

Optimal Sensor Placement for the Structure Health Monitoring of Bridge Structures Using Genetic Algorithm

Seyed Ali Razavian Amrei^{1*}, Amin Hajizadeh Amini²

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran

2- MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran

ABSTRACT

One of the challenges in the health monitoring of bridge structures is the "data" extraction from the structure. This is done by sensors in the structure. The layout and use of the fewest possible number of sensors, so as to provide the most needed data on structural status, has always been of interest. There are shortcomings in the methods used to determine the location of sensors in bridges, such as the use of one optimization indicator, determination of the number of sensors experimentally, high environmental noise, and a long calculation time. In order to overcome these shortcomings, a new MSE-MGA (Modal Strain Energy-Modified Genetic Algorithm) method is proposed in this study. In this method, two modal strain energy indices and modal contribution coefficient are used to reduce the noise effect of vehicles passing through. All the appropriate locations of the sensors are selected by these indices, and then the optimal number of sensors and their location are determined by using the genetic algorithm. The results show that increasing the number of sensors from a given optimal value has no effect on increasing the required data. Also, the simultaneous use of two optimization indices has resulted in the elimination of a large number of inappropriate points for sensor placement, resulting in a significantly reduced computational time. To investigate the performance and practical application of this method, a model of a steel bridge is modeled and the optimal number of sensors and their layout are determined.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 September 2019

Revise Date: 26 April 2020

Accept Date: 02 May 2020

Keywords:

Optimal sensor placement;
Structure health;
Bridge;
Genetic algorithm;
MSE-MGA.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.201830.1948

*Corresponding author: Seyed Ali Razavian Amrei
Email address: razavian@pnu.ac.ir

جانمایی بهینه حسگرها جهت پایش سلامت سازه‌ی پل‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سید علی رضویان امرئی^{۱*}، امین حاجی‌زاده امینی^۲

۱- استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

یکی از چالش‌هایی که در بحث پایش سلامت سازه‌ی پل‌ها وجود دارد، استخراج «داده» از سازه می‌باشد. این کار توسط حسگرهای موجود در سازه انجام می‌شود. نحوه‌ی چیدمان و استفاده از حداقل تعداد ممکن حسگرها، به‌نحوی که بیشترین داده‌های مورد نیاز از وضعیت سازه را در اختیار قرار دهد، همواره مورد توجه بوده است. در روش‌های موجود برای تعیین محل قرارگیری حسگرها در پل‌ها کاستی‌هایی وجود دارد که می‌توان به استفاده از یک شاخص بهینه‌ساز، تعیین تعداد حسگرها به‌صورت تجربی، نویز محیطی بالا و مدت زمان طولانی محاسبات اشاره کرد. برای غلبه بر این کاستی‌ها، در این مطالعه روش جدید *MSE-MGA* (انرژی کرنشی مودال-الگوریتم ژنتیک بهبودیافته) ارائه گردید. در این روش جهت کاهش اثر نویز حاصل از عبور وسایل نقلیه، از دو شاخص انرژی کرنشی مودال و ضریب مشارکت مودی استفاده شده است. کلیه نقاط مناسب محل قرارگیری حسگرها توسط این شاخص‌ها انتخاب شده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعداد بهینه‌ی حسگرها و محل قرارگیری آن‌ها مشخص گردید. نتایج نشان داد افزایش تعداد حسگرها از یک مقدار بهینه‌ی مشخص، تأثیری در افزایش داده‌های مورد نیاز ندارد. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از دو شاخص بهینه‌ساز منجر به حذف تعداد زیادی از نقاط نامناسب برای قرارگیری حسگرها شده است و به همین دلیل زمان محاسبات بطور قابل توجهی کاهش یافته است. برای بررسی نحوه‌ی عملکرد و کاربرد عملی این روش، یک نمونه پل فلزی مدل شد و تعداد بهینه‌ی حسگرها و نحوه‌ی چیدمان آن‌ها مشخص گردید.

کلمات کلیدی: جانمایی بهینه حسگر، سلامت سازه، پل، الگوریتم ژنتیک، *MSE-MGA*

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2020.201830.1948	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.201830.1948	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۳	۱۳۹۹/۰۲/۱۳	۱۳۹۹/۰۲/۰۷	۱۳۹۸/۰۶/۲۵
			سید علی رضویان امرئی razavian@pnu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه با توسعه‌ی تکنولوژی‌های ساخت‌وساز، سازه‌های مقیاس بزرگ مانند پل‌های معلق، برج‌های مخابراتی، اسکله‌ها، بنادر و آسمان‌خراش‌های بیشتری در حال احداث هستند. این زیرساخت‌ها همواره در معرض تهدید طوفان، باران‌های شدید، زلزله، انفجار و دیگر عوامل مخرب احتمالی هستند. روش‌های سنتی بازرسی مشاهده‌ای (چشمی) معمولاً قادر به تشخیص ترک‌ها و آسیب‌های جزئی نیستند. به همین دلیل بحث پایش سلامت سازه^۱ به تحقیقی مهم برای مهندسان تبدیل شده است. با پایش وضعیت نیروهای سازه به صورت در لحظه^۲، می‌توان پاسخ‌های غیرمعمول سازه را شناسایی نمود و آسیب‌های احتمالی را پیش از پیشروی شناسایی کرد. یک سیستم پایش سلامت سازه‌ای به‌طور معمول از سه بخش اصلی سیستم حسگر، سیستم انتقال و پردازش داده و سیستم ارزیابی وضعیت تشکیل می‌گردد. بخش حسگر، یکی از بخش‌های اساسی سیستم پایش سلامت سازه می‌باشد. تعیین بسیاری از متغیرهای مورد نیاز، تشخیص آسیب و ارزیابی وضعیت سازه همگی بر پایه‌ی داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها استوار هستند. عموماً با افزایش تعداد حسگرها، می‌توان اطلاعات بیشتری از سازه بدست آورد. از طرفی هزینه‌های تامین و نگهداری حسگرها و انتقال و پردازش داده‌ها از مسائل پیش‌رو بوده است. بنابراین تعداد حسگرهایی که می‌توان در هر پروژه بکار گرفت، همواره بسیار کمتر از مکان‌های قابل جاگذاری است. در روش‌های سنتی تعیین محل حسگرها براساس تجربه صورت می‌گیرد. اگرچه این روش‌ها برای سازه‌های کوچک و ساده امکان‌پذیر است ولی برای سازه‌های بزرگ و نیز سازه‌هایی که مشخصه‌های فیزیکی و ساختاری پیچیده‌ای دارند، امکان‌پذیر نیست. بنابراین بهینه‌سازی چیدمان و تعداد حسگرها، به نحوی که بهترین و بیشترین داده‌های مورد نیاز از وضعیت سازه را در اختیار قرار دهد مورد توجه است.

پل‌های جاده‌ای و ریلی بخش مهمی از زیرساخت‌های حمل‌ونقل را تشکیل می‌دهند. پل‌ها یک سرمایه‌ی کلان اجتماعی و اقتصادی را نشان می‌دهند که سالانه بخش هنگفتی از هزینه‌های مدیریت زیرساخت‌ها، صرف بازرسی و نگهداری آن‌ها می‌شود. معمولاً پل‌ها، گلوگاه‌ها را در سیستم حمل‌ونقل تشکیل می‌دهند که مسیرهای جایگزین کمی برای آن‌ها وجود دارد، بنابراین بسته شدن آن‌ها برای تعمیر یا بازرسی هزینه‌های زیادی را متوجه استفاده‌کنندگان می‌کند. علاوه بر این، انتظار می‌رود سطح ایمنی پل‌ها از سایر بخش‌های حمل‌ونقل بالاتر باشد، زیرا خرابی و شکست یک پل عواقب شدید و جبران‌ناپذیری را در پی دارد. از طرفی هزینه‌ی لازم برای بازسازی آن‌ها به مراتب بیشتر از هزینه‌ی ساخت خواهد بود.

بر اساس آمارهای سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای کشور تا پایان سال ۹۶ بیش از ۳۶۴ هزار پل در کشور ساخته شده است که از این تعداد حدود ۶۸۷۲ پل با دهانه‌های بالای ۱۰ متر و ۹۴۲ پل با دهانه‌های بالای ۳۰ متر هستند که بیشتر آن‌ها عمر متوسطی بیش از ۳۰ سال دارند [۱]. مشکل عمده‌ای که ادارات ترابری با آن مواجه هستند، این است که هزینه نگهداری و تعمیر پل‌ها، بیش از بودجه تخصیص داده‌شده به آن‌ها است. از طرفی، با گذشت زمان استفاده از پل‌ها بیشتر شده، ترافیک به شکل سنگین‌تر و سریع‌تر افزایش یافته و در نتیجه هزینه‌های مقاوم‌سازی و نگهداری بالا می‌رود که این روند افزایشی ادامه دارد. از سوی دیگر هر ساله هزینه‌های ملزومات پایش سلامت سازه مانند حسگرها، سیستم‌های رایانه‌ای و شبکه‌ای کاهش می‌یابند، در حالی که قابلیت‌های سیستم‌های پایش سلامت سازه به کمک الگوریتم‌ها و حسگرهای جدید بهبود می‌یابند. کاهش هزینه‌های روزافزون بازرسی و تعمیر، کاهش هزینه‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری و افزایش قابلیت اطمینان سازه‌ها با استفاده از داده‌های در لحظه‌ی پایش شده‌ی پل‌ها، امکان‌پذیر است. با توجه به این موارد، پایش سلامت سازه‌ها در حال فراگیر شدن هستند. پایش سلامت سازه یک پل می‌تواند هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم نگهداری آن را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و هشدارهای اولیه را در صورت بروز مشکلات احتمالی صادر کند.

