پایش سلامت سازه های بتنی وروشهای نوین طراحی سازه

ایمان الیاسیان،دانشجوی دکترای عمران سازه

پایش سلامت سازه ها در دهه های اخیر به دلیل افزایش نیاز به پایش دایم سازه های بزرگ به زمینه تحقیقاتی مناسب تبدیل شده است.شناسـایی آسیب در یک سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا کشف زود هنگام آسیب می‌تواند از خرابی فاجعه بار سازه جلوگیری کند. شناسایی آسیب بدون نیاز به تخریب سازه با استفاده از پاسخ‌های فرکانسی توجه علاقمندان زیادی را در دهه اخیر به خود جلب کرده است. زیرا تغییر در مشخصات فیزیکی سازه‌ها مثل سختی وجرم و میرایی به علت آسیب، پاسخ‌های فرکانسی سازه را تغییر می‌دهد. اصل اساسی بیشتر روش‌های شناسایی آسیب این است که آسیب موجود در سازه ها، خواص سختی، جرم و خواص استهلاک انرژی سیستم را که با استفاده از پاسخ دینامیکی اندازه گیری شده سیستم بدست می‌آید، تغییر خواهد داد. این شناسایی می تواند برای درنظرگرفتن اقدامات احتیاطی انجام شود تا در صوررت لزوم برای کار تعمیر و نگهداری سازه برنامه ریزی کنیم. بطور سنتی برای شناسایی آسیب در سازه های عمرانی از بازرسی های چشمی استفاده می‌کنند. اما تشخیص آسیب در سازه‌های بزرگ به روش بصری محیطی امری هزینه بر و غیر موثر به حساب می‌آید. لذا به این دلیل روشی که بتواند به صورت موثر رخداد آسیب را شناسایی و محل آن را معلوم کند مورد نیاز است.بنابراین روش های غیرمستقیمی که بتوانند به طور مداوم سازه را پیش از آنکه به وضعیت بحرانی برسد برای تشخیص مشکلات آن بازرسی کنند، ضرورت دارند.پایش سلامت سازه ،پاسخ سازه را تحت انواع بارگذاری کنترل شده و کنترل نشده را تحلیل می‌کند.

فرآیند سنجش سلامت سازه

فرآیند سنجش سلامت سازه تحت عنوان پایش سلامت سازه SHM نامگذاری شده است ، در انجام پایش سعی می‌کنیم تا ورودی‌ها و پاسخ‌های سازه را اندازه گیری کنیم؛ به منظور اینکه از آنها طی یک آنالیز معکوس برای استخراج مشخصه های ساره و ردیابی تغییرات آنها و در نتیجه تشخیص شروع آسیب و خرابی در شرایط سازه‌ای استفاده کنیم.سپس از مدل‌سازی عددی سازه و تحلیل مجدد آن با توجه به شرایط موجود برای ارزیابی کارایی سازه استفاده می‌شود تا در صورت لزوم نسبت به مقاوم‌سازی آن اقدام گردد. بنابراین، فرآیند SHM یک سیستم سازه ای عبارت است از زیر نظر گرفتن سیستم با استفاده از اندازه گیری پاسخ-های دینامیکی از طریق حسگرها استخراج مشخصه های حساس به آسیب سازه با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌ها و آنالیز تحلیلی این مشخصه ها برای معین کردن وضعیت کنونی سلامت سیستم . دریک SHMطولانی مدت خروجی این فرآیند به طور دوره‌ای اطلاعات مرتبط با توانایی سازه برای اجرای نقش مورد نظرش از لحاظ عملکردی را به روز می‌کند.مراحل SHM عبارتنداز:

- ارزیابی های اجرایی
- پایش سیستم وبه دست آوردن اطلاعات
- پردازش اطلاعات و استخراج مشخصه های ذاتی سازه و شناسایی آسیب با استفاده از آنالیز تحلیلی این مشخصه ها

ارزیابی های اجرایی

این مرحله فاز صفر SHM می باشد.در این مرحله چهار سوال مرتبط با اجرای یک سیستم SHM مورد بررسی قرار می‌گیرد و پاسخ داده می‌شود :

- چه انگیزه‌های اقتصادی و امنیت جانی برای انجام پایش وجود دارد.
- برای یک سیستم در حال پایش خسارت چگونه تعریف می‌شود.
- تحت چه شرایط اجرایی و محیطی سیستم باید پایش شود.
- چه محدودیت‌هایی برای بدست آوردن اطلاعات در شرایط محیطی و اجرایی وجود دارند.

مسئله اقتصادی و ایمنی جانی اولین مسئله در ورای بحث SHM می‌باشد.این که آیا اجرای سیستم SHM برای سازه مورد نظر صرفه اقتصادی دارد و ایمنی حاصل از اجرای SHM چقدر است از سوالات مهم و تعیین کننده در ابتدای بحث SHM می‌باشد. معمولاً SHM برای سازه‌هایی که بُروز خسارت در آنها باعث ایجاد تلفات زیاد مادی و جانی می‌شود انجام می‌گیرد.
به عنوان مثال وزارت نفت انگلیس اعلام می‌کند که سود اقتصادی حاصل از اجرای یک سیسنم SHM برای یکی از سکوهای نفتی ساحلی پنجاه میلیون دلار صرفه‌جویی اقتصادی در برداشته است.این عملیات ۶سال به طول انجامیده و نتیجه تحقیقات این بود که سازه خیلی محافظه کارانه طراحی شده است. بنابراین سازه‌های بعدی کمتر محافظه کارانه طراحی شدند و لذا صرفه جویی زیادی حاصل شده است . محدودیت‌های موجود در پایش سیستم و بدست آوردن اطلاعات در شرایط محیطی و اجرایی از مسائل خیلی مهم و تاثیرگذار در بحث SHM می‌باشد.اثرات تغییرات محیطی روی پاسخ دینامیکی اندازه‌گیری شده سازه ها در مطالعات مختلف مورد اشاره قرار گرفته است. به عنوان مثال نتایج آنالیز مودال روی پل آلاموساکانیون در نیومیکزیکو نشان داد که فرکانس اولین مود، تقریبا به میزان ۵درصد در مدت ۲۴ ساعت تغییر داشته است که این قضیه مرتبط با دمای متغیر در عرض کف پل می‌باشد.این به منظور این است که تغییرات در محیط اطراف سازه با شرایط مرزی مثل انبساط حرارتی می‌تواند تغییرات مهمی در فرکانس‌های طبیعی (نسبت به آسیب) ایجاد کند.پس تغییر در شرایط محیطی و اجرایی اغلب به تشخیص غلط در آسیب سازه منجر می‌شود.چون تغییرات در شرایط محیطی و اجرایی سیگنال‌های ارتعاشی سازه را تغییر می‌دهد

بدست آوردن اطلاعات

بخش دریافت اطلاعات در فرآیند SHM شامل انتخاب کمیت‌هایی است که باید اندازه گیری شود. این کمیتها، تعیین نوع سنسور ها،تعیین محل‌های استقرار سنسورها،تعیین تعداد سنسورها ، معین کردن قدرت تشخیص سنسورها و تعیین پهنای باند انتقال اطلاعات و سخت افزار دریافت و ذخیره و انتقال اطلاعات می‌باشد. از آنجایی که اطلاعات می‌تواند تحت شرایط متغیر اندازه‌گیری شود تصفیه اطلاعات در فرآیند SHM یکی دیگر از مسائل مهم است.بنابراین ضرورت دارد تصفیه اطلاعات به منظور این که تغییرات سیگنال ایجاد شده به وسیله شرایط محیطی و اجرایی از تغییرات سازه‌ای مورد نظر مجزا شودانجام گیرد.یک راه برای تصفیه اطلاعات اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای اجرایی و محیطی می‌باشد. لذا منابع تغییر در فرآیند دریافت اطلاعات باید شناسایی شود وبه کمترین حد خود برسند. همه منابع خطا نمی‌توانند حذف شوند.بنابراین لازم است که در اندازه گیری‌ها دقت لازم را انجام دهیم تا به طور آماری بتوانیم خطاها را اندازه‌گیری نماییم.

ضرورت کنترل سلامت سازه

همزمان با پیشرفت بشر در ساخت مصالح با مقاومت بالاتر و با کیفیت بهتر، ساخت سازه‌های عظیم نیز بیشتر شده و لزوم رعایت راهکارهای پیشگیرانه فزونی یافته است. هرگونه خطا در طراحی و یا نگهداشت این سازه‌ها می‌تواند به فاجعه ای عظیم هم از نظر مالی و هم از نظر جانی تبدیل شود. لذا ضروری به نظر می‌رسد که فرآیند اجرای عملیات تعیین خسارت و تبیین استراتژی‌های لازمه برای سازه‌های عمرانی به منظور جلوگیری از وقوع حوادث ناخواسته که کنترل سلامت سازه یا SHM گفته می‌شود صورت پذیرد. در مباحث مربوط به کنترل سلامت سازه منظور از تخریب، تغییرات ایجاد شده در هندسه و یا خصوصیات فیزیکی سازه عمرانی می‌باشد. از جمله مشخصه های تخریب، تغییرات در شرایط مرزی و ارتباط سیستمی است که تاثیرات منفی قابل توجهی در مقاومت سیستم خواهد داشت. فرآیند کنترل سلامت سازه شامل نظارت دائم بر سیستم در طول زمان و نمونه گیری از وضعیت پاسخ دینامیک سازه با استفاده از سنسورهای جاگذاری شده، نویزگیری و رفع خطا از داده‌های به دست آمده و آنالیز داده های اصلاح شده برای دریافت بهترین استراتژی است. هدف اصلی از مجموعه این عملیات، جلوگیری از ایجاد اختلال در عملکرد سازه ها به دلیل عوامل گوناگون فیزیکی و یا پدیده پیرشدگی می‌باشد. یکی از مهمترین مواقع اعمال فرآیند کنترل سازه پس از وقوع پدیده های شدید فیزیکی از قبیل زلزله و یا انفجار می‌باشد. در این مواقع از SHM برای جمع آوری و آنالیز اطلاعات به منظور بررسی میزان خسارت وارده استفاده شده و مبنای تصمیم گیری‌های بعدی برای اعمال ترمیم خواهد بود.

راهکارتشخیص الگو به روش آماری

کنترل سلامت سازه‌ها را می‌توان نمونه‌ای از تشخیص الگو به روش آماری دانست. چهار بخش اصلی را می‌توان در کنترل سلامت سازه اساسی دانست:

- ارزیابی عملیاتی
- جمع آوری داده، نرمالیزاسیون و خالص‌سازی داده
- متراکم سازی داده و استخراج ویژگی‌ها
- مدل‌سازی آماری

در حال حاضر از دو روش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری به منظور کنترل سلامت سازه استفاده می‌شود. البته در بسیاری از مواقع ازترکیب این دو به منظور کسب نتایج بهتر استفاده می‌شود.

ارزیابی عملیاتی

ارزیابی عملیاتی به منظور پاسخ گویی به چهار سؤال اساسی زیر مطرح می‌شود:

- یافتن توجیه مالی-جانی به منظور اجرای عملیات کنترل سلامت سازه.
- تخریب از چه نوعی است و مهمترین دغدغه از نقطه نظر تخریب کدام است؟
- شرایط محیطی و زیست محیطی که تحت آن سیستم باید کنترل شود چیست؟
- محدودیت‌های اعمال شده از نظر مالی و زیست محیطی برای انجام عملیات چیست؟

ارزیابی عملیاتی محدودیت هایی بر آنچه که باید کنترل شود و روش انجام کنترل اعمال می‌کند.

ارزیابی عملیاتی به ما کمک می‌کند که نقاط حساس را شناخته و سعی در بهره‌گیری از ویژگی‌های خاص تخریب مورد مطالعه دارد.

جمع آوری، نرمالیزاسیون و خالص‌سازی داده

فاز جمع آوری داده ها در پروسه SHMشامل مراحل زیر می‌باشد:

- انتخاب روش تحریک سازه
- انتخاب نوع سنسورهای مورد استفاده
- فراهم نمودن سخت‌افزار لازم برای جمع آوری، ذخیره و انتقال داده ها

در انتخاب هر یک از مراحل ذکر شده همواره مهندس سازه باید به جنبه اقتصادی بودن گزینه و تطابق آن با شرایط محیطی و عملیاتی توجه خاص داشته باشد. همچنین فاصله های زمانی و مکانی جمع آوری داده‌ها باید بهینه سازی شود.

متراکم سازی داده و استخراج ویژگی‌ها

در واقع استخراج مشخصه ها، مرحله شناسایی ویژگی‌های حساس به آسیب سازه می‌باشد که با استفاده از پاسخ ارتعاشی اندازه گیری شده سازه به دست می‌آید که به ما این امکان را می‌دهد که سازه آسیب دیده و آسیب ندیده را از هم تشخیص دهیم. اساس انتخاب مشخصه، تجربه‌ی گذشته همراه با اطلاعات اندازه‌گیری شده سیستم می‌باشد. پس از استخراج پاسخ‌های فرکانسی، با ردیابی تغییرات این پاسخ‌ها و استفاده از یک‌سری روش‌ها که در قسمت‌های دیگر بیشتر درباره‌ی آنها گفته خواهد شد و در این تحقیق یکی از آنها بکار گرفته خواهد شد (می‌توان آسیب رخ داده در سازه را شناسایی کرد.). وضعیت آسیب در سازه با جواب دادن به سوالات زیر توصیف می‌شود:

- آیا آسیب در سازه وجود دارد؟
- موقعیت آسیب در سازه کجاست؟
- آسیب در چه زمانی اتفاق افتاده است ؟
- شدت آسیب چقدر است؟

بعد از شناسایی آسیب، سازه باید با درنظر گرفتن وضعیت موجود مورد تحلیل قرارگیرد و میزان کارایی سازه سنجیده شود و در صورت لزوم نسبت به تعمیر و مقاوم‌سازی سازه اقدام شود

پایش سلامت سازه های بتنی ، تعاریف ، روش ها و تاریخچه

مقدمه ای از پایش سلامت سازه های بتنی

اکثر سازه های بتن مسلح به مرور زمان و ناشی از شرایط محیطی و یا تاثیر بارهای خارجی وارد بر آنها مانند زلزله، بار ترافیک، انفجار و سایر منابعی که در سازه ارتعاش ایجاد می نمایند دچار زوال و آسیب می شوند. علاوه بر آن، عواملی همچون خوردگی میلگردها، پدیده جداشدگی مصالح و واکنش قلیایی سنگدانه ها از جمله ساز و کارهای داخلی ایجاد آسیب در سازه های بتن مسلح می باشند. به منظور شناسایی نقایصی که ممکن است به مرور، سلامت سازه را تهدید نمایند و یا منجر به خرابی آن شوند باید شرایط و سلامت سازه در طول زمان مورد پایش قرار گیرد. در این نوشته به پایش سلامت سازه ها می پردازیم.

لفظ پایش سلامت سازه ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه های مهندسی اطلاق می گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضا) یک سیستم سازه ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد بعنوان آسیب تعریف می شود. در سال‌های اخیر مطالعات پژوهشی زیادی جهت بهبود دقت و قابلیت اطمینان روش پایش سلامت سازه انجام شده است. بازرسی های سنتی سازه معمولا شامل بازرسی های چشمی توسط افراد آموزش دیده و با تجربه انجام می شده ولی در برخی موارد خاص پیشرفته تر روش های غیرمخرب مانند روش های الکترومغناطیس، روش های فراصوتی و دیگر روش های مبتنی بر انتشار امواج نیز استفاده شده است.

برای چنین بازرسی هایی دسترسی به محل مورد نظر از سازه برای آزمایش نیاز می باشد و همچنین تخصص افراد انجام دهنده آزمایش تا حد زیادی موثر می باشد. همچنین در اغلب این روش ها نیاز به کار دقیق و فشرده و پرهزینه می باشد. به همین دلیل روشهای جایگزین که به صورت خودکار اطلاعات سازه را برای تعیین وضعیت آن جمع آوری و تجزیه و تحلیل می‌کنند، توسط پژوهشگران دنبال شد. در این روش ها، پایش سلامت سازه ها مبتنی بر این ایده اساسی هستند که خصوصیات دینامیکی یک سازه تابعی از خصوصیات فیزیکی آن می باشد بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی سازه ناشی از آسیب های وارد بر آن می تواند موجب تغییر خصوصیات دینامیکی آن شود. در نتیجه داده های ارتعاش سازه جمع آوری شده و برای شناسایی آسیب های سازه استفاده می شود.

مبانی پایش سلامت سازه های بتنی

لفظ پایش سلامت سازه ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه های مهندسی اطلاق می گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضاء) یک سیستم سازه ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد به عنوان آسیب تعریف می شود. روش های پایش سلامت سازه ها مبتنی بر این ایده اساسی هستند که خصوصیات دینامیکی یک سازه تابعی از خصوصیات فیزیکی آن می باشد. بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی سازه ناشی از آسیب های وارده برآن می تواند موجب تغییر خصوصیات دینامیکی آن شود. ارزیابی سلامت و یکپارچگی عملکرد سازه های عمرانی در طول زمان از طریق پایش رفتار و برداشت خصوصیات دینامیکی آنها انجام می شود. تشخیص وجود آسیب در سازه ها، بطور مستقیم و بر مبنای تغییرات شناسایی شده در خواص دینامیکی آنها صورت می گیرد.

مقایسه سازه و انسان

طریقه پایش سلامت سازه مشابه به درد و بیماری در بدن انسان است و اینکه چگونه قابل درمان است. اگر سازه را به عنوان بدن انسان فرض شود، هنگامی که فرد آسیب می بیند، شرایط عدم سلامت به وسیله سیستم عصبی کشف می شود و پاسخ هایی را به سمت مغز به این منظور ارسال می کند. شخص در می یابد که مریض است و به دکتر جهت ممانعت از توسعه بیماری مراجعه می کند. حسگرها مشابه به سیستم عصبی و هدف یابی از سیستم به عنوان مغز انسان عمل می کنند. متخصصان سازه نقش دکتری را

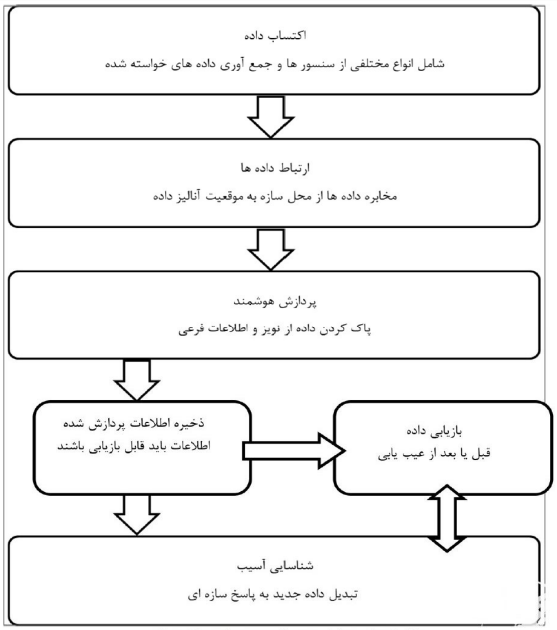
دارند که به پاسخ ها گوش می دهند و برای درمان راه حل و استراتژی هایی ارائه می کنند. در سازه ها این پاسخ ها اهمیت زیاد دارند و قابل سنجش هستند. فرآیند پایش سلامت سازه ها شامل چند مرحله می باشد :

۱- تحت نظر داشتن وضعیت سازه در طی زمان از طریق انجام آزمون های ارتعاشی دوره ای و اندازه گیری پاسخ ارتعاشی سازه به کمک سنسور هایی که در نقاط مختلف سازه تعبیه می گردند.

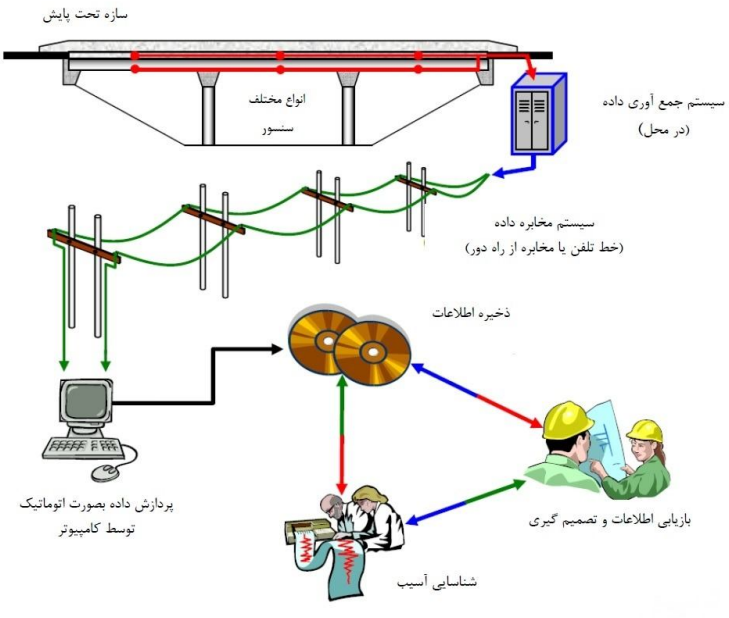
۲- استخراج ویژگی های و مشخصه های حساس به آسیب از داده های اندازه گیری شده

۳- تعیین وضعیت فعلی سلامت سازه بر پایه تحلیل و پردازش مشخصه های استخراج شده

عناصر سیستم پایش سلامت سازه



شکل ۱- عناصر تشکیل دهنده یک سیستم پایش سلامت سازه



شکل ۲- عناصر تشکیل دهنده یک سیستم پایش سلامت سازه [۲].

دسته بندی پایش سلامت سازه

پایش سلامت سازه را با توجه به نوع آزمایش و روش جمع آوری داده ها و می توان به چهار دسته کلی که هرکدام متشکل از زیر مجموعه هایی اند، تقسیم بندی کرد.

- آزمایش میدانی استاتیکی
- آزمایش میدانی دینامیکی
- پایش دوره ای
- پایش پیوسته

سطوح پایش سلامت سازه

یک روش توانمند و کارآمد شناسایی آسیب باید بتواند:

۱- وجود آسیب را شناسایی نماید.

۲- محل آسیب را تعیین نماید.

۳- میزان و شدت آسیب را تعیین نماید.

۴- کارایی و عملکرد آینده سازه را بر اساس سطح آسیب فعلی آن ارزیابی نماید.

مزایا و معایب استفاده از سیستم های پایش سلامت

- کم اشتباه و قابل اطمینان
- کاهش زمان از کارافتادگی ساز
- جلوگیری از خرابی های نابهنگام
- کاهش هزینه چرخه حیات سازه
- افزایش بهره وری
- افزایش ایمنی
- طولانی تر شدن عمر مفید سازه
- و در مقابل می توان به مقرون به صرفه نبودن آن ها به خصوص در سازه های کوچک و یا کم اهمیت اشاره نمود.

تعریف آسیب

همانطور که اشاره شد هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی (شامل تغییر در شرایط مرزی و اتصالات اعضا) یک سیستم سازه‌ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد به عنوان آسیب تعریف می شود.

انواع آسیب

پدیده آسیب در یک سازه را می توان به آسیب خطی و غیر خطی دسته بندی نمود. آسیب خطی حالتی است که در آن سازه الاستیک خطی اولیه، پس از آسیب همچنان به صورت خطی باقی می ماند. این حالت در صورت وقوع خسارت های با شدت کم در سازه تحقق می یابد. پارامترهای مودال سازه در این حالت تغییر می کنند اما سازه همچنان رفتار خطی از خود نشان می دهد.
آسیب غیر خطی نیز حالتی است که سازه دارای رفتار الاستیک خطی پس از ایجاد آسیب، رفتار غیر خطی از خود نشان می دهد. اغلب روش های شناسایی خرابی در هنگام مدلسازی، آسیب را به صورت خطی در نظر می گیرند، زیرا این امر سبب سهولت در امر مدلسازی و استخراج معادلات حاکم بر حرکت می شود. اما در بسیاری از موارد عملی، فرض خطی بودن رفتار سازه پس از ایجاد آسیب منطبق بر واقعیت نیست که از جمله این موارد می توان به آسیب های ایجاد شده در بعضی از المان های سازه ای در اثر وقوع زلزله هایی با شدت های متوسط و زیاد اشاره نمود.

تاریخچه تحقیقات در مورد پایش سلامت سازه های بتنی

دیوارهای برشی برای مقابله با بارهای جانبی وارد بر سازه ها طراحی می شوند. خرابی و نقص در عملکرد سازه ای دیوارهای برشی می تواند منجر به بروز آسیب های جدی و یا حتی خرابی پیشرونده سازه های بتنی گردد. بنابراین شناسایی زود هنگام آسیب دیوارهای برشی و توسعه روش های موثر و کارآمد پایش سلامت دیوارهای برشی امری حیاتی است.

شی و همکاران در سال ۲۰۰۹ رویکردی مبتنی بر استفاده از سنگدانه های هوشمند برای پایش سلامت دیوارهای برشی بتنی پیشنهاد کردند. براساس کار ایشان، قبل از بتن ریزی دیوار، سنگدانه های پیزوالکتریک در موقعیت های مشخصی در درون دیوار قرار داده شده و از این طریق یک شبکه سنجش فعال به منظور پایش سلامت یک نمونه دیوار برشی تشکیل شده است. نمونه مورد نظر تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته و بطور تدریجی تا مرز خرابی کامل بارگذاری شده است.

با اعمال میدان الکتریکی به یکی از سنگدانه ها یک موج تنش هدایت شده از محل سنگدانه مذکور به اطراف پراکنده می شود و سایر سنگدانه ها در نقش حسگرهایی برای دریافت اطلاعات این امواج ظاهر می شوند. سیگنال های رسیده به هرکدام از حسگرها (سنگدانه ها) با استفاده از بسته ویولت تجزیه شده و شاخص آسیبی براساس انرژی سیگنال ها در فرکانس های متفاوت تعریف شده است. سطح دیوار به چندین بخش تقسیم شده و آسیب بخش های مختلف دیوار با استفاده از شاخص مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. ایشان اشاره می کنند که روش مذکور می تواند به عنوان یک ساز و کار احتیاطی به منظور پیشگیری از توسعه خرابی های سازه ای مهم د دیوار های برشی مورد استفاده قرار گیرد. فرهیدزاده و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک شاخص آسیب جدید برای دسته بندی کمی آسیب در اجزای بتن مسلح پیشنهاد کردند که در واقع شاخصی برای کمی کردن آسیب های مشاهده شده در بازبینی های عینی اعضای بتنی می باشد. روش پیشنهادی آنها بر پایه تحلیل فراکتال الگوی ترک باقی مانده بر روی سطح اجزا بتن مسلح استوار است و با این رویکرد به ارزیابی یکپارچگی این اجزای پس از آسیب می پردازد.

واژه فراکتال اولین بار توسط Mandelbrot برای نشان دادن اهدافی که هندسه پیچیده ای داشته و توصیف مشخصات آن با روش ها و ابعاد صحیح ممکن نبود معرفی گردید. در این مطالعه دو دیوار برشی بتن مسلح با مقیاس بزرگ تحت بارگذاری چرخه ای با کنترل تغییر مکان قرار گرفته و اعتبار روش پیشنهادی با بررسی آسیب این دو دیوار ارزیابی شده است. همچنین، شاخص ارائه شده با معیار کنترل عرض ترک ها نیز مقایسه شده است و نتایج این دو آزمایش حاکی از دقت بیشتر شاخص ارائه شده است.

$$DI = \frac{D_i - D_1}{2 - D_1}$$

در رابطه فوق Di بعد فراکتالی ترک های مشاهده شده و D1 بعد فراکتالی ترک ها در اولین مشاهده (اولین زمانی که ترک‌ها قابل مشاهده شده اند) می باشد. به علاوه اثبات کردند که DI می تواند کاهش سختی نسبی نمونه را با دقت قابل قبولی تخمین بزنند.

$$RSL = 1 - \frac{K_i}{K_1}$$

Ki سختی گام iام، K1 سختی اولیه سازه

جدول ۱- مقایسه کاهش سختی نسبی وDI

Load Step	SW1			SW2		
	Stiffness [kN/m]	*RSL*	*DI*	Stiffness [kN/m]	*RSL*	*DI*
1	1588	–	–	5190	–	–
2	1370	0.14	0.00	4101	0.21	0.00
3	926	**0.42**	**0.41**	3607	0.31	0.39
4	860	0.46	0.54	2991	**0.42**	**0.42**
5	794	0.50	0.65	2787	0.46	0.48
6	733	0.54	0.66	2758	0.47	0.57
7	572	0.64	0.66	2570	0.50	0.63
8	435	**0.73**	**0.74**	1861	0.64	0.65
9	302	0.81	0.75	1163	**0.78**	0.79
10	209	0.87	0.76	470	0.91	0.88

فرهیدزاده و همکارانش در تحقیقی دیگر طی بررسی های آزمایشگاهی به پایش روند شکست در یک دیوار برشی بتن مسلح با مقیاس بزرگ پرداختند. یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی تحت بارگذاری چرخه ای با کنترل تغییر مکان قرار داده شده و همزمان، با تحلیل پیوسته انتشار امواج آکوستیک ناشی از شکست مصالح و یا وقوع تغییر شکل های پلاستیک، رفتار ترک خوردگی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیگنال های آکوستیک از طریق یک شبکه نامتراکم از حسگرهای آکوستیک تعبیه شده بر روی دیوار دریافت شده است. از میان پارامترهای مهم در زمینه انتشار آکوستیک که در طول آزمایش بطور پیوسته قابل برداشت می باشند، پارامتر b انتخاب شده است. به منظور تفسیر بهتر پارامتر b، فیلتر گوسی مورد استفاده قرار گرفته است. هم چنین سیگنال های آکوستیک براساس الگوریتم شناسایی الگوی K-Means که یک الگوریتم نظارت نشده می باشد به دو خوشه کششی و برشی دسته بندی شده اند و از این طریق مود ترک های کششی و برشی قابل تمایز شده اند.

در نهایت الگوریتم جدیدی با عنوان پارامتر b غربال شده، برای پایش رشد و تکامل هر یک از مود های ترک خوردگی معرفی شده است. وفائی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی بلادرنگ آسیب لرزه ای ارائه دادند. در این روش دریفت طبقات میانی و چرخش مفصل پلاستیک دیوارهای برشی بتنی به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی شبکه عصبی MLP در نظر گرفته شده است. آماده کردن مجموعه داده ورودی و خروجی برای آموزی شبکه عصبی بسیار مهم است.

دو چالش در زمینه آموزش نمونه وجود دارد:

- مجموعه داده ورودی و خروجی باید رفتار واقعی سازه را منعکس کند.
- آنها باید تقریبا همه سناریو های احتمالی آسیب را بپوشانند.

معمولا الگوریتم های شناسایی آسیب پاسخ های خطی سازه را به کار می برند تا مجموعه داده آموزش بدست بیاید. در برخی از الگوریتم ها آسیب با کاهش مدول الاستیسیته مصالح به سازه معرفی می‌گردد و یا با کاهش مقطع عرضی المان.

این روش ها وقتی در رابطه با آسیب لرزه ای باشند واقع گرایانه به نظر نمی رسند. زلزله می تواند در چند نقطه از سازه ایجاد آسیب باشدت های متفاوت بکند. به عبارت دیگر، زلزله یک سناریو آسیب توزیع شده را نسبت به یک سناریو آسیب متمرکز ارائه می کند. برای غلبه بر این مسئله رفتار غیر خطی المان های موجود باید در نظر گرفته شود.

با این راه نمونه های آموزشی بدست آمده می توانند رفتار واقعی سازه را منعکس کند. تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش آور) و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NTH) دو روش شناخته شده برای تحلیل سازه اند. در این مطالعه، تحلیل پوش آور برای آماده

کردن مجموعه داده آموزشی برای پوشاندن سناریو آسیب احتمالی به کار برده می شود. دو دلیل برای انتخاب روش آنالیز پوش آور بجای روش NTH وجود دارد.

۱-برخلاف تحلیل NTH نتایج بدست آمده از تحلیل پوش آور وابسته به حجم فرکانس، مدت یا PGA زلزله ثبت شده نیست. در نتیجه تحلیل پوش آور می تواند سناریو آسیب های بیشتری را با تعداد برابری از run نسبت به تحلیل NTH بپوشاند.

۲- تحلیل NTH زمان بر و پیچیده است در حالیکه تحلیل پوش آور سریع و آسان اجرا می گردد. یک مانع تحلیل پوش‌آور زمانی است که برای سازه های پیچیده و بلند بکار می رود. نتایج بدست آمده اغلب ناصحیح است.

برای نمایش کارایی و قدرت روش پیشنهادی، یک ساختمان ۵ طبقه با دیوار برشی بکار برده شده است.

- ساخت مدل اجزای محدود غیر خطی
- آنالیز مودال پوش آور و بدست آوردن نسبت دریفت طبقات میانی و چرخش مفصل پلاستیک
- نتایج به شبکه عصبی MLP خورانده می شود
- شبکه آموزش دیده برای پیش بینی چرخش مفصل پلاستیک دیوار برشی بتنی استفاده می شود

۹ زلزله متفاوت رکورد شده مطابق شکل با نسبت PGA/PGV های مختلف برای این مطالعه در نظر گرفته می شود.

جدول ۲- زلزله های رکورد شده

No.	Earthquake	Year	Duration(sec.)	PGA(cm/s^2)	PGV(cm/s)	PGA/PGV
1	Parkfield	1966	10	264.4	14.51	18.2
2	San Francisco	1957	10	102.8	4.6	22.3
3	Helena	1935	15	143.7	7.2	19.9
4	Kern County	1952	25	175.9	17.7	9.9
5	Borrego	1968	35	45.5	4.2	10.8
6	Mounte Negro	1979	20	167.8	19.4	8.6
7	Long Beach	1933	30	95.6	23.7	4
8	Lower California	1934	25	156.8	20.9	7.5
9	San Fernando	1971	20	98.7	19.3	5.1

در مرحله تایید اعتبار شبکه عصبی آموزش دیده چهار راه سنجش مختلف بررسی شده است:

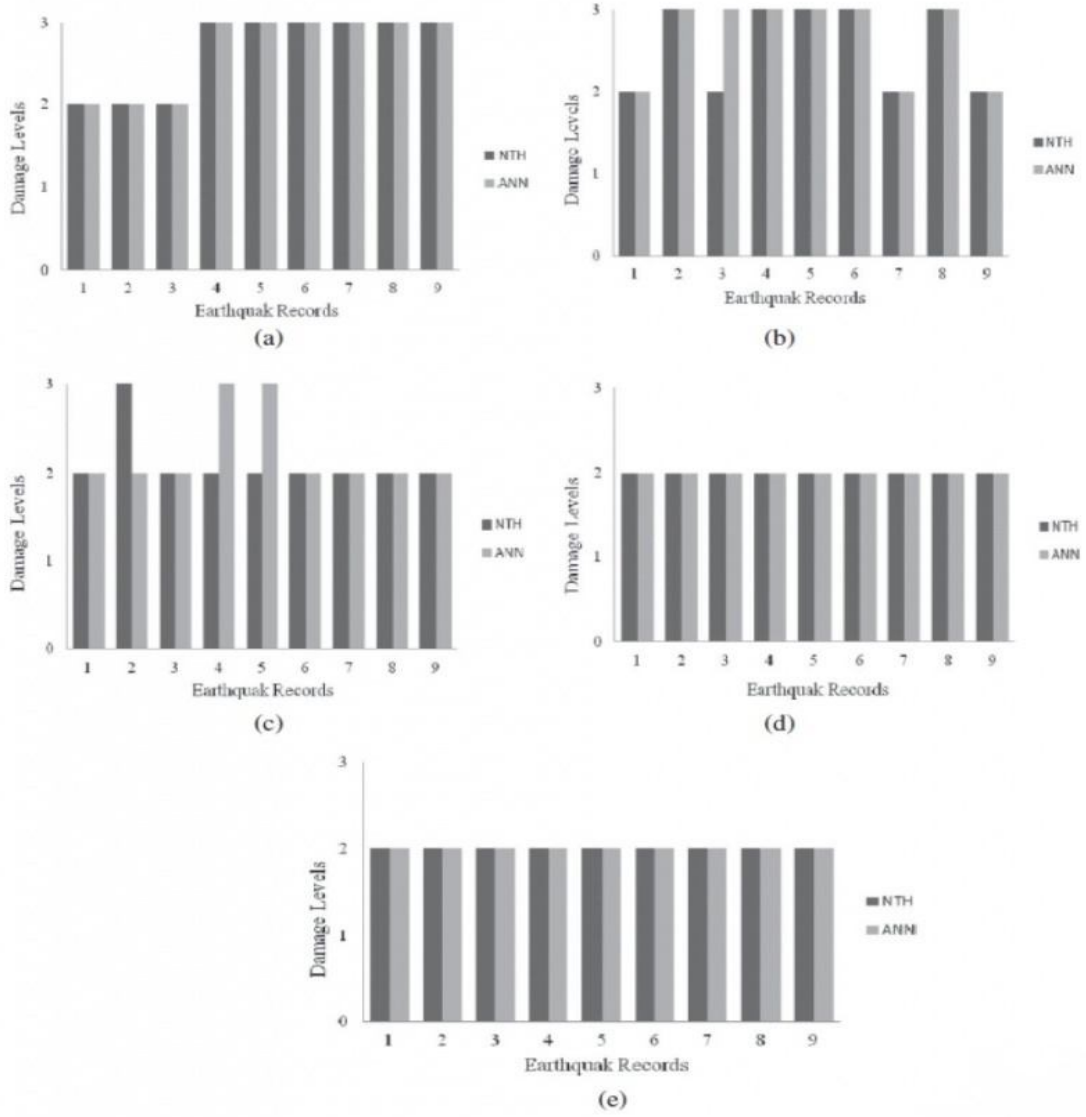
- مقایسه نتایج پیش بینی شده شبکه عصبی آموزش دیده با نتایج ۹ تحلیل NTH متفاوت. نتایج نشان دهنده موفقیت آمیز بودن پیش بینی شبکه عصبی است.
- تغییر PGA زلزله های رکورد شده انتخابی و مقایسه نتایج نشان دهنده عدم حساسیت شبکه عصبی به PGA زلزله های رکورد شده است.
- مقایسه نتایج شبکه عصبی و آنالیز NTH در دامنه زمان. نتایج نشان می دهد که شبکه عصبی نه تنها آسیب، بلکه شدت آسیب را نیز درست تخمین می زند.
- تعریف سه سطح آسیب بر اساس میزان دوران مفصل پلاستیک:

سطح۱- آسیب قابل چشم پوشی کمتر از ۰،۰۰۴رادیان

سطح۲- آسیب متوسط بین ۰،۰۰۴و۰،۰۱رادیان

سطح۳- آسیب شدید بیش از ۰،۰۱رادیان

در همه حالات به غیر از ۴ مورد شبکه شناسایی آسیب دیوار برشی را درست انجام داده است.



شکل ۳- مقایسه نتایج شبکه عصبی و تحلیل NTH در دامنه زمان

در تحقیقی که توسط Lombaert در سال ۲۰۰۹ صورت گرفت از مدل بیزین بروزآوری شده جهت شناسایی آسیب سازه بتنی که روی میز لرزان آزمایش می شود استفاده شده است. سازه بتنی ۷ طبقه دارای دیوار برشی در معرض یک رشته زلزله رکورد شده قرار می گیرد تا تدریجا دچار آسیب شود. بعد از هر تحریک لرزه ای، داده ارتعاشی از وایت نویز و تحریک محدود جهت تعیین خصوصیات مودال سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصیات مودال سه مود اول ساختمان برای تعیین آسیب به وسیله مدل اجزای محدود بیزین بروزآوری شده استفاده می شود. شناسایی آسیب در سطح های مختلف بوسیله مدل اجزای محدود بدست می آید. برای این هدف مدل اجزای محدود سازه به چند زیر سازه تقسیم می گردد. پارامترمورد نظر سختی زیر سازه هاست. کاهش سختی زیر سازه آسیب و محل آن را مشخص می کند. از بیزین جهت محاسبه چگالی سختی زیر سازه استفاده می شود. MAP سختی تخمینی برای زیر سازه آسیب دیده کمترین مقدار را نشان می دهد.

موافقت خوبی بین نتایج مدل بیزین بروزآوری شده و آسیب واقعی مشاهده دیده می شود.

نتیجه گیری از پایش سلامت سازه های بتنی

وقوع خرابی در سیستم های سازه ای در طول عمر سازه امری اجتناب ناپذیر می باشد. تاکنون نمونه های بسیاری از انواع خرابی ها در سازه های مختلف مهندسی به ثبت رسیده که در پی وقوع آنها، خسارات جانی و مالی فراوانی به بار آمده است.
بیشتر چنین خرابی ها را می توان با بررسی های اولیه از وضعیت موجود سازه ها، اصلاح و ترمیم نمود و بدین ترتیب از گسترش خرابی در سازه ها و فروریختن ساختمان ها جلوگیری کرد. این موضوع در مناطق زلزله خیز که خرابی های موضعی در المانهای سازه ها می توانند منشاء خرابی های کلی باشند اهمیت موضوع پایش سلامتی سازه ها را دو چندان می نماید. بنابراین تعیین خرابی در سیستم های سازه ای و تعلقات آن برای پایش سلامتی سازه ها و افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه ها امری مهم و ضروری است. اگر خرابی در سیستم های سازه ای بطریقی قابل شناسایی باشد می توان با تعمیر یا تعویض المانهای آسیب دیده از ایجاد خرابی های کلی در سازه جلوگیری نمود. در نتیجه سیستم های شناسایی و تعیین خرابی می توانند نقش بسیار مهمی را در ایمن سازی و بهسازی سازه ها و جلوگیری از بوجود آمدن خسارات مالی و جانی ناشی از فروریختن سازه ها ایفا نمایند. امروزه، تحقیقات بر روی روش های عیب یابی سازه ها بر پایه تحلیل دینامیکی، بسیار گسترش یافته است زیرا از این روش ها می توان به عنوان روش های بررسی دائمی و به هنگام سازه ها استفاده کرد و از به وجود آمدن آسیب های بیشتر در سازه ها جلوگیری نمود. زمانی که سازه دچار آسیب می شود، به دلیل کاهش سختی، ویژگی های استاتیکی و دینامیکی سازه تغییر کرده، که با در نظر گرفتن نحوه این تغییرات می توان مکان و شدت خرابی را در سازه شناسایی کرد.
این روش متاثر از پیشرفت مهندسی کامپیوتر و الکترونیک می باشد.
فرآیند پایش سلامت سازه ها شامل چند مرحله است: تحت نظر داشتن وضعیت سازه در طی زمان از طریق انجام آزمون های ارتعاشی دوره ای و اندازه گیری پاسخ ارتعاشی سازه به کمک سنسور هایی که در نقاط مختلف سازه تعبیه می گردند، استخراج ویژگی های و مشخصه های حساس به آسیب از داده های اندازه گیری شده، تعیین وضعیت فعلی سلامت سازه بر پایه تحلیل و پردازش مشخصه های استخراج شده. در این راستا می توان از روش های مبتنی پردازش سیگنال استفاده نمود و یا با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی که با یک سری از ورودی ها و خروجی های مطلوب آموزش داده شده اند به شناسایی آسیب در سازه پرداخت. در این میان شناسایی زود هنگام آسیب دیوارهای برشی که برای مقابله با بارهای جانبی وارد بر سازه ها طراحی می شوند امری حیاتی است زیرا خرابی و نقص در عملکرد سازه ای دیوارهای برشی می تواند منجر به بروز آسیب های جدی و یا حتی خرابی پیشرونده سازه های بتنی گردد. به این منظور می توان با مطالعاتی در زمینه شناسایی آسیب دیوار برشی به وسیله پردازش سیگنال و شبکه عصبی روش های مناسبی را ارائه کرد.

