یک آزمون مودال عملیاتی نشان داده شده است. با وجود مزایایی که *OMA* دارد همواره با دو مسئله اصلی در این تکنیک روبرو خواهیم بود؛ اول اینکه در این روش تنها داده‌های مربوط به پاسخ سیستم در اختیار است و نیروها مجهول می‌باشند و دوم اینکه نسبت نویز به سیگنال در مقایسه با داده‌های بدست آمده از محیط کنترل شدهٔ آزمایشگاهی به مراتب بیشتر است. با توجه به این مسایل روش‌ها و تکنیک‌های متنوعی در حوزهٔ زمان و فرکانس برای کارآمدتر کردن *OMA* ارائه شده است.

روش‌های مختلف شناسایی مودال در حوزهٔ زمان نظیر روش‌های *PRCE*[5]، ابراهیم توسعه یافته[6] و *ERA*[7] که در آزمون مودال متعارف برای استخراج پارامترهای مودال از تابع پاسخ ضربه به کار می‌روند، با ظهور *NExT*[8] در

---

1. Operational Modal Analysis
2. Natural-Excitation Modal Analysis
3. Ambient Modal Analysis
4. Output-Only Modal Analysis
5. Poly Reference Complex Exponential
6. Extended Ibrahim Time Domain
7. Eigen Realization Algorithm
8. Natural Excitation Technique

سال *1992* برای *OMA* به کار گرفته شده‌اند. تکنیک *NExT* بیانگر این اصل است که توابع همبستگی[1] که از داده‌های اندازه‌گیری شده از تحریک‌های محیطی بدست می‌آیند ترکیبی از تعدادی تابع سینوسی میرا شونده بوده که پارامترهای مودال با استفاده از این توابع استخراج می‌گردند. علاوه بر روش‌های ارائه شده در حوزهٔ زمان برخی روش‌های مربوط به حوزهٔ فرکانس نظیر *FDD*[2] و *LSCF*[3] نیز برای شناسایی مودال در آزمون مودال با تحریک طبیعی پیشنهاد گردیده‌اند.

شکل ۱-۲- آزمون مودال عملیاتی بر روی موتور یک خودرو

استفاده از روش‌های *OMA* مستلزم برخی ملاحظات تئوری و عملی است که در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد. انگیزه و هدف اصلی تعریف این پروژه استفاده از روش‌های آنالیز مودال عملیاتی به منظور استخراج پارامترهای مودال سازهٔ ماشین‌های دوار از طریق اندازه‌گیری پاسخ سازه حین کار عادی ماشین دوار است. وجود نیروهای هارمونیک و غیر تصادفی در سیستم می‌تواند مشکلاتی را در همهٔ روش‌های مربوط به حوزهٔ زمان و فرکانس بوجود آورد که این مسئله محدودیت‌هایی را برای استفاده از تکنیک *OMA* برای کاربردهایی نظیر ماشین‌های دوار بوجود می‌آورد. اما قبل از اینکه به تعریف دقیق مسئله مورد نظر رساله پرداخته شود لازم است مروری بر کارهای انجام شده در زمینه *OMA* صورت پذیرد. در ادامه به بررسی مقالات و تاریخچه توسعه علمی

1. Correlation Functions
2. Frequency Domain Decomposition
3. Least-Squares Complex Frequency Domain

روش‌ها و تکنیک‌های مختلف *OMA* و چگونگی بکارگیری آنها در شرایط وجود تحریک هارمونیک پرداخته می‌شود.

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

با توجه به اینکه هدف این پروژه استفاده از روش‌های *OMA* در حضور تحریک هارمونیک است در این بخش ابتدا مروری بر تاریخچه توسعه روش‌های مختلف *OMA* شده و سپس به بررسی مطالعات صورت گرفته برای کاربرد *OMA* در شرایط وجود تحریک‌های هارمونیک پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱ مروری بر روش‌های *OMA*

در این بخش تحقیقات کلیدی برای توسعه روش‌های *NExT*، *SSI*[1]، *FDD*، *ARMA*[2]، *SR*[3] و *LSCE* بیان می‌شود.

