بررسی خرابی و پایش سلامت سازه های بلند

(الگوریتم شبکه های عصبی)

علیرضا توانا

(کارشناس ارشد ژئوتکنیک)

محمدرضا کوهستانی

(کارشناس ارشد ژئوتکنیک)

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

مقدمه ۸
مراحل پایش سلامت سازه ای ۱۱
آسیب در سازه ها ۱۳

فصل دوم: روش های مختلف در تشخیص خرابی در سازه ها

روش های تشخیص خرابی بر اساس ارتعاش دینامیکی ۲۳
روش های مبتنی بر فرکانس طبیعی ۲۴
روش های مبتنی بر اشکال مودی ۲۶
روش های مبتنی بر انحنای شکل مودی ۲۹
انرژی کرنشی مودال ۳۱
روش های مبتنی بر انعطاف پذیری اندازه گیری شده دینامیکی ۳۱
روش بردار نیروی باقی مانده ۳۳
روش های مبتنی بر ماتریس بهبود یافته ۳۴
روش های برپایه تابع پاسخ فرکانس FRF ۳۶
روش های برپایه تبدیل ویولت ۳۷
روش های مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی ۴۱
مدهای زوال ۴۷
پیامدهای زوال بر پاسخ سازه ای ۵۰
دلایل زوال ۵۲
مدل سازی زوال ۵۳
منحنی پوش ۵۴
مدل کردن هیسترتیک پایه ۵۶
گزینه های مدل سازی تحلیلی ۵۷

حساس بودن پاسخ به زوال ۶۱
اثر پی دلتا ۶۳
مرور ادبیات فنی در زمینه اثر پی–دلتا ۶۵
استهلاک انرژی و میرایی ویسکوز ۶۹
اثر بارهای ثقلی ۷۰
جمع بندی ۷۱

فصل سوم: روش های مختلف بهینه یابی

روش های بهینه یابی ۷۴
تشریح الگوریتم ۸۰
تشکیل الگو ۸۱
پارامترهای روش بهینه یابی الگوکاوی ۸۲
شرایط توقف الگوریتم ۸۴
روش بهینه یابی تبرید تدریجی ۸۶
شرایط توقف الگوریتم ۸۸
جمع بندی ۸۸

فصل چهارم: الگوریتم های پیشنهادی جهت تشخیص خرابی در سازه ها

روش های ارائه شده جهت تشخیص خرابی ۹۱
فرضیات روش های ارائه شده ۹۴
تشخیص خرابی با استفاده از نتایج آنالیز مودال ناقص ۹۵
تشخیص خرابی بر اساس پاسخ های استاتیکی ناقص ۱۰۰
مدلسازی اثرات نوفه ۱۰۳
مدلسازی خطا در مدلسازی ۱۰۴
رویه انجام آنالیزهای غیرخطی ۱۰۸
آنالیز استاتیکی غیرخطی(پوش اور) ۱۱۰

آنالیز دینامیکی افزایشی(IDA) ۱۱۱
ارتباط کیفی بین مرزهای منحنی پوش اور و میانهIDA..... ۱۱۲
تخمین منحنیIDA ۱۱۶

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل و بیان نتایج حاصل از تحقیق

تخمین خرابی با استفاده از نتایج آنالیز مودال ناقص..... ۱۲۳
بررسی قاب سه طبقه یک دهانه مستوی ۱۴۶
مرور مثال آزمایشگاهی ۱۴۹
تشخیص خرابی براساس پاسخ های استاتیکی ناقص..... ۱۵۰

فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات

جمع بندی و پیشنهادات در تشخیص خرابی سازه ها ۱۶۲
مراجع..... ۱۷۲
پیوست ها..... ۱۸۷

کلیات

۱–۱– مقدمه

با گسترش سازه های مهم و حیاتی، لزوم نگهداری و محافظت از این سازه ها در برابر انواع بارهای عادی و فوق العاده بیش از پیش احساس میگردد. امروزه اغلب چالشهای مهندسی در مورد بارهای فوق العاده ای نظیر زلزله، انفجار و یا مواردی از این قبیل است که ممکن است در مدت زمان کوتاهی باعث ایجاد خرابی های جبران ناپذیری گردند. برای محافظت از سازه ها در مقابل این نوع بارگذاری ها و از جمله زلزله، علوم بسیاری در ارتباط با مسائل زلزله شناسی و مهندسی زلزله گسترش یافته اند. علم مهندسی زلزله خود شامل طیف وسیعی از علوم میگردد و هر آنچه را که ممکن است در رفتار سازه تاثیر گذار باشد تحت تاثیر قرار میدهد. یکی از مهمترین آنها که در سالیان اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده، توسعه سازه های هوشمند و پایش سلامتی در سازه هاست که هدف پایش رفتار سازه ها در لحظات مختلف است. بدین مفهوم که رفتار سازه های مهم از قبیل سازه های بلند، پلها، سدها، سازه های فرا ساحلی و ... تحت بارهای عادی نظیر عبور بار ترافیک از روی پل و یا نوسانات حرکت آب در سازه های فراساحلی و یا رفتار این سازه ها قبل و بعد از وقوع یک بار فوق العاده نظیر زلزله در اختیار محققین قرار میگیرد. از زیر شاخه های این بحث می توان به بحث تشخیص خرابی در این سازه ها اشاره نمود؛ یعنی با در اختیار داشتن رفتار و پاسخهای سازه قبل و بعد از وقوع خرابی می توانیم به تعیین موقعیت و محل ایجاد خرابی و همچنین میزان خرابی ایجاد شده پرداخت.

توسعه سازه‌های هوشمند و پایش سلامت سازه‌ای[1] در رشته مهندسی عمران در دهه اخیر از جذابیت خاصی برخوردار بوده است و توجه جامعه دانشگاهی، محققین و صنعت را به خود

[1] Structural Health Monitiring

جلب کرده است. اینکه چگونه سنسورها را بسازیم، طراحی سیستم پایش، جمع آوری داده‌ها و پردازش آن، آنالیز و تفسیر اندازه گیریها و تصمیم گیری خود نیازمند به تخصص ویژه می‌باشد. با به وجود آمدن سیستم فیبرهای نوری و تکنیک‌های آنالیز تاحد زیادی فاصله بین مفاهیم و کاربرد عملی آنها را از بین برده است و این امکان را به وجود آورده است که با استفاده از سیستم‌های پایش قابل اعتماد بتوان رفتار سازه را در هر مرحله‌ای از ساخت، دوره‌های بازبینی و کاربرد در مدت عملکردشان کنترل کرد. پایش سلامت سازه‌ای روندی برای بدست آوردن دقت و اطلاعات لحظه‌ای از شرایط و عملکرد سازه‌ای می‌باشد. این روند شامل اندازه‌گیری دائمی پیوسته، اندازه‌گیری دوره‌ای پیوسته از پارامترهای مربوطه در کوتاه مدت یا بلندمدت می‌باشد. این اطلاعات بدست آمده از پایش عموماً جهت برنامه ریزی و طراحی فعالیتها، افزایش ایمنی، تایید فرضیه ها، کاهش عدم قطعیت و افزایش اطلاعات در ارتباط با سازه‌ای که مونیتور می‌شود، به کار می‌رود. با وجود اهمیت زیاد، فرهنگ پایش سلامت سازه هنوز گسترش نیافته است. به منظور رسیدن به اهداف پایش لازم است که از یک استراتژی مناسب استفاده کنیم.

عملکرد نامناسب سازه‌ها اغلب با عواقب جدی همراه است. جدی ترین آنها حوادثی هستند که با قربانی انسانها همراه بوده اند. حتی اگر قربانی نیز در میان نباشد، مردم از اینکه بخشی از سازه‌های زیربنایی یا همه آنها از سرویس دهی خارج شوند، به دردسر می‌افتند. آسیب سازه‌های خاص، از جمله نیروگاههای هسته‌ای و خطوط لوله، ممکن است باعث آلودگی خطرناک اکولوژیکی شود. اثر اقتصادی مربوط به از کارافتادگی سازه‌ها دارای دو قسمت می‌باشد: مستقیم و غیرمستقیم. اثر مستقیم به هزینه ساخت مجدد بر می‌گردد، در حالیکه اثر غیرمستقیم شامل خسارات در سایر بخشهای اقتصادی می‌باشد.

شکل (۱-۱) پایش سلامتی در سازه‌ها در مقابل پایش سلامتی انسان

آثار تاریخی، مثل پلهای سنگی قدیمی، مساجد، کلیساها، شهرهای باستانی (نظیر بم) خسارات فرهنگی جبران ناپذیری به جامعه وارد می‌آورد. ایمن ترین و بادوام ترین سازه‌ها آنهایی هستند که به خوبی مدیریت شده اند. برنامه اندازه‌گیری و پایش معمولاً نقش اساسی در فعالیت‌های مدیریتی ایفا می‌کند. داده‌های بدست آمده از پایش برای بهینه کردن عملکرد، نگهداری، تعمیر و جایگزینی سازه بر اساس داده‌های قابل اعتماد و اندازه‌گیری شده هدف، بکار می‌روند.

سازه‌های زیربنایی موجود در هر کشور از پرهزینه ترین و حساس ترین سازه‌های آن کشور می‌باشند. خوردگی و زوال این سازه‌ها با نرخ هشدار دهنده‌ای رو به افزایش است. با این حال این سیستم‌ها دارای یک دوره سرویس دهی طولانی در مقایسه با محصولات تجاری می‌باشد. امروزه در تلاش برای داشتن سازه‌های سبک تر، مقاوم تر و مقاوم در برابر خوردگی، جایگزینی مواد دارای آهن به وسیله فیبرهای با مقاومت بالا در بیشتر کشورها به شدت دنبال می‌شود. این مسئله هم در مورد طراحی سازه‌های جدید و هم در مورد مقاوم سازی و بهسازی سازه‌های زیربنایی موجود به کار می‌رود. در اکثر کشورهای پیشرفته تحقیقات زیادی در مورد طراحی سازه‌های زیربنایی و مهم از جمله سازه‌ها و سکوهای نفتی

و پلها صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه در طراحی پل‌های شاهراه ها، به جای استفاده از میلگرد در عرشه بتنی از فیبرهای با مدول پائین و در کابلهای پیش تنیده، از تاندونهای با مقاومت بالا استفاده می‌شود .

در گذشته پایش سازه‌ها به وسیله ابزارهای اندازه‌گیری قابل حمل، در زمانی که جمع آوری داده‌ها مورد نیاز بود، صورت می‌گرفت. در سالهای اخیر، روشهای پایش از راه دور، با استفاده از لیزر، سنسورهای فیبرنوری، تکنیک‌های جمع آوری داده‌ها از راه دور و تکنیک‌های پردازش صورت می‌گیرد. با استفاده از این تکنولوژی تعداد زیادی از سازه‌ها شامل پل ها، ستونها و سازه‌های زیربنایی و حیاتی پایش شده‌اند.

به هر حال پایش به مهندسین علم و اطلاعات برای ساختن سازه هوشمند شامل تهیه تجهیزات مورد نیاز برای پایش سلامت سازه را فراهم می‌کند، قبل از اینکه سازه به آسیب بیش از حد برسد. برای اینکه پایش سلامت سازه مفید و با موفقیت باشد، کلیه مشخصات در تمامی مراحل از شروع طراحی سازه تا جمع آوری داده‌ها بایستی مکتوب و محاسبه شده باشد. مشخصات سازه‌ای مونیتور شده شامل مشخصات فنی برای پایش مثل سنسورهای فیبر نوری، کابلها، مجاری، جعبه اتصال و اتاق کنترل می‌باشد.

۱-۲- مراحل پایش سلامت سازه ای

روند پردازش از ثبت داده‌ها مربوط به پارامترها به صورت پیوسته یا دوره‌ای می‌باشد که اگر به درستی انجام شود، بیانگر عملکرد سازه‌ای می‌باشد. بسته به نوع سازه، شرایط و نیازهای خاص مرتبط با پروژه پایش، پایش سلامت سازه‌ای می‌تواند به صورت کوتاه مدت (چندروزه)، میان مدت (از چند روز تا چند ماه) بلند مدت (چندماه تا چندسال) یا در کل

دوره عمر سازه به کار رود.

پارامترهای معرف انتخاب شده جهت پایش به عوامل متعددی بستگی دارند، از جمله می‌توان به نوع و هدف پایش، بارهای مورد انتظار، مصالح ساختمان، شرایط محیطی و پدیده‌ی زوال مورد انتظار اشاره کرد. پایش می‌تواند در سطح مصالح موضعی و یا در سطح کل یک ساختمان باشد. پایش در سطح مواد اطلاعات مرتبط با رفتار محلی مصالح را به دست می‌دهد اما در مورد رفتار کل سازه اطلاعات محدودی در اختیار قرار می‌دهد. پایش در سطح کل سازه اطلاعات بهتری از رفتار کل سازه و به طور غیرمستقیم، تغییرات در رفتار سازه، همین طور اطلاعات مرتبط با عملکرد مواد را به دست می‌دهد.