روش های تشخیص و نمایان سازی آسیب و ترک با توجه به اهمیت آن در شکست سازه ای، موضوع تحقیقات گسترده ای است که در حال انجام است. امروزه دلیل بسیاری از شکست های سازه ای، گسیختگی مواد تشکیل دهنده ی آن است. آغاز این گسیختگی ها با ترک توام بوده که با گسترش خود به عنوان تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می شود. بر این اساس روش های تشخیص و نمایان سازی آسیب و ترک موضوع تحقیقات متعددی است که تاکنون انجام شده و کماکان ادامه دارد. **پایش سلامت سازه ای** روندی برای بدست آوردن اطلاعات دقیق لحظه ای از شرایط و عملکرد سازه ای می باشد. در مبحث پایش سلامت سازه ای آسیب به عنوان تغییراتی که در طول بهره برداری از سازه رخ می دهد تعریف می گردد و شناسایی آسیب به کلیه روش ها و تکنیک هایی اطلاق می گردد که وجود خرابی را تشخیص و موقعیت و شدت خرابی را بیان می کند. در سال های اخیر، با پیشرفت های صورت گرفته در عرصه علمی، روش های پایش از راه دور با استفاده از لیزر، سنسورهای فیبرنوری، تکنیک های جمع آوری داده ها از راه دور و تکنیک های پردازش تصویر صورت می گیرد. یکی از روش های تشخیص خرابی، روش های دینامیکی مبتنی بر پردازش سیگنال می باشد. در طول بهره برداری از یک سازه مانند قاب های با اندازه بزرگ، ساختمان های بلند مرتبه و پل ها، ممکن است ترک های موضعی و نهفته داخلی سازه به طور پیوسته افزایش یافته و در نهایت باعث فرو ریختن کل سازه شود. تاثیر ترک در ساختار سازه به صورت تغییرات موضعی سختی است که این تغییرات در ساختار دینامیکی سازه اثر قابل توجهی دارد این موضوع در تغییر فرکانس طبیعی قابل مداخله بوده و تحلیل این تغییرات، شناسایی ترک را ممکن

می سازد. امروزه صاحبان ساختمان ها نیازمند حس اطمینان خاطر در خصوص دارایی های ملکی خود هستند. مالکان برج ها و ساختمان ها می خواهند پاسخ این سوال را بدانند که آیا ساختمان شان بعد از رخداد ارتعاشی مانند زلزله یا باد شدید دچار آسیب می شود یا خیر؟

شیوه کلاسیک و قدیمی پایش و سلامت سازه ای

بر اساس شیوه ی کلاسیک و قدیمی، بررسی وضعیت سازه با استفاده از بازبینی چشمی توسط یک متخصص انجام می شود که این مساله چند ضعف عمده دارد:

۱- طبیعتا خطای این روش بالاست.

۲- پوشیده بودن اجزای اصلی و شروع خرابی ها از بخش های داخل المان.

۳- امکان دسترسی به بسیاری از بخش های برخی از سازه ها به طور کلی وجود ندارد.

۴- اعلام هشدار قبل از خرابی سازه و تعیین مسیرهای امن سازه در مواقع بحرانی مانند زلزله.

۵- در بسیاری از خرابی ها در مقیاس کوچک قابلیت آشکارسازی با بازرسی چشمی وجود ندارد.

۶- بازرسی تمام نقاط سازه امکان‌پذیر نیست.

هدف از ارزیابی سازه در علم پایش و سلامت سازه ای

ارزیابی غیرمخرب (NDT) وضعیت سلامت یا عدم سلامت سازه ها موضوع علم نوین پایش سلامت سازه هاست. این ارزیابی معمولا سه هدف عمده را مد نظر قرار می دهد:

۱ – پایش سلامت سازه ای به عنوان فراهم کننده ی اطلاعات مورد نیاز در بحث ترمیم و مقاوم سازی سازه ها.

۲- پایش سامت سازه ای ابزاری به جهت برآورد و تخمین باقیمانده ی عمر مفید سازه.

۳- پایش سلامت سازه ای ابزاری به جهت اعلام هشدار قبل از خرابی سازه و نیز تعیین مسیرهای فرار و نقاط امن سازه در مواقع بحرانی مانند جنگ، زلزله، بادهای شدید و . . . .

سیستم پایش و سلامت سازه ای را می توان همانند سیستم مغز – اعصاب بدن در نظر گرفت، به نحوی که سازه بدون پایش سلامت همانند بدن بدون سیستم عصبی است. در بدن بدون سیستم عصبی ممکن است عضو یا اعضایی دچار فرسودگی و آسیب شوند، در حالی که صاحب آن بدن این مسئله را نمی داند و قاعدتا هیچ اقدامی در جهت بهبود آن انجام نخواهد داد، این مورد در نهایت می تواند منجر به تخریب آن عضو و حتی مرگ فرد گردد.

در کاربردهای امروزه در زمینه ی مهندسی عمران روش های بر اساس اطلاعات لرزه ای کاربردهای بسیار گسترده تری نسبت به سایر روش ها دارند؛ همچنین بیشتر تحقیقات محققان و پژوهشگران عمرانی بر روی این نوع از پایش سلامت متمرکز می باشد، در این روش ها از مشخصات دینامیکی یک سازه مانند زمان تناوب و بردار شکل مودی مودهای مختلف، ماتریس‌های نرمی و سختی، ماتریس میرایی و ... به جهت بررسی و تعیین آسیب ها استفاده می شود.

مزایای پایش و سلامت سازه ای

۱- بررسی و ارزیابی مداوم وضعیت سازه به صورت خودکار.

۲- تعیین سریع و به هنگام نقاط آسیب دیده ی سازه به صورت خودکار و جلوگیری از انتشار و گسترش آسیب. این مزیت به صاحبان سازه اجازه ی تصمیم گیری می دهد. صاحبان متوجه خواهند شد که سازه چه زمانی نیاز به مرمت و بازسازی موضعی و چه زمانی نیاز به بازسازی کلی و حتی تخریب دارد.

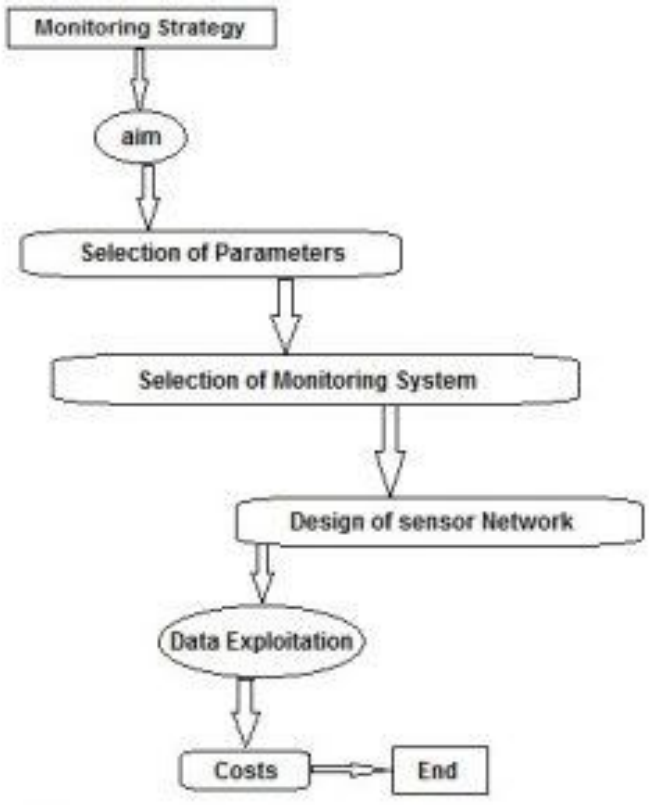
۳- مشخص نمودن امن بودن یا نبودن کلی سازه در هنگام وارد آمدن نیروهای شدید بر سازه به صورت خودکار بدیهی است که در صورت استفاده از ابزارهای کنترل ارتعاش سازه ها احتمال بروز حالت نا امنی سازه به میزان چشمگیری کاهش خواهد یافت.

۴- تعیین نقاط امن سازه به جهت پناه گرفتن یا خروج در هنگام وارد آمدن نیروهای شدید بر سازه به صورت خودکار.

۵- هزینه ی پایین به نسبت کارایی های بسیار ارزشمند.

استراتژی کلی در پایش و سلامت سازه ها

مهمترین عامل در مونیتورینگ سلامت سازه ای، به کارگیری استراتژی صحیح می باشد. استراتژی مونیتورینگ شامل: تعیین هدف مونیتورینگ، تعیین و انتخاب پارامترهایی که در آینده مونیتور می شوند، انتخاب سیستم مونیتورینگ مناسب، طراحی شبکه سنسور، کامل شدن برنامه زمان بندی و تثبیت آن، برنامه ریزی جهت استخراج داده ها و قیمت گذاری مونیتورینگ می باشد.
جهت شروع مونیتورینگ، تعیین هدف مونیتورینگ و پارامترهایی که قرار است مونیتور شوند از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. این پارامترها بایستی به درستی انتخاب شوند تا بتوانند نمایانگر رفتار سازه باشند. فعالیت های هسته در روند مونیتورینگ سلامت سازه ای شامل: انتخاب استراتژی، نصب سیستم مونیتورینگ، نگهداری از سیستم مونیتورینگ، مدیریت داده‌ها و قطع فعالیت ها در صورت اشکال در مونیتورینگ.



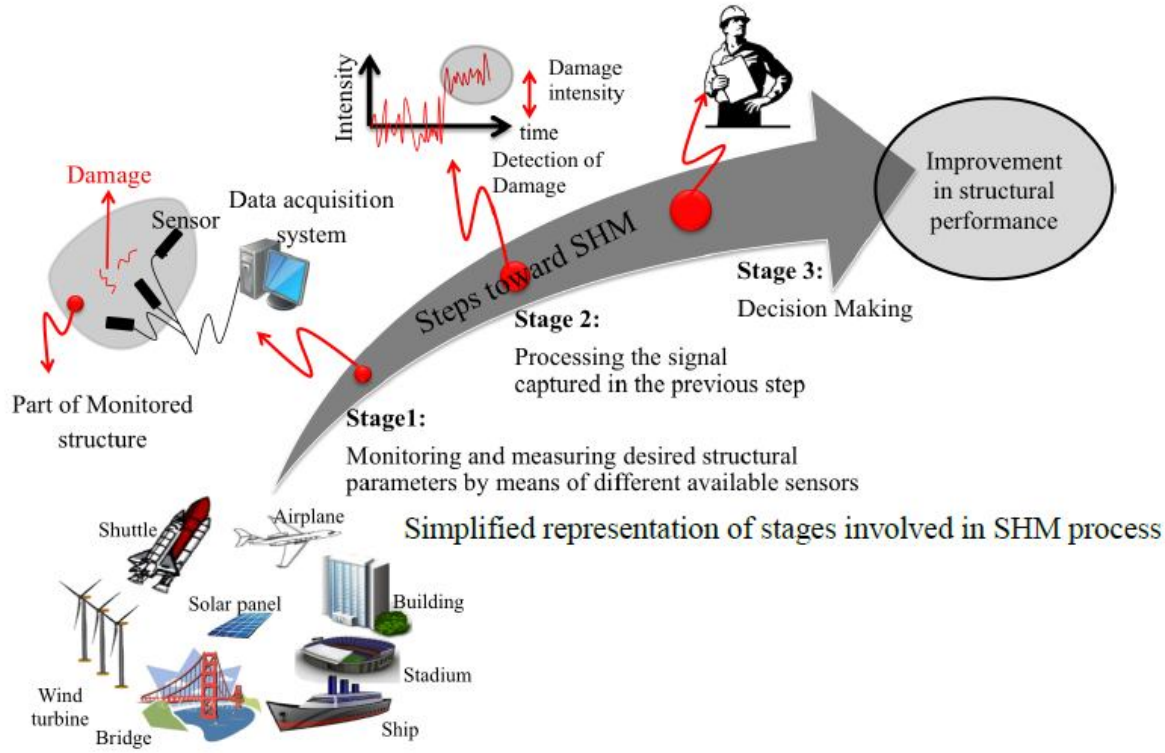
فلوچارت کلی پایش و سلامت سازه ای

دو دسته بندی کلی برای بحث پایش و سلامت سازه ای داریم:

- دوره ای
- دائمی

هر روش را می توان در دوره کوتاه مدت یا دراز مدت، دائمی (پیوسته) یا دوره ای انجام داد. طرح و گام مونیتورینگ بستگی به این دارد که با چه سرعتی پارامترهای تحت مونیتورینگ تغییر می یابند. برای برخی از کاربردها، مونیتورینگ دوره ای نتایج بهتری به دست می دهد اما ممکن است اطلاعات در دوره ی بین دو بازدید برای همیشه از دست می روند. فقط در مونیتورینگ دراز مدت در کل دوره ی مونیتورینگ اندازه گیری ها ثبت شده و به درک رفتار سازه کمک می نماید. مونیتورینگ متشکل از دو رویکرد می باشد: اندازه گیری مقدار پارامترهای مونیتورشده و ثبت زمان، مقدار اندازه گیری شده. به منظور انجام اندازه گیری ها و ثبت آن ها، از دستگاه های مختلفی می توان استفاده کرد. تنظیم همه دستگاه هایی که در اندازه گیری و ثبت آن دخیل هستند به سیستم

مونیتورینگ معروف می باشد. امروزه تعداد زیادی از سیستم های مونیتورینگ با سطوح عملکردی متفاوت وجود دارند. در حالت کلی دارای مولفه های مشابهی هستند: سنسورها، انتقال دهنده اطلاعات، واحدهای ثبت داده ها و سیستم های مدیریت داده(مدیریت نرم افزاری). انتخاب سیتم مونیتورینگ بستگی به مشخصاتی مثل هدف مونیتورینگ، پارامترهای انتخابی، دقت، تکرار خواندن داده، سازگاری با محیط زیست روش های نصب برای مولفه های مختلف مربوط به سیستم مونیتورینگ، امکان عملکرد اتوماتیک، ارتباط از راه دور، نوع مدیریت داده ها و سطحی که سازه در آن مونیتور می شود.



Simplified representation of stages involved in SHM process

- Observation and conceptualization
- A prior modeling (developing of first generation of FE model)
- Controlled experimentation
- Processing and interpolation of data
- Model correlation
- Utilization of model for simulations

دستگاه های ثبت داده استاندارد

حسگر یا سنسور یکی از اجزای مهم سیستم پایش سلامت می باشد. حسگرها جزوی از سیستم جمع آوری و انتقال اطلاعات از سازه به پردازشگر مرکزی می باشند؛ سیستم جمع آوری و انتقال اطلاعات همانند سیستم عصبی بدن انسان می باشد که وظیفه ی دریافت انتقال اطلاعات دریافت شده از محیط پیرامون به مغز را دارد. به همین دلیل نوع، دقت و کیفیت حسگری که در یک پروژه پایش سلامت مورد استفاده قرار می گیرد نقش تعیین کننده ای در موفقیت و نیز هزینه های انجام آن پروژه دارد. از

معتبرترین لوازم مورد استفاده در پایش و سلامت سازه ای می توان به حسگرهای تولید کارخانه ژئوسیگ (GeoSig) کشور سوییس که سازنده ی بسیار معتبر در زمینه ی تولید سیستم های جمع آوری و انتقال اطلاعات لرزه ای می باشد.
استفاده از مونیتورینگ سلامت سازه از آن جهت اهمیت دارد که با استفاده از داده های آنلاین و لحظه به لحظه از سازه و موقعیت آسیب های احتمالی در آن آگاه شد. به طوریکه نیازی به صرف هزینه های زیاد برای آزمایش های سونداژ و ترمیم به منظور شناخت نسبی سازه نبوده و تصمیم مناسبی در زمان مناسب به منظور جلوگیری از تلفات گرفته می شود. اطلاعات بدست آمده از مونیتورینگ عموما جهت برنامه ریزی و طراحی فعالیت ها، افزایش ایمنی، تایید فرضیه ها، کاهش عدم قطعیت و افزایش اطلاعات در ارتباط با سازه‌ایی که مونیتور می شود، به کار می رود. مونیتورینگ آنلاین سازه ها در حقیقت روشی نوین در استفاده از سنسورهای مختلف در درون سازه ها به منظور کنترل آنلاین سازه ها می باشد. بهسازی لرزه ای در ساعات اولیه وقوع زلزله در پل های ارتباطی بدون صرف زمان از مهم‌ترین مزایای این روش می باشد. در این خصوص کشورهای پیشرفته در راستای کاهش هزینه ها و افزایش کنترل آنلاین سازه ها به تدوین آیین نامه های مختلف به تدوین آیین نامه های مونیتورینگ سلامت سازه ای در سازه های زیربنایی و مهم از قبیل پل ها و ساختمان های مهم پرداخته اند:
به هنگام سازی مدل المان محدود کلی سازه توسط پاسخ های دینامیکی سازه و لحاظ کردن مدلهای به هنگام شده تیرها به عنوان منبع اصلی سیستم پایش سلامت دائمی در طول زمان.
به دست آوردن ضرایب میرایی و تغییرات آن در طول زمان که البته نیاز به انجام آزمایشات دوره‌ای می‌باشد. در طول زمان بهره برداری از سازه‌ها ممکن است آسیب‌هایی در قسمت های حیاتی آنها ایجاد شده و به مرور زمان گسترش یابد؛ عوامل بسیاری از قبیل وارد آمدن نیروهایی بزرگتر از نیروهای پیش بینی شده، شرایط نامناسب پیرامون سازه، قرار گرفتن در معرض تغییرات شدید آب و هوایی، خطاهای ساخت، ضربه، خستگی، خوردگی و ... می‌توانند منجر به وقوع آسیب سازه‌ها شوند. از گذشته تعیین وضعیت سلامت و یا آسیب دیدگی سازه‌ها، مخصوصا سازه‌های با اهمیت نظیر پل‌ها، سدها، تونل‌ها، ساختمان‌های با تعداد ساکنان بالا و یا دارای تجهیزات گران قیمت، ساختمان‌های مهم که لازم است بهره برداری آنها متوقف نگردد، ساختمان‌های تاریخی و ... همواره حائز اهمیت بوده است. بر اساس شیوه‌ی کلاسیک و قدیمی، بررسی وضعیت سازه با استفاده از بازبینی چشمی توسط یک متخصص انجام می‌شود که این مسئله چند ضعف عمده دارد:

۱- به صورت ذاتی طبیعتا خطای این روش بالا می‌باشد.
۲- پوشیده بودن اجزای اصلی و همین طور اتصالات سازه و همچنین بخش های داخلی سازه یکی دیگر از مشکلات بازرسی چشمی است. بسیاری از خرابی ها از بخش های داخل المان ها آغاز می شود که با چشم قابل رویت نمی باشد.
۳- امکان دسترسی به بسیاری از بخش‌های برخی از سازه‌ها مانند سکوهای دریایی، پل های با دهانه بلند، سازه های فضاکار و ...به طور کلی وجود ندارد.

بر این اساس روش های ارزیابی غیرمخرب به وجود آمد. ارزیابی غیرمخرب وضعیت سلامت سازه ها موضوع علم نوین پایش سلامت سازه هاست. این ارزیابی معمولا سه هدف عمده را مد نظر قرار میدهد:

۱- پایش سلامت سازه‌ای به عنوان فراهم کننده‌ی اطلاعات مورد نیاز در بحث ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها. در این مورد علاوه بر تعیین موقعیت مکانی آسیب ها و نیز شدت آنها میتوان هزینه ی ترمیم و مقاوم سازی و نیز مدت زمان لازم برای انجام عملیات ترمیم و مقاوم سازی را نیز برآورد نمود.
۲- ابزاری به جهت برآورد و تخمین باقیمانده‌ی عمر مفید سازه؛ دانستن باقیمانده‌ی عمر سازه می تواند منجر به اخذ تصمیم درست در قبال سازه از طرف مالک، بیمه‌گذار، ساکنین و ... گردد.
۳- ابزاری به جهت اعلام هشدار قبل از خرابی سازه و نیز تعیین مسیرهای فرار و نقاط امن سازه در مواقع بحرانی مانند جنگ، زلزله (کاهش تلفات پس لرزه ها)، بادهای شدید و ....

به طور کلی روش های انجام ارزیابی غیرمخرب در گذشته بیشتر به صورت روش های تست محلی بوده است. این روش ها عبارتند از:

الف) روشهای آکوستیک و اولتراسونیک.

ب) روش های میدان مغناطیسی.

پ) رادیوگرافی.

ت) روشهای جریان ادی.

ث) روش های میدان حرارتی.

روش های فوق دارای چند ضعف و ایراد عمده می باشند:

۱- برای استفاده از این روش ها باید محدوده مکان آسیب از قبل مشخص باشد چرا که انجام تست موضعی بر روی کل یک سازه عملا امکان پذیر نمی باشد.

۲- محدوده مورد نظر باید حتما قابل دسترسی باشد .همانگونه که قبلا دیدیم در بسیاری از مواقع دسترسی به بخش‌های مختلفی از سازه امکان پذیر نمی باشد.

۳- در اغلب موارد لازم است که بهره برداری از سازه برای مدتی متوقف گردد تا بررسی ها و تست های لازم انجام گردد. این مسئله در بسیاری از موارد امکان پذیر نمی باشد و یا اینکه ممکن است خسارت های مالی به بار آورد.

۴- ارزیابی با این روش ها معمولا بسیار زمان بر است.

با توجه به ایرادات ذکر شده، امروزه انجام تمام عملیات پایش سلامت سازه با این روش ها محدود به سازه های کوچک و نیز آسیب یابی در سطوح قابل دسترسی (خارجی) سازه ها می گردد. البته به عنوان مکمل پایش سلامت در برخی موارد از روش های ذکر شده استفاده می شود. با توجه به تمام موارد ذکر شده نیاز به روشی که بتواند در کنار دقت بالا با هزینه کم از لحاظ مالی و زمانی قابل اجرا باشد وجود داشته است. بر این اساس روش های پایش سلامت بر مبنای اطلاعات لرزه‌ای سازه توسعه داده شده اند. در این روش ها از نکته زیر استفاده می شود:

۵- به هنگام سازی مدل المان محدود کلی سازه توسط پاسخ های دینامیکی سازه و لحاظ کردن مدلهای به هنگام شده تیرها به عنوان منبع اصلی سیستم پایش سلامت دائمی در طول زمان.

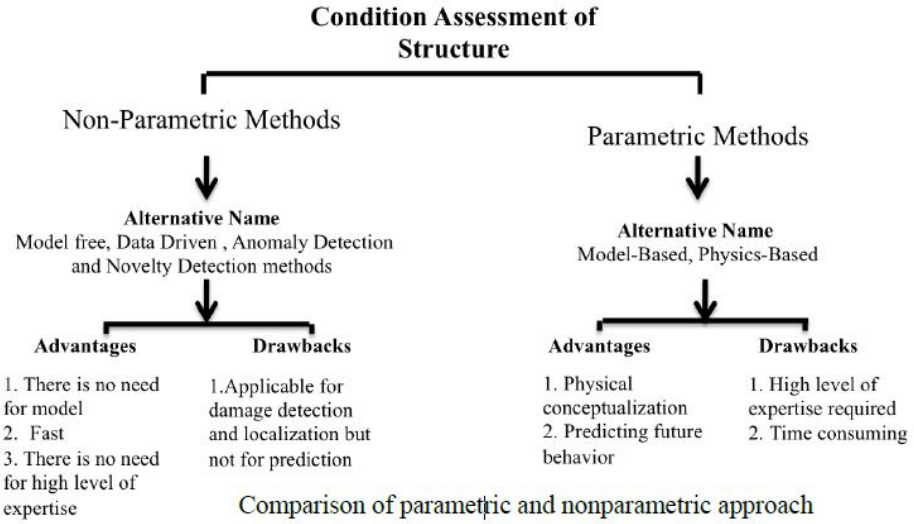
۶- به دست آوردن ضرایب میرایی و تغییرات آن در طول زمان که البته نیاز به انجام آزمایشات دوره‌ای می‌باشد.

هر آسیبی در سازه منجر به تغییر در مشخصات فیزیکی سازه (جرم، سختی و میرایی) می گردد. این مسئله منجر به تغییر در ویژگی های دینامیکی (فرکانس مدها، بردار شکل مدها، میرایی مدها، توابع انتقال، پاسخ سازه و ...) سازه خواهد شد.

در ادامه ملاحظه می‌گردد که با افزایش شتاب میز لرزان در یک آزمایش بر روی سازه ۳ بعدی در ژاپن و آغاز و سپس توسعه ی آسیب میزان فرکانس مود اول سازه کاهش و میرایی این مود افزایش می‌یابد؛ این بدان معناست که می توان آسیب سازه منجر به تغییر در پارامترها و مشخصات فیزیکی سازه شده است.

تحلیل و پردازش اطلاعات سازه

در این مرحله یا به صورت مستقیم بر روی اطلاعات مرحله ۱ و یا بر روی اطلاعات مرحله ۲ با استفاده از الگوریتم‌ها و نرم افزارهای مختلف پردازش انجام می شود و در پایان این مرحله وضعیت سلامت و یا عدم سلامت و همچنین نقاط احتمالی آسیب‌دیده مشخص می‌گردد.



Comparison of parametric and nonparametric approach

وقوع خرابی در ساختمانها ، پلها ، سکوهای نفتی و بطور کلی تمام سیستم‌های سازه‌ای در طول عمر سازه امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. تاکنون نمونه‌های بسیاری از انواع خرابی‌ها در سازه‌های مختلف مهندسی به ثبت رسیده که در پی وقوع آنها، خسارات جانی و مالی فراوانی به بار آمده است. بیشتر چنین خرابی‌هایی را می‌توان با بررسی‌های اولیه از وضعیت موجود سازه‌ها، اصلاح و ترمیم نمود و بدین ترتیب از گسترش خرابی در سازه‌ها و فروریختن ساختمانها جلوگیری کرد. این موضوع در مناطق زلزله خیز که خرابی‌های موضعی در المان‌های سازه‌ها می‌توانند منشاء خرابی‌های کلی باشند، اهمیت موضوع پایش سلامت سازه‌ها را دو چندان می‌کند. بنابراین تعیین خرابی در سیستم‌های سازه‌ای و تعلقات آن برای پایش سلامت سازه‌ها و افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه‌ها امری مهم و ضروری است. اگر خرابی در سیستم‌های سازه‌ای به طریقی قابل شناسایی باشد، می‌توان با تعمیر یا تعویض المان‌های آسیب دیده از ایجاد خرابی‌های کلی در سازه جلوگیری نمود. در نتیجه سیستم‌های شناسایی و تعیین خرابی می‌توانند نقش بسیار مهمی را در ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها و جلوگیری از بوجود آمدن خسارات مالی و جانی ناشی از فروریختن سازه‌ها ایفا نمایند.

- Artificial Neural Networks (ANNs)
- Wavelet decomposition
- Auto-regressive moving average vector (ARMAV) models
- State space models, and empirical mode decomposition (EMD) in conjunction with the Hilbert- Huang Transform
- Instance based method
- Correlation anomaly scores analysis
- Principal Component Analysis (PCA)
- Moving principal component analysis (MPCA) and robust regression analysis (RRA)

تمایل برای نظارت بر سلامت سازه و تشخیص خرابی در ابتدایی ترین مراحل ممکن در سازه، در میان جامعه مهندسین عمران، مکانیک و هوافضا افزایش چشم گیری داشته است. سازه های موجود در معرض خطرات عمده ای همچون افت کارایی سازه و خرابی می باشند. این مشکلات با خطرات طبیعی یا مصنوعی مانند زلزله و انفجار تشدید می شوند. امروزه بهره برداری بی وقفه از

سازه های عمرانی از جمله پل ها، مراکز کنترل، بیمارستان های بزرگ و سایر سازه های مهم ضروری می باشد. بخصوص پس از وقوع حوادث طبیعی همچون زلزله، استفاده از سازه های فوق به کاهش اثرات ثانویه ناشی از زلزله منجر می شود. بدین منظور تشخیص و تعیین خرابی های سازه ای ضروری بنظر می رسد. تا کنون روش های متعددی برای شناسایی آسیب برای سیستم های سازه ای مختلف از قبیل ورق ها، تیرها، سازه های فضاکار ، قابها ، اسکله های نفتی ، پل ها و . . . ارائه شده است. دوبلینگ و همکارانش گزارش های جامعی از روش های استفاده شده توسط محققین مختلف منتشر کردند به طور کلی، روشهای آزمایشگاهی برای تشخیص خرابی پر هزینه می باشند، ضمن این که لازم است محدوده خرابی مشخص بوده و همچنین خرابی ها به راحتی قابل دسترس باشند. بنابراین در بسیاری از روشها تمایل به یافتن خرابی بر اساس مدل های عددی است به طوریکه به حداقل اطلاعات آزمایشگاهی درباره پاسخ های سازه ی خراب نیاز باشد. هر کدام از روش های عددی که تا کنون ارائه شده اند، رویکرد متفاوتی برای انتخاب ویژگی های حساس نسبت به خرابی دارند. ویژگی های مودی مانند فرکانس های اصلی و مود شکل ها، معمول ترین ویژگی های مورد استفاده برای پیدا کردن خرابی می باشند، زیرا این ویژگی ها تابعی از مشخصات فیزیکی سازه (جرم، میرایی و سختی) می باشند و لذا تغییر در ویژگی های فیزیکی مثل کاهش در سختی که می تواند ناشی از وجود ترک یا از بین رفتن اتصالات باشد، سبب تغییر در این ویژگی های مودی می شود.

اهداف عملکرد سازه

به طور ذاتی مفهوم طراحی براساس عملکرد مستلزم تعریف سطوح چندگانه عملکرد هدف (خسارت) می باشد که انتظار می رود سازه، تحت اثر زلزله با شدت مشخص به این سطوح برسد یا حداقل از آن تجاوز نکند.

یک هدف عملکرد، مشخص کننده سطح عملکرد مطلوب ساختمان در هر سطحی از زلزله طراحی می باشد. در مورد یک طراحی، باید براساس موارد ذیل انتخاب شوند:

ـــ ساختمان اهداف عمل

ـــ کاربری ساختمان

ـــ اهمیت ساختمان از لحاظ فعالیتهای مرتبط با آن

ـــ ملاحظات اقتصادی، شامل هزینه های مربوط به تعمیر ساختمان و ایجاد وقفه در بهره برداری ساختمان

ـــ ارزش ساختمان به عنوان یک اثر تاریخی یا فرهنگی

بنابراین، اهداف عملکرد، درواقع عملکرد لرزه ای مورد نظر سازه راتعیین می نمایند و عملکرد لرزه ای نیز توسط سطوح عملکرد، که حداکثر مقدار مجاز خسارت وارد به سازه را برای یک زلزله تعیین می نماید، توصیف می شود. بعلاوه هر هدف عملکرد می تواند، با درنظر گرفتن حالات مختلف خسارت برای زمین لرزه های متعدد تعریف شود که درآن صورت به آن، هدف دو منظوره یا چند منظوره اطلاق می گردد. با مشخص شدن یک هدف عملکرد، یک مهندس قادر است زلزله طرح را جهت تحلیل انتخاب نموده و معیارهای قابل قبولی ارزیابی سازه ای و غیر سازه ای را تعیین نماید. سند Vision 2000 پیشنهاد می کند که ساختمانهایی که، براساس سکونت و کاربریشان مشخص می شوند، اهداف عملکرد را تامین کنند. هر ترکیبی از دوره بازگشت یک زلزله وسطح عملکرد، باعلامتی نشان داده شده است که عملکرد مشخص طراحی را نشان می دهد. منظور این است که هدف عمل:

ـــ در نتیجه عملکرد ساختمانهای معمولی تحت زلزله های محتمل وارد برآنها، احتمال به خطر افتادن جان افراد پایین باشد.

ـــ در زلزله های معمولی (زلزله باشدت پایین)، استفاده کننده از ساختمان متحمل تعمیرات زیاد یا ضرر نشود.

ـــ ساختمانهایی که در مواقع اضطراری لازم هستند و اماکن عمومی ضروری، باید احتمال خسارت کمی، در سطحی که استفاده از آنها مجاز است، داشته باشند.

ـــ تاسیساتی که شامل سیستم ها و موادی هستند که درصورت آزادشدن، ایجاد خطر برای عده زیادی خواهند کرد، احتمال خسارت کمی داشته باشند.

در نشریه راهنمای NEHRP چنین اهداف عملکردی رابه عنوان پایه طرح بازسازی برای سازه های موجود پیشنهاد می کند. بویژه

توصیه می گردد که ارزیابی عملکرد، خصوصاً برای هر هدف عملکرد مورد نظر انجام شود. ارزیابی عملکرد، شامل تحلیل سازه ای با تقاضاهای محاسبه شده و مقایسه آن با معیارهای پذیرش مشخص، برای هر یک ازسطوح مختلف عملکرد می باشد. این موضوع بر خلاف روند منظورشده توسط آیین نامه های ساختمانی فعلی می باشد که در آنها، تنها یک ارزیابی عملکرد، برای سطح عملکرد ایمنی جانی در سطح معینی از حرکت زمین، تحت عنوان زلزله مبنای طرح (DBE1)، لازم دانسته شده است.

سطوح عملکرد

هرسطح عملکرد، شرایطی راجهت محدود کردن ماکزیمم خسارت وارد به سازه، دراثر یک زمین لرزه معین ارائه می نماید. سطوح عملکرد به صورت کمی درمدارک مختلف ازجمله، پروژه (Vision 2000 SEAOC, 1995) وراهنمای (NEHRP ATC,1996) تعریف شده است .هردومدرک فوق روند مشابهی رابرای تعیین عملکرد ساختمان توسعه داده اند، گرچه از اصطلاحات متفاوتی استفاده کرده اند.جدول (۱ـ۱) خلاصه ای از سطوح عملکرد تعریف شده، دراین مدارک می باشد. خصوصاً درراهنمای NEHRP، ملاکهایی به صورت کمی تعیین شده است که توسط آن، عملکرد سازه ای مربوط به این سطوح قابل ارزیابی است. به این ترتیب که، اجزای مختلف موجود درسازه، به عنوان اولیه یا ثانویه تعیین می شوند. اجزای اولیه، اجزایی هستند که جهت پایداری جانبی ومقاومت سازه هستند. در حالیکه اجزای ثانویه، این طور نیستند. هرچند ممکن است، این اجزا برای باربری قائم سازه لازم باشند. درحالت کلی، سختی جانبی اجزایی که به عنوان ثانویه انتخاب می شوند نباید از ۲۵ درصد از سختی جانبی کل طبقه بیشتر باشد.

سطوح عملکرد در SEAOC

سطوح عملکرد در SEAOC شامل کارایی کامل، کارایی، ایمنی جانی، آستانه فروریزش و فروریزش می باشند. در ادامه به شرح هریک ازاین سطوح پرداخته می شود.

۱ـ کارایی کامل (Fully Operational)

دراین سطح عملکرد، هیچ خسارتی نباید به سازه وارد شود. سازه پس از زلزله باید خدمت رسانی خود را حفظ کند و کلیه تجهیزات و سرویسهای وابسته به آن بایستی قابل استفاده باشند درحالت کلی هیچ تعمیری مورد نیاز نخواهد بود.

۲ـ کارایی (Operational)

دراین سطح عملکرد خسارت متعادلی به عناصر غیرسازه ای و خسارت جزئی به المانهای سازه ای وارد می شود. خسارت محدود است و ایمنی سازه را جهت خدمت رسانی تهدید نمی کند.

۳ـ ایمنی جانی (Life Safety)

دراین سطح عملکرد خسارت متعادلی به عناصر سازه ای و غیرسازه ای وارد می شود. سختی جانبی سازه و مقاومت در برابر نیروی جانبی، تاحد نسبتاً زیادی کاهش می یابد، هرچند که حاشیه اطمینانی تا فروریزش باقی مانده است. سازه احتمالاً قابل تعمیر است هرچند این کار اقتصادی نباشد.

۴ـ آستانه فروریزش (Near Collapse)

خسارت قابل ملاحظه ای به عناصر مقاوم جانبی و قائم وارد می شود، پس لرزه ها می توانند سبب فروریزش کلی یا جزئی سازه شوند. سازه احتمالاً برای خدمت رسانی و تعمیر این نخواهد بود و تعمیر ساختمان توجیه اقتصادی و فنی ندارد.

۵ـ فروریزش (Collapse)

خسارت وارده به سازه قابل ملاحظه است به طوری که المانهای باربر قائم آن به صورت کلی یا جزئی فروریخته اند. سازه قابل تعمیر نمی باشد وترجیحاً باید تخریب گردد.

سطوح عملکرد تعریف شده توسط ATC40

در ATC40، سطوح عملکرد هدف برای سیستمهای سازه ای و سیستمهای غیرسازه ای به صورت جداگانه، تعریف شده است. دراین مدرک، عملکرد کلی یک ساختمان به صورت ترکیبی ازسطح عملکرد سازه ای وسطح عملکرد غیرسازه ای اعضای آن،می باشد. ترکیب سطوح عملکرد سازه ای و غیرسازه ای جهت تعیین سطوح علمکرد کلی ساختمان را نشان می دهد. درادامه به شرح

سطوح عملکرد ارائه شده دراین مدرک برای اعضای سازه ای و غیرسازه ای و کل ساختمان پرداخته می شود.

سطوح عملکرد سازه ای

ـــ قابلیت استفاده بی وقفه SP-1 Immediate Occupancy

خسارت وارده پس از زمین لرزه دراعضای سازه ای بسیار محدود می باشد و تغییری در ظرفیت عناصر مقاوم باربر قائم و جانبی نسبت به حالت قبل از زلزله دیده نمی شود. خطر صدمات جانی قابل اغماض است. سازه جهت ورود و خروج و سکونت ایمن می باشد.

ـــ کنترل خسارت SP-2 Damage Control

این حالت درحقیقت نشانگر یک سطح خاص عملکرد نمی باشد. بلکه محدوده ای از زمین لرزه را که مابین سطوح قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی می باشد،شامل می شود. در واقع با این تعریف می توان حالاتی را که لازم است خسارت سازه ای کنترل شود، درنظر گرفت. به عنوان مثال می توان به کنترل خسارت سازه ای، جهت حفاظت ازنماهای (نازک کاریهای) معماری درساختمانهای تاریخی یا محتویات گران قیمت آنها نام برد.

ـــ ایمنی جانی، SP-3 Life Safety

خسارت وارده پس از زمین لرزه به اعضای سازه ای، قابل توجه است، لیکن هنوز حاشیه ای تا فروریزش کلی یا جزئی سازه باقی مانده است. سطح خسارت، کمتر از مقدار مورد نظر برای سطح پایداری سازه ای می باشد. اعضای مهم سازه ای ازجای خود خارج نشده اند وخسارت سازه ای باعث صدمات جانی نمی شود. تعمیرات عمده سازه ای قبل از استفاده مجدد از ساختمان لازم است گرچه ممکن است این تعمیرات همیشه توجیه اقتصادی نداشته باشند.

ـــ ایمنی محدود، SP-4 Limited Safety

این عبارت نیز مبین دامنه ای ازخسارت وارده به سازه بین سطوح ایمنی جانی وپایداری سازه می باشد ودراین حالت تامین کامل سطح ایمنی جانی مورد نظر نیست و نقایص سازه ای درحدی است که تغییر شکلهای شدیدی در سازه، اتفاق نمی افتد.

ـــ پایداری سازه ای،SP-5 Structural Stability

دراین سطح، خسارت وارده به سازه پس از زلزله در حدی است که سیستم سازه ای درآستانه ریزش کلی یا جزئی قرار می گیرد. خسارت وارده به سازه اساسی است و شامل کاهش قابل ملاحظه سختی ومقاومت سیستم باربر جانبی می باشد، لیکن عناصر بار بر قائم هنوز کار می کنند. ممکن است ساختمان بطور کلی پایدار باشد، خطر لطمات جانی به دلیل ریزش در داخل و خارج ساختمان زیاد است. پس لرزه ها ممکن است باعث فرو ریزش ساختمان شوند. تعمیرات سازه ای قابل ملاحظه قبل از استفاده مجدد از ساختمان لازم است.

سطوح عملکرد غیرسازه ای

-کارایی، NP-A Operational

خسارت پس از زلزله به صورتی است که عناصر وسیستمهای غیرسازه ای درمحل اولیه خود قرار دارند ولیکن شکافهای محدودی در آنها ایجاد شده است و تعمیرات لازم است . همه تجهیزات و ماشین آلات باید قابل استفاده باشند گرچه تاسیسات شهری (External Utilities) ممکن است به دلیل خسارت قابل توجه ساختمان قابل دسترس نباشند. طرحهای اضطراری جهت غلبه بر مشکلات به وجود آمده برای ارتباط با بیرون، دسترسی و تاسیسات ساختمان باید تامین گردند.

ـــ قابلیت استفاده بی وقفه NP-B Immediate Occupancy

خسارت وارد آمده دراثر زلزله به صورتی است که کلیه اعضاء و سیسمتهای غیرسازه ای درمحل اولیه خود قراردارند، لیکن شکافهای محدودی در آنها ایجاد شده است و تعمیرات، خصوصاً به دلیل خسارت یا جابه جایی محتویات لازم است. باوجودی که تجهیزات و ماشین آلات کلاً مهار شده اند، امکان استفاده از آنها پس از تکانهای شدید وجود ندارد و ممکن است، محدودیتهایی در استفاده یا کاربرد آنها وجود داشته باشد.

ـــ ایمنی جانی NP-C Life Safety

دراثر زلزله، خسارت قابل ملاحظه ای به اجزاء و سیستمهای غیرسازه ای وارد می شود، اما خرابی یا ریزش اجزای سنگین درحدی نیست که سبب صدمات شدید در داخل یا خارج ساختمان شود.

شکسته شدن لوله های تحت فشار بالا یا حاوی مواد سمی یا لوله های آب اطفای حریق نباید منجر به خطرات ثانویه شود.

سیستمهای غیرسازه ای، تجهیزات و ماشین آلات ممکن است نیاز به جایگزینی یا تعمیر داشته باشند. گرچه زلزله باعث صدمات می شود ولیکن احتمال به خطر افتادن جان افراد به دلیل این صدمات (ناشی از خسارت غیرسازه ای) بسیار پایین است.

ـــ خطر کاهش یافته، NP-D Reduced Hazard

در اثر زلزله به اجزاء و سیستمهای غیرسازه ای خسارت وارد می شود، اما این خسارت نباید شامل فروریزش ساختمان یا ریزش قطعات بزرگ و سنگین که منجر به صدمات قابل توجه به افراد می شود، باشد. مثل ریزش جان پناهها، دیوارهای بنایی خارجی، نما و سقفهای بزرگ و سنگین. درحالیکه انتظارمی رود که صدمات جدی اتفاق افتد، احتمال وقوع ریزشهایی که منجر به خطر افتادن جان تعداد زیادی از افراد درداخل یا خارج بنا می شود، بسیار پایین است.

