



# آسیب‌یابی بادبندها به یاری روش سادک شبه دوگان

محمد رضایی پژند<sup>۱\*</sup>، محمدصادق کاظمیان<sup>۲</sup>

۱- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی سازه، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱، rezaiee@um.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱)

## چکیده

راه‌کاری برای شناسایی طبقه‌هایی از قاب‌های ساختمانی ساده که بادبندهای آن‌ها خراب شده‌اند، در این مقاله پیشنهاد می‌شود. یادآوری می‌کند، بادبندها نقش کلیدی در سختی جانبی سازه‌های نامبرده دارند. روش نویسندگان از پاسخ‌های ایستای سازه و یک الگوی بارگذاری بهره می‌گیرد. در این فن، تنها تغییرمکان‌های انتقالی سازه سنجیده می‌شوند. الگوی بارگذاری انتخابی باید بتواند سبب پیدایش این گونه تغییرمکان‌ها گردد. باید آگاه بود، این مقاله با انجام تحلیل بر روی سازه‌ی خراب، تغییرمکان‌ها را برای آغاز فرآیند آسیب‌یابی فراهم می‌سازد. شناسایی بخش‌های آسیب‌دیده با حل مسأله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی انجام می‌پذیرد. رهیافت پیشنهادی این مسأله را به گونه‌ی خطی با متغیرهای دودویی تبدیل می‌کند. سپس، فن سادک شبه‌دوگان برای حل برنامه‌ریزی به‌کار می‌رود. به یاری برنامه‌ی رایانه‌ای، روش پیشنهادی بر روی چند قاب تخت با بادبندهای گوناگون آزمایش خواهد شد و درستی کار و ارسی می‌شود. یافته‌ها نشان از توانایی بالای شیوه‌ی پیشنهادی در شناسایی طبقه‌های آسیب‌دیده‌ی قاب‌های ساختمانی ساده و برآورد سختی جانبی آن‌ها دارند.

## واژگان کلیدی

آسیب‌یابی ایستا، برآورد خسارت، برنامه‌ی خطی دودویی، آسیب‌یابی تحلیلی، سادک شبه‌دوگان

## Bracing Damage Detection by Pseudo Dual Simplex Method

M. Rezaiee-Pajand, M.S. Kazemiyan

### Abstract

A new method for detecting the stories of the simple bracing frames whose bracing systems are damaged is presented in this paper. Recall that; the braces play an important role in the lateral stiffness of these structures. Authors' approach only takes advantage of one load case and the static responses of the structure. It is worthwhile to mention that only translational degrees of freedom are measured. The selected load pattern should be able to produce these types of displacements. Note that; this paper performs analysis on the damaged structures to provide the displacements of the unhealthy structure required for damage detection process. By solving a non-linear optimization problem, the damage identification is carried out. The suggested technique converts this nonlinear problem into a binary linear programming, which could be solved by "pseudo dual simplex method." This new method is employed to assess the bracing systems of several plane frames with different braces. The damage identification process is carried out by authors' special-purpose computer program. Numerical results demonstrate the ability of this approach in detecting the damaged stories and estimating their lateral stiffness in a given simple bracing frame.

### Keywords

Static damage detection, Damage assessment, Binary linear programming, Analytical damage detection, Pseudo dual simplex method



در سراسر جهان پل‌ها، آسمان خراش‌ها، تونل‌ها، سدها و گونه‌های دیگری از سازه‌ها هستند که سال‌ها از عمر آن‌ها سپری شده است. برای اطمینان از درستی کارکرد و ایمنی آن‌ها، باید در بازه‌های زمانی مشخص به واریسی سازه‌ها پرداخت. با به‌کار بستن روش‌های مناسب، می‌توان از تخریب آن‌ها پیش‌گیری نمود. افزون بر این، سازه‌هایی که به تازگی ساخته می‌شوند، نیاز به واریسی و پایش دارند. با واریسی این سازه‌ها در دوران ساخت و بهره‌برداری، می‌توان خسارت‌های احتمالی را در کوتاه‌ترین زمان شناسایی نمود و با انجام کارهای مناسب، از گسترش آسیب جلوگیری کرد.

آسیب‌یابی سازه‌ها در مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا از اهمیت بسزایی برخوردار است. هدف از انجام این کار، بررسی رخداد خسارت، موقعیت آسیب، تخمین میزان آسیب‌دیدگی و همچنین عمر بهره‌برداری باقی‌مانده‌ی سازه می‌باشد. برای رسیدن به این هدف‌ها، پژوهش‌های بسیاری از دهه‌ی هفتاد میلادی انجام یافته است. پژوهشگران شیوه‌های گوناگونی را برای آسیب‌یابی سازه‌ها پیشنهاد کرده‌اند. یادآوری می‌کند، روش‌های آسیب‌یابی به دو دسته‌ی "مخرب" و "نامخرب" دسته‌بندی می‌شوند. از میان این فن‌ها، آن‌هایی که کمترین مزاحمت را در کارکرد سازه ایجاد نمایند، اهمیت شایانی دارند. بنابراین، راه‌کارهای نامخرب شایسته‌ی گسترش روز افزونند.

روش‌های چشمی و پاره‌ای از فن‌هایی که برپایه‌ی انجام آزمایش‌های درجا هستند، نامخرب به‌شمار می‌آیند. آزمایش‌های مبتنی بر شیوه‌های فراصدا، میدان مغناطیسی، پرتونگاری و میدان حرارتی، نمونه‌هایی از راه‌کارهای نامخرب هستند. برای به‌کارگیری این شیوه‌ها، نخست باید گستردگی آسیب شناسایی شود. روش‌های پیش‌گفته توانایی آسیب‌یابی در سازه‌های دور از دسترس را ندارند. به یاری آن‌ها، تنها آسیب‌های سطحی و یا نزدیک به رویه‌ی سازه شناسایی می‌گردند.

به سبب تنگناهای این شیوه‌ها، رهیافت‌های تحلیلی گسترش یافتند. این راه‌کارها نامخرب می‌باشند و دربرگیرنده‌ی دو دسته روش‌های پویا و ایستا هستند. هر دو دسته بر پایه‌ی فن عددی اجزای محدود و نتیجه‌های آزمایشی بنا می‌شوند. رهیافت‌های تحلیلی آسیب‌یابی، راه‌حل‌هایی الگومدارند که با نگرشی سامانه‌وار به سازه، به ارزیابی آن می‌پردازند. پایه‌ی اصلی فن‌های تحلیلی، یکی شدن پاسخ‌های واقعی و اندازه‌گیری شده با الگوی ریاضی است. این شیوه‌ها، با توجه به این دیدگاه و تنها به کمک

پاسخ‌های سازه، مانند تنش‌ها و کرنش‌های عضو در فن‌های ایستا و یا بسامد و پاسخ زمانی در روش‌های پویا و یا ترکیبی از پاسخ‌های ایستا و پویا، حالت کنونی سازه را در دسترس قرار می‌دهند. بروندادهای یاد شده با بهره‌جویی از دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌دست می‌آیند و به یاری آن‌ها و با حل مسأله‌ای وارون، ویژگی‌های ساختاری سازه تعیین می‌گردند. از این رو، می‌توان با بهره‌جویی از این فرآیند، سازه‌های دور از دسترس را نیز مورد پایش قرار داد. برای این کار، باید از دستگاه‌هایی برای اندازه‌گیری برونداد سازه بهره جست، که توانایی ارسال داده‌ها به مکانی دور را داشته باشند.

شمار پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی راه‌کارهای پویا از ایستا گسترده‌تر است. آن گونه که آمد، 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 به‌دست آورد. سپس، با بهره‌گیری از این فرآیند، آسیب‌یابی سازه انجام می‌پذیرد. باید افزود، دگرگونی در پاسخ‌های پویای سازه به تغییر در ویژگی‌های سختی، جرم و میرایی وابسته است. از این رو، شیوه‌های پویا نسبت به روش‌های ایستا، پیچیده‌ترند. در بیشتر راه‌کارهای پویا، ماتریس جرم و میرایی پیش و پس از آسیب، ثابت پنداشته می‌شوند. باید افزود، چنین انگاره‌ای برای همه‌ی سازه‌ها درست نیست. برای نمونه، می‌توان به سکوه‌های نفتی اشاره نمود. در این‌گونه سازه‌ها، ماتریس جرم دستخوش دگرگونی است [۱].

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 زیادی در بسامدهای سازه گردد. همچنین، در راه‌کارهای پویا سنجش شکل حالت‌های سازه نیاز به دقت شایانی دارد. برای دستیابی به شکل حالت‌های درست، باید تحریک‌های نادرست حذف شوند. باید آگاه بود، یافتن شکل حالت‌های سازه دشوار می‌باشد. همچنین، شرط‌های مرزی نیز بر بسامدها و شکل حالت‌های سازه اثر می‌گذارند.

