



ارزیابی رفتار خمشی تیرهای بتنی در برابر خسارت به کمک آزمایش ارتعاشی

ندا بقیعی^۱، محمدرضا صفهانی^۲، کاظم مسلم^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

خلاصه

این مقاله به بررسی رفتار تیرهای بتنی با آزمایش مودال می پردازد. برای این هدف، نه تیر بتنی آزمایش شدند و زیر اثر بارهای بارهای ایستا قرار گرفتند. این بارگذاریها به صورت گام به گام تا رسیدن به مرحله نهایی شکست ادامه یافت. شش نمونه از تیرها هنگامی که بار به حدود نیمی از بار نهایی رسید، با ورقهای پلیمرهای کربنی CFRP تقویت شدند. پس از هر گام بارگذاری و ایجاد خسارت، آزمایش دینامیکی در حالت آویزان روی تیرها انجام گردید. در این آزمایش ویژگیهای اصلی مودال که بسامدهای ویژه، میرایی و شکل مودها را در بر می گیرند، به دست آمدند. هماهنگی نتیجه‌های تجربی با نتیجه‌های حاصل از الگوی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انجام تحلیل مودال و محاسبه معیار اطمینان مودال (MAC) اثر خسارت و تقویت با CFRP روی رفتار تیرها ارزیابی گردید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که نگاشت ارتعاشات سازه و تحلیل مودال، ابزار مناسبی برای شناسایی رفتار سازه و برآورد میزان سختی و کارایی آن می‌باشد.

کلمات کلیدی: آزمایش مودال، بسامد ویژه، تیر بتنی، خسارت، شکل مود.

مقدمه

همه سازه‌ها در مدت بهره‌برداری، در اثر بارهای خارجی مانند زلزله، رفت و آمد خودروها، باد و تغییرات درجه حرارت دچار خسارت می‌شوند. این خسارت‌ها از کارایی سازه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد و امکان دارد به شکست ناگهانی آن‌ها بینجامد. به همین دلیل، نگاشت سلامت سازه‌ها و ارزیابی خسارت در زمان بهره‌برداری بسیار بااهمیت است. در آزمایش مودال با نگاشت ارتعاش سازه و اندازه‌گیری بسامد، میرایی و شکل مودها، مشخصه‌های وابسته به سختی، میرایی و مقاومت به دست می‌آیند. از این رو، نگاشت ارتعاش و پردازش سیگنال‌ها نه تنها برای شناسایی خسارت، بلکه برای بررسی رفتار ناشناخته مصالح نوینی که برای تقویت و ترمیم سازه‌ها به کار می‌روند مناسب می‌باشد. پلیمرهای الیافی (FRP) مصالح نوینی هستند که به دلیل آسانی نصب و ویژگیهای مقاومتی رضایت‌بخش، در سال‌های اخیر برای تقویت سازه‌های بتنی کاربردهای بسیاری پیدا کرده‌اند و هنوز همه ویژگی‌های رفتاری شان شناخته نشده است. آزمایش‌های ارتعاشی اطلاعات مورد نیاز برای شناسایی بیشتر رفتار این مواد را در اختیار می‌گذارد. برای شناسایی خسارت‌ها و اثر تقویت با FRP یک شاخص مناسب که از تحلیل نتیجه‌های آزمایش مودال به دست می‌آید لازم است. با همه پیشرفت‌های فراوان روش‌های نگاشت سلامت سازه‌ها هنوز هم برای به دست آوردن این شاخص تردیدهای بسیاری به جا مانده و برای رسیدن به این معیار روی نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی آزمایش‌های زیادی انجام داده‌اند. در این زمینه، پژوهشگران دانشگاه Leuven در بلژیک روی نمونه‌های آزمایشگاهی و سازه‌های واقعی آزمایش نموده‌اند و برخی از نمونه‌ها مانند آزمایش Peeters و همکاران [۱] از سال ۱۹۹۶ تا اکنون پایه بسیاری از پژوهش‌های علمی قرار گرفته است. Maeck و DeRoock [۲] همین نمونه‌ها را برای ارزیابی خسارت سازه‌های بتنی به کار

^۱ دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه عمران، عضو هیئت علمی گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار گروه عمران، عضو هیئت علمی گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد



برده‌اند. پژوهشگران دیگری نیز مانند Zonta [۳]، Pimental و همکاران [۴] و Eilbracht و Link [۵] با آزمایش مودال رفتار تیرهای بتنی را بررسی نمودند.

در این مقاله، با توجه به اهمیت روش‌های ارتعاشی برای ارزیابی سازه‌ها، رفتار تیرهای بتنی در اثر خسارت و تقویت با آزمایش مودال بررسی می‌شود. برای این هدف یک برنامه آزمایشگاهی که دربرگیرنده آزمایش‌های ایستا و ارتعاشی بود ترتیب داده شد. برای رسیدن به نتیجه‌های دقیق هر آزمایش چندین بار تکرار و روش‌هایی را که Ibarra و همکاران [۶] به کار بردند با توجه به آزمایش‌های Maeck [۷] اصلاح گردیدند. پس از آن، نتیجه‌ها تحلیل شدند و تغییرات عامل‌های مودال اصلی نمونه‌ها ارزیابی گردیدند. نتیجه‌های آزمایش‌های ارتعاشی با الگوی اجزای محدود نرم افزار ANSYS [۸] مقایسه شدند.

