ارزيابي خسارت در تيرهاي بتن مسلح به كمك ماتريس نرمي

ندا بقيعي[١], محمدرضا اصفهاني*[٢] و كاظم مسلم[٣]
[١]دانشجوي دكتري مهندسي سازه- دانشكده مهندسی - دانشگاه فردوسي مشهد
[٢]استاد گروه عمران- دانشكده مهندسی - دانشگاه فردوسي مشهد
[٣]استاديار گروه عمران- دانشكده مهندسی - دانشگاه فردوسي مشهد
(تاريخ دريافت ٨٧/٢/١, تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ٨٨/١٢/١٠, تاريخ تصويب ٨٩/٣/٢٣)

چكيده

اين مقاله به بررسي الگوي خسارت در تيرهاي بتن مسلح به كمك ماتريس نرمي مي‌پردازد. ماتريس‌هاي نرمي از داده‌هاي مودال تجربي محاسبه شدند و داده‌هاي مورد نياز با انجام آزمايش‌هاي ايستا و ارتعاشي روي نمونه‌هاي تير بتني به دست آمدند. تغييرات ماتريس نرمي با روش پيشنهادي اين مقاله بر پايه بردارهاي Ritz تعيين شد. اين روش ناحيه ترك‌خورده را به صورت سهمي در بخش مياني تير نشان مي‌دهد كه اندازه آن با پيشروي خسارت افزايش و با مقاوم‌سازي با ورق‌هاي CFRP كاهش مي‌يابد. الگوي خسارت پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz، با روش‌هايي كه كاهش سفتي تيرهاي بتني را در اثر ترك‌هاي خمشي آشكار مي‌كنند هماهنگ است و در يك چارچوب رياضي قابل اثبات، برآوردي از كاهش و افزايش سفتي در طول نمونه‌هاي تيرهاي بتني به دست مي‌دهد.

واژه‌هاي كليدي: الگوي خسارت، بسامد، تير بتن مسلح، سفتي، شكل مود، ماتريس نرمي

مقدمه

نگهداري و حفظ ايمني سازه‌هاي مهندسي در زمان بهره‌برداري، عمر مفيد سازه‌ها را افزايش مي‌دهد. با شناسايي ترك‌ها و ترميم اعضاي سازه از شكست ناگهاني كل سازه پيشگيري خواهد شد. اين كار براي سازه‌هاي زيرساختي مهم كه با گسترش شهرها بر شمار آن‌ها افزوده شده است، اهميت بيشتري دارد. به همين دليل مهندسان و پژوهشگران همواره به دنبال روش‌هايي هستند تا بتوانند به‌آساني وضعيت هر سازه را از ابتداي ساخت تا پايان بهره‌برداري ارزيابي كنند. روش‌هاي ارزيابي مخرب هزينه زيادي مي‌برند و كاربرد آن‌ها در همه‌جا امكان‌پذير نيست. روش‌هاي ارزيابي غيرمخرب مانند پرتوهاي x و فراصوتي از روش‌هاي مخرب بهتر هستند، ولي توانايي ارزيابي كل سازه را ندارند و به كمك آن‌ها تنها مي‌توان تغيير ويژگي‌هاي محلي را بررسي كرد [١]. يكي از روش‌هاي ارزيابي غيرمخرب كه كاربردهاي گسترده‌اي پيدا كرده، آزمايش ارتعاشي است.

به كمك فرابيني[١] ارتعاش‌های سازه‌ها و پردازش آن‌ها مي‌توان ويژگي بسامد، ميرايي و شكل مودها را به دست آورد و پيشروي ترك‌ها را بررسي كرد. اين ويژگي‌ها كه به مودهاي ارتعاشي وابسته‌اند و عامل‌هاي مودال بنيادي[٢] نام دارند، براي بررسي سازه مورد نظر كافي نيستند. به همين علت، پژوهشگران رويكرد ديگري را در پيش گرفته‌اند كه روش عامل‌هاي مودال يافتني[٣] نام دارد. در اين روش، با پردازش عامل‌هاي مودال بنيادي كميت‌هايي مانند انرژي كرنشي، انحناي شكل مودها و ماتريس نرمي را مي‌يابند [١].

تا كنون، روش‌هاي بسياري براي تعيين خسارت بر اساس داده‌هاي مودال پيشنهاد شده‌اند. Betti [٢] در سال ٢٠٠٥ خاطرنشان كرد كه ارائه يك راهكار براي همه سازه‌ها و براي همه موقعيت‌ها مناسب نيست و بايد بتوان با توجه به خطي و غيرخطي بودن، دامنه زماني يا بسامدي و تغييرپذيري يا تغييرناپذيري نسبت به زمان، راهكار مناسب را برگزيد. بنا به نوشته‌هاي Doebling و همكاران [٣] همه كميت‌هاي مودال حساسيت يكساني نسبت به خسارت ندارند. هنگامي كه در سازه بيش از يك ناحيه خسارت باشد، برخي از روش‌هاي ارزيابي خسارت نمي‌توانند مكان دقيق خسارت را نشان دهند. يك روش ارزيابي بايد بتواند خسارتي را كه در گام‌هاي نخست روي‌داده شناسايي و مكان‌يابي كند، برآوردي از گسترش خسارت بدهد و عمر باقي‌مانده سازه را پيش‌بيني كند. براي رسيدن به اين هدف بايد روش‌هاي ارزيابي خسارت بهبود يابند [٣]. يكي از روش‌هاي ارزيابي، بررسي تغييرات

* نويسنده مسئول : تلفن : ٨٧٦٣٣٠٣ – ٠٥١١ , فاكس : ٨٧٦٣٣٠١ – ٠٥١١ , Email: Esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

ماتريس‌هاي نرمي سازه‌ها پس از خسارت است. برخي از الگوهاي پيشنهادي بر پايه ماتريس نرمي ابتكاري هستند و بدون اثبات رياضي براي گونه ويژه‌اي از سازه‌ها پاسخ رضايت‌بخشي دارند [۴، ۵]. از اين رو در اين مقاله تلاش مي‌شود تا در يك چارچوب رياضي قابل اثبات، خسارت‌ها در تيرهاي بتن مسلح با كمك ماتريس نرمي تجربي ارزيابي شوند.