در ادامه نگاهی گذرا به پاره‌ای از پژوهش‌های پیشینان در زمینه‌ی رهیافت‌های پویا می‌شود. شماری از پژوهش‌گران به شناساندن گونه‌های فن‌های پویا پرداختند [۷-۱]. Moslem و Nafaspour به یاری فراروش‌های ارثی عضوهای خراب را



شناسایی کردند [۸]. Escobar و همکارانش با به‌کارگیری بسامدهای طبیعی و شکل حالت‌های سازه شیوه‌هایی برای تعیین موقعیت و میزان آسیب در قاب‌های دو و سه بعدی پیشنهاد نمودند [۹]. Chen روشی برای آسیب‌یابی قاب‌ها پیشنهاد کرد. رهیافت وی توانایی تشخیص اندازه و شدت آسیب در اجزای سازه‌ای مانند بادبندها و ستون‌ها را نیز دارد [۱۰]. Goldfed راه‌کاری برای ارزیابی خسارت سازه‌های گوناگون مانند خرپاهای قاب‌ها و تیرها ارائه کرد. این روش با بهره‌جویی از سنجش شماری از بسامدها و شکل حالت‌های سازه ویژگی‌های ساختاری را حساب می‌کند [۱۱]. Ge و Lui راه‌کاری پویا برای ارزیابی خسارت ارائه کردند. این رهیافت، دگرگونی در ماتریس سختی و جرم را واری می‌کند [۱۲]. افزون بر این، Ge و همکارانش روش دیگری نیز برای واری سلامت سازه‌های قابی ارائه نمودند. این شیوه نیز از ویژگی‌های پویای سازه بهره می‌جوید. فن مزبور توانایی جداسازی بخش‌های آسیب‌دیده و درست سازه را پیش از تخمین میزان خسارت دارد [۱۳]. Rodreguez و همکارانش نیز برای واری سلامت قاب‌های ساختمانی از پاسخ‌های پویا بهره جستند. فن مزبور، بر پایه‌ی چگونگی تقسیم‌بندی سازه‌ی سالم می‌تواند در ناحیه‌های مشخصی از سازه به ارزیابی خسارت بپردازد [۱۴]. Na و همکارانش با بهره‌جویی از ماتریس نرمی و تحلیل پویای سازه به تعیین موقعیت و میزان آسیب در قاب‌های ساختمانی برشی پرداختند. در فن مزبور نیز از فراروش‌های ارثی بهره‌جویی شد [۱۵].

دسته‌ی دیگر راه‌کارهای تحلیلی آسیب‌یابی، رهیافت‌های ایستا هستند. برپایه‌ی آنچه آمد، پاسخ‌های ایستای اندازه‌گیری شده، دقیق‌تر از پاسخ‌های پویا هستند. بنابراین، نتیجه‌های روش‌های ایستا، مطمئن‌ترند. با وجود این، فن‌های ایستا کاستی‌هایی نیز دارند. برای نمونه، شیوه‌های ایستا وابسته به الگوی بارگذاری سازه هستند. پژوهش‌های پیشین آشکار کرده‌اند که چنانچه سهم عضوی از سازه در شکل‌گیری پاسخ‌های سازه کم باشد، نمی‌توان آسیب آن را شناسایی نمود [۱۶]. 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 واری الگوهای گوناگون بهره می‌جویند. شایان توجه است، محدودیت‌های راه‌کارهای ایستا ریشه در نهاد معادله‌های تعادل ایستای سازه دارد.

در ادامه، رهیافت‌های ایستای آسیب‌یابی سازه بررسی می‌شوند. Sheena 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 [۱۷]. همچنین، در این فن پاسخ‌های سازه در مکان‌های مشخصی اندازه‌گیری می‌شوند. باید دانست، قیده‌های مسأله‌ی بهینه‌سازی در این راه‌کار، همان پاسخ‌های اندازه‌گیری شده هستند. Sanayei و Nelson [۱۸] و Sanayei و Scampoli [۱۹] روشی برای تخمین سختی‌های عضوی ارائه کردند. در این راه‌کار، زیرمجموعه‌ای از درجه‌های آزادی زیر بارگذاری قرار می‌گیرند. پاسخ‌های درجه‌های آزادی مزبور، باید اندازه‌گیری شوند. به دیگر سخن، زیرمجموعه‌ی درجه‌های آزادی بارگذاری شده و آن‌هایی که پاسخ‌شان اندازه‌گیری می‌شود، باید همپوشانی کامل داشته باشند. انجام چنین کاری همواره کاربردی نیست. از این رو، Sanayei و Onipde به یاری کم‌سازی ماتریس سختی سازه، روش پیشین را بهبود دادند. در راه‌حل نوین، دو زیرمجموعه‌ی مزبور می‌توانند همپوشانی کامل، ناکامل و یا تهی داشته باشند [۲۰]. داده‌های تغییرمکانی در روش مزبور استفاده می‌شوند. Sanayei و Salentik این راه‌کار را برای به‌کارگیری کرنش‌های عضوی گسترش دادند [۲۱]. در این شیوه نیازی به اندازه‌گیری همه‌ی کرنش‌های عضوی نمی‌باشد. Sanayei و همکارانش، افزون بر ارائه‌ی رهیافتی توانمند در ارزیابی خسارت سازه‌ها اثر اغتشاش را نیز بر روش خود واری نمودند [۲۲ و ۲۳]. همچنین، با ساخت سازه‌هایی در آزمایشگاه به ارزیابی اثر اغتشاش بر داده‌های تغییرمکانی و کرنش‌های عضوی پرداختند [۲۴].

Hajela و Soeiro تابع‌های خطا را در سه دسته‌ی خطای معادله، خطای ستاده و انحراف کمینه رده‌بندی نمودند [۲۵ و ۲۶]. همچنین، آن‌ها روشی برای آسیب‌یابی پیشنهاد داده‌اند. در این شیوه از داده‌های پویا و ایستا بهره‌جویی می‌شود. Banan و همکارانش دو فراروش برای ارزیابی خسارت در سازه‌ها پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها از برنامه‌ریزی درجه دوم تکراری بهره گرفتند [۲۷ و ۲۸]. افزون بر این، Shin و Hjelmstad نیز روشی برای ارزیابی خسارت در سازه‌ها ارائه دادند [۲۹]. پایه‌ی اصلی این راه‌کار، پژوهش‌های انجام شده توسط Banan و همکارانش است. همچنین، Liu و Chian با تجزیه‌ی ماتریس سختی سازه و بیرون کشیدن عامل‌های ندانسته‌ی آن، شیوه‌ی نوینی برای تخمین خسارت سازه پیشنهاد کردند. راه‌حل آن‌ها



توانایی برآورد خسارت در سازه‌های خرپایی را دارد [۳۰].  
 Saliان راه‌کار Liu و Chian را گسترش داد [۳۱]. روش  
 Saliان، توانایی آسیب‌یابی سازه‌های قابی را داراست. و Chou  
 و Ghaboussi به یاری روش‌های اثری سختی‌های عضوی را  
 برآورد نمودند [۳۲]. Bakhtiari-Nejad و همکارانش برای برآورد  
 ماتریس سختی سازه‌ی خراب از چندجمله‌ای Taylor بهره  
 جستند. فن پیشنهادی آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم  
 پیایی به ارزیابی خسارت در سازه‌ها پرداخت [۱۶]. Shenton و  
 Hu به یاری بازتوزیع بار مرده شیوه‌ای نوین برای آسیب‌یابی  
 ارائه کردند [۳۳]. Kouchmeshki و همکارانش با به‌کارگیری  
 فراروش هم‌تکاملی به ارزیابی خسارت در سازه‌ها پرداختند  
 [۳۴]. در این رهیافت کوشش شده است که کم‌ترین شمار  
 بارگذاری بهره‌جویی شود. Sun و Yang روشی ساده برای  
 شناسایی عضوهای آسیب‌دیده و برآورد میزان خرابی در آن‌ها  
 پیشنهاد کردند. فن مزبور، از ماتریس نرمی سازه بهره می‌جوید.  
 این راه‌کار برای تخمین خسارت در سازه‌ها از بهینه‌سازی  
 استفاده نمی‌کند [۳۵]. Rezaiee-Pajand و Aftabi-Sani روشی  
 برای آسیب‌یابی خرپاها ارائه کردند. در شیوه‌ی مزبور، تابع  
 هدف ناخطی مسئله با به‌کارگیری متغیرهای دودویی به تابعی  
 خطی تبدیل می‌شود. سپس، با به‌کارگیری فراروش سادک  
 شبه‌دوگان مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی حل می‌گردد. باید دانست،  
 این روش از هیچ تقریبی در خطی‌سازی بهره نمی‌گیرد. بنابراین،  
 توانایی رسیدن به پاسخ دقیق را داراست [۳۶]. پاره‌ای از  
 راه‌کارهای آسیب‌یابی از داده‌های پویا و ایستا بهره می‌جویند.  
 Hwan و Jung [۳۷] و Wang و همکارانش [۳۸] از ترکیب  
 پاسخ‌های ایستا و پویا برای برآورد خرابی در سازه بهره گرفتند.  
 در این مقاله، راه‌کاری ایستا برای شناسایی طبقه‌هایی از  
 قاب‌های ساختمانی ساده که بادبندهای آن‌ها خسارت‌دیده‌اند،  
 پیشنهاد می‌شود. این روش توانایی حساب کردن سختی جانبی  
 طبقه را داراست. یادآور می‌کند، قابی که دارای اتصال‌های تیر به  
 ستون مفصلی و بادبند باشد را قاب ساختمانی ساده می‌نامند. در  
 تحلیل این گونه سازه‌ها، تیرها و ستون‌های قاب را بدون  
 تغییرشکل محوری می‌پندارند. همچنین، پیش و پس از آسیب  
 تیرها و ستون‌های سازه را سالم می‌پندارند. باید دانست، بر  
 پایه‌ی واری تجربی‌های راستین، این پنداشت‌ها دور از واقعیت  
 نمی‌باشد. به طور معمول، نخست بادبندهای سازه به سبب  
 آسیب کارایی خود را از دست می‌دهند و دیگر نقشی در سازه  
 نخواهند داشت. در فن مزبور، قاب‌های ساختمانی ساده با  
 استفاده از تغییرمکان‌های انتقالی سازه مورد پایش قرار می‌گیرند.