روش‌های تحلیلی

آشکارسازی خسارت به کمک تغییر ویژگی‌های دینامیکی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. هدف‌های اصلی ارزیابی خسارت و روش‌های آن را Doebling و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۶ ارائه دادند که هم اکنون یکی از مرجع‌های مهم به شمار می‌رود. بنا به نوشته‌های آنان یک روش ارزیابی خسارت باید بتواند آسیب‌هایی را که در گام‌های نخست بارگذاری روی داده شناسایی کند و محل آن را تعیین و عمر باقی مانده سازه را پیش بینی نماید. روش‌های ارزیابی خسارت را می‌توان به دو دسته تقسیم بندی نمود. در دسته نخست تغییر عامل‌های مودال اصلی که شامل بسامدهای ویژه، شکل مودها و میرایی هستند بررسی می‌گردد. عامل‌های مودال اصلی به صورت مستقیم از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آیند و هزینه کمتری می‌برند. دسته دوم در برگیرنده روش‌هایی است که داده‌های تجربی را به صورت مستقیم به کار نمی‌برند. این روش‌ها با کمیت‌های محاسباتی آزمایش مودال به نداشت سلامت سازه‌ها می‌پردازند. راهکارهایی مانند انرژی کرنشی مودال، انحناهای شکل مود و نرمی از این دسته‌اند. در این پژوهش، شکل مودهای تجربی تیرهای بتنی در گام‌های خسارت بررسی می‌گردند. این بررسی‌ها با معیار اطمینان مودال (MAC) انجام می‌شود. با معیار MAC، بردارهای شکل مود در دو حالت متفاوت از سازه مورد نظر با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این مقاله، داده‌های هر گام با حالت خسارت ندیده مقایسه شده‌اند. حالت خسارت ندیده با زیرنویس A و حالت تغییر یافته به دلیل خسارت و یا تقویت با زیرنویس B مشخص شده است. می‌توان برای یک سازه با n درجه آزادی و m مود اندازه‌گیری شده دو ماتریس $\{\Psi_A\}$ و $\{\Psi_B\}$ را تشکیل داد. این ماتریس‌ها که اندازه آن‌ها $n \times m$ است، مودهای اندازه‌گیری شده را در بر می‌گیرند. ضریب MAC از مولفه‌های آن‌ها به دست می‌آیند. معیار اطمینان مودال (MAC) از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۱۰]:

$$MAC(\{\Psi_{A_i}\}, \{\Psi_{B_j}\}) = \frac{|\{\Psi_{A_i}\}^t \{\Psi_{B_j}\}|^2}{(\{\Psi_{A_i}\}^t \{\Psi_{A_i}\})(\{\Psi_{B_j}\}^t \{\Psi_{B_j}\})} \quad (1)$$

معیار MAC را Allemang [۱۱] در سال ۱۹۸۲ ارائه داد و رابطه میان آ امین مود $\{\Psi_{A_i}\}$ از مجموعه داده‌های حالت نخستین سازه و آ امین مود $\{\Psi_{B_j}\}$ از مجموعه داده‌های خسارت دیده را نشان می‌دهد. مقدار MAC میزان وابستگی بین دو مود را که از صفر تا یک تغییر می‌کند مشخص می‌سازد. هر گونه دور شدن از یک می‌تواند نشانهای از وجود خسارت باشد. از این معیار برای نشان دادن درستی الگوهای عددی و تحلیلی و مقایسه آن‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی نیز استفاده می‌کنند.

آزمایش‌ها

برای شناخت بهتر عامل‌های مهم و رسیدن به معیار مناسبی که نشان‌دهنده وضعیت سازه واقعی باشد، آزمایش مودال را روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام می‌دهند و پس از آن نتیجه‌ها را برای سازه‌های واقعی به کار می‌برند. به همین جهت شبیه‌سازی شکست سازه‌ها در آزمایشگاه و بررسی پیشروی خسارت‌های سازه با آزمایش مودال بسیار ارزشمند است. در این پژوهش برای بررسی تغییرات ویژگی‌های دینامیکی تیرهای بتنی پس از ترک خوردن و تقویت با ورق‌های FRP، روی نه نمونه تیر بتنی آزمایش‌های بارگذاری ایستا و ارتعاشی انجام شد. در بخش‌های بعدی ویژگی‌های مصالح، نمونه‌ها و روش آزمایش شرح داده می‌شود.

نمونه‌های آزمایشی و جزئیات طراحی

برای برنامه آزمایش‌ها نه تیر بتنی با عرض 150 mm، ارتفاع 200 mm و طول 2200 mm ساخته شدند و بنا به ویژگی‌های مشابه در سه گروه جداگانه قرار گرفتند. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در دو رده 20 MPa و 50 MPa در نظر گرفته شد. برای هر مجموعه، مقاومت فشاری مشخصه از آزمایش فشاری روی پنج مکعب استاندارد به دست آمد. نمونه‌های تیرهای بتنی با میلگردهای فولادی به قطر 12mm و 16mm مسلح گردیدند. برای خاموت‌های عرضی میلگردهای با قطر 10mm به کار رفته‌اند. ویژگی‌های هندسی و مصالح نمونه‌های تیرهای بتنی در جدول (۱) درج گردیده‌اند. هدف از ساختن نمونه‌های مشابه در هر گروه، آزمودن نمونه‌های بیشتر و گزارش نتیجه‌ها با دقت بالاتر است.

