

شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی

امید رضایی فر^{۱*}، عادل یونسی^۲، مجید قلمکی^۱، اکبر اسفندیاری^۳

۱-دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲-دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳-استادیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT)^۱ بعلاوه قابلیت بالای باربری بطور چشمگیری در سازه‌های بسیار بلند مرتبه و پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت و جایگاه این نوع ستون‌ها در علم مهندسی سازه و بعلاوه اینکه در سازه‌های خاص استفاده می‌شوند ممکن است آسیب‌های جزئی در آنها قبل از شناسایی تبدیل به آسیب‌های بزرگتر و غیرقابل جبران شود. بر همین اساس شناسایی آسیب در این المان سازه‌ای بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از آسیب‌های محتمل در این ستون‌ها جدا شدن جداره فولادی از هسته بتنی می‌باشد. در این تحقیق آسیب جداشدگی توسط یک لایه پلی‌استایرن نازک به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه سازی شده است و داده‌های مودال ستون بطور آزمایشگاهی تعیین شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه فرکانس، شکل مود و پارامترهای MAC^2 و $COMAC^3$ داده‌های نمونه سالم و آسیب دیده نشان می‌دهد که در سازه آسیب رخ داده است. علاوه بر این جهت شناسایی محل آسیب از تبدیل موجک استفاده شده است که نتایج تحلیل نشان می‌دهد در نقاط ۰/۲ متر (شروع آسیب) و ۰/۶ متر (انتهای آسیب) در هر مود اصلی سازه پرش ناگهانی رخ داده است که در روش تبدیل موجک بیانگر ناپیوستگی در شکل مود (سیگنال) سازه است، بدین ترتیب محل آسیب با کمترین خطای ممکن شناسایی می‌شود.

کلمات کلیدی: ستون CFT، شناسایی آسیب، آسیب جداشدگی، تبدیل موجک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.117020.1444	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.117020.1444	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۳/۰۹	۱۳۹۶/۱۱/۰۷
امید رضایی فر					*نویسنده مسئول:	
orezayfar@semnan.ac.ir					پست الکترونیکی:	

¹ Concrete Filled Tube

² Modal Assurance Criteria

³ Coordinate Modal Assurance Criterion

Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data

Omid rezaifar*¹, Adel Younesi², Majid Gholhaki¹, Akbar Esfandiari³

1- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- PhD. student, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, AmirKabir University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Concrete Filled Tube (CFT) column significantly used in high-rise structures and bridges due to high load bearing capacity. Considering the importance and position of these types of columns in structural engineering science and because they are used in specific structures partial damage may result in larger and unrecoverable damage before detection. Accordingly, the basis for the identification of damage in this structural element is more of a researcher's attention. One of the possible damages in these columns is the separation of the steel wall from the concrete core. In this study, the detachment damage was simulated by a thin layer of polystyrene of 6 x 40 cm in one of the columns between the concrete core and the steel wall and modal data of columns have been determined and analyzed. Comparison of frequency, shape of modes, and MAC and COMAC parameters data of healthy and damaged specimen show which occurred in the structure of the damage. In addition, wavelet transform has been used to identify the location of damage. The results of the analysis show that sudden jump occurred in 0.2 m (start of damage) and 0.6 m (end of damage) in any of the main structures. Which, in the wavelet transform method, indicates discontinuity in the form of the structure's modulus (signal), In this way, the location of the damage is identified with the least possible error.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 January 2018

Revise Date: 30 May 2018

Accept Date: 03 July 2018

Keywords:

CFT Column

Damage Detection

Debonding

Wavelet Transform

Modal Data

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.117020.1444

*Corresponding author: Omid rezaifar
Email address: orezayfar@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

ستون‌های CFT بعلت قابلیت بالای باربری تحت بارهای ثقلی و جانبی و همچنین بهره‌مندی از خواص مکانیکی دو ماده فولاد و بتن بطور همزمان، و ایجاد مقاطع کوچک برای ستون‌های ساختمان‌ها و افزایش فضای مفید داخلی ساختمان بطور گسترده در صنعت ساختمان بخصوص مناطق با خطر لرزه‌خیزی بسیار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به جایگاه و اهمیت این ستون‌ها و به دلیل آنکه اگر تحت هر شرایطی این المان سازه‌ای دچار آسیب جزئی شود ممکن است به مرور تحت تاثیر بار و زمان، آسیب‌ها گسترده‌تر شده و خرابی‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به بار بیاورد، شناسایی آسیب آنها بسیار حائز اهمیت است. در این بخش ابتدا به مطالعات صورت گرفته روی ستون‌های بتن‌آرمه و فولادی و سپس بطور خاص روی ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداخته می‌شود.

از آنجایی که انتقال نیرو از تیر به ستون در ستون‌های با مقطع قوطی شکل (بطور خاص CFT) همواره یکی از مساله‌های مورد بحث مهندسان و محققان این حرفه بوده و آئین‌نامه‌ها، ورق‌های پیوستگی را برای ستون‌های H شکل و قوطی پیشنهاد کرده‌اند و از آنجایی که اجرای این اتصال در ستون‌های قوطی با مشکلاتی همراه است، سخت‌کننده‌های خارجی مانند مثلثی، دوزنقه‌ای شکل و المان‌های با شبکه میلگرد و دیگر اتصالات پیشنهاد شده‌اند. مطالعات انجام شده توسط رضایی فر و همکاران موجب شده است تا عیوب احتمالی در این نوع ستون‌ها برای مولفین بیش از پیش محرز شود [۴-۱].

شناسایی آسیب برای یک ستون بتن‌آرمه بعد از یک بارگذاری نیمه استاتیکی با استفاده از داده‌های تست مودال با بهره‌گیری از روش ESRA^۴ نشان می‌دهد که آسیب در تیر کامپوزیت بدرستی شناسایی شده است [۵]. ارزیابی خسارت ستون‌های بتنی تقویت شده با ژاکت‌های فولادی که بصورت تئوریک و آزمایشگاهی تحت بار چرخه‌ای انجام شده است نشان می‌دهد که محل آسیب توسط الگوریتم و آزمایشگاه ارتعاش به خوبی شناسایی شده است و نهایتاً تکنیکی جهت کاهش خطاهای مدلسازی معرفی شده است [۶]. روش احتمالاتی بی‌زین جهت پایش مستر آسیب برای سازه‌های عمرانی توسط هون سان و کین چو^۵ پیشنهاد شده است. در این روش برای پایش بینی محل تشکیل مفصل پلاستیک از داده‌های آزمایشگاهی منتجه از ارتعاش ستون بتنی استفاده شده است. قابل ذکر است افزایش تدریجی بار، زوال تدریجی ستون را شبیه‌سازی می‌کند. روش پیشنهادی قادر به تعیین محدوده آسیب با استفاده از یک مدل تحلیلی و پارامترهای مودال حاصل از تست ارتعاش می‌باشد. علاوه بر این روش پیشنهادی برای داده‌های آزمایش جدید نیز قابلیت برورسانی سیستماتیک را دارد [۷].

