بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

**پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی**

عنوان:

# شناسایی نیرو در سازه هایی با مودهای نزدیک به هم

توسط:

**هدی سرپرست**

استاد راهنما:

**دکتر محمدرضا آشوری**

مهر ماه ۱۳۹۱

بنام خدا

دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه آقای / خانم .هدی مریم برای اخذ کارشناسی ارشد مهندسی

تحت عنوان : شناسایی نیرو در سازه‌ای با مودهای نزدیک به هم

در جلسه مورخ ۹۱/۷/۲۴ بررسی و با نمره بیست ۲۰ مورد تایید قرار گرفت .

هیئت داوران :

استاد راهنما : دکتر محمدرضا آشوری امضاء
استاد مشاور : امضاء
استاد داور : دکتر سیدالحسن میرروشندل امضاء
استاد داور : دکتر علی تمدن طلب امضاء

مسئول تحصیلات تکمیلی : دکتر سیدالحسن میرروشندل امضاء

## تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش بینهایت هستی را که توان و استعداد انجام آنچه را که دوست دارم به من عطا کرد، و با تشکر و قدردانی از زحمات دلسوزانه پدر و مادر عزیزم که رفاه و راحتی خود را فدای راحتی و آرامش خاطر من کرده اند.

و با تشکر ویژه از استاد راهنمای ارجمندم دکتر محمد رضا آشوری که با اخلاق، صبر و درک والای خود فضای علمی سرشار از صمیمیت را در هر زمان برایم مهیا نمودند تا این پایان نامه به مرحله پایانی خود برسد.

در ادامه از مهندس محمد مهدی خطیبی که در تمامی مراحل این پایان نامه مرا یاری کرده اند کمال تشکر و امتنان را دارم.

**تقدیم به:**

مادر صبور و پدر فداکارم؛
آن ها که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر.
توانشان رفت تا به توان برسم. و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند.
در برابر وجود گرامیشان، زانوی ادب بر زمین می‌نهم و
با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بر دستانشان بوسه می‌زنم.

اینجانب ..... متعهد می شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان

.....

که به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد رشته ..... گرایش .....

به گروه مهندسی ..... دانشکده مهندسی دانشگاه سمنان ارائه شده ، دارای اصالت پژوهشی و حاصل فعالیت های علمی اینجانب می باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود ، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان نامه از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به نیز از طرف مراجع زیربط قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی :

شماره دانشجویی :

امضا

# چکیده

شناسایی نیرو در آنالیز مودال محیطی بسیار حائز اهمیت است . زیرا لازمه طراحی د قیق و تعمیر و نگهداری سازه ها می باشد . در این پایان نامه روش جدیدی در حوزه فرکانس برای تخمین نیرو در سازه هایی با مودهای نزدیک به هم ارائه شده است که برخلا ف روش های قبلی قابلیت اندازه گیری نیروی اتفاقی را دارد و در فرکانس های طبیعی نیرو را با دقت بالایی تخمین می زند . بدین منظور ابتدا شبیه سازی روش زیرفضای اتفاقی بر مبنا ی کواریانس بر روی یک تیر یک سر درگیر انجام و اثر نویز و افزایش دمپینگ در دقت پارامترهای م ودال حاصل، در مقایسه با نتایج اجزای محدود بررسی شده است. سپس روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای کواریانس بر روی یک ورق که دارای مودهای نزدیک به هم می باشد اجرا شده و اثر شرایط مختلف نظیر؛ نویز، میزان نزدیکی فرکانس های دو مود و بالا بودن دمپینگ سیستم در دقت پارامترهای مودال بدست آمده، مورد بررسی قرارگرفته است. در ادامه بمنظور شناسایی نیرو در ورق، روش ارائه شده برای تخمین نیرو، بر روی آن اجرا شده است. نتایج شبیه سازی دقت مناسب روش ارائه شده را در تخمین نیرو در سازه ای با مودهای نزدیک به هم نشان می دهد. همچنین به منظور بررسی تجربی، یک رینگ چرخ خودروی پژوی ۴۰۵ تحت آزمایش های مودال محیطی و مودال کلاسیک قرار گرفته و داده های بدست آمده از این آزمایش ها به ترتیب با روش های زیر فضای اتفاقی و یکپارچه آنالیز و با یکدیگر مقایسه شده ا ست. نتایج شبیه سازی و آزمایش دقت بالای روش زیرفضای اتفاقی بر مبنا ی کواریانس را در شناسایی مودهای نزدیک به هم نشان می دهد.

