

ارزیابی خسارت در تیرهای بتن مسلح به کمک ماتریس نرمی

ندا بقیعی^۱، محمدرضا اصفهانی*^۲ و کاظم مسلم^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی سازه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۸۷/۲/۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۲/۱۰، تاریخ تصویب ۸۹/۳/۲۳)

چکیده

این مقاله به بررسی الگوی خسارت در تیرهای بتن مسلح به کمک ماتریس نرمی می‌پردازد. ماتریس‌های نرمی از داده‌های مودال تجربی محاسبه شدند و داده‌های مورد نیاز با انجام آزمایش‌های ایستا و ارتعاشی روی نمونه‌های تیر بتنی به دست آمدند. تغییرات ماتریس نرمی با روش پیشنهادی این مقاله بر پایه بردارهای Ritz تعیین شد. این روش ناحیه ترک‌خورده را به صورت سهمی در بخش میانی تیر نشان می‌دهد که اندازه آن با پیشروی خسارت افزایش و با مقاوم‌سازی با ورق‌های CFRP کاهش می‌یابد. الگوی خسارت پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz با روش‌هایی که کاهش سفتی تیرهای بتنی را در اثر ترک‌های خمشی آشکار می‌کنند هماهنگ است و در یک چارچوب ریاضی قابل اثبات، برآوردی از کاهش و افزایش سفتی در طول نمونه‌های تیرهای بتنی به دست می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوی خسارت، بسامد، تیر بتن مسلح، سفتی، شکل مود، ماتریس نرمی

مقدمه

نیستند. به همین علت، پژوهشگران رویکرد دیگری را در پیش گرفته‌اند که روش عامل‌های مودال یافتنی^۲ نام دارد. در این روش، با پردازش عامل‌های مودال بنیادی کمیت‌هایی مانند انرژی کرنشی، انحنا و شکل مودها و ماتریس نرمی را می‌یابند [۱].

تا کنون، روش‌های بسیاری برای تعیین خسارت بر اساس داده‌های مودال پیشنهاد شده‌اند. Betti [۲] در سال ۲۰۰۵ خاطر نشان کرد که ارائه یک راهکار برای همه سازه‌ها و برای همه موقعیت‌ها مناسب نیست و باید بتوان با توجه به خطی و غیرخطی بودن، دامنه زمانی یا بسامدی و تغییرپذیری یا تغییرناپذیری نسبت به زمان، راهکار مناسب را برگزید. بنا به نوشته‌های Doebling و همکاران [۳] همه کمیت‌های مودال حساسیت یکسانی نسبت به خسارت ندارند. هنگامی که در سازه بیش از یک ناحیه خسارت باشد، برخی از روش‌های ارزیابی خسارت نمی‌توانند مکان دقیق خسارت را نشان دهند. یک روش ارزیابی باید بتواند خسارتی را که در گام‌های نخست روی داده شناسایی و مکان‌یابی کند، برآوردی از گسترش خسارت بدهد و عمر باقی‌مانده سازه را پیش‌بینی کند. برای رسیدن به این هدف باید روش‌های ارزیابی خسارت بهبود یابند [۳]. یکی از روش‌های ارزیابی، بررسی تغییرات

نگهداری و حفظ ایمنی سازه‌های مهندسی در زمان بهره‌برداری، عمر مفید سازه‌ها را افزایش می‌دهد. با شناسایی ترک‌ها و ترمیم اعضای سازه از شکست ناگهانی کل سازه پیشگیری خواهد شد. این کار برای سازه‌های زیرساختی مهم که با گسترش شهرها بر شمار آن‌ها افزوده شده است، اهمیت بیشتری دارد. به همین دلیل مهندسان و پژوهشگران همواره به دنبال روش‌هایی هستند تا بتوانند به‌آسانی وضعیت هر سازه را از ابتدای ساخت تا پایان بهره‌برداری ارزیابی کنند. روش‌های ارزیابی مخرب هزینه زیادی می‌برند و کاربرد آن‌ها در همه‌جا امکان‌پذیر نیست. روش‌های ارزیابی غیرمخرب مانند پرتوهای x و فراصوتی از روش‌های مخرب بهتر هستند، ولی توانایی ارزیابی کل سازه را ندارند و به کمک آن‌ها تنها می‌توان تغییر ویژگی‌های محلی را بررسی کرد [۱]. یکی از روش‌های ارزیابی غیرمخرب که کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده، آزمایش ارتعاشی است.

به کمک فرآیندی^۱ ارتعاش‌های سازه‌ها و پردازش آن‌ها می‌توان ویژگی بسامد، میرایی و شکل مودها را به دست آورد و پیشروی ترک‌ها را بررسی کرد. این ویژگی‌ها که به مودهای ارتعاشی وابسته‌اند و عامل‌های مودال بنیادی^۲ نام دارند، برای بررسی سازه مورد نظر کافی

داده‌های مودال تجربی بررسی می‌شود. تا کنون برای بررسی پاسخ ارتعاشی نمونه تیرهای بتنی تقویت‌شده با FRP کار پژوهشی زیادی انجام نشده است. Bonfiglioli و همکاران [۱۰] و Ibarra و همکاران [۱۱] نخستین کارهای پژوهشی را در این زمینه انجام داده‌اند. آنها تنها تغییرات بسامدهای ویژه و نسبت‌های میرایی تیرهای بتن مسلح را پس از خسارت و تقویت با ورق‌های FRP بررسی کردند و تغییرات عامل‌هایی مانند شکل مودهای تجربی، کرنش‌های مودال، کارمایه کرنشی مودال و ماتریس نرمی را در نظر نگرفتند. از این رو، در ادامه کارهای Bonfiglioli و همکاران [۱۰] و Ibarra و همکاران [۱۱]، میدان گسترده‌ای در برابر پژوهشگران وجود دارد که این مقاله گوشه‌ای از پژوهش‌های مورد نیاز را در بر می‌گیرد. کارهای پژوهشی این مقاله دو مرحله تجربی و نظری را شامل می‌شود.

در مرحله تجربی، نمونه تیرهای بتنی با عرض ۱۵۰mm، ارتفاع ۲۰۰mm و طول ۲۲۰۰mm طراحی و ساخته شدند. در طراحی نمونه‌ها و مرحله‌های آزمایش، پژوهش‌های گذشته مورد نظر قرار گرفتند. برای رسیدن به نتیجه‌های دقیق‌تر، هر آزمایش چندین بار تکرار شد. نمونه‌های تیرهای بتنی آزمایشگاهی در اثر بارهای ایستا به صورت گام به گام خسارت دیدند. مقاومت خمشی برخی از نمونه‌ها هنگامی که بار به حدود نیمی از بار نهایی رسید، با کمک ورق CFRP افزایش یافت. پاسخ ارتعاشی نمونه‌ها پس از هر گام خسارت و تقویت دریافت و در حافظه رایانه ذخیره شد. داده‌های مودال دریافتی در مرحله نظری پردازش شدند و با کمک روش‌های تشخیص خسارت بر پایه ماتریس نرمی، الگوی خسارت نمونه‌های تیرهای بتنی بررسی و چگونگی شکست آنها پیش‌بینی شد.