- **روش *NExT***

یکی از ایده‌های راهگشا برای *OMA* در سال ۱۹۹۲ توسط جیمز تحت عنوان تکنیک *NExT* ارائه شد [۱]. ایدهٔ *NExT* بیانگر این اصل است که تابع همبستگی که از پاسخ تصادفی یک سازه در اثر تحریک محیطی بدست می‌آید می‌تواند بصورت سری مجموع توابع سینوسی کاهنده نوشته شود. هر تابع سینوسی کاهنده دارای یک فرکانس طبیعی میرا شده، نسبت میرایی و ضریب شکل مود است که به یکی از مودهای سازه مربوط می‌شود. بنابراین تابع همبستگی را می‌توان به جای تابع پاسخ ضربه در روش‌های معمول آنالیز مودال در حوزه زمان برای سیستم‌های *MIMO*، جهت استخراج پارامترهای مودال بکار گرفت. به این ترتیب روش‌های ارائه شده در آنالیز مودال معمول برای آنالیز مودال عملیاتی توسعه داده شدند.

روش‌های *OMA* مبتنی بر ایده *NExT* شامل دو مرحله اصلی می‌شوند؛ مرحله اول بدست آوردن یک تابع پاسخ زمانی که در آن تأثیر نویز با استفاده از داده‌های تصادفی محیطی به حداقل رسانده شده باشد و مرحله دوم استخراج پارامترهای مودال با استفاده از تابع پاسخ زمانی بدست آمده به کمک یکی از روش‌های معمول در حوزه زمان. برای بدست آوردن تابع پاسخ زمانی در *OMA* دو روش اصلی ارائه گردیده است:

---

1 . Stochastic Subspace Identification
2 . Auto Regression Moving Average
3 . Stochastic Realization

- استفاده از تابع همبستگی
- استفاده از تابع زمانی بدست آمده از روش کاهش تصادفی[1] (RD)

تکنیک کاهش تصادفی که یک روش متوسط‌گیری بر روی قطعه‌های زمانی از پاسخ زمانی تصادفی سیستم است، ابتدا در سال ۱۹۷۳ توسط کُل پیشنهاد گردید [۲] و در سال ۱۹۷۷ توسط ابراهیم برای آنالیز مودال مورد استفاده قرار گرفت [۳]. آنها ابتدا نتیجه تکنیک کاهش تصادفی را به عنوان ارتعاش آزاد سیستم بیان نمودند لیکن بعدها ون دیور در سال ۱۹۸۲ ثابت کرد که نتیجهٔ کاهش تصادفی تابع همبستگی است [٤].

با استفاده از روش کاهش تصادفی می‌توان از داده‌های پاسخ تصادفی سازه تابع همبستگی را بدست آورده و با توجه به ایده $NExT$ این تابع را برای استخراج پارامترهای مودال در OMA به کار برد. به این ترتیب راه برای ارائه روش‌های مختلف بر اساس این ایده باز شد و محققان مختلفی در این زمینه به توسعه دانش پرداختند.

برینکر در سال ۱۹۹۱ روش RD را برای تخمین توابع دگرهمبستگی[2] ($CCOR$) و خودهمبستگی[3] ($ACOR$) به کار گرفت و سپس سه روش مختلف را برای استخراج پارامترهای مودال مورد بررسی قرار داد [٥]. این محقق همچنین سرعت و دقت روش RD را با روش تخمین مبتنی بر تبدیل فوریه سریع[4] (FFT) مقایسه نمود [٦]. بر اساس نتایج بدست آمده RD حدود ۱۰۰ برابر سریعتر از FFT بود. همچنین RD برای تخمین $ACOR$ دقیقتر از FFT بود ولی برای تخمین $CCOR$ با استفاده از داده‌های تصادفی روش FFT دقیقتر است.

