

تخمین سختی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP پس از خسارت با استفاده از داده‌های آزمایش مودال

سیدروح... موسوی^{۱*}، محمدرضا اصفهانی^۲، مهراله رخشانی مهر^۳، سیدحجت... موسوی^۴ و بنیامین قربانزاده^۵

^۱ دانش‌آموخته دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ استاد گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانش‌آموخته دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار گروه عمران، دانشگاه الزهرا تهران

^۴ عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل

^۵ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

خسارت در سازه موجب کاهش سختی آن می‌شود. در تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP به دلیل مدول الاستیسیته کم این میلگردها، کاهش سختی پس از ترک خوردگی شدیدتر خواهد بود. برای ارزیابی وضعیت سازه‌های موجود پس از ایجاد خسارت باید مدل اجزای محدود آن‌ها به هنگام شود. از تحلیل مدل به هنگام شده بر اساس پارامترهای ارتعاشی، مقاومت سازه خسارت دیده در مقابل بارهای موجود بررسی و نقاط ضعف آن برای تقویت مشخص می‌شوند. در این مقاله، یک روش عملی شناسایی خسارت معرفی می‌شود. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، توزیع سختی تیر به گونه‌ای تخمین زده می‌شود که فرکانس‌ها و شکل‌های مود به دست آمده از مدل تحلیلی کمترین خطا را در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش مودال داشته باشد. برای این منظور ۱۰ نمونه آزمایشگاهی از تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP ساخته شده است. نمونه‌های مذکور شامل دو گروه با وصله و بدون وصله می‌باشند که در آن‌ها میلگرد عرضی در طول وصله، مقاومت بتن و نسبت میلگرد طولی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. آزمایش استاتیکی، با هدف ایجاد خسارت صورت می‌گیرد. در بین هر گام بارگذاری استاتیکی، آزمایش مودال انجام می‌گیرد. با استفاده از این آزمایش تغییرات پارامترهای ارتعاشی در گام‌های مختلف خسارت ارزیابی می‌شود. همچنین، مقادیر تجربی فرکانس‌ها و شکل‌های مود برای استفاده در تابع هدف بهینه‌سازی و به هنگام‌سازی سختی تیر خسارت خورده برداشت می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر ممان اینرسی تخمین زده شده با وضعیت ترک خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی در همان سطح بارگذاری هم‌خوانی دارند.

واژگان کلیدی: آزمایش مودال، الگوریتم ژنتیک، انحنای مودال، بهینه‌سازی، شکل مود، فرکانس، میلگردهای GFRP.

۱- مقدمه

و رفتار آن را پیش‌بینی کرد. استفاده از فرکانس‌های طبیعی قدیمی‌ترین و معروف‌ترین روش در ارزیابی سیستم خسارت دیده است. این ویژگی بیشترین کاربرد را برای تخمین خسارت در گذشته و حال حاضر دارد. نخستین تحقیقات مربوط به تخمین خسارت توسط Adams و Cawley [۱] صورت گرفت. آن‌ها با استفاده از تغییرات فرکانس‌های طبیعی سازه خسارت دیده، به کشف موقعیت خسارت پرداختند. از دیگر مشخصه‌های مهم دینامیکی سازه‌ها، شکل‌های مود می‌باشد که در ارزیابی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری شکل‌های مود مشکل‌تر از فرکانس‌های طبیعی است. مودهای به دست آمده از آزمایش مودال دارای مقداری اغتشاش می‌باشند.

Maeck و De Roeck [۲] برای کاهش این اغتشاشات، از روش توانی باقی‌مانده وزنی^۱ استفاده نمودند. برخلاف اجزای

میلگردهای FRP از لحاظ الیاف به سه دسته شیشه (GFRP)، کربن (CFRP) و آرامید (AFRP) تقسیم می‌شوند. این میلگردها مقاومت کششی بالایی دارند و در مقابل خوردگی مقاوم هستند؛ ولی از شکل‌پذیری خوبی برخوردار نیستند. همچنین، پیوستگی بین بتن و این میلگردها به خاطر تفاوت در سطح جانبی و مشخصات مکانیکی، با میلگردهای فولادی متفاوت است. مدول الاستیسیته کم میلگردهای GFRP باعث می‌شود که پس از ترک خوردگی، سختی سازه‌های مسلح شده با این میلگردها با شدت بیشتری نسبت به سازه‌های بتن مسلح فولادی افت کند.

پس از خسارت یک تیر تحت بارگذاری، سختی آن کاهش و میرایی آن افزایش می‌یابد. در نتیجه پارامترهای ارتعاشی آن تغییر می‌کنند. از این تغییرات می‌توان دگرگونی سیستم سازه‌ای

1- Weighted Residual Penalty

هدف از این مقاله، ارائه برنامه‌های عملی برای بررسی وضعیت خسارت در سازه موجود می‌باشد. بر اساس این برنامه، با برداشت فرکانس‌ها و شکل‌های مود تجربی یک تیر به وسیله آزمایش مودال، توزیع سختی آن پس از خسارت تخمین زده می‌شود و مدل اجزای محدود آن به هنگام می‌شود. از تحلیل تیر بر اساس سختی به هنگام شده، می‌توان نیاز سازه به مقاوم‌سازی را بررسی کرد. همچنین، چگونگی ارتباط رشد ترک‌ها با تغییر پارامترهای ارتعاشی در تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP، به طور تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ۱۰ نمونه تیر دو سر ساده بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP به طول ۲/۳ متر (فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲ متر) طراحی و ساخته شده است. عرض و ارتفاع مقطع تیرها، به ترتیب، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. نمونه‌ها با سه نوع بتن با مقاومت‌های فشاری استوانه‌ای ۲۰، ۳۸ و ۶۴ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. سه نمونه دارای وصله می‌باشند که طول وصله و مقدار میلگرد عرضی در محل وصله بر اساس رابطه ارائه شده توسط Kianoush و Esfahani [۱۲] طراحی شده است. جزئیات دقیق‌تر نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

عنوان نمونه	f'_c (MPa)	میلگردهای کششی (GFRP)	$\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)$	L_d (mm)	خاموت در طول وصله
B-1	۲۰	۲φ۱۰	۱/۶۴	---	---
B-2	۲۰	۲φ۱۶+۱φ۱۰	۵/۴۴	---	---
B-3	۳۸	۲φ۱۰	۰/۸۷	---	---
B-4	۳۸	۲φ۱۶+۱φ۱۰	۲/۸۸	---	---
B-5	۶۴	۲φ۱۰	۰/۵۱	---	---
B-6	۶۴	۲φ۱۶+۱φ۱۰	۱/۷۰	---	---
B-7	۶۴	۳φ۱۶+۱φ۱۰	۲/۴۲	---	---
B-8	۳۸	۲φ۱۰	۰/۸۷	۱۸۰	فاقد خاموت
B-9	۳۸	۲φ۱۶	۲/۴۱	۲۸۰	۵φ۸@۵۵
B-10	۶۴	۲φ۱۰	۰/۵۱	۱۶۰	۷φ۱۲@۲۴

در جدول (۱)، f'_c مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن، L_d طول وصله، ρ_f نسبت میلگرد موجود و ρ_{fb} نسبت میلگرد بالانس می‌باشند. در ρ_{fb} میلگردهای FRP، نسبت میلگردی است که در آن شکست فشاری بتن و پارگی میلگردهای FRP به صورت هم‌زمان رخ دهد.

محدود که در آن مشخصه‌های سازه موجود است و هدف یافتن پاسخ‌هاست، در به هنگام سازی مدل اجزای محدود مشخصه‌های سازه آسیب دیده از روی پاسخ‌های آن به دست می‌آیند. Maeck و همکاران [۳] کاهش سختی خمشی ناشی از ترک خوردگی تیرهای بتن مسلح را با کاهش مدول الاستیسیته شبیه‌سازی کردند. سپس، سختی خمشی تیرهای ترک خورده را به صورت تکراری از کمینه‌سازی تابع هدفی تخمین زدند که شامل چندین ضریب جریمه است که در تفاوت میان شکل مودهای تقریبی عددی و اندازه‌گیری شده ضرب شده‌اند.

Baghiee و همکاران [۴] آزمایش مودال را بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورقه‌های CFRP انجام دادند. در این پژوهش تغییرات فرکانس‌ها و برخی از شاخص‌های خسارت در اثر ایجاد خسارت و همچنین تقویت بررسی شده است. به عبارت دیگر میزان اثر بخشی مقاوم‌سازی از روی تغییرات مشخصه‌های ارتعاشی ارزیابی شده است. آن‌ها در تحقیق دیگری نشان دادند که میانگین افت فرکانس‌های طبیعی در نمونه‌های تقویت شده با ورقه‌های CFRP حدوداً ۴۲ درصد از مقادیر وابسته به نمونه‌های تقویت نشده کمتر است. همچنین، مقاومت نمونه‌های تقویت شده ۴۰ درصد بیشتر از نمونه‌های تقویت نشده بوده است [۵].