^۱ Structure Health Monitoring (SHM)

^۲ Real-time Monitoring

در سال‌های اخیر، توجه به بحث پایش سلامت سازه‌ها در کشور مورد استقبال مهندسين قرار گرفته است. گرچه هنوز استفاده از این سیستم به صورت محدود در کشور انجام می‌گیرد ولی با توجه به شناختی که نسبت به اهمیت موضوع ایجاد شده است، پژوهش‌های بیشتری در حال انجام است. تلیسچی‌آذر و بدری برای پایش سلامت سازه‌های پل کابلی تبریز از فرکانس‌های طبیعی سازه استفاده کردند [۲]. درویش برای چیدمان بهینه‌ی حسگرها در مدل‌های سازه‌ای، از تعیین فرکانس‌های تجربی سازه استفاده کرد [۳]. محمدی و کارگر برای تشخیص موقعیت و مقدار آسیب وارده به سازه، از روش بر پایه اطلاعات مودال و الگوریتم جستجوی ذرات باردار برای تشخیص آسیب در پل‌های فولادی بهره گرفتند و نشان دادند روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری دارای سرعت بالایی در همگرایی است [۴]. بخشی و وزیرزاده پایش سلامت سازه‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی را مطرح کردند و نشان دادند داده‌های لازم برای آموزش شبکه‌ی عصبی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند [۵]. جهان و همکاران پایش سلامت سازه‌های پل‌های فولادی براساس اطلاعات مودال را ارائه کردند [۶]. نکته‌ای که در تحقیقات انجام‌شده در کشور چندان موردتوجه قرار نگرفته، این است که جهت حصول نتیجه مناسب، استفاده از تنها یک شاخص بهینه‌ساز کافی نبوده و در نظر گرفتن شاخص‌های متعدد با توجه به نوع سازه، ضروری است. تحقیقات مفصل‌تری توسط پژوهشگران دیگر کشورها در زمینه‌ی پایش سلامت سازه‌ها و سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ها صورت گرفته و الگوریتم‌ها، توابع اندازه‌گیری و توابع هدف مختلفی ارائه شده است. کرامر نشان داد که محل بهینه حسگر، با به حداقل رساندن نرُم ماتریس اطلاع فیشر که از ماتریس‌های کوواریانس و مودال به دست می‌آید، تعیین می‌گردد [۷]. روش ارائه‌شده توسط کرامر پایه‌گذار بسیاری از تحقیقات بعدی بود. پس از آن کارن و دورمان یک روش معروف به نام Min MAC را توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند اساسی‌ترین اصل جهت مشخص کردن مودهای اندازه‌گیری شده‌ی سازه این است که بردارهای مودی اندازه‌گیری شده باید تا حد امکان، مستقل خطی باشند. به همین منظور کارن، شاخص تضمین مودال (MAC) را به‌عنوان یک ثابت اسکالر ایده آل مرتبط به نسبت بین دو بردار مودال در نظر گرفت و از کمینه کردن عبارات غیر قطری در ماتریس MAC، به‌عنوان یک شاخص سنجش برای چیدمان شبکه حسگرها استفاده کرد [۸]. به‌کارگیری شاخص MAC جهت جاگذاری حسگرها این اطمینان را می‌دهد که همپوشانی حسگرها در نقاط مختلف سازه حداقل ممکن است.

روش‌های ارائه‌شده در زمینه‌ی پایش سلامت سازه‌ها پیشرفت بزرگی به شمار می‌رود، اما هنوز کاستی‌هایی وجود دارد؛ اولاً چیدمان مناسب برای یک سازه‌ی واقعی نیازمند شاخص‌های ارزیابی متعددی است که باید به‌صورت هم‌زمان در مقدار بهینه خود قرار داشته باشند. به‌عنوان مثال، در سازه‌های پل، به دلیل باد و باران شدید، نویز سیگنال حسگر اغلب مقدار بسیار بزرگی است. بنابراین بهبود نسبت سیگنال به نویز داده‌های جمع‌آوری‌شده، ضروری است. یک چیدمان بهینه از حسگرها در سازه‌های پل، هر دو شاخص انرژی مودال بالا و شاخص مناسب MAC را به‌طور هم‌زمان نیاز دارد. شاخص انرژی مودال بالا می‌تواند این اطمینان را بدهد که داده‌های اندازه‌گیری شده، نسبت سیگنال به نویز بالایی دارند و از دقت زیادی برخوردار هستند. شاخص مناسب MAC نیز می‌تواند تعامد بردارهای مودال اندازه‌گیری شده را تضمین کند و نیز مقدار اطلاعات مودال به‌دست‌آمده از داده‌های جمع‌آوری‌شده را افزایش دهد. با این وجود، بیشتر روش‌های مرسوم چیدمان بهینه حسگرها، بدون اصلاحات موردنیاز نمی‌توانند در سازه‌های واقعی پل‌ها استفاده شوند. ثانیاً ماتریس شکل مودی، از همه‌ی آرایش‌های مودها تشکیل شده و این مودها را می‌توان به‌سادگی از طریق تحلیل مودال به دست آورد. با توجه به این نکته و نیز به‌منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، تنها مودهایی که پاسخ دینامیکی بزرگی دارند، برای ایجاد ماتریس شکل مودی انتخاب می‌شوند. چگونگی انتخاب ترتیب مودها یک مسئله‌ی مهم است. در روش‌های مرسوم، ترتیب مودها بر اساس تجربه انتخاب می‌گردد. بی و همکاران نشان دادند که انتخاب ترتیب مود تأثیر زیادی در نتیجه‌ی چیدمان نهایی حسگرها دارد [۹]. بنابراین انتخاب تجربی، غیردقیق و سلیقه‌ای است. از طرفی با توجه به شکل، اندازه و ویژگی‌های دینامیکی خاص مربوط به هر سازه، به دست آوردن تعداد حسگرها به‌صورت تجربی، بسیار مشکل و غیرقابل اطمینان است. نکته‌ی دیگری که بایستی به آن توجه کرد این است که در روش‌های مرسوم به دلیل

پردازش کلیه گره‌های تعریف شده در مدل سازی سازه‌ای و عدم حذف نقاطی که صلاحیت کمتری برای جاگذاری حسگرها دارند، مدت زمان محاسبات بخصوص در سازه‌های بزرگ، بسیار بیشتر است.

۲- شاخص‌های بهینه‌سازی

به دلیل وجود حجم زیادی از اطلاعات اضافی، همه‌ی درجات آزادی یک سازه مورد نیاز نیستند. بحث جاگذاری بهینه حسگرها به دنبال این مطلب است که چه تعداد و کدام یک از درجات آزادی برای نصب حسگرها باید انتخاب شوند. در واقع به وسیله‌ی شاخص‌های بهینه‌ساز، حذف درجات آزادی تا جایی که ممکن است ادامه پیدا کرده و داده‌های مناسب برای توصیف رفتار سازه با دقت کافی، حاصل می‌گردد.

۲-۱- شاخص MAC^3

شاخص MAC یا همان معیار تضمین مودال، با هدف تعیین پارامترهای مودال، ارتباط بین روش‌های تحلیلی و اشکال آزمون یکی از ضروری‌ترین شاخص‌ها است با این پیش شرط که کدام روش در تشخیص یک بردار شکل از دیگری آسان‌تر و مناسب‌تر است. MAC یک ارزیابی کاربردی برای ارتباط بین شکل‌های مودی را فراهم می‌کند و به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$MAC_{ij} = \frac{(\varphi_i^T \varphi_j)^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \quad (1)$$

که در آن φ_i و φ_j ، ستون نام و زام از ماتریس شکل مودی است. MAC_{ij} کسینوس زاویه بین دو بردار را نشان می‌دهد. مقادیر کمتر کسینوس بیانگر تمایز بیشتر از بردارهای شکل مودی است بنابراین با به حداقل رساندن عبارات غیرقطری ماتریس MAC ، مجموعه‌ای از بردارهای با ارتباط مناسب، مشخص می‌شود.

مقدار MAC می‌تواند به‌عنوان اندازه‌ی تشابه دو شکل مود سنجیده شود. مقدار MAC برابر با ۱ تطبیق کامل بردارهای مودی را نشان می‌دهد و مقدار صفر به معنی این است که آن‌ها کاملاً ناهمسان هستند. با توجه به موفقیت‌های استفاده از این شاخص، مدل‌های متعدد دیگری از آن توسعه داده شده‌اند [۱۰].