در روش‌های آنالیز مودال مبتنی بر RD چنانچه از توابع $ACOR$ و $CCOR$ استفاده شود نویز بالای تابع $CCOR$ وارد مسئله شده و پارامترهای مودال دچار خطا می‌شوند و چنانچه تنها از تابع $ACOR$ استفاده گردد، داده‌های فاز از دست رفته و امکان استخراج شکل مود از بین می‌رود. برای رفع این مشکل ابراهیم در سال ۱۹۹۷ روش برداری[5] را پیشنهاد داد [۷]. در این روش شرایط شروع جدا کردن قطعه زمانی برای متوسط‌گیری بصورت برداری تعریف شده و اطلاعات فاز حفظ می‌گردد. در همین سال آسموسن و همکاران کاربرد روش VRD را بوسیله شبیه‌سازی یک سیستم چهار درجه آزادی و همچنین آزمون عملی مدل آزمایشگاهی یک پل بررسی نمودند [۸]. برینکر نیز به بررسی و مقایسه چگونگی تخمین FRF با استفاده از RD و FFT پرداخت و نتیجه گرفت که FRF حاصل از RD نشتی و نویز کمتری داشته و سرعت محاسبات نیز بالاتر است [۹].

---

1. Random Decrement (RD)
2. Cross Correlation
3. Auto Correlation
4. Fast Fourier Transform (FFT)
5. Vevtor Triging Random Decrement (VRD)

آسموسن و برینکر در سال ۱۹۹۸ روشی را برای محاسبه پـراش[1] در *RD*، تخمـین دقـت *RD* و طـول زمـانی مناسب برای *RD* را در آنالیز مودال پیشنهاد دادند [۱۰]. آنها همچنین چگـونگی بـه کـار گـرفتن *RD* بـرای *OMA* و چگونگی تعیین پارامترهای مناسب در *RD* را ارائه نمودند [۱۱].

شِن و زِنگ در سـال ۲۰۰۲ پـس از بررسـی توسـعه علمـی روش *NExT* بـا اسـتفاده از *CCOR* و روش‌هـای معمول آنالیز مودال در *TD* روشی برای استخراج پارامترهای مودال در حوزهٔ فرکانس ارائه دادند [۱۲]. آنهـا از تـابع *CPSD*[2] بـه جـای *FRF* در روش *FDPR*[3] اسـتفاده نمودنـد و کـارایی اسـتفاده از *CCOR* را در *FDPR* بـا انجـام آزمایشات بر روی مدل هواپیما نشان دادند.

با توسعه استفاده از تکنیک *RD* کاربرد این تکنیک به روش‌های آنالیز مودال در حوزهٔ فرکانس نیـز کشـیده شد. رودریگز در سال ۲۰۰٤ ایدهٔ محاسبه توابع چگالی طیف را از تبدیل فوریه توابع *RD* به جای اسـتفاده مسـتقیم از توابع زمانی مطرح نمود [۱۳]. با استفاده از این روش نویز به دلیل متوسط‌گیـری کـاهش یافتـه و نشـتی نیـز بـه دلیـل استفاده از طول زمانی کافی در تابع *RD* برای مستهلک شدن، کاهش می‌یابد. این محقق ایدهٔ خود را با آزمون مـدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده است. در نهایت در سال ۲۰۰۵ رودریگـز کـاربرد *RD* را در *OMA* بطـور کامـل شرح داد [۱٤] وی با بررسی مقالات مختلف کلیه روش‌های ارائه شده در حوزهٔ زمان و فرکانس را مقایسه کرد.

- **روش *SSI***

یکی از روش‌های شناسایی مودال سیستم‌ها در حوزه زمان که برای *OMA* بطور گسـترده‌ای توسـعه یافتـه و بکار گرفته شده است، روش‌های مبتنی بر زیر فضای تصادفی[4] هستند. در دهـهٔ ۹۰ در مهندسـی سیسـتم‌هـا و کنتـرل، یک روش جدید برای شناسایی فضای حالـت سیسـتم‌هـا مبتنـی بـر زیـر فضـا[5] ارائـه شـده کـه مسـتقیماً از داده‌هـای اندازه‌گیری شده استفاده می‌نمود. براساس این روش، *SSI* در سال ۱۹۹۳ با اسـتفاده از انـدازه‌گیـری پاسـخ سـازه بـه تحریک تصادفی ارائه شد [۱۵، ۱٦].

