دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز
۱۵تا ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴

آسیب‌یابی خرپاها به یاری پاسخ‌های ایستای دارای اغتشاش

محمدصادق کاظمیان [۱]، هاشم جهانگیر [۲]، منصور قله‌نوی [۳]

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- - دانشیار گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

sadegh_kazemian @yahoo.com
jahangir.farhad@gmail.com
ghalehnovi@um.ac.ir

خلاصه

راه‌کاری برای آسیب‌یابی سازه‌های خرپایی در این مقاله ارائه می‌شود. این روش برپایه‌ی کمینه‌سازی تفاوت میان پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه‌ی آسیب‌دیده و پاسخ‌های به‌دست آمده از الگوی تحلیلی آن است. در این فن، از پاسخ‌های ایستای سازه بهره‌جویی می‌شود. شیوه‌های مزبور، برای برآورد خسارت در سازه‌های خرپایی به حل مساله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی قیددار منجر می‌شود. خاطرنشان می‌کند، برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی برای حل مساله‌ی بهینه‌سازی به‌کار می‌رود. باید افزود، دستگاه‌های اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه دقیق نیستند. به سخن دیگر، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده خطا دارند. در این مقاله، اثر خطای اندازه‌گیری بر روی روش ارائه شده بررسی می‌گردد. برای این کار، شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌گردد. نتیجه‌ها نشان می‌دهند روش پیشنهادی در حضور خطاهای ایجاد شده در اندازه‌گیری داده‌ها نیز توانایی شناسایی عضوهای آسیب‌دیده را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: آسیب‌یابی، پاسخ‌های ایستا، ، خرپاها، برنامه‌ریزی ناخطی،شبیه‌سازی مونت کارلو.

۱. مقدمه

تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی آسیب‌یابی سازه‌ها انجام شده است. این شاخه‌ی نوین از مهندسی سازه، از سال‌های پایانی دهه‌ی هفتاد میلادی شکل گرفت. کارهای انجام شده در این راستا را می‌توان در دو دسته فن‌های پویا و ایستا جای داد. شمار پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی روش‌های پویا از ایستا گسترده‌تر است.

در فن‌های پویا به یاری اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه (بسامدهای طبیعی، شکل حالت و انحنای شکل حالت) پیش و پس از آسیب و هم‌شماری آن‌ها با یکدیگر، می‌توان ویژگی‌های سازه‌ی خسارت‌دیده را به دست آورد. سپس، با بهره‌گیری از این فرآیند، آسیب‌یابی سازه انجام می‌پذیرد. روش‌های پویا دارای محدودیت‌هایی هستند. بسامدهای طبیعی سازه در برابر آسیب حساسیت کمی دارند. بنابراین، برای اندازه‌گیری آن‌ها باید از ابزارهای اندازه‌گیری بسیار دقیق بهره گرفت، مگر آن که آسیب‌دیدگی شدید باشد که سبب دگرگونی شایانی در بسامدهای سازه گردد. هم‌چنین، در روش‌های پویا سنجش شکل حالت‌های سازه نیاز به دقت شایانی دارد. برای دست‌یابی به شکل حالت‌های درست، باید تحریک‌های

[۱] دانشجوی دکتری سازه
[۲] دانشجوی دکتری سازه
[۳] دانشیار گروه عمران

نادرست حذف شوند. علاوه بر آن، شرط‌های مرزی نیز بر بسامدها و شکل‌حالت‌های سازه اثر می‌گذارند. شماری از پژوهش‌گران به شناساندن گونه‌های مختلف روش‌های پویا پرداخته‌اند [۳-۱].

دسته‌ی دیگر فن‌های تحلیلی آسیب‌یابی، رهیافت‌های ایستا هستند. برپایه‌ی آنچه آمد، پاسخ‌های ایستای اندازه‌گیری شده، دقیق‌تر از پاسخ‌های پویا هستند. بنابراین، نتیجه‌های شیوه‌های ایستا، مطمئن‌ترند. با وجود این، راه‌کارهای ایستا کاستی‌هایی نیز دارند. پژوهش‌های پایان‌یافته در زمینه‌ی روش‌های ایستا شمار کم‌تری دارند. از این رو، منبع‌های کم‌تری در این زمینه در دسترس پژوهش‌گران است. هم‌چنین، رهیافت‌های ایستا وابسته به الگوی بارگذاری سازه هستند. پژوهش‌های پیشینیان آشکارکرده‌اند که چنانچه تنش‌های اندازه‌گیری شده‌ی پاره‌ای از عضوها، از خطای دستگاه سنجش تنش کم‌تر باشد، نمی‌توان آسیب آن‌ها را شناسایی نمود [۴]. بر پایه‌ی این یافته‌ها، بارگذاری‌ای مناسب است که سبب ایجاد تنش‌های اندک در سازه نشود. هم‌چنین، پژوهش‌گران پیشنهاد نموده‌اند که تنش‌های عضوی دارای کمیت‌هایی نزدیک به هم باشند. بنابراین، برای شناسایی الگوی بهینه‌ی بارگذاری از وارسی الگوهای گوناگون بهره می‌جویند. شایان توجه است، محدودیت‌های راه‌کارهای ایستا ریشه در نهاد معادله‌های تعادل ایستای سازه دارد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی شناسایی خسارت به روش ایستا پرداخته می‌شود.

