دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

آنالیز مودال دم افقی هواپیما با استفاده از روش آنالیز مودال بر مبنای خروجی (OMA)

استاد راهنما :

دکتر مرتضی صادقی

استاد مشاور:

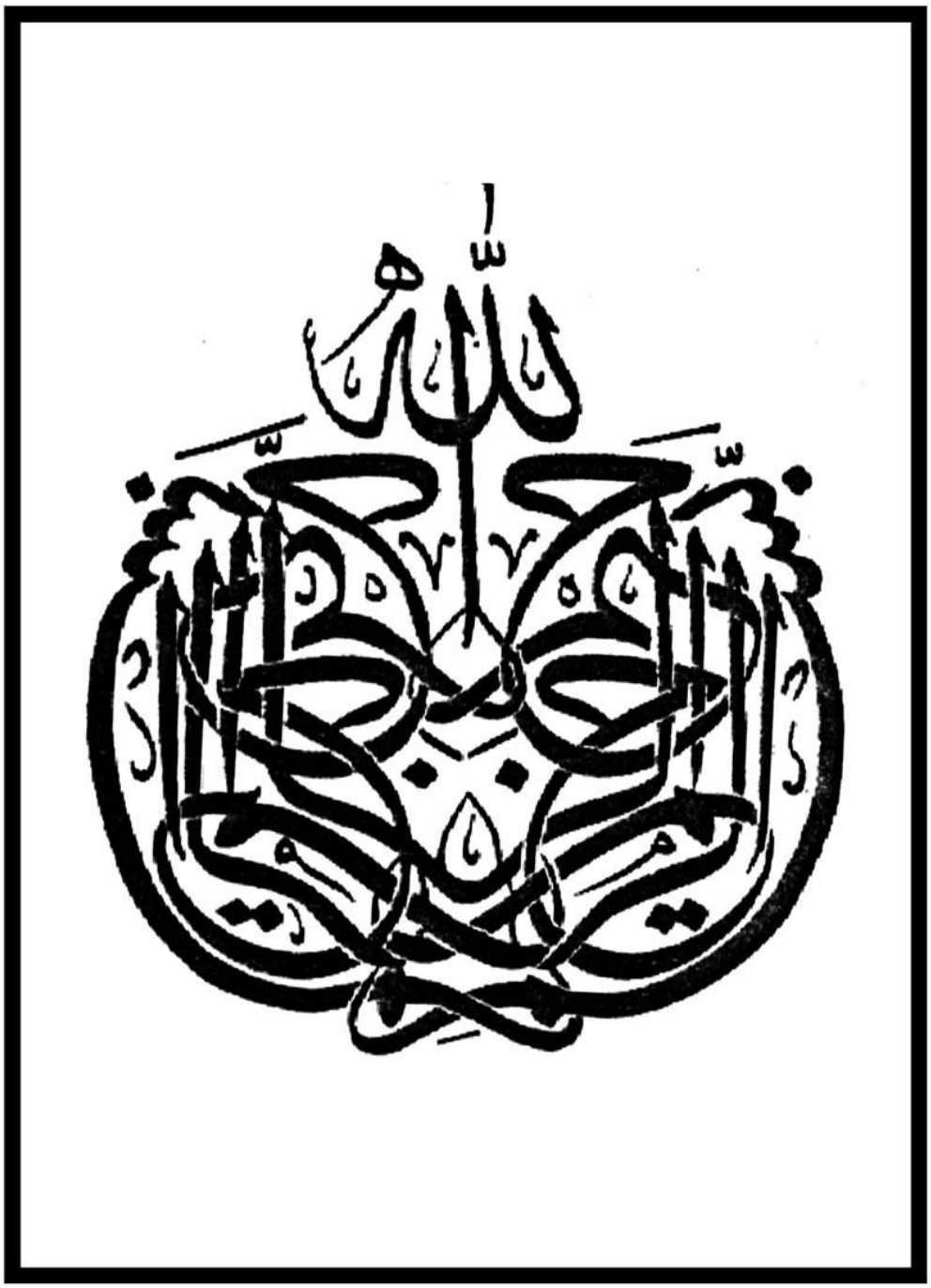
دکتر کمال جهانی

پژوهشگر:

پیمان جلالی

۹۰۹٤۲۲۱۰۷

شهریور ماه ۱۳۹۲



تقدیم به:

خدایم که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و مادر مهربانم و پدر عزیزم

دو فرشته‌ای که خورشیدی شدند و از روشنایی‌شان جان

گرفتم و در نا امیدی‌ها نازم را کشیدند

و لبریزم کردند از شوق ...