۲-۲- شاخص MSE^4

انرژی مودال یک مشخصه‌ی مهم از سازه است. در سال ۱۹۸۸، چن و گاربا انرژی کرنشی را به‌عنوان یک شاخص مهم در شناسایی رفتار سازه معرفی کردند [۱۱]. ماتریس انرژی کرنشی مودال سازه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSE = \varphi^T K \varphi \quad (2)$$

که در آن φ ، ماتریس مودال و k ماتریس سختی سازه است.

بنابراین انتخاب درجات آزادی که مقادیر انرژی بزرگ‌تری دارند، برای ارزیابی وضعیت و شناسایی آسیب سازه ضروری است. شاخص انرژی مودال، درجات آزادی با انرژی بیشتر را به‌عنوان محل حسگر انتخاب می‌کند. در نتیجه این شاخص برای سازه‌ی پل‌ها که داده‌های به‌دست آمده عمدتاً توسط محیط دارای نویز تحت تأثیر قرار می‌گیرند، مناسب است.

³ Modal Assurance Criteria

⁴ Modal Strain Energy (MSE)

۳- تئوری پایه و استراتژی روش MSE-MGA

مسئله‌ی چیدمان بهینه حسگرها فرض می‌کند که n محل ممکن برای قرارگیری حسگرها وجود دارد و تعداد S حسگر باید در سازه کار گذاشته شود. پس می‌توان مدل ریاضی چیدمان بهینه حسگرها را به‌عنوان معادله‌ی بهینه‌سازی به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\text{Max } f(n_1, n_2, \dots, n_s) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \dots n_1, n_2, \dots, n_s \in N \quad (4)$$

که در آن f ، تابع هدف است که توسط شاخص‌های ارزیابی انتخاب‌شده، تعیین می‌شود.

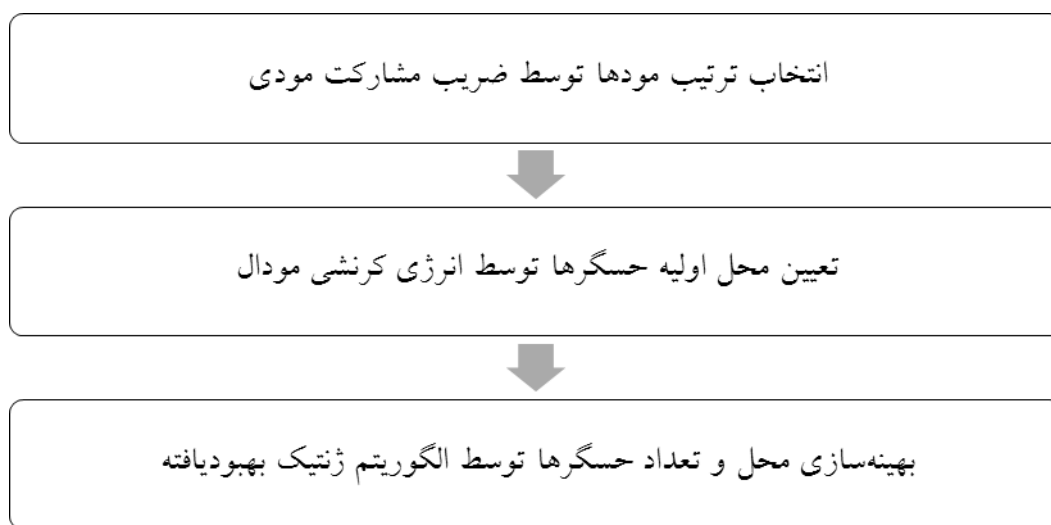
در این بخش روش MSE-MGA که یک رویکرد جدید برای چیدمان بهینه حسگرها است معرفی گردیده و راه‌حلی برای مشکلات روش‌های پیشین ارائه گردید. این روش شامل سه استراتژی برای حل مسئله است:

اول، ترتیب مناسب مودها با استفاده از ضریب مشارکت مودی^۵ که بر پایه‌ی تحلیل مودال استوار است، انتخاب می‌گردند.

دوم، چیدمان اولیه محل حسگرها با استفاده روش انرژی کرنشی مودال صورت می‌گیرد.

سوم، تعداد و محل بهینه‌ی حسگر توسط الگوریتم ژنتیک بهبودیافته^۶ MGA تعیین می‌شود.

مراحل اصلی روش MSE-MGA در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: مراحل روش MSE-MGA.

۳-۱- انتخاب مودها

انتخاب‌های متفاوت برای ترتیب مودها، نتایج مختلفی برای چیدمان نهایی در پی خواهد داشت. با توجه به نیاز و ماهیت چیدمان بهینه حسگرها، مودهایی که پاسخ دینامیکی قوی‌تری داشته باشند بایستی انتخاب شوند. با این حال، در روش‌های مرسوم ترتیب مودها براساس تجربه انتخاب می‌شوند. برای حل این مشکل، انرژی کرنشی مودال به‌عنوان شاخص ارزیابی جهت انتخاب مودها معرفی گردید.

ضریب مشارکت مودی با جرم نرمالیزه شده به‌صورت زیر تعریف گردیده است:

⁵ Modal Participation Factor (MPF)

⁶ Modified Genetic Algorithm (MGA)

$$\varphi_{ir} = \varphi_i^T M D_r \quad (5)$$

که در آن، φ_{ir} ضریب مشارکت مودی مود i ام در جهت r ، M ماتریس جرم سازه و D_r برداری است که تحریک در جهت r را نشان داده و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$D_r^T = T \cdot E_r \quad (6)$$

E_r بردار یکه در جهت r و T ماتریس ثابتی است که رابطه‌ی بین نقاط تحریک و مرجع را نشان می‌دهد.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z - Z_0 & Y_0 - Y \\ 0 & 1 & 0 & Z_0 - Z & 0 & X - X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Y - Y_0 & X_0 - X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن Z_0 و Y_0 ، X_0 مختصات کارترین عمومی نقاط مرجع و Z و Y ، X مختصات کارترین نقاط تحریک هستند.

ضریب مشارکت مودی، دامنه‌ی پاسخ دینامیکی همه مودها را نشان می‌دهد. بنابراین باید مودهایی که مقدار ضریب مشارکت مودی بزرگ‌تری دارند، انتخاب شوند. اگرچه می‌توان همه مودها را بر اساس ضریب مشارکت مودی آن‌ها ترتیب بندی کرد، اما هنوز یک سؤال وجود دارد و آن اینکه چه تعداد از مودها باید انتخاب شوند؟ نسبت جرم مشارکت مودی به‌عنوان شاخص تعیین تعداد مودها ارائه می‌شود.

جرم مشارکت مودی مود i ام را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$r_i = \frac{M_{pi}}{D^T M D} \quad (8)$$

که در آن M_{pi} جرم مشارکت مودی مود i ام است.

ویلسون پیشنهاد کرد که جمع درصد جرم مشارکت مودی برای موده‌ای انتخاب‌شده بایستی بیشتر از ۹۰٪ باشد [۱۲]. در این مطالعه نیز برای تعیین تعداد مودها از همین شاخص استفاده شده است.

۳-۲- چیدمان اولیه حسگرها با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال

در روش انرژی کرنشی مودال، محل‌هایی که دامنه‌ی پاسخ بزرگ‌تری دارند انتخاب می‌شوند. این کار توسط مقایسه‌ی انرژی کرنشی مودال همه‌ی درجات آزادی صورت می‌گیرد. انرژی کرنشی مودال همه‌ی درجات آزادی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$MSE_i = \varphi_i^T [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n] \varphi_i = \sum_{j=1}^n \varphi_i^T k_j \varphi_{ji} \quad (9)$$

$$MSE_{ji} = \varphi_i^T k_j \varphi_{ji} \quad (10)$$

که در آن MSE_{ji} ، انرژی کرنشی مودال درجه‌ی آزادی j ام در مود i ام است.

ایده‌ی اصلی جاگذاری اولیه حسگرها، انتخاب درجه آزادی‌های دارای انرژی کرنشی مودال بزرگ‌تر، به‌عنوان کاندید محل حسگرها است. در نتیجه، این بخش تضمین می‌کند که محل نهایی حسگرها دارای انرژی بیشتری هستند و فضای جستجوی محل‌های بهینه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

۳-۳- الگوریتم ژنتیک

روش‌های کلاسیک ریاضیات دارای دو اشکال اساسی هستند. اغلب این روش‌ها فقط بهینه محلی^۷ را به‌عنوان نقطه‌ی بهینه‌ی کلی در نظر می‌گیرند و نیز هر یک از این روش‌ها اغلب منجر به یک فرمول یا دستورالعمل خاص برای حل هر مسئله می‌شوند. در حالی که روش‌های جستجوی هوشمند دستورالعمل‌هایی هستند که به‌صورت کلی می‌توانند در حل هر مسئله‌ای بکار گرفته شوند. یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله، مجموعه‌ی بسیار بزرگی از جواب‌های ممکن را تولید می‌کند. هر یک از این جواب‌ها با استفاده از یک تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از عملگرهای^۸ تکامل ژنتیکی، جواب‌های جدید تولید می‌شوند. این جواب‌ها توسط تابع تناسب با یکدیگر سنجیده می‌شوند و بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می‌کند که به راه‌حل مطلوب‌تر برسد. الگوریتم ژنتیک به‌طور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. این تکرار زمانی خاتمه می‌یابد که تابع تناسب یا یکی از شرایط تعیین‌شده به مقدار موردنظر برسد.

