

شناسایی آسیب در اتصال‌های صلب قاب‌های خمشی فولادی در ارتفاع و پلان سازه با استفاده از روش انحنای مودی اصلاح شده

طه تیموری* (دانشجوی دکتری)

موسی محمودی صاحبی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مهندسی عمران شریف، (پیاپی ۱۳۹۹)
دربی ۲ - ۳۶، شماری ۱/۲، ص. ۱۱۱-۱۲۲

عیب‌یابی سازه‌ها، از مهم‌ترین بخش‌های پایش سلامت سازه‌هاست. مشخصات دینامیکی سازه‌ها در اثر آسیب‌های موضعی دچار تغییر می‌شوند. در نوشتار حاضر، روش جدیدی برای شناسایی آسیب در اتصال‌های صلب قاب‌های خمشی در ارتفاع و پلان سازه معرفی شده است. روش مذکور بر اساس تغییرات انحنای شکل مود سازه است. ابتدا با استفاده از انحنای شکل مودی ستون‌های سازه، تراز آسیب مشخص و سپس با استفاده از انحنای شکل مودی تیر طبقه، محل دقیق اتصال آسیب دیده در پلان تعیین می‌شود. محاسبه انحنای تقریبی شکل مود در ابتدا و انتهای اعضا، شناسایی آسیب در مناطق مرزی را ممکن می‌سازد. برای نرمال کردن اختلاف انحنای شکل مودها، از روش ابداعی استفاده می‌شود. روش مذکور بر روی یک قاب فولادی ۷ طبقه‌ای ۳ دهانه با ابعاد واقعی و در سناریوهای آسیب مختلف مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در پژوهش حاضر می‌تواند موقعیت 10% محل اتصال‌های آسیب دیده، خصوصاً در ابتدا و انتهای سازه را شناسایی کند.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، انحنای شکل مود، تحلیل اجزاء محدود، قاب خمشی.

t.teimoori@sru.ac.ir
m.mahmoudi@sru.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های با ارزشی در زمینه پایش سلامت سازه‌ها^۱ صورت گرفته است. یکی از شاخه‌های مهم پایش سلامت سازه، شناسایی آسیب^۲ در سازه است. شناسایی آسیب در سازه‌ها به معنای تشخیص وجود آسیب و موقعیت‌یابی و همچنین میزان آسیب وارد شده به سازه است. روش‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در سازه‌ها ارائه شده است. روش‌های اشاره شده، به طور کلی به دو دسته مخرب^۳ و غیرمخرب^۴ تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرمخرب، بدون نیاز به نمونه‌برداری، امکان پایش سلامت پیوسته سازه را فراهم می‌آورند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر علوم رایانه و حسگرها، روش‌های مذکور بسیار ساده‌تر و ارزان‌تر شده‌اند. روش‌های غیرمخرب را می‌توان به ۳ دسته: استاتیکی، مودال و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد.^[۱] به طور خلاصه، روش‌های استاتیکی بر اساس کرنش‌ها و جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده از سازه تحت بارهای استاتیکی هستند و با استفاده از به روزرسانی مدل اجزاء محدود، تغییرات خیز، سختی و ظرفیت باربری را به دست می‌آورند. مثال‌هایی از روش‌های ذکرشده، ارائه شده است. روش‌های مودال از تغییرات پارامترهای مودال

بررسی می‌کنند. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر، روش بر پایه‌ی شکل مود بررسی شده است، لذا مطالعات انجام شده در زمینه مذکور ارائه شده است. شکل مودهای یک سازه، پارامتری منحصر به فرد و حساس به تغییرات در سازه است. پاندی و همکاران (۱۹۹۱)،^[۱۵] در نوشتار خود نشان دادند که انحنای شکل مودهای یک سازه نسبت به آسیب‌های وارده بسیار حساس هستند. ایشان از انحنای شکل مودی

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های با ارزشی در زمینه پایش سلامت سازه‌ها^۱ صورت گرفته است. یکی از شاخه‌های مهم پایش سلامت سازه، شناسایی آسیب^۲ در سازه است. شناسایی آسیب در سازه‌ها به معنای تشخیص وجود آسیب و موقعیت‌یابی و همچنین میزان آسیب وارد شده به سازه است. روش‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در سازه‌ها ارائه شده است. روش‌های اشاره شده، به طور کلی به دو دسته مخرب^۳ و غیرمخرب^۴ تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرمخرب، بدون نیاز به نمونه‌برداری، امکان پایش سلامت پیوسته سازه را فراهم می‌آورند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر علوم رایانه و حسگرها، روش‌های مذکور بسیار ساده‌تر و ارزان‌تر شده‌اند. روش‌های غیرمخرب را می‌توان به ۳ دسته: استاتیکی، مودال و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد.^[۱] به طور خلاصه، روش‌های استاتیکی بر اساس کرنش‌ها و جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده از سازه تحت بارهای استاتیکی هستند و با استفاده از به روزرسانی مدل اجزاء محدود، تغییرات خیز، سختی و ظرفیت باربری را به دست می‌آورند. مثال‌هایی از روش‌های ذکرشده، ارائه شده است. روش‌های مودال از تغییرات پارامترهای مودال

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۵/۱۳۹۷، اصلاحیه ۷/۸/۱۳۹۷، پذیرش ۸/۵/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J30.2018.51308.2390

به تیر سراسری با سه محل آسیب دیده در المان‌های ۱۱، ۲۱، ۲۲ و ۳۲ مشاهده می‌شود.

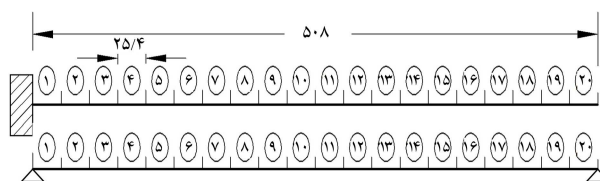
یانگ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۷] با استفاده از یک روش ساده بر اساس طیف فوریه، انحناهای شکل مودها را محاسبه و از آنها در شناسایی آسیب تیر استفاده کرده‌اند. از محاسن روش اخیر می‌توان به مقاومت در برابر نویز و دقت محاسبه‌ی انحناهای شکل مود اشاره کرد.

کیمیلا و وسترونی (۲۰۱۵)^[۱۸] نیز به موقعیت‌یابی آسیب در سازه‌های تیرگونه پرداخته و مشتق دوم شکل مودها را با استفاده از استخراج آشفستگی از رابطه‌ی اویلر - برنولی مطالعه کرده‌اند. ایشان همچنین نتایج پژوهش‌های خود را با مثال کنسول در نوشتار پانزی و همکاران^[۱۵] مقایسه کرده‌اند.

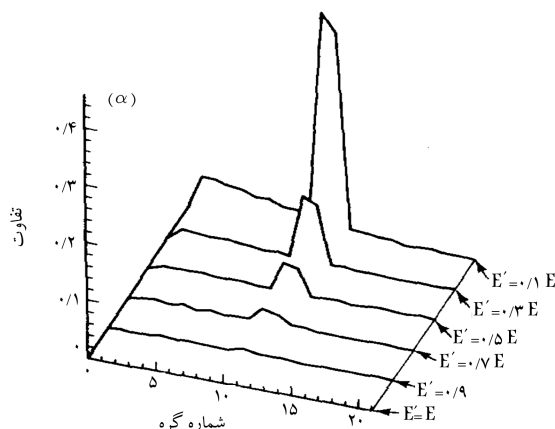
همچنین قدرتی و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۹] با استفاده از پردازش شتاب پاسخ ارتعاش آزاد سازه به کمک تبدیل هیلبرت - هوآنگ، بسامدهای طبیعی و شکل مودهای سازه را تخمین زده و با مقایسه‌ی انحناهای شکل مودهای محاسباتی در وضعیت‌های مختلف سازه، اقدام به شناسایی آسیب در سازه کرده‌اند. صحت روش ارائه شده بر روی قاب خمشی بتنی ۷ طبقه مطابق شکل ۵ بررسی شده است. یکی از سناریوها، سختی اتصالات‌های طبقه‌ی پنجم به میزان ۴۰٪ کاهش یافته است. هر یک از سازه‌های سالم و آسیب دیده تحت ارتعاش اجباری ناشی از زلزله‌ی سن فرناندو قرار گرفته و سپس شتاب پاسخ سازه تحت ارتعاش آزاد سازه در راستای افقی ثبت شده است. سیگنال‌های ثبت شده از طریق ۷ حسگر در طبقات، با استفاده از فیلتر میان‌گذر باترورث^۶ مرتبه‌ی چهارم با پهنای باند ۰/۱ تا ۰/۳، ابتدا فیلتر و سپس تفکیک مودی تجربی شده‌اند.^[۱۹] در شکل ۶، ضریب انحناهای آسیب (CDF) برای

برای موقعیت‌یابی آسیب‌ها در یک تیر کنسولی و یک تیر دو سر مفصل استفاده و از ۵ شکل مود اول سازه‌ها استفاده کردند. در شکل ۱، مدل اجزاء محدود دو تیر مدل‌سازی شده در نوشتار پانزی و همکاران مشاهده می‌شود. در شکل ۲، تفاوت انحناهای شکل مود اول برای سازه‌های سالم و آسیب دیده برای شدت آسیب‌های مختلف در المان ۱۰ تیر کنسول و در شکل ۳ دو سر مفصل ترسیم شده است. محور قائم، تفاوت انحناهای شکل مود در دو حالت سالم و آسیب دیده و محور افقی، شماره‌ی گره است.