باید افزود، این راه‌کار از یک الگوی بار استفاده می‌کند. با این  
 فرآیند، طبقه‌هایی که بادبندهای آن‌ها خراب شده‌اند شناسایی  
 می‌شوند و سختی جانبی آن‌ها حساب می‌گردد.

در ادامه‌ی کار، درباره‌ی عامل‌های ناشناخته و چگونگی  
 رابطه‌سازی مسئله برای یافتن آن‌ها، بحث خواهد شد. در این  
 رهیافت، با به‌کارگیری متغیرهای دودویی، تابع هدف ناخطی  
 مسئله به تابعی خطی و دودویی تبدیل می‌شود. سرانجام، درستی  
 روش نویسندگان با بررسی چند نمونه ارزیابی می‌گردد.

## ۲- رابطه‌سازی ماتریسی

معادله‌ی حاکم بر سازه را می‌توان به‌سان زیر نشان داد:

$$KU = F \quad (۱)$$

در برابری کنونی، بردار تغییرمکان  $U$ ، بردار نیرو  $F$  و  
 ماتریس سختی سازه  $K$  می‌باشد. باید افزود، بردارهای بار و  
 تغییرمکان  $nd$  درایه دارند که برابر با شمار درجه‌های آزادی  
 سازه‌اند. یادآوری می‌کند، شمار سطر و ستون‌های ماتریس  
 سختی سازه برابر با شمار درجه‌های آزادی آن خواهد بود.

ماتریس سختی قاب دارای بادبند از دو بخش تشکیل  
 می‌شود. بخش نخست وابسته به سختی تیرها و ستون‌ها و بخش  
 دیگر وابسته به سختی بادبندها می‌باشد. در نتیجه، رابطه‌ی (۱)  
 را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$(K_B + K_F)U = F \quad (۲)$$

در این رابطه،  $K_B$  و  $K_F$ ، به ترتیب، بخش‌هایی از ماتریس  
 سختی سازه هستند که وابسته به عضوهای قاب و بادبندها  
 می‌باشند. شمار سطر و ستون‌های این ماتریس‌ها برابر با  $nd$   
 است. برابری (۲) را می‌توان به‌سان زیر درآورد:

$$K_B U = F - K_F U \quad (۳)$$

به یاری جداسازی درجه‌های آزادی، می‌توان رابطه‌ی کنونی  
 را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} K_{Bdd} & K_{Bdr} \\ K_{Brd} & K_{Brr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_d \\ U_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_d \\ F_r \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{Fdd} & K_{Fdr} \\ K_{Frd} & K_{Frr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_d \\ U_r \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

در برابری کنونی، زیرنویس  $dd$  وابسته به درجه‌های آزادی  
 انتقالی و زیرنویس  $rr$  وابسته به درجه‌های آزادی دورانی  
 می‌باشند. همچنین، زیرنویس‌های  $rd$  و  $dr$  وابسته به درجه‌های  
 آزادی انتقالی و دورانی هستند. زیربردارهایی که زیرنویس  $d$   
 دارند به درجه‌های آزادی انتقالی و آن‌هایی که دارای زیرنویس  $r$   
 می‌باشند، به درجه‌های آزادی دورانی وابسته‌اند. شایان توجه  
 است، در ماتریس وابسته به سختی بادبندهای سازه، تنها  
 درایه‌های زیرماتریس وابسته به درجه‌های آزادی انتقالی ناصفر



می‌باشند و سایر درایه‌ها صفرند. با گسترش رابطه‌ی پیشین برابری‌های زیر به دست می‌آیند:

$$K_{Bda}U_d = F_d - K_{Fda}U_d - K_{Fdr}U_r \quad (5)$$

$$F_r - K_{Frd}U_d - K_{Frr}U_r = 0 \quad (6)$$

آن گونه که آمد، در اثر آسیب تنها بادبندهای سازه خسارت می‌بینند. همچنین، پس از آسیب، عضوهای بادبندی کارایی خود را از دست می‌دهند. به دیگر سخن، سختی آن‌ها صفر خواهد شد. در نتیجه، نیازی به پایش تیرها و ستون‌های سازه نمی‌باشد. از این رو، تنها عضوهای بادبندی واری می‌گردند. گره‌های سر و ته این عضوها تنها درجه‌های آزادی انتقالی دارند. یادآوری می‌کند، چون عضوهای سازه بدون تغییرشکل‌های محوری هستند، تغییرمکان‌های افقی گره‌هایی که در یک طبقه قرار گرفته‌اند، برابرخواهند بود.

باید دانست، سختی بادبندها تنها بر سطر و ستون‌هایی از ماتریس سختی که وابسته به درجه‌های آزادی انتقالی هستند، اثرگذار می‌باشد. از این رو، پس از آسیب تنها درایه‌های وابسته به زیرماتریس  $K_{Bda}$  دستخوش تغییر می‌شوند. در رهیافت پیشنهادی با اندازه‌گیری درجه‌های آزادی انتقالی، سلامت بادبندهای آن بررسی می‌گردد. بنابراین، در سازه‌ی آسیب‌دیده زیربردار  $U_r$  و زیرماتریس  $K_{Bda}$  ناشناخته‌اند. باید افزود، سایر زیربردارها و زیرماتریس‌ها در سازه‌ی خسارت‌دیده معلوم می‌باشند. آشکار است، به یاری برابری (6) می‌توان زیربردار  $U_r$  را حساب نمود. در نتیجه، سمت راست رابطه‌ی (5) برداری معلوم می‌باشد که با  $G$  نشان داده می‌شود:

$$G = F_d - K_{Fda}U_d - K_{Fdr}U_r \quad (7)$$

برابری (5) را به سان زیر می‌توان نوشت:

$$K_{Bda}U_d = G \quad (8)$$

در برابری کنونی، زیربردار تغییرمکان که دربرگیرنده‌ی درجه‌های آزادی انتقالی سازه است، با  $U_d$  نشان داده می‌شود. آن گونه که آمد، زیرماتریس  $K_{Bda}$  درایه‌هایی از ماتریس سختی سازه که وابسته به سختی بادبندها و درجه‌های آزادی انتقالی هستند را در بر می‌گیرد. خاطر نشان می‌سازد، شمار درایه‌های زیربردار پیش‌گفته و سطر و ستون‌های زیرماتریس مزبور برابر با درجه‌های آزادی انتقالی ( $ns$ ) می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد، شمار درایه‌های بردار  $G$  برابر با شمار درجه‌های آزادی انتقالی سازه است.