تشکر و سپاس

به پاس لطف بیکران و رحمت لایزال پرودگار متعال در تمامی مراحل زندگی و تحصیل، خاضعانه، جبهه شکر بر آستان پر عطوفت و کبریایی‌اش می سایم و با زبانی قاصر ذات اقدسش را به‌خاطر تمامی نعمت‌های بی‌شمار و ناتمامش شکر می گزارم.

لازم می دانم که از راهنمایی ها، دقت نظر و مساعی استاد گرانقدرم **آقای دکتر مرتضی صادقی**، در این پایان نامه و تمامی اساتید عزیزم که در دانشکده مهندسی مکانیک زحمت تعلیم و تربیت را بر دوش داشته و در ایام تحصیل خوشه‌هایی از خرمن علم آنان چیدم، سپاسگزاری نمایم.

همچنین بر خود وظیفه می دانم که از همراهی و مشاوره **آقای دکتر جهانی** برای به ثمر رسیدن این پایان‌نامه مراتب تشکر و قدردانی را بجای آورم.

نام خانوادگی دانشجو : جلالی **نام :** پیمان
عنوان پایان‌نامه : آنالیز مودال دم افقی هواپیما با استفاده از روش آنالیز مودال بر مبنای خروجی(OMA)
استاد راهنما : دکتر مرتضی صادقی
استاد مشاور : دکتر کمال جهانی
مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد **رشته :** مهندسی مکانیک **گرایش :** طراحی کاربردی
دانشگاه : تبریز **دانشکده :** فنی مهندسی مکانیک
تاریخ فارغ التحصیلی : شهریور ۱۳۹۲ **تعداد صفحه : ۹۴**
کلید واژه‌ها : آنالیز مودال، روش تجزیه فرکانسی، دم افقی، چند جمله ای کسری گویا
چکیده :

برای یافتن مشخصات دینامیکی سیستم های پیچیده روش های مختلفی وجود دارد. اولین راه‌حل دقیق مسئله با استفاده از روش تحلیلی است. اگرچه برای بسیاری از مسائل مهندسی با فرض های ساده شونده جواب های جواب های صریح ارائه شده ولی معمولاً برای معادلات دشوار و پیچیده حل دقیق و صریحی وجود ندارد. یکی از روش های حل، گسسته سازی مدل و حل عددی آن به وسیله اجزای محدود است. روش اجزای محدود یکی از روش‌هایی است که کارایی خود را در مسائل

مختلف مهندسی نشان داده است و دقت بالای نتایج به دست آمده از این روش در مقایسه با جواب های صریح و حل دقیق مسائل مختلف بیانگر قدرتمند بودن این روش در حل مسائل پیچیده مهندسی و ریاضی است. برای یافتن مشخصات دینامیکی سیستم از یکی از دو روش ارتعاش آزاد و یافتن مقادیر ویژه و دیگری بر اساس تحریک و پاسخ (آنالیز مودال) می به اشد. در روش تحریک و پاسخ با استفاده از ورودی سیستم دینامیکی و پاسخ آن، تابع پاسخ فرکانسی و از روی آن فرکانس های طبیعی و مود های ارتعاشی محاسبه می شوند. برای بعضی از سازه ها امکان تحریک سیستم وجود ندارد و روش نسبتاً جدید برای یافتن مشخصات ارتعاش بر اساس فقط خروجی است. هدف از انجام پروژه حاضر یافتن مشخصات دینامیکی (فرکانس های طبیعی و مود های ارتعاشی) یک سیستم بر اساس فقط خروجی می باشد. سیستم مورد نظر در این پروژه دم افقی هواپیما می باشد. تحلیل انجام شده بر روی دم افقی طراحی شده یک هواپیما از طریق اجزای محدود به سه روش زیر صورت می پذیرد:

۱- بر اساس مسئله مقدار ویژه
۲- بر اساس ورودی و خروجی
۳- بر اساس فقط خروجی

نتایج به دست آمده از سه روش فوق با یکدیگر مقایسه می شوند.