این کار پژوهشی پس از مرور جامعی بر کارهای پژوهشگران در زمینه آزمایش مودال و روش‌های تشخیص خسارت برنامه‌ریزی شد و تفاوت بارز آن با کارهای پژوهشی قبلی ارائه یک راهکار نو برای آشکارسازی خسارت‌ها در تیرهای بتن مسلح بر پایه بردارهای Ritz است. در این مقاله، با تعریف بردار نیروهای گسترده به صورت نیروهای لختی مودال، روشی نو برای به دست آوردن مکان خسارت‌ها به کمک بردارهای Ritz پیشنهاد می‌شود. هماهنگی الگوی خسارت پیشنهادی با روش‌های

ماتریس‌های نرمی سازه‌ها پس از خسارت است. برخی از الگوهای پیشنهادی بر پایه ماتریس نرمی ابتکاری هستند و بدون اثبات ریاضی برای گونه ویژه‌ای از سازه‌ها پاسخ رضایت‌بخشی دارند [۴، ۵]. از این رو در این مقاله تلاش می‌شود تا در یک چارچوب ریاضی قابل اثبات، خسارت‌ها در تیرهای بتن مسلح با کمک ماتریس نرمی تجربی ارزیابی شوند.

به کمک ماتریس نرمی که از داده‌های تجربی محاسبه می‌شود، می‌توان مکان خسارت‌ها را پیدا کرد. ماتریس نرمی به تغییرات مودها در بسامدهای پایین‌تر حساس‌تر است. بنابراین می‌توان در آزمایشگاه با اندازه‌گیری تعداد محدودی از مودهای ارتعاشی نخست، ماتریس نرمی را با دقت مناسبی محاسبه کرد [۶]. روش ماتریس نرمی را تا کنون پژوهشگران بسیاری برای آشکارسازی خسارت به کار برده‌اند. Pandey و Biswas [۷] با بررسی تغییر ماتریس نرمی خسارت‌ها را شناسایی و مکان‌یابی کردند. Zhang و Aktan [۸] از مفهوم انحنا برای مقایسه ماتریس‌های نرمی در گام‌های خسارت بهره گرفتند. آنها تغییر انحنای ستون‌های ماتریس نرمی را به عنوان نشان خسارت در سازه تعریف به کار بردند. ولی محاسبه دقیق انحنای ستون‌های ماتریس نرمی به آسانی امکان‌پذیر نیست و روش‌هایی مانند تفاضل محدود خطا دارند. بنابراین، باید به دنبال روش‌هایی بود که بدون نیاز به محاسبات پیچیده و در یک چارچوب ریاضی خسارت‌ها را آشکار کنند. یکی از این روش‌ها بررسی تغییرات بردارهای Ritz است. بردارهای Ritz که با کمک ماتریس نرمی به دست می‌آیند، در دینامیک سازه‌ها برتری‌های نهفته فراوانی دارند و از داده‌های مودال بنیادی در آشکارسازی خسارت‌ها کارآیی بهتری دارند [۹]. با این همه هنوز پژوهش‌های اندکی برای آشکارسازی خسارت‌ها با کمک بردارهای Ritz انجام داده‌اند. بردارهای Ritz از حاصل ضرب ماتریس نرمی و بردار نیروهای گسترده وارد بر سازه به دست می‌آیند. چگونگی در نظر گرفتن بردار نیروهای گسترده در روش‌های آشکارسازی خسارت بسیار با اهمیت است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

برنامه کار پژوهشی و نوآوری‌ها

در این مقاله رفتار تیرهای بتن مسلح خسارت‌دیده و تقویت‌شده با ورق‌های FRP به کمک

رابطه (۸) اثر شکل مودها و بسامدها را روی ماتریس نرمی نشان می‌دهد. بنا به رابطه (۸)، ماتریس نرمی با وارون توان دوم بسامدها وابسته است و بسامدهای بالاتر روی ماتریس نرمی کمتر اثر می‌گذارند. در عمل تنها می‌توان تعداد محدودی از بسامدها را اندازه گرفت. از این رو ماتریس نرمی محاسباتی خطا دارد. اگر تعداد مودهای اندازه‌گیری شده از تعداد درجه‌های آزادی کمتر باشند، خطای محاسباتی ماتریس نرمی را می‌توان با میانگین‌گیری فربنیوس (Frobenius norm) محاسبه کرد. محاسبه این میانگین برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که می‌توان از این خطا چشم پوشید [۶]. خطای محاسبه ماتریس سفتی که از وارون ماتریس نرمی به دست می‌آید، بیشتر است. به همین دلیل، در بیشتر پژوهش‌ها روش نرمی را به کار می‌برند.

برای پیدا کردن مکان خسارت‌ها، باید تغییر ماتریس نرمی را در گام‌های خسارت بررسی و با حالت خسارت ندیده مقایسه کرد. پژوهشگران روش‌های متفاوتی را برای بررسی این تغییرها به کار می‌برند. برخی از این روش‌ها پایه نظری ندارند و تنها به صورت ابتکاری و با مشاهده و آزمایش بر داده‌های گوناگون پیشنهاد شده‌اند [۴، ۵]. یکی از این روش‌های ابتکاری، روش Pandey و Biswas [۷] است که در آن ماتریس‌های نرمی پیش و پس از خسارت با یکدیگر مقایسه می‌شوند و بیشترین تغییر هر ستون از ماتریس نرمی را به عنوان شاخص خسارت در نظر می‌گیرند. تغییر ماتریس نرمی پیش و پس از خسارت با ماتریس $[\Delta]$ تعریف می‌شود [۷، ۱۲]:

$$[\Delta] = [F^d] - [F] \quad (9)$$

در این رابطه، $[F]$ و $[F^d]$ به ترتیب ماتریس‌های نرمی پیش و پس از خسارت هستند. قدر مطلق بیشترین تغییر درایه‌های ستون z از ماتریس $[\Delta]$ ، که $\bar{\delta}_z$ نام دارد، از رابطه (۱۰) حاصل می‌شود [۷، ۱۲]:

$$\bar{\delta}_z = \max |\delta_{ij}| \quad ; \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $\bar{\delta}_z$ خسارت را در درجه آزادی z ام مشخص می‌کند و n تعداد درجه‌های آزادی است.

برخی از پژوهشگران، با کمک بردارهای Ritz خسارت‌ها را نشان می‌دهند [۹]. بردارهای Ritz از حاصل ضرب ماتریس نرمی و بردار وابسته به نیروهای دینامیکی (نیروهای گسترده) محاسبه می‌شوند [۹]:

ابتکاری نشان می‌دهد که الگوی خسارت پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz بدون نیاز به محاسبات پیچیده و با یک روند ریاضی قابل اثبات برای تشخیص خسارت در تیرهای بتنی خسارت دیده و تقویت شده با ورق FRP کارایی بسیار خوبی دارد.

روش‌های تحلیلی

روند محاسبه ماتریس نرمی را از دیدگاه نظری می‌توان به آسانی دنبال کرد. محاسبه ماتریس نرمی، به الگوی جزء محدود سازه نیازی ندارد و از رابطه‌های ساده معادله حرکت در دینامیک سازه‌ها به دست می‌آید [۶]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی، K ماتریس سفتی، x بردار تغییرمکان، \dot{x} بردار سرعت، \ddot{x} بردار شتاب و f بردار نیرو است. با در نظر گرفتن ویژگی تعامدی شکل مودها نسبت به ماتریس جرم و سفتی، می‌توان نوشت [۶]:

$$\bar{M} = \phi^T M \phi \quad , \quad \bar{K} = \phi^T K \phi \quad (2)$$

در رابطه (۲)، \bar{M} ماتریس قطری جرم و \bar{K} ماتریس سفتی قطری و ϕ بردار شکل مودها است. توان دوم بسامدهای مودال از ماتریس Λ در رابطه (۳) به دست می‌آیند [۶]:

$$\Lambda = \bar{M}^{-1} \bar{K} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، توان دوم بسامدهای مودال روی قطر اصلی ماتریس Λ جای دارند. جای‌گذاری رابطه‌های (۲) در (۳) و ساده‌سازی، رابطه (۴) را نتیجه می‌دهد [۶]:

$$\phi^T K \phi - \phi^T M \phi \Lambda = 0 \quad (4)$$

با شکل مودها (ϕ) و ماتریس جرم (M) ، ماتریس قطری v تشکیل خواهد شد [۶]:

$$v = (\phi^T M \phi)^{1/2} = \bar{M}^{1/2} \quad (5)$$

با گذاشتن ماتریس v در معادله (۴)، رابطه‌های (۶) به دست می‌آیند:

$$\phi^T K \phi - v^2 \Lambda = 0 \quad , \quad \phi^T K \phi = v^T \Lambda v \quad (6)$$