جدول ۱- جزئیات نمونه‌های تیر و ویژگی‌های مصالح

گروه نمونه‌ها	گروه ۱			گروه ۲			گروه ۳		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
مقاومت فشاری بتن (MPa)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۴۸	۴۸	۲۰
مقاومت کششی فولادها (MPa)	۴۸۳	۴۸۳	۴۸۳	۴۹۴	۴۹۴	۴۹۴	۴۸۳	۴۸۳	۴۸۳
ضریب کشسانی فولادها (GPa)	۲۱۷/۶	۲۱۷/۶	۲۱۷/۶	۲۱۸/۵	۲۱۸/۵	۲۱۸/۵	۲۱۷/۶	۲۱۷/۶	۲۱۷/۶
فولاد فشاری	2Φ12	2Φ12	2Φ12	2Φ16	2Φ16	2Φ16	2Φ12	2Φ12	2Φ12
فولاد کششی	2Φ12	2Φ12	2Φ12	2Φ16	2Φ16	2Φ16	2Φ12	2Φ12	2Φ12
فاصله خاموت‌ها (mm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
تعداد ورق‌های FRP	۰	۲	۲	۰	۲	۲	۰	۱	۱

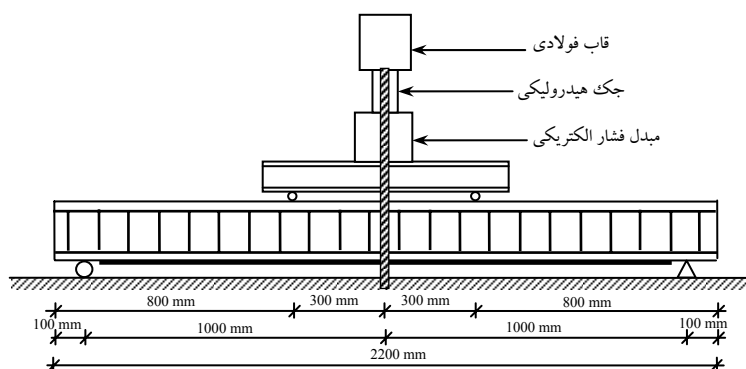
تیرها با نماد Bn نامگذاری شده‌اند که در این نامگذاری رقم (n) شماره تیر آزمایشی می‌باشد. شش نمونه از تیرها با ورق CFRP تقویت شدند. مقاومت خمشی تیرها به کمک ورق‌های پلیمری همراه با الیاف کربنی یک جهته (CFRP) بهبود یافت. عرض ورق‌های CFRP در همه نمونه‌ها یکسان و برابر با ۱۵۰mm است. ضخامت لایه‌های CFRP، ۱/۱۷ mm و مقاومت کششی و ضریب کشسانی آن‌ها به ترتیب ۲/۸۴۵GPa و ۲۳۷GPa بود.

روش بارگذاری ایستا

تیرهای بتن مسلح با تکیه گاه‌های ساده مانند شکل‌های (۱) و (۲) زیر اثر بار ایستای چهار نقطه ای قرار گرفتند. تغییرشکل‌های نمونه‌ها در وسط دهانه با یک تغییرمکان سنج الکتریکی (LVDT) و بار وارده با مبدل فشار الکتریکی (Load Cell) اندازه گیری و به کمک دستگاه دریافت کننده داده (Data Logger) ثبت شدند.

