

ارزیابی و مقایسه‌ی شاخص‌های مکان‌یابی خسارت در قاب‌های سه بعدی بتنی

رضا عباس‌نیا* (دانشیار)

غزاله صدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی هندی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران: شریف
دردی ۲-۲۸، شماری ۳، ص. ۶۹-۷۷

تشخیص خسارت در سازه‌ها به دلیل تأثیر در مسائل اقتصادی و مدیریت بحران پس از زلزله، مورد توجه محققان قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات، در طیف وسیعی از روش‌های تشخیص خسارت، مبتنی بر پارامترهای ارتعاشی است. مزیت مهم این روش قابلیت شناسایی خسارت در سازه‌های بزرگ است. اغلب مطالعات تشخیص خسارت با روش‌های ارتعاشی به سازه‌های یک یا دو بعدی اختصاص دارد. در سازه‌های سه بعدی این مطالعات محدودترند. در این نوشتار توسعه‌ی روش‌های دینامیکی خصوصاً روش انحنای مودی و روش‌های مبتنی بر انرژی کرنشی مودال در قاب‌های سه بعدی بتن مسلح مطالعه شده است که بر مبنای نتایج، شاخص‌های تغییر انحنای مودی در درجات آزادی چرخشی و تغییر انرژی کرنشی مودال به ازای مؤلفه‌ی محوری ماتریس سختی، دقت قابل قبولی در مکان‌یابی خسارت دارند.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی خسارت، اشکال مودی، قاب سه بعدی.

۱. مقدمه

رویکرد یک تابع هدف قابل‌سنجش میان مدل اندازه‌گرفته‌شده و مدل پیش‌بینی‌شده انتخاب می‌شود. آنگاه از روش بهینه‌سازی برای یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترهای مدل که تابع هدف را کمینه می‌کند، استفاده می‌شود. از این رو انتخاب یک تابع هدف مناسب، کلیدی‌ترین بخش از به‌کارگیری این روش است. روش‌هایی مانند استفاده از الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم شبکه‌ی عصبی از راهکارهای مؤثر در بهینه‌سازی تابع هدف است.^[۱،۲]

دسته‌ی دیگر اساساً شامل استفاده‌ی مستقیم از مشخصات دینامیکی سازه است و با توجه به تغییرات این مشخصات، تشخیص خسارت امکان‌پذیر می‌شود.^[۳] روش‌های ارتعاشی تصویری کلی از سازه را فراهم می‌سازد که در سازه‌های بزرگ و پیچیده توجه به این تصویر کلی از سازه ضروری است. اساس استفاده از خواص ارتعاش برای شناسایی خسارت بر این مبناست که همه‌ی سازه‌ها دارای مشخصاتی نظیر سختی، جرم، مقاومت، و میرایی هستند. هنگامی که خسارتی در سازه به‌وجود می‌آید، این پارامترها تغییر خواهند کرد و این مسئله منجر به تغییر در مشخصات دینامیکی سازه یعنی تابع پاسخ بسامدی و سایر پارامترهای مودال می‌شود. از این رو، این تغییرات می‌توانند به‌منزله‌ی نشانه‌ی از وقوع خسارت سازه‌ی تلقی شوند.^[۴،۵] در دو دهه‌ی اخیر، محققان شاخص‌های متنوع و مختلفی بر مبنای خصوصیات ارتعاشی را برای تشخیص خسارت بررسی کرده‌اند که تحقیقات ابتدایی بر مبنای استفاده‌ی مستقیم از بسامدهای طبیعی و اشکال مودی، به‌منزله‌ی علائم پارامتر ارتعاشی بوده است.^[۶] با گذشت زمان، برای تشخیص دقیق‌تر خسارت به‌ویژه در سازه‌های بزرگ‌تر، شاخص‌های دیگری چون اعطاف‌پذیری دینامیکی، انحنای مودی، بردار نیروی باقیمانده، و انرژی کرنشی مودال معرفی شدند.^[۸] البته روش‌هایی بر

سازه‌های عمرانی پیوسته در معرض بارگذاری‌های خارجی یا عوامل محیطی هستند که این مسئله بروز خسارت در آن‌ها را محتمل می‌کند. از این رو گسترش روشی مناسب برای تعیین وضعیت سازه و بررسی سلامت سازه‌ی برای اجتناب از وقوع شکست ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی در سازه‌ها ضروری است. به فرایند نمایش پیوسته‌ی شرایط سازه و تشخیص خسارت در عمر مفید آن، «بررسی سلامت سازه‌ی» گفته می‌شود.

پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر منجر به گسترش قابل توجه روش‌های تشخیص خسارت برای تعیین سلامت و یکپارچگی سازه‌ها شده است. این روش‌ها شامل آزمایش‌های امواج آکوستیک، روش‌های حرارتی، اولتراسونیک و مغناطیسی، اندازه‌گیری‌های کرنش و روش‌های ارتعاشی بوده است. به استثناء روش ارتعاشی سایر رویکردها برای شناسایی خسارت موضعی و جزئی مناسب‌تر هستند.^[۱]

روش‌های ارتعاشی متداول تشخیص خسارت را می‌توان در دو رده‌ی عمده تفکیک کرد: روش‌هایی که مستقیماً پارامترهای فیزیکی مانند سختی یا نسبت میرایی را تخمین می‌زنند و تغییرات آن‌ها را بررسی می‌کنند. الگوریتم مدل المان محدود به‌روزشونده^۱، یکی از رایج‌ترین رویکردهای استفاده‌شده در این رده است. این رویکرد اطلاعات آزمایشی سازه را به‌منزله‌ی کمیت مرجع به‌کار می‌گیرد و پارامترهای جرم، سختی، و استهلاک منطبق با مدل المان محدودی را برای به‌دست‌آوردن بهترین تطابق میان نتایج عددی و اطلاعات آزمایشی اصلاح می‌کند. سپس مکان هندسی و شدت خسارت، مطابق با ضرایب اصلاحی سازه تعیین می‌شوند. به عبارت بهتر در این

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۲/۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۷/۲۰، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۲۲.

مبنای اندازه‌گیری‌های بسامدهای طبیعی و اشکال مودی نیز گسترش یافته‌اند و برای مکان‌یابی و تخمین شدت خسارت استفاده شده‌اند.^[۹] در این میان مطالعاتی که بر مبنای استفاده از اشکال مودی و انرژی کرنشی مودال بوده‌اند، مانند استفاده از شاخص انحنای مودی یا شاخص انرژی کرنشی یا شاخص تابع پاسخ کرنشی بسامدی، حجم بالایی دارند و موفقیت قابل‌قبولی در تشخیص خسارت داشته‌اند. دلیل این موفقیت، حساسیت شدید این شاخص به مکان و شدت خسارت است.^[۱۰] این شاخص‌ها با در نظر گرفتن رفتار سازه قبل و بعد از خسارت و مقایسه بین آن‌ها برای شناسایی خسارت به‌کار می‌روند.

در یک طبقه‌بندی عمومی، تشخیص خسارت سازه‌ی شامل ۴ مرحله، بررسی وجود یا عدم وجود خسارت، مکان‌یابی خسارت، تخمین شدت خسارت و پیش‌بینی عمر باقیمانده‌ی سازه است.