الگوریتم ژنتیک در هر مرحله، برای ایجاد نسل بعد (مجموعه نقاط منتخب قرارگیری حسگرها) از جمعیت فعلی، از سه عملگر تکاملی استفاده می‌کند:

- ۱- عملگر انتخاب^۹، جواب‌های منفرد که به آن‌ها والدین گفته می‌شود را انتخاب می‌کند.
- ۲- عملگر ترکیب^{۱۰}، ویژگی‌های والدین را با یکدیگر ترکیب می‌کند تا فرزند آن‌ها را که عضو نسل بعد خواهد بود، تشکیل دهند.
- ۳- عملگر جهش^{۱۱}، به‌صورت تصادفی تغییراتی را بر روی یکی از والدین (و یا هر دو آن‌ها) اعمال می‌کند تا فرزندان نسل بعد را تشکیل دهند.

برخلاف سیستم‌های هوش مصنوعی قدیمی‌تر، الگوریتم ژنتیک با تغییر اندک مقادیر ورودی و یا با وجود مقادیر قابل توجهی از نویز در سیستم به راحتی قطع نمی‌شود. علاوه بر این، در جستجوی یک فضای حالت بزرگ، فضای چندمنظوره^{۱۲} و یا یک رویه چندبعدی، استفاده از الگوریتم ژنتیک مزیت‌های بسیار بیشتری نسبت به روش‌های جستجوی متداول در سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی، جستجوی تصادفی، روش جستجوی عمق اول^{۱۳} و یا روش جستجوی اول سطح^{۱۴} دارد. در حالت کلی از مزایای الگوریتم ژنتیک در مقایسه با دیگر روش‌های جستجو می‌توان به این موارد اشاره نمود:

- ۱- ماهیت جستجوی تصادفی این الگوریتم در فضای مسئله، به‌نوعی یک جستجوی موازی محسوب می‌شود. زیرا هر کدام از جواب‌های تصادفی تولیدشده به‌وسیله الگوریتم، یک نقطه شروع جدید برای جستجوی بخشی از فضای حالت مسئله به‌حساب آمده و جستجو در تمام آن‌ها به شکل هم‌زمان صورت می‌گیرد.
- ۲- به دلیل وسعت و پراکندگی نقاطی که مورد جستجو قرار می‌گیرند، در مسائلی که فضای جستجوی بزرگی داشته باشند نتیجه مطلوبی کسب می‌کند.

⁷ Local optima

⁸ Operator

⁹ Selection

¹⁰ Crossover

¹¹ Mutation

¹² Multimodal

¹³ Depth-First Search (DFS)

¹⁴ Breadth-First Search (BFS)

- ۳- نوعی جستجوی تصادفی هدفمند محسوب شده و از مسیرهای مختلف به جواب‌های متفاوتی خواهد رسید. علاوه بر آن، با هیچ محدودیتی در مسیر جستجو و انتخاب پاسخ‌های تصادفی روبرو نیست.
- ۴- به دلیل انتخاب بهترین‌ها از میان جمعیت (مجموعه جواب)، با احتمال بالایی به نقطه بهینه‌ی سراسری دست پیدا خواهد کرد.
- ۵- به دلیل وجود عملگر جهش، احتمال به تله افتادن الگوریتم‌های ژنتیک در کمینه‌های محلی، بسیار کمتر از سایر روش‌ها است.
- ۶- پیاده‌سازی آن نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر بوده و نیازی به روال‌های پیچیده حل مسئله ندارد.
- ۳-۳-۱- جهش هدفمند

در روش‌های معمول الگوریتم ژنتیک، جستجو با عملگرهای ترکیب و جهش در جهت پیدا کردن کمینه تابع تا رسیدن به مقدار موردنظر ادامه پیدا می‌کند. این امکان وجود دارد که نتیجه نهایی شامل دو یا چند حسگر در یک محل باشد. برای جلوگیری از بروز این مشکل روند الگوریتم طوری طراحی می‌شود که در صورت قرارگیری دو حسگر در یک محل عمل جهش صورت گیرد تا هم از قرارگیری چند حسگر در یک محل جلوگیری شده و هم مانع به تله افتادن الگوریتم در کمینه‌ی محلی شود.

۳-۴- تابع تناسب، تعداد و محل بهینه‌ی حسگرها

مقایسه صلاحیت نقاط انتخاب‌شده توسط الگوریتم ژنتیک، به وسیله‌ی تابع تناسب (f) انجام می‌شود. ابتدا مجموعه نقاطی (گره‌ها) که انرژی کرنشی کمتری دارند حذف شده و سایر نقاط دارای انرژی کرنشی بالاتر به‌عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شوند. در صورتی که n عدد حسگر برای سازه نیاز باشد الگوریتم موردنظر، n نقطه را به‌صورت تصادفی از بین همگی نقاط به‌عنوان جواب انتخاب کرده و ماتریس MAC را بر اساس نقاط انتخابی تشکیل می‌دهد.

تابع تناسب (f) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = 1 - RMS; \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n MAC_{ij}^2}{n^2 - n}} \quad . i \neq j \quad (11)$$

که در آن RMS^{15} جذر متوسط مربع (مقدار مؤثر) اعضای غیرقطری ماتریس MAC است.

اعضای غیرقطری در ماتریس MAC ارتباط بین دو بردار مودال را بیان می‌کنند. در صورتی که $MAC_{ij}=0$ باشد، دو بردار مودال متعامد هستند که تلاش الگوریتم نیز برای پیدا کردن کوچک‌ترین مقدار RMS است.

پس از تشکیل ماتریس MAC، مقدار تابع تناسب از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود. زمانی که مقدار تابع تناسب برابر ۱ باشد یعنی کلیه بردارهای انتخابی مستقل از یکدیگر هستند. در ادامه، الگوریتم با استفاده از عملگرهای خود نقاط دیگری را به‌عنوان جواب تولید می‌کند و با مقایسه مقادیر تابع تناسب مجموعه جواب‌های تولیدشده و انتخاب نقاط مناسب‌تر به سمت نسل‌های بهتر (دارای مقدار تابع تناسب بزرگ‌تر)، تکامل می‌یابد. این تکامل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تابع تناسب، به مقدار موردنظر برسد (برابر عدد ۱) و یا تغییرات آن در نسل‌های بعدی ناچیز باشد. در نهایت خروجی الگوریتم ژنتیک، محل‌های حسگرها (شماره گره‌ها) و مقدار تابع تناسب را نشان می‌دهد.

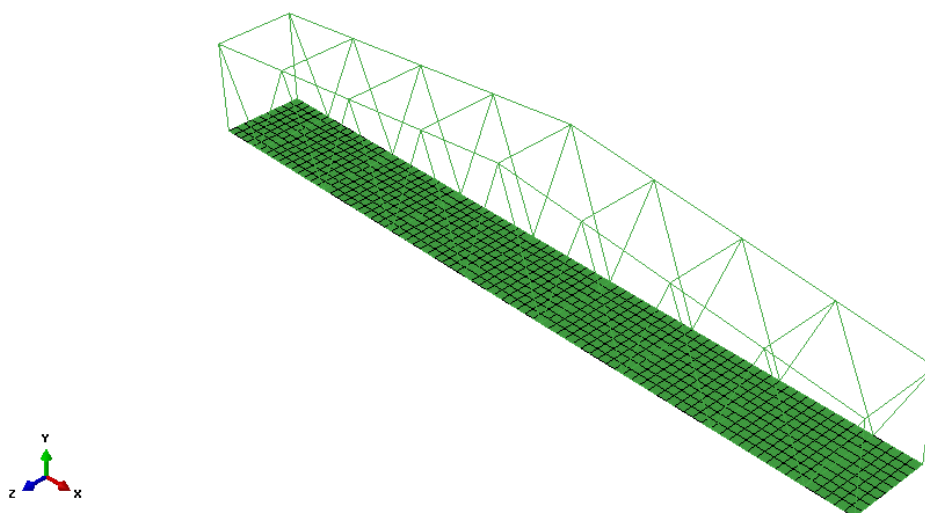
تعیین تعداد حسگرهای موردنیاز عملاً به‌صورت تجربی دارای خطای زیادی است. دقیق‌ترین روش برای تعیین تعداد حسگرها، مقایسه‌ی مقدار تابع تناسب به ازای تعداد حسگرهای مختلف است. به همین منظور برنامه‌ی تهیه‌شده در نرم‌افزار متلب، طوری طراحی

¹⁵ Root mean square

شده است که مقدار تابع تناسب به ازای تعداد حسگرهای مختلف را محاسبه کند. با مقایسه مقادیر توابع تناسب به ازای تعداد حسگرهای مختلف، تعداد بهینه‌ی حسگرها انتخاب می‌شود.