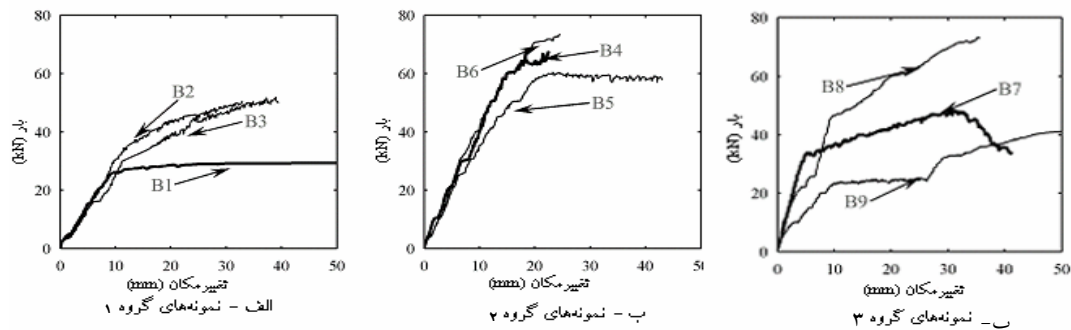


شکل ۱- دستگاه آزمایش بارگذاری ایستا



شکل ۲- اندازه نمونه‌ها و محل بارگذاری ایستا

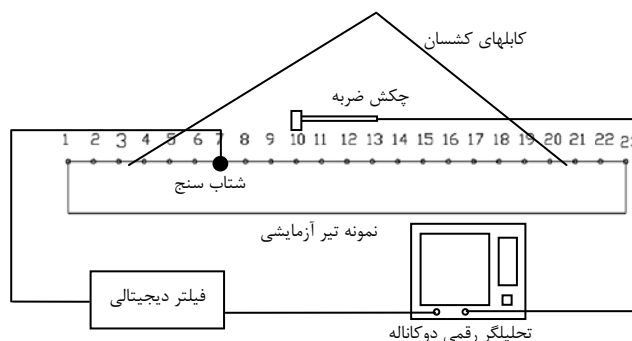
این بارگذاری‌های ایستا در نمونه‌های تیری خسارت پیشرونده‌ای ایجاد نمودند. گام‌های بارگذاری برای نمونه‌های گروه ۱، 5 kN و برای نمونه‌های گروه ۲، 10 kN بود. در نمونه‌های تقویت شده، دو گام بارگذاری (وزن تیر و همان بار پیش از تقویت) درست پس از مقاوم سازی با CFRP وارد گردیده است. شکل (۳) پوش نمودارهای بار- تغییر مکان را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۳- پوش نمودارهای بار- تغییر مکان نمونه‌های تیرهای بتنی در آزمایش ایستا

دستگاه و روش آزمایش ارتعاشی

واکنش‌های ارتعاشی نمونه‌های تیرهای بتنی در برابر تحریک با چکش ضربه، به کمک شتاب سنج اندازه‌گیری و در حافظه رایانه ذخیره گردید. در این اندازه‌گیری هر تیر مانند یک سازه یک بعدی رفتار می‌کند و شتاب سنج در محور مرکزی واقع در سطح بالایی آن و در درجه آزادی شماره ۷ قرار داده شد. در این آزمایش محل شتاب سنج ثابت و محل ضربه‌های چکش روی درجات آزادی که 100 mm از یکدیگر فاصله دارند تغییر می‌کند. داده‌ها در دامنه ۱۶۰۰-۰ Hz و با بسامد ۴۰۹۶ Hz دریافت شدند. سر مناسب چکش نیز با توجه به بسامدهای ویژه تیر و شکل نمودارهای پاسخ بسامدی (FRF) انتخاب گردید. در این آزمایش‌ها سر مناسب چکش از جنس پلاستیک با دامنه بسامدی ۰ تا ۲ kHz و دامنه نیرویی ۳۰۰ N تا ۱۰۰۰ N می‌باشد. شکل (۴) شمایی از این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴- شمایی از آزمایش دینامیکی

پس از هر دوره بارگذاری و باربرداری آزمایش‌های ارتعاشی در حالت آویزان مانند شکل (۴) انجام شدند. هنگامی که نمونه‌ها با کابل‌های کشسان و در حالت آویزان آزمایش می‌شوند، اثر تکیه‌گاه‌ها و نوبز ناشی از ارتعاش‌های تصادفی کف حذف می‌گردد و دقت نتیجه‌ها بالا می‌رود. در آزمایش‌های ارتعاشی چکش ضربه نیروی محرک ورودی را فراهم می‌سازد و تابع‌های پاسخ بسامدی (FRF) با اندازه‌گیری نیروی ورودی (از چکش ضربه) و پاسخ (از شتاب سنج ثابت) در هر نقطه اندازه‌گیری به دست می‌آیند.

تحلیل و بررسی نتیجه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش داده‌های تجربی با روش شناسایی مستقیم عامل‌های وابسته به بسامد (FDPI) و با نرم افزار STAR [۱۲] تحلیل گردیدند. داده‌های دریافتی از تحلیلگر رقمی دو کاناله به وسیله (GPIB) در حافظه رایانه ذخیره و با برنامه STAR و MATLAB [۱۳] پردازش شدند. عامل‌های اصلی موдал که بسامدهای ویژه، شکل مودها و میرایی را در بر می‌گیرند، با استفاده از روش‌های برازش منحنی برنامه STAR به دست آمدند. در این بخش از مقاله نتیجه پردازش داده‌ها برای دو حالت خسارت دیده و خسارت ندیده ارائه و بررسی می‌شوند.

**بررسی نتیجه‌های آزمایش مودال پیش از خسارت و مقایسه با الگوی عددی**

آگاهی از شرایط اولیه سازه و ویژگی‌های آن در حالت بدون خسارت برای بررسی‌های بعدی لازم است. البته این داده‌ها همیشه در دسترس نیستند. در این مورد باید روش‌هایی به کار روند که تنها به ویژگی‌های سازه در حالت خسارت دیده تکیه می‌کنند. در پژوهش‌های آزمایشگاهی این کار را می‌توان انجام داد و برای اطمینان از درستی روش آزمایش و پردازش داده‌ها از آن استفاده نمود. در این پژوهش همه داده‌ها با حالت خسارت ندیده مقایسه شده‌اند و به همین جهت بررسی درستی آن اهمیت دارد. با کمک آزمایش ASTM C215 [۱۴] ویژگی‌های مکانیکی در حالت خسارت ندیده محاسبه شده‌اند. درستی نتیجه‌های این آزمایش با الگوی عددی اجزای محدود به اثبات رسیده است.