بین ژاو و ژاو گنگ^۶ در سال ۲۰۱۰ آزمایش ارتعاش بر اساس تکنیک‌های تشخیص آسیب را بکار برده‌اند تا آسیب را در ستون بتنی شناسایی کنند و در این مطالعه چهار حالت سالم، ترک خوردگی بتن، تسلیم اولیه و نهایی فولاد را بررسی نموده‌اند و تحت اثر بار چرخه‌ای آسیب را شبیه‌سازی کرده‌اند و نتایج نشان داده است که آسیب شناسایی شده با آسیب مشاهده شده در تیر همخوانی دارد [۸]. مصلحی و همکاران جهت پایش سلامت پایه‌های پل از یک پیروالکترونیک نوآورانه مبتنی بر مصالح هوشمند تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای معکوس استفاده کرده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که خسارت به منطقه تضعیف شده انرژی منتقل می‌شود. علاوه بر این شاخص آسیب مبتنی بر تبدیل موجک و سنسور تاریخچه زمانی ماتریس شاخص خرابی بر اساس تعریف موج انتقالی گسترش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نحوه قرار گیری پیروالکترونیک دامنه پاسخ را تحت تاثیر قرار می‌دهد اما در روند تضعیف انرژی انتقالی موثر نیست. علاوه بر این سنگدانه هوشمند^۷ این پتانسیل را دارد که در پایش سلامت سازه‌های بتنی بزرگ مقیاس استفاده شود [۹]. چن کیائو چی^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به تجزیه و تحلیل آسیب سازه‌ای پل بتن‌آرمه رو به زوال در یک دوره مشخص که در اثر زلزله ایجاد شده است پرداخته‌اند. از آنجایی که عدم قطعیت در وقوع زلزله وجود دارد از شبیه‌سازی کارنو استفاده شده است و پس از آن یک مطالعه موردی روی سه پل بتنی در تایوان انجام شده است و احتمال وقوع حالات آسیب در دوره‌های مختلف بررسی شده است و زوال پایه‌های پل توسط کلراید مورد بررسی قرار گرفته است که بررسی این موضوع به مهندسان جهت درک بهتر عملکرد لرزه‌ای پل‌ها و قابلیت کاربری در ایمنی مربوط به

⁴ Eigen-System Realization Algorithm

⁵ Sohn, H., and Law, K. H.

⁶ Xu, B., and Gong, X.

⁷ Smart Aggregate

⁸ Chiu, C. K.

سرویس‌دهی کمک خواهد کرد و همچنین بانک علمی مناسب جهت تعمیر و مقاومسازی این نوع پل‌ها در اختیار مهندسان قرار داده است [۱۰].

در سال ۲۰۰۶ یک حساسیت سنجی بر اساس برزورسانی مدل اجزا محدود برای شناسایی پارامترهای سازه‌ای و شناسایی آسیب برای پایش سلامت سازه‌های فولادی بر اساس اندازه‌گیری ارتعاش محیطی صورت گرفته است [۱۱]. در این مطالعه ابتدا سختی اتصال تیر به ستون و مدول الاستیسیته سازه بروز شده است و در گام بعد از روش اجزا محدود جهت شناسایی آسیب‌های مهاربندها با پارامترهای آسیب متفاوت استفاده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل برزو رسانی شده اجزا محدود نشان می‌دهد که مدل بروز شده اجزا محدود یک ابزار مناسب برای شناسایی پارامتر سازه‌ای و شناسایی آسیب برای قاب سازه فولادی است.

بتی^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک روش ترکیبی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای شناسایی آسیب پیشنهاد کرده‌اند. آنها در تحقیق خود از یک قاب فولادی فضایی سه طبقه مقیاس شده استفاده کرده‌اند که آسیب پیش‌رونده توسط برش یکی از ستون‌های بالای طبقه اول شبیه‌سازی شده است و پس از آن دو تابع خطا که اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی از مدل المان محدود و قاب فولادی را اندازه‌گیری می‌کند استفاده کردند و الگوریتم ژنتیک برای تشخیص آسیب بکار برده شده است که نتایج حاصل از الگوریتم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که بیانگر توانمند بودن این روش در شناسایی آسیب است [۱۲].

در این بخش مطالعات صورت گرفته در شناسایی آسیب ستون‌های فولادی پر شده با بتن ارائه شده است. سنگ تورت^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۰۴ به ارزیابی آسیب در ستون‌های مستطیلی فولادی پر شده با بتن و اعضای تیر-ستون داده‌های آزمایشگاهی محققین مختلف در سرتاسر جهان پرداخته‌اند و برای اولین بار یک پایگاه از داده‌های آزمایشگاهی ایجاد کردند. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی انواع آسیب تعریف شده است و برای هر حالت آسیب عملکرد نمونه‌ها بصورت کمی با استفاده از توابع شکل‌پذیری و آسیب ثبت شده است و سرانجام یک روش طراحی ترکیبی برای توابع آسیب در چارچوب اصول PBD^{۱۱} ارائه شده است [۱۳].

شناسایی جداشدگی تیوب فولادی از هسته بتن مرکزی در ستون CFT مستطیلی براساس طیف انرژی تبدیل موجک با پیروسرامیک مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴-۱۶]، جداشدگی هسته محصور شده از تیوب فولادی سبب کاهش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه می‌شود. در مطالعه ژاوو و همکاران با تعبیه پیزوالکتریک‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده از سطوح خارجی بعنوان سنسور یک روش جدید جهت پایش و وضعیت سطح داخلی پیشنهاد شده است. در این مطالعه تجزیه و تحلیل طیف انرژی موجک نیز انجام شده است و یک شاخص آسیب بر پایه تغییرات وزنی (WPES) برای تشخیص مناطق جداشدگی مصنوعی تعریف شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های پیشنهادی به نقص جداشدگی حساس بوده و سطح داخلی یک ستون CFT را بطور کامل ارزیابی می‌کند علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که هیچ نقص جداشدگی غیرآشکارا را در پایش سلامت ستون CFT در سازه‌های بلند مرتبه را نمی‌توان شناسایی کرد.

در این مطالعه شناسایی آسیب جداشدگی در ستون CFT روی پاسخ حسگر پیزوالکتریک تعبیه شده در بتن پر شده که بصورت چندمقیاسی شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. شبیه‌سازی عددی بصورت چندمقیاسی بر روی پاسخ حسگر پیزوالکتریک و موج منتشر شده در ستون CFT با هسته بتنی شامل توزیع تصادفی سنگدانه‌های گرد به همراه حسگر و محرک PZT صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اثر جداشدگی‌های فعال ورق فولادی از هسته بتنی بر روی PZT غالب است. همچنین این تحقیق قابلیت امکان شناسایی آسیب جداشدگی را برای اعضای CFT مستطیلی شکل حتی با هسته بتنی با ساختار چندمقیاسی را تایید کرده است [۱۷]. برای درک مکانیزم تشخیص برای مقاطع مستطیلی و دایره‌ای با استفاده از سنسور PZT نصب شده روی سطح و سنسور PZT جاسازی شده در هسته بتنی، شبیه‌سازی عددی برای بررسی تغییرات انتشار موج تنش به علت وجود نقص‌های جداشدگی صورت گرفته است [۱۸ و ۱۹].

⁹ Betti, M.

¹⁰ Tort, C.

³Performance-Based Design

به منظور بررسی اثر پیزوالکتریک، مواد PZT بکار برده شده و اثر کوپلینگ بین محرک PZT و سنسور و عضو CFST، کوپلینگ چند فازی ایجاد شده است و علاوه بر این مطالعه عددی برای بررسی تأثیر نقص‌های جداولی بر فرآیند انتشار موج و کاهش تنش موج در CFST انجام شده است. نهایتاً حساسیت سیگنال‌های خروجی به ابعاد آسیب جداولی مورد بررسی قرار گرفته و با یافته‌های مربوط به آن مقایسه شده است [۲۰].