۴- معرفی مدل

برای بررسی نحوه‌ی عملکرد روش MSE-MGA و روش به‌کارگیری آن، یک مدل پل، شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفت. پل مورد نظر دارای طول ۶۴ متر و عرض ۷ متر است. ارتفاع پل در دو سر دهانه ۸ متر و در قسمت میانی (بلندترین قسمت پل) ۱۱٫۶ متر است. برای مدل‌سازی المان محدود سازه، از نرم‌افزار آباکوس^{۱۶} استفاده شده است (شکل ۲). خرپاهای پل با استفاده از مقطع Beam و عرشه‌ی آن توسط مقطع Shell مدل شده‌اند. مدل نهایی از ۱۴۶۴ گره و ۱۶۶۷ المان تشکیل شده است.

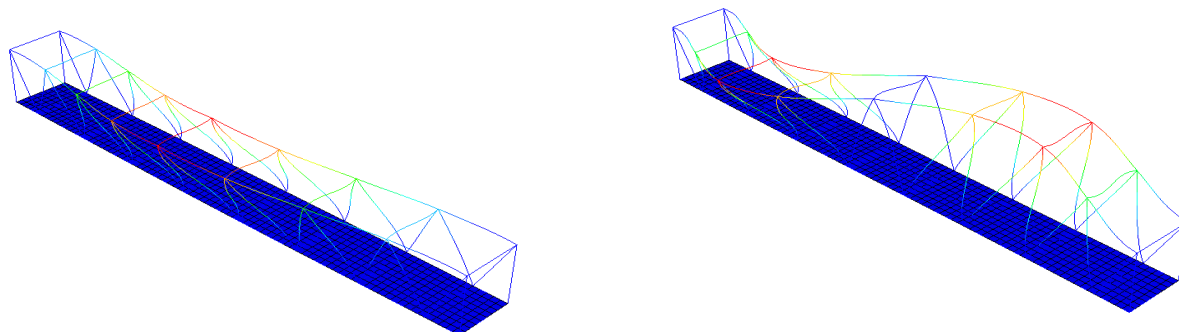


شکل ۲: سازه‌ی پل فلزی مدل شده در نرم‌افزار آباکوس.

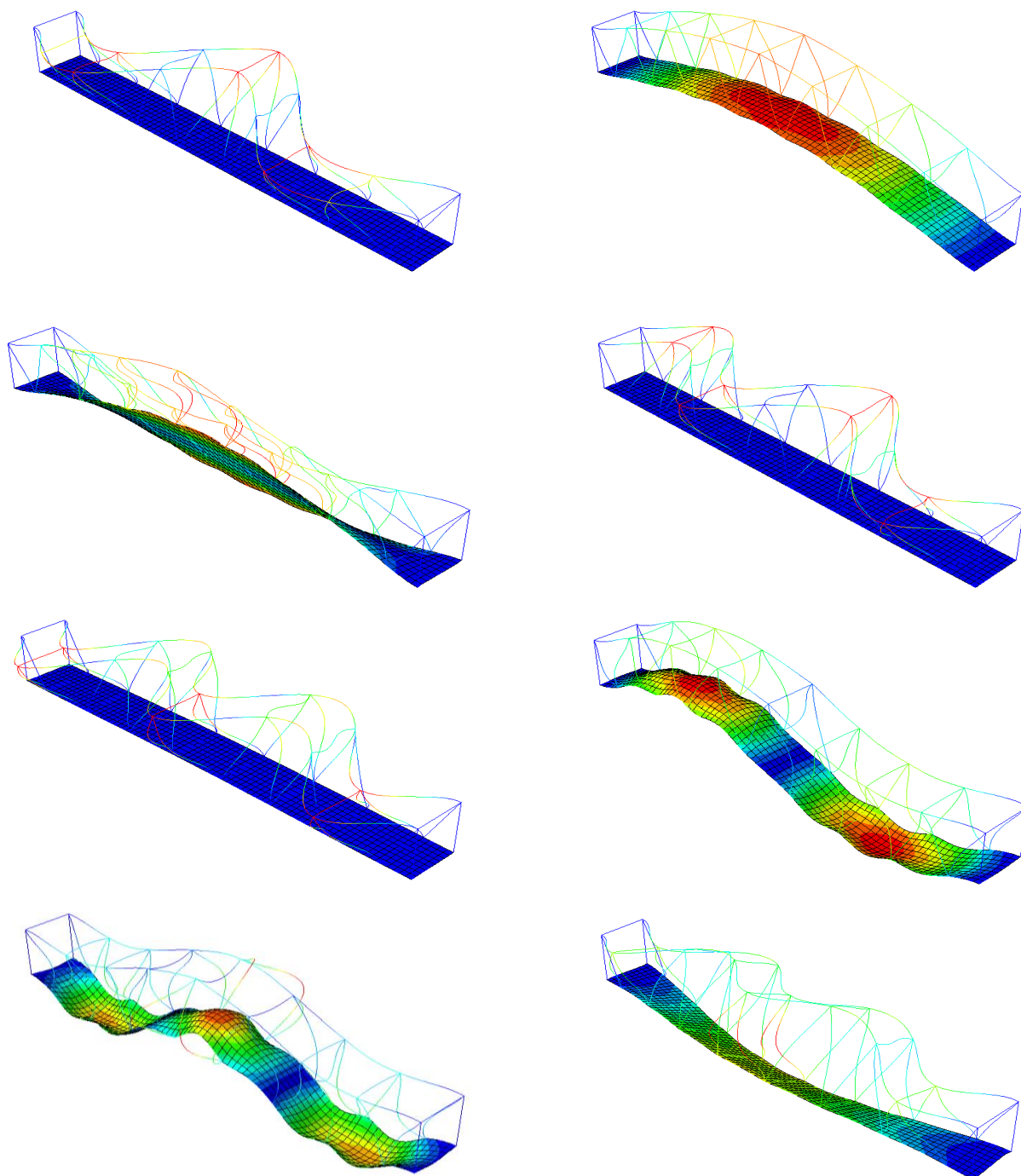
فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی سازه (به ترتیب شماره مود) که از آنالیز مودال به دست آمده است در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۱: فرکانس‌های طبیعی پل فلزی مدل شده.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Freq (cycles/time)	1.451	2.239	2.869	3.191	4.476	4.829	5.043	5.894	5.960	6.667



¹⁶ Abaqus/CAE 6.10-1



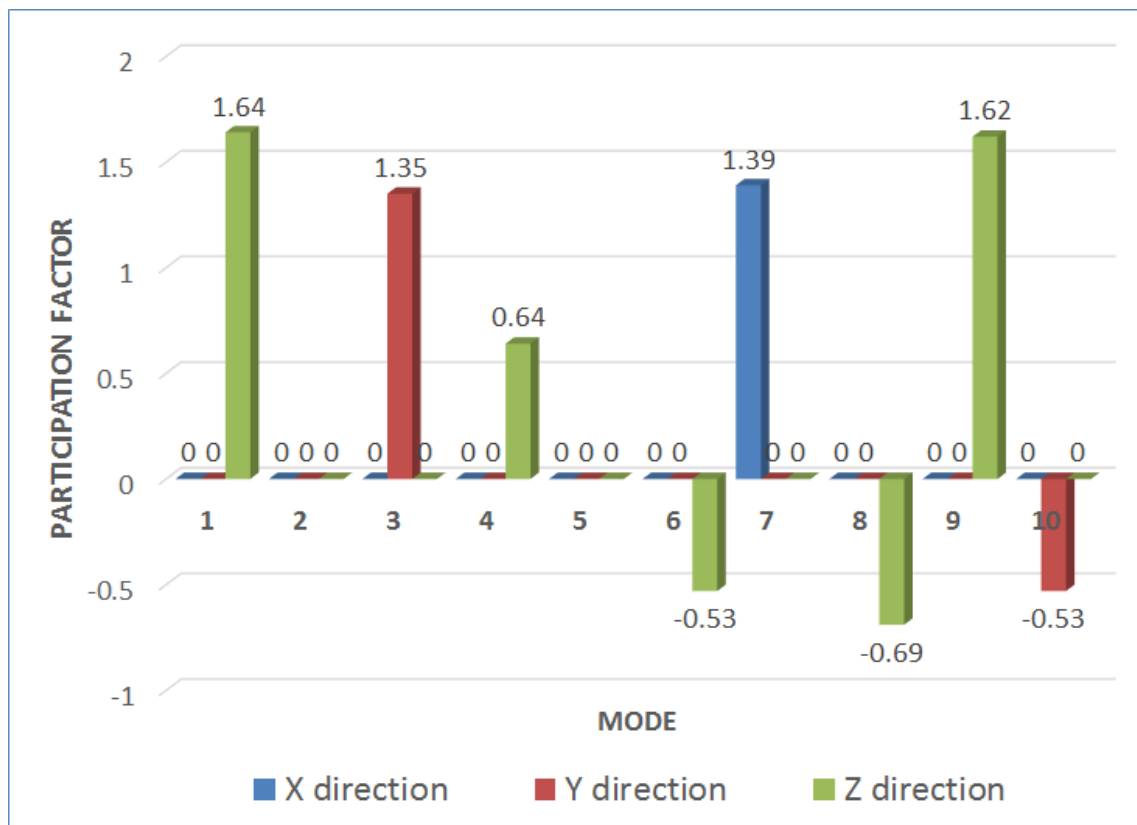
شکل ۳: شکل مودهای اول تا دهم پل فلزی مدل شده.

