

## شناسایی آسیب در پایه‌های پل‌های بتن آرمه تحت ارتعاش محیطی به کمک روش

### بهینه‌یابی

سروش صفاخواه، دانشجوی دکترای سازه، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی،

اراک، ایران

علی خیرالدین\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

سید مهدی زهرائی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

حسین رحامی، دانشیار، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران

Email: Kheyroddin@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۶/۱۵ - پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۵

### چکیده

امروزه، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌طور گسترده‌ای در جهت شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده می‌شود. در حالی که در این مقاله سعی شده به دور از این الگوریتم‌ها و صرفاً از روش‌های کلاسیک و ریاضی بهینه‌یابی که درک فیزیکی بهتری به ما می‌دهند استفاده شود. در این مقاله، روش جدیدی برای تشخیص آسیب‌های محیطی ایجاد شده در پایه‌های پل‌ها به صورت مسئله معکوس پیشنهاد شده است. در این روش، در ابتدا، با توجه به یک سناریوی مشخص آسیب، درصد آسیب و موقعیت آن فرض می‌شود. سپس، با فرض محدود بودن اطلاعات ارتعاشی، با استفاده از روش بهینه‌یابی و تعریف تابع هدف برای عضو خمشی محوری پایه پل، مقدار متغیر (درصد کاهش سختی) به دست می‌آید. با توجه به خطی در نظر گرفتن آسیب در حد پوسته پوسته شدن بتن، و با استفاده از روش بهینه‌یابی خطی به روش سیمپلکس، حداقل میزان خطای ایجاد شده در سه حالت مورد بررسی، مقادیر ۰/۷، ۰/۱ و ۱/۴۵ درصد (اکثر مواقع سه رابطه) به دست آمد که بیانگر انطباق خوب بین نتایج روش پیشنهادی و مقادیر اولیه می‌باشد. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی، از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده شد. بررسی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب در پایه پل‌های بتن آرمه، با دقت زیادی می‌تواند استفاده شود. واژه‌های کلیدی: شناسایی آسیب، روش بهینه‌یابی، ارتعاش محیطی، پایه پل بتن آرمه

### ۱. مقدمه

برخوردارند. نقش بازرسی فنی منظم پل‌ها جهت حصول اطمینان از ایمنی سازه‌های آنها از جمله موارد ضروری در حوزه مدیریت یکپارچه پل‌ها می‌باشد. نظر به عملکرد ویژه پل‌ها در عبور ترافیک از روی

پل‌ها به عنوان یکی از مهمترین سازه‌ها در برقراری ارتباط بین نقاط مختلف یک کشور، که در مسیر راه‌های ارتباطی بین مناطق قرار دارند، از اهمیت زیادی

سختی و ظرفیت باربری سازه از مدل بهنگام شده اجزای محدود استفاده می‌شود. این روش‌ها به صورت گسترده در سلامت‌سنجی پل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها، نیاز به حجم گسترده‌ای از اطلاعات اندازه‌گیری شده است. همچنین، ضمن نیاز به مدل اجزای محدود، آزمایش‌های استاتیکی باید انجام شود که موجب اختلال در سرویس‌دهی سازه می‌گردد.

روش‌های ارتعاشی پایه را می‌توان به روش‌های مودی و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های مودی، از تغییرات به‌وجود آمده در پارامترهای مودی اندازه‌گیری شده مانند فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و میرایی برای شناسایی آسیب استفاده می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۰۳). روش‌های تشخیص آسیب مودی می‌تواند به خوبی برای تعیین خواص دینامیک سیستم-های سازه‌ای به‌کار رود. ایده این روش‌ها بر این اساس است که تغییرات به‌وجود آمده در مشخصه‌های سازه بر اثر ایجاد آسیب، پارامترهای مودی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در خصوص مسائل بهینه‌یابی با استفاده از پارامترهای مودال، رن و دیراک (۲۰۰۲) یک تکنیک شناسایی آسیب بر اساس مدل اجزای محدود با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی ارائه کردند. معادلات آسیب‌المان‌ها با استفاده از معادلات مشخصه پایه‌ریزی شد. سپس، روش‌های مختلف حل مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه شدند. مدل تحلیلی آنها در تیرهای ساده و پیوسته به کار برده شده است.

روتولو و سوراس (۱۹۹۷) به حل مسائل بهینه‌سازی تشخیص آسیب پرداختند. تابع هدف بر اساس آسیب کلی و مشخصات ارتعاشی سازه (فرکانس‌های طبیعی ارتعاش، شکل‌های مودی و انحنای شکل مودی) فرمول‌بندی شد و روش تشخیص آسیب برای داده‌های آزمایشی و شبیه‌سازی شده در تیرهای فولادی طره‌ای با سناریوهای مختلف به کار برده شده و نشان داده شد

رودخانه‌ها، مسیل‌ها و کاهش معضلات ترافیکی تقاطع-های شهری پُر ازدحام، بروز مشکلات فنی و در موارد خاص ریزش پل‌ها، خسارات جانی و مالی فراوانی به دنبال خواهد داشت. افزون بر این، قابلیت استفاده بی-وقفه از پل‌ها در حین و پس از وقوع بلایای طبیعی، زمانی که عملیات امداد و نجات باید با حداکثر سرعت ممکن صورت گیرد، اهمیتی دوچندان می‌یابد، زیرا در صورت مناسب نبودن عملکرد آنها و در نهایت خراب شدن این سازه‌ها، منجر به بسته شدن راه ارتباطی می‌گردد. بنابراین، در طول عمر مفید این پل‌ها، باید مراقبت‌های لازم به عمل آید و با انجام بازدیدهای فنی، کارایی و یا نواقص سازه‌ای پل‌ها مشخص گردد. وجود ناکارایی سازه‌ای بدین معناست که برخی از المان‌های پل نیاز به کنترل منظم و یا تعمیر دارند. ناکارایی سازه‌ای به معنی نایمن بودن و یا احتمال ریزش کلی پل نمی‌باشد. بلکه لزوم پایش سازه پل، انجام بازدیدهای منظم و بهسازی پل را بیان می‌نماید.

روش‌های قدیمی برای تشخیص آسیب وارده به سازه شامل روش‌های مشاهده‌ای یا آزمایش‌های غیر مخرب محلی هستند. در این روش‌ها، لازم است تمامی اعضای سازه به صورت محلی مورد بررسی قرار گیرند و بنابراین کاری بسیار زمان‌بر و پُر زحمت است (احمدی و دانشجو، ۱۳۸۹؛ بالاگس و همکاران، ۲۰۰۶). با این وجود، روش‌های دیگری برای سلامت‌سنجی و تشخیص آسیب در سازه‌ها و پل‌ها مطرح شده که از جمله آنها روش‌های تشخیص آسیب بر اساس اندازه-گیری پاسخ‌های سازه است که به دو دسته استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شوند (یان و همکاران، ۲۰۰۷). با استفاده از روش‌های استاتیکی پایه و دینامیکی ارتعاش پایه، امکان شناسایی و ارزیابی آسیب در سازه‌ها فراهم می‌شود. روش‌های استاتیکی پایه بر اساس اندازه‌گیری-های کرنش یا جابجایی سازه پل تحت اثر بارهای استاتیک مشخص‌اند که برای تعیین تغییرات در خیز،

با ۱۵٪ کاهش سختی سیستم بوده که نشان‌دهنده قابلیت مناسب و واقع‌گرایانه بودن استفاده از این روش برای فرض استفاده از کاهش سختی یکنواخت در المان‌های بتن می‌باشد (زمباتی و همکاران، ۲۰۰۶).

به‌طور معمول، آسیب سازه‌ای به‌صورت کاهش در سختی مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود (مرانس و همکاران، ۲۰۱۱):

$$K_d = (1 - \lambda)K_h \quad (1)$$

که  $K_d$  سختی سازه آسیب دیده،  $K_h$  سختی سازه سالم و  $\lambda$  ضریب کاهش سختی می‌باشد. کاهش سختی می‌تواند به صورت کاهش در مدول الاستیسیته در معادلات عددی و یا کاهش در سطح مقطع اعضای سازه‌ای در معادلات آزمایشگاهی مدل شود. پارک و همکاران (۲۰۰۲) با کاهش مدول الاستیسیته اعضای آسیب دیده، به مدل‌سازی آسیب پل خرابایی فلزی پرداختند. الوندی و کرمونا (۲۰۰۶) روش مشابهی را برای مدل‌سازی آسیب تیرهای فولادی با تکیه‌گاه‌های مفصلی ارائه کردند. کورهللی و همکاران (۲۰۱۵) و (۲۰۱۷) به صورت گسترده‌ای این روش را برای تیرها، قاب‌ها و خرپاها جهت مدل‌سازی آسیب به‌کار بردند. رسولی و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) نیز این روش را برای تیرها و قاب‌های بتنی و فلزی مورد استفاده قرار دادند. مورد مشابه در تمامی تحقیقات ذکر شده در بالا، یکنواخت فرض کردن کاهش سختی در محل آسیب بوده است.