ـــ منظور نشده،NP-E Not Considered

اجزای غیرسازه ای، غیر از آنهایی که بر پاسخ سازه ای تاثیر دارند، ارزیابی نمی شوند، به عبارت دیگر عملکرد لرزه ای آنها مهم نیست.

سطوح عملکرد ساختمان

ـ کارایی A Operational

این سطح عملکرد مربوط به کارایی تمام اعضاء می باشد. خسارت سازه ای دراین حالت محدود است بطوریکه امکان استفاده ایمن از ساختمان وجوددارد. هرگونه تعمیراتی جزئی است واین تعمیرات می تواند بدون ایجاد وقفه در استفاده از ساختمان انجام شود.

به صورت مشابه، خسارت وارده به همه سیسمتهای غیرسازه ای و محتویات ساختمان جزئی است و منجر به خطر افتادن عملکرد ساختمان نمی شود. برای عدم وقفه درسرویسهای حیاتی مانند مخابرات، آب، برق، گاز، دسترسی و ...باید طرحی برای استفاده از سیسمتهای اضطراری موجود باشد.

ـ قابلیت استفاده بی وقفه B Immediate Occupancy

این سطح، بخش عمده ای از معیارهای لازم برای تاسیسات ضروری را شامل می شود. سیستم ها و فضاهای ساختمان باید به صورت قابل قبولی قابل استفاده باشند، لیکن تامین پیوستگی فعالیت همه سرویسها، شامل سیستمهای اصلی و پشتیبانی لازم نیست . محتویات بنا ممکن است خسارت ببینند.

ـ قابلیت استفاده بی وقفه B Immediate Occupancy

این سطح، بخش عمده ای از معیارهای لازم برای تاسیسات ضروری را شامل می شود. سیستم ها و فضاهای ساختمان باید به صورت قابل قبولی قابل استفاده باشند، لیکن تامین پیوستگی فعالیت همه سرویسها، شامل سیستمهای اصلی و پشتیبانی لازم نیست . محتویات بنا ممکن است خسارت ببینند.

ـ ایمنی جانی Life Safety

منظور از این سطح، رسیدن به حالت خسارتی است که آسیبهای سازه ای یا ریزش اجزای غیرسازه ای ساختمان، خطر بسیار کمی را از نظر ایمنی جانی ایجاد کند، اما محتویات و اثاثیه ساختمان قابل کنترل نیستند و می توانند خطرات ریزش و خطرات ثانویه مثل رها شدن مواد شیمیایی و آتش سوزی را دربرداشته باشند. این سطح عملکرد کمتر از عملکرد مورد نظر آیین نامه طراحی ساختمانهای جدید در نظر گرفته شده است.

ـــ پایداری سازه ای Structural Stability

این حالت خسارت فقط مربوط به قاب اصلی ساختمان یا سیستم باربر قائم می باشد و در این حالت، سیستم تنها در برابر بارهای

قائم پایدار می باشد. هیچ حاشیه امنی دربرابر فرو ریزش دراثر وقوع پس لرزه ها وجود ندارد. احتمال تهدید جانی دراثر خطرات ریزش داخلی و خارجی ونماها و نازک کاری غیرسازه ای یا حتی در اثر آسیب دیدگی سازه ای وجود دارد. تجدید نظر در عملکرد عناصر غیر سازه ای به دلیل نیروها و تغییر مکانهای به وجود آمده در آنها لازم نیست وعملکرد آنها بسیار غیر قابل اعتماد می باشد.

حرکات زمین

حرکات زمین لرزه در ترکیب با سطح عملکرد مورد نظر یک هدف عملکرد را شکل می دهد. یک حرکت زمین لرزه می تواند به یکی از دو صورت ذیل تعریف شود.

الف ـ تعیین یک سطح لرزش به همراه احتمال وقوع آن (روش احتمالاتی).

ب ـ تعریف حرکت زمین برحسب حداکثر لرزش مورد انتظار ازیک زلزله معین با بزرگای مشخص در یک گسل (چشمه لرزه ای) معین (روش تعیینی).

سطح حرکت زمین برحسب شاخص های مهندسی قابل استفاده در طراحی، بیان می شود. یک طیف پاسخ یا مجموعه ای از رکوردهای زلزله برای این منظور استفاده می شود. سطوح زمین لرزه های ATC40 به شرح ذیل می باشند.

زمین لرزه ای است که احتمال وقوع زلزله ای بزرگتر از آن درمدت ۵۰ سال (عمر مفید سازه)، ۵۰ درصد می باشد.

طرح مسئله پایش سلامت سازه‌ها

به طور کلی شناسایی آسیب در سازه ها در چهار سطح طبقه بندی می شوند :

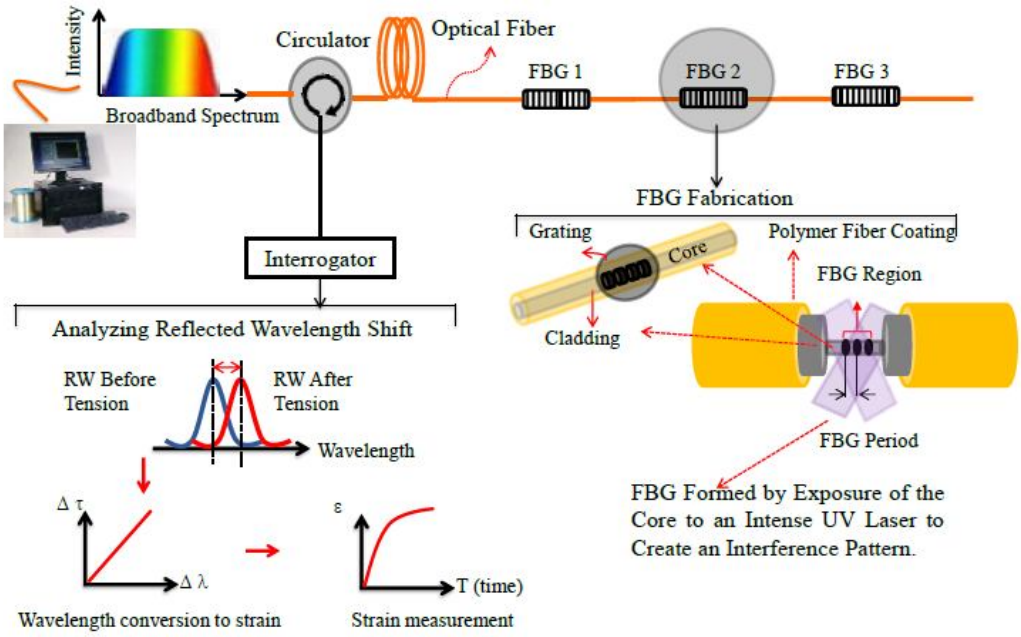
۱- تشخیص وجود و یا عدم وجود خرابی در سازه ها

۲- تعیین موقعیت هندسی خرابی

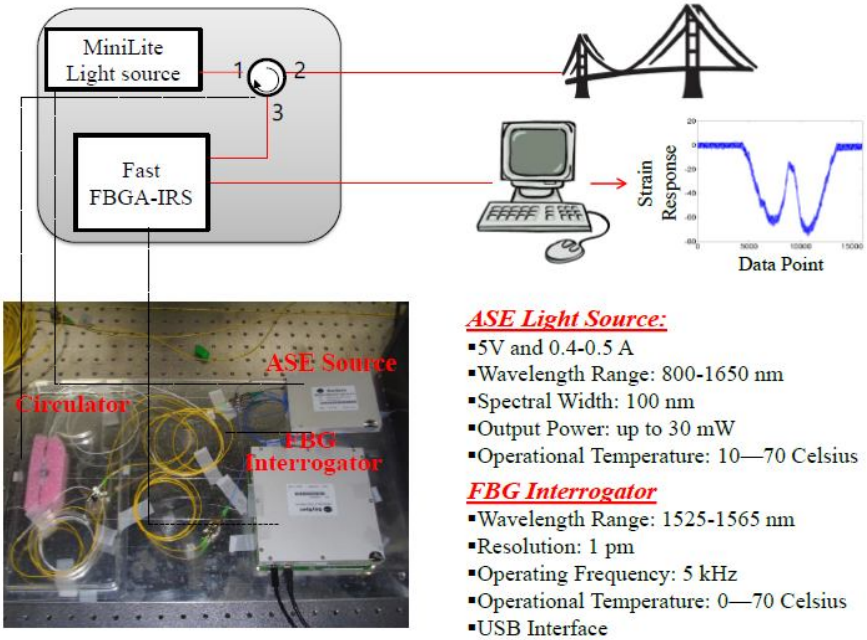
۳- کمیت شدت خرابی

۴- تخمین عمر باقیمانده

روش های غیر مخرب عیب یابی به دو دسته کلی تقسیم می شوند: روش های مستقیم که شامل انواع بازرسی های مستقیم از سازه می باشند. این روش ها نیازمند هزینه گزاف برای بازرسی بوده و علاوه بر آن، برخی از اعضای سازه ای به واسطه دور از دسترس بودن نمی توانند مورد بازرسی قرار گیرند، که این خود منجر به گسترش عیوب در سازه ها می شود. روش های غیر مستقیم که امروزه مورد استفاده قرار میگیرند عمدتاً مبتنی بر اطلاعات حاصله از سنسورها بوده و جهت انجام آنها از پاسخ های استاتیکی، دینامیکی ویا ترکیب آنها استفاده می شود. این روش ها به دو صورت کلی انجام می شوند. در گروهی از این روش ها، تنها با ارزیابی اطلاعات حاصله از سنسورها به شناسایی خرابی در سازه می پردازند. در حالی که در گروه دوم با مقایسه ی داده های حاصل از سنسورها و خروجی حاصل از مدل عددی سازه پی به مکان و شدت خرابی در سازه می برند. روش اول که دارای سابقه به کارگیری بیشتری می باشد، دارای حجم محاسبات عددی بسیار کمتری نسبت به روش های مبتنی بر مدل های عددی سازه است. در روش اول با ارزیابی اختلاف بین پاسخ های حاصله از سنسور و پاسخ های سازه سالم پی به وجود یا عدم وجود عیب در سازه برده می شود که این سطح نخست در عیب یابی می باشد. گروه دوم این روش ها نقش تعیین کننده‌ای در تعیین موقعیت و شدت خرابی در سازه ها دارا می باشند. روش های مبتنی بر به روز رسانی مدل سازه‌ای با به روز رسانی ویژگی های فیزیکی سازه و استخراج پاسخ های متناظر با آن ویژگی ها، با به حداقل رساندن اختلاف بین پاسخ های حاصله از سنسور و مدل عددی به بردار خرابی سازه پی می برند. این روش برای سازه های بزرگ مقیاس از حجم بالای محاسبات برخوردار بوده که منجر به پایین آمدن کارایی این روش در عیب یابی این نوع سازه ها می شود. در این پژوهش به ارائه روند حل با استفاده از مدل کمکی مبتنی بر شبکه عصبی به عنوان یک مکانیزم کارامد تقریب ساز برای مدل عددی سازه جهت استخراج پاسخ های مدل سازه به روز شونده، پرداخته شده است. استفاده از این روند حل جهت کاهش حجم بالای محاسبات عددی مورد نیاز برای به روز رسانی مدل سازه‌ای می باشد.



Measurement principal of Fiber Bragg Grating (FBG) sensor



In-house developed FBG system

۱-۱- ضرورت پایش سلامت سازه‌ها

امروزه روشهای زود هنگام تشخیص آسیب دیدگی سازه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زیرا با کشف زود هنگام آسیب در سازه ها می توان برای تعمیر و نگهداری آنها برنامه ریزی و از خرابی فاجعه بار به هنگام رسیدن خسارت به حالت بحرانی جلوگیری کرد. روش هایی که در گذشته جهت شناسایی خرابی در سازه ها مورد استفاده قرار می گرفتند را می توان به دو دسته روش مخرب و غیر مخرب تقسیم بندی نمود. این روش ها نیازمند هزینه گزاف برای بازرسی بوده و علاوه بر آن، برخی از اعضای سازه ای به واسطه دور از دسترس بودن نمی توانند مورد بازرسی قرار گیرند، که این خود منجر به گسترش عیوب در سازه ها می شود.

روش های غیر مستقیم که امروزه مورد استفاده قرار میگیرند عمدتاً مبتنی بر اطلاعات حاصله از سنسورها بوده و جهت انجام آنها از پاسخ های استاتیکی، دینامیکی ویا ترکیب آنها استفاده می شود.
به طور کلی روشی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته روش غیر مستقیم مبتنی بر استفاده از پاسخ های دینامیکی می باشد.

۱- ۲- اهداف پایش سلامت سازه‌ها

- این امکان را به کاربران سازه می‌دهد که سازه را در شرایط بهینه‌تری قرار دهند.
- اطلاعات دقیقی از رفتار واقعی سازه جهت انجام تعمیر، نگهداری و همچنین مقاوم سازی مشخص می‌کند.
- زمان صرف شده برای تعمیر و نگهداری کاهش می‌یابد.
- از شکست‌های ناگهانی سازه جلوگیری می‌شود.
- به سازندگان این امکان را می‌دهد که کیفیت تولیدات خود را افزایش دهند.
- نحوه‌ی نگهداری و تعمیرات دوره‌ای را ارتقاء و بهبود می‌بخشد، به این صورت که به جای تعمیرات دوره‌ای و زمان‌بندی شده، تعمیرات بر اساس عملکرد (ویا وضعیت) جایگزین می‌شود. بدین وسیله در بسیاری از هزینه‌های نگهداری صرفه‌جویی می‌گردد.
- خطای انسانی را کاهش داده و امنیت و اطمینان به سیستم را افزایش می‌دهد.

۱- ۳- روش‌های عیب‌یابی سازه‌ها

اصولا روش های عیب یابی به سه بخش اصلی زیر تقسیم می‌شود:
۱-روش های مخرب[۱]
۲-روش های غیر مخرب[۲]
۳-روش های غیر مستقیم(معکوس[۳])

۱- ۳- ۱- روش‌های مخرب

روش های مخرب به آزمایشاتی گفته می‌شود که پس از انجام آن نمونه مورد آزمایش بلااستفاده می‌گردد. آزمایش های مخرب اغلب به منظور بررسی و تعیین خواص مکانیکی و یا کنترل کیفیت مواد، با استفاده از نمونه برداری از قطعه مورد نظر بکار می‌رود.
از معایب این روش می‌توان به سرعت پایین، پرهزینه بودن و ارائه اطلاعات فقط مربوط به نمونه‌های آزمایش شده اشاره کرد.
آزمایش های مخرب عبارتند از: آزمایش کشش- آزمایش سختی- آزمایش ضربه- آزمایش سلامت- آزمایش خستگی- آزمایشات مخرب جهت تعیین خواص شیمیایی- آزمایش متالوگرافی.

۱- ۳- ۲- روش‌های غیرمخرب

در مقابل روش‌های مخرب روش‌های غیر مخرب قرار دارند. تست‌های غیر مخرب روش‌های غیر تهاجمی در تشخیص درستی اجزاء یک ماده یا ساختار با اندازه‌گیری برخی کمیت‌های فیزیکی یک عضو است. به عبارت دیگر روش‌های غیر مخرب به روش‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها کارایی یک عضو بدون ایجاد خرابی در آن‌ها و نیز بدون آسیب پوشش‌های سطحی آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.
روش‌های غیر مخرب عبارتند از: بازرسی چشمی-بازرسی به روش مایع نافذ-بازرسی با ذرات مغناطیسی-بازرسی آلتراسونیک-بازرسی رادیوگرافی با امواج

---

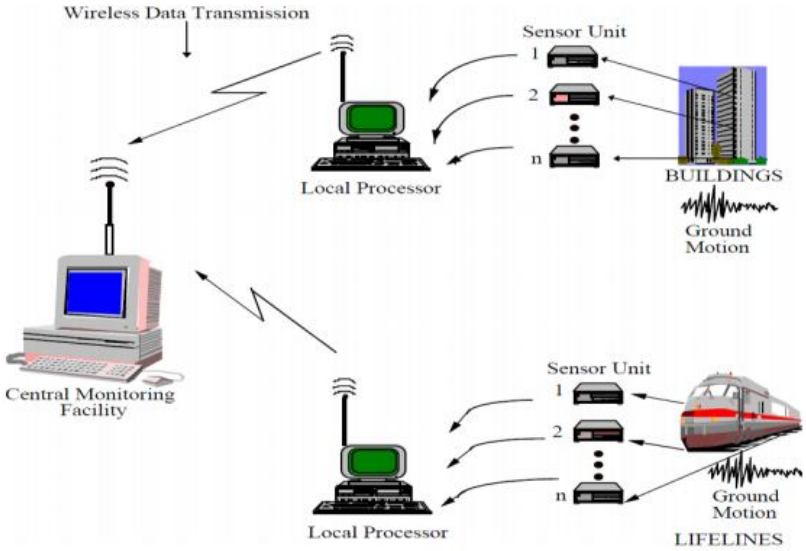
[۱] Destructive Test
[۲] Non-Destructive Test
[۳] Inverse Methods

از معایب این روش‌ها می‌توان به محدودیت‌های موجود و پرهزینه بودن آنها اشاره کرد.

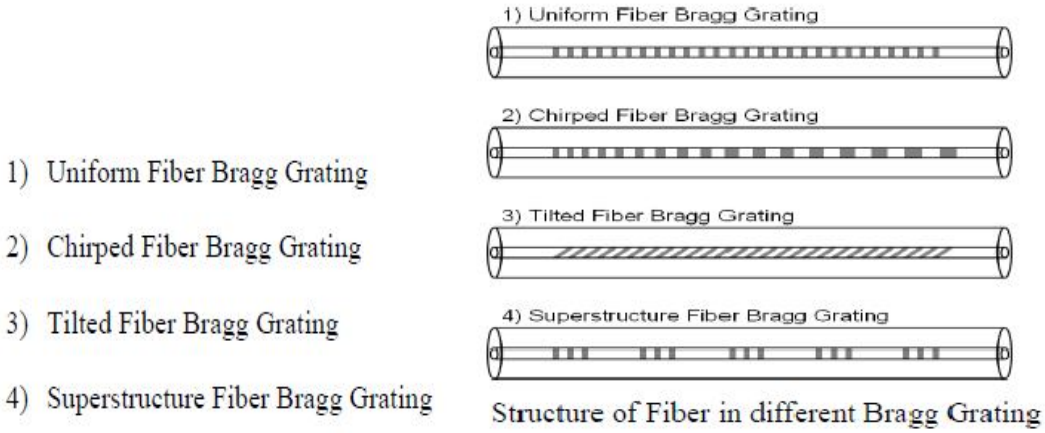
روش‌های غیرمستقیم (معکوس)

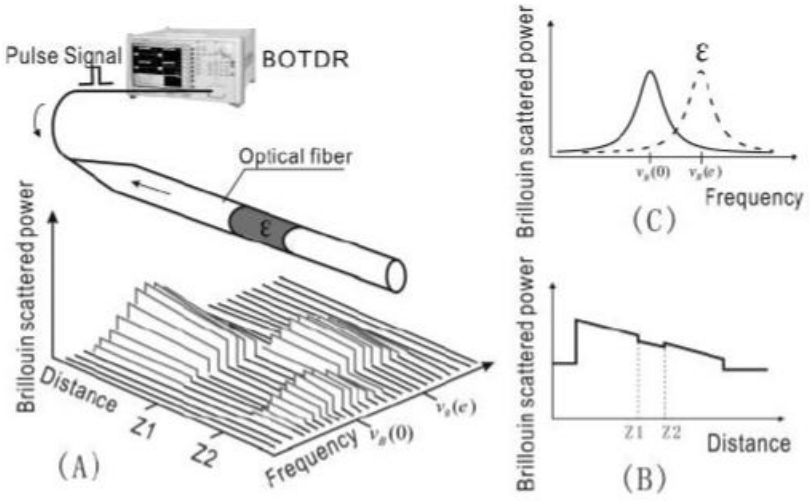
هر یک از روش‌های عیب یابی که در قسمت قبل اشاره شد دارای محدودیت های خاص می‌باشند که باعث می‌شود هر یک از آنها در حیطه مشخصی از شناسایی عیوب سازه‌ای کاربرد داشته باشند. از طرفی برای شناسایی وضعیت کل سازه باید روش های ذکر شده به صورت مستقیم برای هر یک از اعضای سازه، بکار گرفته شوند که این کار مستلزم صرف هزینه و وقت بسیار زیاد بوده و در عمل نشدنی خواهد بود. در نتیجه با روش‌های مذکور فقط می‌توان تعداد محدودی از اعضا را مورد آزمایش و بررسی قرار داد.

جهت شناسایی وضعیت سلامت سازه نیاز به روش‌هایی وجود دارد که علاوه بر کنترل وضعیت کل سازه، محدودیت‌های روش‌های غیر مخرب و مخرب را نداشته باشند. بررسی پاسخهای دینامیکی ویا استاتیکی سازه، قبل و بعد از ایجاد خرابی از جمله راهکارهای مناسب در این مورد می‌باشند. از جمله این پاسخ ها می‌توان به جابجایی‌ها، شتاب‌ها، سرعت‌ها، فرکانس‌ها و مودشکل‌های سازه اشاره کرد. از میان این پاسخ ها، شتاب‌ها را با سهولت بیشتری توسط سنسورها (شتاب‌نگاشت) می‌توان ثبت کرد. در شکل ۱مفهوم روش‌های عیب‌یابی غیرمستقیم به طور ساده نشان داده شده است. همانطورکه در شکل مشاهده می‌شود، در این روش‌ها کیفیت عیب‌یابی به نوع سنسورها، پردازشگر محلی و پردازشگر کلی وابسته است



شکل: نمایش اجزای روش‌های غیرمستقیم عیب‌یابی





BODTR measurement principle

روش‌های عیب یابی مبتنی بر پاسخ‌های سازه‌ای از جمله روش‌های غیر مستقیمی می‌باشند که در شناسایی عیب سازه موثر هستند. در این روش‌ها می‌توان با مقایسه رفتار سازه قبل و بعد از خرابی آسیب‌های موجود در سازه را مورد ارزیابی قرار داد و حتی شدت خرابی را با دقت بالایی بدست آورد.

محققان در زمینه عیب یابی با استفاده از روش های غیر مستقیم تاکنون کارهای دسته بندی شده‌ی ارزشمندی را انجام داده اند و تحقیقات همچنان ادامه دارد. در این بخش مروری گذرا بر تاریخچه و دستاوردهای حاصل شده انجام می شود.

روش‌های غیر مستقیم که امروزه استفاده می‌شود را می‌توان به طور کلی به صورت زیر تقسیم کرد:

۱-استفاده از پاسخ های سازه بصورت مستقیم به عنوان شاخصی برای عیب یابی

۲-استفاده از روش های بروز رسانی مدل سازه ای

۳-استفاد از روش های آنالیز موجک

۴-استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی درون یاب

استفاده از پاسخ‌های سازه به عنوان شاخصی برای عیب‌یابی

همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، به طور کلی خرابی در سازه ها باعث تغییر پاسخ آنها می شود. مسئله خرابی در روش غیر مستقیم با روندی معکوس، با استفاده از تغییری که در پاسخ ها ایجاد می گردد حل می‌شود. به طور کلی می توان پاسخ های مورد استفاده در عیب یابی سازه ها را به سه دسته تقسیم نمود:

الف-پاسخ های استاتیکی

ب- پاسخ های دینامیکی

ج-ترکیبی از پاسخ های استاتیکی و دینامیکی

استفاده از پاسخ‌های استاتیکی

دست یابی ارزانتر به پاسخ های استاتیکی نسبت به پاسخ های دینامیکی یکی از مزیت های آن می باشد. از این رو استفاده از پاسخ های استاتیکی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است.

- **استفاده از جابجایی**

اندازه گیری جابجایی در سازه های بزرگ بسیار دشوار و پرهزینه می باشد و نیازمند ایجاد یک قاب مرجع ثابت برای سنجش جابجایی می باشند.

چو و قابوسی با استفاده از پاسخ جابجایی اندازه گیری شده سازه معیوب و به کار گیری الگوریتم بهینه سازی ژنتیک به تعیین محل و شدت آسیب پرداختند. این محققین نتیجه گرفتند که روش پیشنهادی حتی با وجود کمبود اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط سنسورها، مکان تقریبی خرابی را تشخیص می‌دهد.

بودا و کادمی روشی را بر اساس به حداقل رساندن تابع خطا در اندازه گیری خطا بین مدل تحلیلی و داده‌های تجربی جهت عیب یابی پیشنهاد دادند. آنها از پاسخ جابجایی ثبت شده در اثر اعمال بار استاتیکی استفاده کردند.

- **استفاده از کرنش**

اگر چه مراحل نصب کرنش سنج بر روی سطوح نیاز به صرف وقت زیادی دارد ولی بعد از نصب، اندازه گیری کرنش ها به راحتی انجام می شود.

ونگ و همکارانروشی را جهت شناسایی آسیب در خرپاهای سقفی ارائه کردند. آنها مسئله عیب یابی را مانند یک مسئله بهینه سازی حل نمودند. روش ارائه شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و اختلاف بین کرنش های اندازه گیری شده می باشد.

استفاده از پاسخ‌های دینامیکی

پاسخ های دینامیکی به طور گسترده ای در تشخیص آسیب مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه مروری بر تحقیقات گذشته که در آنها از انواع پاسخ های دینامیکی مستقیم(فرکانس های طبیعی و اشکال مودی و شتاب) و یا پاسخ های دینامیکی ترکیبی(تابع پاسخ فرکانس و انرژی کرنشی) استفاده شده، بیان شده است.

- **استفاده از تغییرات فرکانسی**

محققان بسیاری با استفاده از تغییرات در فرکانس ها، آسیب‌های سازه را شناسایی کرده اند. در سازه ها در اثر خرابی، تغییر محسوسی در فرکانس های طبیعی سازه قبل و بعد از آسیب ایجاد می شود. لذا از این شاخص عمدتاً برای تشخیص آسیب می توان بهره برد ولی محل یابی و میزان آسیب معمولاً بدین طریق قابل تشخیص نمی باشد . کاولی و آدامز با استفاده از تغییرات ایجاد شده در فرکانس های طبیعی فرمولی را بر اساس نسبت تغییر فرکانس های طبیعی در مودهای مختلف جهت تشخیص آسیب در مواد کامپوزیت به دست آوردند.

سالاوو مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه تشخیص عیب با استفاده از فرکانس های طبیعی داشت. تنها مزیت استفاده از این پاسخ دینامیکی، ارزان بودن استخراج این پاسخ عنوان کرد.

جیاسهار و سومانگالا با استفاده از روش های شبکه عصبی به شناسایی آسیب پرداختند. این محققین از پاسخ فرکانس طبیعی در روش خود استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که روش به کار رفته قادر است خرابی را با خطای تقریباً ده درصد مورد شناسایی قرار دهد.

لی روشی را برای شناسایی ترک های متعدد در یک تیر بر پایه ی روش نیوتن رافسون و با استفاده از آنالیز حساسیت ارائه کرد. وی در روش خود از پاسخ فرکانس های طبیعی سازه آسیب دیده استفاده نمود.

- **استفاده از اشکال مدی**

با توجه به اینکه محققان با استفاده از پاسخ فرکانس طبیعی به تنهایی قادر به تشخیص محل و شدت آسیب نبودند. توجه آنها به سوی استفاده از شکل مودی به تنهایی و یا به صورت ترکیبی با فرکانس های طبیعی سازه جلب شد.

اولین استفاده سیستماتیک از اطلاعات مودی برای تعیین موقعیت آسیب در سازه توسط وست در سال ۱۹۸۴ارائه شد. وی از معیار اطمینان مودی (MAC[۴]) برای تعیین همبستگی بین مدهای به دست آمده از سازه سالم و آسیب دیده استفاده کرد. اشکال مودی

[۴] Modal Assurance Criterion

با استفاده از طرح های مختلف تفکیک شده و تغییر در معیار اطمینان مودی در روش های تفکیکی مختلف برای تعیین موقعیت آسیب استفاده شده است.

ژانگ کمیاتی را جهت بررسی تطابق شکل های مودی در حالت های مختلف (به طور نمونه در سازه آسیب دیده و سالم) ارائه نمود و آنها را با هم مقایسه نمود.که از جمله آنها می توان به MSF[۵] ، MAC وCOMAC[۶] اشاره نمود.

$$MSF_{A,B} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\varphi_i^A).(\varphi_i^B)^T}{\sum_{i=1}^{n}(\varphi_i^A).(\varphi_i^A)^T}$$

$$MAC_{A,B} = \frac{|\sum_{i=1}^{n}\varphi^A\varphi^B|^2}{\sum_{i=1}^{n}(\varphi^A)^2\sum_{i=1}^{n}(\varphi^B)^2}$$

$$COMAC_{i,A,B} = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n}\varphi_i^A\varphi_{i,j}^B\right|^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\varphi_{i,j}^A\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(\varphi_{i,j}^B\right)^2}$$

در این روابط φ_i^A, φ_i^B به ترتیب مود شکل مود iام در سازه‌های آسیب دیده و سالم می باشد. مقادیر MAC,COMAC,MSF بین صفر تا یک متغیر می باشند به طوریکه عدد یک نشان دهنده تطابق کامل و عدد صفر بیانگر عدم تطابق در دو حال سالم و معیوب می باشد. بنابراین هر چه سازه دارای آسیب بیشتری باشد مقدار پارامتر های مذکور به سمت صفر میل می کنند. کو و همکاران روشی جهت شناسایی آسیب بر مبنای معیار اطمینان مودی برای قابهای فلزی ارائه نمودند. روش ارائه شده نشان داد که نتایج حاصله از معیار اطمینان مودی COMAC نمی تواند موقعیت خرابی در سازه را به درستی نشان دهد. اسماعیل و همکاران انحراف شکل مودی را به عنوان شاخص معرفی نمودند و بر اساس آن محل و شدت خرابی راتشخیص دادند.

گریست و همکاران محل وشدت خرابی را در یک ورق با استفاده از الگوریتم بهبود یافته ژنتیک توسط آنالیز حساسیت تعیین نمودند. آنها در این تحقیق از ترکیبی از فرکانس های طبیعی سازه و اشکال مودی به عنوان پاسخ سازه استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی بود.

جی و لویی روشی را بر پایه مدل اجزا محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه از قبیل فرکانس ها و اشکال مودی ارائه نمودند. روش مذکور با در نظر گرفتن مثالهایی بر روی تیر، قاب و ورق بررسی شد و نتایج حاکی از آن بود که اگر شدت آسیب زیاد نباشد روش فوق می تواند در شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گیرد. پررا و همکاران از الگوریتم اجتماع ذرات جستجوگر در مسائل شناسایی آسیب به صورت چند هدفه استفاده کردند. در این تحقیق آنها از دو تابع هدف که یکی بر اساس فرکانس های طبیعی سازه سالم وسازه آسیب دیده و دیگری بر اساس معیار MAC بود استفاده کردند. بررسی ها نشان می دهند که استفاده ترکیبی از فرکانس و مود شکل ها نتایج بهتری حاصل می شود.

- **استفاده از شتاب**

لی و لا [۱۹] با استفاده از روش پایدار سازی تیخونوف با بهره گیری از پاسخ های شتاب در کره ها به روز رسانی مدل سازه جهت عیب یابی پرداختند.

---

[۵] Modal Scale Factor

[۶] Co-ordinate Modal Assurance Criterion

- **استفاده از تابع پاسخ فرکانس**

استفاده از تابع پاسخ فرکانس (FRF[۷]) جهت عیب یابی اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است که در واقع برگرفته از روش های استفاده از پاسخ های فرکانس و شکل های مودی می باشد. با توجه به اینکه تابع پاسخ فرکانس ترکیبی از پارامترهای شکل مودی و فرکانس می باشد، در زمینه عیب یابی نتیجه مطلوبی دارد.

سمان و همکارانش با استفاده از روشی مبتنی بر تفاوت بین FRF های پل های ترک خورده و نخورده جهت پالایش سلامت مدل پل استفاده کردند. این روش همچنین محل بعضی از ترک ها را پیش بینی نمود.

لی و همکارانش جهت عیب یابی پوسته های استوانه ای از تابع پاسخ فرکانس استفاده نمودند. آنها در این تحقیق با ارائه روشی بر اساس حل دینامیکی سازه و به کارگیری تئوری صفحات و پوسته ها به تعیین محل وشدت آسیب پرداختند. اسفندیاری و همکارانش از تابع پاسخ فرکانس برای شناسایی آسیب استفاده کردند. آنها با استفاده از آنالیز حساسیت و روش حداقل مربعات مسئله عیب یابی را حل نمودند. روش ارائه شده توسط این محققین به درستی محل و شدت آسیب را تعیین نمود.

- **استفاده از انرژی کرنشی**

انرژی کرنشی عضو به صورت حاصل ضرب ماتریس سختی در توان دوم شکل مودی بیان می شود. اگر عضو یا اعضائی از سازه دچار آسیب گردد، بدین ترتیب انرژی کرنشی عضو تغییر کرده و باعث تغییر در انرژی‌کرنشی سازه می‌شود. از این رو با استفاده از این اختلافات با حلی معکوس می توان آسیب در سازه را تشخیص داد. دوبلینگ و همکاران با استفاده از اندازه گیری انرژی کرنشی تمامی مدهای سازه ، مدهای غالب را در سازه سالم و آسیب دیده رتبه بندی کردند. آنها با استفاده از انرژی کرنشی مودهای غالب توانستند دقت شناسایی آسیب را بالا ببرند. شی و همکاران روشهایی را بر مبنای استفاده از تفاوت انرژی کرنشی مودال در سازه های خراب و سالم برای پیش بینی محل خرابی بر اساس تحلیل حساسیت برای تعیین شدت خرابی پیشنهاد نمودند. گودرزی وترکزاده با ارائه تابع هدفی بر اساس انرژی کرنشی مودال و حل آن با کمک الگوریتم اجتماع ذرات، محل و شدت خرابی را در یک سازه خرپایی تعیین کردند. نتایج نشان داد که در اثر آسیب، انرژی کرنشی اعضاء تغییر می‌کند و نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال در اعضای آسیب‌دیده بیشتر از اعضاء سالم خواهد بود. همچنین می‌توان از تغییرات انرژی کرنشی درکل سازه، قبل و بعد از آسیب به عنوان معیاری مناسب جهت تشخیص و تعیین آسیب استفاده کرد. گریست و همکاران یک شاخص خرابی بر اساس تغییرات انرژی کرنشی مودال تعریف کردند و نزدیک ترین شاخص به شاخص واقعی را بوسیله الگوریتم ژنتیک تشخیص دادند و بدین صورت محل وشدت خرابی را در یک تیر یک سر گیردار تعیین نمودند.

سیدپور یک روش دو مرحله ای بر مبنای انرژی کرنشی و فرکانس با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برای تعیین و تشخیص خرابی در سازه ها معرفی نمود.

۱- ۴- استفاده ترکیبی از پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی

در برخی تحقیقات، محققان از هر دو پاسخ استاتیکی ودینامیکی جهت عیب یابی استفاده کردند.

ونگ وهمکاران یک الگوریتم دو مرحله ای جهت شناسایی آسیب با استفاده از فرکانس های طبیعی و تغییر شکل های استاتیکی ارائه نمودند. در مرحله اول این تحقیق، با استفاده از پاسخ های استاتیکی و دینامیکی محل آسیب مشخص کردند. سپس مسئله ی عیب یابی به صورت یک مسئله بهینه سازی غیر مقید حل کردند. اُه و ژانگ با استفاده از ترکیب داده های استاتیکی و انحنای مود شکل ها در سازه های به شناسایی خرابی پرداختند. ناصر علوی و همکاران با استفاده از آنالیز حساسیت و به کاربردن الگوریتم ژنتیک پیوسته به شناسایی خرابی در یک سازه خرپایی و یک تیر پرداختند. آنها عیب یابی را توسط اندازه گیری فرکانس ها و پاسخ جابجایی انجام دادند.

---

[۷] Frequency Response Function

1) Auto-regressive methods
2) Fourier analyses
3) Wavelet methods
4) Robust regression
5) Correlation analysis
6) Instance-based methods
7) Moving principal component analysis

استفاده از روش های بروز رسانی مدل سازه‌ای

با توجه به اینکه تغییر در مشخصات فیزیکی سازه موجب تغییر در پاسخ‌های آنها می‌گردد، ایده کلی روش‌های به روز رسانی جهت عیب‌یابی بر این اساس استوار است. در واقع طی روندی معکوس می توان با استفاده از پاسخ ها به جزئیات تغییرات فیزیکی مدل که به عنوان خرابی شناخته می شود پی برد. بنابراین پاسخ‌های ثبت‌شده از سازه آسیب‌دیده تابعی از خرابی ایجاد شده در سازه می‌باشند. یعنی هر خرابی ایجادشده یک پاسخ منحصر بفرد ایجاد می‌کند که با داشتن پاسخ می‌توان آسیبی را که منجر به پاسخ منحصر به فرد شده است جستجو کرد. بنابراین عیب یابی یک پدیده غیر خطی می باشد.

با توجه به اینکه خرابی یک پدیده غیر خطی می باشد و حل دستگاه معادلات فوق به طور مستقیم محدود و گاهی غیر ممکن می باشد، امروزه بیشتر تحقیقات بر اساس حداقل سازی اختلاف پاسخ سازه خراب واقعی و خراب فرضی که از به روزرسانی پارامترهای فیزیکی مدل در هر مرحله از تکرار به دست می آید، می باشند. برخی از تحقیقات با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی جستجوگر فراکاوشی طی یک فرایند تکراری به حل مسئله پرداخته اند. برخی دیگر از تحقیقات مبتنی یر آنالیز حساسیت می باشند که با به کار گیری الگوریتم های مختلف طی فرایندی تکراری تابع هدف ارائه شده که بر اساس اختلاف پاسخ یا پاسخ های مورد نظر سازه خراب واقعی وخراب فرضی می باشد را حداقل می کنند. سروی و همکاران بر اساس پاسخ های دینامیکی با استفاده از به روز رسانی مدل اجزا محدود به عیب‌یابی سازه‌ها پرداختند که در این پژوهش خرابی به صورت کاهش یکی از خصوصیات فیزیکی اعضای سازه مدل‌سازی شده است ومحل و شدت خرابی با روندی معکوس با استفاده از به روز رسانی مدل سازه مشخص گردیده است و جهت تشخیص خرابی از دو روش استفاده شده که اولی با استفاده از الگوریتم های جستجوگر فرا کاوشی (رقابت استعماری و اجتماع ذرات) ودومی با استفاده از الگوریتم گرادیانی (لونبرگ-مارکوارت) مسئله خرابی را حل می کند. همچنین برای عملکرد مطلوب لونبرگ- مارکوارت در حل مسئله عیب یابی سازه های پر عضو گسسته از جمله سازه های فضاکار عیب یابی شده اند و همین طور از روش های بهینه سازی فرا کاوشی رقابت استعماری و اجتماع ذرات جهت عیب یابی سازه ها با کاربرد تابع هدف موثر بهره گرفته شده است و در نهایت مقایسه بین الگوریتم ها صورت گرفته است.

روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی فراکاوشی با همگرا شدن تابع هدفی مناسب، مدل اجزاء محدود طی فرایندی تکراری به روز رسانی می شود. در حل مسئله خرابی با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی پارامتر های فیزیکی اعضاء سازه آسیب دیده، مجهولات مسئله را تشکیل می دهند. مجهولات مسئله در طی حداقل سازی تابع هدف موثر پیشنهادی در هر مرحله به روز می

شوند. در نهایت با همگرایی تابع هدف مجهولات مسئله و در پی آن مدل سازه به روز می گردد.از جمله الگوریتم های بهینه سازی فراکاوشی مختلفی که جهت حل مسئله خرابی به کار می روند می‌توان به الگوریتم اجتماع ذرات، رقابت استعماری وراثتی، فاخته، جامعه مورچگان و. . . اشاره کرد. این الگوریتم ها در مسایل مختلف با توجه به تابع هدف معرفی شده از نظرکیفیت عملکرد متفاوت خواهند بود . در سازه های بزرگ با توجه به اعضاء یا المان های زیاد، تعداد مجهولات بالایی وجود داشته از این رو لازم است مسئله خرابی در دو مرحله حل شود. بدین ترتیب که در مرحله اول با استفاده از روش های مقایسه ای المان های مشکوک به خرابی مشخص شوند و در مرحله دوم با توجه به کاهش متغیرها با همگرا شدن تابع هدف پیشنهادی، شدت دقیق آسیب اعضای مشکوک به خرابی مشخص شوند. ترکزاده و همکاران با استفاده از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و جنبشی و الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات کاوشی به عیب یابی سازه های بزرگ مقیاس پرداخت. در این تحقیق در مرحله‌ی اول با استفاده از انرژی کرنشی جنبشی المان های محتمل خرابی پیدا شده و در مرحله دوم با استفاده از تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی مودال به وسیله الگوریتم HPSO شدت خرابی در سازه های بزرگ مقیاسی مانند شبکه دو لایه ۸۰۰ عضوی با دقت خوبی تعیین شده است.

روش‌های مبتنی بر آنالیز حساسیت

در سالهای اخیر به روز رسانی مدل اجزاء محدود بر اساس حساسیت جهت تشخیص خرابی به طور موفقیت آمیزی عمل کرده است. با استفاده از این روش خصوصیات فیزیکی مدل به روز می شوند در واقع پاسخ های سازه آسیب دیده به عنوان مرجع انتخاب می گردد و در هر تکرار خصوصیت فیزیکی (پارامتر به روزرسانی) به روز می گردد ودر پی آن پاسخ اولیه سازه به روز می شود. در واقع در اولین مرحله پاسخ سازه اولیه، پاسخ سازه آسیب دیده می باشد و در آخرین مرحله پاسخ سازه اولیه، پاسخ سازه معیوب می باشد. از جمله الگوریتم های ریاضی‌که جهت حل مسئله خرابی بوسیله به‌روز رسانی مدل اجزاء محدود بکار می‌روند می‌توان به الگوریتم نیوتن رافسون، الگوریتم لونبرگ مارکوارت[۸] و ... اشاره کرد.

سروی وهمکاران برای عیب یابی سازه‌های بزرگ مقیاس از الگوریتم لونبرگ مارکوارت استفاده کردند که نتایج بیانگر دقت بسیار خوب این روش در عیب یابی سازه‌ها، حتی در صورت وجود نویز، می‌باشد.

استفاده از روش های آنالیز موجک

بیشتر روش‌های ارزیابی خرابی بر اساس ارتعاش به مشخصات مودال از سیگنال موقت که به وسیله تبدیل فوریه به دست می‌آید نیازمند می‌باشند. البته جدیدا از آنالیز موجک و کرولت نیز در این زمینه استفاده شده است. بطور مثال لوریدیس و همکاران در سال ۲۰۰۵، تبدیل موجک دو بعدی را برای تعیین خرابی در صفحات خمشی استفاده کردند. مد ارتعاشی صفحه خمشی ترک خورده به حوزه موجک منتقل شده و سپس موقعیت و امتداد ترک را با دقت از پاسخ تبدیل شده بدست آوردند. همچنین عمق ترک را با استفاده از مقادیر حداکثر و محتوای انرژی ضرائب موجک تخمین زدند. همچنین خردمند و سلاجقه بعد از اعمال تبدیل موجک برای تعیین موقعیت خرابی در صفحات خمشی با سنسورگذاری در نقاط اطراف مکان تشخیص داده شده و حل ماتریس حساسیت ایجاد شده با الگوریتم انبوه ذرات شدت خرابی المان‌ها را نیز مشخص کردند.