ماتریس سفتی را می‌توان با رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$K = (\phi^T)^{-1} v^T \Lambda v \phi^{-1} \quad (7)$$

با توجه به اینکه ماتریس نرمی وارون ماتریس سفتی است، رابطه کلی ماتریس نرمی سازه به این شکل است [۶]:

$$F = \phi v^{-1} \Lambda^{-1} v^{-1} \phi^T \quad (8)$$

(ϕ^{-1}) به کار رفتند. بردار نیروهای لختی مودال (f) نیز با شکل موده‌های بهنجار شده نسبت به ماتریس جرم محاسبه شد و نخستین بردارهای Ritz برای سه مود اول نمونه‌ها به دست آمدند. تغییرات نخستین بردارهای Ritz نمونه‌های تیرهای بتنی در هر گام خسارت و تقویت با ورق‌های CFRP، با شاخص خسارت پیشنهادی که در رابطه‌های زیر آمده، ارزیابی شد.

$$r_{ij} = F_{mj} \times f_{ij} \quad (12)$$

$$D_{ij} = |r_{ij} - r_{i0}| \quad (13)$$

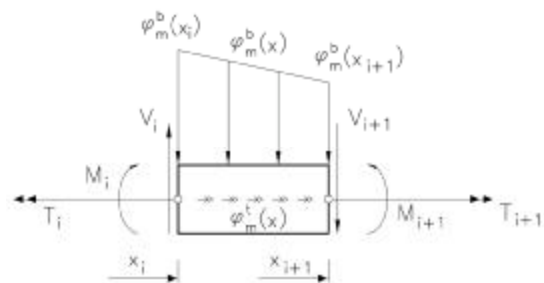
در رابطه (۱۲) r_{ij} نخستین بردار Ritz وابسته به مود ارتعاشی m ام در گام j ام خسارت، F_{mj} ماتریس نرمی مودال در گام j ام خسارت و f_{ij} بردار نیروهای لختی مودال وابسته به مود ارتعاشی m ام در گام j ام خسارت است. رابطه (۱۳) شاخص خسارت D_{ij} را که بر پایه قدر مطلق تفاوت نخستین بردارهای Ritz در گام‌های خسارت با حالت خسارت‌ندیده است، نشان می‌دهد. با شاخص خسارت D_{ij} می‌توان اثر هر یک از موده‌های ارتعاشی را در ساختن الگوی خسارت بررسی کرد. الگوی خسارت نمونه‌ها با میانگین یا روی هم‌گذاری اثر هر یک از موده‌های ارتعاشی به دست می‌آید.

برنامه آزمایش‌ها

در این پژوهش نتیجه‌های آزمایشگاهی چهار نمونه تیر بتن مسلح مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. این چهار نمونه، از میان مجموعه‌ای از آزمایش‌های ایستا و ارتعاشی که نویسندگان مقاله در آزمایشگاه سازه و دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد روی نمونه‌های تیر بتنی خسارت‌دیده و تقویت‌شده با ورق‌های CFRP انجام دادند، انتخاب شدند [۱۵، ۱۶]. این مجموعه آزمایش‌ها با توجه به آزمایش‌های Bonfiglioli و همکاران [۱۰] و Ibarra و همکاران [۱۱] انجام گرفتند و با راستی‌آزمایی نتیجه‌ها از درستی دستگاه آزمایش و سامانه دریافت داده‌ها اطمینان حاصل شد. مقاومت فشاری نمونه تیرهای بتنی در دو رده 20MPa و 50MPa اندازه‌گیری شدند. این اندازه‌گیری‌ها با آزمایش روی پنج نمونه استاندارد از هر مجموعه به دست آمدند. نمونه تیرهای بتنی با میل‌گردهای خمشی با قطر 12mm و 16mm مسلح شدند. نسبت سطح مقطع میل‌گردهای مصرفی ρ مطابق

$$r = F \times f \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، F ماتریس نرمی، f بردار وابسته به نیروهای دینامیکی و r بردار Ritz است. یادآور می‌شود، با شکل بازگشتی رابطه (۱۱)، بردار n ام Ritz به دست می‌آید. در این پژوهش با کمک نخستین بردار Ritz خسارت‌ها آشکار می‌شوند و به همین دلیل رابطه (۱۱) با شکل بازگشتی نوشته نشد. Nour-omid و Clough [۱۳] و Leger و همکاران [۱۴] نشان دادند که با تعداد محدودی از بردارهای Ritz می‌توان کمیت‌های ناشناخته مورد نظر از سازه را پیدا کرد. تا کنون بردارهای Ritz را برای آشکارسازی خسارت در تیرهای بتنی به کار نبرده‌اند. محاسبه بردارهای Ritz به چگونگی انتخاب بردار نیروهای گسترده بستگی دارد. در این پژوهش بردار نیروهای گسترده به صورت نیروهای لختی مودال در نظر گرفته شدند. بردار نیروهای لختی مودال از شکل موده‌های ارتعاشی به دست می‌آیند [۱]. شکل (۱) پخش نیروی لختی مودال را روی یک جزء تیری نشان می‌دهد. در شکل (۱) $\phi_m^b(x_i)$ و $\phi_i^b(x_i)$ به ترتیب تغییر مکان‌ها و چرخش‌های مودال ناشی از موده‌های خمشی و پیچشی هستند. پخش نیروهای لختی ناشی از موده‌های ارتعاشی، از تغییر شکل‌های مودال پیروی می‌کند. تغییر شکل‌های مودال همان بردار شکل موده‌های ارتعاشی هستند که با آزمایش به دست می‌آیند. بنابراین با کمک شکل موده‌های اندازه‌گیری‌شده می‌توان نیروهای مودال داخلی و خارجی مودال را به دست آورد. علامت‌های قراردادی نیروهای مودال به صورت شکل (۱) هستند. در شکل (۱)، M_i ، V_i و T_i به ترتیب لنگر خمشی داخلی، نیروی برشی داخلی و لنگر پیچشی داخلی مودال تیر هستند [۱].



شکل ۱: نیروهای داخلی و خارجی مودال روی بخشی از یک سازه تیری [۱].

در این مقاله، شکل موده‌های تجربی نسبت به ماتریس جرم بهنجار^۵ شدند و در رابطه (۸) به جای عبارت

خمشی تیرهای بتن مسلح با ورق‌های CFRP افزایش یافت. خاطر نشان می‌شود که این نمونه‌ها از نظر جزئیات و روش مقاوم‌سازی شبیه به نمونه‌های Ibarra و همکاران [۱۱] ساخته شدند تا راستی‌آزمایی و مقایسه نتیجه‌ها امکان‌پذیر باشد [۱۵، ۱۶]. بنابراین برای افزایش پیوستگی میان ورق CFRP و بتن از دستک‌های محدودکننده انتهایی استفاده نشد.