در آزمایش ASTM C215 [۱۴] با کمک بسامد ویژه اصلی، ضریب کشسانی دینامیکی محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن بسامد ویژه اصلی می‌توان تکیه‌گاه‌ها را به فاصله 0.224 از دو انتهای تیر قرار داد. در این حالت، نمونه مانند حالت آزاد مود اول خمشی ارتعاش می‌کند و بیشترین دامنه ارتعاش انتهای تیر در حدود $1/6$ دامنه ارتعاش وسط دهانه است. می‌توان به جای این کار نتیجه‌های آزمایش حالت آویزان را به کار برد. با به کار بردن ضریب کشسانی دینامیکی، ضریب کشسانی استاتیکی نمونه‌ها با استاندارد BS1881:Part116 [۱۵] به دست می‌آید. ضریب کشسانی استاتیکی بتن با استفاده از رابطه‌های مواد مرکب محاسبه شده است. این مقادیر در جدول (۳) آمده‌اند. در جدول E_D ، E_S و E_C به ترتیب ضریب کشسانی دینامیکی نمونه‌ها، ضریب کشسانی استاتیکی نمونه‌ها و ضریب کشسانی بتن هستند.

جدول ۲- ضریب کشسانی دینامیکی و استاتیکی نمونه‌های تیرهای بتنی

گروه	گروه (۱)			گروه (۲)			گروه (۳)		
	نمونه‌ها	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
E_D (GPa)	۱۸/۵۰۸	۱۹/۲۷۳	۱۷/۴۶۰	۱۶/۷۱۴	۱۵/۶۱۲	۱۶/۸۴۷	۲۰/۹۲۲	۳۶/۱۵۴	۱۹/۸۸۵
E_S (GPa)	۱۹/۱۳۶	۲۰/۰۹۱	۱۷/۸۲۵	۱۶/۸۹۳	۱۵/۵۱۵	۱۷/۰۵۸	۲۲/۱۵۲	۴۱/۱۹۲	۲۰/۸۵۶
E_C (GPa)	۱۶/۳۶۳	۱۷/۳۳۳	۱۵/۰۳۲	۱۱/۸۱۲	۱۰/۳۹۵	۱۱/۹۸۲	۱۹/۴۲۹	۳۸/۷۵۷	۱۸/۱۰۹

اکنون با ضریب کشسانی استاتیکی محاسبه شده رفتار سازه خسارت ندیده شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی مقایسه می‌گردد. بسامدهای ویژه و شکل مودهای تجربی راهنمای بسیار خوبی برای رسیدن به یک الگوی عددی هستند. در این پژوهش، با همین شیوه رفتار نمونه‌ها الگوسازی می‌شود. نمونه‌های تیرهای بتنی به صورت دو بعدی و با نرم افزار Ansys [۸] الگوسازی شده‌اند. این الگوی عددی از اجزای تنش صفحه‌ای هم عامل (Plane 42) برای بتن و اجزای خرابی (Link1) برای میلگردها تشکیل شده است. نتیجه‌های تحلیل برای بسامدهای ویژه تجربی و عددی در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- مقایسه میان بسامدهای ویژه اصلی تجربی و عددی تیرهای بتنی در آزمایش ASTM C215

گروه	گروه (۱)			گروه (۲)			گروه (۳)		
	نمونه‌ها	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
تجربی (بسامد ویژه اصلی تجربی (Hz))	۱۱۴/۴۸	۱۱۶/۸۲	۱۱۱/۱۹	۱۰۸/۷۹	۱۰۵/۱۴	۱۰۹/۲۲	۱۵۹/۸۲	۱۶۰	۱۱۸/۶۶
عددی (بسامد ویژه اصلی عددی (Hz))	۱۱۳/۸۹	۱۱۶/۵۶	۱۱۰/۱۲	۱۰۷/۸۹	۱۰۳/۷۶	۱۰۸/۳۸	۱۵۹/۸۵	۱۶۰/۰۵	۱۱۹/۵۲

در آزمایش استاندارد ASTM C215، تنها مود اول تجربی را به کار می‌برند. از این رو، داده‌های مود اول تجربی و عددی در جدول (۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این داده‌ها برای حالت اولیه و بدون خسارت هستند. هماهنگی نتیجه‌ها نشان می‌دهند که ویژگی‌های مصالح درست هستند. برای مقایسه شکل مودهای ارتعاشی تجربی و عددی آزمایش حالت آویزان تیرها در حالت خسارت ندیده شبیه‌سازی می‌شود. در این الگوی عددی سه مود اول عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای مقایسه شکل مودهای تجربی و عددی معیار MAC به کار رفته است که در جدول (۴) نوشته شده‌اند.