روش مکان‌یابی خسارت بر مبنای پارامترهای مودال را می‌توان در دو بخش تفکیک کرد: ۱. الگوریتم شناسایی پارامترهای مودال برای تعیین مشخصات دینامیکی؛ ۲. الگوریتم مکان‌یابی خسارت توسط پارامترهای تخمین‌زده‌شده در مرحله‌ی قبلی.^[۱۱] تأثیر خسارت بر سازه می‌تواند در دو دسته‌ی خطی و غیرخطی طبقه‌بندی شود. وضعیت خسارت خطی به مواردی اطلاق می‌شود که سازه‌ی اولیه‌ی کشسانی خطی بعد از وقوع خسارت نیز رفتاری خطی و کشسانی از خود نشان دهد؛ بدین معنی که هر چند مشخصات هندسی و یا مشخصات مواد تشکیل‌دهنده یعنی جرم یا مدول کشسانی تغییر کند، ولی پاسخ‌های سازه را بتوان با استفاده از معادلات حرکت خطی بیان کرد. وضعیت خسارت غیرخطی به مواردی اطلاق می‌شود که سازه‌ی اولیه‌ی کشسانی خطی بعد از وقوع خسارت رفتار غیرخطی از خود نشان دهد.^[۵] علاوه بر این، مدل‌های خسارت نیز در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند: دسته‌ی اول، مدل‌هایی که عمدتاً برای سازه‌های متشکل از عناصر خطی شکل (تیرگونه) و در مهندسی زلزله به‌کار می‌روند که شاخص خسارت از پارامترهایی نظیر نیروهای وابسته به سطح مقطع، شکل‌پذیری یا انرژی مربوط به تغییر شکل اعضای سازه ارزیابی می‌شوند؛ و دسته‌ی دوم، مدل‌های خسارتی هستند که حالت‌های مراحل مصالح مربوط به نقاط سازه را بررسی می‌کنند و بر مبنای اصول ترمودینامیک استوارند.^[۱۲] چنانچه پیش‌تر اشاره شد، بسیاری از روش‌ها برای مکان‌یابی خسارت در تیرها (فضای یک بعدی) یا قاب‌های دو بعدی به‌کار رفته است. در خصوص قاب‌های سه بعدی نیز تحقیقاتی پراکنده صورت گرفته است که به تشخیص خسارت در تیر یا ستون، صرف‌نظر از محل دقیق آن در ستون یا تیر با استفاده از تجزیه‌ی ماتریس سختی به مؤلفه‌های محوری و عرضی اختصاص دارد.^[۱۳] در تعدادی از مطالعات نیز مسئله‌ی تخمین شدت خسارت و وجود اختلال در پارامترهای دینامیکی بیشتر موردنظر بوده است.^[۱۴، ۱۵] در تحقیقات بعدی تشخیص خسارت در قاب‌های دو بعدی (۱۰ طبقه) و سه بعدی (۲ طبقه) بررسی شده است. شایان ذکر است که وجود خسارت یک‌بار در تمام طول اعضا و بار دیگر در نیمه‌ی ابتدایی یا انتهایی اعضا شناسایی شده است. با این حال تعیین محل دقیق‌تر خسارت کمتر مورد توجه بوده است، که البته در خصوص شبیه‌سازی اختلال در ماتریس سختی و تأثیر آن در شناسایی خسارت و هم‌گرایی حل مسئله، موفقیت‌هایی به‌دست آمده است.^[۱۶] در بسیاری از مطالعات استفاده از مدل‌های واقعی و در مقیاس حقیقی یا نزدیک به آن مورد توجه بوده است.^[۱۷، ۱۸] با وجود این برای کسب نتایج دقیق‌تر در خصوص مکان‌یابی خسارت، بررسی‌های بیشتری مورد نیاز است.

این تحقیق به مکان‌یابی خسارت در قاب‌های سه بعدی بتن‌آرمه با استفاده از روش‌های استفاده از تغییر انحنای مودی و انرژی کرنشی مودال اختصاص دارد. برای مکان‌یابی دقیق‌تر در روش تغییر انحنای مودی و حساسیت مودی، اشکال مودی

به درجات آزادی تفکیک شده است و حساسیت مودی با استفاده از رابطه‌های تقریبی، یک‌بار با در نظر گرفتن رفتار خمشی و بار دیگر با در نظر گرفتن رفتار محوری به‌دست آمده است. در ادامه تغییر انرژی کرنشی مودال و نسبت تغییر آن بررسی شده است و برای کسب نتایج دقیق‌تر، ماتریس سختی به مؤلفه‌های خود یعنی محوری، عرضی، عرضی-چرخشی، و چرخشی تفکیک شده است. علاوه بر این، اثر نوع تکیه‌گاه مفصلی نیز در چند حالت خسارت مطالعه شده است. بدین منظور یک قاب سه بعدی منظم بتن‌آرمه در چند حالت خسارت بررسی شده است و قاب مورد بحث با نرم‌افزار المان محدودی Ansys در هر دو حالت سالم و آسیب‌دیده مدل شده و مشخصات دینامیکی آن پس از تحلیل مودال به‌دست آمده است.

۲. معرفی شاخص‌های به‌کاررفته در مکان‌یابی خسارت

این بخش به معرفی شاخص‌های استفاده‌شده در مکان‌یابی خسارت اختصاص دارد. شایان ذکر است که پارامتر دینامیکی مورد استفاده، اشکال مودی و مشتقات آن است.

۱.۲. تغییر انحنای مودی

بر اساس مقاومت مصالح، رابطه‌ی مستقیم بین انحنای اعضا و کرنش خمشی وجود دارد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$\frac{M}{EI} = \kappa \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon}{y} = \kappa \quad (2)$$

در رابطه‌های ۱ و ۲، M معرف ممان خمشی، E مدول کشسانی، I ممان اینرسی، ε کرنش خمشی و y معرف ارتفاع مقطع است. تغییر در انحنای شکل مودی می‌تواند به‌منزله‌ی نشانه‌ی تغییر در سختی خمشی (یا کرنشی خمشی) در مقطع موردنظر محسوب شود که دارای دقت بالاتری نسبت به تفاضل مستقیم جابجایی شکل مودی است و به‌منزله‌ی شاخصی برای آشکارسازی خسارت استفاده می‌شود. انحنای شکل مودی i در گره‌ی z را می‌توان با استفاده از جابجایی مودال و تقریب تفاضلات مرکزی، از رابطه‌ی ۳ به‌دست آورد.

$$k_{ij} = \phi''_{ij} = \frac{\phi_{i(j-1)} - 2\phi_{ij} + \phi_{i(j+1)}}{L^2} \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۳، ϕ_{ij} ، $\phi_{i(j-1)}$ و $\phi_{i(j+1)}$ بیانگر تغییر مکان مودی مود i ام در گره‌ی j ام و دو گره‌ی مجاور آن و L فاصله‌ی نقاط اندازه‌گیری‌شده و k_{ij} معرف انحنای شکل مودی i در گره‌ی j ام هستند. با محاسبه‌ی انحنای شکل مودی برای دو حالت سازه‌ی سالم و خسارت‌دیده و تفاضل آن‌ها از هم، شاخص تغییر انحنای مودی با استفاده از رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$\Delta\phi''_{ij} = \phi''_{ij}^d - \phi''_{ij} \quad (4)$$

که در رابطه‌ی ۴، ϕ''_{ij} و ϕ''_{ij}^d به‌ترتیب بیانگر انحنای شکل مودی سازه‌ی سالم و خسارت‌دیده است.