در جدول (۱) ویژگی‌های نمونه‌های مورد نظر درج شده است. نمونه تیرهای بتنی زیر اثر بارگذاری ایستای چهارنقطه‌ای خسارت دیدند. این خسارت‌ها به شکل گام به گام بودند. گام‌های بارگذاری بر اساس مقاومت خمشی نمونه‌ها 10kN و 5kN در نظر گرفته شد. پس از هر گام خسارت، بارها برداشته و پاسخ ارتعاشی نمونه‌ها در حالت آویزان به دست آمدند. در نمونه‌های تقویت شده، دو گام بارگذاری (وزن تیر و همان بار پیش از تقویت) درست پس از مقاوم‌سازی با CFRP وارد شده است. گام‌های بارگذاری نمونه‌ها در جدول (۲) آمده‌اند. شکل (۲) دستگاه‌های آزمایش ایستا و ارتعاشی را نشان می‌دهد.

ACI318-05 [۱۷] محاسبه شده که از ρ_{max} کمتر است. در این تیرها خاموت‌هایی به قطر 10mm به کار رفت.

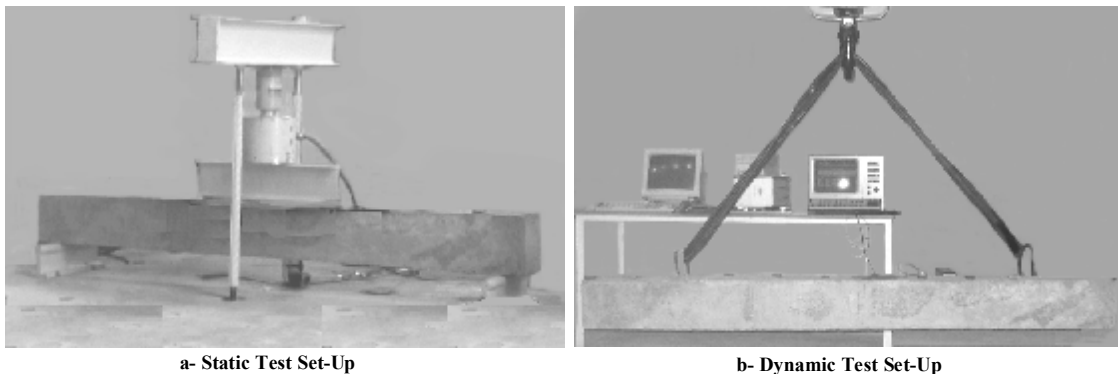
هنگامی که بار به حدود نیمی از بار نهایی رسید، مقاومت خمشی برخی از نمونه‌ها با ورق‌های CFRP (C-Sheet 240) بهبود یافت. ویژگی‌های این ورق‌های پلیمری با الیاف کربنی یک جهت با آزمایش استاندارد D3039 [۱۸] اندازه‌گیری شدند. با این آزمایش‌ها ضخامت هر لایه 0.117mm، مقاومت کششی 2845MPa و ضریب کشسانی 237GPa تعیین شد. عرض این ورق‌ها در همه نمونه‌ها یکسان و برابر با 150mm بود. این ورق‌ها با چسب Epoxy به تیرها چسبیدند. پیش از کاربرد چسب، همه ناصافی‌های سطح بتن با مته دستی و برس فلزی مخصوص از بین رفتند. پس از آن چسب Epoxy با برس و ماله پخش و ورق‌های CFRP روی آن محکم چسبانده شد. هوای میان بتن و ورق را فشار ناشی از حرکت یک غلتک پلاستیکی خارج کرد. برای پیوستگی بیشتر ورق الیاف کربنی با بتن، یک لایه چسب Epoxy روی سطح ورق به طور یکنواخت پخش شد. کمترین زمان عمل‌آوری برای چسب حدود یک هفته بود. با این کارها مقاومت

جدول ۱: ویژگی‌های نمونه تیرهای آزمایشی.

تعداد لایه‌های CFRP	خاموت‌ها	فولاد کششی	فولاد فشاری	مقاومت فشاری بتن f'_c (MPa)	ارتفاع نمونه (mm)	عرض نمونه (mm)	طول نمونه (mm)	نمونه‌ها
۰	$\Phi 10 @ 100 \text{ mm}$	$2\Phi 12$	$2\Phi 12$	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۱
۰	$\Phi 10 @ 100 \text{ mm}$	$2\Phi 16$	$2\Phi 16$	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۲
۱	$\Phi 10 @ 200 \text{ mm}$	$2\Phi 12$	$2\Phi 12$	۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۳
۱	$\Phi 10 @ 200 \text{ mm}$	$2\Phi 12$	$2\Phi 12$	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۴

جدول ۲: گام‌های بارگذاری نمونه تیرهای آزمایشی.

گام بارگذاری / نمونه‌ها	پیش از خسارت	گام ۱ (kN)	گام ۲ (kN)	گام ۳ (kN)	گام ۴ (kN)	گام ۵ (kN)	گام ۶ (kN)	گام ۷ (kN)	گام ۸ (kN)	گام ۹ (kN)	گام ۱۰ (kN)
نمونه ۱	وزن تیر	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
نمونه ۲	وزن تیر	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۶۰
نمونه ۳	وزن تیر	۱۰	۲۰	۲۵	وزن	۲۵	۴۰	۵۰	۶۰	۷۳	...
نمونه ۴	وزن تیر	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	وزن	۲۵	۳۰	۴۰



a- Static Test Set-Up

b- Dynamic Test Set-Up

شکل ۲: دستگاه‌های آزمایش ایستا و ارتعاشی.

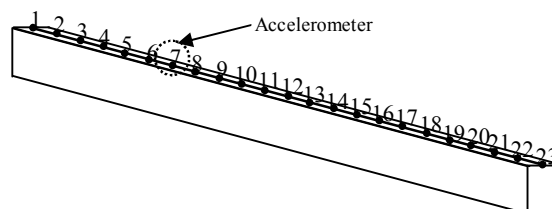
که تغییرات تنظیم‌نشده شرایط مرزی هنگام آویزان کردن نمونه‌ها در آزمایشگاه، ممکن است روی ویژگی‌های ارتعاشی آنها اثر نامطلوب بگذارد [۲۲]. در این پژوهش، نمونه‌ها با کابل‌های کشسان آویزان و پس از تنظیم شرایط مرزی، حالت تکیه‌گاهی آزاد-آزاد برای نمونه‌ها ایجاد و دقت داده‌های آزمایشگاهی تأیید شد. همچنین برای بالا بردن دقت آزمایش هر دو سیگنال تحریک و پاسخ از یک جداساز رقمی^۷ عبور کردند. داده‌های مودال در دامنه بسامدی 0-1600 Hz و با بسامد 4096 Hz دریافت شدند.

تحلیل و بررسی نتیجه‌های آزمایشگاهی

در آزمایش ارتعاشی از نسبت نیروی تحریک به پاسخ شتاب‌سنج، نمودارهای تابع پاسخ بسامدی^۸ (FRF) به دست آمدند. این نمودارها پس از دریافت از تحلیلگر رقمی دوکاناله، به کمک GPIB در حافظه رایانه ذخیره و با برنامه‌های STAR [۲۳] و MATLAB [۲۴] پردازش شدند. بسامدهای اصلی، شکل مودها و میرایی، با کاربرد روش‌های برازش منحنی روی نمودارهای پاسخ بسامدی اندازه‌گیری شدند.

در داده‌های آزمایشگاهی همیشه نوفه وجود دارد. با آویزان کردن نمونه‌ها و کاربرد جداساز می‌توان این نوفه را به کمترین مقدار خود رساند. برای حذف نوفه باقیمانده از داده‌ها، در این پژوهش به کمک بهینه‌سازی محدودیت‌دار این نوفه از شکل مودهای تجربی حذف شد [۱، ۱۵]. شکل (۴) شکل مودها را پیش و پس از حذف نوفه نشان می‌دهد.