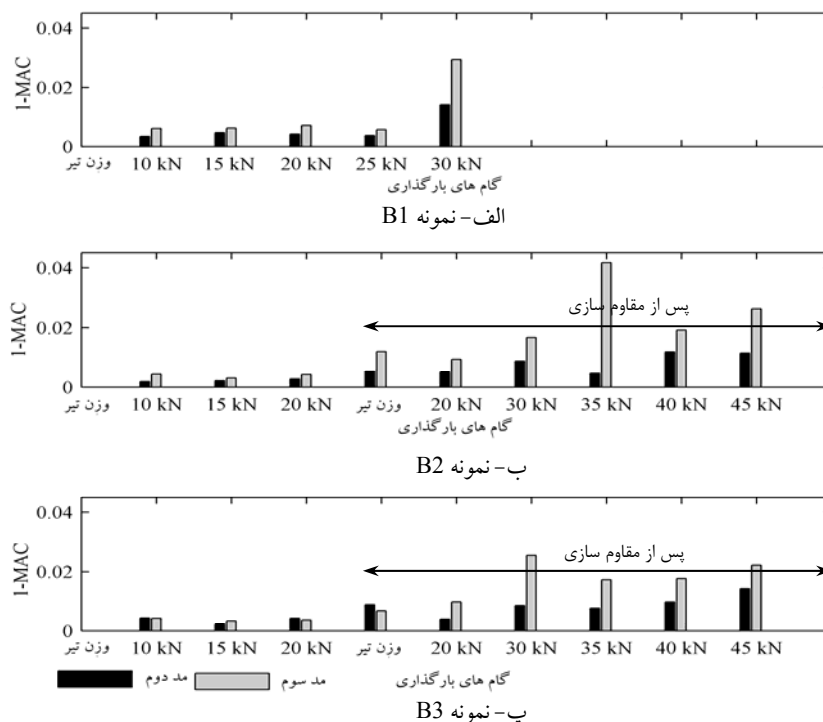
جدول ۴- مقایسه میان شکل مودهای تجربی و عددی تیرهای بتنی در حالت آویزان با معیار MAC

گروه	گروه (۱)			گروه (۲)			گروه (۳)		
	نمونه‌ها	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
مود اول	۰/۹۹۶۵	۰/۹۹۲۳	۰/۹۸۵۸	۰/۹۸۸۱	۰/۹۹۰۰	۰/۹۹۱۰	۰/۹۹۶۵	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۰۳
مود دوم	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۶۷	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۴۷	۰/۹۹۳۹	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۲۵	۰/۹۹۵۲
مود سوم	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۵۰	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۰۴	۰/۹۹۱۴

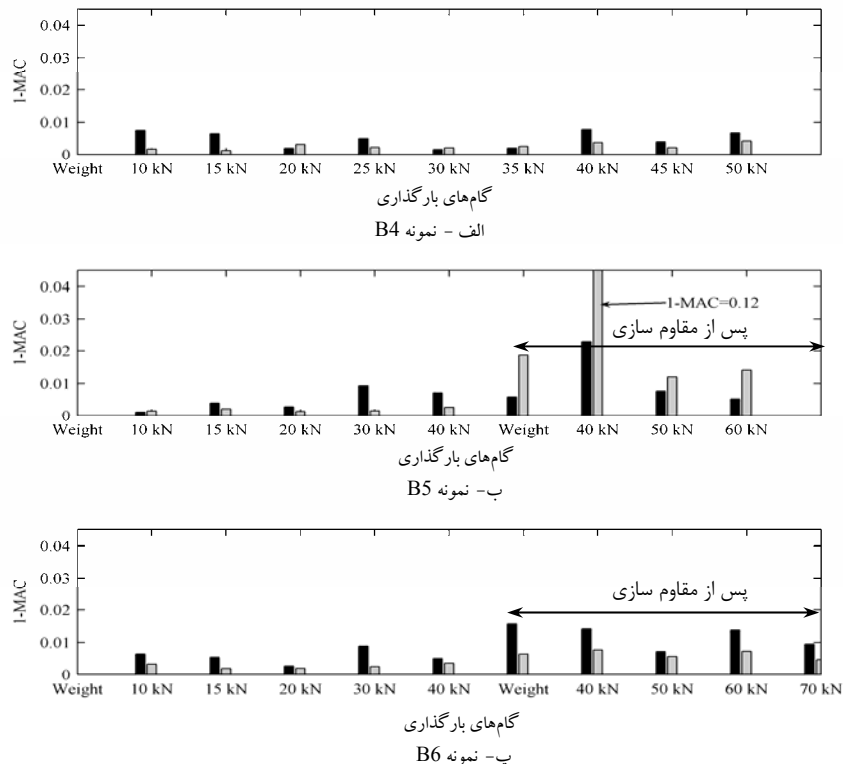
عددهای جدول (۴) نشان می دهند که روش تجربی و عددی با یکدیگر هماهنگی دارند. به بیان دیگر مقدار MAC بسیار به یک نزدیک است و می توان به نتیجه های این شبیه سازی عددی اعتماد نمود. در بخش بعدی تغییرات بسامدها و شکل مودها پس از خسارت و تقویت بررسی خواهد شد.