Kim و Stubbs [۶، ۷] از رابطه میان تغییرات فرکانس و شکل مودها با انرژی کرنشی مودال استفاده کردند و به معرفی شاخص‌هایی پرداختند تا موقعیت ترک در تیرها را شناسایی کنند. Shih و همکاران [۸] یک روش ترکیبی بر پایه انرژی کرنشی مودال و نرمی مودال را پیشنهاد کردند که توانایی ارزیابی خسارت‌های منفرد و چندتایی را در سازه‌های تیری و صفحه‌ای داشته باشد. Peterson و همکاران [۹] با ایجاد شکاف‌هایی با ابعاد مشخص در تیرهای چوبی، از روی تغییرات انرژی کرنشی مودال خسارت‌ها را شناسایی کردند. Abdel Wahab و De Roeck [۱۰] از تغییرات انحنای مودال به صورت یک شاخص خسارت استفاده کردند تا خسارت‌های پل Z24 را در سوئیس ارزیابی کنند. در تیرهای نامعین، نیروهای داخلی به توزیع سختی بستگی دارند. بنابر این، Goldfeld [۱۱] از یک روش تکراری در یافتن توزیع سختی تیرهای نامعین با استفاده از آزمایش مودال استفاده کرده است. بر اساس این روش، سختی خمشی هر مقطع را می‌توان به صورت تکراری از تقسیم لنگر داخلی تیر در آن مقطع بر انحنای متناظر آن به دست آورد. برای یک جزء تیری، هنگام ترک خوردگی، افزایش نرمی در محل ترک بسیار زیاد و در فاصله‌های دور، بسیار کم می‌باشد.



شکل ۱- دستگاه‌های آزمایش استاتیکی

بنابر این، بعد از هر گام بارگذاری، باربرداری انجام می‌شود و در شرایطی که نمونه توسط فنرهایی به صورت آویزان در آورده شده است، آزمایش مودال صورت می‌گیرد تا مشخصه‌های دینامیکی آزمایشگاهی برداشت شوند. در آزمایش مودال تجربی از چکش ضربه برای اعمال نیروی محرک به سازه و از شتاب‌سنج پیزوالکتریک برای دریافت پاسخ سازه استفاده می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده، ۲۳ درجه آزادی برای تیر بتنی در نظر گرفته شده است (شکل ۳). شتاب‌سنج در درجه آزادی هشتم به صورت ثابت قرار می‌گیرد و تمام درجات آزادی به وسیله چکش ضربه تحریک می‌شوند. سپس، تحریک‌ها و پاسخ‌ها به یک تحلیل گر دو کاناله^۶ منتقل می‌شوند تا نسبت پاسخ به نیروی اعمال شده اندازه‌گیری شود. این نسبت در حوزه فرکانس، به تابع پاسخ فرکانسی (FRF)^۷ موسوم است [۴].

مشخصات دینامیکی سازه علاوه بر خود سازه به شرایط مرزی آن نیز بستگی دارد. پیاده سازی کامل شرایط مرزی آزاد و یا گیردار عملاً ممکن نیست. این شرایط را می‌توان با دقت معقولی در آزمایشگاه به صورت تقریبی پیاده کرد. ایجاد شرایط مرزی گیردار در آزمایشگاه مشکل است ولی شرایط مرزی آزاد با تعلیق سازه از تکیه‌گاه نرم مانند فنر شبیه‌سازی می‌شود. در این حالت یک یا چند مود حرکت جسم صلب نیز تولید می‌شود. اگر فرکانس‌های طبیعی مودهای صلب به اندازه کافی از اولین مود الاستیک سازه کوچک‌تر باشند، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های FRF اندازه‌گیری شده قابل قبول هستند [۱۳]. شکل‌های (۳) و (۴) دستگاه‌های آزمایش مودال و چگونگی ارتباط لوازم سنجش را نشان می‌دهند.

۳- چگونگی آزمایش

در آزمایش‌های صورت گرفته، ابتدا خسارت‌هایی در گام‌های مختلف بارگذاری استاتیکی ایجاد می‌شوند. سپس، در هر مرحله با استفاده از آزمایش مودال، مشخصه‌های ارتعاشی تیر خسارت‌دیده برداشت می‌شوند.

۳-۱- آزمایش استاتیکی

در این آزمایش، تیرهای مسلح شده با GFRP تحت بار استاتیکی چهار نقطه‌ای خمشی بر روی تکیه‌گاه‌های ساده قرار می‌گیرند. بار استاتیکی با هدف ایجاد خسارت بر روی سازه وارد می‌شود. خیز وسط تیر توسط خط‌کش اندازه‌گیری تغییر مکان LVDT^۱ و نیروهای وارده توسط نیروسنج^۲ به دستگاه ثبت داده^۳ منتقل می‌شوند و خیز تجربی تیرهای مسلح شده با GFRP در وسط دهانه برداشت می‌شود. همچنین، در مراحل مختلف بارگذاری مشاهدات ثبت و چگونگی گسترش ترک‌ها ترسیم می‌گردد تا چگونگی شکست تیر مشخص گردد. گام‌های بارگذاری استاتیکی در جدول (۲) نشان داده می‌شوند.

جدول ۲- گام‌های بارگذاری استاتیکی نمونه‌ها

گام‌های بارگذاری استاتیکی	L0	L1	L2	L3	L4	L5
بار استاتیکی (کیلونیوتن)	وزن تیر	۱۰	۲۰	۳۰	۵۰	۷۰

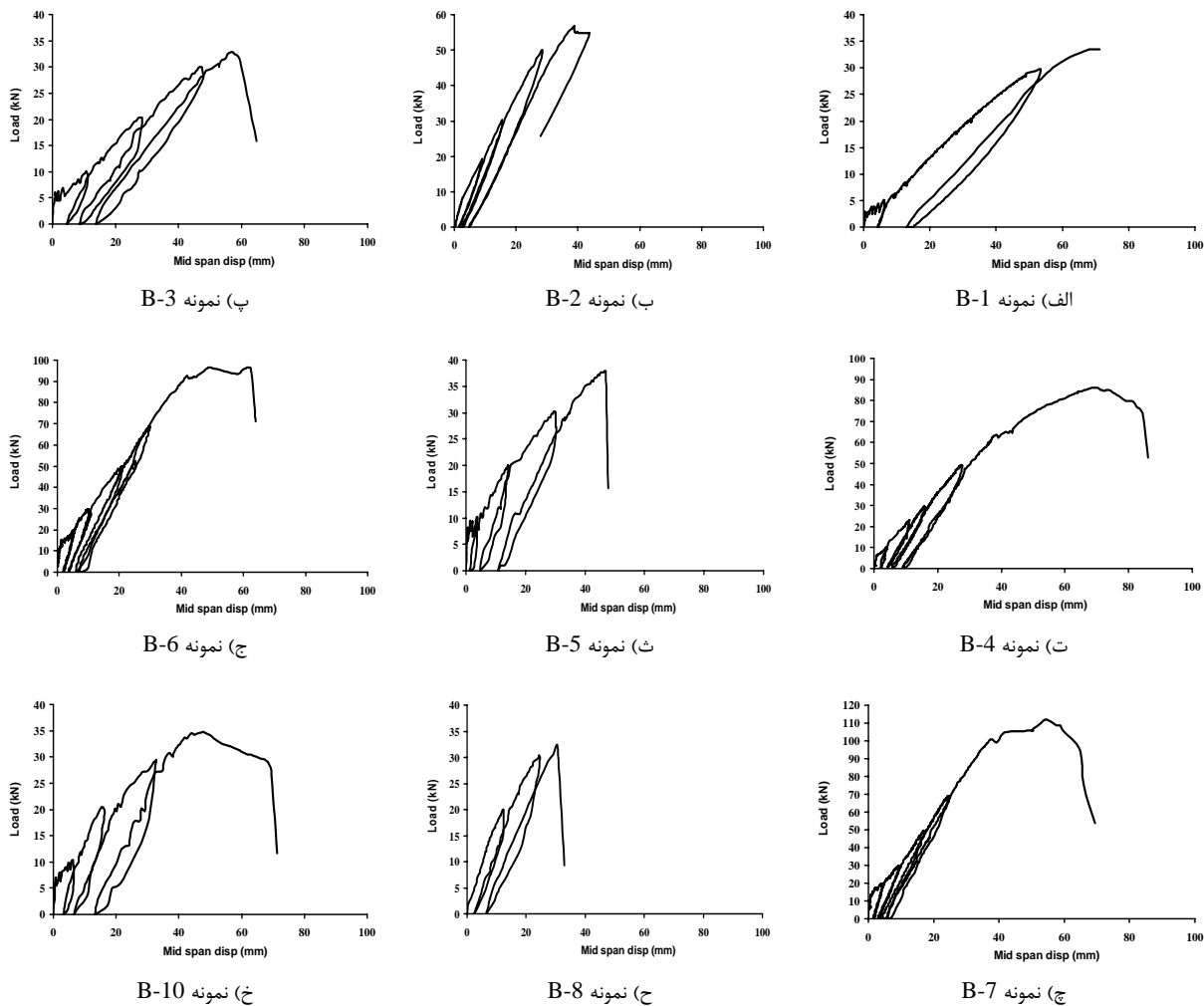
شکل (۱) چگونگی استقرار لوازم سنجش نیرو و تغییر مکان را بر روی تیر نشان می‌دهد. شکل (۲) نیز نمودارهای بار- تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی را در گام‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. در شکل (۲-ب) نمونه B-5 دارای شکست پارگی^۴ می‌گردد و در شکل (۲-ج) نمونه B-8 دارای شکست شکافت^۵ پوشش بتن در محل وصله بوده است که این دو مود شکست از نوع شکست‌های ترد می‌باشند.

۳-۲- آزمایش مودال

این آزمایش در ابتدا بر روی سازه سالم و در بین گام‌های بارگذاری بر روی سازه خسارت دیده، به منظور بررسی رفتار ارتعاشی سازه در حالت‌های مختلف انجام می‌گیرد.

