بررسی کرنش‌های مودال با روش اسپلاین در ارزیابی خسارت تیرورق فلزی پل I40

احمد شاکری[۱]، ندا بقیعی[۲*]

[۱]ایران، قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، گروه مهندسی عمران، کدپستی ۹۴۷۷۱۷۷۸۷۰،دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

[۲*]ایران، قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، گروه مهندسی عمران، کدپستی ۹۴۷۷۱۷۷۸۷۰، استادیار

*n.baghiee@qiet.ac.ir**

چکیده

امروزه با توجه به اهمیت و هزینه‌های بالای ساخت، بسیاری از بناهای مهم و حیاتی هنوز در حال بهره‌برداری و استفاده مداوم می‌باشند. این سازه‌ها در طول عمر خود با آسیب‌های گوناگونی رو به رو می‌شوند که بعضی از آنها قابل روئیت و شناسایی و برخی دیگر غیرقابل روئیت می‌باشند. عدم شناسایی این آسیب‌ها باعث به وجود آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی می‌شود. بنابراین، برای کاهش هزینه‌های بررسی و پیشگیری از هدر رفت زمان، در زمینه ارزیابی خسارت در چند دهه گذشته تحقیقات و کارهای پژوهشی-آزمایشگاهی بسیاری انجام شده است. این خسارت‌ها در سازه‌ها، سبب تغییر در ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها مانند سختی و میرایی می‌شود. مقاله پیش‌رو به بررسی حالت‌های مودی سازه و انرژی کرنشی مودال می‌پردازد. با توجه به محدودیت تعداد سنسورهای موجود در سازه‌ها، موقعیت آسیب دارای خطاهای اندازه‌گیری بوده و به طور دقیق مشخص نمی‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش درون‌یابی اسپلاین مکعبی و افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری بر در نرم‌افزار MATLAB کرنش‌های مودال محاسبه می‌شوند. در ادامه با روش انرژی کرنشی اقدام به شناسایی موقعیت آسیب در تیر فلزی مشخص و آستانه خسارت در نمودارها تعریف می‌شود. داده‌های مورد استفاده این مقاله شامل داده‌های آزمایش‌های ارتعاشی پل واقعی I ۴۰ هستند. با این داده‌ها، بر اساس روش‌های انرژی کرنشی مودال خسارت‌ها در تیرورق فولادی پل I ۴۰ شناسایی می‌شوند.

کلمات کلیدی: ارزیابی خسارت؛ اسپلاین مکعبی؛ انرژی کرنشی؛ آنالیز مودال.

۱- مقدمه

تمامی سازه‌های فلزی و بتنی به مرور زمان و به دلیل وارد شدن بارهای جانبی شامل باد، زلزله، ارتعاشات پیش‌بینی نشده، شرایط محیطی، عوامل آسیب‌زای داخلی و خارجی از قبیل خوردگی فلز و میلگرد، فرسایش و تخریب سطحی و عمقی بتن به دلیل نفوذ آب ، یخزدگی و ... باعث کاهش طول عمر مفید سازه و ایجاد خسارت و کاهش کارائی سازه می‌شود. بررسی سلامت سازه‌ها و

شناسائی آسیب در سه دهه گذشته به یکی از موضوعات مهم در مقالات و پژوهش‌های علمی تبدیل شده است. یکی از بهترین روش‌های پایش سلامت سازه‌ها، روش کنترل و وارسی پاسخ ارتعاشی سازه می‌باشد. یکی از این روش‌ها شناسایی آسیب با روش‌های پردازش سیگنال‌ها است. در حقیقت، با پردازش سیگنال پاسخ سازه در دامنه زمان یا بسامد خسارت‌ها ارزیابی می‌شوند. از نخستین پژوهش‌ها در زمینه ارزیابی خسارت‌ها را کاولی و آدامس [۱] در سال ۱۹۷۹ روی ورق مستطیلی شکل آلومینیومی انجام دادند و بسامدهای ۶ مود ارتعاش پیش و پس از خسارت را مقایسه کردند. پس از خسارت مقدار بسامدها در اثر خسارت کاهش پیدا کرد. ولی، شدت خسارت پیش‌بینی شده در ورق با مقدار واقعی خسارت ایجاد شده تفاوت زیادی داشت. گادمانسون [۲] در سال ۱۹۸۲ تغییرات بسامدهای تشدید را در اثر ترک ایجاد شده در سازه مورد بررسی قرارداد. تغییرات بسامدهای تشدید نشان دهنده وابستگی به کارمایه کرنشی بودند. در پژوهش گادمانسون [۲]، نتیجه‌ها آزمایشگاهی و عددی بود. این روش برای تغییرات هندسی کوچک ناشی از ترک پیشنهاد شد و برای تغییرات حداکثر تا ۱۰٪ به اثبات رسید.