پاسخ ارتعاشی نمونه تیرهای بتنی در دامنه بسامد و به کمک چکش ضربه و شتاب‌سنج پیزوالکتریک به دست آمدند. در آزمایش ارتعاشی، رفتار نمونه تیرهای بتنی به شکل یک‌بعدی در نظر گرفته شد. در این الگوی ریاضی درجه‌های آزادی روی محور مرکزی تیر مانند شکل (۳) تعریف شدند. شتاب‌سنج در درجه آزادی شماره ۷ قرار گرفت. شکل (۳) درجه‌های آزادی و مکان شتاب‌سنج را نشان می‌دهد.

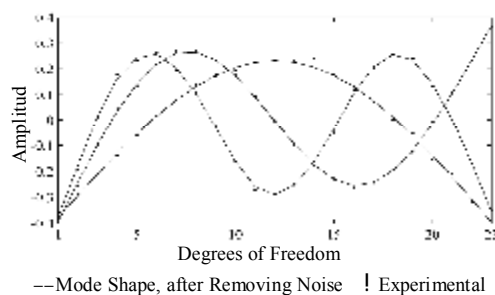


شکل ۳: مکان درجه‌های آزادی و شتاب‌سنج روی نمونه‌ها در آزمایش ارتعاشی.

برای پیشگیری از نوفه^۹ (noise) ناشی از کف آزمایشگاه در داده‌های ارتعاشی دریافتی، آزمایش ارتعاشی در حالت آویزان انجام شد [۱]. آویزان کردن نمونه‌ها یک رویه معمول در آزمایش‌های ارتعاشی تجربی است [۱۹، ۲۰، ۲۱]؛ زیرا در عمل، صلبیت تکیه‌گاه‌ها محدود است و تعریف دقیق شرایط مرزی را با دشواری رو به رو و داده‌ها را به نوفه ناشی از کف آزمایشگاه آلوده می‌کند. از این رو، پژوهشگران برای بررسی بهتر داده‌های مودال تلاش می‌کنند که عامل‌های نامطلوب را با آویزان کردن نمونه‌ها از نتیجه‌های آزمایشگاهی حذف کنند و پس از راستی‌آزمایی روش‌های پیشنهادی، به بررسی نمونه‌ها با شرایط مرزی واقعی بپردازند [۱، ۲۲]. ولی باید توجه کرد

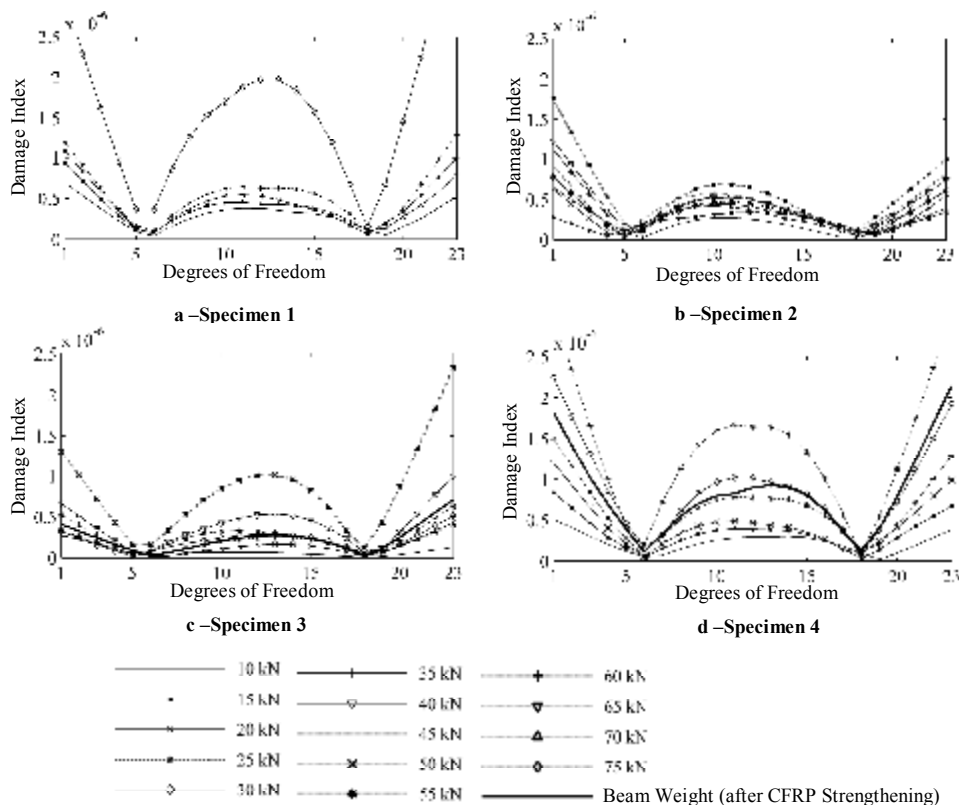
بتنی نشان می‌دهد و می‌توان تفاوت رفتاری نمونه‌ها را مشاهده کرد. نمونه ۲ پرفولادتر و سفت‌تر است و به همین دلیل ناحیه خسارت کوچک‌تری دارد. نمونه ۱ تا رسیدن به گام نهایی شکست، ترک‌های زیادی برداشت و تغییر شکل آن بیشتر بود. ناحیه خسارت نمونه ۱ از همه نمونه‌ها بیشتر است. اثر تقویت با CFRP در نمونه ۴ دیده می‌شود. در این نمونه، کوچک‌تر شدن ناحیه خسارت پس از تقویت با CFRP، گواهی بر افزایش سفتی نمونه است. در نمونه ۳ نیز پس از تقویت با CFRP، ناحیه خسارت محدود شده است [۲۵].

شکل (۵) ناحیه سهمی شکل را برای خسارت در بخش میانی تیرها پیش‌بینی می‌کند. این پیش‌بینی با نظریه‌ها و آزمایش‌هایی که روی نمونه تیرهای بتنی انجام شده، هماهنگی دارد. Ndambi و همکاران [۱۹] نیز پس از پردازش نتیجه‌های مودال آزمایشگاهی تیرهای بتن مسلح به همین نتیجه رسیدند. ناحیه‌های ترک‌خورده در تیرهای بتن مسلح با تکیه‌گاه ساده مانند شکل (۶) است.



شکل ۴: برداشتن نوفه از شکل مودهای ارتعاشی.

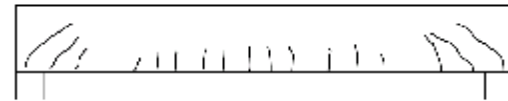
در این بخش از مقاله با استفاده از ماتریس نرمی، الگوی خسارت نمونه‌های تیرهای بتنی ارایه می‌شود و روش پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz با روش ابتکاری و Pandey و Biswas [۷] مورد مقایسه قرار می‌گیرد. الگوی خسارت نمونه‌ها که با رابطه‌های (۹) و (۱۰) محاسبه شده در شکل (۵) آمده است. الگوی خسارت روش Pandey و Biswas [۷] در شکل (۵) ناحیه خسارت و پیشروی آن را در نمونه تیر



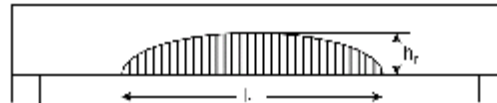
شکل ۵: الگوی خسارت نمونه‌ها با روش Pandey و Biswas [۷] در گام‌های مختلف بارگذاری.

برخی از پژوهشگران این روش را به چالش کشیدند و تلاش کردند تا با بهره گرفتن از قانون‌های ریاضی حاکم بر مسئله، روش‌های نوینی را برای آشکارسازی خسارت‌ها بر پایه ماتریس نرمی ارائه کنند [۴، ۵].

