



بکارگیری نویز سفید در بررسی و مقایسه خواص دینامیکی تیرهای دو سر ساده معمولی و لانه زنبوری

محمد علی لطف الهی یقین^۱، حمید احمدی^۲

(دریافت: ۸۹/۴/۲۱، پذیرش: ۸۹/۹/۱۶)

چکیده

در مقاله حاضر، خصوصیات دینامیکی تیرهای با پروفیل معمولی و لانه زنبوری بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مطالعه در دو حالت مجزا، با مهار جانبی کامل و ناقص، انجام شده است. ابتدا با استفاده از نرم افزار ANSYS، یک تحلیل مودی روی تیرهای دو سر ساده لانه زنبوری و پروفیل معمولی انجام شده و مودهای ارتعاش آزاد به شکل مبسوط مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در ادامه، طی تحلیل در حوزه فرکانس، یک بار دینامیکی با خواص نویز سفید به این تیرها اعمال و پاسخ دینامیکی آنها بررسی شده است. بدین منظور، چگالی طیفی توان (PSD) پاسخ‌های مختلف استخراج و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در تیر دو سر ساده با بار گسترده یکنواخت در تمام طول تیر با خواص نویز سفید، صرفاً بعضی از مودها تحریک شده و اثر برخی مودهای دیگر حذف می‌گردد. لذا برای بررسی خصوصیات دینامیکی المان، بایستی از بارگذاری مناسب استفاده شود که بتواند تمامی مودهای ارتعاشی تیر را تحریک نماید. به عنوان مثال، در PSD شتاب حاصل از بارگذاری گسترده در نصف دهانه تیر با طیف نویز سفید، کلیه مودها ظاهر می‌شوند.

کلمات کلیدی

تیر لانه زنبوری، تیر دو سر ساده، تحلیل مودی، طیف پاسخ، نویز سفید، چگالی طیفی توان (PSD)

Application of White Noise Excitation for Investigation and Comparing the Dynamic Characteristics of Castellated and Plain-webbed Beams

Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin, Hamid Ahmadi

ABSTRACT

In the present paper, dynamic characteristics of castellated beams are investigated and compared with the plain-webbed ones. Firstly, using the FEM-based software package ANSYS, modal analyses are performed on plain-webbed and castellated simply supported beams. The mode shapes are extracted and discussed. Afterwards, during a frequency-domain analysis, a white noise dynamic load with an appropriate frequency range is applied to both plain-webbed and castellated beams and their dynamic behaviors are studied through extracting the power spectral densities (PSDs) of various structural responses. The effect of full and local lateral bracing of the beams is considered in the present study. It can be concluded that the loading pattern is a critical factor in investigating the dynamic properties of simply supported castellated beams. For example, when a uniformly distributed load having white noise characteristics is applied to the whole length of the beam, some mode shapes can not be detected. However, when the same load is exerted on the half of the beam length, all mode shapes appear in the PSD of the acceleration response.

Keywords

Castellated Beam, Simply Supported Beam, Modal Analysis, Response Spectrum, White Noise, PSD

۱. دانشیار، دانشکده عمران دانشگاه تبریز، lotfollahi@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده عمران دانشگاه تبریز، h-ahmadi@tabrizu.ac.ir

در این مقاله، به منظور بررسی خصوصیات دینامیکی تیرهای لانه زنبوری و در کنار آن تیر با پروفیل معمولی به عنوان المان شاهد، یک تیر دو سر ساده در نظر گرفته شده و پس از انجام تحلیل مودی، نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با بکارگیری نوین سفید، تحلیل دینامیکی تیر از دیدگاه متفاوتی دنبال خواهد شد. در این روش، تعیین تعداد مودها و اعمال محدودیت روی شماره آن‌ها ضرورتی نداشته و کلیه مودهای فعال، متناسب با شرایط بارگذاری ظاهر شده و وزن و میزان تأثیر آنها نیز مشخص است. بارگذاری از نوع گسترده یکنواخت با خصوصیات نوین سفید می‌باشد. تحت این بارگذاری، واکنش‌های مختلف تیر از جمله تغییر مکان، لنگر خمشی و شتاب تعیین شده و تابع چگالی طیفی توان (PSD)^۱ واکنش‌های مذکور استخراج و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۲- مرور مطالعات فنی

در تیرهای لانه زنبوری، به دلیل افزایش بازوی لنگر، مقاومت خمشی تیر افزایش یافته و در نتیجه چنین مقاطعی در تیرهای بلند کاربرد بیشتری دارند. در مقابل به دلیل حذف شدن جان در محل سوراخ‌ها، مقاومت برشی تیر کاهش می‌یابد. در طراحی این تیرها باید مسائل ویژه‌ای از جمله کمناش جانبی بال، کمناش جان و کمناش پیچشی مقطع در نتیجه افزایش تنش برشی در تیر مورد توجه قرار گیرند. در رابطه با این مسائل، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که خلاصه‌ای از آنها در ادامه مرور می‌شود.

Redwood و Demirdjian [۱] کمناش جان در تیرهای لانه زنبوری در اثر برش را بررسی نمودند. Zaarour و Redwood [۲] آزمایشاتی روی تیرهای لانه زنبوری انجام داده و با افزایش بارگذاری در حالت فوق کمناش تا مرحله شکست، پیشنهاداتی برای تقویت جان ارائه نمودند. کمناش جانبی- پیچشی پروفیل‌های لانه زنبوری توسط Nethercot و Kerdal [۳] مورد بررسی

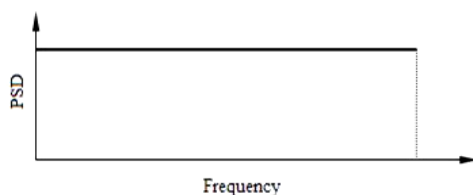
استفاده از تیرهای لانه زنبوری موجب افزایش ممان اینرسی تیر و متعاقباً افزایش ظرفیت خمشی و کاهش خیز تیر می‌گردد. بدیهی است در این صورت صرفه‌جویی قابل توجهی در استفاده از فولاد در صنعت ساختمان‌سازی صورت می‌گیرد. ظرفیت برشی در تیرهای لانه زنبوری به دلیل سوراخ‌های ایجاد شده کاهش می‌یابد که این ضعف با بکارگیری ورق تقویتی در موقعیت‌های بحرانی برطرف می‌شود. از جمله مهمترین معایب این پروفیل‌ها، بالا بودن هزینه ساخت آنهاست که باعث کاهش کاربرد آن‌ها در سطح جهان شده است. لیکن در کشورمان ایران به دلیل ارزان بودن نیروی کار و نیز محدودیت در تنوع پروفیل‌ها، کاربرد تیرهای لانه زنبوری کماکان توجیه اقتصادی داشته و این تیرها بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. متأسفانه به دلیل محدود بودن کاربرد این تیرها در سطح جهان، مطالعات زیادی روی رفتار آنها صورت نگرفته است. این موضوع، ضرورت بررسی نقاط ضعف این تیرها و رفع آن‌ها در داخل کشور را دو چندان می‌نماید. به خصوص در رابطه با عملکرد دینامیکی این تیرها تحقیقات قابل توجهی صورت نگرفته است و پیش‌بینی می‌شود به دلیل وجود سوراخ‌های ایجاد شده در جان، رفتار چنین تیرهایی با تیرهای مشابه معمولی متفاوت باشد. در کشور زلزله‌خیزی مثل ایران، عدم توجه به خصوصیات دینامیکی این تیرها ممکن است عواقب جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد.