روش ارزیابی خسارت بر اساس شکل مود و کنترل انرژی کرنشی از جمله روش‌های بررسی شده چند دهه اخیر می‌باشد. کیم و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۲ اقدام به شناسایی آسیب در سازه‌های تیر شکل کردند و کارآیی روش مبتنی بر فرکانس را در مقابل روش مبتنی بر حالت شکل مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۵ الوندی و همکاران [۴] به ارزیابی روش‌های شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش پرداختند. آنها مدل یک تیر دو سر ساده را بر اساس روش انرژی کرنشی و تعیین آستانه خسارت بررسی و نتایج را تحلیل کردند.

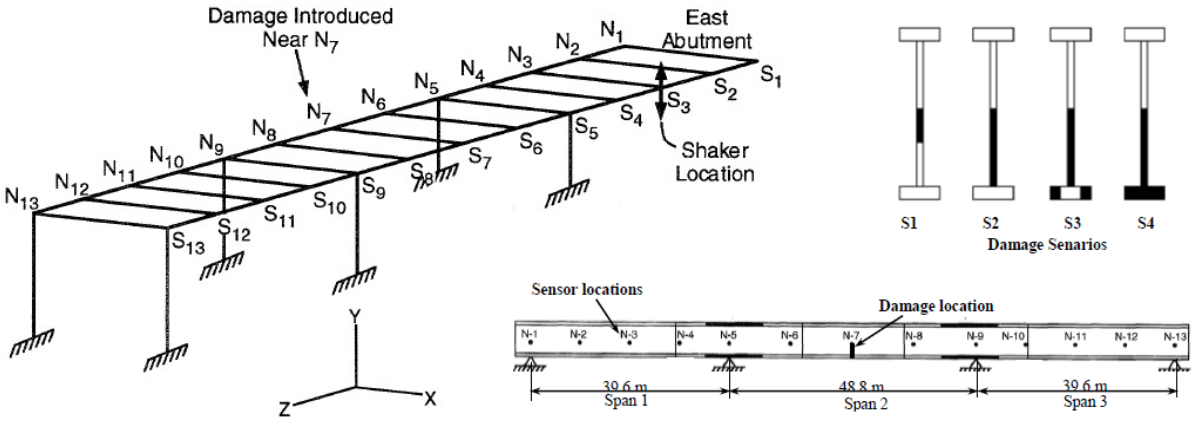
در روش ارزیابی آسیب مبتنی بر آنالیز مودال و انرژی های کرنشی می‌توان خسارات جزئی را بر اساس درونیابی و افزایش نقاط کنترلی تعیین کرد و آستانه خسارت هر نمودار را مشخص ساخت. از جمله مقالات مرتبط در این خصوص را می‌توان به مقاله بقیعی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۵]، ژنهوا و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۶]، راکا در سال ۲۰۱۱ [۷]، عاطف اراکی و همکاران در ۲۰۱۵ [۸]، وای لی ۲۰۱۰ [۹] اشاره داشت. مقاله حاضر به بررسی حالت‌های مودی سازه و انرژی کرنشی مودال پل I-40 می‌پردازد. با توجه به محدودیت تعداد سنسورهای موجود در آزمایش‌ها، با کمک روش درون‌یابی اسپلاین مکعبی و افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری بر در نرم‌افزار MATLAB کرنش‌های مودال محاسبه می‌شوند. در ادامه با روش انرژی کرنشی و تعریف آستانه خسارت در نمودارها اقدام به شناسایی موقعیت آسیب در تیرورق فلزی پل I-40 خواهد شد.