تبدیل موجک بسته‌ای حالت توسعه یافته موجک معمولی است که تفکیک سطح به سطح کاملی را برای سیگنال ایجاد می‌کند؛ بنابراین یک تحلیل فرکانس-زمان دلخواهی ایجاد می‌کند.

در سال ۲۰۱۱ قدرتی و باقری با روش تبدیل Curvelet اقدام به شناسایی آسیب در سازه‌های پیوسته کردند.

استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی درون یاب

---

[۸] Levenberg - Marquardt

الگوریتم های هوش مصنوعی درون یاب شامل ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی و نزدیکترین همسایگی می‌باشد. این الگوریتم ها بعلت ۴ ویژگی مهم برای عیب یابی استفاده می‌شوند: ۱-توانایی نگاشت کلی ۲-مقاومت در برابر داده‌های نویزی ۳-توانایی یادگیری با آموزش نظارت شده ۴-قابلیت کار با داده‌های ناقص

این الگوریتم ها عمدتا بعنوان ابزاری برای انجام نگاشت بین الگوهای ورودی و الگوهای خروجی متناظر با شرایط عیب سازه‌ای بکار می‌رود. این روشها باعث افزایش قابل توجه سرعت پروسه عیب یابی می‌شود.

در سال ۱۹۹۹ محمد محمود از شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته[۹](GRNN) برای عیب یابی یک تیر کنسول استفاده کردند. شش فرکانس نخست تیر را بعنوان ورودی شبکه و محل و عمق ترک را بعنوان خروجی شبکه بکاربرد. در سال ۲۰۰۸ مهرجو و همکاران گره‌های یک پل خرپایی را با شبکه عصبی انتشار بازگشتی عیب یابی کردند. فرکانس به اضافه مود شکل خرپا را بعنوان ورودی شبکه و محل و درصد خرابی گره‌ها را بعنوان خروجی شبکه بکار برد. در عیب یابی پل خرپایی از ساختار زیر سازه استفاده شد. در سال ۲۰۱۲ رسولی و همکاران به مقایسه پاسخهای مختلف در عیب یابی گنبدها با استفاده شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی پرداختند و نتیجه گرفتند پاسخ مد شکل به همراه فرکانس، کمترین خطا را در شناسایی شدت خرابی در گنبدها دارد.

ماشین بردار پشتیبان[۱۰] (SVM) یکی از روشهای یادگیری ماشینی بر مبنای تئوریهای آماری است که در سال ۱۹۹۵ توسط واپنیک [۳۸] معرفی گردید. این الگوریتم در مقایسه با شبکه عصبی به تعداد داده های آموزشی کمتری برای یادگیری فرآیند نیازمند است بعلاوه توانایی بهتری در پیدا کردن جواب بهینه کلی سیستم دارد . فاروق و همکاران با استفاده از اطلاعات حاصل از کرنش سنج های نصب شده بر روی یک ورق کامپوزیتی، به مقایسه ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی در عیب یابی ورق ها پرداختند و نتیجه گرفتند که جوابهای SVM در این زمینه بهتر است. نوری و همکاران از SVM برای عیب یابی مدل یک قاب ۳ طبقه فولادی استفاده کرد و نتیجه گرفت این الگوریتم نسبت به نویز نیز مقاوم است.

جونگ و یان برای عیب یابی شاه تیرهای فلزی پل ها از یک روش دو مرحله ای استفاده کرده اند بدینصورت که ابتدا با انرژی کرنشی مودال اعضا مشکوک به خرابی تعیین می شود و در مرحله دوم با استفاده از شبکه عصبی انتشار برگشتی[۱۱] (BP) عضو خراب و شدت خرابی مشخص می شود. برای تست روش از مدل یک سازه ۱۲۰ المانی شامل ۱۰ شاه تیر ۱۲ المانی یک پل فلزی استفاده شده است. برای مدل کردن خرابی از کاهش سختی المان ها به میزان ۳۰ درصد استفاده شده است. سازه برای ۲۰ سناریوی خرابی شامل ۱۰ حالت تک خرابی و ۱۰ حالت دو خرابی به ازای ۳ حالت متفاوت از نویز مورد بررسی قرار می گیرد به این صورت که مثلا برای حالت خرابی المان ۱۴ و برای ٪ ۰/۱نویز درصد مود شکل های سازه به ۱۰۰ حالت اتفاقی به نویز ٪ ۰/۱ آلوده می شود سپس با استفاده از انرژی کرنشی مودال المان های محتمل خرابی در هر یک از این حالات نویز پیدا می شود.در مرحله دوم هم شدت خرابی با استفاده از شبکه عصبی مشخص می شود.

سعید و همکاران برای عیب یابی یک تیر انحنا دار سه بعدی ۵۹۱۰ المانی از شبکه عصبی BP و ANFIS[۱۲] استفاده شده است. عیب بصورت ترک در تیر در موقعیت ها و اندازه های مختلف مدل شده است. در تحلیل نصف تیر مورد بررسی قرار گرفته و به ازای ۱۴ موقعیت مختلف و ۲۰ اندازه متفاوت که در مجموع می شود۲۸۰ سناریوی خرابی سازه تحلیل شده است. برای ورودی شبکه عصبی و ANFIS از فرکانس، فرکانس بعلاوه تابع پاسخ فرکانسی و تابع پاسخ فرکانسی به تنهایی استفاده شده است.نتایج بیانگر دقت بالاتر شبکه عصبی در حالت بدون نویز و دقت بالاتر ANFIS با وجود نویز ۰/۱ و۰/۵ و ۱ درصد است برای کاهش تعداد داده های ورودی به شبکه از روش PCA[۱۳] استفاده شده است.

---

[۹] Generalized Regression Neural Network

[۱۰] Support Vector Machine

[۱۱] Back Propagation

[۱۲] Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

[۱۳] Principal Component Analysis

لیو و همکاران [۴۴] از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی[۱۴] ANN با تبدیل کرولت[۱۵] WPT به منظور عیب یابی سازه ۴ طبقه بنچ مارک عیب یابی دانشگاه British Colombia استفاده شده کردند. بدین منظور انرژی بسته موجکی به عنوان ورودی ANN در نظر گرفته شده است. برای ترکیب داه های حاصل از چندین سنسور از روش Data fusion استفاده شده است. لازرویک و همکاران از یک روش دو مرحله ای برای عیب یابی سازه های بزرگ مقیاس استفاده نمودند. بدین صورت که بعد از تشکیل ماتریس داده ها ی آموزشی به ازای سناریوهای مختلف خرابی, برای داده تست جدید داده های شبیه به آن را از ماتریس داده های آموزشی به دو روش نزدیکترین همسایگی[۱۶] NN و مبتنی بر چگالی[۱۷] DB پیدا میکند حال با این داده ها و داده تست تشکیل یک کلاستر میدهد. در مرحله بعد پاسخ های هر یک داده های کلاستر را پیدا میکند و بر حسب اینکه کدام المان بیشتر در پاسخ ها تکرار شده است عضو خراب را مشخص میکند. در مرحله بعد با مشخص شدن المان خراب درصد خرابی آن را با استفاده از شبکه عصبی پیدا میکند. برای تست روش از یک دکل انتقال برق ۳۱۲ المانی استفاده شده است.خرابی بصورت کاهش مدول الاسیسته به ۲۰ روش درهر المان مدل شده است از اینرو تعداد سناریوهای خرابی برابر با ۶۲۴۰ می شود. به ازای هر سناریوی خرابی ماتریس ورودی ۲۰۰ فرکانس اول سازه و خروجی المان معیوب و شدت خرابی می باشد. نتایج نشان دهنده دقت بیشتر این روش نسبت به کلاسترینگ سلسه مراتبی است. نگوین و لی در سال ۲۰۱۰ از نزدیکترین همسایگی برای عیب یابی موتور القاگر[۱۸] استفاده گردند. بدین منظور از خصوصیات آماری ارتعاش موتور بعنوان ورودی سیستم و از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه خصوصیات ورودی استفاده شد. بنا به نتایج این تحقیق نزدیکترین همسایگی دقت بالاتری از SVM استاندارد در عیب یابی موتور القاگر دارد.قیاسی و همکاران با استفاده از روش های پیشرفته هوش مصنوعی که در آن مسئله عیب یابی بصورت آموزش الگوریتم هوش مصنوعی بیان می شود به عیب‌یابی سازه‌ها پرداختند که در آن پاسخ های سازه ، ورودی الگوریتم وعیوب سازه ، خروجی الگوریتم می باشند. با آموزش الگوریتم های مورد استفاده شامل بردار پشتیبان حداقل مربعات، شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی و با نزدیکترین همسایگی با بزرگترین مرز می‌باشد. همچنین به مقایسه ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات با سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی درون یاب پرداخته شده و حالتی که ویژگی‌های داده‌های ورودی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز انتخاب شوند بررسی شده است و مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف کاهش داده شده در LS–SVM[۱۹] به منظور افزایش سرعت و دقت الگوریتم انجام شده وکرنل پیشنهادی نیز با سایر کرنلهای استاندارد وموجکی پیشتهاد شده برای LS-SVM مقایسه شده است.

[۱۴] Artificial Neural Network

[۱۵] Wavelet Packet Transform

[۱۶] Nearest Neighbour

[۱۷] Density Based

[۱۸] Induction Motor

[۱۹] Least Square Support Vector Machines

- Auto Regressive with Moving Average (ARMA)
- Box-Jenkins (BJ)
- Seasonal ARIMA
- Discrete Wavelet Transform (DWT)
- Wavelet Packet Transform (WPT)
- Robust Regression Analysis (RRA)
- Instance Based Method (IBM)
- Short-term Fourier Transform (SFT)
- Correlation Anomaly Scores Analysis

۱– ۵– عیب یابی سازه ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و بزرگی ابعاد داده‌ها

ابعاد و بزرگی داده ها در صورتیکه سنسورهای نصب شده بر روی سازه بطور دائمی روی آن قرار داشته باشد بسیار بیشتر میشود در حالیکه باید وضعیت سازه در هر لحظه پایش شود. به عبارت بهتر در اکثر این حالت ما با "کلان داده" طرف هستیم. کلان داده اصطلاحی است برای مجموعه داده های حجیم که بزرگ ، متنوع ، با ساختار پیچیده و با دشواریهایی برای ذخیره سازی ، تحلیل و تصویرسازی (نمایش) ، پردازشهای بیشتر و یا تصمیم گیری بر مبنای آنها میباشد یکی از تعاریف کلان داده در زمینه عیب یابی سازه ها عبارت است از: یک ماتریس داده بسیار بزرگ که از نمونه های حاصل از تعداد فراوانی سنسور تشکیل شده است و حاصل یک سیستم پایش سلامت سازه (Structural Health Monitoring (SHM)) بزرگ مقیاس میباشد . به منظور بیان مثالی از بزرگی داده‌ها میتوان به تحقیقات کتبس و ملک زاده [۵۰و۵۱] اشاره کرد که در آن به بررسی پل متحرک Sunrise در فلوریدا که دارای ۲۰۰ سنسور میباشد پرداخته شده است. روزانه این پل ده مرتبه برای عبور کشتی ها باز می‌شود و در هر مرتبه سنسورهای شتاب سنج داده های حاصل از این فرآیند را اندازه گیری می‌کنند. در هر یک از این دفعات ۱۶۰۰۰ داده جمع آوری میشود. فلذا تعداد داده‌های در سال برای یک سنسور می‌شود: $16\times10^3\times10\times365=5.76\times10^7$

این شدنی نیست و در خیلی از مواقع لازم نیست که تمام این کلان داده ها را بصورت همزمان مورد پردازش قرار داد، در اینحالت کارهای ساده ای همچون بارگذاری (upload) تمام داده های اندازه گیری شده نیز به زمان محاسباتی قابل توجه ای نیاز دارد. هزینه محاسباتی پروسه عیب یابی را به روشهای مختلفی میتوان کاهش داد؛ از جمله:

۱-با ارائه روش های استخراج ویژگی ها از داده های اصلی: در این روش ها، ماتریس اصلی به ماتریسی با ابعاد بسیار کمتر از ماتریس اولیه کاهش پیدا میکند. ماتریس ثانویه شامل خصوصیات یا ویژگی های ماتریس اولیه بوده که برای کاهش ابعاد آن از روشهایی مانند PCA (Principal Component Analysis)، POD (Proper Orthogonal Decomposition) و ... استفاده میشود

.۲-بوسیله روشهای فشرده سازی اطلاعات رو کار و انتقال ویژگی های فشرده شده: در این روش ها، برای کاهش ابعاد داده هایی که باید به کامپیوتر مرکزی منتقل گردد، داده های خام حاصل از هر سنسور با هم ترکیب شده (Data Fusion) و سپس داده ها منتقل میگردند.

۳-بوسیله روشهای انتخاب زیر مجموعه (subset selection algorithm) : در این روشها فقط بخشی از داده های جمع آوری شده مورد پردازش و یا انتقال قرار میگیرند.

راهکار سوم در مواجه به "کلان داده ها" از عملکرد بهتری برخوردار میباشد، چون در دو راهکار دیگر نیاز به دسترسی به کل ماتریس دادها و بررسی و استخراج ویژگی‌ها از آن می‌باشد در حالیکه در روش سوم فقط بخش کوچکی از ماتریس بصورت پنجره ای (Sliding Window) مورد بررسی و تحلیل قرار میگیرد و اطلاعات اساسی هر زیر بخش بعد از استخراج وارد مرحله بعد میشود. بعلاوه میتوان از این رویکرد در مواجهه با داده های آنی (online health monitoring) نیز استفاده کرد . با اینحال این روش در تعدادی از مسائل مخصوصا به هنگام وجود نویز زیاد در داده های ورودی کیفیت خود را از دست میدهد . برای رفع این نقیصه

در این پژوهش از ترکیب و بهبود روشهای مختلفی به منظور کاهش حجم محاسبات مربوطه استفاده میشود. به همین منظور اصلاحاتی روی الگوریتم انتخاب زیر مجموعه ها صورت خواهد پذیرفت تا با استفاده از ترکیب آن با الگوریتم های فراکاوشی (meta-heuristic algorithms) قابلیت تطبیق پذیری ان در مواجه با عدم قطعیت های ناشی از نویز در داده های ورودی افزایش یابد. هدف، ارائه راهکاری مبنی بر انتخاب مهمترین ویژگی های هر یک از زیر مجموعه ها با استفاده از تابع هدفی مبتنی بر حداکثر کردن دقت الگوریتم در شناسایی خرابی در المانها میباشد. این تابع هدف با الگوریتم بهینه سازی فراکاوشی بهینه خواهد شد، بعلاوه خود الگوریتم فراکاوشی مبنا نیز برای استفاده در این پروسه بهینه و اصلاح خواهد گردید.در کنار این موارد، در مدلسازی یک سازه، طراح با عدم قطعیت های متفاوتی نظیر مقدار و نوع بارهای وارده، خصوصیات مصالح سازنده، ابعاد سازه ای و غیره، مواجه می باشد. پارامترهای عدم قطعیت ناشی از تغییر شرایط محیطی، خطاهای انسانی، نقصان در ساخت و موارد مشابه آن نیز به صورت پیش بینی نشده ای عملکرد یک سازه را تحت تاثیر قرار می دهند . در روش های معمول مدلسازی سازه ها معمولا پارامترهای بار و مقاومت سازه به صورت مقادیر قطعی (Deterministic) در نظر گرفته شده و عدم قطعیت های موجود به صورت ضرایب بار و مقاومت یا ضرایب اطمینان، در مدل طراحی در نظر گرفته می شوند. یکی از قوی ترین روش های ارزیابی احتمال عملکرد سازه ها، روش ارزیابی قابلیت اطمینان سازه ای می باشد. در این روش، عدم قطعیت های احتمالاتی به صورت متغیرهای تصادفی در مدل طراحی در نظر گرفته شده که منجر به برآوردی از سطح ایمنی و محتمل ترین حالت شکست سازه خواهد شد. بدین منظور از روشهای مختلفی همچون مونت-کارلو [Monte Carlo Simulation, (MCS)]و یا روشهای نوینی همچون شبیه سازی وزنی [Weighed Simulation Method, (WSM)] و روشهای خود انطباق هوشمند استفاده میشود

در زمینه تحقیقاتی پایش سلامت سازه ها هم این عدم قطعیت ها وجود دارد و ارائه یک روند کلی برای این بحث مستلزم در نظر گرفتن این عدم قطعیت ها میباشد. درحالت کلی دو منبع عدم قطعیت در اندازه گیری پارامترهای مودال سازه وجود دارد. منبع اول عدم قطعیت ناشی از خصوصیات ذاتی مصالح سازنده، ابعاد هندسی سازه، بار وارده و ... میباشد، که قابل کاهش و یا حذف نبوده و باید بصورت یک تابع احتمالاتی در پروسه مدلسازی وارد گردند. منبع دوم عدم قطعیت در پارامترهای مودال ناشی از نویزهای اندازه گیری و روشهای شناسایی اطلاعات مودال سازه می باشد. در این روشها خصوصیاتی مانند فرکانسها و مد شکلهای سازه از روی پاسخ های لحظه ای سازه (تاریخچه جابه‌جایی، سرعت و شتاب) اندازه گیری میشود. این منبع عدم قطعیت را میتوان با استفاده از تجهیزات اندازه گیری دقیقتر (سنسورهای شتاب سنج، کرنش سنج و ...) و روشهای شناسایی اطلاعات مودال مناسبتر کاهش داد؛ با اینحال نمی توان آنرا بصورت کلی حذف نمود . از اینرو از روشهای احتمالاتی به منظور وارد کردن عدم قطعیت های سازه ای و نویزهای اندازه گیری در فرآیند عیب یابی استفاده میشود. در این روشها عدم قطعیت ها بصورت یک متغیر تصادفی با میانگین و انحراف معیار استاندارد در نظر گرفته میشود. به منظور مدلسازی عدم قطعیت ها در سازه ها از روشهای محاسباتی همچون مونت کارلو استفاده میشود. در این نوع روشها بعضا نیاز به تحلیل یک سازه برای تعداد دفعات زیاد خواهد بود که در صورت بزرگ بودن تعداد درجات آزادی سازه زمان انجام تحلیل به شدت افزایش خواهد یافت. در نتیجه در بخش دوم این رساله، به منظور کاهش زمان آنالیزهای مربوط به تعیین احتمال خرابی المانهای سازه رویکردی مبتنی بر جایگزینی تحلیل دقیق سازه با مدل جایگزین (Surrogate Model) بهینه شده مبتنی بر الگوریتم های هوش مصنوعی ارائه خواهد شد. در صورتی که این "مدلهای جانشین" با دقت خوبی انتخاب شوند میتوانند موجب کاهش قابل توجه در زمان محاسبات گردند .بعلاوه به منظور افزایش سرعت و دقت الگوریتم هوش مصنوعی مورد استفاده تغییراتی در کرنل داخلی آن صورت خواهد پذیرفت تا توانایی ان الگوریتم در نگاشت داده های ورودی به خروجی و قابلیت تعمیم پذیری آن در صورت بزرگ بودن ابعاد داده ها حفظ گردد.

همانطور که بیان شد برای عیب یابی سازه ها معمولا از پارامترهای مودال سازه استفاده میشود، بدین جهت که اولا این پارامترها تابع سختی و جرم سازه بوده و در صورت تغییر آنها تغییر میابند و ثانیا میتوان آنها را با دقت و سرعت خوبی محاسبه کرد. در بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه پایش سلامت سازه ها بر اساس روشهای بروز رسانی مبتنی بر پارامترهای مودال، فرض اولیه این است که این پارامترها دقیق، معین و قطعی میباشند. در حالیکه در واقعیت همیشه عدم قطعیت هایی وجود دارد که ممکن

است موجب شناسایی غیر قابل اعتماد و اشتباه اعضای معیوب سازه گردند. لذا الزامیست عدم قطعیت ها را نیز در پروسه عیب یابی سازه ها در نظر گرفت. از اینرو از روشهای احتمالاتی به منظور وارد کردن عدم قطعیت های سازه ای و نویزهای اندازه گیری در فرآیند عیب یابی استفاده میشود. در این روشها عدم قطعیت ها بصورت یک متغیر تصادفی با میانگین و انحراف معیار استاندارد در نظر گرفته میشود. در نظر گرفتن این خصوصیات یکی از رویکردهای نو در زمینه پایش سلامت و عیب یابی سازه‌ها میباشد که در زیر به تحقیقات شاخص صورت پذیرفته شده اشاره میشود. وانگ و همکاران در پژوهشی به مقایسه شناسایی خرابی در یک قاب سه طبقه فلزی ۴۵ المانی بر اساس شاخص های مودال (تغییرات فرکانس و مد شکل) و شاخص نرمی (مشتق مد شکل) پرداختند. در این مقایسه به تاثیر عدم قطعیت ناشی از نویز بر دقت هر یک از این دو شاخص پرداخته شد و نتایج نشانگر دقت بالاتر شاخص های مودال میباشد . ورمزیار و هاریتوس در سال ۲۰۱۵ یک روش یک مرحله ای بر اساس چگالی طیفی پاسخ نیرو (Power Spectral Density(PSD)) ارائه کردند. در این روش به منظور مدلسازی عدم قطعیت ناشی از نویز از یک ساختار احتمالاتی بیزین (Bayesian probabilistic framework) استفاده شد. نتایج بیانگر دقت قابل قبول روش پیشنهادی در عیب یک تیر دو سر ساده ۱۰ المانی میباشد یالان و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای شناسایی خرابی در یک خرپای صفحه ای ۲۵ المانی روش عامل تصادفی (Random factor method) را توسعه داده و از آن برای بروز رسانی تصادفی مدل (stochastic model updating) استفاده کردند. برای بررسی تاثیر عدم قطعیتها، عدم قطعیت ها سازه ای و عدم قطعیت های ناشی ار اندازه گیری بصورت جدا و ترکیبی با هم نیز بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که روش عامل تصادفی توسعه داده شده دارای دقت همانند روش مونت کارلو بوده، با اینحال بار محاسباتی بسیار کمتری دارد در بیشتر تحقیقات صورت گرفته، مدل سازه در نظر گرفته شده بزرگ مقیاس نبوده و مشکلات ناشی از کلان داده ها وجود ندارد. هدف اصلی این پژوهش ارائه راهکاری نو در زمینه عیب یابی سازه در صورت وجود تعداد داده های زیاد میباشد. محققین از روش‌های مختلفی همچون PCA و ICA (Independent Component Analysis) برای کاهش ابعاد داده‌ها استفاده کرده‌اند هرچند در این روش ها تضمینی بر اینکه اطلاعات حذف شده برای عیب یابی مفید نبوده‌اند، وجود ندارد .حجم بسیاری از تحقیقات، به روش های مبتنی بر ارتعاشات جهت شناسایی آسیب در سازه ها اختصاص داده شده است. تغییرات در مشخصات فیزیکی یک سازه منجر به تغییرات قابل اندازه گیری در مشخصات مودی می شود. در این فصل روش های گوناگون مبتنی بر تغییر در مشخصات دینامیکی اندازه گیری شده جهت شناسایی آسیب و بررسی وضعیت سازه ها طبقه بندی می شوند و خلاصه ای از آنها بیان می گردد.

در مبحث پایش سلامت سازه، قسمتی که بیشترین توجه را به خود جلب کرده و بیشترین تحقیقات را متوجه خود ساخته است، استخراج ویژگی‌ها است. استخراج ویژگی عبارت است از عملیات شناسایی خصوصیات حساس به آسیب در سازه و استخراج آن‌ها از داده‌های پاسخ دینامیکی اندازه‌گیری شده که این امکان را به کاربر می‌دهد تا سازه را آسیب دیده و یا سالم معرفی کند. عموماً روش‌های استخراج ویژگی شامل مراحل مقایسه‌ی داده و یا ترکیب داده می‌شوند. اگر قرار باشد تخمین دقیقی از توزیع آماری ویژگی مورد نظر به دست آید، مقایسه‌ی داده‌ها در بردارهای ویژگی با دیمانسیون کوچک صورت می‌گیرد. همچنین اگر قرار است تعداد زیادی داده در طول عمر سازه مورد بررسی قرار گیرند، فشرده‌سازی و خلاصه‌سازی داده‌ها در دستور کار قرار می‌گیرد.

استخراج ویژگی‌ها به روش‌های متعددی صورت می‌گیرد. انتخاب هر یک از این روش‌ها، بستگی به نوع سازه‌ی موجود و تجهیزات در دسترس دارد. هر کدام از روش‌ها با توجه به کارایی‌ها و شرایط خاص خود، در علوم مهندسی مختلف محبوبیت پیدا کرده است. بدیهی است که هر یک از روش‌ها مزایا و معایب مختص خود را دارد. این محدودیت‌ها گاهاً در بطن تئوری روش مشخص است و گاهاً هنگام برداشت خروجی‌ها از روش، کاربر متوجه این محدودیت‌ها می‌گردد. بنابراین توصیه می‌گردد علاوه بر توجه به تئوری و ریاضیات روش، خروجی‌های به دست آمده توسط مبناها و منابع و روش‌های دیگر کنترل گردد و صرفاً به خروجی به دست آمده از یک روش اتکا نگردد. در اندازه‌گیری‌های دینامیکی مربوط به سازه‌ها، سه نوع داده‌ی دینامیکی در دسترس است که هر روش بنا به شرایط خود، از حداقل یکی از این داده‌ها استفاده می‌کند. این سه نوع داده عبارتند از:

- داده‌های سری زمانی

- داده‌های دامنه‌ی فرکانسی
- داده‌های مدل مودی

همچنین داده‌ها از نوع ساختاری به سه دسته‌ی خطی، غیرخطی و گذرا تقسیم می‌شوند که هرکدام نیازمند تحلیل‌های ویژه‌ی خود هستند.به طور کلی می توان روش های تشخیص خرابی را به دو دسته تقسیم نمود

- روش هایی که با استفاده از پاسخ ها ی سازه سالم و آسیب دیده طی فرایند مستقیم به شناسایی آسیب می پردازند.
- روش هایی که با به روز رسانی مدل اجزاء محدود در یک فرایند تکراری به شناسایی آسیب می پردازند.

روش‌های مستقیم با استفاده از تغییرات پاسخ‌ها

انرژی کرنشی

هنگامی که عضو یا اعضائی از سازه دچار آسیب گردد، مود شکل های آن ها نیز دچار تغییر می شوند. بدین ترتیب انرژی کرنشی عضو تغییر کرده و باعث تغییر در انرژی‌کرنشی سازه می‌شود. در این صورت انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه آسیب‌دیده و سازه سالم در فرم اجزاء محدود بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$U_{j,h} = \frac{1}{2}\phi_{j,h}^{T} K_h \phi_{j,h}$$
$$U_{j,d} = \frac{1}{2}\phi_{j,d}^{T} K_h \phi_{j,d}$$

که در آنها، $U_{j,h}$ و $U_{j,d}$ به ترتیب انرژی کرنشی سازه سالم و آسیب‌دیده در مود **j**ام، $\emptyset_{j,h}$ و $\emptyset_{j,d}$ به ترتیب اشکال مودی سازه سالم و آسیب دیده در مود **j**ام و K_h ماتریس سختی سازه سالم می باشند. با توجه به اینکه ماتریس سختی سازه آسیب دیده موجود نمی باشد جهت به دست آوردن انرژی کرنشی سازه آسیب دیده ماتریس سختی سازه سالم جایگزین می شود.

جهت شناسایی آسیب در اعضای سازه مقدار انرژی کرنشی عضو سازه سالم و آسیب دیده مقایسه می شود.

روابط مختلفی بر اساس تغییرات انرژی کرنشی سازه سالم و آسیب دیده در مقالات بیان شده است. که در این تحقیق روابط آورده شده است.

انرژی کرنشی مودال(mse_i^e) هر عضو در مود **i**ام طبق رابطه ی ذیل قابل محاسبه می باشد.

$$mse_i^e = \frac{1}{2}\varphi_i^{eT} K^e \varphi_i^e \quad , \quad i = 1,\ldots,ndf \ , \ e = 1,\ldots,nte$$

در رابطه فوق، ndf تعداد مودهای موجود سازه و nte تعداد اعضای سازه می باشد.

انرژی کرنشی هر عضو در مد **i**ام طبق رابطه ی ذیل نرمال می گردد:

$$nmse_i^e = \frac{mse_i^e}{mse_i} \quad , \quad mse_i = \sum_{e=1}^{nte} mse_i^e$$

انرژی کرنشی هر عضو به صورت میانگین انرژی کرنشی عضو در مدهای موجود محاسبه می شود:

$$mnmse_i^e = \frac{\sum_{i=1}^{ndf} nmse_i^e}{ndf}$$

در نهایت شاخص خرابی مبتنی بر انرژی کرنشی جهت شناسایی عضو خراب بدین صورت تعریف می گردد:

$$MSEBI^e = \max[0, \frac{(mnmse^e)^d - (mnmse^e)^h}{(mnmse^e)^h}]$$

باقیمانده نیروی مودال

با استفاده از فرکانس طبیعی و مود شکلها در تمام درجات آزادی سازه و مسئله مقدار ویژه، می توان باقیمانده مودی را بدین شکل مطرح نمود.

$$(K^d - \lambda_m^d M)\varphi_m^d = 0 \qquad (۲-۷)$$

$$(K^h - \lambda_m^d M)\varphi_m^d = d \qquad (۲-۸)$$

رابطه(۲-۷) و (۲-۸) به ترتیب مسئله مقدار ویژه و باقیمانده نیروی مودی می باشد. در روابط فوق، d نیروی باقیمانده مودی، K^h و K^d به ترتیب ماتریس سختی سازه ی سالم و آسیب دیده ، λ_m^d و φ_m^d به ترتیب فرکانس و مود شکل های سازه ی خراب در مود mام می باشند.M ماتریس جرم سازه می باشد.

با بررسی معادله (۲-۸) مشخص است که i امین عضو از بردار d وقتی صفر است که i امین ردیف از ماتریس سختی سازه سالم با i امین ردیف از ماتریس سختی سازه آسیب دیده یکسان باشد. بنابراین اعضایی که مربوط به درجات آزادی هستند که درایه بردار باقیمانده متناظر با آنها صفر می باشد اعضای خراب تلقی می شوند

استفاده از انعطاف‌پذیری شکل مودی

گروه دیگری از روش های شناسایی آسیب، از ماتریس انعطاف پذیری دینامیکی اندازه گیری شده برای تخمین تغییرات در رفتار استاتیکی سازه استفاده می کنند. ماتریس انعطاف پذیری به صورت معکوس ماتریس سختی استاتیکی تعریف می شود. بنابراین، هر ستون از ماتریس انعطاف پذیری بیانگر الگوی تغییر مکان سازه وابسته به نیروی واحد اعمال شده در در جه آزادی مربوطه می باشد. با توجه به این که فقط چند مود اول سازه اندازه گیری می شود، لذا فرمالاسیون ماتریس انعطاف پذیری، تقریبی خواهد بود. ایجاد ماتریس انعطاف پذیری استاتیکی به صورت کامل نیازمند اندازه گیری کلیه اشکال مودی و فرکانس ها می باشد. آسیب با مقایسه انعطاف پذیری ایجاد شده با استفاده از مدهای سازه آسیب دیده و ماتریس انعطاف پذیری ایجاد شده با استفاده از سازه سالم تشخیص داده می شود.

اکثر روشهایی که در دسته اول قرار دارند قادر به شناسایی محل آسیب می باشند و قادر به تشخیص شدت عیب نیستند.

روش‌های به روز رسانی مدل

با توجه به اینکه تغییر در مشخصات فیزیکی سازه موجب تغییر در پاسخ‌های آنها می‌گردد، ایده کلی روش‌های به روز رسانی جهت عیب‌یابی بر این اساس استوار است. در واقع طی روندی معکوس می توان با استفاده از پاسخ ها به جزئیات تغییرات فیزیکی مدل که به عنوان خرابی شناخته می شود پی برد. بنابراین پاسخ‌های ثبت‌شده از سازه آسیب‌دیده تابعی از خرابی ایجاد شده در سازه می‌باشند. یعنی هر خرابی ایجادشده یک پاسخ منحصر بفرد ایجاد می‌کند که با داشتن پاسخ می‌توان آسیبی را که منجر به پاسخ منحصر به فرد شده است جستجو کرد. بنابراین عیب یابی یک پدیده ی غیر خطی می باشد. برای اثبات این گفته می توان آزمایشی را انجام داد، به صورتیکه اگر یکی از المان های سازه مورد بررسی را مقداری خراب کرده و پاسخ سازه را اندازه‌گیری کرده و ثبت نماییم، با توجه به اطلاعات به دست آمده در صورت خطی بودن پدیده خرابی باید پاسخ سازه را برای خرابی بین مقدار خرابی قبلی بتوان به دست آورد، در صورتیکه بعد از آزمایش متوجه می شویم نتایج به دست آمده از آزمایش با مقدار پاسخی که از تحلیل اطلاعات قبلی به دست آمده یکسان نیست. در نتیجه پدیده خرابی غیر خطی می باشد. اگرچه عیب‌یابی یک پدیده غیر خطی می‌باشد، به هرحال خرابی را می‌توان با تغییر در برخی از پارامترهای سازه مانند مدول یانگ، سطح مقطع اعضاء و غیره شبیه‌سازی کرد. معادله خرابی را می توان به صورت تابع باقیمانده بیان نمود:

$$r = R(X) - R_d$$
$$X = \{x_1, x_1, ..., x_n\} \ , \ 0 \le x_i \le 1$$

خرابی همه اعضا در برداری بنام بردار خرابی قرار گرفته‌اند. بردار خرابی در اینجا با X نمایش داده شده است. در مسئله عیب‌یابی هدف پیدا کردن بردار خرابی با استفاده از بردار پاسخ سازه آسیب دیده می‌باشد. بردار شامل پاسخ‌های سازه در اینجا با R و بردار پاسخ سازه آسیب دیده با R_d نشان داده شده است. همانطور که گفته شد بردار پاسخ سازه آسیب دیده تابعی از بردار خرابی می‌باشد و همچنین در رابطه فوق n تعداد اعضاء می باشد. دستگاه معادلات رابطه (۹-۳) دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- عموماً معادلات به صورت صریح وجود ندارند.
۲- معادلات غیرخطی می‌باشند.
۳- معمولاً جواب دستگاه معادلات پرصفر است. (تنها چند عضو دارای خرابی می‌باشند و خرابی در آنها محدود می‌باشد.)
۴- مجهولات و معلومات عموماً برابر نیستند.

با توجه به اینکه خرابی یک پدیده غیر خطی می باشد و حل دستگاه معادلات فوق به طور مستقیم محدود و گاهی غیر ممکن می باشد. امروزه بیشتر تحقیقات بر اساس مینمم سازی اختلاف پاسخ سازه خراب واقعی و خراب فرضی که از به روزرسانی پارامترهای فیزیکی مدل در هر مرحله از تکرار به دست می آید، می باشند. برخی از تحقیقات با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی جستجوگر فراکاوشی طی یک فرایند تکراری به حل مسئله پرداخته اند. برخی دیگر از تحقیقات مبتنی یر آنالیز حساسیت می باشند که با به کار گیری الگوریتم های مختلف طی فرایندی تکراری تابع هدف ارائه شده که بر اساس اختلاف پاسخ یا پاسخ های مورد نظر سازه خراب واقعی وخراب فرضی می باشد را حداقل می کنند.

روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه سازی فراکاوشی

با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی فراکاوشی با همگرا شدن تابع هدفی مناسب، مدل اجزاء محدود طی فرایندی تکراری به روز رسانی می شود. در حل مسئله ی خرابی با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی پارامتر های فیزیکی اعضاء سازه آسیب دیده، مجهولات مسئله را تشکیل می دهند. مجهولات مسئله در طی حداقل سازی تابع هدف موثر پیشنهادی در هر مرحله به روز می شوند. در نهایت با همگرایی تابع هدف مجهولات مسئله و در پی آن مدل سازه به روز می گردد. الگوریتم های بهینه سازی فراکاوشی که جهت حل مسئله خرابی به کار می روند از جمله الگوریتم اجتماع ذرات، رقابت استعماری وراثتی، فاخته، جامعه مورچگان و. . . می باشند. این الگوریتم ها در مسایل مختلف با توجه به تابع هدف معرفی شده از نظرکیفیت عملکرد متفاوت خواهند بود .

در سازه های بزرگ با توجه به اعضاء یا المان های زیاد، تعداد مجهولات بالایی را خواهند داشت از این رو لازم است مسئله ی خرابی در دو مرحله حل شود. بدین ترتیب که در مرحله ی اول با استفاده از روش های مقایسه ای المان های مشکوک به خرابی مشخص شوند و در مرحله ی دوم با توجه به کاهش متغیرها با همگرا شدن تابع هدف پیشنهادی، شدت دقیق آسیب اعضای مشکوک به خرابی مشخص شوند.

روش‌های مبتنی بر آنالیز حساسیت

در سالهای اخیر به روز رسانی مدل اجزاء محدود بر اساس حساسیت جهت تشخیص خرابی به طور موفقیت آمیزی عمل کرده است. با استفاده از این روش خصوصیات فیزیکی مدل به روز می شوند در واقع پاسخ های سازه آسیب دیده به عنوان مرجع انتخاب می گردد و در هر تکرار خصوصیت فیزیکی (پارامتر به روزرسانی) به روز می گردد ودر پی آن پاسخ اولیه سازه به روز می شود. در واقع در اولین مرحله پاسخ سازه اولیه، پاسخ سازه آسیب دیده می باشد و در آخرین مرحله پاسخ سازه اولیه، پاسخ سازه معیوب (مستخرجه از نتایج ثبت شده‌ی سنسورها) می باشد.

مبانی روش های مبتنی بر آنالیز حساسیت

حداقل مربعات

در عیب یابی سازه به وسیله ی به روزرسانی مدل اجزاء محدود، شاخص خرابی اعضاء سازه به عنوان پارامترهای بهینه سازی فرمول بندی می شوند به طوری که مدل اجزاء محدود به روز شده بتواند پاسخ سازه خراب را به خوبی بازسازی نماید. در نهایت، با اندازه گیری خطای بین پاسخ سازه سالم و به روزشده، تابع هدف در مساله به روزرسانی به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(X)=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m} r_j^2(X) \Rightarrow f(X)=\left\|r(x)\right\|^2 \qquad (۲-۱۱)$$

در رابطه بالا X بردار شاخص خرابی می باشد و r خطای خروجی تابع خرابی می باشد. با توجه به این که پاسخ های سازه توابع غیر خطی بر حسب شاخص خرابی می باشند، خطای خروجی بر مبنای بهینه سازی که توسط معادله (۲-۱۱) تعریف می شود. در اصل یک مسئله غیر خطی کمترین مربعات می باشد.

آنالیز حساسیت

هدف درمسئله عیب‌یابی، پیدا کردن بردار خرابی با استفاده از بردار پاسخ سازه آسیب دیده می‌باشد در رابطه ذیل. بردار پاسخ‌های سازه با R و بردار پاسخ سازه آسیب دیده با R_d نشان داده شده است. در این جهت رابطه (۲-۹) با استفاده از بسط تیلور به صورت زیر قابل بیان می باشد:

$$r_n = r_0 + \frac{\partial r_0}{\partial X}\Delta X + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 r_0}{\partial X^2}\Delta X^2 + \dots$$

در صورتیکه که از جملات مراتب بالاتر بسط تیلور صرفه نظر شود و مقدار تابع r (باقیمانده) در نقطه انتهایی برابر صفر قرار داده شود رابطه ذیل بدست می آید:

$$0 = R(X_0) - R_d + \frac{\partial r_0}{\partial X}\Delta X + \dots \Rightarrow \mathrm{R_d} - R_h \cong S\Delta X$$

در رابطه فوق، $\mathrm{X_0}$ خرابی سازه سالم و $R(X_0)$ پاسخ سازه سالم می‌باشد. S ماتریس حساسیت نام داشته و نشان‌دهنده حساسیت تغییرات پاسخ به تغییرات خرابی می‌باشد. ماتریس حساسیت به روش زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\mathrm{S} = \frac{\Delta \mathrm{R}}{\Delta \mathrm{X}} = \left[\ \mathrm{S_1}\quad \mathrm{S_2}\quad \mathrm{S_3}\quad \dots\dots\dots\quad \mathrm{S_n}\ \right]$$

$$S_i = \frac{R_{di} - R_h}{\Delta X},\quad R_{di} = R(X_{di})$$

$$X_{di} = \{0,\dots,\Delta X,\dots,0\}$$

مطابق با روابط فوق ماتریس حساسیت با استفاده از تکنیک تفاضلات پیشرو بدست آمده است[۴۶]. در این روابط R_{di} پاسخ ناشی از خرابی مصنوعی عضو i در اثر مقدار خرابی ناچیز (۰/۰۰۱)، R_h بردار پاسخ سازه سالم و m تعداد عضوها می‌باشد.

روش تکرار نیوتن-رافسون[۲۰]

الگوریتم نیوتن-رافسون با بروز رسانی ماتریس حساسیت و تشکیل دستگاه معادلات خطی به طور متوالی با حداقل سازی تابع هدف مدل اجزاء محدود سازه به روز رسانی می شود.

در گام اول، رابطه (۲-۱۳) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R_d - R_h = S_0(X_1 - X_0) \Rightarrow \Delta R_0 = S_0 X_1$$

X_0 در رابطه فوق خرابی سازه سالم است، بنابراین مقدار آن صفر می‌باشد. ΔR_0 اختلاف پاسخ‌های سازه سالم و سازه آسیب دیده می‌باشد. ماتریس ضرایب S ماتریس حساسیت می‌باشد.