در تحلیل مودی سازه، معمولاً لازم است مقداری برای تعداد مودهای مورد نظر برای هر تحلیل، به تناسب دقت و اهمیت تحقیق، فرض شود. افزایش شماره مودها مبین کاهش اهمیت آن‌ها روی پاسخ دینامیکی سازه است، ولی وزن و تأثیر مودهای بالاتر به طور دقیق مشخص نمی‌شود. لذا برای تحلیل‌گر مشخص نیست که تا کدام مود بایستی تحلیل انجام گیرد. در واقع، انتخاب تعداد مودهای مورد بررسی تابع تجربه فرد است.

1. Power Spectral Density



کلیه فرکانس‌ها در محدوده مذکور به یک میزان فعال باشند را نیز می‌توان نویز سفید نامید [۹]. تابع PSD برای یک فرایند نویز سفید در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): تابع PSD برای یک فرایند نویز سفید

در تحلیل بعضی از سیستم‌های دینامیکی، اعمال نویز سفید به عنوان ورودی بسیار مفید است، زیرا کلیه مودهای مؤثر یک سازه در اثر اعمال نویز سفید فعال می‌شوند. ضمناً چون دامنه تأثیر ورودی همه فرکانس‌ها یکسان است، مقایسه مقدار چگالی طیفی در فرکانس‌های مختلف، تأثیر و اهمیت اثرگذاری مودهای مختلف را به خوبی نشان می‌دهد. بدین منظور، اعمال یک بارگذاری متناسب با شرایط سازه برای تحریک مودهای خاص مورد نظر که با شرایط بارگذاری همخوانی داشته باشد بسیار مهم است. به عبارتی بار مذکور با خواص نویز سفید مسلماً تحت فرکانس‌های خاصی که با شکل مودهای سازه متناسب است سازه را تحریک می‌کند. می‌توان پیش‌بینی نمود که تحریک سازه تحت فرکانس طبیعی اول نسبتاً شدید بوده و در فرکانس‌های بالاتر با افزایش مود ضعیف‌تر می‌شود. ضمناً به دلیل اینکه تحلیل در حوزه فرکانس انجام می‌گیرد، بهتر است خاصیت مورد نظر سازه به شکل طیف پاسخ تهیه و نشان داده شود.

در مقاله حاضر باند نسبتاً وسیعی در محدوده صفر تا ۱۰۰ هرتز برای نویز سفید در نظر گرفته شده و بار وارده، یک بار یکنواخت گسترده در طول تیر می‌باشد. به منظور بررسی خواص دینامیکی تیرهای لانه زنبوری، توابع چگالی طیفی توان (PSD) برای تغییر مکان، لنگر خمشی و شتاب در محدوده فرکانسی در نظر گرفته شده، تعیین می‌شوند.

قرار گرفت. Kerdal و Nethercot [۴] نیروی برشی را عامل کماتش جان دانسته و کماتش جانبی-پیچشی را فاکتور تعیین کننده ظرفیت نهائی تیرهای لانه زنبوری معرفی کردند. کماتش جانبی-پیچشی غیر ارتجاعی در تیرهای لانه زنبوری توسط Mohebkhah [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. Showkati و Mohebkhah [۶] تأثیرات قیود جانبی مرکزی الاستیک بر مقاومت پیچشی-خمشی غیر الاستیک، در تیرهای دو سر ساده لانه زنبوری، تحت بارگذاری خمشی خالص را مورد مطالعه قرار دادند. Showkati و Zirakian [۷] کماتش پیچشی تیرهای دو سر ساده لانه زنبوری که دارای یک مهاربند جانبی در وسط دهانه بودند را تحت اثر یک بار متمرکز در وسط دهانه بررسی نمودند. همان طور که مشاهده می‌شود، رفتار دینامیکی تیرهای لانه زنبوری چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است.

۳- تحلیل فرکانسی تحت بارهای تصادفی و اثر نویز سفید در واکنش سازه

در تحلیل یک سیستم دینامیکی تحت بارگذاری تصادفی، مقدار لحظه‌ای نیرو به عنوان عامل محرک مشخص نبوده و تعیین مقدار واکنش نیز به صورت جزمی^۱ میسر نیست. در چنین شرایطی می‌توان برای بررسی مشخصات واکنش سازه از تحلیل طیفی استفاده کرد. از بررسی تابع چگالی طیفی توان (PSD) یک واکنش نه تنها خواص واکنش مذکور تعیین می‌شود بلکه می‌توان خواص دینامیکی سیستم را نیز ارزیابی نمود. تابع چگالی طیفی توان پاسخ از حاصل ضرب تابع PSD نیروی محرک در مربع عملگر دامنه پاسخ^۲ به صورت رابطه (۱) تعیین می‌شود [۸]:

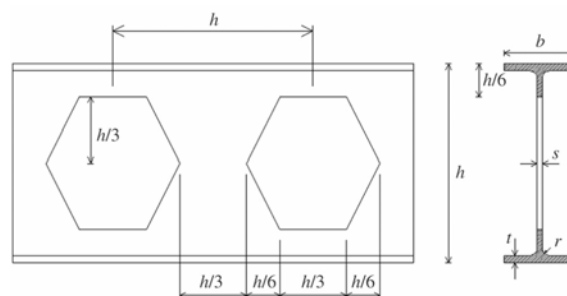
$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (1)$$

در صورتی که محدوده فرکانس‌های فعال یک فرایند از صفر تا بی‌نهایت تغییر کند، فرایند تنوریک حاصله، نویز سفید نامیده می‌شود. در عمل طیف با باند محدودتری که

1. Deterministic
2. Response amplitude operator

در این مقاله، تیرهای با پروفیل معمولی و لانه زنبوری در دو حالت مورد تحلیل قرار می‌گیرند. حالت اول مربوط به تیرهای معمولی و لانه زنبوری است که در محور وسط تیر و نیز در بالا و پایین ورق جان دارای مهار جانبی هستند (مهار ناقص) و حالت دوم مربوط به تیرهایی است که تمام گره‌های آنها دارای مهار جانبی هستند (مهار کامل). برای شبیه سازی عددی تیرهای مورد مطالعه در این مقاله، از روش اجزای محدود و نرم افزار ANSYS نسخه 5.4 استفاده شده است. از المان Shell 63 برای مدل سازی استفاده شده است. این المان در هر گره دارای سه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی است.