۲.۲. نسبت حساسیت مودی F_{ij}

حساسیت ε_{ij} آیین سختی مودال المان j ام (انرژی المانی) بر روی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ تعریف می‌شود: [۱۳]

$$F_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_i} \quad (5)$$

$$F_{ij}^d = \frac{\varepsilon_{ij}^d}{\varepsilon_i^d} \quad (6)$$

که در رابطه‌ی ۵، ε_{ij} بیانگر آیین سختی مودال المان j ام و ε_i بیانگر آیین سختی مودال کل سازه است. برای محاسبه‌ی ε_{ij} و ε_i بدون نیاز به تشکیل ماتریس سختی و با در نظر گرفتن رفتار خمشی سازه رابطه‌های تقریبی ۷ و ۸ توصیه شده است: [۹]

$$(\varepsilon_i)_M = (EI)(\gamma_i)_M \quad (7)$$

$$(\varepsilon_{ij})_M = (EI)_j (\gamma_{ij})_M \quad (8)$$

که در رابطه‌های ۷ و ۸ به منظور محاسبه‌ی γ از رابطه‌های ۹ و ۱۰ استفاده می‌شود.

$$(\gamma_{ij})_M = \int_j (\phi_i''(x))^T dx \quad (9)$$

$$(\gamma_i)_M = \sum (\phi_i''(x))^T \quad (10)$$

در رابطه‌های ۸ و ۹ سختی مودال خمشی المان j و در رابطه‌های ۷ و ۱۰ مجموع سختی کل المان‌ها محاسبه می‌شود. به طور مشابه مقدار سختی با در نظر گرفتن رفتار محوری سازه با استفاده از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ به صورت تقریبی محاسبه می‌شود:

$$(\varepsilon_i)_A = (EA)(\gamma_i)_A \quad (11)$$

$$(\varepsilon_{ij})_A = (EA)_j (\gamma_{ij})_A \quad (12)$$

که در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲، γ با استفاده از رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$(\gamma_{ij})_A = \int \phi_i'(x)^T dx \quad (13)$$

$$(\gamma_i)_A = \sum \phi_i'(x)^T \quad (14)$$

در رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴، A معرف سطح مقطع است. مشابه حالت قبل در رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ سختی مودال محوری المان j و در رابطه‌های ۱۱ و ۱۴ مجموع سختی کل المان‌ها محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی مقدار F_{ij} در هر دو سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده و تقاضا آن، شاخص تغییر حساسیت مودی از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$\Delta F_{ij} = F_{ij}^d - F_{ij} \quad (15)$$

که در رابطه‌ی ۱۵، F_{ij} و F_{ij}^d به ترتیب معرف حساسیت سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده است.

۳.۲. تغییرات و نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال

انرژی کرنشی مودال هر المان با ماتریس سختی المانی و مؤلفه‌ی توان دوم شکل مودی تعریف می‌شود. برای آیین المان و آیین مود انرژی کرنشی مودال (MSE)

در دو حالت قبل و بعد از خسارت با استفاده از رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ تعریف می‌شود: [۱۹]

$$MSE_{ij} = \Phi_i^T * K_j * \Phi_i \quad (16)$$

$$MSE_{ij}^d = \Phi_i^{dT} * K_j * \Phi_i^d \quad (17)$$

نکته‌ی قابل توجه آن است که با توجه به معلوم نبودن مقدار سختی المانی بعد از خسارت، با استفاده از تقریب می‌توان از K_j اولیه برای محاسبه‌ی انرژی کرنشی المانی عضو آسیب‌دیده استفاده کرد.

در رابطه‌های ۱۶ و ۱۷، Φ_i^d و Φ_i معرف اشکال مودی المان سالم و آسیب‌دیده و K_j معرف سختی المانی و MSE_{ij} و MSE_{ij}^d معرف انرژی کرنشی مودال المان سالم و آسیب‌دیده‌اند، تغییر انرژی کرنشی مودال با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید: [۱۹]

$$MSECR_{ij} = MSE_{ij}^d - MSE_{ij} \quad (18)$$

نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال نیز که در برخی منابع به منزله‌ی شاخصی برای مکان‌یابی خسارت معرفی می‌شود، [۱۹] با استفاده از رابطه‌ی ۱۹ تعریف می‌شود:

$$MSECR_{ij} = \frac{MSE_{ij}^d - MSE_{ij}}{MSE_{ij}} \quad (19)$$

۴.۲. شاخص β حاصل از نسبت انرژی کرنشی المانی به انرژی

کرنشی کل سازه

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، حساسیت آیین سختی مودال المان j ام (انرژی المانی) در سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ تعریف می‌شود و با استفاده از این روابط و گسترش آن، رابطه‌های ۲۰ و ۲۱ برقرار است: [۱۳]

$$\frac{1 + F_{ij}^d}{1 + F_{ij}} = 1 \quad (20)$$

$$\frac{(\varepsilon_{ij}^d - \varepsilon_i^d)\varepsilon_i}{(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_i)\varepsilon_i^d} = 1 \quad (21)$$

با توجه به اینکه در محاسبه‌ی ε_{ij}^d و ε_i^d به علت معلوم نبودن ماتریس سختی سازه‌ی آسیب‌دیده نمی‌توان از مقدار دقیق آن استفاده کرد و به جای آن ماتریس سختی در حالت سالم به کار می‌رود، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ی ۲۱ برابر عدد ۱ نخواهد بود و به جای آن ضریب β (رابطه‌ی ۲۲) معرفی می‌شود.

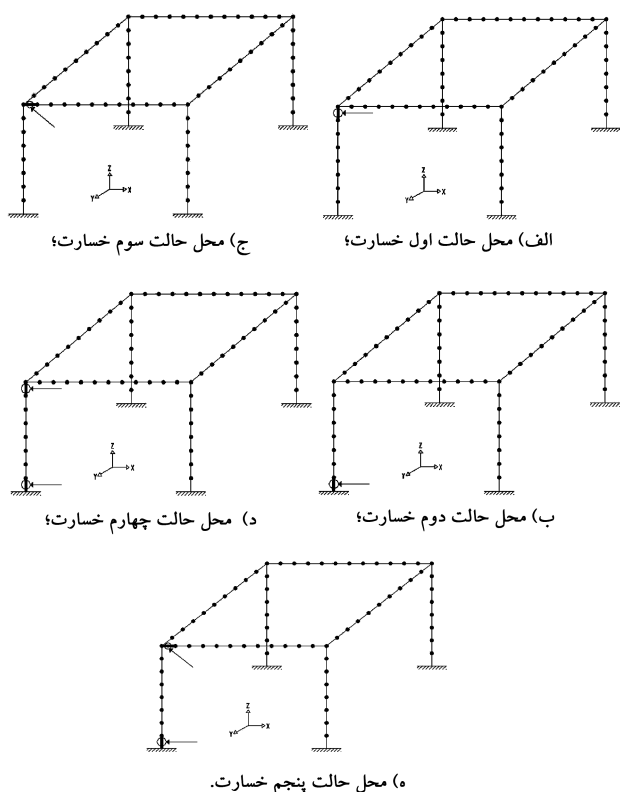
$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} (\Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^* + \Phi_i^{dT} K \Phi_i^*) \Phi_i^T K \Phi_i}{\sum_{i=1}^{N_m} (\Phi_i^T K_j \Phi_i + \Phi_i^T K \Phi_i) \Phi_i^{*T} K \Phi_i^*} \quad (22)$$

که در رابطه‌ی ۲۲، N_m بیانگر تعداد مدهای استخراج شده است.