بردار خرابی در رابطه (۳-۱۷) با استفاده از حل معکوس بدست می‌آید:

$$X_1 = S_0{}^{+}\Delta R_0$$

$S_0{}^{+}$ شبه‌معکوس[۲۱] ماتریس حساسیت در اولین گام می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد ستون های ماتریس حساسیت برابر با تعداد اعضای سازه می باشد و تعداد سطر های آن برابر با تعداد پاسخ ها می باشد. ماتریس حساسیت یک ماتریس مستطیلی است. از این رو جهت معکوس گیری از روش های شبه معکوس بایستی استفاده شود. با حل این دستگاه معادلات خطی ساده، در گام اول بردار X_1 بدست می‌آید. حال در گام دوم با اعمال X_1 از مرحله ی قبل مقدار R_1 بدست می آید، R_1 و X_1 به ترتیب جایگزین R_h و X_1 در رابطه(۲-۱۷) شده و مراحل قبل تکرار می‌شود تا X_2 بدست آید. ضمناً در محاسبه ماتریس حساسیت نیز بایستی خرابی جدید جایگزین خرابی سازه سالم شود. با توجه به روابط (۲-۱۴) (۲-۱۵) وتوضیحات داده‌شده، ماتریس حساسیت در هر گام از رابطه ذیل بدست می‌آید.

$$S_k = \frac{\Delta R_k}{\Delta X} = [s_1 \quad \dots \quad s_i \quad \dots \quad s_m] \quad , \quad s_i = \frac{R_{(k+1)i} - R_k}{\varepsilon}, i = 1,\dots,m$$

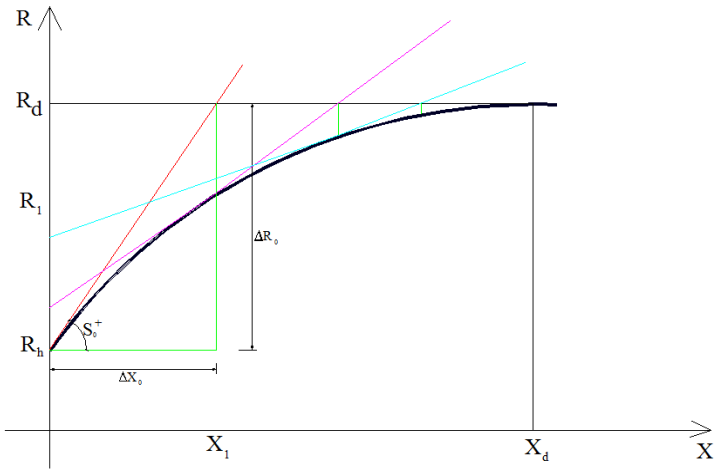
که در آن $R_{(k+1)i}$ پاسخ ناشی از خرابی مصنوعی عضو i در اثر خرابی ناچیز می‌باشد. برای بدست آوردن ماتریس حساسیت، باید هر عضو را به اندازه ناچیز خراب در نظرگرفته و پاسخ ناشی از آن را بدست آورد، سپس از رابطه (۲-۱۹) ماتریس حساسیت در گام مورد نظر بدست می‌آید.

این مراحل تا بدست آمدن دقت مورد نظر ادامه می‌یابند. در انتها باید طبق رابطه (۲-۹) به مقدار خرابی واقعی (همان بردار X سازه خراب) برسیم یعنی درایه‌هایی از X که شامل عضوهای خراب هستند به مقدار خرابی و بقیه درایه‌های X صفر باشند. در شکل۳-۱ چگونگی روش نیوتن-رافسون برای حالت تک متغیره نشان داده شده است.

---

[۲۰] Newton-Raphson Method

[۲۱] Pseudo Inverse



شکل۳-۱. نمایش شماتیک روش نیوتن-رافسون

در حالت کلی معادله تشخیص خرابی در گام k اُم به صورت زیر بیان می‌شود [۶۹].

$$S_k \times \Delta X_{k+1} = \Delta R_k \quad , \quad k = 0,1,2,... \qquad (۲-۲۰)$$

$$\Delta X_{k+1} = S_k{}^{+} \Delta R_k \qquad (۲-۲۱)$$

$$X = \Delta X_1 + \Delta X_2 + ... + \Delta X_{k+1} \qquad (۲-۲۲)$$

تکرارها تا زمانی ادامه پیدا می‌کنند که اندازه پارامتر بروزآوری بدست آمده بسیار ناچیز شود و یا هر ضابطه همگرایی پیشنهادشده ارضا شود.

روش پایدارسازی تیخونوف[۲۲]

مشکل اولیه مسائل بدوضع بودن مسئله، به دلیل مقادیر منفرد کوچک ماتریس ضرائب است. لذا لازم است که به منظور پایدارسازی مسئله، اطلاعاتی در خصوص جواب به مسئله اضافه گردد. روش تیخونوف معمول‌ترین روش در پایدارسازی مسائل بدحالت خصوصاً حل مسائل معکوس محسوب می‌گردد. ایده روش یاد شده توسط تیخونوف ارائه گردید جواب مطلوب در این روش مانند سایر روش های به روز رسانی ، جوابی با کمترین مقدار باقیمانده‌ها می‌باشد. اما حصول به چنین جوابی صرفاً با شرط کمترین مربعات در دستگاه‌های معادلات بدوضع و ناپایدار امکان‌پذیر نبوده، از این رو در روش تیخونوف همزمان با حداقل‌سازی اندازه بردار باقیمانده‌ها، از بی‌کرانی جواب جلوگیری می‌گردد. لذا روش تیخونوف را در حالت جامع، می‌توان در قالب حداقل‌سازی تابع تیخونوف به صورت ذیل تعریف نمود.

$$F_{Tikhonov}(\Delta X_{k+1};\lambda) = \left\| S_k \times \Delta X_{k+1} - \Delta a_k \right\|_2^2 + \lambda^2 \times \Omega(\Delta X_{k+1})$$

تابع Ω در رابطه (۳-۲۳)، با توجه به فرضیات و یا اطلاعات اولیه‌ی مجهولات مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که به روش تیخونوف با تعریف تابع (۲-۲۳) روش تیخونوف تعمیم‌یافته[۲۳] نیز اطلاق می‌گردد. در رابطه بالا λ پارامتر پایدارسازی می‌باشد و مقدار آن بین مقدار منفرد حداقل و حداکثر است و باید مقدار بهینه آن محاسبه شود. غالباً در پایدارسازی مسائل بدوضع به روش تیخونوف تعمیم‌یافته، از حداقل‌کردن اندازه جواب مسئله با تعریف تابع Ω به صورت ذیل استفاده می‌گردد:

---

[۲۲] Tikhonov regularization

[۲۳] Generalized Tikhonov (G-Tikh)

$$\Omega(\Delta X) = \left\| L\Delta X \right\|_2^2 , L \in R^{p\times n}$$

با قرار دادن تابع Ω از تعریف (۲-۲۷) در رابطه (۲-۲۶) و مشتق‌گیری نسبت به مجهولات و مساوی صفر قرار دادن مشتقات، استراتژی پایدارسازی در روش تیخونوف تعمیم‌یافته به صورت ذیل شکل می گیرد:

$$S_\lambda^{\#} = (S^T S + \lambda^2 L^T L)^{-1} S^T$$

$S_\lambda^{\#}$ نشان‌دهنده شبه‌معکوس‌پایدارشده می‌باشد که به پارامتر پایدارسازی λ بستگی دارد.

اگر در تعریف تابع Ω، $L = I_{mm}$ باشد، آنگاه به روش تیخونوف استاندارد و یا به طور خلاصه روش تیخونوف با تابع تیخونوف به تعریف ذیل خواهیم رسید:

$$F_{Tikhonov}(\Delta X ; \lambda) = \left\| S\Delta X - \Delta a \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \Delta X \right\|_2^2$$

در رابطه فوق $\left\| S\Delta X - \Delta a \right\|_2^2$ به مؤلفه فیزیکال[۲۴] و $\lambda^2 \left\| \Delta X \right\|_2^2$ به مؤلفه پایدارسازی[۲۵] معروف می‌باشند. مهم‌ترین مسئله در این روش انتخاب پارامتر پایدارسازی می‌باشد که به بهترین جواب منجر شود. پارامتر پایدارسازی بهینه عمدتاً از دو روش منحنی ال-شکل[۲۶] و اعتبار متقاطع تعمیم‌یافته[۲۷] بدست می‌آید

نمونه‌ای از روند پایش سلامت سازه بر مبنای اطلاعات لرزه‌ای

در طول زمان بهره برداری از سازه‌ها ممکن است آسیب‌هایی در قسمت های حیاتی آنها ایجاد شده و به مرور زمان گسترش یابد؛ عوامل بسیاری از قبیل وارد آمدن نیروهایی بزرگتر از نیروهای پیش بینی شده، شرایط نامناسب پیرامون سازه، قرار گرفتن در معرض تغییرات شدید آب و هوایی، خطاهای ساخت، ضربه، خستگی، خوردگی و ... می‌توانند منجر به وقوع آسیب سازه‌ها شوند. از گذشته تعیین وضعیت سلامت و یا آسیب دیدگی سازه‌ها، مخصوصا سازه‌های با اهمیت نظیر پل‌ها، سدها، تونل‌ها، ساختمان‌های با تعداد ساکنان بالا و یا دارای تجهیزات گران قیمت، ساختمان‌های مهم که لازم است بهره برداری آنها متوقف نگردد، ساختمان‌های تاریخی و ... همواره حائز اهمیت بوده است. بر اساس شیوه‌ی کلاسیک و قدیمی، بررسی وضعیت سازه با استفاده از بازبینی چشمی توسط یک متخصص انجام می‌شود که این مسئله چند ضعف عمده دارد:

به صورت ذاتی طبیعتا خطای این روش بالا می‌باشد.

پوشیده بودن اجزای اصلی و همین طور اتصالات سازه و همچنین بخش های داخلی سازه یکی دیگر از مشکلات بازرسی چشمی است. بسیاری از خرابی ها از بخش های داخل المان ها آغاز می شود که با چشم قابل رویت نمی باشد. امکان دسترسی به بسیاری از بخش‌های برخی از سازه‌ها مانند سکوهای دریایی، پل های با دهانه بلند، سازه های فضاکار و ... به طور کلی وجود ندارد. بر این اساس روش های ارزیابی غیرمخرب به وجود آمد. ارزیابی غیرمخرب وضعیت سلامت سازه ها موضوع علم نوین پایش سلامت سازه هاست. این ارزیابی معمولا سه هدف عمده را مد نظر قرار میدهد:پایش سلامت سازه‌ای به عنوان فراهم کننده‌ی اطلاعات مورد نیاز در بحث ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها. در این مورد علاوه بر تعیین موقعیت مکانی آسیب ها و نیز شدت آنها میتوان هزینه ی ترمیم و مقاوم سازی و نیز مدت زمان لازم برای انجام عملیات ترمیم و مقاوم سازی را نیز برآورد نمود.ابزاری به جهت برآورد و تخمین

---

[۲۴] Physcial Component

[۲۵] Regularizing Component

[۲۶] L-curve Method (LCM)

[۲۷] Generalized Cross-Validation (GCV)

باقیمانده‌ی عمر مفید سازه؛ دانستن باقیمانده‌ی عمر سازه می تواند منجر به اخذ تصمیم درست در قبال سازه از طرف مالک، بیمه‌گذار، ساکنین و ... گردد.

ابزاری به جهت اعلام هشدار قبل از خرابی سازه و نیز تعیین مسیرهای فرار و نقاط امن سازه در مواقع بحرانی مانند جنگ، زلزله (کاهش تلفات پس لرزه ها)، بادهای شدید و ....

به طور کلی روش های انجام ارزیابی غیرمخرب در گذشته بیشتر به صورت روش های تست محلی بوده است. این روش ها عبارتند از:

الف) روشهای آکوستیک و اولتراسونیک.

ب) روش های میدان مغناطیسی.

پ) رادیوگرافی.

ت) روشهای جریان ادی.

ث) روش های میدان حرارتی.

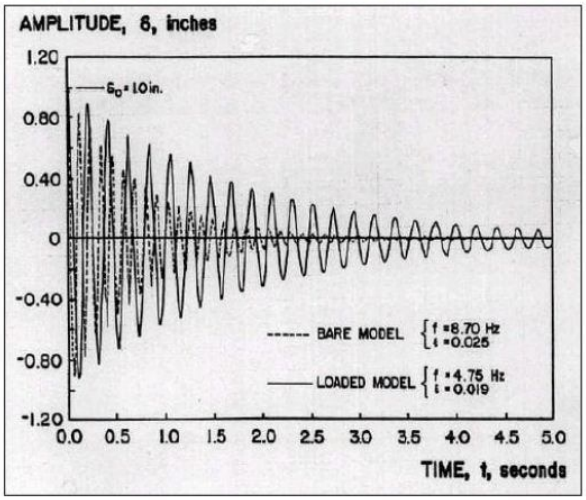
روش های فوق دارای چند ضعف و ایراد عمده می باشند:

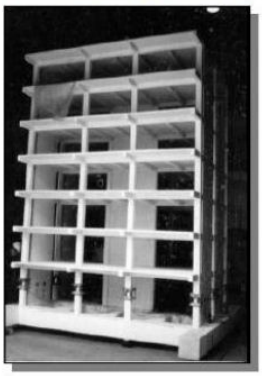
برای استفاده از این روش ها باید محدوده مکان آسیب از قبل مشخص باشد چرا که انجام تست موضعی بر روی کل یک سازه عملا امکان پذیر نمی باشد.محدوده مورد نظر باید حتما قابل دسترسی باشد .همانگونه که قبلا دیدیم در بسیاری از مواقع دسترسی به بخش‌های مختلفی از سازه امکان پذیر نمی باشد.در اغلب موارد لازم است که بهره برداری از سازه برای مدتی متوقف گردد تا بررسی ها و تست های لازم انجام گردد. این مسئله در بسیاری از موارد امکان پذیر نمی باشد و یا اینکه ممکن است خسارت های مالی به بار آورد.ارزیابی با این روش ها معمولا بسیار زمان بر است.

با توجه به ایرادات ذکر شده، امروزه انجام تمام عملیات پایش سلامت سازه با این روش ها محدود به سازه های کوچک و نیز آسیب یابی در سطوح قابل دسترسی (خارجی) سازه ها می گردد. البته به عنوان مکمل پایش سلامت در برخی موارد از روش های ذکر شده استفاده می شود. با توجه به تمام موارد ذکر شده نیاز به روشی که بتواند در کنار دقت بالا با هزینه کم از لحاظ مالی و زمانی قابل اجرا باشد وجود داشته است. بر این اساس روش های پایش سلامت بر مبنای اطلاعات لرزه‌ای سازه توسعه داده شده اند. در این روش ها از نکته زیر استفاده می شود:

هر آسیبی در سازه منجر به تغییر در مشخصات فیزیکی سازه (جرم، سختی و میرایی) می گردد. این مسئله منجر به تغییر در ویژگی های دینامیکی (فرکانس مدها، بردار شکل مدها، میرایی مدها، توابع انتقال، پاسخ سازه و ...) سازه خواهد شد. در ادامه ملاحظه می‌گردد که با افزایش شتاب میز لرزان در یک آزمایش بر روی سازه ۳ بعدی در ژاپن و آغاز و سپس توسعه ی آسیب میزان فرکانس مود اول سازه کاهش و میرایی این مود افزایش می‌یابد؛ این بدان معناست که می توان آسیب سازه منجر به تغییر در پارامترها و مشخصات فیزیکی سازه شده است.

1981/1982 US-JAPAN PROJECT
Response of Bare Frame Before and After Adding Ballast

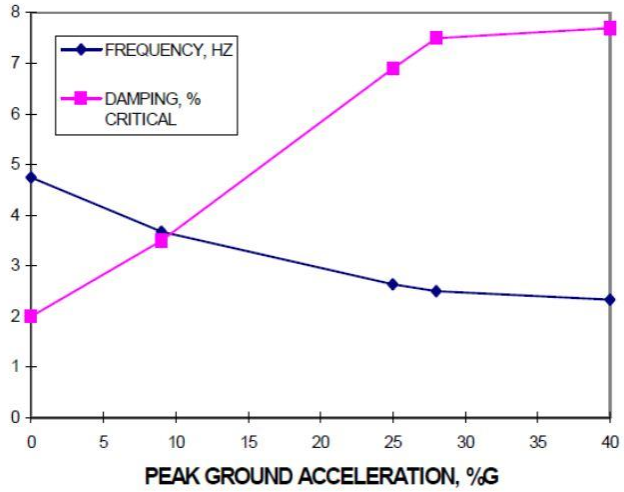




Model Weight

Bare Model	18 kips
Loaded Model	105 kips

1981/1982 US-JAPAN PROJECT
Change in Damping and Frequency with Accumulated Damage

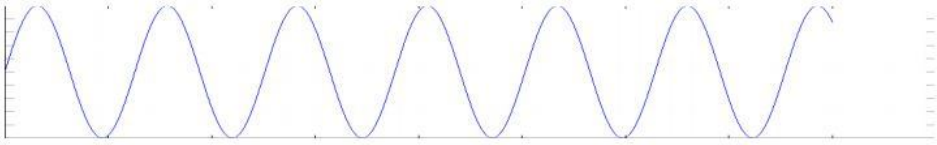


امروزه پروژه‌های بسیاری در زمینه ی پایش سلامت پل ها، سدها و ساختمانها در دنیا با استفاده از اطلاعات لرزه ای انجام میگردد؛ در واقع در حال حاضر قریب به اتفاق پروژه های بزرگ که عملیات پایش سلامت کلی (و نه موضعی در مکانی خاص) بر روی آنها انجام می گردد از پایش سلامت بر مبنای اطلاعات لرزهای استفاده می نمایند.

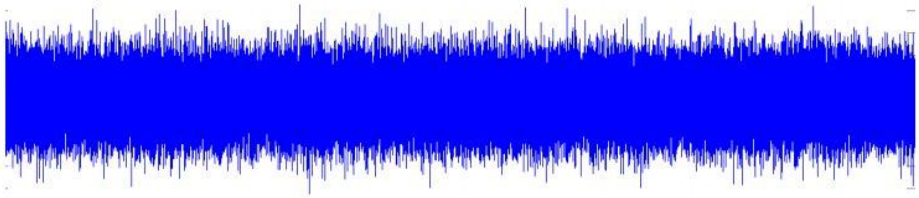
۲مراحل کلی پایش سلامت سازه‌ای بر مبنای اطلاعات لرزه‌ای

جمع آوری پاسخ سازه

الف) پاسخ سازه در اثر یک ارتعاش اجباری جمع آوری میگردد. به عنوان مثال یک تحریک هارمونیک با فرکانس و دامنه‌ی مشخص توسط دستگاه‌هایی که بدین منظور ساخته شده اند و یا توسط انسان به سازه اعمال می‌گردد.

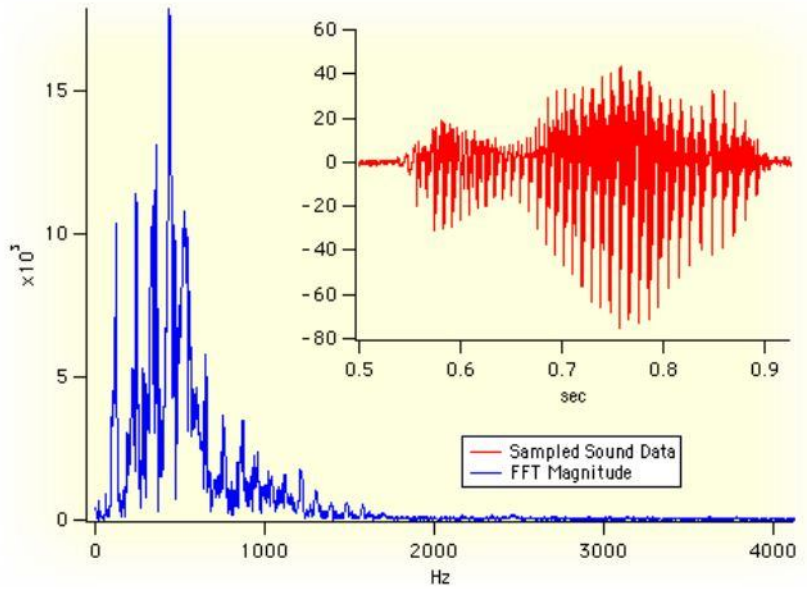


ب) پاسخ سازه تحت ارتعاش محیطی که در هر محل با توجه به اثر باد، عبور ترافیک، انسان، لرزش طبیعی زمین، حرکت قطارهای زیرزمینی مترو و .... به طور ذاتی و طبیعی وجود دارد جمع آوری می شود.



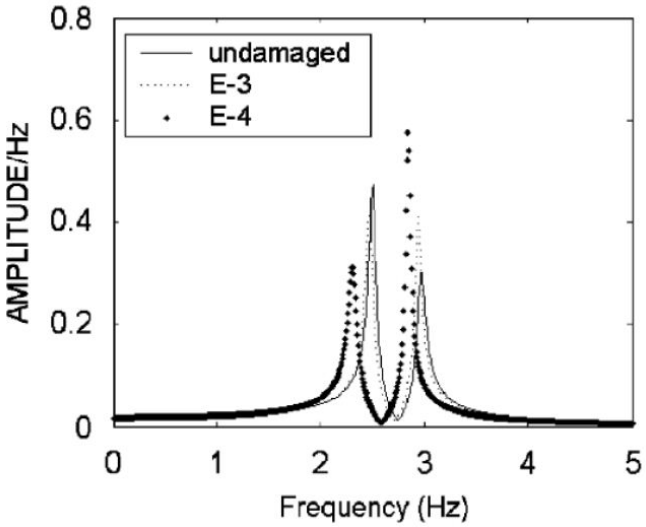
استخراج اطلاعات مورد نیاز از پاسخ سازه

در این مرحله پارامترهای سازه از قبیل فرکانس های مودی کلی و محلی، نسبت های میرایی مودی کلی، بردارهای شکل مودی و ... استخراج می شوند.



تحلیل و پردازش اطلاعات سازه

در این مرحله یا به صورت مستقیم بر روی اطلاعات مرحله ۱ و یا بر روی اطلاعات مرحله ۲ با استفاده از الگوریتم‌ها و نرم افزارهای مختلف پردازش انجام می شود و در پایان این مرحله وضعیت سلامت و یا عدم سلامت و همچنین نقاط احتمالی آسیب‌دیده مشخص می‌گردد.

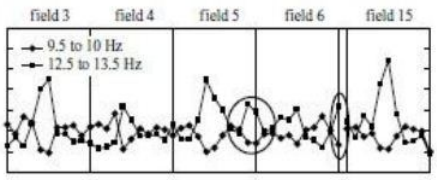


۲-۲ مثال‌هایی از سیستم پایش سلامت پل‌ها

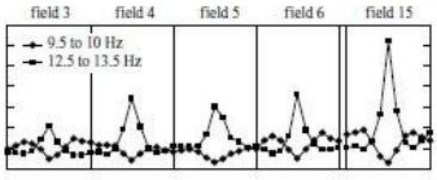
مثال : پل یوروپابروکث

ایجاد مقادیر الگو تیرهای زیر عرشه به عنوان اجزای مستقل و تشکیل ترند کارت‌ها (که احتمال آسیب به صورت چشمی در آن‌ها وجود دارد) بر پایه مشخصات دینامیکی حاصل از ارتعاشات حس شده توسط حسگرهای شتاب.تشکیل مدل المان محدود تیرها و به هنگام سازی مدل تیرها از روی مقادیر آماری مشخصات دینامیکی.

به کارگیری الگوریتم های تشخیص آسیب بر پایه مقایسه عملکرد تیرهای سالم و آسیب دیده.



Behavior pattern of the cantilevers with indications of irregularity



Acceptable behavior pattern of the cantilevers along the bridge

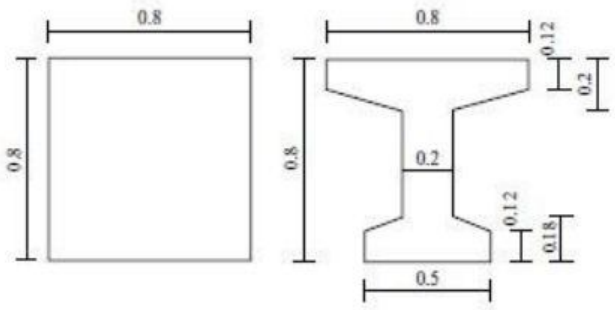
مثال: تیر بتنی مسلح پیش تنیده ساخته شده توسط Bilfinger Berger، تیر بتن مسلح پیش تنیده Teughels ۲۰۰۳، تیر بتن مسلح Maeck ۲۰۰۳ ، پل Lanaye ، پل روزرنبرک، پل رو مکه و بربکه و...



Lanaye Bridge



The investigated PRC beam



Cross-sectional sketches (dimensions in meters)

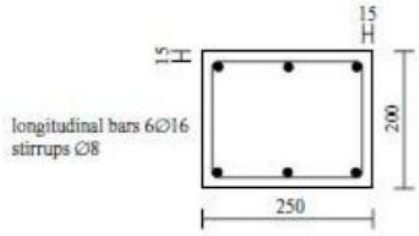


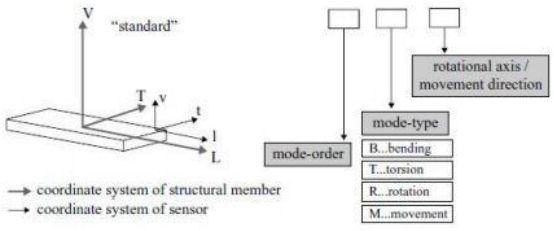
Figure 7.45 Beam cross-section (dimensions in millimeters)

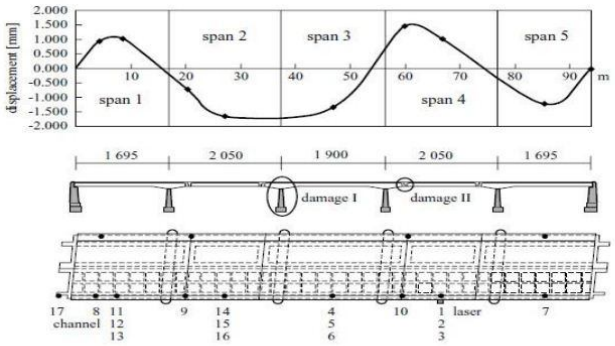
بررسی احتمال وجود آسیب بر پایه اطلاعات بدست آمده از اشکال و فرکانس مدی حاصل از ارتعاش محیطی

مثال :پل Aschach Danube به طول ۳۲۵ متر

Eigenfrequencies – Aschach Danube Bridge

Eigenfrequency [Hz]	Typification	Number of alternations	Initiated in span number	Brief description	Sequential mode nomenclature	Specific mode nomenclature
0.85	*BT*	1	2	Main span	(1)*BT*	1*BT* main span
1.24	*BT*	1	1; 3	Side-span	(2)*BT*	1*BT* side-span
1.52	*BT*	1		Uniformly	(3)*BT*	1*BT* uniformly
2.09	*TL*	1	2	Main span	(4)*TL*	1*TL* main span
2.90	*BT*	2	2	Main span	(5)*BT*	2*BT* main span
3.81	*BT*	2	1; 3	Side-span	(6)*BT*	2*BT* side-span
4.02	*BT*	2		Uniformly	(7)*BT*	1*BT* uniformly
6.40	*TL*	3	2	Main span	(8)*TL*	2*TL* main span
7.24	*BT*	3	1; 3	Side-span	(9)*BT*	3*BT* side-span
8.69	*BT*	4	2	Main span	(10)*BT*	3*BT* main span





Measured first mode shape of a defect structure (settlement of supports due to heavy traffic)



Figure 7.71 First mode shape 0.85 Hz (measurement) and 0.81 Hz (computation) – 1*BT* symmetric, main span



Figure 7.72 Second mode shape 1.24 Hz (measurement) and 1.22 Hz (computation) – 1*BT* side-span



Figure 7.73 Third mode shape 1.52 Hz (measurement) and 1.53 Hz (computation) – 1*BT* uniformly



Figure 7.74 Fourth mode shape 2.09 Hz (measurement) and 2.29 Hz (computation) – 1*TL* main span



Figure 7.75 Fifth mode shape 2.90 Hz (measurement) and 2.66 Hz (computation) – 2*BT* main span

منحنی شکنندگی Fragility

به منظور بیان کمی آسیب پذیری اجزای مختلف سازه ای و یا غیر سازه ای بر حسب میزان خطر زلزله می توان در مورد هر نوع از سازه ها یا اجزای غیر سازه ای حساس به جابجایی نسبی و اجزای غیر سازه ای حساس به شتاب، احتمال وقوع یا فرا گذشت از یک میزان خسارت خاص را بر حسب یک ویژگی معرف زلزله نظیر PGA, PGV, PGD بیان نمود. تکرار این عملیات برای مقادیر مختلف PGA یا سایر تک پارامترها، منجر به تولید منحنی های نرمال شده ای موسوم به منحنی شکنندگی Fragility curve می گردد.

روش های تولید منحنی شکنندگی

الف - روش تجربی (Empirical method)

ب - بر اساس قضاوت مهندسی (Judgmental approach)

ج - روش تحلیلی (Analytical method)

د - روش ترکیبی (Hybrid approach)

موارد استفاده از منحنی‌های شکنندگی

الف) چنین منحنی های شکنندگی برای برآورد خطر کلی زیرسازه های شهری قابل استفاده می باشد.

ب) در موسسات مدیریت دولتی و ادارات بیمه که کار برآورد میزان خسارت بعد از زلزله را بر عهده دارند، قابل استفاده می باشد.

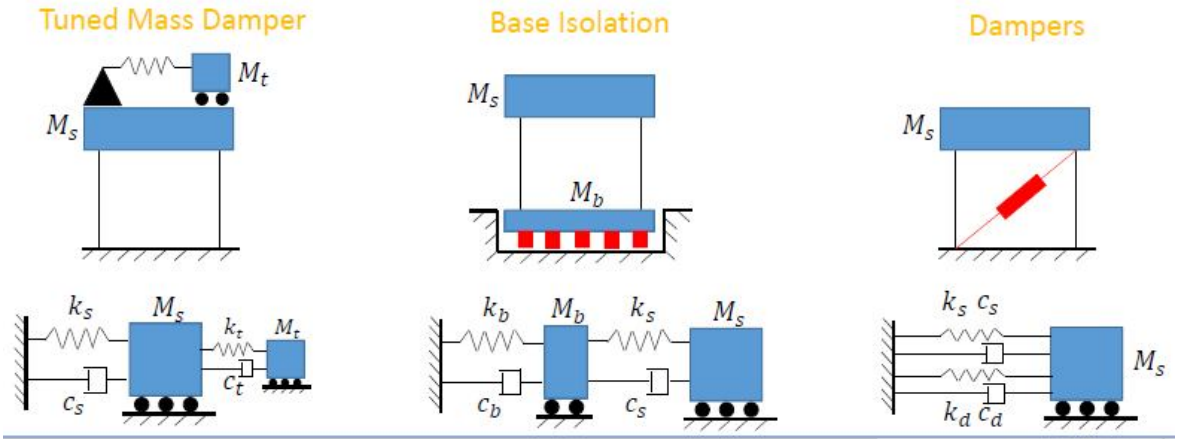
تولید منحنی شکنندگی به روش ترکیبی

این روش برای متعادل کردن کمبود اطلاعات مشاهده ای (تجربی) روش دوم و کم کردن خطاهای مدل کردن در روش سوم، از طریق جمع آوری اطلاعات از منابع مختلف استفاده می شود. روش ترکیبی منحنی های شکنندگی قابل اعتمادی را با ترکیب ارزیابی های ریاضی و داده های خسارت مشاهده شده از سازه ها در زلزله های قبل تولید می کند. اساس روش، استفاده از مدلهای تحلیلی برای تکمیل اطلاعات بدست آمده از بررسی‌های آماری است.

گام‌های آنالیز شکنندگی در سازه‌ها

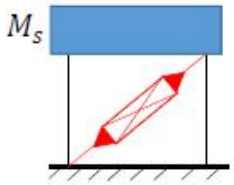
- ایجاد مدل تحلیلی غیرخطی المان محدود از سازه
- انتخاب مدل های غیرخطی هیسترتیک مناسب جهت انجام آنالیز
- انجام آنالیز PushOver جهت تعیین ظرفیت اعضاء
- انتخاب رکوردهای واقعی و ایجاد رکوردهای مصنوعی
- مقیاس کردن تحت سطوح PGA , PGV
- انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی المان محدود با استفاده از رکوردها
- گرفتن نتایج خروجی ، ضرایب شکل پذیری و بیشینه پاسخ سازه ها
- تعیین توابع خسارت لرزه ای وابسته به سطح لرزه ورودی
- استخراج حالات خسارت و تعداد وقوع آنها در سطوح مختلف
- ایجاد منحنی شکنندگی با فرض توزیع Lognormal پارامترها

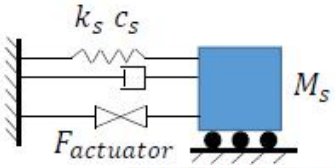
خلاصه ای از روش های نوین طراحی سازه ها (Passive Systems)



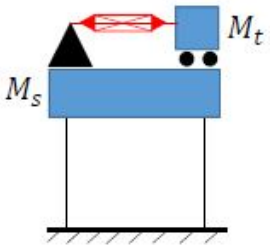
خلاصه ای از روش های نوین طراحی سازه ها (Active Systems)

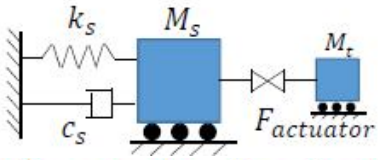
Active Brace or ...





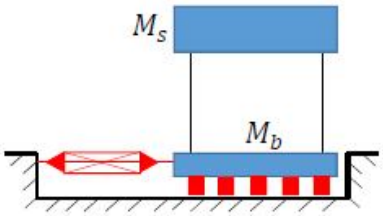
Tuned Mass Damper

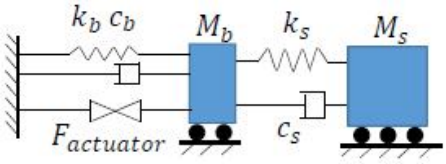




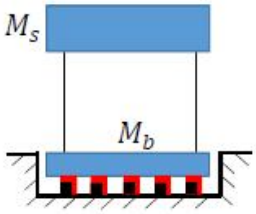
خلاصه ای از روش های نوین طراحی سازه ها (Hybrid Systems)

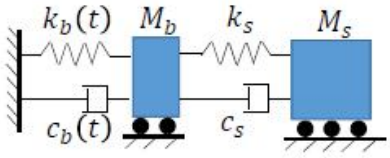
Active Isolation



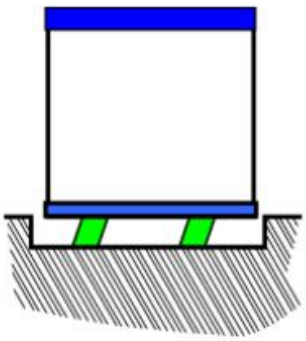


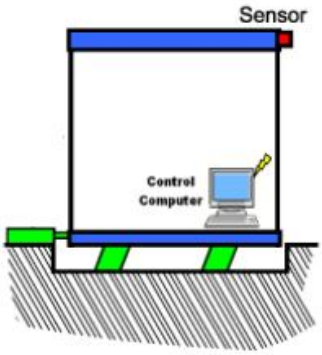
"Smart Isolators"

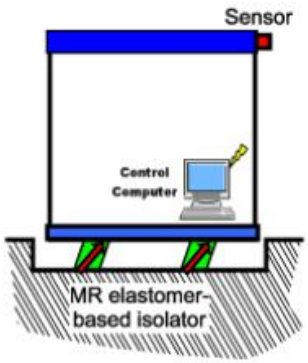




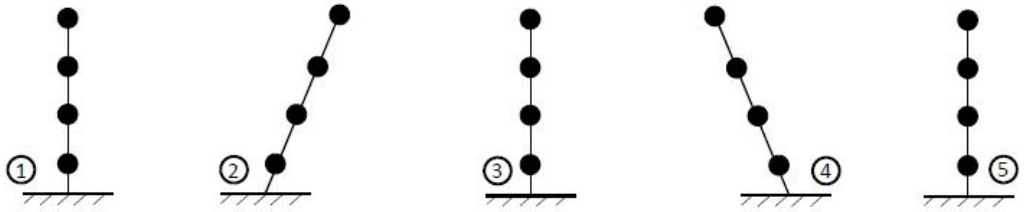
"Smart Isolators"







روش خارج قسمت رایلی Rayleigh's Quotient



ارتعاش آزاد یک سازه چند درجه آزادی را در نظر بگیرید.

با فرض آنکه هیچگونه میرایی و اتلاف انرژی در سیستم وجود ندارد. ⟵ انرژی کل در این سیستم همواره یک عدد ثابت است.

KE PE

Kinetic Energy + Potential Energy = Constant ⟵ عدد ثابت = انرژی جنبشی + انرژی پتانسیل

روش خارج قسمت رایلی Rayleigh's Quotient

انرژی جنبشی

$$KE = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i \, v_i^2$$

جرم طبقه — سرعت طبقه

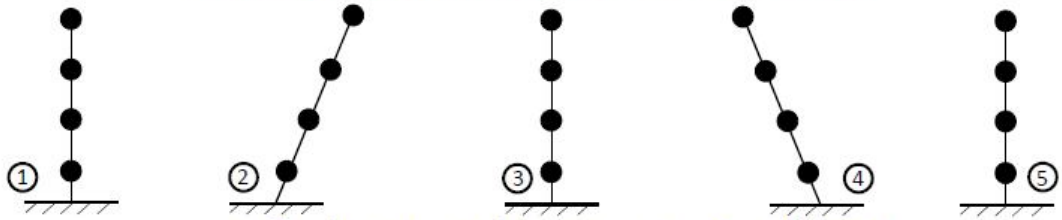
انرژی پتانسیل

$$PE = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} F_i \, \Delta u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} k_i \, \Delta u_i^2$$

نیروی طبقه — سختی طبقه — جابجایی نسبی طبقه

حرکت ارتعاش آزاد جسم به صورت هارمونیک می باشد. ⟹ $v_{i,max} = u_{i,max} \, \omega$

روش خارج قسمت رایلی Rayleigh's Quotient



ارتعاش آزاد یک سازه چند درجه آزادی را در نظر بگیرید.

موقعیت ② را در نظر بگیرید

$v_i = 0 \longrightarrow KE = 0$

$$E = PE = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} k_i \, \Delta u_{i,max}^2$$

موقعیت ③ را در نظر بگیرید

$\Delta u_i = 0 \longrightarrow PE = 0$

$$E = KE = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i \, v_{i,max}^2 = \omega^2 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i u_{i,max}^2$$

$=$

روش خارج قسمت رایلی Rayleigh's Quotient

$$\omega^2 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i u_{i,max}^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} k_i \, \Delta u_{i,max}^2$$

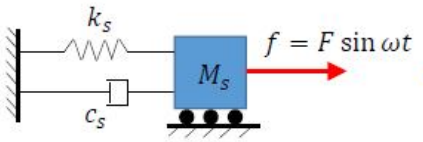
روش خارج قسمت رایلی برای تعیین فرکانس سیستم

Rayleigh's Quotient for Frequency

$$\omega^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i \, \Delta u_{i,max}^2}{\sum_{i=1}^{n} m_i u_{i,max}^2}$$

خلاصه ای از میرایی

حالت اول: بار سینوسی



$$u = u_{st} \, R_d \sin(\omega t - \emptyset)$$

Deformation Response Factor
ضریب پاسخ جابجایی

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

فرکانس طبیعی سیستم

$$r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Phase Angle
زاویه فاز

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{(1-r^2)}$$

$$u_{st} = \frac{F}{k_s}$$

Damping Ratio
ضریب میرایی

$$\zeta = \frac{c_s}{2m_s\omega_n} = \frac{c_s}{c_{cr}}$$

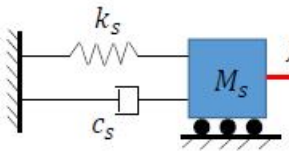
Viscous Damping
میرایی ویسکوز

Critical Damping
میرایی بحرانی

$$c_{cr} = 2m_s\omega_n = 2\sqrt{k_s m_s} = \frac{2k_s}{\omega_n}$$

خلاصه ای از میرایی

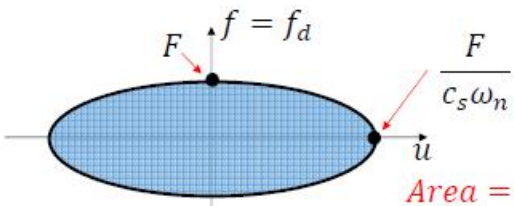
حالت اول: بار سینوسی



$$u = u_{st} \, R_d \sin(\omega t - \emptyset)$$

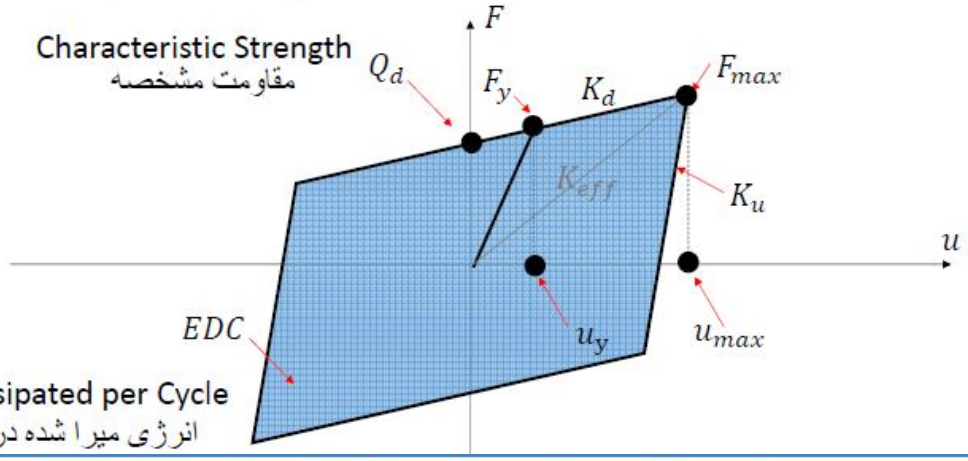
حالت تشدید

حالت غیر از تشدید



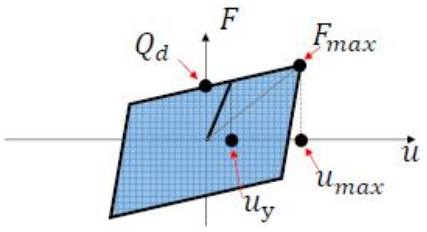
$$Area = \frac{\pi F^2}{c_s \omega_n}$$

نامگذاری رفتارمیرایی پسماند (رفتار ایده آل)



Equivalent Hysteresis Damping میرایی معادل پسماند

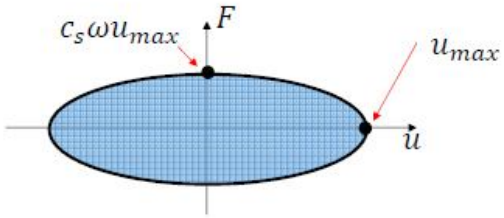
میرایی پسماند



$$Area = 4Q_d(u_{max} - u_y)$$

=

میرایی ویسکوز



$$Area = \pi c_s \omega {u_{max}}^2$$

Equivalent Hysteresis Damping میرایی معادل پسماند

میرایی ویسکوز

$$Area = \pi c \omega {u_{max}}^2 \Rightarrow c = \frac{Area}{\pi\omega {u_{max}}^2}$$

جایگذاری

میرایی پسماند

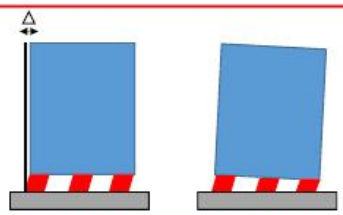
$$Area = 4Q_d(u_{max} - u_y)$$

$$\Rightarrow c = \frac{4Q_d(u_{max} - u_y)}{\pi\omega {u_{max}}^2} \Rightarrow c = \frac{4Q_d}{\pi\omega u_{max}}\left(1 - \frac{u_y}{u_{max}}\right)$$

$$\Rightarrow c_{cr} = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \Rightarrow \frac{c}{c_{cr}} = \frac{2Q_d}{\pi k u_{max}}\left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)\left(1 - \frac{u_y}{u_{max}}\right) \quad , \quad \mu = \frac{u_{max}}{u_y}$$

$$h = \frac{2Q_d}{\pi F_{max}}\left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)\left(1 - \frac{1}{\mu}\right)$$

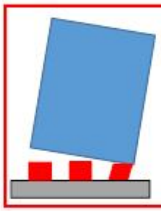
- مقاوم در برابر وزن سازه



- سختی اولیه زیاد

- سختی افقی کم

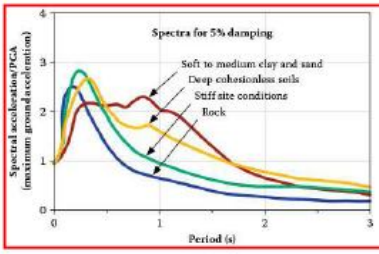
- سختی قائم زیاد



- کنترل جابجایی های ماندگار

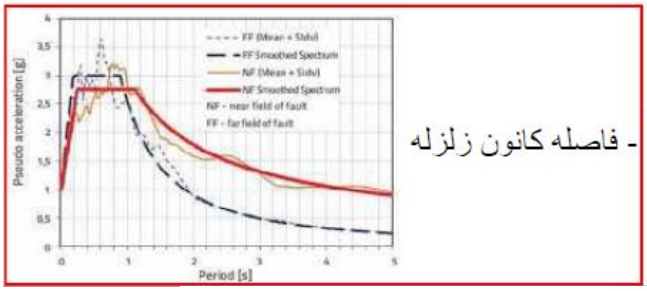
- قابلیت میرایی انرژی

- نوع خاک



- اثر مولفه قائم زلزله

- فاصله کانون زلزله



- اثر مودهای بالاتر

انواع اصلی جداسازهای لرزه ای

- جداسازهای لاستیکی Elastomeric-Based Isolators
- جداسازهای لغزشی Sliding-Based Isolators
- جداسازهای فنری Spring Type Isolators
- جداسازهای ترکیبی Combined Isolation Systems
- Sleeved-Pile Isolation Systems
- قابهای گهواره ای Rocking Frames

انواع جداساز های لاستیکی

- جدا ساز لاستیکی طبیعی غیر مسلح (Unreinforced Natural Rubber Bearings)

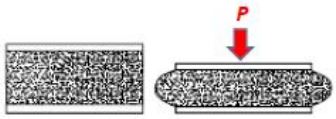
- جدا ساز های لاستیکی با میرایی کم (Low-Damping Rubber Bearings)

- جدا ساز های لاستیکی با هسته سربی (Lead Rubber Bearing)

- جدا ساز های لاستیکی با میرایی زیاد (High-Damping Rubber Bearings)

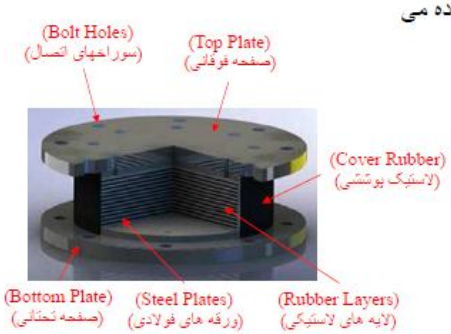
جدا ساز لاستیکی طبیعی غیر مسلح (Unreinforced Natural Rubber Bearings)





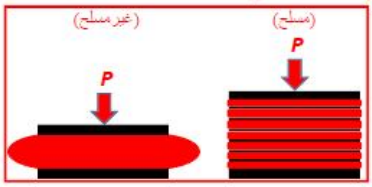
- نخستین مورد استفاده از جدا ساز لاستیکی غیر مسلح در سال 1969 در یک مدرسه ابتدایی 3 طبقه با سازه ای بتنی در یوگسلاوی می باشد.
- جداگر های غیرمسلح لاستیکی تا 25% تحت بار قائم (وزن سازه) متراکم می شوند.
- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز اغلب ناچیز است.
- سختی قائم این جداگر ها تنها چند برابر سختی افقی آنها میباشد. احتمال وقوع حرکت گهواره ای در سازه بسیار بالا می باشد.
- میرایی در این نوع جداگر ها تقریبا ناچیز است.
- احتیاج به المان های اضافی (فیوز ها) برای کنترل بار های باد، زلزله های خفیف و غیره دارد.