آن گونه که آمد، اگر دست‌کم یکی از بادبندهای هر طبقه

کارایی خود را از دست بدهد، آن طبقه آسیب‌دیده است و سختی جانبی آن کاهش می‌یابد. بنابراین، برای شناسایی طبقه‌های خراب، باید سختی بادبندها پس از خسارت واری شوند. اگر بادبندی خراب شده باشد، سختی آن در سازه صفر خواهد شد. از این رو، عامل‌های ناشناخته سختی بادبندها هستند. در ادامه‌ی کار، این عامل‌ها از ماتریس سختی وابسته بیرون کشیده می‌شوند [30]. برای رسیدن به این هدف، ماتریس نگاشت  $T$  به کار می‌رود. ماتریس مزبور به یاری رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$K_{Bda} = \sum_{e=1}^{nel} A_e E_e L_e S_e L_e^T \quad (9)$$

$$T = [L_1 S_1 L_1^T U_d \dots L_{nel} S_{nel} L_{nel}^T U_d] \quad (10)$$

در برابری نخست،  $L_e$  ماتریس پیوستگی بادبند  $e$ ام است که  $ns$  سطر و  $e$  ستون دارد. ماتریس پیوستگی، درجه‌های آزادی بادبندهای سازه در راستای محورهای محلی را به درجه‌های آزادی کلی وابسته می‌سازد. باید دانست،  $L_e$  و  $S_e$  وابسته به سختی بادبندها نمی‌باشند. در رابطه‌ی کنونی،  $S_e$  بخشی از ماتریس سختی است که ویژگی‌های هندسی عضو را نشان می‌دهد. این ماتریس به یاری برابری‌های زیرین حساب می‌شود:

$$K_e = A_e E_e S_e; \quad S_e = \frac{1}{L_e} \begin{bmatrix} C^2 & CS & -C^2 & -CS \\ CS & S^2 & -CS & -S^2 \\ -C^2 & -CS & C^2 & CS \\ -CS & -S^2 & CS & S^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در برابری‌های پیشین،  $E_e$ ،  $A_e$  و  $L_e$ ، به ترتیب، ضریب کشسانی عضو  $e$ ام، سطح مقطع بادبند  $e$ ام و طول عضو مزبورند.  $C$  و  $S$  نیز کسینوس‌های هادی محور عضو نسبت به محورهای کلی  $X$  و  $Y$  هستند. سرانجام، رابطه‌ی (8) به سان زیر در می‌آید:

$$T\alpha = G \quad (12)$$

در برابری کنونی، بردار سختی بادبندها  $\alpha$  می‌باشد. این بردار  $nel$  درایه دارد که شمار بادبندهای سازه است. ماتریس  $T$  دارای  $nel$  ستون و  $ns$  سطر می‌باشد.

### ۳- تابع هدف

یادآوری می‌کند، در رابطه‌ی (12) تنها بردار  $\alpha$  ناشناخته است. بنابراین، با حل این دستگاه معادله می‌توان سختی بادبندها را حساب کرد. سپس، طبقه‌های آسیب‌دیده شناسایی می‌شوند. شایان توجه است، حل دستگاه به‌آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا، دستگاه مزبور، به طور معمول، فرومعیین است. به دیگر



$$\begin{aligned} \text{Min} \varepsilon = & \sum_{i=1}^{ns} \left( G_i^2 + \sum_{j=1}^{nel} T_{ij}^2 Z_j^2 \alpha_{0j}^2 \right. \\ & - 2G_i \sum_{j=1}^{nel} T_{ij} Z_j \alpha_{0j} \\ & \left. + 2 \sum_{j=1}^{nel-1} \sum_{k=j+1}^{nel} T_{ij} T_{ik} Z_j \alpha_{0j} Z_k \alpha_{0k} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

در تابع هدف کنونی، تنها متغیرهای دودویی  $Z_i$ ، که در بردار مجهول  $Z$  جای گرفته‌اند، به چشم می‌خورند. این بردار  $nel$  درایه دارد. اگرچه متغیرهای مسئله به متغیرهای دودویی تبدیل شده‌اند، هنوز امکان به‌کارگیری روش سادک شبه‌دوگان فراهم نیست. زیرا تابع هدف (۱۷) ناخطی است.

### ۵- خطی‌سازی

آشکار است، رابطه‌ی (۱۷) از دو بخش خطی و ناخطی تشکیل شده است. جمله‌های ناخطی از حاصل ضرب متغیرهای دودویی بوجود آمده‌اند. چون متغیرهای مسئله دودویی هستند، توان دوم و یا حاصل ضرب آن‌ها نیز متغیرهایی دودویی می‌باشد. از این رو، می‌توان هر یک از عبارت‌های  $Z_j^2$  و  $Z_j Z_k$  را متغیری جدید مانند  $Z_r$  و  $Z_s$  انگاشت [۳۶]. با این کار، شمار متغیرهای مسئله افزایش می‌یابد، اما عبارت‌های ناخطی به جمله‌هایی خطی تبدیل می‌شوند. خاطرنشان می‌سازد، مقدارهای متغیرهای جدید وابسته به مقدارهای متغیرهای نخستین است. برای وارد ساختن این وابستگی‌ها از قیدهای زیر بهره‌جویی می‌شود:

$$Z_r = Z_j Z_k : Z_r, Z_j, Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Z_r \geq Z_j + Z_k - 1 \\ Z_r \leq \frac{1}{2}(Z_j + Z_k) \end{cases} \quad (19)$$

رابطه‌ی نخست نشانگر تغییر متغیرهای جدید و دو رابطه‌ی (۱۹) قیدهای اضافی وابسته به تغییر متغیرها را نشان می‌دهند. با به‌کارگیری این رابطه‌ها، می‌توان تابع هدف (۱۷) را خطی نمود. به یاری رابطه‌های زیرین می‌توان شمار قیدها و متغیرهای دودویی را به‌دست آورد:

$$nv = \frac{nel}{2}(nel + 3) \quad (20)$$

$$nc = 2(nv - nel) \quad (21)$$

در برابری‌های کنونی، شمارعامل‌های ناشناخته و قیدهای مسئله، به ترتیب،  $nv$  و  $nc$  می‌باشد. اینک، می‌توان به یاری روش سادک شبه‌دوگان مسئله ریزی خطی را حل نمود.

سخن، شمار عامل‌های مجهول آن از عامل‌های معلوم بیشتر خواهد بود. همچنین، هنگامی که ماتریس ضریب‌ها مربعی باشد، در بیشتر حالت‌ها، ماتریس مزبور ناویژه می‌گردد. در نتیجه، برای حل دستگاه معادله‌های (۱۲)، به شیوه‌های خاصی نیاز است. خاطرنشان می‌سازد، یکی از راه‌کارهای کارا و مناسب حل این گونه دستگاه‌ها، کمینه‌سازی هیچ خطای دو طرف معادله و بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌یابی می‌باشد. در این صورت، با حل برنامه‌ریزی ناخطی زیر می‌توان سختی بادبندها را حساب نمود:

$$\begin{cases} \text{Min} \varepsilon = \|T\alpha - G\| \\ 0 \ll \alpha \ll \alpha_0 \end{cases} \quad (13)$$

در این رابطه‌ها، بردار سختی بادبندهای سالم با  $\alpha_0$  نشان داده می‌شود. تابع هدف کنونی را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \text{Min} \varepsilon = \sum_{i=1}^{ns} \left( G_i - \sum_{j=1}^{nel} T_{ij} \alpha_j \right)^2 \\ 0 \ll \alpha \ll \alpha_0 \end{cases} \quad (14)$$

شکل گسترش یافته‌ی رابطه‌ی کنونی به سان زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min} \varepsilon = & \sum_{i=1}^{ns} \left( G_i^2 + \sum_{j=1}^{nel} T_{ij}^2 \alpha_j^2 - 2G_i \sum_{j=1}^{nel} T_{ij} \alpha_j + \right. \\ & \left. 2 \sum_{j=1}^{nel-1} \sum_{k=j+1}^{nel} T_{ij} T_{ik} \alpha_j \alpha_k \right) \end{aligned} \quad (15)$$

رهیافت پیشنهادی برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از روش سادک شبه‌دوگان بهره می‌گیرد [۳۶]. این راه‌کار، توانایی حل مسئله‌های برنامه‌ریزی خطی را داراست. افزون بر این، متغیرهای مسئله باید دودویی باشند. بنابراین، باید برنامه‌ریزی ناخطی پیشین به برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای دودویی تبدیل شود. متغیرهای دودویی تنها می‌توانند دارای مقدارهای صفر و یا یک باشند.

### ۴- رابطه‌سازی دودویی

برای تبدیل عامل‌های ناشناخته به متغیرهای دودویی از برابری زیر بهره‌جویی می‌شود:

$$\alpha_i = Z_i \alpha_{0i} \quad (16)$$

در این رابطه، سختی عضو  $\alpha_m$  پس از رخداد خرابی در سازه و سختی عضو سالم  $\alpha_i$  است.  $Z_i$  متغیری دودویی می‌باشد که صفر شدن آن نشانگر خرابی بادبندها خواهد بود. اگر عضو مزبور سالم باشد، این متغیر یک خواهد شد. به یاری رابطه‌ی (۱۶) می‌توان تابع هدف دودویی زیر را به‌دست آورد:



شایان توجه است، فرآیند خطی‌سازی در روش پیشنهادی هیچ خطایی در پی ندارد. زیرا فرآیند مزبور، تنها با بهره‌گیری از ویژگی‌های دودویی متغیرهای مسئله، تابع هدف را خطی می‌نماید. افزون بر این، برای دستیابی به تابع هدف خطی نیازی به محاسبه‌ی اضافی نیست و تنها تغییر متغیر جدید به‌کار می‌رود. به سخن دیگر، شیوه‌ی نویسندگان پاسخ دقیق را پیدا می‌کند.