- 1- Linear Variable Displacement Transducer
- 2- Load cell
- 3- Data logger
- 4- Rapture
- 5- Splitting

- 6- Dual channel analyzer
- 7- Frequency response function

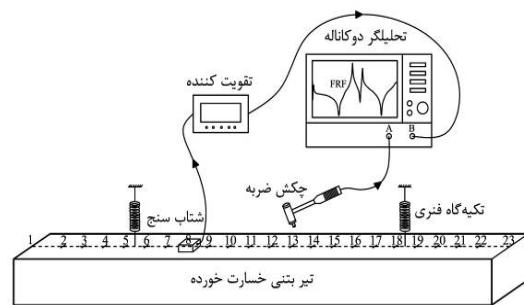


شکل ۲- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها

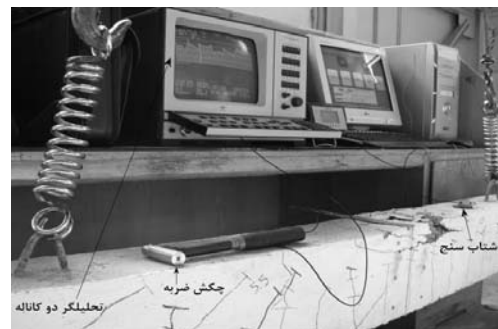
۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- چگونگی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی

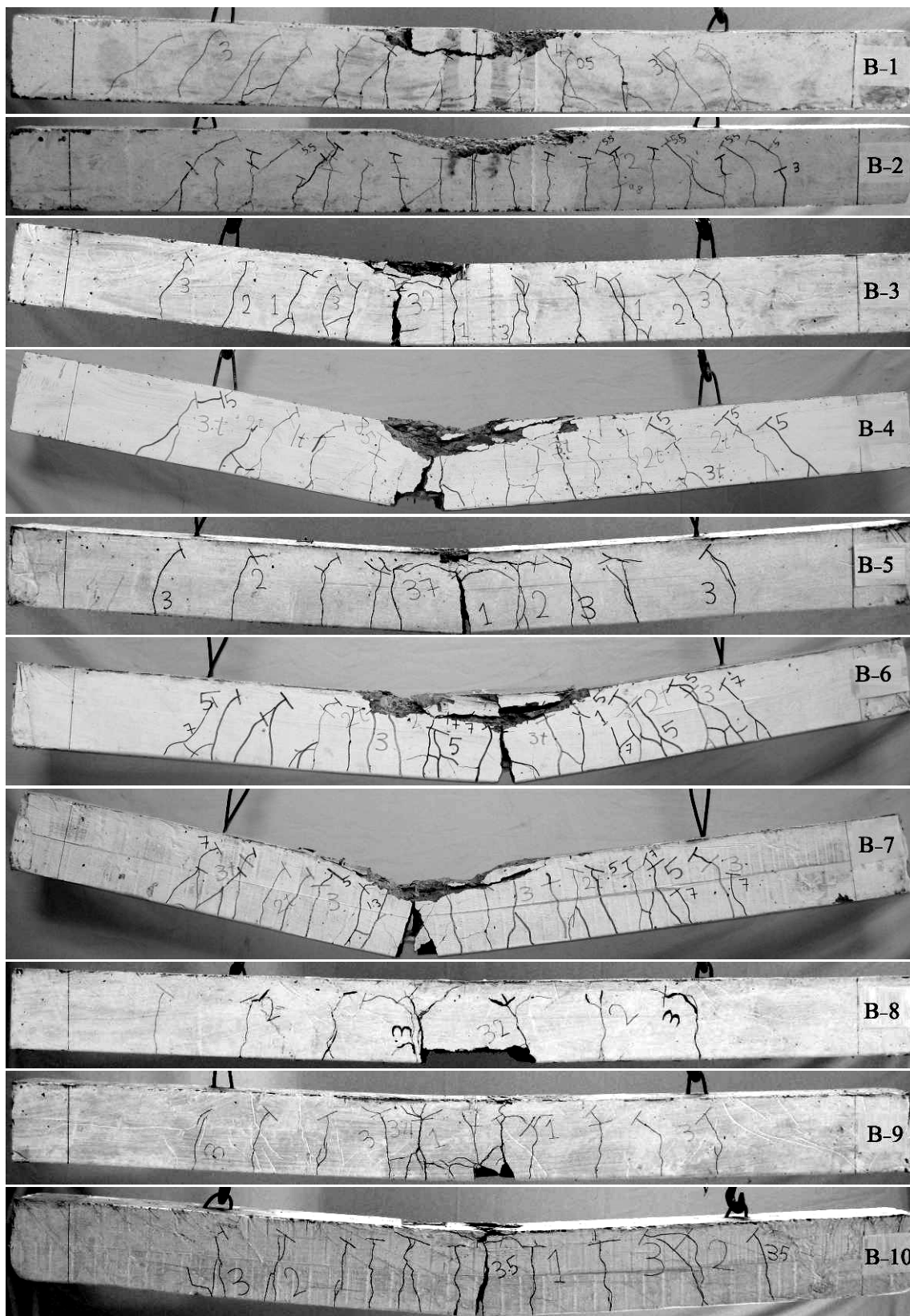
نحوه گسترش ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری و چگونگی شکست نمونه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. در تمام نمونه‌های B-1 تا B-7 (فاقد وصله) به جز نمونه B-5 پس از ایجاد ترک‌های خمشی و گسترش آن‌ها، با خرد شدن بتن در فشار بار افت می‌کند. در نمونه B-5 با گسترش ترک‌های خمشی و افزایش کرنش میلگردها، پارگی مسلح کننده‌ها به طور آبی رخ داده است. این نمونه دارای شکست ترد بوده است. در نمونه B-8 (وصله‌دار) که محل وصله توسط میلگردهای جانبی مهار نشده است، ترک‌های اولیه در دو انتهای وصله ایجاد شده‌اند. با افزایش بارگذاری، مؤلفه تنش تماسی قائم بر میلگردها موجب به روز ترکهایی در راستای میلگرد شده است. با ترکیب پوشش بتن در ناحیه وصله، شکست نهایی انجام و بار به شدت افت کرده است.



شکل ۳- چگونگی انتقال نیرو و پاسخ به تحلیلگر دو کاناله



شکل ۴- دستگاه‌های آزمایش مودال



شکل ۵- چگونگی ترک خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی

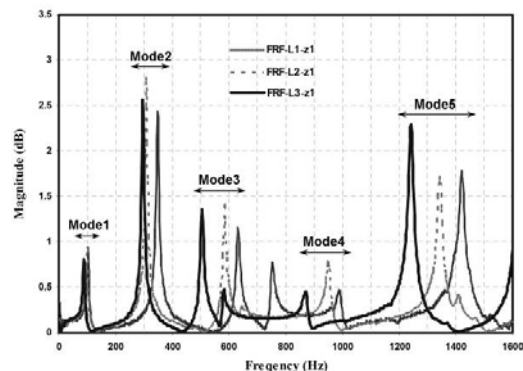
در شکل‌های (۷) و (۸) رابطه بین درصد تغییرات نسبی فرکانس‌های طبیعی سازه با تغییر پارامترهای مختلف نشان داده شده است. شکل (۷) درصد تغییرات مود اول و شکل (۸) درصد تغییرات مودهای بالاتر (مود چهارم) را به عنوان نمونه نمایش می‌دهند. در نمودارهای این شکل با افزایش بارگذاری، تغییرات نسبی فرکانس‌ها افزایش یافته است. عمدتاً بیشترین افت فرکانس در گام بارگذاری L1 ایجاد شده است و در گام‌های L2 و L3 شدت افت فرکانس‌ها کمتر شده است. اگر چه بر اساس شکل (۶)، از لحاظ عددی مودهای بالاتر تغییرات بیشتری را در گام‌های خسارت نشان می‌دهند. ولی با مقایسه شکل‌های (۷) و (۸)، فرکانس مود یکم نسبت به مود چهارم درصد تغییرات نسبی بیشتری را در گام‌های مختلف خسارت نشان می‌دهد. بنابراین، در مواردی که محدودیت اندازه‌گیری فرکانس مودهای بالاتر وجود دارد، بهتر است در بررسی خسارت از شاخص‌هایی استفاده شود که بر اساس تغییرات نسبی فرکانس‌ها بنا شده‌اند.

از مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه‌های B-8 و B-10 در شکل (۷) مشاهده می‌شود که مود شکست احتمالی نیز در میزان افت فرکانس‌ها مؤثر است. نمونه B-8 با مود شکست شکافت پوشش بتن در ناحیه وصله دارای افت فرکانس کمتری در مقایسه با نمونه B-10 با مود شکست بیرون‌کشیدگی میلگرد می‌باشد. از مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه‌های B-1، B-3 و B-5 در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت بتن، افت فرکانس‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، این شکل نشان می‌دهد که بیشترین شدت ترک‌خوردگی و افت فرکانس‌ها مربوط به نمونه B-10 می‌باشد. از مقایسه نمونه‌های B-1 و B-2 در شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت میلگرد، افت فرکانس‌ها کاهش می‌یابد چون شدت ترک‌خوردگی کمتر شده است. نمودارهای مربوط به نمونه‌های B-2، B-4 و B-6 در شکل (۸) نیز نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت بتن، ترک‌های کمتری در گام بارگذاری یکسان شکل می‌گیرد و به دنبال آن افت فرکانس‌ها کمتر خواهد شد.