در روش دوم مدل‌سازی آسیب، عضو آسیب دیده در محل آسیب به دو قسمت تقسیم شده و توسط المان‌های فنر دورانی به یکدیگر متصل می‌شوند. در روش سوم که استفاده از مدل‌های مبتنی بر مکانیک شکست می‌باشد، به دلیل حجم بیشتر محاسباتی که به الگوریتم شناسایی آسیب تحمیل می‌نمایند، کمتر از دو روش نخست، توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار

که روش ارائه شده می‌تواند موقعیت آسیب را تشخیص داده و محل ترک را پیش‌بینی نماید. هائو و شیا (۲۰۰۲) از بهینه‌سازی تابع هدف با سه معیار تغییرات فرکانس، تغییرات شکل‌های مودی و تغییرات هر دو استفاده کردند. نتایج آزمایشی یک تیر طره برای بررسی روش ارائه شده استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که روش ارائه شده، برای تشخیص آسیب برای تیرها مناسب است. همچنین، در زمینه استفاده از اطلاعات مودال ناقص، یان و همکاران (۲۰۰۷) و گنزالز و زاپیکو (۲۰۰۸) به تشخیص آسیب در ساختمان قابی ۵ طبقه پرداختند. در مورد کارهای انجام شده در داخل کشور نیز اسفندیاری و همکاران (۲۰۰۷) سازه‌های خرابایی و قاب‌ها را مورد بررسی قرار دادند. رسولی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از اطلاعات ناقص ارتعاشی، به بهینه‌سازی سازه‌های خمشی و خرابایی از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری پرداختند و نتایج مناسبی نیز حاصل شد. در این مقاله سعی شده به دور از این الگوریتم‌ها و صرفاً از روش‌های کلاسیک و ریاضی بهینه‌یابی استفاده شود.

## ۲. معرفی توابع هدف و روش بهینه‌یابی

به‌طور کلی، روش‌های مدل‌سازی آسیب را می‌توان به سه دسته کلی کاهش موضعی سختی، استفاده از المان فنر مجزا و همچنین مدل‌های پیچیده مبتنی بر مکانیک شکست تقسیم نمود. از میان روش‌های نامبرده شده، روش کاهش موضعی سختی ساده‌ترین روش مدل‌سازی می‌باشد. این روش از طریق کاهش مدول الاستیسیته و یا مدول برشی، کاهش ممان اینرسی در یک مقطع و یا ایجاد یک شکاف به‌صورت یک ناپیوستگی در مدل اجزای محدود اعمال می‌گردد. در یکی از تحقیقات گذشته، تغییر پارامترهای مودال سازه با توسعه ترک‌ها در بتن روی قاب‌های بتن مسلح نشان داد که آستانه قابل مشاهده بودن ترک‌های اولیه، متناظر

اطلاعات محدود ارتعاشی سازه پرداخته می‌شود. پارامترهای مودال می‌توانند به سادگی از معادله مشخصه به‌دست آیند.

معادله مشخصه برای سیستم‌های چند درجه آزادی را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) بیان کرد (چوپرا، ۲۰۰۷):

$$([K] - (\omega_k)^2[M])\{\phi\}_k = \{0\} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

در این رابطه،  $[K]$  ماتریس سختی سازه سالم،  $\omega_k$  فرکانس طبیعی ارتعاش مود  $k$  ام در سازه سالم و  $\{\phi\}_k$  بردار شکل مود ارتعاشی  $k$  ام در سازه سالم است. این معادله را در حالت آسیب دیده می‌توان به‌صورت رابطه (۳) نیز نوشت:

$$([K]^d - (\omega_k^d)^2[M])\{\phi\}_k^d = \{0\} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

در این رابطه،  $[K]^d$  ماتریس سختی سازه آسیب دیده،  $\omega_k^d$  فرکانس طبیعی ارتعاش مود  $k$  ام در سازه آسیب دیده و  $\{\phi\}_k^d$  بردار شکل مود ارتعاش  $k$  ام در سازه آسیب دیده است. با توجه به این که اطلاعات مودال مربوط به درجات آزادی اندازه‌گیری شده (تعداد سنسورها)، معمولاً کمتر از درجات آزادی کل سازه می‌باشد، لازم است اطلاعات درجات آزادی موجود نگاه داشته شده و مابقی حذف گردد که این کار با استفاده از تراکم استاتیک ماتریس‌های سختی و جرم امکان‌پذیر است.

با کاهش تعداد درجات آزادی، معادله (۳) به‌صورت معادله (۴) در می‌آید:

$$([K]_{re}^d - (\omega_{k,re}^d)^2[M]_{re})\{\phi\}_{k,re}^d = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_{re} \quad (4)$$

در این رابطه،  $[M]_{re}$  ماتریس جرم کاهش یافته سازه آسیب دیده،  $[K]_{re}^d$  ماتریس سختی کاهش یافته سازه آسیب دیده،  $\omega_{k,re}^d$  فرکانس طبیعی ارتعاش مود  $k$  ام در سازه آسیب دیده در حالت کاهش یافته،  $\{\phi\}_{k,re}^d$

گرفته‌اند. در این مقاله، جهت مدل‌سازی آسیب، از روش اول (کاهش مدول الاستیسیته) استفاده شده است. بهینه‌یابی در واقع رسیدن به بهترین نتیجه، در مورد یک عملیات است، در حالی که محدودیت‌های مشخصی برآورده شده باشند. در این مقاله، با توجه به شرایط طرح مسئله، از روش بهینه‌یابی استفاده شده است. بنابراین، لازم می‌باشد که مبانی رابطه‌سازی و نوع روش مورد استفاده بیان گردد. در بهینه‌سازی، به طور ضمنی، اختیار تغییر سازه یک پیش‌فرض است. پتانسیل تغییر به طور معمول براساس محدودهای از تغییرات در تعدادی از پارامترها بیان می‌شود. چنین پارامترهایی در اصطلاح بهینه‌سازی معمولاً متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند. متغیرهای طراحی می‌توانند ابعاد سطح مقطع یا اندازه اعضا، پارامترهای کنترل هندسه سازه، خواص مصالح آن و غیره باشد. متغیرها ممکن است مقادیر پیوسته یا گسسته داشته باشند (هفتکا و گوردال، ۱۹۹۳). در این مقاله، مقادیر درصد آسیب، که از کاهش مدول ارتجاعی به‌دست می‌آید، به عنوان متغیر پیوسته لحاظ می‌شود.

مفهوم بهینه‌سازی ایجاب می‌کند که تابع یا توابع شایستگی وجود داشته باشد که بتواند بهبود یابد و از آن به عنوان معیار مؤثر بودن طراحی استفاده شود. اصطلاح معمول برای چنین توابعی، توابع هدف است. برای شناسایی آسیب، روش‌های مختلفی به صورت مسئله بهینه‌یابی با استفاده از پارامترهای مودال به عنوان تابع هدف فرمول‌بندی شده‌اند. مسئله تشخیص آسیب یک مسئله بهینه‌سازی مقید است که در آن ضرایب کاهش سختی هر عضو به عنوان پارامترهای بهنگام شدن می‌باشند. با تشکیل تابع هدف مناسب، به همراه قیود مورد نظر، به بهینه‌سازی (کمینه‌سازی) تابع هدف پرداخته می‌شود. تابع هدف به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مشخصات دینامیک را به طور کامل در بر داشته باشد. در این مقاله، به تعیین تابع هدف با استفاده از

خواهد داشت. در نتیجه، تابع هدف با در نظر گرفتن همه روابط تعامد مودها برابر خواهد شد با:

$$F(\lambda) = \sum_{r=1}^m ((\phi)_{k, re}^d)_r^T \left( \sum_{j=1}^{me} (1 - \lambda_j) [K]_j^d \right) ((\phi)_{k, re}^d)_n \quad (8)$$

$j = 1, \dots, me$

در رابطه‌سازی‌ها، محدود بودن به مقادیر در یک بازه مشخص به معنای حدود بر متغیرهای طراحی می‌باشد. این قیود حد بالا و پایین متغیرهای طراحی به خاطر سادگی اغلب در روش‌های حل به شکل ویژه‌ای در نظر گرفته می‌شوند و قیود جانبی نامیده می‌شوند. قیودی که حد بالا و پایین مقادیر را اعمال می‌کنند به علت طبیعتشان قیود نامساوی‌اند. در این مقاله، دو نوع قید در نظر گرفته می‌شود. قید اول، محدوده درصد آسیب را نشان می‌دهد که مقادیری بین صفر و یک دارند، به عبارت دیگر، درصد آسیب بین صفر و ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود. قید دوم نیز مثبت بودن تابع هدف را نشان می‌دهد. موارد مطرح شده در روابط (۹) و (۱۰) آورده شده است.