۲- تعریف هندسه مدل پل I ۴۰،مطالعات میدانی و بررسی نتایج

در این تحقیق، برای ارزیابی امکان‌سنجی روش مبتنی بر آنالیز مودال و روش ارزیابی خسارت مبتنی بر انرژی کرنشی، داده‌های میدانی از آسیب شبیه‌سازی‌شده بر روی پل I ۴۰ بر روی رودخانه ریوگراند استفاده می‌شود[10]. پل های I ۴۰ بر فراز ریو گرانده در نیومکزیکو، در سال ۱۹۹۳ تخریب شده و با یک پل جدید جایگزین گردید. دهانه های هر پل شامل یک عرشه بتنی بود که توسط دو تیر ورق فولادی پشتیبانی می شد. تیرهای فرعی بارها را از عرشه به تیرورق‌ها از طریق تیرهای کف واقع در فواصل ۶٫۰۹۶ متری (۲۰ فوت) منتقل می کردند. در طول تابستان سال ۱۹۹۳، دانشگاه ایالتی نیومکزیکو و آزمایشگاه ملی لوس آلاموس برای شبیه‌سازی رشد ترک خستگی در تیرورق اصلی یکی از پل‌ها، آسیب‌های متوالی را به پل معرفی کردند تا روش‌های مختلف شناسایی آسیب را آزمایش کنند. برای شبیه‌سازی ترک‌خوردگی خستگی در پل، چهار سطح آسیب به دهانه میانی تیر صفحه شمالی وارد شد. مطابق شکل شماره (۱). آسیب با ایجاد برش‌های مختلف در جان و فلنج تیرورق ایجاد گردید. در این مقاله از داده‌های جمع‌آوری‌شده از سطوح اول تا دوم خسارت و مودهای اول تا سوم مذکور برای ارزیابی کاربرد میدانی روش‌های شناسایی خسارت استفاده شده است.

روی پل‌های I ۴۰ مجموعه‌ای از آزمایش‌های ارتعاش اجباری بر روی سازه قبل از هر گونه آسیب ساختگی، انجام شد. برای هر سناریوی آسیب متوالی، آزمایش ارتعاش اجباری تکرار شد. منبع تحریک یک لرزاننده هیدرولیک متشکل از یک جرم واکنشی ۹۶٫۵۲۶ کیلونیوتن بود. نیروی ورودی توسط یک محرک هیدرولیکی ۹٫۷۸۶۱ کیلونیوتن که در زیر مرکز جرم پیچ شده بود، تامین می‌شد. یک ژنراتور سیگنال تصادفی مربوطه را تولید می‌کرد. یک شتاب‌سنج نصب شده روی جرم واکنش برای اندازه‌گیری تاریخچه نیروی ورودی-زمان استفاده شد. تاریخچه‌های زمانی شتاب خروجی در جهت عمودی با ۱۱ شتاب‌سنج Endevco ۷۷۵۱-۵۰۰ اندازه‌گیری شد. شتاب‌سنج ها بر روی شبکه داخلی تیرورق در ارتفاع وسط تیرورق با فاصله اسمی ۴٫۸۷۶۸ متر (۱۶ فوت) نصب شدند (شکل

(۱)). از آنجایی که داده های مودال برای وضعیت آسیب ندیده و آسیب دیده پل در دسترس است، نیازی به ساخت یک مدل عددی از پل مورد نظر نیست. در این مقاله سناریوهای آسیب یک و دو مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. پل I40 به همراه مراحل آسیب اعمال شده و موقعیت سنسورها [10].

۳- روش ترکیبی مود-انرژی کرنشی برای تشخیص آسیب

در این بخش روش پیشنهادی برای تشخیص آسیب در تیرورق فولادی پل I ۴۰ گام به گام انجام و شرح داده می شود.

۳-۱- تحلیل مودال و گسترش اشکال مود

نخستین گام شناسایی، به دست آوردن شکل‌های مودی و بسامدهای طبیعی سازه است. مانند هر روش تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش، به اطلاعات معینی در مورد وضعیت آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده نیاز دارد. اگر ساختار مورد تجزیه و تحلیل در شرایط آزمایشگاهی قابل بررسی باشد، می‌توان آنالیز مودال تجربی (EMA) را انجام داد. یک نیروی ورودی کنترل‌شده و اندازه‌گیری شده به سازه اعمال می‌شود و پاسخ دینامیکی در نقاط اندازه‌گیری خاص برای به دست آوردن بسامدهای طبیعی و شکل‌های حالت نرمال شده جرمی تجزیه و تحلیل می‌شود. اگر سازه بزرگ باشد و تحت بارهای خدماتی (پل ها، دکل ها و غیره) باشد، آنگاه می‌توان یک تحلیل مودال عملیاتی (OMA) انجام داد. در این حالت، نیروهای برانگیختگی محیط ناشناخته هستند. اگر نیروی تحریک مشخص باشد، می‌توان یک شناسایی زیرفضای تصادفی ترکیبی (CSSI) انجام داد و شکل‌های مودی مقیاس‌شده را به‌دست آورد. با توجه به ساختار سازه مورد بررسی در این مقاله و فاصله کم نقاط اندازه‌گیری، برای به دست آوردن موقعیت خرابی لازم است تعداد نقاط اندازه‌گیری افزایش داده شود.