برای اندازه‌گیری حفره‌های تعبیه شده در CFST ها از روش اولتراسونیک با تحلیل زمان انتقال اولتراسوند استفاده شده. در این مطالعه از چهار راه انتقال بالقوه در CFST با/بدون حفره از پیش تعیین شده، استفاده شده است. با مقایسه زمان انتقال اولتراسوند تجربی و نظری، مسیر واقعی اولتراسوند در CFST تعیین می‌شود. کروماتوگرافی به طور مستقیم موقعیت و هندسه حفره‌ها را در CFST نشان می‌دهد و در توافق منطقی با حفره‌های از پیش تعیین شده است. بنابراین، این مطالعه یک روش جدید برای اندازه‌گیری حفره‌ها در یک ستون CFST را با روش اولتراسونیک ایجاد می‌کند [۲۱].

از آنجایی که آسیب جداولی جداره فولادی از هسته بتن مرکزی یکی از بارزترین آسیب‌هایی است که در این المان سازه‌ای رخ می‌دهد در مطالعه حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت آشکار شدن آسیب در ستون‌های فولادی پر شده با بتن از روش آنالیز مودال آزمایشگاهی استفاده شده است. پس از استخراج داده‌های مودال با مقایسه فرکانس‌ها، میرایی، شکل مود و پارامتر MAC سیر وجود آسیب شناسایی شده است و جهت تعیین محل آسیب از روش تبدیل موجک استفاده شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

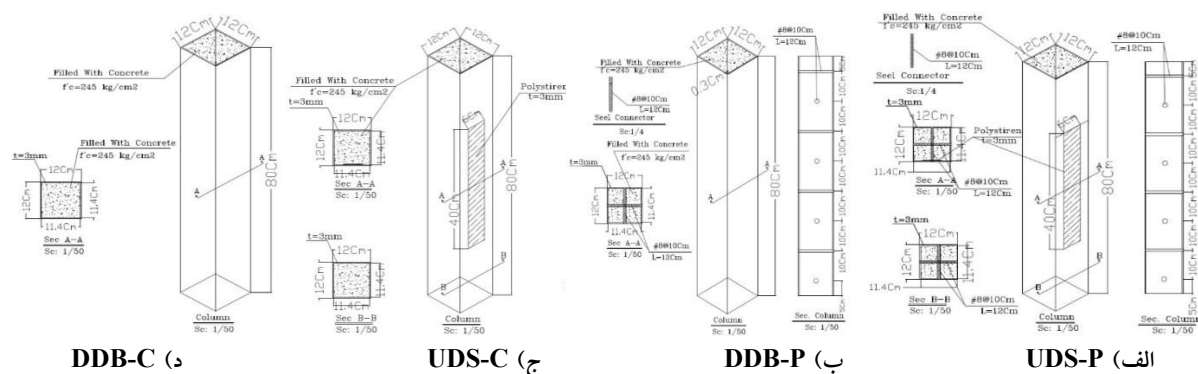
۲-۱ نمونه‌های آزمایش

جهت انجام آزمایش از ۴ نمونه ستون CFT استفاده شده است که دو نمونه از آن توسط برشگیرهایی از جنس میلگرد به قطر ۸ میلی‌متر مسلح شده است و دو نمونه دیگر فاقد برشگیر می‌باشد. مقطع ستون ۱۲*۱۲ سانتیمتر از ورق فولادی به ضخامت ۰/۳ سانتیمتر و به طول ۸۰ سانتیمتر می‌باشد که توسط بتن با مصالح ریزدانه پر شده است. جهت شبیه‌سازی آسیب در نمونه‌ها در یکی از وجوه ستون از یک لایه پلی‌استایرن به ضخامت ۳ میلی‌متر به ابعاد ۶*۴۰ سانتیمتر در حدفاصل بتن و رویه فولادی استفاده شده است. جهت رسیدن به این هدف ابتدا لایه پلی‌استایرن نازک در ستون ثابت شده است و سپس بتن‌ریزی صورت گرفته است. مشخصات نمونه‌های آزمایش در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: معرفی نمونه‌ها

نام نمونه	ابعاد آسیب	وجود برشگیر	نوع آسیب	موقعیت آسیب	نحوه شبیه‌سازی
UDS-P	-	ندارد	سالم	-	-
DDB-P	۴۰*۶	ندارد	جداولی رویه فولادی از هسته بتنی	میانه ستون	پلی‌استایرن به ضخامت به ابعاد ۳/۰*۶*۴۰ سانتیمتر
UDS-C	-	دارد	سالم	-	-
DDB-C	۴۰*۶	دارد	جداولی رویه فولادی از هسته بتنی	میانه ستون	پلی‌استایرن به ضخامت به ابعاد ۳/۰*۶*۴۰ سانتیمتر

علاوه بر این جهت بررسی دقیقتر و مقایسه نتایج با سازه سالم دو نمونه بدون آسیب (با برشگیر و بدون برشگیر) نیز در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱: نمونه‌های آزمایش

۲-۲ مصالح آزمایش

قوطی فولادی از فولاد نرمه ساختمانی St37 می‌باشد که مشخصات دینامیکی آن پیش از انجام تست کشش روی نمونه‌های استاندارد بدست آمده از قوطی استخراج شده است و در جدول ۲ ارائه شده است. جهت پر کردن این قوطی‌ها از بتن با مصالح ریزدانه استفاده شده که مشخصات بتن مصرفی نیز در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این جهت شبیه‌سازی آسیب جداسازی ستون‌ها از پلی-استایرن استفاده شده است (شکل اب و د).

جدول ۲: مصالح مصرفی

مصالح	$f_y (MPa)$	$f_u (MPa)$	$f'_c (MPa)$	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص ($\frac{kN}{m^3}$)
فولاد	۳۲۷/۲۶	۳۹۱/۱۲	-	2×10^5	۰/۲۹	۷۸/۵۰
بتن	-	-	۲۶/۰۶	0.79×10^5	۰/۲۰	۲۴/۴۰
پلی‌استایرن	-	-	-	2×10^5	۰/۳۵	۰/۱۶

۳-۲ مدل‌سازی آزمایش

جهت مدل‌سازی آزمایش از یک نمونه ستون واقعی به مقیاس ۱:۵ استفاده شده است. در این قسمت تمامی پارامترهای مورد نظر شامل ابعاد نمونه و مقاومت فولاد و بتن نیز شبیه سازی شده است. در مرحله بعد نمونه‌های با برشگیر براساس تحلیل برشی و تعیین قطر برشگیرها انجام شده است و برشگیرها در فواصل طراحی شده جوش شده‌اند. در گام بعد نمونه‌های سالم (با و بدون برشگیر) بتن‌ریزی شده و ساخت آنها به اتمام رسیده است. در این مرحله برای ایجاد آسیب مصنوعی در نمونه‌ها از یک لایه پلی‌استایرن نازک به ضخامت ۳ میلی-متر و به ابعاد آسیب (جدول ۱) استفاده شده است. جهت نیل به این کار پلی‌استایرن در داخل ستون مهار شده و سپس بتن ریزی صورت گرفته است. نمونه‌ها پس ساخت عمل آوری شده و پس از رسیدن به مقاومت لازم مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