مفهوم ارائه شده در بالا را می‌توان در مورد سازه‌ها نیز به کار برد. هدف اصلی پایش، آشکار سازی رفتارهای غیرمعمول سازه‌ای که بیانگر عملکرد سوء سازه بوده که خود بیانگر شرایط سازه‌ای نامطلوب می‌باشد. شناسایی شرایط ناسالم نیاز به بازرسی سازه دارد و در ادامه تشخیص و نهایتاً کار ترمیم و مرمت آغاز می‌شود.

در پایش بایستی به موارد زیر پرداخته شود:

- شناسایی آسیب در سازه
- ثبت زمان وقوع رخداد
- مشخص نمودن موقعیت آسیب
- مقدار آسیب
- توقف فعالیت‌ها

گاهی پایش به عنوان تشخیص دهنده فرض می‌شود و برای کنترل تشخیص و درستی، انجام دادن بازرسی‌ها و آنالیزهای مربوطه نیاز می‌باشد. آشکارسازی رفتار غیرمعمول سازه‌ها

بر اساس نتایج پایش، گاهی برای کنترل صحت الگوریتم‌های پیش فرض به کار می‌رود. کارایی پایش به عملکرد سیستم پایش به کار رفته و همچنین به الگوریتم‌های به کار برده شده بستگی دارد. شکل (۱-۲) مراحل مختلف پایش سلامتی سازه‌ها را نشان میدهد.

شکل (۱-۲) مراحل مختلف پایش سلامتی در سازه ها.

۱-۳- آسیب‌ها در سازه ها

عموماً آسیب بعنوان تغییرات آغازین در یک سیستم که بطور معکوس عملکرد آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد، تعریف شده است. آسیب برای سازه‌های مهندسی عمران، تغییرات در مصالح، اتصالات شرایط مرزی و غیره که باعث می‌شود عملکرد سازه نامناسبتر شود تعریف شده است. برای مثال با گذشت زمان، ظرفیت باربری المانهای سازه‌ای که باز توزیع تنش در سازه را بر عهده دارند کم می‌شود. این باز توزیع تنش ممکن است به صورت بارهایی باشد که اصولاً متفاوت با بارهای درنظر گرفته در زمان طراحی بوده و بطور بالقوه ایمنی سازه را تحت شعاع قرار داده و یا حتی امکان دارد به آسیب سازه منجر شود.

آسیب‌های سازه‌ای می‌توانند به طریق مختلف ایجاد شوند. فعالیت‌های نرمال و عادی می‌تواند به ایجاد آسیب در سازه منجر شود. سازه‌ها می‌توانند به دلیل خوردگی، گذشت

زمان و فعالیت‌های روزانه دچار آسیب می‌شوند. بارهای ترافیکی می‌تواند به آسیب در پل‌ها منجر شود در حالیکه سازه‌های ساحلی و اسکله‌ها از بار موج و خوردگی در اثر آب دریا دچار آسیب می‌شوند. به عبارت دیگر، بارهای اضافی ایجاد شده توسط طوفانهای سهمگین، موج‌های عظیم و زلزله‌ها نیز بصورت بالقوه می‌تواند به ایجاد آسیب در سازه منجر شود.

آسیب بر روی سازه‌ها را می‌توان بصورت خطی و غیرخطی دسته بندی کرد. آسیب خطی را می‌توان به این صورت تعریف کرد که رفتار سازه بعد از اینکه آسیب اتفاق افتاد، بصورت خطی و الاستیک باقی بماند در حالیکه در آسیب غیرخطی سبب می‌شود که بعد از وقوع آسیب، سازه از خود رفتار غیرخطی نشان می‌دهد. در سازه‌های مهندسی عمران خوردگی فلز و پوسته پوسته شدن بتن آسیب هایی هستند که از آنها به آسیب خطی یاد می‌شود. هر دو عامل خوردگی و تورق سطح مقطع اعضای سازه‌ای را کاهش می‌دهند و به این ترتیب ظرفیت باربری سازه را کاهش می‌دهند. برای مثال، تورق شدید که در اثر جریان سریع خط آبی در پایه‌های پل اتفاق می‌افتد، به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کم شدن سطح مقطع می‌شود. مواردی از آسیب‌های غیرخطی در مهندسی عمران شامل ترک‌های ایجاد شده در اعضای بتنی یا فولادی یا ضعف اتصالات و پوسته‌های فلزی می‌باشند. برای مثال اعضای سازه‌ای با ترک‌های خستگی به طور کلی رفتار غیرخطی نشان می‌دهند که علت آن باز و بسته شدن ترک‌ها در محیط ارتعاشی نرمال می‌باشد.به طور معمول، آسیب سازه‌ای توسط کاهش در مدول الاستیک در معادلات عددی و یا کاهش در سطح مقطع اعضای سازه‌ای در مطالعات آزمایشگاهی مدل می‌شود.

ارزیابی عملکرد سازه‌ها از بدو پیدایش نخستین آیین‌نامه‌های ساختمانی حائز اهمیت ویژه‌ای بوده است چرا که ارتقای کیفی الزامات آیین‌نامه‌ای در گرو ارزیابی صحیح عملکرد سازه هایی است که بر مبنای آن الزامات آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند. از این رو در سالیان اخیر شاهد تلاشهای بسیاری در زمینه دستیابی به روش‌ها و الگوهای جامع جهت ارزیابی صحیح عملکرد سیستم‌های سازه‌ای متداول و نیز سیستم‌های سازه‌ای جدید بوده‌ایم ولی متاسفانه آیین‌نامه‌های تجویزی طراحی لرزه‌ای، در ابتدا بر پایه درک رفتار سازه‌های کوتاه تا متوسط

مرتبه بنا شدند. رویکرد جدید به ساختن سازه‌های بلند مرتبه که خود ناشی از عوامل گوناگون اقتصادی، سیاسی و اجتماعی است، مهندسین را بر آن داشته که شیوه‌هایی برای اطمینان از عملکرد مناسب و ایمن سازه‌های بلند مرتبه بیابند بدین ترتیب بوده است که راهنمایی مانند TBI بعنوان جایگزینی برای دیگر راهنماهای تجویزی مانند ASCE7 در طراحی و مدل‌سازی سازه‌های بلند مطرح گردیده است. منطبق بر مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که آیین‌نامه‌های ساختمانی متداول به شدت نیازمند اصلاح ضوابط و الزامات آیین‌نامه‌ای (مخصوصا برای سازه‌های بلند) در راستای ارضای اهداف طراحی عملکردی می‌باشند فی الواقع چنین می‌نماید که آیین‌نامه‌های ساختمانی در آغاز پروسه دگرگونی و شیفت پیدا کردن از به کارگیری روشهای طراحی خطی به سمت استفاده از «روشهای طراحی عملکردی» که در دانش نوین «مهندسی براساس عملکرد» مطرح شده است می‌باشند و در این راستا پروژه‌هایی با بودجه‌های کلان جهت افزایش اطلاعات و آگاهی‌ها در زمینه «مهندسی براساس عملکرد» و علی الخصوص «مهندسی زلزله بر اساس عملکرد» (PBEE) تعریف و اجرا شده‌اند که نمونه‌هایی از این پروژه‌ها عبارت‌اند از گزارش ATC-58 و FEMA450 که در راستای دستیابی به روشی است که قادر به ارزیابی کمّی و قابل اطمینان عملکرد انواع مختلف سازه‌ها اعم از سازه‌های موجود و سازه‌های جدید باشد.

سازه‌های فولادی در طول تاریخ ساخت ساختمان‌های بلند همیشه پیشگام بوده‌اند از آنجا که قاب‌های فولادی برای هر نوع ارتفاع مناسب می‌باشد و نسبت مقاومت به وزن بسیار بالایی دارند همیشه بعنوان انتخاب اصلی در ساختمان‌های بلند هستند. سازه‌های فولادی ضمن ایجاد امکان دهانه‌های بزرگ، قابل پیش‌سازی بوده و در نتیجه دارای سرعت اجرای بیشتری هستند و نیاز به مکان کارگاهی کمتری دارند. مهمترین مطلب سازه‌ای فولادی نیاز به پوشش مقاوم در برابر آتش سوزی و زنگ‌زدگی، مهاربندی‌های قطری و اتصالات ویژه در قاب‌های صلب و نماسازی‌های پرهزینه آنهاست. با گذر در تاریخ می‌توان دریافت که نوع ابتدایی بتن برای سازندگان رومی و فراعنه مصری شکافته شده بود و تحقیقات راجع به بتن‌های امروزی از اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم شروع شد. بتن مادی است که مهندسین و معماران

باید شاخص‌های مختلف آن را از قبیل مقاومت، دوام، روش‌های شکل و قالب‌ریزی، سخت شدگی، آرماتورگذاری و ... را مد نظر قرار دهند. در سال ۱۹۰۴ اولین آزمایش تیر بتن مسلح انتشار یافت. در همین دوران ساخت دیوارهای پیش ساخته و استفاده از سیستم قالب بندی موجب تحولی در ساختمان‌سازی، در برابر آتش سوزی، بارهای سنگین و انتقال صدا نیز مقاوم بود و مجموع این پیشرفت‌ها نشان می‌داد که بتن نیز می‌تواند نظیر فولاد در ساختمان‌های بلند بکار رود. سازه‌های بلند بتن‌آرمه تقریباً دو دهه پس از اولین ساختمان‌های بلند فلزی مطرح شدند و قابل ذکر است که ساختمان‌های بتنی اولیه از نظر فرم سازه، متأثر از سازه‌های مشابه فولادی و دارای اسکلتی شامل ستون‌ها و شاهتیرها بودند با این تفاوت که به علت صلب بودن قاب‌ها بدون مهاربندی قطری نیز در برابر بارهای جانبی مقاومت می‌کردند. پس از آتش‌سوزی‌هایی که در شهرها رخ دادند و بسیاری از ساختمان‌های بلند فلزی بعلت گرمای شدید فروریختند بتن توانست بعنوان ماده‌ای مقاوم در برابر آتش خود را تثبیت کند.

فصل دوم

روشهای مختلف تشخیص خرابی در سازه‌ها

۲-۱- مقدمه

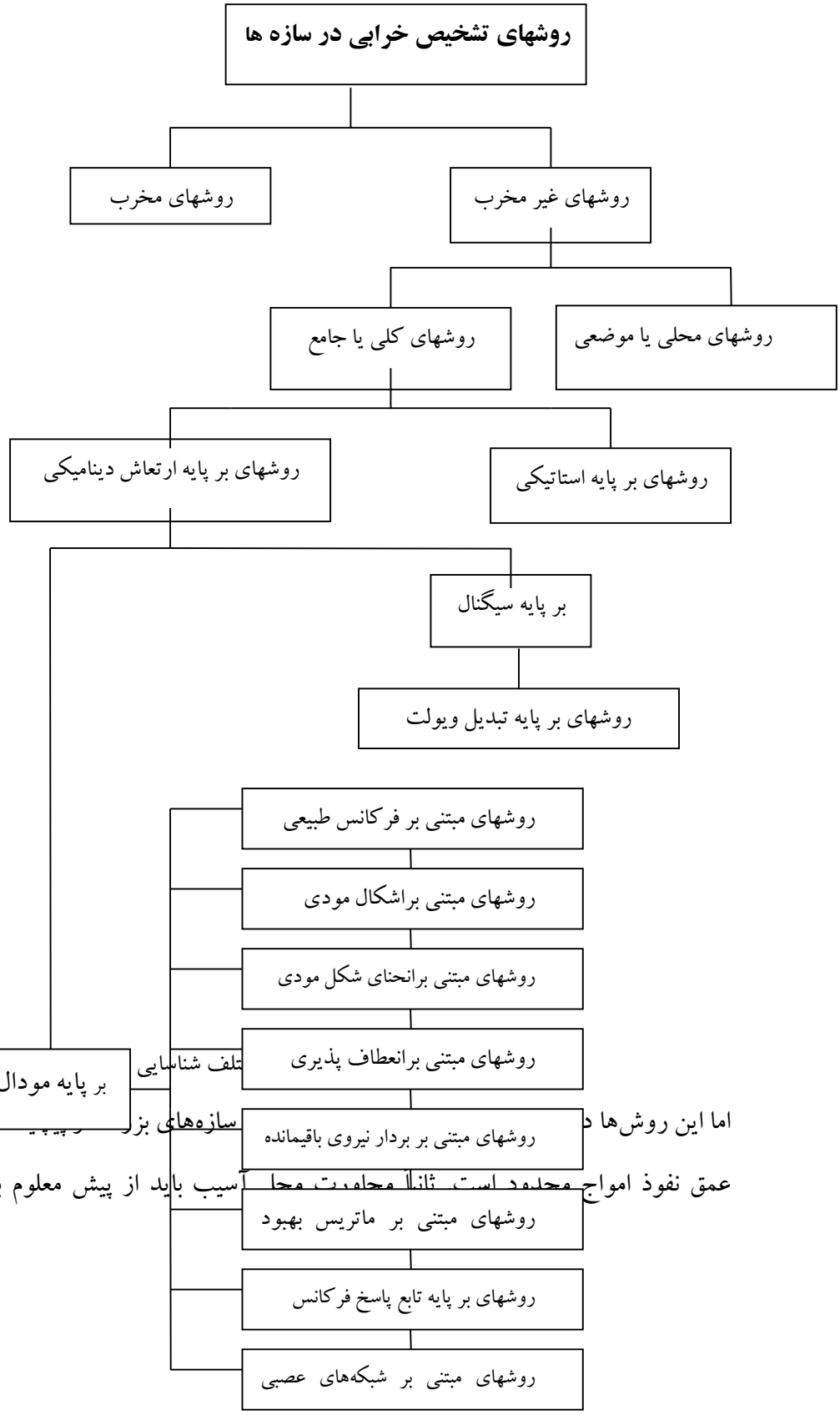
شناسایی مخرب آسیب (DDD) و یا آشکارسازی غیر مخرب آسیب (NDD) برای شناسایی آسیب‌های ممکن در سازه و همچنین ارزیابی ایمنی سازه‌ها به صورت مداوم در نظارت سازه‌ها به کار بسته شده‌اند. شکل (۲-۱) بصورت خلاصه طبقه بندی روشها و الگوریتمهای پایه شناسایی خرابی را نشان میدهد. روش‌های مخرب شناسایی معمولاً با بررسی نمونه‌های برداشته شده از سازه به ارزیابی ایمنی سازه می‌پردازند.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپیوتر، سنسورها و سایر فن‌آوری‌های الکترونیکی موجب شده است که تکنیک‌های غیر مخرب شناسایی آسیب (NDD) بسیار راحتر و مقرون به صرفه‌تر از روش‌های آشکارسازی مخرب گردند. روش‌های غیر مخرب را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱. روش‌های محلی یا موضعی