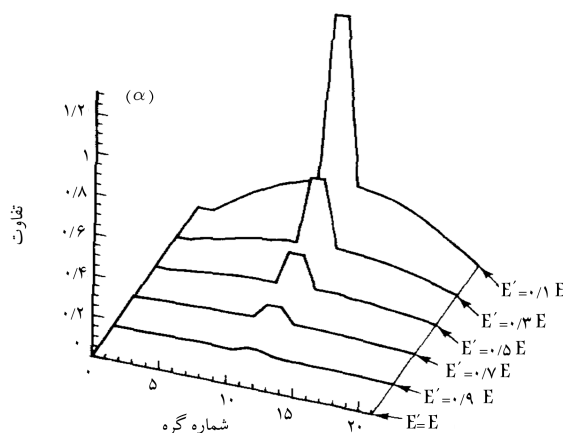
عبدالوهاب و روک (۱۹۹۹) از روش انحناهای شکل مود برای شناسایی آسیب در تیر دو سر مفصل، تیر سراسری دودهانه و یک پل واقعی پیش‌تنیده استفاده کرده‌اند.^[۱۶] ایشان برای خلاصه کردن نتایج چند شکل مود در یک نمودار، پارامتر CDF ^۵ را معرفی کردند، که از طریق آن می‌توان میانگین تفاوت انحناهای شکل مودها برای تعداد مشخصی از شکل مودهای اول سازه را محاسبه کرد. در شکل ۴، نتایج مربوط



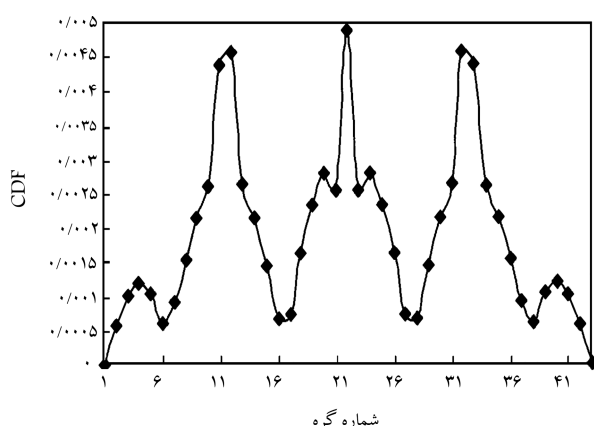
شکل ۱. مدل سازه‌ی تیر کنسولی (بالا) و دوسر مفصل (پایین).^[۱۵]



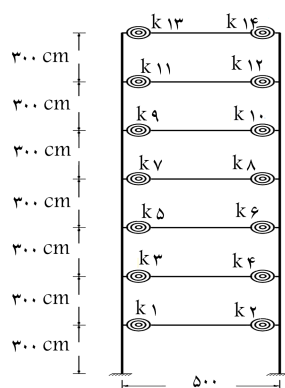
شکل ۲. تفاوت انحناهای شکل مود اول سازه‌ی کنسولی.^[۱۵]



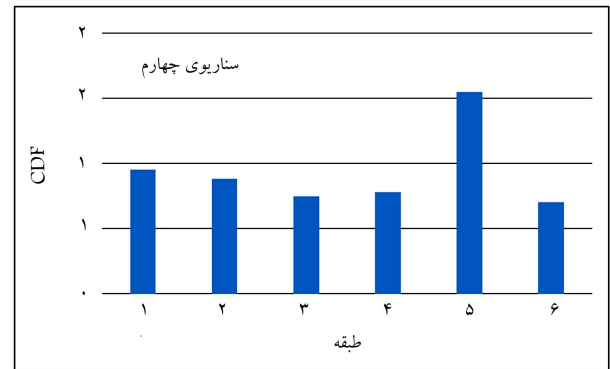
شکل ۳. تفاوت انحناهای شکل مود اول سازه‌ی دو سر مفصل.^[۱۵]



شکل ۴. نمودار CDF تیر سراسری آسیب دیده.^[۱۶]



شکل ۵. مدل شماییک قاب بتنی.^[۱۹]



شکل ۶. ضریب انحنای آسیب (CDF) برای سناریوی چهارم.^[۱۹]

سناریوی چهارم آسیب نیز مشاهده می‌شود. روش مذکور، توانایی شناسایی آسیب در طبقه‌ی هفتم را نداشته و پارامتر CDF برای چهار مود اول سازه محاسبه شده است.

همچنین سیامیلا^۷ و همکاران (۲۰۱۷)^[۲۰] در نوشتار خود به بررسی آثار تعداد و موقعیت حسگرها در روش انحنای شکل مود برای شناسایی آسیب پرداخته‌اند. پژوهش‌های ارائه شده، عمدتاً برای شناسایی آسیب در مورد سازه‌ی تیر بوده و کمتر به شناسایی آسیب در اتصال‌های صلب پرداخته‌اند. در روش‌های ارائه شده در نوشتارهای ذکر شده، به شناسایی آسیب در ابتدا و انتهای سازه‌ها اشاره نشده است. همچنین شاخص‌های استفاده شده برای شناسایی آسیب در نوشتارهای اخیر، محل دقیق آسیب و همچنین نقطه‌یی یا المانی بودن آسیب را مشخص نمی‌کنند. پژوهش‌های صورت گرفته عمدتاً بر روی شناسایی آسیب در ارتفاع سازه و یا فقط در پلان (یک تیر) بوده است.

در نوشتار حاضر، با استفاده از روش جدید، شناسایی آسیب به صورت همزمان در ارتفاع و پلان سازه مد نظر قرار گرفته و با ارائه‌ی شاخص اصلاح شده، محل دقیق اتصال آسیب دیده، حتی در ابتدا و انتهای سازه شناسایی شده است. همچنین در پژوهش حاضر، شناسایی آسیب بر روی یک قاب خمشی فولادی با ابعاد واقعی مد نظر قرار گرفته است.

۲. روش پژوهش

پاندی و همکاران (۱۹۹۱)^[۱۵] نشان داده‌اند که انحنای شکل مود نسبت به وجود آسیب در سازه‌ها بسیار حساس است. همچنین نشان دادند که می‌توان از تفاوت انحنای شکل مود در سازه‌ی آسیب دیده و سالم، موقعیت آسیب در سازه را شناسایی کرد. در پژوهش حاضر، این موضوع به عنوان پایه‌ی پژوهش استفاده شده و فرض بر این بوده است که شکل مودهای سازه‌ی سالم و آسیب دیده در اختیار است. استفاده از شکل مودهای با وضوح بالا، نقش مهمی در موقعیت‌یابی دقیق آسیب‌ها دارد. ساده‌ترین راه برای محاسبه‌ی انحنای شکل مود (MC)، استفاده از تقریب تفاوت میانی^۸ مطابق رابطه‌ی ۱ است:

$$\ddot{v} = \frac{(v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}))}{h^2} \quad (1)$$

که در آن، h فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی متوالی و v تغییرمکان جانبی هر یک از گره‌های ستون است.

روش انحنای شکل مود به طور خلاصه بدین صورت انجام می‌شود که هر یک

از شکل‌های مود سازه‌های سالم و آسیب دیده ترسیم و سپس انحنای شکل مود مذکور توسط رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی آخر، اختلاف انحنای شکل مودهای سازه‌های سالم و آسیب دیده محاسبه می‌شود و مطابق روش ذکر شده در موقعیت‌هایی از سازه، که تفاوت در انحنای شکل مود سازه‌های سالم و آسیب دیده وجود داشته باشد، احتمال آسیب وجود دارد. تاکنون در پژوهش‌های صورت گرفته از روش انحنای شکل مود برای شناسایی آسیب در ارتفاع سازه و یا شناسایی آسیب در یک تیر استفاده شده است. همچنین شاخص‌های معرفی شده برای تحلیل نمودار تفاوت انحنای شکل مود، تفاوت بین آسیب در گره و آسیب در المان را نشان نمی‌دهند. در مثال‌های ارائه شده برای شناسایی آسیب در ارتفاع سازه‌های قاب خمشی، روش مذکور توانایی شناسایی آسیب‌های موجود در پای ستون و بام را ندارد. در نوشتار حاضر، روشی جدید برای نشان دادن محل دقیق آسیب در ارتفاع سازه استفاده شده است، که در آن برای شناسایی تغییرات ناگهانی مقادیر نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود، از اختلاف مقادیر نرمال شده در گره قبل و گره بعد برای هر گره استفاده شده است. بدین صورت که برای گره n ام، از تفاوت مقادیر مربوط به گره $n - 1$ و گره $n + 1$ استفاده شده است. این امر باعث نمایان شدن محل آسیب‌ها در ستون و یا به عبارت دیگر در ارتفاع سازه می‌شود.