به كمك ماتريس نرمي كه از داده‌هاي تجربي محاسبه مي‌شود، مي‌توان مكان خسارت‌ها را پيدا كرد. ماتريس نرمي به تغييرات مودها در بسامدهاي پايين‌تر حساس‌تر است. بنابراين مي‌توان در آزمايشگاه با اندازه‌گيري تعداد محدودي از مودهاي ارتعاشي نخست، ماتريس نرمي را با دقت مناسبي محاسبه كرد [۶]. روش ماتريس نرمي را تا كنون پژوهشگران بسياري براي آشكارسازي خسارت به كار برده‌اند. Pandey و Biswas [۷] با بررسي تغيير ماتريس نرمي خسارت‌ها را شناسايي و مكان‌يابي كردند. Zhang و Aktan [۸] از مفهوم انحنا براي مقايسه ماتريس‌هاي نرمي در گام‌هاي خسارت بهره گرفتند. آن‌ها تغيير انحناي ستون‌هاي ماتريس نرمي را به عنوان نشان خسارت در سازه تعريف به كار بردند. ولي محاسبه دقيق انحناي ستون‌هاي ماتريس نرمي به آساني امكان‌پذير نيست و روش‌هايي مانند تفاضل محدود خطا دارند. بنابراين، بايد به دنبال روش‌هايي بود كه بدون نياز به محاسبات پيچيده و در يك چارچوب رياضي خسارت‌ها را آشكار كنند. يكي از اين روش‌ها بررسي تغييرات بردارهاي Ritz است. بردارهاي Ritz كه با كمك ماتريس نرمي به دست مي‌آيند، در ديناميك سازه‌ها برتري‌هاي نهفته فراواني دارند و از داده‌هاي مودال بنيادي در آشكارسازي خسارت‌ها كارآيي بهتري دارند [۹]. با اين همه هنوز پژوهش‌هاي اندكي براي آشكارسازي خسارت‌ها با كمك بردارهاي Ritz انجام داده‌اند. بردارهاي Ritz از حاصل ضرب ماتريس نرمي و بردار نيروهاي گسترده وارد بر سازه به دست مي‌آيند. چگونگي در نظر گرفتن بردار نيروهاي گسترده در روش‌هاي آشكارسازي خسارت بسيار با اهميت است كه در اين مقاله به آن پرداخته مي‌شود.

برنامه كار پژوهشي و نوآوري‌ها

در اين مقاله رفتار تيرهاي بتن مسلح خسارت‌ديده و تقويت‌شده با ورق‌هاي FRP به كمك داده‌هاي مودال تجربي بررسي مي‌شود. تا كنون براي بررسي پاسخ ارتعاشي نمونه تيرهاي بتني تقويت‌شده با FRP كار پژوهشي زيادی انجام نشده است. Bonfiglioli و همكاران [۱۰] و Ibarra و همكاران [۱۱] نخستين كارهاي پژوهشي را در اين زمينه انجام داده‌اند. آنها تنها تغييرات بسامدهاي ويژه و نسبت‌هاي ميرايي تيرهاي بتن مسلح را پس از خسارت و تقويت با ورق‌هاي FRP بررسي كردند و تغييرات عامل‌هايي مانند شكل مودهاي تجربي، كرنش‌هاي مودال، كارمايه كرنشي مودال و ماتريس نرمي را در نظر نگرفتند. از اين رو، در ادامه كارهاي Bonfiglioli و همكاران [۱۰] و Ibarra و همكاران [۱۱]، ميدان گسترده‌اي در برابر پژوهشگران وجود دارد كه اين مقاله گوشه‌اي از پژوهش‌هاي مورد نياز را در بر مي‌گيرد. كارهاي پژوهشي اين مقاله دو مرحله تجربي و نظري را شامل مي‌شود.

در مرحله تجربي، نمونه تيرهاي بتني با عرض۱۵۰mm، ارتفاع ۲۰۰mm و طول ۲۲۰۰mm طراحي و ساخته شدند. در طراحي نمونه‌ها و مرحله‌هاي آزمايش، پژوهش‌هاي گذشته مورد نظر قرار گرفتند. براي رسيدن به نتيجه‌هاي دقيق‌تر، هر آزمايش چندين بار تكرار شد. نمونه‌هاي تيرهاي بتني آزمايشگاهي در اثر بارهاي ايستا به صورت گام به گام خسارت ديدند. مقاومت خمشي برخي از نمونه‌ها هنگامي كه بار به حدود نيمي از بار نهايي رسيد، با كمك ورق CFRP افزايش يافت. پاسخ ارتعاشي نمونه‌ها پس از هر گام خسارت و تقويت دريافت و در حافظه رايانه ذخيره شد. داده‌هاي مودال دريافتي در مرحله نظري پردازش شدند و با كمك روش‌هاي تشخيص خسارت بر پايه ماتريس نرمي، الگوي خسارت نمونه‌هاي تيرهاي بتني بررسي و چگونگي شكست آنها پيش‌بيني شد.

اين كار پژوهشي پس از مرور جامعي بر كارهاي پژوهشگران در زمينه آزمايش مودال و روش‌هاي تشخيص خسارت برنامه‌ريزي شد و تفاوت بارز آن با كارهاي پژوهشي قبلي ارائه يك راهكار نو براي آشكارسازي خسارت‌ها در تيرهاي بتن مسلح بر پايه بردارهاي Ritz است. در اين مقاله، با تعريف بردار نيروهاي گسترده به صورت نيروهاي لختي مودال، روشي نو براي به دست آوردن مكان خسارت‌ها به كمك بردارهاي Ritz پيشنهاد مي‌شود. هماهنگي الگوي خسارت پيشنهادي با روش‌هاي

ابتکاري نشان مي‌دهد که الگوي خسارت پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz بدون نياز به محاسبات پيچيده و با يك روند رياضي قابل اثبات براي تشخيص خسارت در تيرهاي بتني خسارت ديده و تقويت شده با ورق FRP کارآيي بسيارخوبي دارد.

روش‌هاي تحليلي

روند محاسبه ماتريس نرمي را از ديدگاه نظري مي‌توان به آساني دنبال کرد. محاسبه ماتريس نرمي، به الگوي جزء محدود سازه نيازي ندارد و از رابطه‌هاي ساده معادله حرکت در ديناميك سازه‌ها به دست مي‌آيد [۶]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \qquad (۱)$$

در اين رابطه، M ماتريس جرم، C ماتريس ميرايي، K ماتريس سفتي، x بردار تغييرمکان، $\dot{x}$ بردار سرعت، $\ddot{x}$ بردار شتاب و f بردار نيرو است. با در نظر گرفتن ويژگي تعامدي شکل مودها نسبت به ماتريس جرم و سفتي[۴]، مي‌توان نوشت [۶]:

$$\overline{M} = \phi^T M \phi \quad , \quad \overline{K} = \phi^T K \phi \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\overline{M}$ ماتريس قطري جرم و $\overline{K}$ ماتريس سفتي قطري و ϕ بردار شکل مودها است. توان دوم بسامدهاي مودال از ماتريس Λ در رابطه (۳) به دست مي‌آيند [۶]:

$$\Lambda = \overline{M}^{-1}\overline{K} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، توان دوم بسامدهاي مودال روي قطر اصلي ماتريس Λ جاي دارند. جاي‌گذاري رابطه‌هاي (۲) در (۳) و ساده‌سازي، رابطه (۴) را نتيجه مي‌دهد [۶]:

$$\phi^T K \phi - \phi^T M \phi \Lambda = 0 \qquad (۴)$$

با شکل مودها (ϕ) و ماتريس جرم (M)، ماتريس قطري ν تشکيل خواهد شد [۶]:

$$\nu = \left(\phi^T M \phi\right)^{1/2} = \overline{M}^{1/2} \qquad (۵)$$

با گذاشتن ماتريس ν در معادله (۴)، رابطه‌هاي (۶) به دست مي‌آيند:

$$\phi^T K \phi - \nu^2 \Lambda = 0 \quad , \quad \phi^T K \phi = \nu^T \Lambda \nu \qquad (۶)$$

ماتريس سفتي را مي‌توان با رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$K = \left(\phi^T\right)^{-1} \nu^T \Lambda \nu \phi^{-1} \qquad (۷)$$