۳. مکان‌یابی خسارت در قاب سه بعدی

برای مکان‌یابی خسارت در قاب‌های سه بعدی و استفاده از شاخص‌های معرفی شده، یک قاب سه بعدی بتنی یک طبقه با نرم‌افزار المان محدودی Ansys مدل‌سازی شده است. [۲۰] شایان ذکر است که تحلیل‌های انجام شده در محدوده‌ی خطی بوده است و به طور خلاصه مکان‌یابی خسارت در این تحقیق، شامل مراحل زیر است:

۱. مدل‌سازی اولیه‌ی قاب و استخراج اشکال مودی در حالت سالم؛



شکل ۲. قاب خسارت دیده در حالات مختلف.

در نظر گرفته شده است، آسیب پذیری سازه معمولاً در نزدیکی انتهای تیر و ستون و یا به طور کلی در نزدیکی اتصالات اتفاق می افتد. از این رو وجود خسارت در سه حالت مجزا یعنی دو حالت خسارت در ستون و یک حالت در تیر در نظر گرفته شده است. خسارت در ستون در دو نقطه‌ی اتصال به تیر و پای ستون در اتصال به زمین و در تیر در محل اتصال به ستون دیده شده است. علاوه بر این در بسیاری موارد سازه در نقاط مختلف دچار آسیب می شود، از این رو برای بررسی بیشتر در مکان‌یابی خسارت، دو حالت ترکیبی از حالت‌های مجزای خسارت نیز در نظر گرفته و بنابراین ۵ حالت خسارت به شرح زیر مطالعه شده است:

۱. وجود خسارت به میزان ۳۰٪ کاهش ممان اینرسی در المان شماره ۸، شکل ۲الف؛
۲. وجود خسارت به میزان ۳۰٪ کاهش ممان اینرسی در المان شماره ۱، شکل ۲ب؛
۳. وجود خسارت به میزان ۳۰٪ کاهش ممان اینرسی در المان شماره ۳۳، شکل ۲ج؛
۴. وجود خسارت به میزان ۳۰٪ کاهش ممان اینرسی در المان‌های شماره ۱ و ۸، شکل ۲د؛
۵. وجود خسارت به میزان ۳۰٪ کاهش ممان اینرسی در المان‌های شماره ۸ و ۳۳، شکل ۲ه.

۲.۳. حالت اول خسارت: کاهش ۳۰٪ ممان اینرسی در المان شماره ۸

شاخص تغییر انحنای مودی به ازای درجات آزادی مختلف مطالعه شده است. گره‌هایی که دارای بالاترین تغییر انحنای مودی هستند، گره‌های مرتبط با عضو

۲. ایجاد خسارت در قاب با کاهش سختی در المان‌های مورد نظر؛

۳. مدل‌سازی قاب آسیب دیده و استخراج اشکال مودی در حالت خسارت دیده؛

۴. تشکیل ماتریس سختی سازه (در حالت سالم) به صورتی که یک بار ماتریس کل سازه و بار دیگر ماتریس هر المان به صورت مجزا ایجاد شود. شایان ذکر است که ماتریس‌های سختی همه از مختصات محلی به مختصات کلی انتقال یافته است؛

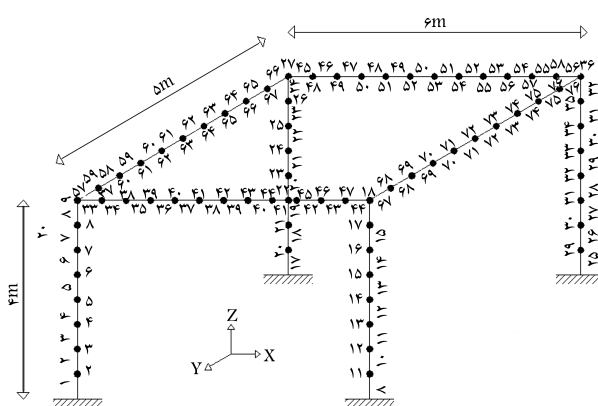
۵. تفکیک اشکال مودی به درجات آزادی و تفکیک ماتریس سختی به مؤلفه‌های خود؛

۶. انجام عملیات جبری شاخص‌های معرفی شده‌ی خسارت با استفاده از اشکال مودی و ماتریس‌های سختی به دست آمده در مراحل قبلی و بررسی تغییرات آن‌ها به کمک نمودار.

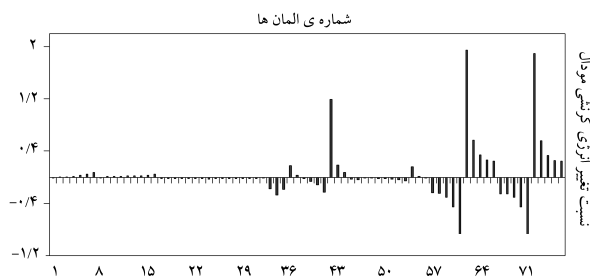
۱.۳. معرفی مدل عددی

هندسه‌ی قاب مورد مطالعه در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. مشخصات مصالح مصرفی عبارتند از: $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $E = 25 \text{ GPa}$ و $\nu = 0.3$. ستون‌ها یک بار برای تمامی حالت‌های خسارت در پای خود گیردار و بار دیگر برای ۳ حالت اول خسارت در پای خود مفصل فرض شده‌اند و اتصال تیرها به ستون‌ها صلب است. سطح مقطع تیرها و ستون‌ها، همه دایره‌هایی به قطر ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از مقاطع دایره‌ای سهولت در تفکیک ماتریس سختی به مؤلفه‌های خود و یکسان بودن مقدار ممان اینرسی در دو محور متعامد مقطع است. شایان ذکر است که ماتریس سختی متشکل از مؤلفه‌های محوری^۱، عرضی^۲، عرضی-چرخشی^۳ و چرخشی است. تفکیک ماتریس سختی به مؤلفه‌ی محوری عبارت است از قراردادن عدد صفر به جای مؤلفه‌های غیرمحوری در ماتریس سختی. این تفکیک برای سایر مؤلفه‌ها نیز انجام می شود.^[۱۸] برای انجام تحلیل، تیرها و ستون‌های قاب در فواصل ۰/۵ متر مش بندی شده است. در هر گره، ۶ درجه‌ی آزادی شامل سه درجه‌ی آزادی انتقالی و سه درجه‌ی آزادی چرخشی در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب قاب متشکل از ۷۶ المان و ۷۶ گره و دارای ۴۳۲ درجه‌ی آزادی در پای گیردار و دارای ۴۴۴ درجه‌ی آزادی در پای مفصل خود است.