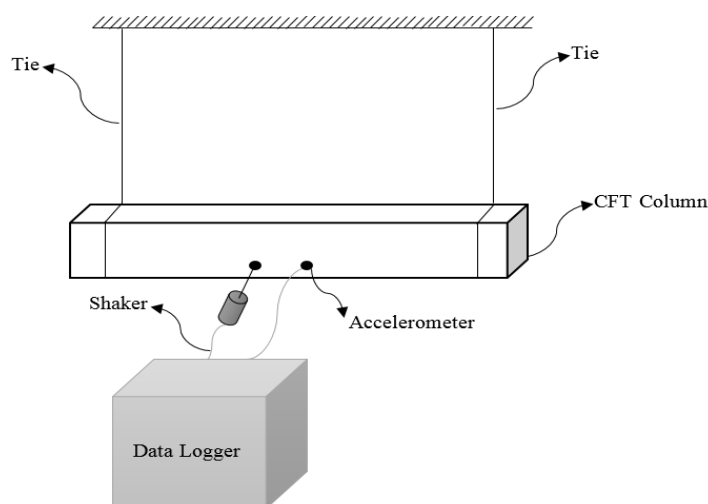
۴-۲ راه‌اندازی آزمایش و ابزارگذاری

از آنجایی که وجود هر نوع شرایط تکیه گاهی سبب ایجاد صلبیت بالا در سازه شده و جهت تحریک آن برای آنالیز مودال نیاز به نیروی بزرگی است و این نیرو ممکن است سبب ایجاد آسیب پیش بینی نشده و حتی تخریب سازه و خطا در نتایج آنالیز شود، در تحقیق

حاضر از شرایط تکیه گاهی آزاد-آزاد^{۱۲} استفاده شده و جهت رسیدن به این هدف، ستون فلزی توسط کش با قابلیت ارتجاعی بالا معلق شده (یا روی تیوپ با بادکم) قرار گرفته و شتابسنج در یک نقطه از ستون به آن متصل شده است (شکل ۲). محل اتصال سنسور شتابسنج، حدفاصل میانه و لبه تیر انتخاب شده است تا اولاً هنگام اعمال ضربه جدا نشود و ثانیاً در نقطه صفر لنگر باشد تا دارای کمترین خطا باشد. در مرحله بعد نمونه‌ها توسط محرک (چکش تحریک یا شیکر) به نقاط تحریک (محل گره مش‌ها) تحت بار قرار گرفته و به ازای هر تحریک تابع پاسخ فرکانسی استخراج شده است، در نهایت با استفاده از مجموع توابع فرکانسی حاصله، شکل مودهای اول تا سوم توابع پاسخ فرکانسی به دو روش مختلف حاصل گشته است که به شرح زیر است:

۱- تحریک با استفاده از چکش تحریک^{۱۳}: در این روش نمونه بر روی تیوپ قرار گرفته و سپس سنسور در محلی مشخص ثابت شده و تحریک توسط چکش تحریک در نقاط مختلف صورت گیرد. حائز اهمیت است که محل نصب سنسور نباید بر روی گره شکل مود قرار گیرد، به همین علت نقطه حدفاصل انتها و میانه ستون به عنوان محل نصب سنسور انتخاب شد.

۲- تحریک با استفاده شیکر^{۱۴}: در این روش نمونه با استفاده از کش معلق گردید. شیکر در محلی معین از نمونه ثابت و سنسور در نقاط مختلف جابجا شد. در اینجا نیز اهمیت دارد که شیکر در محل گره قرار نگیرد. نوع سیگنال تحریک، رندوم^{۱۵} انتخاب شده تا اثرات غیرخطی نمونه میانگین‌گیری و بهترین مدل خطی ارائه شود. انتخاب بهترین نوع تحریک بستگی به هندسه و ساختار قطعه دارد. برای بیشتر نمونه‌ها به علت طبیعت غیرخطی آنها تحریک با چکش مناسب نبوده و بنابراین از شیکر استفاده شده است. پیدا کردن بهترین روش از قانون کلی پیروی نکرده و با سعی و خطا بدست آمده است.



شکل ۲: ستاپ آزمایش

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱ مشاهدات کلی

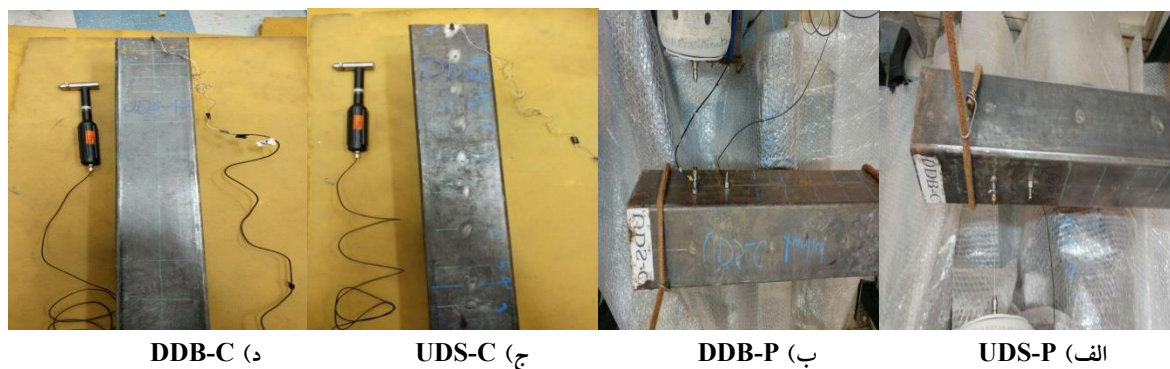
پس از ساخت نمونه‌ها و استقرار سازه در ستاپ تعیین شده، نمونه‌ها توسط سیستم تحریک (چکش تحریک یا شیکر) تحت بار قرار گرفته‌اند که نحوه آزمایش نمونه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است و پس از آن، فرکانس، اشکال مودی و میرایی نمونه‌ها بعنوان داده‌های مودال استخراج شده‌اند.