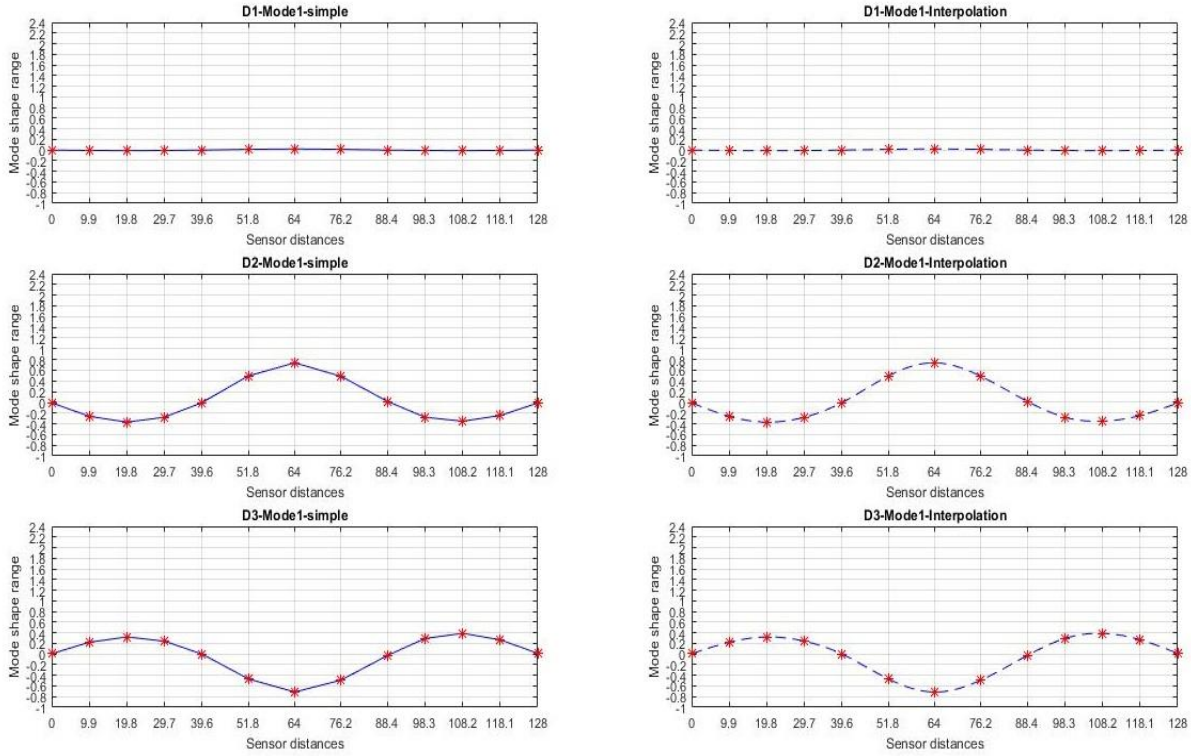
۳-۲- درونیابی و کاهش نویز اشکال مود

یکی دیگر از مسائل مهم در هنگام تجزیه و تحلیل اشکال مود، کاهش اثر نویز تجربی است. شکل‌های مود آزمایشی همواره تحت تأثیر نویز قرار می گیرند. بنابراین همیشه نوعی بی نظمی در داده‌ها وجود دارد. این رفتار نامطلوب بر روش‌های تحلیلی تأثیر می‌گذارد و در نهایت می‌تواند منجر به عدم شناسایی تأثیر آسیب روی سختی سازه شود. برای کاهش این اثر، می‌توان از روش‌های هموارسازی بهره گرفت. با این روش‌ها نقاط اوج محلی ناشی از نویز تجربی بدون تأثیر بر روند محلی که می‌تواند ناشی از آسیب باشد، حذف می‌شوند. زیرا، انتظار نمی‌رود که آسیب فقط یک نقطه اوج محلی ایجاد کند. در این مقاله برای حذف نویز تجربی از روش‌های هموارسازی نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. در یکی از این روش‌ها با استفاده از رویکرد کمترین مربعات درجه دوم وزنی در هر