۲. روش‌های کلی یا جامع

روش‌های کنونی بسیار موثر برای شناسایی محلی آسیب به صورت موضعی عبارتند از روش‌های صوتی و یا اولتراسونیک، روش میدان مغناطیسی، رادیوگرافی، مایکروویو و جریان گردابی و یا روش‌های میدان حرارتی. این روش‌ها برای شناسایی آسیب به صورت موضعی و بصری در نزدیک سطح سازه با اندازه‌گیری نور، صدا، شدت میدان مغناطیسی و یا درجه حرارت و یا تغییر مکان‌ها عمل می‌کنند. برخی از این روش‌ها برای کاربردهای خاص بسیار موثر هستند. برای مثال روش جریان گردابی برای شناسایی ترک در اتصالات جوشی بسیار موثر است.



تلف شناسایی

اما این روش‌ها د سازه‌های بزر ند. اولاً

عمق نفوذ امواج محدود است ثانیاً محلول محل آسیب باید از پیش معلوم باشد و این

قسمت قابل دسترس باشد. بنابراین راه ساده‌ای برای تعیین وضعیت سلامت کلی سازه وجود ندارد. Change and Liu اطلاعات دقیقی را در مورد روش‌های محلی یا موضعی ارائه کرده است .

روش‌های غیر مخرب بر پایه استاتیک و دینامیک فرصت مناسبی برای شناسایی و ارزیابی آسیب به صورت جامع و کلی در سازه‌ها ارائه می‌کنند. روش‌های مبتنی بر استاتیک با تکیه بر اندازه‌گیری کرنش و جابجایی سازه تحت بارهای شناخته شده استاتیکی و استفاده از مدل المان محدود به روز شده، اقدام به تعیین تغییرات در تغییر شکل‌ها، سختی و ظرفیت مقطعی حمل بار سازه‌ها می‌نماید. این گونه روش‌ها به صورت گسترده‌ای برای نظارت و ارزیابی سلامت پل‌ها استفاده می‌شود. کارهای انجام شده توسط .Barr et al و Cardinale and Orlando را می‌توان بعنوان مثال برای این روش نام برد. معایب روش‌ها غیر مخرب استاتیکی عبارتند از:

۱. نیاز به مقدار زیادی از داده‌های اندازه‌گیری شده

۲. نیاز به مدل المان محدود به روز شده با مشخصات دقیق مصالح

۳. نیاز به تست بار استاتیکی که موجب ایجاد توقف در سرویس‌دهی سازه می‌شود.

این محدودیت‌ها موجب می‌شود تا اعمال روش‌های غیر مخرب استاتیکی به صورت آنلاین سخت و غیر ممکن برای سازه‌های در حال سرویس باشد.

روش‌های غیر مخرب دینامیکی و یا ارتعاشی مبتنی بر بررسی تغییرات مشخصات ارتعاشی (دینامیکی) سیستم سازه است. اساس تئوری این روش در این حقیقت نهفته است که آسیب موجب تغییرات در خصوصیات فیزیکی سازه خواهد شد و این امر باعث ایجاد تغییرات در مشخصات دینامیکی و ارتعاشی و سیگنال‌های سازه می‌شود.

در طول دو دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای بر روی روش‌های شناسایی غیر مخرب ارتعاشی (دینامیکی) انجام گرفته است. این مطالعات منجر به توسعه روش‌های تجربی و همچنین راه کارها و الگوریتم‌های پردازش سیگنال برای شناسایی آسیب گشته است. در این راستا Doebling و همکاران Sohn و همکاران به صورت جامعی روش‌های مختلف در این زمینه را مورد بررسی قرار داده اند.

این روش‌ها می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند:

۱. بر پایه مودال

۲. بر پایه سیگنال

متدهای مبتنی بر مودال از تغییرات در پارامترهای اندازه‌گیری شده مودال از قبیل فرکانس رزونانس، میرایی مودال و اشکال مودی و غیره و یا از مشتقات آنها به عنوان نشانه‌ای از تغییر در مشخصات فیزیکی- دینامیکی سازه (جرم، سختی و میرایی) استفاده می‌کند. فرض اساسی در این روش این است که تغییر در سختی منجر به تغییر در فرکانس‌های طبیعی و شکل مودی سازه می‌شود. روش‌های مبتنی بر مودال با موفقیت در شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه معادل خطی، غیر وابسته به زمان به کار برده شده است.روش‌های مبتنی بر شکل مدی انحناء، روش‌های مبتنی بر تغییر در انعطاف‌پذیری، روش‌های بر پایه تغییر در سختی، و روش‌های مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و غیره نیز در ادبیات موجود می‌باشد.اخیراً، رویکردهای مبتنی بر تبدیل ویولت و تبدیل هیلبرت بعنوان تکنیک‌های پیشرفته برای شناسایی پارامتریک آسیب سازه‌های خطی و متغیر در زمان به کار گرفته شده‌اند. نمونه‌ای از کاربرد این روش‌ها را می‌توان در تحقیقات مراجع مشاهده کرد.اگرچه روش‌های مبتنی بر مودال به طور کلی به منظور شناسایی آسیب قابل اجرا هستند اما هنوز

مشکلات و کاستی‌های زیادی در این روش وجود دارد.روش‌های بر پایه سیگنال با بکارگیری رویکردهای مناسب پردازش سیگنال اقدام به شناسایی آسیب می‌کند. هدف این روش بررسی تغییرات در ویژگی‌هایی است که به صورت مستقیم از تاریخچه زمانی و یا طیف متناظر آن بدست می‌آید. به دلیل وجود روندهای مختلف پردازش سیگنال برای استخراج مشخصات موردنیاز در این روش سه دسته مختلف در دامنه زمان، در دامنه فرکانس و دامنه زمان- فرکانس تقسیم می‌شود.در حوزه زمان از توابع خطی و غیرخطی تاریخچه زمانی برای استخراج ویژگی‌های سیگنال استفاده می‌شود به طور مثال در این دسته می‌توان مدل اتورگرسیو (AR) و یا مدل اتورگرسیو میانگین متحرک (ARMA) و یا مدل اتورگرسیو با ورودی برون‌زا[۱] (ARX) و فیلتر کالمن بسط داده شده[۲] (EKF) را نام برد. Silve و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک الگوریتم سه مرحله ای جهت تشخیص آسیب در سازه‌ها ارائه نمودند. مرحله اول شامل کاهش داده‌های تاریخچه زمانی بر اساس آنالیز مولفه اصلی[۳]، مرحله دوم شامل تشکیل

یک مدل براساس داده‌های سازه سالم و باستفاده از مدل ARMA، مرحله نهایی شامل تشخیص وجود و یا عدم وجود آسیب در سازه‌ها با استفاده از منطق فازی است. در این مطالعه از سازه مرجع آزمایشگاه لوس آلاموس (Los Alamos) استفاده شده است. در حوزه فرکانس از آنالیز فوریه و طیف فوردی در یک پنجره زمانی مشخص استفاده می‌شود. تابع پاسخ فرکانس[۴] (FRFS)، طیف فرکانس، طیف توان[۵]، طیف چگالی توان[۶] مثال‌های از

[1] - Auto regressive with exogenous input
[2] - Extended Kalman filter
[3] Principle Component Analysis
[4] - Frequency spectra
[5] - Power spectra
[6] - Power spectral density

این روش هستند.روش‌هایی که در حوزه زمان- فرکانس عمل می‌کند از آنالیز و یا توزیع Wigner-Ville برای استخراج ویژگی‌های سیگنال استفاده می‌کنند.برای نمونه از این دسته می‌توان به اسپکتوگرام (طیف نگاره)، تبدیل ویولت پیوسته آنتروپی ویولت بسته‌های انرژی ویولت نام برد.

۲-۲- روشهای تشخیص خرابی بر اساس ارتعاش دینامیکی

می توان روشهای آشکارسازی آسیب بر اساس ارتعاش دینامیکی را به ترتیب زیر طبقه بندی کرد:

- روشهای مبتنی بر فرکانس طبیعی
- روشهای مبتنی براشکال مودی
- روشهای مبتنی برانحنای شکل مودی
- روشهای مبتنی برانعطاف پذیری
- روشهای مبتنی بر بردار نیروی باقیمانده
- روشهای مبتنی بر ماتریس بهبود یافته
- روشهای بر پایه تابع پاسخ فرکانسFRF
- روشهای بر پایه تبدیل ویولت
- روشهای مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی

۲-۲-۱- روشهای مبتنی بر فرکانس طبیعی

رابطه فیزیکی بین تغییرات جرم و سختی با تغییرات در فرکانس طبیعی و همچنین سهولت اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی که در اغلب موارد فقط با استفاده ازیک سنسور قابل انجام می‌باشد به عنوان انگیزه اصلی استفاده از روشهای مودال جهت آشکارسازی آسیب در

سازه‌ها مطرح میگردد. Salawu به بیش از ۶۵ تحقیق صورت گرفته در زمینه آشکارسازی آسیب سازه‌ها با استفاده از تغییرات فرکانسی پرداخته است.

می‌توان گفت که تا حدودی حساسیت روش مبتنی بر تغییرات فرکانس نسبت به آسیب کم است. از این رو برای مشاهده جابجایی در فرکانس نیاز به آسیب‌های مهم و بزرگ و یا اندازه‌گیری بسیار دقیق اطلاعات دارد. اگرچه مطالعات اخیر نشان داده است که فرکانس رزونانس تغییرات آماری کمتری نسبت به خطای رندم در مقایسه با سایر روش‌ها دارد برای مثال در سکوهای نفتی تشخیص و تمییز تغییرات فرکانس ایجاد شده توسط آسیب از تغییرات فرکانس به دلیل افزایش جرم حاصل از رشد دریایی کاری بسیار سخت می‌باشد. همچنین آزمایشات انجام گرفته بر روی یک پل بزرگراهی نشان می‌دهد که تغییرات فرکانس را نمی‌توان به عنوان نشانگر حساس در نظر گرفت چرا که کاهش سختی خمشی در مقطع پل به میزان ۲۱٪ باعث ایجاد تغییر چندانی در فرکانس نظیر حالت رزونانس نگردید. Cowley and Adams روابطی را برای شناسایی آسیب در موارد ترکیبی از روی تغییرات فرکانسی ارائه دادند. آنها از نسبت فرکانس برای دو مد (حالت) اول شروع کردند. شبکه‌ای با آسیب‌هایی در آن در نظر گرفته شد و همچنین مقداری نوفه و خطا در ارتباط با اندازه‌گیری اختلاف فرکانس اعمال شده است سپس تعدادی از جفت فرکانس‌ها را برای محل‌هایی که احتمال وجود آسیب دارند محاسبه شد. جفت فرکانس‌های که کمترین خطا را مشخص می‌کنند موقعیت آسیب را نشان می‌دهند. رابطه داده شده برای پیدا کردن موقعیت چندین آسیب کارساز نمی‌باشد.روش دیگری توسط Friswell ارائه شده در این روش تلاش برای شناسایی آسیب بر پایه سناریوهای از پیش معلوم آسیب صورت گرفته است. فرض بر این شده است که مدل سازه موجود بسیار دقیق می‌باشد. با استفاده از این مدل،

تغییرات فرکانس برای چندین مود اول برای سازه آسیب دیده و غیر آسیب دیده با تمام سناریوهای فرض شده بدست آمد، سپس تمام فرکانس‌ها محاسبه می‌شود و آسیب در محدوده‌ای که تعریف شده باشد، قابل شناسایی است.در شکل (۲-۲) اثرات خرابی در تغییر فرکانسهای چهار مود اول سازه نشان داده شده است که بر گرفته از مطالب ارائه شده در دوره های آموزشی کوتاه مدت توسط پروفسور Catbas در سال ۲۰۰۸ است. لازم به ذکر است که سازه مورد مطالعه در تحقیق فوق بصورت یک تیر پیش تنیده است که در ۱۴ حالت بار پیش تنیدگی انجام شده است که هرچه شماره مورد پیش تنیدگی افزایش می یابد بار پیش تنیدگی کاهش می یابد.