¹² Free-Free

¹³ Impact hammer

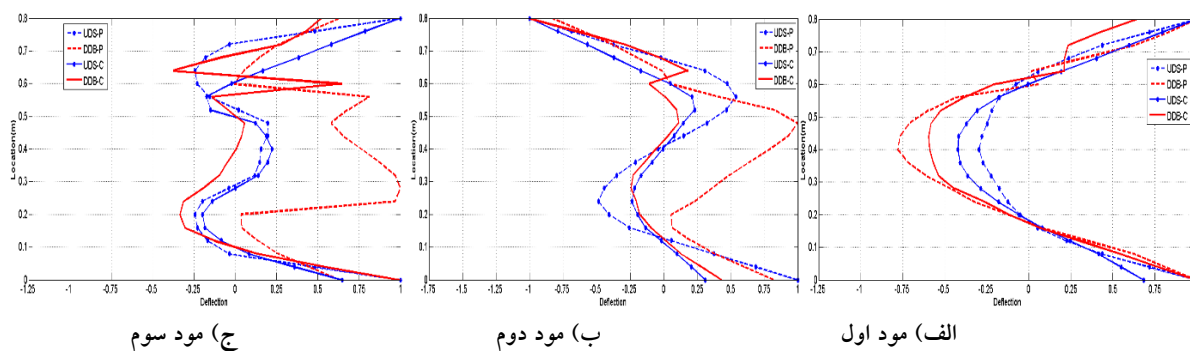
¹⁴ Shaker

¹⁵ Random



شکل ۳: نحوه تست نمونه‌ها

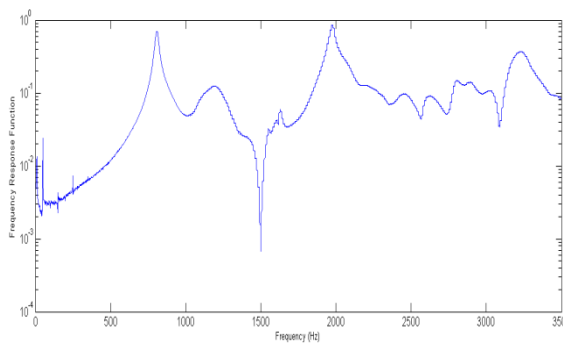
جدول ۳ فرکانس نمونه‌ها در سه مود اول را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳ نمونه‌های با برشگیر نسبت به نمونه‌های فاقد برشگیر دارای سختی بیشتری بوده و به طبع دارای فرانس بالاتری هستند (هر چند عوامل دیگری نیز در مقدار فرکانس نقش دارد) اما میرایی در ستون‌های فاقد برشگیر بیشتر از مدل‌های با برشگیر است. از طرفی مقایسه دو به دو نمونه‌ها (مقایسه با حالت سالم) نتیجه می‌شود که فرکانس کاهش یافته و این موضوع بیانگر وجود آسیب در سازه است. شکل مود نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



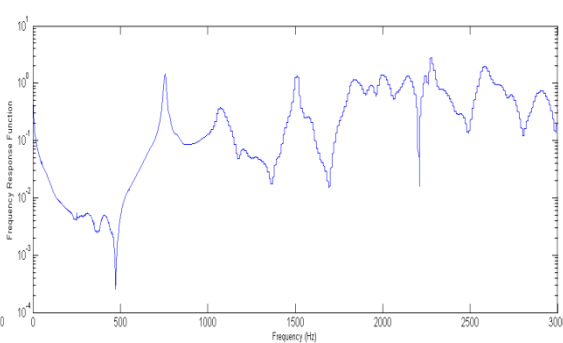
شکل ۴: شکل مود نمونه‌ها

جهت تعیین فرکانس‌های هر مود منحنی FRF^{16} (تابع پاسخ فرکانسی) نمونه‌ها استخراج شده است (شکل ۵). رسیدن از مدل پاسخ به مدل مودال همان تست مودال است که با تحریک یک درجه آزادی و گرفتن پاسخ در همان یا یک درجه آزادی دیگر انجام می‌شود (مدل پاسخ به صورت جملات FRF است). اندازه‌گیری FRF مستلزم اندازه‌گیری همزمان تحریک و پاسخ است. اندازه‌گیری نیروی تحریک در خیلی از موارد غیرممکن یا سخت است. در سازه‌هایی که تحریک در اثر نیروی داخلی، تحریک آلوسستیک و... باشد FRF قابل اندازه‌گیری نیست. در این حالت تعداد قله‌ها نشان دهنده تعداد درجات آزادی سیستم است. از طرفی جهت پایش میزان دقت آزمایشات انجام شده نمودار COHERENCE (انسجام) ترسیم شده است که در حقیقت بیانگر انسجام داده‌ها و دقت آزمایش می‌باشد. هر چه نقاط به یک نزدیکتر باشند و برش کمتری داشته باشند بیانگر انسجام بیشتر داده‌ها و دقت بالای آزمایشات انجام شده است (شکل ۶).