**واژگان کلیدی:** شناسایی نیرو، مودهای نزدیک به هم، روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای کواریانس، پارامترهای مودال، آزمایش مودال محیطی، آزمایش مودال کلاسیک، روش یکپارچه

# مقدمه

آنالیز مودال محیطی [1] یکی از روش های شناخته شده برای تحلیل دینامیکی سازه می باشد. در این روش خواص دینامیکی سازه فقط با اندازه گیری پاسخ قابل محاسبه است و نیازی به اندازه گیری نیرو نیست . بنابراین در سازه های بزرگ که امکان تحریک وجود ندارد یا در مواردی که سازه تحت نیروهای محیطی نظیر، باد، تردد خودرو، تردد عابر پیاده و ... قرار دارد، بدلیل غیرقابل اندازه گیری بودن این نیرو ها؛ استفاده از روش های آنالیز مودال محیطی ضرورت می یابد. اما نکته حائز اهمیت در اینجا این است که برای آنالیز دقیق، طراحی بهینه و تعمیر و نگهداری سی ستم علاوه بر خواص دینامیکی سازه باید نیروی دینامیکی فعال بر

[1] Operational Modal Analysis (OMA)

روی سازه نیز شناسایی شود. روش های بسیاری برای تخمین نیرو در حوزه فرکانس [۱] و حوزه زمان[۲] وجود دارد. اما مشکل اغلب این روش ها آن است که در فرکانس های طبیعی سیستم، نیرو را با اختلاف زیادی از مقدار واق عی تخمین می زنند . مطالعات انجام شده بر روی روش های شناسایی نیرو نشان می دهد که در همه روش های حوزه فرکانس نیاز به حل مسئله معکوس[۳] می باشد که اغلب با مشکل ایل کاندیشن [۴] روبرو می شود و بنابراین بمنظور حل این مشکل باید راه حل مناسبی اتخاذ شود . همچنین اکثر این روش های حوزه فرکانس و حوزه زمان در عمل قادر به تخمین نیروی ساده نظیر ؛ ضربه[۵] یا سینوسی[۶] در یک نقطه مشخص از سازه می باشند و اگر تعداد نیروهای فعال بر روی سازه زیاد باشد یا اینکه چند نوع نیرو بطور همزمان به سازه وارد شو رد قابلیت خود را در تخمین دقیق نیرو از د ست می دهند. در این پایان نامه روش جدیدی در حوزه فرکانس برای تخ مین نیرو در سازه هایی با مودهای نزدیک به هم[۷] ارائه شده است . مزیت روش ارائه شده نسبت به روش های قبلی آن است که اولا؛ مسئله معکوس در آن با مشکل ایل کاندیشن رو به رو نمی شود و این مزیت بزرگی محسوب می شود. ثانیا؛ برخلاف روش های قبلی که حساسیت زیادی در تخمین نیرو در فرکانس های طبیعی سیستم دارند، روش ارائه شده حتی در فرکانس های طبیعی سیستم نیز نیرو را با دقت بسیار خوبی تخمین می زند . ثالثا؛ قابلیت اندازه گیری نیروی اتفاقی[۸] را دارد و بدلیل اینکه اغلب سازه های موجود در محیط اطراف ما تحت بار اتفاقی قرار دارند، این مزیت بسیار مهمی می باشد.

[1] Frequency Domain
[2] Time Domain
[3] Inverse Problem
[4] Ill- Condition
[5] Impulse
[6] Sinusoidal
[7] Close Modes
[8] Random

دلیل انتخاب یک سازه با مودهای نزدیک به هم برای تخمین نیرو با روش ارائه شده این است که بسیاری از سازه های موجود در محیط پیرامون ما سازه های متقارن و پیچیده ای می باشند و وجود مودهای نزدیک به هم در چنین سازه هایی غیر قابل اجتناب است.