مکان از شکل مود اصلی با در نظر گرفتن یک دهانه شامل ده نقطه همسایه در مرکز آن مکان انجام می شود. وزن رگرسیون برای هر نقطه داده در دهانه با تابع مکعب (۱) زیر داده می شود:

$$Wi = \left(1 - \left(\frac{x - xi}{dx} - i\right)^3\right)^3 \quad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (۱)$$

که در آن Wi وزن نقطه i در دهانه در نظر گرفته شده، x محل نقطه ای است که باید هموار شود، xi محل نقطه i و dx طول فیزیکی دهانه است. شکل (۲) نشان می دهد که چگونه تکنیک هموارسازی نویز تجربی را در شکل های مود به دست آمده برای یکی از سناریوهای آسیب کاهش می دهد.



شکل ۲. هموار سازی شکل‌های مودی بر اساس نقاط مشخص.

از آنجایی که بررسی انرژی کرنشی به مقدار قابل توجهی از نقاط برای سیگنال ورودی نیاز دارد تا ضرایب معنی‌دار و نتایج واضح به دست آید، کاهش نقاط اندازه‌گیری مورد نیاز یک چالش بزرگ در هنگام اعمال برای تشخیص آسیب است. اگر تعداد نقاط اندازه گیری آزمایشی به اندازه کافی زیاد نباشد، ممکن است بین مقادیر آزمایشی یک درونیابی انجام شود. در این مقاله از یک روش درون‌یابی اسپلاین مکعبی استفاده شد. شکل (۲) نشان می دهد که با افزایش نقاط درون‌یابی نمودار واقعی‌تر و میزان خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. فرآیند درون‌یابی شکل مود حاصل را به خودی خود هموار می‌سازد. ولی، برای محاسبه کرنش‌های مودال خطای زیادی ایجاد می‌کند. بنابراین، شیوه هموارسازی که پیشتر بر اساس رگرسیون حداقل مربعات زمانی توضیح داده شد، همیشه کارساز نیست. به همین دلیل از روش‌های دیگری مانند اسپیلاین مکعبی استفاده می‌شود. اگر نقاط اندازه‌گیری به طور یکنواخت در طول سازه توزیع نشده باشند، می‌توان از درون‌یابی برای به دست آوردن بردارهای شکل مود صاف با اجزای پراکنده یکسان استفاده کرد. روش درون‌یابی همچنین می تواند به عنوان ابزاری برای نادیده گرفتن نقاط اندازه‌گیری که در آن نقاط اوج نامطلوب برای اشکال مود به دست می آید و به وضوح به عنوان نمونه های پر از نویز شناسایی می‌شوند، استفاده شود. هنگام نادیده گرفتن یک نقطه اندازه گیری، نمونه های به دست آمده ممکن است به طور یکنواخت توزیع نشوند، بنابراین همان طور که شرح داده شد، می‌توان از روش درون‌یابی اسپیلاین برای کاهش نویز و به دست آوردن کرنش‌های مودال استفاده کرد.

۳-۳- شناسایی خسارت بر اساس انرژی کرنشی مودال

در این مقاله، مفاهیم انرژی کرنش مودال غیر مبتنی بر مدل اجزای محدود برای تیر پل به کار می‌روند و حالت‌های ارتعاش خمشی تیرها در نظر گرفته شده است. از معادله انرژی کرنشی برنولی-اویلر استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن یک تیر سه بعدی به طول L ، انرژی کرنشی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$U=\frac{1}{2}\int_0^L\left[EI_Z(x)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)^2+EI_y(x)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2+EA(x)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+GJ_x(x)\left(\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)^2\right]dx \qquad (۲)$$

که در آن w،u و v به ترتیب جابجایی ها در جهت های x، y و z هستند. در معادله (۲) ψ، جابجایی چرخشی حول محور x است. EI_z و EI_y به ترتیب نشان دهنده سختی خمشی در مورد محورهای z و y هستند. EA و GJ_x سختی طولی و پیچشی هستند. در این مطالعه که صلبیت خمشی حول محور z در نظر گرفته شده است، تنها عبارت اول معادله (۲) استفاده می شود و EI_z به صورت زیر با EI جایگزین می شود[4]:

$$U=\frac{1}{2}\int_0^L\left[\int_0^L EI_Z(x)\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)^2\right]dx \qquad (۳)$$