جدا ساز های لاستیکی با میرایی کم (Low-Damping Rubber Bearings)

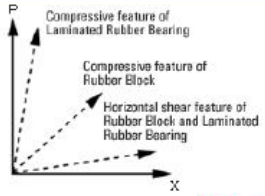


- در ساخت این نوع از جداگر ها از هر دو نوع لاستیک طبیعی و مصنوعی استفاده می شود.
- در این نوع جداگر از ورقه های فولادی ((Steel Plates (Shims) در بین لایه های لاستیکی برای افزایش سختی قائم استفاده می شود.
- دراین نوع جداگر از صفحات تحتانی و فوقانی برای اتصال به زیر سازه و روسازه استفاده می شود.
- از لایه لاستیک پوششی (محافظ) برای جلولیگیری از زنگ زدگی و بروز خوردگی فولاد استفاده می شود..

جدا ساز های لاستیکی با میرایی کم (Low-Damping Rubber Bearings)

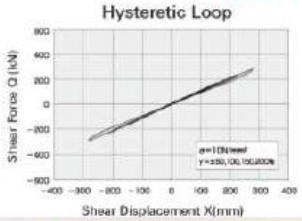


- روند ساخت و تولید این جداگر ها بسیار ساده می باشد.
- سختی قائم این جداگر ها بسیار بیشتر از سختی افقی آنها میباشد.
- میرایی در این نوع جداگر ها بسیار کم (ضریب میرایی 2-3%)است.
- احتیاج به المان های میراکننده اضافی دارد.



- خواص این جداگر نسبت به سرعت بارگذاری، دما و طول عمر جداگر تغییر نمیکند.
- از این جداگر به تنهایی اغلب در دور کردن فرکانس طبیعی سیستم از ارتعاشات محیطی استفاده می شود.
- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز اغلب ناچیز است.

جدا ساز های لاستیکی با میرایی کم (Low-Damping Rubber Bearings)

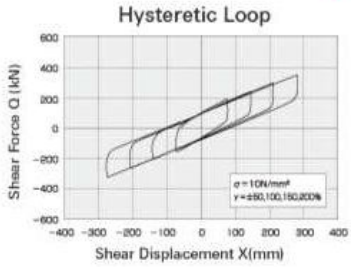


- میرایی در این نوع جداگر ها بسیار کم (ضریب میرایی 2-3%)است.
- احتیاج به المان های میراکننده اضافی دارد.
- روش ساخت سرد: ورقه هاي لاستيك با چسب به ورقه هاي فولاد چسبانده شده و براي خشك شدن كامل چسب در دماي معمولي يا دماي بالا (توسط تجهيزات گرمادهي) نگهداري مي شوند. پس از خشك شدن چسب در بين لايه ها، پوشش محافظ لاستيكي نصب می شود.



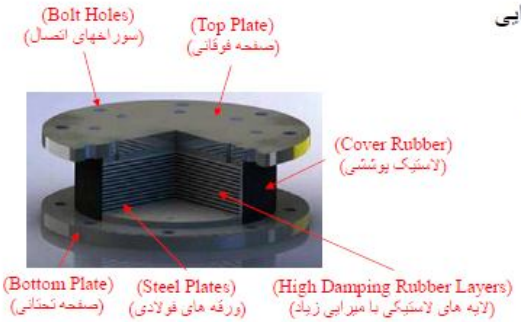
- روش ساخت گرم: لاستيك پس از تركيب مواد مختلف در حالي كه هنوز به حالت نيمه مايع است، در بين ورقه هاي فولادي ريخته مي شود. سپس مجموعه حرارت داده شده و تحت فشار قرار می گیرد تا لاستیک کاملا جوش خورده و چسب خشک شود. نتیجه این کار بدست آمدن قطعاتی بدون بخشهای مجزا و کاملا یکدست است که به کیفیت، طول عمر و عملکرد آنها می افزاید.

جدا ساز های لاستیکی با هسته سربی (Lead Rubber Bearing)



- روند ساخت و تولید این جداگر ها بسیار ساده می باشد.
- سختی قائم این جداگر ها بسیار بیشتر از سختی افقی آنها میباشد.
- ضریب میرایی در این نوع جداگر ها (کرنش برشی 100%) در حدود بیش از 10% است.
- احتیاج به المان های میراکننده اضافی ندارد.
- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز ها اغلب ناچیز است.
- نحوه ساخت لایه های فلزی و لاستیکی این جداگر مانند جداگر لاستیکی با میرایی کم می باشد.
- از آنجا که هسته سربی و دیگر قسمتهای جداگر باید یکپارچه عمل کنند، مقدار سرب کمی بیشتر از حجم استوانه خالی درون جداگر می باشد که تحت نیروی تراکمی، سرب درون این حفره جای می گیرد.

جدا ساز های لاستیکی با میرایی زیاد (High-Damping Rubber Bearings)

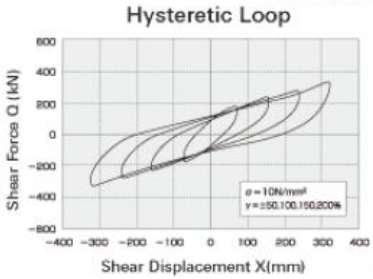


- تمامی مراحل ساخت این نوع جداگر مانند جداساز های لاستیکی با میرایی کم می باشد.

- تمامی اجزای تشکیل دهنده این جداگر به غیر از لایه های لاستیکی با جداساز لاستیکی با میرایی کم یکسان است.

- در این نوع جداگر ها، از پرکننده های گوناگون برای بهبود عملکرد لاستیک همچون افزایش میرایی و سختی اولیه استفاده شده است .

جدا ساز های لاستیکی با میرایی زیاد (High-Damping Rubber Bearings)



- سختی قائم این جداگر ها بسیار بیشتر از سختی افقی آنها میباشد.

- ضریب میرایی در این نوع جداگر ها (کرنش برشی 100%) بین 10 تا 20% است.

- احتیاج به المان های میراکننده اضافی ندارد.

- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز ها اغلب ناچیز است.

- این جداگر ها دارای سختی اولیه زیاد برای تحمل نیروی باد و زلزله های خفیف می باشند.

- به دلیل ساختار ملکولی لاستیک این جداگر ها، در جابجایی های بزرگ، سختی این جداگر ها زیاد شده که بسیار مفید برای مهار تغییر مکان های بزرگ در هنگام زلزله های با شدت زیاد می باشد.

انواع جداساز های لغزشی

- جدا ساز های لغزشی تخت (Flat Slider Bearing)

- جداساز های لغزشی منحنی (پاندولی) (Spherical Friction Pendulum Bearings)

- انواع دیگر جداساز های لغزشی (Other Types of Slider Bearings)

جداساز های لغزشی تخت



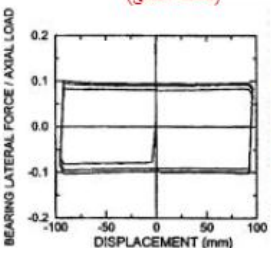
- هرزمان که نیروی وارده بر جداگر ها از نیروی اصطکاکی استاتیکی موجود (ضریب اصطکاک ضربدر بار قائم) در آنها فراتر رود، رفتار هیسترتیک الاستیک-پلاستیک نسبتا ایده آل را تولید می کند.

- برش پایه در این نوع جداگر ها (در زمان لغزش) همواره محدود به نیروی اصطکاکی لغزشی تمامی جداگر ها می باشد.

- سطح رایج در این نوع جداگرتفلون است که در زیر فولاد صیقلی زدزنگ قرار دارد. polytetrafluorethylene (PTFE)

- سطح تفلون دارای ضریب اصطکاک استاتیکی پایین (در حدود 3%) است که با افزایش فشار کاهش می یابد اما با افزایش سرعت این ضریب اصطکاک به شدت افزایش می یابد.

- در طراحی مقدماتی معمولا ضریب اصطکاک ثابت و حدود 10% فرض می شود.





جداساز های لغزشی تخت

- روند ساخت و تولید این جداگر ها بسیار ساده می باشد.

- سختی قائم این جداگر ها بسیار بیشتر ازسختی افقی آنها میباشد.

- فشارقائم قابل تحمل این جداگر ها بسیار بالاتر از جداگر های الاستومری می باشد (60 Mpa در مقابل 15 Mpa).

- ضریب میرایی در این نوع جداگر ها بسیار بیشتر از جداگر های الاستومری می باشد.

- احتیاج به المان های میراکننده اضافی ندارد.

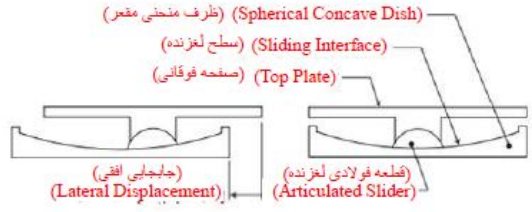
- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز ها از مشکلات و محدودیت های اساسی می باشد.

- دراین نوع از جداگر ها، مرکز جرم و سختی بر همدیگر منطبق است و گشتاور پیچشی کمتر مطرح است.

- این جداگر ها دارای سختی اولیه زیاد برای تحمل نیروی باد و زلزله های خفیف می باشند.

- اندرکنش مولفه های قائم و افقی این نوع از جداگر ها در هنگام زلزله یکی دیگر ازمشکلات این نوع جداگر ها می باشد.

جداساز های لغزشی منحنی (پاندولی)





- در این نوع از جداگر یک سطح لغزنده فولادی منحنی استفاده شده است که نقش بازگردانندگی جداگر به مکان اولیه آن را دارد.

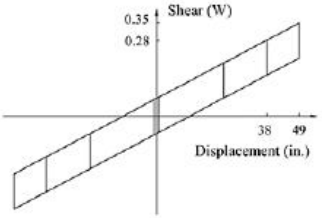
- در این نوع جداگر از قطعه فولادی لغزنده که دارای پوشش تفلون می باشد برای حرکت افقی جداگر استفاده می شود.

- خواص باربر این جداگر توسط ضریب اصطکاک، شعاع کره و وزن روی آن تعریف می شود.

- دوره ي تناوب سیستم جداسازي بسیار تابع شعاع انحناي این جداساز را میباشد. بنابراین در صورتي که وزن سازه تغییراندکی کند، دوره ي تناوب سیستم تغییري زیادی نخواهد کرد.

جداساز های لغزشی منحنی (پاندولی)

- سختی قائم این جداگر ها بسیار بیشتر از سختی افقی آنها میباشد.
- فشار قائم قابل تحمل این جداگر ها بسیار بالاتر از جداگر های الاستومری می باشد (60 Mpa در مقابل 15 Mpa).
- در این نوع از جداگر ها، مرکز جرم و سختی بر همدیگر منطبق است و گشتاور پیچشی کمتر مطرح است.



- احتیاج به المان های میراکننده اضافی ندارد.
- جابجایی ماندگار در این نوع جداساز ها به دلیل سطح منحنی آنها اغلب ناچیز می باشد.
- ضریب میرایی در این نوع جداگر ها بسیار بیشتر از جداگر های الاستومری می باشد.
- این جداگر ها دارای سختی اولیه زیاد برای تحمل نیروی باد و زلزله های خفیف می باشند.
- اندرکنش مولفه های قائم و افقی این نوع از جداگر ها در هنگام زلزله یکی دیگر از مشکلات این نوع جداگر ها می باشد.

انواع دیگر جداساز های (لغزشی)

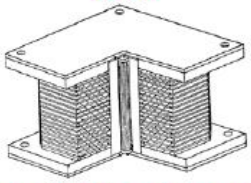
Roller Bearing



Pot Bearing



R-FBI



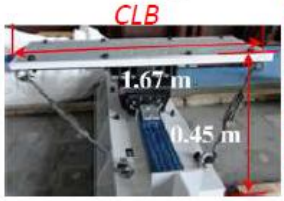
TFPB



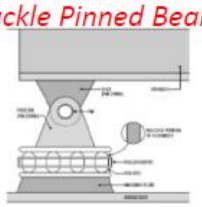
Rocker Bearing



CLB



Knuckle Pinned Bearing



جداساز های فنری



- جداگر های لاستیکی و لغزشی معمولا تنها یک راه حل جداسازی برای مولفه های افقی زلزله هستند. در حالی که سیستم جداساز برای هر سه مولفه زلزله طراحی شود، اغلب و نه همیشه، از جداساز های فنری نیز به طور همزمان استفاده می شود.
- از این جداساز ها معمولا در تجهیزات صنعتی، تجهیزات و ماشین آلات صنعتی استفاده می شود.
- بزرگترین نقطه ضعف این نوع از جداگر ها انعطاف پذیری آنها در هر دو جهت افقی و قائم می باشد که باعث به وجود آمد حرکت گهواره ای در سیستم می شود.
- این نوع از جداگر ها دارای میرایی اندک می باشند و اغلب تحت بار های سرویس نیز حرکت می کنند.



GERB System

جداساز های ترکیبی

- به دلایل مختلف از چند جداگر و یا از ترکیب جداگر و وسایلی همچون میراگر ها در یک سازه استفاده می شود که به این ترکیب سیستم ها، جداساز ترکیبی می گوید. تعدادی از این دلایل در زیر آورده شده است:

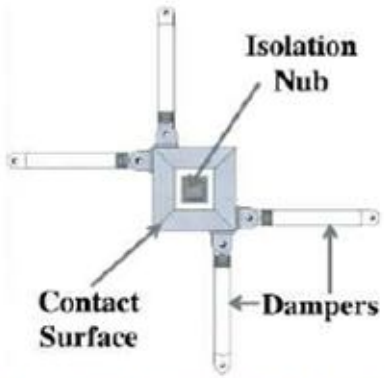
- تامین میرایی لازم در سیستم جداساز با میرایی کم.

- تامین سختی اولیه مناسب برای تحمل بارهای سرویس در جداگر های با سختی اولیه کم

- فشار قائم قابل تحمل کم در جداساز های لاستیکی - تامین مقاومت لازم جداگر ها در مقابل نیروی کششی

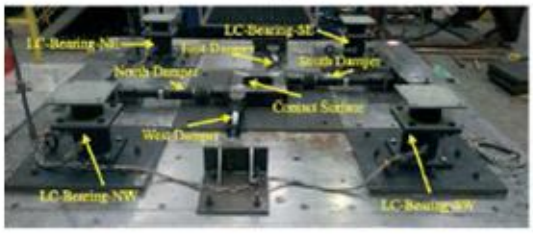
- جداسازی مولفه قائم زلزله با استفاده از وسایلی همچون فنر ها - اصطکاک استاتیکی بالا در جداگر های اصطکاکی

- محدود کردن جابجایی بزرگ در جداگر ها با استفاده ازوسایلی همچون میراگر ها

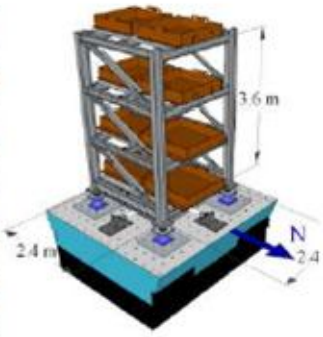


جداساز های ترکیبی

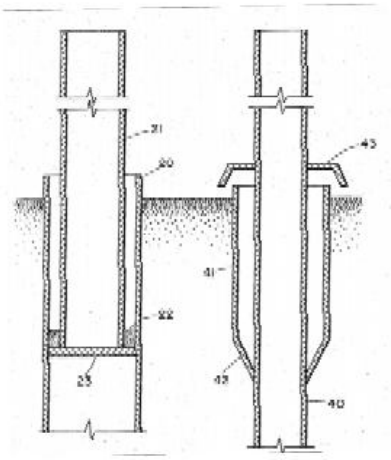
استفاده ازمیراگر ها برای کنترل جابجایی های بزرگ در سازه های جداسازی شده







شمع های غلاف دار



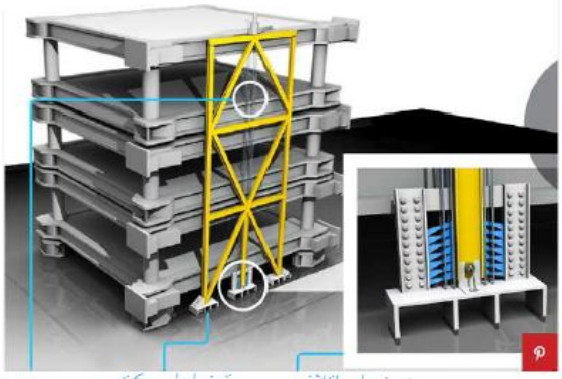
- در پروژه هایی که استفاده از شمع های بلند ضروری بوده، بسترخاک نرم و جود دارو روسازه بسیار سخت می باشد استفاده می شود.

- لازم به توجه است:

$$\text{نیروی کمانش} \propto \frac{EI}{L^2} \qquad \text{سختی جانبی} \propto \frac{EI}{L^3}$$

- دراین روش از جداسازی، مقاومت لازم در برابر بار سرویس اغلب وجود ندارد و میرایی سیستم نیز کم می باشد، در نتیجه معمولا در این روش، از دستگاه های مکمل برای تولید میرایی و سختی لازم استفاده می شود.

قابهای گهواره ای



- سیستم جداساز گهواره ای جزو مدل های خاص اتلاف انرژی دسته بندی می شوند و در زمره ی مفاهیم کلاسیک جداسازی قرار نمی گیرند.

- سیستم جداساز گهواره ای معمولا در سازه های بلند و لاغر استفاده می شوند.

- در این سیستم یک بدنه نوسانگر وجود دارد که با افزایش میزان جابجایی، پریود آن افزایش می یابد.

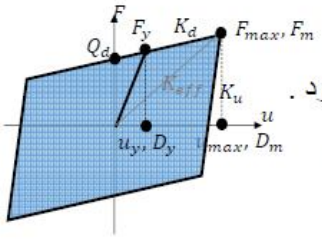
- در این سیستم مقاومت در برابر بارهای سرویس از طریق وزن سازه تامین می شود.

- میرایی در این سیستم با افزودن فیوز های اتلاف انرژی همچون صفحه های فولادی یا پیچ های تسلیم شونده تامین می شود.

روش آنالیز ساده شده AASHTO AASHTO Simplified Analysis Method

چند فرض مهم در این روش:

- روسازه به صورت یک سازه صلب در مقایسه با جداگر ها درنظر گرفته می شود.



- در این روش آنالیز، از تعریف سیستم یک درجه آزادی استفاده می شود.

- رفتار غیرخطی جداگر ها با یک رفتار دوخطی رفتاری ایده آل سازه می شود .

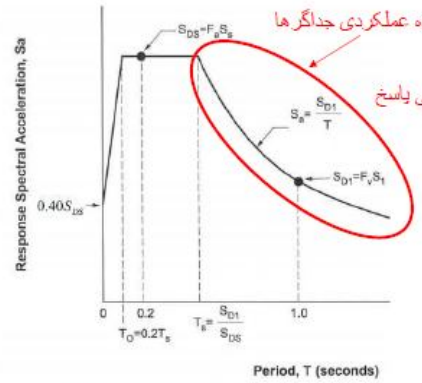
- سختی موثر سیستم جداسازی شده با $K_{eff} = K_{isol}$ نشان داده می شود.

- میرایی پسماند جداساز ها با میرایی ویسکوز معادل سازی می شود.

- شتاب طیفی با پریود نسبت عکس دارد (محدوده عملکردی پریود بلند جداگر ها).

روش آنالیز ساده شده AASHTO AASHTO Simplified Analysis Method

محدوده عملکردی پریود بلند جداگر ها:



AASHTO Design Response Spectrum

شتاب طیفی در پریود 1 ثانیه — شتاب طیفی طرح در پریود 1 ثانیه

$$S_A = A = \frac{S_{D1}}{T_{eff}} \quad و \quad S_{D1} = F_v S_1 \Rightarrow S_A = A = \frac{F_v S_1}{T_{eff}}$$

ضریب منطقه در دامنه پریود بلند

Site Class	Mapped Spectral Response Acceleration Coefficient at 1 Second Periods				
	$S_1 \le 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \ge 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	a	a	a	a	a

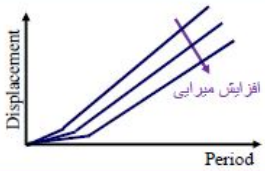
روش آنالیز ساده شده AASHTO AASHTO Simplified Analysis Method

محدوده عملکردی پریود بلند جداگر ها:

برای 5% میرایی

$$S_A = A = \frac{F_v S_1}{T_{eff}} \Rightarrow S_D \equiv D = \frac{g}{4\pi^2} F_v S_1 T_{eff}$$

$$B_L = \left(\frac{h}{0.05}\right)^{0.3}$$



$$h = \frac{2Q_d}{\pi F_m}\left(1 - \frac{D_y}{D_{isol}}\right)$$

برای بیشتر از 5% میرایی

$$S_A = A = \frac{F_v S_1}{B_L T_{eff}} = \frac{S_{D1}}{B_L T_{eff}} \Rightarrow S_D = D = \frac{g}{4\pi^2}\frac{F_v S_1 T_{eff}}{B_L}$$

مراحل استفاده از روش آنالیز ساده شده:

1- مقداری را برای D_{isol} فرض کنید.

2- سختی موثر جداگر K_{isol} را بدست آورید (با داشتن ویا فرض کردن K_d و Q_d). $K_{isol} = \frac{Q_d}{D_{isol}} + K_d$

3- مقدار ماکزیمم نیرو F_m را بدست آورد. $F_m = K_{isol} D_{isol}$

4- مقدار پریود موثر T_{eff} را بدست آورد. $T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{gK_{isol}}}$

5- مقدار ضریب میرایی h را بدست آورد. $h = \frac{2Q_d}{\pi F_m}\left(1 - \frac{D_y}{D_{isol}}\right)$

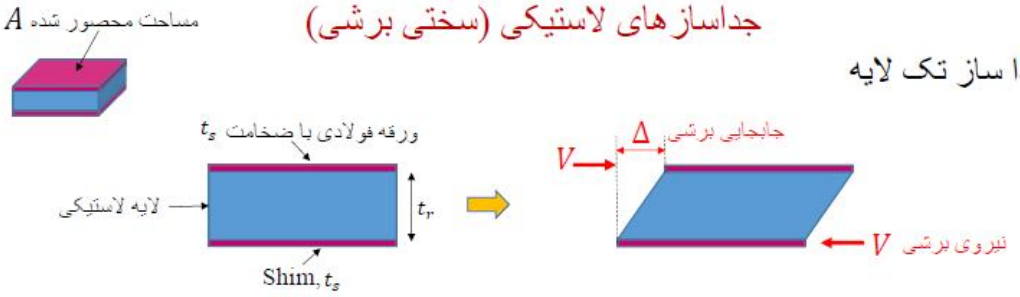
6- ضریب اصلاح میرایی B_L را بدست می آوریم. $B_L = \left(\frac{h}{0.05}\right)^{0.3}$

7- جابجایی جداگر D_{isol} را بدست آورید. $S_D = D_{isol} = \frac{g}{4\pi^2}\frac{F_v S_1 T_{eff}}{B_L}$

8- مقادیر بدست آمده از مرحله 1 و7 را با یکدیگر مقایسه کنید، اگر اختلاف زیاد بود، تکرار را از مرحله 1 آغاز کنید و تا زمانی که اختلاف به حداقل برسد، این تکرار را ادامه دهید.

جداساز های لاستیکی (سختی برشی)

الف: جدا ساز تک لایه

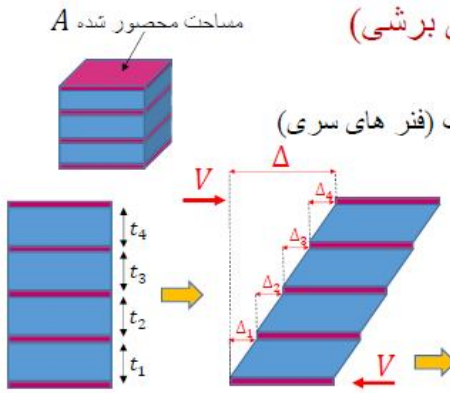


مدول برشی — کرنش برشی — تنش برشی

$$\tau = G\gamma \Rightarrow \frac{V}{A} = G\frac{\Delta}{t_r} \Rightarrow V = \frac{GA}{t_r}\Delta \Rightarrow \boxed{k_{layer,d} = \frac{GA}{t_r}}$$

جداساز های لاستیکی (سختی برشی)

ب: جدا ساز چند لایه



- از آنجایی که برش و سطح محصور شده در تمامی لایه ها یکسان است (فنر های سری)

$$\frac{V}{GA} = \frac{\Delta}{t_r} = \gamma$$ کرنش برشی در تمامی لایه ها یکسان است.

همچنین داریم: $\Delta_1 = \gamma t_1$ و $\Delta_2 = \gamma t_2$ و $\Delta_3 = \gamma t_3$ و $\Delta_4 = \gamma t_4$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = \gamma(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = \gamma T_r$$

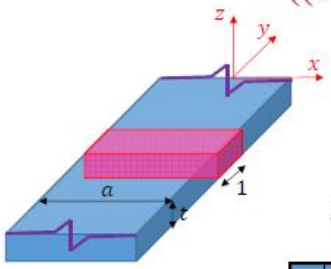
مجموع ضخامت لایه های لاستیکی

$$V = \frac{GA}{T_r}\Delta \Rightarrow \boxed{k_{multi-layer,d} = \frac{GA}{T_r}}$$

این رابطه مستقل از ضخامت مختلف لایه های لاستیکی در یک جداگر است

جداساز های لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

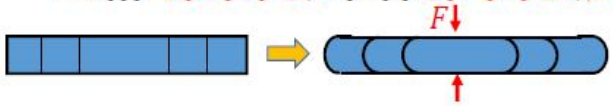
الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه



- چند فرض اولیه:

1- رفتار الاستیک و خطی می باشد (برقرار بودن Superposition).

2- نقاطی که بر روی یک خط قائم پیش از بارگذاری قرار دارند، پس از بارگذاری برروی خط سهموی قرار می گیرند.



3- در هرنقطه داخلی از لایه، تنش های اصلی در تمامی جهات یکسان می باشد (تنش های هیدروستاتیکی). $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$

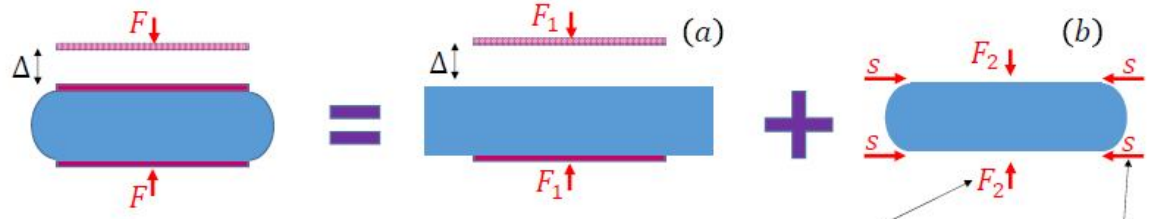
4- در تمامی سطوح خارجی، تنش های سطحی $P(x,y)$ برابر با صفر است.

5- حجم همواره ثابت است. $\nu = 0.5 \quad K = \infty$

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

با فرض برقرار بودن Superposition



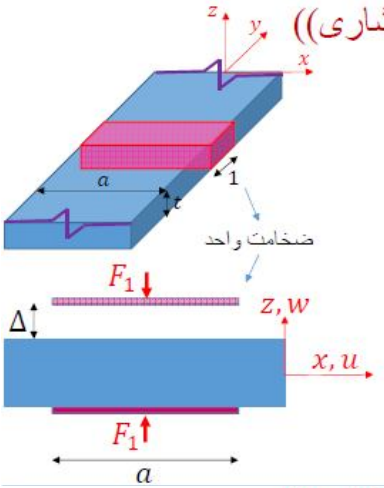
$F = F_1 + F_2$

علت وجود این نیرو چیست؟

نیروی برشی لازم برای سازگاری با نقاط مرزی

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه



(a): با فرض وجود نیروی خالص فشاری:

- در یک نوار با طول نا متناهی: ⟸ کرنش صفحه ای $\varepsilon_y = 0$ *Plain Strain*

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right) \quad ①$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right) \quad ②$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right) \quad ③$$

$\varepsilon_y = 0 \rightarrow$ ④ $\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(a): با فرض وجود نیروی خالص فشاری:

- در یک جسم تحت نیروی خالص فشاری، تنش های برشی در هر نقطه ای از آن جسم برابر با صفر می باشد. ⟸ $\tau_{yx} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x = 0 \quad (a)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0 \quad (c)$$

با فرض صفر بودن نیرو های حجمی ⟹

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \quad (d) \qquad \text{و} \qquad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (e)$$

⟹ تنشها در جسم (لایه لاستیکی) یکسان می باشد.

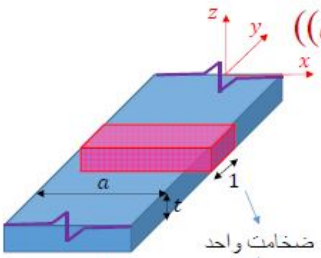
$\sigma_x = 0$ (d) ⟹ در نقاط مرزی لایه لاستیکی

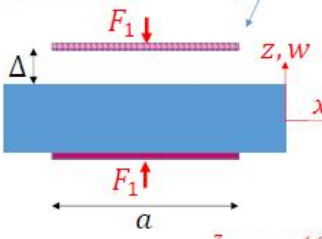
⑤ $\sigma_x = 0$ در هر نقطه لایه لاستیکی

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(a): با فرض وجود نیروی خالص فشاری:





④ $\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$ و $\sigma_x = 0$ ⑤ ⇒ $\boxed{\sigma_y = \nu\sigma_z}$ علت وجود این تنش چیست؟

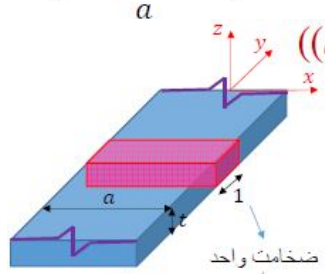
$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right)$ ③ ⇒ $\boxed{\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}(1-\nu^2)}$ ⑥

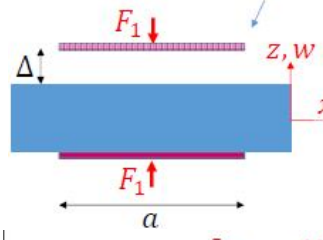
$\varepsilon_z = \frac{F_1}{a(1)E}(1-\nu^2)$, $\varepsilon_z = \frac{\Delta}{t}$ ⇒ $\frac{\Delta}{t} = \frac{F_1}{a(1)E}(1-\nu^2)$ ⇒ $\boxed{F_1 = \frac{a(1)E}{(1-\nu^2)t}\Delta}$ ⑦

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(a): با فرض وجود نیروی خالص فشاری:





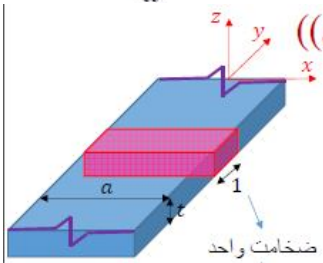
⑦ $F_1 = \frac{a(1)E}{(1-\nu^2)t}\Delta$ و $e = \frac{\Delta}{t}$ ⇒ $F_1 = \frac{aE}{(1-\nu^2)}e$

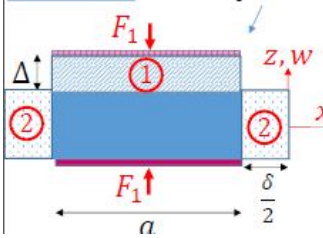
$\nu = 0.5$ ⇒ $\boxed{F_1 = \frac{4}{3}Eae}$ ⑧

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(a): با فرض وجود نیروی خالص فشاری:





★ نکته: حجم قسمت 2 = حجم قسمت 1 ⇐ حجم ثابت است $K = \infty$ $\nu = 0.5$

حجم قسمت 1 $= a(1)\Delta$

حجم قسمت 2 $= t\left(\frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2}\right)(1)$ ⇒ $\delta = \frac{a\Delta}{t}$

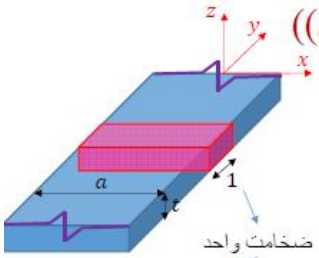
$\varepsilon_x = \frac{\delta}{a} = \frac{a\Delta}{at} = \frac{\Delta}{t} = \varepsilon_z$ ⇒ $\boxed{\varepsilon_x = (-1)\varepsilon_z}$ $\nu = 0.5$

کرنش ها برابرند و نه جابجایی ها

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

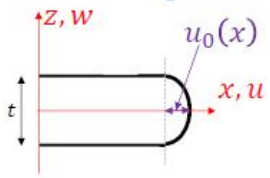
الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(b): نیروی برشی و فشاری سازگارکننده با نقاط مرزی:



یادآوری

نقاطی که بر روی یک خط قائم پیش از بارگذاری قرار دارند، پس از بارگذاری برروی خط سهموی قرار می گیرند.



مجهول

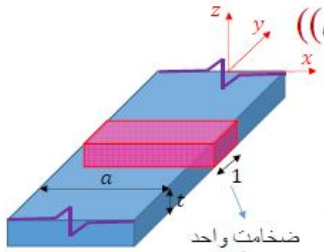
$$u(x,z) = u_0(x)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)$$

جابجایی افقی نقاط بعد از بارگذاری نسبت به حالت پیش از بارگذاری

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

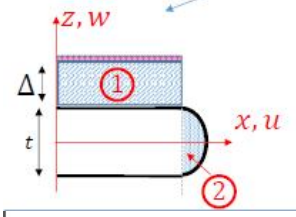
الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(b): نیروی برشی و فشاری سازگارکننده با نقاط مرزی:



با در نظر گرفتن نقاط مرزی ← حجم قسمت 2 = حجم قسمت 1 ← حجم ثابت است $K = \infty \quad \nu = 0.5$

$$\text{حجم قسمت } 2 = 2\int_0^{\frac{t}{2}} u_0(x)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)dz \qquad \text{حجم قسمت } 1 = \Delta(1)x$$



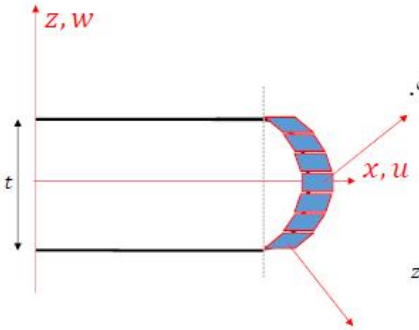
$$\Delta(1)x = 2u_0(x)\left[\frac{t}{2} - \frac{t}{6}\right] = \frac{2}{3}u_0(x)t \Rightarrow \boxed{u_0(x) = \frac{3}{2}\frac{\Delta x}{t} = \frac{3}{2}ex}$$

علت آنکه u_0 تابع x است، چیست؟

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(b): نیروی برشی و فشاری سازگارکننده با نقاط مرزی:



کرنش برشی در لایه وسط صفر است. $\gamma_{zx} = 0$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}^{0} = \frac{\partial\left[u_0(x)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)\right]}{\partial z} = -8u_0(x)\frac{z}{t^2}$$

$$z = \frac{t}{2} \rightarrow \boxed{(\gamma_{zx})_{max} = -\frac{4u_0(x)}{t}} \Rightarrow (\tau_{zx})_{max} = G(\gamma_{zx})_{max}$$

$$\boxed{(\tau_{zx})_{max} = -\frac{4Gu_0(x)}{t}}$$

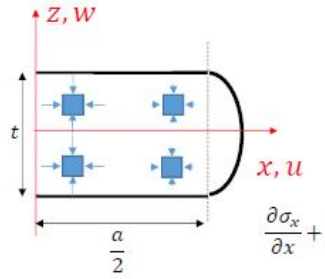


کرنش برشی در لایه های انتهایی ماکزیمم است. $\gamma_{zx} = max$

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(b): نیروی برشی و فشاری سازگارکننده با نقاط مرزی:



کرنش صفحه ای $\varepsilon_y = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0 \Rightarrow \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$

و صرفنظر از نیروهای حجمی

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x = 0 \Rightarrow \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad ,\quad \gamma_{zx} = -8u_0(x)\frac{z}{t^2} \quad ,\quad u_0(x) = \frac{3}{2}\frac{\Delta x}{t}$$

$$\tau_{zx} = -8Gu_0(x)\frac{z}{t^2} \Rightarrow \tau_{xz} = -\frac{12Gz\Delta x}{t^3} \Rightarrow \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = -\frac{12G\Delta x}{t^3} = -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$$

$$\sigma_x = \frac{6Gx^2\Delta}{t^3} + c(z) \Rightarrow \pm a/2 \text{ تنش افقی صفر در نقاط مرزی} \Rightarrow \sigma_x = \frac{6G\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3}$$

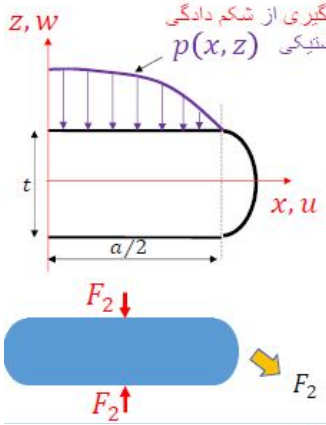
با فرض تنش های هیدرو ستاتیک

$$\Rightarrow \sigma_x = \sigma_z = \frac{6G\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3}$$

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

(b): نیروی برشی و فشاری سازگارکننده با نقاط مرزی:



$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{6G\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3} \Rightarrow \begin{matrix} \nu = 0.5 \\ E = 2G(1+\nu) \\ E = 3G \end{matrix} \Rightarrow \sigma_z = \frac{2E\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3}$$

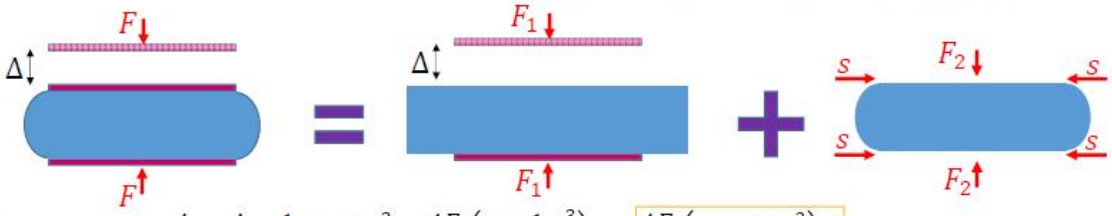
تعادل در شرایط مرزی

$$\sigma_z = p(x,z) = p(x) = \frac{2E\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3}$$

$$F_2 = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{2E\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3} dx \Rightarrow F_2 = \frac{1}{3}E\Delta\left(\frac{a}{t}\right)^3$$

جداسازهای لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه (c): جمع تاثیر نیروها:



$$F = F_1 + F_2 = \frac{4}{3}Ea\frac{\Delta}{t} + \frac{1}{3}E\Delta\left(\frac{a}{t}\right)^3 = \frac{4E}{3}\left(\frac{a}{t} + \frac{1}{4}\frac{a^3}{t^3}\right)\Delta = \frac{4E}{3}\left(1 + \left(\frac{a}{2t}\right)^2\right)\frac{a}{t}\Delta$$

$$F = k_{axial,c}\Delta \Rightarrow k_{axial,c} = \frac{4E}{3}\left(1 + \left(\frac{a}{2t}\right)^2\right)\frac{a}{t}$$

جداساز های لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

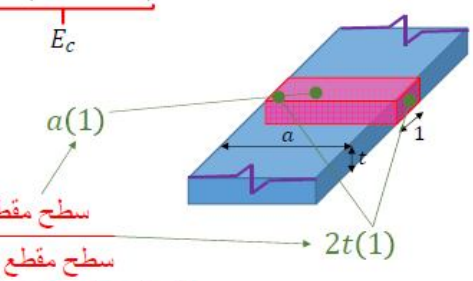
الف: جدا ساز نواری (نامتناهی) تک لایه

در حالت کلی $k_{axial,c} = \frac{AE}{L}$ ⇨ $k_{axial,c} = \underbrace{\frac{4E}{3}\left(1+\left(\frac{a}{2t}\right)^2\right)}_{E_c}\frac{a(1)}{t}$ (A → $a(1)$، L → t)

$$E_c = \frac{4E}{3}\left(1+\left(\frac{a}{2t}\right)^2\right) = \frac{4E}{3}(1+S^2)$$

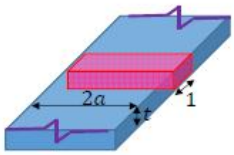
ضریب شکل
Shape Factor

$S = \frac{\text{سطح مقطع لایه}}{\text{سطح مقطع شکم داده}}$



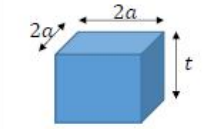
جداساز های لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

ب: جدا ساز نواری (نامتناهی)، مقطع مربعی ومستطیلی تک لایه

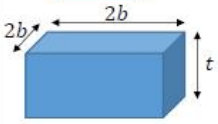


$E_c = \frac{4E}{3}(1+S^2)$ $\quad S = \frac{a}{t}$

توجه شود در این روابط از عرض $2a$ استفاده شده است.