جنس پروفیل‌ها، فولاد نرمه با وزن مخصوص ۷۸۰۰ کیلوگرم نیرو بر متر مکعب است. ارتفاع و ضخامت تیر لانه زنبوری و تیر معمولی متناظر برابر هستند. هندسه تیر لانه زنبوری در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات مدل‌ها منطبق بر پروفیل CPE180 است ($h = 270 \text{ mm}$, $b = 91 \text{ mm}$, $t = 8.0 \text{ mm}$, $s = 5.3 \text{ mm}$). طول تیرها ۶۱۰ سانتیمتر می‌باشد. با انتخاب این طول بخصوص، امکان ایجاد اشکال منظمی از سوراخ‌ها بطور مرتب در طول تیر فراهم بوده و دو انتهای تیرها نیز بصورت جان‌پُر با عرضی برابر عرض بین سوراخ‌ها تکمیل گردیده‌اند.



شکل (۲): هندسه تیر لانه زنبوری

۴-۲- تحلیل مودی

اولین قدم در تحلیل دینامیکی، شناسایی مشخصات مود شکل‌ها و محاسبه فرکانس‌های متناظر می‌باشد. از

آنجائی که تیرهای لانه زنبوری به عنوان المان‌های خمشی متداول در ایران از دیدگاه دینامیکی مورد بررسی کامل قرار نگرفته‌اند، لذا نمونه‌هایی از این تیرها در کنار تیرهای شاهد (پروفیل معمولی) تحت تحلیل مودی قرار گرفته و نتایج بطور مبسوط مقایسه شده است.

در جدول‌های (۱) و (۲) فرکانس مودهای ارتعاشی تیر دو سر ساده معمولی و لانه زنبوری، به ترتیب در شرایط مهار جانبی ناقص و کامل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار فرکانس‌های تیر لانه زنبوری همیشه کوچکتر از تیر معمولی است. این موضوع بیانگر آن است که تیر لانه زنبوری نسبت به تیر معمولی نرم‌تر عمل می‌کند.

از مقایسه مودهای مشترک تیر دو سر ساده با پروفیل معمولی در شرایط مهار ناقص و کامل ملاحظه می‌شود که صرفاً ۵ مود مشترک بین آنها وجود دارد. در ضمن سایر مودهای خمشی رؤیت شده در تیر مهار شده کامل نیز در جدول آورده شده است. سایر مودهای تیر با مهار ناقص، مود شکل‌های پیچیده حاصل از ترکیب خمش و پیچش بوده و دارای فرکانس‌های بزرگی می‌باشند. لذا از ارائه آنها در جدول‌های (۱) و (۲) خودداری شده است.

ملاحظه می‌شود که تیر مهار شده کامل نسبت به تیر با مهار در لبه‌ها و وسط جان (مهار ناقص) سخت‌تر بوده و دارای فرکانس‌های بزرگتری می‌باشد. حداکثر درصد کاهش فرکانس در تیرهای با مهار ناقص در حدود ۳٪ است. از مقایسه تیرهای لانه زنبوری مهار شده کامل و ناقص مشاهده می‌شود که تعداد مودهای مشترک در دو تیر، ۷ مود بوده که بیشتر از پروفیل معمولی است. در این حالت نیز تیر لانه زنبوری مهار شده نسبت به تیر با مهار ناقص قدری سخت‌تر عمل می‌کند.

با مقایسه چهار تیر مورد بررسی، می‌توان نتیجه گرفت مهار کامل‌تر جانبی باعث می‌شود تیرها سخت‌تر عمل کرده و در مودهای اصلی یعنی مودهای خمشی نوسان کنند. لیکن تفاوت فرکانس مودهای مشابه بسیار ناچیز بوده و حداکثر در حدود ۳٪ می‌باشد.

جدول (۱): فرکانس مودهای ارتعاشی تیر دو سر ساده معمولی و لانه زنبوری، مهار جانبی در لبه ها و محور جان

ردیف	توصیف نوع مود شکل	تیر معمولی		تیر لانه زنبوری	
		عدد مود	فرکانس (هرتز)	عدد مود	فرکانس (هرتز)
۱	مود اول خمشی	۱	۱/۱۴۹۱	۱	۱/۱۰۶۲
۲	مود دوم خمشی	۲	۳/۱۴۵۳	۲	۳/۰۳۳۰
۳	مود سوم خمشی	۳	۷/۰۴۰۳	۳	۶/۰۸۵۵
۴	مود چهارم خمشی	۴	۹/۷۵۲۸	۴	۸/۶۷۰۵
۵	مود چهارم خمشی + مود اول محوری	۵	۱۲/۹۰۱	۵	۱۰/۶۴۹
۶	مود اول پیچش طولی + مود دوم کمانش جان	۶	۱۳/۷۴۴	۶	۱۱/۷۲۸
۷	مود دوم پیچش طولی + مود دوم کمانش جان	۷	۱۳/۸۶۸	۷	۱۱/۹۳۴
۸	مود سوم پیچش طولی + مود دوم کمانش جان	۸	۱۴/۰۷۳	۸	۱۲/۲۶۴
۹	مود پنجم خمشی	-	-	۹	۱۲/۳۱۱
۱۰	مود چهارم پیچش طولی + مود دوم کمانش جان	۹	۱۴/۳۵۴	۱۰	۱۲/۶۶۸

جدول (۲): فرکانس مودهای ارتعاشی تیر دو سر ساده معمولی و لانه زنبوری، مهار کامل جانبی