شکل (۲-۲) تشخیص خرابی در سازه‌ها بر اساس تغییرات فرکانس در مودهای مختلف [۲]

۲-۲-۲- روشهای مبتنی براشکال مودی

اندازه‌گیری شکل مودی سازه‌ها با استفاده از یک نقطه تحریک و تعداد بیشتری سنسور و یا محرک گردشی و یک یا تعداد بیشتری سنسور ثابت قابل انجام است. روشهای بسیاری جهت استخراج اشکال مودی براساس تحلیل مودال در حوزه زمان ارائه شده اند. روشهای آشکارسازی آسیب یا بصورت مستقیم از اشکال مودی اندازه‌گیری شده استفاده

می‌نمایند و یا از انحنای شکل مودی بهره می‌برند. Fox نشان داد که اندازه گیری های یک عددی از اشکال مودی برای شناسایی خرابی تیرها تقریباً غیر حساس هستند. این موضوع سبب پر رنگ تر شدن مشکل فشرده سازی اطلاعات در شناسایی خرابی شد. مقایسه تصویری تغییرات نسبی در اشکال مودی که به دلیل وجود خرابی می باشد، نشان می دهد که این روش بهترین متد برای شناسایی خرابی می باشد به خصوص وقتی که آزمایش بر روی فرکانس و اشکال مودی صورت می گیرد. Mayes روشی برای یافتن خطا بر پایه تغییرات در اشکال مودی بعنوان آزمون خطای جابجایی و چرخشی سازه[1] (STRECH) ارائه کرده است. در این روش با در نظر گرفتن نسبت جابجایی نسبی مودال، می‌تواند دقت سختی سازه‌ای بین درجات آزادی سازه‌ای را ارزیابی می‌کند. همچنین STRECH می‌تواند برای مقایسه نتیجه آزمایشات با مدل المان محدوده اولیه و یا مقایسه نتایج دو نمونه آزمایش بکار رود.Ratcliffe رویکرد نوینی را برای موقعیت‌یابی آسیب در تیرها ارائه کرد. در این روش از تفاضل محدود عملگر لاپلاس در اطلاعات شکل مدی استفاده شده است

همچنین Cobb and Liebst روشی را برای اولویت‌بندی موقعیت سنسورها برای تعیین آسیب سازه‌ها بر پایه آنالیز حساسیت بردار[2] ویژه ارائه کردند. در تحقیقی دیگر Skjaeraekو همکاران از موقعیت بهینه سنسور با استفاده از تغییرات در داده‌های شکل مودی و فرکانس مودی و با بهره‌گیری از روش تکرار شالوده‌ای[3] اقدام به شناسایی آسیب می‌کند. همچنین Rahai و همکاران یک الگوریتم آشکارسازی آسیب با استفاده از اشکال مودی

[1] - Structural translational and rotational error checking
[2] - Eigenvector sensitivity analysis
[3] - Substructure iteration method

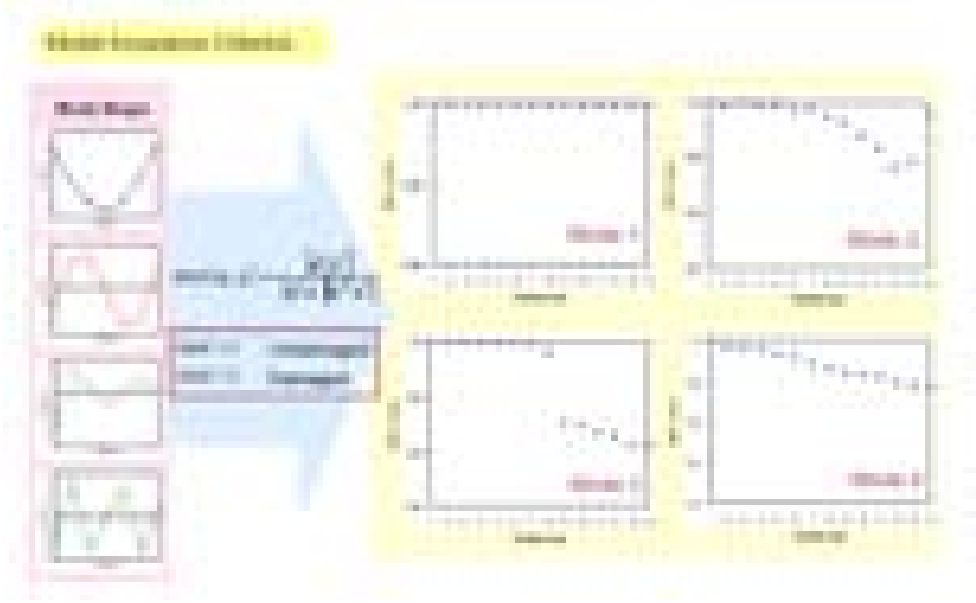
اندازه گیری شده ناقص را ارائه نمودند. در این تحقیق تغییرمکانهای مودال سازه بصورت تابعی از پارامترهای سازه ای بیان شده است. همچنین رابطه بین اشکال مودی اندازه گیری شده ناقص با پارامترهای سازه ای توسط معادلات آسیب المانها ارائه شده و در نهایت مسئله بهینه سازی جهت تعیین میزان تغییرات در پارامترهای سازه ای (سختی) حل شده است. Fang&Perera در سال ۲۰۰۹ یک روش آشکارسازی آسیب بدون استفاده از اطلاعات مودال سازه و تنها بر اساس مشخصات آماری سیگنالهای پاسخ ارائه نمودند. در این تحقیق اشکال مودی توان[1] به جای اشکال مودی تعریف شده است که این اشکال با استفاده ازمشخصه جذر میانگین مربعات[2] سیگنالهای پاسخ بدست میاید. اشکال مودی توان، مشابه اشکال مودی بوده و با همپایه نمودن آن با چگالی‌های طیفی توان سیگنال بدست میایند. در این مطالعه اندیسهای خسارت براساس انحنای شکل مودی توان و انعطاف پذیری توان که از مشتقات اشکال مودی توان می‌باشند تعریف شده است.

۲-۲-۲-۱- مقایسه مستقیم اشکال مودی

دو روش رایج و مرسوم برای مقایسه اشکال مودی عبارتند از روش COMAC, MAC همانطوریکه در شکل (۲-۳) دیده میشود، روش MAC بر اساس میزان تشابه بین دو مجموعه اشکال مودی مقداری بین صفر و یک اختصاص می‌یابد که مقدار یک بیانگر تشابه کامل یا بعبارتی یکسان بودن دو مجموعه شکل مودی بوده و مقدار صفر نشاندهنده عدم تشابه کامل می‌باشد. بنابراین کاهش مقدار MAC ممکن است بیانگر آسیب در سازه باشد. لازم به توضیح است که دو مجموعه شکل مودی ممکن است مربوط به اندازه گیری‌های صورت

[1] Power Mode Shape
[2] Root Mean Square

گرفته قبل و بعد از ایجاد آسیب بوده و یا جهت کالیبره کردن مدل تحلیلی و بررسی میزان تطابق بین مدل آزمایشگاهی و تحلیلی باشد.از جمله کارهای انجام شده به این روش میتوان به کار West اشاره نمود که برای اولین بار از اطلاعات مربوط به شکل مودی را برای شناسایی آسیب بدون استفاده از مدل المان محدود استفاده کرد. در این تحقیق به تجزیه و تحلیل مدلهای مودال تجربی المانهای سازه ای بر اساس معیار MAC پرداخته شده است. نتایج این تحقیق بیانگر کارایی روش MAC برای تشخیص تغییرات عمده سازه ای میباشد.



شکل (۲-۳) تشخیص خرابی با استفاده از مقایسه مستقیم اشکال مودی[۲]

COMAC بر اساس اندازه‌گیری نقاط بین دو مجموعه از اشکال مودی ارائه میگردد و مقداری بین صفر و یک خواهد داشت که مقدار پایین COMAC در یک نقطه ممکن است بیانگر موقعیت آسیب در سازه باشد.Li و همکاران در سال ۲۰۰۸ به آشکارسازی آسیب در سازه‌های فراساحلی بر اساس داده‌های مودال ناقص پرداختند. در این تحقیق از روش همبسته

مدل و مود[1] (CMCM) به همراه روش کاهش درجات آزادی تکراری گویان[2] به آشکارسازی آسیب در سازه‌های سه بعدی فراساحلی پرداخته اند. نتایج این تحقیق حاکی از آنست که می‌توان با استفاده از روش CMCM و کاهش و بسط تکراری مدل برای محاسبه ماتریس تبدیل سازه خسارت دیده و تعیین وضعیت آسیب استفاده نمود.

۲-۲-۳- روشهای مبتنی بر انحنای شکل مودی

استفاده از انحناهای اشکال مودی جهت آشکارسازی آسیب براین اساس استوار است که تغییرات انحنای اشکال مودی می‌تواند با حساسیت بیشتری نسبت به تغییرمکانهای اشکال مودی ناحیه آسیب دیده را پیش بینی نماید. معمولاً انحنا طبق رابطه زیر بر اساس تخمین اختلاف مرکزی[3] از روی تغییر مکان شکل مودی محاسبه میگردد:

$$\phi''_{ji} = \frac{\phi_{(j+1)i} - 2\phi_{ji} + \phi_{(j+1)i}}{L^2} \qquad (۱-۲)$$

که i شماره شکل مودی، j شماره گره و L فاصله بین گره‌ها را مشخص می‌نماید.

برای شناسایی سه بعدی آسیب در سازه‌ها به جای استفاده از تغییرات مودال می‌توان از مشتقات اشکال مودی[4] استفاده کرد که برای اولین بار بر روی تیرها، صفحات و پوسته‌ها تحقیق شده است.

بدلیل آنکه بین انحناء و کرنش ضمنی رابطه ای مستقیم وجود دارد، لذا برخی از محققان از اندازه‌گیری کرنش و یا محاسبه آن به صورت مستقیم از جابجایی و شتاب مطالعه کرده‌اند.

---

[1] Cross-Model Cross-Mode
[2] Iterative Guyan Reduction
[3] Centeral Difference Approximatiom
[4] - Mode shape derivatives

Pandy و همکاران نشان دادند که تغییر مطلق انحنای شکل مودی می‌تواند نشانگر خوبی برای تیرهایی که به صورت المان محدود مدل شده‌اند، باشد. مقادیر انحنا از شکل مودی جابجایی از عملکرد تفاضلی مرکزی[1] بدست می‌آیند.کار دیگری توسط Stubbs و همکاران انجام گرفت که در آن روشی بر پایه کاهش انرژی کرنشی مودال[2] با استفاده از منحنی شکل مودی ارائه شده است. در این مطالعه امکان استفاده از پارامترهای محدود مودال برای شناسایی آسیب مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنینChance و همکاران دریافتند محاسبه عددی انحناها از اشکال مودی منجر به تولید خطاهای بزرگ می‌شود. آنها از کرنش‌های اندازه‌گیری شده به جای انحناهای اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم استفاده کردند که به صورت فاحشی نتایج را بهبود داد.Chandrashekhar&Ganguli به ارزیابی آسیب در سازه‌ها با لحاظ نمودن عدم قطعیتهای موجود در هندسه سازه و اندازه گیری‌های انجام شده با استفاده از انحناهای شکل مودی و منطق فازی[3] نمودند. همچنین از شبیه سازی مونته کارلو[4] برای انجام آنالیز حساسیت شاخص خرابی(انحنا) با عدم قطعیتهای موجود در مشخصات هندسی تیر مورد مطالعه استفاده شده است.