$$(0 \leq \lambda_j \leq 1) \quad (9)$$

$$0 \leq F(\{\lambda\}) \quad (10)$$

اکثر روش‌های بهینه‌یابی بر مبنای فنون جستجوی عددی‌اند. این فنون، با یک طراحی اولیه شروع می‌شوند و با گام‌های کوچکی، مقدار تابع هدف یا میزان مقبولیت قیود، و یا هر دو را بهبود می‌بخشند. هنگامی که نتوان بدون نقض قید، در بهبود بخشیدن به تابع هدف پیشرفتی حاصل کرد، جستجو متوقف می‌شود. در سال‌های اخیر، توجه به کاربرد ابزارهای کلاسیک در بهینه‌سازی سازه‌ها افزایش یافته است. مطالعه مسائل کلاسیک نه تنها برای تأکید اصول فنون روش‌های کلاسیک لازم است، بلکه به عنوان یک ضرورت اساسی در بهینه‌سازی سازه‌ها مطرح است. صورت کامل جواب‌های دقیق مسائل کلاسیک به عنوان اعتباربخشی

بردار شکل مود ارتعاشی  $k$  ام پایه آسیب دیده در حالت کاهش یافته و  $N_{re}$  تعداد کل مودهای ارتعاشی کاهش یافته می‌باشد. با حل معادله (۴)، مقادیر فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی کاهش یافته محاسبه می‌شوند.

در این مقاله، تابع هدف، تعامد مودها تعریف شده است. مفهوم فیزیکی تعامد مودها این است که کار انجام شده توسط نیروهای استاتیکی، نظیر تغییر مکان‌های مود  $n$  ام به علت تغییر مکان‌های مود  $r$  ام، مساوی صفر است. در کارهای گذشته، تعامد مودها توسط فارر و وُردن (۲۰۱۳) به عنوان قید و توسط رسولی و همکاران (۲۰۱۴) به عنوان تابع هدف معرفی شده بود.

$$(\{\phi\}_{k, re}^d)_r^T [K]_{re}^d (\{\phi\}_{k, re}^d)_n = 0 \quad r \neq n \quad (5)$$

با کاربرد مودهای ارتعاشی ناقص سازه آسیب‌دیده در رابطه (۵)، در واقع مسئله تعیین آسیب به یک مسئله معکوس تبدیل می‌شود که هدف تعیین مقدار آسیب در اعضای سازه (مقدار آسیب عضو  $j$  ام با پارامتر  $\lambda_j$  مشخص می‌شود) می‌باشد. فرایند تعیین مقدار آسیب اعضاء به عنوان یک مسئله معکوس می‌تواند به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شود. شکل تابع هدف در این مسئله بهینه‌سازی به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$F_{r,n}(\lambda) = ((\phi)_{k, re}^d)_r^T [K]_{re}^d ((\phi)_{k, re}^d)_n \quad (6)$$

$$F_{r,n}(\lambda) = ((\phi)_{k, re}^d)_r^T \left( \sum_{j=1}^{me} (1 - \lambda_j) [K]_j^d \right) ((\phi)_{k, re}^d)_n \quad (7)$$

در این روابط،  $(\phi)_{k, re}^d)_r$  و  $(\phi)_{k, re}^d)_n$  مقادیر شکل مودهای ارتعاشی ناقص سازه آسیب‌دیده برای دو مود مختلف  $r$  و  $n$  می‌باشند. همچنین  $me$  نشان‌دهنده تعداد اعضا می‌باشد. اگر مقدار و موقعیت آسیب در اعضای سازه صحیح تشخیص داده شود، مقدار بردار نیروی باقیمانده صفر خواهد شد. برای همه مودهای ارتعاشی در سازه آسیب دیده  $(N)$ ، تعداد  $M = N(N - 1)/2$  رابطه تعامد مود وجود

### ۳. مدل عددی

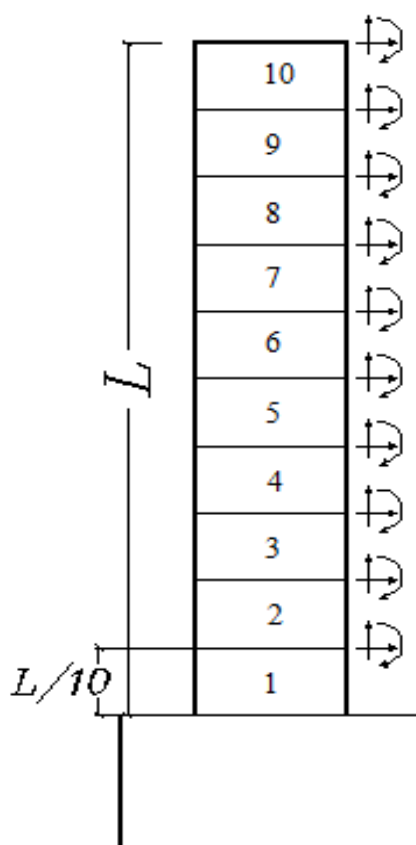
در این مرحله، با توجه به سناریوهای مشخص آسیب، به تحلیل مودال سازه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2015 پرداخته و مقادیر فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی پایه آسیب دیده به دست می‌آیند. در واقع این اطلاعات جایگزین داده‌هایی است که در سازه واقعی براساس پردازش داده‌های به دست آمده از سنسورهای نصب شده روی پایه به دست می‌آیند. مدل در نظر گرفته شده، مقیاس ۱/۳ از مدل واقعی طراحی شده می‌باشد. پایه دارای قطر و طول به ترتیب برابر با ۲۵ و ۹۰ سانتی متر بوده و از ۱۰ المان و ۱۱ گره تشکیل شده است. جهت مدل‌سازی اجزای محدود از المان خمشی محوری استفاده می‌شود که هر گره دارای سه درجه آزادی شامل تغییر مکان‌های افقی و قائم و همچنین دوران می‌باشد. ترتیب نام‌گذاری درجات آزادی از پایین پایه به سمت بالا به ترتیب براساس نوع محوری، برشی و دورانی می‌باشد. براساس المان‌بندی انجام گرفته، پایه مورد مطالعه دارای ۳۳ درجه آزادی است که جزییات و مشخصات مصالح و هندسه به کار رفته به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است. با توجه به اینکه معمولاً تعداد درجات آزادی در نظر گرفته شده بیشتر از تعداد سنسورهای اندازه‌گیری اطلاعات می‌باشد، برای در نظر گرفتن اطلاعات ناقص ارتعاشی فرض می‌شود فقط درجات آزادی مربوط به تغییر مکان افقی اندازه‌گیری شده است. یعنی تنها اطلاعات ۱۰ درجه آزادی موجود می‌باشد. بنابراین، برای کاهش درجات آزادی از ۳۳ به ۱۰، روش تراکم استاتیک مورد استفاده قرار گرفت. در واقع با استفاده از عملیات تراکم می‌توان درجات آزادی سازه را کاهش داد و به تعداد درجات آزادی دارای اطلاعات معلوم رساند. نهایتاً به آنالیز مودال سازه پرداخته و مقادیر فرکانس‌ها و شکل‌های مودی پایه، تحت هر سناریوی آسیب محاسبه می‌شوند.

جواب‌های به دست آمده از فنون عمومی‌تر عددی تقریبی به کار می‌روند. از آن مهمتر، بهینه‌سازی کلاسیک شاید بهترین راهکاری باشد که بتوان به سؤال وجود و یگانگی طراحی‌های بهین و مشخص کردن شرایط لازم و کافی بهینگی پاسخ دهد. عبارت برنامه‌ریزی خطی (LP)، گروه خاصی از مسائل اکسترمم‌سازی را در بر می‌گیرد که در آنها تابع هدف و روابط قید، توابع خطی از متغیرهای طراحی‌اند. از آنجا که شرط لازم برای یک مینیم درونی، صفر شدن مشتق اول تابع نسبت به متغیرهای طراحی است، مسائل برنامه‌ریزی خطی یک ویژگی مخصوص به خود دارند. آن ویژگی این است که مشتق تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی اعدادی ثابت‌اند که لزوماً صفر نیستند. این موضوع ایجاب می‌کند که اکسترموم یک مسئله برنامه‌ریزی خطی نتواند در داخل فضای طراحی قابل قبول باشد. بنابراین باید روی مرز فضای طراحی که با روابط قیود مشخص می‌شود، قرار بگیرد. از آنجا که روابط قیود هم توابع خطی از متغیرهای طراحی‌اند، طراحی بهین باید در محل دو یا چند تابع قید باشد؛ مگر اینکه مرز قید موازی خطوط تراز تابع هدف باشد (هفتکا و گوردال، ۱۹۹۳). این ویژگی مسائل برنامه‌ریزی خطی این امکان را فراهم می‌سازد که الگوریتم‌های مؤثری که برای رسیدن به جواب‌های بهینه مناسبند، طراحی شوند. مسائل برنامه‌ریزی خطی که تعداد زیادی متغیر طراحی و قید دارند معمولاً با یک روش بسیار کارا و مطمئن به نام روش سیمپلکس حل می‌شوند.