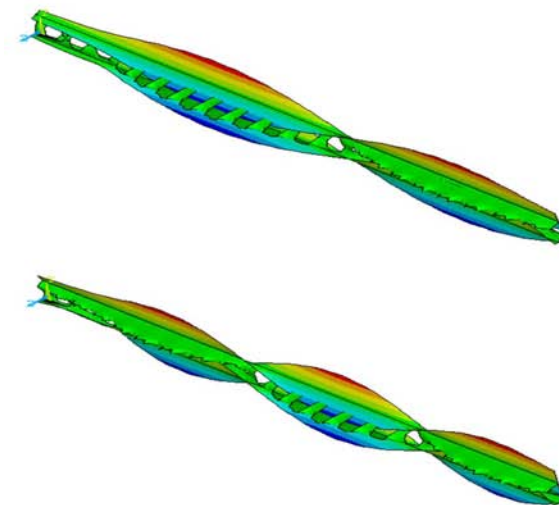
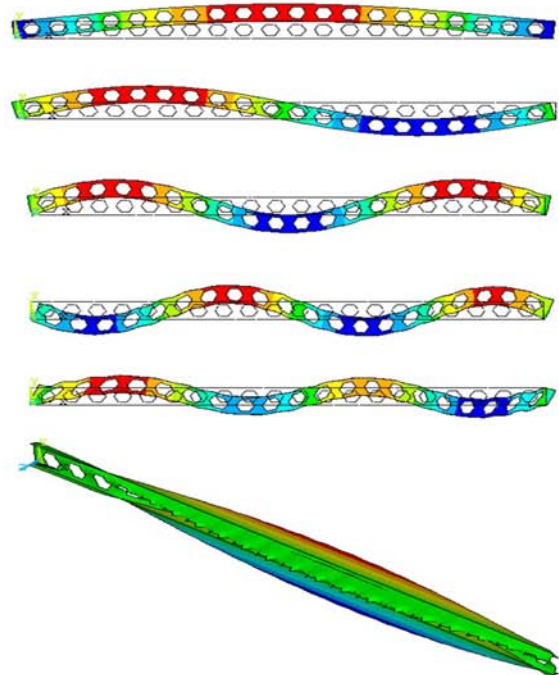
ردیف	توصیف نوع مود شکل	تیر معمولی		تیر لانه زنبوری	
		عدد مود	فرکانس (هرتز)	عدد مود	فرکانس (هرتز)
۱	مود اول خمشی	۱	۱/۱۸۴۷	۱	۱/۱۴۲۵
۲	مود دوم خمشی	۲	۳/۲۵۰۱	۲	۳/۱۲۳۴
۳	مود سوم خمشی	۳	۷/۲۳۸۵	۳	۶/۲۲۲۵
۴	مود چهارم خمشی	۴	۱۰/۰۴۷	۴	۸/۸۷۹۵
۵	مود چهارم خمشی + مود اول محوری	۵	۱۳/۱۸۷	۵	۱۰/۹۱۶
۶	مود پنجم خمشی	۶	۱۶/۳۰۰	۶	۱۲/۵۰۱
۷	مود ششم خمشی	۷	۲۱/۶۷۲	۷	۱۵/۷۷۱
۸	مود هفتم خمشی + مود دوم محوری	۸	۲۳/۴۴۱	۹	۲۰/۹۶۲
۹	مود هفتم خمشی	۹	۲۶/۸۲۷	۸	۱۸/۷۱۷
۱۰	مود اول نوسان بالها (چرخش موازی بالها)	۱۰	۳۰/۱۶۰	-	-

در نقاط بالا، پایین و وسط، به دلیل آزاد بودن کنسول بالها و ضعف جان تیر، مود کمانشی جان به راحتی اتفاق می افتد. این موضوع بیانگر آن است که مهار جانبی تیرها بایستی دقیق تر و جدی تر انجام گیرد زیرا مودهای پیچشی و کمانش جان تیر به راحتی و قبل از مودهای بالاتر خمشی ظاهر می شوند. چنین عملی در اجرای سقف های معمولی با بکارگیری مصالح پر کننده سقف صورت

به عنوان نمونه، صرفاً مود شکل های اول تا هشتم تیر دو سر ساده لانه زنبوری با مهار ناقص، در شکل (۳) ارائه شده است.

به دلیل مقید بودن محور وسط تیرهایی که بطور ناقص در جهت عرضی در این تحقیق مهار شده اند، مود اول کمانش جان حذف و شکل کمانش جان از مود دوم آغاز می شود. علی رغم مهار بودن صفحه جان تیر از نظر عرضی

میگیرد. ولی در سازه‌های صنعتی که احتمال عریان ماندن تیرها وجود دارد بایستی موضوع مهار جانبی بیشتر مورد توجه قرار گیرد.



شکل (۳): هشت مود اول ارتعاش طبیعی (به ترتیب از بالا به پایین) برای تیر دو سر ساده لانه زنبوری با مهار ناقص

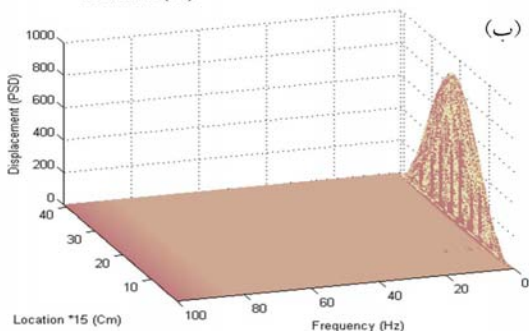
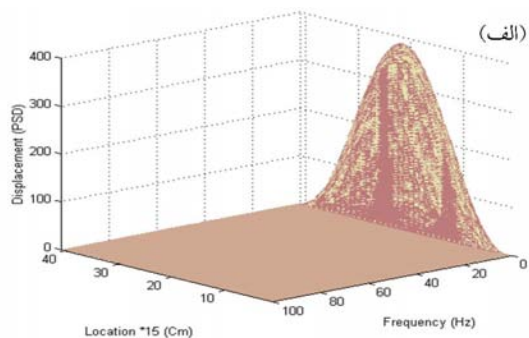
در تیر لانه زنبوری با مهار ناقص جانبی در مدهای بالاتر از مود چهاردهم، تغییر شکل خاصی به صورت ترکیب سه حرکت مستقل مشاهده می‌شود. این حرکت‌ها شامل نوسان طولی بال‌ها مشابه مود هفتم یا بالاتر، همراه

با مدهای مختلف پیچشی و مود سوم کمانش جان تیر می‌باشد. در تیر با پروفیل معمولی با مهار ناقص جانبی، در مدهای بالاتر از مود هفدهم یک تغییر شکل ترکیبی حاصل از سه حرکت مود دهم خمش طولی در بال‌ها، مدهای مختلف پیچش طولی و مود سوم کمانش جان مشاهده می‌شود، که چنین مود شکلی در بیست مود اول تیر لانه زنبوری ظاهر نمی‌شود.