روش پیشنهادی این مقاله بر پایه بردارهای Ritz، بررسی اثر هر مود در تشکیل الگوی خسارت را امکان‌پذیر می‌کند و در یک چارچوب ریاضی قابل اثبات، خسارت‌ها آشکار می‌شوند. برای رسیدن به این هدف، با رابطه (۱۲) و نیروهای لختی مودال، نخستین بردارهای Ritz وابسته به سه مود اول ارتعاشی نمونه‌ها در گام‌های خسارت و تقویت با ورق‌های CFRP محاسبه شدند و با رابطه (۱۳) شاخص خسارت D_{ij} برای هر یک از بردارهای Ritz به دست آمد. شکل‌های (۸) و (۹) نتیجه این محاسبات را برای نمونه‌های ۱ و ۴ نشان می‌دهند. همان گونه که مشاهده می‌شود، با پیشروی خسارت‌ها، سطح زیر نمودارها افزایش می‌یابد و بردارهای Ritz وابسته به مود اول ارتعاشی در ساختن الگوی خسارت نمونه‌ها اثرگذارتر هستند. در شکل (۹-d) اندازه این ناحیه سهمی شکل پس از مقاوم‌سازی با CFRP کاهش پیدا کرده است و می‌توان اثر تقویت با ورق‌های CFRP را مشاهده کرد. محاسبه شاخص خسارت برای نمونه‌های دیگر نیز به همین نتیجه رسید. بررسی روی داده‌های تجربی و عددی نشان داده‌اند که همه بردارهای Ritz در ساختن الگوی خسارت بهره یکسانی ندارند و الگوی خسارت مورد نظر با روی هم‌گذاری اثر هر یک از بردارها به دست می‌آید [۲۷]. در این مقاله با میانگین اثر بردارهای Ritz، الگوی خسارت نمونه‌ها ساخته شد که در شکل (۱۰) به نمایش درآمده است.



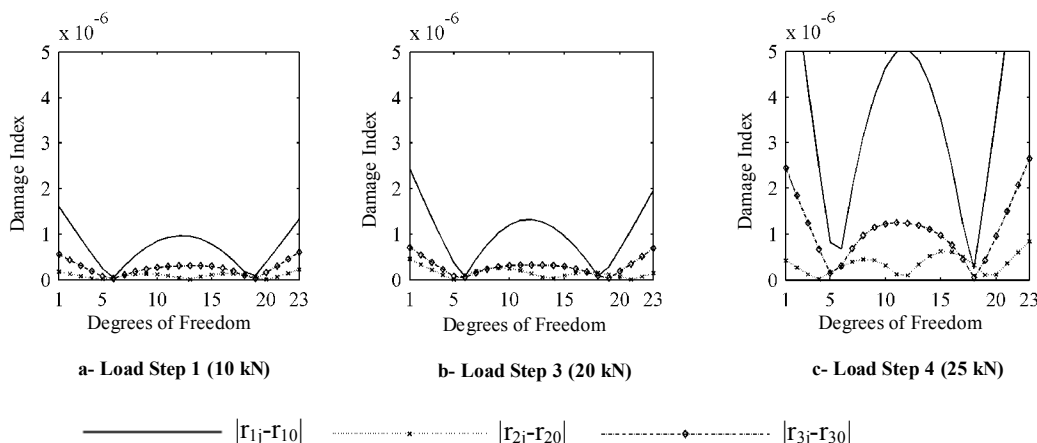
شکل ۶: ناحیه ترک‌خورده در تیر بتن مسلح روی تکیه‌گاه ساده [۱].



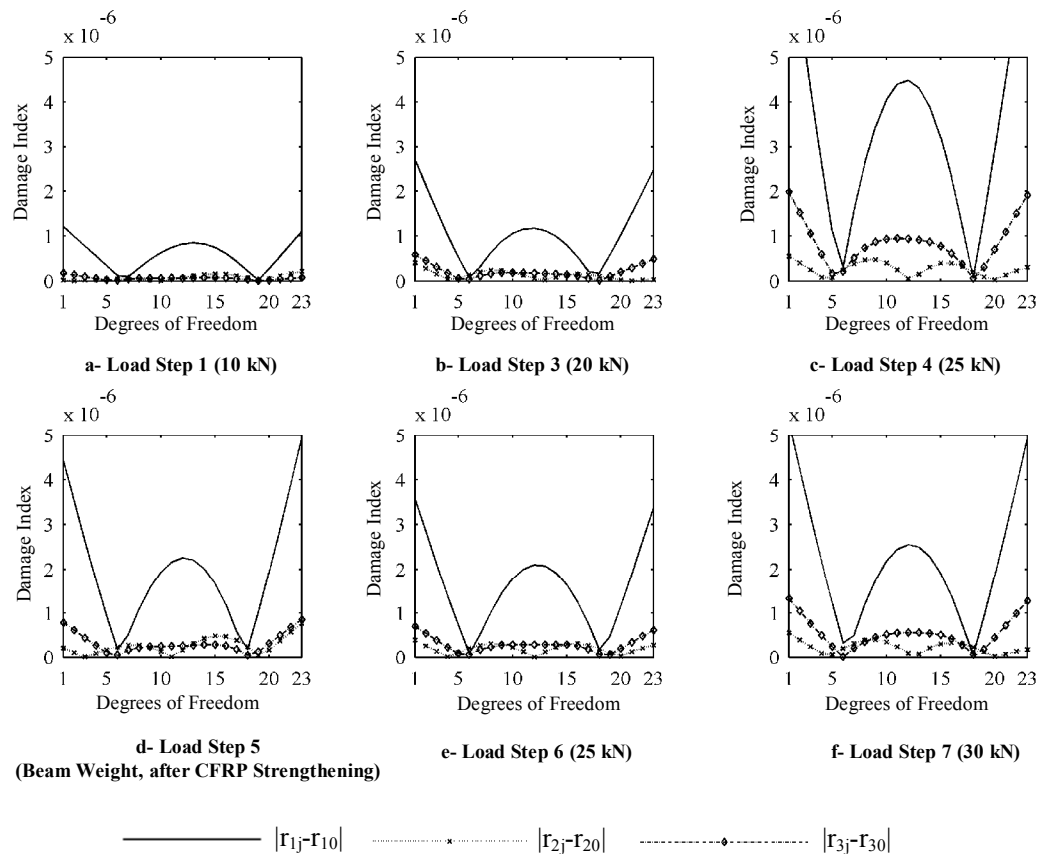
شکل ۷: الگوی پیشنهادی Eilbracht برای ناحیه ترک‌خورده در تیر بتن مسلح روی تکیه‌گاه ساده [۲۶].

در شکل (۶) سه ناحیه خسارت که ناشی از ترک‌های خمشی و برشی هستند، مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری این ناحیه‌های ترک‌خورده و بررسی آن‌ها در گام‌های خسارت، Eilbracht [۲۶] الگوی خسارتی را ارائه داده که تا به حال پایه بسیاری از پژوهش‌ها و بهنگام‌سازی‌های دینامیکی قرار گرفته است. وی از ناحیه ترک‌های برشی چشم پوشید و محل خسارت را با یک ناحیه سهمی شکل، مانند شکل (۷) در نظر گرفت. اندازه این ناحیه با دو عامل l_r و h_r و با کمک داده‌های تجربی و بهنگام‌سازی یک الگوی عددی به دست می‌آیند. با بیشتر شدن ترک‌ها، اندازه این ناحیه نیز افزایش می‌یابد. ناحیه سهمی شکل نمودارهای شکل (۵) با نظریه Eilbracht [۲۶] هماهنگ است.

الگوی خسارت شکل (۵) ترک‌های گسترده در تیرهای بتنی و اثر تقویت خمشی با ورق‌های CFRP را نشان می‌دهد، ولی نمی‌تواند اثر هر یک از مودهای ارتعاشی را در تشکیل الگوی خسارت تعیین کند. این الگو یک روش ابتکاری است و اثبات ریاضی ندارد. از این رو،



شکل ۸: آشکارسازی تغییرات سختی نمونه ۱ با کمک بردارهای Ritz.