الگوریتم سیمپلکس که توسط جورج دانتزینگ شکل گرفت، مسائل برنامه‌ریزی خطی را به این ترتیب حل می‌کند که یک جواب قابل قبول در یکی از رئوس چندضلعی فراهم می‌کند و سپس در راستای اضلاع چندضلعی به طرف رئوسی با مقدار بالاتری از تابع هدف حرکت می‌کند تا این که به نقطه بهینه برسد.

جدول ۱. مشخصات پایه پل

مقدار	واحد	مشخصات مصالح و هندسه
$229 \times 10^4$	نیوتن بر متر مربع	مدول الاستیسیته
۲۵۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی
$0.0490873$	متر مربع	سطح مقطع
$0.00019174$	متر به توان چهار	ممان اینرسی
$0/9$	متر	طول نمونه (L)



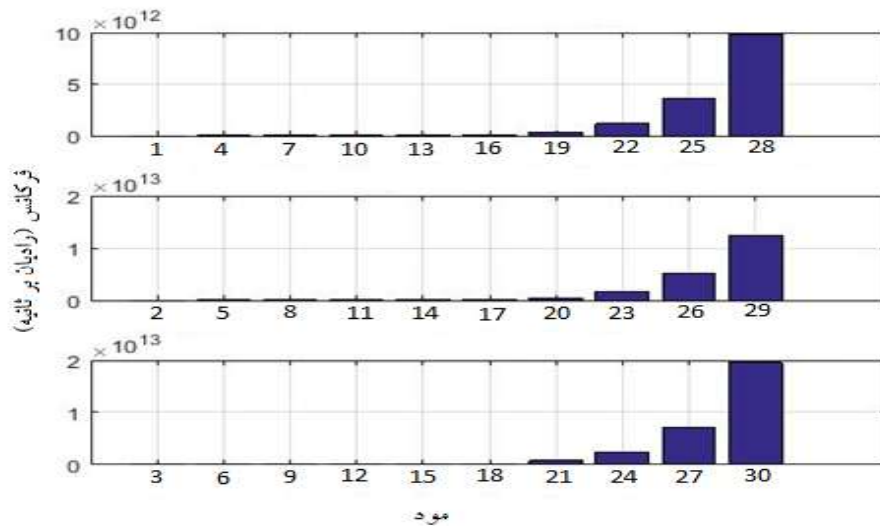
شکل ۱. المان‌بندی و درجات آزادی پایه پل

### ۳-۱. آنالیز مودال پایه سالم

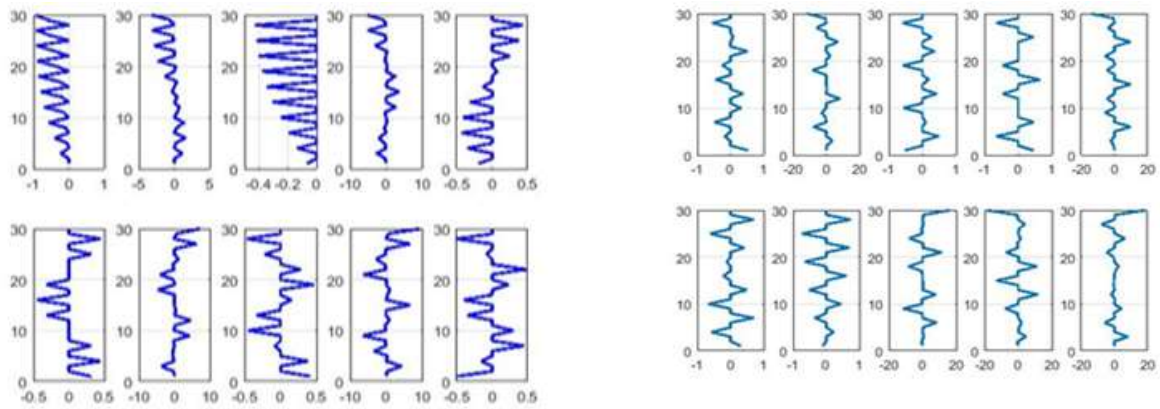
جهت بررسی دقیق مشخصات دینامیک پایه و مقایسه نتایج حالت‌های دیگر، به آنالیز پایه سالم پرداخته و مقادیر شکل‌های مودی و فرکانس‌ها (شکل‌های ۲ و ۳)

به دست می‌آیند. لازم به ذکر است درجات آزادی ۱، ۴، ۷، ... و ۲۸ مربوط به درجات آزادی محوری، درجات ۲، ۵، ۸، ... و ۲۹ مختص درجات آزادی برشی و مقادیر ۳، ۶، ۹، .. و ۳۰ مربوط به درجات آزادی دورانی می‌باشند.

شناسایی آسیب در پایه‌های پل‌های بتن آرمه تحت ارتعاش محیطی به کمک روش بهینه‌یابی

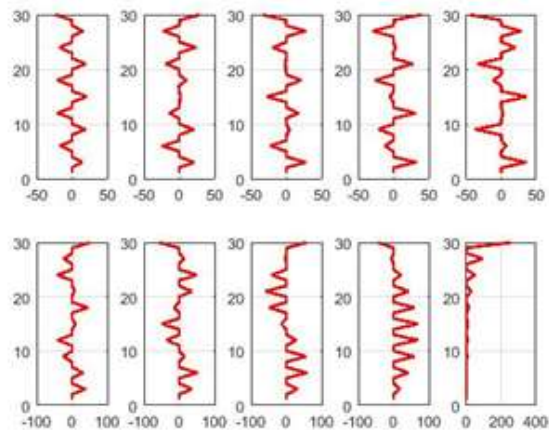


شکل ۲. فرکانس‌های پایه بدون آسیب برای تمامی درجات آزادی



الف

ب



ج

شکل ۳. شکل‌های مودی سازه سالم: الف) ده مود اول، ب) ده مود دوم و ج) ده مود سوم



### ۲-۳. آنالیز مودال پایه آسیب دیده

مقادیر و موقعیت آسیب، با توجه به سناریوی از پیش معلوم برای مدل در نظر گرفته می‌شود. با توجه به در نظر گرفتن ارتعاشات محیطی و کم دامنه، سه سناریوی آسیب به مقدار ۱۰ درصد مطابق با جدول ۲، به مدل تحلیلی اختصاص می‌یابد.

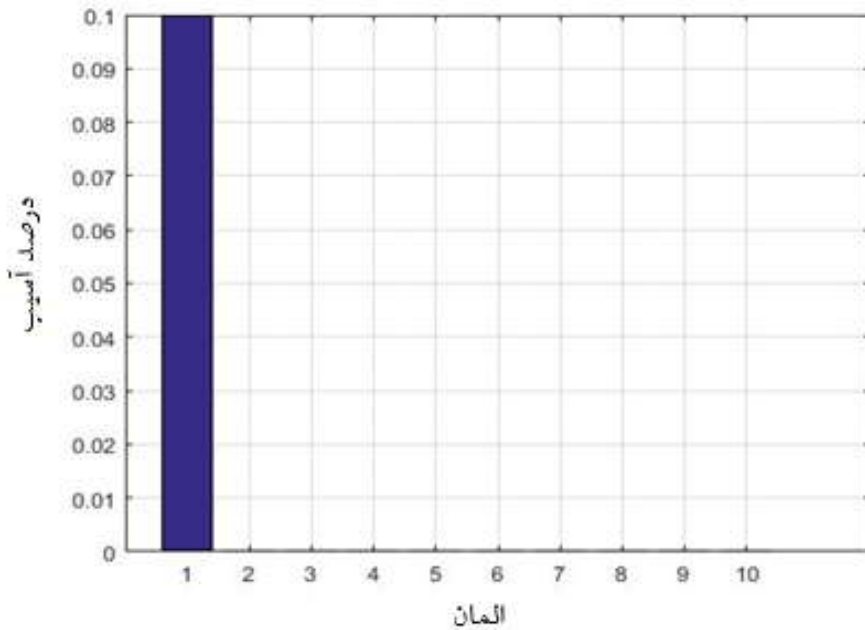
جدول ۲. سناریوهای آسیب

سناریوی سه	سناریوی دو	سناریوی یک
المان شماره ده ۱۰٪	المان شماره پنج ۱۰٪	المان شماره یک ۱۰٪