بررسی نمونه ها پس از خسارت و تقویت با CFRP

در حالت خسارت دیده، تغییرات ویژگی های مودال در گام های خسارت بررسی و با حالت پیش از خسارت مقایسه می شوند. اثر تقویت با CFRP نیز در این مرحله بررسی می گردد. سازه ها را می توان با ویژگی های کلی یا محلی پس از خسارت ارزیابی نمود. در این مقاله بر اساس شکل مودهای تجربی، سختی کلی تیرها با حالت پیش از خسارت مقایسه می شوند. همه مودهای ارتعاشی انرژی یکسانی ندارند. در آزمایش مودال، مودهایی که انرژی بیشتری دارند، در تغییر شکل ها اثر گذارتر هستند. از این رو، برای یک قضاوت درست باید مودهایی را انتخاب کرد که انرژی بیشتری داشته باشند. در این آزمایش ها مودهای دوم و سوم انرژی بیشتری دارند. در این پژوهش، مودهای دوم و سوم برای تحلیل نتیجه ها انتخاب شدند و با معیار MAC در گام های بارگذاری با یکدیگر مقایسه گردیدند. کاهش و یا افزایش مقدارهای MAC همیشه یکنواخت نیست و همین مساله تفسیر نتیجه ها را دشوار می کند. در حقیقت، این معیار بسیار به اندازه گیری حساس می باشد و در مودهای بالاتر به دلیل افزایش خطاها این غیریکنواختی افزایش می یابد. مقدار ضریب های MAC بین یک برای حالت خسارت ندیده و صفر برای خرابی کامل تغییر می کند. برای ارائه بهتر و مشخص نمودن تغییرات MAC، مقدار 1-MAC در گام های بارگذاری و برای مودهای دوم و سوم محاسبه می شود. بنابراین افزایش مقدار 1-MAC، کاهش سختی و کم شدن آن افزایش سختی را نشان می دهد. برای هر گروه از نمونه تیرهای آزمایشی این نمودارها در شکل های ۵، ۶ و ۷ رسم شده اند که تغییرات آن ها بررسی می گردد. در شکل ۵-الف، افزایش مقدارهای 1-MAC، کاهش سختی نمونه B1 را در گام های بارگذاری نشان می دهند. در بارهای کم نمونه ها ترک زیادی ندارند و مقدار 1-MAC تغییر چندانی نمی کند. با مقایسه شکل های ۵-ب و ۵-پ با شکل ۵-الف، می توان افزایش سختی نمونه های تیرهای بتنی پس از تقویت با CFRP نسبت به نمونه تقویت نشده مشاهده نمود. شکل (۶)، تغییرات 1-MAC را برای نمونه های پر فولاد نشان می دهد. در این نمونه ها، اثر ورق های CFRP، در افزایش سختی نسبت به نمونه های گروه ۱ کمتر است. با مقایسه شکل های (۵) و (۶) می توان به این تفاوت پی برد. در نمونه B5 از گام بارگذاری هفتم که وزن تیر می باشد، بر خلاف انتظار مقدارهای 1-MAC افزایش یافته اند. این پدیده نشانی از وجود خسارت اولیه در نمونه B5 می باشد که در هنگام آزمایش مشاهده شد. در حقیقت، به دلیل ترک اولیه در نمونه B5، تقویت با CFRP اثر چندانی روی سختی آن نداشته و رفتار نمونه B5 با نمونه B6 متفاوت است. معیار MAC برای بررسی چنین پدیده هایی کافی نیست و باید از روش هایی که خسارت های محلی را بررسی می کنند بهره گرفت.