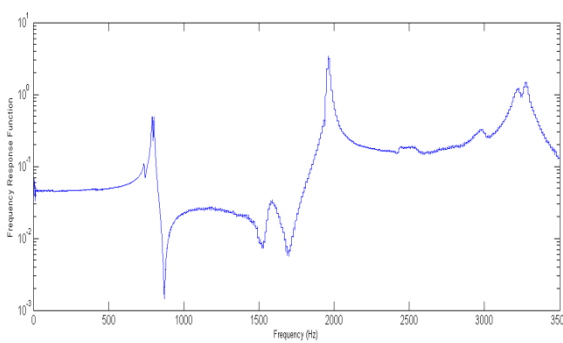
¹⁶ Frequency Response Function



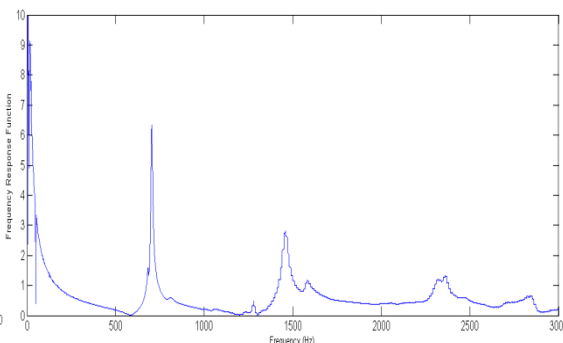
ب) DDB-P



الف) UDS-P

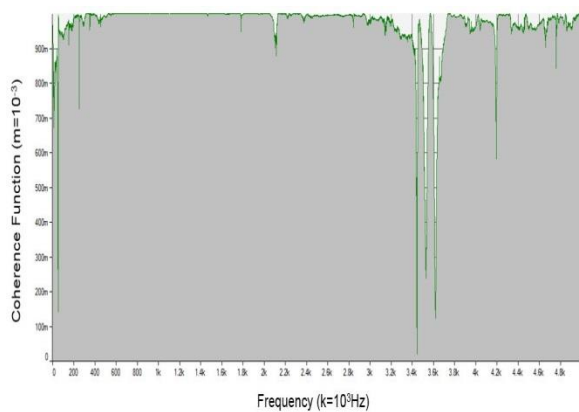


د) DDB-C

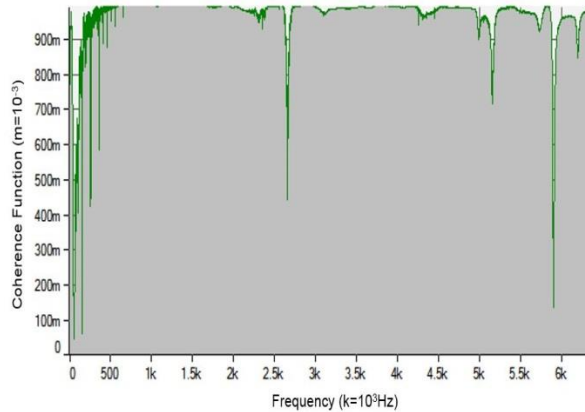


ج) UDS-C

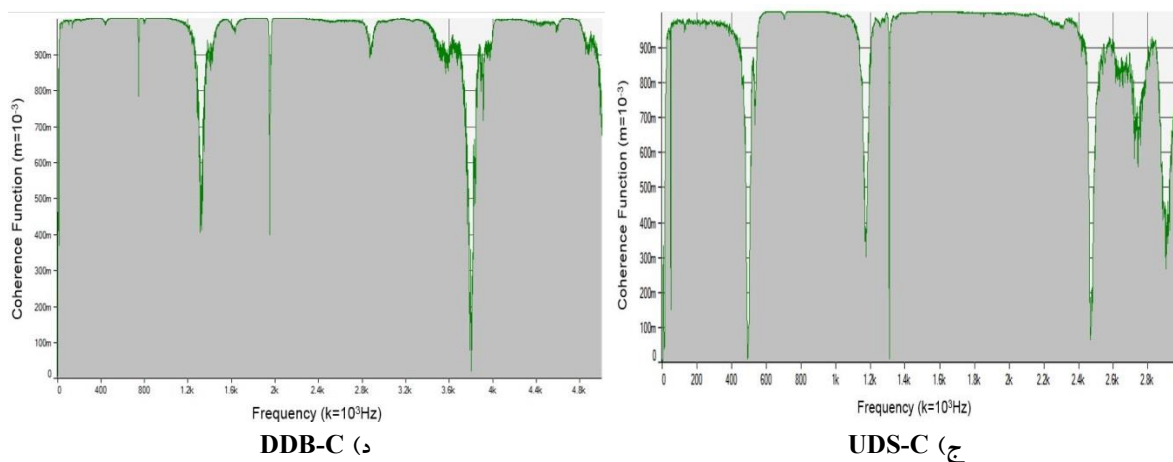
شکل ۵: نمودار فاز-دامنه نمونه‌ها



ب) DDB-P



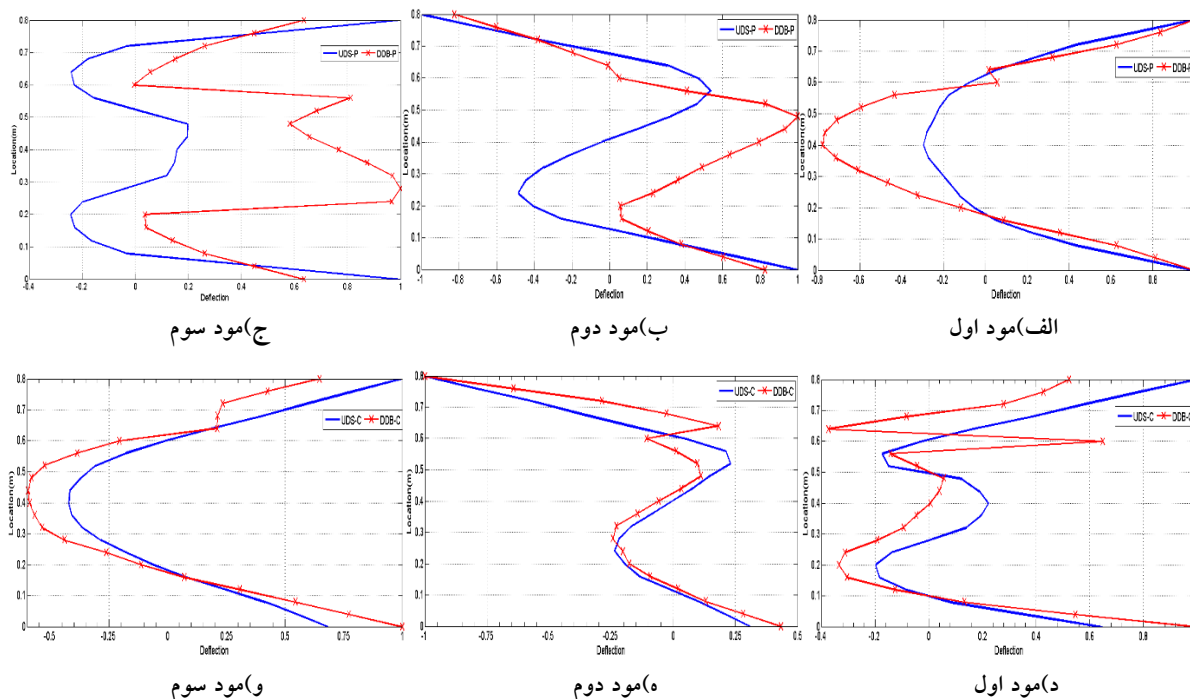
الف) UDS-P



شکل ۶: نمودار COHERENCE نمونه‌ها

۲-۳ نتایج و تفسیر آن ۱-۲-۳ شکل مود نمونه‌ها

یکی از روش‌های شناسایی وجود آسیب در سازه‌ها شکل مود آنها می‌باشد. شکل مود یکی از داده‌های مودال می‌باشد که با مقایسه حالت سالم و آسیب دیده می‌توان پی به وجود آسیب برد و حتی در شرایط خاص با آسیب شدید می‌توان محل آسیب را شناسایی کرد. در مود اول نمونه بدون برشگیر آسیب سبب شده است که نقطه اوج شکل مود حدود ۵۰ درصد بیشتر شود. بطور مشابه برای مودهای دوم و سوم نیز این روند رخ داده است. در نمونه‌های با برشگیر این تغییر (جاب‌جایی نقطه اوج) نیز رخ داده است اما شدت آن بسیار کمتر از حالت بدون برشگیر است چون در نمونه بدون برشگیر نقص جداشدگی به علت عدم پیوستگی کافی بین بتن و فولاد بیشتر تاثیر می‌گذارد اما در نمونه با برشگیر، المان‌های داخلی (برشگیرها) تعبیه شده سبب پیوستگی بین بتن و فولاد می‌شوند. در مودهای دوم و سوم این نمونه‌ها (UDS-C, DDB-C) نیز روند مشابه مود اول است.



شکل ۷: مقایسه شکل مود نمونه‌های بدون برشگیر (الف تا ج) و دارای برشگیر (د تا و)

۳-۲-۲ مقایسه فرکانس و میرایی

فرکانس طبیعی به عنوان یکی از داده‌های مودال در تعیین وجود آسیب بسیار حائز اهمیت است. نتایج آنالیز ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که فرکانس نمونه بدون برشگیر نسبت به حالت سالم (UDS-P) در مود اول حدود ۶/۳۸ درصد کاهش می‌یابد ولی بیشترین کاهش در مود دوم رخ می‌دهد. ولی کاهش میرایی در مود دوم نسبت مودهای دیگر بیشتر است که نتیجه می‌شود رشد کاهش فرکانس در اثر آسیب رابطه معکوس با کاهش میرایی دارد. در نمونه با برشگیر (DDB-P) نسبت به حالت (UDS-C) رفتار به گونه‌ای دیگر است. به علت پیوستگی بیشتر هسته بتنی و رویه فولادی و به خاطر وجود برشگیرها، فرکانس‌ها در مودهای بالاتر کاهش بیشتری نسبت به مودهای پایین‌تر نشان می‌دهند.

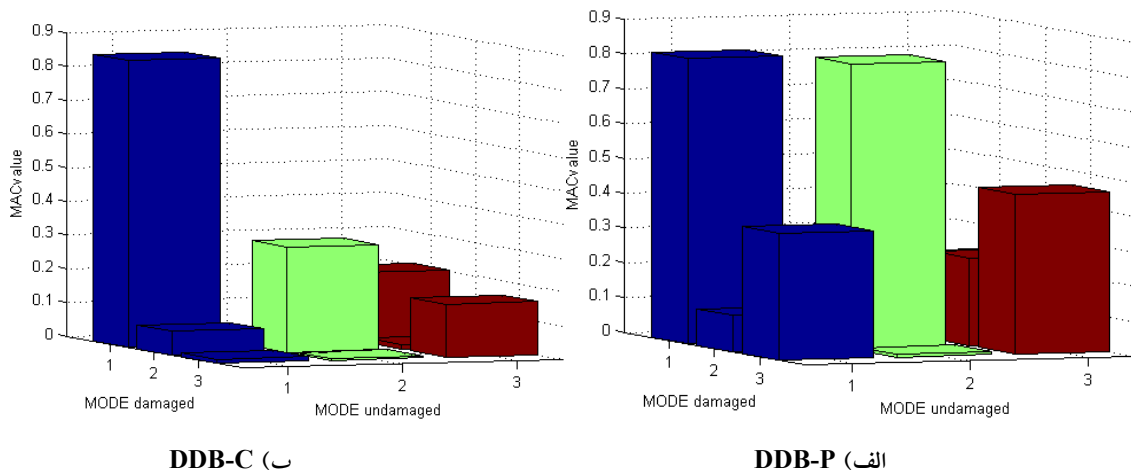
جدول ۲: مقادیر مطلق فرکانس و میرایی و درصد اختلاف آنها نسبت به نمونه سالم