با توجه به اينکه ماتريس نرمي وارون ماتريس سفتي است، رابطه کلي ماتريس نرمي سازه به اين شکل است [۶]:

$$F = \phi \nu^{-1} \Lambda^{-1} \nu^{-1} \phi^T \qquad (۸)$$

رابطه (۸) اثر شکل مودها و بسامدها را روي ماتريس نرمي نشان مي‌دهد. بنا به رابطه (۸)، ماتريس نرمي با وارون توان دوم بسامدها وابسته است و بسامدهاي بالاتر روي ماتريس نرمي کمتر اثر مي‌گذارند. در عمل تنها مي‌توان تعداد محدودي از بسامدها را اندازه گرفت. از اين رو ماتريس نرمي محاسباتي خطا دارد. اگر تعداد مودهاي اندازه‌گيري‌شده از تعداد درجه‌هاي آزادي کمتر باشند، خطاي محاسباتي ماتريس نرمي را مي‌توان با ميانگين‌گيري فربنيوس (Ferbenouse norm) محاسبه کرد. محاسبه اين ميانگين براي نمونه‌هاي آزمايشگاهي نشان مي‌دهد که مي‌توان از اين خطا چشم پوشيد [۶]. خطاي محاسبه ماتريس سفتي که از وارون ماتريس نرمي به دست مي‌آيد، بيشتر است. به همين دليل، در بيشتر پژوهش‌ها روش نرمي را به کار مي‌برند.

براي پيدا کردن مکان خسارت‌ها، بايد تغيير ماتريس نرمي را در گام‌هاي خسارت بررسي و با حالت خسارت نديده مقايسه کرد. پژوهشگران روش‌هاي متفاوتي را براي بررسي اين تغييرها به کار مي‌برند. برخي از اين روش‌ها پايه نظري ندارند و تنها به صورت ابتکاري و با مشاهده و آزمايش بر داده‌هاي گوناگون پيشنهاد شده‌اند [۴، ۵]. يکي از اين روش‌هاي ابتکاري، روش Pandey و Biswas [۷] است که در آن ماتريس‌هاي نرمي پيش و پس از خسارت با يکديگر مقايسه مي‌شوند و بيشترين تغيير هر ستون از ماتريس نرمي را به عنوان شاخص خسارت در نظر مي‌گيرند. تغيير ماتريس نرمي پيش و پس از خسارت با ماتريس $[\Delta]$ تعريف مي‌شود [۷، ۱۲]:

$$[\Delta] = \left[F^d\right] - [F] \qquad (۹)$$

در اين رابطه، $[F]$ و $\left[F^d\right]$ به ترتيب ماتريس‌هاي نرمي پيش و پس از خسارت هستند. قدر مطلق بيشترين تغيير درايه‌هاي ستون j از ماتريس $[\Delta]$، که $\overline{\delta}_j$ نام دارد، از رابطه(۱۰) حاصل مي‌شود [۷، ۱۲]:

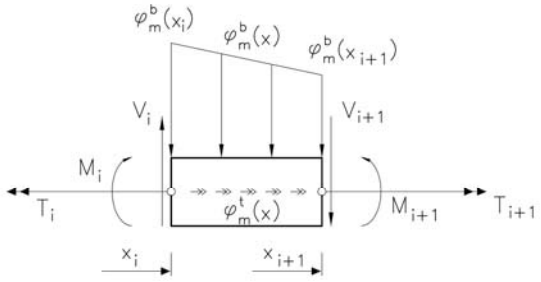
$$\overline{\delta}_j = \max\left|\delta_{ij}\right| \quad ; \quad i = 1,2,...,n \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، $\overline{\delta}_j$ خسارت را در درجه آزادي j ام مشخص مي‌کند و n تعداد درجه‌هاي آزادي است.

برخي از پژوهشگران، با کمك بردارهاي Ritz خسارت‌ها را نشان مي‌دهند [۹]. بردارهاي Ritz از حاصل‌ضرب ماتريس نرمي و بردار وابسته به نيروهاي ديناميکي (نيروهاي گسترده) محاسبه مي‌شوند [۹]:

$$r = F \times f \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، F ماتریس نرمي، f بردار وابسته به نیروهاي دینامیکي و r بردار Ritz است. یادآور مي‌شود، با شکل بازگشتي رابطه (۱۱)، بردار n ام Ritz به دست مي‌آید. در این پژوهش با کمك نخستین بردار Ritz خسارت‌ها آشکار مي‌شوند و به همین دلیل رابطه (۱۱) با شکل بازگشتي نوشته نشد. Nour-omid و Clough [۱۳] و Leger و همکاران [۱۴] نشان دادند که با تعداد محدودي از بردارهاي Ritz مي‌توان کمیت‌هاي ناشناخته مورد نظر از سازه را پیدا کرد. تا کنون بردارهاي Ritz را براي آشکارسازي خسارت در تیرهاي بتني به کار نبرده‌اند. محاسبه بردارهاي Ritz به چگونگي انتخاب بردار نیروهاي گسترده بستگي دارد. در این پژوهش بردار نیروهاي گسترده به صورت نیروهاي لختي مودال در نظر گرفته شدند. بردار نیروهاي لختي مودال از شکل مودهاي ارتعاشي به دست مي‌آیند [۱]. شکل (۱) پخش نیروي لختي مودال را روي یك جزء تیري نشان مي‌دهد. در شکل (۱) $\varphi_m^b(x_i)$ و $\varphi_t^b(x_i)$ به ترتیب تغییر مکان‌ها و چرخش‌هاي مودال ناشي از مودهاي خمشي و پیچشي هستند. پخش نیروهاي لختي ناشي از مودهاي ارتعاشي، از تغییر شکل‌هاي مودال پیروي مي‌کند. تغییر شکل‌هاي مودال همان بردار شکل مودهاي ارتعاشي هستند که با آزمایش به دست مي‌آیند. بنابراین با کمك شکل مودهاي اندازه‌گیري‌شده مي‌توان نیروهاي مودال داخلي و خارجي نمونه‌ها را به دست آورد. علامت‌هاي قراردادي نیروهاي مودال به صورت شکل (۱) هستند. در شکل (۱)، M_i، V_i و T_i به ترتیب لنگر خمشي داخلي، نیروي برشي داخلي و لنگر پیچشي داخلي مودال تیر هستند [۱].



شکل ۱: نیروهاي داخلي و خارجي مودال روي بخشي از یك سازه تیري [۱].

در این مقاله، شکل مودهاي تجربي نسبت به ماتریس جرم بهنجار[5] شدند و در رابطه (۸) به جاي عبارت (ϕv^{-1}) به کار رفتند. بردار نیروهاي لختي مودال (f) نیز با شکل مودهاي بهنجارشده نسبت به ماتریس جرم محاسبه شد و نخستین بردارهاي Ritz براي سه مود اول نمونه‌ها به دست آمدند. تغییرات نخستین بردارهاي Ritz نمونه‌هاي تیرهاي بتني در هر گام خسارت و تقویت با ورق‌هاي CFRP، با شاخص خسارت پیشنهادي که در رابطه‌هاي زیر آمده، ارزیابي شد.

$$r_{ij} = F_{mj} \times f_{ij} \qquad (۱۲)$$

$$D_{ij} = \left| r_{ij} - r_{i0} \right| \qquad (۱۳)$$

در رابطه (۱۲) r_{ij} نخستین بردار Ritz وابسته به مود ارتعاشي iام در گام زام خسارت، F_{mj} ماتریس نرمي مودال در گام زام خسارت و f_{ij} بردار نیروهاي لختي مودال وابسته به مود ارتعاشي iام در گام زام خسارت است. رابطه (۱۳) شاخص خسارت D_{ij} را که بر پایه قدر مطلق تفاوت نخستین بردارهاي Ritz در گام‌هاي خسارت با حالت خسارت‌ندیده است، نشان مي‌دهد. با شاخص خسارت D_{ij} مي‌توان اثر هر یك از مودهاي ارتعاشي را در ساختن الگوي خسارت بررسي کرد. الگوي خسارت نمونه‌ها با میانگین یا روي‌هم‌گذاري اثر هر یك از مودهاي ارتعاشي به دست مي‌آید.