بنابراین در فصل اول، ابتدا مروری بر روی روش های شناسایی نیرو در دو حوزه فرکانس و زمان انجام شده است و این روش ها با یکدیگر مقایسه شده اند . سپس روش های شناسایی مودهای نزدیک به هم مورد بررسی قرار گرفته است و از بین آن ها روشی که در عمل قابلیت شناسایی دقیق پارامترهای مودال را دارد انتخاب شده است. در فصل دوم نیز به معرفی آنالیز و آزمایش مودال، عوامل ایجاد خطا در آزمایش و راه حل هایی برای کاهش آن ها، کاربردهای آنالیز مودال، معرفی آنالیز مودال محیطی و مزیت های آن پرداخته شده است. مباحث مربوط به تئوری روش های زیرفضای اتفاقی[1] و تخمین نیرو در فصل سوم مطرح شده است. از آنجایی که برای تخمین نیرو ابتدا باید پارامترهای مودال سازه شناسایی شوند ، در فصل چهارم شبیه سازی روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای کواریانس[2] بر روی یک تیر یک سر درگیر در محیط نرم افزار متلب[3] انجام شده و پارامترهای مودال بدست آمده است. همچنین اثر نویز و بالا بودن دمپینگ سیستم با وجود نویز مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مودال حاصل با نتایج اجزای محدود مقایسه شده است. سپس شبیه سازی روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای کواریانس بر روی یک ورق که دارای مودهای نزدیک هم می باشد انجام شده است . در این شبیه سازی اثر شرایط مختلف نظیر؛ نویز، میزان نزدیکی فرکانس های دو مود و بالا بودن دمپینگ سیستم مورد بررسی قرارگرفته است. در انتها بمنظور شناسایی نیرو در سازه با مودهای نز دیک به هم

[1] Stochastic Subspace Identification (SSI)
[2] Stochastic Subspace Identification– Covariance Driven (SSI-COV)
[3] Matlab

شبیه سازی روش ارائه شده برای تخمین نیرو بر روی ورقی که پارامترهای مودال آن از روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای کواریانس بدست آمد انجام شده است.

همچنین به منظور بررسی تجربی، در فصل پنجم یک رینگ چرخ خودروی پژوی ۴۰۵ تحت آزمایش مودال محیطی و آزمایش مودال کلاسیک قرار گرفته است . داده های بدست آمده از این آزمایش ها به ترتیب با روش زیر فضای اتفاقی و روش یکپارچه [1] آنالیز و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شده ا ست. در فصل ششم به بحث بر روی نتایج حاصل و نتیجه گیری پرداخته شده است . سرانجام در بخش ضمائم مقالات منتشر شد ه از این کار تحقیقاتی ارائه شده است.

[1] Global

# فصل اول
# مروری بر تحقیقات گذشته

## ۱ ۱ -مروری بر روش های شناسایی نیرو

اندازه گیری نیروی دینامیکی فعال روی سازه بطور مستقیم غیر ممکن یا دشوار است اما شناسایی این نیروها بمنظور آنالیز و طراحی بهینه سیستم لازم می باشد . با توجه به اینکه اندازه گیری پاسخ سازه با نیروی مجهول امکان پذیر است بنابراین از این پاسخ می توان برای محاسبه نیروی مجهول استفاده کرد . مثال های متعددی نشان می دهد که تعیین نیروهای فعال روی سازه ضروری است نظیر نیروی عکس العمل پایه موتور، نیروی باد روی سازه های مکانیکی و عمرانی، نیروهای فعال روی هلی کوپترهای در حال پرواز و همچنین ماشین های

دوار مانند توربین ها و پمپ ها.

نیروهای خارجی وارد بر سازه به سه دسته تقسیم می شوند:

۱ -نیروی فضایی نظیر نقطه ای یا گسترده

۲ -نیروی زمانی نظیر ضربه، هارمونیک، پریودیک و تصادفی

۳ - نیروی فضایی- زمانی نظیر نیروی متحرک

به طور کلی دو روش برای تخمین نیرو وجود دارد:

۱ -روش مستقیم: در این روش سنسور جایی قرار می گیرد که نیرو وارد شده است.