ξ	ضریب میرایی
I	ماتریس واحد
$\mathrm{H(w)}$	تابع پاسخ فرکانسی
$\mathrm{F(t)}$	نیروی تحریک
f	فرکانس چرخشی
f_{s}	فرکانس نمونه برداری
$[M]$	ماتریس جرم
$[K]$	ماتریس سختی
t	زمان
m	جرم
γ_k	بردار دخالت مود
ϕ_k	بردار شکل مود
$\mathrm{U_i}$	بردار تکین
$\mathrm{S_i}$	ماتریس مقادیر تکین
A_k	امین باقیمانده چگالی توان خروجی k
G_{yy}	ماتریس طیف چگالی توان ورودی

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه.....۱

بخش اول (پیشینه پژوهشی)

پیشینه ی پژوهشی.....۶

بخش دوم (مواد و روش ها)

فصل اول

آنالیزمودال تئوری.....۱۵

۲-۱-۱) آنالیز مودال چیست؟.....۱۵

۲-۱-۲) تئوری آنالیز مودال.....۱۶

فصل دوم

آنالیز مودال بر مبنای مقادیر ویژه.....۲۴

۲-۲-۱) روش اجزاء محدود.....۲۵

۲-۲-۲) حل معادلات اجزاء محدود در گره‌ها.....۳۶

فصل سوم

تحلیل آنالیز مودال بر مبنای (ورودی – خروجی)..... ۴۱

فصل چهارم

تحلیل آنالیز مودال بر مبنای - فقط خروجی..... ۴۶

بخش سوم (نتایج وبحث)

فصل پنجم

آنالیز مودال عددی دم افقی هواپیما..... ۵۲

۳-۵-۱) انتخاب نرم افزار مناسب برای تحلیل مودال..... ۵۲

۳-۵-۲) تهییه مدل المان محدود دم افقی..... ۵۵

۳-۵-۳) شبیه سازی فرآیند آنالیز مودال دم افقی..... ۵۹

فصل ششم

آنالیز مودال بر مبنای ورودی – خروجی..... ۶۷

۳-۶-۱) تحریک سیستم در تست مودال..... ۶۷

۳-۶-۲) تنظیم پارامترهای داده برداری در آزمایش عملی..... ۷۰

۳-۶-۳) بررسی اثر نویز..... ۷۳

۳-۶-۴) معرفی نرم افزار آنالیز مودال.....۷۳

فصل هفتم

۳-۷-۱) محاسبه فرکانس های طبیعی..... ۷۸

۳-۷-۲) محاسبه شکل مود ها.....۸۱

۳-۷-۳) محاسبه ضرایب میرایی.....۸۷

پیشنهاد و کارهای آینده.....۹۲

فهرست منابع و مراجع.....۹۳

مقدمه

یکی از راه هایی که به وسیله آن می‌توان خصوصیات مکانیکی و صنعتی اجزاء ماشین را تحقیق کرد تست ارتعاشی آن است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تست ارتعاشات می‌توان درستی مدل های تئوری مانند اجزاء محدود را بررسی کرد و حتی آن‌ها را تا حدود زیادی بهبود بخشید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ارتعاشات اجزاء ماشین نیز استفاده های متعددی دارند مانند پیش‌بینی رفتار ارتعاشی قطعه در شرایط کاری، محاسبه نیروهای وارد بر قطعه در هنگام کار، اصلاح کردن رفتار ارتعاشی قطعه با تغییر ابعاد؛ جنس قطعه و غیره. معمولا دو روش مختلف در اندازه گیری ارتعاشات وجود دارد:

الف) اندازه‌گیری دامنه و فرکانس ارتعاشاتی که به اجزاء ماشین در هنگام کار تحمیل می شود. (اندازه‌گیری پاسخ)

ب) بررسی خصوصیات ارتعاشی اجزاء ماشین به روش تحریک با نیرویی شناخته شده. (اندازه‌گیری نیرو و پاسخ)

در اندازه‌گیری نوع اول ارتعاشات قطعه در هنگام کار بررسی می شود مانند اندازه‌گیری ارتعاشات پرهٔ توربین هنگام کار کردن توربین یا اندازه‌گیری ارتعاشات بدنه یک ماشین هنگام حرکت در یک جاده ناهموار. تحت این شرایط، قطعه ممکن است تحت تأثیر تحریک‌هایی از منابع مختلف قرار گیرد و با توجه به این که در این روش به اندازه‌گیری نیروها نمی پردازیم، ماهیت و نتایج نیروهای وارده (که عامل اصلی ایجاد ارتعاش هستاند) به دست نمی آیند؛ بنابراین اطلاعات به دست آمده اطلاعات محدودی از خصوصیات ارتعاشی قطعه را در اختیار ما قرار می دهد البته عوامل ایجاد ارتعاشات و میزان اثر هر یک تا حد زیادی قابل شناسایی است. اندازه‌گیری نوع دوم که کامل تر است در آن قطعه تحت تأثیر تحریک کنترل شده ای (که نوع آن ساده و شناخته شده است) قرار می گیرد. در چنین آزمایشی هم پاسخ و هم تحریک بررسی می شوند تا خصوصیات کلی قطعه بدست آید و بتوانیم از رفتار قطعه، یک مدل ریاضی بسازیم. به چنین آزمایشی عموماً « تست مودال » می گویند.

در سال های اخیر، روش جدیدی در کاربرد آنالیز مودال ظهور کرده است. این روش operational modal analysis یا output only modal analysis نامیده می شود. به نظر می رسد صنعت در این خصوص بر روی لبه دوران جدیدی ایستاده است که به کاربردهای جدید به منظور فعالیت های حرفه ای در حوزه صوت و ارتعاشات می پردازد.

آنالیز مودال سنتی EMA از ورودی (تحریک) و خروجی (پاسخ) به منظور تخمین پارامترهای مودال استفاده می کند. این پارامترها شامل، فرکانس های مودال، نسبت های دمپینگ، شکل مودها و فاکتورهای مشارکت پذیری مودال می باشند. در هر حال آنالیز مودال سنتی برخی محدودیت‌هایی دارد:

۱- در آنالیز مودال سنتی EMA معمولاً از تحریک مصنوعی به منظور اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی (FRFs) یا توابع پاسخ ضربه (IRFs) استفاده می شود. بسیار مشکل یا حتی غیرممکن می باشد که این توابع را در فضای تست یا در سازه های بزرگ محاسبه نمود.

۲- آنالیز مودال سنتی به محیط آزمایشگاه محدود می شود. در هر حال در بسیاری از کاربردهای صنعتی، شرایط عملی واقعی به وضوح متفاوت از شرایطی است که در آزمایشگاه وجود دارد.

۳- اغلب در آزمایشگاه یک ترکیب به جای سیستم کامل تست می شود، و شرایط مرزی می‌بایست به شکل قابل‌قبولی شبیه‌سازی شود.