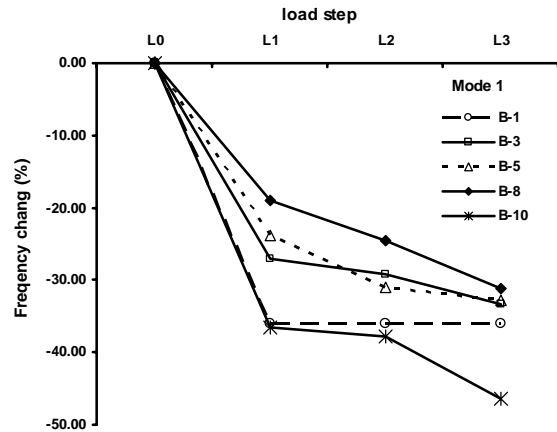
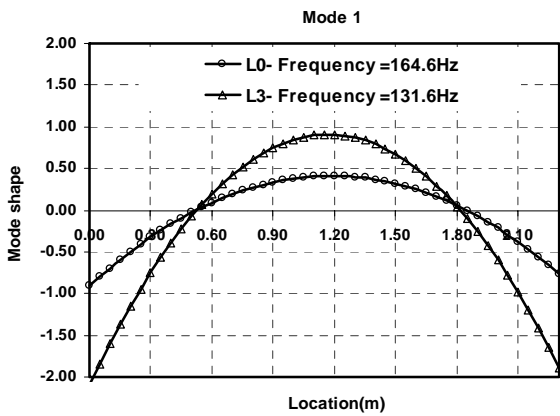
در نمونه‌های B-9 و B-10 که بر اساس رابطه Esfahani و Kianoush [۱۲] میلگرد عرضی در طول وصله قرار داده شده است، اولین ترک‌ها از محل انتهای وصله ایجاد می‌شوند. در این نمونه‌ها به خاطر وجود میلگردهای عرضی، ترک‌ها به صورت کاملاً تدریجی پخش می‌شوند به گونه‌ای که نمونه B-10 با میلگرد عرضی زیاد و مقاومت بالای بتن، بیشترین پخش ترک را در بین تمام نمونه‌ها تا گام بارگذاری ۳۰ کیلونیوتن داشته است. در نمونه B-10، لغزش میلگرد با باز شدن یکی از ترک‌های انتهای وصله به صورت تدریجی انجام و پس از شکست ناشی از بیرون‌کشیدگی میلگرد^۱ بار به صورت تدریجی افت می‌کند. شکست نمونه‌های B-9 و B-10 به صورت نرم و تدریجی اتفاق افتاده است و منشا آن لغزش میلگرد بوده است.

۴-۲- تغییرات پارامترهای ارتعاشی

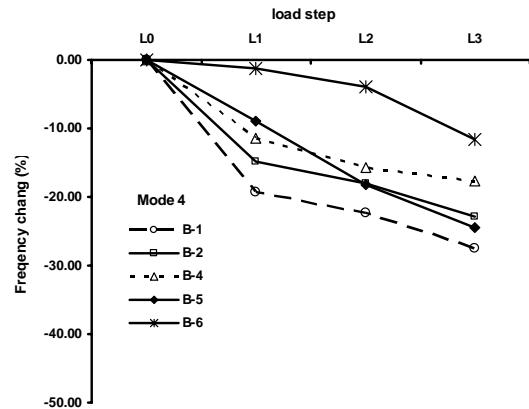
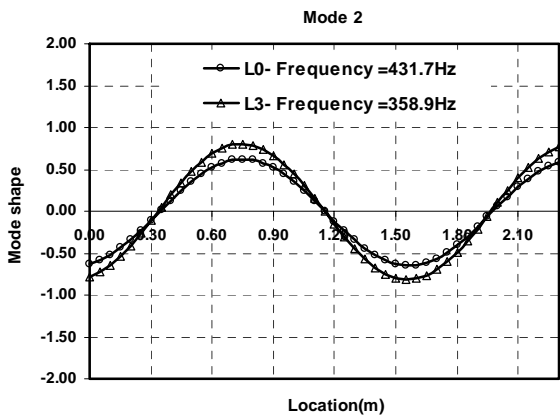
برای تعیین فرکانس‌ها و مودهای ارتعاشی تجربی سازه از نمودار دامنه مقادیر FRF بر حسب فرکانس استفاده می‌شود. در این نمودار، فرکانس مربوط به قله‌های شدید، بسامدهای طبیعی سازه‌اند. اما هر قله‌ای در نمودار FRF لزوماً نمایانگر یک مود نمی‌باشد. در شکل (۶)، نمودارهای FRF برای سه مرحله بارگذاری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلونیوتن در سطوح مختلف ترک‌خوردگی تیر B-10 آورده شده‌اند. در شکل (۶) درجه آزادی یکم توسط چکش ضربه تحریک شده است. فرکانس‌های طبیعی سازه را می‌توان از روی یکی از نمودارهای FRF و با تحریک یکی از درجات آزادی پیدا کرد در حالی که برای استخراج شکل‌های مود باید تمام درجات آزادی سازه تحریک شوند. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش بارگذاری و شدیدتر شدن خسارت‌ها، قله‌های نمودار به سمت عقب حرکت کرده و فرکانس‌های طبیعی سازه کاهش می‌یابند.



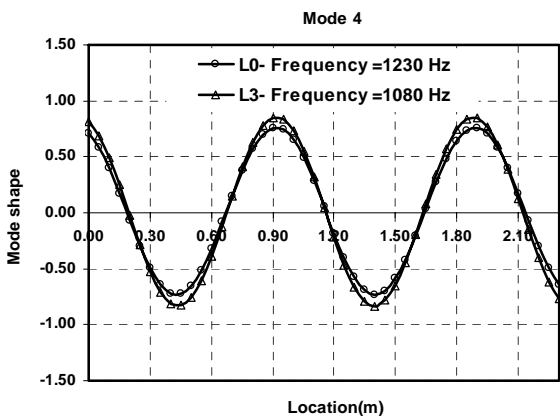
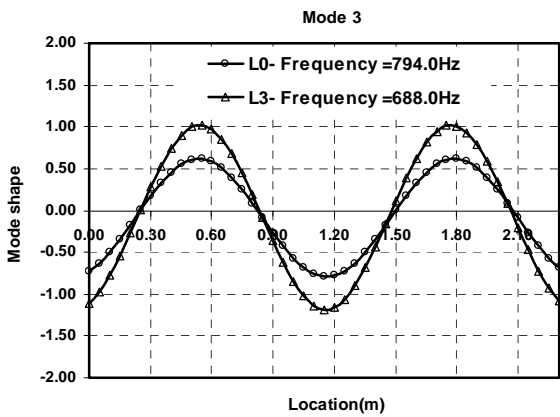
شکل ۶- منحنی‌های FRF درجه آزادی یکم نمونه B-10



شکل ۷- مقایسه تغییرات فرکانس مود یکم در نمونه‌های دارای میلگرد طولی یکسان



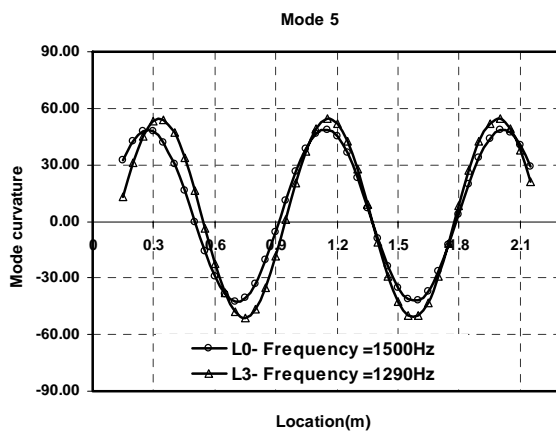
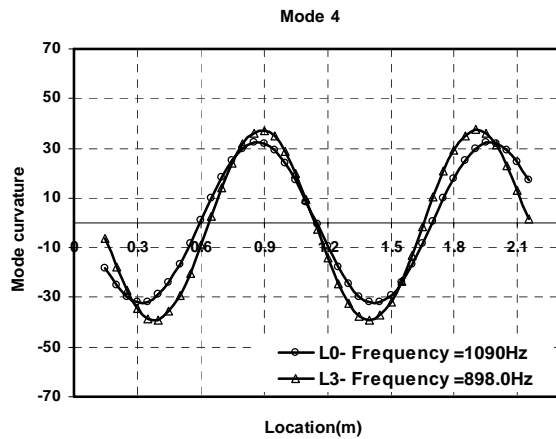
شکل ۸- تغییرات فرکانس مود چهارم در نمونه‌های بدون وصله و دارای نسبت میلگرد طولی و مقاومت بتن متغیر



شکل ۹- شکل‌های مود نمونه سالم و خسارت خورده B-7

هنگامی که تیر دچار خسارت می‌شود، شکل مودهای آن نیز تغییر می‌کند. شکل (۹) تغییرات شکل مودهای یکم تا چهارم نمونه B-7 را در حالت سالم (گام L0) و خسارت خورده (گام بارگذاری L3) نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که وقتی در یک تیر تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای خسارت ایجاد شود، تغییرات در شکل مودهای فرد بیشتر خواهد بود. بر اساس شکل (۹) مشاهده می‌شود که پس از ایجاد خسارت، شیب شکل مودها بیشتر می‌شود.

در ادامه، با به کارگیری درایه‌های بردار شکل هر مود، انحنای آن مود حساب می‌شود. این کار با استفاده از روش تفاوت‌های محدود قابل انجام است. اما دقت این روش با توجه به محدودیت درجات آزادی قابل سنجش، کم است. بنابر این، برای نرم کردن نمودارها از درون‌یابی با نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.