شینا و همکارانش، روشی برای بهنگام‌سازی ماتریس سختی سازه پیشنهاد کردند. در این فرآیند، از اثر اغتشاش بر داده‌ها چشم‌پوشی شده است. این راه‌کار با کمینه‌سازی تفاوت میان ماتریس سختی راستین و تحلیلی سازه، ماتریس سختی آن را برآورد می‌کند [۵،۴]. هم‌چنین، در این فن پاسخ‌های سازه در مکان‌های مشخصی اندازه‌گیری می‌شوند. باید آگاه بود، قیدهای مساله‌ی بهینه‌سازی در این راه‌کار، همان پاسخ‌های اندازه‌گیری شده هستند. صنایعی و نلسون [۶] و صنایعی و اسکاملپی [۷] روشی برای تخمین سختی‌های عضوی ارائه کردند. در این راه‌حل‌ها، زیرمجموعه‌ای از درجه‌های آزادی زیر بار قرار می‌گیرند. پاسخ‌های این درجه‌های آزادی، باید اندازه‌گیری شوند. به دیگر سخن، زیرمجموعه‌ی درجه‌های آزادی باردار و آن‌هایی که پاسخ‌شان اندازه‌گیری خواهد شد، باید همپوشانی کامل داشته باشند. انجام چنین کاری همواره کاربردی نیست. از این رو، صنایعی و انیپد روش پیشین را بهبود دادند. در راه‌حل نوین، دو زیرمجموعه‌ی مزبور می‌توانند همپوشانی کامل، ناکامل و یا تهی داشته باشند [۸]. داده‌های تغییرمکانی دراین فن استفاده می‌شوند. صنایعی و سالتنیک این راه‌کار را برای به کارگیری کرنش‌های عضوی گسترش دادند [۹]. در این شیوه نیازی به اندازه‌گیری همه‌ی کرنش‌های عضوی نمی‌باشد. صنایعی و همکاران، افزون بر ارائه‌ی رهیافتی توانمند در ارزیابی خسارت سازه‌ها، اثر اغتشاش را نیز بر روش خود وارسی نمودند. هم‌چنین، با ساخت سازه‌هایی در آزمایشگاه به ارزیابی اثر اغتشاش بر داده‌های تغییرمکانی و کرنش‌های عضوی پرداختند [۱۰]. هاجلا و سوئیرو تابع‌های خطا را در سه دسته‌ی خطای معادله، ستاده و انحراف کمینه رده‌بندی نمودند. هم‌چنین، آن‌ها روشی برای آسیب‌یابی پیشنهاد داده‌اند. در این شیوه، از داده‌های پویا و ایستا بهره‌جویی می‌شود. دو فراروش برای ارزیابی خسارت در سازه‌ها را بنان و هالمشتاد پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها از برنامه‌ریزی درجه دوم تکراری بهره گرفتند [۱۱]. بختیاری‌نژاد و همکاران ماتریس سختی‌سازه‌ی آسیب‌دیده را برابر با مجموع ماتریس سختی سازه‌ی سالم و ماتریس آشفتگی پنداشتند. ماتریس آشفتگی نشان‌گر تغییر در ماتریس سختی سازه‌ی سالم است. در این فن، ازچندجمله‌ای تیلور برای وارون ساختن مجموع ماتریس سختی سازه و ماتریس آشفتگی بهره جستند. این روش با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی به ارزیابی خسارت در سازه‌ها پرداخت [۴]. رضایی‌پژند و آفتابی‌ثانی روشی برای آسیب‌یابی خرپاها ارائه کردند. در شیوه‌ی مزبور، تابع هدف ناخطی مساله با به کارگیری متغیرهای دودویی به تابعی خطی تبدیل می‌شود. سپس، با بهره‌جویی از فراروش سادک شبه‌دوگان مساله‌ی برنامه‌ریزی خطی حل می‌گردد. باید آگاه بود، این رهیافت از هیچ تقریبی در خطی‌سازی بهره نمی‌گیرد. بنابراین، توانایی رسیدن به پاسخ دقیق را داراست [۱۲].