#### ۶- راه‌کار بهینه‌یابی

آن گونه که آمد، برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی از فراروش سادک شبه‌دوگان بهره‌جویی می‌شود. در سال ۱۹۶۵، بالاس (Balas) این فن را برای حل مسئله‌های برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای صفر و یک پیشنهاد نمود [۳۹]. مسئله‌هایی که متغیرهای طراحی آن‌ها دودویی هستند، بردار ناشناخته‌های آن‌ها دارای  $2^n$  حالت ممکن و متفاوت است. یادآوری می‌کند،  $n$  شمار متغیرهای می‌باشد. راه‌کار بالاس با به‌کارگیری فرآیندی نظام‌دار و هدفمند و با واریسی نمودن تنها پاره‌ای از این حالت‌ها پاسخ بهینه را حساب می‌کند. باید دانست، واریسی همگی حالت‌های ممکن برای دست‌یابی به پاسخ بهینه برای مسئله‌های واقعی دشوار و زمان‌بر است. راه‌کار بالاس دارای سه گام اصلی است و با فرآیندی تکراری پاسخ بهینه را به‌دست می‌آورد. باید دانست، عملگرهای ریاضی هر گام، بیشتر به صورت مقایسه‌ای و منطقی هستند. از این رو، زمان مورد نیاز برای پیمایش گام‌های روش چندان زیاد نیست. در پیوست ۱، نمودار جریان این روش می‌آید.

شایان توجه است، در هر تکرار متغیرهای طراحی به گونه‌ای مقداره‌ی می‌شوند که به پذیرفتنی بودن پاسخ و کمینه‌شدن تابع هدف کمک کنند. این روند تکراری با مقدارهای نخستین صفر برای تمامی متغیرها آغاز و تا رسیدن به پاسخ بهینه ادامه می‌یابد. خاطرنشان می‌سازد، ممکن است که مقدارهای نخستین متغیرهای طراحی پذیرفتنی نباشند. باید افزود، این شیوه همانند روش سادک توانایی شناسایی ناممکن بودن مسئله را داراست.

#### ۷- نمونه‌های عددی

در این بخش چند قالب ساختمانی ساده واکاوی می‌شوند. نخست در هر مسئله، شکل و هندسه‌ی سازه به همراه ویژگی‌های عضوهای درج می‌گردد. در آغاز کار، بادبندهای خراب تعیین می‌شوند. سپس، با استفاده از تحلیل سازه‌ی خسارت‌دیده،

تغییر مکان‌های انتقالی قالب به‌دست می‌آیند. در ادامه، به یاری این تغییر مکان‌ها، مسئله‌ی شناسایی طبقه‌های آسیب‌دیده برپا می‌گردد. سرانجام، با بهره‌جویی از شیوه‌ی پیشنهادی، سختی جانبی ناشی از بادبندهای هر طبقه حساب و طبقه‌هایی که شماری از بادبندهای آن‌ها کارایی خود را از دست داده‌اند، شناسایی می‌شوند. باید افزود، گام‌های حل مسئله با به‌کارگیری فن نوین، در پیوست ۲ می‌آیند. سرانجام، نتیجه‌های نویسندگان با پاسخ‌های دقیق همشماری می‌گردند. باید دانست، برای به‌کارگیری رهیافت پیشنهادی، نویسندگان برنامه‌ای رایانه‌ای فراهم کرده‌اند. در این برنامه، برای تحلیل سازه‌ها، از روش جزءهای محدود بهره‌جویی می‌شود. آشکار خواهد شد، روش پیشنهادی توانایی شناسایی طبقه‌های آسیب‌دیده را دارد. در این پژوهش، خطای اندازه‌گیری اثرگذار نیست. زیرا، پاسخ‌ها به یاری تحلیل سازه به‌دست می‌آیند. یادآوری می‌نماید، راه‌کار نویسندگان از تغییر مکان‌های انتقالی بهره می‌جوید. بنابراین، الگوی بار وارد بر سازه باید بتواند سبب ایجاد این گونه تغییر مکان‌ها شود. در نمونه‌های عددی پسین، الگوهای بار جانبی به‌کار می‌روند که برای کوتاه‌نویسی، از آوردن آن‌ها چشم‌پوشی می‌گردد. خاطر نشان می‌سازد، کمیت‌های عددی برحسب سانتی‌متر و کیلوگرم می‌باشند و از نمایش یک‌ها چشم‌پوشی شده است. همچنین، ضریب کشسانی مصالح برای همه‌ی سازه‌های قابی  $2 \times 10^6$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

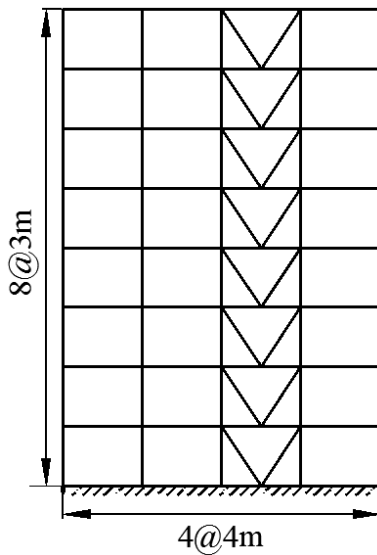
#### ۷-۱- قالب پنج طبقه

این سازه پنج طبقه و بادبندهای ضربدری دارد. شکل (۱) هندسه‌ی این قالب را نشان می‌دهد. سازه‌ی مزبور هشتاد و پنج درجه‌ی آزادی دارد و شمار درجه‌های آزادی دورانی آن هشتاد می‌باشد. آن گونه که آمد، خرابی بادبندها بر درجه‌های آزادی انتقالی اثر می‌گذارد. ستون‌های دو طبقه‌ی نخست سازه لنگر لختی ۲۹۴۱۸، ستون‌های طبقه‌ی سوم لنگر لختی ۲۳۲۱۳ و ستون‌های دو طبقه‌ی دیگر لنگر لختی ۱۳۰۳۱ دارند. تیرهای سازه دارای لنگر لختی ۵۷۹۰ می‌باشند. سطح مقطع بادبندهای طبقه‌های یکم تا پنجم قالب، به ترتیب، ۶۴، ۵۶، ۴۸، ۴۰ و ۳۵ است.

تنها شمار اندکی از درایه‌های ماتریس سختی وابسته به سختی بادبندها می‌باشند. آن گونه که آمد، این درایه‌ها وابسته به درجه‌های آزادی انتقالی هستند. از این رو، با اندازه‌گیری تغییر مکان‌های افقی سازه می‌توان طبقه‌های آسیب‌دیده را پیدا نمود. به کمک راه‌کار پیشنهادی سازه‌ی شکل (۱) واریسی



می‌گردد. نتیجه‌های به‌دست آمده از به‌کارگیری فن مزبور به همراه پاسخ‌های راستین مسأله در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.



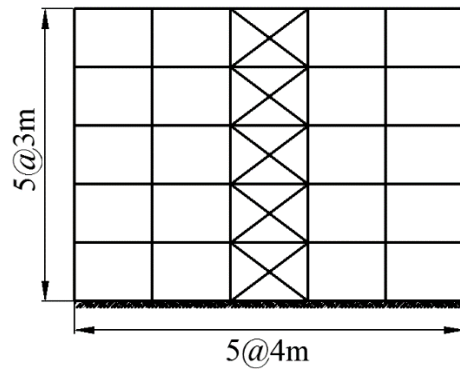
شکل ۲- قاب هشت طبقه با بادبندهای هفتی

به یاری فن آسیب‌یابی پیشنهادی طبقه‌های آسیب یافته سازه ارزیابی شدند. نتیجه‌های شیوه‌ی پیشنهادی نویسندگان در جدول (۲) می‌آیند.