که با فرض معلوم بودن درجات آزادی برشی، مابقی درجات حذف می‌شوند که نتیجه این عمل، کاهش تعداد درجات از ۳۳ به ۱۰ می‌باشد. مقادیر فرکانس و شکل‌های مودی ۱۰ درجه آزادی برشی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

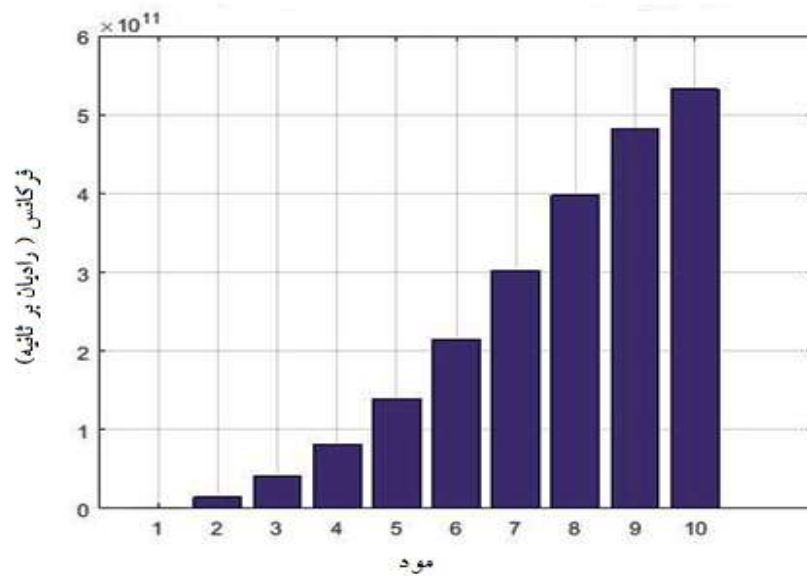
### ۱-۲-۳. سناریوی اول آسیب

در اولین حالت مورد بررسی، آسیب به میزان ۱۰٪ در المان شماره یک، به وسیله کاهش مدول الاستیسیته در ماتریس سختی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴). با توجه به ناقص بودن اطلاعات ارتعاشی، عموماً از کاهش درجات آزادی استفاده می‌شود. به این ترتیب

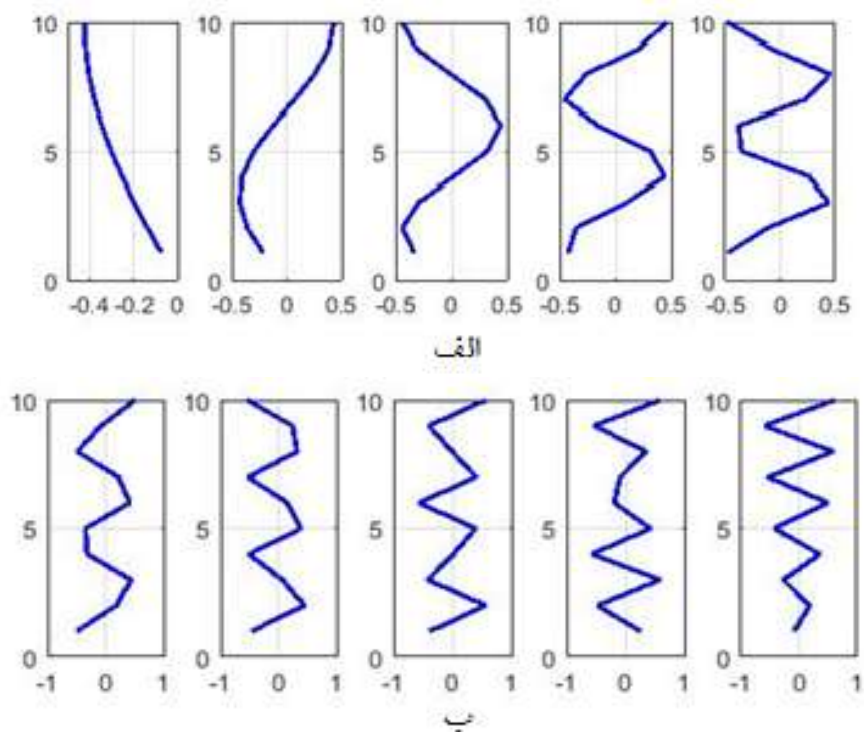


شکل ۴. مقادیر آسیب سناریوی یک

شناسایی آسیب در پایه‌های پل‌های بتن آرمه تحت ارتعاش محیطی به کمک روش بهینه‌یابی



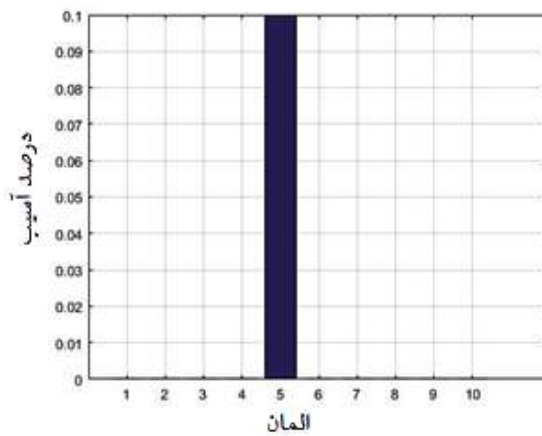
شکل ۵. مقادیر فرکانس‌های طبیعی در سناریوی یک پس از عملیات تراکم



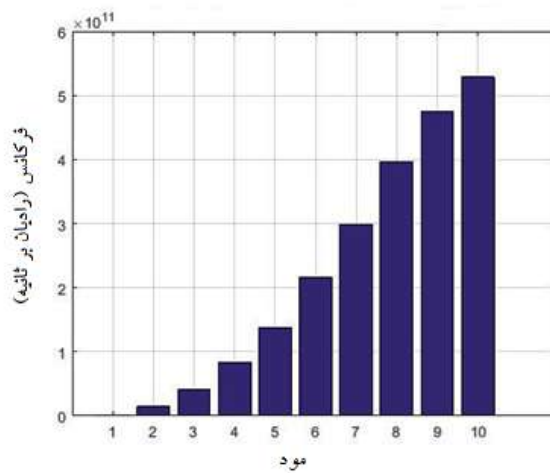
شکل ۶. شکل‌های مودی سازه در سناریوی یک پس از عملیات تراکم: الف) ۵ مود برشی اول و ب) ۵ مود برشی دوم

است (شکل‌های ۷ و ۱۰). مقادیر اطلاعات ارتعاشی برای این دو حالت نیز محاسبه می‌گردند (شکل‌های ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲).

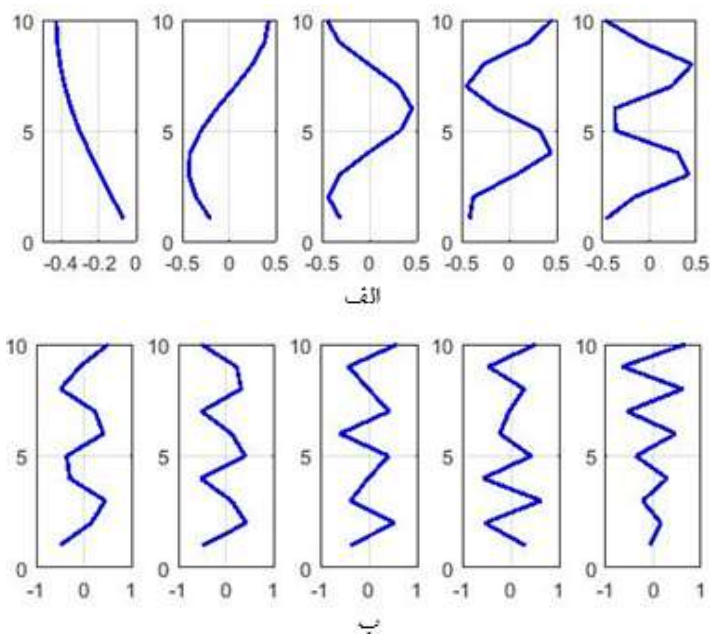
۲-۲-۳. سناریوی دوم و سوم آسیب در حالت‌های دوم و سوم به ترتیب مقدار آسیب در المان شماره ۵ و ۱۰ برابر با ۱۰٪ در نظر گرفته شده