۲-۲-۳-۱- انرژی کرنشی مودال

هنگامیکه یک مود ارتعاشی خاص از سازه مقدار انرژی کرنشی بیشتری را در یک مسیر انتقال بار سازه‌ای جذب می‌نماید، فرکانس و شکل آن مود نسبت به تغییرات در مسیر انتقال بار بسیار حساس میگردد. بنابراین تغییرات در انرژی کرنشی مودال می‌تواند بعنوان یک گزینه منطقی برای بیان موقعیت آسیب انتخاب گردد. انرژی کرنشی مربوط به یک شکل

[1] - Central difference operator
[2] - Modal strain energy
[3] Fuzzy Logic
[4] Monte Carlo Simulation

مودی خاص در یک تیر برنولی-اولر می‌تواند به شرح زیر بیان گردد:

$$U_i = \frac{1}{2}\int_0^l EI\left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2 dx \qquad (۲-۲)$$

که جهت محاسبه انحنای بکاررفته در رابطه فوق معمولاً از روش تخمین اختلاف مرکزی فوق الذکر استفاده میگردد.Sharifi& Banan در سال ۲۰۰۸ یک روش آشکارسازی آسیب سازه ای براساس تغییرات در انرژی کرنشی هریک از المانها قبل و بعد از وقوع خرابی را پیشنهاد نمودند. الگوریتم پیشنهادی براساس ماتریسهای جرم و سختی سازه قبل از آسیب و تعداد اندکی از مودهای اندازه گیری شده سازه خسارت دیده قابل طراحی است. روش پیشنهادی با استفاده از مسئله مرجع ارائه شده توسط IASC-ASCE مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۲-٤- روشهای مبتنی برانعطاف پذیری اندازه‌گیری شده دینامیکی

ماتریس انعطاف پذیری عکس ماتریس سختی است و به نیروی استاتیکی وارده و تغییر مکان حاصله وابسته است. بنابراین هر ستون از ماتریس انعطاف پذیری بیانگر نحوه تغییرمکان ایجاد شده در درجات آزادی مختلف به ازای نیروی واحد وارده بر درجه آزادی مورد نظر می‌باشد.

ماتریس انعطاف پذیری اندازه‌گیری شده دینامیکی [F] به صورت زیر قابل تخمین است:

$$[F] = [\Phi][\Lambda]^{-1}[\Phi]^T \qquad (۳-۲)$$

که $[\Phi]$ ماتریس اشکال مودی اندازه‌گیری شده و $[\Lambda]$ ماتریس قطری مربوط به مقادیر مربع

فرکانسهای مودال اندازه‌گیری شده است. بدلیل وجود مشکلات عملی در اندازه‌گیری مودهای بالاتر، ماتریس انعطاف پذیری معمولاً بر اساس مودهای پایین تر قابل تخمین است که با دقت بالایی همراه است چرا که ماتریس انعطاف پذیری رابطه عکس با مجذور مقادیر فرکانس داشته و هر اندازه مقادیر فرکانس افزایش می‌یابد (در مودهای بالاتر) میزان تاثیر آن در ماتریس انعطاف پذیری کمتر خواهد بود. بنابراین یکی از مزایای روش فوق، امکان استفاده از روش فوق تنها با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مودهای پایین است بطوریکه کارایی روش حفظ گردد.Duan و همکاران در سال ۲۰۰۷ اقدام به آشکارسازی آسیب در اثر ارتعاش محدود با استفاده از ماتریس انعطاف پذیری متناسب و بااستفاده از اندازه گیریهای ناقص در درجات آزادی مختلف نموده اند. با توجه به اینکه در حالتی که ارتعاش محدود وجود دارد ماتریس انعطاف پذیری در دسترس نمیباشد لذا از ماترسی انعطاف پذیری متناسب که حاصلضرب اسکالر جرم مودال مود اول در ماتریس انعطلف پذیری است، استفاده می‌شود . در این تحقیق ماتریس انعطاف پذیری متناسب در موقعیت سنسورها تشکیل شده و با استفاده از روش بردار شناسایی آسیب به آشکارسازی آسیب پرداخته شده است.

۲-۲-۵- روش بردار نیروی باقیمانده[1]

اگر اشکال مودی و مقادیر فرکانسهای طبیعی و همچنین مدل پایه اولیه موجود باشند امکان انجام فرمولاسیون مربوط به بردار نیروی باقیمانده وجود خواهد داشت. فرکانسهای طبیعی و اشکال مودی در معادله مقادیر ویژه (مفسر) سیستم صدق میکنند که اگر این معادله را برای مود i ام یک سازه آسیب دیده بنویسیم به ترتیب زیر خواهد بود:

[1] Residue Force Vector

$$(K_d - \lambda_{d_i} M_d)\phi_{d_i} = 0 \qquad (۴-۲)$$

که λ_d مجذور فرکانس طبیعی و ϕ_d شکل مودی اندازه‌گیری شده سازه آسیب دیده می‌باشد. با فرض آنکه K_d و M_d به ترتیب ماتریس‌های سختی و جرم سازه آسیب دیده باشند داریم:

$$\begin{aligned} K_d &= K_a + \Delta K \\ M_d &= M_a + \Delta M \end{aligned} \qquad (۵-۲)$$

با جاگذاری معادلات (۲-۵) در معادله (۲-۴) و مرتب کردن آن به بردار نیروی باقیمانده برای مود i ام به ترتیب زیر میرسیم:

$$R_i = (K_a - \lambda_{d_i} M_a)\phi_{d_i} \qquad (۶-۲)$$

که سمت راست معادله فوق معلوم می‌باشد. هر مود سازه‌ای یک بردار نیروی باقیمانده تولید میکند که این بردار می‌تواند بعنوان نیروی محرک هارمونیک با فرکانس $\sqrt{\lambda_{d_i}}$ وارده بر سازه سالم با ماتریس جرم وسختی M_a و K_a تعریف گردد طوریکه پاسخ سازه همان شکل مودی ϕ_{d_i} گردد.

هرسطر از RFV بیانگر یک درجه آزادی در مدل عددی سازه میباشد. وقتی که آسیب در یک المان واصله به این درجه آزادی رخ دهد باعث افزایش مقادیر مربوطه در RFV نسبت به سایر مقادیر میگردد. با جدا کردن مقادیر بزرگتر می‌توان به روشی جهت تعیین موقعیت

آسیب دست یافت. جهت تعیین مقدار کمیت آسیب نیز الگوریتمهای تکمیلی بایستی اضافه گردند.

۲-۲-٦- روشهای مبتنی بر ماتریس بهبود یافته

یکی از پر کاربردترین روشها جهت شناسایی آسیب بر اساس اصلاح مدل عددی سازه برای انطباق نتایج حاصله از ارتعاش دینامیکی است. در این زمینه معمولاً دشواریهایی نظیر چگونگی انتخاب داده‌های اندازه‌گیری شده جهت انطباق با مدل، دقت مدل اولیه، اندازه و پیچیدگی مدل، تعداد پارامترهای لازم برای بهبود و عدم یکتایی مدل منتجه جهت انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد.

موضوع اطلاعات ناقص در روشهای به روز نمودن مدل بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته اند. در روشهائی که موسوم به روشهای به روز شده[1] می‌باشند با مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش که در آزمایشگاه انجام گرفته با نتایج حاصل از تحلیل مدل کامپیوتری سازه فوق و اصلاح پارامترهای مدل سازه‌ای جهت تطبیق نتایج با مدل آزمایشگاهی به کالیبره نمودن مدل تحلیلی پرداخته می‌شود. در این روش‌ها یکی از مشکلات عمده در این است که معمولاً نتایج بدست آمده از آزمایشگاه در موقعیت‌های خاصی از سازه که سنسور نصب گردیده است وجود دارد و بنابراین در تمام درجات آزادی سازه مدل شده نتایج آزمایشگاهی جهت مقایسه وجود ندارد فلذا می‌بایست یا نتایج آزمایشگاهی را بسط داد[2] و یا مدل تحلیلی و درجات آزادی مدل سازی انجام شده را کاهش دهیم[3] که در هر صورت مقداری خطا وجود خواهد داشت.Yang وLee در سال ۱۹۹۹ یک روش دو مرحله جهت

[1] Model Updating
[2] Expanding
[3] Reduction

آشکارسازی آسیب ارائه نمودند. در این تحقیق جهت حداقل نمودن مسئله عدم یکتائی در پاسخ ناشی از داده‌های مودال ناقص در ابتدا از تکنیک زیر سازه‌ای جهت تشخیص نواحی محتمل به آسیب استفاده شده و با استفاده از تعیین موقعیت‌های احتمالی آسیب، اقدام به کوچک نمودن فضای جستجوی جهت تعیین میزان آسیب در مرحله دوم نموده اند. در این مرحله عملیات کمینه سازی تابع هدف بر اساس کمینه نمودن مقادیر خطاها بین مولفه‌های اشکال مودی بدست آمده از آزمایش و مقادیر متناظر تحلیلی انجام می‌شود. بنابر این نه نیاز به کاهش مدل و نه نیاز به بسط شکل مودی خواهد بود. این محققین روش پیشنهادی خود را با مدلسازی عددی آزمایش کردند به این ترتیب که داده‌های آزمایشگاهی را بر اساس داده‌های بدست آمده از یک مدل کاملاً اصلاح شده نسبت به مدل عددی که به روز شده بدست آوردند. آنها از یک تیر کنسولی جهت مطالعه خود استفاده نمودند و آسیب را بر اساس کاهش مقادیر سختی به میزان 20% و 40% در دو المان سازه‌ای مدل نمودند و نتایج مثبتی را از این مطالعه خود ارائه نمودند. Papadimitriou, Mailmen, Levine-West یک روش به روز نمودن مدل تکراری را جهت آشکارسازی آسیب با استفاده از مجموعه داده‌های ناقص از فرکانسها و اشکال مودی آزمایشگاهی ارائه نمودند. روش آنها بر اساس روش کمینه سازی حداقل مربعات نیروی باقیمانده نامتعادل دینامیکی[1] بود. سه مرحله تکراری شامل بسط دادن شکل مودی، تعیین محل آسیب و نهایتاً تعیین مقدار آسیب می‌باشد. تعیین محل آسیب بر اساس اختلاف انرژی کرنشی یک المان در اشکال مودی آزمایشگاهی بسط داده شده در مرحله فعلی با مقدار متناظراشکال مودی تحلیلی در مرحله پیشین انجام می گیرد. اندازه آسیب نیز با استفاده از اشکال عددی بسط داده شده بدست

[1] Dynamic Unbalanced Force Residuals

می‌آید. اطلاعات مودال بدست آمده از یک سازه خرپایی سه بعدی جهت بیان مزایا و محدودیتهای کارایی روش ارائه شده در ارتباط با تعداد و موقعیت سنسورها، محل و میزان آسیب و تعداد مودهای اندازه‌گیری شده بکار رفته است. همچنین Weber و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از به روز نمودن مدل اجزاء محدود، پارامترهای کاهش سختی را براساس اشکال مودی و فرکانسهای اندازه گیری شده تعیین نمودند که برای شناسایی غیر خطی پارامترها از مرتب سازی Tikhonov به همراه خطی سازی تکراری استفاده نمودند.

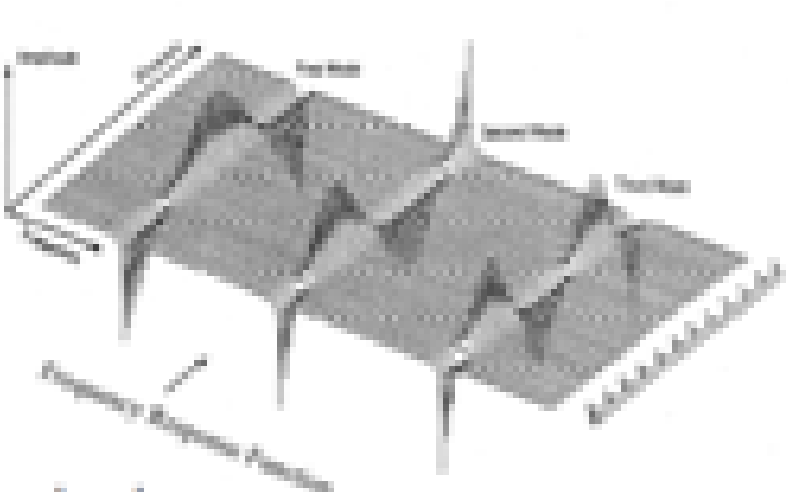
۲-۲-۷- روشهای بر پایه تابع پاسخ فرکانس FRF

برخی از منابع بر استفاده مستقیم از اندازه گیری‌های بعمل آمده از تابع پاسخ فرکانسی بجای استخراج داده‌های مودال ازآن تاکید میکنند. Lee, Shin به دو مورد از مزایای استفاده از روش FRF نسبت به روش مودال اشاره نمودند :

الف- امکان وجود خطا در داده‌های مودال ناشی ازاستخراج اطلاعات و خطاهای موجود در اندازه‌گیری وجود دارد.

ب- مجموعه کامل از داده‌های مودال معمولاً قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد.

همانطوریکه در شکل (۲-۴) دیده می‌شود، داده‌های FRF میتوانند اطلاعات بیشتری از آسیب سازه در محدوده فرکانسی وسیع تری در اختیار ما قراردهد در حالیکه داده مودال از محدود کوچکتری از فرکانس نزدیک تشدید استخراج شده اند.



شکل (۲-۴) تابع پاسخ فرکانس FRF [۲]

۲-۲-۸- روشهای بر پایه تبدیل ویولت

تبدیل ویولت تبدیلی است که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه کوتاه استخراج نموده و تغییرات این اجزاء فرکانسی را با گذشت زمان مشخص می‌نماید. در این تبدیل با ایجاد یکسری بردارهای پایه تصویر سیگنال بر این پایه‌ها که معادل جزءفرکانسی سیگنال میباشد تولید میگردد. ویولتها مزیتهای زیادی نسبت به روشهای فوریه سنتی در تحلیل سیگنالهای دارای ناپیوستگی و ضربه تیز دارند. تئوری ویولت به ما این امکان را می‌دهد که در فرایندهای غیرایستا بتوانیم از جزئیات فرکانسی در هر لحظه، اطلاعاتی بدست آوریم. همچنین آنالیز ویولت در مقایسه با آنالیز فوریه رفتار محلی را ارائه میکند در صورتیکه آنالیز فوریه رفتار کلی را ارئه می کند.