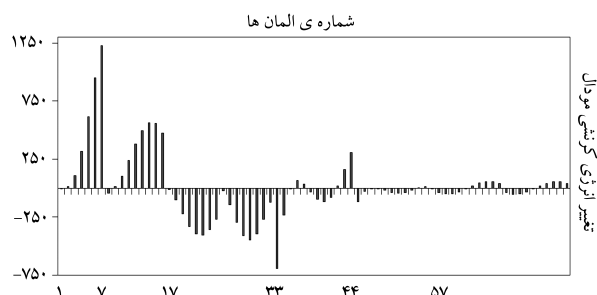
شایان ذکر است که اثر خسارت به صورت کاهش قطر مقطع یعنی کاهش ممان اینرسی و سطح مقطع در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه قاب مورد بحث بتنی



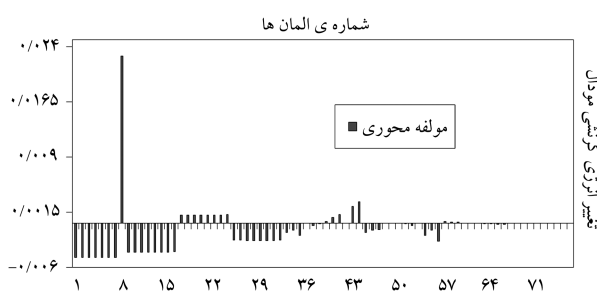
شکل ۱. نمای قاب سه بعدی و شماره‌ی گره‌ها و المان‌های آن.



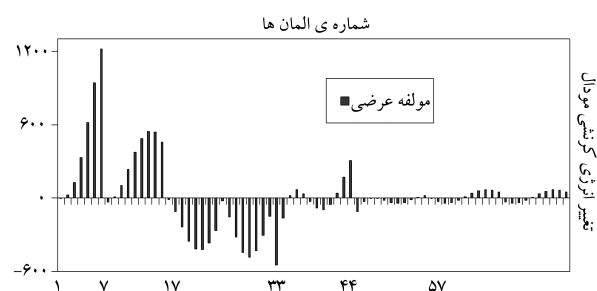
شکل ۵. شاخص نسبت تغییر انرژی کرنشی مودال -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۶. شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال به ازای ماتریس سختی کلی -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۷. شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال به ازای مولفه محوری از ماتریس سختی تفکیک شده -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۸. شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال به ازای مولفه عرضی از ماتریس سختی تفکیک شده -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.

پارامتر EI صورت می‌گیرد. تغییر انرژی کرنشی مودال برای مولفه‌ی محوری در المان ۸ بیشترین مقدار خود را دارد (شکل ۷). در مورد مولفه‌ی عرضی، المان‌های مجاور به المان خسارت‌دیده بالاترین تغییرات را دارند (المان‌های ۷ و ۳۳ در مود اول) (شکل ۸). با توجه به وجود پارامتر EI در ترم‌های عرضی -چرخشی و چرخشی EI نمودار این شاخص در مولفه‌های نامبرده مانند حالت عرضی هستند.

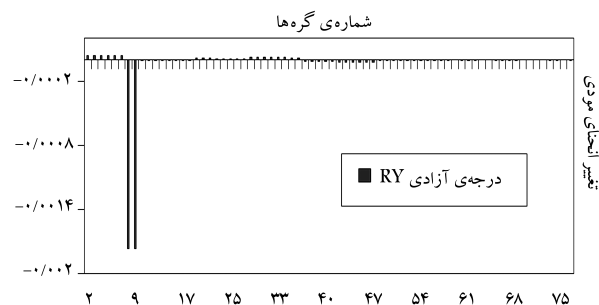
خسارت‌دیده به‌شمار می‌روند. تغییر قابل‌ملاحظه‌ی این شاخص در درجه‌ی آزادی انتقالی UX و درجه‌ی آزادی چرخشی RY در مود اول مبین وجود خسارت در گره‌ی شماره‌ی ۸ است (شکل ۳). تغییرات این شاخص به ازای درجه‌ی آزادی انتقالی UY و درجه‌ی آزادی چرخشی RX در مود دوم به‌ترتیب مشابه درجه‌ی آزادی UX و RY در مود اول است. شایان ذکر است که درجات آزادی چرخشی حساس به خسارت متناظر با درجات آزادی عمود بر درجات آزادی انتقالی در مودهای مربوط است.

تفکیک درجات آزادی برای شاخص تغییر حساسیت مودی با توجه به رفتار خمشی و با توجه به رفتار محوری نیز صورت گرفته و درجات آزادی تأثیرگذار مشابه تغییر انحنای مودی است. شکل تغییرات شاخص حساسیت مودی بر مبنای رفتار خمشی در درجات آزادی UX و RY و شاخص حساسیت مودی بر مبنای رفتار محوری در درجه‌ی آزادی RY کاملاً مشابه بوده و در تمامی این شاخص‌ها هم المان آسیب‌دیده و هم المان‌های مجاور آن متأثر از خسارت‌اند که تغییرات المان آسیب‌دیده از همه بیشتر است (شکل ۴).

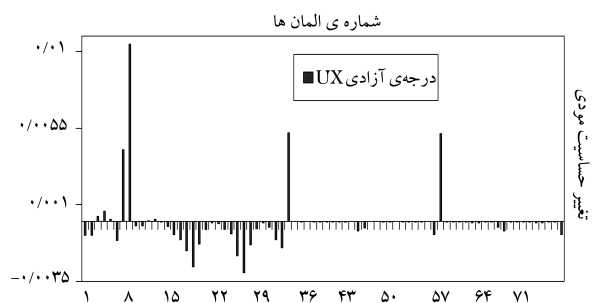
شاخص تغییر حساسیت مودی بر مبنای رفتار محوری در درجه‌ی آزادی انتقالی UX در مود اول، به‌درستی قادر به تشخیص المان خسارت‌دیده نیست.

شاخص نسبت تغییر انرژی کرنشی مودال دارای نتایج قابل‌قبول و مشخصی در مکان‌یابی خسارت نیست و المان‌هایی که تغییرات بالا دارند، المان خسارت‌دیده و المان‌های مجاور آن‌را در برنمی‌گیرند (شکل ۵). بالاترین تغییر در شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال مربوط به المان ۷ یعنی المان مجاور به المان آسیب‌دیده است. همچنین در المان ۳۳ که از جنس تیر است و مجاور به المان خسارت به‌شمار می‌رود، تغییر محسوس‌ی مشاهده می‌شود (شکل ۶).