برنامه آزمایش‌ها

در این پژوهش نتیجه‌هاي آزمایشگاهي چهار نمونه تیر بتن مسلح مورد بحث و بررسي قرار مي‌گیرد. این چهار نمونه، از میان مجموعه‌اي از آزمایش‌هاي ایستا و ارتعاشي که نویسندگان مقاله در آزمایشگاه سازه و دینامیك سازه دانشگاه فردوسي مشهد روي نمونه‌هاي تیر بتني خسارت‌دیده و تقویت‌شده با ورق‌هاي CFRP انجام دادند، انتخاب شدند [۱۵، ۱۶]. این مجموعه آزمایش‌ها با توجه به آزمایش‌هاي Bonfiglioli و همکاران [۱۰] و Ibarra و همکاران [۱۱] انجام گرفتند و با راستي‌آزمایي نتیجه‌ها از درستي دستگاه آزمایش و سامانه دریافت داده‌ها اطمینان حاصل شد. مقاومت فشاري نمونه تیرهاي بتني در دو رده 20MPa و 50MPa اندازه‌گیري شدند. این اندازه‌گیري‌ها با آزمایش روي پنج نمونه استاندارد از هر مجموعه به دست آمدند. نمونه تیرهاي بتني با میل‌گردهاي خمشي با قطر 12mm و 16mm مسلح شدند. نسبت سطح مقطع میل‌گردهاي مصرفي ρ مطابق

ACI318-05 [۱۷] محاسبه شده که از ρ_{max} کمتر است. در این تیرها خاموت‌هایي به قطر10mm به کار رفت.

هنگامي که بار به حدود نیمي از بار نهایي رسید، مقاومت خمشي برخي از نمونه‌ها با ورق‌هاي CFRP (C-Sheet 240) بهبود یافت. ویژگي‌هاي این ورق‌هاي پلیمري با الیاف کربني یك جهته با آزمایش استاندارد D3039 [۱۸] اندازه‌گیري شدند. با این آزمایش‌ها ضخامت هر لایه 0.117mm، مقاومت کششي 2845MPa و ضریب کشساني 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 ناصافي‌هاي سطح بتن با مته دستي و برس فلزي مخصوص از بین رفتند. پس از آن چسب Epoxy با برس و ماله پخش و ورق‌هاي CFRP روي آن محکم چسبانده شد. هواي میان بتن و ورق را فشار ناشي از حرکت یك غلتك پلاستیکي خارج کرد. براي پیوستگي بیشتر ورق الیاف کربني با بتن، یك لایه چسب Epoxy روي سطح ورق به طور یکنواخت پخش شد. کمترین زمان عمل‌آوري براي چسب حدود یك هفته بود. با این کارها مقاومت خمشي تیرهاي بتن مسلح با ورق‌هاي CFRP افزایش یافت. خاطر نشان مي‌شود که این نمونه‌ها از نظر جزئیات و روش مقاوم‌سازي شبیه به نمونه‌هاي Ibarra و همکاران [۱۱] ساخته شدند تا راستي‌آزمایي و مقایسه نتیجه‌ها امکان‌پذیر باشد [۱۵، ۱۶]. بنابراین براي افزایش پیوستگي میان ورق CFRP و بتن از دستك‌هاي محدودکننده انتهایي استفاده نشد.

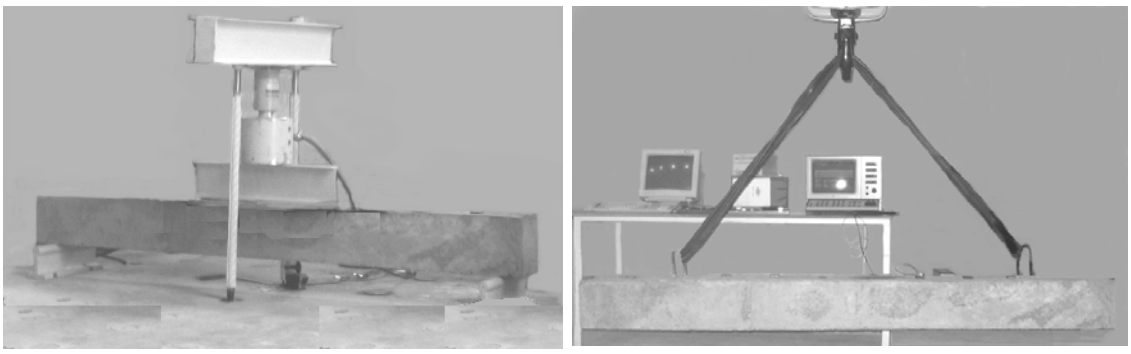
در جدول (۱) ویژگي‌هاي نمونه‌هاي مورد نظر درج شده است. نمونه تیرهاي بتني زیر اثر بارگذاري ایستاي چهارنقطه‌اي خسارت دیدند. این خسارت‌ها به شکل گام به گام بودند. گام‌هاي بارگذاري بر اساس مقاومت خمشي نمونه‌ها 10kN و 5kN در نظر گرفته شد. پس از هر گام خسارت، بارها برداشته و پاسخ ارتعاشي نمونه‌ها در حالت آویزان به دست آمدند. در نمونه‌هاي تقویت شده، دو گام بارگذاري (وزن تیر و همان بار پیش از تقویت) درست پس از مقاوم‌سازي با CFRP وارد شده است. گام‌هاي بارگذاري نمونه‌ها در جدول (۲) آمده‌اند. شکل (۲) دستگاه‌هاي آزمایش ایستا و ارتعاشي را نشان مي‌دهد.

جدول ۱: ویژگي‌هاي نمونه تیرهاي آزمایشي.

تعداد لایه‌هاي CFRP	خاموت‌ها	فولاد کششي	فولاد فشاري	مقاومت فشاري بتن f'_c (MPa)	ارتفاع نمونه(mm)	عرض نمونه(mm)	طول نمونه(mm)	نمونه‌ها
۰	Φ۱۰@۱۰۰mm	۲Φ۱۲	۲Φ۱۲	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۱
۰	Φ۱۰@۱۰۰mm	۲Φ۱۶	۲Φ۱۶	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۲
۱	Φ۱۰@۲۰۰mm	۲Φ۱۲	۲Φ۱۲	۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ۳
۱	Φ۱۰@۲۰۰mm	۲Φ۱۲	۲Φ۱۲	۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۲۰۰	نمونه ٤

جدول ۲ : گام‌هاي بارگذاري نمونه تیرهاي آزمایشي.

گام بارگذاري / نمونه‌ها	پیش از خسارت	گام ۱ (kN)	گام ۲ (kN)	گام ۳ (kN)	گام ٤ (kN)	گام ۵ (kN)	گام ٦ (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	٤۵	۵۰	٦۰
نمونه ۳	وزن تیر	۱۰	۲۰	۲۵	وزن	۲۵	٤۰	۵۰	٦۰	۷۳	...
نمونه ٤	وزن تیر	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	وزن	۲۵	۳۰	٤۰	...	...