جدول ۲- نتیجه‌های ارزیابی طبقه‌های قاب هشت طبقه با بادبندهای هفتی

ردیف	سختی جانبی طبقه‌های سازه				وضعیت طبقه‌های سازه
	سالم	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	
۱	۳۲۷۶۸	۳۲۷۶۸	۳۲۷۶۸	۳۲۷۶۸	سالم
۲	۳۲۷۶۸	۱۶۳۸۴	۱۶۳۸۴	۱۶۳۸۴	خراب
۳	۲۸۶۷۲	۱۴۳۳۶	۱۴۳۳۶	۱۴۳۳۶	خراب
۴	۲۸۶۷۲	۲۸۶۷۲	۲۸۶۷۲	۲۸۶۷۲	سالم
۵	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	سالم
۶	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	سالم
۷	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	سالم
۸	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	سالم

پیدااست، یکی از بادبندهای طبقه‌های دوم و سوم کارایی خود را از دست داده‌اند و بادبندهای طبقه‌های دیگر سالم هستند. همچنین، سختی جانبی هر طبقه به‌درستی حساب شده است. باید افزود، طبقه‌های خسارت‌دیده به‌درستی مشخص شده‌اند.



شکل ۱- قاب پنج طبقه با بادبندهای ضربدری

جدول ۱- پاسخ‌های ارزیابی طبقه‌های قاب پنج طبقه با بادبندهای ضربدری

ردیف	سختی جانبی طبقه‌های سازه				وضعیت طبقه‌های سازه
	سالم	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	
۱	۳۲۷۶۸	۱۶۳۸۴	۱۶۳۸۴	۱۶۳۸۴	خراب
۲	۲۸۶۷۲	۱۴۳۳۶	۱۴۳۳۶	۱۴۳۳۶	خراب
۳	۲۴۵۷۶	۲۴۵۷۶	۲۴۵۷۶	۲۴۵۷۶	سالم
۴	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	۲۰۴۸۰	سالم
۵	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	۱۷۹۲۰	سالم

آشکار است، روش پیشنهادی توانایی شناسایی طبقه‌های آسیب‌دیده‌ی سازه را دارد. جدول (۱) نشان می‌دهد که یکی از بادبندهای طبقه‌ی نخست و یکی از بادبندهای طبقه‌ی دوم خراب شده‌اند.

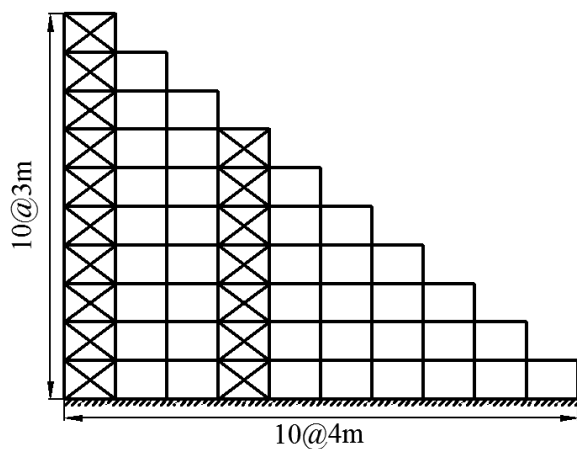
#### ۲-۷- قاب هشت طبقه

سازه‌ی این بخش هشت طبقه دارد و هندسه‌ی آن همانند شکل (۲) است. بادبندهای قاب هفتی شکل هستند که یکی از گونه‌های رایج بادبندها می‌باشند. این سازه صد و بیست و شش درجه‌ی آزادی دارد و شمار درجه‌های آزادی دورانی آن صد و یازده است. لنگرلختی ستون‌های چهار طبقه‌ی نخست سازه ۵۷۵۵۲ و لنگر لختی ستون‌های چهار طبقه‌ی دوم ۴۸۰۹۲ می‌باشد. تیرهای سازه لنگر لختی ۵۷۹۰ دارند. سطح مقطع بادبندهای طبقه‌های یکم و دوم ۶۴، سوم و چهارم ۵۶، پنجم و ششم ۴۰ و دو طبقه‌ی پایانی ۳۵ است.



### ۷-۳- قاب پلکانی ده طبقه

قاب‌های پلکانی از گونه‌های پرکاربرد ساختمانی می‌باشند. سازه‌ی این بخش ده طبقه و بادبندهای ضربدری دارد. شکل (۳) هندسه‌ی قاب پلکانی را نمایان می‌سازد. قاب مزبور صد و هشتاد و پنج درجه‌ی آزادی دارد که شمار درجه‌های آزادی دورانی آن صد و هفتاد و پنج می‌باشد. لنگر لختی ستون‌های سه طبقه‌ی نخست سازه ۸۸۲۸۱ و لنگر لختی ستون‌های سه طبقه‌ی دوم ۷۳۳۶۵، سه طبقه‌ی سوم ۵۷۱۵۳ و طبقه‌ی پایانی ۳۹۵۷۲ است. تیرهای سازه دارای لنگر لختی ۳۸۹۲ می‌باشند. سطح مقطع بادبندهای سه طبقه‌ی نخست ۹۶/۶، سه طبقه‌ی دوم ۸۴/۶، طبقه‌های هفت و هشت ۷۴/۸ و دو طبقه‌ی پایانی ۶۴/۴ است.



شکل ۳- قاب پلکانی ده طبقه با بادبندهای ضربدری

طبقه‌های سوم، ششم و دهم این سازه دارای بادبند خراب می‌باشند. به یاری رهیافت پیشنهادی سلامت سازه واری می‌گردد. جدول (۳) نتیجه‌های به‌دست آمده از پایش سازه را نشان می‌دهد.

آشکار است، روش نویسندگان به‌درستی طبقه‌های آسیب‌دیده‌ی سازه را شناسایی کرده است. همچنین، سختی جانبی هر طبقه ناشی از مهاربندها به‌درستی حساب شده‌اند.

### ۷-۴- قاب پلکانی ده طبقه

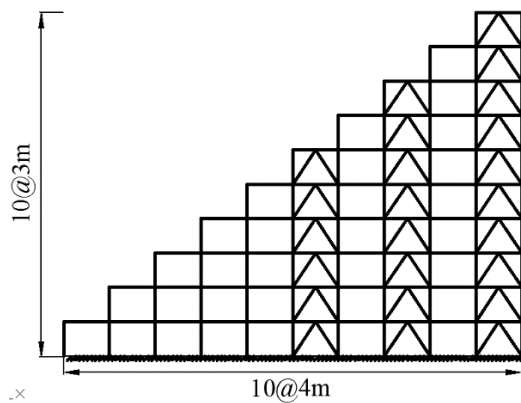
شکل (۴)، این سازه‌ی ده طبقه را نشان می‌دهد. قاب مزبور دویست و سی و سه درجه‌ی آزادی دارد که شمار درجه‌های آزادی دورانی آن صد و نود و نه می‌باشد. بادبندهای سازه هشتی شکل هستند. لنگر لختی ستون‌های سه طبقه‌ی نخست سازه ۸۸۲۸۱ و لنگر لختی ستون‌های سه طبقه‌ی دوم ۷۳۳۶۵، سه طبقه‌ی سوم ۵۷۱۵۳ و طبقه‌ی پایانی ۳۹۵۷۲ است. تیرهای سازه

### جدول ۳- پاسخ‌های ارزیابی طبقه‌های قاب پلکانی ده طبقه با

بادبندهای ضربدری

طبقه	سختی جانبی طبقه‌های سازه				وضعیت طبقه‌های سازه
	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	
۱	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	سالم
۲	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	سالم
۳	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۴۹۴۹۵	۴۹۴۹۵	خراب
۴	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	سالم
۵	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	سالم
۶	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۴۳۳۱۵	۴۳۳۱۵	خراب
۷	۷۶۵۹۵۰	۷۶۵۹۵۰	۷۶۵۹۵۰	۷۶۵۹۵۰	سالم
۸	۳۸۲۹۷	۳۸۲۹۷	۳۸۲۹۷	۳۸۲۹۷	سالم
۹	۳۲۹۷۲	۳۲۹۷۲	۳۲۹۷۲	۳۲۹۷۲	سالم
۱۰	۳۲۹۷۲	۳۲۹۷۲	۱۶۴۸۶	۱۶۴۸۶	خراب

دارای لنگر لختی ۳۸۹۲ می‌باشند. سطح مقطع بادبندهای چهار طبقه‌ی نخست ۹۶/۶، طبقه‌ی پنجم، ششم و هفتم ۸۴/۶ و سه طبقه‌ی پایانی ۷۴/۸ است.

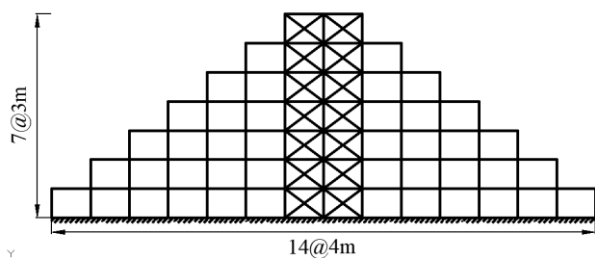


شکل ۴- قاب پلکانی ده طبقه با بادبندهای هشتی

پس از آسیب، شماری از بادبندهای هر یک از طبقه‌های سوم، ششم، نهم و دهم خراب شده است. نخست، تغییر مکان‌های انتقالی سازه مزبور حساب می‌گردند. سپس، سلامت طبقه‌های سازه به یاری روش پیشنهادی ارزیابی می‌شود. جدول (۴) نتیجه‌های این واری می‌دهد.