۲ -روش غیر مستقیم: در این روش ممکن است سنسور در محل نیرو قرار نگیرد.

که معمولاً از روش های غیر مستقیم استفاده می شود.

در نوعی تقسیم بندی مهم دیگری روش های تخمین نیرو به دو دسته حوزه زمان و حوزه فرکانس تقسیم می شوند.

در ادامه به شرح روش های موجود در این حوزه ها پرداخته شده است.

## ۱ ۱ ۱ - روش های حوزه فرکانس

در این روش ها برای تعیین نیرو باید به حل مسئله معکوس پرداخت . همانگونه که توسط ای. جاکولین[1] و همکارانش بیان شده است [۱]، اغلب رفتار و اندازه مقادیر ویژه ماتریس پاسخ ضربه، نوع مشکلی را که در حل مسئله معکوس وجود دارد تعیین می کند. در این راستا دو نوع مشکل ممکن است در حل مسئله پیش بیاید. مسئله فقط ممکن است ایل پوز[2] باشد یا اینکه ایل پوز و ایل کاندیشن باشد.

در صورتیکه مقادیر ویژه ماتریس پاسخ ضربه به آرامی به سمت صفر میل نمایند بدون اینکه افت ناگهانی در آن ها مشاهده شود، مسئله فقط ایل پوز خواهد بود. در این شرایط

[1] E.Jacquelin
[2] Ill-Pose

مسئله حل پایدار داشته و با حل معکوس آن می توان نیروها را بدست آورد . ولی اگر مقادیر ویژه ماتریس پاسخ ضربه در مسیر خود به سمت صفر دارای افت ناگهانی باشند، مخصوصا در حالتیکه مقادیر ویژه پس از افت ناگهانی ، کمتر از مقدار $۱۰^{-۱۶}$ شوند مسئله ایل پوز و ایل کاندیشن خواهد بود. در این حالت حل پایدار برای مسئله وجود ندارد و با حل م عکوس بدون تصحیحات نمی توان نیروها را بدست آورد.

در حالت دوم که مسئله ایل پوز و ایل کاندیشن می شود، به دلیل اینکه خطای حل از دقت محاسباتی کامپیوتر فراتر می رود، حل مسئله ناپایدار می شود و یا اینکه با خطای بسیار زیادی همراه می باشد. دلیل این ناپایداری از دید حوزه زمان تفاوت زمانی است که به طول می انجامد تا موج تولید شده در نقطه تحریک به نقطه اندازه گیری برسد. این اختلاف زمانی باعث می شود که تعدادی از سطرها و ستون های ماتریس پاسخ ضربه سیستم در حوزه زمان صفر شوند و این باعث به وجود آمدن مقادیر ویژه بسیار کوچکتر سی ستم معادلات می شود . در نتیجه هر چه این تفاوت زمانی کمتر باشد، احتمال اینکه سیستم ، مقادیر ویژه نزدیک به صفر داشته باشد کمتر خواهد شد . اما در حالتیکه مقدار این تفاوت زمانی بیشتر شود، مقادیر ویژه نزدیک به صفر بیشتر می شوند و حل سیستم مشکل و یا غیر ممکن می شود . دو عامل که تاثیر بسیار مهمی بر این تفاوت زمانی دارند عبارتند از فاصله نقطه اندازه گیری از نقطه تحریک و سختی سازه. هر چه فاصله نقطه اندازه گیری از نقطه تحریک بیشتر شود، این فاصله زمانی زیادتر می شود در صورتیکه با افزایش سختی سازه این فاصله زمانی کم می شود . لذا می توان نتیجه گیری کرد که هر چه محل اندازه گیری پاسخ به محل اعمال تحریک نزدیک تر باشد حل مسئله معکوس با مشکلات کمتری روبه رو می شود [۲].