شکل ۷. مقادیر آسیب سناریوی دو

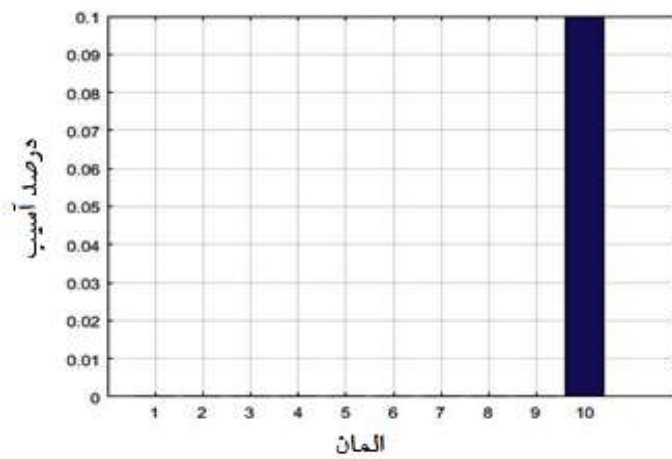


شکل ۸. مقادیر فرکانس‌های طبیعی در سناریوی دو پس از عملیات تراکم

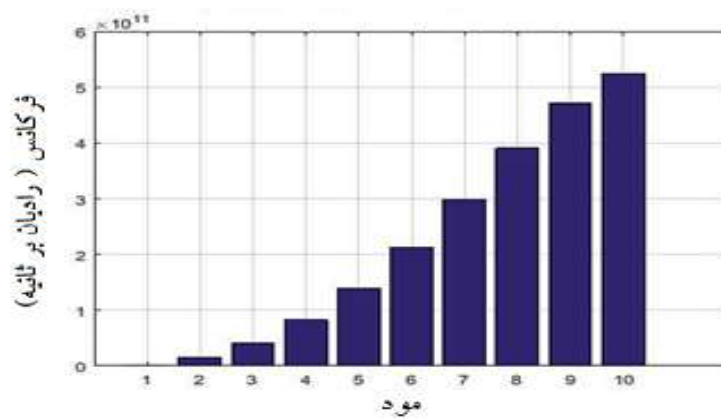


شکل ۹. شکل‌های مودی سازه در سناریوی دو پس از عملیات تراکم: الف) ۵ مود برشی اول و ب) ۵ مود برشی دوم

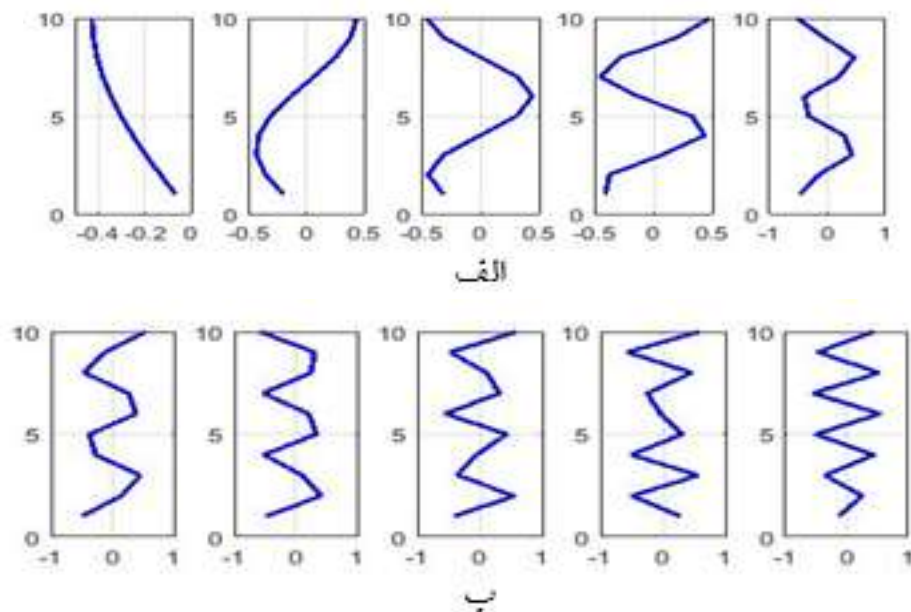
شناسایی آسیب در پایه‌های پل‌های بتن آرمه تحت ارتعاش محیطی به کمک روش بهینه‌یابی



شکل ۱۰. مقادیر آسیب سناریو سه



شکل ۱۱. مقادیر فرکانس‌های طبیعی در سناریوی سه پس از عملیات تراکم



شکل ۱۲. شکل‌های مودی سازه در سناریوی سه پس از عملیات تراکم: الف) ۵ مود برشی اول و ب) ۵ مود برشی دوم

#### ۴. تفسیر نتایج

در این مقاله، مدل‌سازی با برنامه‌نویسی به روش اجزای محدود در محیط نرم‌افزار ۲۰۱۵ MATLAB انجام شده است. با استفاده از مدل اجزای محدود، ماتریس‌های سختی و جرم هر المان در حالت خمشی محوری محاسبه شده و در نهایت با اسمبل کردن ماتریس‌های هر المان، ماتریس کل پایه آسیب دیده به دست آمده است. در ادامه، با استفاده از عملیات تراکم، ابعاد ماتریس‌های سختی و جرم، متناسب با داده‌های اولیه

کاهش یافته و فرکانس‌ها و توابع شکل سازه آسیب دیده محاسبه شده است. با داشتن توابع شکل، تابع هدف تشکیل شده و با استفاده از روش بهینه‌یابی خطی و قیدهای موجود، شدت آسیب تعیین می‌گردد. موضوع مهم در تابع هدف، ارتباط بین تعداد روابط و مودها می‌باشد که جزئیات آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. تعداد روابط متناظر با مودها در تابع هدف

تعداد مودها	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تعداد روابط	۱	۳	۶	۱۰	۱۵	۲۱	۲۸	۳۶	۴۵

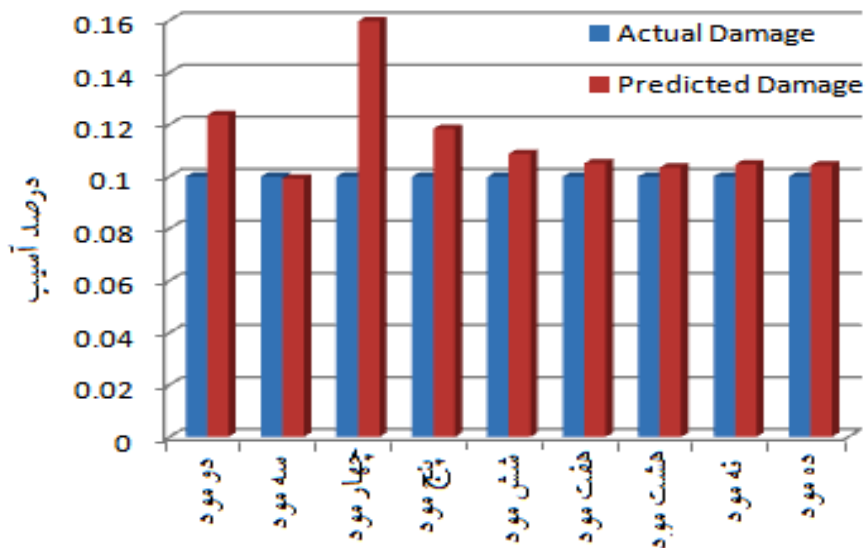
نظر گرفتن تمامی روابط موجود بین توابع شکل، بهبود در نتایج حاصل شده است.

همانند قسمت قبل، عملیات برای المان‌های آسیب دیده پنجم و دهم تکرار شده و نتایج در قالب نمودار در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و همچنین جزئیات در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. بعد از استخراج مقادیر آسیب در المان‌های اول، پنجم و دهم، با استفاده از خطای مربع میانگین (MSE)، که در واقع میانگین مربع اختلاف بین مقادیر خروجی و مقادیر هدف است، مقدار خطا با استفاده از رابطه ۱۱ برابر با  $2/79 \times 10^{-5}$  به دست آمد که مقدارش بسیار کم بوده و نشان‌دهنده این است که اختلاف بین خروجی‌ها و مقدار هدف ناچیز است.

$$MSE = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2 \right) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)،  $A_i$  و  $B_i$  و  $N$  به ترتیب مقادیر آسیب اندازه‌گیری شده، آسیب مدل و تعداد نمونه‌ها می‌باشند.