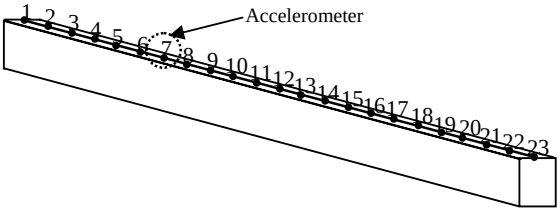


a- Static Test Set-Up

b- Dynamic Test Set-Up

شکل ۲: دستگاه‌هاي آزمايش ايستا و ارتعاشي.

پاسخ ارتعاشي نمونه تيرهاي بتني در دامنه بسامد و به كمك چكش ضربه و شتاب‌سنج پيزوالكتريك به دست آمدند. در آزمايش ارتعاشي، رفتار نمونه تيرهاي بتني به شكل يك‌بعدي در نظر گرفته شد. در اين الگوي رياضي درجه‌هاي آزادي روي محور مركزي تير مانند شكل (۳) تعريف شدند. شتاب‌سنج در درجه آزادي شماره ۷ قرار گرفت. شكل (۳) درجه‌هاي آزادي و مكان شتاب‌سنج را نشان مي‌دهد.



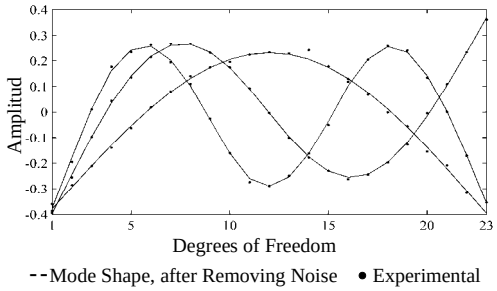
شكل ۳: مكان درجه‌هاي آزادي و شتاب‌سنج روي نمونه‌ها در آزمايش ارتعاشي.

براي پيشگيري از نوفه[۶] (noise) ناشي از كف آزمايشگاه در داده‌هاي ارتعاشي دريافتي، آزمايش ارتعاشي در حالت آويزان انجام شد [۱]. آويزان‌كردن نمونه‌ها يك رويه معمول در آزمايش‌هاي ارتعاشي تجربي است [۱۹، ۲۰، ۲۱]؛ زيرا در عمل، صلبيت تكيه‌گاه‌ها محدود است و تعريف دقيق شرايط مرزي را با دشواري رو به رو و داده‌ها را به نوفه ناشي از كف آزمايشگاه آلوده مي‌كند. از اين رو، پژوهشگران براي بررسي بهتر داده‌هاي مودال تلاش مي‌كنند كه عامل‌هاي نامطلوب را با آويزان كردن نمونه‌ها از نتيجه‌هاي آزمايشگاهي حذف كنند و پس از راستي‌آزمايي روش‌هاي پيشنهادي، به بررسي نمونه‌ها با شرايط مرزي واقعي بپردازند [۱، ۲۲]. ولي بايد توجه كرد كه تغييرات تنظيم‌نشده شرايط مرزي هنگام آويزان كردن نمونه‌ها در آزمايشگاه، ممكن است روي ويژگي‌هاي ارتعاشي آنها اثر نامطلوب بگذارد [۲۲]. در اين پژوهش، نمونه‌ها با كابل‌هاي كشسان آويزان و پس از تنظيم شرايط مرزي، حالت تكيه‌گاهي آزاد- آزاد براي نمونه‌ها ايجاد و دقت داده‌هاي آزمايشگاهي تأييد شد. همچنين براي بالا بردن دقت آزمايش هر دو سيگنال تحريك و پاسخ از يك جداساز رقمي[۷] عبور كردند. داده‌هاي مودال در دامنه بسامدي 0-1600 Hz و با بسامد 4096 Hz دريافت شدند.

تحليل و بررسي نتيجه‌هاي آزمايشگاهي

در آزمايش ارتعاشي از نسبت نيروي تحريك به پاسخ شتاب‌سنج، نمودارهاي تابع پاسخ بسامدي[۸] (FRF) به دست آمدند. اين نمودارها پس از دريافت از تحليلگر رقمي دوكاناله، به كمك GPIB در حافظه رايانه ذخيره و با برنامه‌هاي STAR [۲۳] و MATLAB [۲۴] پردازش شدند. بسامدهاي اصلي، شكل مودها و ميرايي، با كاربرد روش‌هاي برازش منحني روي نمودارهاي پاسخ بسامدي اندازه‌گيري شدند.

در داده‌هاي آزمايشگاهي هميشه نوفه وجود دارد. با آويزان كردن نمونه‌ها و كاربرد جداساز مي‌توان اين نوفه را به كمترين مقدار خود رساند. براي حذف نوفه باقيمانده از داده‌ها، در اين پژوهش به كمك بهينه‌سازي محدوديت‌دار اين نوفه از شكل مودهاي تجربي حذف شد [۱، ۱۵]. شكل (۴) شكل مودها را پيش و پس از حذف نوفه نشان مي‌دهد.

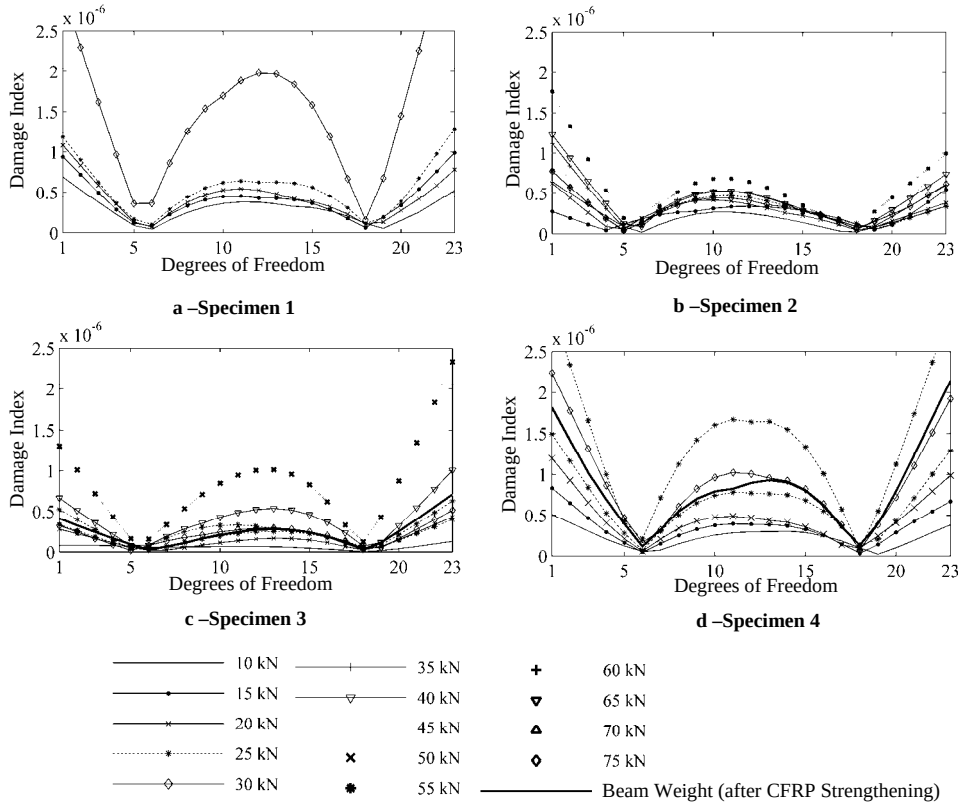


شکل ۴: برداشتن نوفه از شکل مودهاي ارتعاشي.