همچنین در پژوهش حاضر، برای بررسی توانایی روش ارائه شده برای شناسایی آسیب، از مدل اجزاء محدود سازه‌های سالم و آسیب دیده استفاده شده است. بدین صورت که با استفاده از مدل اجزاء محدود، شکل مودهای سازه‌های سالم و آسیب دیده ترسیم شده است. آسیب در سازه توسط کاهش مدول کشسانی در نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌سازی شده است. اطلاعات مربوط به سازه‌های سالم و آسیب دیده در دسترس است. برای به دست آوردن موقعیت اتصال و یا اتصال‌های آسیب دیده در ارتفاع سازه از شکل مودهای جانبی سازه استفاده شده است. بدین صورت که خروجی هر یک از ستون‌های قاب خمشی به صورت جداگانه مطالعه شده است. تفاوت انحنای شکل مود سازه‌های سالم و آسیب دیده برای هر یک از ستون‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است. تفاضل انحنای شکل مود سازه‌های سالم و آسیب دیده مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است. اندیس d برای سازه‌ی آسیب دیده و اندیس u برای سازه‌ی سالم است.

$$\Delta \ddot{v}_{i,j} = \ddot{v}_{i,j}^{(d)} - \ddot{v}_{i,j}^{(u)} \quad (2)$$

تغییرات انحنای شکل مود توسط رابطه‌ی ۳ نرمال شده است:

$$\Delta \ddot{v}_{i,j}^{(N)} = \left[1 + \frac{\Delta \ddot{v}_{i,j}}{\max(\Delta \ddot{v}_{i,j}) - \min(\Delta \ddot{v}_{i,j})} \right]^2 \quad (3)$$

با استفاده از شکل مودی هر ستون، تقاطع تیر و ستونی که اتصال آسیب دیده‌ی به آن متصل باشد، مشخص شده و برای شناسایی این‌که کدام یک از دو اتصال آسیب دیده‌اند، از شکل مودی تیر طبقه‌ی مورد نظر استفاده شده است.

برای موقعیت‌یابی آسیب در پلان سازه، از تفاوت انحنای شکل مود تیرهای آسیب دیده و سالم استفاده شده است. روش ارائه شده، مشابه روش شناسایی آسیب در ارتفاع سازه است، با این تفاوت که در رابطه‌ی ۱، v تغییرمکان قائم گره‌های متناظر تیر در شکل مودی سازه‌های سالم و آسیب دیده است. در نوشتار حاضر، برای مشخص شدن محل دقیق اتصال آسیب دیده در تیر، از اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره‌ی بعد از خود استفاده شده است.

یکی از نقاط ضعف ذاتی روش انحنای شکل مود، عدم توانایی در شناسایی آسیب‌های انتهایی در سازه است. با توجه به محدودیت‌های رابطه‌ی ۱ در محاسبه‌ی

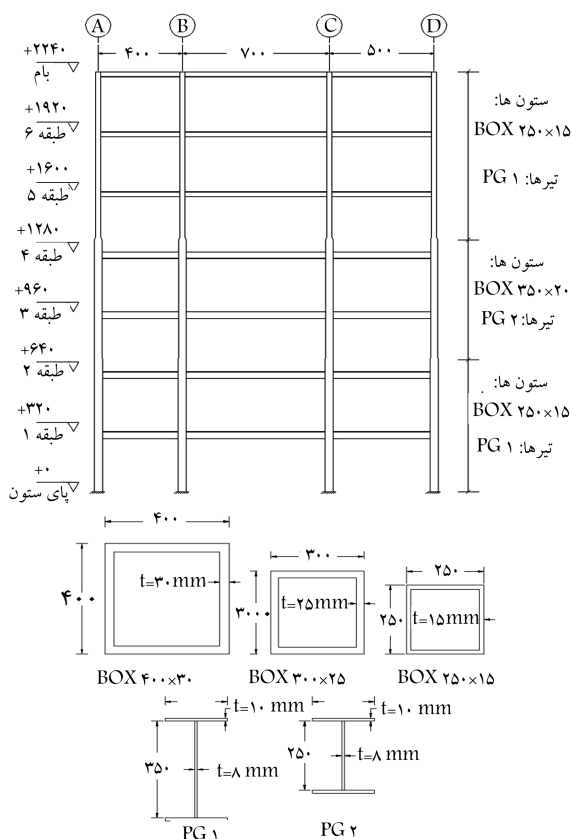
f- بیشینه‌های برجسته‌ی نمودار اخیر، طبقاتی را که اتصال آسیب دیده دارند، مشخص می‌کند.

۲- بخش دوم شناسایی آسیب در پلان سازه

- a- محاسبه‌ی اختلاف انحنای شکل مود تیر طبقه‌ی مورد نظر در سازه‌های سالم و آسیب دیده.
- b- نرمال کردن اختلاف انحنای شکل مودهای سالم و آسیب دیده‌ی تیر طبقه‌ی آسیب دیده.
- c- محاسبه‌ی اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره کناری آن در سمت میانه‌ی تیر.
- d- بیشینه‌های برجسته‌ی نمودار اخیر، محل دقیق اتصال آسیب دیده را مشخص می‌کنند.

۱.۲. مطالعات موردی

برای اجرایی کردن روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، قاب ۷ طبقه‌ی دو بُعدی سه دهانه مطالعه شده است. سناریوهای مختلف آسیب جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی بررسی شده است. جهت بررسی کارآمدی روش ارائه شده برای شناسایی آسیب در اتصالات‌های صلب قاب‌های خمشی، قاب خمشی دو بُعدی ۷ طبقه با مشخصات مندرج در شکل ۸ مطالعه شده است. قاب مذکور به عنوان بخشی از یک سازه‌ی ۷ طبقه با در نظر گرفتن الزامات آیین‌نامه‌ی ASCE ۷-۱۰ و با استفاده از آیین‌نامه‌ی ۳۶۰-۱۰ AISC طراحی شده است. فولاد مصرفی از نوع St-۳۷ با حد جاری شده‌ی ۲۴۰ مگاپاسکال و حد نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال است. بار مرده‌ی



شکل ۸. مشخصات قاب خمشی فولادی مورد مطالعه.

انحنا در ابتدا و انتها، استفاده از روش ذکر شده برای شناسایی آسیب در پای ستون، بام و نیز اتصالات‌های محاطی سازه امکان‌پذیر نیست. در نوشتار حاضر، فرمول جدیدی برای محاسبه‌ی انحنای گره‌ی آخر ارائه و با استفاده از شیب المان ماقبل آخر، انحنا در المان آخر محاسبه شده است. همچنین در نوشتار حاضر، با ترکیب روش انحنای شکل مود در ارتفاع و پلان سازه، محدودیت‌های اشاره شده از بین رفته‌اند. با توجه به رابطه‌ی ۱، برای محاسبه‌ی انحنای شکل مود در پای ستون و بام به ترتیب جابه‌جایی‌های مودی در گره قبل و بعد گره مورد مطالعه در دست نیست. بنابراین محاسبه‌ی انحنا در این دو تراز امکان‌پذیر نیست. در نوشتار حاضر برای نقطه‌های ابتدا و انتها، رابطه‌ی ۴ جهت محاسبه‌ی انحنا ارائه و از آن برای نقطه‌ی ابتدایی شکل مود یا همان پای ستون سازه استفاده شده است، که همان رابطه‌ی تفاوت میانی با جابه‌جایی گره قبلی مساوی صفر است.

$$\ddot{v} = (v_{i+1} - v_i) / h^2 \quad (4)$$

همچنین برای انتهای شکل مود، با استفاده از روش شتاب خطی در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، مطابق شکل ۷ و با فرض رابطه‌ی ۵ و ۶ پیشنهاد شده است، که در آن: \ddot{v} مشتق دوم جابه‌جایی، \dot{v} مشتق اول جابه‌جایی و v مقادیر جابه‌جایی در شکل مود است. در رابطه‌ی ۶، نیز \ddot{v} میزان افزایش مشتق دوم جابه‌جایی نسبت به گره قبل Δx فاصله‌ی دو گره متوالی است.

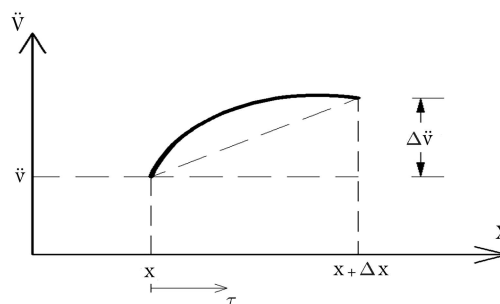
$$\begin{cases} \ddot{v}(x + \Delta x) = \ddot{v} + \Delta \ddot{v} \\ \dot{v}(x + \Delta x) = \dot{v} + \Delta \dot{v} \\ v(x + \Delta x) = v + \Delta v \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta \ddot{v} = \frac{6}{\Delta x^2} \Delta v - \frac{6}{\Delta x} \dot{v} - 3\ddot{v} \quad (6)$$

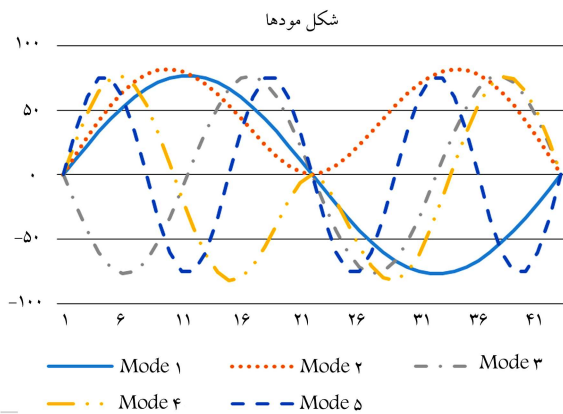
در ضمن شکل مودهای دقیق هر یک از ستون‌های قاب خمشی، برای رفع محدودیت‌های روش انحنای شکل مود، استفاده شده است. روش بهینه شده‌ی انحنای شکل مود به صورت خلاصه و گام به گام به این صورت خلاصه می‌شود:

۱- بخش اول شناسایی آسیب در ارتفاع سازه

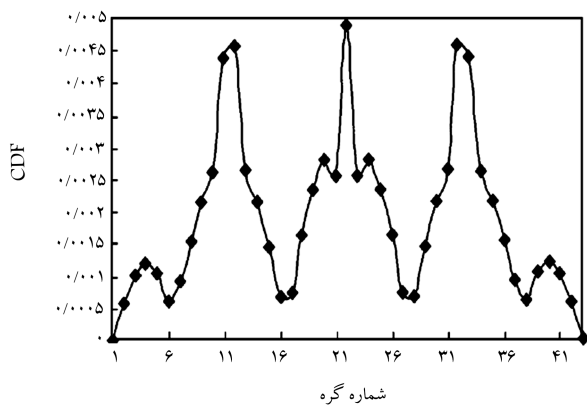
- a- تعیین شکل مود سازه‌های سالم و آسیب‌دیده.
- b- محاسبه‌ی اختلاف انحنای شکل مود در هر یک از ستون‌های سازه در حالت سالم و آسیب دیده.
- c- نرمال کردن اختلاف انحنای شکل مود ستون در سازه‌های سالم و آسیب دیده.
- d- ترسیم نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده برای گره ماقبل و مابعد هر گره برای تمام ستون‌ها به صورت مجزا.
- e- ترسیم نمودار مجموع قدرمطلق اختلاف مقادیر نرمال‌های گره قبل و بعد.