انرژی‌های کرنشی مودال مرتبط با شکل مود ϕ_i، قبل و بعد از آسیب با کمک معادلات (۴) و (۵) ارائه می‌شوند[4]:

$$U_i=\frac{1}{2}\int_0^L\left[EI(x)\left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2\right]dx \qquad (۴)$$

$$U_i^*=\frac{1}{2}\int_0^L\left[EI^*(x)\left(\frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2}\right)^2\right]dx \qquad (۵)$$

در این معادلات، ستاره‌ها سختی، انرژی کرنش و بردار ویژه سازه آسیب دیده را مشخص می‌کنند. با استفاده از قضیه مقدار میانگین تعمیم یافته، وقتی f پیوسته و g غیرمنفی و انتگرال پذیر باشد، می‌توان نوشت[4]:

$$\exists x\in[a,b]\int_a^b f(u)g(u)du=f(\hat{x})\int_a^b g(u)du \qquad (۶)$$

با فرض اینکه EI در طول تیر برای هر دو حالت آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده ثابت است و با استفاده از معادله (۶) می‌توان معادله‌های (۷) و (۸) را به ترتیب زیر مرتب کرد[4]:

$$U_i=\frac{1}{2}EI\int_0^L\left[\left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2\right]dx \qquad (۷)$$

$$U_i^*=\frac{1}{2}EI^*\int_0^L\left[\left(\frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2}\right)^2\right]dx \qquad (۸)$$

با در نظر گرفتن $(EI^*\approx EI)$، تغییر انرژی کرنش مدال نسبی پیش و پس از حالت‌های آسیب را می توان با معادله *(۹)* به دست آورد[4]:

$$\Delta U_i = \frac{U_i^* - U_i}{U_i} = \frac{\int_0^L \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2}\right)^2\right] dx - \int_0^L \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2\right] dx}{\int_0^L \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2\right] dx} \tag{۹}$$

کاهش سختی مرتبط با آسیب باعث افزایش انحنا می‌شود. بنابراین، با توجه به میزان آسیب، مقدار ΔUi در معادله *(۹)* افزایش می‌یابد.

با فرض تقسیم تیر به N عنصر، انرژی کرنش عنصر j برای شکل حالت معین i ممکن است با معادله (۱۰) بیان شود[4]:

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left[EI(x) \left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2}\right)^2 \right] dx \tag{۱۰}$$

با aj و ۱+ aj نقطه شروع و پایان جزء j را نشان می دهد. انرژی کرنش کسری Fi j، یعنی نسبت انرژی کرنش جزء خسارت‌دیده به انرژی کرنش تیر را می توان به صورت زیر تعریف کرد[4]:

$$F_{ij} = U_{ij} / U_i \tag{۱۱}$$

در صورت وجود آسیب های کوچک، می توان یک تقریب مرتبه اول می‌توان نوشت[4] :

$$F_{ij}^* = F_{ij} + higher - order\ terms \tag{۱۲}$$

جایگزینی معادله (۶)، (۷)، (۸) و به معادله (۱۱) و استفاده از معادله (۱۲)، منجر به این معادلات می‌شود[4]:

$$1 = \frac{F_{ij}^*}{F_{ij}} = \frac{U_{ij}^* U_i}{U_{ij} U_i^*} = \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} EI^*(x) \left(\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L EI(x) (\partial^2 \phi_i / \partial x^2)^2 dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} EI(x) \left(\partial^2 \phi_i / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L EI^*(x) (\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2)^2 dx} \tag{۱۳}$$

$$1 = \frac{EI_j^* \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2\right)^2 dx \quad EI^* \int_0^L (\partial^2 \phi_i / \partial x^2)^2 dx}{EI_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i / \partial x^2\right)^2 dx \quad EI \int_0^L (\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2)^2 dx} \tag{۱۴}$$

$$\frac{EI_j}{EI_j^*} = \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L (\partial^2 \phi_i / \partial x^2)^2 dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L (\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2)^2 dx} \tag{۱۵}$$