پیتر و همکارانش در سال ۱۹۹۵ پس از شـرح روش *SSI* ارتبـاط بـین مـدل سـازهٔ مـرتعش و مـدل تصـادفی سیستم را بیان نمودند و از آن به عنوان ابزاری برای آنالیز مودال سـازه‌هـای تحـت بارهـای محیطـی اسـتفاده نمودنـد [۱۷]. برینکـر و همکـارانش در سـال ۲۰۰۱ از ایـن روش بـرای آزمـون *OMA* یـک صـفحه بـه همـراه یـک موتـور الکتریکی استفاده نموده و آنرا با روش *FDD* در حوزهٔ فرکانس مقایسه نمودند [۱۸]. در نهایـت برینکـر و اندرسـون

---

1 . Variance
2. Cross Power Spectral Density
3. Frequency Domain Poly-Reference
4 . Stochastic Subspace
5 . Subspace-Base

سعی نمودند با توجه به پیچیدگی‌های ریاضی روش *SSI* آنرا بصورت قابل فهمی شرح بدهند [۱۹]. آنها بیان کردند که بیشتر مراحل این روش مشابه دیگر روش‌ها در حوزه زمان است.

جیانگ در سال ۲۰۰۵ یک تکنیک جدید پردازش سیگنال برای سیگنال‌های غیر ایستا[1] به نام *EMD*[2] پیشنهاد داد و سپس یک روش جدید *SSI* مبتنی بر *EMD* را برای *OMA* ارائه نمود [۲۰]. وی در این تکنیک ابتدا بوسیله *EMD* داده‌ها را به تابع پاسخ مودال[3] برده و سپس روش *SSI* را برای استخراج پارامترهای مودال به کار می‌گیرد. هُونِ نیز چگونگی استفاده از روش‌های مبتنی بر زیر فضا را برای استخراج مستقیم سری‌های زمانی مختصات مودال شرح داد [۲۱]. وی ادعا می‌کند که این روش محدودیت روش‌های قدیمی که در آنها تعداد مختصات مودال به تعداد سنسورها محدود می‌گردد را ندارد.

ریندر در سال ۲۰۰۷ روشی ترکیبی تصادفی و معین[4] را برای هر دو روش *OMA* و *EMA* ارایه نموده و عملکرد آن را با استفاده از داده‌های پل *Z24* مورد بررسی قرار داده است. این روش در عین سریع و دقیق بودن برخی محدودیت‌های *OMA* نظیر بدون اندازه بودن شکل مودها را ندارد. این محقق در همان سال روش‌هایی را برای حذف خطای بایاس با استفاده از دیاگرام پایداری و تخمین خطای پراش با استفاده از حساسیت مرتبه اول پارامترهای مودال بدست آمده از روش *SSI* ارائه نموده است و دقت و کاربردی بودن این روش‌ها را به وسیله داده‌های شبیه سازی و آزمون بررسی نموده است [۲۳،۲۲] . کاردن و میتا در سال ۲۰۰۹ روش‌های مختلف در خصوص تعیین محدوده اطمینان[5] و نا معینی در پارامترهای مودال حاصل از روش *SSI* را مورد بررسی قرار داده و مشکلات و پیچیدگی‌های پیش روی این روش‌ها را شرح دادند [۲٤].

آنتونی در سال ۲۰۱۰ با شرح پیش زمینه ریاضی روش‌های جداسازی کور منابع مرتبه دو[6] (*SO-BSS*) و *SSI* نشان داد این دو روش چگونه در رابطه نزدیک با یکدیگر هستند و استفاده از روش *SO-BSS* در *OMA* را شرح داد [۲۵].

- **روش *FDD***

FDD یک روش *OMA* در حوزه فرکانس می‌باشد. روش‌های *OMA* در حوزهٔ فرکانس مبتنی بر فرمول سادهٔ ارتباط بین ماتریس‌های چگال طیف توان (*PSD*)[7] ورودی و خروجی مربوط به فرایندهای تصادفی است [۲٦].

---

1. Non Stationary
2. Empirical Mode Decomposition
3. Modal Response Function
4. Reference-Based Combined Deterministic-Stochastic Subspace Identification
5. Confidence Intervals
6. Second Order Blind Source Separation
7. Power Spectral Density