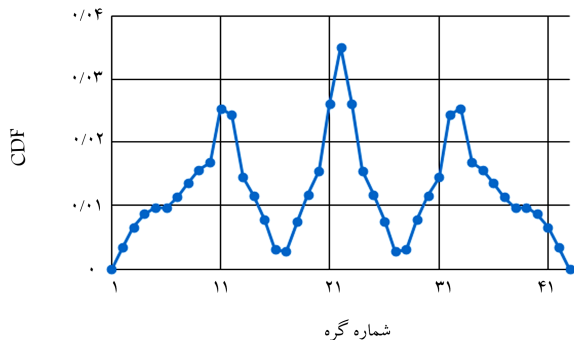
شکل ۷. نمودار شماتیک مشتق دوم جابه‌جایی.



شکل ۱۰. شکل مدهای تیر سراسری.



شماره گره



شماره گره

شکل ۱۱. مقایسه‌ی نمودار CDF ها، در نوشتار عبدالوهاب (بالا) و نوشتار حاضر (پایین).

۴. نتایج

در این فصل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سازه‌ی قاب خمشی ۷ طبقه‌ی سه دهانه، برای نشان دادن توانایی روش معرفی شده در موقعیت‌یابی اتصال‌های صلب آسیب دیده ارائه شده است. روش مذکور به دو بخش اصلی شناسایی آسیب در ارتفاع و شناسایی آسیب در پلان سازه تقسیم می‌شود. ابتدا شناسایی آسیب در ارتفاع صورت گرفته و هر یک از ستون‌های سازه به تنهایی مطالعه شده‌اند. شکل مود اول هر یک از ستون‌های سازه‌ی آسیب دیده، به طور مجزا با شکل مود اول ستون متناظر خود در سازه‌ی سالم مطالعه شده است. شکل مود تیر طبقات آسیب دیده در بخش دوم ارزیابی شده است. در آخر محل دقیق اتصال و یا اتصال‌های آسیب دیده مشخص شده است.

سقف‌ها، ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده‌ی آنها، ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. قاب مورد مطالعه دارای سه دهانه با ابعاد ۴۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع طبقات ۳۲۰ سانتی‌متر بوده است.

هر دو سازه‌ی سالم و آسیب دیده توسط نرم‌افزار اجزاء محدود SAP۲۰۰۰ مدل‌سازی شده‌اند. در نوشتار حاضر، تمامی تیرها و ستون‌ها به ۱۰ جزء مساوی، که می‌توانند معرف حسگرهای تغییرمکان برای تعیین شکل مدهای سازه باشند، تقسیم‌بندی شده‌اند. برای ارتفاع و دهانه‌های متعارف، تعداد المان مذکور، دقت کافی جهت شناسایی آسیب در سازه را ارائه داده‌اند. آسیب دیدگی در اتصال‌ها توسط کاهش مدول کشسانی در المان انتهایی تیر، که به ستون متصل است، انجام شده است. آسیب در المان مذکور، به صورت یک آسیب‌گرایی در ستون، خود را نشان می‌دهد.

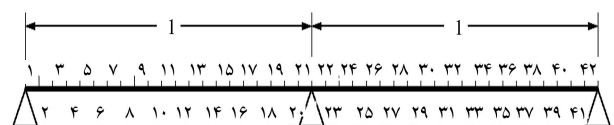
از بین سناریوهای متعدد مطالعه شده، سه سناریو جهت نشان دادن توانایی روش ارائه شده برای شناسایی آسیب ارائه شده است. سناریوی اول، فقط شامل دو اتصال آسیب دیده در طبقات اول و پنجم است. در سناریوی دوم، علاوه بر اتصال اخیر، یک اتصال آسیب دیده در بام نیز در نظر گرفته شده است، تا توانایی روش ارائه شده در شناسایی آسیب در اتصال‌های طبقه‌ی بام مشخص شود. در سناریوی سوم، برای نشان دادن توانایی روش مذکور در سازه‌های با تعداد آسیب زیاد، مجموعاً ۱۱ اتصال آسیب دیده در طبقات سوم و پنجم در نظر گرفته شده است. در سه سناریوی اشاره شده، میزان آسیب هر یک از اتصال‌ها ۱۵٪ است.

۳. صحت‌سنجی

قبل از این‌که مثال‌های عددی ارزیابی شوند، نخست یک سری مطالعات صحت‌سنجی با استفاده از پژوهش انجام شده توسط عبدالوهاب و روک^[۱۶] که بر روی یک تیر سراسری دو دهانه مطالعه کرده بودند، انجام شده است. لذا با استفاده از روش انحنای شکل مود به شناسایی آسیب در سازه‌ی مذکور اقدام شده است. مشخصات فیزیکی تیر، مطابق شکل ۹، عبارت از: $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ ، $A = 0.09 \text{ m}^2$ ، $I = 6/3 \text{ m}^4$ و $El = 20/25 \text{ eNm}^2$ بوده است.

تیر مذکور به ۴۲ المان تقسیم‌بندی شده و سه محل آسیب دیده در وسط دهانه‌ی هر تیر و همچنین در المان‌های ۲۱ و ۲۲، که تکیه‌گاه میانی در آن قرار دارد، در نظر گرفته شده و سختی هر یک از المان‌های آسیب دیده، ۵۰٪ کاهش یافته است. پنج شکل مود اول تیر اشاره شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. شکل مدها در دو حالت سالم و آسیب دیده ترسیم و در شناسایی آسیب از آنها استفاده شده است.

عبدالوهاب در نوشتار خود از پارامتر CDF برای جمع‌بندی آثار چند مود استفاده و نتایج مربوط به ۵ مود اول تیر ذکر شده را ترسیم کرده است. در شکل ۱۱، مقایسه‌ی CDF به دست آمده توسط عبدالوهاب (نمودار بالا) و CDF محاسبه شده در پژوهش حاضر (نمودار پایین) مشاهده می‌شود. در نمودارهای مذکور، محل آسیب در تیر به درستی مشخص است و تطابق قابل قبولی دارد.



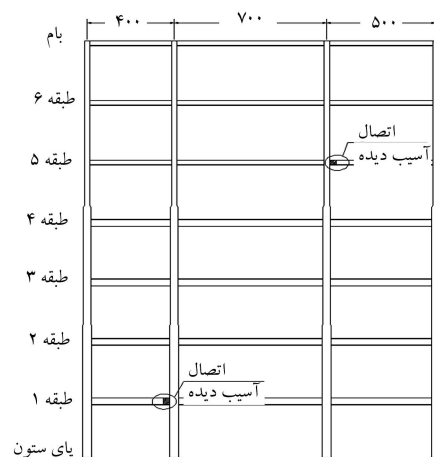
شکل ۹. تقسیم‌بندی اجزاء محدود مدل تیر سراسری.^[۱۶]

۱.۴. سناریوی اول^۹

در سناریوی اول مطابق شکل ۱۲، یک اتصال در طبقه اول و یک اتصال در طبقه پنجم آسیب دیده است. میزان آسیب در سناریوی اول، ۱۵٪ در هر یک از اتصال‌هاست. چون هدف نوشتار حاضر، شناسایی شدت آسیب نیست، لذا همواره شدت آسیب ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.

مرحله اول، شناسایی آسیب در ارتفاع است. برای این منظور، شکل مود اول سازه‌های سالم و آسیب دیده تعیین و تغییر شکل هر یک از ستون‌ها به صورت جداگانه ترسیم شده است. در شکل ۱۳، مود اول ستون محور C در دو حالت سالم و آسیب دیده مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۳، شکل مود سالم و آسیب دیده بسیار به هم شبیه است و امکان شناسایی آسیب وجود ندارد.

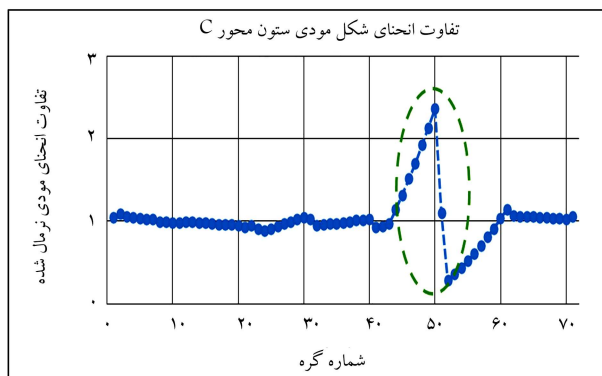
انحنای هر یک از ستون‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. برای اولین المان روی پای ستون، انحنای از رابطه ۴ و برای آخرین المان در بام از رابطه ۵ محاسبه شده است. همچنین اختلاف انحنای شکل مود ستون‌های سالم و آسیب دیده به دست آمده و با استفاده از رابطه ۳ نرمال شده است. شکل ۱۴، نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور C را نشان می‌دهد.