در این مقاله، راه‌کاری برای آسیب‌یابی سازه‌های خرپایی ارائه می‌شود. کمینه‌سازی تفاوت میان پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه‌ی آسیب‌دیده و پاسخ‌های به‌دست آمده از الگوی تحلیلی آن، پایه‌ی روش پیشنهادی است. در این فن، از پاسخ‌های ایستای سازه بهره‌جویی می‌شود. برای برآورد خسارت در سازه‌های خرپایی در این شیوه‌ها از برنامه‌ریزی ناخطی قیددار استفاده شده است. خاطرنشان می‌کند، برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی برای حل مساله‌ی بهینه‌سازی به‌کار می‌رود. در واقعیت، دستگاه‌های اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه دقیق نیستند و داده‌های اندازه‌گیری شده خطا دارند. در این مقاله، اثر خطای اندازه‌گیری بر روی روش ارائه شده بررسی می‌گردد. برای این کار، شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌گردد. در پایان به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی، به آسیب‌یابی نمونه عددی از خرپا همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی دارای خطا پرداخته می‌شود.

۲. رابطه‌سازی مساله‌ی آسیب‌یابی

در این بخش، راه‌کاری ایستا برای آسیب‌یابی سازه‌های خرپایی ارائه می‌گردد. روش مزبور از کمینه‌سازی تفاوت میان تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه‌ی خراب و تغییرمکان‌های الگوی تحلیلی آن بهره می‌جوید. برای انجام این کار، مساله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی قیددار حل خواهد شد. در هرچرخه‌ی فرآیند حل، ماتریس سختی سازه‌ی آسیب‌دیده برآورد و وارون می‌گردد. سپس، بردار تغییرمکان‌های تحلیلی سازه و تابع هدف مساله حساب می‌شوند.

راه‌کارهای ارائه شده از تقریب مرتبه‌ی اول و دوم چند جمله‌ای تیلور بهره می‌گیرند. باید آگاه بود، این رهیافت دو گام دارد. در گام نخست، به یاری فراروشی شماری از عضوهای آسیب‌دیده شناسایی می‌گردند. سپس، سختی سایر عضوهای سازه در گام دوم برآورد می‌گردد.

آن گونه که آمد، در مساله‌ی آسیب‌یابی، تغییرمکان‌های سازه‌ی خسارت‌دیده معلومند و سختی‌های عضوی ناشناخته‌اند. بنابراین، ماتریس سختی سازه‌ی خراب مجهول است. برای به دست آوردن عامل‌های مجهول می‌توان از کمینه ساختن تفاوت میان تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده و تحلیلی سازه‌ی آسیب‌دیده بهره جست. یادآوری می‌کند، جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های سازه به یکدیگر وابسته‌اند. از این رو، امکان بهره‌جویی از کرنش‌های عضوی نیز وجود دارد. برای آسیب‌یابی سازه‌ها به یاری شیوه‌ی پیش‌گفته، نخست بردار خطا به سان زیر نوشته می‌شود:

$$R_i = {D_d}^a - {D_d}^m \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی کنونی، بردار تغیرمکان‌های اندازه‌گیری شده ${D_d}^m$ و بردار جابه‌جایی‌های تحلیلی ${D_d}^a$ است. یادآور می‌کند، زیرنویس i شمارنده‌ی الگوی بار می‌باشد. تابع هدف مساله به گونه‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$g = \sum_{i=1}^{nlc} {R_i}^T R_i \qquad (۲)$$

در این رابطه، g تابع هدف مساله است و وابسته به سختی‌های عضوی می‌باشد. هم‌چنین، شمار الگوهای بار nlc است. با به کارگیری این تابع هدف، مساله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی به سان زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \text{Min } g(\text{diag}(\boldsymbol{\delta}\mathbf{P})) \\ \text{diag}(\boldsymbol{\delta}\mathbf{P}) \geq 0 \end{cases} \qquad (۳)$$

در این رابطه، $\text{diag}(\boldsymbol{\delta}\mathbf{P})$ برداری است که درایه‌های آن برابر با درایه‌های قطری ماتریس δP هستند. این بردار، عامل‌های ناشناخته‌ی مساله را در بر می‌گیرد.

در ادامه، بر پایه‌ی مساله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی رابطه‌ی (۳) راه‌کاری برای آسیب‌یابی سازه‌های خرپایی پیشنهاد می‌گردد. باید آگاه بود، اگر سختی عضوهای سازه به درستی حساب شوند، بردار ${D_d}^a$ برابر با تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه‌ی خراب خواهد شد. در نتیجه، مقدار تابع هدف برابر صفر خواهد گردید. باید افزود، روش کمینه‌ی مربع‌ها برای کمینه‌سازی تابع هدف به کار می‌رود. به خاطر باید سپرد، پیش از به کارگیری رهیافت‌های آسیب‌یابی پیشنهادی، شماری از عضوهای درست سازه به یاری روش بخش پیشین شناسایی می‌شوند. خاطرنشان می‌سازد، در رابطه‌سازی پیش‌گفته امکان به کارگیری چند الگوی بار نیز وجود دارد.