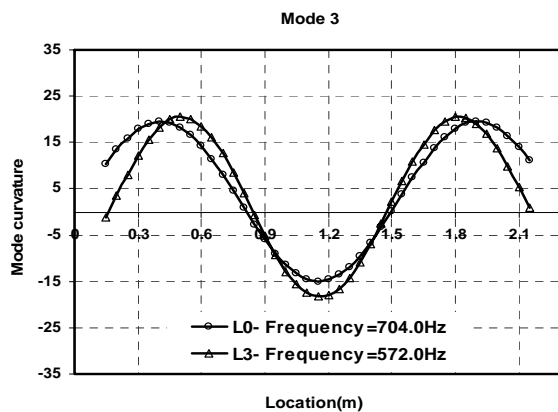
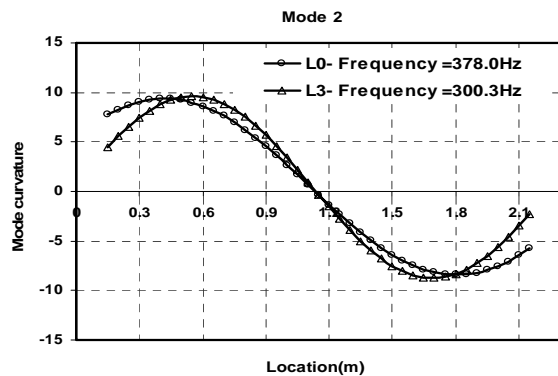
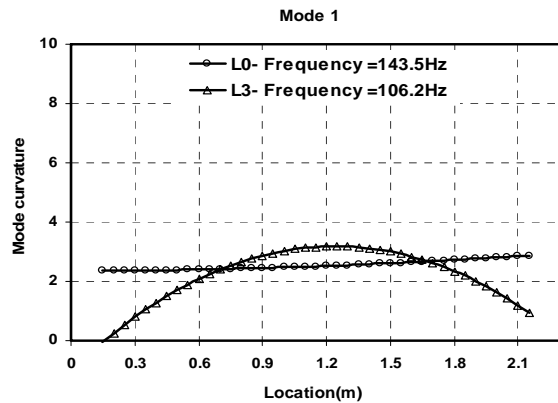
شکل ۱۰- انحنای مودهای یکم تا پنجم نمونه سالم و خسارت خورده B-9

هنگامی که خسارت در سازه ایجاد می‌گردد، مقداری از انرژی کرنشی به خاطر ترک‌خوردگی آزاد می‌شود. بنابراین، خسارت با انرژی کرنشی مرتبط است. در تیر اولر-برنولی که از تغییر شکل‌های برشی چشم‌پوشی می‌شود، رابطه میان انرژی کرنشی مودال و انحنای شکل مودها به صورت زیر است:

$$w_i = \int_0^L \frac{1}{2} EI \{\phi_i''(x)\}^2 dx \quad (1)$$

در این رابطه، $\phi_i''(x)$ انحنای مود i ام، EI سفتی خمشی و w_i انرژی کرنشی مودال نام می‌باشد. Stubbs و Kim [۶] از ارتباط بین انحنای مودال و تغییرات انرژی کرنشی مودال استفاده کردند و شاخص خسارتی بر مبنای انحنای مودال ارائه نمودند. در این شاخص از انحنای شکل‌های مودی پیش از خسارت و پس از آن استفاده شده است.

شکل (۱۰) انحنای پنج مود اول نمونه B-9 را در حالت سالم (گام L0) و خسارت خورده (گام بارگذاری L3) نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها، مقدار انحنای مودال پس از ایجاد خسارت در ناحیه‌های ترک خورده افزایش می‌یابد. همچنین، با ایجاد خسارت، شیب منحنی‌های انحنای مود نیز افزایش می‌یابد.

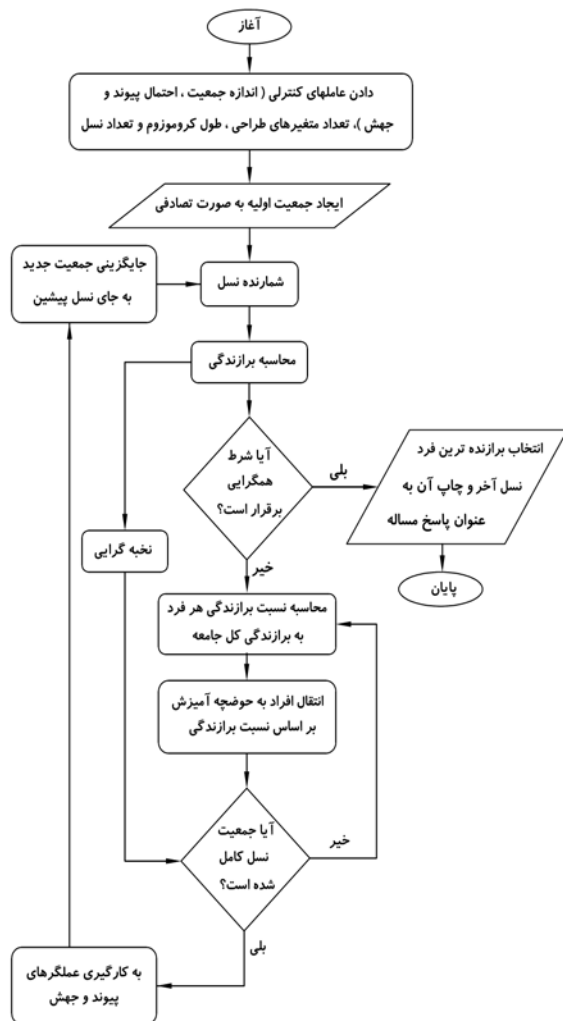


۵- به هنگام سازی مدل اجزای محدود

به هنگام سازی مدل اجزای محدود وارون فرایند تحلیل سازه‌ها می‌باشد. در تحلیل سازه با داشتن مدل اجزای محدود، پاسخ‌های سازه به دست می‌آیند؛ ولی در به هنگام سازی مدل اجزای محدود، از روی پاسخ‌های سازه، سختی سیستم سازه‌ای در وضعیت موجود به دست می‌آید. فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها از مهم‌ترین خصوصیات دینامیکی ذاتی سازه می‌باشند. با استفاده از این پارامترها می‌توان وضعیت خسارت را در سازه ارزیابی کرد.

با ایجاد خسارت در سازه سختی کاهش و به دنبال آن فرکانس‌ها، شکل مودها و انحنای آن‌ها دچار تغییر می‌شوند. شکل مودها نسبت به فرکانس‌های طبیعی، مشخصات بیشتری از سازه را در اختیار می‌گذارد. ولی حساسیت شکل مود به خسارت‌های محلی ناچیز است و به طبیعت سازه نیز بستگی دارد. به عنوان مثال، در یک خرابای بزرگ، آسیب‌های محلی سبب تغییرات زیادی در شکل مودها می‌گردند. با وجود این، در یک تیر ترک خورده، تغییرات شکل مود ناشی از خسارت‌های محلی ناچیز می‌باشد. از طرف دیگر، اگر سختی همه اعضا به یک نسبت افزایش یا کاهش یابد، هیچ تغییری در شکل مودها ایجاد نمی‌شود؛ ولی فرکانس‌ها به یک نسبت معلوم تغییر می‌کنند. بر این اساس، بهتر است تابع هدف ترکیبی از شکل مودها و فرکانس‌ها باشد. بدین منظور باید خطای بین مقادیر فرکانس‌ها و شکل‌های مود به دست آمده از مدل اجزای محدود نسبت به مقادیر آزمایشگاهی کمینه شود. تابع هدف بهینه‌سازی با رابطه (۲) معرفی می‌شود.

شده است. نمودار جریان بهینه‌یابی رابطه (۲) با الگوریتم ژنتیک در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار جریان بهینه‌یابی با الگوریتم ژنتیک

برای بررسی درستی برنامه، با جایگزینی پارامترهای ارتعاشی گام بارگذاری L0 در برنامه کامپیوتری، مدل اجزای محدود تیر سالم تخمین زده می‌شود. به عنوان مثال، تحلیل انجام شده بر روی نمونه سالم B-3 در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. شکل (۱۲) تغییرات مقدار شایستگی^۱ را در نسل‌های (تکرارهای) مختلف الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. به عبارت دیگر این شکل روند همگرایی مسأله را به تصویر کشیده است. هرچه تفاوت بین مقادیر تجربی و مقادیر تحلیلی در برنامه الگوریتم ژنتیک کمتر شود، شایستگی بیشتر خواهد شد. شکل (۱۳) نیز توزیع ممان اینرسی نمونه سالم B-3 را که بر اساس برنامه الگوریتم ژنتیک تخمین زده شده است، نشان می‌دهد. بر

$$e = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |X_{aij} - X_{mij}| + 10 \times \sum_{j=1}^m \left| \frac{\omega_{mj} - \omega_{aj}}{\omega_{mj}} \right| \quad (2)$$

در این رابطه، ω_j فرکانس طبیعی مود j ام، n تعداد درجات آزادی و m تعداد مودهای اندازه‌گیری شده می‌باشد. شکل X_{ij} مود i در مود j ام است. زیرنویس‌های a و m به ترتیب، شکل مود تحلیلی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. در این تابع هدف، جمله دوم تفاوت نسبی فرکانس‌ها را نشان می‌دهد که تأثیر آن در مودهای پایین، بیشتر است. با توجه به پیچیده بودن فضای جستجو، از روش تصادفی الگوریتم ژنتیک برای حل این مسأله نامقید بهینه‌سازی استفاده می‌شود. برنامه بهینه‌سازی این مسأله در نرم‌افزار مطلب MATLAB نوشته

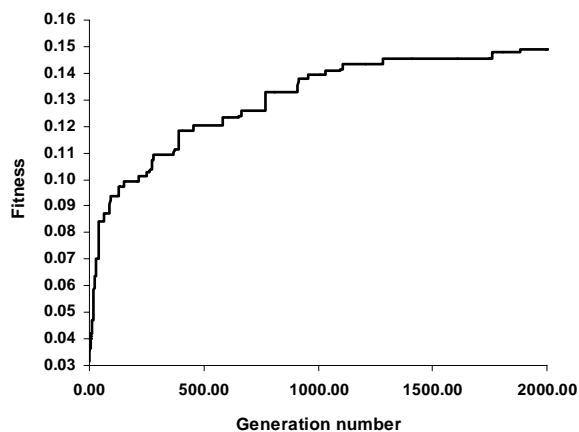
شکل (۵) نتیجه می‌شود که توزیع ممان اینرسی به دست آمده توسط برنامه با وضعیت ترک خوردگی تیر در همان گام بارگذاری هم‌خوانی دارد.