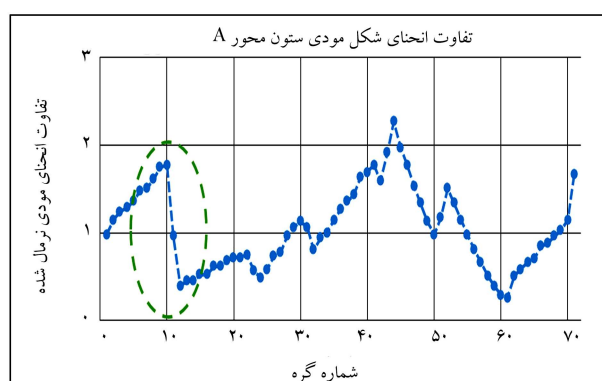
شکل ۱۲. محل اتصال‌های آسیب دیده در سناریوی اول.

مطابق شکل ۱۴، در گره ۵۱ ام، که گره سقف طبقه پنجم است، جهش ناگهانی در نمودار رخ داده است، که نشان‌دهنده وجود آسیب در یکی از اتصال‌های صلب در تراز مذکور است. در شکل ۱۵ الی ۱۷، به ترتیب اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول هر یک از ستون‌های A ، B و D نشان داده شده‌اند. شکل ۱۵ با جهش در حوالی گره ۱۱، وجود آسیب در تراز طبقه اول را نشان می‌دهد.

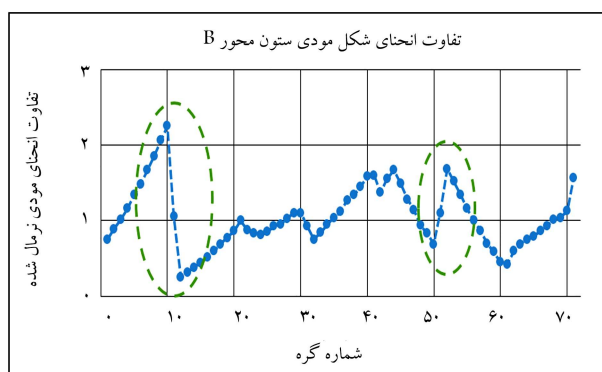
شکل ۱۶، وجود آسیب در تراز طبقه اول و تا حدودی طبقه پنجم را نشان می‌دهد.



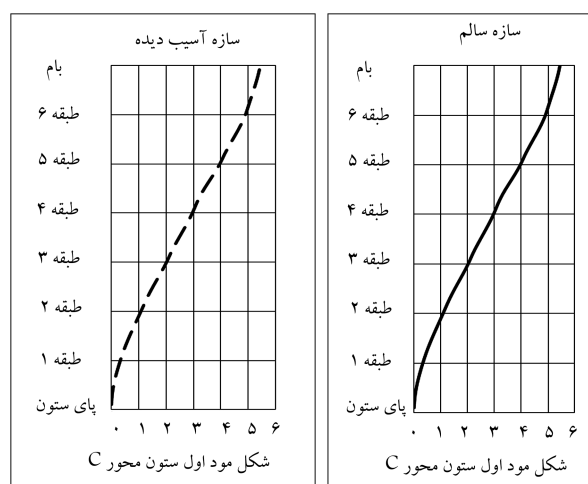
شکل ۱۴. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور C در سناریوی اول.



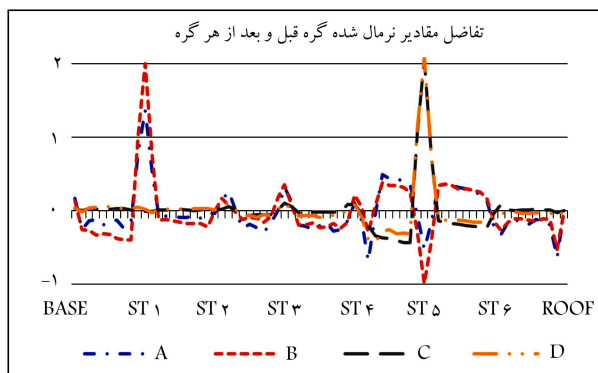
شکل ۱۵. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور A در سناریوی اول.



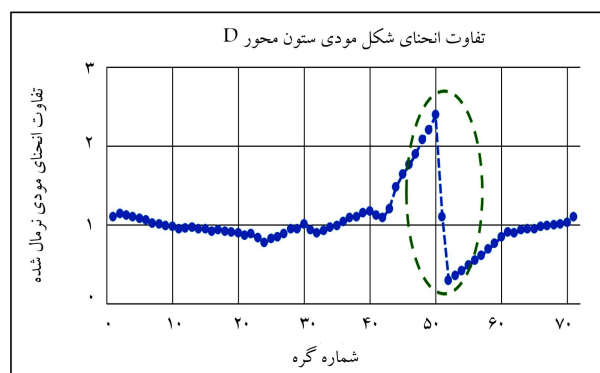
شکل ۱۶. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور B در سناریوی اول.



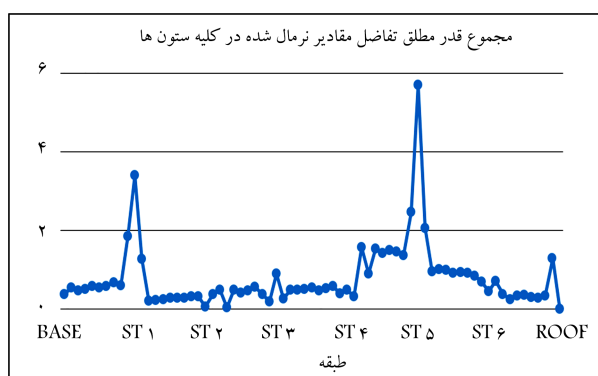
شکل ۱۳. مقایسه‌ی شکل مود سالم (سمت راست) و آسیب دیده (سمت چپ) ستون محور C در سناریوی اول.



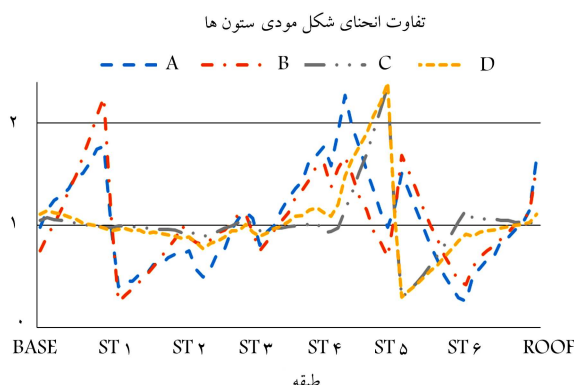
شکل ۱۹. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده شکل مود برای گره قبل و بعد هر گره در سناریوی اول.



شکل ۱۷. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور D در سناریوی اول.



شکل ۲۰. مجموع قدر مطلق مقادیر اختلاف نرمال‌ها در همه‌ی ستون‌ها برای سناریوی اول.



شکل ۱۸. اختلاف انحنای شکل مود در تمام ستون‌های سازه در سناریوی اول.

گزارش شده برای طبقه سوم در حدود ۱ است، که در مقایسه با عدد ۳/۵ در طبقه اول، ناچیز است. با این حال برای حصول اطمینان می‌توان از شناسایی آسیب در پلان طبقه سوم استفاده کرد. در ادامه، شناسایی آسیب در پلان طبقه بام، نشان داده است که مشابه طبقه سوم، آسیبی در تراز بام وجود ندارد.

مرحله دوم برای شناسایی آسیب در سازه، انجام بررسی در پلان طبقاتی است که در قسمت اول (شناسایی آسیب در ارتفاع)، احتمال وجود آسیب در آنها مشخص شده است. در مرحله دوم، بررسی طبقات اول و پنجم در سناریوی مورد مطالعه انجام شده است. جهت نشان دادن کارایی روش معرفی شده، طبقه بام که آسیبی به آن وارد نشده است، نیز بررسی شده است.

در شکل ۲۱، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی مود اول تیر طبقه اول در دو حالت سالم و آسیب دیده مشاهده می‌شود. انحنای هر یک از دو شکل مود مذکور با استفاده از رابطه ۱ محاسبه و سپس اختلاف انحنای آنها به دست آمده و توسط رابطه ۳ نرمال شده است.

در نوشتار حاضر، برای مشخص شدن محل دقیق اتصال آسیب دیده، از اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره کناری آن در سمت میانه‌ی تیر استفاده شده است. شکل ۲۲، نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره بعد از خود است، که مطابق آن، اتصال سمت چپ ستون محور B آسیب دیده است.

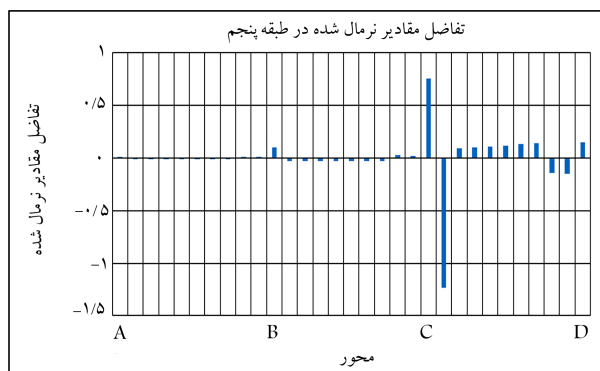
شکل ۲۳، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه پنجم را نشان می‌دهد.