$E_c = E(1+2.256\,S^2)$ $\quad S = \frac{a}{2t}$

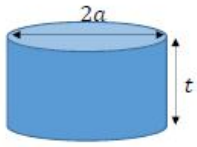


$$E_c = E\left[\left(\frac{4}{3}-\frac{2}{3}\frac{ab+t^2}{a^2+b^2+2t^2}\right)+\frac{1}{3}\frac{(2a)^2}{t^2}\left(1-\frac{192}{\pi^5}\frac{a}{b}\sum_{n=1,3,5}\frac{1}{n^5}\tanh\left(\frac{n\pi b}{2a}\right)\right)\right] \qquad S = \frac{ab}{(a+b)t}$$

Gent A.N., Meinecke, E.A. (1970). Compression, Bending and Shear of Bonded Rubber Blocks. Polymer Engineering and Science, 10(1), 48-53.

جداساز های لاستیکی (سختی محوری (فشاری))

پ: جدا ساز با مقطع دایروی تک لایه



$E_c = E(1+2S^2)$ $\quad S = \frac{a}{2t}$

ت: جدا ساز با مقاطع مختلف تک لایه

ضریب سختی فشاری

$E_c = f_c E$ ⟹ $E_c = (f_{c1}+f_{c2})E$

این ضرایب معمولا در جداولی ارائه می شوند.

Gent A.N., Meinecke, E.A. (1970). Compression, Bending and Shear of Bonded Rubber Blocks. Polymer Engineering and Science, 10(1), 48-53.

جداسازهای لاستیکی (حالت های حدی در طراحی)

Material Limit States — حالت های حدی مواد
- لایه های فولادی
- لایه های لاستیکی

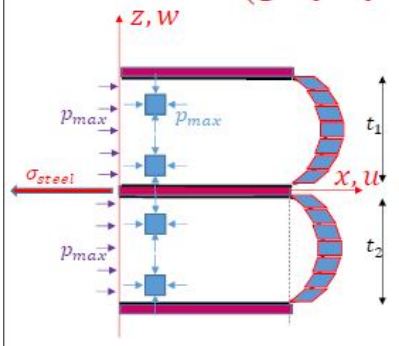
Rollover Limit States — حالت های حدی واژگونی

Critical Load Limit States — حالت های حدی کمانشی

جداسازهای لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(a): لایه های فولادی:

یک جدا ساز نواری (نامتناهی) را در نظر بگیرید:



تعادل نیرو در جهت x

$$\sigma_{steel} \times t_s = p_{max}(t_1 + t_2)/2 \Rightarrow \sigma_{steel} = \left(\frac{t_1 + t_2}{2t_s}\right) p_{max}$$

یادآوری(عرض = a)

$$p(x) = \frac{2E\Delta\left(x^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{t^3} \xrightarrow[p(x) = p_{max}]{x = 0} p_{max} = -\frac{2E\Delta}{t^3}\frac{a^2}{4}$$

$$\Rightarrow p_{max} = -\frac{2E\Delta}{t^3}\frac{a^2}{4} \text{ و } s = \frac{a}{2t} \text{ و } e = \frac{\Delta}{t} \Rightarrow p_{max} = 2Ees^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{steel} = \left(\frac{t_1 + t_2}{2t_s}\right) 2Ees^2 \text{ و } e = \frac{\sigma_c}{E_c} \text{ و } E_c = \frac{4E}{3}(1 + s^2) \Rightarrow \sigma_{steel} = \left(\frac{t_1 + t_2}{2t_s}\right)\left[2E\sigma_c \frac{s^2}{\frac{4E}{3}(1 + s^2)E}\right]$$

جداسازهای لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(a): لایه های فولادی:

یک جدا ساز نواری (نامتناهی) را در نظر بگیرید:

$$\sigma_{steel} = \left(\frac{t_1 + t_2}{2t_s}\right)\left[\frac{1.5s^2}{1 + s^2}\right]\sigma_c \xrightarrow{s \text{ با فرض مقادیربزرگ}} \boxed{\sigma_{steel} = 1.5\left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2t_s}\right)\sigma_c}$$

مثال: مطلوب است تعیین نسبت تنش لایه فولادی نسبت تنش فشاری در جداگر زیر:

$$t_i = t_{i+1} = \frac{1''}{2} \quad t_s = \frac{1''}{8} \Rightarrow \sigma_{steel} = 1.5\left(\frac{0.5 + 0.5}{2 \times 0.125}\right)\sigma_c \Rightarrow \sigma_{steel} = 6\sigma_c$$

★ کمی تفکر: تنش مجاز فولاد $A36$ $0.6 \times 274.4 \times 10^6 = 165 \times 10^6\ Pascal$

$\times 23 \approx$

محدوده کاری تنش قائم حداکثر در جداگر های لاستیکی $6 - 8 \times 10^6\ Pascal$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(a): لایه های فولادی:

★ چند توصیه در طراحی لایه های فولادی:

ضابطه نشریه 523

- حداقل ضخامت لایه های فولادی را برابر با 1.5 mm بگیرید.

- محدوده کاری ضخامت این لایه ها در حدود 3-2 mm است.

- معمولا با استفاده از ضخامت های رایج، کنتر های مربوط به ضخامت ورقه های فولادی کنترل کننده نیستند.

ضخامت لایه های مجاور لاستیکی — وزن سازه از ترکیب بار مرده و زنده

$$t_s \geq \frac{2(t_i + t_{i+1}) \times P_{DL+LL}}{A_{re} \times f_y}$$

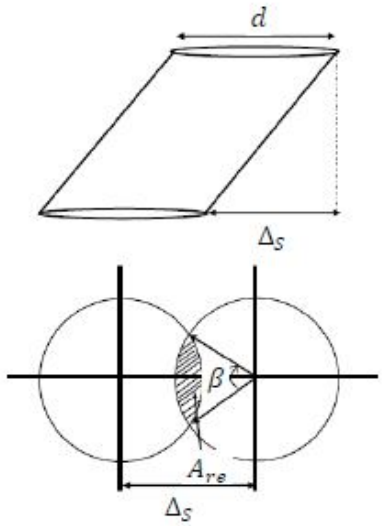
سطح مقطع موثر — تنش مجاز فولاد

- ورقه های فولادی را ضخیم طراحی نکنید زیرا باعث سنگینی جداگر ها شده مشکلاتی را در هنگام اجرا ایجاد می کند.

- اگر حفره ای در ورقه های فولادی وجود دارد، ضخامت لایه های فولادی باید به نسبت $\frac{2A_{gros}}{A_{net}}$ افزایش یابد.

جداساز های لاستیکی (سطح مقطع موثر)

ضوابطه نشریه 523



مقطع مربعی

$$A_{re} = A\left(1 - \frac{\Delta_S}{B}\right)$$

مقطع دایروی

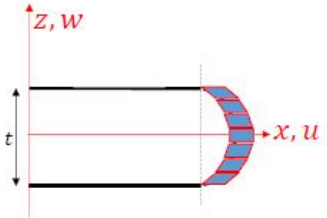
$$A_{re} = d^2\frac{\beta - sin\beta}{4}$$

$$\beta = 2\cos^{-1}\left(\frac{\Delta_S}{d}\right)$$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(b): لایه های لاستیکی (حداکثر کرنش برشی):

یک جدا ساز نواری (نامتناهی) را در نظر بگیرید:



یادآوری(عرض = a)

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial\left[u_0(x)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)\right]}{\partial z} = -8u_0(x)\frac{z}{t^2} \quad ، \quad u_0(x) = \frac{3}{2}\frac{\Delta x}{t} = \frac{3}{2}ex$$

$$z = -\frac{t}{2} \text{ و } x = \frac{a}{2} \Rightarrow \gamma_{zx} \rightarrow (\gamma_{zx})_{max} \Rightarrow (\gamma_{zx})_{max} = -\left(\frac{3}{2}e\frac{a}{2}\right)8\frac{-\frac{t}{2}}{t^2} \Rightarrow (\gamma_{zx})_{max} = \frac{3ea}{t}$$

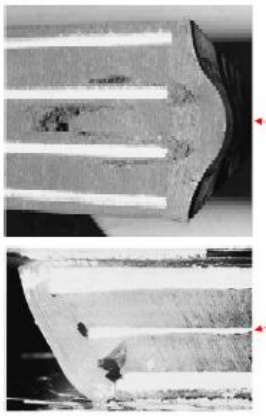
یادآوری(عرض = a) جدا ساز نواری (نامتناهی)

$$s = \frac{a}{2t} \Rightarrow \boxed{(\gamma_{zx})_{max} = \gamma_c = 6se}$$

کرنش برشی حداکثر جدا ساز تحت بارفشاری (نواری، دایروی، مربعی)

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(b): لایه های لاستیکی (حداکثر کرنش برشی):



فلسفه طراحی در آیین نامه ها: کرنش برشی ماکزیمم تحت بار فشاری تنها و یا تحت بار های همزمان فشاری و برشی از مقدار مشخصی کمتر باشد.

کرنش برشی ماکزمم تحت بار فشاری تنها

کرنش برشی ماکزمم تحت نیروی برشی

$\gamma_T \geq \gamma_c + \gamma_s$ ← کرنش برشی مجاز

Elongation at Break (EB)
تغییرطول در زمان پارگی

$f\varepsilon_u \geq \gamma_c + \gamma_s$

ضریب اطمینان

$f = 0.33$ تحت بار های قائم تنها (بار مرده + بار زنده) $\gamma_s = 0$

$f = 0.75$ تحت بار های قائم وافقی (بار مرده + بار زنده + بار زلزله) $\gamma_s \neq 0$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(b): لایه های لاستیکی (حداکثر کرنش برشی):

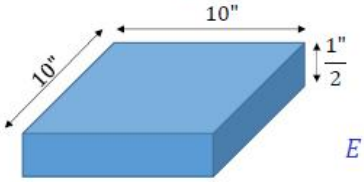
$$f\varepsilon_u \geq \gamma_c + \gamma_s \Rightarrow f\varepsilon_u \geq 6se + \gamma_s \Rightarrow e \leq \frac{f\varepsilon_u - \gamma_s}{6s} \quad , \quad e = \frac{\Delta}{t} \quad , \quad \Delta = \frac{P}{k_c}$$

$$\Rightarrow P_\gamma \leq k_c t \frac{f\varepsilon_u - \gamma_s}{6s} \Rightarrow P_\gamma \leq k_c t \frac{f\varepsilon_u - \gamma_s}{6s} \quad , \quad k_c = \frac{E_c A}{t} \Rightarrow P_\gamma \leq E_c A \frac{f\varepsilon_u - \gamma_s}{6s}$$

$$\Rightarrow E_c = (1 + 2ks^2)E \Rightarrow \boxed{P_\gamma \leq EA\frac{(1+2ks^2)}{6s}(f\varepsilon_u - \gamma_s)} \quad \boxed{\begin{matrix} P_\gamma = P_{DL+LL} & \gamma_s = 0 & f = 0.33 \\ P_\gamma = P_{DL+LL+EQ} & \gamma_s \neq 0 & f = 0.75 \end{matrix}}$$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(b): لایه های لاستیکی (حداکثر کرنش برشی):



مطلوبست تعیین ظرفیت قائم باربری جداگر زیر برای هر یک از حالات مورد نظر:

$E = 300\ psi \qquad k = 0.65 \qquad \varepsilon_u = 6 \qquad s = \frac{10 \times 10}{4 \times 10 \times 0.5} = 5$

$$P_\gamma \leq EA\frac{(1+2ks^2)}{6s}(f\varepsilon_u - \gamma_s) \Longleftrightarrow EA\frac{(1+2ks^2)}{6s} = 300 \times 100\frac{(1+2\times 0.65\times 5^2)}{6\times 5\times 1000} = 33.5\ kips$$

حالت	γ_s	f	$f\varepsilon_u - \gamma_s$	P_γ	$\sigma_c(ksi)$
1	0	0.33	2.00	66.90	0.67
2	0.50	0.50	2.50	83.75	0.84
3	1.00	0.90	4.40	147.40	1.47

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی مواد در طراحی)

(b): لایه های لاستیکی (حداکثر کرنش برشی):

ضوابط نشریه 523

حاصل از نیروی افقی — حاصل از پیچش — حاصل از فشار

$$\gamma_c + \gamma_t + \gamma_{eq} \le \frac{\varepsilon_u}{1.33}$$

بار قائم موجود برروی جداساز ها تحت بار مرده و زنده — تغییرطول در زمان گسیختگی

$$\gamma_c \approx 6s\frac{P_{DL+LL}}{E_c A} \le \frac{\varepsilon_u}{3}$$

تنها 30% از ظرفیت جداگر ها تحت بار سرویس استفاده می شود.

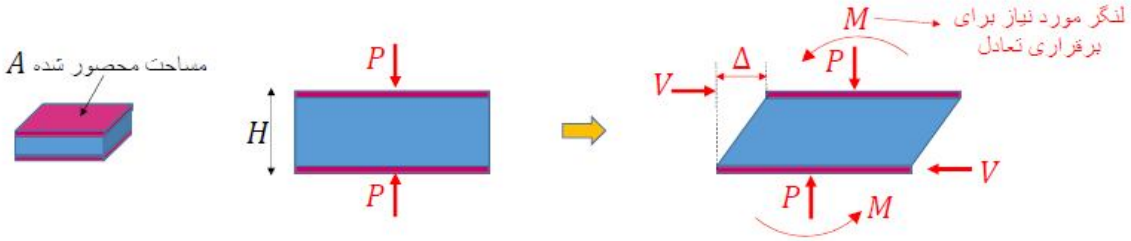
کل ارتفاع لایه های لاستیک — جابجایی افقی جداگر — بار قائم موجود برروی جداساز ها تحت بار مرده و زنده

$$\gamma_{eq} \approx \frac{D}{T_r} \qquad \gamma_c \approx 6s\frac{P_{DL+LL+EQ}}{E_c A_{re}}$$

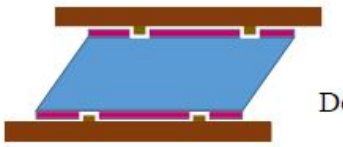
خروج از مرکزیت نیرو — عرض جداگر — ابعاد سازه

$$\gamma_t \approx \frac{B^2}{2T_r t_r} = \frac{12De}{b^2 + l^2}$$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)



معادله تعادل ⇒ $VH + P\Delta = 2M$, $V = k_d\Delta$ ⇒ $M = \frac{k_d H + P}{2}\Delta$



(a): اتصال زبانه ای
Dowelled Connections

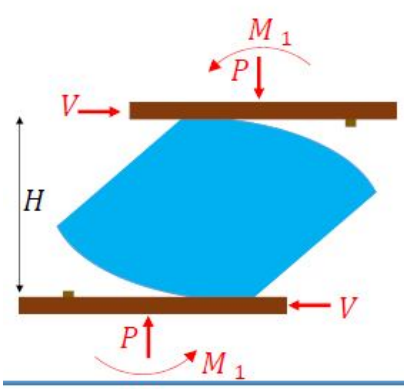
جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)



(b): اتصال پیچی
Bolted Connections

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

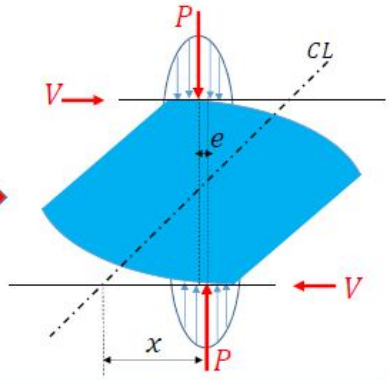
(a): اتصال زبانه ای



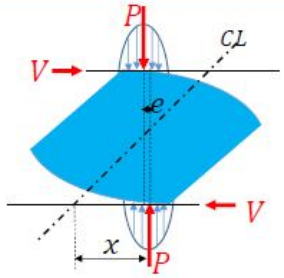
این جداگر طوری طراحی شده است که هیچگاه در کشش نیافتد.

$M = Pe$

لنگر مقاوم در این جداگر از خروج از مرکزیت محل اثر بار قائم در بالا و پایین جداگر تشکیل شده است.



جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

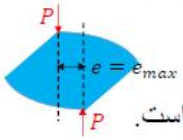


(a): اتصال زبانه ای

$$\vec{x} + \vec{e} + \vec{x} = \vec{\Delta} \Rightarrow x - e + x = \Delta \Rightarrow e = 2x - \Delta$$

$$Pe = VH \Rightarrow \overset{\text{جداساز خطی}}{P(2x - \Delta) = k_d \Delta H} \Rightarrow x = \left(\frac{k_d H}{P} + 1\right)\frac{\Delta}{2}$$

با افزایش Δ ، x آنقدر زیاد می شود تا به مقدار حداکثر خود، یعنی زمانی که بار قائم تنها در دو گوشه های جداگر تحمل می شود، میرسد. در این نقطه x برابر با $B/2$ (نصف عرض جداگر) است.

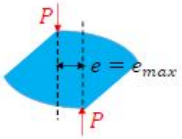


★ در زمانی که x به مقدار $B/2$ می رسد، Δ برابر با Δ_{cr} است.

★ در زمانی که x به مقدار $B/2$ می رسد، e برابر باحداکثر مقدارخود e_{max} تحت جابجایی Δ_{cr} است.

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(a): اتصال زبانه ای



$$x = x_{max} = \frac{B}{2} \Rightarrow \Delta = \Delta_{cr} \Rightarrow e = B - \Delta_{cr}$$

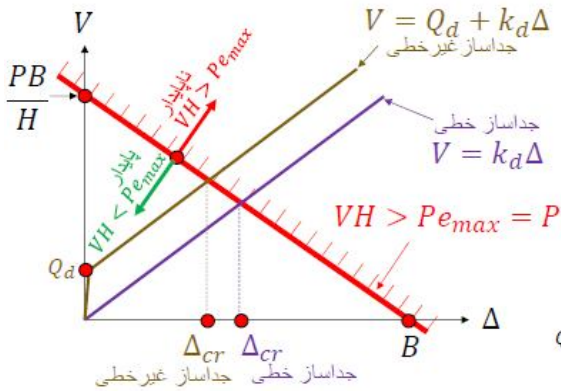
$$x = \left(\frac{k_d H}{P} + 1\right)\frac{\Delta}{2} \quad \text{و} \quad x = \frac{B}{2} \quad \text{و} \quad \Delta = \Delta_{cr} \Rightarrow \Delta_{cr} = \left(\frac{PB}{k_d H + P}\right)$$

جابجایی بحرانی
جابجایی حدی واژگونی
Rollover Displacement

مرحله نا پایداری	نقطه بحرانی	مرحله پایداری
$Pe_{max} < VH$	$Pe_{max} = VH$	$Pe_{max} > VH$
$\Delta > \Delta_{cr}$	$\Delta = \Delta_{cr}$	$\Delta < \Delta_{cr}$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(a): اتصال زبانه ای



جداساز خطی: $\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB}{k_d H + P}\right)$

جداساز غیرخطی: $\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB - Q_d H}{k_d H + P}\right)$

$VH = Pe_{max} = P(B-\Delta_{cr}) \Rightarrow (Q_d + k_d\Delta_{cr})H = P(B-\Delta_{cr})$

$Q_d H + k_d\Delta_{cr}H = PB - P\Delta_{cr} \Rightarrow k_d\Delta_{cr}H + P\Delta_{cr} = PB - Q_d H$

$\Delta_{cr} = \left(\frac{PB - Q_d H}{k_d H + P}\right)$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(a): اتصال زبانه ای

مثال:مطلوبست تعیین جابجایی بحرانی واژگونی جداگر زیر برای هر یک از حالات مورد نظر: جداگر با مقطع مربعی $A = 100\ in^2$

ضخامت و تعداد لایه های لاستیکی $5 \times \frac{1"}{2}$ ضخامت و تعداد لایه های فولادی $4 \times \frac{1"}{8}$ ضخامت ورقه های فوقانی و تحتانی $\frac{3"}{4}$ $E = 0.1\ ksi$

$H = 5 \times \frac{1"}{2} + 4 \times \frac{1"}{8} + 2 \times \frac{3"}{4} = 4.5"$ $T_r = 5 \times \frac{1"}{2} = 2.5"$ $k_d = \frac{GA}{T_r} = \frac{0.1 \times 100}{2.5} = 4\frac{k}{in}$

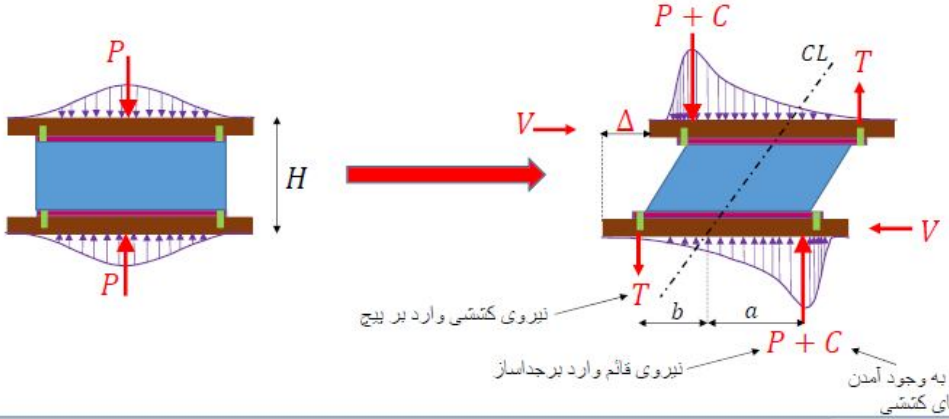
جداساز خطی $\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB}{k_d H + P}\right)$

جداساز غیرخطی $\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB - Q_d H}{k_d H + P}\right)$

حالت	$Q_d(kips)$	$P_{min}(kips)$	$\Delta_{cr,min}(in)$	$P_{max}(kips)$	$\Delta_{cr,max}(in)$
جداساز خطی	0	75	8.1"	150	8.9"
جداساز غیر خطی	10	75	7.6"	150	8.7"

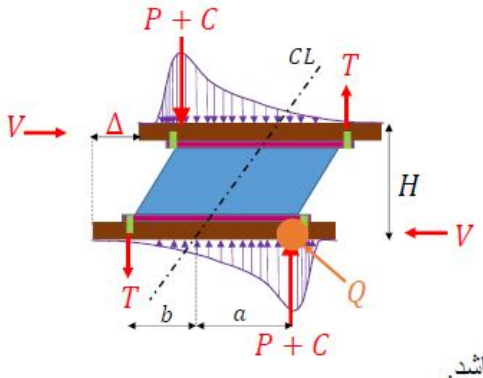
جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(b): اتصال پیچی



جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(b): اتصال پیچی



تعادل حول نقطه Q

$$VH = T(b+a) + (P+C)(2a-\Delta) + T(b+\Delta-a)$$

$$C = T \quad \Rightarrow \quad VH = T(2b+2a) + P(2a-\Delta)$$

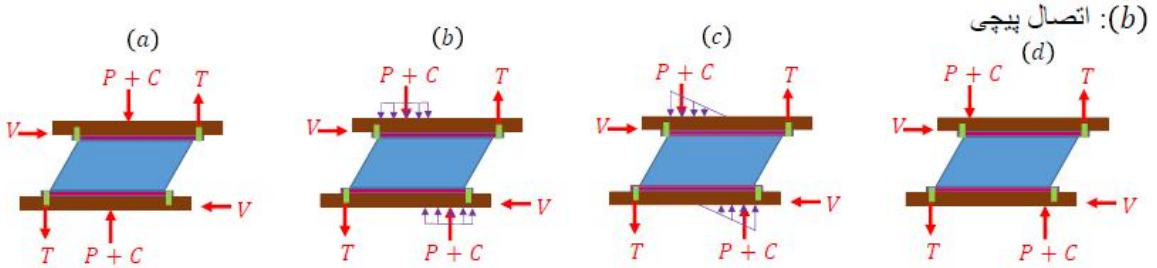
$$T = \frac{VH - P(2a-\Delta)}{(2b+2a)} = \frac{(k_d H + P)\Delta - 2Pa}{(2b+2a)}$$

نیروی کششی وارد بر پیچ

★ نیروی کششی موجود در پیچ ها تابع نقطه اثر بار $P+C$ می باشد.

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(b): اتصال پیچی



حد بالا در طراحی

$a = 0$

$$T = \frac{(k_d H + P)}{2b}\Delta$$

حد پایین در طراحی

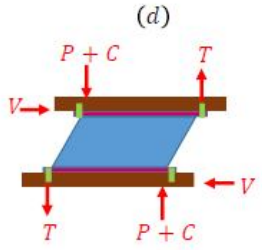
$a = B/2$

$$T = \frac{(k_d H + P)\Delta - PB}{B + 2b}$$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

(b): اتصال پیچی

حالت (d) بسیار مرسوم در تخمین جابجایی بحرانی می باشد.



حالت حدی را که پیچ ها وجود ندارند را در نظر بگیرید. $\Rightarrow \quad T = 0$

$$T = \frac{(k_d H + P)\Delta - PB}{B + 2b} = 0$$

همانند روابط جداساز ها با اتصال زبانه ای

جداساز خطی

$$\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB}{k_d H + P}\right)$$

جداساز غیرخطی

$$\Delta_{cr} = \Delta_{roll} = \left(\frac{PB - Q_d H}{k_d H + P}\right)$$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی واژگونی در طراحی)

ضابطه نشریه 523

کوچکترین بعد یا قطر جداگر

بار قائم شامل بار مرده، زنده و زلزله

$$D \le \Delta_{roll} = \left(\frac{P_{DL+LL+EQ} \times B}{k_{eff} H + P_{DL+LL+EQ}} \right)$$

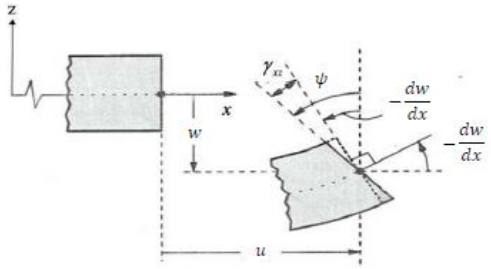
سختی موثر جداگر

ارتفاع کل جداگر

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

Timoshenko beam theory — نظریه تیر تیموشنکو

Shear deformation beam theory — نظریه تغییر شکل برشی تیر



- مقطع هر صفحه بعد از تغییر شکل صفحه باقی می ماند ولی نه لزوما عمود.

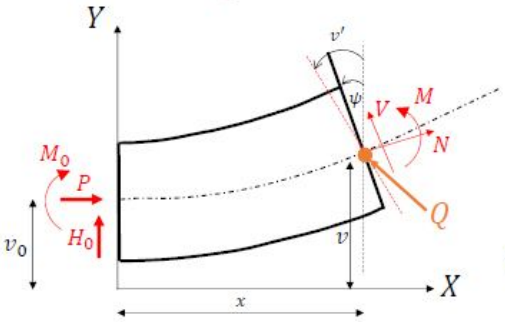
- فرض خمش تیر های تیموشنکو برای تیر های عمیق و یا کوتاه صحیح می باشد.

$$\frac{L}{t} < 10$$

- تغییر شکل ناشی از تنش برشی در طول مقطع صرف نظر نمی شود.

J. A. Haringx. 1947., On highly compressible helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings. III, Philips Res. Rep. 4, 206-220

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)



$$V = GA_s(v' - \psi) \quad (1) \qquad M = E_b I_s(\psi') \quad (2)$$

ارتفاع کل جداگر

$$A_s = \frac{H}{T_r} A \quad \text{و} \quad I_s = \frac{H}{T_r} I$$

مجموع ضخامت لایه های لاستیکی

از آنجا که فولاد به صورت کامپوزیت با لاستیک کار نمی کند.

تعادل نیرودر راستای سطح مقطع تغییر شکل یافته ⇒ $V + H_0 - P\psi = 0$ (3)

لنگر حول نقطه Q ⇒ $M + P(v - v_0) - M_0 - H_0 x = 0$ (4)

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

① ③ ⇨ $GA_s(v' - \psi) + H_0 - P\psi = 0$ ⑤ ⇨ $\psi = \frac{GA_s v' + H_0}{GA_s + P}$ ⑥ ⇨ $\psi' = \frac{GA_s}{GA_s + P} v''$ ⑦

② ④ ⇨ $E_b I_s \psi' + P(v - v_0) - M_0 - H_0 x = 0$ ⑧

⑦ ⑧ ⇨ $E_b I_s \frac{GA_s}{GA_s + P} v'' + Pv = Pv_0 + M_0 + H_0 x$ ⑨

⑤ ⇨ $v' = \frac{GA_s + P}{GA_s}\psi - \frac{H_0}{GA_s}$ ⑩ ⑧ ⇨ $E_b I_s \psi'' + Pv' + H_0 = 0$ ⑪

⑩ ⑪ ⇨ $E_b I_s \psi'' + \frac{P(GA_s + P)}{GA_s}\psi = \frac{P}{GA_s} H_0 + H_0$ ⇨ $E_b I_s \frac{GA_s}{GA_s + P}\psi'' + P\psi = H_0$ ⑫

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

$E_b I_s \frac{GA_s}{GA_s + P} v'' + Pv = Pv_0 + M_0 + H_0 x$ ⑨ — تعادل لنگر

$E_b I_s \frac{GA_s}{GA_s + P}\psi'' + P\psi = H_0$ ⑫ — تعادل برش

تعریف دو پارامتر

$\alpha^2 = \frac{P(GA_s + P)}{E_b I_s GA_s}$ ⑬ $\qquad \beta = \frac{GA_s}{GA_s + P}$ ⑭

حل معادله دیفرانسیل

⑨ ⑬ ⇨ $v = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + v_0 + \frac{M_0}{P} + \frac{H_0}{P} x$ ⑮

⑫ ⑬ ⇨ $\psi = C\cos(\alpha x) + D\sin(\alpha x) + \frac{H_0}{P}$ ⑯

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

ضرایب A، B، C و D مستقل نیستند و از رابطه زیر تبعیت می کنند:

$v' = \frac{GA_s + P}{GA_s}\psi - \frac{H_0}{GA_s}$ ⑩ ⑭ ⇨ $v' = \frac{1}{\beta}\psi - \frac{H_0}{GA_s}$ ⑰

⑮ ⑯ ⑰ ⇨ $-\alpha A\sin(\alpha x) + \alpha B\cos(\alpha x) + \frac{H_0}{P} = \frac{C}{\beta}\cos(\alpha x) + \frac{D}{\beta}\sin(\alpha x) + \frac{H_0}{\beta P} - \frac{H_0}{GA_s}$

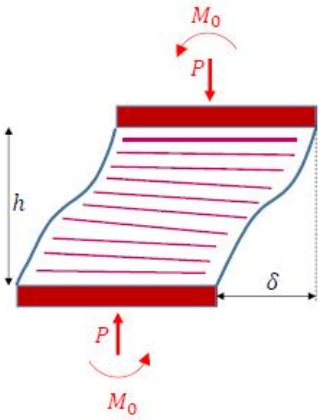
ضرایب متناظر با $\sin(\alpha x)$ و $\cos(\alpha x)$ را برابر با صفر قرار می دهیم. ⇨ $C = \alpha\beta B$ ⑱ $\quad D = -\alpha\beta A$ ⑲

⑮ ⇨ $v = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + v_0 + \frac{M_0}{P} + \frac{H_0}{P} x$ ⑳

⑯ ⑱ ⑲ ⇨ $\psi = \alpha\beta B\cos(\alpha x) - \alpha\beta A\sin(\alpha x) + \frac{H_0}{P}$ ㉑

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

در یک جداگر داریم:



$$v(0)=0 \quad \psi(0)=0 \quad \psi(h)=0 \quad H_0=0$$

(20) ⇒ $A+\frac{M_0}{P}=0$ (22) (21) ⇒ $\psi(0)=\alpha\beta B=0$ (23)

(21) ⇒ $\psi(h)=-\alpha\beta A\sin(\alpha h)=0$ ⇒ $\alpha h=\pi$ (24)

$\frac{M_0}{P}=\frac{1}{2}\delta$ ⇒ (22) (20) ⇒ $v=\frac{1}{2}\delta\left(1-\cos\left(\frac{\pi x}{h}\right)\right)$ (25)

(21) (23) (24) ⇒ $\psi=\frac{1}{2}\delta\alpha\beta\sin\left(\frac{\pi x}{h}\right)$ (26)

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

$\alpha^2=\frac{P(GA_s+P)}{E_bI_sGA_s}$ (13) و $\alpha h=\pi$ (24) ⇒ $\frac{P(GA_s+P)}{GA_s}=\frac{\pi^2E_bI_s}{h^2}=P_E$ (27) ← بار کمانشی اویلر

$GA_s=GA\frac{h}{T_r}=P_s$ (28) ← سختی برشی واحد طول جداگر (27) (28) ⇒ $P^2+P_sP-P_sP_E=0$ (29)

از حل این معادله، بار بحرانی قائم بر روی جداگر بدست می آید.

(29) ⇒ $P_{crit}=\frac{-P_s+\sqrt{P_s^2+4P_sP_E}}{2}$ ⟹ در اکثر انواع باربر ها که s برابر یا بزرگتر از 5 است، $P_E\gg P_s$ ⟹ $P_{crit}=\sqrt{P_sP_E}$ (30)

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

$E_b=E(1+2/3\,S^2)$ دایروی
$E_b=E(1+0.742S^2)$ مربعی
⟹ $s\geq 5$ ⟹ $E_b\approx\frac{2}{3}S^2E$ ⟹ $\nu=0.5$ ⟹ $E=3G$ ⟹ $E_b\approx 2S^2G$ (31)

(27) $P_E=\frac{\pi^2E_bI_s}{h^2}$ و $I_s=\frac{h}{T_r}I$ و $r^2=\frac{I}{A}$ و (31) ⇒ $P_E=\frac{\pi^2 2S^2G\,Ar^2}{hT_r}$ (32)

$P_s=GA_s=G\frac{h}{T_r}A$ (33) $P_{crit}=\sqrt{P_sP_E}$ (30) (32) (33) ⇒ $P_{crit}=\sqrt{G\frac{h}{T_r}A\,\frac{\pi^2 2S^2G\,Ar^2}{hT_r}}$

⇒ $P_{crit}=\frac{\sqrt{2}\pi GAsr}{T_r}$ با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ⇒ $\boxed{P_{crit}=\frac{A_{re}}{A}\frac{\sqrt{2}\pi GAsr}{T_r}}$

جداساز های لاستیکی (حالت های حدی کمانشی در طراحی)

ضابطه نشریه 523

مقطع دایروی $r = \frac{d}{2}$ مقطع مربعی $r = \frac{B\sqrt{3}}{2}$

بار قائم شامل بار مرده و زنده

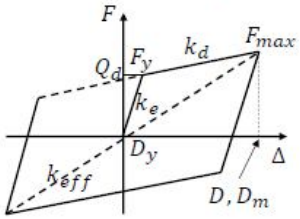
شعاع ژیراسیون مقطع

$$\frac{P_{DL+LL}}{A} \le \sigma_{crit} = \frac{\sqrt{2}\pi Gs}{T_r} r$$

تنش قائم بحرانی

ارتفاع کل لایه های لاستیکی

جداساز های لاستیکی با هسته سربی (چند نکته تکمیلی)



- بدست آوردن پارامتر Q_d در طراحی جداساز های سربی اهمیت زیادی دارد.

میرایی ویسکوز $Area = \pi c \omega_n {D_m}^2$ = میرایی پسماند $Area = 4Q_d(D_m - D_y)$

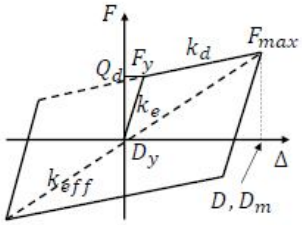
$$4Q_d(D_m - D_y) = \pi c \omega_n {u_{max}}^2$$

$$\beta = \zeta = \frac{c}{c_{cr}}$$

$$c_{cr} = \frac{2k_{eff}}{\omega_n}$$

$$\Rightarrow 4Q_d(D_m - D_y) = 2\pi k_{eff} \zeta {D_m}^2 \quad (1)$$

جداساز های لاستیکی با هسته سربی (چند نکته تکمیلی)



(1) $\Rightarrow 4Q_d(D_m - D_y) = 2\pi k_{eff} \zeta {D_m}^2 \Rightarrow Q_d = \frac{\pi k_{eff} \zeta {D_m}^2}{2(D_m - D_y)}$ (2)

ضوابط نشریه 523

(2) $\Rightarrow$ با فرض آنکه $D_m \gg D_y \Rightarrow Q_d = \frac{1}{2}\pi k_{eff} \zeta D_m$ (3)

- سطح تسلیم تئوری سرب برابر با 10.5 MPa است. اما سطح تسلیم ظاهری معمولا 7 MPa تا 8.5 MPa فرض می شود.

$\tau_y \approx 1.3\ ksi$

$F_y = \tau_y \times A_p$ ← سطح مقطع هسته سربی با فرض مقطع دایروی $\Rightarrow F_y = \tau_y \times \pi \frac{d_p^2}{4}$ (4)

(4) $\Rightarrow$ $D_y \approx 0$ با فرض آنکه $\Rightarrow F_y \approx Q_d \Rightarrow d_p = \sqrt{\frac{4Q_d}{\pi \tau_y}}$ (5) تخمین قطر هسته سربی

جداساز های لاستیکی با هسته سربی (چند نکته تکمیلی)

- در طراحی همواره مدنظر داشته باشید که:

نیروی زلزله ⟵ $F_{service} < F_y < F_{seismic}$ ⟶ بار سرویس (باد)

- انرژی مستهلک شده در سرب به صورت اتلاف انرژی از طریق حرارت می باشد.

یک چرخش کامل در کرنش برشی 100% ایجاد 1 درجه فارنهایت حرارت می کند.

- اگر نیروی تسلیم یک هسته سربی در بارگذاری سریع برابر با F_y باشد، نیروی تسلیم همان هسته سربی در بارگذاری آهسته تقریبا $F_y/4$ خواهد بود.

- محصور شدگی سرب در جداگر دارای اهمیت بالایی است. فاصله بین لایه های فولادی را کوچک طراحی کنید. $t_r \leq 0.5\ in.$

جداساز های لاستیکی با هسته سربی (چند نکته تکمیلی)

- هسته سربی نباید خیلی کوچک و یا خیلی بزرگ باشد:

ضلع یا قطر جداگر — ارتفاع هسته سربی

$$\frac{B\ or\ d}{6} < d_p < \frac{B\ or\ d}{3} \qquad \text{ضابطه نشریه 523} \quad 1.25 < \frac{h_p}{d_p} < 5.0$$

- ضریب شکل : $S = \frac{\text{سطح مقطع لایه}}{\text{سطح مقطع شکم داده}}$

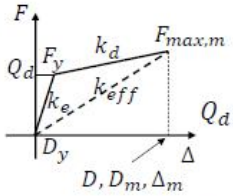
دایروی با حفره	دایروی بدون حفره	مربعی با حفره	مربعی بدون حفره
$S = \frac{\frac{\pi}{4}(d^2 - d_p^2)}{\pi(d + d_p)t_r}$	$S = \frac{\frac{\pi}{4}(d^2 - d_p^2)}{\pi d t_r}$	$S = \frac{B^2 - \frac{\pi}{4}d_p^2}{4Bt_r + \pi d_p t_r}$	$S = \frac{B^2 - \frac{\pi}{4}d_p^2}{4Bt_r}$

- اگر حفره ای در ورقه های فولادی وجود دارد، ضخامت لایه های فولادی باید به نسبت $\frac{2A_{gros}}{A_{net}}$ افزایش یابد.