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

در روزهای نخستین که محققین کار خود را در حوزه آنالیز مودال آغاز کردند، ایده OMA و اینکه چگونه می‌توان در مواردی که ورودی‌ها دقیقاً شناخته شده نیستند، اطلاعات مودال را به دست آورد، در کلیه تفکرات وجود داشت. محققان از این مسئله آگاهی یافته‌اند و بسیاری از مقالات قدیمی با این نمونه ها سروکار داشتند. بحث‌ها در خصوص ورودی‌ها شروع شد و این نتیجه حاصل شد که با دانستن ورودی‌ها دیگر نیاز به تخمین آن‌ها نیست. در ادامه محققان در مورد SISO، SIMO و MIMO (یک ورودی یک خروجی، یک ورودی چند

خروجی و چند ورودی چند خروجی) بحث کردند. در این فرآیند OMA به جز در موارد اندکی که با سازه های بزرگ سروکار داشتاند، مورد فراموشی واقع شد. از آغاز دهه ۱۹۷۰ تا اواخر دهه ۱۹۹۰ برخی پیشرفت‌ها در زمینه OMA اتفاق افتاد، اما در کاربرد با شکست مواجه شد؛ اما اینکه دلیل این شکست چه بود، شاید به این دلیل که صنعت دچار فقدان تجهیزات قابل‌قبول بود.

در حوالی سال ۲۰۰۰ میلادی شرکت های نرم‌افزاری مختلف شروع به توسعه ابزارهای مختلف برای OMA کردند و کم‌کم به نقطه ای رسید که اکنون OMA به یک تکنولوژی قابل‌قبول تبدیل شده است. اکنون کنفرانس های فراوانی وجود دارند که منحصراً به این موضوع پرداخته اند و نرم‌افزارهای گوناگونی در این زمینه وجود دارد.
از جمله مزیت های OMA را می‌توان چنین نام برد:

۱- OMA ارزان است و با سرعت زیادی انجام می گیرد؛ زیرا به تجهیزات پیچیده تحریک و شرایط مرزی شبیه سازی شده نیاز ندارد.

۲- مشخصه های دینامیکی سیستم کامل به جای ترکیب در نقاط بیشتری به دست می آید.

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

۴-.تمامی و یا بخشی از نقاط می تواند 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 می شوند که برای سازه های واقعی مختلط مناسب می باشد.

۵- OMAنه‌تنها برای طراحی دینامیکی، کنترل سازه استفاده می شود بلکه برای VIBRATION-BASEDو health monitoring و damag ditection سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد.

۶- سازه های بزرگ نظیر پل و ساختمان‌ها می توانند توسط نیروی باد، بار ترافیکی و امواج صوتی تحریک شوند و در سیتمهای 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 متوسط گیری و یا فیلترینگ سعی در حذف نویزهای محیطی می کند.

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

۸- بیش‌تر سیستم‌ها از خود خواص غیرخطی نشان می دهند، 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 می نامند، که دارای اهمیت بسیاری می باشد.

پیشرفت های مهم OMAدر موضوعات زیر حاصل شده است.

۱- OMA در حوزه زمان، روش هایNExT-type

۲- OMA در حوزه زمان، روش هایARMA-type

۳- OMA در حوزه زمان، روش هایStochastic Realization-based

۴- OMA در حوزه زمان، روش هایStochastic Subspace-based

۵- OMA در حوزه فرکانس، روش هایFDD-Type

بخش اول

پیشینه پژوهشی

پیشینه ی پژوهشی:

در حالت کلی آنالیز مودال یک سازه به منظور تعیین ماهیت دینامیکی و دست یافتن به خواص ارتعاشی سیستم نظیر فرکانس های طبیعی، مدهای ارتعاشی و ضرایب میرایی انجام می شود. اولین تست های انجام شده به سال ۱۹۴۰ برمی گردد، در این سال برای اولین بار سازه ی یک هواپیما مورد آزمایش مودال قرار گرفت و پاسخ ارتعاش آن به دست آمد. [۱]هرچند که در سال های بعد و به خصوص بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۵ آنالیز مودال سازه های مختلف به صورت پراکنده در نقاط مختلف جهان انجام شد. [۲] لیکن به دلیل حجم زیاد محاسبات مورد نیاز، این روش چندان مورد استفاده قرار نگرفت. [۳]در سال ۱۹۶۵ کولی الگوریتمی را جهت محاسبه سریع‌تر سری‌های فوریه ارائه کرد. [۴] و سپس در سال ۱۹۶۷ هندرسون کار وی را تعمیم بخشید. [۵,۴] اما نقطه ی عطف عمده در این روش که باعث پیشرفت سریع و همه‌گیر شدن آنالیز مودال شده در سال ۱۹۷۰ با پیشرفت ریاضیات در زمینه ی سری‌های فوریه روش های FFT و DFT به وجود آمد. [۶]