متوسط مقادیر ممان اینرسی تخمین زده شده در طول تیر برای گام بارگذاری L3 در جدول (۳) درج شده‌اند. مقادیر جدول (۳) نشان می‌دهند که در این گام بارگذاری (L3)، تیر B-1 با کمترین مقدار میلگرد طولی و مقاومت بتن بیشترین مقدار ترک خوردگی و تیر B-7 با بیشترین مقدار میلگرد طولی و مقاومت بتن کمترین میزان ترک خوردگی (بیشترین ممان اینرسی) را دارد.

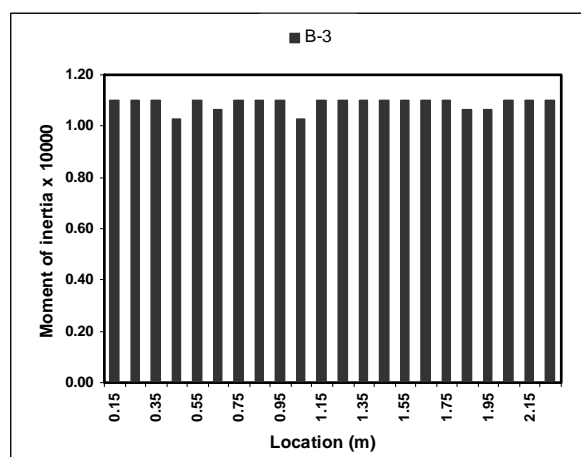
جدول ۳- متوسط ممان اینرسی تخمین زده شده (m⁴)

عنوان نمونه	متوسط ممان اینرسی تخمین زده شده (m ⁴) در گام بارگذاری L3
B-1	0.69×10^{-4}
B-2	0.79×10^{-4}
B-3	0.75×10^{-4}
B-4	0.80×10^{-4}
B-5	0.77×10^{-4}
B-6	0.88×10^{-4}
B-7	0.91×10^{-4}
B-8	0.78×10^{-4}
B-9	0.81×10^{-4}
B-10	0.69×10^{-4}

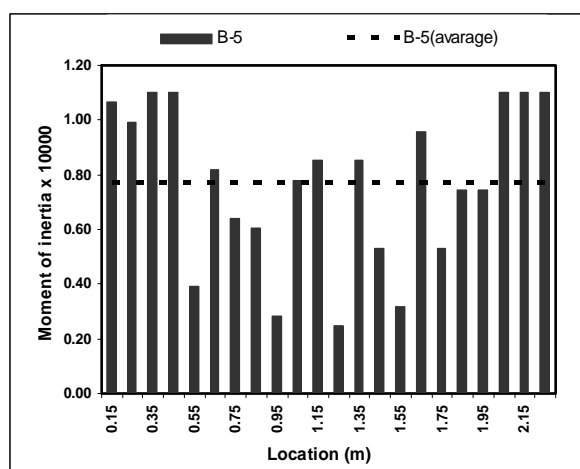
اساس این شکل، مقادیر تخمین زده شده توسط برنامه همان مقادیر ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته ترک نخورده می‌باشند.



شکل ۱۲- آزمون انجام شده برای تیر سالم B-3



شکل ۱۳- توزیع ممان اینرسی در طول تیر سالم B-3

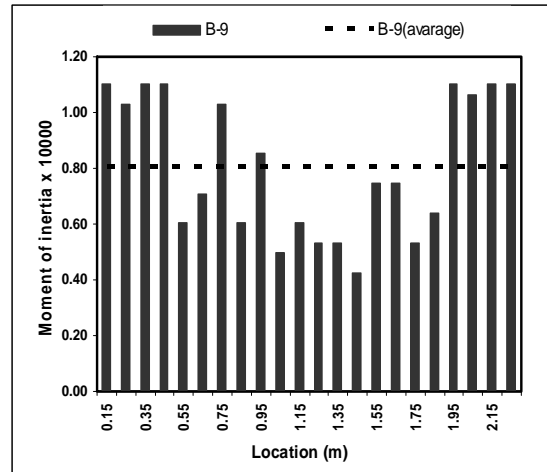


شکل ۱۴- توزیع ممان اینرسی برای تیر B-5 در گام بارگذاری

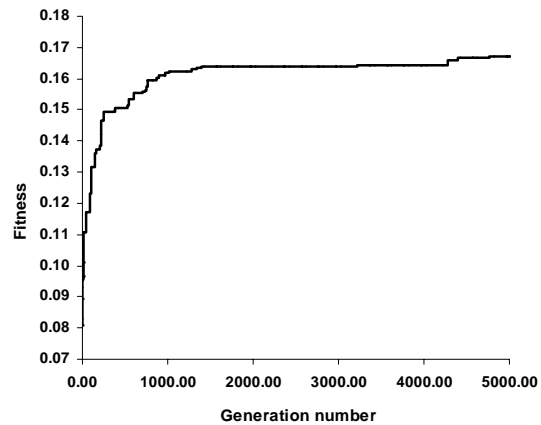
L3

پس از اطمینان از درستی برنامه، آزمون‌هایی بر روی نمونه‌های خسارت دیده در گام‌های مختلف بارگذاری انجام می‌شود تا توزیع سختی در طول این نمونه‌ها تخمین زده شود. آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهند که تعداد ۵۰۰۰ نسل (تکرار) و اندازه جمعیت ۱۰۰ برای همگرایی مسئله در الگوریتم ژنتیک، کفایت می‌کند. شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) توزیع ممان اینرسی تخمین زده شده و روند همگرایی را در تیرهای B-5 و B-9 نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۱۶) و (۱۷) مشاهده می‌شود که پس از نسل ۲۰۰۰ تغییرات مقدار شایستگی ناچیز می‌شود و برنامه به یک همگرایی نسبی رسیده است. از مقایسه ممان اینرسی‌های به دست آمده توسط برنامه در گام‌های مختلف بارگذاری با وضعیت ترک خوردگی نشان داده شده در

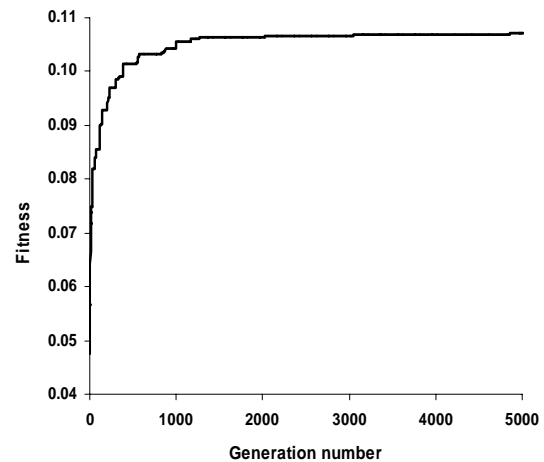
شکل‌های (۱۸) تا (۲۲) مقادیر ممان اینرسی تخمین زده شده را در نمونه‌های مختلف مقایسه می‌کنند. شکل (۱۸) تا (۲۰) مقادیر ممان اینرسی را در نمونه‌هایی مقایسه می‌کنند که مقاومت بتن یکسان و میلگردگذاری متفاوتی داشته‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که مقدار ممان اینرسی برای نمونه‌های با نسبت میلگرد طولی بالاتر، بیشتر به دست آمده است. به عبارت دیگر شدت ترک‌خوردگی‌ها کمتر بوده است. شکل (۲۱) مقدار ممان اینرسی را در نمونه‌های B-1 و B-7 مقایسه می‌کند. این نمونه‌ها کمترین و بیشترین شدت ترک‌خوردگی‌ها را داشته‌اند. شکل (۲۲) نیز نشان می‌دهد که علی‌رغم مقاومت بتن بالاتر نمونه B-10، شدت ترک‌خوردگی‌ها در این نمونه وصله‌دار بیشتر بوده است. استفاده از میلگرد عرضی در طول وصله باعث تغییر مود شکست از شکافت پوشش بتن در نمونه B-8 به بیرون‌کشیدگی میلگرد طولی در نمونه B-10 شده است. بیرون‌کشیدگی تدریجی میلگردهای طولی سبب ایجاد ترک‌های کنترل شده می‌شود که این موضوع به افت شدید فرکانس‌ها منجر می‌شود. با توجه به افت شدید فرکانس‌ها، برنامه نیز مقادیر ممان اینرسی کمی را برای نمونه B-10 تخمین می‌زند.