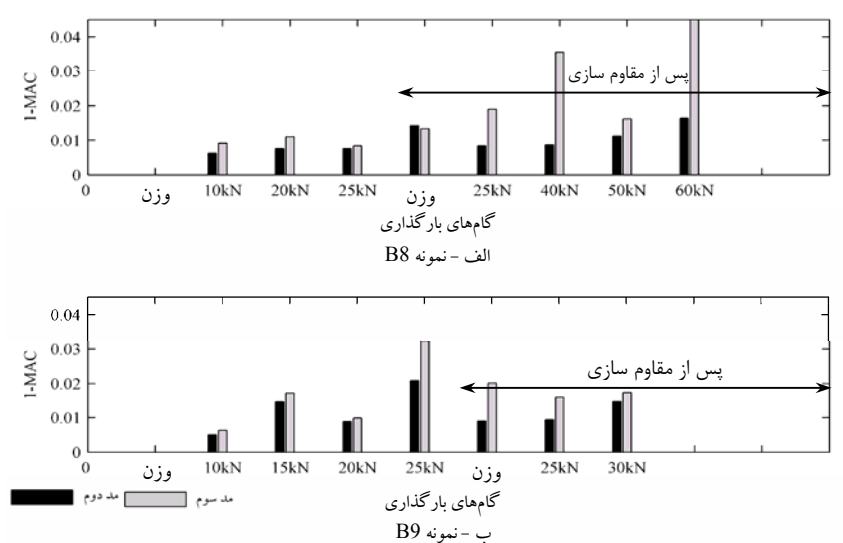


شکل ۵- نمودارهای تغییر 1-MAC در گام های بارگذاری برای نمونه های گروه ۱



شکل ۶- نمودارهای تغییر I-MAC در گام‌های بارگذاری برای نمونه‌های گروه ۲

شکل (۷)، تغییرات I-MAC مقادیر نمونه‌های گروه ۳ را نشان می‌دهد. نمونه B8 از بتن با مقاومت بالا ساخته شده و اثر خسارت و تقویت با ورق‌های CFRP را می‌توان مشاهده نمود. در نمونه B8، بالا و پایین رفتن‌های نمودارهای میله ای مود سوم ارتعاشی، نشان دهنده خطا در اندازه‌گیری است. ولی تغییرات نمودارهای مود دوم که با دقت بیشتری اندازه‌گیری شده، منطقی است و با آن می‌توان چگونگی تغییرات سختی در گام‌های مختلف بارگذاری را نشان داد. نمودارهای میله‌ای شکل ۷- ب، اثر تقویت با CFRP را بهتر از دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهند. در نمونه B9 که از بتن با مقاومت پایین‌تری ساخته شده، اثر تقویت با CFRP از نمونه B8 بیشتر است.



شکل ۷- نمودارهای تغییر I-MAC در گام‌های بارگذاری برای نمونه‌های گروه ۳



نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار نه نمونه تیر بتن مسلح با آزمایش‌های ایستا و ارتعاشی مورد بحث قرار گرفت. در آزمایش‌های ایستا، نمونه‌های تیرها در اثر بارگذاری چهارنقطه‌ای خسارت دیدند. پس از هر گام بارگذاری، پاسخ ارتعاشی نمونه‌ها در دامنه بسامد اندازه‌گیری و ثبت گردید. برای بررسی اثر ورق‌های CFRP در افزایش سختی تیرها، برخی از نمونه‌ها هنگامی که بار به حدود نیمی از بار نهایی رسید، با ورق‌های CFRP تقویت شدند و نمودارهای پاسخ بسامدی آن‌ها به دست آمدند. پس از پردازش مودال داده‌های تجربی، تغییرات شکل مودها بررسی گردید. در نمودارهای پاسخ بسامدی نمونه‌ها، مودهای دوم و سوم انرژی بیشتری دارند و روی تغییر شکل‌ها بیشتر اثر می‌گذارند. به همین جهت معیار اطمینان مودال (MAC) برای مودهای دوم و سوم محاسبه شد. به کمک معیار (MAC) می‌توان تغییرات سختی نمونه‌ها در اثر خسارت و تقویت را نشان داد. معیار اطمینان مودال (MAC) کاهش سختی ناگهانی نمونه را در اثر ترک آشکار می‌کند و رفتار متفاوت نمونه‌ها را می‌توان مشاهده نمود. نتیجه‌ها برای یک الگوی عددی اجزای محدود در نرم افزار به کار رفتند و هماهنگی دو روش تجربی و تحلیلی بررسی گردید.

مراجع

1. Peeters B., Abdel Wahab M., De Roeck G., De Visscher J., De Wilde W.P., Ndambi J.-M., and Vantomme J. (1996) Evaluation of structural damage by dynamic system identification. *Proceedings ISMA 21 International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium*, 1349-1361.
2. Maeck J., and De Roeck G. (1998) Technical report Task D (SIMCES): Damage identification by direct stiffness derivation from modal curvatures. Department of Civil Engineering, K.U.Leuven, Belgium.
3. Zonta, D. (2000) Structural damage detection and localization by using vibrational measurements. PhD dissertation, Univ. of Bologna, Bologna, Italy.
4. Pimentel, R., Pavic, A., and Waldron, P. (1999) Vibration performance of footbridges established via modal testing. *Proc., IABSE Symp. Structures for the future—the search for quality*, Rio de Janeiro, Brazil, 602–609.
5. Eilbracht, G., and Link, M. (1995) Identification of crack parameters in concrete beams using modal test data. *Proc., Int. Symp. On Nondestructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, 327–334.
6. Ibarra J, Bonfiglioli B, Pascale G. (2001) Assessment of reinforced concrete beams damaged and repaired with externally bonded FRP sheets. Final Report-Jorge1100, Univ. of Bologna, Bologna, Italy.
7. Maeck J. (2003) Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring. Ph.D. thesis, Belgium: Department of Civil Engineering, K.U.Leuven.
8. ANSYS (2004) Engineering Analysis System, Release 9.2.
9. Doebling SW, Farrar CR, and Prime MB. (1998) A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, **30**, 2, 91-105.
10. Perera, R., Huerta, C., and M.Orquin J. (2007) Identification of damage in RC beams using indexes based on local modal stiffness”, *Construction and Building Materials*.
11. Allemang RJ, and Brown DL. (1982) A correlation coefficient for modal vector analysis. *In: Proc. of the 1st Int. Modal Analysis Conf.*, 110-116.
12. STAR (1990) Structural Testing Analysis and Report, Structural Measurement System, SMS, Version 3.1.
13. MATLAB (2004) The language of technical computing, , Version 7,(Release 14-1).
14. American Society for Testing and Materials (1998) ASTM C 215 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, **4.02**, West Conshohocken, PA.
15. British Standards Institution (1983) Testing Concrete BS 1881: Part 116: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes. British Standards Intuition, London.