این روش‌ها که به ترتیب تبدیل سریع فوریه و تبدیل گسسته فوریه نامیده می شوند، سرعت و دقت انجام آنالیز های مودال را بسیار بالا بردند و حجم محاسبات فراوانی را که مشکل عمده روش های مودال بود کاسته، و محاسبه سری های ریاضی را به صورت کد نویسی شده و کار پسند در آوردند. [۷]

از آن پس آنالیز مودال به عنوان یک روش سودمند و کارا و تقریباً به عنوان یک علم مجزا مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۷۳ اولین تخمین های طیف، توسط شارپ ارائه شد. [۹] و سپس در سال ۱۹۷۶ ابراهیم علاوه بر انجام یک آزمایش عملی مفصل، روشی را در خصوص تعیین خصوصیات پارامتری و دینامیکی سازه از روی پاسخ ارتعاش آن در حوزه ی زمان ارائه کرد. [۱۱,۱۰] گاهاً در مجامع علمی تنها این مرحله از کار را آنالیز مودال می نامند. [۸] سپس در ۱۹۸۰ زاگول روش ابراهیم را در حوزه ی فرکانس تعمیم بخشید. [۱۲]

در ۱۹۸۳ گید کاربرد توابع وزنی فوریه را در آنالیز مودال ارائه کرد و در همان سال سیلوا کار وی را ادامه داد و کامل کرد. [۱۵,۱۴,۱۳] تحول و جهش بعدی در تست های مودال در سال ۱۹۸۴ بوسیله ی اوینز رخ داد. [۱۶] وی تمامی آزمایش‌ها و روش های قبلی آنالیز مودال در زمینه تئوری و عملی را جمع آوری نموده و اولین منبع

جامع آنالیز مودال را منتشر کرد که منبع درسی بسیاری از دانشگاه های جهان قرار گرفت و آنالیز مودال را به عنوان یک درس رسمی وارد مجامع علمی کرد.

پس از این سال آنالیز مودال در شاخه های مختلف و متعددی ادامه یافت و پیشرفت کرد که هر کس با توجه به نیاز و مسأله مورد مطالعه خود یکی از این روش‌ها را انتخاب و گسترش داد.

مروری بر تاریخچه کار آنالیز مودال بر مبنای خروجی

۱ ـ روش **OMA in Time Domain, NExT- type procedures**

تکنیک تحریک طبیعی (NEXT) اولین بار توسط James در سال ۱۹۹۲ نشان داده شد. در این روش تابع کورولیشین (COR) که از پاسخ تصادفی با تحریک محیطی یک سازه بدست آمده است به عنوان مجموع سینوسی مستهلک شده می تواند نوشته شود. [۱۷].

بنابراین در تکنیک های EMA حوزه ی زمان در سیستم های mimo به جای تابع پاسخ ضربه (IRF) می‌توان از COR برای محاسبه پارامترهای مودال سیستم استفاده شود این واقعاً زمینه ی خوبی را برای توسعه و استفاده تکنیک های EMA در آنالیز مودال محیطی ایجاد می کند.

روش های OMA بر اساس روش NEXT شامل دو مرحله مهم است: اول به دست آوردن تابع پاسخ زمانی (TRF) و دومی شامل شناسایی پارامترهای مودال توسط یک روش رایج در TD است. به منظور به دست آوردن TRF در OMA دو روش پیشنهاد می شود:

۱ ـ استفاده از COR

۲ ـ استفاده از تابع زمانی که از تکنیک کاهش تصادفی (RD) به دست آمده است.