۳. بهره‌جویی از دنباله‌ی تیلور

باید آگاه بود، سختی‌های عضوی سازه در اثر آسیب کاهش می‌یابند. بنابراین، درایه‌هایی از ماتریس سختی سازه‌ی خراب که وابسته به عضوهای خسارت‌دیده‌اند، دستخوش دگرگونی می‌شوند. از این رو، می‌توان ماتریس سختی سازه‌ی خراب را به سان زیر نوشت:

$$K_d = K + \Delta K \qquad (۴)$$

در این برابری، ΔK ماتریس آشفتگی می‌باشد که شمار سطر و ستون‌های آن برابر با درجه‌های آزادی سازه است. این ماتریس، میزان تغییر ماتریس سختی سازه‌ی درست را در اثر آسیب نشان می‌دهد. ماتریس مزبور وابسته به میزان کاهش سختی‌های عضوی می‌باشد. این ماتریس را می‌توان به سان برابری زیر نوشت[۱۳]:

$$\Delta K = \Phi \, \delta P \Phi^T \qquad (۵)$$

یادآوری می‌کند، درایه‌های قطری ماتریس δP میزان کاهش سختی عضوهای سازه را نشان می‌دهند و سایر درایه‌های آن صفرند. درایه‌های قطری ماتریس مزبور در مساله‌ی آسیب‌یابی سازه‌ها مجهول می‌باشند. به دیگر سخن، متغیرهای طراحی مساله همان درایه‌های قطری ماتریس δP هستند.

با استفاده از برابری (۴) می‌توان تغییرمکان‌های الگوی تحلیلی سازه را حساب نمود:

$${D_d}^a = (K + \Delta K)^{-1} F \qquad (۶)$$

با به کارگیری این رابطه، می‌توان بردار خطا را برپا کرد:

$$R_i = (K + \Delta K)^{-1} F - {D_d}^m \qquad (۷)$$

به یاری رابطه‌ی کنونی و برابری (۲) می‌توان تابع هدف مساله‌ی بهینه‌سازی را تشکیل داد.
در هر چرخه، مقدارهایی به درایه‌های قطری ماتریس δP نسبت داده می‌شوند. سپس، ماتریس آشفتگی برآورد و مقدار تابع هدف حساب می‌گردد. این فرآیند تا کمینه شدن تابع هدف ادامه می‌یابد. یادآوری می‌کند، برای به دست آوردن مقدار تابع هدف در هر تکرار، باید بردار تغییرمکان‌های تحلیلی سازه را حساب کرد. برای این کار، مجموع ماتریس سختی سازه‌ی درست و ماتریس آشفتگی برآورد شده در هر چرخه وارون می‌گردد.
به یاری گسترش دنباله‌ی تیلور تابع‌ها می‌توان رابطه‌هایی تقریبی برای وارون نمودن مجموع دو ماتریس نوشت [۱۴]. اگر تنها از دو جمله‌ی نخست گسترش تیلور بهره گرفته شود، تقریب مرتبه‌ی یکم وارون مجموع ماتریس‌های پیش‌گفته به دست می‌آید:

$$(K+\Delta K)^{-1} \cong K^{-1} - K^{-1}\Delta K\, K^{-1} \tag{۸}$$

با جایگزینی رابطه‌ی کنونی در برابری (۶) بردار تغییرمکان سازه‌ی خراب در هر چرخه به سان زیر تخمین زده می‌شود:

$$D_d{}^a \cong (K^{-1} - K^{-1}\Delta K\, K^{-1})\, F \tag{۹}$$

این رابطه را به گونه‌ی زیر نیز می‌توان نوشت:

$$D_d{}^a \cong D - K^{-1}\Delta K\, D \tag{۱۰}$$

با به کارگیری رابطه‌ی کنونی می‌توان بردار خطا را به سان زیر برپا کرد:

$$R_i = (D - K^{-1}\Delta K\, D) - D_d{}^m \tag{۱۱}$$

به یاری رابطه‌ی (۵)، برابری پیشین به سان زیر بازنویسی می‌گردد:

$$R_i = (D - K^{-1}\Phi\,\delta P\,\Phi^T D) - D_d{}^m \tag{۱۲}$$

در ادامه، به یاری رابطه‌ی (۲) تابع هدف مساله‌ی آسیب‌یابی حساب می‌شود. سپس، با کمینه ساختن آن سختی عضوهای سازه‌ی خراب برآورد می‌گردند. باید افزود، پیش از کمینه‌سازی تابع هدف مساله، شماری از عضوهای درست با به کارگیری روش فراروش شناسایی عضوها شناسایی می‌شوند [۱۳]. پس از یافتن این عضوها، ستون‌های وابسته به آن‌ها در ماتریس Φ حذف می‌شوند. در نتیجه، شمار ستون‌های ماتریس مزبور کاهش می‌یابد. می‌توان ماتریس نوین را با Φ_m نشان داد. هم‌چنین، سطر و ستون‌های ماتریس δP که به عضوهای مزبور وابسته‌اند، حذف می‌شوند و ماتریس δP_m برپا می‌گردد. سپس، در رابطه‌های پیشین Φ_m و δP_m، به ترتیب، به جای Φ و δP قرار داده می‌شوند.
از سوی دیگر، با بهره‌جویی از سه جمله‌ی نخست گسترش تیلور تابع‌ها، می‌توان تقریب مرتبه‌ی دوم وارون مجوع ماتریس‌های پیش‌گفته را به سان زیر به دست آورد:

$$(K+\Delta K)^{-1} \cong K^{-1} - K^{-1}\Delta K\, K^{-1} + K^{-1}\Delta K\, K^{-1}\Delta K\, K^{-1} \tag{۱۳}$$

با به کارگیری این رابطه، تغییرمکان‌های سازه‌ی خراب به گونه‌ی زیر در هر چرخه حساب می‌شوند:

$$D_d{}^a \cong (K^{-1} - K^{-1}\Delta K\, K^{-1} + K^{-1}\Delta K\, K^{-1}\Delta K\, K^{-1})\, F \tag{۱۴}$$

رابطه‌ی پیشین را به شکل زیر نیز می‌توان بازنویسی کرد:

$$D_d{}^a \cong D - K^{-1}\Delta K\, D + K^{-1}\Delta K\, K^{-1}\Delta K\, D \tag{۱۵}$$

با جایگزینی این رابطه در برابری (۱)، بردار خطا به سان زیر به دست می‌آید:

$$R_i = (D - K^{-1}\Delta K\, D + K^{-1}\Delta K\, K^{-1}\Delta K\, D) - D_d{}^m \tag{۱۶}$$

با به کارگیری رابطه‌ی (۵) برابری کنونی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$R_i = (D - K^{-1}\Phi\,\delta P\,\Phi^T D + K^{-1}\Phi\,\delta P\,\Phi^T K^{-1}\Phi\,\delta P\,\Phi^T D) - D_d{}^m \tag{۱۷}$$

با جایگزینی این برابری در رابطه‌ی (۲) تابع هدف برپا می‌گردد. با کمینه‌سازی تابع هدف سختی‌های عضوی سازه‌ی خراب حساب می‌شوند. باید افزود، پیش از کمینه‌سازی تابع هدف مساله، شماری از عضوهای درست با بهره‌جویی از فراروش شناسایی عضو پیدا می‌شوند. آن گونه که آمد، Φ_m و δP_m، به ترتیب، به جای Φ و δP قرار می‌گیرند.

۴. شبیه‌سازی مونت کارلو

در یک آزمایش و بررسی میدانی، هرچند اندازه‌گیری‌ها دقیق انجام شده باشند، این انتظار می‌رود که خطاهایی به علت وجود نوفه در داده‌های اندازه‌گیری شده وجود داشته باشند. این خطاها بر روی سطح مقطع‌های برآورد شده برای اعضای سازه اثر می‌گذارند. علاوه بر این، این خطاها می‌توانند باعث واگرایی روش‌هایی شناسایی خسارت می‌شوند. این خطاها در نمونه‌های عددی، با اضافه کردن سری‌هایی از اعداد تصادفی به داده‌های اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌شوند. به طور معمول، دو نوع خطاهای مطلق و نسبی در نظر گرفته می‌شوند. خطاهای مطلق میزان خطای یکسانی را در همه داده‌ها ایجاد می‌کنند. خطاهای نسبی بر اساس مقدار هر داده به وجود می‌آیند [۱۵]. به علت پراکندگی دستگاه‌های اندازه‌گیری، خطاهای ناشی از آن‌ها نیز می‌توانند توزیع‌های متفاوتی داشته باشند. به طور معمول از دو توزیع یکنواخت و نرمال برای این خطاها استفاده می‌شود[۱۶ ،۱۵]. در بیشتر پژوهش‌ها به منظور تحلیل و بررسی اثر خطاها بر عامل‌های برآورد شده از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. در این پژوهش خطاها بصورت نسبی و با توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده‌اند.

۵. نمونه‌های عددی

در این بخش، با بهره‌جویی از راه‌کار پیشین سطح مقطع عضوهای چند سازه‌ی خرپایی برآورد می‌گردند. نخست، الگوی آسیبی برای این سازه‌ها پنداشته می‌شود. سپس، به یاری تحلیل سازه‌ها پاسخ‌های سازه‌ی خراب حساب خواهند شد. به دیگر سخن، به جای به کارگیری آزمایش برای سنجش پاسخ‌های سازه‌ی خراب می‌توان از تحلیل سازه‌ها بهره جست. با داشتن بردار تغییرمکان سازه‌ی خسارت‌دیده، می‌توان به آسیب‌یابی سازه‌ی مزبور پرداخت. برای ارزیابی خرابی در این سازه‌ها، از روش تیلور مرتبه اول و تیلور مرتبه دوم استفاده می‌شود.