اولین مطالعات انجام شده توسط Newland بیانگر پتانسیل بالای تبدیل موجک(ویولت) در پردازش سیگنال بود. این مطالعات فصل جدیدی از تحققات را در مهندسی ارتعاشات

گشود. تبدیل موجک، یک سیگنال را به سری از توابع محلی (موجک) از حوزه زمان تقسیم می‌کند. و همچنین، شناسایی ویژگی‌های محلی سیگنال را در مقیاس و موقعیت موجک (Wanted) ممکن می‌سازد. به نظر می‌رسد اولین مطالعات در زمینه استفاده از آنالیز موجک در محدود شناسایی آسیب مربوط به کارهای انجام شده توسط Surace and Ruotole باشد. از تبدیل موجک برای آنالیز سیگنال پاسخ ارتعاشی شبیه سازی شده یک تیر که شامل ترک با مدل باز و بسته شونده بود استفاده کردند. Wang and McFadden, Liew and Wangمطالعاتی را در مورد شناسایی آسیب با استفاده از تبدیل موجک انجام دادند. آنها موجک زمانی و موجک فضایی را در تحقیقات خود برای شناسایی ویژگی‌های محلی این سیگنال‌ها به کار بردند. همچنین Poudel و همکاران در مطالعات خود به استفاده از Digital video imaging اشاره می‌کنند و اشکال مودی را از سری زمانی بدست آورده و از اختلاف اشکال مودی با استفاده از تبدیل موجک برای شناسایی آسیب استفاده نمود. Rucka and Wildoاقدام به ارائه روشی برای تخمین موقعیت آسیب در تیرها و صفحات کردند. در این روش از تبدیل موجک پیوسته بوسیله اندازه‌گیری از حداکثر تغییرات فضایی پاسخ تبدیل یافته، استفاده شد. همچنین Gokdag&Kopmaz در سال ۲۰۰۹ با ترکیب تبدیلات ویولت گسسته و پیوسته به آشکارسازی آسیب در تیرها پرداختند. در این روش فرض شده تا شکل مودی سازه آسیب دیده را بتوان بصورت تقریبی از شکل مودی سازه سالم و بخشهایی نظیر متغییرهای اندازه گیری و خسارت موضعی تخمین زد. در این روش شاخص خسارت بصورت تفاضل ضرایب تبدیل ویولت پیوسته برای شکل مودی خسارت دیده و تابع تخمین تعریف میگردد. Beskhyroum و همکاران در سال ۲۰۰۹ از مشخصه‌های سیگنالهای ارتعاشی تحت تبدیل ویولت برای شناسایی آسیب استفاده نمودند. روش پیشنهادی تنها

براساس داده‌های خروجی و بدون نیاز به اندازه گیری نیروی محرک و یا مدلهای عددی و شناسایی مودال سیستم میباشد که برای تایید تئوری پیشنهادی از پل فولادی ریلی استفاده شده است. همچنین استفاده از محرکهای پیزوالکتریک برای تحریک سازه‌های بزرگ نظیر پلهای فولادی در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. در این مطالعه سناریوهای مختلف آسیب توسط برداشتن بولتهای سخت کننده‌های جان تعریف شده است.Ren و همکاران در سال ۲۰۰۸ به تشخیص خرابی در برشگیرهای اتصال دال به تیر از طریق بسته‌های انرژی ویولت پرداخته اند. سناریوهای مختلف آسیب با برداشتن اتصالات تیرها به دال که بعنوان برشگیر عمل میکنند صورت گرفته است و از یک مدل پل با مقیاس ۱:۳ استفاده شده است. یک روش تشخیص آسیب با استفاده از سیگنال که شاخص آسیب در آن تغییرات در انرژی بسته ویولتی خواهدبود طرح ریزی شده است. با استفاده از نتایج پاسخهای ضربه ای چکش موقعیت برشگیر حذف شده به درستی تشخیص داده شد. همچنین در این تحقیق نشان داده شده است که اندیس انرژی براساس بسته ویولتی میتواند بعنوان یک شاخص حساس به آسیب موضعی بکاررود.Pakrashi و همکاران در سال۲۰۰۷ به تشخیص آسیب در المانهای تیر که دچار ترک شده اند پرداخته اند. در این تحقیق تغییرشکل استاتیکی و شکل مودی اول تیر که دارای ترک میباشد بدست آمده و نوفه سفید گوسی با چگالی‌های مختلف به آنها اعمال شده است. برای تعیین موقعیت آسیب آنالیز ویولت برروی تغییرشکل استاتیکی و شکل مود اول تیر انجام شده است و برای تعیین میزان آسیب ازتکنیک wavelet-kurtosis استفاده گشته است. نتایج حاکی از آن است که آنالیز ویولت به همراه کالیبراسیون خسارت بر اساسkurtosis میتواند بطرز صحیحی موقعیت و میزان آسیب را براساس اندازه گیریهای دارای نوفه تعیین نماید.He&Yan در سال۲۰۰۷ به تشخیص آسیب در سازه‌ها با استفاده از

ماشین بردار پشتیبانی ویولتی[1] پرداختند. در این مطالعه برای تعیین بردار مشخصه از طیف انرژی ویولت استفاده شده که خود بسته ویولتی جهت تجزیه سیگنالهای پاسخ سازه ای تحت ارتعاش محدود[2] بکاررفته است. بردارهای مشخصه بعنوان ورودی برای آموزش ماشین بردار پشتیبانی بکار میرود. بنابراین به معرفی یک سیستم شناسایی آسیب براساس ویولتها و تولید تابع کرنل ماشین بردار پشتیبانی[3] پرداخته میشود.Jiang&Mahadevan درسال ۲۰۰۷ به پاره ای از مشکلات موجود در فرآیند آشکارسازی آسیب سازه‌ها شامل اثرات رفتار غیر خطی سیستم سازه ای، داده‌های اندازه گیری شده ناقص، وجود نوفه در داده‌ها و عدم قطعیت در اندازه گیری‌های آزمایشگاهی و مدل تحلیلی پرداخته شود. در این تحقیق سعی شده تا براساس روش احتمالاتی ویولت بیزین[4] آسیب سازه ای بصورت غیر پارامتری و باوجود مشکلات اشاره شده آشکارسازی شود. برای حذف نوفه ها از تبدیل ویولتی بیزین استفاده شده است. روش شناسایی غیر پارامتری سیستم براساس شبکه‌های عصبی ویولتی فازی جهت پیش بینی پاسخهای دینامیکی سازه تحت تحریکات خارجی بکاررفته است. متریک ارزیابی بیزین بعنوان متغییر تصادفی آموزش داده شده که برای وارد نمودن اثرات عدم قطعیت در تابع چگالی احتمال از شبیه سازی مونته کارلو[5] استفاده شده است. روش پیشنهادی از طریق انجام آزمایش برروی یک قاب فولادی ۵ طبقه و مدل ساختمان ۳۸ طبقه تایید شده است.Curadeliوهمکاران در سال ۲۰۰۸ به آشکارسازی آسیب بر اساس شناسایی میرایی و آنالیزحساسیت مربوطه پرداختند. هدف اصلی این تحقیق آشکارسازی آسیب با

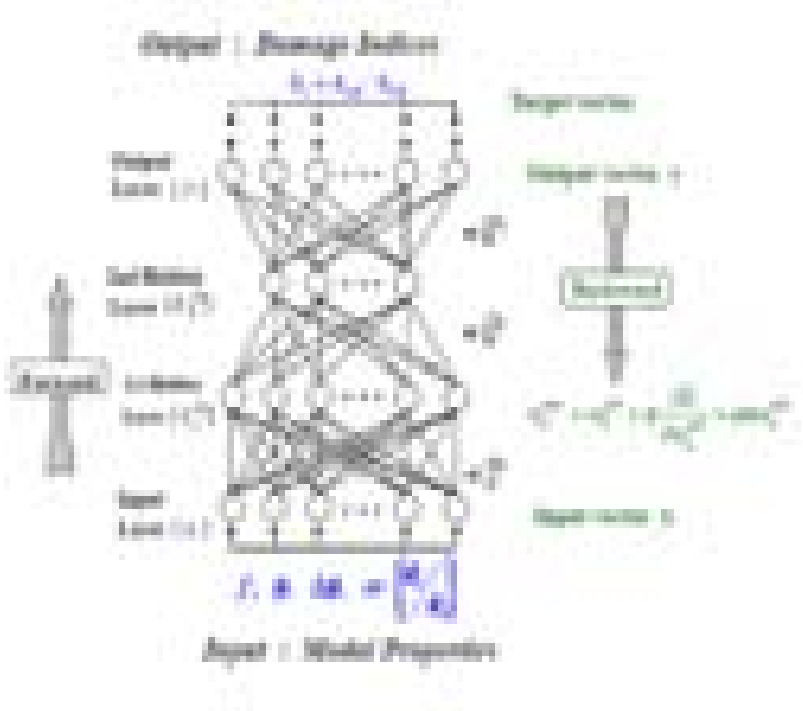
[1] Wavelet Support Vector Machine
[2] Ambient Vibration
[3] Kernel Function
[4] Bayesian wavelet
[5] Monte Carlo simulation

شناسایی ضریب میرایی آنی و استفاده از تبدیل ویولت است. نتایج آزمایشگاهی و عددی بیانگر آنست که آسیب سیستم سازه ای باعث تغییر در میرایی شده و بنابراین میرایی میتواند بعنوان یک پارامتر حساس به آسیب سازه ای بکار رود. همچنین قدرتی امیری و باقری در سالهای ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ به مطالعات خود در زمینه آشکار سازی آسیب در صفحات با استفاده از تبدیلات پیچک و ویولت دوبعدی پرداختند .

۲-۲-۹- روشهای مبتنی برشبکه‌های عصبی مصنوعی

در چند دهه اخیر، اندیشه بالنده شبیه سازی مغز انسان، محققان و دانشمندان را بر آن داشته است تا توانایی‌های مغز انسان را به رایانه منتقل سازند. عملکرد مغز انسان با توجه به میلیونها سال تکامل میتواند به عنوان کاملترین و بهترین الگو برای تشخیص وقایع پیرامون خود در نظر گرفته شود. لذا دانشمندان در تلاش‌اند تا با درک اصول و ساز و کارهای محاسباتی مغز انسان که عملکرد بسیار سریع و دقیقی را دارا می‌باشد، سیستمهای عصبی مصنوعی را شبیه سازی نمایند. بدین ترتیب شبکه‌های عصبی مصنوعی تا حدودی از مغز انسان الگوبرداری شده‌اند و همانگونه که مغز انسان میتواند با استفاده از تجربیات قبلی و مسائل از پیش یادگرفته، مسائل جدید را تحلیل و تجزیه نماید، شبکه‌های عصبی نیز در صورت آموزش قادرند بر مبنای اطلاعاتی که به ازای آنها آموزش دیده‌اند جوابهای قابل قبولی ارائه دهند و نیز میتوان از آنها به طور نامحدود در ارائه جواب به اطلاعاتی که قبلاً با آنها مواجه نبوده اند، استفاده نمود. در سالهای اخیر علاقه زیادی به کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در شناسایی آسیب در سازه‌های پیچیده بر اساس تغییرات در خصوصیات فیزیکی از قبیل کاهش سختی ناشی از ایجاد ترک یا از آسیب اتصال و یا سایر موارد شده است که باعث ایجاد تغییرات در

خواص مودال می‌گردد. تغییرات در خصوصیات مودال و سایر خصوصیات به عنوان اندیس آسیب نامیده می‌شوند. بنابراین روند شناسایی آسیب بر اساس ارتعاش اصولاً به برخی از فرمهای مساله شناسایی الگو بر می‌گردد .شناسایی الگو یکی از مهمترین مسائل برای حل مناسب شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. در شکل (۲-۵) نحوه عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در شناسایی آسیب نشان داده شده است.