۴-۱- انتخاب مودها با استفاده از ضریب مشارکت مودی

ضرایب مشارکت مودی با استفاده از روابط ۵، ۶ و ۷ محاسبه گردید. خروجی ۱۰ مود اول پل در جهت x ، y و z در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مود هفتم در جهت x ، مودهای سوم و دهم در جهت y و مودهای اول، چهارم، ششم، هشتم و نهم در جهت z ، ضریب مشارکت مودی بزرگتری دارند. بنابراین مودهای اول، سوم، چهارم، ششم، هفتم، هشتم، نهم و دهم

به عنوان ترکیب مودی بهینه انتخاب می شوند. با استفاده از رابطه ۸ درصد مشارکت جرمی برای جهت X ، ۹۰ درصد، برای جهت Y ، ۹۳ درصد و برای جهت Z ، ۹۷ درصد محاسبه شده و با توجه به اینکه درصدهای مشارکت به دست آمده بیشتر از ۹۰٪ می باشند، بیانگر انتخاب مناسب تعداد مودها می باشد.



شکل ۴: ضرایب مشارکت مودی در جهت X و Y و Z .

۴-۲- تعیین نقاط با انرژی کرنشی مودال بالا برای چیدمان بهینه‌ی حسگرها

با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ انرژی کرنشی همه درجات آزادی محاسبه گردید. با حذف نقاط با انرژی کرنشی پایین، ۸۶۶ نقطه به عنوان محل احتمالی جاگذاری حسگرها انتخاب گردید که در مجموع ۲۵۹۸ درجه آزادی (در جهت‌های x ، y و z) را شامل گردیدند. هر یک از درجات آزادی از شماره ۱ تا ۲۵۹۸ کدگذاری شد. به این صورت که شماره‌های ۱ تا ۸۶۶ بیانگر تغییر مکان در جهت x گره‌ها، ۸۶۷ تا ۱۷۳۲ بیانگر تغییر مکان در جهت y گره‌ها و ۱۷۳۳ تا ۲۵۹۸ بیانگر تغییر مکان در جهت z گره‌ها می باشند.

با توجه به مشخص شدن نقاط کاندیدای جاگذاری حسگرها، از الگوریتم ژنتیک جهت تعیین محل نهایی حسگرها استفاده گردید. همان‌طور که در بخش ۳-۴ اشاره شد، می‌توان با تشکیل ماتریس MAC و محاسبه تابع تناسب برای هر یک از مجموعه نقاط انتخابی جهت چیدمان حسگرها، میزان برازش آن نقاط را تعیین کرد. در ادامه با بیان یک مثال عددی، نحوه‌ی محاسبه‌ی ماتریس MAC و تابع تناسب و نیز حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک شرح داده است.

۴-۳- مثال عددی نحوه‌ی محاسبه‌ی ماتریس MAC

فرض گردید نقاط ۲۷، ۹۸، ۲۸۰ و ۴۴۷ توسط الگوریتم به عنوان محل جاگذاری ۴ عدد حسگر انتخاب شدند. در جدول ۲ اطلاعات ماتریس شکل مودی این نقاط ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر جابجایی گره‌های انتخابی در هر یک از مدهای انتخاب شده.

Node number	Mode 1	Mode 3	Mode 4	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9	Mode 10
27	-1.79E-03	-5.66E-02	-1.28E-03	5.64E-02	-4.14E-02	-3.50E-03	3.63E-02	3.15E-02
98	2.25E-03	-7.04E-02	1.71E-03	-7.13E-02	-1.78E-02	3.93E-03	-4.25E-02	3.46E-03
280	6.06E-04	-5.85E-03	3.55E-04	-1.98E-02	3.76E-03	-4.42E-03	4.36E-02	1.92E-03
447	4.45E-05	-2.56E-02	-2.02E-04	1.14E-02	-7.03E-03	8.67E-03	-8.61E-02	-6.22E-02

روند محاسبه تابع تناسب برای این نقاط به صورت زیر بوده است:

۱-۳-۴- تشکیل ماتریس شکل مودی

به عنوان قدم اول، ماتریس شکل مودی با استفاده از اطلاعات جدول ۲ تشکیل گردید.

$$\begin{bmatrix} -1.79E-03 & -5.66E-02 & -1.28E-03 & 5.64E-02 & -4.14E-02 & -3.50E-03 & 3.63E-02 & 3.15E-02 \\ 2.25E-03 & -7.04E-02 & 1.71E-03 & -7.13E-02 & -1.78E-02 & 3.93E-03 & -4.25E-02 & 3.46E-03 \\ 6.06E-04 & -5.85E-03 & 3.55E-04 & -1.98E-02 & 3.76E-03 & -4.42E-03 & 4.36E-02 & 1.92E-03 \\ 4.45E-05 & -2.56E-02 & -2.02E-04 & 1.14E-02 & -7.03E-03 & 8.67E-03 & -8.61E-02 & -6.22E-02 \end{bmatrix}$$

در این ماتریس هر ستون نشان دهنده یک شکل مودی است.

۲-۳-۴- تشکیل ماتریس MAC

با توجه به اینکه ماتریس MAC همواره یک ماتریس مربعی متقارن با قطر اصلی برابر ۱ است، برای تشکیل ماتریس کافی است درایه‌های بالا یا پایین قطر اصلی محاسبه شود.

$$MAC_{ij} = \frac{(\varphi_i^T \varphi_j)^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \quad (12)$$

φ_i و φ_j ، ستون i ام و j ام از ماتریس شکل مودی است.

$$i = j; \quad MAC_{ii} = 1. \quad MAC_{12} = \frac{(\varphi_1^T \varphi_2)^2}{(\varphi_1^T \varphi_1)(\varphi_2^T \varphi_2)}$$

$$(\varphi_1^T \varphi_2) = \begin{bmatrix} -5.66E-02 \\ -7.04E-02 \\ -5.85E-03 \\ -2.56E-02 \end{bmatrix} = 6.1770E-5$$

$$(\varphi_1^T \varphi_1) = \begin{bmatrix} -1.79E-03 \\ 2.25E-03 \\ 6.06E-04 \\ 4.45E-05 \end{bmatrix} = 8.6358E-6$$

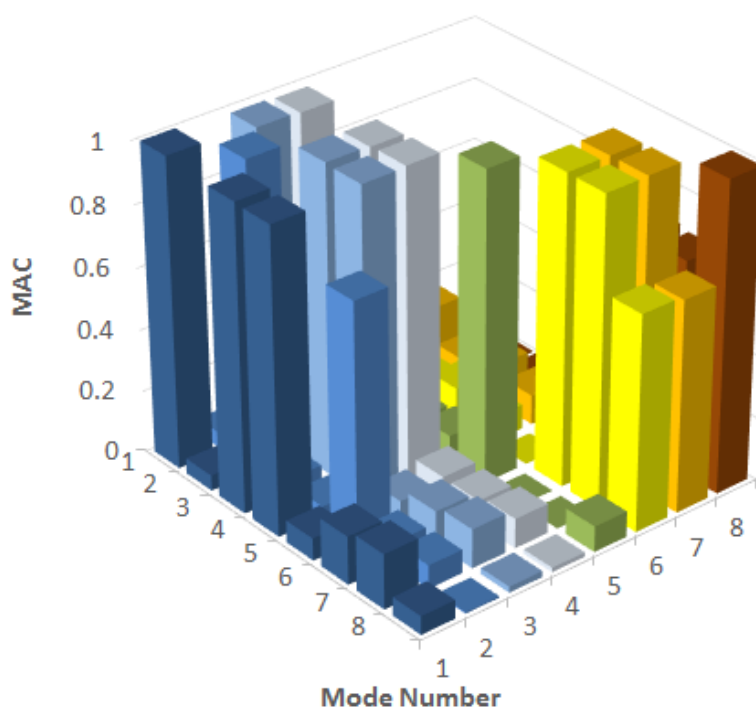
$$(\varphi_2^T \varphi_2) = \begin{bmatrix} -5.66E-02 & -7.04E-02 & -5.85E-03 & -2.56E-02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -5.66E-02 \\ -7.04E-02 \\ -5.85E-03 \\ -2.56E-02 \end{bmatrix} = 8.8493E-3$$

$$MAC_{12} = \frac{(6.1770E-5)^2}{(8.6358E-6)(8.8493E-3)} = 0.0499$$

به همین ترتیب مقدار سایر درایه‌های ماتریس MAC محاسبه گردیدند:

$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.0499 & 0.9857 & 0.9813 & 0.0717 & 0.1554 & 0.1773 & 0.0598 \\ 0.0499 & 1 & 0.048 & 0.0351 & 0.7605 & 0.0697 & 0.0757 & 0.0046 \\ 0.9857 & 0.048 & 1 & 0.996 & 0.0647 & 0.1073 & 0.1265 & 0.0194 \\ 0.9813 & 0.0351 & 0.996 & 1 & 0.0809 & 0.0789 & 0.0956 & 0.0143 \\ 0.0717 & 0.7605 & 0.0647 & 0.0809 & 1 & 0 & 0 & 0.0831 \\ 0.1554 & 0.0697 & 0.1073 & 0.0789 & 0 & 1 & 0.999 & 0.6957 \\ 0.1773 & 0.0757 & 0.1265 & 0.0956 & 0 & 0.999 & 1 & 0.6828 \\ 0.0598 & 0.0046 & 0.0194 & 0.0143 & 0.0831 & 0.6957 & 0.6828 & 1 \end{bmatrix}$$

همان‌طور که اشاره شد، اعضای غیرقطری در ماتریس MAC ارتباط بین دو بردار مودال را بیان می‌کند. هرچه MAC_{ij} کوچک باشد، دو بردار به تعامد نزدیک‌ترند و زمانی که $MAC_{ij}=0$ باشد، دو بردار کاملاً متعامد هستند.