به منظور بررسی توانایی و کارامدی روش‌های پیشنهادی برای شناسایی خسارت با وجود خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده، میزان ۱٪ خطا با توزیع یکنواخت به جابجایی‌های اندازه‌گیری شده اضافه می‌شود[۱۷]. سپس، ۱۰۰ عدد شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود و میانگین عامل‌های برآورد شده به کمک نتیجه‌های شبیه‌سازی و رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

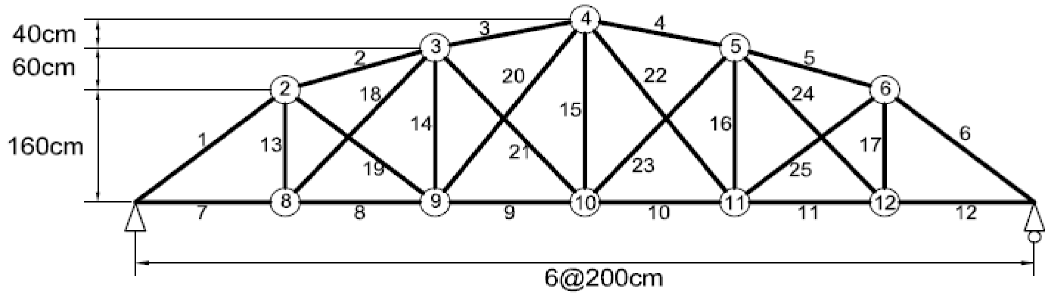
$$P_M = \frac{1}{NOBS}\sum_{i=1}^{NOBS} P_i \qquad (۱۸)$$

در این رابطه، P_M و P_i بردارهایی شامل عامل‌های برآورد شده می‌باشند. P_M شامل مقدارهای میانگین عامل‌های برآورد شده است. علاوه بر آن، ورودی‌های P_i عامل‌های برآورد شده در iامین مرحله از شبیه‌سازی مونت کارلو هستند. P_M نشان‌دهنده‌ی تعداد شبیه‌سازی‌های مونت کارلو است که در این پژوهش برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی توانایی روش پیشنهاد شده در حضور خطاهای اندازه‌گیری شده، مقدار میانگین‌های به دست آمده از شبیه‌سازی مونت کارلو با نتیجه‌های به دست آمده از اندازه‌گیری‌های بدون خطا مقایسه می‌شوند. در پایان نیز، شاخص خطا بیان‌گر میزان توانایی و موفقیت این روش در شناسایی خسارت با وجود خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده خواهد بود.

در سراسر متن، از یکاهای کیلوگرم و سانتی‌متر بهره‌جویی خواهد شد. باید افزود، نویسنده برنامه های رایانه‌ای را به زبان فرترن فراهم کرده است. برای آسیب‌یابی سازه‌ها در نمونه‌های عددی از این برنامه‌ها بهره‌جویی می‌شود.

- **خرپای مستوی بیست و پنج عضوی**

شکل زیر یکی از خرپاهای پرکاربرد را نشان می‌دهد [۳]. این سازه در پل‌ها و سقف‌ها به کار می‌رود. خرپای مزبور بیست و پنج عضو دارد. شمار درجه‌های آزادی آن برابر با بیست و یک است. همچنین، این خرپا نامعین می‌باشد.



شکل ۱- خرپای مستوی بیست و پنج عضوی

جدول۱ سطح مقطع عضوهای خرپای مستوی بیست و پنج عضوی را نشان می‌دهد. پس از آسیب، سطح مقطع عضوهای ۱ تا ۶ سازه کاهش می‌یابند. سطح مقطع عضوها برحسب سا نتی‌متر مربع هستند.