## ۱ ۱ ۱ ۱ روش تجزیه مقطع مقادیر ویژه[۱] و تیخونف رگولاریزیشن[۲]

در حوزه ریاضیات دو راه حل به منظور کم کردن اثر ایل کاندیشن حل معکوس با استفاده از مقادیر ویژه یک ماتریس وجود دارد . این دو روش عبارتند از ؛ روش تجزیه مقطع مقادیر ویژه و تیخونف رگولاریزیشن. همانگونه که پیش تر نیز اشاره شده است منبع مشکلات سیستم در حین معکوس نمودن ماتریس از مقادیر ویژه بسیار کوچک آن ناشی می شود . لذا حذف نمودن این مقادیر ویژه می تواند به پایداری حل معکوس کمک نماید . همچنین کاهش اثر این مقادیر ویژه بسیار کوچک در حین فرایند معکوس گیری که با تخصیص وزن های متناسب به آنها امکان پذیر می باشد، حل معکوس یک سیستم ، با حل ناپایدار را میسر می سازد. روش تجزیه مقطع مقادیر ویژه به منظور پایدار نمودن مسئله ، به شناسایی و حذف مقادیر ویژه بسیار کوچک معادلات می پردازد در حالیکه روش تیخونف رگولاریزیشن با تخصیص وزن متناسب با اندازه مقادیر ویژه سعی در کاهش اثر مقادیر ویژه بسیار کوچک و پایدار نمودن حل معکوس دارد [۲]. روش تیخونف بر خلاف روش تجزیه مقطع مقادیر ویژه به منظور کاهش شدت ایل کاندیشن مسئله از یک پارامتر رگولاریزیشن که حل را به سمت صاف بودن[۳] هدایت می کند استفاده می نماید [۲].

یکی از کاربردهای روش تیخونف رگولاریزیشن، تخمین نیروهای ناشی از احتراق موتور بر روی میل لنگ یک خودروی در حال کار کردن است . به منظور تعیین پارامترهای رگولاریزیشن در این روش از دو معیار منحنی ال [۴] و ارزیابی تقاطع تعمیم یافته [۵] می توان

[1] Truncated Singular Value Decomposition (TSVD)
[2] Tikhonov Regularization
[3] Smooth
[4] L-Curve
[5] Generalized Cross Validation (GCV)

استفاده نمود. البته در حضور نویز معیار منحنی ال نسبت به معیار ارزیابی تقاطع تعمیم یافته نتایج بهتری می دهد [۳].

## ۱ ۱ ۲ - تیخونف رگولاریزیشن اصلاح شده[1]

تیخونف رگولاریزیشن تاثیر بسزایی در افزایش کیفیت پاسخ های بازسازی شده دارد . همچنین اشاره شد که تیخونف رگولاریزیشن با احتیاط بیشتری نسبت به تجزیه مقطع مقادیر ویژه به حذف و یا نگاه داشتن اثر مقادیر ویژه می پردازد . در روابط استاندارد تیخونف رگولاریزیشن، وزن تخصیص یافته به مقادیر ویژه ، به نسبت اندازه آن ها می باشد و در نتیجه ناحیه ای که در آن مقادیر ویژه به سمت صفر میل می نماید، ناحیه بزرگی می باشد. این در حالی است که اگر این ناحیه کوچک تر باشد و وزن مقادیر ویژه افت سریع تری داشته باشد اثر مقادیر ویژه بسیار کوچک به نحو بهتری حذف می شود و بدلیل آنکه مقادیر ویژه با وزن متناسبی وزن دار می شوند انتظار می رود که نتایج بهتری بدست آید.

به منظور افزایش اثر فرکانس های طبیعی در پاسخ می توان پاسخ سیستم را با پاسخ ضربه خود سیستم کانوالو[2] نمود. از دیدگاه فیزیکی این عمل مانند این است که سیستم را با ورودی که در آن فرکانس های طبیعی سیستم وجود دارند تحریک کرد. این عمل باعث افزایش قدرت فرکانس های طبیعی در پاسخ اندازه گیری شده می شود. این اصلاح مخصوصا در مواردی که نیاز است نیروی ضربه بازسازی شود موثر واقع می شود . از دید مقادیر ویژه، با این عمل، مقادیر ویژه کوچک اثرشان به صورت مضاعف کم می شود و مقادیر ویژه بزرگتر اثرشان در همان حد می ماند . این عمل به سادگی باعث جدا شدن مقادیر ویژه می شود و اجازه می هد که آن ها افت با شیب دلخواه را داشته باشند [۲].