۵- چگالی طیفی توان (PSD) واکنش‌ها در تیر با مهار ناقص

۱-۵ چگالی طیفی تغییر مکان

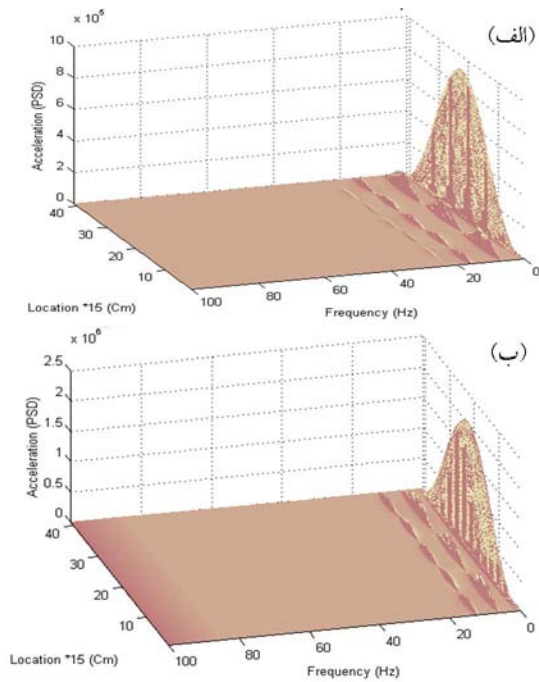
شکل (۴) طیف تغییر مکان را به ترتیب برای تیر با پروفیل معمولی و تیر لانه زنبوری نشان می‌دهد. در این تیرها صرفاً مود اول تحریک شده است. ولی مقدار طیف تغییر مکان تیر لانه زنبوری بسیار بیشتر از تیر معمولی بوده و این نشانگر نرم بودن تیر لانه زنبوری است.



شکل (۴): طیف تغییر مکان قائم برای تیر دو سر ساده با مهار ناقص: (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

۲-۵- چگالی طیفی لنگر خمشی

در طیف لنگر تیر معمولی و لانه زنبوری تحریک بسیار جزئی در مود سوم نیز ایجاد می‌شود (شکل (۵)). شاید بدون بررسی طیف‌های شتاب که در ادامه بحث می‌شوند امکان تشخیص تحریک مود سوم از مود دوم مقدور نباشد. در طیف لنگر تیر لانه زنبوری به دلیل وجود سوراخ‌ها، شکستگی مشاهده می‌شود.



شکل (۶): طیف شتاب برای تیر دو سر ساده با مهار ناقص: (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

۶- چگالی طیفی واکنش‌ها در تیر با مهار جانبی کامل پیش‌بینی می‌شود به دلیل حذف حرکت‌های پیچشی و کمانشی جان در تیرهای با مهار کامل جانبی، تحریک مودهای بالاتر خمشی در این تیرها ملاحظه شود. مشروح توضیحات در ادامه ارائه شده است.

۱-۶- چگالی طیفی تغییر مکان

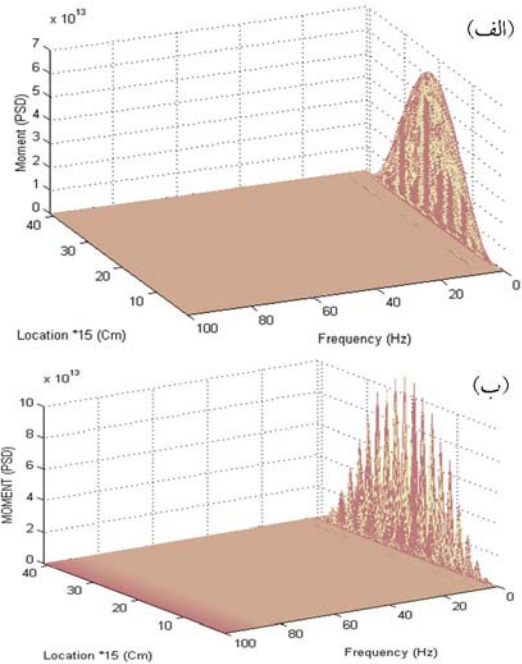
چگالی طیفی توان تغییر مکان در هر دو تیر صرفاً به ازای تحریک مود اول تولید شده است و در این واکنش تفاوت عمده‌ای نسبت به تیر با مهار ناقص وجود ندارد.

۲-۶- چگالی طیفی لنگر

در طیف لنگر در تیرهای با مهار کامل جانبی، نسبت به تیر با مهار ناقص تغییر عمده‌ای مشاهده نمی‌شود.

۳-۶- چگالی طیفی شتاب

در طیف شتاب تیر معمولی با مهار کامل جانبی، مطابق شکل (۷ - الف) فعالیت مودهای مختلف کاملاً مشهود است. البته وزن مودهای بالاتر نسبت به مود اول کمتر

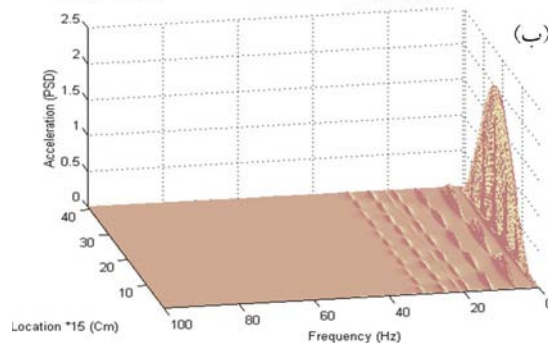
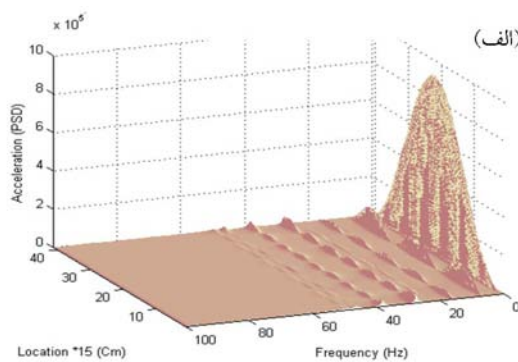


شکل (۵): طیف لنگر خمشی برای تیر دو سر ساده با مهار ناقص: (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

۳-۵- چگالی طیفی شتاب

در شکل (۶) طیف شتاب برای تیرهای معمولی و لانه زنبوری نشان داده شده است. در هر دو تیر مشارکت مودهای بالاتر کاملاً مشخص است. در هر دو تیر علاوه بر مود اول، مودهای سوم و پنجم به طور واضح‌تر مشارکت دارند. در تیر معمولی تأثیر بسیار جزئی مود دیگری نیز قابل تشخیص است. به نظر می‌رسد که این مود شکل مربوط به ترکیب مود پنجم خمشی با مود تغییر مکان محوری باشد. ضمناً تأثیر مودهای زوج یعنی مود دوم یا مود چهارم به هیچ وجه مشهود نیست.

میباشد. با دقت در این طیف مشخص می‌شود که همگی مودهای تحریک شده جزء مودهای فرد هستند. فعالیت مودهای اول، سوم، پنجم، هفتم و نهم کاملاً مشهود است و فعالیت‌های جزئی دیگری بین مودهای پنجم و هفتم رویت می‌شود که به نظر می‌رسد مربوط به ترکیب مود پنجم خمشی و مود دوم محوری است. ضمناً بعد از مود نهم نیز دو مود با فرکانس‌هایی در حدود ۵۰ هرتز فعال هستند که به دلیل ضعف انرژی آن‌ها چندان قابل تشخیص نیستند.