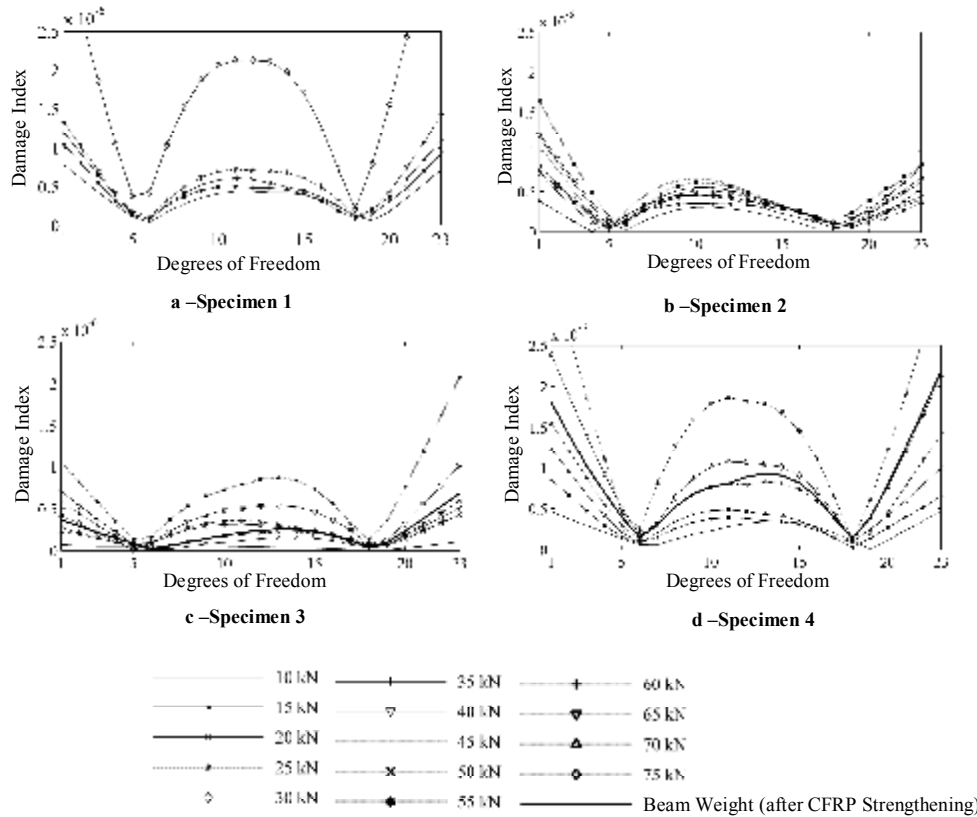


شکل ۹: آشکارسازی تغییرات سفتی نمونه ۴ با کمک بردارهای Ritz.

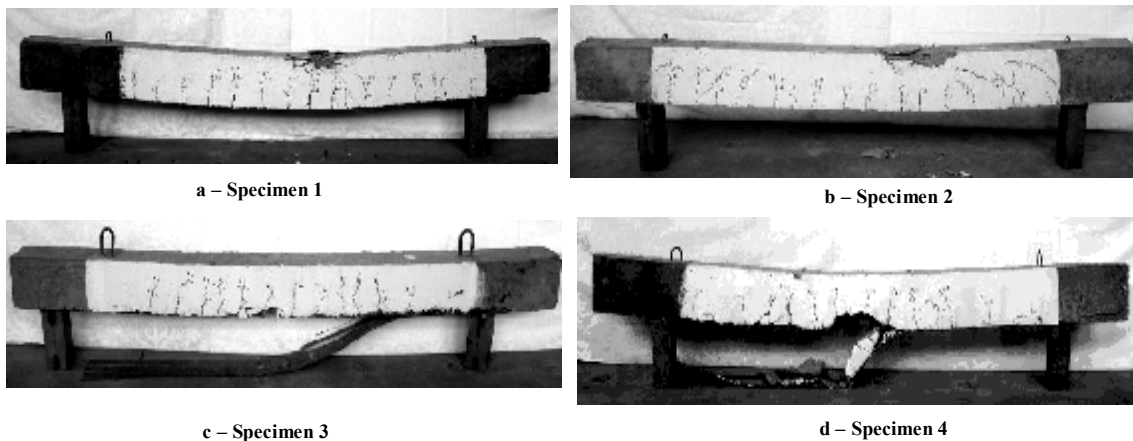
می‌توان اثر هر یک از مودهای ارتعاشی را در ساختن الگوی خسارت نمونه‌ها بررسی کرد. افزون بر این، با نظریه Eilbracht [۲۶] و فرض ناحیه سهمی شکل خسارت در بخش میانی تیر بتنی و مشاهدات تجربی هماهنگی دارد. در شکل (۱۱)، نمونه‌های مورد نظر پس از وارد کردن آخرین گام بارگذاری نشان داده شده‌اند. نمونه ۱ در بخش میانی تغییر شکل زیادی دارد و ترک‌های خمشی در آن، خسارت قابل ملاحظه‌ای ایجاد کرده‌اند. نمودارهای شکل (۱۰-ا) نیز این موضوع را نشان می‌دهند؛ در گام پیش از شکست، اندازه ناحیه خسارت نمونه ۱ افزایش چشمگیری کرده است. ترک‌ها و تغییر شکل‌های نمونه ۲ در شکل (۱۱-ب) از سایر نمونه‌ها کمتر هستند. بازتاب این رفتار در نمودارهای شکل (۱۰-ب) مشاهده می‌شود. بنا به شکل‌های (۱۱-ج) و (۱۱-د)، در نمونه‌های ۳ و ۴ که با CFRP تقویت شده‌اند، شکست از بخش میانی تیر آغاز شده و گسترش پیدا کرده است. نمودارهای (۱۰-ج) و (۱۰-د) نیز اثر تقویت و افزایش ترک‌ها را به همین صورت پیش‌بینی می‌کنند.

نمودارهای شکل (۱۰)، پیشروی ترک‌ها در نمونه‌ها، اثر تقویت با ورق‌های CFRP و تفاوت‌های رفتاری نمونه‌ها را به خوبی نشان می‌دهند. در اثر ترک‌های ناشی از بارگذاری‌های گام به گام، سطح ناحیه سهمی شکل خسارت در بخش میانی نمونه‌ها افزایش یافته است. این افزایش در همه نمونه‌ها یکسان نیست. نمونه ۲ سفت‌ترین و نمونه ۱ نرم‌ترین نمونه‌ها است. با مقایسه اندازه ناحیه خسارت در نمونه‌ها می‌توان این تفاوت‌ها را مشاهده کرد. مقاومت فشاری بتن نمونه ۳ بیشتر است و به همین دلیل ترک‌های آن از نمونه ۴ کمتر است. کوچک‌تر شدن ناحیه خسارت نمونه‌های ۳ و ۴ پس از مقاوم‌سازی با ورق‌های CFRP، افزایش سفتی نمونه‌ها را پس از مقاوم‌سازی نشان می‌دهد.

مقایسه نمودارهای شکل (۱۰) و شکل (۵)، هماهنگی میان روش پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz و روش ابتکاری Pandey و Biswas [۷] را نشان می‌دهند. روش پیشنهادی از یک چارچوب ریاضی قابل اثبات بهره‌مند است و بنا به نمودارهای شکل‌های (۸) و (۹)،



شکل ۱۰: الگوی خسارت نمونه‌ها بر اساس بردارهای Ritz در گام‌های مختلف بارگذاری.



شکل ۱۱: شکست نهایی نمونه‌ها.