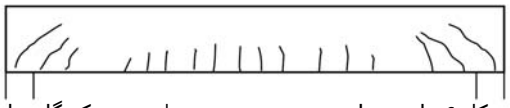
در اين بخش از مقاله با استفاده از ماتريس نرمي، الگوي خسارت نمونه‌هاي تيرهاي بتني ارايه مي‌شود و روش پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz با روش ابتكاري Pandy و Biswas [۷] مورد مقايسه قرار مي‌گيرد. الگوي خسارت نمونه‌ها كه با رابطه‌هاي (۹) و (۱۰) محاسبه شده در شكل (۵) آمده است.

الگوي خسارت روش Pandey و Biswas [۷] در شكل (۵) ناحيه خسارت و پيشروي آن را در نمونه تير بتني نشان مي‌دهد و مي‌توان تفاوت رفتاري نمونه‌ها را مشاهده كرد. نمونه ۲ پرفولادتر و سفت‌تر است و به همين دليل ناحيه خسارت كوچك‌تري دارد. نمونه ۱ تا رسيدن به گام نهايي شكست، ترك‌هاي زيادي برداشت و تغيير شكل آن بيشتر بود. ناحيه خسارت نمونه ۱ از همه نمونه‌ها بيشتر است. اثر تقويت با CFRP در نمونه ۴ ديده مي‌شود. در اين نمونه، كوچك‌تر شدن ناحيه خسارت پس از تقويت با CFRP، گواهي بر افزايش سفتي نمونه است. در نمونه ۳ نيز پس از تقويت با CFRP، ناحيه خسارت محدود شده است [۲۵].

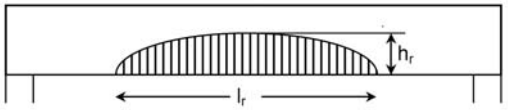
شكل (۵) ناحيه سهمي‌شكل را براي خسارت در بخش مياني تيرها پيش‌بيني مي‌كند. اين پيش‌بيني با نظريه‌ها و آزمايش‌هايي كه روي نمونه تيرهاي بتني انجام شده، هماهنگي دارد. Ndambi و همكاران [۱۹] نيز پس از پردازش نتيجه‌هاي مودال آزمايشگاهي تيرهاي بتن مسلح به همين نتيجه رسيدند. ناحيه‌هاي ترك‌خورده در تيرهاي بتن مسلح با تكيه‌گاه ساده مانند شكل (۶) است.



شكل ۵ : الگوي خسارت نمونه‌ها با روش Pandey و Biswas [۷] در گام‌هاي مختلف بارگذاري.



شکل ۶: ناحیه ترك‌خورده در تیر بتن مسلح روي تکیه‌گاه ساده [۱].

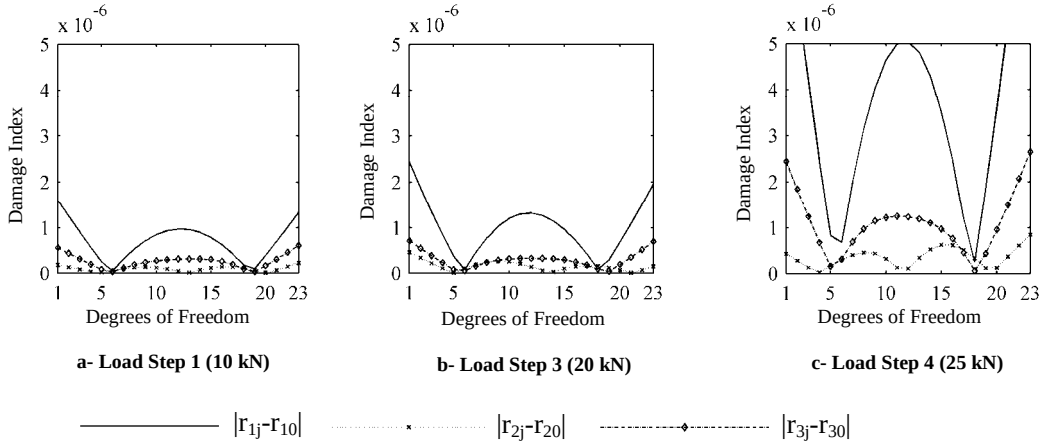


شکل۷: الگوي پیشنهادي **Eilbracht** براي ناحیه ترك‌خورده در تیر بتن مسلح روي تکیه‌گاه ساده [۲۶].

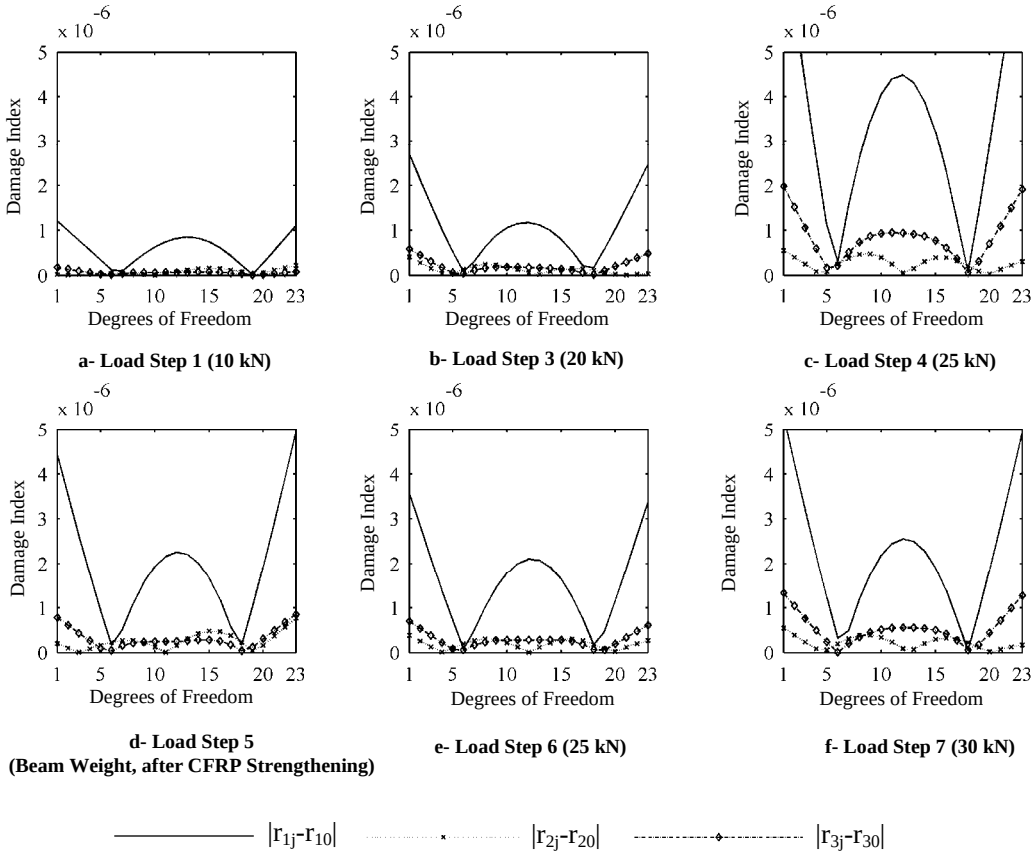
در شکل (۶) سه ناحیه خسارت که ناشي از ترك‌هاي خمشي و برشي هستند، مشاهده مي‌شود. براي اندازه‌گیري این ناحیه‌هاي ترك‌خورده و بررسي آن‌ها در گام‌هاي خسارت، Eilbracht [۲۶] الگوي خسارتي را ارائه داده که تا به حال پایه بسیاري از پژوهش‌ها و بهنگام‌سازي‌هاي دینامیکي قرار گرفته است. وي از ناحیه ترك‌هاي برشي چشم پوشید و محل خسارت را با یك ناحیه سهمي‌شکل، مانند شکل (۷) در نظر گرفت. اندازه این ناحیه با دو عامل l_r و h_r و با کمك داده‌هاي تجربي و بهنگام‌سازي یك الگوي عددي به دست مي‌آیند. با بیشتر شدن ترك‌ها، اندازه این ناحیه نیز افزایش مي‌یابد. ناحیه سهمي‌شکل نمودارهاي شکل (۵) با نظریه Eilbracht [۲۶] هماهنگ است.