جدول ۴- پاسخ‌های ارزیابی طبقه‌های قاب پلکانی ده طبقه با

بادبندهای هشتی



شکل ۵- قاب هرمی هفت طبقه با بادبندهای ضربدری

جدول ۵- نتیجه‌های ارزیابی طبقه‌های قاب هرمی هفت طبقه با

بادبندهای ضربدری

طبقه	وضعیت طبقه‌های سازه		سختی جانبی طبقه‌های سازه		
	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	سالم
۱	خراب	خراب	۳۸۲۹۷	۳۸۲۹۷	۷۶۵۹۵
۲	خراب	خراب	۳۸۲۹۷	۳۸۲۹۷	۷۶۵۹۵
۳	خراب	خراب	۵۷۴۴۶	۵۷۴۴۶	۷۶۵۹۵
۴	سالم	سالم	۶۵۹۴۵	۶۵۹۴۵	۶۵۹۴۵
۵	سالم	سالم	۶۵۹۴۵	۶۵۹۴۵	۶۵۹۴۵
۶	سالم	سالم	۵۷۳۴۴	۵۷۳۴۴	۵۷۳۴۴
۷	سالم	سالم	۵۷۳۴۴	۵۷۳۴۴	۵۷۳۴۴

طبقه	سختی جانبی طبقه‌های سازه				وضعیت طبقه‌های سازه
	سالم	آسیب‌دیده (دقیق)	آسیب‌دیده (محاسباتی)	آسیب‌دیده (دقیق)	
۱	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	سالم
۲	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	سالم
۳	۱۴۸۳۷۷	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	۹۸۹۱۸	خراب
۴	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	۱۴۸۳۷۷	سالم
۵	۱۲۹۹۴۵	۱۲۹۹۴۵	۱۲۹۹۴۵	۱۲۹۹۴۵	سالم
۶	۱۲۹۹۴۵	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	خراب
۷	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	۸۶۶۳۰	سالم
۸	۷۶۵۹۵	۷۶۵۹۵	۷۶۵۹۵	۷۶۵۹۵	سالم
۹	۳۸۲۹۷۵	۱۹۱۴۸	۱۹۱۴۸	۱۹۱۴۸	خراب
۱۰	۳۸۲۹۷	۱۹۱۴۸	۱۹۱۴۸	۱۹۱۴۸	خراب

آشکار است، رهیافت پیشنهادی به درستی طبقه‌های خسارت‌دیده‌ی سازه را مشخص می‌کند. طبقه‌های سوم، ششم و دو طبقه‌ی پایانی که آسیب‌دیده‌اند به درستی شناسایی شدند. افزون بر این، سختی طبقه به سبب بادبندهای آن به‌درستی حساب می‌گردد.

۵-۷- قاب هرمی هفت طبقه

قاب‌های هرمی شکل از گونه‌های دیگر پرکاربرد قاب‌های ساختمانی می‌باشند. این سازه هفت طبقه است و شکل (۵) هندسه‌ی آن را نمایان می‌سازد. قاب مزبور بادبندهای ضربدری و صد و هشتاد و دو درجه‌ی آزادی دارد. شمار درجه‌های آزادی دورانی آن صد و هفتاد و پنج می‌باشد. لنگر لختی ستون‌های چهار طبقه‌ی نخست سازه ۸۸۲۸۱ و لنگر لختی ستون‌های سه طبقه‌ی دیگر ۷۳۳۶۵ است. تیرهای سازه دارای لنگر لختی ۳۸۹۲ می‌باشند. سطح مقطع بادبندهای سه طبقه‌ی نخست ۷/۴/۸، طبقه‌های چهارم و پنجم ۶/۴/۴ و دو طبقه‌ی دیگر ۵/۶ است. سه طبقه‌ی نخست این سازه آسیب‌دیده‌اند. به یاری راه‌کار پیشنهادی، طبقه‌های این سازه واری شده‌اند که نتیجه‌های به‌دست آمده از این بررسی در جدول (۵) می‌آیند.

آشکار است، طبقه‌هایی که شماری از بادبندهای آن‌ها خراب می‌باشند به‌درستی شناسایی گردیده‌اند. همچنین، سختی جانبی ناشی از بادبندهای آن‌ها به‌درستی برآورد شده است. طبقه‌های مزبور همان طبقه‌های یکم، دوم و سوم سازه هستند و سایر طبقه‌های سازه سالم می‌باشند. با واری دهانه‌های بادبندی طبقه‌های آسیب‌دیده بادبندهایی که کارایی خود را از دست داده‌اند شناسایی می‌شوند.

۸- نتیجه‌گیری

آشکار گردید، به یاری رهیافت پیشنهادی می‌توان طبقه‌های خسارت‌دیده در قاب‌های ساختمانی ساده را شناسایی نمود. افزون بر این، سختی جانبی هر طبقه حساب می‌شود. خاطر نشان می‌سازد، راه‌کار نویسندگان از برنامه‌ریزی خطی دودویی بهره می‌جوید. همچنین، فرآیند آسیب‌یابی دارای خطای صفر



- [15] Na, C., Kim, S.P. and Kwak, G.H. (2011), "Structural Damage Evaluation Using Genetic Algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 12, pp 2772-2783.
- [16] Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A. and Esfandiari, A. (2005), "A Structural Damage Detection Method Using Static Noisy Data", *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 12, pp. 1784-1793.
- [17] Sheena, Z., Unger, A. and Zalmanovich, A. (1982), "Theoretical Stiffness Matrix Correction by Static Test Results", *Israel Journal of Technology*, Vol. 20, pp. 245-253.
- [18] Sanayei, M. and Nelson, R.B. (1986), "Identification of Structural Element Stiffness from Incomplete Static Test Data", *Society of Automotive Engineering, Technical Paper*, SAE.
- [19] Sanayei, M. and Scampoli, S. (1991), "Structures Element Stiffness Identification from Static Test Data", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 5, pp. 1021-1036.
- [20] Sanayei, M. and Onipde, O. (1991), "Damage Assessment of Structures Using Static Test Data", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 7, pp. 1174-1179.
- [21] Sanayei M. and Salentik M.J. (1996), "Parameter Estimation of Structures from Static Strain Measurements I", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 555-562.
- [22] Sanayei M. and Onipde O. and Babu S.R. (1992), "Selection of Noisy Measurement Locations for Error Reduction in Static Parameter Identification", *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 9, pp. 2299-2308.
- [23] Sanayei, M. and Salentik, M.J. (1996), "Parameter Estimation of Structures From static Strain Measurements II: Error Sensitivity Analysis", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 563-572.
- [24] Sanayei, M., Imbaro, G.R. and McClain, A.S. (1997), "Structural Model Updating Using Experimental Static Measurements", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 792-798.
- [25] Hajela, P. and Soeiro, F.J. (1990), "Structural Damage Detection Based on Static and Modal analysis", *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 6, pp. 1110-1115.
- [26] Hajela, P. and Soeiro, F.J. (1990), "Recent Development in Damage Detection Based on System Identification Methods", *Structural Optimization*, Vol. 2, pp. 1-10.
- [27] Banan, M.R., Banan, M.R. and Hjelmstad, K.D. (1994), "Parameter Estimation of Structures from Static Response, I: Computational Aspects", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 11, pp 3243-3259.
- [28] Banan, M.R., Banan, M.R. and Hjelmstad, K.D. (1994), "Parameter Estimation of Structures From Static Response, II: Numerical Simulation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 11, pp. 3259-3283.
- [29] Hjelmstad, K.D. and Shin, S. (1997), "Damage Detection and Assessment from Static Response", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 6, pp. 568-576.
- [30] Liu, P.L. and Chian, C.C. (1997), "Parameter Identification of Truss Structures Using Static Strains", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 7, pp. 927-933.
- [۳۱] سالیانی، م. (۱۳۷۸)، "تخمین خسارت سازه‌های ایستای مستوی با روش اجزای محدود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ناپیوسته سازه، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [32] Chou, J.H. and Ghaboussi, J. (2001), "Genetic Algorithm in Structural Damage Detection", *Computers and Structures*, Vol. 79, No. 14, pp 1335-1353.
- [33] Shenton, III H.W. and Hu, X. (2006), "Damage Identification Based on Dead Load Redistribution: Methodology", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 8, pp. 1254-1263.