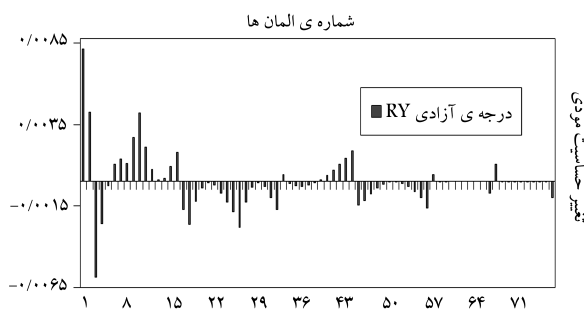
برای بررسی دقیق‌تر عملکرد این شاخص در مکان‌یابی خسارت ماتریس سختی به مولفه‌های خود تفکیک شده است و بار دیگر این نمودارها ارزیابی می‌شوند. این تفکیک برای مولفه‌های محوری، عرضی، عرضی -چرخشی و چرخشی (با توجه به



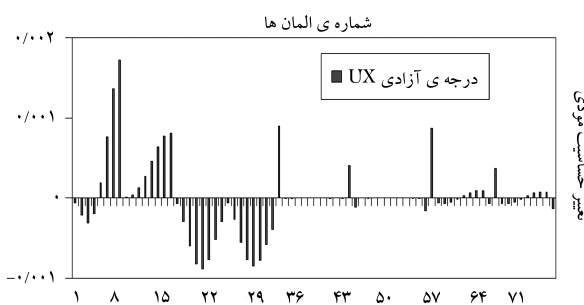
شکل ۹. شاخص تغییرات انحنای مودی در مود اول -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۰. شاخص تغییر حساسیت مودی بر مبنای رفتار خمشی در مود اول -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۱. شاخص تغییر حساسیت بر مبنای رفتار محوری در مود اول -- حالت دوم -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۲. شاخص تغییر حساسیت بر مبنای رفتار محوری در مود اول -- حالت سوم -- تکیه‌گاه گیردار.

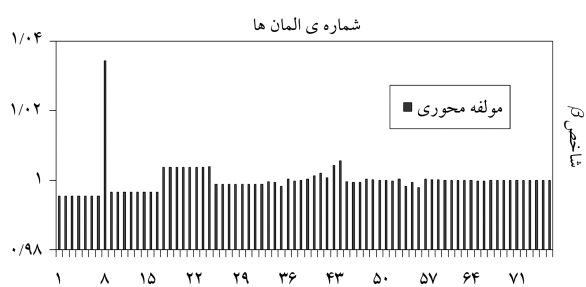
تغییر حساسیت با توجه به رفتار خمشی به ازای درجه‌ی آزادی چرخشی و تغییر حساسیت با توجه به رفتار محوری به ازای درجه‌ی آزادی انتقالی، تغییر انرژی کرنشی مودال و نسبت آن و شاخص β مشابه حالت اول است و تفاوت با حالت اول در شاخص تغییر حساسیت وجود دارد. چنانچه مشخص است المان مجاور به المان خسارت‌دیده چندان به خسارت حساس نیست (شکل ۱۱).

۴.۳. حالت سوم خسارت: کاهش ۳۰٪ ممان اینرسی در المان شماره‌ی ۳۳

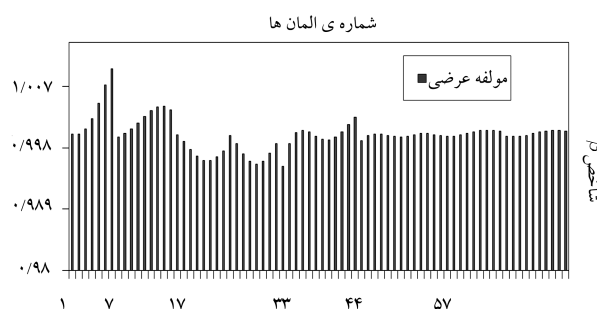
برای بررسی مکان‌یابی خسارت در تیر، وجود خسارت در المان ۳۳ در نظر گرفته شده است. شاخص تغییر انحنای مودی به ازای درجه‌ی آزادی UX در مود اول در گره‌ی ۸ و ۹ (مجاور به المان خسارت‌دیده) دلالت به وجود خسارت در آن نقطه دارد. همچنین، شاخص تغییر حساسیت در المان‌های مجاور به المان خسارت‌دیده نیز دارای تغییرات بالاست (شکل ۱۲). تغییر سایر شاخص‌ها مشابه حالت‌های قبلی خسارت هستند.

۵.۳. حالت چهارم خسارت: کاهش ۳۰٪ ممان اینرسی در المان‌های شماره‌ی ۱ و ۸

برای بررسی مکان‌یابی خسارت هم‌زمان در المان‌های متفاوت، وجود خسارت در المان‌های ۱ و ۸ در نظر گرفته شده است. نتایج شاخص‌ها دارای هم‌پوشانی حالت‌های اول و دوم خسارت است. با این تفاوت که میزان تغییرات در شاخص‌های انحنای مودی به ازای درجه‌ی آزادی چرخشی RY (شکل ۱۳) و تغییر حساسیت مودی با توجه به رفتار خمشی به ازای درجه‌ی آزادی UX و تغییر حساسیت مودی با توجه به رفتار محوری به ازای درجه‌ی آزادی RY متفاوت است. یادآوری می‌شود که شدت خسارت در هر دو المان خسارت‌دیده برابر است.



شکل ۹. شاخص تغییرات β به ازای مولفه محوری از ماتریس سختی تفکیک شده -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۰. شاخص تغییرات β به ازای مولفه عرضی از ماتریس سختی تفکیک شده -- حالت اول -- تکیه‌گاه گیردار.

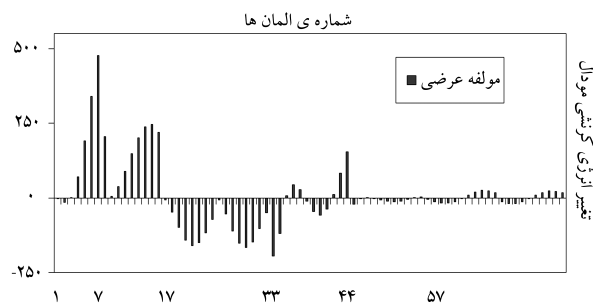
در مورد نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال نتایج روشنی از مکان‌یابی خسارت مشاهده نمی‌شود.

در بررسی شاخص β حاصل از نسبت انرژی کرنشی المانی به انرژی کرنشی کل سازه نیز ماتریس سختی به مؤلفه‌های خود تفکیک شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است، هرچند تغییرات عددی این شاخص در مقایسه با تغییرات عددی انرژی کرنشی مودال متفاوت است، اما نتایج این دو شاخص یعنی شاخص β و تغییر انرژی کرنشی مودال مشابه است.

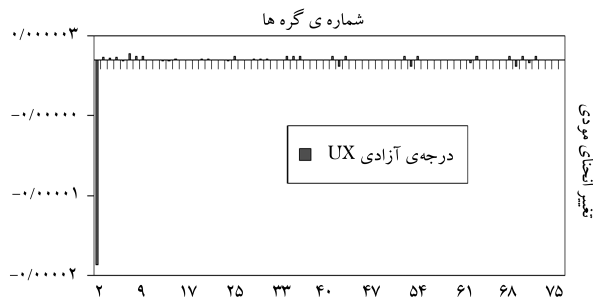
در شاخص‌های مربوط به انرژی کرنشی با توجه به مؤلفه‌های محوری و عرضی، چنانچه پیش‌تر اشاره شد ماتریس سختی به مؤلفه‌های خود تفکیک شده است. در این ماتریس، جمله‌ی $12EI/L^3$ دلالت به مؤلفه‌ی عرضی و جمله‌ی EA/L دلالت به مؤلفه‌ی محوری دارد. با توجه به استقلال جمله‌ی محوری در ماتریس سختی (بقیه‌ی جملات مربوط به مؤلفه‌های پیچشی و عرضی - پیچشی، وابسته به ترم EI هستند) انتظار می‌رود که وضوح تشخیص خسارت در مؤلفه‌ی محوری بیشتر از سایر مؤلفه‌ها باشد که این مسئله در نمودارها مشخص است. علاوه‌براین با توجه به سه بعدی بودن قاب مورد بحث، سختی عضو مجاور به عضو مورد بررسی در ماتریس کلی سختی (که از مختصات محلی به مختصات کلی انتقال یافته است)، اثر می‌گذارد. همچنین راستای مودهای انتقالی و قرارگیری عضو در تعیین نتایج مؤثر است. در المان عمودی با توجه به اینکه عضو متصل به المان افقی باشد یا فقط با عضو عمودی مرتبط باشد، دقت تشخیص متفاوت می‌شود.