جدول۱- سطح مقطع‌های عضوی خرپای بیست و پنج عضوی

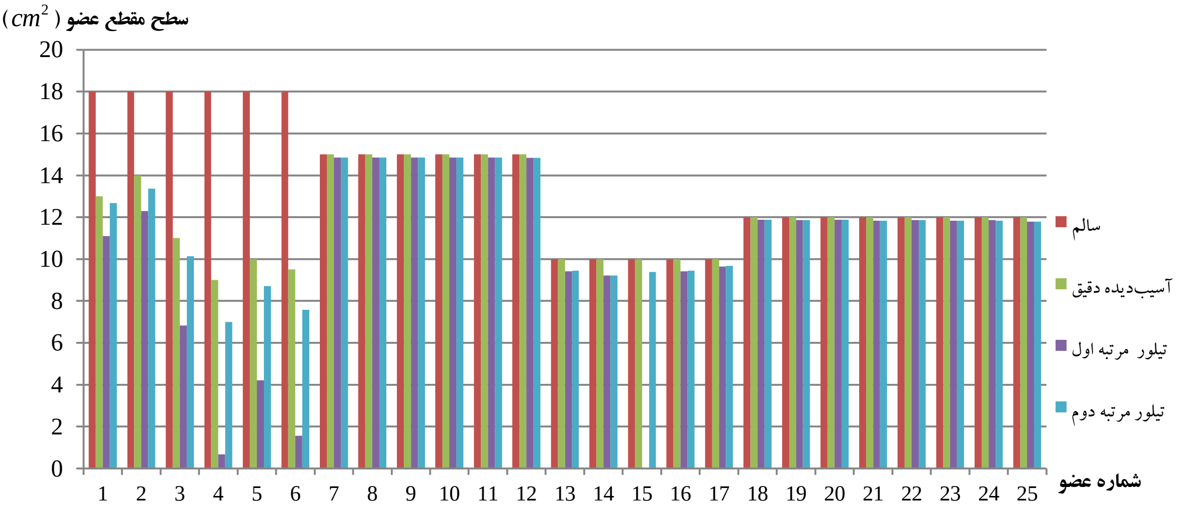
سطح مقطع عضو (cm^2)	شماره‌ی عضو
۱۸	۶ – ۱
۱۵	۱۲ – ۷
۱۰	۱۷ – ۱۳
۱۲	۲۵ – ۱۸

به کمک روش پیشنهادی، بردار بار اعمالی به دست می‌آید. این بردار بار باعث ایجاد تنش $800\ kg/cm^2$ در همه‌ی اعضا می‌شود. جدول زیر مقدارهای این بردار بار را در گره‌های مختلف نشان می‌دهد. مقدار مولفه‌های افقی و قائم بار در گره‌ها برحسب کیلوگرم می‌باشند.

جدول۲- بردار بار اعمالی در خرپای بیست و پنج عضوی

گره	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مولفه افقی بار (kg)	-۱۰/۰۵	-۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۳۳	۱۰/۰۵	۲۳/۲۴	-۶/۴۶	۱/۶۴	۰/۰۰	-۱/۶۴	۶/۴۶
مولفه قائم بار (kg)	۱۸/۸۶	۲۳/۵۲	۲۸/۸۷	۲۳/۵۲	۱۸/۸۶	۰/۰۰	-۱۵/۱۰	-۲۱/۶۱	-۲۲/۲۱	-۲۱/۶۱	-۱۵/۱۰

پس ار تعیین بردار بار اعمالی، فرض می‌شود داده‌ها دارای ۱٪ خطای نسبی با توزیع یکنواخت هستند. سپس، به کمک ۱۰۰ نمونه شبیه‌سازی مونت کارلو، میانگین سطح مقطع‌های برآورد شده به کمک برنامه‌ریزی درجه دوم و استفاده از روش‌های تیلور مرتبه اول و تیلور مرتبه دوم به دست می‌آیند. نمودار زیر سطح مقطع عضوهای خرپا در حالت سالم و آسیب‌دیده به همراه نتیجه‌های به دست آمده از دو روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نتیجه‌های آسیب‌یابی خرپای بیست و پنج عضوی به کمک روش‌های پیشنهادی

آشکار است، عضوهای آسیب‌دیده ۱ تا ۶ به درستی شناسایی شدند. روش به گونه‌ی تقریبی سطح مقطع عضوهای سازه را برآورد می‌کند. زیرا، روش برای به دست آوردن وارون مجوع ماتریس سختی سازه‌ی درست و ماتریس آشفتگی از دنباله‌ی تیلور بهره می‌جوید. باید دانست، با توجه به این‌که سطح مقطع برآورد شده کم‌تر از مقدار واقعی آن است، روش‌های پیشنهادی در جهت اطمینان، میزان آسیب‌دیدگی را بیش از مقدار حقیقی نشان می‌دهند. بر طبق انتظار، نتیجه‌ها نشان می‌دهند که روش تیلور مرتبه دوم از روش تیلور مرتبه اول دقیق‌تر است. به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر کارایی و دقت

این روش‌ها، تعداد تکرارها، مقدار تابع هدف، شاخص سرعت و شاخص خطای آن‌ها و هم‌چنین کمینه و بیشینه‌ی درصدهای خطا درجدول زیر نشان داده شده‌اند.