[1] Modified Tikhonov Regularization
[2] Convolve

### ۱-۱-۴-۳ - روش شبه معکوس وزنی تکراری[1]

این روش برای شناسایی نیروی متمرکز بکار می رود و مشکل ایل کاندیشن مسئله معکوس راحل کرده و توانمندی خاصی در رابطه با انتخاب پارامتر $P$ (ماکزیمم تعداد تاخیر زمانی) دارد [۴-۶].

### ۱-۱-۴-۴ - روش شبه معکوس کلاسیک[2]

تحقیقات بسیاری بر روی شناسایی نیرو با استفاده از روش شبه معکوس کلاسیک انجام شده است. در روش شبه معکوس کلاسیک نیرو از رابطه (۱-۱) بدست می آید:

$$F\left(\omega_f\right)=\left[H\left(\omega_f\right)\right]^{+}.X(\omega_f) \qquad f=1,...,N_f \tag{۱-۱}$$

که در آن $F$ ، $X$ و $H$ نیرو، پاسخ و ماتریس پاسخ فرکانسی [3] می باشند. همچنین $\omega_f$ فرکانس در بازه فرکانسی $f$ ام، $N_f$ تعداد بازه های فرکانسی و علامت $^{+}$ شبه معکوس می باشد.

شبه معکوس ماتریس پاسخ فرکانسی از رابطه (۱-۲) قابل محاسبه می باشد که بالانویس $H$ در آن نهاد مزدوج ترانسپوز[4] است.

$$\left[H\left(\omega_f\right)\right]^{+}=\left[H^{H}\left(\omega_f\right).H\left(\omega_f\right)\right]^{-1}.H^{H}\left(\omega_f\right) \tag{۱-۲}$$

در صورتیکه تعداد موقعیت های نیرو ($N_i$) محدود باشد و تعداد خروجی ها و مودهای اندازه گیری شده کافی باشند، نیرو از روش شبه معکوس کلاسیک با دقت خوبی بدست می آید.

[1] Iteratively Weighted Pseudo-Inverse (IWPI)
[2] Classic Pseudo-Inverse
[3] Frequency Response Function (FRF)
[4] Hermitian

روش شبه معکوس نیروهایی را که در سراسر سازه توزیع شده اند تخمین می زند. بدین معنی که اثر یک یا چند نیروی متمرکز را در فرکانس $f$ ام تخمین می زند و این باعث می شود که شناسایی دقیق موقعیت نیروی متمرکز دشوار شود [۶-۱۳].

### ۱-۱-۵ - روش تخمین ورودی بازگشتی[1]

در این روش ابتدا مدل فضای حالت سیستم تعیین شده و پاسخ اندازه گیری می شود. سپس با استفاده از الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی ورودی نامعلوم تخمین زده می شود [۱۴و۱۵]. با استفاده از این روش می توان نیروهای اتفاقی، ضربه و متناوب[2] را با دقت مناسبی تخمین زد.

### ۱-۱-۶ - روش کمترین مربعات[3]

یک روش رایج برای محاسبه نیروی دینامیکی، روش کمترین مربعات می باشد [۱۶]. متاسفانه دقت این روش اغلب در فرکانس های نزدیک رزونانس های سازه کم می شود. برای غلبه بر این مشکل، دو روش تجزیه مقطع مقادیر ویژه و تیخونوف وجود دارد. برای م اتریس های پاسخ فرکانسی با ابعاد کوچک روش کمترین مربعات بر مبنای تیخونوف بهتر از روش کمترین مربعات بر مبنای تجزیه مقطع مقادیر ویژه می باشد. روش کمترین مربعات می تواند برای انواع مسائل تعیین نیرو اعم از تعیین نیروی منفرد یا مجموعه ای از نیروها استفاده شود.

### ۱-۱-۷ - روش کمترین مربعات مجموع[4]

این روش بهتر از روش کمترین مربعات عمل می کند. جزئیات مربوط به این روش بطور کامل درمرجع [۱۶] توضیح داده شده است.