الگوي خسارت شکل (۵) ترك‌هاي گسترده در تیرهاي بتني و اثر تقویت خمشي با ورق‌هاي CFRP را نشان مي‌دهد، ولي نمي‌تواند اثر هر یك از مودهاي ارتعاشي را در تشکیل الگوي خسارت تعیین کند. این الگو یك روش ابتکاري است و اثبات ریاضي ندارد. از این رو، برخي از پژوهشگران این روش را به چالش کشیدند و تلاش کردند تا با بهره گرفتن از قانون‌هاي ریاضي حاکم بر مسئله، روش‌هاي نویني را براي آشکارسازي خسارت‌ها بر پایه ماتریس نرمي ارائه کنند [۴، ۵].

روش پیشنهادي این مقاله بر پایه بردارهاي Ritz، بررسي اثر هر مود در تشکیل الگوي خسارت را امکان‌پذیر مي‌کند و در یك چارچوب ریاضي قابل اثبات، خسارت‌ها آشکار مي‌شوند. براي رسیدن به این هدف، با رابطه (۱۲) و نیروهاي لختي مودال، نخستین بردارهاي Ritz وابسته به سه مود اول ارتعاشي نمونه‌ها در گام‌هاي خسارت و تقویت با ورق‌هاي CFRP محاسبه شدند و با رابطه (۱۳) شاخص خسارت D_{ij} براي هر یك از بردارهاي Ritz به دست آمد. شکل‌هاي (۸) و (۹) نتیجه این محاسبات را براي نمونه‌هاي ۱ و ۴ نشان مي‌دهند. همان گونه که مشاهده مي‌شود، با پیشروي خسارت‌ها، سطح زیر نمودارها افزایش مي‌یابد و بردارهاي Ritz وابسته به مود اول ارتعاشي در ساختن الگوي خسارت نمونه‌ها اثرگذارتر هستند. در شکل (۹-d) اندازه این ناحیه سهمي‌شکل پس از مقاوم‌سازي با CFRP کاهش پیدا کرده است و مي‌توان اثر تقویت با ورق‌هاي CFRP را مشاهده کرد. محاسبه شاخص خسارت براي نمونه‌هاي دیگر نیز به همین نتیجه رسید. بررسي روي داده‌هاي تجربي و عددي نشان داده‌اند که همه بردارهاي Ritz در ساختن الگوي خسارت بهره یکساني ندارند و الگوي خسارت مورد نظر با روي‌هم‌گذاري اثر هر یك از بردارها به دست مي‌آید [۲۷]. در این مقاله با میانگین اثر بردارهاي Ritz، الگوي خسارت نمونه‌ها ساخته شد که در شکل (۱۰) به نمایش درآمده است.



شکل ۸: آشکارسازي تغییرات سفتي نمونه ۱ با کمك بردارهاي **Ritz** .

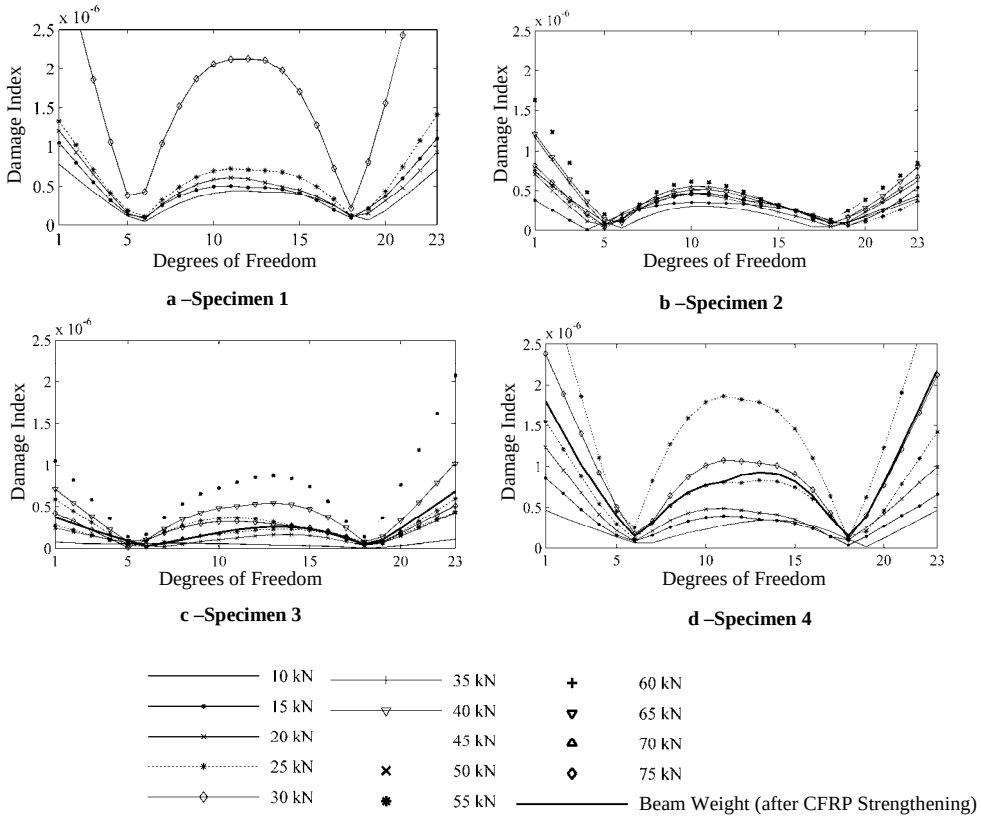


شكل ۹: آشكارسازي تغييرات سفتي نمونه۴ با كمك بردارهاي **Ritz**.