با استفاده از مقدار متوسط انرژی‌های کرنش مودال n شکل حالت، معادله (۱۵) را می‌توان به صورت معادله (۱۶) نشان داد، که در آن βj شاخص آسیب انرژی کرنش مود تیر است[4] .

$$\beta_j = \frac{EI_j}{EI_j^*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L (\partial^2 \phi_i / \partial x^2)^2 dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\partial^2 \phi_i / \partial x^2\right)^2 dx \int_0^L (\partial^2 \phi_i^* / \partial x^2)^2 dx} \tag{۱۶}$$

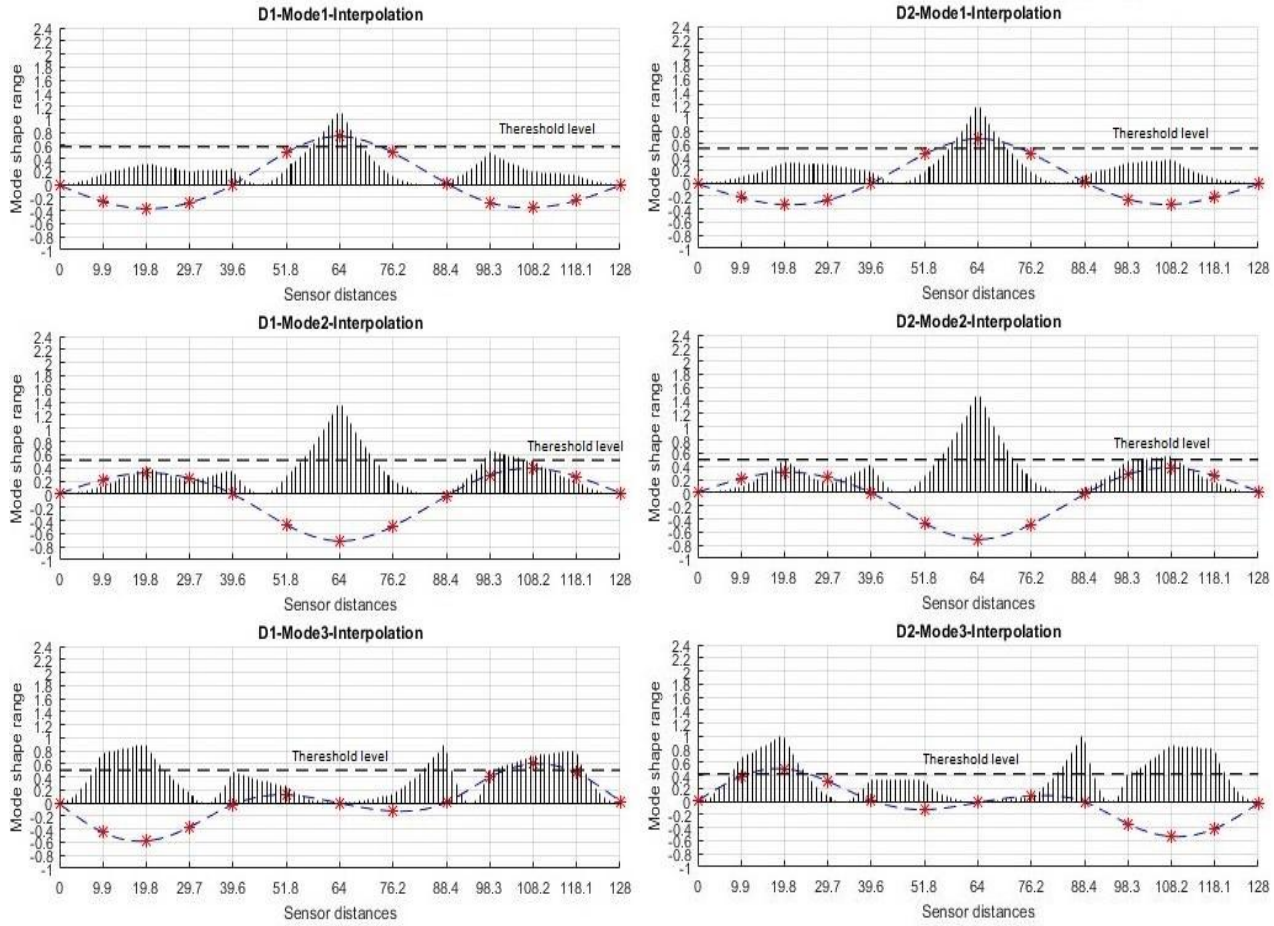
۴- تعریف آستانه خسارت و تعیین موقعیت آسیب