شکل ۱۷، نیز نشان دهنده‌ی وجود آسیب در تراز طبقه پنجم است. در شکل ۱۸، نیز جمع‌بندی نتایج حاصل از اختلاف انحنای شکل مود در تمام ستون‌های سازه صورت گرفته و نمودارهای اخیر در کنار یکدیگر نشان داده شده‌اند.

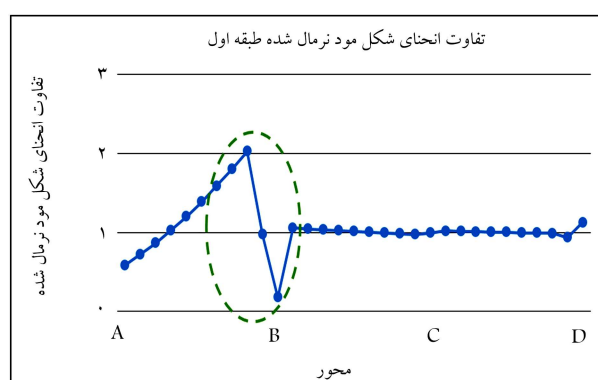
همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در نوشتار حاضر، روشی جدید برای نشان دادن محل دقیق آسیب استفاده شده است، که در آن برای شناسایی تغییرات ناگهانی مقادیر نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود، از اختلاف مقادیر نرمال شده در گره‌های قبل و بعد برای هر گره استفاده شده است. بدین صورت که برای گره n ام، از تفاوت مقادیر مربوط به گره‌های $n-1$ و $n+1$ استفاده شده است. این امر باعث نمایان شدن محل آسیب‌ها در ستون و یا به عبارت دیگر، در ارتفاع سازه می‌شود. در شکل ۱۹، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود برای گره قبل و بعد هر گره مشاهده می‌شود.

برای جمع‌بندی نتایج مربوط به تمام ستون‌های یک سازه، استفاده از مجموع قدرمطلق مقادیر اختلاف نرمال‌ها پیشنهاد شده است (شکل ۲۰).

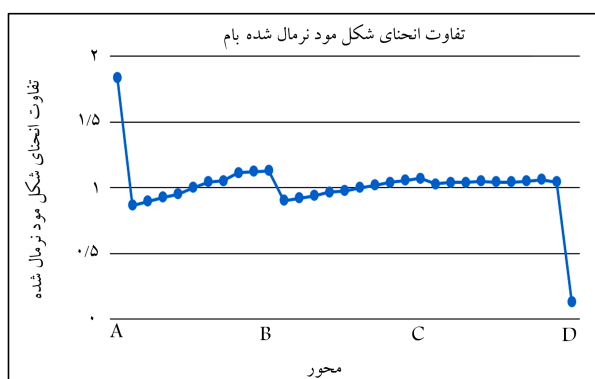
در شکل ۲۰، وجود آسیب در طبقه‌های اول و پنجم به وضوح مشخص شده است. با توجه به نمودار اخیر و وجود بیشینه‌های کوچک در بعضی طبقات، برای اطمینان از وجود و یا عدم وجود آسیب در طبقات از شناسایی آسیب در پلان سازه استفاده شده است. بدین ترتیب با طی مراحل مربوط به شناسایی آسیب در پلان سازه می‌توان ضمن به دست آوردن محل دقیق اتصال‌های آسیب دیده، از وجود یا عدم وجود آسیب در سایر طبقات اطمینان حاصل کرد. با توجه به تعداد زیاد سناریوهای انجام شده با روش ذکر شده، مقادیر به دست آمده برای سایر طبقات در حد نویز است. به عنوان مثال، مقدار عددی



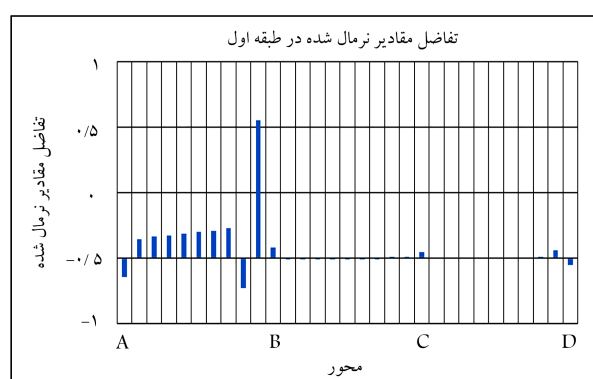
شکل ۲۴. نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره بعد از خود برای تیر طبقه‌ی پنجم در سناریوی اول.



شکل ۲۱. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر طبقه‌ی اول در دو حالت سالم و آسیب دیده در سناریوی اول.



شکل ۲۵. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه‌ی بام در سناریوی اول.



شکل ۲۲. نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره بعد از خود برای تیر طبقه‌ی اول در سناریوی اول.

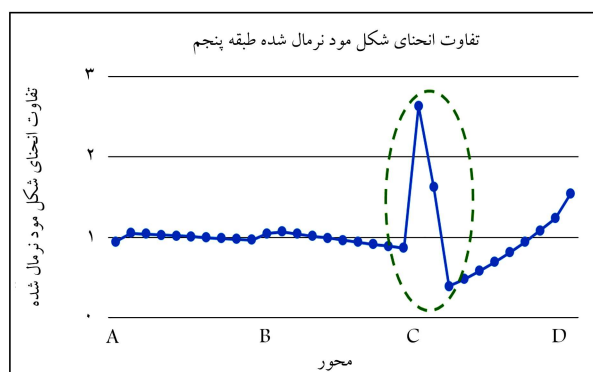


شکل ۲۶. محل اتصال‌های آسیب دیده در سناریوی دوم.

مود است و نشان دهنده‌ی وجود آسیب نیست. آسیب در اتصال ابتدا و انتهای یک تیر در سناریوهای بعدی نشان داده شده است. در مورد آسیب در گره‌های ابتدایی و انتهایی، مقادیر نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر باید در دو گره منتهی به تقاطع تیر و ستون دچار تغییرات ناگهانی شوند، تا نشان‌دهنده‌ی وجود آسیب باشد.

۲.۴. سناریوی دوم

در سناریوی دوم، مطابق شکل ۲۶، علاوه بر دو اتصال در طبقات اول و پنجم، اتصال تیر متصل به ستون محور D در طبقه‌ی بام نیز آسیب دیده است. مشابه سناریوی

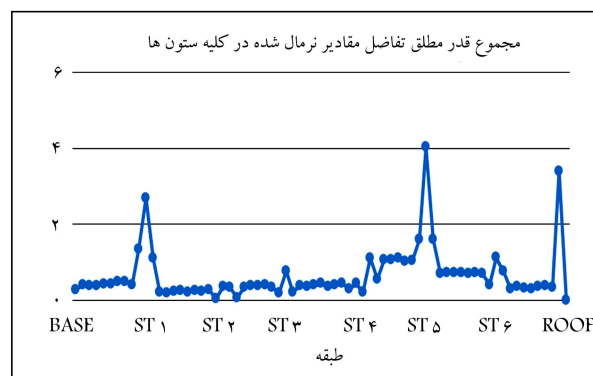


شکل ۲۳. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه‌ی پنجم در سناریوی اول.

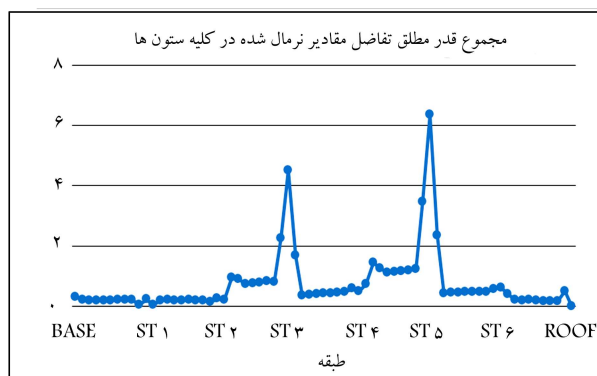
شکل ۲۴، نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره بعد از خود است. با توجه به شکل ۲۴، اتصال سمت راست ستون محور C آسیب دیده است. برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده در نوشتار حاضر، به عنوان نمونه شناسایی آسیب در طبقه‌ی بام (که فاقد آسیب است) انجام شده است. شکل ۲۵، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه‌ی بام را نشان می‌دهد، که با توجه به آن تغییر ناگهانی معنی‌داری برای اثبات وجود آسیب در طبقه‌ی بام وجود ندارد. در مورد گره ابتدایی و انتهایی نیز، اختلاف مشاهده شده مربوط به مقدار ناشی از روش به دست آوردن انحنای شکل



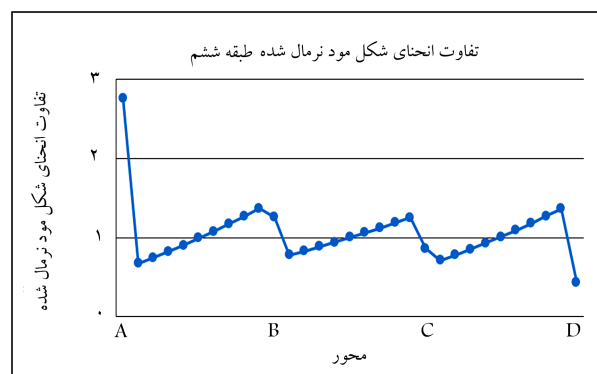
شکل ۲۹. محل اتصال‌های آسیب‌دیده در سناریوی سوم.