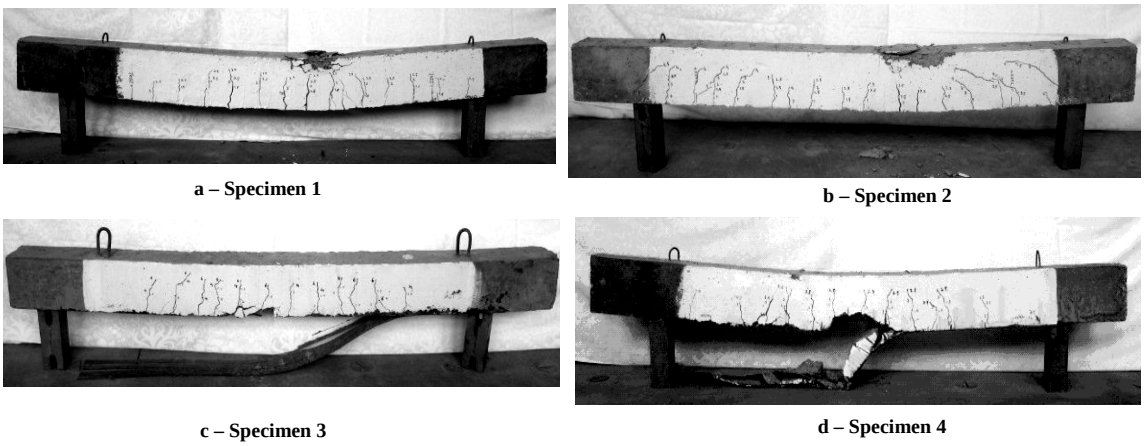
نمودارهاي شكل (۱۰)، پيشروي ترك‌ها در نمونه‌ها، اثر تقويت با ورق‌هاي CFRP و تفاوت‌هاي رفتاري نمونه‌ها را به خوبي نشان مي‌دهند. در اثر ترك‌هاي ناشي از بارگذاري‌هاي گام به گام، سطح ناحيه سهمي‌شكل خسارت در بخش مياني نمونه‌ها افزايش يافته است. اين افزايش در همه نمونه‌ها يكسان نيست. نمونه ۲ سفت‌ترين و نمونه ۱ نرم‌ترين نمونه‌ها است. با مقايسه اندازه ناحيه خسارت در نمونه‌ها مي‌توان اين تفاوت‌ها را مشاهده كرد. مقاومت فشاري بتن نمونه ۳ بيشتر است و به همين دليل ترك‌هاي آن از نمونه ۴ كمتر است. كوچك‌تر شدن ناحيه خسارت نمونه‌هاي ۳ و ۴ پس از مقاوم‌سازي با ورق‌هاي CFRP، افزايش سفتي نمونه‌ها را پس از مقاوم‌سازي نشان مي‌دهد.

مقايسه نمودارهاي شكل (۱۰) و شكل (۵)، هماهنگي ميان روش پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz و روش ابتكاري Pandey و Biswas [۷] را نشان مي‌دهند. روش پيشنهادي از يك چارچوب رياضي قابل اثبات بهره‌مند است و بنا به نمودارهاي شكل‌هاي (۸) و (۹)، مي‌توان اثر هر يك از مودهاي ارتعاشي را در ساختن الگوي خسارت نمونه‌ها بررسي كرد. افزون بر اين، با نظريه Eilbracht [۲۶] و فرض ناحيه سهمي‌شكل خسارت در بخش مياني تير بتني و مشاهدات تجربي هماهنگي دارد.

در شكل (۱۱)، نمونه‌هاي مورد نظر پس از وارد كردن آخرين گام بارگذاري نشان داده شده‌اند. نمونه ۱ در بخش مياني تغيير شكل زيادي دارد و ترك‌هاي خمشي در آن، خسارت قابل ملاحظه‌اي ايجاد كرده‌اند. نمودارهاي شكل (۱۰-a) نيز اين موضوع را نشان مي‌دهند؛ در گام پيش از شكست، اندازه ناحيه خسارت نمونه ۱ افزايش چشمگيري كرده است. ترك‌ها و تغيير شكل‌هاي نمونه ۲ در شكل (۱۱-b) از ساير نمونه‌ها كمتر هستند. بازتاب اين رفتار در نمودارهاي شكل (۱۰-b) مشاهده مي‌شود. بنا به شكل‌هاي (۱۱-c) و (۱۱-d)، در نمونه‌هاي ۳ و۴ كه با CFRP تقويت شده‌اند، شكست از بخش مياني تير آغاز شده و گسترش پيدا كرده است. نمودارهاي (۱۰-c) و (۱۰-d) نيز اثر تقويت و افزايش ترك‌ها را به همين صورت پيش‌بيني مي‌كنند.



شكل ١٠: الگوي خسارت نمونه‌ها بر اساس بردارهاي Ritz در گام‌هاي مختلف بارگذاري.



شكل ١١: شكست نهايي نمونه‌ها.

شكل‌هاي شكست و نمودارهاي به دست آمده در اين پژوهش، كارآيي روش پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz را به خوبي نشان مي‌دهند. شاخص خسارتي كه با اين روش به دست مي‌آيد، در ناحيه نزديك تكيه‌گاه‌ها دچار كاستي مي‌شود. در نزديكي تكيه‌گاه‌ها ترك‌هاي برشي وجود دارند ولي تا اين اندازه در كاهش سفتي موثر نيستند. همچنين الگوي پيشنهادي مكان‌هايي را كه احتمال خسارت بيشتر است، مشخص مي‌كند ولي مكان دقيق خسارت‌ها را نشان نمي‌دهد. اگر شاخص‌هاي خسارت در هر يك از درجه‌هاي آزادي، متغيرهاي تصادفي پنداشته شوند، مي‌توان با شيوه‌هاي آماري اين روش را بهبود داد [٢٧].

نتيجه‌گيري

در اين مقاله دو روش ارزيابي خسارت با كمك ماتريس‌هاي نرمي شامل روش رياضي پيشنهادي بر پايه بردارهاي Ritz و روش ابتكاري Pandey و Biswas بررسي شد. كارآيي اين دو روش با داده‌هاي دريافتي از يك مجموعه آزمايش‌هاي ايستا و ارتعاشي روي نمونه‌هاي تيرهاي بتن مسلح آزموده شد و هماهنگي آنها با نظريه‌ها و مشاهده‌های تجربي بررسي شد. نتيجه بررسي‌ها به اين ترتيب است:

۱- هر دو روش ، سه ناحيه خسارت را كه ناشي از ترك‌هاي خمشي و برشي هستند، در طول نمونه‌هاي تيرهاي بتني نشان مي‌دهند. ناحيه خسارت در بخش مياني نمونه‌ها سهمي‌شكل است كه اندازه آن با افزايش ترك‌ها و كاهش سفتي افزايش مي‌يابد.

۲- در الگوهاي خسارت مورد بحث، اثر مقاوم‌سازي خمشي با ورق‌هاي CFRP نيز با كاهش اندازه ناحيه سهمي‌شكل آشكار شد.

۳- با تعريف بردار نيروهاي گسترده به شكل نيروهاي لختي مودال، روشي نو براي به دست آوردن مكان خسارت‌ها به كمك بردارهاي Ritz پيشنهاد شد. روش پيشنهادي در يك چارچوب رياضي قابل اثبات خسارت‌ها و اثر تقويت با CFRP را آشكار و ميزان مشاركت هر مود در تشكيل الگوي خسارت را مشخص مي‌كند. روش پيشنهادي با نظريه Eilbracht و مشاهدات تجربي آزمايشگاهي هماهنگي 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 stahlbetonblkenr 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.

واژه‌هاي انگليسي به ترتيب 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