جداساز های لاستیکی با میرایی بالا (چند نکته تکمیلی)

بدست آوردن پارامترهای Q_d ، k_d و k_e در جداگر های لاستیکی با میرایی بالا:

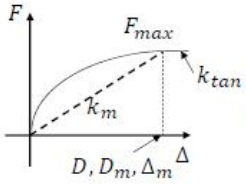
<u>رفتار ایده آل دوخطی:</u>



$$Q_d = F_m - k_d\Delta_m = F_m - \frac{\bar{G}_{tan}A}{T_r}\Delta_m \quad (2)$$

$\bar{G}_{tan}$ برابر است با میانگین مدول برشی های مماسی

<u>داده های آزمایشگاهی:</u>



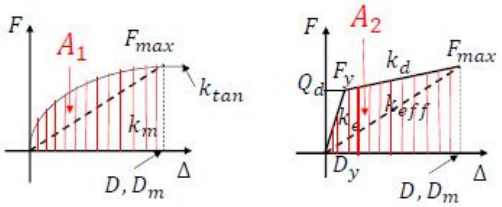
$$F_m = k_m\Delta_m = \frac{G_m A}{T_r}\Delta_m \quad (1)$$

G_m عبارتست از مدول برشی در کرنش برشی برابر با: $\gamma_m = \frac{\Delta_m}{T_r}$

(1) (2) ⇨ $Q_d = \left(\frac{G_m A}{T_r} - \frac{\bar{G}_{tan}A}{T_r}\right)\Delta_m$ ⇨ $\boxed{Q_d = (G_m - \bar{G}_{tan})A\gamma_m}$

جداساز های لاستیکی با میرایی بالا (چند نکته تکمیلی)

بدست آوردن پارامتر های Q_d ، k_d و k_e در جداگر های لاستیکی با میرایی بالا:



$$A_1 = A_2 \quad ①$$

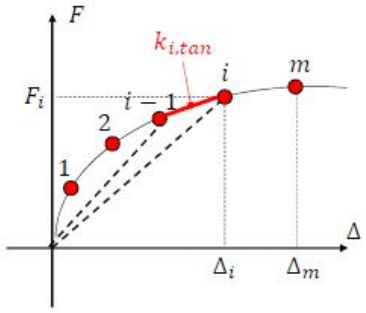
$$A_2 = \frac{1}{2}(Q_d + F_m)\Delta_m - \frac{1}{2}Q_d\Delta_y \quad ②$$

① ② ⇨ $A_1 = \frac{1}{2}(Q_d + F_m)\Delta_m - \frac{1}{2}Q_d\Delta_y$ ⇨ $\boxed{\Delta_y = \left(1 + \frac{F_m}{Q_d}\right)\Delta_m - \frac{2A_1}{Q_d}}$

$k_e = \frac{F_y}{\Delta_y}$ و $F_y = Q_d + k_d\Delta_y$ ⇨ $\boxed{k_e = \frac{Q_d}{\Delta_y} + k_d}$

جداساز های لاستیکی با میرایی بالا (چند نکته تکمیلی)

نحوه محاسبه $\bar{G}_{tan}$:



$$F_i = \frac{G_i A}{T_r}\Delta_i \Rightarrow F_i = G_i A\gamma_i$$

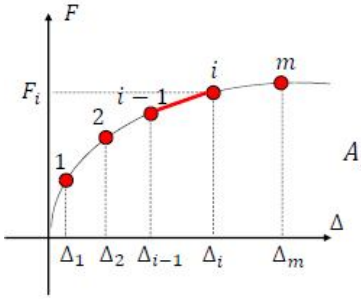
$$\Rightarrow k_{i,tan} = \frac{F_i - F_{i-1}}{\Delta_i - \Delta_{i-1}} \Rightarrow k_{i,tan} = \overbrace{\boxed{\frac{G_i\gamma_i - G_{i-1}\gamma_{i-1}}{\gamma_i - \gamma_{i-1}}}}^{G_{i,tan}}\frac{A}{T_r}$$

$$\Rightarrow k_{i,tan} = G_{i,tan}\frac{A}{T_r}$$

$\bar{G}_{tan}$ میانگین $G_{i,tan}$ ها می باشد.

جداساز های لاستیکی با میرایی بالا (چند نکته تکمیلی)

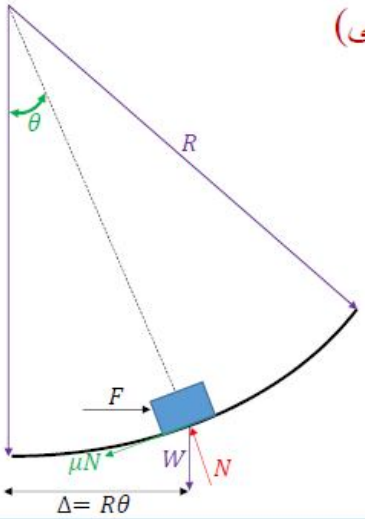
نحوه محاسبه A_1 :



$$A_1 \approx \frac{1}{2}F_1\Delta_1 + \frac{1}{2}(F_1 + F_2)(\Delta_2 - \Delta_1) + \cdots + \frac{1}{2}(F_{i-1} + F_i)(\Delta_i - \Delta_{i-1}) + \cdots$$

$$A_1 \approx \frac{1}{2}[G_1\gamma_1^2 + (G_1\gamma_1 + G_2\gamma_2)(\gamma_2 - \gamma_1) + \cdots + (G_{i-1}\gamma_{i-1} + G_i\gamma_i)(\gamma_i - \gamma_{i-1}) + \cdots]AT_r$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)



$W =$ وزن جسم

$N =$ نیروی عکس العمل عمود بر سطح

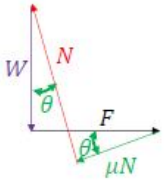
$F =$ نیروی لازم برای حرکت دادن جسم به سمت راست

$\mu N =$ نیروی اصطکاکی که در برابرحرکت جسم مقاومت می کند

جداساز های لغزشی (پاندولی)

رابطه تعادل

$$F = N\sin\theta + \mu N\cos\theta \qquad W = N\cos\theta - \mu N\sin\theta$$

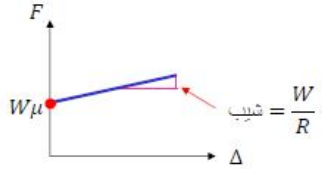


$$F = \frac{\sin\theta + \mu\cos\theta}{\cos\theta - \mu\sin\theta}W \Rightarrow F = \frac{\tan\theta + \mu}{1 - \mu\tan\theta}W \xrightarrow[\text{خیلی کوچک } \mu\tan\theta]{\theta,\mu \text{ کوچک}} F = W\tan\theta + W\mu$$

$$\Rightarrow F = W\theta + W\mu \Rightarrow \boxed{F = W\mu + \Delta\frac{W}{R}}$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)

$$F = W\mu + \Delta\frac{W}{R} \Rightarrow$$



$$\Rightarrow \boxed{\begin{aligned} Q_d &= W\mu \\ k_d &= \frac{W}{R} \end{aligned}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_d = 2\pi\sqrt{\frac{W}{g}\frac{1}{k_d}} \Rightarrow \boxed{T_d = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}}$$

پریود زمان شروع لغزش، پریود ثانویه

★ پریود لحظه لغزش تنها تابع شعاع انحنای سطح جداساز می باشد و همچنین مستقل از وزن می باشد.

جداساز های لغزشی (پاندولی)

$$k_{eff} \times D_m = Q_d + k_d \times D_m \Rightarrow k_{eff} = \frac{Q_d}{D_m} + k_d \Rightarrow \boxed{k_{eff} = \frac{W\mu}{D_m} + \frac{W}{R}}$$

ضابطه نشریه 523

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{g}\frac{1}{k_{eff}}} \Rightarrow T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{g}\frac{1}{W\left(\frac{\mu}{D_m}+\frac{1}{R}\right)}} \Rightarrow \boxed{T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{1}{g\left(\frac{\mu}{D_m}+\frac{1}{R}\right)}}}$$

★ پریود موثر تابع شعاع انحنای سطح جداساز، ضریب اصطکاک و جابجایی ماکزیمم می باشد ولی همچنان مستقل از وزن می باشد.

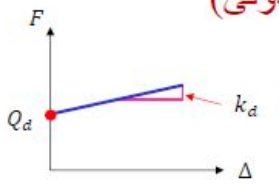
$$T_d = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$$

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{1}{g\left(\frac{\mu}{D_m}+\frac{1}{R}\right)}}$$

شعاع R	30"	60"	120"
جابجایی D_m	3"	6"	12"
ضریب اصطکاک μ	5%	5%	5%
پریود ثانویه T_d	1.75 s	2.48 s	3.50 s
پریود موثر T_{eff}	1.43 s	2.02 s	2.86 s

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین شعاع انحنا:



با داشتن این دو پارامتر از طراحی اولیه

$$\boxed{R = \frac{W}{k_d}}$$

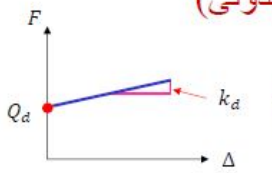
مقدار حداقل پیشنهادی برای k_d (AASHTO) $k_d \geq \frac{0.05W}{D_m} \Rightarrow \frac{W}{R} \geq \frac{0.05W}{D_m} \Rightarrow \boxed{R \leq 20D_m}$

ضابطه نشریه 523

$$T_d = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \Rightarrow \boxed{R = g\left(\frac{T_d}{2\pi}\right)^2}$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین ضریب اصطکاک:



با داشتن این دو پارامتر
از طراحی اولیه

$$\mu = \frac{Q_d}{W}$$

انتخاب نوع تفلون:

ضریب اصطکاک در سرعت بالا

عددی که دیمانسیون معکوس سرعت را دارد و وابسته به فشار وارده و شرایط سطوح اصطکاکی است.

$$\mu = f_{max} - D_f \times e^{-a|\dot{u}|}$$

$D_f = f_{max} - f_{min}$ اختلاف ضریب اصطکاک در سرعت بالا و پایین

$\dot{u} = \omega u_{max} = \frac{2\pi}{T_d} D_m$ سرعت حداکثر سیستم

پریود ثانویه

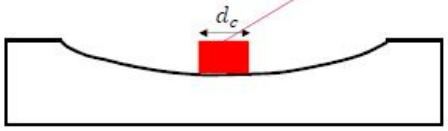
جداساز های لغزشی (پاندولی)

نمونه ای از جدول تعیین ضریب اصطکاک:

Type of Teflon	Pressure (psi)	Sliding Direction	f_{max} (%)	D_f (%)	a (sec/in)
UF	1000	P	11.93	9.27	0.60
UF	2000	P	8.70	6.95	0.60
UF	3000	P	7.03	5.52	0.80
UF	6500	P	5.72	4.85	0.50
15GF	1000	P	14.61	10.60	0.60
15GF	2000	P	10.08	5.80	0.55
15GF	3000	P	8.49	4.17	0.60
15GF	6500	P	6.27	3.12	0.70
25GF	1000	P	13.20	7.66	0.65
25GF	2000	P	11.20	6.33	0.65
25GF	3000	P	9.60	5.20	0.32
25GF	6500	P	5.89	2.70	0.90
UF	1000	T	14.20	11.81	0.45
UF	2000	T	10.50	8.78	0.70
UF	3000	T	8.20	5.00	0.65
UF	6500	T	5.50	4.39	0.45

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین اندازه قطعه لغزنده تفلونی:



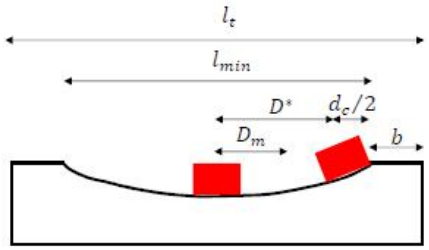
A_c سطح تماس $A_c = \frac{W}{p_C}$ فشار موجود بر سطح تماس

d_c قطر قطعه لغزنده تفلونی

$$d_c = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}}$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین قطر ظرف منحنی مقعر :



توصیه طراحی(AASHTO) $D^* = 1.5D_m$

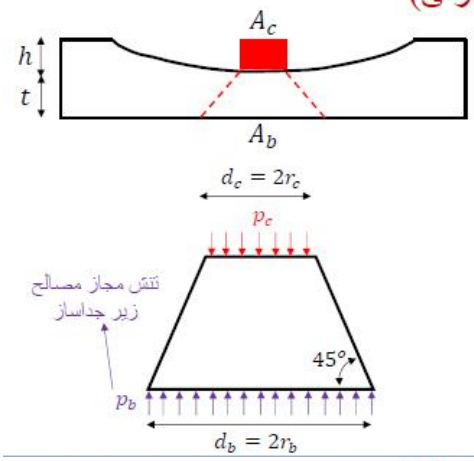
$$l_{min} = 2\left(D^* + \frac{d_c}{2}\right)$$

$$l_{design} = 1.1 \times 2\left(D^* + \frac{d_c}{2}\right)$$

$$l_{total} = l_{design} + 2b$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین ضخامت ظرف منحنی مقعر :



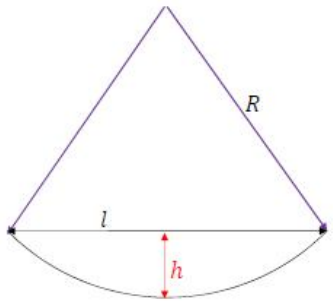
$$p_c A_c = p_b A_b \qquad \text{و} \qquad r_b = r_c + t$$

$$A_b = \frac{p_c A_c}{p_b}$$

$$A_b = \pi(r_c + t)^2 \qquad t = \sqrt{\frac{A_b}{\pi}} - r_c$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)

تعیین تغییر مکان قائم:

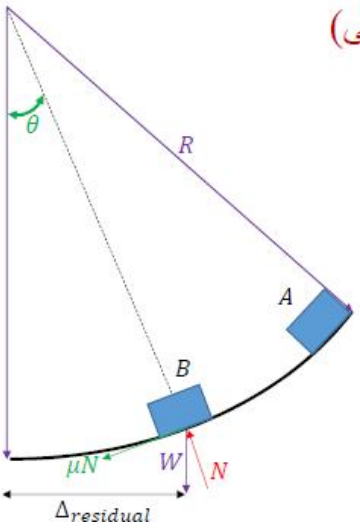


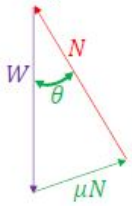
$$R^2 = (R-h)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \xrightarrow{h \text{ با فرض کوچک بودن}} h = \frac{l^2}{8R}$$

ضابطه نشریه 523

$$h = \frac{(D_m)^2}{8R}$$

جداساز های لغزشی (پاندولی)





تعیین مقدار جابجایی ماندگار :

فرض کنید جداگر از نقطه A رها شده است و در نقطه B به تعادل رسیده است:

$$N = W\cos\theta \quad و \quad \mu N = W\sin\theta \Rightarrow \mu = \tan\theta$$

$$\Rightarrow \tan\theta = \frac{\Delta_{residual}}{R} \Rightarrow \boxed{\Delta_{residual} = R\mu}$$

ضابطه نشریه 523 $\Rightarrow$ $\boxed{D \geq R\mu}$

پ

علت نیاز به نسل آینده ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه ها؟

Next-Generation Seismic Performance Assessment of Buildings

- طراحی سازه ها بر اساس آیین نامه ها یک طراحی بر اساس عملکرد نیستند. سطح عملکردی بر اساس این روش معمولا مشخص نیست و تنها یک هدف مشخص مانند امنیت جانی را تامیین می کند.

- طراحی لرزه ای بر اساس عملکرد یک روش تقریبا قدیمی تر برای طراحی و مقاوم سازی سازه ها شناخته می شود. در این روش سعی بر این می شود یک رفتار عملکردی دلخواه تحت یک زلزله فرضی آینده بدست آید.

علل نیاز:

1- آیا روش های عملکردی دقت لازم را دارند؟ 2- آیا میزان محافظه کاری در روش های عملکردی مناسب است؟

3- عدم توانایی روش های عملکردی در برآورد اقتصادی

4- نیاز به روش نوین برای ارتباط با مالک، ساکنین و افراد نا آشنا با مهندسی عمران

انواع روش های بدست آوردن نمودار های شکنندگی لرزه ای

1- روش تجربی Empirical Method:

- حاصل از شرایط قابل اطمینان مانند شرایط ساختگاه، منبع زلزله ... - تنها مختص یک سری از شرایط

- مفید برای سازه های قدیمی - تعداد رخداد ثبت شده بسیار اندک - اطلاعات ثبت شده ناکافی - شواهد خرابی واقعی

2- روش براساس قضاوت مهندسی Experiential Method:

- بر اساس نظر افراد متخصص - قابل استفاده برای شرایط گوناگون - وابستگی دقت آن به دقت نظر متخصصین

3- روش آزمایشگاهی Experimental Method:

- حاصل از شرایط ایجاد شده در فضای آزمایشگاه - شرایط محدود به نمونه های آزمایشگاهی

- تعداد رخداد ثبت شده نسبتا کافی - اطلاعات ثبت شده بسیار دقیق - شواهد خرابی محدود به نمونه های آزمایشگاهی

4- روش تحلیلی Analytical Method:

- تعداد رخداد های بسیار زیاد - قابل استفاده برای شرایط گوناگون - اطلاعات ثبت شده بسیار دقیق

- وابستگی دقت آن به دقت مدلسازی - پیچیدگی زیاد - شواهد خرابی محدود به توانمندی مدلسازی

5- روش ترکیبی Hybrid Method:

- ترکیبی از روشهای ذکر شده می باشد تا دقت و تعداد داده ها در جهت تولید نمودار های شکنندگی بالاتر رود.

اجزای تشکیل دهنده نمودار های شکنندگی لرزه ای

1- معیاری از شدت زلزله Intensity Measure (IM):

- یک مشخصه ای از شدت زلزله است مانند مقادیر ماکزیمم و یا مثلا مقادیر طیفی شتاب، سرعت، جابجایی و ... .

- این مشخصه باید به گونه ای انتخاب شود که کارآمد ترین معیار برای لحاظ کردن اثر شدت زلزله بر روی سیستم مورد نظر باشد.

2- پارامتر تقاضای مهندسی Engineering Demand Parameter (EDP):

- این مشخصه ای از تقاضا بر روی سیستم می باشد مانند جابجایی نسبی طبقه، میران چرخش اتصالات، شتاب طبقه و ... .

- مشخصه ای است که به عنوان بهترین معیار مرتبط کننده تقاضا بر روی یک سیستم و خرابی دیده شده در آن سیستم است. به عنوان مثال خرابی درون صفحه دیوار ها جابجایی نسبی طبقه و یا خرابی تیر ها میزان چرخش انتهایی آنها می باشد.

- تقاضا ی کلی Global Demand: معمولا به منظور استفاده فراگیر از نمودار های شکنندگی لرزه ای، از چند پارامتر تقاضا کلی مانند جابجایی نسبی طبقه، شتاب ماکزمم طبقه، و جابجایی ماندگار طبقه استفاده می شود.

3- میزان (سطح) خسارت (خرابی) Damage State (DS) or Limit State (LS):

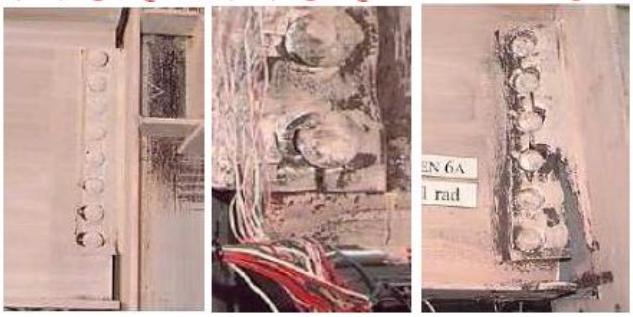
- یک مقیاسی و یا میزانی از ظرفیت یک سیستم است تا قبل از خرابی کامل آن.

- معمولا در 3 و یا 4 مقیاس بیان می شوند (ناچیز، متوسط، سنگین و کامل).

Slight Moderate Extensive Collapse

- این سطوح خرابی بر اساس نحوه عملکردی آن سیستم پس از خرابی تعیین می شود که بر طبق عواملی همچون میزان خسارت، مدت زمان عدم عملکرد سیستم وروش تعمیر آن مشخص می شود.

سطح خرابی 3 (DS3) سطح خرابی 2 (DS2) سطح خرابی 1 (DS1)



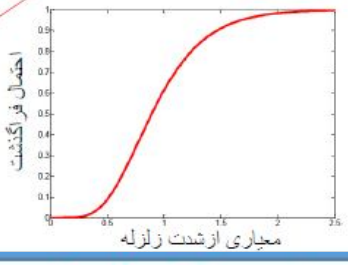
محاسبه نمودار های شکنندگی لرزه ای

معادله کامل احتمالاتی ارزیابی لرزه ای

$$P(D > C_i) = \int_0^{\infty} P(D > C_i \mid IM = im) \left| \frac{dv(IM)}{dIM} \right| dIM$$

شیب خط

معادله شکنندگی لرزه ای



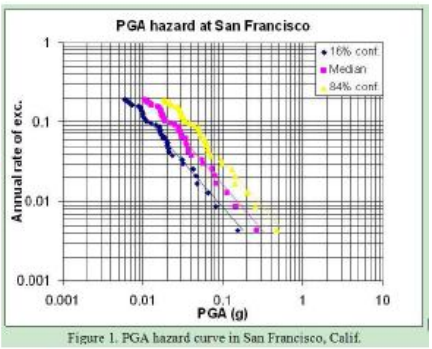
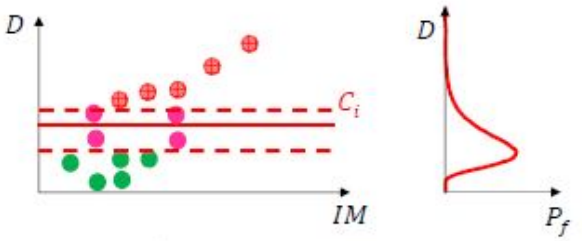
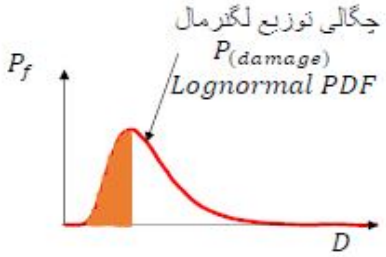


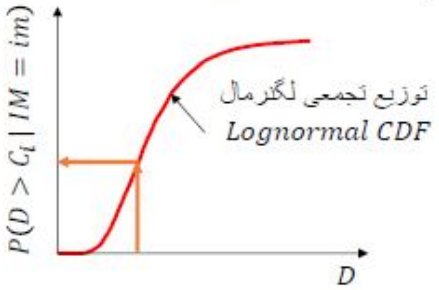
Figure 1. PGA hazard curve in San Francisco, Calif.

محاسبه نمودار های شکنندگی لرزه ای

$$P_f = P\left(\frac{D}{C_i}\right) < 1$$







محاسبه نمودار های شکنندگی لرزه ای

$$P_f = P\left(\frac{D}{C_i}\right)$$

$$P(D > C_i \mid IM = im) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{S_d}{S_c}\right)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_{d|IM}^2}}\right)$$

میانه ظرفیت

میانه تقاضا

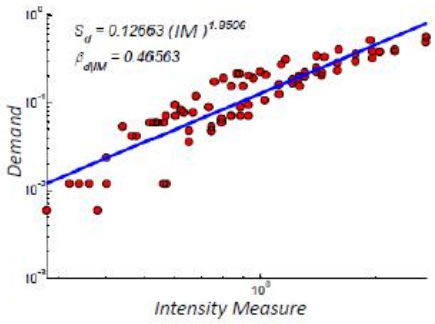
توزیع تجمعی نرمال

انحراف معیار لگاریتمی ظرفیت

انحراف معیار لگاریتمی تقاضا

محاسبه نمودار های شکنندگی لرزه ای

S_d میانه تقاضا: ازبهترین خط برازش داده شده به داده تقاضا بر حسب معیار شدت زلزله رسم می شود.



- به این خط میانه معمولا مدل احتمالی تقاضا لرزه ای نیز گفته می شود. PSDM: Probabilistic Seismic Demand Model

- این خط در اصل وظیفه مرتبط کردن داده های تقاضا بر حسب معیار شدت زلزله را دارد.

- معادله این خط معمولا به فرم های مختلفی ارائه شده است اما از معروف ترین آنها:

$$S_d = a(IM)^b$$

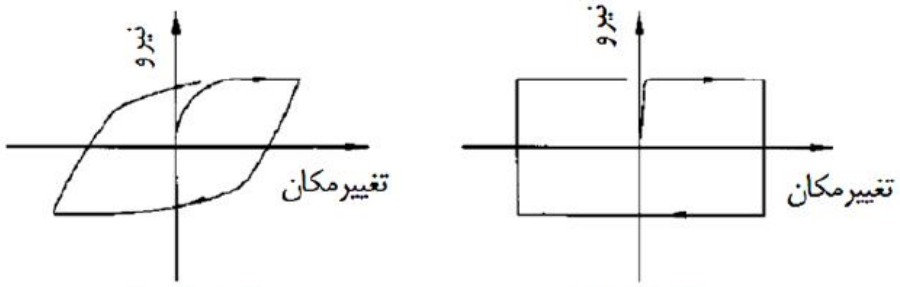
از برازش داده ها بدست می آیند.

$$P(D > C_i \mid IM = im) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{S_d}{S_C}\right)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{EDP|IM}^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(S_d) - \ln(S_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{d|IM}^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln\left(a(IM)^b\right) - \ln(S_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{d|IM}^2}}\right)$$

$$P(D > C_i \mid IM = im) = \Phi\left(\frac{\ln\left(a(IM)^b\right) - \ln(S_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{d|IM}^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \left(\frac{\ln(S_C) - \ln(a)}{b}\right)}{\frac{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{d|IM}^2}}{b}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \lambda_C}{\zeta_C}\right)$$

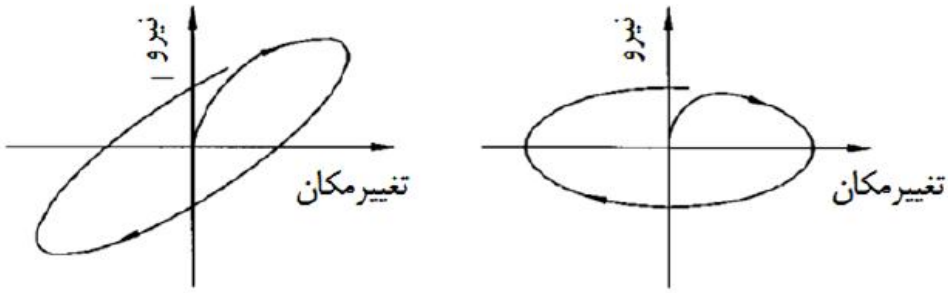
$$\beta_{d|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\ln(EDP_i) - \left(\ln(a) + b\,\ln(IM_i)\right)\right]^2}{n-2}}$$

$$\beta_C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left[\ln(c_j) - \ln(S_C)\right]^2}{N-1}}$$



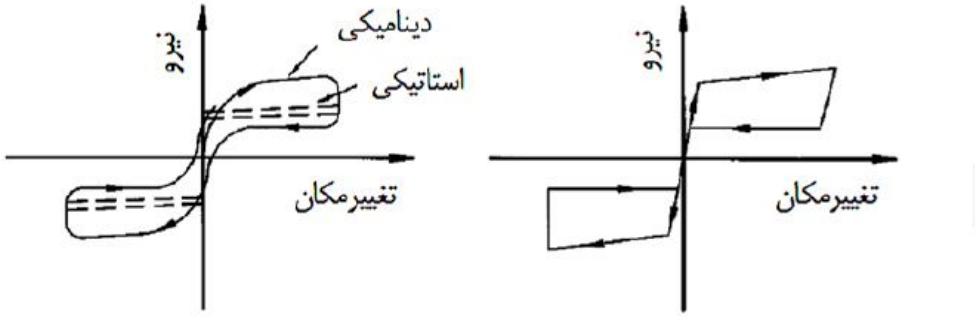
میراگر تسلیم فلزی　　میراگر اصطکاکی

نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییرمکان برای میراگرهای وابسته به تغییرمکان

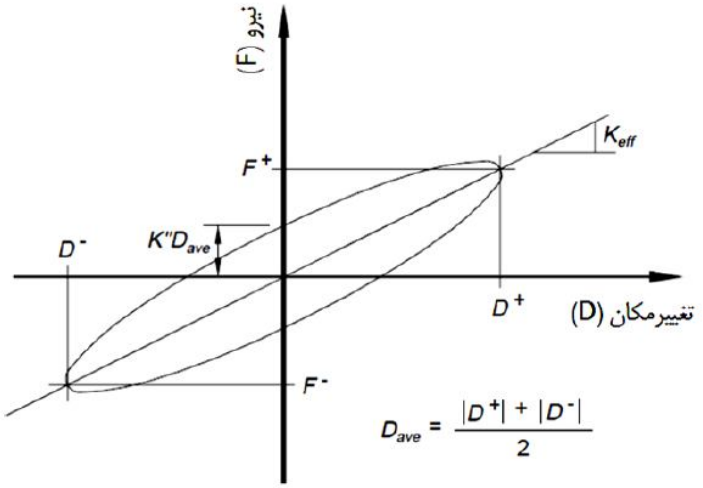


میراگر ویسکوز مایع یا جامد　　**میراگر ویسکوز مایع**

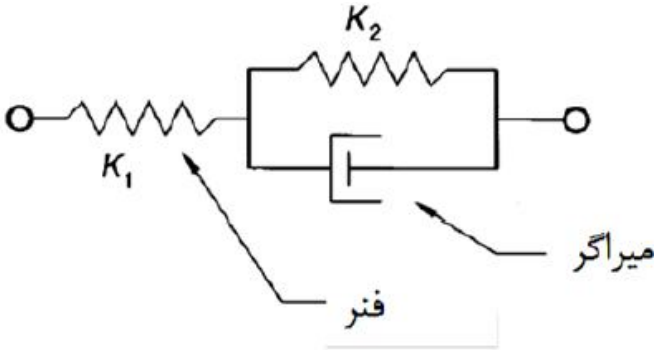
نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییرمکان برای میراگرهای وابسته به سرعت



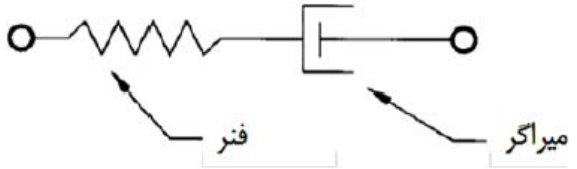
میراگر مایع با قابلیت حفظ‌کنندگی میرائی　　میراگر اصطکاکی-فنری با قابلیت Recentering



رابطه ایده‌آل بار –تغییرمکان برای میراگر Viscoelastic solid



مدل ویسکوالاستیک برای میراگر

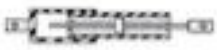
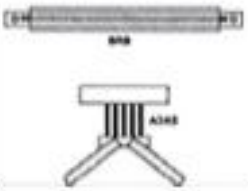
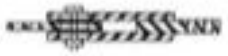
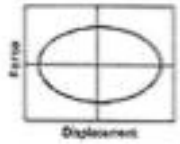
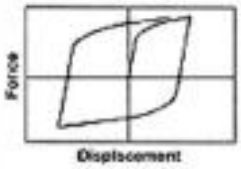
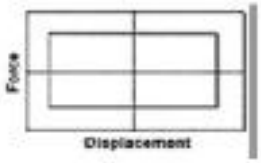
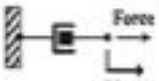
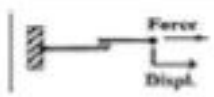


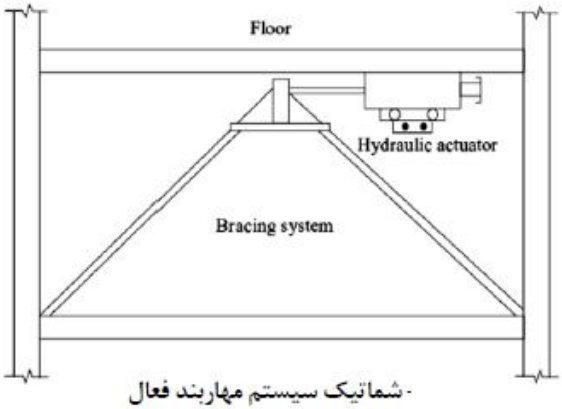
مدل ماکسول برای میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک

کاربرد سیستم های جداگر لرزه‌ای و استهلاک انرژی

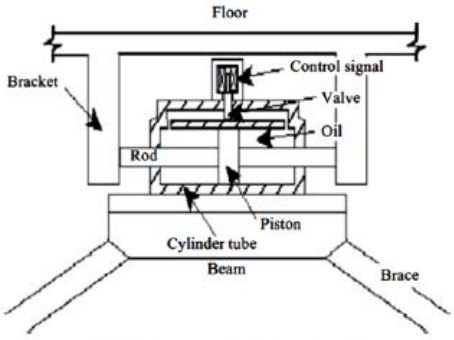
سطح عملکرد مورد انتظار	جداگر لرزه‌ای	سیستم استهلاک انرژی
خدمت رسانی بی‌وقفه	بسیار مناسب	مناسب
ایمنی جانی	محدود	مناسب
آستانه فروریزش	غیر عملی	محدود

- مقایسه میراگرهای غیرفعال مورد استفاده برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

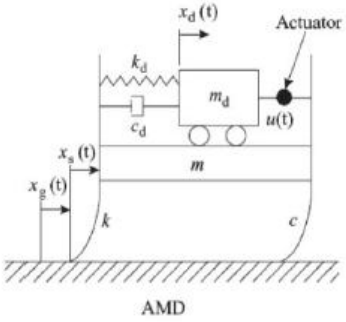
نوع میراگر	سیال ویسکوز	ویسکوالاستیک	جاری شونده فلزی	اصطکاکی
شکل شماتیک				
رفتار هیسترتیک ایده آل				
مدل فیزیکی ایده آل			وجود ندارد	
محاسن	موتر در جابجایی‌های کوچک، نیروی بازگرداننده حداقل، ساده سازی مدل میراگر برای میراگرهای خطی، عدم وابستگی خصوصیات به فرکانس بارگذاری و دما،	موتر در جابجایی‌های کوچک، وجود نیروی بازگرداننده، رفتار خطی و مدلسازی ساده میراگر، رفتار پایدار، جابجایی ماندگار کوچک	رفتار چرخه‌ای پایدار، قابلیت اعتماد در دراز مدت، عدم حساسیت به دمای بهره برداری، آشنا بودن رفتار ماده برای مهندسین	استهلاک انرژی بالا در هر چرخه، عدم حساسیت به دمای بهره‌برداری
معایب	احتمال نشت سیال (مشکل قابلیت اعتماد)	ظرفیت تنییرشکل محدود، خصوصیات وابسته به فرکانس بارگذاری و دما، احتمال جداشدگی و پارگی ماده ویسکوالاستیک (مشکل قابلیت اعتماد)	آسیب دیدگی میراگر پس از زلزله (احتمال نیاز به تعویض)، رفتار غیرخطی (احتمال نیاز به تحلیل غیرخطی)	امکان تغییر شرایط سطح لغزش در طول زمان (مشکل قابلیت اعتماد)، رفتار شدیداً غیرخطی، امکان تحریک مدهای بالاتر و نیاز به تحلیل های غیرخطی، جابجایی ماندگار در صورت عدم تامین مکانیزم بازگرداننده



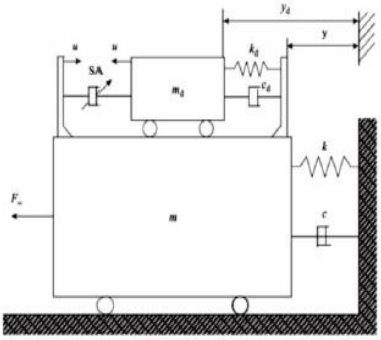
شماتیک سیستم مهاربند فعال



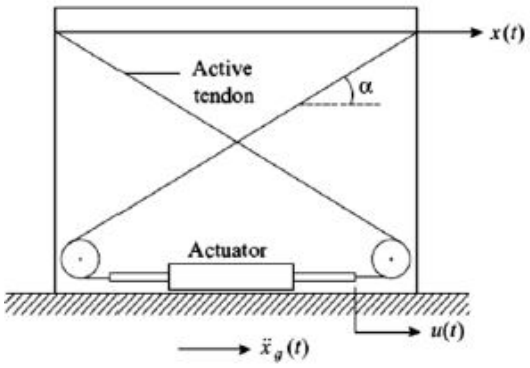
شماتیک وسیله سختی متغیر نیمه فعال



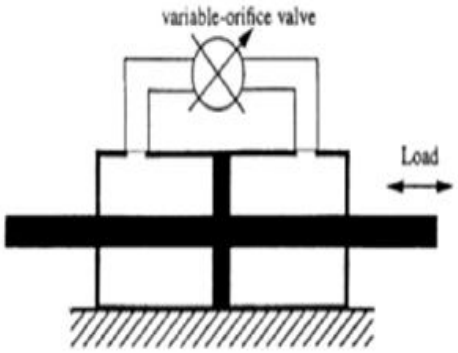
شماتیک سیستم AMD



میراگر با جرم متوازن نیمه فعال



شماتیک سیستم تاندون فعال



میراگر با دریچه متغیر

ردیف	نوع میراگر	مدل رفتاری	کاربرد
۱	تسلیمی	وابسته به تغییرمکان	سازه های کوتاه و متوسط در مقابل زلزله
۲	اصطکاکی	وابسته به تغییرمکان	سازه های کوتاه و متوسط در مقابل زلزله
۳	آلیاژی	سایر وسایل (نه وابسته به سرعت و نه وابسته به تغییرمکان)	کنترل لرزه‌ای موضعی
۴	ویسکوز	وابسته به سرعت	اکثرسازه‌ها در مقابل باد و زلزله
۵	ویسکوالاستیک	وابسته به سرعت و تغییرمکان	سازه های کوتاه و متوسط در مقابل باد و زلزله
۶	جرمی	سایر وسایل (نه وابسته به سرعت و نه وابسته به تغییرمکان)	سازه های بلند در مقابل باد و زلزله

انواع سیستم‌های میراگر فعال عبارتند از:

۱- سیستم میراگر با جرم فعال

۲- سیستم تاندون فعال

۳- سیستم مهاربند فعال

۴- سیستم مولد پالس

۵- سیستم میراگر فعال با سختی متغیر

انواع مختلف سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال عبارتند از:

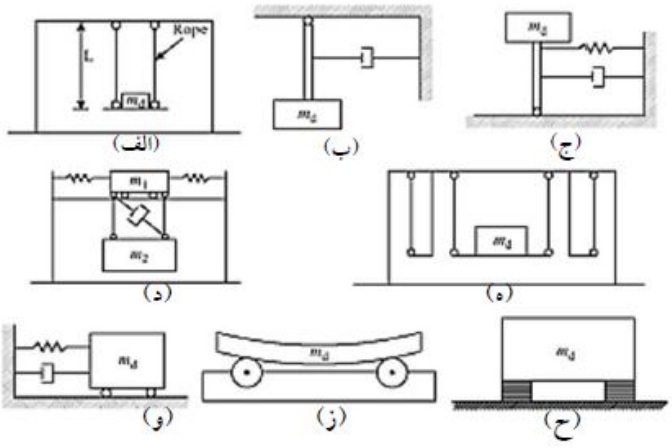
۱- میراگر با دریچه متغیر

۲- میراگر با سختی متغیر

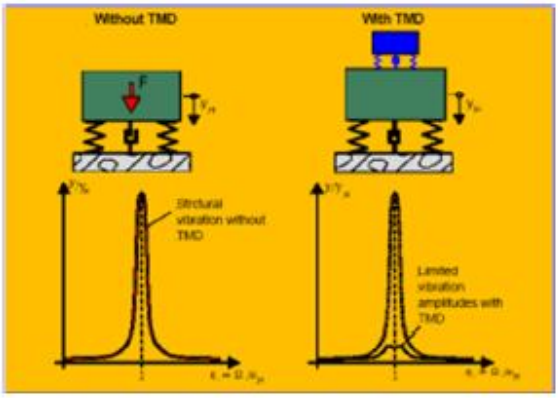
۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال

۴- میراگر با ستون مایع کنترل شونده

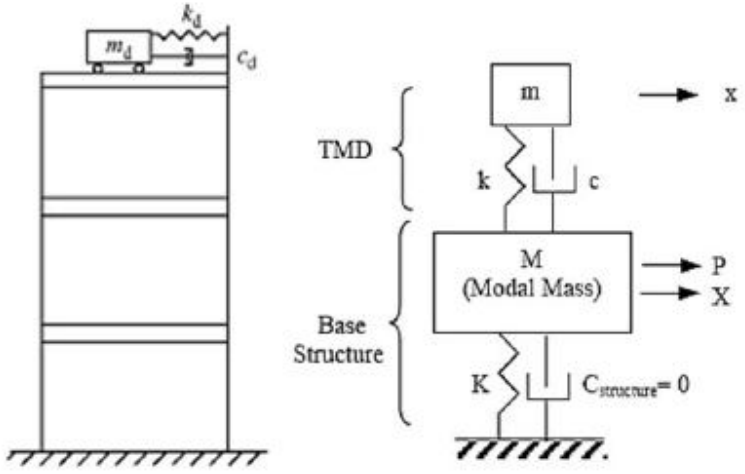
۵- میراگر با سیال کنترل شونده



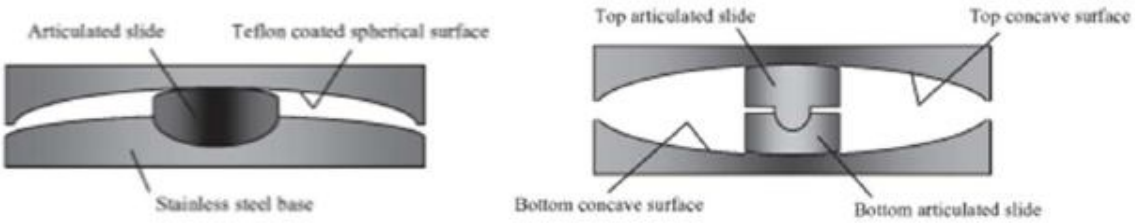
طرح‌های مختلف برای میراگر جرمی تنظیم شده



پاسخ دینامیکی سیستم در حالت با و بدون میراگر با جرم متوازن

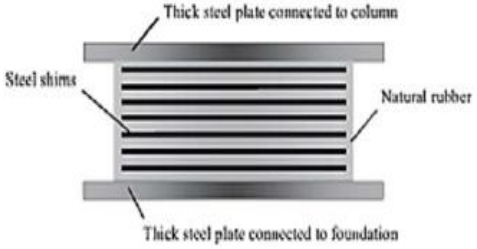


سیستم سازه‌ای دارای میراگر با جرم متوازن

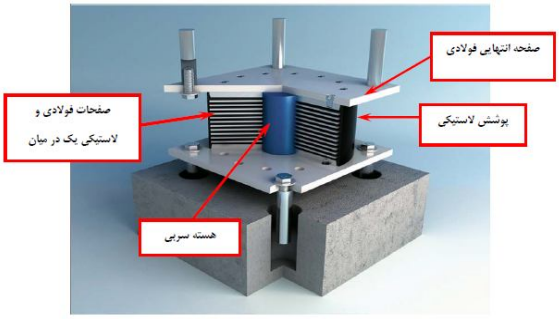


(ب) (الف)

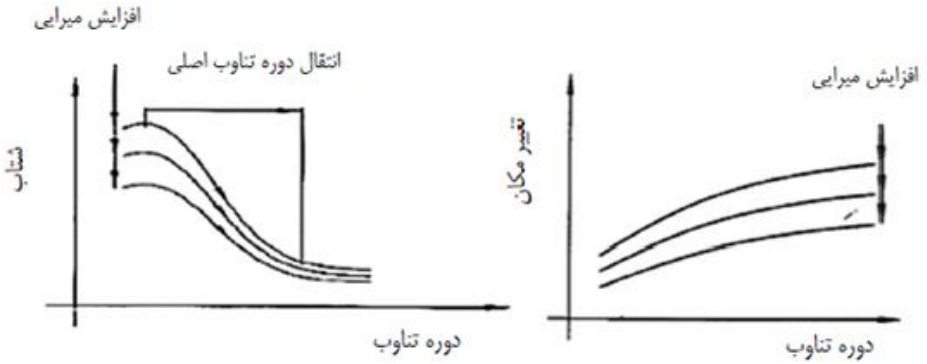
جداساز آونگی اصطکاکی، ب) جداساز آونگی اصطکاکی دوگانه



مقطع الاستومر با صفحات فولادی



اجزا مختلف سیستم جداسازی لرزه‌ای سرب-لاستیک



(ب) (الف)

نحوه عملکرد جداساز لرزه‌ای: (الف) انتقال دوره تناوب اصلی جهت کاهش انرژی وارده، (ب) افزایش میرایی جهت محدود نمودن تغییرمکان (رابینسون ۱۹۹۸)