با هدف بهبود اثربخشی روش پیشنهادی، یک حد اطمینان بالایی یک طرفه (UCL) برای تعریف آستانه‌ای برای تشخیص آسیب قابل اطمینان تر معرفی می‌شود که به صورت معادله (۱۷) می‌باشد[۶]:

$$T^{a} = \mu + Z_{a}\sigma \qquad (۱۷)$$

که در آن T^{α} مقدار حد اطمینان است، μ و σ به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار شاخص‌های آسیب به دست آمده می‌باشند، $Z\alpha$ مقدار توزیع نرمال استاندارد در بازه ۱ تا ۲ می‌باشد که در این مقاله مقدار ۱٫۵ انتخاب شده است.

مقدار α در این مقاله ۱٫۵ انتخاب شده است، که می‌تواند به عنوان یک مقدار آستانه برای ناهنجاری احتمالی در پایش سلامت سازه در نظر گرفته شود. از آنجایی که آستانه خسارت بر اساس ویژگی‌های آماری شاخص‌های خسارت محاسبه شده از پاسخ‌های اندازه گیری شده است، مقادیر شاخص خسارت که بزرگتر از مقدار آستانه هستند می‌توانند برای نشان دادن مکان های آسیب استفاده شوند. شکل (۳) نتایج را درسناریوی مورد نظر نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار برازش منحنی و شاخص خسارت بر اساس انرژی کرنشی مودال در سناریوی اول و دوم خسارت(آستانه خسارت با خطچین افقی).

۵- نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش مشخص می‌کند با افزایش نقاط اندازه‌گیری و روش برازش اسپیلاین مکعبی می‌توان شاخص خسارت بر اساس انرژی کرنشی مودال را تعیین کرد. مکان دقیق خسارت‌ها با تعریف آستانه خسارت با تقریب خوبی مشخص می‌شوند. در حقیقت

وجود خرابی در سازه، یک ناپیوستگی کوچک در پاسخ سازه در محدوده خرابی ایجاد می‌کند. با مشاهده پاسخ سازه این ناپیوستگی‌ها آشکار نیستند. ولی، با انجام درون‌یابی و استفاده از روش شناسایی آسیب انرژی کرنشی مودال نتایج واقعی‌تر و نزدیک به واقعیت به دست می‌آیند. بنابراین، می‌توان با توجه انتخاب نقاط درون‌یابی بهینه و استفاده درست از معادلات حاکم، به وجود و محل خرابی در تیرورق فولادی پل پی برد.

۶- مراجع

1. P. Cawley and R. D. Adams, "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 14, no. 2, pp. 49-57, 1979.
2. P. Gudmundson, "Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 30, no. 5, pp. 339-353, 1982.
3. J.-T. Kim, Y.-S. Ryu, H.-M. Cho, and N. Stubbs, "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method," Engineering structures, vol. 25, no. 1, pp. 57-67, 2003.
4. Alvandi and C. Cremona, "Assessment of vibration-based damage identification techniques," Journal of sound and vibration, vol. 292, no. 1-2, pp. 179-202, 2006.
5. N. Baghiee, M. R. Esfahani, and K. Moslem, "Damage detection of multi-girder bridge superstructure based on the modal strain approaches," Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics, vol. 5, no. 1, pp. 21-42, 2019.
6. Z. Nie, Y. Xie, J. Li, H. Hao, and H. Ma, "Damage detection in bridges under moving loads based on subspace projection residuals," Advances in Structural Engineering, vol. 25, no. 5, pp. 979-1001, 2022.
7. M. Rucka, "Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes," Journal of theoretical and applied mechanics, vol. 49, no. 2, pp. 399-417, 2011.
8. Eraky, A. M. Anwar, A. Saad, and A. Abdo, "Damage detection of flexural structural systems using damage index method–Experimental approach," Alexandria Engineering Journal, vol. 54, no. 3, pp. 497-507, 2015.
9. Y. Li, "Hypersensitivity of strain-based indicators for structural damage identification: A review," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 24, no. 3, pp. 653-664, 2010.
10. C. R. Farrar and D. Jauregui, Damage detection algorithms applied to experimental and numerical modal data from the I-40 bridge. Los Alamos National Laboratory, 1996.