تکنیک RD که یک روش میانگین در قطعه زمانی یک پاسخ زمانی تصادفی است توسط cole در سال ۱۹۷۳ نشان داده شد. [۱۸] هرچند برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط ابراهیم در آنالیز مودال استفاده شد و او ادعا می کرد که نتایج RD ارتعاش آزاد سیستم می باشد. [۱۹] بعدها واندیور در سال ۱۹۸۲ نشان داد که ادعای ابراهیم اشتباه بوده و اثبات کرد که نتایج RD به دست آمده COR می باشد. [۲۰]

با استفاده از روش RD می توانیم COR را از داده های پاسخ تصادفی سازه بدست آوریم و آن را برای شناسایی پارامترهای مودال در OMA بر اساس روش NEXT استفاده کنیم.

این دیدگاه مبنایی برای محققان مختلف به منظور توسعه و نشان دادن تکنیک هایشان در دانش OMA شد.

برینکر در سال ۱۹۹۱ از روش RD برای تخمین توابع cross correlation (CCOR) و auto correlation (ACOR) استفاده کرد و سپس سه روش مختلف برای شناسایی پارامترهای مودال را بررسی کرد برینکر همچنین سرعت و دقت تکنیک RD را با تکنیک FFT مقایسه کرد. بر طبق این نتایج RD ۱۰۰ برابر سریع تراز FFT بوده است. [۲۱,۲۲] در تخمین ACOR، RD نسبت به FFT دقیق تر بوده است. هر چند روش های FFT نسبت به RD در تخمین CCOR دقیق تر هستند. در روش تحلیل مودال بر اساس RD اگر هر دو CCOR و ACOR استفاده شوند سطح نویز بالایی در CCOR باعث خطا در پارامترهای مودال خواهند شد.

اگر فقط ACOR استفاده شود در این صورت اطلاعات فاز را از دست خواهیم داد بنابراین شکل مود را نمی توانیم شناسایی کنیم. برای حل این مشکل ابراهیم و همکارانش در سال ۱۹۹۷ بردار تحریک RD (VRD) را پیشنهاد دادند. در این تکنیک شرایط برای انتخاب نقطه ی آغاز بخش های زمانی توسط یک بردار تعریف می شود. این تکنیک باعث می شود داده های فاز نگه داشته شود. [۲۳]

در همان سال آزموسن و همکاران (۱۹۷۷) کاربرد تکنیک VRD توسط شبیه‌سازی سیستم چهار درجه ی آزادی و همچنین آزمایش تجربی یک مدل پل را بررسی کردند. همچنین برینکر و آزموسن در سال ۱۹۹۷ تخمین

FRF با استفاده از RD و FFT را مطالعه و مقایسه کردند. او نتیجه گرفت که FRF از RD افت و سطح نویز کمتر و سرعت عمل بیش‌تری دارد. [۲۴] آزموسن و برینکر در سال ۱۹۸۸ یک تکنیک برای محاسبه واریانس، تخمین دقیق و صحیح گام زمانی برای RD در آنالیز مودال را پیشنهاد دادند. [۲۵] به علاوه آن‌ها مطرح کردند که چطور RD را برای OMA و محاسبه پارامترهای مودال صحیح در RD استفاده کنند. (آزموسن و همکاران ۱۹۸۸) [۲۶,۲۷] شن و همکاران در سال ۲۰۰۲ بعد از بررسی علمی روش NEXT یک روش برای شناسایی پارامترهای مودال در حوزه ی فرکانس با استفاده از C COR و روش های آنالیز مودال معمول در حوزه ی زمان پیشنهاد دادند. [۲۸] آن‌ها از تابع چگالی طیفی توان متقاطع (CPSD) به جای FRF حوزه ی فرکانس تکنیک (FDPR) چندین مرجع استفاده کردند و قابلیت استفاده از CCOR در FDPR با انجام آزمایش های تجربی بر روی مدل یک هواپیما نشان دادند.