شکل (۲-۵) تشخیص خرابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوع[۲]

Chen, Shah یک پایه پل را با استفاده از شبکه پس انتشار خطا مورد مطالعه قرار دادند. ورودی‌های این شبکه عصبی شتابهای بدست آمده از ۴ شتابنگاشت است که دو عدد از آنها به صورت عمودی و دو عدد به صورت افقی بر روی پایه پل نصب شده اند. خروجی

شبکه عصبی شامل فرکانس، جابه جایی و شکل مدی می‌باشد. شبکه با استفاده از داده‌های بدست آمده در شرایط مختلف آموزش می‌بیند: قبل از آسیب و بعد از آسیب. با مقایسه نتایج، آنها نتیجه گرفتند که شبکه عصبی با موفقیت تغییرات در پارامترهای پایه را بعد از آسیب آشکار می‌کند. همچنین در صورت استفاده از داده‌های بیشتر نتایج دقیق تری به دست می‌آیند.Elkordy و همکارانش از شبکه عصبی با پس انتظار برای شناسایی آسیب در سازه استفاده کردند. آسیب وارده به صورت کاهش در سختی اعضای طبقه پایین به میزان ۱۰ درصد الی ۷۰ درصد شبیه سازی شده بود. نویسنده‌ها یک لایه پنهان با ۱۴ نرون انتخاب کرده بود. شکلهای مدی به عنوان ورودی در نظر گرفته شده بود و درصد تغییر در سختی عضو به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. با استفاده از دو شبکه، دو مدل ریاضی را آموزش دادند و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. اولین شبکه با استفاده از ۱۱ الگوی آموزشی از اولین مدل ایجاد شده، مورد آموزش قرار گرفت. دومین شبکه با استفاده از ۹ الگوی آموزشی که از مدل دوم ایجاد شده بود، مورد آموزش قرار گرفت. در حالت کلی شبکه عصبی مصنوعی اولین مدل با پیچیدگی کمتر به نتایج بهتری رسید و شبکه آموزش دیده بر روی دومین مدل به شناسایی خوبی رسید و دقیقاً خطای پیش بینی کمتر از ۱۰ درصد گزارش شده است.Pandey, Barai دو نوع شبکه عصبی جهت آشکارسازی آسیب در پلهای ریلی ارائه نمودند.سیگنالهای ارتعاشی بدست آمده از یال تحتانی پل خرپایی بعنوان ورودی شبکه‌های عصبی بکار می‌روند. یک نوع شبکه چند لایه‌ای پرسپترون [1](MLP) و همچنین تاخیر زمانی در پاسخ دینامیکی با استفاده ازشبکه عصبی با تاخیر زمانی معرفی می‌گردند. کارائی هر دو شبکه عصبی آموزش داده شده در دو حالت

[1] Multi Layer Perceptron

اندازه گیری کامل و ناقص بدست آمده از آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آسیب با استفاده از کاهش سختی در یکی از المانها مدلسازی گشته است. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که کارایی شبکه عصبی با تاخیر زمانی بهتر از شبکه عصبی چند لایه‌ای پرسپترون است. Li&Yangدرسال۲۰۰۸ آسیب تیررا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی شناسایی نمودند. برای آموزش شبکه انتشار برگشتی[1] از تغییرات واریانس در پاسخهای سازه ای بعنوان ورودی شبکه و وضعیت خرابی بعنوان خروجی استفاده شده است. نتایج حاکی از آنست که استفاده از مشخصه‌های آماری (نظیر واریانس) پاسخ سازه ای بعنوان شاخص خرابی و ورودی شبکه بسیار موثر خواهد بود.Wen و همکاران در سال۲۰۰۷ به تشخیص آسیب سازه‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی فازی بدون نظارت[2] پرداختند. در این تحقیق از یک ساختمان قابی ۵ طبقه استفاده گردیده است که برای ارزیابی روش پیشنهادی از اندازه گیری‌های ناقص و اطلاعات مودال ناقص نیز بهره برده اند. نتایج بیانگر آنست که شبکه بکاررفته در مقایسه با شبکه‌های انتشار برگشتی موثرتر خواهد بود.

پارامترهای مهم در تحلیل غیرخطی

در این قسمت به پارامترهای مدل‌سازی که در تحلیل‌های غیرخطی اهمیت ویژه‌ای دارند خواهیم پرداخت. این پارامترها عبارتند از زوال، اثرات پی-دلتا و اثر بار ثقلی و استهلاک انرژی.

[1] Back-Propagation ANN
[2] Unsupervised Fuzzy Neural Networks

زوال[1]

ارزیابی عملکرد سیستم تحت سطوح خطر لرزه‌ای متفاوت انجام می‌شود. از آنجا که باید رفتار سیستم را در بازه‌ای از وضعیت حدی خدمت‌رسانی تا وضعیت حدی نزدیک به فروریزش بدانیم، لازم است تا مدل‌های هیسترتیکی[2] که شامل پدیده‌های مهم شرکت‌کننده در پاسخ سازه (نزدیک به فروریزش) است، را توسعه بدهیم. فروریزش به این معنی است که سیستم سازه‌ای نتواند بارهای ثقلی را در اثرهای زلزله تحمل نماید. برای مثال اگر یک عضو عمودی حمل‌کننده بار تحت فشار از بین برود و یا اگر انتقال برش بین اعضای عمودی و افقی رخ ندهد (برای مثال خرابی برشی پانچ[3] بین دال تخت و ستون)، فروریزش محلی رخ می‌دهد. فروریزش کلی زمانی اتفاق می‌افتد که یک خرابی محلی منتشر شود و یا جابجایی یک طبقه به نقطه‌ای برسد که اثرات پی-دلتای مرتبه دوم از مقاومت برشی مرتبه اول طبقه بیشتر شود. ارزیابی زلزله نیازمند مدل‌های هیسترتیکی است که قادر باشند تا تمام مدهای مهم زوال را که در داده‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شوند، ارایه دهند. مدل‌کردن زوال معادل با مدل‌کردن نتایج خرابی بر رفتار هیسترتیک اجزای سازه‌ای می‌باشد. خرابی به علت بارگذاری یکنواخت رخ می‌دهد و با بارگذاری چرخه‌ای تشدید می‌شود (خرابی تجمعی).

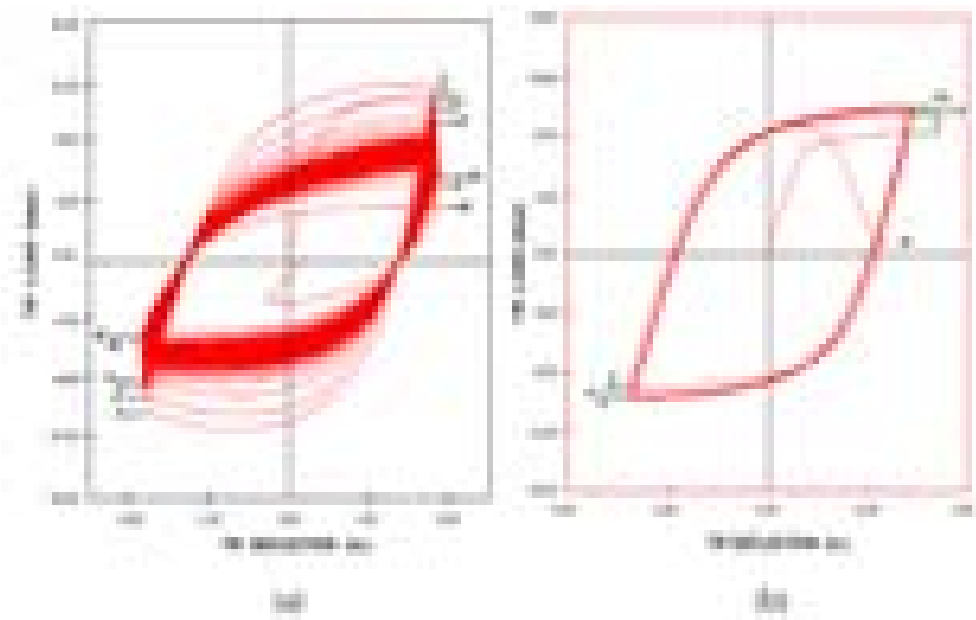
---

[1] Deterioration

[2] Hystertic

[3] Punching shear failure

این امر تمام شرایط حدی[1] را تحت تاثیر قرار می‌دهد، ولی وقتی سازه نزدیک به فروریزش باشد مساله غالب خواهد بود. زوال می‌تواند به سرعت و یا به آرامی رخ دهد. در شکل ۲-۶ که از نتایج آزمایشگاهی تیر فولادی جوش شده به ستون بدست آمده، a زوال نسبتا آرام به علت ناپایداری محلی و b زوال سریع به علت انتشار ترک و خستگی در تیر-ستون می‌باشد



شکل (۲-۶): تعداد تکرار نمودارهای نشان دهنده سرعت مختلف زوال.

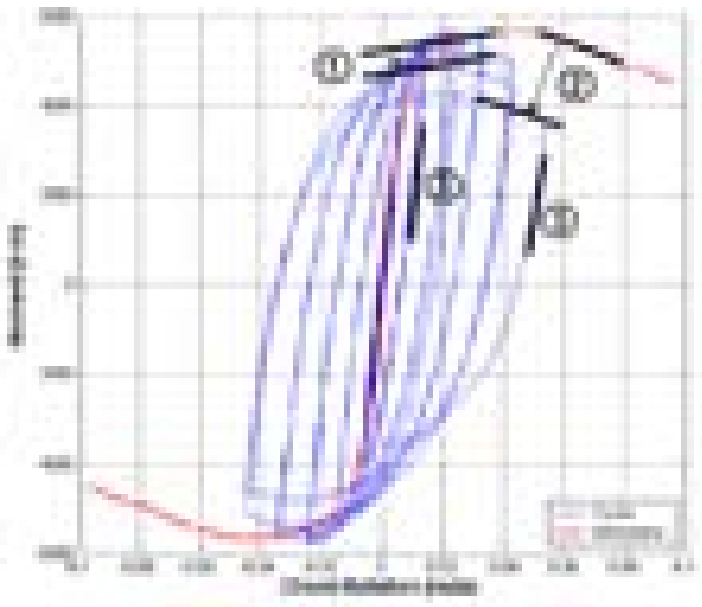
عدم قطعیت بزرگی در پیش‌بینی شروع زوال سریع که منجر به از دست رفتن کامل مقاومت می‌شود، وجود دارد. به صورت کلی در اعضایی که تحت تقاضای تغییرشکل غیرالاستیک هستند باید از زوال سریع جلوگیری کرد، مگر آنکه زوال سریع تحت تغییرشکل‌های مرتبط

[1] Limit states

با MCE رخ دهند. در ساخت و سازهای جدید فرض می‌شود از چنین مدهای خرابی بوسیله شکل‌پذیری کامل و چک لیست‌های ایمنی ظرفیت، جلوگیری می‌شوند. برای همین نیازی نیست تا این رفتار در تحلیل به صورت مستقیم مدل شود و سازه‌های بلند با زوال آرام مدل می‌شوند. با این حال صحت‌سنجی برای نشان دادن این امر که تقاضاهای رخ داده در مدل از حدود مرتبط با زوال سریع در اعضا بیشتر نباشند، باید انجام شود.

مدهای زوال

شکل زیر پاسخ بارگذاری، جابجایی یکنواخت و چرخه‌ای یک تیر فلزی را [ترمبلی[1]، ۱۹۹۷] نشان می‌دهد.



[1] Tremblay

شکل (۲-۷): پاسخ یکنواخت و چرخه‌ای یک تیر فلزی.

نتایج آزمایش یکنواخت نشان می‌دهد که مقاومت به اوج می‌رسد و بعد سختی مماسی منفی می‌شود در نتیجه بعد از یک تغییرشکل معین تحت بارگذاری یکنواخت زوال مقاومت واضح است. بارگذاری چرخه‌ای باعث بوجود آمدن مدهای زوال اضافه‌ای می‌شود که عبارتند از :

۱. زوال مقاومت پایه[۱]

مقاومت با تعداد و دامنه سیکل‌ها، حتی اگر جابجایی مرتبط با نقطه اوج مقاومت رخ نداده باشد، کاهش می‌یابد، (مد اول در شکل ۴-۲) که به صورت یک جابجایی (و معمولا به همراه یک چرخش) از مقاومت قبل اوج نسبت به مبدا نمایش داده شود.

۲. زوال مقاومت بعد اوج[۲]

وقتی سختی مماسی منفی می‌شود، مقاومت به مقدار بیشتری زوال می‌یابد، (مد ۲ در شکل ۴-۲) که به شکل یک جابجایی (و معمولا به همراه یک چرخش) از نقطه بعد اوج نسبت به مبدا نمایش داده می‌شود.

۳. زوال سختی باربرداری[۱]

---

[۱] Basic strenght deterioration

[۲] Post-capping strength deterioration

سختی باربرداری با تعداد و دامنه چرخه‌ها زوال می‌یابد (مد ۳ در شکل ۴-۲) که به شکل یک چرخش در شیب باربرداری نشان داده می‌شود.

۴. زوال سختی بارگذاری مجدد شتاب داده شده[۲]

سه مدل اول زوال چرخه‌ای در پاسخ سیکلی تمام اعضای سازه‌ای دیده می‌شود. مد چهارم در اعضایی که خمش در آنها حاکم باشد، قابل تشخیص نبوده و با حلقه‌های هیسترزیس چاق نمایش داده می‌شود.