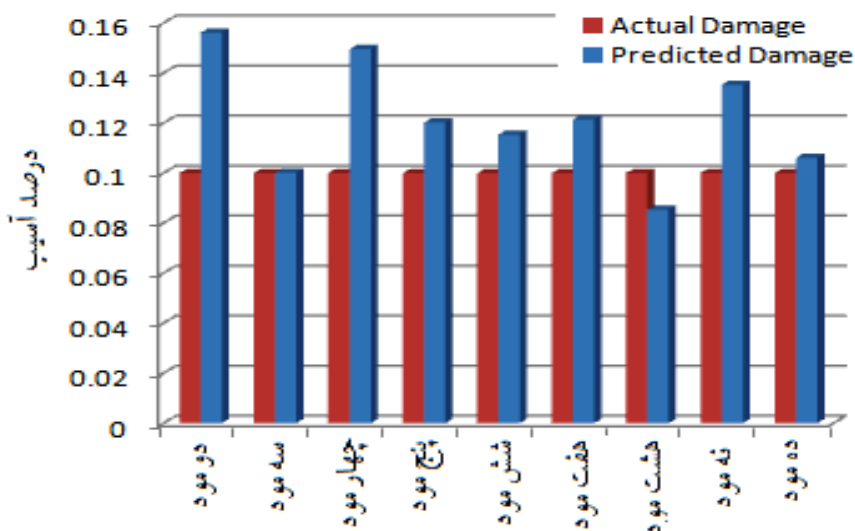
همانطوری که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، مقدار آسیب در المان شماره یک به ازای تعداد روابط بین مودها و ماتریس سختی، که در مجموع ۴۵ رابطه است، به خوبی تشخیص داده شده است. بررسی تابع هدف با در نظر گرفتن دو مود (یک رابطه بین توابع شکل‌های اول و دوم)، مقدار آسیب را برابر با ۱۵٪ محاسبه نموده که بیانگر خطای ۵۰ درصدی می‌باشد که دور از واقعیت است. در نظر گرفتن اثر سه مود (سه رابطه) مقدار آسیب را ۱۰٪ برآورد کرد که رضایت‌بخش بود. ادامه عملیات برای چهار مود (۶ رابطه) و همچنین ۵ مود (۱۰ رابطه)، مقادیر آسیب را ۱۵ و ۱۱ درصد نشان داد که باعث بالا رفتن خطا شد. در حالی که با کامل‌تر در نظر گرفتن تابع هدف برای تعداد ۶ مود و بیشتر، مقدار آسیب با دقت بهتری برآورد شد. مقادیر دقیق برآورد آسیب در جدول ۴ برای المان شماره یک نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، نتایج با در نظر گرفتن سه مود ما را به نتیجه مطلوب رسانده و با در



شکل ۱۳. مقادیر درصد آسیب المان اول (۸۱) براساس تعداد مودهای در نظر گرفته شده

جدول ۴. جزییات آسیب المان اول با کمیته کردن تابع هدف

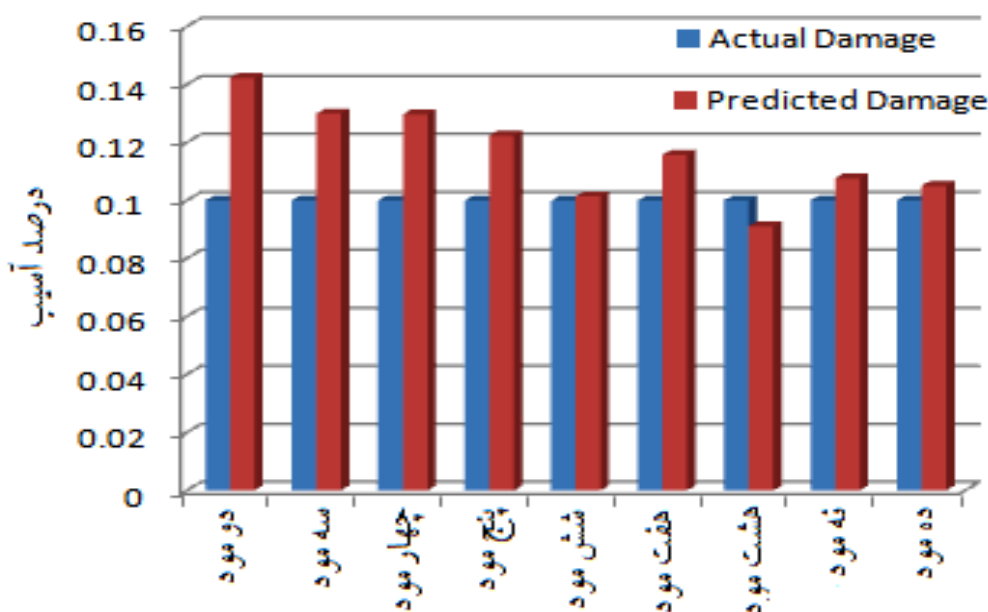
تعداد روابط	۱	۳	۶	۱۰	۱۵	۲۱	۲۸	۳۶	۴۵
درصد آسیب	۰/۱۲۳۶۲	۰/۰۹۹۲۵۴	۰/۱۵۹۷۱	۰/۱۱۸۳۸	۰/۱۰۸۷۴	۰/۱۰۵۱۳	۰/۱۰۳۵۳	۰/۱۰۴۶۷	۰/۱۰۴۲۴
درصد خطا	۲۳/۶۲	۰/۷	۵۹/۷۱	۱۸/۳۸	۸/۷	۵/۱۳	۳/۵۳	۴/۶۷	۴/۲۴



شکل ۱۴. مقادیر درصد آسیب المان پنجم (۸۵) براساس تعداد مودهای در نظر گرفته شده

جدول ۵. جزئیات آسیب المان پنجم با کمینه کردن تابع هدف

تعداد روابط	۱	۳	۶	۱۰	۱۵	۲۱	۲۸	۳۶	۴۵
درصد آسیب	۰/۱۵۶۱۶	۰/۱۰۰۱	۰/۱۴۹۵۹۴	۰/۱۲۰۲	۰/۱۱۵۴۱	۰/۱۲۱۴۷۹	۰/۰۸۵۳۰۷	۰/۱۳۵۲۵	۰/۱۰۶۰۸
درصد خطا	۵۶/۱۶	۰/۱	۴۹/۵۹	۳۰/۲	۱۵/۴۱	۲۱/۴۷	۱۷/۲۲	۳۵/۲۵	۶/۰۸



شکل ۱۵. مقادیر درصد آسیب المان دهم (۸۱۰) براساس تعداد مودهای در نظر گرفته شده

جدول ۶. جزئیات آسیب المان دهم با کمینه کردن تابع هدف

تعداد روابط	۱	۳	۶	۱۰	۱۵	۲۱	۲۸	۳۶	۴۵
درصد آسیب	۰/۱۴۲۳۱	۰/۱۳۰۰۱۷	۰/۱۲۹۷۱	۰/۱۲۲۴۱	۰/۱۰۱۴۵	۰/۱۱۵۷۱۰	۰/۰۹۱۱	۰/۱۰۷۷	۰/۱۰۵۱
درصد خطا	۴۲/۳۱	۳۰/۰۱	۲۹/۷۱	۲۲/۴۱	۱/۴۵	۱۵/۷	۹/۷۶	۷/۷	۵/۱

سختی‌های محاسبه شده به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نمایش داده شده است. جرم ساختمان به صورت کف-های متمرکز، برای شش طبقه اول برابر با ۳/۷۸ کیلوگرم و طبقه آخر ۳/۳۱ کیلوگرم در نظر گرفته شد. نمای مدل ساخته شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای این قاب، شش سناریوی آسیب در دو نوع آسیب‌های کوچک و بزرگ در نظر گرفته شد. آسیب‌های کوچک با استفاده از چهار برش در دو انتهای ستون میانی و آسیب‌های بزرگ با برشی نسبتاً کامل در وسط ارتفاع

## ۵. صحت‌سنجی روش پیشنهادی

در بخش‌های قبلی، روش پیشنهادی برای نمونه عددی به‌کار گرفته شد. برای نشان دادن عملکرد و کارایی روش ارائه شده، از اطلاعات اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی استفاده گردید (کوه و پری، ۲۰۱۰). مدل آزمایشگاهی ساخته شده، یک قاب فولادی هفت طبقه با ارتفاع ۱/۴۱۲۵ متر با ستون‌های انعطاف‌پذیر و تیرهای نسبتاً صلب بوده است. مقاطع اعضا و مقادیر

ستون کل، مقدار آسیب ۱۶۷ درصد به‌دست آمد. در یکی از سناریوهای در نظر گرفته شده برای این قاب ۷ طبقه، سختی طبقه چهارم به میزان ۴/۱ درصد کاهش یافت. در این مقاله، روش پیشنهادی برای این سناریو لحاظ شد و مشاهده شد با در نظر گرفتن سه مود ارتعاشی، مقدار آسیب برابر با ۴/۰۶ به‌دست آمد که نشان دهنده خطای ۰/۹۷ درصدی روش پیشنهادی بود.