شکل ۵: ماتریس MAC مثال حل شده.

۳-۳-۴- محاسبه‌ی مقدار تابع تناسب

مقدار تابع تناسب با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه گردید:

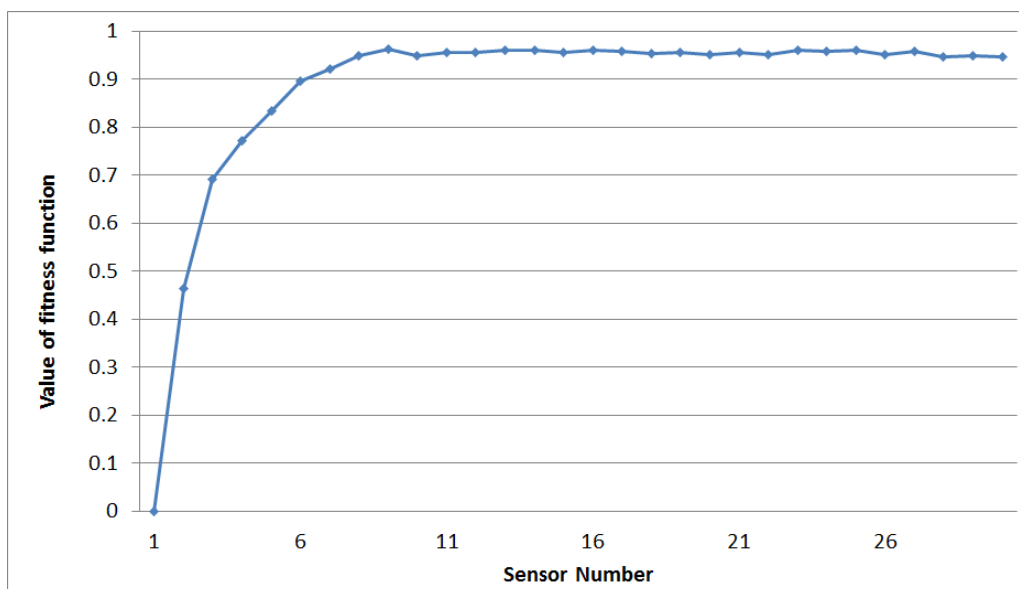
$$f = 1 - RMS.RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n MAC_{ij}^2}{n^2 - n}} \quad .i \neq j. n = \text{number of modes}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{11.1905}{64 - 8}} = 0.4470 ; f = 0.5530$$

به این ترتیب مقدار تابع تناسب برای محل‌های انتخابی حسگر، برابر ۰,۵۵۳۰ محاسبه شد. هر میزان مقدار تابع به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نقاط انتخابی از صلاحیت بیشتری برای انتخاب برخوردار هستند. با توجه به شکل ۵ و مقادیر بزرگ اعضای غیرقطری ماتریس MAC، مقدار کوچک تابع تناسب برای مثال بالا (که نشان‌دهنده عدم انتخاب مناسب نقاط کاندید حسگر است) دور از انتظار نبود.

۴-۴- تعداد و محل بهینه‌ی حسگرها

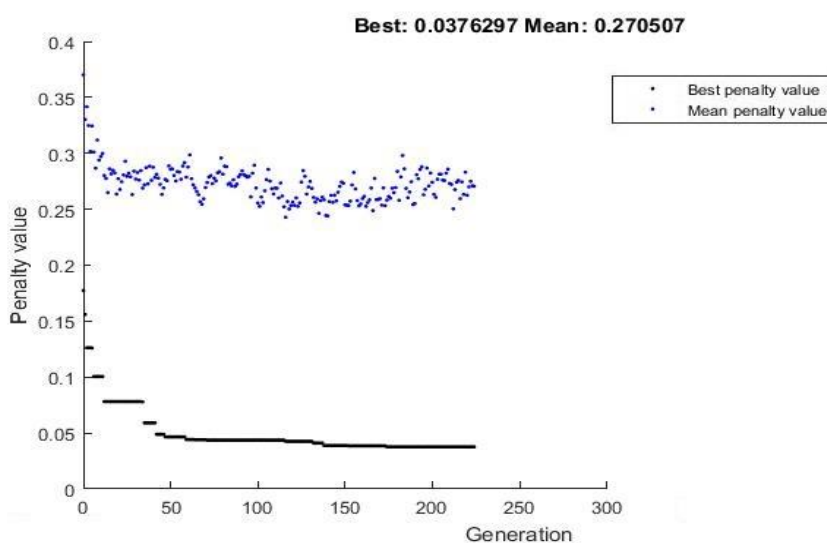
در شکل ۶ مقدار تابع تناسب به ازای تعداد حسگرهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶: مقدار تابع تناسب به ازای تعداد حسگرهای مختلف.

همان‌طور که در شکل مشخص است، هنگامی که تعداد حسگرها بین ۲ تا ۸ است، تابع تناسب با اضافه کردن حسگرها، افزایش یافته و بیشترین مقدار آن به ازای ۹ حسگر است. اما با اضافه کردن بیشتر حسگرها، مقدار تابع تناسب افزایش نمی‌یابد. دلیل این تناقض این است که بردار محل حسگر جدید اضافه شده، با مجموعه‌ی حسگرهای قبلی رابطه‌ی خطی قوی‌ای دارد. بنابراین ۹ عدد حسگر به‌عنوان تعداد حسگر بهینه از نظر کارایی و هزینه انتخاب گردید.

با انتخاب محل‌های دارای بیشترین مقدار انرژی کرنشی مودال به‌عنوان جمعیت اولیه‌ی الگوریتم ژنتیک و اجرای برنامه، محل نهایی حسگرها در سازه مشخص گردید و مقدار تابع تناسب برابر ۰,۹۶۲۴ به دست آمد. شکل ۷ تعداد نسل‌های ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و کمترین مقدار RMS در بازه‌ی نسل‌های مختلف را نشان می‌دهد.



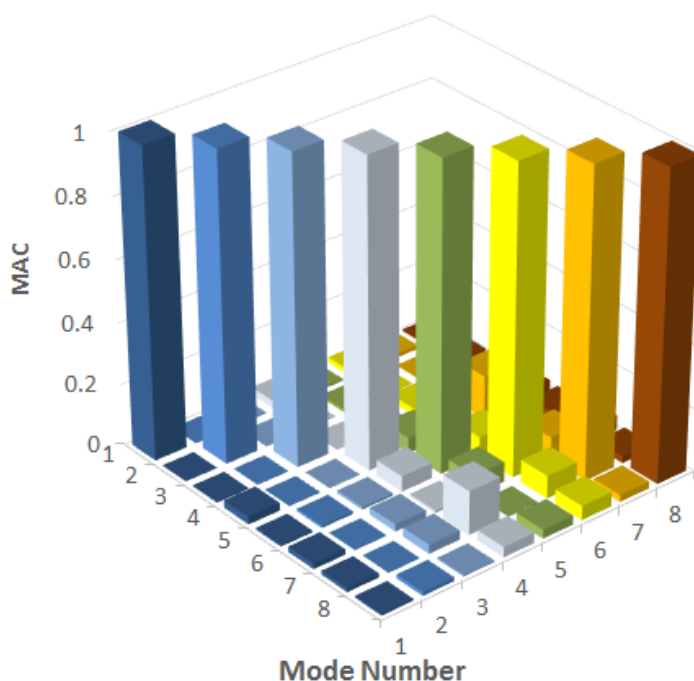
شکل ۷: تعداد نسل‌های ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و کمترین مقدار RMS در بازه‌ی نسل‌های مختلف.

خروجی الگوریتم ژنتیک برابر مجموعه اعدادی از شماره‌های اختصاصی هر گره است که در جدول ۲ ارائه شده است. با مشخص شدن این شماره‌ها، محل آن‌ها روی سازه تعیین می‌گردد. جدول ۳ شماره‌های هر گره جهت جاگذاری حسگرها را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مشخصات نقاط انتخاب شده.