۳.۳. حالت دوم خسارت: کاهش ۳۰٪ ممان اینرسی در المان شماره‌ی ۱

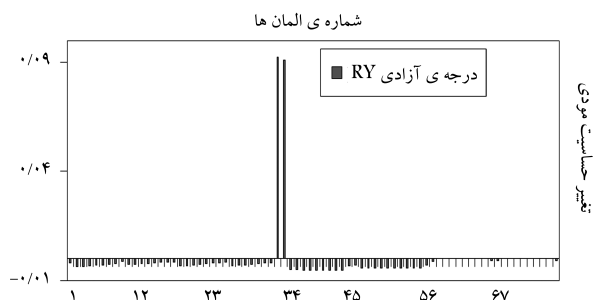
برای بررسی مکان‌یابی خسارت در پای ستون، وجود خسارت در المان ۱ در نظر گرفته شده است. در این حالت نتایج مربوط به شاخص‌های تغییر انحنای مودی،



شکل ۱۵. شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال - حالت پنجم - تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۶. شاخص تغییر انحنای مودی در حالت دوم خسارت - تکیه‌گاه مفصلی.



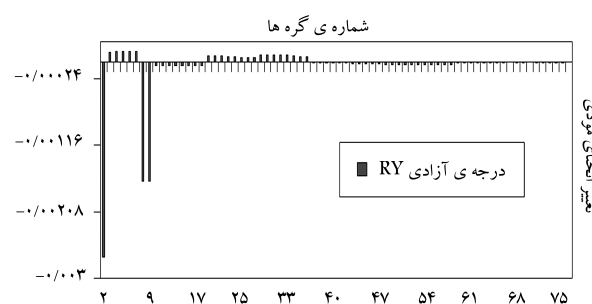
شکل ۱۷. شاخص تغییر حساسیت مودی در حالت سوم خسارت (خمش) - تکیه‌گاه مفصلی.

مکان‌یابی خسارت به چشم نمی‌خورد، هر چند که در درجه‌ی آزادی RY المان آسیب‌دیده کاملاً متمایز است (شکل ۱۷).

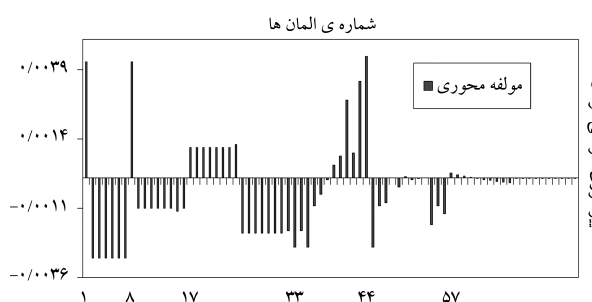
شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال به ازای مؤلفه‌ی محوری از ماتریس سختی در هر سه حالت قادر به مکان‌یابی خسارت است، با این تفاوت که در حالت دوم دقت مکان‌یابی با استفاده از این شاخص بسیار بالا رفته است و در حالت سوم از دقت آن کاسته شده است. اما همین شاخص به ازای مؤلفه‌ی عرضی از ماتریس سختی فقط در حالت دوم با وضوح بالا قادر به مکان‌یابی درست خسارت است (آن هم در خود المان و نه المان مجاور)، و در دو حالت دیگر الزاماً نتایج روشنی از تشخیص خسارت به چشم نمی‌خورد.

۴. نتیجه‌گیری

در این نوشتار مکان‌یابی خسارت در یک قاب بتنی سه بعدی با استفاده از شاخص‌های تغییر انحنای مودی به ازای درجات آزادی مؤثر و شاخص‌های مبتنی بر روش‌های انرژی کرنشی مودال به ازای مؤلفه‌های محوری و عرضی از ماتریس سختی بررسی شد. علاوه بر این برای بررسی اثر نوع تکیه‌گاه بر مکان‌یابی خسارت در اعضای قاب،



شکل ۱۳. شاخص تغییرات انحنای مودی در مود اول - حالت چهارم - تکیه‌گاه گیردار.



شکل ۱۴. شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال - حالت چهارم - تکیه‌گاه گیردار.

تغییر انرژی کرنشی مودال و شاخص β با توجه به مؤلفه‌ی محوری، هر چند به درستی قادر به مکان‌یابی المان خسارت‌دیده است، ولی دارای خطای قابل‌ملاحظه در المان ۴۴ است (شکل ۱۴). همچنین تغییر انرژی کرنشی مودال و شاخص β با توجه به مؤلفه‌ی عرضی فقط قادر به تشخیص خسارت در المان ۱ است.

۶.۳. حالت پنجم خسارت: کاهش ۳۰٪ ممان اینرسی در المان‌های شماره ۸ و ۳۳

برای بررسی مکان‌یابی خسارت هم‌زمان در المان‌های متفاوت، این بار وجود خسارت در المان‌های ۸ و ۳۳ در نظر گرفته شده است. نتایج شاخص‌ها نیز دارای هم‌پوشانی حالت اول و سوم خسارت است. با این تفاوت که تغییر انرژی کرنشی مودال (شکل ۱۵) و شاخص β با توجه به مؤلفه‌ی عرضی فقط قادر به تشخیص خسارت در المان ۸ است.

۷.۳. بررسی اثر تکیه‌گاه مفصلی در پای ستون در سه حالت اول خسارت

چنانچه پیش‌تر توضیح داده شد، در سه حالت اول خسارت، تکیه‌گاه ستون به زمین مفصلی مدل شده است تا بتوان اثر نوع تکیه‌گاه را بر مکان‌یابی خسارت بهتر ارزیابی کرد. در حالت اول خسارت تغییر در شاخص‌های انحنای و حساسیت مودی (با توجه به رفتار خمشی و محوری) در هیچ‌کدام از درجات آزادی مشاهده نشد. در حالت دوم خسارت دقت شاخص‌های تغییر انحنای و حساسیت هم در المان آسیب‌دیده بسیار بالاتر رفته است (شکل ۱۶).

در حالت سوم شاخص تغییر انحنای مودی تغییر نیافته است، ولی در شاخص حساسیت با توجه به رفتار خمشی در درجه‌ی آزادی UX نتیجه‌ی روشنی از

سختی تفکیک‌شده به مؤلفه‌ی عرضی در المان مجاور به المان خسارت‌دیده حساس هستند.