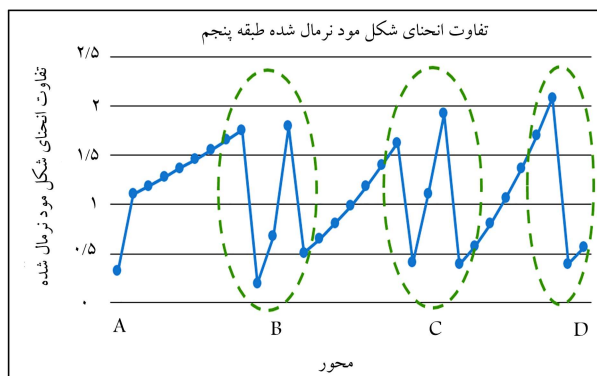
شکل ۲۷. مجموع قدر مطلق مقادیر اختلاف نرمال‌ها در همه‌ی ستون‌ها برای سناریوی دوم.



شکل ۳۰. مجموع قدر مطلق مقادیر اختلاف نرمال‌ها در همه‌ی ستون‌ها برای سناریوی سوم.



شکل ۲۸. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب‌دیده در طبقه‌ی ششم در سناریوی دوم.



شکل ۳۱. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب‌دیده برای طبقه‌ی پنجم در سناریوی سوم.

شکل ۳۰، به خوبی نشان دهنده‌ی وجود آسیب در طبقات سوم و پنجم است. مرحله‌ی دوم شناسایی آسیب که مربوط به شناسایی آسیب در پلان سازه است، بر روی طبقات سوم و پنجم انجام شده است. شکل ۳۱، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب‌دیده برای طبقه‌ی پنجم را نشان می‌دهد.

شکل ۳۲، نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده‌ی هر گره با گره بعد از خود برای طبقه‌ی پنجم است. با توجه به شکل ۳۲، اتصال‌های سمت راست و چپ ستون محوره‌های B و C و همچنین اتصال تیر به ستون محور D آسیب دیده است.

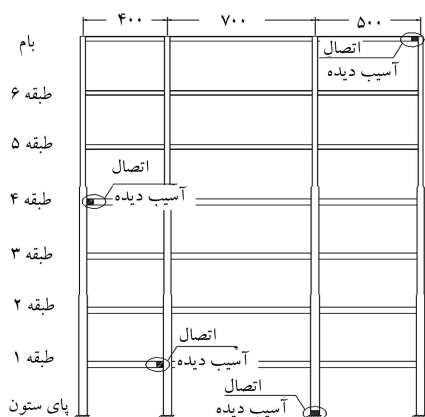
اول، میزان آسیب‌ها، هر یک ۱۵٪ است. مجموع قدر مطلق مقادیر اختلاف نرمال‌ها برای ۴ ستون قاب مذکور در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۲۷، روش ارائه شده وجود آسیب در طبقات اول، پنجم و بام را شناسایی کرده است. در سناریوی دوم، باید طبقات اول، پنجم و بام جهت موقعیت‌یابی دقیق اتصال آسیب‌دیده در پلان بررسی شوند. جهت اطمینان از وجود یا عدم وجود آسیب در طبقه‌ی ششم، طبقه‌ی مذکور نیز برای شناسایی آسیب در پلان بررسی شده است. در شکل ۲۸، نیز نمودار اختلاف انحنای نرمال شده‌ی شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب‌دیده برای طبقه‌ی ششم مشاهده می‌شود، که مطابق آن در طبقه‌ی ششم آسیبی وجود ندارد.

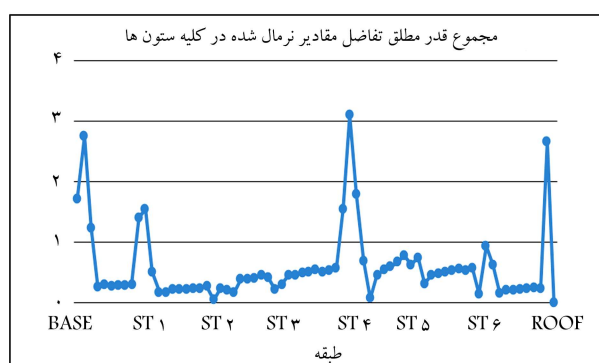
یکی از نقاط قوت روش دو مرحله‌ی معرفی شده، کنترل مجدد وجود آسیب در مرحله‌ی دوم است. بدین صورت که چنانچه آسیبی در ارتفاع سازه گزارش شود، باید در پلان سازه نیز مجدداً شناسایی شود؛ در غیر این صورت، آسیب شناسایی شده در اثر نویز یا خطاهای کوچک محاسباتی بوده است. این نکته در سناریوی دوم، کاملاً مشهود است.

۳.۴. سناریوی سوم

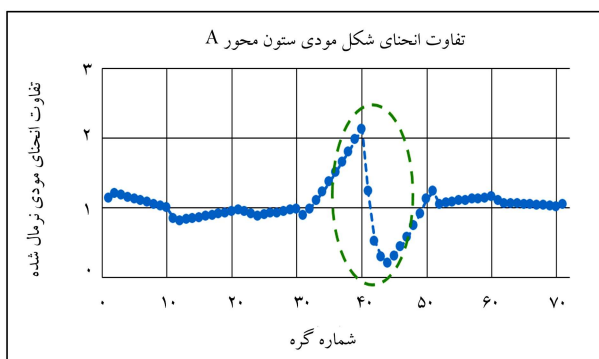
سناریوی سوم جهت نشان دادن دقت روش ارائه شده در سازه‌یابی با اتصال‌های آسیب‌دیده‌ی متعدد انتخاب شده است. مطابق شکل ۲۹، تعداد ۸ اتصال از سازه، هر یک به اندازه‌ی ۱۵٪ آسیب‌دیده‌اند. مرحله‌ی اول شناسایی آسیب در سازه، که مربوط به شناسایی آسیب در ارتفاع است، در شکل ۳۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۳۵. محل اتصال‌های آسیب دیده در سناریوی چهارم.



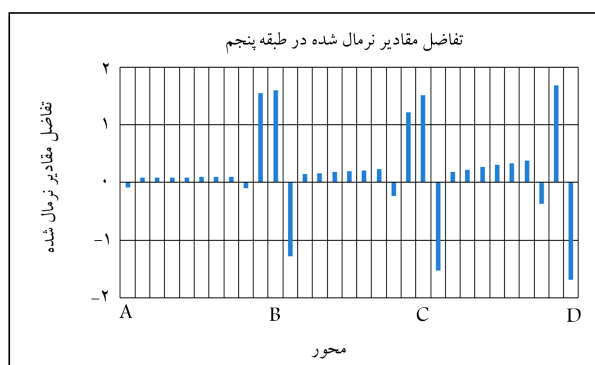
شکل ۳۶. مجموع قدر مطلق تفاضل مقادیر نرمال شده در تمامی ستون‌ها برای سناریوی چهارم.



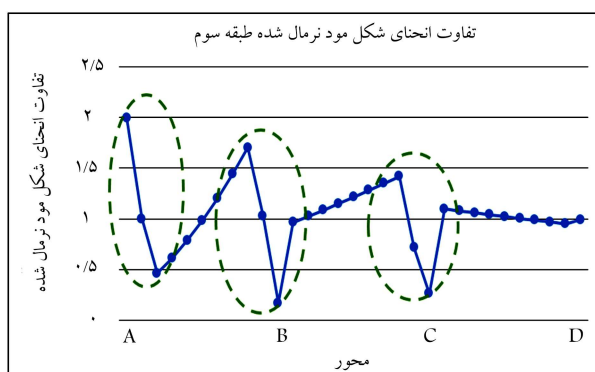
شکل ۳۷. نمودار نرمال شده اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور A در سناریوی چهارم.

شده است. به این منظور، مطابق شکل ۳۵، چهار اتصال از جمله پای ستون محور C در سناریوی چهارم، آسیب دیده اند. همچنین در سناریوی چهارم فرض شده است که پای ستون محور C به اندازه ۱۵٪ آسیب دیده و با صلبیت اتصال آن به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است.

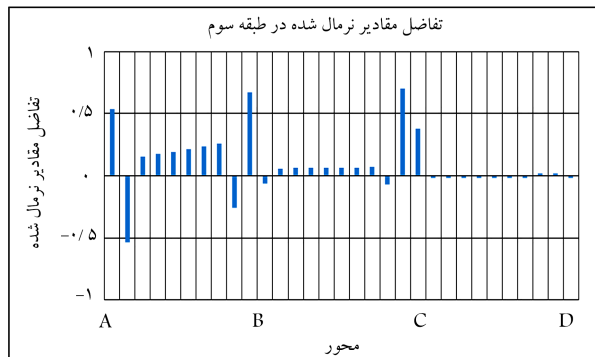
مرحله اول شناسایی آسیب در ارتفاع در شکل ۳۶ نشان داده شده است، که مطابق آن وجود آسیب در طبقات اول، چهارم، بام و پای ستون مشاهده می‌شود. برای شناسایی محل اتصال پای ستون آسیب دیده، باید از اختلاف انحنای شکل مود ستون سالم و آسیب دیده استفاده کرد. به این منظور در ادامه و در شکل ۳۷



شکل ۳۸. نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده هر گره با گره بعد از خود برای طبقه پنجم در سناریوی سوم.



شکل ۳۹. نمودار اختلاف انحنای نرمال شده شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه سوم در سناریوی سوم.



شکل ۴۰. نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده هر گره با گره بعد از خود برای طبقه سوم در سناریوی سوم.