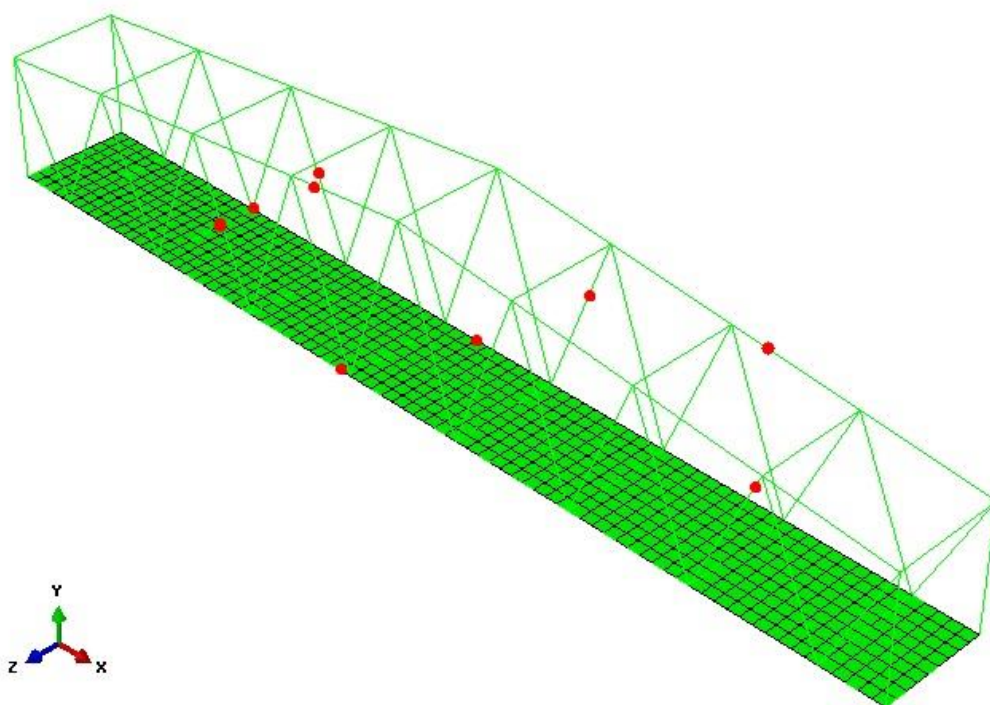
شماره حسگر	1	2	3	4	5	6	7	8	9
شماره کدگذاری شده در متلب	1974	996	1502	1886	1841	1731	415	1267	2190
شماره گره در مدل سازه	242	130	636	154	109	865	415	401	458
جهت	Z	Y	Y	Z	Z	Y	Z	Y	Z

همچنین ماتریس MAC مربوط به نقاط نهایی انتخاب شده در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: ماتریس MAC مربوط به نقاط نهایی انتخاب شده.

با مقایسه مقادیر ماتریس‌های MAC و توابع تناسب شکل‌های ۵ و ۸ تفاوت بین صلاحیت نقاط انتخابی کاملاً مشخص خواهد شد. محل نهایی قرارگیری حسگرها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: محل نهایی جاگذاری حسگرها.

۴-۵- مدت زمان محاسبات الگوریتم ژنتیک

محاسبات مربوط به الگوریتم ژنتیک توسط برنامه متلب نسخه R2015a در یک سیستم با مشخصات زیر اجرا شد:

CPU: Intel Core 2 Dou 2.20GHz

RAM: 4 GB

Operating system: Windows 7 Ultimate 64-bit

زمان موردنیاز برای یافتن مقدار تابع تناسب و محل حسگرها با در نظر گرفتن امکان جاگذاری تا ۳۰ عدد حسگر، تقریباً ۵۸۹

ثانیه شد که زمان بسیار مطلوبی به حساب می‌آید. لازم به ذکر است زمان محاسبات رابطه‌ی مستقیم با تعداد درجات آزادی و تعداد موده‌های انتخابی دارد.

۴-۶- نکاتی در مورد روش MSE-MGA

ذکر چند نکته در مورد روش MSE-MGA ضروری است:

- ۱- با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجو است و برای تکنیک‌های جستجو جواب یکتا وجود ندارد، خروجی الگوریتم ژنتیک (محل‌های انتخاب‌شده برای حسگرها) در هر بار پردازش، متفاوت خواهد بود.
- ۲- انعطاف‌پذیری بالای این روش از آنجا نشئت می‌گیرد که می‌توان گره‌هایی که مناسب جاگذاری حسگر نیستند، از همان ابتدا برای برنامه تعریف کرد و آن‌ها را حذف نمود. همچنین در صورتی که جاگذاری حسگر در گرهی ضروری باشد، خللی در روند کار ایجاد نمی‌کند و می‌توان آن گره را به برنامه معرفی کرد. به‌عنوان مثال در صورت نیاز می‌توان محدودیت جاگذاری حسگرها در المان‌های خاص سازه را اعمال کرد.
- ۳- سهولت اجرا و سرعت بالای آن سبب کاهش هزینه‌های پردازش گردید.

۵- نتیجه گیری

روش‌های معمول پایش سلامت سازه‌ها به استفاده از تنها یک شاخص بهینه‌سازی، انتخاب تجربی مودها و تعداد حسگرها و زمان طولانی محاسبات محدود شده‌اند. در این مقاله برای رفع این موانع، روش MSE-MGA که یک روش ترکیبی به شمار می‌رود، ارائه گردید. در این روش، ابتدا مودها با استفاده از ضریب مشارکت مودی انتخاب و سپس از انرژی کرنشی مودال جهت تعیین محل‌های کاندید حسگر و نیز محل اولیه حسگرها استفاده گردید و در نهایت تعداد و محل موردنظر برای حسگرها از طریق الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. نتایج به دست آمده را می‌توان به در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- نويز حاصل از عبور و مرور وسایل نقلیه در پل‌ها باعث ورود داده‌های اشتباه به حسگرها می‌گردد. استفاده از انرژی کرنشی مودال برای تعیین محل اولیه حسگرها این اطمینان را می‌دهد که نقاط نهایی انتخاب شده در سازه‌ی پل‌ها، از انرژی کرنشی بالایی برخوردار بوده و نويز کمتری دارند.
- ۲- انتخاب مودها بر اساس ضریب مشارکت مودی یک پیشرفت نسبت به روش‌های معمول به شمار می‌آید. ضریب مشارکت مودی دامنه پاسخ دینامیکی همه مودها را منعکس می‌کند. بنابراین برای انتخاب مودهای دارای خصوصیات دینامیکی بزرگ مؤثر است.
- ۳- تعداد بهینه‌ی حسگرها را می‌توان براساس مقایسه‌ی مقادیر تابع تناسب به ازای حسگرهای مختلف به دست آورد.
- ۴- افزایش تعداد حسگرها از یک مقدار بهینه‌ی مشخص، تاثیری در افزایش اطلاعات دریافتی از حسگرها ندارد. این مهم در جهت کاهش تعداد حسگرهای موردنیاز برای پایش سلامت سازه و در نتیجه کاهش هزینه‌های مرتبط، بسیار کارآمد و ضروری است.
- ۵- استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، از قرارگیری دو حسگر در یک مکان جلوگیری کرده و هم‌زمان با استفاده از عملگر جهش، از به تله افتادن الگوریتم در جواب محلی بهینه، جلوگیری می‌کند.
- ۶- به دلیل حذف گره‌هایی که انرژی کرنشی کمتری دارند، فضای جستجوی الگوریتم کوچک‌تر می‌شود که علت اصلی مدت‌زمان پایین محاسبات نیز به همین دلیل است.
- ۷- تعریف مکان‌های اجباری قرارگیری حسگرها و یا محل‌هایی که امکان جاگذاری حسگر در آن‌ها میسر نیست، از مزیت‌های این روش می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] National Road and Transportation Organization. (2017). Statistical Yearbook. Ministry of Roads and City Planning.
- [2] Talis'chi Azar, D. and Badri, H. (2012). Feasibility Study of Structural Health Monitoring of Tabriz Cable Bridge. In: 9th International Congress of Civil Engineering. Isfahan: Isfahan University of Technology.
- [3] Dervish, M. (2013). The optimal placement of sensors on structural models using an appropriate performance criteria. Masters Degree in Civil-Earthquake, University of Science and Culture.
- [4] Karami Mohammadi, R. and Kargar, H. (2013). Structural Health Monitoring and Detection of Steel Bridge Damage Based on Modal Information Using CSS Algorithm. In: Third International Conference on Acoustics and Vibrations. Tehran: Iranian Acoustic and Vibration Society.
- [5] Bakhshi, A. and Vazirizadeh, M. (2015). Structure Health Monitoring Using Neural Networks. In: International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. Tehran: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.

- [6] Jahan, S. & Hosseinzadeh Y. & Mojtahedi, A. (2017). Steel Bridges Structural Health Monitoring Based on Operational Modal Analysis Accommodating Evaluation of Uncertainty. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), 5-17.
- [7] Kammer, D. (1991). Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14(2), 251-259.
- [8] Carne, T. and Dohrmann, C. (1994). A modal test design strategy for model correlation. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. United States: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers.
- [9] Yi, T.H., Li, H.N. and Wang, G.-X. (2008) Optimal Sensor Placement for Super High-Rise Building Based on Simplified Finite Element Model. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 25, 417-423.
- [10] Allemang, R.J. (2003). The modal assurance criterion (MAC) : Twenty years of use and abuse. *Journal of Sound & vibration*, 37(8), 14-23.
- [11] Chen, J., & Garba, J. (1988). On-orbit damage assessment for large space structures. *AIAA journal*, 26(9), 1119-1126.
- [12] Wilson, E. (2002). *Three-dimensional static and dynamic analysis of structures*. 3rd edn. Computers and Structures Inc, Berkeley, United States.