نیستند. همچنین الگوی پیشنهادی مکان‌هایی را که احتمال خسارت بیشتر است، مشخص می‌کند ولی مکان دقیق خسارت‌ها را نشان نمی‌دهد. اگر شاخص‌های خسارت در هر یک از درجه‌های آزادی، متغیرهای تصادفی پنداشته شوند، می‌توان با شیوه‌های آماری این روش را بهبود داد [۲۷].

شکل‌های شکست و نمودارهای به دست آمده در این پژوهش، کارایی روش پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz را به خوبی نشان می‌دهند. شاخص خسارتی که با این روش به دست می‌آید، در ناحیه نزدیک تکیه‌گاه‌ها دچار کاستی می‌شود. در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ترک‌های برشی وجود دارند ولی تا این اندازه در کاهش سفتی موثر

نتیجه گیری

در این مقاله دو روش ارزیابی خسارت با کمک ماتریس‌های نرمی شامل روش ریاضی پیشنهادی بر پایه بردارهای Ritz و روش ابتکاری Pandey و Biswas بررسی شد. کارآیی این دو روش با داده‌های دریافتی از یک مجموعه آزمایش‌های ایستا و ارتعاشی روی نمونه‌های تیرهای بتن مسلح آزموده شد و هماهنگی آنها با نظریه‌ها و مشاهدات تجربی بررسی شد. نتیجه بررسی‌ها به این ترتیب است:

۱- هر دو روش، سه ناحیه خسارت را که ناشی از ترک‌های خمشی و برشی هستند، در طول نمونه‌های تیرهای بتنی نشان می‌دهند. ناحیه خسارت در بخش

میانی نمونه‌ها سهمی‌شکل است که اندازه آن با افزایش ترک‌ها و کاهش سفتی افزایش می‌یابد.

۲- در الگوهای خسارت مورد بحث، اثر مقاوم‌سازی خمشی با ورق‌های CFRP نیز با کاهش اندازه ناحیه سهمی‌شکل آشکار شد.

۳- با تعریف بردار نیروهای گسترده به شکل نیروهای لختی مودال، روشی نو برای به دست آوردن مکان خسارت‌ها به کمک بردارهای Ritz پیشنهاد شد. روش پیشنهادی در یک چارچوب ریاضی قابل اثبات خسارت‌ها و اثر تقویت با CFRP را آشکار و میزان مشارکت هر مود در تشکیل الگوی خسارت را مشخص می‌کند. روش پیشنهادی با نظریه Eilbracht و مشاهدات تجربی آزمایشگاهی هماهنگی دارد.

مراجع

- 1 - Maeck J. (2003). *Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring*, Ph.D. thesis, Belgium: Department of Civil Engineering, K.U.Leuven.
- 2 - Betti, R. (2005). *Dynamic Methods for damage detection in structures*, Advanced Course on dynamic methods for damage detection in structures, CISM (Center International des Sciences Mechaniques), Italy.
- 3 - Doebling, S. W., Farrar, C.R. and Prime, M. B. (1998). "A summary review of vibration-based damage identification methods." *The Shock and Vibration Digest*, Vol.30, No. 2, PP.91-105.
- 4 - Bernal, D. (2002). "Load vectors for damage localization." ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 1, PP. 7-14.
- 5 - Zonta, D., Lanaro, A. and Zanon, P. (2003). "A strain-flexibility-based approach to damage location." *Key Engineering Materials*, Vol. 245-246, PP. 87-94.
- 6 - Gao, Y., Spencer Jr., B. F. and Bernal, D. (2007). "Experimental verification of the flexibility-based damage locating vector method." ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 10, PP. 1043-1049.
- 7 - Pandey, A. K. and Biswas, M. (1994). "Damage detection in structures using changes in flexibility." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.169, No. 1, PP.3-17.
- 8 - Zhang, Z. and Aktan A. E. (1995). "The damage indices for constructed facilities." *Proceedings of the IMAC*, Vol. 13, PP. 1520-1529.
- 9 - Sohn, H. and H.Law, K. (2001). "Damage diagnosis using experimental Ritz vectors." ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 11, PP. 1184-1193.
- 10 - Bonfiglioli B., Pascale, G., and Martinez de Mingo S. (2004). "Dynamic testing of reinforced concrete beams damaged and repaired with CFRP sheets." ASCE, *J. Mater Civil Eng*, Vol. 16, No. 5, PP. 400-406.
- 11 - Ibarra J., Bonfiglioli B. and Pascale G. (2001). *Assessment of reinforced concrete beams damaged and repaired with externally bonded FRP sheets*, FinalReport_Jorge1100. Bologna (Italy): Univ. of Bologna.
- 12 - Alvandi, A. and Ceremona, C. (2006). "Assessment of vibration-based damage identification techniques." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292, No. 1, PP. 179-202.
- 13 - Nour-Omid, B. and Clough, R.W. (1984). "Dynamics analysis of structures using Lanczos coordinates." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, PP. 565-577.

- 14 - Leger, P., Wilson, E. and Clough R. W., *The use of load-dependent Ritz vectors for dynamic and earthquake analyses*, Technical Report. UBC/EERC-86/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Berkeley, California.
- 15 - Baghiee, N., Esfahani, M. R. and Moslem, K. (2009). "Studies on damage and FRP strengthening of reinforced concrete beams by vibration monitoring." *Engineering Structures*, Vol. 31, PP. 875–893.
- 16 - Baghiee, N., Esfahani, M.R. and Moslem, K. (2009). "Assessment of behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets by experimental modal data analysis." *International Journal of Engineering Science*, Iran University of Science and Technology, Vol. 19, No. 2-8, PP. 99-112.
- 17 - ACI 318-05 (2005), *Building Code Requirements for Structural Concrete (318M-05) and Commentary (318RM-05)*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
- 18 - ASTM D3039. (1995). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- 19 - Ndambi, J-M., Vantomme, J. and Harri, K. (2002). "Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives." *Engineering Structures*, Vol. 24, PP.501–15.
- 20 - Ndambi JM, Peeters B, Maeck J, De Visscher Y, Wahab M.A. and Vantomme J. (2000). "Comparison of techniques for modal analysis of concrete structures." *Engineering Structures*, Vol. 22, PP. 1159–1166.
- 21 - Maeck J, Abdel Wahab M, Peeters B, De Roeck G, De Visscher J. and De Wilde WP. (2000). "Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination." *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 10, PP. 339–349.
- 22 - Garaygordobil JCA. (2003). *Dynamic assessment of structural building components*, Ph.D. thesis. Barcelona (Spain): Department of Construction Engineering, Catalunya.
- 23 - STAR. (1990). *Structural Testing Analysis and Report*, Structural Measurement System, SMS, Version 3.1.
- 24 - MATLAB. (2004). *The language of technical computing*, Version 7, (Release 14-1).
- 25 - Baghiee, N., Esfahani, M. R., Moslem, K. and Rezaee Pazhand, J. (2009). "Structural damage identification of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets." *Proceedings of the 8th International Congress on Civil Engineering*, May 11-13, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- 26 - Eilbracht, G. (1997). *Identifikation von rissbereichen in stahlbetonblckenr mit hife von schwingungstestdaten*, Fortschritt Berichte VDI; Reihe 18, Ph.D. dissertation, Dusseldorf, Germany.
- 27 - Baghiee, N., Moslem, K., Esfahani, M. R. and Rezaee Pazhand, J. (2010). "Damage Detection in Reinforced Concrete Beams Based on the Ritz Vectors." *Proceedings of the 5th National Congress on Civil Engineering*, May 4-6, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Monitoring
- 2 - Basic Modal Parameters
- 3 - Derived Modal Parameters
- 4 - Stiffness
- 5 - Normal
- 6 - Noise
- 7 - Digital filter
- 8 - Frequency response function