شکل (۷): طیف شتاب برای تیر دو سر ساده با مهار کامل: (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

مطابق شکل (۷ - ب)، در طیف شتاب تیر لانه زنبوری نیز تحریک مودهای اول، سوم، پنجم، هفتم، نهم و یازدهم به طور واضح مشهود است. ضمناً مود دیگری با انرژی کمتر بعد از مود هفتم به شکل ضعیف ظاهر می‌شود که مربوط به ترکیب مود هفتم خمشی با مود دوم محوری است و تأثیر بسیار کمی از خود نشان می‌دهد. در کل ملاحظه می‌شود که مود شکل‌های مؤثری با فرکانس‌هایی بالاتر از ۴۰ هرتز برای این تیر مشاهده نمی‌شود.

نکته بسیار مهم دیگری که در طیف شتاب تیر با مهار جانبی و مهار ناقص مشاهده می‌شود این است که هیچ واکنشی از مودهای زوج دیده نمی‌شود. این مسئله نیاز به بررسی بیشتری دارد و لازم است دلیل این مسئله مشخص گردد. در تیرهای کنسولی چنین مسئله‌ای ملاحظه نشده بود. یعنی در تیر کنسول مودهای فرد و زوج همگی در واکنش‌ها دخالت دارند [۱۰]. به نظر می‌رسد دلیل این امر، مربوط به وجود تقارن در سازه و بارگذاری باشد که مودهای غیر متقارن را حذف نموده و واکنش مودهای متقارن (مودهای فرد) را تحریک می‌کند. به منظور بررسی این موضوع، در ادامه بحث، یک بارگذاری گسترده متقارن معکوس (در نصف دهانه رو به بالا و در نصف دهانه رو به پایین) با خاصیت نویز سفید روی تیر اعمال و واکنش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۷- چگالی طیفی واکنش‌های تیر با مهار کامل و ناقص تحت بار معکوس

در ادامه بحث یک بار گسترده دینامیکی به طور متقارن معکوس روی تیرهای دو سر ساده اعم از پروفیل معمولی یا لانه زنبوری با مهار جانبی ناقص و کامل جان اعمال می‌گردد. به عبارت دیگر تا وسط تیر بارگذاری گسترده و به سمت پایین (در جهت ثقل) و در نیمه دیگر بارگذاری گسترده به سمت بالا (خلاف جهت ثقل) به صورت نویز سفید اعمال می‌گردد. در آرای این بارگذاری، تحلیل روی تیرهای مختلف انجام شده و نتایج جهت حفظ اختصار صرفاً برای طیف‌های لنگر خمشی و شتاب ارائه می‌شوند.

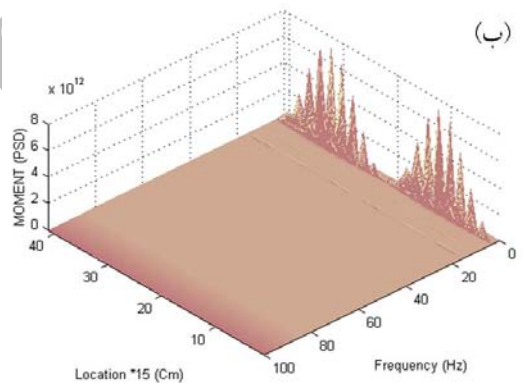
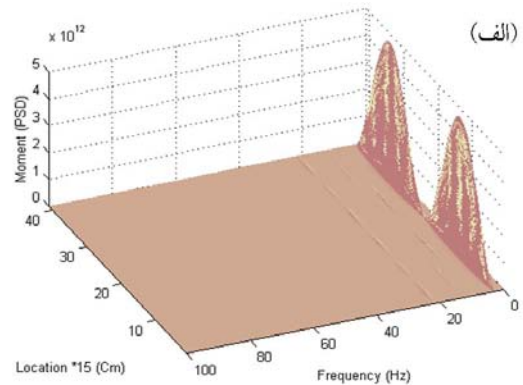
۷-۱- چگالی طیفی واکنش‌ها در تیرهای با مهار ناقص جانبی تحت بار متقارن معکوس

تحت اثر بارگذاری متقارن معکوسی که به صورت نویز سفید اعمال می‌شود، پیش‌بینی می‌شود فرکانس‌های فرد که شکل نوسانی آن‌ها حالت تقارن مستقیم دارند از نتایج تحلیل حذف گردند. واضح است از آنجا که در PSD، توان دوم اعداد بکار گرفته می‌شوند کلیه مقادیر به

صورت مثبت ظاهر شده و در نتیجه ظاهر طیف‌های زوج نیز به صورت متقارن مستقیم دیده می‌شوند.

۷-۱-۱- چگالی طیفی لنگر برای تیر با مهار ناقص

در طیف لنگر تیر معمولی و لانه زنبوری تحت اثر بار گسترده متقارن معکوس با نوسانات نویز سفید که در شکل (۸) ارائه شده است، تأثیر مود دوم که از یک طیف دو کوهانه تشکیل شده به وضوح نمایان می‌باشد.



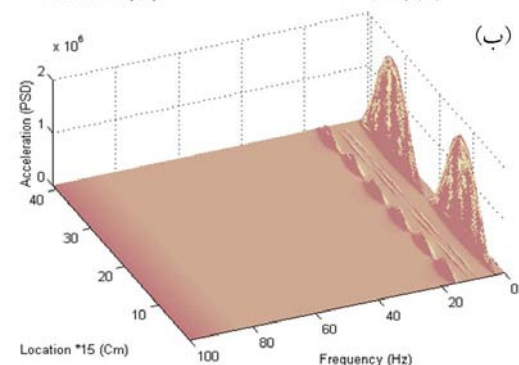
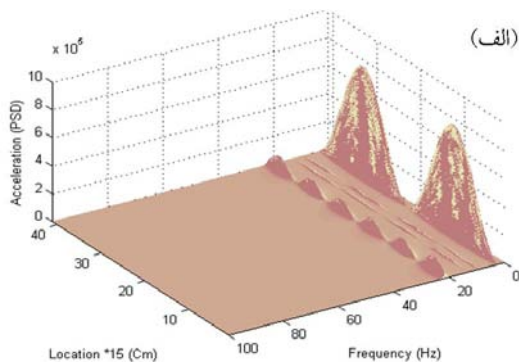
شکل (۸): طیف لنگر برای تیر با مهار ناقص (بار متقارن معکوس): (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

در کنار مود دوم، تأثیر جزئی سایر مودهای زوج بالاتر از جمله مودهای چهارم و ششم روی طیف لنگر کاملاً قابل مشاهده می‌باشد. البته تأثیر مود چهارم ناچیز بوده و به سختی از روی شکل قابل تشخیص است. ضمناً شکستگی‌های ناشی از اثر سوراخ‌ها روی طیف لنگر تیر لانه زنبوری کاملاً مشهود می‌باشد.