پیامدهای زوال بر پاسخ سازه‌ای

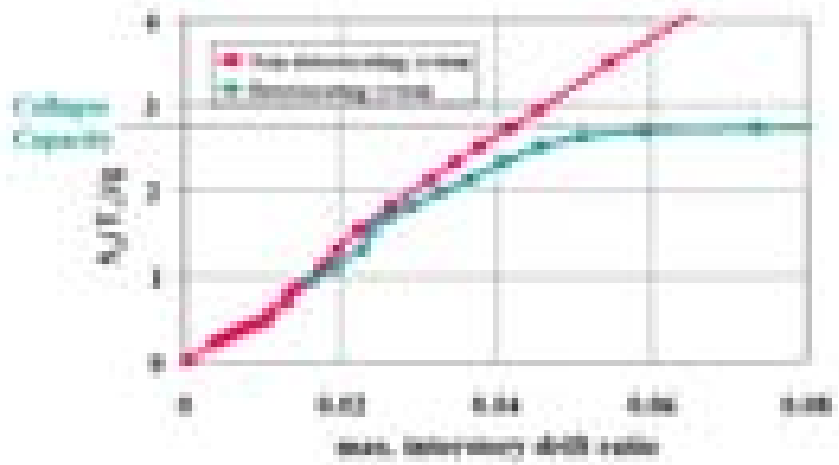
اهمیت زوال بر پاسخ دینامیکی سازه به متغیرهای فراوانی از جمله خصوصیات شدت و فرکانس زمین‌لرزه، نوع سیستم سازه‌ای، سطح تغییرشکل‌ها، اهمیت اثر پی-دلتا و خصوصیات زوال اعضای مهم سازه‌ای بستگی دارد. در شکل ۲-۸ تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) سازه با قاب گیردار نسبتاً شکل پذیر کم ارتفاع، شتاب طیفی پریود مد اول سازه در برابر بیشینه دریفت طبقه، برای یک زمین‌لرزه مشخص را نشان می‌دهد. یکی از منحنی‌ها از تحلیل مدل با زوال و دیگری بدون زوال بدست آمده است (پاسخ هیسترزیس دو خطی

---

[۱] Unloading stiffness deterioration

[۲] Accelerated reloading stiffness deterioration

فرض می‌شود و هیچ مد یکنواخت و یا زوال چرخه‌ای در نظر گرفته نمی‌شود). در منحنی مدل بدون زوال، از آنجا که اثر پی-دلتا به آن‌اندازه بزرگ نیست که اثر سخت‌شدگی کرنشی ذاتی اعضای مدل غلبه کند، IDA تا دریفت ۲۰٪ ادامه یافته و بعد تحلیل متوقف شده است. در دریفت‌های نسبتا کوچک پاسخ یکسان است ولی منحنی‌ها وقتی خرابی تجمعی وارد می‌شوند، منحرف می‌شوند. منحنی دوم از تحلیل اعضای زوال کننده بدست



آمده است و شیب به سرعت کاهش می‌یابد. در این نقطه یک افزایش کوچک در شدت باعث یک افزایش بزرگ در دریفت می‌شود که نشان دهنده ناپایداری دینامیکی در مدل تحلیلی است. با فرض اینکه مدل صحیح باشد، این امر بیانگر فروریزش یک طبقه یا تعدادی از طبقات در سیستم سازه‌ای است. شدت زمین‌لرزه مرتبط با ناپایداری دینامیکی به عنوان ظرفیت فروریزش یک سازه خاص در یک حرکت زمین خاص می‌باشد.

شکل(۲-۸): تحلیل دینامیکی افزایشی یک قاب گیردار با مدل‌های شامل زوال و بدون زوال.

شکل ۲-۸ نشان می‌دهد که استفاده از زوال وقتی سازه به فروریزش نزدیک باشد ضروری است. انجام تعدادی از این تحلیل‌ها با استفاده از یک تعداد زمین لرزه، منحنی‌های شکست فروریزش را فراهم می‌کند که در ترکیب با مقیاس‌های عدم قطعیت مدل‌سازی، برای تخمین احتمال فروریزش (حاشیه فروریزش) به کار می‌روند. مطالعات ایبارا و همکارانش (۲۰۰۲)، ایبارا و کراوینکلر (۲۰۰۵)، زارعیان (۲۰۰۶)، هسلتون و دیرلین[1] (۲۰۰۷) و زارعیان و کراوینکلر (۲۰۰۷) نشان می‌دهند که تغییرشکل مرتبط با نقطه اوج و سختی مماسی بعد اوج، پارامترهای اولیه‌ای هستند که ظرفیت فروریزش به آن وابستگی دارد.

دلایل زوال

نرم‌افزارهای تحلیلی، زوال را تنها در صورتی تشخیص می‌دهند که به صورت مستقیم تعریف شده باشد و پارامترهای آن برای مقاومت و سختی اعضای سازه‌ای مشخص باشد. برای همین، کاربر باید زوال را در مدل تعریف کند و پدیده‌هایی که ممکن است در زوال تاثیرگذار باشند را تشخیص دهد. در اعضای فولادی عوامل زیر می‌تواند باعث زوال شوند:

- کمانش موضعی
- کمانش خمشی
- جاری شدن فولاد

[1] Deierlein

- کمانش پیچشی جانبی
- خرابی برشی و پیچشی

مدل کردن زوال کاری دشوار است. در بیشتر موارد، باید به شواهد آزمایشگاهی اعتماد کرد و ساده‌سازی‌هایی انجام داد. اینکه کدام منبع زوال به اندازه کافی مهم است که در مدل تحلیلی در نظر گرفته شود، یک قضاوت مهندسی است.

مدل‌سازی زوال

مدل‌سازی صحیح زوال شامل در نظرگرفتن تمام خصوصیات ماده و هندسه که در کاهش مقاومت و سختی تاثیرگذار می‌باشند، می‌شود. به علت عدم قطعی ذاتی در خصوصیات مواد، تصمیم‌های طراحی، تکنیک‌های ساخت‌وساز، خطاهای انسانی و مدل‌های میکرومکانیکی، ممکن است که به اهداف یک مدل‌سازی صحیح نرسیم. از طرفی، ممکن است به علت عدم قطعیت‌های قابل ملاحظه ذاتی در خصوصیات خطر زمین‌لرزه به جوابهای دقیق نیاز نداشته باشیم. از طرف دیگر نادیده گرفتن زوال، ارزیابی کارایی نزدیک فروریزش و یا دیگر وضعیت‌های حدی با احتمال کم و پیامدهای بالای مرتبط با MCE را غیرممکن می‌سازد.

مفاهیم پایه در مدل کردن رفتار هیسترتیک مشتمل بر زوال

مدل کردن رفتار چرخه‌ای شامل زوال بر پایه سه مفهوم زیر است:

۱. منحنی پوش، یک رابطه نیرو-تغییرشکل است که مرزهایی که در آن پاسخ هیسترتیک عضو محصور می‌شوند را توصیف می‌کند.

۲. تعدادی قانون که خصوصیات پایه رفتار هیسترتیک داخل مرزهای پوش را تعریف می‌کنند.

۳. تعدادی قانون که مدهای متفاوت زوال بسته به منحنی پوش را توصیف می‌کنند.

مدل‌های فراوانی که ازاین مفاهیم استفاده کنند در ادبیات فنی وجود دارند. یکی از این مدل‌ها، مدل‌ایبارا-کراوینکلر است. این مدل برای اعضای فولادی، بتنی و چوبی جواب‌های قابل قبولی که با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده یکسان باشند، فراهم می‌سازد.

منحنی پوش

منحنی پوش، یک رابطه نیرو-تغییرشکل است که مرزهایی که در آن پاسخ هیسترتیک عضو محصور می‌شوند را توصیف می‌کند، اگر زوال چرخه‌ای رخ ندهد، منحنی پوش نزدیک به منحنی بارگذاری یکنواخت بوده و به آن "منحنی پوش اولیه"[۱] گفته می‌شود. وقتی زوال چرخه‌ای داشته باشیم شاخه‌های منحنی پوش به سمت مبدا حرکت کرده و پیوسته تغییر می‌کنند این منحنی آپدیت شونده را "منحنی چرخه‌ای پوش"[۲] می‌نامیم.

---

[۱] Initial backbone curve

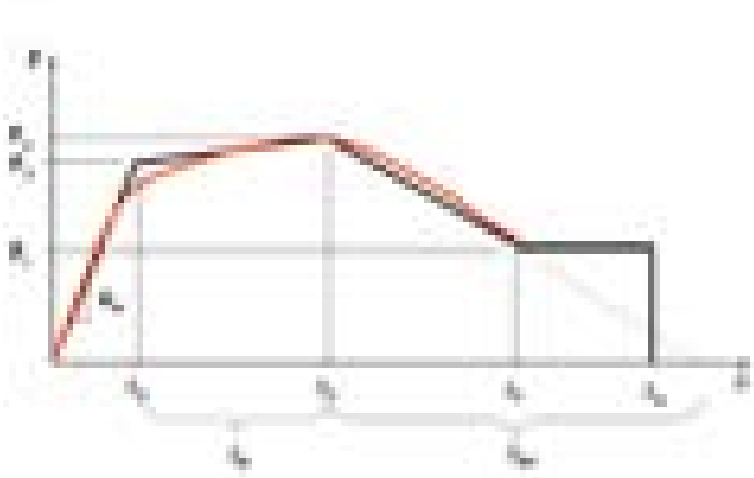
[۲] Cyclic backbone curve

منحنی چرخه‌ای پوش به تاریخچه بارگذاری وابسته بوده و به صورت پیوسته بعد هر چرخه که باعث خرابی در عضو می‌شود، تغییر می‌کند. منحنی پوش اولیه نزدیک به بارگذاری یکنواخت است اما لزوماً با آن یکسان نیست و شامل ساده‌سازی‌های توصیف پاسخ می‌باشد برای مثال امکان دارد که میانگین سخت‌شدگی چرخه‌ای[۱] را در نظر بگیرد. تفاوت کمی بین منحنی پوش اولیه و بارگذاری یکنواخت، در مفهوم وجود دارد و برای اهداف عملی این دو عبارت را می‌توان به جای هم به کاربرد. شکل ۲-۹ یک منحنی پوش اولیه را نشان می‌دهد. توصیفات دقیقتر چندخطی[۲] می‌تواند در صورت نیاز به کاررود. منحنی پوش اولیه، زوال مقاومت برای تغییرشکل‌های بیشتر از نقطه اوج (بیشینه مقاومت تحت بار یکنواخت) را در نظر می‌گیرد.خصوصیات منحنی پوش اولیه برای جهت‌های مثبت و منفی می‌تواند متفاوت باشد (مثلاً آرماتورگذاری نامساوی در یک تیر بتنی یا تیرهای فلزی کامپوزیت). همچنین ممکن است که به علت بعضی از ملاحظات، ساختمان منحنی پوش تغییر کند. اگر سختی اولیه با سختی الاستیک موثر تفاوت زیادی داشته باشد، جواب تحت تاثیر قرار می‌گیرد و حتی در نزدیکی فروریزش، سختی اولیه باید در مدل‌سازی لحاظ شود.

---

[۱] Cyclic hardening

[۲] Multi-linear



شکل (۲-۹): منحنی پوش اولیه مدل ایبارا-کراوینکلر.

منحنی پوش اولیه فرض می‌کند که زوال چرخه‌ای در مدل تحلیلی لحاظ می‌شود، اگر این امر شدنی نباشد (یعنی از زوال چرخه‌ای صرف نظر شود)، منحنی پوش اولیه باید با توجه به اینکه بارگذاری چرخه‌ای، تغییرشکل اوج (که سختی مماسی در آن منفی می‌شود) و تغییرشکل نهایی (که عضو تمام یا بیشتر مقاومتش را از دست می‌دهد) را کاهش می‌دهد، اصلاح شود.

مدل کردن هیسترتیک پایه[1]

قوانین تعریف‌کننده رفتار چرخه‌ای بدون تمهیدات خاص برای زوال چرخه‌ای، باید بسته به مد غالب تغییرشکل، مطابقت داده شوند. در شرایط مناسب قوانین هیسترتیک پایه می‌تواند به

[1] Basic hysteretic

خوبی مفاهیمی مثل هیسترزیس دو خطی خطی شده[۱]، اوج گرا [۲]یا پینچینگ [۳]را نشان دهد. (به ترتیب c،b،a در شکل ۲-۱۰) بیشتر مطالعات تقاضای زلزله‌ای از مدل‌های هیسترزیس استفاده می‌کنند که قوانین هیسترزیس آنها یا از زوال سختی صرف نظر می‌کند (مدل دو خطی) و یا زوال سختی را با اصلاح مسیری که شاخه بارگذاری مجدد به منحنی پوش نزدیک می‌شود، انجام می‌دهد (مدل‌های اوجدار و یا پینچینگ).

شکل (۲-۱۰): هیسترزیس‌های پایدار از راست به چپ: پینچینگ، اوج گرا و دو خطی.

در ۱۹۷۰ تاکدا [۴] مدل با منحنی پوش سه خطی ارایه کرد که سختی باربرداری بر پایه ماکزیمم جابجایی سیستم کاهش می‌یافت. این مدل به صورت خاص برای فولادی ارایه شده بود و منحنی پوش از این جهت سه خطه بود که قسمت بتن ترک نخورده را شامل می‌شد.

---

[۱] Linearized bilinear

[۲] Peak-oriented

[۳] Pinching

[۴] Takeda