DDB-C	UDS-C	DDB-P	UDS-P	داده‌های آزمایش	
703.78	801.98	756.82	808.40	فرکانس	مود اول
-12.24	Base	-6.38	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	
0.697	0.502	0.551	1.380	میرایی	
38.84	Base	-60.07	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	
1460.4	1955.8	1498.5	1971.5	فرکانس	مود دوم
-25.33	Base	-24.00	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	
0.966	2.66	0.704	1.140	میرایی	
-63.68	Base	-38.25	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	
2353.0	3277.5	2571.6	3218.9	فرکانس	مود سوم
-28.21	Base	-20.11	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	
0.432	2.6	0.824	2.09	میرایی	
-83.38	Base	-60.57	Base	درصد اختلاف با نمونه سالم	

۳-۲-۳ معیار MAC

یکی دیگر از معیارهای بررسی وجود آسیب در نمونه‌ها معیار MAC^{17} می‌باشد. این معیار در واقع ضرب داخلی بردارهای ویژه می‌باشد. مقدار یک بیانگر انطباق کامل و مقدار صفر بیانگر عمود بودن بردارهاست. با مقایسه بردارهای ویژه دو شکل مود می‌توان به میزان همپوشانی آنها پی برد. در این مطالعه مودهای نمونه سالم و آسیب‌دیده دوبرو با هم مقایسه شده‌اند که هر چه این مقدار به یک نزدیک باشد بیانگر انطباق بالای مودها و آسیب کمتر آنهاست. در مودهای بالاتر انطباق کمتر شود و به صفر نزدیک می‌شود بطوریکه شناسایی آسیب راحت‌تر خواهد شد. بطور کلی در تمامی حالات مورد بررسی چون عدد کمتر از یک است بیانگر وجود آسیب در سازه می‌باشد.

17 Modal Assurance Criterion



شکل ۸: نمودار MAC نمونه‌های آسیب‌دیده نسبت به حالت سالم

۳-۲-۴ شناسایی آسیب توسط تبدیل موجک

تبدیل موجک یک ابزار ریاضی است که سیگنال اصلی (شکل مود) را به یک سیگنال با خصوصیات سیگنال اصلی و به صورت مختصرتر در حوزه زمان تبدیل می‌کند و از کاربردهای مهم آن عبارتند از: یافتن نقاط ناپیوسته سیگنال، حذف اغتشاشات (امواج مزاحم) از سیگنال، فشرده‌سازی سیگنال و شناسایی سیستم.

۳-۲-۴-۱ تبدیل موجک پیوسته یک بعدی

تبدیل موجک پیوسته^{۱۸} به عنوان روشی جایگزین بر تبدیل فوریه زمان-کوتاه ارائه گردید و هدف آن، فائق آمدن بر مشکلات مربوط به رزولوشن در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. در آنالیز ویولت، مشابه با تبدیل فوریه زمان-کوتاه، سیگنال موردنظر در یک تابع (موجک) ضرب می‌شود که در حقیقت نقش همان تابع پنجره را دارد. همچنین بطور مشابه با قبل، تبدیل موجک نیز به طور جداگانه بر روی قطعه‌های زمانی مختلف سیگنال انجام می‌شود. اما ماهیتاً دو اختلاف عمده با تبدیل فوریه زمان-کوتاه دارد که عبارتند از:

در تبدیل موجک، از سیگنال پنجره شده، تبدیل فوریه گرفته نمی‌شود و بنابراین نقاط اوج منفرد متناظر با یک سینوسی، یا به عبارت دیگر فرکانس‌های منفی محاسبه نمی‌شود.

در تبدیل موجک، عرض پنجره به موازات تغییر مؤلفه‌های فرکانسی تغییر می‌کند که به‌طور حتم مهمترین ویژگی تبدیل موجک است. بر این اساس، تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$CWT_x^w(\tau, s) = \Psi_x^w(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن پارامترهای s, τ به ترتیب مقیاس^{۱۹} و پارامترهای انتقال^{۲۰} می‌باشند. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است که میزان جابجایی پنجره را معلوم می‌کند و به وضوح، اطلاعات زمانی تبدیل را دربر دارد. اما برخلاف

¹⁸ Wavelet Transform

¹⁹ Scaling

²⁰ Translation

تبدیل ویولت زمان-کوتاه، در تبدیل ویولت به طور مستقیم پارامتر فرکانس وجود ندارد. در عوض، پارامتر مقیاس وجود دارد که به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد. به عبارت دیگر $s = 1/f$ (به مفهوم مقیاس است). در رابطه ۱، V تابع پنجره است که اصطلاحاً ویولت مادر نامیده می‌شود. واژه ویولت به معنای موج کوچک (موجک) است. دلیل استفاده از واژه کوچک، محدود بودن و کوتاه بودن تابع پنجره می‌باشد. علت استفاده از واژه موج نیز به دلیل ماهیتی نوسانی این تابع است. واژه مادر نیز به این منظور به کار برده می‌شود که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس شده، همگی از روی تابع اولیه بدست می‌آیند که اصطلاحاً ویولت مادر نامیده می‌شود. به بیان علمی، ویولت مادر، یک تابع الگو^{۲۱} جهت تولید سایر پنجره‌ها می‌باشد. آنچنانکه پیش از این عنوان شد، در تبدیل ویولت به جای فرکانس، پارامتر مقیاس وجود دارد. همانگونه که از معنی این پارامتر برمی‌آید، نوعی مفهوم مقیاس درون آن نهفته است. درست به مانند مفهوم مقیاس در نقشه، در تبدیل ویولت نیز مقیاس‌های بزرگ، متناظر با یک دید کلی و فارغ از جزئیات به سیگنال است (متناظر با فرکانس‌های پایین) و مقیاس‌های کوچک، متناظر با نگاه به جزئیات سیگنال است و لذا در تناظر با فرکانس‌های بالا خواهد بود. مقیاس کردن، به عنوان یک اپراتور ریاضی، سیگنال را منقبض یا منبسط می‌کند. بدین‌سان، در مقیاس‌های بالا که سیگنال منبسط می‌شود، به جزئیات پرداخته خواهد شد و در مقیاس‌های پایین که سیگنال منقبض می‌شود، به کلیات پرداخته خواهد شد. نکته قابل ذکر این است که متغیر مقیاس در تعریف تبدیل ویولت، در مخرج ظاهر شده است. بنابراین به ازای مقادیر $s < 1$ سیگنال منبسط شده و به ازای $s > 1$ سیگنال فشرده می‌گردد.