۷-۱-۲- چگالی طیفی شتاب برای تیر با مهار ناقص

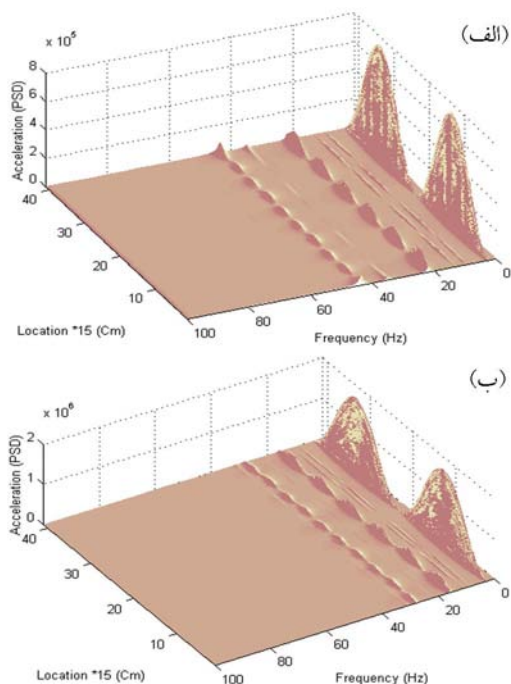
طیف شتاب برای تیرهای معمولی و لانه زنبوری تحت بار متقارن معکوس با نویز سفید در شکل (۹) ارائه شده است. تأثیر مودهای زوج بالاتر علاوه بر مود دوم بر روی این طیف‌ها مشهود است. ملاحظه می‌شود مود ششم خمشی در این طیف کاملاً مؤثر بوده ولی مود خمشی چهارم چندان مؤثر نیست.

از نکات قابل توجه در مورد طیف شتاب تیر معمولی این است که مود خمشی ششم در این تیر دارای فرکانسی بالاتر از ۲۲ هرتز می‌باشد ولی فرکانس مود بیستم در این تیر ۱۸/۰۶۵ هرتز بود. لذا این مود در بین بیست مود اول مشاهده نمی‌شود. لیکن در تیر لانه زنبوری مود خمشی ششم با فرکانس ۱۵/۶۲۸ هرتز، نوزدهمین مود ارتعاشی است. ضمناً هیچ مود زوجی بالاتر از مود ششم در محدوده فرکانس صفر تا ۱۰۰ هرتز در طیف شتاب تیرها ظاهر نشده است.



شکل (۹): طیف شتاب برای تیر با مهار ناقص (بار متقارن معکوس): (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

ضرب توان دوم فرکانس‌های هر مود، تأثیر مودهای بالاتر تقویت و با ارائه انرژی بیشتر، واضح‌تر نشان داده می‌شوند. ضمناً محدوده فرکانسی صفر تا ۱۰۰ هرتز برای بررسی مودهای ارتعاش تیرها در مسئله حاضر، محدوده مناسبی می‌باشد.



شکل (۱۰): طیف شتاب برای تیر با مهار کامل (بار متقارن معکوس): (الف) پروفیل معمولی، (ب) پروفیل لانه زنبوری

۸- چگالی طیفی توان شتاب تیر با مهار کامل تحت بار نامتقارن

در ادامه تحقیق پیش‌بینی می‌شود چنانچه یک بار نامتقارن روی تیرها اعمال شود، تأثیر کلیه مودها اعم از فرد یا زوج رؤیت گردد. این وضعیت در تیر کنسول با اعمال بار گسترده یکنواخت متقارن رخ می‌دهد [۱۰].

به دلیل حساسیت طیف شتاب و انرژی زیاد آن در مودهای بالا برای تیر لانه زنبوری با مهار کامل، این بارگذاری صرفاً روی تیر لانه زنبوری با مهار کامل اعمال شده و تأثیر آن به صورت PSD شتاب در شکل (۱۱) ارائه گردیده است. بارگذاری مذکور یک بار گسترده روی نصف دهانه تیر با نوسانات نوین سفید و در جهت نیروی

نکته دیگری که از طیف شتاب هر دو تیر قابل استنباط می‌باشد این است که مود چهارم دو بار ظاهر شده و در هر دو بار سهم کمی در انرژی طیف دارد. دلیل این مسئله این است که مود چهارم یک بار به صورت مستقل و بار دوم در ترکیب با مود اول تغییر شکل محوری ظاهر گردیده است.

۷-۲- چگالی طیفی توان واکنش‌ها در تیرهای با مهار کامل جانبی تحت بار متقارن معکوس

با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که در تیرهای مهار شده کامل جانبی، مودهای خمشی نقش فعال‌تری دارند. از سوی دیگر از آنجا که بارگذاری گسترده ثقلی اعم از بار مستقیم یا معکوس در تحریک مودهای خمشی مؤثر هستند، لذا پیش‌بینی می‌شود در این بخش، تأثیر مودهای بیشتری در طیف واکنش‌ها ملاحظه شود. ضمناً بدیهی به نظر می‌رسد که در بارگذاری متقارن معکوس، مشابه با تیر دارای مهار ناقص جانبی، صرفاً مودهای زوج رؤیت گردند.

۷-۲-۱- PSD لنگر برای تیر با مهار کامل

طیف‌های لنگر در این حالت کاملاً شبیه به طیف‌های مربوط به تیرهای با مهار جانبی ناقص جان می‌باشند.

۷-۲-۲- PSD شتاب برای تیر با مهار کامل

انتظاری که از تأثیر بار گسترده متقارن معکوس با نوسانات نوین سفید روی تیرهای ساده با مهار جانبی کامل می‌رود، از شکل (۱۰) تأمین می‌گردد. به عبارت دیگر، در این طیف‌ها تأثیر مودهای زوج بالاتر کاملاً مشهود است. در هر دو طیف علاوه بر تأثیر مود دوم خمشی، مود چهارم خمشی، مود چهارم خمشی همراه مود محوری و مود ششم خمشی، تأثیر مود دهم خمشی نیز کاملاً مشهود و مشخص است. این تحلیل نشان می‌دهد که مودهای بالاتر تأثیر چندانی در واکنش شتاب این تیرها که حساس‌ترین واکنش سازه است ندارند. در رابطه با حساسیت طیف شتاب می‌توان گفت که در این طیف تحت اثر حاصل

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، خصوصیات دینامیکی تیرهای دو سر ساده لانه زنبوری و پروفیل معمولی، با استفاده از تحلیل مودی و همچنین تحریک از طریق نویز سفید مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. جزئیات نتایج حاصل از این بررسی در بخش‌های مختلف مقاله به تفصیل مورد بحث قرار گرفته و از تکرار آنها در این بخش خودداری می‌شود. در ادامه صرفاً نتایج کلی مرور خواهد شد:

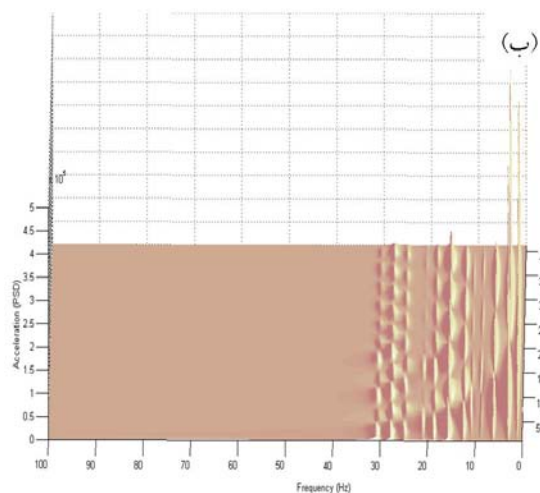
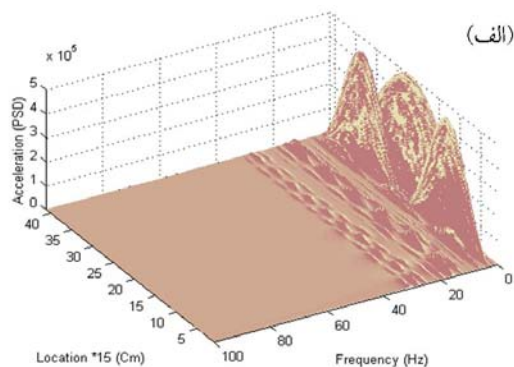
۱- مهار جانبی کامل جان در تیرهای لانه زنبوری موجب افزایش سختی آنها می‌گردد. به بیان دیگر مهار ناقص در این تیرها موجب کاهش فرکانس در مودهای مشابه نسبت به تیر با مهار کامل می‌شود. حداکثر درصد کاهش فرکانس به دلیل مهار ناقص در حدود ۳٪ است. در تیر با مهار جانبی ناقص، در مودهای خمشی، محوری و پیچشی، مقدار فرکانس‌های تیر لانه زنبوری همیشه کوچکتر از تیر معمولی است. این موضوع بیانگر رفتار نرم‌تر خمشی، محوری و پیچشی تیر لانه زنبوری نسبت به تیر مشابه معمولی است.

۲- چگالی طیفی توان (PSD) لنگر در محل سوراخ‌های جان، شکستگی‌هایی دارد که ظاهر آن را پلکانی نشان می‌دهد. این پدیده امکان تشخیص محل سوراخ یا خرابی در سازه را از طریق مقایسه طیف لنگر سازه معیوب با یک سازه سالم مشابه فراهم می‌سازد.

۳- بارگذاری متقارن با طیف نویز سفید در سازه‌های متقارن موجب حذف مودهای غیر متقارن (مودهای زوج) شده و فقط واکنش مودهای متقارن (مودهای فرد) را تحریک می‌کند.

۴- در طیف لنگر تیر معمولی و لانه زنبوری (با مهار کامل یا ناقص) که تحت اثر بار گسترده متقارن معکوس با نوسانات نویز سفید قرار دارد، تأثیر مود دوم با یک طیف دو کوهانه کاملاً مشخص بوده و تأثیر ناچیز سایر مودهای بالاتر زوج از جمله مودهای چهارم و ششم قابل مشاهده است.

ثقل می‌باشد. لازم به ذکر است تأثیر کلیه مودها به صورت تفکیک شده یعنی مودهای فرد در بارگذاری متقارن و مودهای زوج در بارگذاری متقارن معکوس قبلاً مورد بحث قرار گرفته است.



شکل (۱۱): دو نما از طیف شتاب برای تیر لانه زنبوری با مهار کامل (بار نامتقارن)

در چگالی طیفی توان شتاب حاصل از این نوع بارگذاری، مودهای اول تا یازدهم به طور واضح قابل مشاهده هستند. از شکل ظاهری این طیف می‌توان نتیجه گرفت که مود دوم خمشی به دلیل ماهیت بارگذاری تأثیر بیشتری روی انرژی طیف دارد (البته ضمن توجه به تأثیر توان دوم فرکانس آن که بزرگتر از فرکانس مود اول است). تأثیر مودهای بالاتر با افزایش شماره مود به تدریج کاهش می‌یابد، لیکن از این میان، تأثیر مود سوم و ششم خمشی تا حدودی بیشتر از سایر مودها است.

۱۰. لطف‌اللهی یقین، م. ع.، "بررسی تغییرات مودهای مختلف دینامیکی تیرهای لانه زنبوری نسبت به پروفیل‌های معمولی در تیرهای طره"، اولین کنفرانس سازه‌های جدار نازک ایران، دانشگاه ارومیه، ایران، ۱۳۸۱.

۵- طیف شتاب در تیرهای لانه زنبوری و معمولی تحت بار متقارن معکوس با نویز سفید، تأثیر مودهای زوج بالاتر علاوه بر مود دوم را کاملاً نشان می‌دهد. در واقع بارگذاری متقارن معکوس اثر مودهای متقارن (مودهای فرد) را حذف می‌کند.

۶- در چگالی طیفی توان شتاب حاصل از بارگذاری نامتقارن با طیف نویز سفید، مودهای اول تا یازدهم (کل مودهای فرد و زوج) به طور واضح مشاهده میشوند. لذا استفاده از بارگذاری نامتقارن برای بررسی خصوصیات دینامیکی تیرهای دو سر ساده بسیار مفید است.

مراجع

1. Redwood R., Demirdjian, S. (1998), "Castellated beam web buckling in shear", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 10, 1202-7.
2. Zaarour, W., Redwood, R., (1996), "Web buckling in thin webbed castellated beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 8, 860-6.
3. Nethercot, DA., Kerdal D. (1982), "Lateral-torsional buckling of castellated beams", The Structural Engineering, Vol. 60, No. 3, 53-61.
4. Kerdal, D., Nethercot, D.A. (1984), "Failure mode for castellated beams", Journal of Construct Steel and Research, Vol. 4, No. 4, 295-315.
5. Mohebkah, A. (2004), "The moment-gradient factor in lateral-torsional buckling on inelastic castellated beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, 1481-94.
6. Mohebkah, A., Showkati, H. (2005), "Bracing requirements for inelastic castellated beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, 1373-86.
7. Showkati, H., Zirakian, T. (2006), "Distortional buckling of castellated beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, 863- 71.
8. Ochi, M.K., (1990), "Applied probability and stochastic processes in engineering and physical sciences", John Wiley & Sons, Inc., USA.
9. Chatfield, C., (2004), "The analysis of time series: an introduction", 6th Edition, CRC Press, Washington D. C., USA.