---

[1] Recursive Input Estimation Approach
[2] Periodic
[3] Least Souare
[4] Total Least Souare

### ۱ ۱ ۲ - روش های حوزه زمان

در این روش ها حل دقیق تری وجود دارد و نیرو در زمان واقعی تخمین زده می شود . یکی از کاربردهای روش های حوزه زمان تخمین نیروهای وجهین [1] می باشد [۱۷]. علیرغم تحقیقات انجام شده، شناسایی نیرو در حوزه زمان به گستردگی حوزه فرکانس مطالعه نشده است.

### ۱ ۱ ۲ ۱ - روش مجموع شتاب های وزنی[2]

این روش بطور موفق در مسائل ضربه [3] و برخورد بکار می رود . محدودیت روش مجموع شتاب های وزنی آن است که باید در این روش تعداد سنسورها بزرگتر مساوی تعداد مودها انتخاب شود [۱۸و۱۹]. همچنین در روش مجموع شتاب های وزنی نیروهای وارد به سازه، فقط در صورتیکه سازه دارای مود صلب باشد قابل باز سازی می باشند. این روش نیروها و ممان های معادل را در مرکز جرم سازه تخمین می زند، بنابراین برای تخمین نیروهای گسترده بهتر عمل می نماید. برای تعیین نیروهای منفرد در این روش باید دو شرط زیر برقرار باشد:

۱ -موقعیت نیرو معلوم باشد.

۲ -تعداد نیروهای وارد بر سازه کمتر یا برابر تعداد مودهای صلب باشد.

### ۱ ۱ ۲ ۲ - روش بسط پاسخ ها

یک روش به منظور شناسایی نیروهای وارد به سازه در حوزه زمان این است که با استفاده از روش های موجود، پاسخ های اندازه گیری شده ی سیستم را به پاسخ های سیستم در تمامی درجات آزادی (درجات آزادی اندازه گیری نشده) بسط داد و با استفاده از پاسخ های کامل سیستم نیروهای وارد بر سیستم را با حل معکوس معادلات سیستم بازسازی نمود . این

[1] Interfacial Forces
[2] Sum of Weighted Accelerations Technique (SWAT)
[3] Impact

روش در حقیقت یک روش مکمل برای روش مجموع شتاب های وزنی می باشد که باعث افزایش کارایی آن نیز می شود [۲۰].

در روش مجموع شتاب های وزنی نیروهای وارد به سازه فقط در صورتیکه سازه دارای مود صلب باشد قابل باز سازی می باشند در صورتی که با استفاده از روش بسط پاسخ ها می توان نیروها ی وارد به سازه را حتی برای سازه های بدون مود صلب نیز محاسبه نمود . مزیت دیگر این روش نسبت به روش قبلی این است که با استفاده از این روش محل صحیح نیروهای وارد شده به سازه قابل شناسایی می باشد در حالیکه با استفاد ه از روش مجموع شتاب های وزنی به دلیل اینکه نیروها حول مرکز جرم سازه باز سازی می شوند محل اعمال آن ها بدست نمی آید [۲].

### ۱ ۱ ۲ ۳ - روش فیلتر سازه ای معکوس[1]

فیلتر سازه ای معکوس یکی دیگر از روش های حوزه زمان است . مشکل این روش آن است که گاهی اوقات حتی اگر سیستم پیش رو [2] پایدار باشد روش فیلتر سازه ای معکوس به حل ناپایدار می انجامد. این روش برای تخمین نیروی منفرد که مکان آن مشخص نیست مناسب می باشد [۱۸، ۱۹و۲۱].

### ۱ ۱ ۲ ۴ - روش فیلتر سازه ای معکوس چند مرحله ای به تاخیر افتاده [3]

این روش در واقع بهبود یافته روش فیلتر سازه ای معکوس است و می تواند یک فیلتر سازه ای معکوس پایدار ایجاد کند. روش فیلتر سازه ای معکوس چند مرحله ای به تاخیر افتاده با عمل مشتق گیری از معادلات فضای حالت در روش فیلتر سازه معکوس ، باعث بهبود ناپایداری آن می شود. در روش فیلتر سازه ای معکوس چند مرحله ای به تاخیر افتاده ، می

[1] Inverse Structural Filter (ISF)
[2] Forward
[3] Delayed, Multi-Step Inverse Structural Filter (DMISF)