در این تحقیق موجک‌های db و bior به خوبی توانسته‌اند محل آسیب را با کمترین خطای ممکن شناسایی کنند. اشکال ۹الف تا ۹و، شناسایی محل آسیب در نمونه‌ها توسط تبدیل موجک را نشان می‌دهند. در نمونه بدون برشگیر (اشکال ۹الف تا ۹ج) در نقاط شروع و پایان آسیب (محدوده جداسازی توسط لایه پلی‌استایرن) پرشی در ضریب موجک ایجاد می‌شود و از آنجایی که یکی از کاربردهای این تبدیل شناسایی نقاط ناپیوسته در سیگنال می‌باشد و آن نقطه را بعنوان آسیب می‌شناسد، شروع و پایان محدوده آسیب بخوبی تشخیص داده شده است و با این وجود می‌توان پی برد در محدوده ۲۰ الی ۶۰ سانتی‌متر از سازه آسیب رخ داده است. قابل ذکر است شناسایی محدوده آسیب بدون خطا صورت گرفته است.

در نمونه DDB-C شرایط به خاطر برشگیر و ایجاد سختی نقطه‌ای در طول ستون قدری متفاوت است و در مود اول محدوده آسیب تقریباً درست پیش‌بینی شده است ولی حدود ۳/۱۷ درصد از هر طرف خطا دارد ولی در مود دوم خطا تقریباً برابر صفر است. مود سوم مانند مود اول دارای خطای تقریباً ۳/۱۷ درصدی است، ولی بطور کلی هر سه مود محدوده جداسازی را به خوبی و با تقریب قابل قبولی شناسایی می‌کنند که بیانگر دقت روش تبدیل موجک و مناسب بودن شرایط آزمایش است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت ستون‌های فولادی پر شده با بتن در صنعت ساختمان و بطور کلی پروژه‌های خاص و بلند مرتبه، شناسایی آسیب در این المان سازه‌ای نیز بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر جهت پایش سلامت ستون‌های CFT از چهار نمونه (نمونه با برشگیر و ۲ نمونه بدون برشگیر) استفاده شده است. در گام بعد داده‌های مودال استخراج شده و تحلیل روی داده‌ها صورت گرفته است. در بحث پایش سلامت سازه‌ای گام اول پس از استخراج داده‌ها، شناسایی وجود آسیب است که در این تحقیق به کمک روش‌های فرکانسی (مقایسه فرکانس‌ها)، ضریب میرایی، شکل مودی (تطابق مودها) و پارامتر MAC صورت گرفته است که نتایج بیانگر تغییر در تمامی مودهای نمونه‌های مورد بررسی نسبت به حالت سالم است و وجود آسیب در سازه را در دو حالت با/بدون برشگیر تایید می‌کند. گام دوم شناسایی محل آسیب است که برای رسیدن به این مهم از روش تبدیل موجک استفاده شده است. یکی از خصوصیات این روش این است که بدون در اختیار داشتن اطلاعاتی از داده‌های مودال سازه سالم نیز می‌توان وجود آسیب و محل آن را شناسایی کرد. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که محدوده آسیب تعیین شده با دقت بسیار بالایی مشخص شده است بطوریکه بیشترین خطا در مدل با برشگیر و به میزان ۳/۱۷ درصد رخ داده است که قابل قبول می‌باشد.

²¹ ProTOTYPE

مراجع

- [1] O. Rezaifar, A. Yoonesi, S.H. Yousefi, M. Gholhaki (2016). Analytical study of concrete filled effect to the seismic behavior of restrained beam-column steel joints. *Sci. Iran*, 23 (2), 475–485.
- [2] O. Rezaifar, A. Yoonesi (2016). Finite element study the seismic behavior of connection to replace the continuity plates in (NFT/CFT) steel columns. *Steel Compos. Struct.* 21 (1), 73–91.
- [3] O. Rezaifar, M. Nazari (2016). Experimental Study the Seismic Behavior of Types of Continuity Plates in Beam-to-HSS Column Connections. *MSc. Thesis, Semnan University, Semnan, Iran.*
- [4] O. Rezaifar, M. Monavari (2016). Experimental Study the Seismic Behavior of Types of Continuity Plates in Beam-to-CFT Column Connections. *MSc. Thesis, Semnan University, Semnan, Iran.*
- [5] Yuen, M. M. (1985). A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever. *Journal of sound and vibration*, 103 (3), 301-310.
- [6] Feng, M. Q., and Bahng, E. Y. (1999). Damage assessment of jacketed RC columns using vibration tests. *Journal of Structural Engineering*, 125(3), 265-271.
- [7] Sohn, H., & Law, K. H. (2000). Bayesian probabilistic damage detection of a reinforced-concrete bridge column.
- [8] Xu, B., & Gong, X. (2010). Damage Detection of Reinforced Concrete Columns Based on Vibration Tests. *In Earth and Space 2010@ sEngineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 2321-2329, ASCE.
- [9] Moslehy, Y., Gu, H., Belarbi, A., Mo, Y. L., & Song, G. (2010). Smart aggregate based damage detection of circular RC columns under cyclic combined loading. *Smart Materials and Structures*, 19(6), 065021.
- [10] Chiu, C. K., Lyu, Y. C., & Jean, W. Y. (2014). Probability-based damage assessment for reinforced concrete bridge columns considering the corrosive and seismic hazards in Taiwan. *Natural hazards*, 71(3), 2146-2164.
- [11] Wu, J. R., and Li, Q. S. (2006). Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), 231-234.
- [12] Betti, M., Facchini, L., & Biagini, P. (2015). Damage detection on a three-storey steel frame using artificial neural networks and genetic algorithms. *Meccanica*, 50(3), 875-886.
- [13] Tort, C., & Hajjar, J. F. (2004). Damage assessment of rectangular concrete-filled steel tubes for performance-based design. *Earthquake Spectra*, 20(4), 1317-1348.
- [14] Xu, B., Li, B., & Song, G. (2012). Active debonding detection for large rectangular CFSTs based on wavelet packet energy spectrum with piezoceramics. *Journal of Structural Engineering*, 139(9), 1435-1443.
- [15] Xu, B., Zhang, T., Song, G., & Gu, H. (2013). Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(1), 7-17.
- [16] XU, B., SHU, Z., & DYKE, S. (2015). Embedded Interface Debonding Detection for an Irregular Complex Multi-chamber Steel Reinforced Concrete Column with PZT Impedance. *Structural Health Monitoring*.
- [17] Xu, Bin, Hongbing Chen, Y-L. Mo, & Tianmin Zhou (2018). Dominance of debonding defect of CFST on PZT sensor response considering the meso-scale structure of concrete with multi-scale simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 107, 515-528.
- [18] B. Xu, H. Chen & S. Xia (2017). Numerical study on the mechanism of active interfacial debonding detection for rectangular CFSTs based on wavelet packet analysis with piezoceramics, *Mech. Syst. Sig. Process.* 86, 108–121.
- [19] B. Xu, H. Chen & S. Xia (2017). Wave propagation simulation and its wavelet package analysis for debonding detection of circular CFST members. *Smart Struct. Syst.* 19(2), 181–194.
- [20] B. Xu, H. Chen, Y.-L. Mo & X. Chen (2017). Multi-physical field guided wave simulation for circular concrete-filled steel tubes coupled with piezoelectric patches considering debonding defects. *Int. J. Solids Struct.* 122(123), 25–32.
- [21] Dong, Wei, Zhimin Wu, Xiangming Zhou, & Yongjie Tan (2016). Experimental studies on void detection in concrete-filled steel tubes using ultrasound. *Construction and Building Materials*. 128, 54-162.