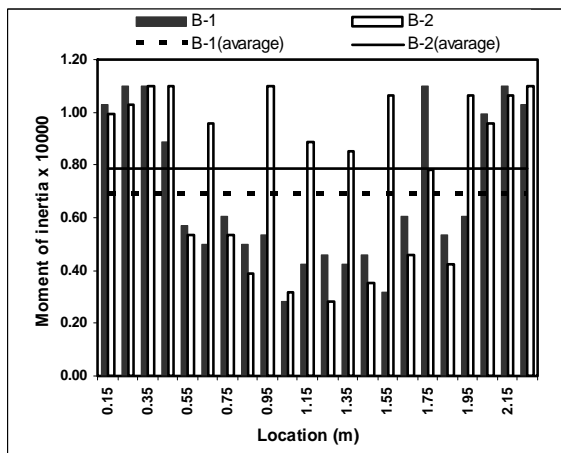
شکل ۱۵- توزیع ممان اینرسی برای تیر B-9 در گام بارگذاری L3



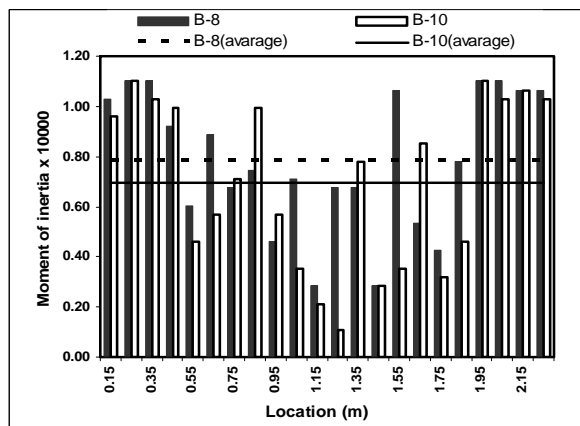
شکل ۱۶- آزمون انجام شده برای تیر B-5 در گام بارگذاری L3



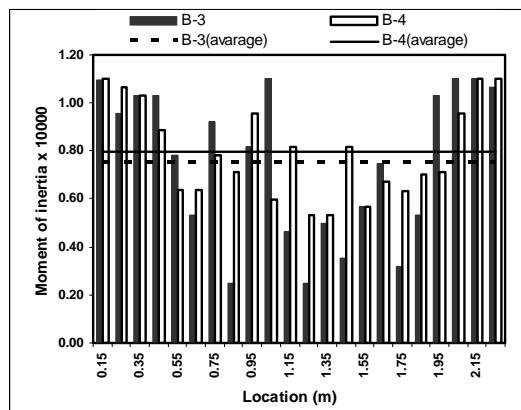
شکل ۱۷- آزمون انجام شده برای تیر B-9 در گام بارگذاری L3



شکل ۱۸- مقایسه ممان اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B-1 و B-2 در گام بارگذاری L3



شکل ۲۲- مقایسه ممان اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B-10 و B-8 در گام بارگذاری L3



شکل ۱۹- مقایسه ممان اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B-4 و B-3 در گام بارگذاری L3

۶- نتیجه گیری

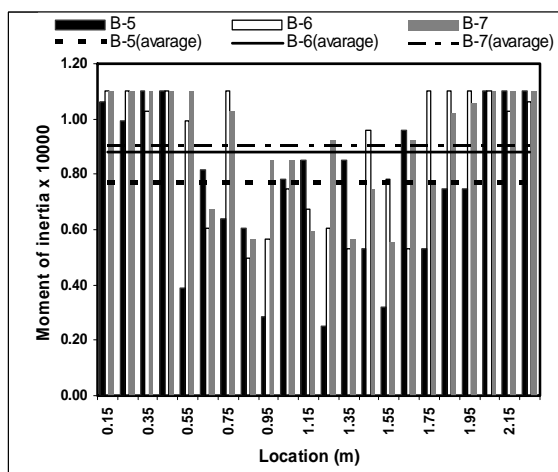
این تحقیق با هدف بررسی تغییرات پارامترهای ارتعاشی در فرایند ترک خوردگی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP انجام شده است. همچنین، با استفاده از داده‌های تجربی مودال و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک، مدل اجزای محدود تیرها پس از خسارت، به هنگام شده و توزیع ممان اینرسی در طول تیر خسارت خورده به دست آمده است. بدین منظور ۱۰ نمونه تیر تحت آزمایش استاتیکی و مودال قرار گرفته‌اند. از تحلیل و بررسی داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده با برنامه الگوریتم ژنتیک نتایج زیر به دست آمده‌اند.

۱- از مقایسه مقادیر ممان اینرسی تخمین زده شده توسط الگوریتم ژنتیک با وضعیت ترک خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که برنامه مذکور با دقت خوبی توزیع سختی را پس از ایجاد خسارت پیش‌بینی می‌کند.

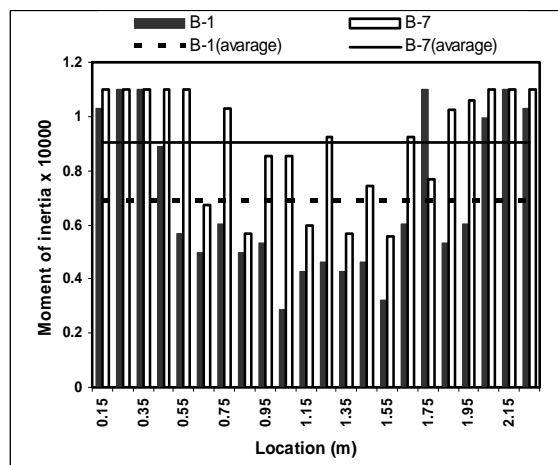
۲- برنامه مقدار ممان اینرسی را در نمونه‌های با مقاومت بتن و نسبت میلگرد طولی کم، کمتر از مقادیر مربوط به نمونه‌های با مقاومت بتن بالا و پرمیلگرد تخمین می‌زند. این نتایج نشان می‌دهند که روند به هنگام سازی سختی منطقی است.

۳- نتایج آزمایش مودال تیرهای مسلح شده با میلگرد GFRP نشان می‌دهند که در نمونه‌های با مود شکست بیرون کشیدگی میلگرد، میزان افت فرکانس‌ها و پخش ترک‌ها نسبت به نمونه‌های با مود شکست شکافت پوشش بتن شدیدتر است.

۴- درگام‌های بارگذاری، فرکانس مودهای بالاتر از لحاظ عددی نسبت به مودهای پایین‌تر افت بیشتری می‌کنند. در حالی که تغییرات نسبی فرکانس مودهای پایین بیشتر از مودهای بالا



شکل ۲۰- مقایسه ممان اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B-5 تا B-7 در گام بارگذاری L3



شکل ۲۱- مقایسه ممان اینرسی تخمین زده شده برای تیرهای B-7 و B-1 در گام بارگذاری L3

علم و صنعت ایران- ویژه‌نامه مهندسی عمران، ۱۳۸۷،
۱۹ (۸-۲)، ۹۹-۱۱۲.

- [6] Kim, J. T., Stubbs, N., "Nondestructive Crack Detection Model and Vibration-Based System Identification in Structures", the 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, US, 2000.
- [7] Kim, J. T., Stubbs, N., "Crack Detection in Beam-Type Structures Using Frequency Data", Journal of Sound and Vibration, 2003, 259 (1), 145-160.
- [8] Shih, H. W., Thambiratnam, D. P., Chan, T. H. T., "Vibration Based Structural Damage Detection in Flexural Members Using Multi-Criteria Approach", Journal of Sound and Vibration, 2009, 323, 645-661.
- [9] Peterson, S. T. et al., "Application of Dynamic System Identification to Timber Beams", ASCE, Journal of Structural Engineering, 2001, 127 (4), 418-425.
- [10] Abdel Wahab, M., De Roeck, G., "Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario", Journal of Sound and Vibration, 1999, 226 (2), 217-235.
- [11] Goldfeld, Y., "Identification of the Stiffness Distribution in Statically Indeterminate Beams", Journal of Sound and Vibration, 2007, 304, 918-931.
- [12] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., "Development / Splice Length of Reinforcing Bars", ACI Structural Journal, 2005, 102 (1), 22-30.
- [13] Agilent Technologies, "The Fundamentals of Modal Testing", Application Note 243-3, US, 56 pp, 2000.

می‌باشد. بنابر این، بهتر است که تابع هدف برحسب تفاوت نسبی فرکانس‌ها نوشته شود.

۵- افزایش سطح بارگذاری نسبت به بار نهایی، موجب افزایش ترک‌ها و کاهش سختی سازه می‌گردد. این کاهش سختی بر روی فرکانس‌ها، شکل‌های مود و انحنای مودها تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سطح بارگذاری، فرکانس‌های طبیعی سازه کاهش و انحنای شکل‌های مود افزایش داشته است.

۷- مراجع

- [1] Cawley, P., Adams, R. D., "The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies", Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14, 49-57.
- [2] Maeck, J., De Roeck, G., "Dynamic Bending and Torsion Stiffness Derivation from Modal Curvatures and Torsion Rates", Journal of Sound and Vibration, 1999, 225 (1), 153-170.
- [3] Maeck, J., Abdel Wahab, M., Peeters, B., De Roeck, G., De Visscher, J., De Wilde, W. P., Ndambi, J. M., Vantomme, J., "Damage Identification in Reinforced Concrete Structures by Dynamic Stiffness Determination", Engineering Structures, 2000, 22, 1339-1349.
- [4] Baghiee, N., Esfahani, M. R., Moslem, K., "Studies on Damage and FRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Vibration Monitoring", Engineering Structures, 2009, 31 (4), 875-893.
- [۵] بقیعی، ن.، اصفهانی، م. ر.، و مسلم، ک.، "ارزیابی رفتار تیرهای بتنی تقویت شده با کمک پردازش داده‌های مودال تجربی"، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه

EXTENDED ABSTRACT

Finite Element Model Updating of Damaged Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Using Modal Test Data

Seyed Roohollah Mousavi ^{a,*}, Mohammad Reza Esfahani ^b, Mehrollah Rakhshani Mehr ^c, Seyed Hojjatollah Mousavi^d, Benyamin Ghorbanzadeh ^a

^a *Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran*

^b *Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*

^c *Department of Civil Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran*

^d *Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran*

Received: 29 August 2014 ; **Accepted:** 13 April 2014

Keywords:

Modal test, Genetic algorithm, Modal curvature, Optimization, Mode shapes, Frequency, GFRP bars.