جدول۱- مقایسه کارایی و دقت روش‌ها

روش	تعداد تکرار	شاخص سرعت	شاخص خطا	کمینه درصد خطا	بیشینه درصد خطا	مقدار تابع هدف
تیلور مرتبه اول	۲۷	۱۰۰	۱۱/۵۰	۰/۰۰	۹۱/۶۹	$۲/۹۵\times۱۰^{-۹}$
تیلور مرتبه دوم	۲۷	۹۳/۲۲	۲/۵۴	۰/۰۰	۲۱/۲۷	$۷/۱۳\times۱۰^{-۹}$

بر پایه‌ی این جدول، برای تعداد تکرارهای یکسان، بیشینه و شاخص خطا نشان می‌دهند روش تیلور مرتبه دوم از مرتبه اول دقیق‌تر است. هم‌چنین، این روش در مقایسه با روش مرتبه اول کندتر بوده و سرعت کم‌تری دارد. تفاوت زمان اجرای و مقدار تابع هدف در این دو روش ناچیز بوده و می‌توان از این اختلاف صرف‌نظر کرد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، راه‌کاری برای آسیب‌یابی سازه‌های خرپایی ارائه می‌شود. این روش برپایه‌ی کمینه‌سازی تفاوت میان پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه‌ی آسیب‌دیده و پاسخ‌های به‌دست آمده از الگوی تحلیلی آن است. در این فن، از پاسخ‌های ایستای سازه بهره‌جویی می‌شود. شیوه‌های مزبور، برای برآورد خسارت در سازه‌های خرپایی به حل مساله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی قیددار منجر می‌شود. خاطرنشان می‌کند، برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی برای حل مساله‌ی بهینه‌سازی به‌کار می‌رود. باید افزود، دستگاه‌های اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه دقیق نیستند. به سخن دیگر، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده خطا دارند. در این مقاله، اثر خطای اندازه‌گیری بر روی روش ارائه شده بررسی می‌گردد. برای این کار، شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌گردد. در پایان به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی، به آسیب‌یابی نمونه عددی از خرپا همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی دارای خطا پرداخته می‌شود.

۷. مراجع

[1] Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. 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, Los Alamos, NM,1996.

[2] Salawu OS. Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: A Review. Engineering Structures,19(9)(1997), pp.718-723.

[3] Friswell MI. Damage Identification Using Inverse Methods. Philosophical Transaction of the Royal Society A, 365(2007), pp.393-410.

[4] Bakhtiari-Nejad F, Rahai A, Esfandiari A. A Structural Damage Detection Method Using Static Noisy Data. Engineering Structures, 27(2005), pp. 1784-1793.

[5] Sheena Z, Unger A, Zalmanovich A. Theoretical Stiffness Matrix Correction by Static Test Results. Israel Journal of Technology, 20(1982), pp. 245-253.

[6] Sanayei M, Nelson RB. Identification of Structural Element Stiffness From Incomplete Static Test Data. Society of Automotive Engineering, Technical Paper ser, SAE-861793 .

[7] Sanayei M, Scampoli SF. Structures Element Stiffness Identification From Static Test Data. Journal of Engineering Mechanics-ASCE. 177(5)(1991),pp. 1021-1036.

[8] Sanayei M, Onipde O. Damage Assessment of Structures Using Static Test Data. AIAA Journal, 29(1991), pp. 1174-1179.

[9] Sanayei M, Saletnik MJ. Parameter Estimation of Structures From Static Strain Measurements I: Formulation. Journal of Structural Engineering-ASCE,122(5)(1996), pp. 555-562.

[10] Sanayei M, Imbaro GR, McClain AS, Brown LC. Structural Model Updating Using Experimental Static Measurements. Journal of Structural Engineering-ASCE, 123(6)(1997), pp. 792-798.

[11] Banan MR, Banan MR, Hjelmstad K.D. Parameter Estimation of Structures From Static Response, I: Computational Aspects. Journal of Structural Engineering-ASCE, 120(11)(1994), pp. 3243-3258.

[۱۲] رضایی‌پژند، محمد و آفتابی‌ثانی، احمد، کنکاشی در نگره آسیب‌یابی ایستایی خرپاهای مستوی، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ویژه‌نامه مهندسی عمران، جلد ۱۹، شماره ۸، صفحه ۷۷-۸۷، سال ۱۳۸۷.

[۱۳] رضایی‌پژند، محمد ، به سوی بارگذاری نظام دار برای ارزیابی خرپاها با روش اجزای محدود،طرح پژوهشی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.

[14] Wang X, Hu N, Funkunaga H, Yao ZH. Structural Damage Identification Using Static Test Data and Changes in Frequencies. Engineering Structures, 23(2001), pp. 610-621.

[15] Sanayei M, Saletnik MJ. Parameter Estimation of Structures From static Strain Measurements II: Error Sensitivity Analysis. J Struct Eng-ASCE, 122 (5) (1996), pp. 563-572.

[16] Sanayei M, Onipede O, Babu SR. Selection of Noisy Measurement Locations for Error Reduction in Static Parameter Identification. AIAA J, 30(9) (1992), pp. 2299-2308.

[17] Liu PL, Chian CC. Parameter Identification of Truss Structures Using Static Strains. J Struct Eng-ASCE, 123 (7) (1997), pp. 927-933.