۶. هنگامی‌که چند محل خسارت‌دیده در سازه وجود دارد، احتمال خطا در شناسایی مکان خسارت افزایش می‌یابد؛ با این حال شاخص تغییر انحنای مودی در درجات آزادی چرخشی و شاخص‌های تغییر انرژی کرنشی مودال و شاخص β به ازای ماتریس سختی تفکیک‌شده به مؤلفه‌ی محوری موفقیت بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارند.

در تکیه‌گاه مفصلی:

۷. دقت شاخص‌های به‌کاررفته نسبت به حالت گیردار تغییر می‌یابد. در حالت تشخیص خسارت در پای ستون همه‌ی شاخص‌های عنوان‌شده، دقت بالایی در مکان‌یابی خسارت دارند. در حالت تشخیص خسارت در ستون (در محل اتصال به تیر)، تفاوتی در شاخص‌های تغییر انحنای و حساسیت و انرژی کرنشی به ازای مؤلفه‌ی محوری دیده نشده است، ولی دقت شاخص تغییر انرژی کرنشی به ازای مؤلفه‌ی عرضی کاهش می‌یابد. در حالت تشخیص خسارت در تیر (در محل اتصال به ستون) تغییر انحنای و حساسیت در درجات آزادی چرخشی دارای دقت کافی در مکان‌یابی خسارت است، ولی در سایر شاخص‌ها از دقت مکان‌یابی کاسته شده‌است و توانایی مکان‌یابی صحیح خسارت از بین می‌رود.

سازه یک‌بار با تکیه‌گاه گیردار (در سه حالت خسارت مجزا و دو حالت با ترکیب خسارت‌ها) و بار دیگر با تکیه‌گاه مفصلی (در سه حالت خسارت مجزا) مدل‌سازی و بررسی شد. بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده موارد زیر جمع‌بندی می‌شود:

۱. استفاده از یک شاخص، به‌تنهایی برای مکان‌یابی خسارت دقت کافی ندارد و لازم است از چند شاخص به این منظور استفاده شود.

در تکیه‌گاه گیردار:

۲. شاخص تغییر انحنای مودی قادر به مکان‌یابی قابل‌قبول خسارت است و به ازای درجات آزادی چرخشی دقت بالاتری نسبت به درجات آزادی انتقالی دارد.

۳. شاخص تغییر حساسیت مودی با توجه به رفتار خمشی و محوری به ازای درجات آزادی چرخشی، دقت قابل‌قبولی دارد. دقت این شاخص به ازای درجات آزادی انتقالی نسبت به درجات آزادی چرخشی کمتر است و در بعضی حالات در المان‌های مجاور به المان آسیب‌دیده تأثیر قابل‌توجه می‌گذارد.

۴. شاخص نسبت تغییر انرژی کرنشی مودال عملکرد بسیار ضعیف و غیرقابل استناد در مکان‌یابی خسارت دارد.

۵. شاخص‌های تغییر انرژی کرنشی مودال و نسبت انرژی کرنشی المانی به انرژی کرنشی کل (شاخص β)، به ازای ماتریس سختی تفکیک‌شده به مؤلفه‌ی محوری دارای موفقیت قابل‌قبول در مکان‌یابی خسارت‌اند. این شاخص‌ها به ازای ماتریس

پانویس‌ها

1. model updating
2. axial
3. transverse- rotational

منابع (References)

1. Yan, Y.J.; Cheng, L.; Wu, Z.Y. and Yam, L.H. "Development in vibration-based structural damage detection technique", *Mechanical System and Signal Processing*, **21**(5), pp. 2198-2211 (2007).
2. Perera, R.; Ruiz, A. and Manzano, C. "Performance assessment of multicriteria damage identification genetic algorithms", *Computer & Structures*, **87**(1-2), pp. 120-127 (2009).
3. Golnalez, M.P. and Zapico, J.L. "Seismic damage identification in buildings using neural networks and modal data", *Computer & Structures*, **86**(3-5), pp. 416-426 (2008).
4. Yinfeng, D.; Yingmin, L. and Ming, L. "Structural damage detection using empirical-mode decomposition and vector autoregressive moving average model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(3), pp. 133-145 (2010).
5. Doebling, S.W.; Farrar, C.R.; Prime, M.B. and Shevitz, D.W., *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS (May 1996).
6. Abbasnia, R. and Ayoubi, N. "A new method for damage detection based on changes in the basic modal properties", *Modares Technical And Engineering*, (35), pp.43-53 (2009).
7. Alampalli, S.; Fu, G. and Dillon, E.W. "Signal versus noise in damage detection by experimental modal analysis", *Journal of Structural Engineering*, **123**(2), pp.237-245 (1997).
8. Carden, E.P. and Fanning, P. "Vibration based condition monitoring: A review", *Structural Health Monitoring*, **3**(4), pp. 355-377 (2004).
9. Jeong-Tea, K.; Yeon-Sun, R.; Hyun-Man, C. and Norris, S. "Damage identification in beam-type structures: Frequency-based method and mode-shape-based method", *Engineering Structures*, **25**(1), pp. 57-67 (2003).
10. Li, Y.Y. "Hypersensitivity of strain-based indicators for structural damage identification: A review", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24**(3), pp. 653-664 (2010).
11. Barroso, L.R. and Rodriguez, R. "Damage detection utilizing the damage index method to a benchmark structure", *Journal Engineering Mech.*, **130**(2), pp. 142-151 (2004).

12. Hanganu, A.D.; Onate, E. and Barbar, A.H. "A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures", *Computers & structures*, **80**(20-21), pp. 1667-1687 (2002).
13. Li, H.; Yang, H. and James Hu, S.L. "Modal strain energy decomposition method for damage localization in 3D frame structures", *Journal of Engineering Mech.*, **132**(9), pp. 941-951 (2006).
14. James Hu, S.L.; Wang, S. and Li, H. "Cross-modal strain energy method for estimating damage severity", *Journal of Engineering Mech.*, **132**(4), pp. 429-437 (2006).
15. Hsu, T.Y. and Loh, C.H. "Damage diagnosis of frame structure using modified modal strain energy change method", *Journal of Engineering Mech.*, **134**(11), pp. 1000-1012 (2008).
16. Rodríguez, R.; Escobar, J.A. and Góñez, R. "Damage location and assessment along structural elements using damage submatrices", *Engineering Structures*, **31**(2), pp. 475-486 (2009).
17. Zonta, D.; Elgamal, A.; Fraser, M. and Nigel Priestley, M.J. "Analysis of change in dynamic properties of a frame-resistant test building", *Engineering Structures*, **30**(1), pp. 183-196 (2008).
18. Yi, W.; Zhou, Y.; Kunnath, S. and Xu, B. "Identification of localized frame parameters using higher natural modes", *Engineering Structures*, **30**(11), pp. 3082-3094 (2008).
19. Shi, Z.Y.; Law, S.S and Zahng, L.M. "Structural damage detection from modal strain energy Change", *Journal Engineering Mech.*, **126**(12), pp. 1216-1223 (2000).
20. Kokot, S. and Zembaty, Z. "Damage reconstruction of 3D frames using genetic algorithms with Levenberg-Marquardt local search", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, PP. 1-13 (2008).