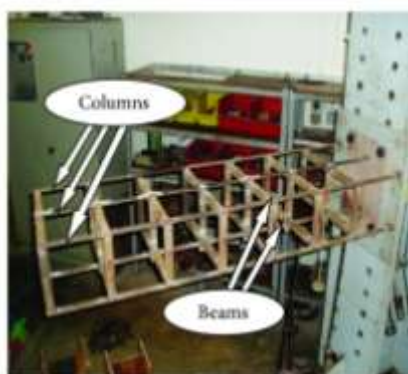
ستون میانی شبیه‌سازی شدند (شکل ۱۷). جهت محاسبه مقدار آسیب کوچک، از نرم‌افزار اجزای محدود استفاده شد. به این ترتیب که مدل اجزای محدود ستون‌های سالم و آسیب‌دیده ساخته شد و تغییر مکان‌ها تحت بارهای گره‌ای محاسبه شدند و با مقایسه نتایج، تغییر در سختی ستون‌ها برآورد شد که نتیجه آن معادل با ۴/۱ درصد کاهش سختی بود. همچنین، برای محاسبه آسیب بزرگ، با توجه به حذف کامل یک ستون از تعداد شش

جدول ۷. مشخصات مقاطع اعضاء (کوه و پری، ۲۰۱۰)

ستون	تیر	پارامتر
۲۵×۴/۶	۲۵×۲۵×۳	اندازه مقطع ( میلی‌متر )
۱۱۵e-۶	۲۸۶e-۶	سطح مقطع ( متر مربع )
۷/۷۸e-۱۰	۲/۴۱e-۸	ممان اینرسی ( متر به توان چهار )
۲۰۶e۹	۲۰۶e۹	مدول الاستیسیته ( پاسکال )
۷۸۵۰	۷۸۵۰	چگالی حجمی ( کیلوگرم بر متر مکعب )

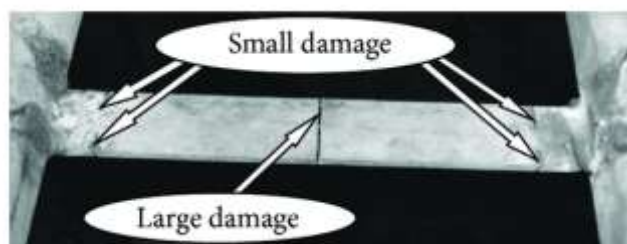
جدول ۸. مقادیر سختی طبقات (کوه و پری، ۲۰۱۰)

سختی طبقه	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
مقدار (کیلو نیوتن بر متر)	۳۰۰	۶۲۶	۵۵۳	۵۶۶	۵۴۷	۵۷۴	۵۱۹



شکل ۱۶. مدل قاب فولادی هفت طبقه (کوه و پری، ۲۰۱۰)





شکل ۱۷. آسیب به کار رفته در ستون‌ها (کوه و پری، ۲۰۱۰)

## ۶. نتیجه گیری

گرفتن تمامی مودها در المان اول ۴/۲۴ درصد، المان پنجم ۶/۰۸ درصد و در المان دهم مقدار ۵/۱ درصد را نشان داد. در حالی که حداقل خطا برای المان اول به ازای سه مود ۰/۷ درصد، المان پنجم به ازای سه مود ۰/۱ درصد و نهایتاً برای المان دهم مقدار ۱/۴۵ درصد را پیش‌بینی نمود که قابل قبول هستند. روش پیشنهادی برای سناریوی اول آسیب کار آزمایشگاهی (کوه و پری، ۲۰۱۰) به کار برده شد. نتایج، نشان‌دهنده میزان خطای ۰/۹۷ درصد با در نظر گرفتن سه مود ارتعاشی بود که مناسب به نظر می‌رسید.

در این مقاله، یک روش ساده و کلاسیک به دور از هر گونه پیچیدگی، برای پایه پل‌ها که از عناصر اساسی و استراتژیک در مهندسی سازه می‌باشد استفاده گردید و نشان داده شد که به راحتی با روش معکوس و دقت بالا، می‌توان به شناسایی آسیب پرداخت. استفاده از یک تابع هدف مناسب، به همراه قیود مرتبط با آن، نشان داد که کمینه کردن تابع هدف با دقت بالایی، مقادیر متغیرهای تابع، که همان درصد آسیب می‌باشند را مشخص می‌نماید. میزان خطای ایجاد شده با در نظر

## مراجع

احمدی، ح. ر. و دانشجو، ف. (۱۳۸۹). "استخراج مشخصات دینامیک عرشه خرپایی پل راه‌آهن فیروزه با استفاده از توابع زمان-فرکانس". اولین کنفرانس ملی سازه و فولاد و دومین کنفرانس کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه، تهران.

- Adewuyi, A. P., Wu, Z. and Serker, N. H. M. K., 2009. "Assessment of vibration-based damage identification methods using displacement and distributed strain measurements". *Struct. Health Monit.*, 8(6): 443-461.
- Alvandi, A. and Cremona, C. 2006. "Assesment of vibration-based damage identification techniques." *J. Sound Vib.*, 292(1): 179-202.
- Balageas, D., Fritzen, C. and Guemes, A. 2006. "Introduction to Structural Health Monitoring". ISTE, Ltd, London.
- Chopra, A. K. 2007. "Dynamics of Structures in Theory and Applications to Earthquake Engineering". 4<sup>th</sup> Edition, Prentice Hall, Berkeley, USA.
- Esfandiari, A., Rahai, A. and Bakhtiari-Nejad, F. 2007. "Damage assessment of structure using incomplete measured mode shapes". *Struct. Control Health Monit.*, 14: 808-829.
- Farrar, C. R. and Worden, K. 2013. "Structural Health Monitoring". John Wiley & Sons, Ltd.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T. and Wilson, D. A. L. 1994. "Using vibration data and statistical measure to locate damage in structures modal analysis". *Int. J. Anal. Exp. Modal Anal.*, 9(4): 239-254.
- Gonzalez, M. P. and Zapico, J. L. 2008. "Seismic damage identification in buildings using neural networks and modal data". *Comp. Struct.*, 86(3-5): 416-426.
- Haftka, R. T. and Gurdal, Z. 1993. "Elements of Structural Optimization". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- Hao, H. and Xia, Y. 2002. "Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm". *J. Comp. Civil Eng.*, 16(3): 222-229.
- Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M. and Stubbs, N. 2003. "Damage identification in beam-type structures frequency-based method vs mode-shape-based method". *Eng. Struct.*, 25: 57-67.
- Koh, C. G. and Perry, M. J. 2010. "Structural Identification and Damage Detection Using Genetic Algorithms". Structures and Infrastructures Series, Taylor & Francis, London, UK.
- Kourehli, S. S. 2015. "Damage assessment in structures using incomplete modal data and artificial neural network". *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 15(6), doi: 10.1142/S0219455414500874.
- Kourehli, S. S. 2017. "Structural damage diagnosis using incomplete static responses and LS-SVM", *J. Inverse Probl. Sci. Eng.*, 25: 418-433.
- Meruance, V. and Heylen, W. 2011. "An hybrid genetic algorithm to detect structural damage using modal properties". *Mech. Sys. Sig. Process.*, 25(5): 1559-1573.
- Park, S., Kim, Y. B. and Stubbs, N. 2002. "Nondestructive damage detection in large structures via vibration monitoring". *Electr. J. Struct. Eng.*, 2: 59-75.
- Rasouli, A., Ghodrati Amiri, G., Kheyroddin, A., Ghafory-Ashtiany, M. and Kourehli, S. S. 2014. "A new method for damage prognosis based on incomplete modal data via an evolutionary algorithm". *Eur. J. Environ. Civil Eng.*, 18(3): 253-270.
- Rasouli, A., Kourehli, S. S., Ghodrati Amiri, G. and Kheyroddin, A. 2015. "A two-stage method for structural damage prognosis in shear frame based on story displacement index and modal residual force". *Adv. Civil Eng.*, 2015, Article ID 527537, 15 p.
- Ren, W. X. and De Roeck, G. 2002. "Structural damage identification using modal data simulation verification". *J. Struct. Eng.*, ASCE, 128(1): 87-95.
- Ruotolo, R. and Surac, C. 1997. "Damage assessment of multiple cracked beams: Numerical results and experimental validation". *J. Sound Vib.*, 206(4): 567-588.
- Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z. and Yam, L. 2007. "Development in vibration-based structural damage detection technique". *Mech. Sys. Sig. Process.*, 21: 2198-2211.
- Zembaty, Z., Kowalski, M. and Pospisil, S. 2006. "Dynamic identification of a reinforced concrete frame in progressive states of damage". *Eng. Struct.*, 28(5): 668-681.