1. Introduction

Damage in reinforced concrete beams causes a reduction in stiffness. Since the elastic modulus of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars is lower than that of steel bars, concrete beams reinforced with GFRP bars have a lower stiffness after cracking. The finite element model should be updated for analyzing the structure after being damaged. Experimental dynamic measurement can be used for damage assessment of structures. Flexural stiffness reduction due to cracking of reinforced concrete beams is simulated by reducing the elastic modulus [1]. This paper presents a practical and user-friendly damage identification technique for estimating the stiffness of FRP reinforced concrete beams using the genetic algorithm and vibration test results. The identification is based on the finite element model updating involving an optimization process in which the objective function is defined as the difference between the analytical and corresponding experimental modal data.

2. Methodology

2.1. Experimental study

A total of 10 RC beam specimens with the length of 2.3 m (the distance between two supports was 2 m) strengthened with GFRP bars, were manufactured. Width and height of the beam cross section were 150 mm and 200 mm, respectively. Three concrete mixtures with cylindrical compressive strength of 20, 38 and 64 MPa were used in this study. Three specimens had lap-spliced bars. Splice length and the amount of transverse reinforcement in splice zone had been designed based on the equation represented by Esfahani and Kianoush [2].

2.1.1. Static test

Static load on beams was applied to cause damage. Beam deflections at the mid-span point and the forces were measured by a Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) and a Load Cell, respectively (Fig. 1).

* Corresponding Author

E-mail addresses: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir (S. Roohollah Mousavi), esfahani@um.ac.ir (M. R. Esfahani), Rakhsh_77@yahoo.com (M. Rakhshanimehr), h.mousavi@uoz.ac.ir (S. H. Mousavi), benyamin1989@gmail.com (B. Ghorbanzadeh)

2.1.2. Modal test

Each test was carried out, first on the undamaged beam and then between loading steps on the damaged beam, in order to investigate the vibration behavior of the beam in different states. Each beam was assigned by 23 degrees of freedom. All degrees of freedom were excited by an impact hammer. Afterwards, excitations and responses were transmitted to a dual channel analyzer to determine the ratio of response to the applied force (Fig.2). This ratio in the frequency domain is called the Frequency Response Function (FRF) [3].

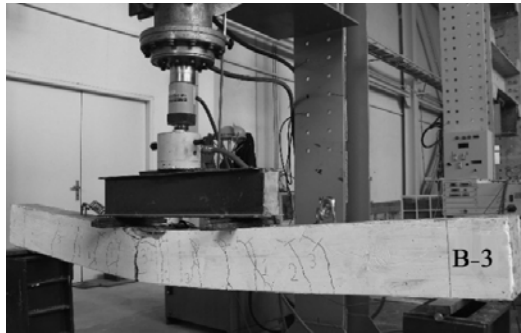


Fig. 1. Static test apparatus

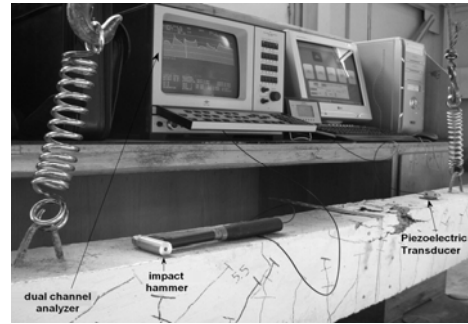


Fig. 2. Modal test setup

2.2. Finite element model updating

The stiffness of beams decreases due to damage at each load step. Subsequently, frequencies, the shape of modes and their curvatures alter. Compared to the natural frequencies, the shape of the modes provides more structural specifications. However, the mode shape sensitivity to local damage depends on the nature of the structure. On the other hand, if the stiffness of all members increases or decreases with the same ratio, no change will occur in mode shapes. However, frequencies will be changed. Accordingly, the optimization objective function is introduced by the following equation:

$$e = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |X_{aj} - X_{mij}| + 10 \times \sum_{j=1}^m \left| \frac{\omega_{mj} - \omega_{aj}}{\omega_{mj}} \right| \quad (1)$$

In Eq. (1), n is the degree of freedom, m is the number of experimental mode shapes, ω_j is the j th natural frequency, X_{ij} is contribution of the i th degree of freedom to the j th mode shape. Two indices a and m indicate analytical and experimental modal data, respectively

3. Results and discussion

In Fig. 3, it is observed that with increasing load and more severe damage, the peak of the FRF curve takes place in lower frequency and the structural natural frequencies decrease. In Fig. 4, with increasing in load level, relative variations of frequency are raised. The greatest loss in frequency is caused mainly by the load step L1 and the intensity of frequency drops is reduced in L2 and L3 steps.

Variation of the modal curvature has been used as a damage index [4]. According to Fig.5, it is illustrated that after damage, the slope of mode shapes grows.

Fig.6 compares the values of moment of inertia predicted by the genetic algorithm in specimens B-1 and B-7. Specimen B-1 with concrete compressive strength of 20 MPa reinforced with two 10 mm diameter GFRP tension reinforcement has degradation in the moment of inertia far greater than specimen B-7 with concrete strength of 64 MPa and three GFRP bars with a diameter of 16 mm and one 10 mm.

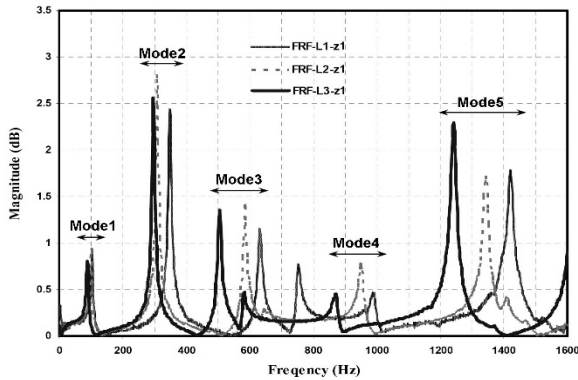


Fig. 3. FRF curves of the first degree of freedom related to Specimen B-10

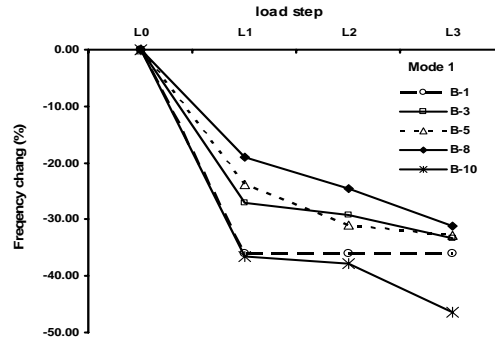


Fig. 4. Comparison in variation of the first mode frequency in specimens with the same longitudinal reinforcement

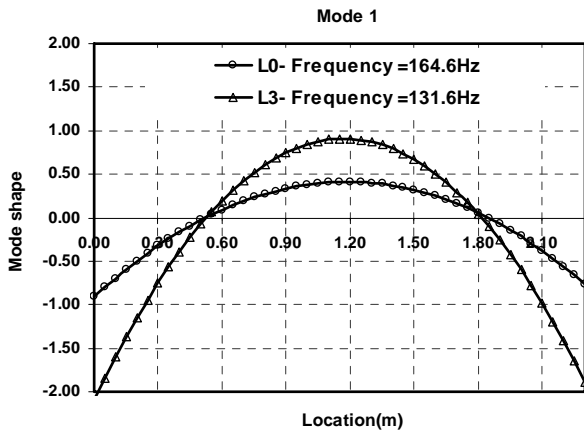


Fig. 5. The first mode shapes of Specimen B-7 in undamaged and damaged state

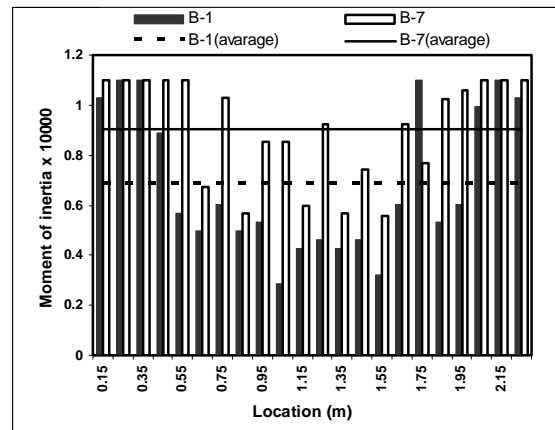


Fig. 6. Comparison of estimated moment of inertia for specimens B-1 and B-7 at load level L3

4. Conclusions

By comparing the values of moment of inertia estimated by the genetic algorithm with cracking status of the beam specimens, it is concluded that the aforementioned program predicts the stiffness distribution of damaged beams with good accuracy. The program evaluates the moment of inertia in specimens with lower concrete strength and longitudinal reinforcement ratio as being less than the values related to the specimens with higher concrete strength and reinforcement ratio. These results indicate that the process of stiffness updating is logical.

5. References

- [1] Maeck, J., Abdel Wahab, M., Peeters, B., De Roeck, G., De Visscher, J., De Wilde, W. P., Ndambi, J. M., Vantomme, J., "Damage Identification in Reinforced Concrete Structures by Dynamic Stiffness Determination", *Engineering Structures*, 2000, 22, 1339-1349.
- [2] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., "Development/Splice Length of Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal*, 2005, 102 (1), 22-30.
- [3] Baghiee, N., Esfahani, M. R., Moslem, K., "Studies on Damage and FRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Vibration Monitoring", *Engineering Structures*, 2009, 31 (4), 875-893.
- [4] Abdel Wahab, M., De Roeck, G., "Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario", *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226 (2), 217-235.