با توسعه RD، کاربرد این تکنیک به روش های آنالیز مودال دیگر در حوزه ی فرکانس بسط داده شد. رودریگز و برینکر در سال ۲۰۰۱ یک روش برای محاسبه تابع چگالی طیفی از تبدیل تابع RD به جای تابع زمان ارائه کردند. [۲۹] با این روش سطح نویز به دلیل میانگین گیری و همچنین میزان افت به دلیل گام زمانی کافی در RD کاهش می یابد. آن‌ها ایده شان را به وسیله ی تست در یک مدل آزمایشی بررسی کردند. بالاخره، رودریگز و برینکر در سال ۲۰۰۵ با مقالات مختلف همه ی روش‌ها در حوزه ی زمانی و فرکانس را مقایسه کردند او همچنین کاربرد RD در OMA را به طور کامل توضیح می دهد. [۳۰]

۲- روش **OMA in Time Domain, Stochastic Subspace-based Procedures**

یکی از روش های شناسایی مودال در حوزه ی زمان که در OMA توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است روش مبتنی بر زیر فضای تصادفی می باشد. در سال ۱۹۹۰ در زمینه سیستم‌ها و مهندسی کنترل، روش جدید subspace-base برای شناسایی فضای حالت سیستم‌ها که به طور مستقیم از داده های اندازه‌گیری شده

استفاده می کنند پیشنهاد شد. بر اساس این روش در سال ۱۹۹۳،روش شناسایی زیر فضای تصادفی ssi ارائه شده که اندازه‌گیری پاسخ تصادفی سازه ها استفاده می شود. (وان اورچی و دی مور ۱۹۹۶)[۳۱,۳۲]

پیتر و همکاران در سال ۱۹۹۵ بعد از توصیف روش ssiرابطه ی بین ارتعاش مدل و مدل تصادفی یک سیستم را توضیح داده و این رابطه به عنوان یک ابزار برای تجزیه و تحلیل مودال یک سازه تحت نیروهای طبیعی استفاده کردند. [۳۳] برینکر و همکاران در سال ۲۰۰۳ این روش را برای آزمایش یک صفحه که موتور الکتریکی بر روی آن ثابت شده است استفاده کردند و نتایج را با تکنیک FDD در حوزه ی فرکانس مقایسه کردند. [۳۴] به دلیل پیچیدگی ریاضی برینکر و اندرسون در سال ۲۰۰۶ تلاش کرند تا روش ssiبه صورت ساده تر توضیح دهند آن‌ها بیان کردند که بیش تر مراحل در این روش به نسبت روش های دیگر در حوزه ی زمان ساده تر هستند. [۳۵]

ژیانگ و دن در سال ۲۰۰۵ یک تکنیک جدید پردازش سیگنال غیر ساکن سیگنال‌ها را پیشنهاد کردند که تجزیه مود تجربی (EMD) نامیده می شود و بر اساس این تکنیک آن‌ها یک تکنیک جدید ssi بر اساس EMD در آنالیز مودال محیطی بیان کردند.[۳۶] در این تکنیک برای اولین بار آن‌ها داده های اندازه‌گیری شده برای تابع پاسخ مودال را به EMD انتقال دادند سپس روش ssiرا برای استخراج پارامترهای مدال اعمال کردند با تکمیل تحقیقات ژیانگ، هوان در سال ۲۰۰۶ روش‌هایی بر اساس زیر فضا را برای استخراج سری های زمانی مختصات مودال توضیح داد. [۳۷] او ادعا کرد که این روش محدودیت های روش های قبلی که در آن تعداد مختصات مودال با تعداد سنسورهای محدود می شوند را ندارد.

۳ -روش **OMA in Frequency Domain, FDD-type Procedures**

FDD یک روش OMA در حوزه ی فرکانس می باشد. روش های OMA در حوزه ی فرکانس بر اساس ارتباط ساده مابین ورودی و خروجی چگالی طیفی قدرت (PSD) یک فرآیند تصادفی می باشد. (باندت و پیرسول سال ۱۹۸۶). [۳۸] ساده ترین روش در حوزه ی فرکانس روش پیک پیکینگ می باشد که در آن فرکانس های طبیعی