شکل ۳۳، نمودار اختلاف انحنای نرمال شده شکل مود اول تیر در دو حالت سالم و آسیب دیده برای طبقه سوم را نشان می‌دهد. در شکل ۳۴، نمودار اختلاف مقادیر نرمال شده هر گره با گره بعد از خود برای طبقه سوم مشاهده می‌شود، که مطابق آن، اتصال‌های سمت چپ ستون محورهای B و C و همچنین اتصال تیر به ستون محور A آسیب دیده است.

۴.۴. سناریوی چهارم

در سناریوی چهارم، توانایی روش ارائه شده در شناسایی آسیب در پای ستون بررسی

الی^{۴۰}، نمودار اختلاف انحنای شکل مود اول ستون‌های سالم و آسیب دیده برای هر چهار ستون ترسیم شده است. تراز آسیب‌های سازه در شکل‌های مذکور به درستی مشخص شده است. در شکل ۳۹، وجود آسیب در پای ستون محور C' مشهود است. سناریوی چهارم، فقط جهت ارزیابی روش ارائه شده در شناسایی آسیب پای ستون است، و به دلیل ذکر شده، از شناسایی آسیب در پلان صرف‌نظر شده است.

۵. نتیجه‌گیری

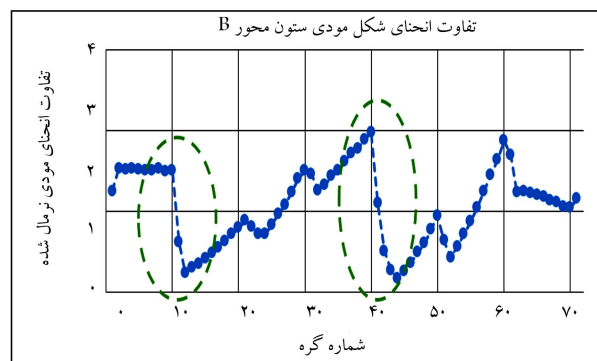
در نوشتار حاضر، یک روش جدید برای شناسایی آسیب اتصال‌های صلب قاب‌های خمشی در ارتفاع و پلان سازه معرفی شده است. روش جدید بر روی یک قاب فولادی ۷ طبقه سه دهانه با ابعاد واقعی مطالعه و طی دو مرحله انجام شده است. روش مذکور، بر اساس روش انحنای شکل مود است. ابتدا شناسایی آسیب در ارتفاع سازه انجام و سپس شناسایی در پلان مد نظر قرار گرفته است. جهت افزایش دقت و کارایی روش ارائه شده، از اطلاعات شکل مود هر یک از ستون‌های سازه به صورت جداگانه استفاده شده است.

روش ارائه شده به دلیل دو مرحله‌یی بودن دقیق و قابل اطمینان است و در صورت وجود خطا یا نویز در هر یک از مراحل، خطای ایجاد شده در مرحله‌ی دیگر از بین می‌رود. در نوشتار حاضر، روش جدیدی برای محاسبه‌ی انحنای شکل مود در ابتدا و انتهای یک سازه ارائه شده است. با استفاده از روش جدید و محاسبه‌ی انحنای شکل مود، شناسایی آسیب در مناطق مرزی یک شکل مود میسر می‌شود. همچنین روش جدیدی برای نرمال کردن اطلاعات خروجی اختلاف انحنای شکل مودها برای موقعیت‌یابی دقیق اتصال آسیب دیده ارائه شده است، که با استفاده از آن، محل دقیق اتصال آسیب دیده در اطراف یک ستون مشخص می‌شود. با استفاده از نوآوری‌های صورت گرفته در نوشتار حاضر، شناسایی آسیب در ارتفاع و پلان سازه به صورت همزمان و نیز در ابتدا و انتهای سازه انجام شده است. همچنین با شاخص ارائه شده، امکان موقعیت‌یابی 10% اتصال‌های آسیب دیده فراهم شده است.

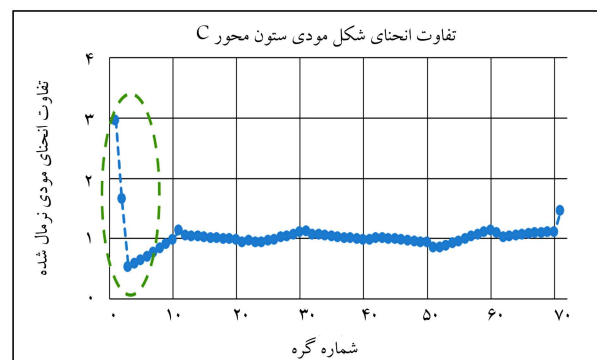
با استفاده از سناریوهای مختلف آسیب در سازه، کارایی روش ارائه شده برای شناسایی اتصال آسیب دیده در ارتفاع و پلان سازه اثبات شده است. در سناریوهای مجزا به بررسی توانایی روش ارائه شده در شناسایی اتصال آسیب دیده در مناطق مرزی سازه، از جمله پای ستون و بام و همچنین اتصال‌های انتهایی سازه پرداخته شده است.

پانویس‌ها

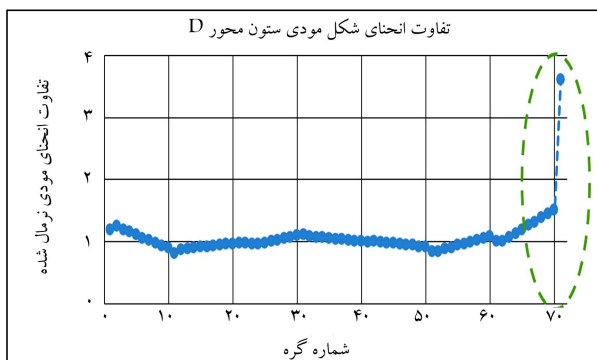
1. structural health monitoring
2. damage detection
3. destructive damage detection
4. non-destructive damage detection
5. curvature damage factor
6. Butterworth



شکل ۳۸. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور B در سناریوی چهارم.



شکل ۳۹. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور C در سناریوی چهارم.



شکل ۴۰. نمودار نرمال شده‌ی اختلاف انحنای شکل مود اول ستون محور D در سناریوی چهارم.

7. Ciambella
8. central difference

۹. سناریوی اول به طور کامل بررسی شده است.

منابع (References)

1. Qiao, L. and Esmaily, A. "An overview of signal-based damage detection methods", *Applied Mechanics and Materials*, **94-96**, pp. 834-851 (2011).
2. Barr, P.J., Woodward, B., Najera, B. and et al. "Long-term structural health monitoring of the san ysidro bridge", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **20**(1), pp. 14-20 (2006).
3. Cardinale, G. and Orlando, M. "Structural evaluation and strengthening of a reinforced concrete bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **9**(1), pp. 44 (2004).
4. Kosmatka, J.B. and Ricles, J.M. "Damage detection in structures by modal vibration characterization", *Journal of Structural Engineering*, **125**(12), pp. 1384 (1999).
5. Ren, W.X. and Roeck, G.D. "Structural damage identification using modal data. I: simulation verification", *Journal of Structural Engineering*, **128**(1), pp. 87 (2002).
6. Shi, Z.Y., Law, S.S. and Zhang, L.M. "Structural damage detection from modal strain energy change", *Journal of Engineering Mechanics*, **126**(12), pp. 1216-1223 (2000).
7. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and et al. "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", *Engineering Structures*, **25**(1), pp. 57-67 (2003).
8. Staszewski, W.J. "Identification of nonlinear system using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform", *Journal of Sound and Vibration*, **214**(4), pp. 639-658 (1998).
9. Kijewski, T. and Kareem, A. "Wavelet transforms for system identification in civil engineering", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **18**(5), pp. 339-355 (2003).
10. Yang, J.N., Lei, Y., Lin, S. and et al. "Hilbert-huang based approach for structural damage detection", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), pp. 85 (2004).
11. Huang, C.S., Huang, S.L., Lin, C.I. and et al. "A wavelet-based approach to identifying structural modal parameters from seismic response and free vibration data", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **20**(6), pp. 408-423 (2005).
12. Hou, Z., Hera, A. and Shinde, A. "Wavelet-based structural health monitoring of earthquake excited structures", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**(4), pp. 268-279 (2006).
13. Chen, H.G., Yan, Y.J. and Jiang, J.S. "Vibration-based damage detection of composite wingbox structures using improved hilbert-huang transform", *Key Engineering Materials*, **324-325**, pp. 539-542 (2006).
14. Yan, B. and Miyamoto, A. "A comparative study of modal parameter identification based on wavelet and hilbert-huang transform", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**(1), pp. 9-23 (2006).
15. Pandey, A.K., Biswas, M. and Samman, M.M. "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, **145**(2), pp. 312-332 (1991).
16. Abdel Wahab, M.M. and Roeck, G. "Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario", *Journal of Sound and Vibration*, **226**(2), pp. 217-235 (1999).
17. Yang, Z.-B., Radzienski, M., Kudela, P. and et al. "Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **84**, pp. 763-781 (2016).
18. Ciambella, J. and Vestroni, F. "The use of modal curvatures for damage localization in beam-type structures", *Journal of Sound and Vibration*, **340**, pp. 126-137 (2015).
19. Amri, G.G., Talebzadeh, M., Talebi, M. and et al. "Damage assessment in connections of moment resistant frames using hilbert-huang transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), pp. 3-11 (In persian)(Spring, 2016).
20. Ciambella, J.; Pau, A. and Vestroni, F. "Effective filtering of modal curvatures for damage identification in beams", *Procedia Engineering*, **199**, pp. 1876-1881 (2017).