است. باید دانست، بادبندهای هر طبقه وابسته به درجه‌های آزادی مشابهی هستند. از این رو، اگر ویژگی‌های آن‌ها یکسان باشد اثر آن‌ها بر ماتریس سختی سازه همانند است. در نتیجه، راه‌کار پیشنهادی نمی‌تواند بادبندهای آسیب‌دیده‌ی هر طبقه را شناسایی کند و آن گونه که آمد، تنها طبقه‌ی خسارت دیده را شناسایی و سختی جانبی آن را حساب می‌کند. این ناتوانی به سبب چشم‌پوشی از تغییرشکل‌های محوری است که یک پدیده معمول می‌باشد.

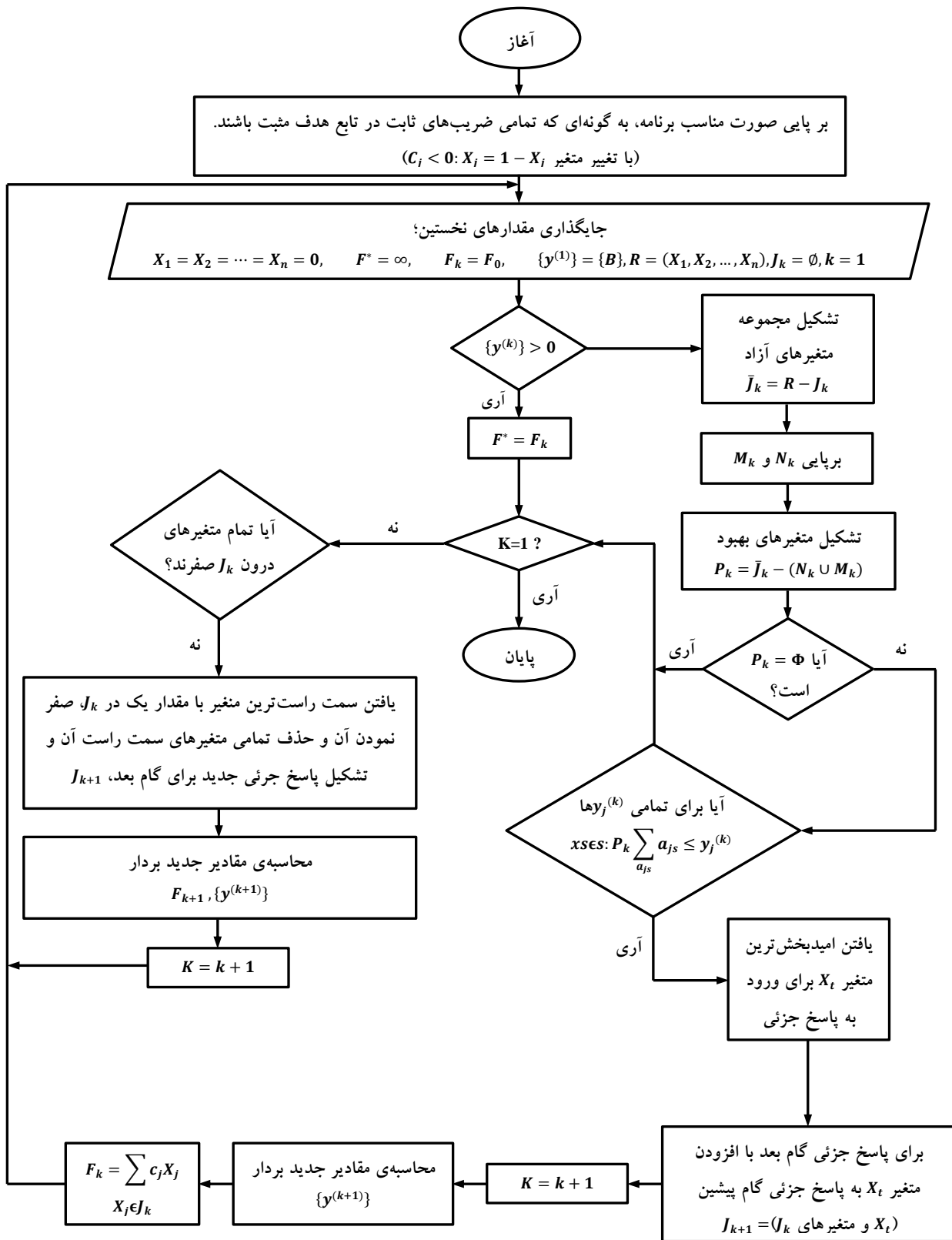
## ۹- مراجع

- [1] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Sheritz, D.W. (1996), "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.
- [2] Mottershead, J.E. and Friswell, M.I. (1993), "Model Updating in Structural Dynamics: A Survey", *Journal Sound and Vibration*, Vol. 167, No 2, pp. 347-375.
- [3] Salawu, O.S. (1997), "Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp. 718-723.
- [4] Roeck, G.D. (2003), "The State-of-the-Art of Damage Detection by Vibration Monitoring: the SIMCES Experience", *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 2, pp. 127-134.
- [5] Carden, E.P. and Fanning, P. (2004), "Vibration Based Condition Monitoring: A Review", *Structural Health Monitoring*, Vol. 3, No. 4, pp. 355-377.
- [6] Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y. and Yam, L.H. (2007), "Development in Vibration-Based Structural Damage Detection Technique", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2198-2111.
- [7] Friswell, M.I. (2007), "Damage Identification Using Inverse Methods", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, pp. 393-410.
- [8] Moslem, K. and Nafaspour, R. (2002), "Structural Damage Detection by Genetic Algorithms", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 7, pp. 1395-1401.
- [9] Escobar, J., Sosa, J.J. and Gomez, R. (2005), "Structural Damage Detection Using the Transformation Matrix", *Computers and Structures*, Vol. 83, pp. 357-368.
- [10] Chen, H.P. (2008), "Application of Regularization Methods to Damage Detection in Large Scale Plane Frame Structures Using Incomplete Noisy Modal Data", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 11, pp. 3219-3227.
- [11] Goldfed, Y. (2009), "A Direct Identification Procedure for Assessment of Stiffness Distribution", *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 5, pp. 1068-1076.
- [12] Ge, M. and Lui, E.M (2005), "Structural Damage Identification Using System Dynamic Properties", *Computers and Structures*, Vol. 83, No. 27, pp. 2185-2196.
- [13] Ge, M., Lui, E.M. and Khase, C. (2010), "Non-proportional Damage Identification in Steel Frames", *Engineering structure*, Vol. 32, No. 2, pp. 523-533.
- [14] Rodreguez, R., Escobar, J.A. and Gomez, R. (2009), "Damage Location and Assessment along Structural Elements Using Damage Submatrices", *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 2, pp. 475-486.



- [34] Kouchmeshki, B., Aquino, W., Bongard, J.C. and Lipson, H. (2007), "Co-Evolutionary Algorithm for Structural Damage Identification Using Minimal Physical Testing", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 69, No. 5, pp. 1085-1107.
- [35] Yang, Q.W. and Sun, B.X. (2010), "Structural Damage Localization and Quantification Using Static Test Data", *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 4, pp. 381-389.
- [۳۶] رضایی پزند، م. و آفتابی‌ثانی، ا. (۱۳۸۷)، "برآورد خسارت خراباها به روش سادک شبه‌دوگان"، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ویژه‌نامه مهندسی عمران، جلد ۱۹، شماره ۸، صفحه ۷۷-۸۷.
- [37] Hwan, B. and Jung, B.S. (1998), "Structural Damage Assessment with Combined Data of Static and Modal Tests", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 8, pp. 956-965.
- [38] Wang, X., Hu, N., Funkunaga, H. and Yao, Z.H., (2001) "Structural Damage Identification Using Static Test Data and Changes in Frequencies", *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 6, pp. 610-621.
- [۳۹] شهیدی‌پور، م.م.، ۱۳۷۴، بهینه‌سازی، دانشگاه فردوسی مشهد.





## پیوست ۲: گام‌های حل مسأله

- ۱- مشخصه‌های هندسی سازه، تغییرمکان‌های انتقالی سازه‌ی آسیب‌دیده و بردار بار، داده‌های مسأله می‌باشند.
- ۲- به یاری داده‌ها، ماتریس‌های پیوستگی عضوهای سازه و ماتریس  $T$  حساب می‌شوند.
- ۳- تابع هدف ناخطی تشکیل می‌گردد (رابطه‌ی (۱۵)).
- ۴- متغیرهای دودویی جایگزین می‌شوند و تابع هدف جدید (رابطه‌ی (۱۷)) به‌دست می‌آید.
- ۵- تابع هدف پیشین به تابعی خطی با متغیرهای دودویی تبدیل می‌گردد.
- ۶- به یاری فراروش سادک شبه‌دوگان تابع هدف دودویی خطی کمینه می‌شود.
- ۷- سختی جانبی ناشی از بادبندهای هر طبقه به‌دست می‌آید. طبقه‌هایی که کاهش سختی داشته‌اند شناسایی می‌گردند.

